

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



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Механика

Број индекса: 524/2015

Маријана Р. Сталевић

**Примена и механика нових материјала у
наменској индустрији**

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Гордана Богдановић, ванредни професор – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог дипломског рада кандидат треба да:

Сагласно знању и компетенцијама које је стекао на предметима Механика 1, 2 и 3, као и на студијском усмерењу, треба да кроз литературу проучи и класификује материјале који се користе у наменској индустрији.

Очекује се, такође, да проучи нове материјале који се данас употребљавају са посебним освртом на механику влакнима ојачаних материјала и функционално градијентних материјала и предложи и конкретне могућности њихове примене.

Препоручена литература:

Ивица Смојвер, *Механика композитних материјала*, Загреб, 2007.

L. N. Phillips, *Design with Advanced Composite Materials*, London, 1989.

Крагујевац, 2019.

Ментор:

др Гордана Богдановић, ванредни професор

Садржај:

1. Увод.....	1
2. Челик и његова подела	2
2.1 Примена челика у наменској индустрији	2
2.1.1 Челици за цеви артиљеријских оруђа	3
2.2.2 Испитивање механичких особина материјала	5
3. Нови материјали високе границе еластичности	7
4. Полимерни материјали	8
4.1 Састав пластичних маса.....	8
4.2 Основна структура и подела полимера	10
4.3 Предности и недостаци полимера	13
4.4 Примена полимерних материјала у наменској индустрији	14
5. Композитни материјали.....	18
5.1 Особине и класификација композита	19
5.2 Класификација композита према природи конституената	24
5.3 Конституенти композитних материјала	25
5.3.1 Влакна	25
5.3.1.1 Угљенична, карбонска и графитна влакна и њихове особине.....	26
5.3.1.2 Арамидна влакна и њихове особине.....	27
5.3.1.3 Стаклена влакна и њихове особине	29
5.3.1.4 Силицијум карбид и његове особине	30
5.3.1.5 Кварцна влакна и њихове особине	30
5.3.1.6 Полиетилен ултра високе молекулске масе и њихове особине.....	31
5.3.2 Матрица.....	31
5.3.2.1 Композитни материјали са полимерном матрицом	32
5.3.2.2 Композитни материјали са металном матрицом	33
5.3.2.3 Композити са керамичком матрицом	34
5.4 Запремински и масени удео	35
5.4.1 Запремински удео	35
5.4.2 Масени удео	36
5.4.3 Однос између запреминског и масеног удела	36
5.5 Механика композитних материјала.....	38

5.5.1 Микромеханика композитних материјала	38
5.5.2 Макромеханика композитних материјала	38
5.6 Примена композитних материјала у наменској индустрији	39
6. Функционално градијентно распоређени материјали	41
6.1 Подела функционално градијентних материјала	48
6.2 Примена функционално градијентних материјала	49
7. Закључак	50
Литература	51

Резиме

Предмет дипломског рада „Примена и механика нових материјала у наменској индустрији“ јесте теоријски и практични осврт на наведену тематику. Први део односи се на механичка својства и примену челика. Затим, следи део који се односи на полимерне материјале, те на њихова својства и примену у наменској индустрији. Срж рада чине композитни материјали, који се састоје од континуалне и дисконтинуалне фазе. Композитни материјал је вишефазни материјал чије фазе имају физичке особине, које се међусобно разликују, тако да материјал поседује боље карактеристике од компоненти појединачно посматрано. На крају, дат је посебан осврт на функционално градијентно распоређене материјале, који као група савремених материјала у породици инжењерских композита добијају све ширу примену. Циљ је да се одговарајућим комбиновањем материјала његове особине искористе на најбољи могући начин.

Кључне речи: *челик, полимерни материјали, композитни материјали, наменска индустрија, функционално градијентно распоређени материјали.*

Abstract

The goal of the final exam “Applications an mechanics of the new materials at the immediate destinations“ is theoretical and practical view of the subject above mentioned. The first part refers to the mechanical features and applications of steel. Next part appertains to polymers, their feautures and application. The core of the work are composite materials, which contain of continuous and discontinuous phase. Composite material is multiphase material whose phases have better properties which differ from each other, so that the material has better performanse than components separately. At the end, an end review of functionally graded materials (FGM) appears, as a group of modern materials in the family of engineering composite materials, which are being increasingly used. Aim is the best use of their characteristics by combining adequatly the potentials of available materials.

Keywords: *steel, polymeric materials, composite materials, dedicated industry, functionally graded materials.*

1. Увод

Под појмом материјал подразумева се полупроизвод који служи за даљу прераду у готове производе. Када посматрамо ширу слику, технички материјали могу да буду: машински, грађевински, електротехнички, текстилни. У даљем тексту, посебан осврт ће бити на метале и металне легуре, полимере, композите као и керамике намењене за различите конструкције.

Данас постоји широк асортиман инжењерских материјала који се могу употребити за израду различитих делова машина и уређаја. На располагању су три класе конструкционих материјала: метали, керамике и полимери, чијом се комбинацијом могу добити сложени материјали звани композити, о којима ће у даљем делу рада бити речи.

Постоје бројни захтеви које одређен материјал својим особинама треба да задовољи. Будући да не постоји конструкциони материјал који подједнако испуњава све захтеве, као што су на пример: својства отпорности и деформације, тврдоће и сл., стога се при избору материјала полази од радних услова елемената или конструкције и технолошких могућности прераде тог материјала.

Изузев техничке и технолошке карактеристике, увек је неопходно имати у виду цену, као и век трајања, који зависи од радних услова праћених хабањем, корозијом и радом на високим и ниским температурама, као и старењем. Све корисне особине материјала произилазе из грађе атома, међуатомских веза као и кристалне структуре металних материјала.

И поред све веће примене полимерних, композитних, керамичких и других нових материјала, још увек се у машинству употребљавају метални материјали, пре свега легуре гвожђа-челици и ливена гвожђа. Њихова главна предност, односно предност металних над неметалним материјалима јесте изузетна комбинација карактеристика механичке отпорности (јачина, напон течења, модул еластичности, жилавост) и деформационе способности (истегљивост, контракција, односно својства пластичности).

Разна истраживања показују, да ће се и даље употребљавати метални материјали, што доводи до тога, да им се пажња још увек треба посвећивати, како у развоју тако и у примени.

Ипак, тежи се да се метали замене савременим материјалима: полимерима, композитима, синтерованим материјалима, алатном и конструкционом керамиком, где год је то могуће.

2. Челик и његова подела

Челици садрже 2.11% угљеника па се могу обрађивати пластичним деформисањем (ковањем, ваљањем) било на собној или повишеној температури. Поред прераде деформисањем на хладно или топло, корисне особине челика могу се добити различитим видовима термичке обраде.

Данас се производи преко хиљаду различитих челика, па је неопходно извршити одређену класификацију, како би и сам избор купцима био једноставнији.

Челици се могу поделити [1]:

1. према хемијском саставу на угљеничне и легиране,
2. према намени на конструкционе, алатне, специјалне,
3. према структури на феритне, перлитне, аустенитне, бејнитне, ледебуритне, мартензитне,
4. према начину производње на Томасове, Бесемерове, конвекторске, електрочеличне,
5. према квалитету, односно садржају фосфора и сумпора на челике обичног квалитета, квалитетне челике, челике високог квалитета и племените челике,
6. према облику и стању испоруке полуфабриката на ваљане, вучене, коване, ливене, пресоване, љуштене, брушене.

2.1 Примена челика у наменској индустрији

Велики број делова, како пешадијског тако и артиљеријског наоружања се израђује од челика. У зависности од оптерећености делова у експлоатацији, за израду се користе челици различитих квалитета, али и механичких особина.

За мањи број делова, као што су клипови клипача у противтрзајућем уређају, пужни точкови, огрлице за минобацаче, предње и задње плоче кутија ракетних лансера и др. се израђују од обојених и лаких легура.

Према литератури [2] постоји подела челика за израду делова наоружања у три групе:

1. Челици за цеви
2. Челици за затвараче, задњаке, коморе и друге високооптерећене делове,
3. Конструкциони челици за остале делове.

Такође, на основу изведене поделе, постоји и подела челика за цеви, у зависности од тога да ли су намењени за цеви:

1. Стрељачког наоружања,
2. Минобацача,
3. Артиљеријских оруђа (топова и хаубица),
4. Ракетних лансера.

Затварачи, задњаци, коморе бестрзајних оруђа и још неки високооптерећени делови израђују се од челика, чији се квалитет и прерада прописују одређеним техничким условима. У циљу смањења асортимана челика који се раде по посебним техничким условима, за наведене делове се користе челици од којих се израђују цеви оруђа. Сви остали делови се израђују од челика за побољшање (Ћ.1430, Ћ.1730, Ћ.4730, Ћ.4130, Ћ.4734, Ћ.5432) челика за цементацију (Ћ.1220, Ћ.4720) и угљеничних конструкционих челика (Ћ.0362, Ћ.0562). За остале делове као што су цилиндри и клипњаче противтрзајућих система, зупчаници и зупчасти сектори, кракови, лафети оруђа, као и задњаци минобацача израђују се од висококвалитетних челика (Ћ.4730, Ћ.4734 и Ћ.5432). Делови наоружања се израђују од полуфабриката, који су: отковци, одливци, отпресци, те разни шипкасти и други профили, добијени ваљањем. Полуфабрикати делова оруђа, израђивани су као слободни отковци, што је поскуљивало оруђа и капацитети ковачница су били преоптерећени на неки начин. У наредном периоду, развојем технологије топлог ваљања бешавних цеви, прешло се, самим тим, на полуфабрикате од бешавно ваљаних цеви. [2]

Овај начин производње, примењен је код минобацача, за израду цеви, као и за цеви ракетних лансера и бестрзајних топова и огледа се у томе да постоје различити поступци, који се, мање или више разликују један од другог. Сви поступци имају заједничку особину, а то је да се добијају обрадом у два дела. У првом делу производње челични блок, како изађе из ваљка, у топлом стању буши се пробијањем помоћу специјалног трна, па се затим одмах приступа другом делу обраде, који се састоји из ваљања тј. издужења врелог блока и довођења на облик готових цеви са предвиђеном дебљином зида. [2]

2.1.1 Челици за цеви артиљеријских оруђа

Посебне физичко-механичке особине морају имати челици који се примањују за израду цеви артиљеријског оруђа, који се односе на [2]:

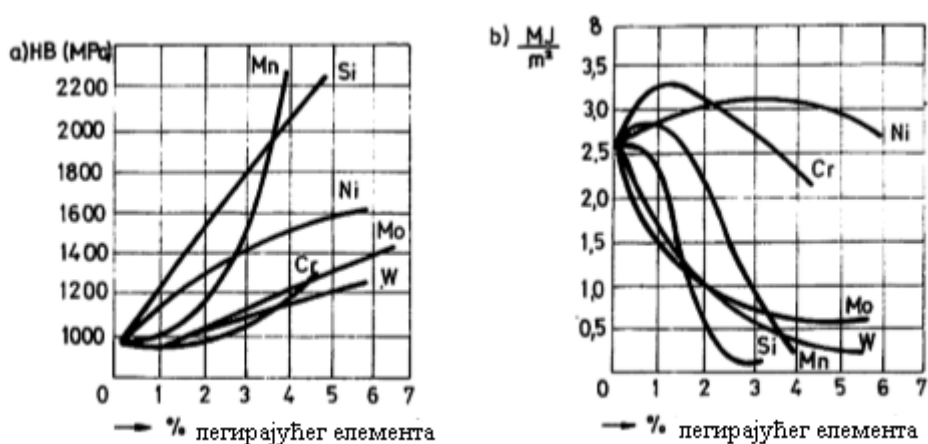
- високу чврстоћу, добру еластичност и жилавост, из разлога да, при високим притисцима барутних гасова не би дошло до пластичних деформација, прскотина и разарања,
- довољну тврдоћу и високу отпорност на ударна оптерећења и механичка трења,
- хомогену структуру без неметалних укључака по дужини и у било ком попречном пресеку полуфабриката,
- високу отпорност на хемијска дејства продуката сагоревања и утицај атмосфере,
- низак интензитет ширења прслина.

Свака од ових особина има свој значај у сваком сегменту животног века цеви оруђа. Како цев представља основни и најважнији део оруђа, у ком се врши опаљење метка, што карактерише појаву изузетно високих притисака и температуре, неопходно је да те особине буду задовољене, како применом одговарајућих материјала, тако и начином производње. [2]

У експлоатацији, цеви гађају у условима околине од -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$, што поред високих напрезања, која су изазвана притиском барутних гасова, додатно повећава сложеност самог напонског стања.

