

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Горан С. Илић
Структура композитних материјала
и примена у стоматологији
дипломски рад

Крагујевац, 2016.



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Дипломске академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Динамика

Број индекса: 199/87

Горан С. Илић

Структура композитних материјала и примена у стоматологији

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Драган Милосављевић, ред. проф.

2. _____

3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру дипломског рада кандидат треба да:

прикаже поделу композитних материјала, врсте, састав, област њихове
примене. У другом делу треба обрадити врсте и употребу композитних материјала
у стоматологији.

Оквирни садржај:

основни појмови

подела композита према врсти матрице и армирајућих влакана

примена композитних материјала у стоматологији.

Препоручена литература:

[1] Др Драган Милосављевић, Влакнима ојачани композити у аутомобилској индустрији, зборник радова

[2] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић, Наука о материјалима I (рукопис), ФИН Крагујевац

[3] Hull D. , Clyne T.W. , An introduction to composite materials second edition

Крагујевац, датум

Ментор:

Др Драган Милосављевић, ред. проф.

Садржај :

1. Увод.....	1
2. Основни појмови.....	3
3. Врсте композита.....	4
3.1 Композити са дискретним честицама уграђеним у матрицу.....	7
3.2 Влакнасти композитни материјали.....	8
3.2.1 Матрица.....	8
3.2.2 Армирајућа влакна.....	9
3.3 Слојевити композити-ламинати.....	12
4. Метални композитни материјали.....	15
4.1 Својства металних композитних материјала.....	17
4.2 Компатибилност компонената у композитном материјалу.....	18
4.3 Компатибилност компонената металних композита армираних влакнима.....	19
4.4 Врсте међуфазног дејства.....	20
4.5 Утицај границе раздвајања на чврстоћу и карактер разарања.....	21
4.6 Модели веза између компонената.....	22
5. Керамички композитни материјали.....	24
5.1 Природа керамичких материјала.....	27
5.2 Производња делова од керамичких композитних материјала.....	28
5.3 Керамички композитни материјали и њима слични.....	28
6. Композитни материјали на бази полимера.....	31
6.1 Термопластичне масе.....	32
6.2 Термореактивне палстичне масе.....	32
6.3 Армирајућа влакна композита на бази полимера.....	33
6.3.1 Неорганска армирајућа влакна.....	34
6.3.1.1 Стаклена влакна.....	34
6.3.1.2 Угљенична влакна.....	37
6.3.1.3 Влакна бора.....	39
6.3.1.4 Остала неорганска влакна.....	41
6.4.2 Органска армирајућа влакна.....	42
6.4.2.1 Арамидна влакна (кевлар).....	43
6.5 Препрег материјали.....	45
7. Примена композитних материјала у стоматологији.....	46
7.1 Састав композитних материјала на бази смола.....	46
7.1.1 Органски део.....	47
7.1.2 Неоргански пуниоци.....	47
7.1.3 Органско-неорганско везивно средство.....	48
7.1.4 Иницијатори полимеризације.....	48
7.1.5 Инхибитори полимеризације.....	49
7.1.6 Стабилизатори.....	49
7.2 Актуелни композитни материјали.....	49
7.2.1 Композити са микропуниоцима.....	50
7.2.2 Микрохибридни композити.....	50
7.2.3 Нанохибридни композити.....	50
7.2.4 Густо пуњени композити.....	50
7.2.5 Течни композити.....	51

7.3 Механичке карактеристике композита у стоматологији.....	51
7.4 Зубне надокнаде.....	52
8. Вlakнима ојачане протезе.....	54
8.1 Протезе направљене у лабораторији.....	54
8.2 Chairside протезе.....	56
9. Закључак.....	58
Литература.....	59

1. Увод

Шта је то композитни материјал? Нажалост не постоји опште прихваћена дефиниција композитног материјала. Композитни материјали настају спајањем два или више материјала са различитим физичко-хемијским својствима, ради добијања новог материјала, који као физичка целина има за нас повољније особине у односу на његове саставне делове.

Навешћемо неколико примера за ове материјале.

Најстарији налазимо код градње кућа која се доскора примењивала и код нас, а датира још из прадавних времена. Наиме зидови таквих кућа зидани су од непечене цигле у коју је убацивана плева. Наравно плева је убацивана у глину у житком стању. Сем плевe додавана је и слама. Зид куће направљен од тих цигала је облепљиван истом том смешом, што би одговарало малтерисању. Овако очврсла глина са додатком плевe и сламе представља једну композитну структуру која поседује битно боље карактеристике у односу на чисту глину.

На сличан начин је рађена таваница оваквих кућа. Она је прављена од плетеног прућа, које је такође облепљивано, са обе стране, већ наведеном смешом глине, плевe и сламе. Овако формирана таваница има добра изолациона својства, а уједно може и да поднесе већи терет захваљујући еластичности уплетеног прућа.

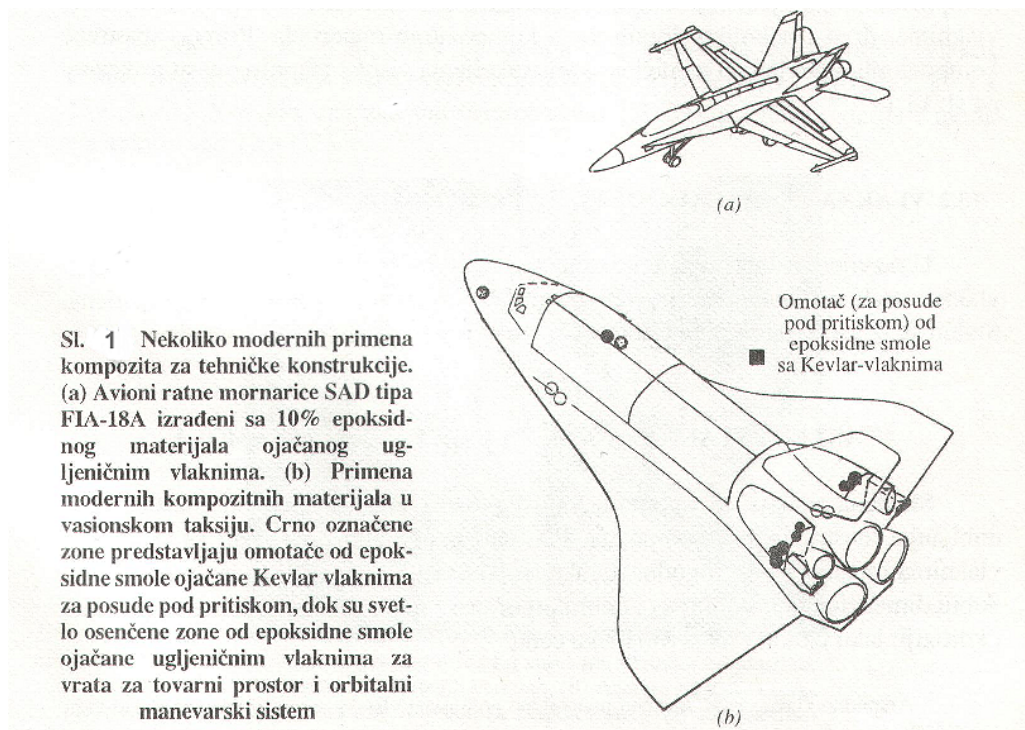
Као други пример узећемо такође материјал из области грађевинарства. То је бетон, који је смеша шљунка, цемента и песка. Заливањем челичне жичане структуре бетоном добијамо армирани бетон који поседује боља механичка својства од обичног бетона. Још боља својства има пренапрегнути бетон у коме је челична арматура затегнута тако да она прима оптерећења која доводе до истезања. Познато је да бетон не подноси истежућа напрезања, већ само на притисак.

Као трећи пример можемо узети обичан угљенични челик који садржи ферит и перлит, који се као посебно видљиви конституенти виде под оптичким микроскопом.

Чак и неки природни материјали се могу сматрати за композитне. Навешћемо два примера, први је дрво које се састоји од целулозних влакана у матрици (основи) од лигнина. Као други пример узећемо кост која се састоји од неорганских кристала у матрици од осеина (колаген костију).

Горе наведени примери појаснили су нам и приближили суштину композитних материјала. Почетак примене композитних материјала као конструкционих материјала, се везује за 40-те године двадесетог века. Због својих особина (мала маса, висока чврстоћа, отпорност на хабање, отпорност на корозију и сл.) најпре су нашли своју примену у авионској, а након тога у космонаутици. На рачун стечених знања, нашли су своју примену и другим областима (аутомобилска индустрија, бродоградња и сл.). На слици 1.1 дата су два примера примене композитних материјал у авионској и космичкој индустрији.

Упредо са развојем ових материјала развијала се и наука о њима. Такође, са њима се појављују и нови видови обраде. За њихово проучавање потребно је удружити знања људи из различитих области. Значи приступ њима захтева интердисциплинарност и мултидисциплинарност.



Sl. 1 Nekoliko modernih primena kompozita za tehničke konstrukcije. (a) Avioni ratne mornarice SAD tipa F1A-18A izrađeni sa 10% epoksidnog materijala ojačanog ugljeničnim vlaknima. (b) Primena modernih kompozitnih materijala u vasijskom taksiju. Crno označene zone predstavljaju omotače od epoksidne smole ojačane Kevlar vlaknima za posude pod pritiskom, dok su svetlo osenčene zone od epoksidne smole ojačane ugljeničnim vlaknima za vrata za tovarni prostor i orbitalni manevarski sistem

Слика 1.1 Пример употребе композита у космичкој и авио индустрији [2]

2. Основни појмови

У основне појмове сврстаћемо: појам композитног материјала, матрицу и армирајуће компоненте.

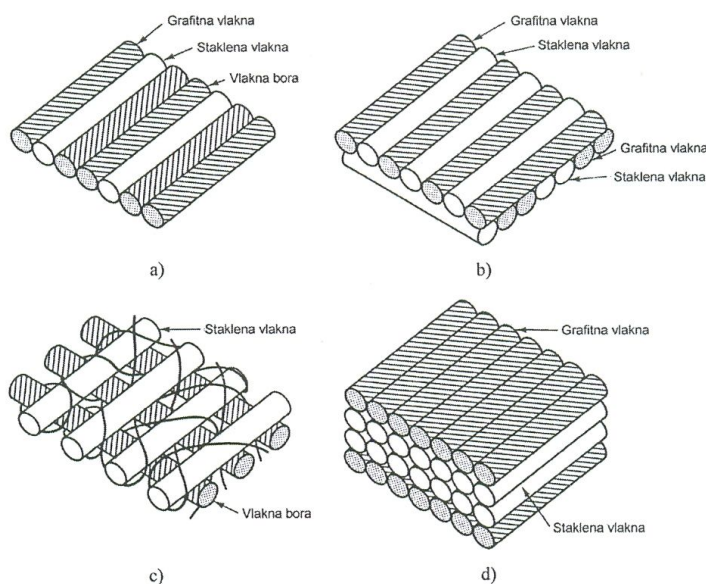
Композитни материјали су хетерогени системи добијени од две и више компоненти, при чему је сачувана особеност сваке појединачне компоненте. Овим материјалима називају се они материјали који поседују следећа обележија :

- не срећу се у природи, то јест као природни, јер су производ људског рада;
- састоје се од две или више компонената, које се разликују по свом хемијском саставу, међу њима постоји јасно изражена граница раздвајања;
- поседују нове особине , које се разликују од особина компонената од којих су састављени;
- нехомогени су у микроразмерама, а хомогени у макроразмерама унапред је испланиран састав, облик и распоред компонената;
- особине им зависе од особина компонената, које морају бити заступљене у довољним количинама (већим од неког критичног садржаја).

На основу изнетих чињеница може се дефинисати композитни материјал. Композитни материјали су вештачки створени материјали састављени од две или више хемијски разнородних и нерастворљивих фаза, које по својим физичко-хемијским карактеристикама представљају потпуно нове материјале, у чијем интегритету постоје јасно утврђене границе између саставних компонената.

Композитни материјали се састоје од матрице и армирајућих компонената. Матрица је у потпуности непрекидна по целој запремини композита. Може бити од метала, легура метала, органских и неорганских полимера, керамике и других материјала.

Армирајуће компоненте налазе се у матрици и уводе се у њу ради добијања одговарајућих особина композита. На слици 2.1 дата је структура и распоред влакана композита ојачаног влакнима (пример хибридног композита).



Слика 2.1 Структура и распоред влакана за ојачавање: а) једнослојно слагање, б) слагање у слојевима, ц) слагање преплитањем, д) селективни размештај[3]

3. Врсте композита

Ови материјали поседују веома сложену структуру, тако да је тешко повући јасну разлику међу њима. Подела се може извршити по више критеријума. Прво ћемо навести поделу преузету из рада[13], а то је: подела према материјалу матрице, подела према облику и величини армирајућих елеманата и подела композита према геометрији армирајућих елемената и њиховом међусобном распореду.

1. Подела композита према материјалу матрице



Слика 3.1 Подела композитних материјала у зависности од материјала матрице [2]

Општи назив композитног материјала потиче од материјала матрице. Полимерни композитни материјали имају матрице на бази полимера, а армирајуће компоненте могу бити на пример од стаклених влакана. То су такозване стаклопластике. Ако је арматура на бази угљеничних влакана а матрица на бази полимера, ради се о угљенопластици. Аналогно наведеном постоји боропластика, азбестопластика, металопластика и слично.

За композите на бази метала и керамика користи се двојно означавање : прво се пише материјал матрице, а затим материјал влакна. На пример ознака бакар-волфрам (CuW) односи се на композитни материјал са бакарном матрицом и армирајућим влакнима волфрама. Међутим, у литератури се може наћи да првареч означава материјал армирајућих влакана, а друга материјал матрице (основе). На пример боралуминијум.

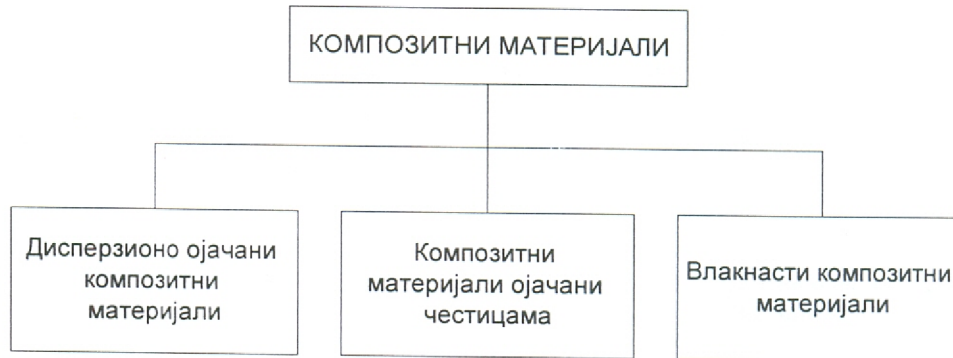
Композити са угљеничном основом називају се угљеничним композитним материјалима.

Композити сачињени од два или више матричних материјала, по природи различита, називају се полиматрични композитни материјали.

Аналогно постојању полиматричних композитних материјала, постоје и полиармирани композити. Они садрже у себи две или више армирајућих компонената (слика 2.1). Могу бити прости или комбиновани. Простиполиармирајући композити за арматуру имају елементе различите по природи али исте по геометрији. На пример стаклоугљенопластика има полимерну, пластичну матрицу армирану стакленим и угљеничним влакнима или укључцима. Комбиновани полиматрични материјали у себи имају арматуру различиту и по природи и по геометрији. На пример у полимерној матрици могу се наћи сферни укључци од стакла и укључци од кратких угљеничних влакана.

2. Подела композита према облику и величини армирајућих елемената

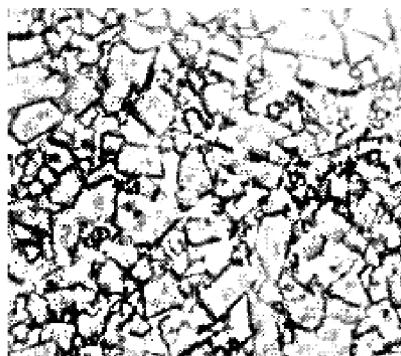
У зависности од облика и величине армирајућих елемената композитни материјали могу бити подељени у три основне групе. Оне су показане на слици 3.2.



Слика 3.2 Подела композита у зависности од величине армирајућих елемената [2]

Прву групу чине дисперзионо ојачани композитни материјали. Код њих су мале честице, димензија $(0.01-0.1) \times 10^{-3} \text{ mm}$, равномерно распоређене по матрици. Њихов запремински удео износи 0.1-15%. Код ових материјала матрица је носилац оптерећења. У њој се помоћу мноштва честица ствара структура која се ефикасно супротставља пластичним деформацијама, то јест таква структура отежава померање дислокација, па се на овај начин повећава чврстоћа материјала. Честице су, на пример, хемијска једињења типа карбида, нитрида, борида, оксида и слично. Одликује их висока чврстоћа и температура топљења. Матрица им може бити од чистог метала или легуре метала. Ови материјали су нашли примену у условима високих температура и оптерећења.

У другу групу спадају композитни материјали ојачани честицама, код којих је запремински удео тих честица већи од 20%. Осим тога величина честица и растојање међу њима је далеко веће него у првој групи. Те величине су обично веће од 0,001 mm. На слици 3.3 приказан је снимак микро структуре композитног материјала ојачаног честицама.



Слика 3.3 Микро структура волфрама карбида у матрици од кобалта. Бледа зона је кобалтна матрица тамна зрна честице волфрам карбида. Увећано 100x. [4]

Трећој групи припадају влакнасто ојачани композитни материјали. Код њих је матрица армирана влакнима високе чврстоће (органским или неорганским), металном жицом или

кончастим кристалима. Влакна могу бити дуга или кратка, непрекидна. Запремински удео влакана се креће од 10-80%.

Са порастом дужине влакана расте и ефикасност материјала.

Приликом оптерећења влакнастог композитног материјала на граници раздвајања влакна и матрице јављају се тангенцијални напони који доводе до потпуног оптерећења влакна, односно влакана. Влакна високе чврстоће обезбеђују композитном материјалу високу крутост и чврстоћу у правцу њихове оријентације. Деформобилна матрица, која испуњава простор између влакана, обезбеђује заједнички рад влакана на рачун сопствене крутости и узајамности дејства влакана и матрице на граници раздвајања.

Механичка својства влакнастих композитних материјала дефинишу се високом чврстоћом влакана, крутошћу матрице и чврстоћом везе на граници раздвајања матрице и влакана. Међусобни однос ових параметара одређује основне механичке карактеристике материјала и механику његовог разарања.

3. Подела композита према геометрији армирајућих елемената и њиховом међусобном распореду



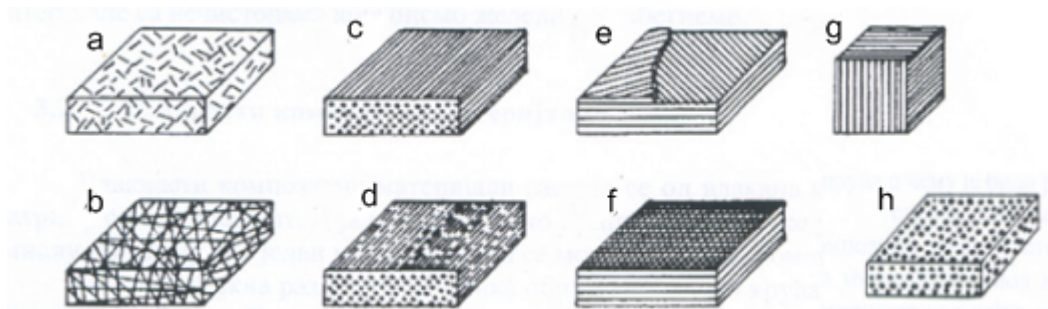
Слика 3.4. Подела композита у зависности од геометрије армирајућих елемената и њиховог међусобног распореда [2]

Постоји још једна подела композитних материјала, која је релативно грубља од претходне поделе. Према овој подели ови материјали се могу поделити на следећи начин :

1. Композитни материјали са дискретним честицама уграђеним у матрицу;
2. Влакнима ојачани композитни материјали, гдесу основни саставни материјали влакна и матрица;
3. Слојасте композитни материјали (ламинати) састављени од слојева више различитих материјала.

Свака од ових група има много подгрупа које се формирају у зависности од саставних материјала, начина израде, области примене и других особина. Рећићемо по нешто о свакој од ових горе наведених група.

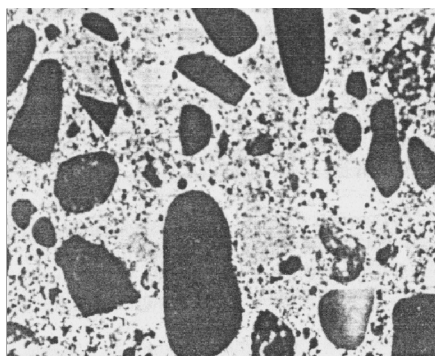
На слици 3.5 приказане су разне врсте композитних материјала.



