

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Механика композитних материјала

Број индекса: 422/2018

Јанићије Д. Весовић

**Фабрикација функционално градијентних
материјала и примена
мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Гордана Богдановић-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Резиме

Композитни материјали чине посебну групу материјала који се добијају спајањем две или више компоненти различитим технолошким процесима. У оквиру овог мастер рада описани су Функционално Градијентни Материјали (ФГМ), који представљају посебну групу композитних материјала. Описана је структура ФГМ, код које не постоји нагла, већ градијентна промена механичких особина између слојева. На овај начин побољшавају се механичке особине, смањују се напони и унапређују се термомеханичка својства. У наставку су приказане теоријске основе ФГМ, почевши од поделе, преко различитих метода производње, до математичких функција градијената материјала. Посебна пажња дата је самој примени ФГМ у разним гранама индустрије. Такође је описан и математички модел понашања плоче израђене од ФГМ.

Кључне речи: композитни материјали, функционално градијентни материјали, фабрикација ФГМ, примена ФГМ

Abstract

Composite materials form a special group of materials that are obtained by joining two or more components with different technological processes. Within this master's thesis, Functionally Graded Materials (FGM) are described, which represent a special group of composite materials. The structure of FGM is described, in which there is no sudden, but a gradient change of mechanical properties between the layers. This way, mechanical properties are improved, stresses are reduced and thermo-mechanical properties are improved. The theoretical foundations of FGM are presented below, starting from the division, through different production methods, to the mathematical functions of material gradients. Special attention is paid to the application of FGM in various branches of industry. A mathematical model of the behavior of a board made of FGM is also described.

Keywords: composite materials, functionally graded materials, fabrication of FGM, application of FGM

Садржај

1. Увод.....	5
2. Структура композитних материјала.....	6
2.1 Влакна	7
2.2 Матрице	11
3. Теоријске основе функционално градијентно распоређених материјала	16
3.1 Подела ФГМ	21
3.2 Методе производње ФГМ	22
3.2.1 Металургија прахова	22
3.2.2 Центрифугално ливење	24
3.2.3 Центрифугална метода талоба	26
3.2.4 Центрифугална метода мешавине прахова	27
3.2.5 Техника напаравања	28
3.3 Градијент материјала ФГМ плоча	28
3.3.1 Материјалне карактеристике П-ФГМ плоча	29
3.3.2 Материјалне карактеристике С-ФГМ плоча	30
3.3.3 Материјалне карактеристике Е-ФГМ плоча.....	31
3.3.4 Мори - Танака метода процене материјалних карактеристика	32
4. Примена функционално градијентних материјала	34
4.1 Транспортни системи	35
4.1.1 Делови свемирских летелица.....	35
4.1.2 Аеромотори	37
4.1.3 Дизел мотори.....	38
4.2 Системи за претварање енергије	39
4.2.1 Делови конвенционалних горивих система	39
4.2.2 Делови за интегрисане термојонске/термоелектричне системе.....	40
4.2.3 Делови горивних ћелија	42
4.2.4 Делови нуклеарног реактора.....	44
4.3 Резни алати	45
4.3.1 Материјали отпорни на хабање	45

4.3.2 Превлаке отпорне на хабање.....	48
4.4 Делови машина.....	49
4.5 Функционално градијентни биоматеријали за вештачке зглобове.....	51
4.5.1 Градијентни међуслој за кости у ортопедским имплантатима.....	51
4.5.2 Зубни имплантати	56
5. Математички опис понашања ФГМ.....	57
5.1 Напонско поље ФГМ плоче	57
5.2 Аксијалне силе, нормалне силе и момент савијања ФГМ плоча	59
5.3 Једначине равнотеже и компатибилности ФГМ плоча	60
6. Закључак	64
7. Литература.....	65

1. Увод

Развој индустрије утицао је на захтеве постављене пред индустријске материјале. Појавила се потреба да се конвенционални материјали замене новијим, савременијим материјалима који ће моћи да испуне задате циљеве. Велики број проблема није било могуће решити применом самосталних метала па ни њихових легура. Употреба полимерних, као и керамичких материјала није дала боље резултате. То је довело до све веће употребе комбинације два или више материјала, који се заједничким термином називају композитни материјали. Ови материјали су нашли своју примену у машинству, авио индустрији, војном инжењерству, аутомобилској индустрији итд. Материјали који имају широку област примене, велики обим производње, неограничене ресурсе, самим тим постижу конкурентну цену и расположивост на тржишту. Насупрот њима, група нових материјала, коју карактеришу посебна својства и примена, ограничени ресурси, високи захтеви у процесу производње, као и у погледу карактеристика и квалитета, што за последицу има високу цену, самим тим и примену ограничену само на скупе и одговорне конструкције. Развој нових материјала резултује све већом количином информација о поступцима њиховог добијања (производње и обликовања), о њиховим својствима и могућностима примене.