Жилавост се, јасно, при негативним температурама знатно смањује, па челици који се примењују треба да располажу довољном резервом жилавости на нормалним температурама. Насупрот томе, челици који не располажу довољном резервом у жилавости, при негативним температурама околине, прелазе у критично подручје кртости. Разарању жилавих челика претходи појава пластичне деформације, док челицима с ниском жилавости, односно кртим челицима, разарању не претходи пластична деформација. Углавном, од легирајућих елемената се тражи да челику за цеви дају високу чврстоћу, потребну резерву у жилавости и добру прокаљивост. Један од тих јесте никал који својим присуством омогућава побољшање наведених карактеристика. Такође, молибден је тај који побољшава механичке особине и прокаљивост челика. Данас се најчешће цеви израђују од челика који је легиран никлом и молибденом, па самим тим нису склони појави отпусне кртости. То је од великог значаја за цеви, јер се приликом гађања цев загрева до температуре од око 400°C. [2]

Утицај осталих легирајућих елемената на чврстоћу и жилавост челика је према литератури [2] дат на дијаграмима:



Слика 1. Утицај легирајућих елемената на својства ферита:

а) утицај на тврдоћу, б) утицај на жилавост [1]

Челици се могу легирати и хромом у случају да су никл и молибден дефицитарни. За израду цеви се могу користити и угљенични челици, у појединим околностима. Такве цеви, односно цеви израђене од угљеничних челика се користе као облоге вишеделних цеви или се од таквих челика израђују цеви стрелачког наоружања за које се прописују смањени режими гађања. Захтеви за одређена механичка својства који се прописују код цеви јесу: граница еластичности, граница развлачења, затезна чврстоћа, жилавост, контракција, издужење и жилавост лома. [2]

2.2.2 Испитивање механичких особина материјала

Механичке особине материјала од кој је израђен део карактеришу одређени параметри, који ће у даљем делу бити наведени. [2]

1. Граница пропорционалности је граница до које још увек постоји пропорционалност између напрезања и издужења. Напон на граници пропорционалности се одређује према обрасцу:

$$\sigma_{pr} = \frac{F_{pr}}{A_0} (MPa) \quad (2.1)$$

2. Граница еластичности при затезању је максималан напон који у материјалу изазива трајно издужење од 0,002% почетне дужине епрувете. Напон на граници еластичности се одређује према обрасцу:

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} (MPa) \quad (2.2)$$

3. Граница развлачења је најмањи напон при којем се епрувета деформише без приметног повећања оптерећења. Напон на граници развлачења се одређује по обрасцу:

$$\sigma_v = \frac{F_v}{A_0} (MPa) \quad (2.3)$$

4. Граница развлачења $\sigma_{0,2}$ је напон при коме се епрувете трајно деформишу за 0,2% у односу на почетно стање. Како се код великог броја материјала не може јасно одредити граница развлачења σ_v , па се код тих материјала граница развлачења означава као $\sigma_{0,2}$ и одређује се по обрасцу:

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0} (MPa) \quad (2.4)$$

5. Затезна чврстоћа је напон који одговара максималном оптерећењу, након којег долази до прекида материјала. Затезна чврстоћа се одређује према максималној сили затезања по обрасцу:

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_0} (MPa) \quad (2.5)$$

6. Сужење пресека је процентуално смањење површине пресека на месту прелома. Одређује се по обрасцу:

$$\sigma = \frac{l_l - l_0}{l_0} \cdot 100(\%) \quad (2.6)$$

7. Контракција или сужење пресека је процентуално смањење површине пресека на месту прелома. Одређује се по обрасцу:

$$\psi = \frac{A_0 - A_l}{A_0} (\%) \quad (2.7)$$

8. Жилавост материјала или чврстоћа на удар при савијању је утрошени рад на лом епрувете, сведен на јединицу попречног пресека епрувете. Одређује се по обрасцу:

$$\rho = \frac{N}{A} (J) \quad (2.8)$$

Цеви оруђа које се испитују са притиском барутних гасова од 3000 до 4000 МПа, треба да имају границу пропорционалности изнад 800-900 МПа, а жилавост од 30 до 40J. Граница развлачења испитана на различитим дисковима код цеви, може да се разликује од 50 до 80 МПа, при чему ова одступања морају бити изнад прописаних захтева, а при томе се не сме смањити жилавост и контракција. Смањење границе развлачења у односу на прописану вредност допушта се на једној до две испитане пробе до 10 МПа. Код жилавости се дозвољава негативно одступање на једној од две испитане пробе за 10-15%, с тим да збир жилавости код тих епрувета буде у границама прописане вредности. У случају да се понавља термичка обрада полуфабриката, онда се понављају и сва испитивања. Уколико се жели оценити отпорност челика кртом лому, постоји метод који је заснован на теорији ширења прскотина у материјалу. [2]

3. Нови материјали високе границе еластичности

Примена ових материјала почела је шездесетих година. Високе механичке особине постигнуте су легирањем са максималном количином никла, уз смањење угљеника, фосфата и сумпора до минимума.

Ови челици спадају у мартензитне челике, који старењем на температурама од 450°C до 525°C, добијају максималне механичке особине. Старење мартензитних челика настаје услед легирања са титаном, алуминијумом, манганом, молибденом, гвожђем, силицијумом, а титан и алуминијум, као легирајући елементи, знатно повећавају чврстоћу челика. Молибден јесте тај који знатно побољшава пластична својства код ових челика. [2]

Код савремених средстава наоружања захтева се задржавање високих механичких особина код цеви и при температурама од 400°C, до који се цеви загревају при максималном режиму гађања. Класични челици, код којих је након каљења извршено отпуштање на температурама нижим од наведених, при максималним режимима гађања имају пад механичких особина услед накнадног отпуштања изазваног високом загревању цеви. Тај пад механичких особина може под притиском барутних гасова да изазове разарање цеви са сниженим механичким особинама, па се у таквим случајевима мора ограничити режим гађања или повећати маса цеви.

4. Полимерни материјали

Као што је већ речено, многобројна истраживања показала су да ће се и даље употребљавати метални материјали, па им на неки начин још увек треба посвећивати пажњу. Где год је то могуће, тежи се да се метали замене савременим материјалима: полимерима, композитима, синтерованим материјалима, алатном и конструкционом керамиком.

Термин полимер је настао од грчке речи поли, што значи много и мерос, што значи део. Полимери су, у суштини, материје које су изграђене од макромолекула, па се још називају и макромолекуларним једињењима. [3]

Полимер + додаци = Пластичне масе

Полазне сировине које се користе за производњу пластике су минералног или органског порекла. Минералне сировине које улазе у састав су нафта, угаљ и земни гас, од којих се израђују основна хемијска једињења за даљу прераду. Тако добијена хемијска једињења се преводе у полупроизводе који могу бити у облику гранула, течности, смола и друго. Процес прераде полупроизвода у финалне огледа се само у промени облика гранула, течности и смола. Даљи процес прераде ових полупроизвода у финалне утиче, не само на промену облика и структуре, већ и на промену хемијских веза које чине основу материје. [3]

Све је већа примена пластичних маса у различитим гранама индустрије, првенствено због широког опсега физичких и оптичких особина, а такође и због ниже цене коштања, својства да су лаганије и хемијски издржљивије. Многе пластике имају могућност термозаваривања, лако се штампају, могу бити интегрисане у производне процесе, где је паковање формирано, напуњено и затворено у истој производној линији. Могућност поновне прераде и рециклаже, још једна је у низу предности које се пре свега испољава гледано са економског или еколошког аспекта. У погледу недостатака, пластични материјали имају променљиву пропустљивост за светлост, гасове и пару. [3]

4.1 Састав пластичних маса

Састав пластике или пластичних маса је из полимер-синтетичких смола као основних компоненти, и у мањем или већем обиму додатних материјала као што су пластификатори, пунила боја, а понекад и мазива, стабилизатори и очвршћивачи. Такође, пластична маса може бити сачињена само из полимера. Додатни материјали, који пластичној маси побољшавају одређена својства су веома бројни и њима се квалитет пластичних маса знатно увећава. [3]

Пластификатори (омекшивачи) су органска једињења, хемијски активна, која се понекад додају у веома великим количинама у циљу повећања пластичности производа.

Односно, пластификатори су материје у којима се полимери растварају, тј. набубре, што изазива промену њихових својстава, првенствено повећања еластичности на рачун затезне чврстоће и тврдоће, као и измену неких физичко-хемијских својстава, у првом реду снижења температуре топљења. Побољшање својстава полимерних материјала додавањем пластификатора, у току производње или касније, назива се пластификацијом или омекшавањем. Пластификатори су већином естери дикарбонских киселина.

Најпознатији су дибутил-фталат, диоктил-фталат, дихексил-себацат, дилаурил-адипат, диамил-малеат и 2-етилхексил-сукцинат. Најчешће се у течном (уљаном), а понекад и у чврстом агрегатном стању. [3]

Пунила су фино прашкасти, плочасти или кугласти додаци, али и врло кратка влакна, која се додају полимерима у веома малој количини, од 5 до 25%. Пунилина се могу мењати и побољшавати различита основна својства полимера, као што су: чврстоћа, тврдоћа, жилавост, електрична проводљивост, способност електричне и топлотне изолације, постојаност облика, корозивност, а може и снизити цену полимерног материјала. Тако, на пример, калцијум-карбонат (креда, доломитно брашно) појефтиније различите пластомерне производе и повећава ударну жилавост. Каолин и листичасти силикати (талк, азбест), који се употребљавају и као ојачивачи, повећавају антикорозивност, чврстоћу и електроизолацијска својства дуромера и пластомера. Природне и синтетичке врсте силицијум-оксида (аморфна и микрокристална врста, кварц, камен, песак) служе за пуњење пластомера, дуромера, еластомера, повећавају чврстоћу, тврдоћу и жилавост те тако смањују трошност материјала. Баријум-сулфат се употребљава као тешко пунило за полиуретанем калцијум-сулфат као безбојно пунило за пластомере и дуромере. Силикатна и стаклена пунила у облику ситних куглица поспешују могућност прераде полимера. [3]

Боје и пигменти служе да дају боју пластичној маси, а уз то повећају хемијску и термичку стабилност. Боје се лако мешају са полимерима и одликује их широк спектар нијанси. Од пигмената се употребљавају и неоргански (оксиди титана, цинка, гвожђа, олова, хрома, кадмијума и др.), и органски, који су нестабилнији. [3]

Мазива се користе као додаци да се смањи трење, такође у циљу смањивања површинског слоја и адхезије (спољна мазива) и олакшавање прераде (унутрашња мазива). Спољашња мазива се углавном мешају с полимером и стварају мазиви слој између мазива и металних површина. [3]

Према полимерном материјалу, примењују се следећа спољашња мазива: парафини, полиолефини, органски фосфати, високомолекуларне масне киселине, алкохоли, амини и амиди са више од 12 угљеникових атома у ланцу. Унутрашња мазива називају се псеудопластификаторима, односно високотемпературним пластификаторима, а могу се мешати и са полимером при повишеној температури обраде. Типична унутрашња мазива су глицерол-моностерат, цинк-стерат и др.

Топлотни стабилизатори се користе да смање оксидацију која се може јавити услед деловања топлоте на полипласте приликом прераде. Као антиоксиданси који се додају, најделотворнији су неки супституирани феноли. [3]

Светлосни стабилизатори заустављају или успоравају разградњу материјала деловањем ултраљубичастих зрака јер полимерни материјали, као и друга органска једињења, се разграђују под дејством ултраљубичастих зрака тако што пуцају хемијске везе у макромолекулама.

Разградња се огледа у многим променама материјала као што су промена боје, појава прелина, смањење механичких и еластичних својстава, па материјал постаје врло крт и на крају се претвара у прлину. Стабилизатори спречавају разградњу полимера најчешће тако да сами апсорбују велики део енергије ултраљубичастих зрачења, а потом примљену енергију поступно отпуштају. [3]

4.2 Основна структура и подела полимера

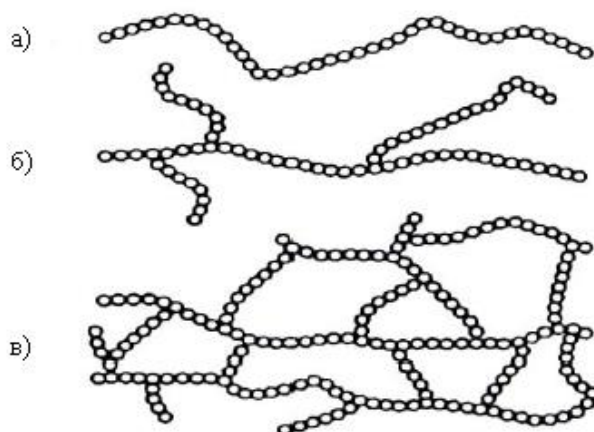
Добијени ланчasti молекули, звани полимер, добија се од простих молекула-мономера и њиховим вишеструким понављањем. Према томе, полимери се могу поделити у зависности од полимерног ланца, на:

1. Линеарне,
2. Разгранате и
3. Мрежасте.

Најједноставнији су линеарни полимери, код којих су понављајуће јединице повезане у издужен или савијен ланац.

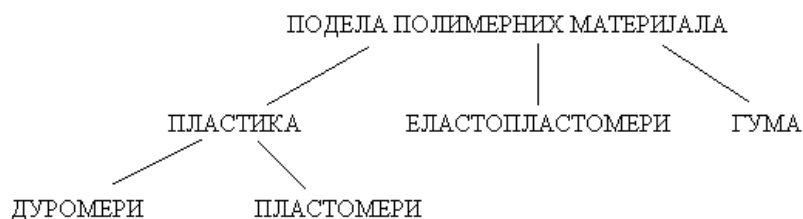
Код разгранатих полимера на основном полимерном ланцу налазе се краћи или дужи огранци састављени од истих понављајућих јединица од којих се састоји и главни полимерни ланац.

Мрежаста полимери имају међусобно повезане полимерне ланце у дводимензионалне и тродимензионалне мреже.



Слика 2. Општи изглед макромолекула а) линеарни, б) разгранати, в) мрежаста полимери [3]

На шеми испод, приказана је подела полимерних материјала према својствима и области примене.