Слика 3.5. Подела композита: а) хаотично армиран дискретним влакнима, б) хаотично армиран непрекидним влакнима, ц) једноосно армиран непрекидним влакнима, д) једноосно армиран дискретним влакнима, е) двоосно армиран непрекидним влакнима, ф) двоосно армиран тканином, г) просторно армиран, х) дисперзионо ојачан [2]

3.1 Композити са дискретним честицама уграђеним у матрицу

О овим материјалима је већ било речи у подели 2, само што је она тамо била суптилнија. Ови материјали имају најдужу примену из разлога зато што су једноставни за израду. Представљају најчешће случајан распоред честица неких материјала унутар основног материјала, матрице. Матрица и честице могу бити од метала, а и од неметала. Типичан пример неметалних честица у неметалној матрици је бетон. Код њега су честице песка и камена повезане цементом уз присуство воде. У случају да је бетон армиран, онда такав материјал се може класификовати као композит са дискретним честицама и влакнима ојачан. Истом аналогijом се може посматрати материјал од глине, плевe и пружа који је описан у уводу. На слици 3.1.1 види се структура бетона.



Слика 3.1.1 Честице песка и шљунка у матрици састављеној од цемента и воде [4]

Условно, сви материјали представљају у одређеном проценту ову врсту композита, јер све врсте нечистоћа у материјалу представљају честице у матрици. Али ми под композитним материјалом овог типа подразумевамо само оне композитне материјале код којих су честице уведене у циљу побољшања његових особина, а не материјале са нечистоћама које желимо да избегнемо.

3.2 Влакнасти композитни материјали

Влакнасти композитни материјали се састоје од влакана која су убачена у матрицу од слабијег материјала. Они су тако припремљени да се у макроскопском смислу понашају као један материјал који се може сматрати хомогеним.

Дугачка влакна различитог облика обично су много крућа и јача него исти материјал у блоку. Парадокс да влакно има различите особине од материјала у блоку условљена је савршенијом структуром влакна. Наиме, кристали су уређенији дуж осе влакна. Мање је унутрашњих дефеката у влакну него у блоку. На пример материјали који стварају дислокације то чине далеко мање у влакнастој структури него у структури блока.

3.2.1 Матрица

Ово што ћемо написати о матрици важи и за остале композитне материјале а не само за влакнасте.

Матрица у композиту има три основне функције:

1. Да држи влакна заједно,
2. Врши расподелу оптерећења међу влакнима,
3. Штити влакна од дејства околине.

Између осталог код композита високих својстава матрица мора да спречи контакт између самих влакана. Тиме се спречава оштећење влакана. Идеалан материјал за матрицу требало би да буде течност ниске вискозности, која би лако могла да се трансформише у трајно очврснуто стање, и тиме повеже армирајућа влакна.

Матрица омогућује монолитност композита, даје производу одговарајући облик и фиксира узајамни распоред влакана.

Захтеви који се постављају матрици могу бити технолошки и експлоатациони.

Технолошки захтеви се односе на процес добијања композитног материјала и производа од њега. Они треба да обезбеде припрему и израду полуфабриката од којих се касније израђују производи, затим да омогуће квалитетно спајање са влакнима као и ниске вредности параметара процеса обликовања (притисак, температура).

У експлоатационе захтеве спадају захтеви повезани са механичким и физичко-хемијским особинама материјала матрице. Они обезбеђују радну способност композитног материјала приликом дејства различитих експлоатационих услова. Матрица мора да обезбеди заједнички рад армирајућих влакана при различитим врстама оптерећења. Мора да прихвати и она напрезања која са не поклапају са правцем влакана, затим динамички променљива оптерећења, промену температуре и слично.

Материјал матрице може бити керамика, стакло, пластика, метал, легуре метала, графит.

За влакнасте композите доста се користе матрице са полимерном основом. То су, на пример, епоксидне смоле, полиестерске смоле, фенолне смоле. У табели 3.2.1 наведене су основне карактеристике смола (матрица) које се користе за композитне материјале.

Табела 3.2.1 Основне карактеристике смола (матрица) које се користе у изради композитних материјала [2]

Карактеристике	Епоксидне смоле			Полиестерске смоле	Фенолне смоле
	ПТ Полимеризација	Полимеризација загревањем	Савремене смоле		
Густина(kg/dm ³)	1.1-1.3	1.2-1.4	1.3	1.2	1.2-1.3
Затезна чврстоћа(MPa)	50-70	70-90	60	50-60	50-60
Модул еластичности (GPa)	2-3	2.5-3	3.5	2-3	5-11
Издужење до лома (%)	2-6	2-5	2	2-3	1.2
Чврстоћа на притисак (MPa)	80-100	120-130	300	120-140	70-200
Макс. радна температура(°C)	70-100	100-180	180	60-180	100-125

3.2.2 Армирајућа влакна

Влакна којима се армира матрица такође треба да задовоље технолошке и експлоатационе захтеве. Мора их одликовати мала густина, висока чврстоћа, висока крутост у читавом интервалу радних температура, висока хемијска постојаност, минимална растворљивост у матрици, технологичност, нетоксичност у изради и експлоатацији. Влакна могу бити карбонска, стаклена, борна, метална (металних легура), а такође од кончастих кристала низа карбида, оксида, нитрида, и других једињења.

1. Кончасти кристали имају пречник од дела микрона до неколико микрона и дужину од дела милиметра до неколико центиметара.
2. Металне жице високе чврстоће од челика, волфрама, молибдена и других метала имају већу густину и мању чврстоћу него кончасти кристали, чешће се користе, нарочито код металних композитних материјала, због технологичности, широке доступности и релативно ниске цене.
3. Неорганска влакна производе се у великим количинама, као и метална жице. Главни недостатак им је висока осетљивост према механичким оштећењима. Због мале густине, високе чврстоће и хемијске постојаности, угљенична, стаклена, кварцна, борна, силицијумкарбидна влакна доста се користе као армирајућа код полимерних и металних композитних материјала.
4. Органска влакна се користе за армирање полимерних матрица.

Влакна као армирајућа компонента могу се употребити као појединачна, као струкови влакана, плетеница, мрежа, тканина. Улога ових влакана је да повећа јачину и

крутост матрице од епоксидне или полиестер смоле. Оцена квалитета коришћених влакана доноси се на основу односа модула еластичности и густине (E/ρ) и односа јачине на кидање и густине (R_m/ρ).

У табели 3.2.2.1 дате су механичке карактеристике неких влакана и неких материјала ради поређења.

Табела 3.2.2.1 Упоредне механичке карактеристике неких структурних материјала и влакана која се користе за армирање[2]

Материјал	Густина (kg/dm ³)	Затезна чврстоћа (MPa)	Модул еластичности (MPa)	Специфична чврстоћа (MPa)	Специфични модул* (MPa)
Легура алуминијума Л65	2.8	460	72000	170	26000
Легура титанијума ДТД 5173	4.5	930	110000	210	24000
Челик С97 (Ћ4130)	7.8	990	207000	130	27000
Е-стаклена влакна	2.54	2600	84000	980	33000
С-стаклена влакна	2.49	4600	72000	1850	29000
Угљенична (графит) влакна, тип И	2.0	1190	400000	950	200000
Угљенична (графит) влакна, тип ИИ	1.7	2600	200000	1520	118000
Влакна бора	2.5	3500	420000	1400	168000
Арамидна влакна	1.44	2800	130000	1940	90000

*Затезна чврстоћа и модул еластичности сведени на специфичну густину материјала (R_m/ρ и E/ρ)

У табели 3.2.2.2 дате су физичко-механичке карактеристике неких влакана која се користе у добијању композита.

Табела 3.2.2.2 Карактеристике влакана од којих се израђују композити [1]

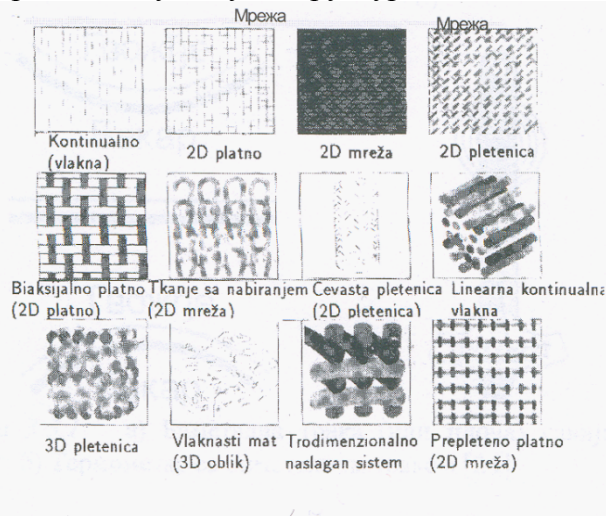
Врста влакана	Густина (kg/m ³)	Пречник (10 ⁻³ mm)	Затезна чврстоћа R_m (MPa)	Процентуал но издужење (%)	Модул еластичност и (GPa)	Температура омекшавања Т (°C)
Стаклено	2500-2600	5-10	1500-4700	3-4	70-84	815
Борно	1900-2600	90-130	2500-3800	1	386-430	2000
Карбонско	1300-2000	5-50	500-3000	1-1.4	225-455	3600
Кварцно	2200-2540	5-80	1500-6500	0.5-4	70-110	1650-1700
Памучно	1540	20-25	300-600	7-10	10-12	
Ланено	1480-1520	70-85	440-700	4.5-6	20-30	

На слици 3.2.1 приказан је снимак структуре влакнастог композита, наравно увеличане под микроскопом.



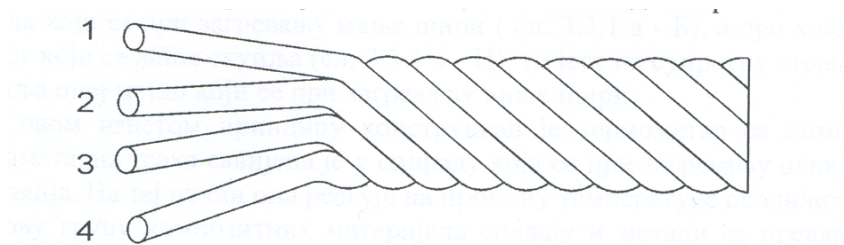
Слика 3.2.1 Микроструктурни снимак влакнастог композита: а) влакно, б) матрица [2]

На слици 3.2.2 приказане су могуће структуре ткања влакана.



Слика 3.2.2 Неки од могућих облика ткања текстилних структура [2]

На слици 3.2.3 нацртана је плетеница, исплетена од четири типа влакана.

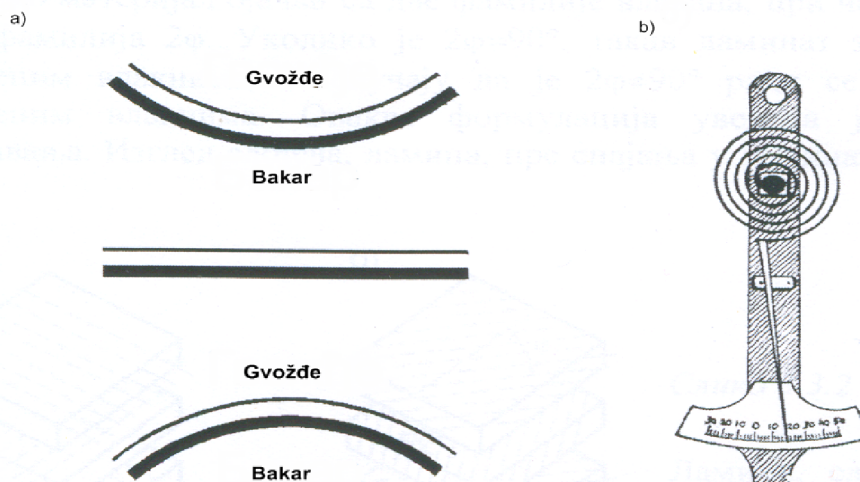


Слика 3.2.3 Слагање и учвршћивање нити : 1- нит од високо модуларног графита на бази вискозног влакна, 2- нит од ниско модуларног графита на бази вискозног влакна, 3- нит од високо модуларног графита на бази полиакрилонитрила, 4- нит од нитрида бора. [2]

Материјали високе чврстоће и модула еластичности израђују се у облику влакана јер су у том облику мање осетљиви према дефектима од монолитних.

3.3 Слојевити композити – ламинати

Ако имамо два материјала у облику листа или плоче, па их спојимо тако да добијемо једну целину у којој разликујемо слијеве, кажемо да се ради о ламинату (слојевитом композиту). Најједноставнији ламинат је састављен из два слоја. У литератури се може наћи да се слој назива ламином. Сликровити пример за ламинат је биметална трака. Принцип њеног понашања је приказан на слици 3.3.1



Слика 3.3.1 а) Биметална трака (или плоча) савија се при промени температуре; б) Термометар са биметалном траком [2]

Ако две уске дугачке металне траке (или плоче) спојимо по целој дужини (слика 3.3.1 а), онда се таква двослојна плоча при загревању савија на страну оног метала који се при загревању мање шири, а при хлађењу на страну оног који се више скупља, то јест на супротну страну јер се више скупља онај метал који се при загревању више шири. На овом принципу је конструисан термометар са биметалном траком. Биметална трака савијена у спиралу се при загревању одвија а при хлађењу завија. На тај начин реагује на принципу промене температуре у околини.

У ову групу композита спадају и метали са превлаком од другог метала. Као пример узећемо легуру алуминијума са високим модулом крутости, која је неотпорна на корозију. Њеним превлачењем са легуром алуминијума мањег модула крутости али високом отпорношћу на корозју, добијамо композитни материјал слојевите структуре.

У електроници се доста користи слојаста комбинација алуминијума и бакра. Предност алуминијума је у томе што је лаган и јефтин, а бакра јер има малу електроотпорност и погодан је за лако спајање.

Слојевито сигурносно стакло као и пластифицирани материјали су такође пример за ламинат.

Акценат ћемо ставити на слојевите композите у чијим се ламинама (слојевима) налазе влакна. Ако су сва влакна у слоју истог правца, ради се о унидирекционом слоју. Ако лепљењем спојимо више оваквих слојева, тако да су влакна у слојевима паралелна, онда добијамо ламинат са једном фамилијом влакана. Сва су истог правца, исте геометрије.

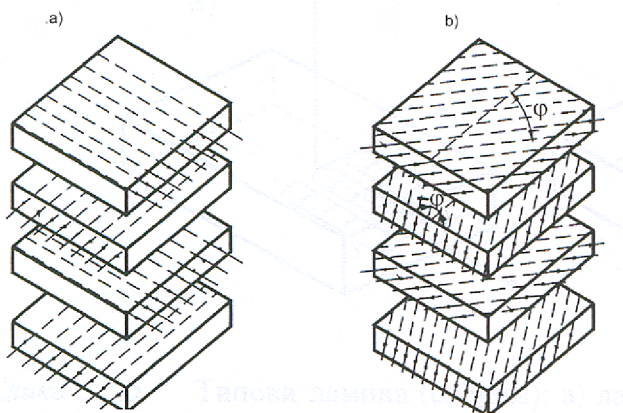
У случају да се правац влакана разликује од слоја до слоја, кажемо да се ради о ламинату са две фамилије влакана.

Размотримо један прост пример. Залепимо ли слојеве тако што ће влакна у њима, у односу на неки унапред задати правац, бити под углом $+\varphi$ и $-\varphi$ добићемо материјал ојачан са две фамилије влакана, при чему је угао између тих двеју фамилија 2φ . У случају да је $2\varphi = 90^\circ$, такав ламинат зваћемо ламинатом са укрштеним влакнима. У случају да је $2\varphi \neq 90^\circ$ ради се о ламинату са косо укрштеним влакнима. Оваква формулација је уведена ради једноставног изражавања. Изглед слојева, ламина, пре спајања у ламинат приказан је на слици 3.3.2.

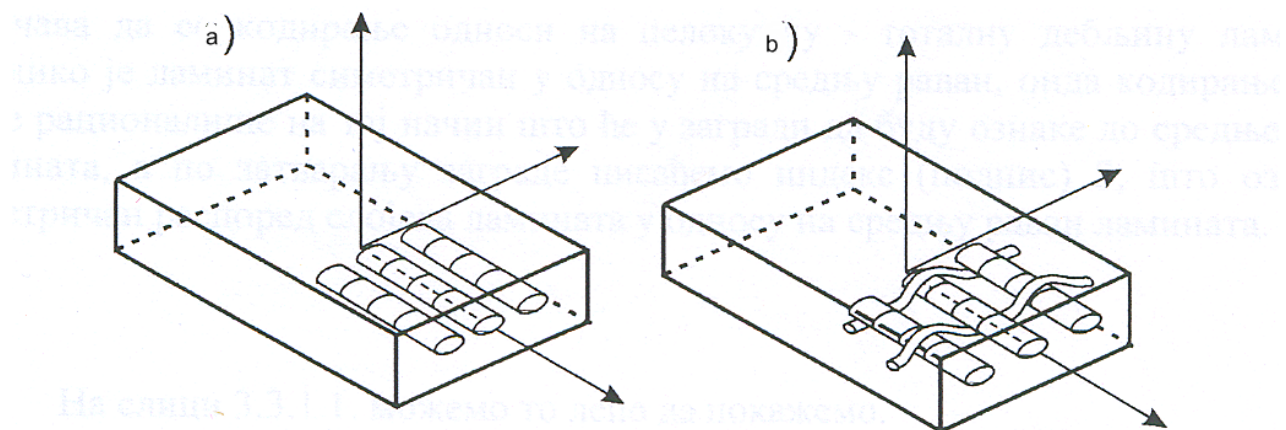
И у самом слоју (ламини) влакна могу бити не само унидирекциона већ и укрштена, коса или пак испреплетана. На слици 3.3.3 приказане су две ламине. Једна са једносмерним (унидирекционим) влакнима, а друга је са испреплетанима влакнима.

На слици 3.3.4 приказан је могући облик у ламини, ткање.

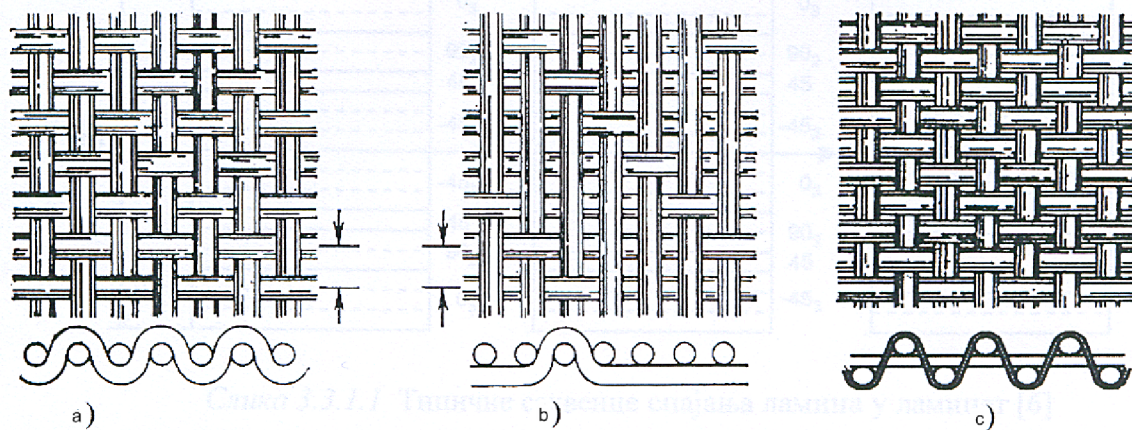
Основна сврха формирања слојевитих композитних материјала-ламината је да се крутост прилагоди захтевима конструкције. Већ је наведено да се ламинати могу конструисати са веома различитом орјентацијом влакана у слојевима, зависно од потребе. Такође и дебљина тих слојева може бити различита.



Слика 3.3.2 Ламине, слојеви, пре спајања у ламинат: а) са укрштеним влакнима, б) са косо укрштеним влакнима. Све ламине су са унидирекционом влакнима [2]



Слика 3.3.3 Типови ламина (слојева): а) ламина са унидирекционим влакнима, б) ламина са испреплетаним влакнима [2]



Слика 3.3.4 Тканина са ткањем у два правца: а) потпуно преплетена, б) свака пета нит уплетена, ц) једнослојна троосна тканина [2]

4.Метални композитни материјали

Према материјалу матрице метални композитни материјали могу се поделити као на слици 4.1.



Al - Алуминијум, Mg - Магнезијум, Ti - Титан, Cu - Бакар, Ni - Никл, Co - Кобалт

Слика 4.1 Подела металних композитних материјала у зависности од материјала матрице [2]

Осим горе наведене поделе постоје и композитни материјали на бази олова (Pb), волфрама (W), цинка (Zn) итд.