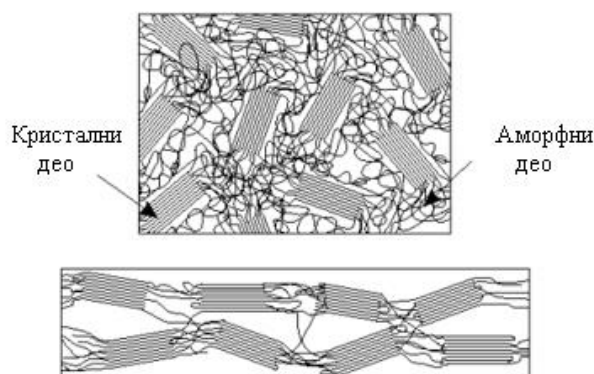
Слика 3. Подела полимерних материјала према својствима и области примене [3]

Пластомери су синтетички полимерни материјали који су растворљиви и топљиви, при расту температуре омекшавају, док опадањем температуре постају крући, због тога су се према старом називу звали Термопласти. Изграђени су од линеарних или разгранатих макромолекула, а могу бити потпуно аморфни или кристални. Кристални су они пластомери који осима аморфне имају и кристалну фазу.[3]

Већи удео аморфне фазе повећава им флексибилност и обрадивост, а кристалне чврстоћу, тврдћу и отпорност према растварачима.

Најпознатији пластомери су:

- полиетилен,
- полипропилен,
- полистирен,
- политетрафлуоретилен,
- поливинилхлорид,
- полиамид и др.



Слика 4. Пластомер [3]

Дуромери су такође синтетички полимерни материјали. Називају се још и дурупластима. Састоје се од густо просторно умрежених макромолекула, велике су чврстоће, тврдоће, топлотне постојаности. Поликондензацијом мономера прво настају вискозни или лакотопљиви претполимери (смоле), погодни за обликовање и прераду. Загревањем и додавањем реактивних спојева смоле неповратно отврдну. Служе као материјал за конструисање апарата и уређаја, као и лепкови, лакови и композитни материјали. Најпознатији дурометри су фенолформалдехидни полимери, епоксидне, меламинске и уреаформаделхидне смоле. [3]

Еластомери, феноменолошки дефинисани, обухватају све полимерне материјале који се лако деформишу у великом износу, под дејством малих напона, а по престанку њиховог дејства брзо се враћају у првобитан облик. Грађени су од дугих, линеарних, макромолекуларних ланаца који су међусобно повезани и слабо умрежени вулканизацијом. Тиме се спречава њихово пластично обликовање, али остаје сачувана покретљивост делова ланаца, што им даје изразита еластична својства. У неоптерећеном стању имају дефинисани облик у који се готово потпуно враћају након снажног деловања спољне силе и јаког изобличења. [3]



Слика 5. Еластомер [20]

Еластопластомери имају еластична својства као еластомери, али при расту температуре омекшавају, док се при опадању температуре стврдњавају као пластомери. Често се дуромери и пластомери називају пластичним масама, а еластомери и еластопластомери гумама. [3]

Разликујемо **природни полимер**, који је саставни део биљака и животиња, нпр. целулоза, скроб, беланчевине, каучук као и једињења у облику силицијум диоксида и др, и **синтетички полимер** добијен хемијском прерадом и синтезом нискомолекуларних једињења (мономера).

4.3 Предности и недостаци полимера

Због повећања примене полимерних материјала, потребно је обезбедити развој у следећим правцима:

- развој нових материјала,
- развој технологија прераде уређаја и алата за прераду и
- развој примене нових материјала и развој нових производа од пластичних маса.

Израда делова од полимера има читав низ предности:

- ниска цена коштања,
- мала густина у односу на метале,
- лака израда делова, посебно производа сложене конфигурације, као и висока продуктивност при њиховој изради,
- добра диелектрична својства, због чега налазе примену као добри електро-изолатори,
- висока отпорност на киселине, растворе и друге агресивне средине,
- добра прозрачност и способност бојења,
- добра пригушујућа својства, односно висока отпорност на вибрације, због чега се користе као добри изолатори вибрација,
- добра својства апсорпције звука, односно добри су звучни изолатори,
- добре антифрикционе особине, а по потреби и добра фриксиона својства.

Недостаци су:

- ниска чврстоћа на повишеним температурама,
- смањење чврстоће у току дуготрајног оптерећења,
- краatak век трајања, што је у директној вези са процесом старења под утицајем светлости, топлоте, влаге и кисеоника.

4.4 Примена полимерних материјала у наменској индустрији

Ручна бомба М75 намењена је за уништавање и онеспособљавање противничке живе силе и неоклопљених материјалних средстава на даљинама до 40 метара. Тело бомбе састоји се од експлозивног пуњења и кошуљице коју чине парчадно језгро и спољашњи омотач од пластичне масе црне боје. [4]



Слика 6. Ручна бомба М75 [4]

Противпешадијска распрскавајућа мина усмереног дејства намењена је за уништавање и онеспособљавање непријатељске живе силе и неоклопљених материјалних средстава на даљинама до 50 метара. Тело мине чини облога која је израђена од пластичне масе, експлозивно пуњење и парчадна облога. У састав комплекта противпешадијске распрскавајуће мине усмереног дејства се налази и детонаторска каписла која има адаптер од пластичне масе са спољним навојем М10х1. Поред наведених елемената комплекта мине такође ножице, ручни индуктор и уређај за проверу исправности имају делове од пластичне масе. [4]



Слика 7. Састав комплекта противпешадијске распрскавајуће мине усмереног дејства [4]

1-тело мине, 2-електричне детонаторске каписле, 3-ножице, 4-електрични проводник,
5-ручни индуктор, 6-уређај за проверу исправности

Противтенковска мина, антимагнетна ТМА-4 намењена за уништавање тенкова и других оклопних возила, као и за минирање железничких пруга, прелаза преко река и сл. Заштитна облога мине је израђена од пластичне масе (полистирен) сивомаслинасте боје чија је намена да обједини све делове мине у једну целину и заштити их од штетних утицаја околине. Пошто је за њихову израду коришћено врло мало метала, мине се отежано откривају старијим моделима детектора метала („миноистраживача“). [4]



Слика 8. Противтенковска мина, антимагнетна ТМА-4 [4]

Противтенковска мина, разорно-пробојна ТМРП-6, намењена је за уништавање и онеспособљавање свих врста моторних возила и људства у њима. Кошуљица мине израђена је од пластичне масе (полистирен) сивомаслинасте боје, која је отпорна на удар и временске утицаје. Горња површина кошуљица ојачана је ребрима, док је обод нагазне површине кошуљице намерно ослабљен како би дошло до ломљења услед нагаза силом од 150 до 300 daN. [4]



Слика 9. Противтенковска мина, разорно-пробојна ТМРП-6 [4]

Ручни бацач ракете 64 mm M80 намењен је за лансирање кумулативне ракете 64 mm M80. РБР је израђен од пластичне масе како би се смањила његова маса и повећала мобилност војника. Након лансирања ракете не може се више користити. [4]



Слика 10. Спољни изглед РБР 64 mm M80 у маршовском положају [4]

Штајер АУГ је јуришна (аутоматска) пушка аустријске производње. Дизајнирана је шездесетих година прошлог века за потребе аустријских оружаних снага. Ова пушка спада у тзв. булпап пушке. Кундак ове пушке израђен је од ојачаног полимера као и сам рукохват и оквир. Употреба полимера је довела до смањења масе пушке што повећава мобилност корисника. [22]



Слика 11. Штајер АУГ [21]

Glock 17 је аустријски полуаутоматски пиштољ од ливеног полимерског рама. Предстаља најзаступљенији модел пиштоља који се налази у употреби припадника полицијских и војних формација у свету. Одликује га прецизност, поузданост, велики капацитет оквира као и отпорност на корозију. [23]

CZ 99 је полуаутоматски пиштољ контруисан у Крагујевцу 1989. године. Намењен је за уништавање живе силе на даљинама до 50 метара. Рам пиштоља је израђен од алуминијумске легуре, док су витални делови пиштоља израђени од челика. [24]

Оба пиштоља су врло сличних карактеристика и идентичне намене. И један и други имају исти калибар (9x19mm) и сличан број метака у оквиру (Glock има 17 метака, а CZ 99 15).

Међутим, разлика у маси је прилична. Маса Glock-а без оквира је 625 грама, а CZ 99 има масу од 880 грама. Разлика од 255 грама која је последица употребе полимерних материјала за израду рама пиштоља, може у великој мери да утиче на брзину руковања оружјем. Поред смањења масе полимерни материјали имају много већу отпорност на корозију од метала.

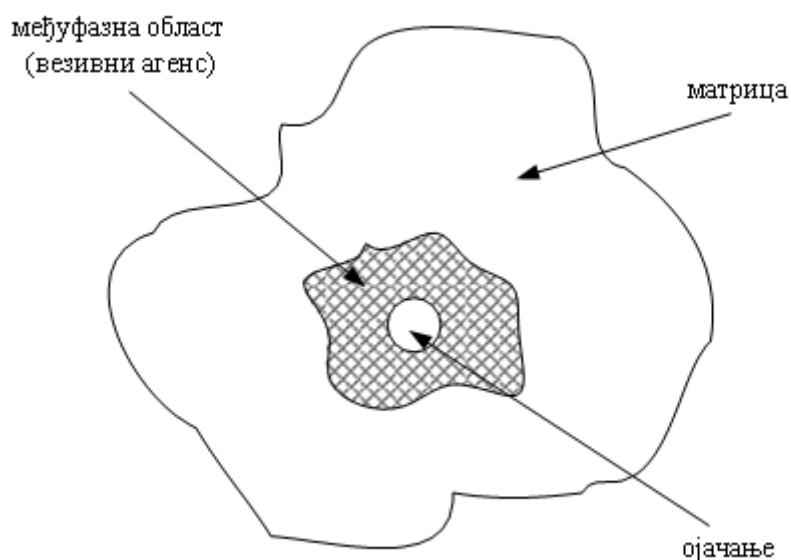


Слика 12. Пиштољи Glock 17 (лево) и CZ 99 (десно) [23], [24]

5. Композитни материјали

Модерне технологије захтевају материјале посебних својстава, попут мање густине, повећане чврстоће или повећане отпорности на удар, а које не могу да задовоље конвенционални метали, керамике или полимерни материјали. Ради добијања нових материјала оптимално прилагођених намени, стварају се композитни материјали, као комбинација два или више материјала, користећи карактеристике појединачних елемената, при чему резултат, односно композит има значајно другачија физичка и хемијска својста од саставних делова. [6]

Одговарајућим избором компонената и њиховог релативног масеног удела могу се, поред претходно наведеног, добити и материјали са жељеном крутошћу, отпорношћу на корозију и хабање, термичком и акустичком изолацијом, итд.



Слика 13. Основни делови у структури композитног материјала [5]

Композитни материјали су у употреби јако дуго. На пример, бетон се користи више хиљада година, а још у Римском царству су додавали различите примесе, попут кољских власи или вулканске глине у керамичку матрицу како би ојачали бетон и смањили могућност наставка пукотина. [5]

Бројни примери композитних материјала могу се наћи у природи. Дрво се, посматрано као композит, састоји из лигнина као матрице и целулозних влакана као ојачања, док се на пример кости састоје јаким влакана колагена које држе на окупу чврсту мешавину минерала на бази калцијума и фосфора. Многа истраживања се спроводе у циљу унапређења карактеристика материјала како на макро, тако и на микро нивоу. [5]

5.1 Особине и класификација композита

Композитни материјали се састоје од континуалне фазе кроз коју је распоређена дисконтинуална фаза. Дисконтинуална фаза је у већини случајева та која даје чврстоћу композиту и ојачава га. С друге стране, континуална фаза тј. матрица везује ојачања, преноси оптерећење на ојачање и штити га од спољашњег утицаја. На крају, континуална фаза даје форму композиту. [6]

У разматрање је потребно узети особине конституената, њихов геометријски распоред као и интеракцију између матрице и ојачања, при одређивању карактеристика материјала. Обликом, величином, концентрацијом и оријентацијом ојачања се описује геометрија ојачања. Облик дисконтинуалне фазе се апроксимира сфером уколико су ојачања честице, цилиндром уколико су ојачања влакна, као и правилном призмом или штапићима. Преко запреминског или преко масеног удела се мери концентрација ојачања. Запремински и масени удео представљају најзначајни параметар у одређивању механичких особина композитних материјала. [6]

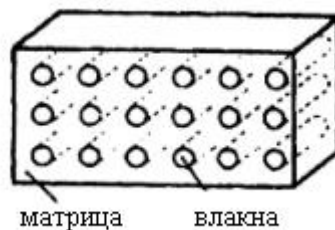
Такође, јако битан параметар јесте и расподела ојачања по запремини композитног материјала. Расподела ојачања по запремини доводи до хомогенизације материјала. За композитне материјале који за ојачање имају влакна, оријентација влакана одређује анизотропију материјала. Нарочиту анизотропију показују материјали који су ојачани дугим влакнима, али се она може контролисати пројектовањем и фабрикацијом.