За дисперзионо ојачане композитне материјале као основа користе се берилијум (Be) и хром (Cr).

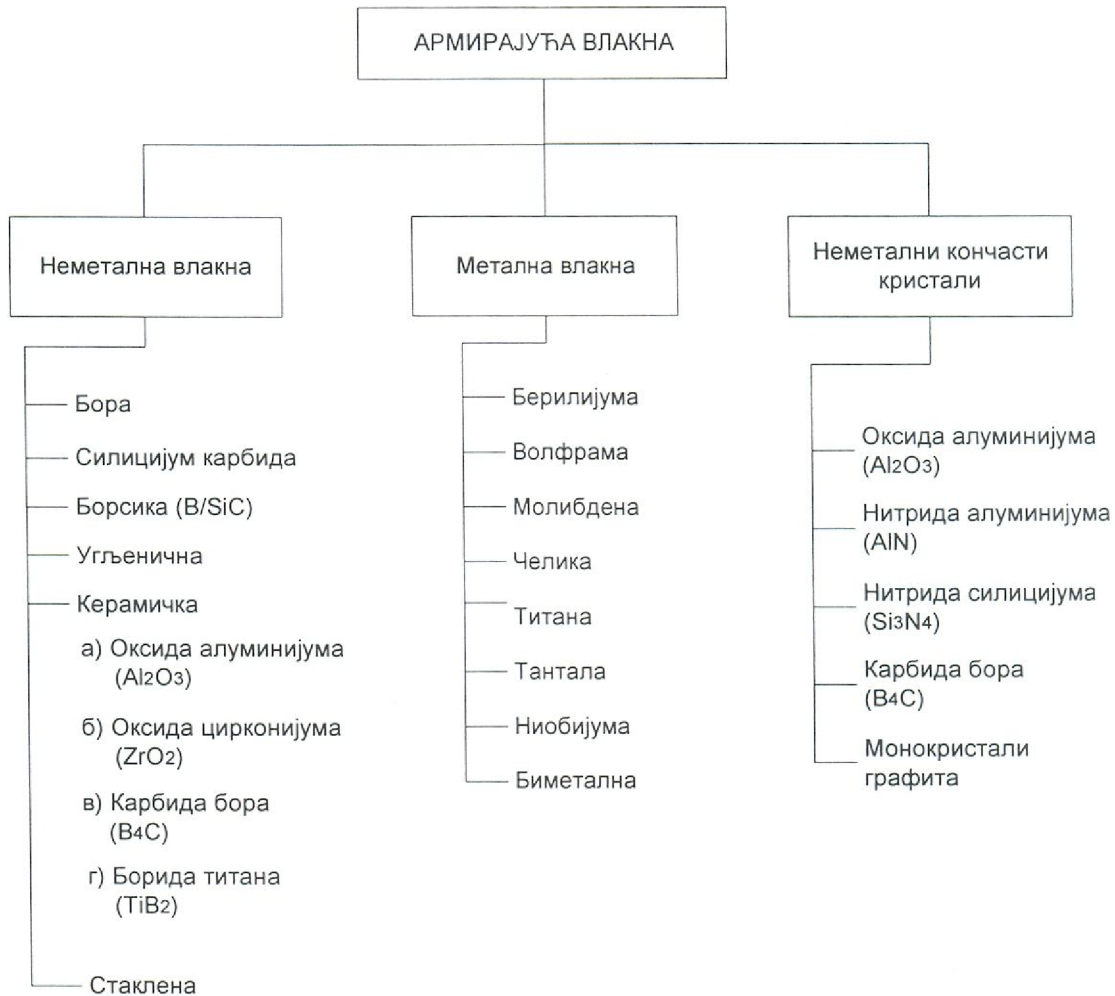
Матрице од наведених метала и њихових легура може се армирати неметалним влакнима, металним влакнима и неметалним кончастим кристалима. Детаљан преглед ове поделе је дат на слици 4.2.

У оквиру прве групе са слике 4.2 интересантна су крта керамичка влакна. Она се израђују од тешко топивих материјала високе чврстоће, који су хемијски и ерозионо постојани. То су неке врсте карбида, оксида и борида. По структури ова влакна могу бити монокристална и поликристална. Монокристална влакна се највише користе за армирање ватроотпорних металних композитних материјала. У њих спадају монокристална влакна сафира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) и влакна рубина ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{xCr}_2\text{O}$).

Захтеви који се постављају армирајућим компонентама металних композитних материјала:

1. Висока чврстоћа влакана, ради обезбеђења чврстоће самог композитног материјала,
2. Висок модул еластичности. Ово је важно да би влакна примила оптерећење без интензивног пластичног течења матрице,
3. Добра хемијска постојаност. Ова особина у многоме зависи од врсте легуре-матрице. Непожељна је међусобна хемијска активност матрице и влакана.Семтога, важна је и стабилностна ваздуху,према атмосферским утицајима,
4. Димензије и облик влакана. Уколико се метални композитни материјал израђује у чврстом стању, предност се даје влакнима кружног попречног

- пресека и то већег пречника. Њих је једноставније уводити у матрицу пластичним деформисањем,
- Отпорност према оштећењима и хабању. Нека влакна су јако осетљива на дејство влаге (Е – стакло) или хабање (Al_2O_3 или SiC),
 - Лакоћа израде и ниска цена.



Слика 4.2 Преглед армирајућих влакана која се користе код металних композитних материјала [2]

Осетљивост влакана представља сметњу при стандардним операцијама добијања металних композитних материјала.

Жице високе чврстоће (челичне, молбденске и волфрамове) често се користе за армирање металних матрица. Метална влакна су отпорна и на пузање при повишеним температурама. Основни недостатак је низак однос модула еластичности према густини, који је својствен другим влакнима. Изузетак су влакна берилијума. Берилијум је метал

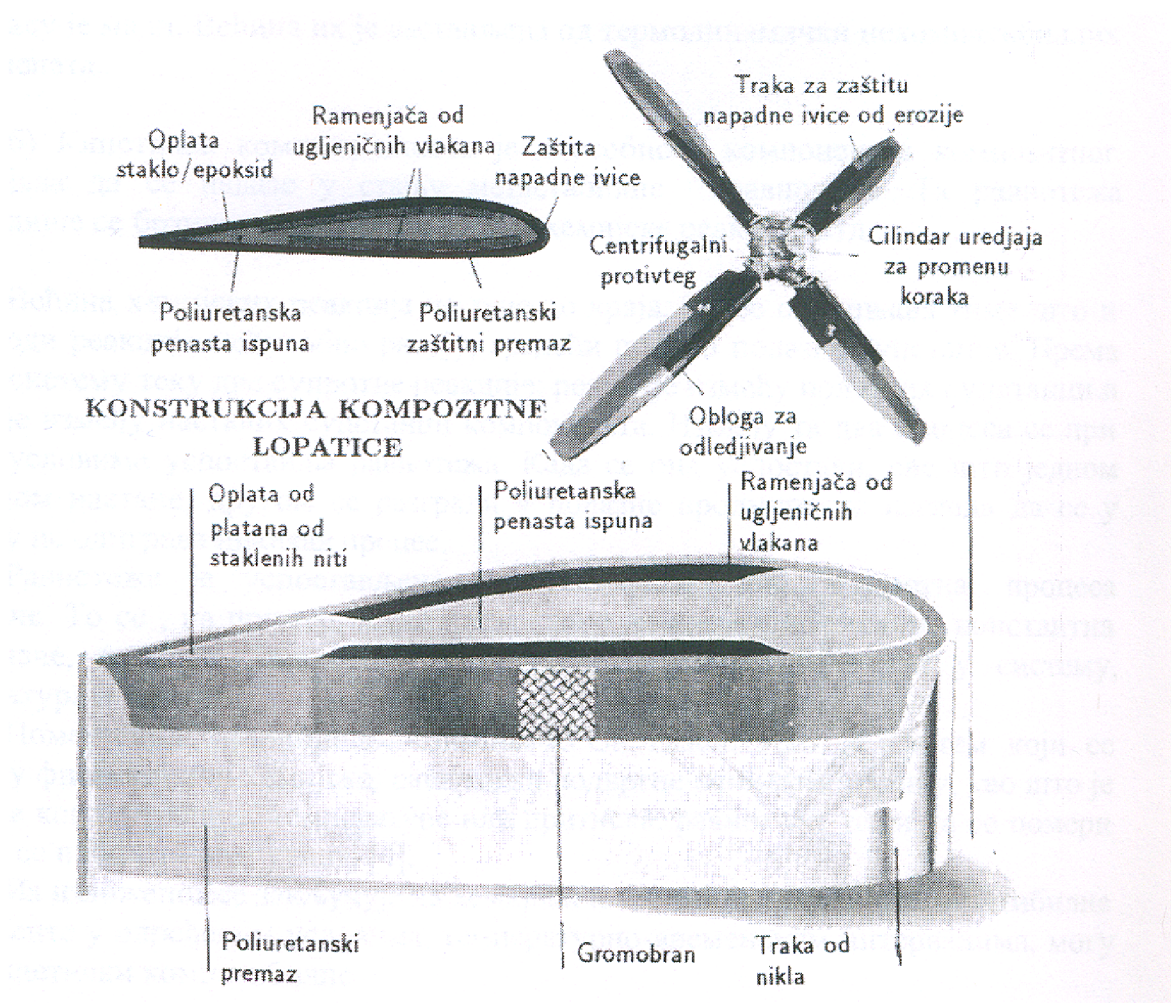
сребрнасто беле боје, густине 1.84 kg/dm^3 . Четири пута је еластичнији од алуминијума. Међутим, жица од берилијума је веома скупа.

Борна влакна поседују најбољу комбинацију својстава која су потребна за армирање магнезијумских и алуминијумских легура јер су хемијски компатибилна са алуминијумом у чврстом стању и магнезијумом у течном стању.

4.1 Својства металних композитних материјала

Метални композитни материјали имају следећа својства: високу чврстоћу, висок модул еластичности, високу жилавост, високу динамичку чврстоћу, малу осетљивост на термичке промене, високу отпорност на хабање, малу осетљивост према површинским дефектима, високу електро и топлотну проводљивост и добру технологичност.

1. Легуре које се користе као матрице ових материјала имају већу чврстоћу од керамике и полимерних материјал.
2. Металне матрице имају већи модул еластичности од полимерних матрица. Код полимерних композита специфични модул еластичности у правцу нормалном на правац влакна већи је код металних композитних материјала. Такође им је већи и модул смицања.
3. Металне матрице су пластичне и жилаве. Оне су способне да апсорбују енергију ударних оптерећења својим пластичним деформисањем.
4. Ове матрице нису осетљиве на дејство температурних промена.
5. Легуре које се користе за металне матрице мање су осетљиве према површинским дефектима од полимерних и керамичких материјала. Отпорност на хабање такође им је већа. Мале прслине су места јаке концентрације напона и за керамику могу бити катастрофалне, док их метални композити боље подносе.
6. Композити на бази полимера су осетљиви на дејство влаге и склони су порозности. Склони су оксидацији при умереним температурама више него металне легуре. Полимери су такође мање или више осетљиви на ултраљубичасто зрачење.
7. Легуре које се користе у изради металних матрица имају добру технологичност и велику трајност.
8. Метални композитни материјали имају доста добру динамичку чврстоћу. Метална матрица ојачана кртим влакнима високе чврстоће даје композитни материјал постојан према дејству једноосног периодично променљивог оптерећења, тако да не долази ојачања материјала, а ни до пада чврстоће. Динамичка чврстоћа зависи од карактеристика компонената и границе раздвајања између њих. Површински дефекти немају велики утицај на динамичку чврстоћу.
9. Површине разарања металног композитног материјала услед замора имају неједначен карактер: постоји доста места на којима се могу јавити прскотине.
10. Висока електро-топлотна проводљивост спречава концентрацију топлоте на једном месту. Што се не може рећи за композите на бази полимера који су доста осетљиви на велика топлотна и електрична пражњења. Због тога се у виталне делове ваздухоплова израђене од полимера убацују метални громобрани. На слици 4.1.1 приказана је једна таква композитна структура.



Слика 4.1.1 Основни елементи структуре и изглед савремене структуре композитне елисе британског произвођача Dowty Rotol [2]

Одмах да кажемо да су се металне елисе данас задржале за тежи турбоелисни транспорт.

4.2 Компатибилност компонената у композитном материјалу

а) Хемијска компатибилност

Компоненте композитног материјала не би требало да се растварају једна у другој, или да дифундују. До међусобног хемијског дејства може доћи још при изради композита, а такође и при његовој експлоатацији, нарочито под дејством високе температуре. Хемијска компатибилност укључује термодинамичку и кинетичку компатибилност.

- а. Термодинамичка компатибилност је способност матрице и армирајућих елемената да се неограничено време налазе у стању термодинамичке

равнотеже, при температурама добијања и при температурама експлоатације композитног материјала. Број композита који ово задовољава у ширем термодинамичком опсегу је мали. Углавном су састављени од термодинамички некомпатибилних компонената.

- b. Кинетичка компатибилност је способност компонената композитног материјала да се налазе у стању метастабилне равнотеже. Та равнотежа контролише се брзином дифузије, брзином хемијске реакције итд.

Већина хемијских реакција не тече до краја. То се објашњава чињеницом да и производи реакције међусобно реагују, градећи поново полазне супстанце. Према томе у систему теку две супротне реакције: реакција између полазних супстанци и реакција између насталих супстанци компонената. Између та два процеса се у неким условима успоставља равнотежа. Када се она успостави, све што једном реакцијом настане, другом се разгради у полазне продукте, па изгледа да се у систему не одвија никакав процес.

Равнотежа је успостављена када се брзине оба супротна процеса изједначе. То се може десити у случају да је температура константна. Иначе, на такву равнотежу утиче концентрација супстанци у систему, температура, притисак.

Из горе наведеног се да закључити да хемијски и термодинамички некомпатибилне компоненте у одређеним условима, температурно-временским интервалима, могу бити кинетички компатибилне.

b) Механичка компатибилност

Механичка компатибилност подразумева сагласност константи еластичности компонената композита, сагласност коефицијената линеарног ширења и показатеља пластичности. Ова компатибилност омогућава остварење чврсте везе између матрице и арматуре, неопходне за ефективну предају напрезања преко границе раздвајања.

4.3 Компатибилност компонената металних композита армираних влакнима

Армирајуће високо модуларне компоненте и матрица бирају се тако да хемијско и механичко дејство међу њима буде незнатно, а да се производ што лакше изради.

Температура израде је обично већа него код полимерних композитних материјала, а модул еластичности матрице виши те су проблеми механичке и хемијске компатибилности знатно израженији.

Код влакнастих металних композита влакно и матрица се не налазе у стању хемијске равнотеже. Тај проблем се решава избором нискотемпературне методе израде (у чврстом стању) уколико су металне матрице лако топљиве (на пример алуминијум-бор).

Неки метали и легуре имају низак напон пузања, па високим притисцима на нижим температурама добијамо чврсту везу границе раздвајања.

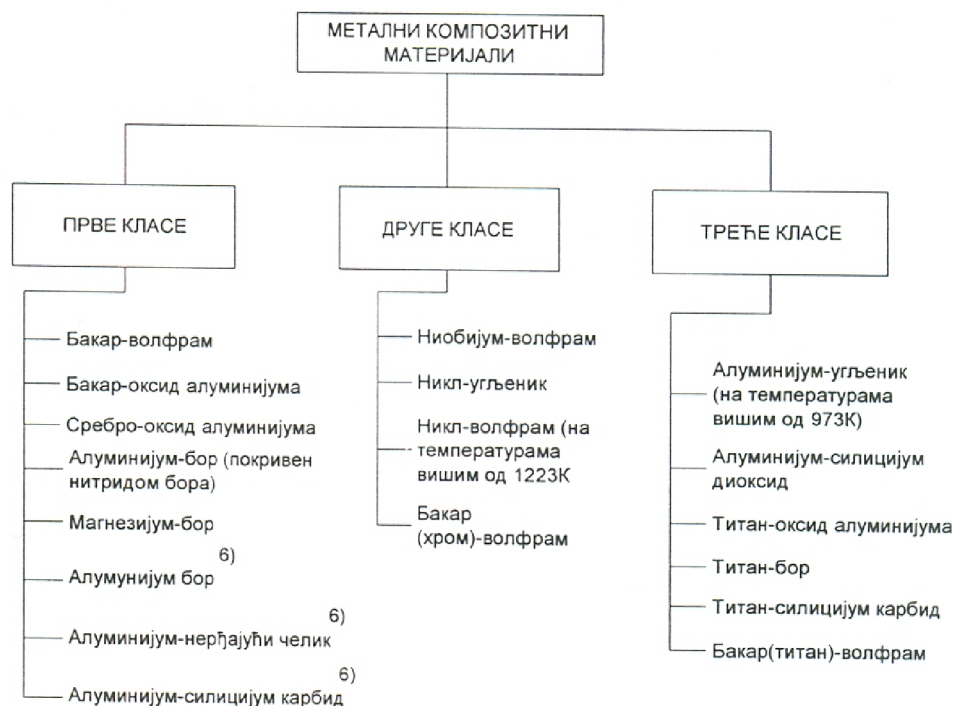
Неки композити (на пример магнезијум-бор, бакар-волфрам) израђују се методом импрегнације растопом, јер између компонената система не постоји узајамно дејство, оне се међусобно не растварају. Спољашња средина такође хемијски реагује са влакнима. Као последица реакције јавља се корозија која може довести до разарања везе између компонената.

Механичка компатибилност компонената, на пример, подразумева матрицу довољно пластичном, али и чврстом, како би равномерно и континуално прионула уз влакна и предала им оптерећење.

Пожељно је да матрица поседује већи коефицијент температурног ширења од материјала армирајуће компоненте. У случају да није тако, и да армирајућа компонента у облику влакна има тај коефицијент већи, брже скупљала унутар матице при хлађењу током израде, па би била изложена затезању, што је непожељно, јер она има знатно бољу притисну од затезне чврстоће. То се односи на већину армирајућих компонената металних композитних материјала. Треба тежити да разлике између температурних коефицијената линеарног ширења за матрицу и арматуру буду што мање.

4.4 Врсте међуфазног дејства

Меткалф Г.А. према врсти међуфазног деловања, металне композитне материјале поделио је на три класе. То је приказано на слици 4.4.1.



Слика 4.4.1 Подела композита у зависности од узајамног дејства компонената [2]

У прву класу спадају метални композитни материјали (МКМ) код којих су влакна и матрица узајамно нерастворљиви, те не стварају хемијска једињења.

Другој класи припадају МКМ код којих влакна и матрица стварају чврсте растворе, али не стварају хемијска једињења.

Код треће класе МКМ матрица и влакна узајамно дејствују стварајући хемијска једињења.

Ова подела је условна, јер МКМ који се састоји од истих елемената, компонената, могу припадати различитим класама, зависно од концентрације компонената, услова добијања и експлоатације. На пример, МКМ са матрицом од чистог бакра армиран волфрамовим влакнима спада у прву класу. Уколико је бакар легиран малом количином титанијума, исти материјал припадаће другој класи јер ће се у таквом систему створити чврсти раствори. У случају да се концентрација титана повећа још, на граници раздвајања долази до стварања хемијских једињења, те ће наведени материјал припадати трећој класи.

Постоје и МКМ псеудо класе. Они се састоје од кинетички компатибилних компонената, међутим, зависно од услова добијања и услова експлоатације, могуће је стварање хемијских једињења на граници раздвајања, те би они самим тим прешли у трећу класу.

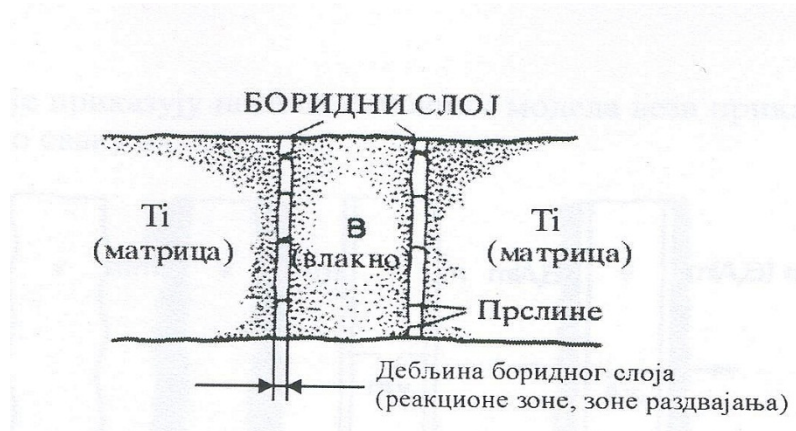
4.5 Утицај границе раздвајања на чврстоћу и карактер разрања

Чврстоћа границе раздвајања може бити нижа или виша од чврстоће матрице. Према Соорег-у и Kelly-ју постоје:

1. МКМ чије се карактеристике објашњавају чврстоћом границе раздвајања при затезању. Чврстоћа у правцу нормалном на правац влакана, притисана чврстоћа и жилавост потпадају под ову категорију.
2. МКМ чије се карактеристике објашњавају смицајном чврстоћом на граници раздвајања.