Једна од могућих подела композитних материјала јесте према врсти ојачања и то на влакном ојачане, честицама ојачане и структурално ојачане. Свака од ових подела се може даље разложити на барем две подгрупе, на начин приказан на слици:



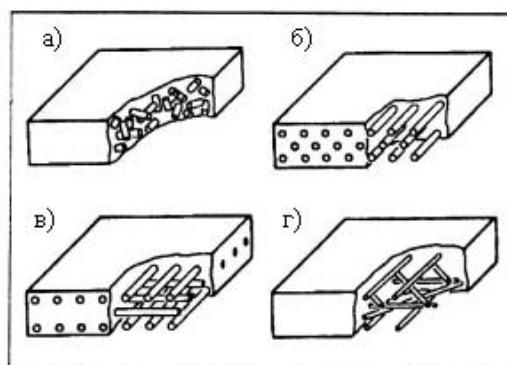
Слика 14. Подела композитних материјала по типу ојачања [5]

Влакнима ојачани композити Композитни материјал је влакнима ојачан када је ојачање у облику влакана. Влакна могу бити различита, на пример, дуга, кратка, исецкана, у облику тканине и др. Постоји могућност да се прилагоде механичке особине композита, контролисањем расподеле влакана. На основу тога, могуће је прилагођавати особине материјала, мењајући природу конституената, њихову концентрацију, као и оријентацију ојачања, како би се на крају добиле жељене карактеристике материјала. Најзначајнију групу композитних материјала заузимају управо влакнима ојачани композити. [6]



Слика 15. Композитни материјали ојачани влакнима [6]

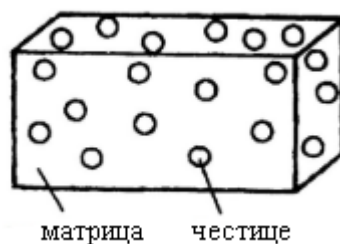
Композити са произвољном оријентацијом влакана понашају се изотропно, али је ефекат ојачавања мали. Композити са влакнима у једном правцу имају оптималне вредности чврстоће и крутости ако оптерећење делује у правцу влакана, али су наведена својства лоша ако је оптерећење управно на правац влакана. Да би се постигла добра својства у више правца, користе се слојеви са различито оријентацијом влакана. [6]



Слика 16. Различита влакна а) кратка, произвољно оријентисана, б) дуга, у једном правцу в) дуга, у два међусобно управна правца г) дуга, испреплетана, произвољно оријентисана [6]

Честицама ојачани композити Композитни материјал је честицама ојачан када је ојачање у облику честица. У односу на влакна, честице су те које немају привилеговане правце. У зависности од ефекта који се жели постићи, материјал може бити ојачан влакнима или ојачан честицама.

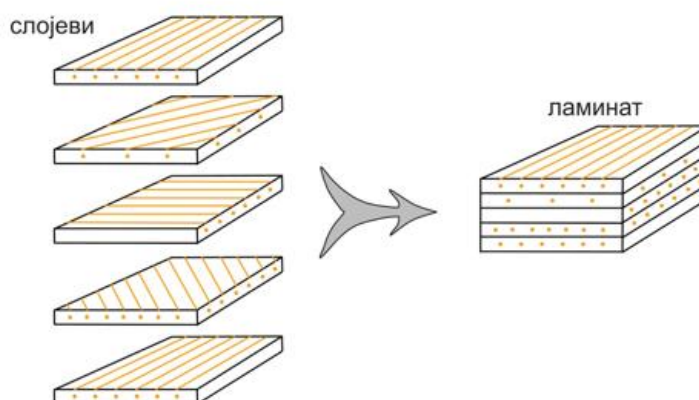
Уколико је потребно да се побољша крутост, термичко понашање, отпорност на хабање, тада је избор припада другом наведеном начину ојачавања материјала. [6]



Слика 17. Композитни материјали ојачани честицама [6]

Структурални композити састоје се из више слојева (ламина), а ојачање може бити у виду континуалних влакана или тканине.

Најпре, може се говорити о ламинатима. Они су састављени од различитих узастопних слојева ојачања потопљених у смолу. У зависности од састава и оријентације слојева, разликују се и сами слојеви. [6]

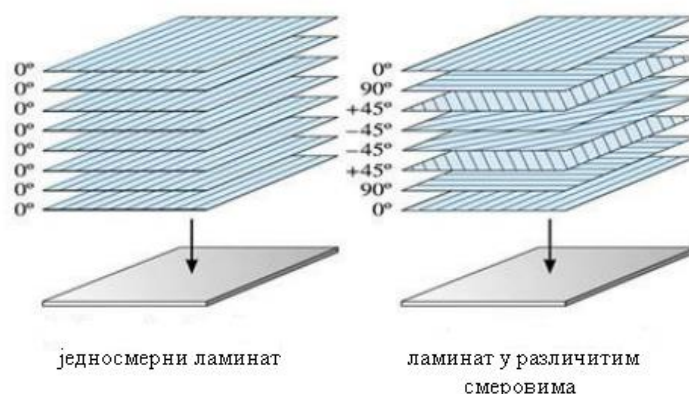


Слика 18. Конструкција ламината [6]

У овом делу може да се говори о ламинатима сачињеним од једнодирекционих слојева и о сендвич конструкцијама.

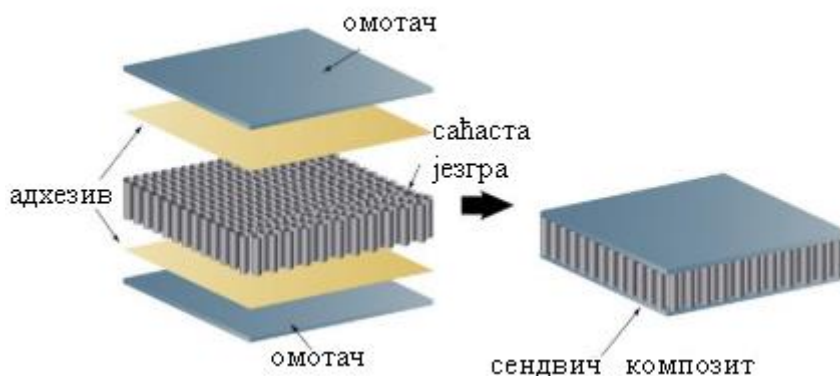
Ламинати сачињени од једнодирекционих влакана садрже основни ламинат од којих, у теорији, анализа било ког другог ламината може да буде изведена. [6]

Особине ламината одређене су својствима влакана, својствима матрице, учешћем влакана у композиту, као и њиховим оријентисањем. Како би се дошло до жељених механичких особина ламината, она могу бити сложена на одређен низ различитих оријентација влакана.



Слика 19. Приказ различитих слојева ламината [6]

Сендвич конструкције се састоје од два крута и чврста спољашња слоја, које повезују материјал који чини језгро конструкције.

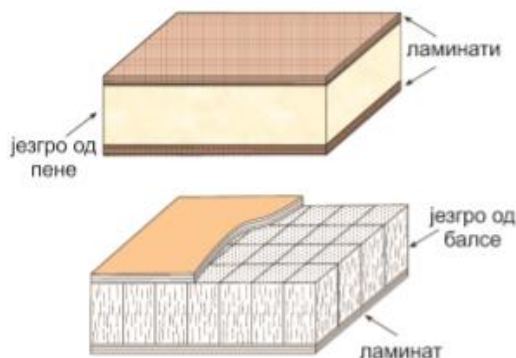


Слика 20. Сендвич конструкција [6]

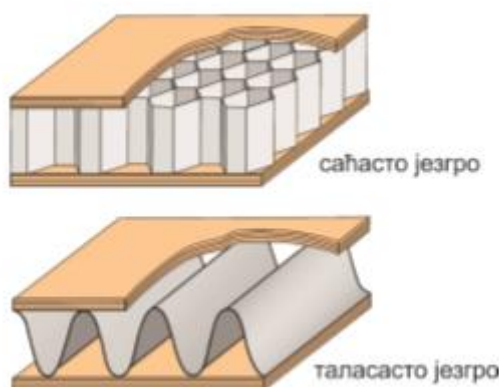
Углавном се омотачи сендвич конструкција састоје од ламината, са стакленим влакнима или Кевлар влакнима, а такође могу бити и плоче лаких легура. Како би сендвич конструкције биле ефикасне, неопходно је обезбедити погодну везу између језгра и омотача, како би механичко оптерећење могло да се пренесе између језгра и омотача. Како би се овај ефекат омогућио, примењују се смоле, које се наносе на омотач. Језгро је најчешће од слабијег и лакшег материјала, али зато има већу дебљину и добре особине при попречном напрезању. Омотач је од чвршћег материјала и има добре особине при затезању. Према томе, циљ сендвич конструкција је да се добије лак материјал који има веома добру савојну крутост. [14]

Према литератури [6], неки од најчешће коришћених материјала су:

За чврста језгра (слика 21): балса или ћелије дрвета, различите ћелијске пене, синтетичке пене и слично, док се за шупља језгра (слика 22) користе: лаке легуре метала, крафт папир, полиамидни папир и сл.



Слика 21. Сендвич материјал са чврстим језгром [6]



Слика 22. Сендвич материјал са шупљим језгром [6]

Неке од предности сендвич конструкција јесу:

- веома мала тежина,
- дуг век трајања,
- висока крутост.

Према томе, веома велику примену проналазе у ваздухопловству, због својих особина које их разликују од других конвенционалних материјала.

5.2 Класификација композита према природи конституената

Према природи матрице, композитни материјали могу бити класификовани као органски, метални или минерални композити. У наведене матрице могу бити уграђена различита ојачања, у циљу конкретних потреба индустрије. За остале материјале то није случај, јер су они, ипак, још увек предмет проучавања истраживача у лабораторијама. Постоји подела композитних материјала на:

1. Композитни материјали са органском матрицом (смола), који могу бити са:
 - минералним влакнима: стаклена, угљенична, итд.
 - органским влакнима: кевлар, полиамид, итд.
 - металним влакнима: борон, алуминијум, итд.

2. Композитни материјали са металном матрицом (лаке и ултра лаке легуре алуминијума, магнезијума, титанијума), које могу бити са:
 - минералним влакнима: угљенична, силицијум карбидна, итд.
 - металним влакнима: борон,
 - метално-минералним влакнима: боронска влакна премазана силицијум карбидом.

3. Композитни материјали са минералном матрицом (керамика), која може да буде:
 - металним влакнима: борон,
 - металним честицама: кремита,
 - минерални честицама: карбиди, нитрити, итд.

5.3 Конституенти композитних материјала

Композитни материјали су добијени два или више материјала различитих својстава с циљем добијања материјала који ће имати такве особине какве не поседује нити једна компонената сама за себе.

Под појмом матрице композитног материјала подразумевамо углавном смоле. Те смоле су на пример полиестер, епокси и друге, у које су убачени пуниоци, из разлога смањења цене производње, а како би се с друге стране побољшале особине смоле, за које се може рећи да се понашају као хомогени материјали. Када се говори о ојачању у композиту, оно обезбеђује високе механичке особине, док је матрица та која има задатак да пренесе спољашње оптерећење на ојачање и да га заштити од спољашњег утицаја.

У зависности од намене материјала и тога да ли је потребно остварити високе механичке карактеристике, добру термичку стабилност, отпорност на корозију, и слично, бира се и тип ојачања и матрице. [7]

5.3.1 Влакна

Влакно се дефинише као материјал код ког је однос дужине и пречника већи од 10, а пречник мањи од 1mm. [8] Влакна морају да поседују висок модул еластичности, велику затезну чврстоћу, задовољавајућу термичку постојаност и еластично понашање приликом оптерећења.

Употреба влакана дефинисана је према трима карактеристикама:

1. мали пречник влакна дозвољава већи ниво чврстоће материјала и смањује могућност појаве напрелина на површини,
2. оптимални однос дужине и пречника влакана омогућава успешан пренос оптерећења са матрице на влакна,
3. висока флексибилност влакана дозвољава употребу различитих техника за израду оптималних текстилних структура као облика ојачања.

Иако се најчешће користе континуална влакна због једноставности њиховог оријентисања, кратка влакна такође могу у значајној мери да повећају снагу резултујућег композита.

Влакна се могу поделити на органска и неорганска. Стаклена и керамичка влакна су пример неорганских, док су карбонска, графитна и арамидна пример органских влакана.

5.3.1.1 Угљенична, карбонска и графитна влакна и њихове особине

Карбонска влакна имају јако дугу историју. Најпре су произведена због своје познате способности, а то је преношење електрицитета. Лучне лампе су те које су имале карбонске штапове као електроде. Јако fine карбонске филаменте користиле су се код првих произведених лучних лампи, са намерном да вечно трају у вакууму.

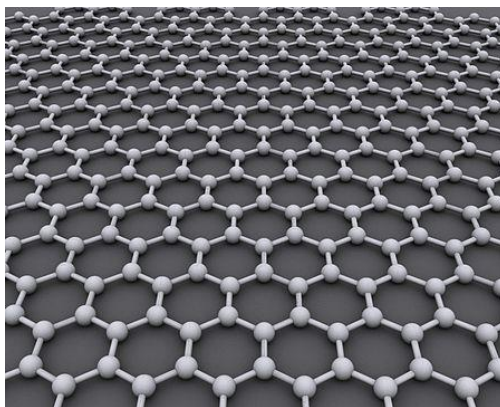
Енглески физичар и хемичар Сван (енгл. *Sir Joseph Wilson Swan*) био је тај који је покушао да побољша пречник нити сијалице. Његов покушај се погледао у томе да је издуживао нит целулозе, која је потом била праћена карбонификацијом.

Такође, целулозна тканина је та која може бити карбонификована тако што би се загревала на високим температурама без присуства ваздуха. На тај начин се добија угљенична тканина, која је знатно слабија него стаклена и има готово једнаку крутост, тако да се не користи за примену где је потребна јако висока температура. [10]

Оријентација је најбитнија, тако да би сви кораци морали да почну са претходном оријентацијом и да се она сачува и одржи док се не постигне жељено карбонско влакно. Карбонска и графитна влакна имају изразите способности као ојачавајућа влакна са одличном флексибилношћу.

Висока крутост и јачина представљају примарну карактеристику за ојачавајућа влакна у полимерној матрици. Неопходно је да влакна ову способност сачувају и у агресивним срединама где је повећана температура, влажност околине и слично. Уколико се део, који је направљен од композитног материјала, користи за примарне конструкције, влакна морају да буду непрекидна. [7]

Неопходно је направити разлику између карбонских и графитних влакана и поред тога што се ови термини често изједначавају. Угљенична и графитна влакна су базирана на мрежи слојева графена (хексагонална). Ова структура је приказана на слици 23. Материјал је дефинисан као графит уколико су слојеви или плоче графена сложени као тродимензионални ред. Да би се формирао овај ред, у већини случајева је потребно дуже време и температура обраде, што графитна влакна чини скупљим. [6]



Слика 23. Решетка графена сачињена од угљеничних влакана [6]

Веза између слојева је веома слаба па се због тога често јављају поремећаји унутар слоја такви да се ред формира дводимензионално и такав материјал дефинисан је као угљеник. У суштини, не постоји један услов који изричито одваја угљенична од графитних влакана. Графирна влакна су такође та која поседују одређене поремећаје у структури.

Јачина угљеничних влакана није иста на тест затезања за појединачне нити. Од дужине влакана веома зависи затезна чврстоћа. Према томе, показало се да су дужа влакна прилично слабија од краћих. [10]

Она влакна која су непрекидна и произведена за продају имају површину која је заштићена премазом. Разлог јесте тај што је влакно које одмах изађе из пећнице после карбонификације погодно да прикупи наелектрисање при додиру са вођицама. Како би се угљеничним влакнима повећала адхезија према матрици она иду на третман површина, који преставља додатак премазивању. У основи, ово је процес оксидације где је идеја не само да се очисти површина, већ и да се побољша пријањање и изазове хемијска реакција. [5]

5.3.1.2 Арамидна влакна и њихове особине

У последњих неколико деценија, арамидна влакна су постала веома важни ојачавачи за захтеване конструкције. Први пут је 1972. године компанија Ду Поинт представила Кевлар арамид. Кевлар арамид јесте органско влакно са високом специфично затезном чврстоћом и модулом. У међувремену је производњу тих влакана усвојило више компанија, од којих је значајнија компанија Тејлин Арамид из Немачке, која та влакна производи под називом Twaron. С обзиром на доступност података, највише података везано је за Кевлар. [5]

Ово влакно је било прво органско влакно које је употребљено као ојачање у композиту. Данас се користе у разним конструкцијским деловима, као ојачања у пластици, балистици, гумама, кабловима, ужадима, као замена за азбест, премазане тканине, заштитна одела. Главне форме које доставља Ду Поинт јесу непрекидне нити клупка, исецкана влакна, термопластични импрегнирани намотаји, композитне плоче које су термо обрадиве. [10]

Као најважније особине арамидних влакана издвајају се:

- мала густина,
- висока затезна чврстоћа,
- висока затезна крутост,
- ниске компресионе особине,
- жилавост.

Густина арамидних влакана износи $1,44 \text{ g/cm}^3$ и она је за око 40% мања од стаклених и за око 20% мања од угљеничних влакана. Арамиди се разлажу на температури од око 500°C и не топе се. Арамидна влакна имају велику термалну стабилност и изолаторске и хемијске особине.

Како би се постигла балистичка заштита за људе, оклопне тенкове, борбене авионе и слично, арамидна влакна се користе у облику тканина или композита. [10]

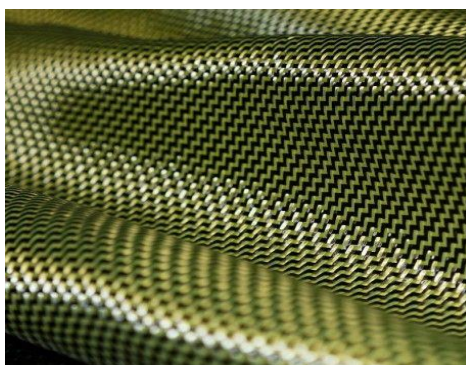
За композитне системе који су ојачани арамидима, може се рећи да имају одличне вибрационо-пригушене особине. Композит са полимерном матрицом праћен је радном температуром од -36 до 200°C . Они су растегљиви под компресијом и савијањем. Код стаклених и згљеничних композита, крајња јачина, под компресијом и савијањем је већа него код наведених. Такође, ови композитни системи су отпорни на замор и пуцање услед напона. Недавно, развијена је термопластична смола ојачана управо арамидним влакнима. У поређењу са сличним термосет системим, ови термопластични композити показали су подједнаке механичке особине. Додатно, термопластични системи пружају одређене економске предности у изради, повезивању и поправци. Како би се постигао низак коефицијент термалног ширења или висока отпорност на хабање користе се такође ови композитни системи. Поред тога, не показују никакву галванску реакцију са металима нити су проводни.

Арамидна влакна су присутна у неколико облика са различитим модулима.

Кевлар 29 поседује најмањи модул и највећу жилавост. Управо ова влакна су нашла примену у балистичким и другим меким композитним системима као што су одела за заштиту од посекотина, за конопце, премазне тканине, замена за азбест, пнеуматске гуме. Тамо где крутост није толико важна, а да је при томе потребна велика толеранција на удар и оштећење, такође је омогућена примена ових влакана.

Кевлар 49 се углавном користи у ојачаним пластикама, било да се ради о термопластичним или термосет системима смола. Такође, употребљава се у меканим композитима као што је језгро оптичког кабла. Тип који је недавно развијен јесте тип 149 који има 40% виши модул од Кевлара 49. [10]

Кевлар 49 је доступан у шест величина предива и две величине клупка. Кевлар 29, с друге стране, доступан је у две величине преденог влакна и две величине клупка, док је Кевлар 149 доступан у три величине предива. Величине предива се крећу од 30 до 1300 снопова, док клупоко има од 3072 до 5000 снопова. [6]



Слика 24. Кевлар [6]

У деловима где је потребно уштедети на тежини користе се управо арамидна влакна, те је њихова примена омогућена код компонената авиона, хеликоптера, савремених летелица и ракета. Са развојем ових композита, повећава се и њихова примена. Наведена влакна су у извесној мери флексибилна и жилава.

Постоји могућност њихове комбинације са смолама и обрађености у композит многим методама које се користе за стаклена влакна.

5.3.1.3 Стаклена влакна и њихове особине

Стаклена влакна су најпре развијена као замена за метале и коришћена су како у комерцијалне тако и у војне сврхе.

Стаклена влакна поред свих претходно наведених карактеристика поседују и отпорност према читавом низу хемикалија, отпорност на старење, потпуну постојаност према микробиолошким дејствима и друге повољне карактеристике. Основа влакна је силицијум, а добијају се фузијом мешавине различитих оксидних материјала на високим температурама. Прва стаклена влакна за комерцијалну употребу извучена су 1938. године, а 1948. године започело је намотавање стаклених влакана импрегнираних термореактивном смолом. [11][12]

Постоји више типова стаклених влакана, а у употреби су најчешће Е и S тип влакна. Стаклена влакна типа Е имају добра електроизолациона својства, добру затезну чврстоћу и висок модул еластичности. Стаклена влакна типа S имају већу затезну чврстоћу, али су скупља, па се употребљавају тамо где се захтевају високе перформансе.

У табели 1 приказане су механичке карактеристике Е и S тип влакна.

Табела 1. Упоредне особине Е и S типа стаклених влакана [12]

Тип влакна	Е	S
Густина, ρ [g/cm ³]	2,54	2,49
Затезна чврстоћа, R_m [MPa]	3448	4585
Модул еластичности, E [GPa]	72,4	85,5
Пречник, d [μm]	3-20	8-13
Коефицијент термичког ширења, α [$10^{-6}/\text{K}$]	5,0	2,9

Од услова добијања и испитивања зависи чврстоћа стаклених влакана. У случају када се влакна тестирају у влажној средини, њихова чврстоћа опада услед апсорпције воде на површини влакна. Када влакна дођу у контакт са минералним киселинама долази до још значајнијег опадања чврстоће.

Чврстоћа и модул стаклених влакана су температурно врло зависне величине.

У току процеса обраде врши се прскање влакана воденим раствором са емулзирајућим полимером. Разлог овог поступка јесте то што долази до оштећења влакана при њиховом међусобном додиру у току операција процесирања и то представља важан фактор који одређује њихову чврстоћу.

За стаклена влакна се може рећи да су владајућа у примени за одређене потребе, поред тога што су се угљенична и арамидна влакна брзо развила.

Цена према запремини или тежини, извесне примене у наоружању, хемијска или галванска корозиона отпорност, електричне особине, доступност у различитим облицима остају примери предности.

У поређењу са угљеничним композитима, коефицијент топлотног ширења и особине модула, представљају недостатке. Док у поређењу са арамидним композитима, стаклена влакна имају недостатке у затезним особинама, али предност на крајњу компресију, смицајне особине и прикупљању влаге. [7]

Када се пореде са другим влакнима, топлотна и електрична проводљивост и температура топљења представљају недостатак.

5.3.1.4 Силицијум карбид и његове особине

Откриће одрживог комерцијалног поступка за производњу, крајем двадесетог века, резултирало је употребом силицијум-карбида. Силицијум карбид је најстабилнији карбид због заштитног филма силицијум-диоксида који се формира на његовој површини. Настали филм силицијум-диоксида врши функцију заштитног слоја који спречава оксидацију силицијум-карбида. [9]

Влакна силицијум карбида се праве како би имала велику јачину, модуле и густину. Готово сва силикон карбид влакна се производе као ојачања за метале. Легуре укључују алуминијум, титанијум и молибден. [6]

5.3.1.5 Кварцна влакна и њихове особине

Битна особина кварцних влакана јесте да се не топе и не испаравају док се не постигне температура од 1650°C. Ова влакна могу да се користе на много вишим температурама него „Е“ и „S“ стаклена влакна. Ова влакна су хемијски стабилна и на њих не утичу халогене и друге киселине. У срединама са јаком концентрацијом алкана не би требало да се користе ова влакна. [6]

5.3.1.6 Полиетилен ултра високе молекулске масе и њихове особине

Влакна полиетилена ултра високе тежине (UHMWPE) је општи назив за влакна високих особина. Одређени број комерцијалних и академских институција у Сједињеним Америчким Државама и у Европи су радили на развоју орјентисаних UHMWPE влакана, док су неоријентисана прво синтетизована средином 50-тих година. Орјентисана влакна су развијена 70-тих година, док су први пут била представљена у улози комерцијалних производа 1985. године. [6]

Начин формирања влакана се огледа у томе да се она формирају у процесу упредања гела где су полимери растворени са циљем да се полимерни ланац расподеле. Затим се из раствора влакна потапају и молекули и постају уздужно поређани са врло високим степеном орјентације. Сам пречник влакана који је тако добијен је поприлично велики, око 27 микрона. Када се та вредност упореди са влакнима која имају високе особине, на пример, арамидна влакна, као представници влакана са високим особинама имају пречник око 12 микрона.

Механичке особине композита ојачаних UHMWPE влакнима имају поприлично добре особине. Затезна чврстоћа и модули, издужења и жилавост су повољне у поређењу са другим типовима влакана.

UHMWPE материјали су јако отпорни на влажност. Ови материјали су се поред лоших особина на вишим температурама, показали као добри када се ради на продуженом излагању Сунцу. Стабилност је изузетна у различитим растварачима као што је хидрауличко уље и растварачи за чишћење. Њихова карактеристична особина јесте та да имају могућност плутања по води. Поређење ових влакана најчешће се врши са арамидним влакнима. Па тако, у односу на њих јачина и модул су јако слични, али због мале густине ($0,97 \text{ g/cm}^3$), њихова специфична јачина и модули су виши. [6]

5.3.2 Матрица

Композитни материјали представљају вишекомпонентне и вишефазне материјале који имају различита физичко-механичка својства по фазама, јасно је да су фазе препознатљиве на микроскопском нивоу и да су одвојене међуфазним границама. Основну структуру, јасно, чине матрица и ојачање.

Матрица даје облику композиту. Матрица, односно континуална фаза унутар композита, има улогу да задржи ојачање, преноси спољна оптерећења на њега, и да га штити од утицаја окружења. Ако је дошло до оштећења, односно до прелома појединих ојачања унутар композита, матрица ће прераспоредити оптерећење на околна ојачања, чиме се спречава потпуни прелом материјала. [15] [16]

Композитни материјали се могу поделити према врсти матрица на [17]:

Полимерни композити (*PMC-Polymer Matrix Composite*) – представљају групу композитних материјала који су такође ојачани влакнима.

Метални композити (MMC – *MetalMatrixComposites*)- који су у основи материјали добијени различитим процесима синтезе, различитих металних легура.