Критична дужина влакна зависи од смицајне чврстоће границе раздвајања. Теорије о чврстоћи границе раздвајања развијене су за МКМ прве класе према слици 4.4.1. Код МКМ друге и треће класе граница раздвајања није бесконачно уска, већ је зона коначне ширине, чије се особине разликују од особина матрице и особина армирајућих влакана. На пример код система треће класе појављују се две границе раздвајања: граница раздвајања влакна и новонасталог хемијског једињења и границе раздвајања тог новонасталог једињења и матрице.

При оптерћењу композитног материјала у правцу влакна прслине се обично јављају у зони раздвајања (зони узајамног дејства). Та зона назива се још и реакционом зоном. Пример ја приказан на слици 4.5.1.



Слика 4.5.1 Прслине боридног слоја створеног на влакну бора [2]

У зависности од дебљине реакционог слоја, при оптерећењу у правцу влакна, разликујемо три случаја:

1. Мала дебљина реакционог слоја (не прекорачује $0.5 \times 10^{-3} \text{ mm}$)

Дужина прслине једнака је дебљини самог реакционог слоја. Она је сувише мала да би иницирала разарање влакна. Разорени слој, прслина, проузрокује концентрацију напона на самом влакну. Но ова концентрација је далеко мања од оне која влада у самом влакну коа последица његових дефеката. Због тога се чврстоћа КМ објашњава дефектима влакна и не зависи од прслина у реакционом слоју.

2. Средња дебљина реакционог слоја $(0.5-1) \times 10^{-3} \text{ mm}$

Дужина прслине је већа него у првом случају. Концентрација напона на влакну проузрокована прслинама (ивицама прслина) већа је од оне коју изазивају дефекти самог влакна. Вlakно се кида прерано.

3. Велика дебљина реакционог слоја $(1-2) \times 10^{-3} \text{ mm}$

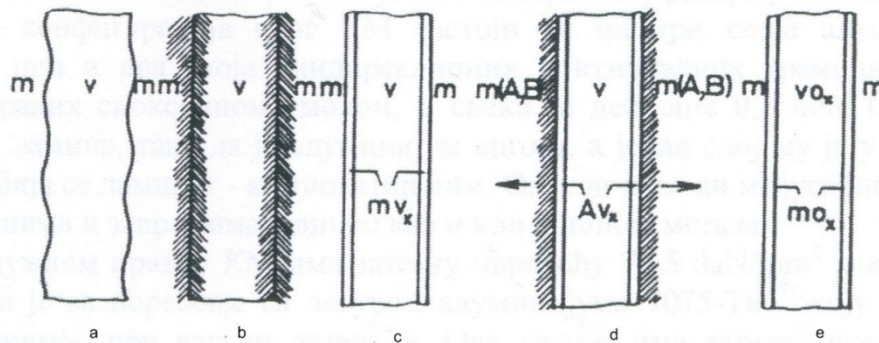
Прслине у реакционом слоју доводе до тренутног кидања влакна. Код МКМ треће класе, реакциона зона у почетку има константну дебљину, но она се током времена повећава како хемијски процес одмиче.

4.6 Модели веза између компонената

Између матрице и влакна образују се везе. Са физичко хемијског становишта оне се могу поделити на шест модела:

- a. Механички модел;
- b. Модел везе настао путем квашења и растварања;
- c. Реакциони модел;
- d. Модел реакције са изменом;
- e. Оксидни модел;
- f. Разнородни модел.

Шеме које приказују неке од основних модела веза приказане су на слици 4.6.1. Размотримо сваки од њих.



Слика 4.6.1 Шема основних модела веза. Матрица m садржи елементе А и Б. Вlakно са састоји од једнородне материје (на пример графита) и означава се са v , али може бити и од вишеродне, сложене материје (на пример Al_2O_3) и онда се означава са vo_x .

а) механичка веза; б) веза квашењем и растварањем (на пример Nb-W); ц) реакциона веза (на пример Ti-C); д) веза реакције са изменом (на пример Ti(Al)-B); е) оксидна веза у систему псеудо прве класе (на пример Al-B) [2]

а) Механичка веза се остварује у недостатку било ког хемијског механизма и своди се на механичку адхезију. Недостатак хемијске везе знатно снижава чврстоћу композитног материјала при затезању управномна влакно и при притискивању у правцу влакна. Ова веза није ефикасна при изради композитних материјала.

б) Веза квашењем и растварањем остварује се захваљујући силама површинског напона. Квашење је обично пропраћено незнатним растварањем компонената. Оваква веза настаје ако се влакна (v) импрегнирају растопљеном матрицом (m).

ц) Реакциона веза се јавља при хемијској реакцији на граници раздвајања матрице (m) и влакна (v). Ова хемијска реакција ствара ширу граничну зону (реакцину зону) које је сад ново хемијско једињење (mv_x). Са њом смо се упознали у одељку 4.5 слика 4.5.1, а одговара МКМ треће класе.

д) Веза реакције са изменом је подврста реакционе везе. Укупна хемијска реакција одвија се у неколико етапа. Прво се ствара реакциона зона (гранична зона, зона раздвајања). Она у себи садржи новонастала једињења. После тога долази до замене компонената из тих једињења са легирајућим компонентама из матрице или влакана, уколико је оно легирано.

е) Оксидна веза је такође подврста реакционе везе. Карактеристична је веза за метале (m), армиране оксидним влакнима (vo_x). Веза се остварује стварањем сложеног оксида на граници раздвајањау облику оксидне превлаке (mo_x).

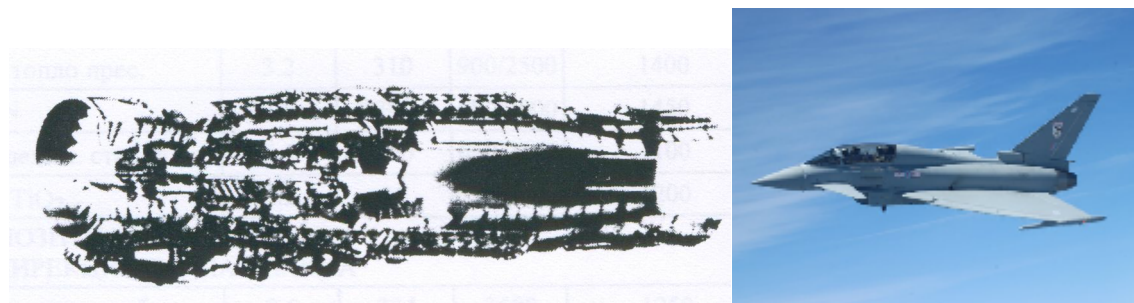
ф) Разнородна веза се појављује код композитних материјала псеудо прве класе, када се разоре оксидне превлаке и отпочне хемијско или дифузионо дејство. Ова веза се остварује, на пример, при делимичном прелазу система псеудо прве класе у систем друге и треће класе.

5. Керамички композитни материјали

Керамички композитни материјали представљају нову област неметалних материјала и развијени су ради успешног рада делова конструкција на повишеним температурама. На пример, легуре на бази никла (користе се у ваздухопловству) практично су непроменљиве на температурама од 1873K (1600°C).

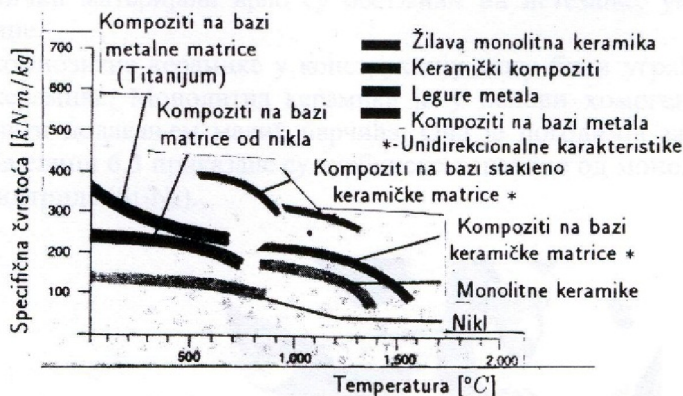
Најбољи керамички материјали су способни да раде без хлађења на температурама од 2473K (2200°C). Они такође имају боље карактеристике специфичне чврстоће и крутости при високим температурама од осталих материјала.

Као и остали композитни материјали, ови су своју прву примену нашли у војној индустрији (војно ваздухопловство), да би се касније њихова употреба пренела и на цивилно ваздухопловство. Први пројекат који је развијен са увођењем компонента од композитне керамике је усавршени европски турбо млазни мотор Еуројет EJ 2000, намењен за погон новог европског ловачког авиона European Fighter Aircraft EFA слика 5.1.



Слика 5.1 Европски турбомлазни мотор Еуројет EJ 2000, намењен за погон новог европског ловца ЕФА (десно), са компонентама од композитне керамике [2]

На слици 5.2 приказано је поређење специфичне чврстоће керамичких композита и метала, у зависности од температуре.



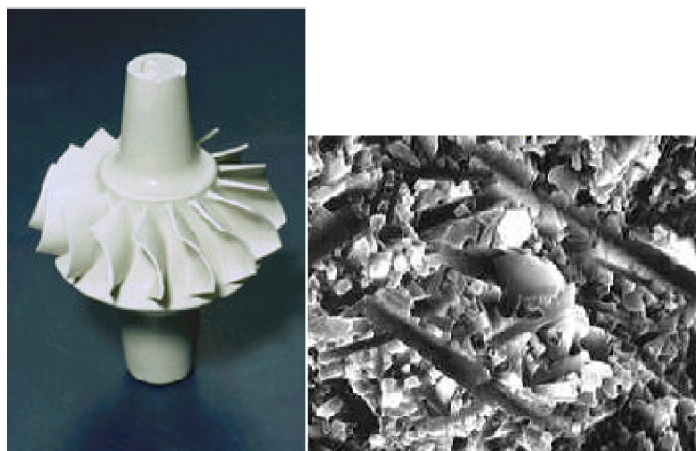
Слика 5.2 Поређење специфичне чврстоће керамичких композита и метала [2]

Материјал	Густина [g/cm ³]	Модул еластичности [GPa]	Чврстоћа на притисак [MPa]	Максимал на радна температура [°C]	Температура Топљења [°C]	Чврстоћа на савијање [MPa]
МЕТАЛИ						
Легуре алуминијума	2.8	75	230	400	600-650	230
Сиви лив	7.6	110	280	650	1500	280
	8.3	210	1100		1370	1100
КЕРАМИКА						
Al ₂ O ₃ , жарен	4.0	380	350/3000	1200	2000	300
SiC	3.1	400	350/3500	1650	2500	500
Si ₃ N ₄ , жарен	2.6	170	300/1200	1450	1900	200
Si ₃ N ₄ , топло пресован	3.2	310	900/2500	1400	1900	700
SiAlON	3.2	290	600/3000	1450	1900	450
ZrO ₂ ,	5.7	200	650/2100	1100	2680	500
Al ₂ O ₃ -TiO ₂	3.2	15	50/550	1200	1700	35
КОМПОЗИТНА КЕРАМИКА УНИДИРЕКЦИОНАЛНА ВЛАКНА						
SiC, јапански карбон	2.6	234	3500	1250		
Al ₂ O ₃ , 3М карбон	2.5	150	1750	1300		
Al ₂ O ₃ , DuPont карбон.	3.95	390	2000	1100		
КОМПОЗИТНА КЕРАМИКА КРАТКА ВЛАКНА						
SiC, Токаи карбон	3.17	700	3-14000	800		
Al ₂ O ₃ -SiO ₂ , ICI	3.3	300	2000	1200		

Табела 5.1 Поређење основних карактеристика неких највише коришћених керамичких композита и метала [2]

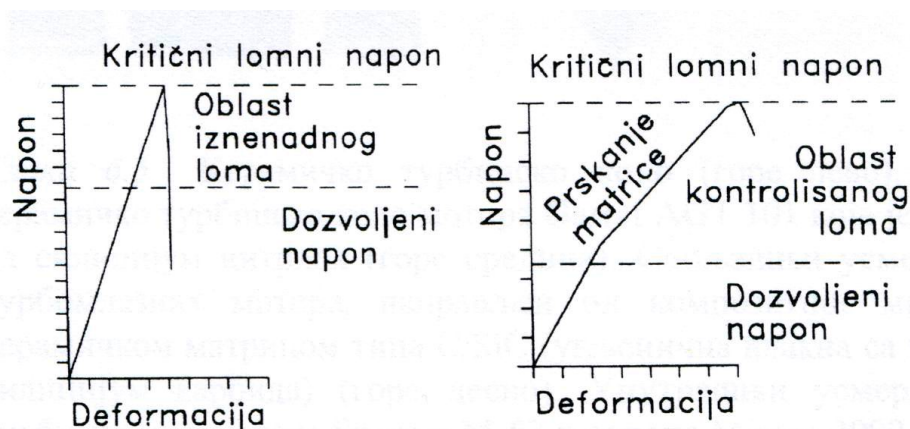
Керамички материјали су врло осетљиви на истезање, укључке, поре и микропрскотине.

Сем композитне керамике у конструкцији могу бити уграђени делови од монолитне керамике. Монолитна керамика је у основи хомогена структура, али може се ојачати додавањем малих парчића. Она је погоднија за делове мањих габарита. На слици 5.3 приказана је турбина од монолитне керамике силицијум нитрида Si₃N₄.



Слика 5.3 Турбина од монолитне керамике силицијум нитрида и њена структура [2]

Композитна керамика има керамичку матрицу, ојачану влакнима различитих врста и ткања. Понашање при оптерећењу монолитне керамике доста се разликује од композитне керамике. То је показано на дијаграмима слике 5.4.



Слика 5.4 Поређење понашања монолитне и композитне керамике при затезању. Лево: еластична својства монолитне керамике. Десно: еластична својства композитне керамике ојачане влакнима [2]

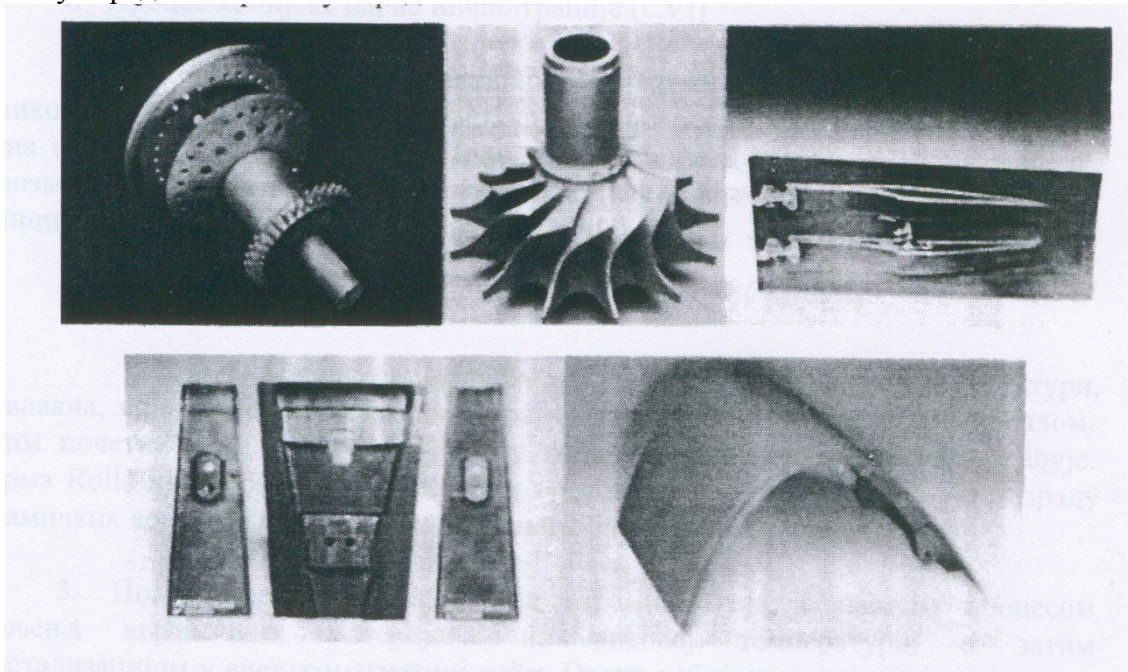
Монолитна керамика има изразиту линеарност понашања до тренутка лома, који се догађа нагло. Он је у функцији стања микроструктуре и микроскопских оштећења. Вероватноћа појаве лома се може предвидети на основу статистичких показатеља. Наиме постоји релација између броја унутрашњих и спољашњих дефеката дела и величине његове запремине. Дефекти величине до 0.025mm могу контролисати понашање керамичких делова. Тако су развијене методе прорачуна на базистатистичке анализе. Они повезују микроструктуру са перформансама дела.

NASA је развила компјутерски програма под називом Nastran(NASA STRcture ANalysis) за прорачун методом коначних елемената за структурну анализу и анализу поузданости делова од керамичких материјала, на бази вероватноће отказа сваког основног елемента.

За разлику од монолитне керамике, композитна керамика се понаша другачије. Она испољава линеарно еластична својства до тачке када у матрици почињу да се јављају микропрскотине. После овога њено понашање јр нелинеарно и неповратно. Тренутак лома можемо контролисати.

Напомињемо да и сама влакна могу бити керамичка.

На слици 5.5 приказани су делови од монолитне и композитне керамике који се користе у изради авиона.



Слика 5.5 Керамичко турбинско коло (горе лево). Интегрално керамичко турбинско коло мотора Garrett AGT 101 направљено од силицијум нитрида(горе средина). Спољашњи усмеривач млаза турбомлазних мотора, направљен од композита са керамичком матрицом типа C/SiC (угљенична влакна са матицом од силицијум карбида) (горе десно). Унутрашњи усмеривач млаза турбомлазног мотора Snecma M-53, направљен од керамичког композита типа SiC/SiC (доле лево). Модел аблативне нападне ивице свемирске летелице Hermes од композитне керамике тип C/SiC (доле десно) [2]

5.1 Природа керамичких материјала

По својој природи, хемијској структури, керамички материјали могу бити:

1. Оксиди (на пример алуминијумов оксид Al_2O_3 , цирконијумов оксид, уранијумов оксид UO_2)
2. Комбинација оксида (на пример $Al_2O_3-TiO_2$)
3. Не оксиди (на пример силицијум нитрид Si_3N_4 , силицијум карбид SiC. Бор карбид B_4C).

5.2 Производња делова од керамичких композитних материјала

Навешћемо три начина за израду делова од керамичких композитних материјала. Прве две се користе у ваздухопловној индустрији.

1. Процес хемијске парне инфилтрације (CVI)

Код овог процеса реактивни гасови пропуштају се преко претходно обликованих загрејаних влакана. У додиру са влакнима она се прекидају и доводе се на облик керамичке матрице. Процес је дуг и скуп. Користи се за производњу композитно-матричне керамике, каква је на пример керамика типа SiC/SiC.

2. Пресовање на топло

При овом поступку делујемо оптерећењем при високој температури, на влакна, која се при томе импрегнирају матричним керамичким материјалом. Затим почетни облик преобликујемо у коначни изглед дела који се израђује. Фирма Rolls-Royce развила је поступак пресовања на топло у калупу за израду керамичких композита врло компликованог облика.

3. Постоје делови добијени од керамике која је настала процесом топљења керамичких материјала на високој температури, а затим кристализацијом у електромагнетној пећи. Овако добијена керамика је провидна, са изузетним механичким особинама, савитљива је и користи се за израду мембрана, сензора притиска, високо интегрисаних компјутерских кола итд.

Сем употребе керамике за монолитне и композитне структуре она се може користити и за наношење у облику заштитних превлака. Најчешће се користи наношење плазмом.

Најважнији поступак у будућој производњи делова од керамичких материјала биће ињектирање у калупима, јер омогућава добијање делова врло сложеног облика.

5.3 Керамички композитни материјали и њима слични

Ове материјале назвали смо сличним јер у себи садрже керамичке компоненте, али и компоненте другог порекла. Кроз неколико примера упознаћемо се са тим композитним материјалима.