Керамички композити (CMC-*Ceramic Matrix Composite*)-су композити ојачани влакнима, који се добијају поступком сагоревања органских материјала након чега долази до ставрања угљеничне матрице која се образује око влакана.

5.3.2.1 Композитни материјали са полимерном матрицом

Код композитних материјала са полимерном матрицом, матрице су полимерне и углавном су у облику полимерних смола, које су велике молекуларне масе које је потребно ојачати влакнима. Управо ови композити се израђују у најширем могућем спектру и карактерише их велика разноликост, уколико се у обзир узме примена, начин производње, цена, као и механичка и друга својства. За избор матрице у композитном материјалу издваја се неколико различитих материјала. При избору материјала мора да се води рачуна да ће композит имати одређени степен растворљивости као и одговарајућу радну температуру.

Смоле и њихове особине

На обраду, фабрикацију и крајње особине композитних материјала знатно утиче смола, њена хемијска композиција као и физичке особине. Управо та разноликост у композицији, физичком стању и присуству нечистоћа у смоли утиче на руковање, обрадивост, особине ламината, особине композитних материјала и издржљивост на дужи период. [7]

1. Епокси смоле

Епокси су термосет смоле које подлежу полимеризацији и садрже једну или више епоксидних група. Добре особине епокси смола јесу велика јачина и модули, мали нивои испарљивости, одлична адхезија, мало скупљање, мала хемијска отпорност и лакоћа обраде. Негативне особине епокси смола јесу ломљивост и пад особина у присуству влаге. [7]

2. Полиестер

Полиестер смоле су релативно јефтине, брзо се обрађују и углавном се користе за нискобуџетне делове. Могу да покажу веома велику отпорност до лома у комбинацији са одређеним уметцима. У поређењу са епоксидним смолама, полиестер смоле имају бржу и лакшу обраду и знатно су живаљи. Ниска цена и брза обрада јесу главне предности ових смола. [6]

3. Фенолне смоле

Фенол – формалдехид смоле и њихови директни претходници су прво произведени за комерцијалне сврхе око 1900. године. Уреаформалдехид и маламин формалдехид су се појавили између 1920. – 1930. године као јефтиније алтернативе које могу да се користе на нижим температурама.

После третмана, фенолне матрице су хемијски и термално отпорне. Могу да се добију два типа фенолних матрица зависно од тога како реагују базни катализатори са фенолом. [6]

4. Бисмалеимидне смоле

Физичка форма ових смола варира у зависности од завршне обраде. Може да се креће од чврстог до чисто течног стања. БМИ смоле су свестране са многим применама у електроници и ваздухополовству.

Примарна предност над епокси смолама им је виша прелазна температура у кристално стање, у опсегу од 260 – 320°C. БМИ смоле се одлично понашају на повишеним температурама и имају високу жилавост.

Термопластични материјали и њихове особине

Брзина израде термопластичних материјала је примарна предност. Током процеса израде хемијска обрада и третирање материјала није потребна. Због тога се очекује редукван број циклуса израде него што је то случај код термосетова. Садашњи трошкови инжењерских термопластичних материјала су за нијансу виши од епокси материјала истих особина.

Већина термопластичних полимера је састављена од насумице орјентисаних молекула и називају се аморфним материјалима.

Коришћење аморфних термопластичних материјала као материјала за матрице за композите са ојачаним влакнима је сада у развоју. Карактеристике композита су довеле до тога да се они сада користе за примарне и секундарне конструкције у авионској индустрији, укључујући и делове ентеријера авиона, крила, као и труп авиона.

5.3.2.2 Композитни материјали са металном матрицом

Реч је о композитима код којих је матрица метал. Метали се у овим композитима могу примењивати при повишеним радним температурама. Управо та особина представља предност код металних матрица у односу на композите са полимерном матрицом. Ипак, у односу на композите са полимерном матрицом, њихова негативна особина јесте висока цена, па им је и употреба самим тим ограничена. [17]

Основни проблем код производње металних композита је некомпатибилност металне матрице и влакана због хемијских реакција које се јављају међу њима. Због тога је избор материјала за ојачање сужен. Када је у питању ојачање на бази влакана, код металних матрица најбоље су сепоказала влакна силицијум-карбида, алуминијум-оксида, угљеника, бора и борових влакана пресвучених силицијум-карбидом.

1. Композити са алуминијумском матрицом

Композити чија је матрица израђена од алуминијумске легуре имају највећи удео на тржишту металних композитних материјала. Основни разлог тога је релативно мала маса у односу на чврстоћу која се постиже ојачањем. Велики значај имају и топлотна својства алуминијума, чија је тачка топљења са једне стране довољно висока да задовољи потребе различитих конструкција, а са друге стране довољно ниска да производњу учини прихватљивом. [17]

2. Композити са магнезијумовом матрицом

При одабиру композита са алуминијумском матрицом или композита са магнезијумовом матрицом, пресудна је маса и отпорност на корозију. Магнезијум је више подложен корозији, док је густина алуминијума отприлике за трећину већа од магнезијума. Магнезијум такође има нижу топлотну проводљивост у односу на алуминијум, што такође утиче на избор материјала за израду матрице. Оно што се захтева од композита са магнезијумовом матрицом јесте: мала маса, чврстоћа, низак коефицијент топлотног истезања итд. [17]

3. Композити са титанијумском матрицом

У авиоиндустрији, код суперсоничних војних авиона, све више се примењују композити са титанијумском матрицом

Титанијум као метал карактеришу добре механичке особине на собној и повишеним температурама, као и отпорност према корозији. У поређењу са алуминијумом, и при већим температурама титанијум задржава своје физичке карактеристике. [17]

4. Композити са бакарном матрицом

Када постоје захтеви за топлотном проводљивошћу и чврстости при високим температурама користе се управо композити са бакарном матрицом. У односу на алуминијум, ове особине превазилазе наведене особине композита са алуминијумском матрицом. Композити са бакарном матрицом се могу користити за облагање страница комора за сагоревање код ракетних мотора. [17]

5.3.2.3 Композити са керамичком матрицом

Материјал који је опште познат по својој способности да поднесе високе температуре на којима задржава своје механичке особине јесте керамика. Висока тврдоћа и мала маса јесу особине које карактеришу керамику као материјал. Међутим, недостатак керамике у односу на већину метала јесте њена кртоност, што је и основни разлог израде композита са керамичком матрицом код кога би се смањила кртоност основног материјала. [17]

1. Композити са матрицом од силицијум карбида

Значајне карактеристике овог материјала су: висока топлотна проводљивост, мала маса, добра отпорност на корозију и хабање. Због стварања оксида на површини материјала, они су отпорни на екстремно високе температуре које се крећу чак до 1500°C. Ови композитни материјали се врло често могу срести у индустријској примени. [17]

2. Композити са матрицом од алуминијум-оксида

Овај композитни материјал се одликује високом тврдоћом, температурном стабилношћу, отпорношћу на хабање, отпорношћу на корозију.

За ојачање матрице од алуминијум оксида користе се влакна од истог керамичког материјала, с тим што се материјал превлачи одговарајућим превлакама као што су на пример угљеничне превлаке. [17]

5.4 Запремински и масени удео

За одређивање механичких особина композитних материјала, један од најзначајнијих фактора јесте пропорција матрице и ојачања, која може да се изрази преко запреминског и масеног удела. Како би се анализирале механичке особине, неопходно је разматрати запремински удео фаза као и однос са масеним уделом. [6]

5.4.1 Запремински удео

Према литератури [14], запремина композитног материјала v_c је израђена од запремине матрице v_m и запремине влакана v_f . Индекси c , f и m , односе се на композит, матрицу и влакна.

На основу наведене литературе, запремински удео влакана у композиту може се изразити као:

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (5.1)$$

Запремински удео матрице у композиту је:

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (5.2)$$

При томе важи да је:

$$V_m = 1 - V_f \quad (5.3)$$

зато што је:

$$v_c = v_f + v_m \quad (5.4)$$

5.4.2 Масени удео

На сличан начин може да се изрази и масени удео, при чему су m_c , m_f и m_m маса композитног материјала, маса влакана и маса матрице.

Масени удео влакана као и матрице је дат према литератури [6]:

$$M_f = \frac{m_f}{m_c} \quad (5.5)$$

$$M_m = \frac{m_m}{m_c} \quad (5.6)$$

где важи:

$$M_m = 1 - M_f \quad (5.7)$$

5.4.3 Однос између запреминског и масеног удела

Масени и запремински удео, односно однос између њих је могуће је изражава се преко густине композита, влакана и матрице ρ_c , ρ_f , ρ_m .

Маса и запремина су међусобно повезани изразима:

$$m_c = \rho_c V_c \quad m_f = \rho_f V_f \quad m_m = \rho_m V_m \quad (5.8)$$

За композитни материјала, према литератури [6], можемо да кажемо да има укупну масу која је:

$$m_c = m_f + m_m \quad (5.9)$$

односно:

$$\rho_c V_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (5.10)$$

Густину композита у функцији запреминског удела је:

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m (1 - V_f) \quad (5.11)$$

Уколико се узме у обзир запремина композита:

$$v_c = v_f + v_m \quad (5.12)$$

добија се:

$$\frac{m_c}{\rho_c} = \frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m} \quad (5.13)$$

На основу ове једначине, густина композита се изражава преко масеног удела:

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \quad (5.14)$$

На основу наведених једначина и према литератури [6], сада је могуће добити везу између запреминског и масеног удела, уколико узмемо у обзир следеће изразе:

$$M_f = \frac{m_f}{m_c} = \frac{\rho_f v_f}{\rho_c v_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \quad (5.15)$$

и

$$M_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m \quad (5.16)$$

Постоји могућност да се инверзне релације добију на следећи начин:

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} M_f \quad (5.17)$$

$$V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} M_m \quad (5.18)$$

Једначине могу да се прошире на било који број конституената. Према томе, уопштени израз за n број конституената је:

$$M_i = \frac{\rho_i}{\rho_c} V_i \quad (5.19)$$

при чему је:

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n p_i V_i \quad (5.20)$$

важи и

$$V_i = \frac{\rho_c}{\rho_i} M_i \quad (5.21)$$

при чему је

$$\rho_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{M_i}{\rho_i}} \quad (5.22)$$

5.5 Механика композитних материјала

Код композитних материјала постоји значајна разлика у физичким особинама матрице и ојачања. У току процеса производње могу се јавити заостала напрезања у материјалу из разлога што су влакна много мање еластична у односу на матрицу. У зависности од процеса производње, мешања компонената матрице и ојачања, као и од избора компоненти које се користе за израду ових материјала, може се рећи да оваква напрезања варирају у зависности од врсте композита који се израђују. [18]

5.5.1 Микромеханика композитних материјала

За микромеханику композитних материјала можемо да кажемо да је област која се бави анализом композита при чему изучава сваки конституент појединачно у материјалу и на тај начин се предвиђају материјалне константе материјала. Како би у потпуности било описано еластично понашање материјала, те константе се користе у прорачуну матрице крутости. [18]

При прорачуну влакана и матрице која их окружује, уводе се претпоставке према литератури [19]:

1. Матрица и влакна су линеарно еластична,
2. Влакна су бесконачно дугачка,
3. Влакна су равномерно распоређена у квадратни или хексагонални низ.

5.5.2 Макромеханика композитних материјала

Разлог проучавања макромеханике композитних материјала је стицање увида у понашање самог материјала приликом дејства одређених сила на основу познавања појединачних слојева материјала, њихову дебљину, усмерност влакана, итд. [19]

На основу ових карактеристика композита утврђују се вредности тензора напрезања и деформације у слојевима, на основу којих се касније могу одредити вредности сила и момената за дати материјал.

5.6 Примена композитних материјала у наменској индустрији

Како су се композитни материјали развијали у свету, тако се и њихова употреба у наменској индустрији повећавала. Они су важни у овом сектору, јер се различитим комбинацијама могу направити издржљивији и лакши делови на различитим конструкцијама.

Композитни материјали се примењују у наменској индустрији за израду шлемова, оклопа борбених возила, авиона, као и као антишрапнелска заштита борбених возила.

Материјали који се примењују јесу:

- епоксидна смола ојачана арамидним или UHMWPE влакнима,
- фенолна смола ојачана арамидним или UHMWPE влакнима,
- винилестер смола ојачана арамидним или UHMWPE влакнима.



Слика 25. Приказ примене композитних материјала на различитим деловима бродова, авиона, борбених возила [25]

Као што је већ речено, кевлар је материјал који је светлост дана угледао средином двадесетог века и представља први материјал које је коришћен за модерну генерацију панцирних прслука.

Кевлар представља вештачка влакна која имају изузетну отпорност на кидање, односно снагу, а уз то су веома лагана.

Отпорна су на ватру, не топе се на високим температурама и не омекшавају, а такође не губе своја балистичка својства ни када се поквасе.



Слика 26. Балистички прслук [26]

Влакнасти композитни материјали користе се на војним авионима још од шездесетих година. Реч је углавном о ограниченој примени на неким од секундарних делова, као што су панели на излазној ивици крила или неким деловима вертикалног репа.

За авиоиндустрију композитни материјали представљају веома битну групу материјала. У сталној пострази за новим решењима у пројектовању летелица, конструктори су често ограничени на тренутно доступне материјале. Открићем композитним материјалима заснованих на угљеничним влакнима, конструктори су добили материјал чији је један од важних параметара изузетна чврстоћа и постојаност уз велике уштеде масе и до 20% у поређењу са до сада коришћеним материјалима.

Код војних летелица, применом композитних материјала постижу се боље маневарске способности. Нижа маса летелице утиче на смањење потрошње горива, а такође, захваљујући особини да пластична структура захтева мање спојева, долази до побољшања аеродинамичких особина и смањења трошкова производње. Употреба композитних материјала на војним авионима највише је одмакла на америчком ловцу нове генерације „F-35“. Процена је да је готово две трећине летелице направљено од композитних материјала. Поред мање масе, летелица има и смањени радарски одзив.

Поред овог, војни транспортер „Airbus A-400“, сачињен је од око 20% композитног материјала.



Слика 27. Војни авион Ловац „F-35“ (лево) и војни транспортер „Airbus A-400“ (десно) [27]

6. Функционално градијентно распоређени материјали

Непрекидни развој индустрије намеће потребу да се конвенционални материјали, где год је то могуће, замене новим, савременим материјалима и на тај начин животно окружење учини сигурнијим и квалитетнијим. Све већа употреба нових материјала у медицини, стоматологији, авио индустрији, аутомобилској индустрији, грађевини и слично, омогућава поузданије и безбедније окружење. Данас, савремене конструкције потражују нове материјале који, својим карактеристикама, могу да одговоре на све захтеве који се пред њих постављају.

Функционално градијентно распоређени материјали представљају највишу лествицу у развоју модерних материјала. Они чине савремене материјале у породици инжењерских композита који добијају све ширу примену у разним гранама инжењерства и технологије са циљем да се њихове особине искористе на најбољи могући начин, комбинацијом потенцијала доступних материјала. [20]

Функционално градијентни материјали представљају материјале у којима постоји континуална или дисконтинуална промена хемијског састава и/или микроструктуре кроз дефинисано геометријско растојање.

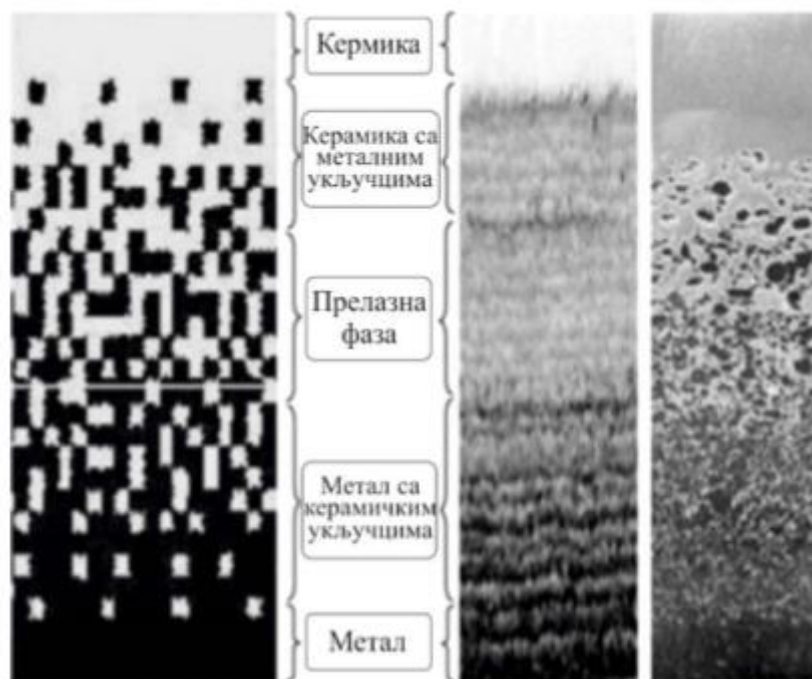
На слици број 28 приказана је основна разлика између хомогеног и ламинатног композита у односу на функционално градијентни материјал. Код ламинатног композита постоји јасна граница између два материјала. Код функционално градијентног материјала, горња површина јесте од чисте керамике, док доњу површину чини метал, а између је непрекидан прелаз од једног до другог материјала.



Слика 28. Хомогени и ламинатни композит у односу на ФГМ [20]

Најчешће коришћени функционално градијентни материјал је метал/керамика, при чему керамика има добру топлотну отпорност, а удео метала је значајан у погледу механичке чврстоће, жилавости. Функционално градијентни материјал може бити формиран тако да се постигне жељени градијент особина у одређеним правцима тако што би се варирао проценат запреминског удела два или више материјала.

Континуално градијенти ФГМ са метал/керамика конституентима је приказан на слици 29.



Слика 29. Континуално градијенти ФГМ са метал/керамика конституентима [20]

Приликом анализа функционално градијентних материјала, врши се апроксимација, при чему се они посматрају као континуум чија се механичка својства мењају равномерно у правцу одређене осе, иако су они веома хетерогени.

ФГМ материјали могу бити различито пројектовани и произведени у зависности од распореда и удела конституената у жељеном правцу. Самим тим и математичке функције које описују добијени градијент особина у одређеном правцу су различите. Према литератури [20], најчешће коришћене функције за опис промене механичких особина при креирању математичког модела ФГМ су:

- степена функција,
- сигма функција,
- експоненцијална функција,
- Мори-Танака метода.

Степена функција

Једна од најчешће коришћених функција јесте ова, која је намењена за опис промене термомеханичких особина ФГМ у правцу дебљине плоче.

Промену механичких особина као функцију запреминског удела конституената ФГМ у правцу дебљине плоче, дефинише приказана степена функција, где је:

$$P(z) = P_b + P_{tb} \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^p \quad (6.1)$$

$$P_{tb} = P_t - P_b \quad (6.2)$$

$$V_f = \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^p \quad (6.3)$$

$P(z)$ -материјална карактеристика у пресеку „ z “,

h -укупна дебљина плоче,

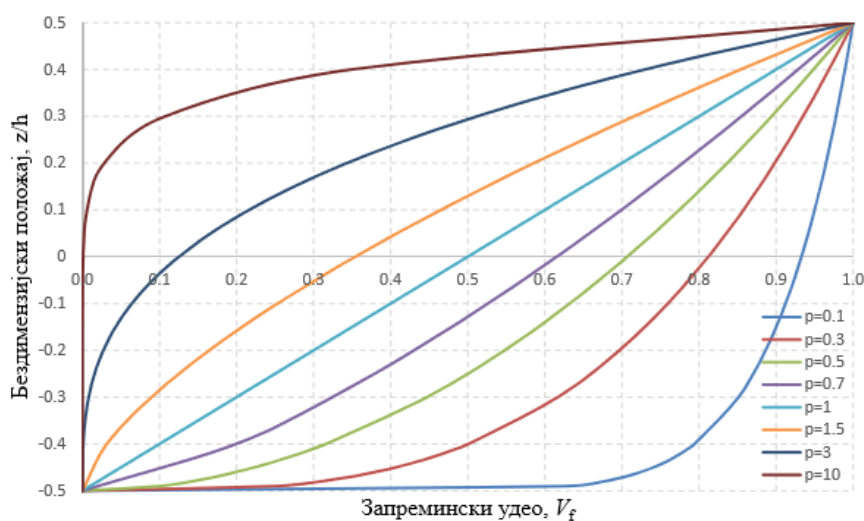
P_t -материјална карактеристика на врху плоче,

P_b -материјална карактеристика на дну плоче,

V_f -запремински удео керамике/метала,

p - запремински удео конституената.

На слици 30, дат је детаљан приказ запреминског удела конституената кроз дебљину плоче за различите вредности индекса p .



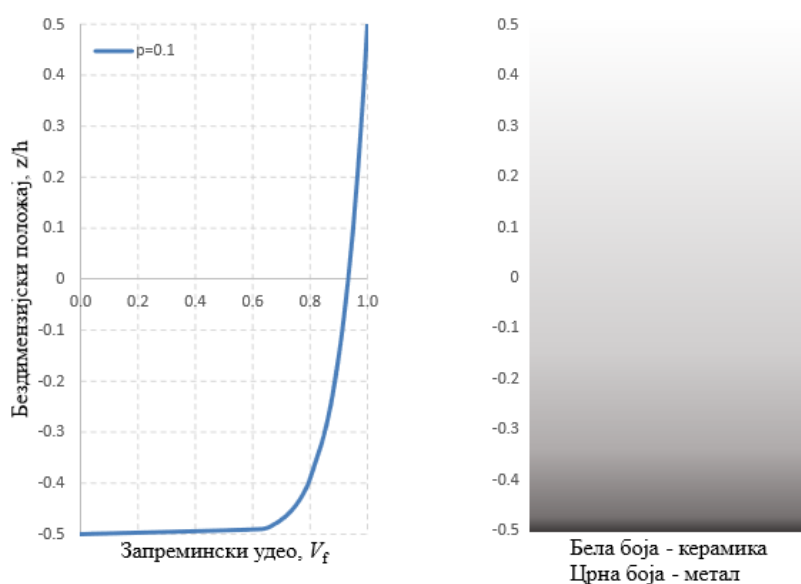
Слика 30. Варијација запреминског удела конституената ФГМ у правцу дебљине плоче у зависности од индекса p [20]

Са дијаграма се види да је при вредности $p=0$ плоча од чисте керамике, при вредностима $p=0,3;0,5;1;3$ смањује се удео керамике, а расте удео метала, да би при вредностима $p=\infty$ плоча била од метала.

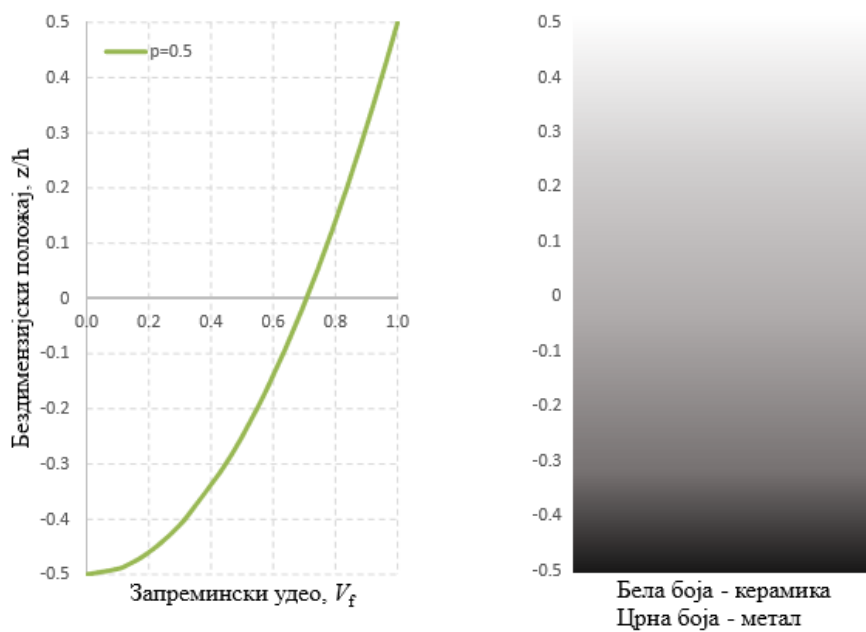
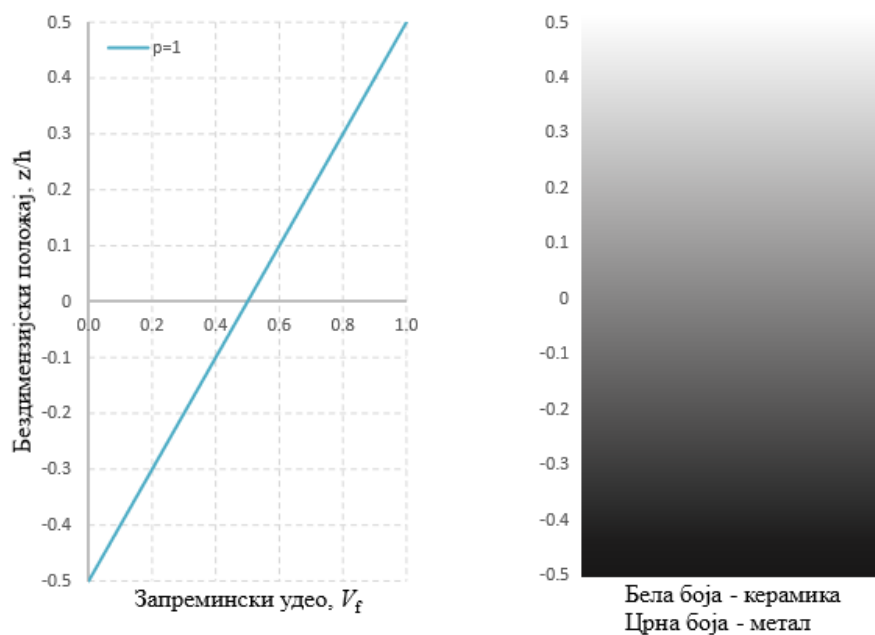
На основу тога, приликом производње плоча од ФГМ, уколико се жели добити боља термичка отпорност, отпорност на корозију, потребно је узети мањи индекс p , што значи да ће плоча обилovati керамиком. Уколико се ипак жели добити плоча велике носивости и жилавости, потребно је узети већи индекс p , што значи да ће плоча обилovati металом.