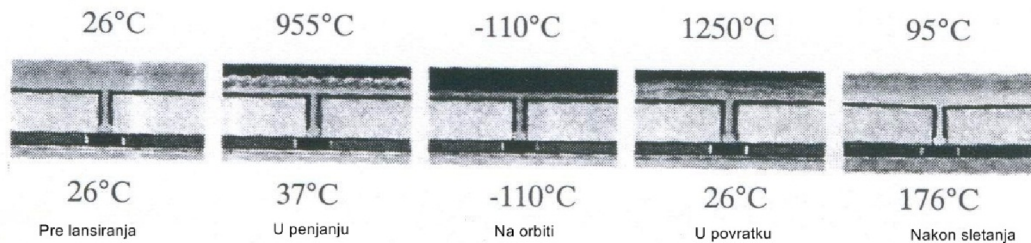
1. При изради резних алата користе се композитни материјали као што су карбиди. Обично се користе волфрам карбид и титан карбид са везивом од никла или кобалта. Композитни материјали су и тоцила за брушење направљена од силицијум карбида, алуминијум оксида, дијаманта или абразивних честица кубног нитрида бора које су повезане различитим неорганским, органским или металним везивима. На слици 5.3.1 приказани су алати и плочице за обраду стругањем на бази композитне керамике са превлаком TiAlN.



Слика 5.3.1 Алати за обраду стругањем и плочице на бази композитне керамике са превлаком од TiAlN [2]

2. Развијен је и композитни материјал са честицама од гранита у епоксидној матрици. Овај КМ има високу чврстоћу, добре карактеристике трења и нарочито добро пригушује вибрације (боље него сиво ливено гвожђе). Прво се почео користити за израду постоља прецизних брусница почетком 80-тих година прошлог века, а касније и за постоља других алатних машина. Састоји се од 93% гранита и 7% епоксидног везива. Поседује неколико добрих својстава: добра ливкост, висок однос крутости према тежини, термичка стабилност и високу отпорност према утицају спољашње средине.
3. У керамичке композитне материјале спада метало кеамика (кермет). Она представља комбинацију метала и керамике. Отпорна је на високе температуре, те се користи као топлотна заштита, на пример при проласку орбиталних свемирских летелица коз земљину атмосферу. Један од најинтересантнијих примера керамичких композита је облога за заштиту од високе температуре, која се у виду плочица поставља на спољашњу површину орбиталних летелица Space Shuttle и Hermes.

На слици 5.3.2 приказане су температуре на спољашној страни облоге и на површини структуре летелице у току комплетног лета.



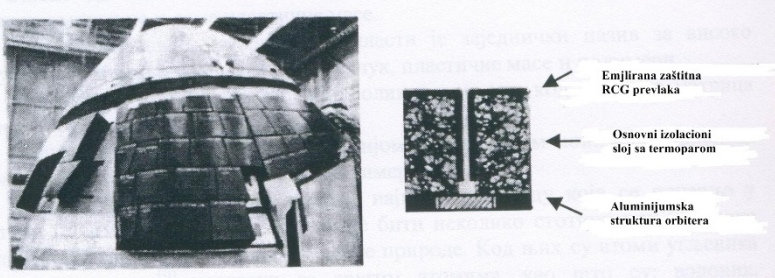
Слика 5.3.2 Температура спољашње стране заштитне облоге и на површини структуре орбиталне летелице Space Shuttle у току комплетне мисије [2]

Плочице остварују три основна задатка:

1. Враћају 90% топлотне енергије, зрачењем, назад у атмосферу. То им обезбеђује превлака реакцијом ојачаног стакла RCG.
2. Обезбеђују јединствену влакнасту силикатну структуру која помаже спољашњој стакленој превлаци. То је термоизолациони слој у плочици испод превлаке од RCG.

Он преузима температурни шок и акустичне импулсе. Такође, овај слој плочице преко напегнуте изолационе подлоге аеродинамичко оптерећење предаје структури змаја орбитера (види слику 5.3.3).

3. Оне имају изузетно малу термичку дифузивност, густину и термичку проводност, тако да одлажу пораст температуре за 2000 секунди. Операција повратка траје 600 секунди. При томе алуминијумска структура орбитера не сме да буде загрејана ни једног тренутка преко 448K (175°C)



Слика 5.3.3 Структура заштитних плочица LI 900 и LI 2200 и њихово постављање [2]

Видимо да постоје две врсте плочица LI 900 и LI 2200. Плочице гушћег материјала постављају се на делове изложене вишој температури.

Најновији материјали са превлаком од силицију-карбида издржавају температуру до 1906K (1633°C).

6. Композитни материјали на бази полимера

Полимери представљају сировине за добијање пластичних маса а не и саме пластичне масе.

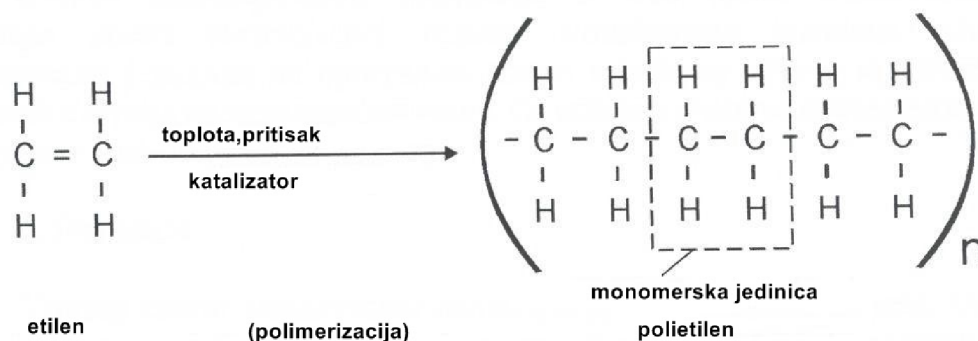
Појам вештачке материје или пласти је заједнички назив за високо молекуларна једињења у која спадају: каучук, пластичне масе и полимери.

Композитни материјали на бази полимера су они код којих је матрица полимерне природе.

Полимери се стварају полимеризацијом, повезивањем мономера. Мономер је значи основни блок од којег се граде полимери.

Мономерска јединица представља најмању јединицу која се понавља у структури полимера. То понављање може бити неколико стотина или хиљада пута. Већина мономера је органске природе. Код њих су атоми угљеника ковалентним везама повезани са другим атомима као што су: водоник, азот, флуор, кисеоник, хлор, силицијум и сумпор.

На слици 6.1 приказано је добијање полиетилена од мономера етилена. Полимеризација је извршена преко дуплих веза између атома угљеника.



Слика 6.1 Повезивање мономера етилена у полимер полиетилен [2]

Разликујемо два врсте полимеризације:

1. Кондензациона полимеризација.

Везе између молекула створене су топлотом и притиском уз помоћ катализатора. Споредни продукти реакције, на пример вода, кондензовани су. Ова полимеризација назива се и полимеризацијом степенасте реакције, зато што полимерни молекул расте корак по корак.

2. Полимеризација ланчасте реакције

Не стварају се споредни продукти реакције. Дугачки молекули стварају се великом брзином (обично у току неколико секунди). Та брзина је много већа од брзине при кондензацијоној полимеризацији.

6.1 Термопластичне масе

Ову врсту пластичних маса карактерише то да при загревању прелазе у течно стање, при хлађењу поново очврсну и тај поступак се може поновити више пута. Терба напоменути да се вишеструким грејањем и хлађењем деградирају особине термопластичних маса то јест до њиховог термичког старења.

Повећањем температуре изнад температуре прелаза у стакло стање оне постају вискозне. Даљим загревањем прелазе у течно стање.

Са порастом температуре смањује им се чврстоћа и модул еластичности а жилавост им се повећава.

При деформисању делова од термопластичних маса, на пример при затезању, дугачки ланци молекула орјентишу се у правцу дејства оптерећења. Део постаје анизотропан. У правцу издужења повећава се чврстоћа и крутост.

Неке термопластичне масе склоне су упијању воде. Вода делује као пластификатор на ланце молекула у аморфној области. Са порастом влаге снижавају се температура прелаза у стакло стање, напон течења и модул еластичности. Као последица апсорпције воде долази до димензионих промена.

Најчешће коришћене групе термопластичних маса су:

1. Целулозни деривати (целулоид, целофан итд.),
2. Полиетилен,
3. Полипропилен,
4. Поливинил (ПВЦ тј. поливинил-хлорид, полистирол итд.),
5. Полифлуоретилени,
6. Полиамиди,
7. Акрилати,
8. Полиуретани,
9. Поликарбонати,
10. Полихлоретар (пентон).

У описивању наведених група термопластичних материјала нећемо да улазимо. Треба напоменути да се неке од њих могу ојачавати одговарајућим влакнима или се пак слагати у ламинате.

6.2 Термореактивне пластичне масе

Под дејством топлоте, полимери од којих ове пластичне масе постају, прелазе у течно стање, а по очвршћавању трајно задржавају облик. При томе се одиграва неповратна реакција то јест умрежавање. У току реакције долази до међусобног повезивања ланчаних молекула смоле који граде пластичну масу од гигантских тродимензионалних молекула. Накнадно загревање, иако може донекле да омекша структуру, не доводи до течљивости која карактерише смолу при загревању. Због тога су термореактивне пластичне масе постојаније при повишенима температурама.

На њихова чврстоћу и тврдоћу утичу температура и брзина деформисања при процесу полимеризације. Оне углавном поседују боља механичка, топлотна и хемијска својства, електричну отпорност и димензиону стабилност него термопластичне масе.

Навешћемо називе неких термореактивних маса:

1. Алдехидне пластичне масе
2. Полиестери
3. Епоксидне смоле
4. Силикони.

На крају да додамо да се већина пластичних маса добија из природних извора коришћењем топлоте и притиска. Ови извори могу бити органског и неорганског порекла. Од њих се добијају различита хемијска једињења која се даљим хемијским реакцијама доводе до пластичних маса.

Основне сировине су: ваздух, кухињска со, угаљ, нафта, земни гас, вода и дрво. Ради усмерења и побољшања особина, пластичним масама при њиховом добијању додају се различите материје као што су: растварачи, омекшивачи, стабилизатори, боје и пигменти и ојачивачи.

6.3 Армирајућа влакна композита на бази полимера

Армирајућа влакна углавном се користе у облику нити или конца који је састављен од великог броја врло танких нити, затим у облику трака и платна. Она утичу на својства композитног материјала са полимерном основом. То је дато у табели 6.3.1.

Својства композитног материјала	Армирајућа влакна				
	Полиакрилно нитрилна	Угљенична	Памучна	Азбестна	Стаклена
Лакоћа прераде	П	Н	Н	Н	Н
Димензиона стабилност производа	П	Н	П	П	П
Хемијска постојаност	П	Н	Н	П	П
Отпорност на влагу	П	Н	Н	П	П
Затезна чврстоћа	П	П	П	П	П
Жилавост	П	Н	П	П	П
Крутост	П	П	П	П	П
Тврдоћа	П	Н	П	П	П
Топлотна постојаност	П	П	Н	П	П
Топлотна проводност	Н	П	Н	Н	Н
Електроизолациона својства	П	Н	П	П	П
Електропроводност	Н	П	Н	Н	Н

Напомена: П- армирајућа влакна побољшавају својства

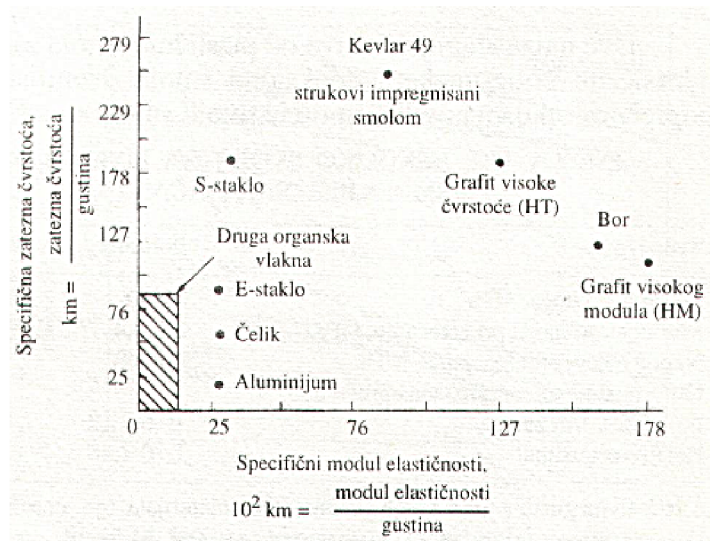
Н- армирајућа влакна не утичу на својства

Табела 6.3.1 Утицај неких врста влакана на својства композита са полимерном основом [2]

У табели 3.2.2.2 дате су неке физичко-механичке особине влакана која се користе за израду композитних материјала.

На слици 6.3.1 дате су још неке карактеристике.

Узајамно дејство матрице и армирајућих влакана зависи од њиховог хемијског састава и карактера површине влакана. Најбоља својства композита са полимерном основом остварује се када се између полимера и влакана стварају хемијске везе или јаке адхезивне везе.



Слика 6.3.1 Специфична затезна чврстоћа и специфични модул еластичности армирајућих влакана [2]

Површина влакана се често третира растворима површинско-активних материја. То се чини ради побољшања пластификатора, ради отпорности на дејство влаге итд.

По својој природи армирајућа влакна се деле на неорганска (минерална) и органска.

6.3.1 Неорганска армирајућа влакна

Навешћемо неколико врста неорганских влакана. То су стаклена влакна, угљенична влакна, влакна бора, азбестна влакна, кончасти кристали и друга неорганска влакна, на пример од метала и керамике.

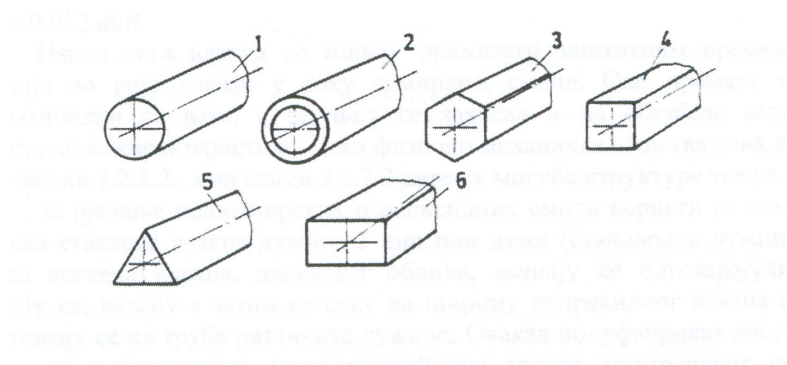
6.3.1.1 Стаклена влакна

Прво континуално стаклено влакно “Fiberglass” које се користило за ојачавање, армирање, пластике произведено је 1948. Од тада је произведено више типова ових влакана, али се у пракси примењује мали број.

Овим влакнима армирају се и термопластичне и термореактивне пластичне масе. Комбинују се и са другим влакнима а само стакло може бити примењено и у облику праха. Из табеле 6.3.1 видимо да она побољшавају хемијску постојаност, затезну чврстоћу, тврдоћу итд.

Недостатак им је ниска адхезија преам неким везивима. Цена им је ниска. Могу бити различитог облика попречног пресека, као што је приказано на слици 6.3.1.1.1. То су

vlakna kružnog попречног пресека, кружног прстенастог, шестоугаоног, квадратног, троугаоног и правоугаоног попречног пресека.



Слика 6.3.1.1.1 Облици попречног пресека стаклених влакана [2]

Састав стакла дефинише метод, услове обликовања и област примене стаклених влакана.

Она се израђује од: безалкалног алуминијум борсиликатног стакла (тип Е); алкалног стакла (тип А); безалкалног или малоалкалног стакло-vlakna отпорна према киселинама; високо чврстог магнезијумалумосиликатног стакла (тип С)-vlakna високе чврстоће; високомодулног стакла (тип М)-високо модулна vlakna; олово силикатног стакла (тип Л)-vlakna отпорна према дејству γ зрачења; стакло са високом диелектричном пропустљивошћу (тип Д).

Састав неких влакана дат је у табели 6.3.1.1.1.

Састав	Е	С	Р
SiO_2 (силицијумски песак)	52,4	64,4	60,0
Al_2O_3 , Fe_2O_3 (глиница и хематит)	14,4	25,0	25,0
CaO (негашени креч)	17,2	-	9,0
MgO (оксид магнезијума)	4,6	10,3	6,0
Na_2O_3 , K_2O (натријум и калијум оксид)	0,8	0,3	-
B_2O_3 (бор оксид)	10,6	-	-

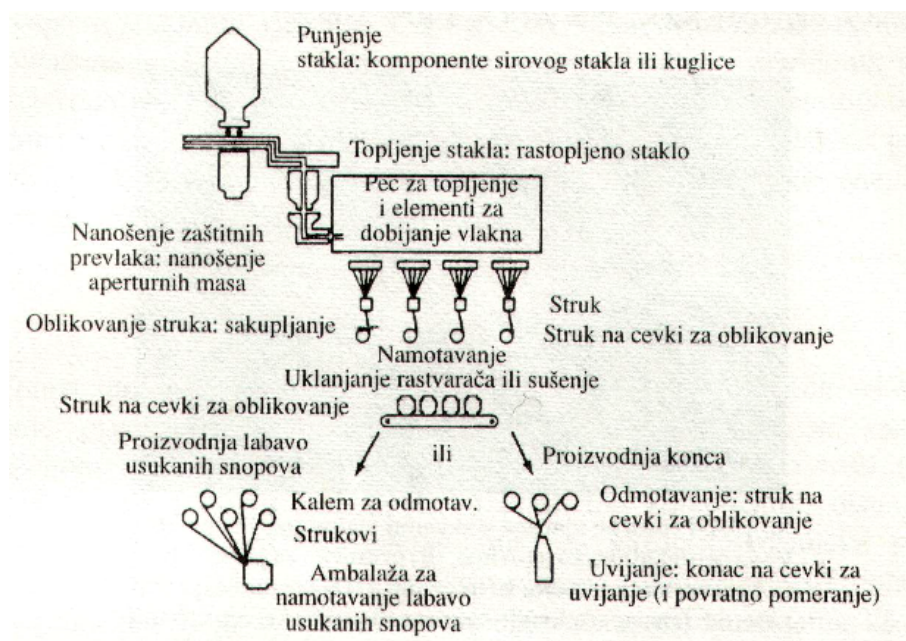
Табела 6.3.1.1.1 Састав неких стаклених влакана која се користе за армирање [2]

Тип стаклених влакана Р користи се за израду летелица у ваздухпловним и космичким програмима. Тип Е је развијен за потребе електроиндустрије.

Континуалне нити се производе директно из растопљене масе. Наиме мешавина сировинских материјала се уводи у пећ, топи се, меша се и помера дуж пећи кроз огњиште. Испод огњишта се налази серија изолованих цевчица од платине, од којих свака у својој основи има по неколико стотина врло малих отвора (200-400 отвора на пречнику од 1-2 mm). Температура стакла у овим цевчицама се контролише са великом прецизношћу, а одржава се кодуктивним загревањем електроотпорним грејачима на нивоу

1523K (1250°C). Стаклена растопљена маса струји вертикално под дејством гравитационе силе, а врло танке нити из цевчица се извлаче машинским путем брзином 50-100 m/s, тако, да када се стакло охлади распршеном водом, добијају се једва видљиве нити. Пречник им је око 0,012mm.

Након тога влакна се премазују заштитним премазом против абразије до које долази у току армирања смоле. Ови премази треба да су компатибилни са њом, а од њих се захтева и да обезбеди задовољавајуће антистатичке карактеристике. Шематски поступак израде стаклених влакана дат је на слици 6.3.1.1.2



Слика 6.3.1.1.2 Шематски приказ процеса производње стаклених влакана [2]

За ојачање епоксидних и полиестарских смола користи се тзв. мат. То су исечена стаклена влакна дужине 3 мм или дужа (стандардна дужина је 50 mm). Овако исечена стаклена влакна, длакастог облика, мешају се са одговарајућим везивом, пресују се, ваљају се а затим секу на ширину непрекидног платна или трака, и намотавају на трубе различите дужине. Овакав полуфабрикат се користи за израду неодговорних мало оптерећених делова, унутрашњих декоративних облога, поклопаца и слично.

Једна од интересантних примена платна од стаклених влакана је у изради носног дела војних и путничких авиона. То је због тога што се у овај део обично уграђује радар, а композит од ових влакана обезбеђује најмањи утицај шума на рад радара.

Плуфабрикати од ових влакана данас се ретко користе за комплетну израду одговорних носећих делова. Углавном се праве структуре које су комбинација стаклених влакана и влакана других материјала. То су на пример угљенична и арамидна влакна.

Затезна чврстоћа стаклених влакана (1000-6000 МПа) знатно је већа од чврстоће стакла у масеном облику (100 МПа) услед изотропне структуре високотемпературног растопла стакла од кога се израђују влакна. Велика брзина хлађења влакана спречава појаву микродефеката на површини влакна при процесу њиховог добијања.

6.3.1.2 Угљенична влакна

Угљенична влакна се појављују у различитим облицима. Производе се пиролизом различитих органских влакнастих материјала. Механичке карактеристике су им од ниских до врло високих. Они са ниским поседују малу чврстоћу и крутост. Користе се као изолациони материјали за високе температуре и за композите опште намене.

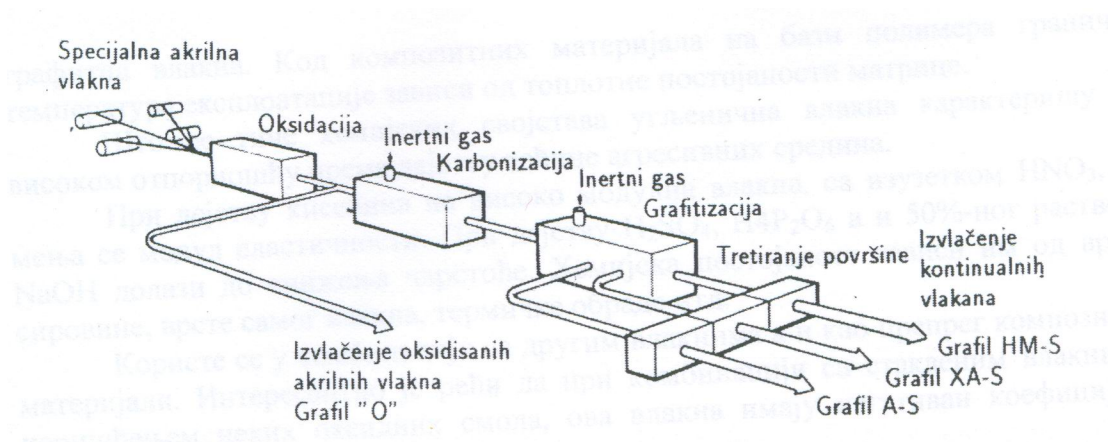
За примену код одговорних конструкција, на пример у ваздухопловству, користе се угљенична влакна која се производе при температури (1173-1773 K) (900-1500°C) са чистоћом угљеника 95-99% и називају се карбонским влакнима. Уколико је температура добијања (1773-3273 K) (1500-3000°C) имамо влакна са чистоћом угљеника од 99% и називамо их графитним влакнима.

У даљем излагању сва влакна на бази угљеника назваћемо угљеничним влакнима. Разлика се прави при означавању квалитета и порекла ових влакана. Данас постоји међународно признато означавање угљеничних влакана, која користе највећи светски произвођачи табела 6.3.1.2.1.

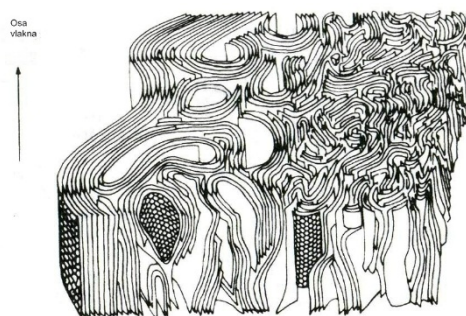
Тип влакна	Чврстоћа МПа	Модула еластичности МПа	Издужење %
ХА, велика чврстоћа	3000...3300	220000... 240000	1,3 ... 1,4
ХА, високе перформансе	3300...3600	220000... 240000	1,4... 1,5
ХА, велико издужење	3700	220000... 240000	1,5 ... 1,7
ХМ, велики модул еластичности	2300...2600	330000... 350000	0,7
ИМ, средњи модул еластичности	2900... 3200	280000... 300000	1,0

Табела 6.3.1.2.1 Механичке карактеристике неких угљеничних влакана за композитне материјале [2]

Производња угљеничних влакана заснована је на термичкој деструкцији органских полимера, при којој се у инертној средини стварају испарљиви продукти и чврст остатак угљеник. Значи она се могу израђивати од претходно већ направљених специјалних влакана. Неки произвођачи користе полиакрилнитрилна влакна ПАН или влакна на бази целулозе (рајона-вештачке свиле). На слици 6.3.1.2.1 приказан је шематски поступак добијања угљеничних влакана, а на слици 6.3.1.2.2 дата је структура угљеничног влакна.



Слика 6.3.1.2.1 Шема тока технолошког процеса добијања угљеничних влакана [2]



Слика 6.3.1.2.2 Шематски приказструктуре угљеничног влакана [4]

Први степен ПАН производног процеса представља контролисана оксидација “ужета” од око 10000 нити, што се обавља на температури од око 473-573 K (200-300°C). Полимерни ланци и мрежа угљеника задржавају оргиналнио центрирање дуж осе влакана. У току ове фазе влакна су напрегнута на истезање. Неопхдно је применити дифузију отпадних органских гасова на површину влакна, чиме се лимитира пречник влакна и он применом овг процеса ПАН износи око 0,008 mm.

Други степен је пиролиза. Она се обавља у инертној атмосфери при температури од 1773 K (1500°C). Овде долази до потпуног угљенисања.

У завршном делу ПАН процеса угљенична влакна се излажу још већој температури. Она износи од 2774-3273 K (2500-3000°C). Коначни продукт овог процеса јесу влакна великог модула еластичности и велике чврстоће. Уколико је температура завршне обраде виша, повећава се степен “графитизације” а са њим и модул еластичности влакана.

Чврстоћа влакана зависи од броја оштећења, присутних дефеката и њихове величине. При вишим температурама термичке обраде оштећења знатно смањују чврстоћу. Процес можемо контролисати и тиме добијати влакна жељених карактеристика. Наведимо значење неких ознака влакана: ХА влакна стандардне чврстоће, могу се користити у изради делова у ваздухопловству, ХА влакна велике чврстоће, користе се за одговорне делове примарних структура авиона, ХС или I тип су влакна велике чврстоће,

ХМ или II тип су влакна великог модула еластичности а користе на пример за израду лопатица ротора хеликоптера.

Најновији поступци користе испредање влакана из црне смоле (нафтног катрана). Угљенична влакна с лошије квасе полимерним везивима од стаклених влакана. Зато се угљенопластике карактеришу нижом смицајном чврстоћом. Морају се третирати неким средствима ради повећања адхезије према матрици.

Карбонска влакна су полупроводници а графитна влакна се налазе између полупроводника и проводника, но повишењем температуре термичке обраде приближавају се проводницима. Електропроводљивост карбонских влакана повећава се њиховом метализацијом (превлачење паладијумом, никлом, бакром).

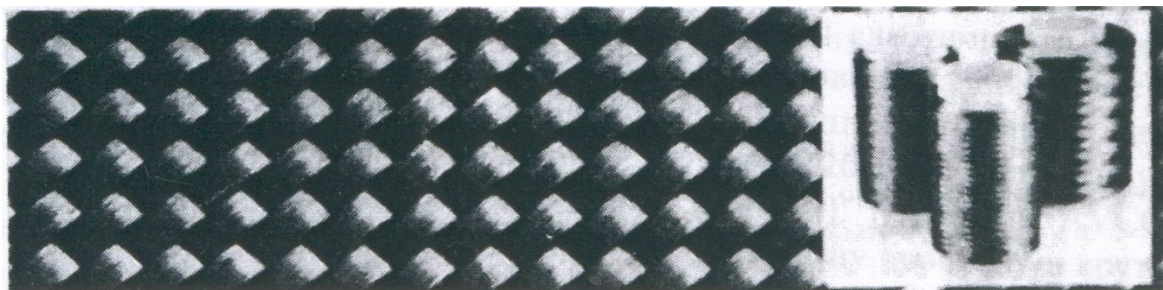
Поседују високу топлотну постојаност. Гранична температура трајне експлоатације у ваздушној средини им је 573 К за карбонска влакна и 673 К за графитна влакна. Код композита на бази полимера гранична температура експлоатације зависи од топлотне постојаности матрице.

Што се тиче хемијских својстава угљеничних влакана карактеришу се високом отпорношћу према дејству већине агресивних супстанци.

При дејству киселина на високо модулана влакна, са изузетком HNO_3 , не мења се модул еластичности. При дејству H_2SO_4 , $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_6$ а и 50%-ног раствора NaOH долаз до смањења чврстоће. Хемијска постојаност зависи од врсте сировине, врсте самог влакна, термичке дораде и слично.

Користе се у комбинацији са другим влакнима а и као препрег композитни материјали. Интересантно је рећи да при комбинацији са стакленим влакнима, коришћењем неких оксидних смола, ова влакна имају негативан коефицијент линеарног ширења.

На слици 6.3.1.2.3 приказан је полуфабрикат од угљеничних влакана.



Слика 6.3.1.2.3 Платно од угљеничних влакана и калемови конца од угљеничних влакана. Производ компаније Торауса [2]

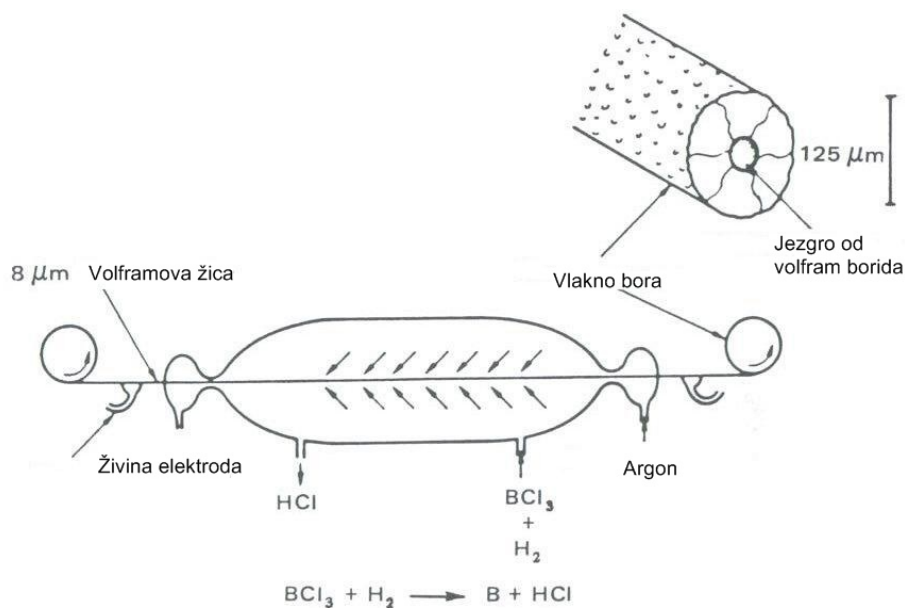
6.3.1.3 Влакна бора

Влакна бора се производе процесом таложења у пари. Танка жица од волфрама, пречника 0.008 mm загрева се пропуштањем електричне струје кроз њу у атмосфери бортрихлорида и водоника. Процес таложења бора одвија се по следећој хемијској формули $2\text{BCl}_3 + 3\text{H}_2 = 2\text{B} + 6\text{HCl}$.

Пажљивом контролом температуре долази до равномерног таложења бора на жици. Волфрам у току процеса углавном прелази у волфрам борид, а преостали део влакна је од бора. Процес израде ограничен је чињеницом да се свако влакно израђује посебно. Пречник влакна је 0.09-0.15 mm. Видимо да су она дебела, те су компликована за ткање.

До лома композитног материјала на бази бора долази при радијусу кривине од око 8 mm. Из тог разлога нису могућа ткања у конвенционалним облицима.

Поступак израде влакна бора дат је шематски на слици 6.4.4.3



Слика 6.4.4.3 Шематски приказ процеса израде влакна бора [2]

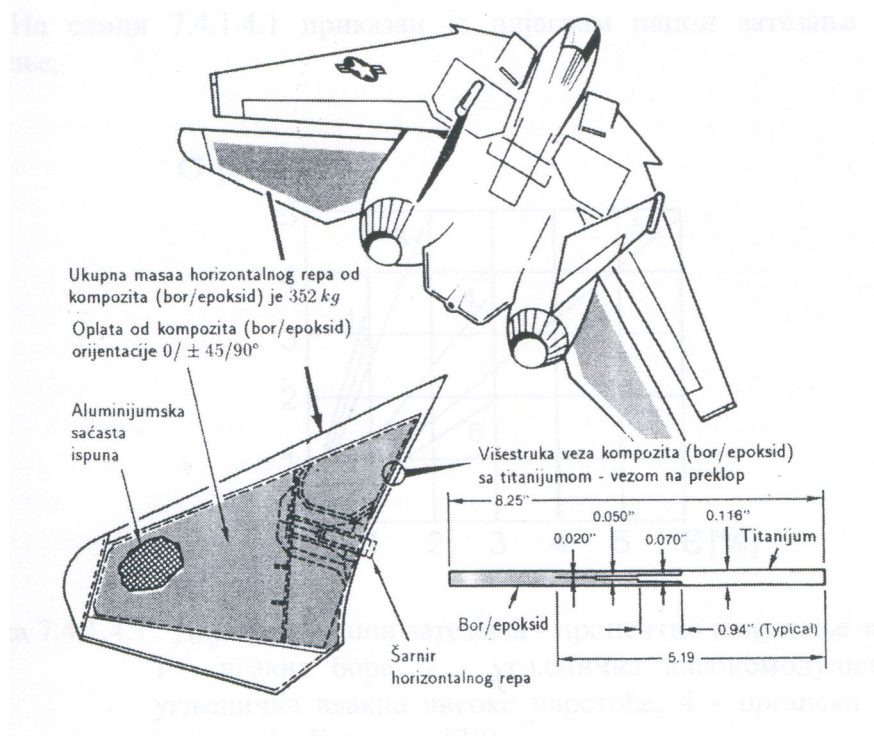
Тврдоћа влакна бора је врло висока, па се јављају велики проблеми при машинској обради композита на бази ових влакана. Могу се обрађивати једино алатима на бази дијаманта.

Због великог пречника отпорна су на извијање. Затезна чврстоћа језгра је знатно нижа од затезне чврстоће влакна у целини. Услед присутности великих заосталих напона у влакнима бора се јављају радијалне прслине.

Композитни материјали на полимерној основи армирани влакнима бора имају високу притисну и затезну чврстоћу, висок модул еластичности и високу динамичку чврстоћу. Један од највећих произвођача влакана на бази бора је америчка компанија AVCO. Углавном се користе унидирекциона влакна високог квалитета, стандардних пречника 0.1 mm, 0.14 mm, 0.20 mm. Испоручују се у виду препрег материјала (са епоксидним смолама). Препрег AVCO са епоксидним смолама армиран влакнима бора има изузетну чврстоћу и крутост на температури од 463 K (190°C).

У новије време за језгра ових влакана користе се карбонска влакна. Један од првих делова направљен од композита на бази борних влакана биле су хоризонталне репне површине ловачког авиона F-14 слика 6.4.4.4.

Оваквом конструкцијом постигнута је уштеда у тежини од 19% у односу на исте елементе од титанових легура, уз исту цену. Време до појаве замора материјал повећано је за 2.5 пута.



Слика 6.4.4.4 Конструкција хоризонталног репа ловачког авиона Ф-14 [2]

6.3.1.4 Остала неорганска влакна

1. Азбестна влакна

Њима се армирају термопластичне и термореактивне пласичне масе. Азбестна влакна су термички постојана, хемијски отпорна и жилава.

2. Кончасти кристали

Кончасти кристали користе се као арматура. Могу бити керамички и метални. Структура им је монокристална. Пречник им је 0,001-0,01mm дужина им је 100-1500 пута већа. Уколико се кончастим кристалима армирају термореактивна матрична везива, при чему је њихов запремински износ 80% могуће је добити композите чија је чврстоћа 50-75% чврстоће арматуре.

Њиховом применом повећава се топлотна постојаност и друга својства. Шира примена кончастих кристала ограничена је њиховом високом ценом.

Армирајућа влакна могу имати нехомогену структуру и анизотропне механичке карактеристике. У она са израженом анизотропијом спадају: органска арамидна, угљенична и влакна бора. Стакла и метална влакна сматрају се хомогеним и изотропним. Анизотропија влакна може знатно утицати на карактеристике композитног материјала.

6.4.2 Органска армирајућа влакна

Органска армирајућа влакна могу бити природна и вештачка. Нешто више ћемо рећи о арамидним влакнима али касније.

1.Памучна влакна

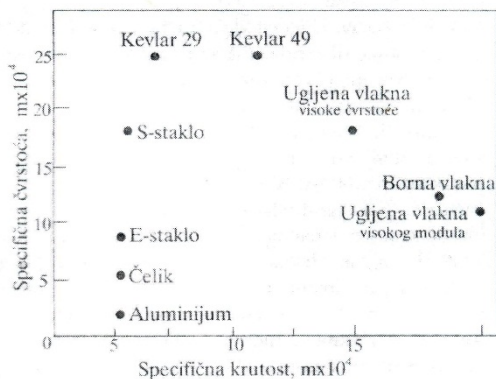
То су природна влакна. Употребљавају се у облику текстилних отпадака, уситњених влакана, струкова влакана, одсечених тканина и др. Лако се боје и имају добра диелектрична својства. Хемијска постојаност и водотопивост су им мале. Памук је важна армирајућа компонента аминокалдехидних смола.

2.Ланена влакна

И ово су природна влакна. У смеси са армирајућим компонентама користе се уситњена и до облика праха. Повећавају жилавост матрице на бази полимера. Уколико се употребљавају уместо стаклених влакана, смањују густину и хемијску постојаност а повећавају динамичку чврстоћу.

3.Синтетичка органска влакна

Синтетичка органска влакна имају добру адхезију према полимерима. Композитни материјали са полимерном основом који садрже ова влакна карактеришу се високом корозивном и хемијском постојаношћу, отпорношћу на дејство влаге, малим коефицијентом трења и високом отпорношћу на хабање. Густина им је 2-3 пута мања од густине минералних влакана, а специфична вредност чврстоће и крутости у многим случајевима је виша (слика 6.4.2.1). основни недостатак им је знатно смањење чврстоће и димензионе стабилности при повишеним температурама. Ограничен им је избор везива, матричног материјала, јер многа везива мењају структуру и механичка својства влакана.



Слика 6.4.2.1 Специфична чврстоћа и специфична крутост разних врста армирајућих влакана у односу на челик и алуминијум [2]

Најчешће се користе следећа органска влакна: полиолефиленска (полиетиленска, полипропиленска), флуоровлакна (политетрафлуороетиленска, фторална), полиестарска (полиетилен терефтална-лавсан), полиамидна, влакна на бази ароматичних полиамида (арамидна влакна), полиамидна, полиоксидозална итд.

Полиамидна (најлонова влакна) најчешће се користе као ткани. Полимерни материјали армирани овим влакнима имају изузетна електроизолациона својства те се примењују у индустрији електронике.

Влакна на основу ароматичних полиамида-арамида имају највећу жилавост од свих расположивих влакана и највећу специфичну чврстоћу. Пре кидања пластично се деформишу.

Из текста о синтетичким влакнима уочавамо да им је структура полимерна.

6.4.2.1 Армидна влакна (кевлар)

Арамидна влакна су откривена 1965 године у корпорацији Du Pont у САД. Открила их је Стефани Кволек, научни сарадник ове фирме. Од тад ова влакна не престају да буду у жижи научника и произвођача. Она представљају синоним за високе технологије и једна су од најважнијих органских влакана. По свом саставу то је ароматски полиамид. Ова влакна слична су конвенционалном најлону у коме су флексибилни алифатични ланци замењени ароматичним прстеновима. Полимер се формира кондензацијом деривата ароматичних диацида и диамини. Производи их корпорација Du Pont под тржишним именом кевлар. Има их неколико типова. На пример, обичан кевлар намењен за ојачавање одеће. Кевлар 29 се користи за ојачавање гумених производа као што су ужад и погонски каишеви. Кевлар 49 већ се користи за композитне структуре. Данас постоје и друге врсте кевлара.

Поседују изузетно велики модул еластичности, велику чврстоћу и малу густину. Структура влакна сама по себи је композитна, дуга и крута влаканца распоређена су подужно у правцу осе и утиснута су у нешто мекшу матрицу. Оваква микроструктура армидних влакана даје им три важне особине. Прво, чврстоћа на притисак знатно им је мања него код других побољшаних влакана јер се комплетно влакно лакше извија због тога што је и само састављено од влакна. Друго, ломна жилавост композита већа је од осталих влакана јер се значајна енергија апсорбује акустичним ефектима који су последица међусобног померања влаканца и њиховог прекидања. Трећа, особина им је структурно пригушење. Шта, то значи? То значи да композитне структуре са овим влакнима пригушују вибрације и то брзо.

На слици 6.4.2.1.1 приказано је хибридно платно састављено од арамидних и угљеничних влакана.



Слика 6.4.2.1.1. Хибридно платно од арамидних и угљеничних влакана, производ фирме Hexcel-Genin. [2]

Арамидна влакна се примењују у конструкцијама где се захтева мала маса, где су крутост структуре и мала маса одлучујући чиниоци и где се захтева отпорност на топлоту и хабање.