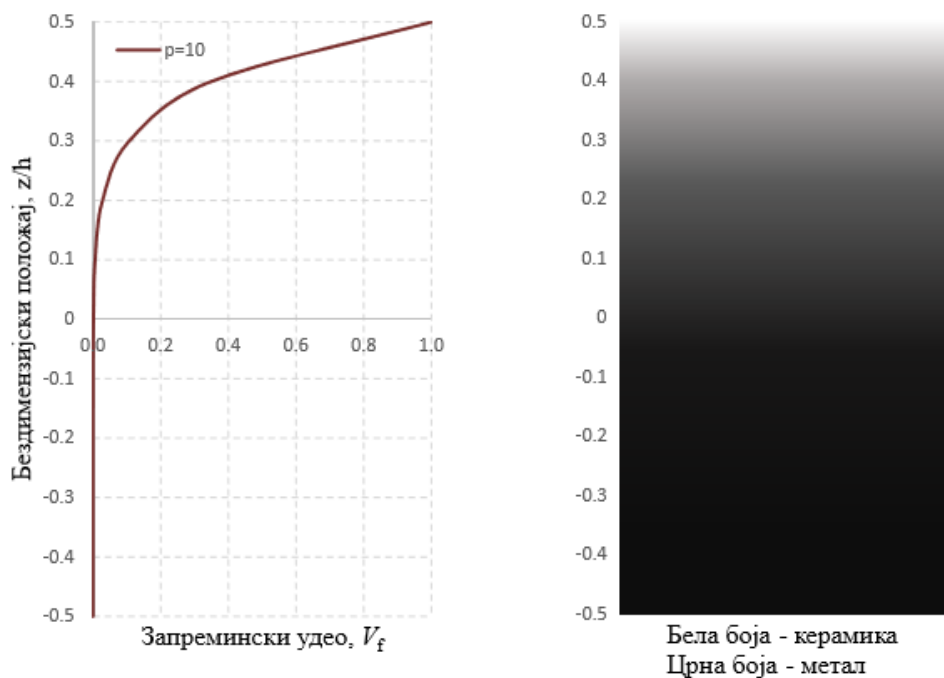
На наредним сликама, дат је приказ дијаграма са различитим утицајем индекса p .

Приказ дијаграма дат је ради лакшег и бољег разумевања утицаја индекса p . Обојени графикони дати су ради прегледније постепене промене у својствима материјала, где се црна боја односи на метал, а бела на керамички материјал. Визуелни показатељ мешавине метала и керамике приказан је сивом бојом, где тамно сива боја представља мешавину која је богатија металом, док је светло сива боја показатељ мешавине богатије керамиком.



Слика 31. Графички приказ запреминског удела за $p=0,1$ [20]

Слика 32. Графички приказ запреминског удела $p=0,5$ [20]Слика 33. Графички приказ запреминског удела $p=1$ [20]



Слика 34. Графички приказ запреминског удела $p=10$ [20]

Сигма функција

Код слојевитих функционално градијентних плоча највише се примењује ова функција. На пример, код плоча са керамиком у центру и градијентном променом особина до метала на обе крајње ивице плоче.

Промена запреминског удела конституената од средње равни према горњој ивици плоче ид од доње ивице према средњој равни, дата је као:

$$V_{f1} = 1 + \left(\frac{z}{h} - \frac{1}{2}\right)^p \quad 0 \leq z \leq h/2 \quad (6.4)$$

$$V_{f2} = \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^p \quad -h/2 \leq z \leq 0 \quad (6.5)$$

Где је:

V_{f1} -запремински удео конституената од средње равни према горњој ивици плоче,

V_{f2} -запремински удео конституената од доње ивице према средњој равни плоче.

Експоненцијална функција

За решавање и анализирање проблема у механици лома, најчешће се примењује ова врста функције. Следећом експоненцијалном функцијом дата је промена термомеханичких особина у праву дебљине плоче:

$$P(z) = P_b e^{\left(\frac{z}{h} \ln\left(\frac{P_t}{P_b}\right)\right)} \quad (6.6)$$

Мори - Танака метода

Ова метода процене се највише примењује код градијентне микроструктуре која има јасно дефинисану континуалну матрицу и насумично распоређену фазу сферних честица. Ефекат еластичних поља и интеракције између суседних честица конституената јесте оно што ова метода разматра. Ефективне материјалне карактеристике у правцу дебљине плоче се овом методом рачунају:

$$\frac{K(z)-K_b}{K_t-K(z)} = \frac{V_f^p}{1+(1-V_f^p)\left(\frac{K_t-K_b}{K_b+\frac{4}{3}G_b}\right)} \quad (6.7)$$

$$\frac{G(z)-G_b}{G_t-G(z)} = \frac{V_f^p}{1+(1-V_f^p)\left(\frac{G_t-G_b}{G_b+f_b}\right)} \quad (6.8)$$

где је:

$$f_b = \frac{G_b(9K_b+8G_b)}{6(K_b+2G_b)} \quad (6.9)$$

$K(z)$ -модул стишљивости,

$G(z)$ -модул смицања.

Поасонов коефицијент $\nu(z)$, ефективна вредност модула еластичности $E(z)$ и коефицијент термичког ширења $\alpha(z)$, рачунају се на основу $K(z)$ и $G(z)$ као:

$$\nu = \frac{3K(z) - 2G(z)}{2(3K(z) + G(z))}, \quad (6.10)$$

$$E(z) = \frac{9K(z)G(z)}{3K(z) + G(z)} \quad (6.11)$$

$$\frac{\alpha(z) - \alpha_b}{\alpha_t - \alpha(z)} = \frac{\frac{1}{K(z)} - \frac{1}{K_b}}{\frac{1}{K_t} - \frac{1}{K_b}} \quad (6.12)$$

6.1 Подела функционално градијентних материјала

У зависности од типа градијента, ФГМ могу бити са:

- степенастим градијентом (скоковит),
- континуалним градијентом (линеарни, параболични или експоненцијалан).

У зависности од структуре градијента, ФГМ могу бити са градијентом који зависи од:

- запреминског удела честица,
- облика честица,
- оријентације честица,
- величине честица.

На основу димензија, ФГМ се деле на:

- функционално градијентне филмове,
- функционално градијентне међуслојеве,
- масивне функционално градијентне.

6.2 Примена функционално градијентних материјала

Као што је већ речено, ФГМ који се данас најчешће употребљава је метал/керамика. Након одржаног првог интернационалног симпозијума о ФГМ у Јапану, почиње убрзан развој ових материјала. У оквиру поменутог националног програма јапанске Владе, покренут је пројекат развоја ФГМ који ће служити као термички штит космичких бродова. При уласку великим брзинама у оксидациону атмосферу, долази до великог термичког напрезања материјала од кога је израђен космички брод, јер се на површини материјала јављају температуре од 1800 - 2000 °С, а такође постоји и велика температурна разлика између спољашњег и унутрашњег зида летелице. Сви ови отежани услови рада космичког брода су захтевали да материјал од кога ће сам космички брод бити израђен буде термостабилан и отпоран на оксидацију на спољашњој, високотемпературној страни и који поседују механичку чврстоћу на нискотемпературној страни. У том моменту, није постојао индустријски материјал који је могао да задовољи задате критеријуме. У ту сврху, произведена је термичка баријера чија је спољашња површина, која се налази у контакту са високотемпературним гасовима, израђена од керамичких материјала који могу да обезбеде адекватну термичку стабилност, док је са нискотемпературне стране ова баријера била израђена од тврдог метала чиме је постигнута неопходна термичка проводљивост и механичка чврстоћа. Ова термичка баријера креирана је тако што је састав градијентно вариран од керамике до метала.

Према мом мишљењу, нешто слично би у будућности могло бити примењено и на цеви артиљеријских оруђа. Приликом опаљења, долази до сагоревања барутног пуњења, чиме се ствара огромна количина барутних гасова, а такође је процес опаљења праћен појавом изузетно високе температуре. Искоришћеност ослобођене енергије је веома мала, јер долази до интензивног загревања цеви артиљеријског оруђа и размене топлоте са околином. Ако би се на цев артиљеријског оруђа применио ФГМ чији се састав градијентно мења од челика са унутрашње стране, до керамике са спољашње стране, овај губитак енергије би се значајно могао смањити, чиме би се повећала искоришћеност самог система оруђа – пројектил, јер би се пројектилу који се испаљује из овако израђене цеви артиљеријског оруђа могла саопштити већа почетна брзина, чиме би се могли постићи и већи домети. Поред овога, смањио би се и демаскирајући ефекат приликом опаљења, јер би температура цеви на спољашњој страни била мања, па би било теже уочити инфрацрвено зрачење коју емитује цев.

7. Закључак

Композитни материјали представљају комбинацију два или више материјала са различитим физичко – механичким својствима у микро и/или макроскопској размери. Овако добијени материјали показују најбоља својства својих компонената, а понекад и својства које компоненте не поседују.

Материјали који се користе у процесу производње материјала варирају по физичким, механичким и хемијским својствима. Ово се првенствено односи на материјале за израду матрица, које варирају од полимерних, металних, керамичких, итд. Поред матрица, влакна и честице којима се матрице ојачавају, такође варирају у складу са већ поменутим особинама.

Одређени композитни материјали представљају у овом тренутку незаменљива средства за израду сложених ваздухопловних, аеронаутичких и других конструкција, због својих физичких, хемијских, механичких и других особина. Поред тога, композитни материјали се могу употребљавати и за израду делова који су потпуно другачије намене, као што су шлемови, оклопи борбених возила, водећи прстен пројектила и сл.

Непрекидни развој индустрије намеће потребу да се конвенционални материјали, где год је то могуће, замене најсавременијим материјалима. Функционално градијентно распоређени материјали, као група савремених материјала у породици инжењерских композита добијају све ширу примену у разним гранама индустрије. С обзиром да су функционално градијентно распоређени материјали, материјали најновијег датума, њихова шира примена се тек очекује. За сад, су најраспрострањенији у свемирској индустрији, међутим, према мом мишљењу ускоро би могли да нађу своје место у наменској индустрији.

Литература

- [1] Милорад Јовановић, Вукић Лазић, Душан Арсић, *Наука о материјалима*, Крагујевац, 2017.
- [2] Винко Павелић, *Технологија производње наоружања*, Загреб, 1988.
- [3] Богдан Недић, Владислав Ђукић, *Пластичне масе*, Крагујевац, 2004.
- [4] Јовица Богданов, *Познавање убојних средстава*, Београд, 2015.
- [5] M. D. Jackson, E. N. Landis, P. F. Brune, M. Vitti, H. Chen, Q. Li, M. Kunz, H. Wenk, P. J. M. Monteiro, A. R. Ingraffea, "Mechanical resilience and cementitious processes in Imperial Roman architectural mortar", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014.
- [6] Владимир Н. Героски, *Макромеханика композитних материјала*, мастер рад, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2016.
- [7] L. N. Phillips, *Design with Advanced Composite Materials*, London, 1989.
- [8] П. С. Ускоковић, *Карактеризација механичких својстава једноосних хибридних композитних материјала*, докторска дисертација, Технолошкометалуршки факултет, Београд, 1999.
- [9] М. Петровић, *Испитивање композитних материјала помоћу уграђених фиброоптички сензора приликом удара контролисаном енергијом*, Докторска дисертација, Електротехнички факултет у Београду, Београд, 2016.
- [10] Bryan Harris, *Engineering Composite Materials*, The Institute of Materials, London, 1999.
- [11] "Modern Plastics Encyclopedia", Vol 62, No 10A, McGraw-Hill, 1985-1986.
- [12] Љ. М. Брајовић, *Детекција оштећења услед замора једноосних композитних материјала применом оптичких влакана*, докторска дисертација, *Технолошко-металуршки факултет*, Београд, 2004.
- [13] М. Пошорац-Марковић, *Синтеза и карактеризација композитног керамичког материјала на бази силицијум карбида и кордијерита*, Технолошко металуршки факултет, Београд, 2013.
- [14] J. M. Berthelot, *Mechanics of Composite Materials and Structures*, Vallouise, 2015.
- [15] Р. Алексић, *Основи композитних материјала*, Београд, ТМФ; 2004.
- [16] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design*, Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC CRC Press; 2008.
- [17] Јулијана Лабовић, *Композитни материјали, карактеристике и примена*, мастер рад, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2019.
- [18] Гордана Богдановић, *Динамичко понашање композитних ламината*, докторска дисертација, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.

- [19]Ивица Смојвер, *Механика композитних материјала*, Загреб, 2007.
- [20]Драган Чукановић, *Статичка и динамичка анализа плоча од функционално градијентно распоређених материјала*, докторска дисертација, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017.
- [21]<https://www.doccity.com/sr/polimerni-materijali-slajdovi-organska-hemija-hemija/203061/>, посећено 05.09.2019.
- [22]<https://www.steyr-arms.com/>, посећено 08.09.2019.
- [23]<https://www.magnumserbia.rs/sr/pistoljirevolveri/pistolj-glock-17-gen4-9mm-1270>, посећено 08.09.2019.
- [24]<https://specijalne-jedinice.com/Oprema/Pistolji/CZ-99.html#sthash.6SqTK9lb.dpbs>, посећено 09.09.2019.
- [25]<https://slideplayer.gr/slide/14953913/>, посећено 09.09.2019.
- [26]<https://www.armyequipment.com/proizvodi/balisticki-proizvodi/balisticki-prsluci-panciri>, посећено 10.09.2019.
- [27]<http://planeta.org.rs/49/10aeronautika.htm>, посећено 11.09.2019.