Опште карактеристике су им: 1) велика затезна чврстоћа, велики модули и мало издужење приликом кидања, 2) отпорна су на топлоту и пламен (не топе се а емисија дима им је ниска), 3) димензионо су стабилна, 4) хемијски су отпорна, 5) слабо проводе струју, 6) текстилна процесибилност им је добра, 7) добра им је отпорност при електричном пражњењу и 8) граница замора им је висока.

Подручија техничке примене су им многобројна. На пример, користе се за израду аутомобилских гума, гума авиона, камиона и бицикала, због повећане отпорности бушење а и осталих перформанси које смо горе изнели. Употребљавају се за црева течности за хлађење, клима уређаја, уља за кочнице, и тамо где се јављају високи хидраулични притисци. Користе се и за композитне материјале саћасте структуре. Од њих се израђују ужад, оптичка влакна, заптивачи, траке и фрикционе производе (као замена за азбест). Нашли су примену у аутомобилској, авионској и космичкој индустрији. У војној индустрији се користе за израду шлемова, заштитних прслука, балистичких покривача за муницију и склоништа, за чамце и остала пловила, возила специјалне намене итд.

Ова влакна са комбинују са влакнима другог порекла, а такође и са металним и керамичким материјалима. Пет пута су јача од челика исте масе.

Влакна се користе и у облику препрег материјала.

Уобичајни типови арамидних влакана, а и осталих, своје добре механичке карактеристике губе са порастом температуре, тако да на 423 K (150°C) губе 20%, а на 513 K (240°C) читавих 50%. Но на 223 K (-40°C) оне су им веће него на собној температури.

Машинска обрада композитних материјала са арамидним влакнима захтева брижљиво пројектовање, а такође развој и модификацију постојећих резних алата. Највеће потешкоће настају из немогућности одвођења велике количине топлоте из зоне резања која може да уништи материјал, јер он има малу термичку проводљивост.

Део топлоте се одводи самим алатом. Врло је тешко остварити и тачност обрађених површина при обради резањем.

С обзиром да арамидна влакна имају велику затезну чврстоћу а малу чврстоћу на притисак, при бушењу долази до деформације и чупања влакана из матрице. Орјентација влакана и ламинау ламинату директно утиче на квалитет машинске обраде и на трајање алата.

Арамидна влакна су јефтинија од карбонских влакана. Композити са овим влакнима могу бити јефтинији и до 50 % од композита са карбонским влакнима при истој тежини, дебљини платна и садржаја смоле.

Сем Du Pont-а постоје и други произвођачи полуфабриката од арамидних влакана. На пример Brochier и Hexcel-Genin из Француске, Ciba-Geigy из Швајцарске, Fiberite из САД и други.

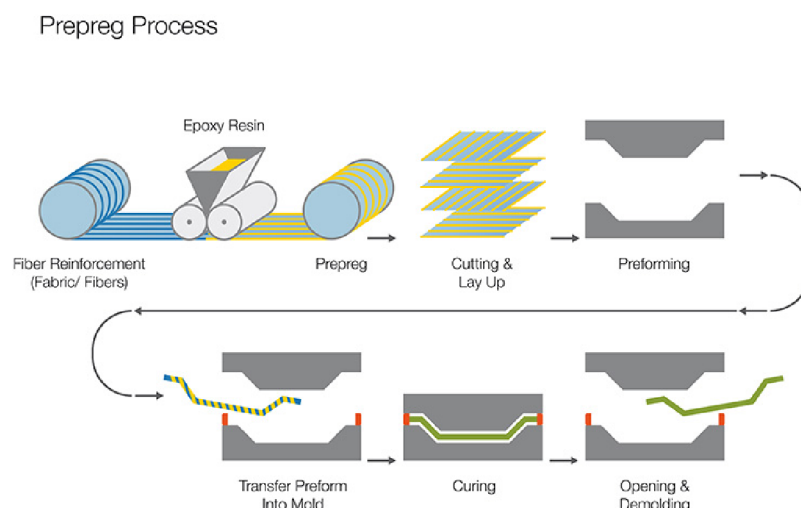
При примени арамидних влакана у нормалној употреби не постоји опасност по људско здравље. Но, људска кожа показује незнатну осетљивост на њих, али без токсичних ефеката.

6.5. Препрег матерјали

Препрег матерјали (преимпрегнирани) су композитни материјали састављени од влакана и полимеризоване матрице. Као такви се чувају најчешће на температурама испод $273\text{K}(0^{\circ}\text{C})$, на пример $255\text{K}(0^{\circ}\text{C})$, да не би дошло до полимеризације. Време чувања је од пар дана, па до једне године. Најчешће су у облику тканине дебљине $0,05\text{.....}0,25\text{mm}$, а намотавају се у ролне ширине $75, 150$ и 300mm и дужине 250m .

Пре употребе загревају се на собној температури у трајању $1\text{-}40$ часова да би се избегла кондензација влаге у њима.

На слици 6.5.1 приказан је процес фабрикации препрег матерјала



Слика 6.5.1 Процес фабрикации препрег материјала [8]

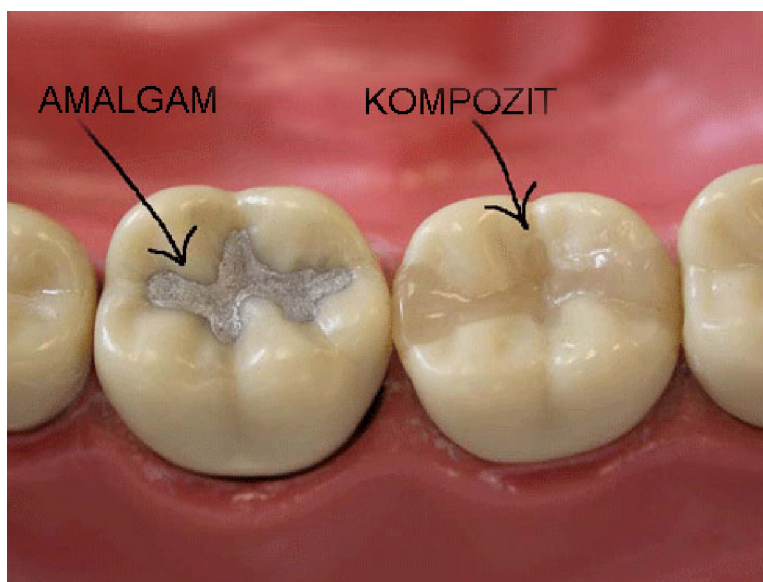
Пре употребе из ролне се исеца препрег одговарајуће дужне, опсеца се на жељени облик и на потребан број комада, који се затим слажу један на други, а затим се уз повишен притисак или вакуум (може и комбиновано) при повишеним температурама врши полимеризација и добијање композитне структуре.

Након полимеризације делови се ваде из аутокалва или пећи и ако је потребно подвргавају завршној обради, на пример уклања се вишак истеклог материјала.

Процента смоле у препрегу је $40\text{-}50\%$ и зависи од врсте употребљених влакана. Поступак је брз, једноставан и прецизан за разлику од такозваног мокрог поступка, самим тиме мање је штетан за раднике и околину.

7. Примена композитних материјала у стоматологији

Примена композитних материјала у стоматологији постаје све више заступљена, пре свега због замене металних материјала и амалгама који су готово стотину година били материјали избора за надоградњу зуба и попуњавању кавититета на бочним зубима. На пример дентални амалгам поред добрих својстава поседује и низ лоших као што су: стварање биоелектричног потенцијала у оралном медијуму, потенцијална опасност од токсичног деловања живе, корозија и немогућност везивања за тврда зубна ткива. Због оваквих својстава неопходна је радикална припрема кавититета, уз жртвовање доста зубног ткива да би се осигурао интегритет зубне испуне а притом се добија потпуо неестетски изглед који му као таквом умањује свеукупну вредност, што се може видети на слици 7.1.



Слика 7.1 Изглед попуне шупљине зуба композитом и амалагамом [9]

Због горе наведених разлога интересовање за денталне амалгаме почело је да опада средином 70-тих година прошлог века и рестауративна стоматологија је тражила нов материјал, који је способан да у потпуности замени амалгам, а притом испуни све веће естетске захтеве у рестауративној и реконструктивној стоматологији. Композит је понудио испуњавање ових захтева, јер је био неметалан, без живе, термички и електрички инертан уз могућност посредног везивања за зубно ткиво, и одговарајући естетски изглед природног зуба.

7.1 Састав композитних материјала на бази смола

Композитни материјали који се користе у стоматологији су на бази смола и састоје се из три дела:

- органског матрикса на бази смоле
- неорганских честица пунилаца или неорганске дисперговане фазе
- органско–неорганског везивног средства, силана.

Поред основних, постоје још бројни додаци у малим количинама, који доприносе побољшању свеукупног квалитета материјала као што су: стабилизатори боје, инхибитори и активатори полимеризације, рентген контрастна средства и различити пигменти.

7.1.1 Органски део

Rafael L. Bowen је открио данајважнији органски састојак композитног материјала чини смолни матрикс, са диметилакрилатним мономерима (DMA) високе молекулске тежине. Ради се о материјалу високе вискозности који се мора разредити мање вискозним мономерима, као што су триетилен-гликол-диметакрилат (TEGDMA).

Други значајан састојак код низа композитних материјала је уретан диметилкрилат (UDMA) који је ниже вискозности и показује боља својства полимеризације од Bowen-ове смоле. Ове две врсте смола су доминантне у употреби.

7.1.2 Неоргански пуниоци

Неорганска распршена (диспергована) фаза или пуниоци обухватају различите честице чисто неорганског порекла, као што су: кристални кварц, пироцени колоидни силицијум диоксид, борсиликатно стакло, алумосиликати баријума, стронцијума, литијума, цирконијума, баријум сулфата и итријум трифлуорида.

Честице неорганских пунилаца су различите величине и облика, а додају се органском матеиксу до његовог засићења. Ове честице дају одговарајућа физичко-механичка својства материјалу. Величина честица варира од материјала до материјала, свака врста честица има засебна својства:

- честице пироценог колоидног силицијума (величине од 0,1-0,05 микрона), инертне су и имају низак степен термичке експанзије, а доприносе бољој кондензибилности и полираности композитне смоле,
- баријумово силикатно стакло и итријум трифлуорид (поседују средњу тврдоћу и могућност отпуштања јона флуора у околину)
- кварц је врло стабилан са високом тврдоћом и високим степеном термичке експанзије, што може утицати на лошију полираност површине.

Пуниоци по својој структури и хемијском саставу могу да имају 5 потенцијалних улога у композитном материјалу:

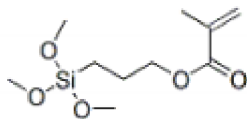
- 1 Повећани удео пуниоца смањује запреминску контракцију. Композит при смањеном уделу полимерних матрица, настао инкорпорирањем већих количина неорганских пунилаца, који не подлежу полимеризацији, за последицу има смањену контракцију при полимеризацији.
- 2 Побољшава механичке особине као што су тврдоћа и отпорност на притисак.
- 3 Додавањем пунилаца на бази стакла, висок коефицијент термичког ширења мономера на бази метакрилата се значајно смањује, тако да се одржи смањени коефицијент ширења на зубном ткиву.
- 4 Разне естетеске карактеристике, као што су боја, транспарентност и флуоресцентност, могу бити побољшане додавањем пунилаца (када материјал садржи честице са различитим индексом преламања светлости од матрице у којој су инкорпориране долази до појаве да део светлости прође

кроз такав материјал, а део се распрши, за такав материјал кажемо да је транспарентан)

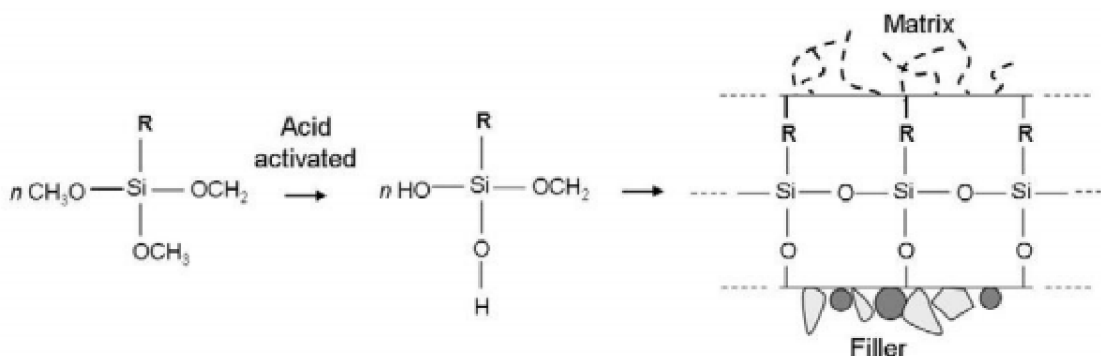
5. Стаклени пуниоци могу бити носиоци резистенције секундарног каријеса.

7.1.3 Органско-неорганско везивно средство

Примарно својство органско-неорганског средства је осигуравање трајне везе честица неорганског пуниоца са органском матрицом на бази смоле. Ово средство омогућује спречавање хидролитичке деградације везе пуниоци/смола и добру расподелу напона између смоле и пунилаца. Најчешће везивно средство за повезивање честица неорганског пуниоца матрикса на бази смоле су органосилани, међу којима главно место заузима метаксилоксипропилтриометоксилан или једноставније силан. Силанизирајући агенс је бифункцијски молекул који се једним крајем везује за хидроксилне групе неорганских пунилаца путем реакције кондензације, остварујући на тај начин силоксанске везе (слика 7.1.3.1). На другом крају молекула метакрилне групе подлежу полимеризацији при хемијској или фотохемијској активацији стврдњавања смоле. Дакле силани омогућују формирање везе са силицијумским пуниоцима са једне стране и умрежавање преко метакрилних група са друге стране. На тај начин се обезбеђује добра веза између органског и неорганског дела композитног материјала.



(3метаксилоксипропилтриметоксисилан)



Слика 7.1.3.1 Формула и реакција силана [5]

7.1.4 Иницијатори полимеризације

Иницијатори полимеризације код већине композита на бази смоле садрже камфорхинон и терцијерни амин, који имају способност апсорпције светлосне енергије у плавом делу видљивог спектра.

Молекули неких фотоиницијатора (као што је бензоилметилетар) дају слободне радикале поребне за почетак полимеризације, тако што апсорбују светлосну енергију одређене таласне дужине и разлажу се. Молекули других фотоиницијатора се апсорбују светлосну енергију различитих таласних дужина и само се побуђују. У тако побуђеном стању реагују са молекулима друге супстанце, која се назива коиницијатор. У реакцији фотоиницијатора и коиницијатора молекули коиницијатора постају слободни радикали. У присуству слободних радикала молекули мономера се за кратко време вежу у дуге полимерне ланце.

7.1.5 Инхибитори полимеризације

Инхибитори су хемијски агенси који имају способност да спрече аутополимеризацију композитне смоле.

7.1.6 Стабилизатори

Стабилизатори ултраљубичастог светла додају се због стабилности боје композитне смоле. У новије време чине се велики напори у изналажењу нових органско-неорганских система, који имају способност да побољшају степен конверзије и смањење полимеризацијског скупљања и повећање отпорности на хабање.

7.2 Актуелни композитни материјали

Након многобројних покушаја у протеклих пар деценија да се понуди одговарајућа врста композита на бази смоластог материјала, који би стоамтологу олакшао избор најповољнијег материјала за поједине индикације рестауративног поступка, данас се сматра да су величина честица и количина пуниоца основно полазиште за сврставање, односно класификацију композитног смоластог материјала.

Задњих деценија догодила су се значајна побољшања у развоју нових композитних материјала. Смањењем величине и повећањем квалитета честица пунилаца, побољшањем адхезије између органске матрице и пунилаца, увођењем мономера ниже молекуларне тежине побољшана је полимеризација и олакшано руковање композитним материјалом. Ово је условило мало другачију поделу композитних материјала погоднију за употребу у клиничкој пракси, а то је подела на основу величине честица, удела неорганског пуниоца и физичких својстава честица пунилаца:

- композитни материјали са микропуниоцима
- хибридни композитни материјали
- нанохибридни композитни материјали
- густо пуњени композитни материјали
- течни композитни материјали.

7.2.1 Композити са микропуниоцима

Композити са микропуниоцима имају запремински удео пунилаца (ЗУП) између 20-59 %, просечну величину честица (ПВЧ) од 0,04-0,75 микрометара, запреминску контракцију (ЗК) од 2-3 %. Ови композити су настали због потребе да се материјал побољшаних физичко-механичких карактеристика употреби у подручју предњих зуба, с тежњом да искаже виши степен површинске полираности од хибридног материјала. Честице мање величине осигуравају бољу полираност и сјај површине, сличан материјалу са микропуниоцима, задржавајући притом висок степен отпорности на хабање.

7.2.2 Микрохибридни композити

Хибридни композити имају ЗУП између 57-72 %, ПВЧ од 0.2-3 микрометара, ЗК од 1.6-4.7 %. Настали су као потреба да се уједине предности добре површинске полираности композитних смола са микропуниоцима и висока отпорност на хабање композита са макропуниоцима. На тај начин се избегавају најважнији недостаци и једне и друге врсте и настаје нови хибридни композитни материјал. Неоргански пунилац садржи кварц, борсиликатно стакло, стронцијум, цирконијум, аморфни силицијум, литијум и алуминијум флуоросиликатно стакло. Овакав састав, поред наведеног осигурава веома добра физичко-механичка својства од композита са микропуниоцима, већи степен конверзије и отпорности на апсорпцију воде, а тиме и нижи степен биодеградације, што значајно утиче на дуговечност рестауративног захвата.

7.2.3 Нанохибридни композити

Нанохибридни композити имају ЗУП између 58-71 % , ПВЧ од 0.0015-0.05 микрометара, ЗК од 2-3.4 %. Испитивања су показала да нанохибридни композити имају унапређена естетска и механичка својства у односу на микрохибридне композите. Услед мале величине честица пуниоца ови композити имају побољшана механичка својства, као што је повишена савојна чврстоћа, повећана отпорност на хабање, смањена запреминска контракција приликом полимеризације.

7.2.4 Густо пуњени композити

Густо пуњени композити имају ЗУП између 43-61 %, ПВЧ од 0.7-0.8 микрометара, ЗК 2.6-3.4 %. Ово је материјал који се може сматрати алтернативом денталном амалгаму, јер се показало да су рестаурације зуба са досадашњим композитима показале бројне недостатке, као што су: проблеми у обликовању апроксималних контактних делова, постојаност боје и облика, ивична адаптација и постоперативна осетљивост зуба. Материјал је препоручен као идеално средство које се може нанети у кавитет слично амалгаму. Сматрало се да је на тај начин могуће постићи оптималне апроксималне контактне односе, заобљење ивица, као и високу отпорност на хабање и очување анатомског изгледа рестаурације. Нажалост ови материјали нису испунили сва очекивања јер су испитивања показала да хибридни композитни материјали уз оптималну примену дају боља физичко-механичка и естетска својства од густо пуњених.

7.2.5 Течни композити

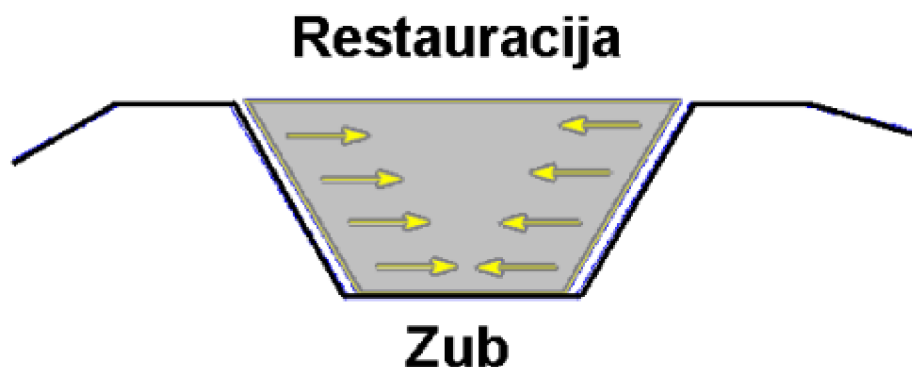
Течни композити имају ЗУП између 30-55 %, ПВЧ од 0.6-1 микрометара, ЗК од 4-8 %. Течне композитне смоле уведене су у клиничку праксу 1995 године, као материјал који омогућује брже, боље и једноставније руковање. Због свог састава имају нешто лошије физичко-механичке особине од осталих композитних материјала, али изражена способност течења материјала и нижи модул еластичности даје им способност доброг подношења напона и самим тиме предност у неким специфичним индикацијама.

7.3. Механичке карактеристике композита у стоматологији

Већ је наведено да композити који се користе у стоматологији морају да поседују одговарајуће физичко-механичке особине које подразумевају тврдоћу, чврстоћу, отпорност на савијање, отпорност на хабање, топлотну и електричну проводљивост итд. На основу ових карактеристика одређује се квалитет одређеног материјала, па се у складу са тим неке особине сматрају пожељним, а неке не. Као непожељне се издвајају полимеризационо скупљање, топлотна и хидро експанзија.

Већина композита на бази смоле, која се користи у рестауративној стоматологији имају заједничку особину да полимеризују слободне радикале метакрилата или се умрежавају током катјонске полимеризације са отварањем прстенова. Ти процеси мењају запремину материјала, што доводи до појаве настанка напона на споју зуб-рестаурација, познату као контракциони напон. Такав напон настаје у композитној маси и преноси се на адхезивну везу и зубну површину, што често ствара оштећење квржица и микро прслине у глеђи и дентину, што код пацијената узрокује постоперативну осетљивост зуба. Полимеризацијски напона може угрозити маргинални интегритет зуба и рестаурације, омогућити продор бактерија између испуне и зуба и на крају довести до настанка маргиналне дисколорације, секундарног каријеса, оштећења дела зуба, упале зубне пулпе.

Напрезање на адхезивном споју зуб-композит и у зубу зависе од облика кавитета, величине, Ц-фактора, модула еластичности зуба и композита, брзине полимеризације и степена конверзије. Сви наведени фактори су међусобно повезани и сложено делују и проузрукују полимеризацијске напоне.



Слика 8.1 Напон услед полимеризацијске контаркције [5]

На појаву напона највише утичу:

- запремина и конфигурација кавитета
- својства смоластог материјала
- техника постављања материјала (постављање у слојевима одговарајуће дебљине)
- полимеризација материјала.

Модерни композити при полимеризацији изазивају контракције од 2.6-4 %, при чему ни адхезивини системи који стварају снажне везе, јаче од 20 Мра, а које су снажније од напона изазваног контаракцијом, понекад не могу поднети напрезања и тада почиње одвајање и стварање напрелина. Деформисање зидова кавитета може делимично компензовати контракцијске напоне код композита у кавитетима на бочним зубима, с тим што полимеризацјска контракција може проузроковати прослине и потпуне фрактуре квржица.

Топлотна експанзија композитних смола огледа се у топлотном ширењу материјала услед сталних промена температуре у усној шупљини, а која опет зависи од коефицијента топлотног ширења материјала.

Хидро експанзија настаје усред апсорпције воде из усне дупље, а као последица тога јавља се ивична обојеност и пукотина која омогућава пролазак бактерија до зубне пулпе.

7.4 Композитне зубне надокнаде

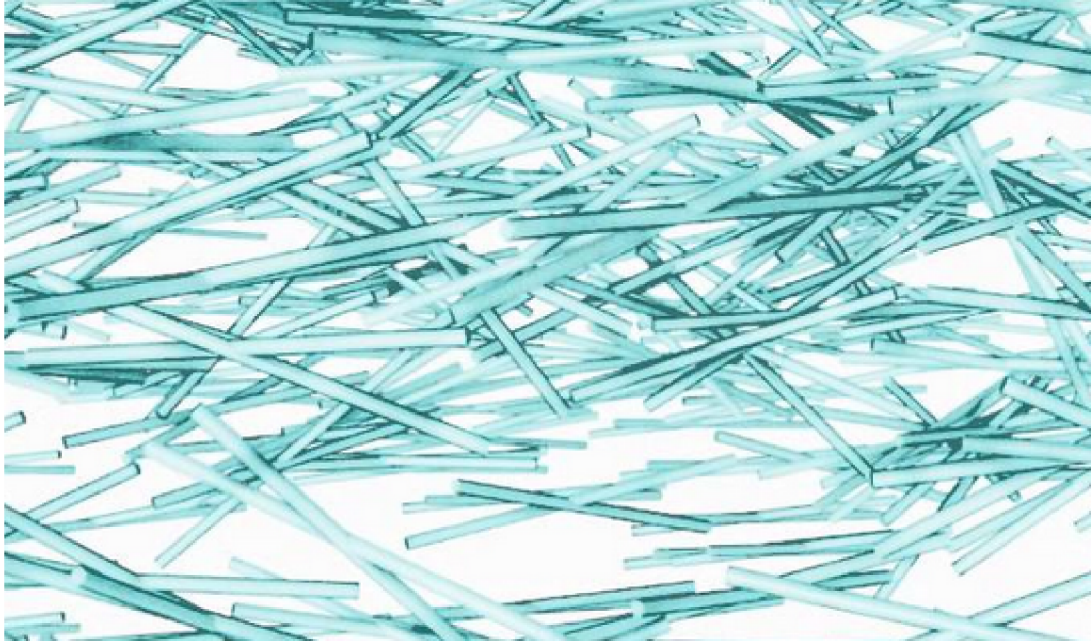
Примена композита ојачаних влакнима у стоматологији се најчешће односи на замену оболелих зуба или оштећених делова зуба. Замена оштећених зуба подразумева уградњу моста, који се може постављати директно у усној дупљи. У зависности од потреба пацијента, елемент причвршћивања може бити инлеј, онлеј, оверлеј, круница итд (Слика 7.4.1). Ови елементи се постављају на оштећене зубе а у зависности од тога да ли је потребно прекрити горњу површину зуба или не, бира се онлеј односно инлеј. Ако је каријес захватио целу површину зуба, поставља се оверлеј. Након изабране зубне надоканде, следи постављање исте на зуб.



Слика 7.4.1 Врсте зубних надокнада [10]

Мостови израђени од композита ојачаних влакнима имају веома добре механичке карактеристике и дуг век трајања. Један од таквих материјала је everx posterior састављен од полимера ојачаног кратким влакнима. Оваква структура је показала изванредна механичка својства и као таква се користи за замену оштећеног зубног ткива (дентина), вршећи улогу колагена и обезбеђујући додатну чврстоћу зуба. У случају коришћења класичних композита и великих оптерећења којима су зуби изложени, а због чињенице да њихова структура ни приближно није слична структури дентина, постоји могућност појаве

прслина, њихове пропагације и лома зуба до нивоа где било каква поправка више није могућа. Evrex posterior је због своје структуре и састава имун на појаву преслина и пропагацију зубне структуре што га чини материјалом избора за масивну репарацију зубне структуре. На слици 7.4.1 је дата структура Evrex posteriora.



Слика 7.4.1 Структура Evrex posteriora[11]

8. Вlakнима ојачане протезе

Један од циљева стоматологије се огледа у развијању протеза које са једне стране не садрже метал, а поседују добре механичке особине. Познато је да метали поседују високу чврстоћу, која је битна за израду протеза. Са естетског аспекта овакве протезе нису најбоље решење. Као алтернатива металима наметнуле су се керамике и полимерни материјали, који су све заступљенији у стоматолошкој пракси.

Ове протезе могу бити направљене у лабораторији или директно у стоматолошкој ординацији од стране лекара. У оба случаја као материјали се користе лаке полимеризоване хибридне мешавине, с тим да се у лабораторијским условима врши и потпуна полимеризација. На слици 8.1 је дат изглед протезе на бази полимера.



Слика 8.1 Пример протезе на бази полимера [7]

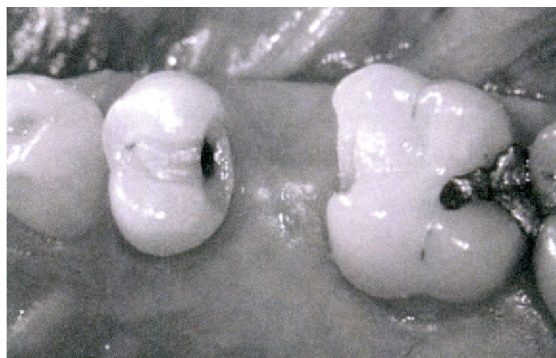
Влакнима ојачан материјал се састоји од матрице на бази смоле и влакана. Механичке особине зависе од комбинације влакана и матрице, врсте влакана и матрице, оријентације влакана и квалитета импрегнације влакана и матрице. Поједине врсте влакнима ојачаних материјала захтевају ручну импрегнацију од стране стоматолога, а у неким случајевима се користи препрег или преимпрегнат. Препрег је трака влакана која су делимично полимеризована смолом. Механичке карактеристике ових материјала пуно зависе од особина конституената. Влакнима ојачани материјали имају различите механичке карактеристике, а чврстоћа појединијх достиже 1000 МПа, што премашује чврстоћу племенитих керамичких легура. Основне врсте протеза направљене су у лабораторији и chairside (у преводу директно у зубарској столици) протезе.

8.1 Протезе направљене у лабораторији

Влакнима ојачане протезе направљене у лабораторијским условима могу да се постављају на зуб или на имплант. Битна карактеристика ових протеза је да садрже површину која не оштећује глеђ супротног зуба, а њихова јака неметална структура доприноси одличним естетским карактеристикама. Међутим, губитак површинског сјаја као и слабење отпора временом су негативне особине влакнима ојачаних протеза.

Ради обезбеђења постављања протезе на зубе који подржавају протезу, потребни су одговарајући композитни држачи, повезани са овим зубима. Поменути дражачи омогућавају појачано причвршћивање протезе на висину зуба. Поред тога, омогућавају коришћење конзервативних протеза, где се припреме за постављање зубне надокнаде извршавају на минимално обновљеном зубу који подржава протезу. Овакав дизајн моста

зубне надокнаде је неуспешан када се користи подструктура металног уметка и када држачи нису везани за одговарајући зуб. На слици 8.1.1 је дат поступак припреме за постављање протезе.



Слика 8.1.1 Поступак припреме за постављање протезе [7]

Истраживања су показала да је дизајн подструктуре кључан за успех влакнима ојачане протезе, направљене у лабораторијским условима. У том смислу, на зубни мост са вештачким зубима се поставља већи садржај подструктуре, чиме се повећава крутост зуба. Поред дизајна подструктуре, хемијско везивање глазури са влакнима ојачаном подструктуром је такође битан елемент за успех ових протеза. Одржавање ваздушног слоја на спољашњој површини подструктуре је од великог значаја за одржавање поменуте везе. Ове врсте протеза је могуће поставити и на имплант. Веза се може остварити лепљењем или уз помоћ вијака. Зубни импалнти се праве на посебним машинама а њихово постављање уз помоћ вијака подразумева постављање цилиндра са рупом за вијак чиме се добија интегрална компонента целе подструктуре. На слици 8.1.2 је дат изглед протезе са мини имплантима.



Слика 8.1.2 Протеза са мини имплантима [10]

Протезе које се постављају на зубне импланте и даље се се тестирају у циљу испитивања њихових карактеристика. Сама структура ових протеза, као и њихов дизајн су на веома високом нивоу.

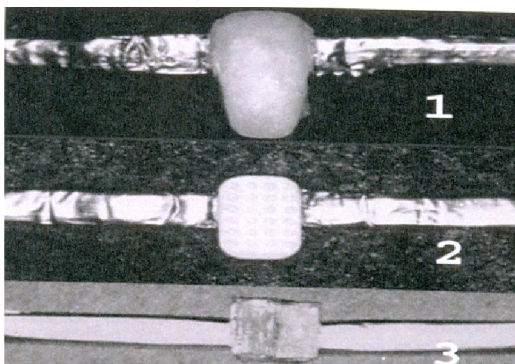
8.2 Chairside протезе

Други тип протеза су chairside протезе. Могућност израде зуба потпуне функције и високе естетеске вредности, при само једној посети зубару, уз миниамлну припрему зуба, суседног зубакоји подражава протезу је могућа захављујући композитним материјалима и савременим техникама лепљења. Поајачање физичких особина која влакна обезбеђују композиту, омогућава бољи приступ насупрот старијим методама где су се користиле зубне протезе у улози вештачких зуба. Примена овог приступа елиминише недостатке који настају услед некомпатибилности различитих хемикалија између композита и вештачког зуба у мосту од акрилне смоле. Осим тога ова метода обезбеђује много јачу везу између вештачког зуба у мосту и зуба који подражавају протезу.

Осим тога, бројна истраживања су усмерена на проналажење подструктуре, која ће обезбедити брзу израду платформе за зубни мост, који би се поставио приликом посете зубару. Тиме се избегава фабричко прављење моста и непотребан губитак времена. Успешност ове методе зависи од способности зубара да направи протезу на начин на који се прави у фабрици.

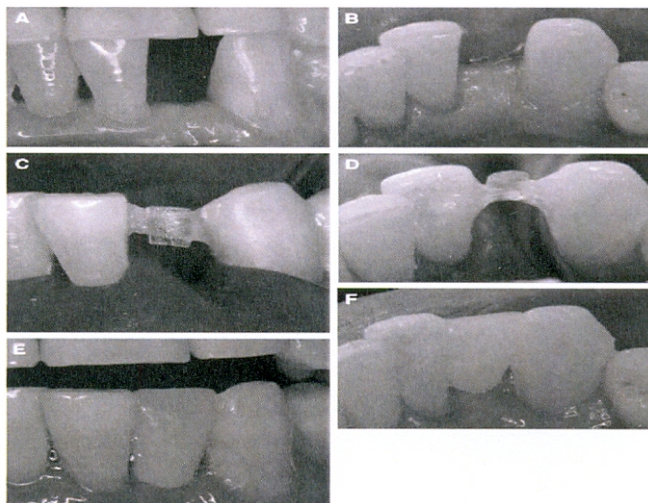
Влакнима ојачан композит се може преобликовати у структуру која садржи полимеризоване елементе, као и елементе на којима није извршена полимеризација. "Крило" представља неполимеризован елемент који обезбеђује везу два суседна зуба који подражавају протезу. Ови зуби представљају полимеризовану целину, причвршћену за кост вилице. Вештачки елемент је чврст, због извршене полимеризације и састоји се од композита са једносмерним влакнима. Након постављања крила за зуб који подржава протезу, зубар поставља навлаке на вештачки полимеризовани елемент. Оваква структура може бити дизајнирана тако да садржи једно или два "крила" која омогућава приступ за два зуба, која подржавају протезу или може имати облик греде која пружа потпору за један зуб.

Током развојног процеса постојале су три генерације оваквог дизајна. За прву генерацију је карактеристичан скоро готов модел вештачког зуба, који замењује оне зубе који недостају. Друга генерација подразумевала је само основни облик вештачког зуба, док је даље усавршавање зуба (стављање глазуре) захтевало стоматолошку столицу. Трећи и тренутни дизајн се састоји од основног рама који пружа потпору вештачком зубу у мосту, а даље добијање облика и постављање се врши на столици. Овакав дизајн омогућава универзалан приступ, а како се постављање и обликовање врши на стоматолошкој столици, захтеви за процесом у фабрици су сведени на минимум. На слици 8.2.1 су приказана три типа дизајна.



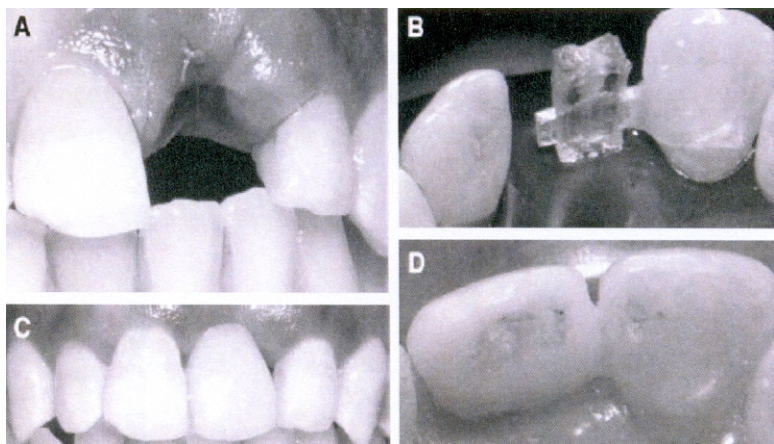
Слика 8.2.1 Три типа дизајна структуре [7]

Након постављања оваквих рамова, није дошло до лома моста приликом интеракције крила и глеђи. Тиме се показује да се јака веза између зубне глеђи и рама може остварити и без уобичајне механичке припреме. Рам може бити припремљен за подршку када је у питању једно или два крила у зависности од клиничког случаја. Крила се постављају без механичке припреме зуба. На слици 8.2.2 су приказани елементи крила.



Слика 8.2.2 Елементи "крила" [7]

На слици 8.2.2 је такође приказан клинички случај где је извршена замена оболелог зуба уз помоћ крилног елемента, који делује на два зуба који подражавају chairside протезу. Зуб је изолован а рам модификован тако да крила могу да се поставе између два зуба. Након лепљења и постављања рама у потребан положај, извршена је компресија над крилним елементом, како би се исти адаптирао зубним контурама. Поред крилног елемента у употреби је и елемент греде, који се поставља на само један зуб. Овај елемент је за пацијенте понекад погоднији избор због бржег захвата. На слици 8.2.3 приказани су елементи греде.



Слика 8.2.3 Елементи греде [7]

9. Закључак

Због својих карактеристика композитни материјали су нашли веома широку примену у разним областима где се захтева еластичност, висока затезна чврстоћа, отпорност на притисак, смицање, високу температуру, корозију, хемијске утицаје и сл. Највише се употребљавају у авио-индустрији, бродоградњи, аутомобилској индустрији, а своју област примене су нашли и у хуманој медицини, посебно у стоматологији. Специфична чврстоћа композита (однос чврстоће и густине) на бази полимера и угљеничних влакана је до 4 пута већа него специфична чврстоћа легура Алуминијума и Титанијума (главни материјали у конструкцији тупа авиона), уз до 2 пута већу специфичну крутост, су карактеристике које су обезбедиле композитима широку употребу у изради делова летелица. Због своје мање масе и густине употребом у конструкцију летелица допринели су свеукупном смањењу њихове масе, што се позитивно одразило на смањену потрошњу горива и мање трошкове, самим тиме и мање загађење околине. Због своје природе могу се обликовати у веома сложене форме, које није могуће остварити са класичним материјалима, што је допринело скараћењу времена потребног за израду дела, и потребног броја позиција у оквиру склопа, а самим тиме је смањена потреба за додатним причвршћивањем и спајањем. Предности оваквог приступа су вишеструке јер се смањује број потенцијално опасних места за иницирање прскотине, будући да су вијци, закивци и отвори места концентрације напона. Елиминацијом горе наведених недостатака добија се квалитетнија и поузданија конструкција (склоп), која у крајњем случају доприноси дужем радном веку производа. Све ово наведено се такође односи на употребу композитних материјала и у другим областима и гранама индустрије.

Посебан осврт је направљен на употребу композитних материјала у области стоматологије. Захваљујући својим својствима у потпуности су заменили амалагаме, а њихова естетска улога је непроцењива. Поред замене материјала за израду зубних импланта и накнада, композити веома успешно мењају и металне протезе. Њихов естетски значај, који је атрактиван како за пацијента тако и за стоматолога, је основа да даље истраживање ових материјала у циљу унапређења и отклањања неких недостатака везаних за механичке особине.

Добијање природне и лепе стоматолошке композиције, која задовољава функције за које је намењена је дугорочни циљ денталне медицине. Захваљујући композитним материјалима и њиховом развоју, остваривање овог циља се спроводи, што ову грану медицине подиже на виши ниво.

Литература

1. Др. Драган Милосављевић, **Влакнима ојачани композити у индустрији моторних возила**-зборник радова, 1995
2. Левићанин С. Мирослав, **Испитивање на унутрашњи притисак цилиндричне коморе танких зидова од композитног материјала**,specijalistički rad, Машински факултет Крагујевац, 1998.
3. Милорад Јовановић, Вукић Лазић, Д. Арсић, **Наука о материјалима I** (рукопис) Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац 2017
4. Hull D. , Clyne T.W. , **An introduction to composite materials** second edition, 1996
5. Милошевић С. Милош, **Тродимензионална оптичка анализа деформација полимеризацијске контракције стоматолошких композитних материјала на бази смоле**, докторска дисертација, Машински факултет Београд, 2012
6. Војић Николина, **Улога композитних материјала у естетском збрињавању предњих зуба**, дипломски рад, Стоматолошки факултет Загреб, 2015
7. Цвијовић Тијана, **Примена композитних материјала у стоматологији**, семинарски рад из предмета Влакнима ојачани материјали, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2015
8. <http://www.hexion.com/epoxyphenoliccomposites/automotive/prepreg/>
9. <http://crest3dwhitesarajevo.blogspot.rs/2013/06/kompoziti-u-stomatologiji-bijele-plombe.html>
10. <http://dentalspa.co.rs/usluge/protetika/129-caddam>
11. <http://www.gcaustralasia.com/everx-posterior.html>
12. <http://www.beogradskiosmeh.com/mini-implanti/>
13. Сања М. Јанковић, **Обрадљивост полимерних композитних материјала високе чврстоће**, магистарска теза, Машински факултет Београд, 1993
14. Милан Брекић, Спасоје Драпић, Јелица Брекић, **Машински материјали за III разред усмереног образовања машинске струке**, Београд 1984