Данашња истраживања материјала могуће је поделити у две групе:

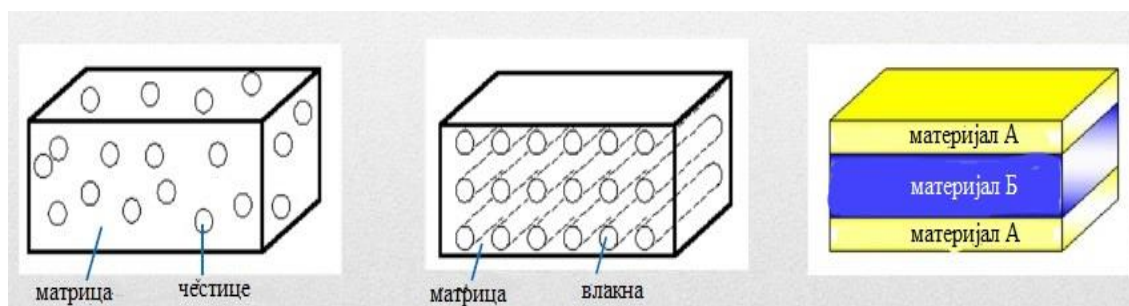
- примена експерименталних метода и савремених инструмената за карактеризацију материјала на микро и нано нивоу
- примена рачунарских симулација које доводе до креирања математичких модела који омогућавају анализу на микро и макромеханичком нивоу. Тако креирани модели омогућавају анализу понашања материјала у реалним условима експлоатације при деловању механичких оптерећења и температуре

У овом раду биће разматрана фабрикација функционално градијентних материјала и њихова примена. Поћи ће се од теорије самих композитних материјала, као и могућности замене већ примењених материјала новим у постојећим конструкцијама.

2. Структура композитних материјала

Композитни материјали се састоје од две основне компоненте: влакна и матрице који чине слојеве који су међусобно повезани и тако чине вишеслојни композит (ламинат). Влакна су основни носиви елемент композита и дају му чврстоћу, док матрица држи влакна заједно, има важну функцију у преносу оптерећења на влакно, даје спољашњу форму композиту, дефинише његово понашање у односу на деловање атмосфере итд. Влакна су најчешће: угљенична, стаклена, арамидна (нпр. кевлар) и метална, а најчешће чине 60 - 70 % запреминског удела у композиту. Матрице могу бити полимерне (дуромери и пластомери), затим угљеничне, металне (енгл. Metal Matrix Composites), керамичке и др. Влакна поред уобичајене конфигурације дугих влакана, могу бити и кратка влакна, сфере и др. Посебну врсту композита чини препрег (енгл. PREimPREGnated) код којих су плетена влакна натопљена матрицом (најчешће полимерном). Препрег се у правилу користи за производњу композитних компоненти у аутоклаву. Ова је технологија врло заступљена код производње композитних делова авионске конструкције. Према облику ојачања композитни материјали се могу поделити у три категорије које чине [1]:

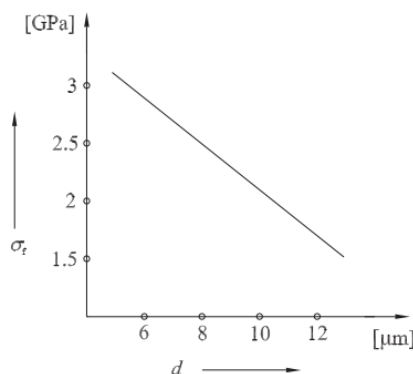
- честицама ојачани
- влакнима ојачани
- слојевити - ламинарни композитни материјали



Слика 1. Упрошћен приказ разлика у структури композитних материјала [1]

2.1 Влакна

Висока механичка својства влакана резултат су снажних међуатомских сила које владају у материјалима ниског атомског броја и мале густине (нпр. C, B, Al, Si). Влакна могу бити направљена или само од тих елемената, од њихових међусобних једињења, или једињења са кисеоником и азотом. Код ових материјала није изражено пластично течење, као код метала, већ се лом догађа услед интегралног ефекта деловања микроскопских пукотина, чији се број смањује што су мање димензије влакна (попречни пресек у односу на дужину). Материјал у влакнастој форми, због тога, има врло малу запремину по метру дужине, па је вероватноћа појаве пукотине обрнуто пропорционална запремини материјала. Са друге стране, код оваквог материјала је знатно више изражено одступање својстава од референтних вредности. Ова неуједначеност механичких својстава представља велики проблем при прорачуну и изради композитних конструкција.



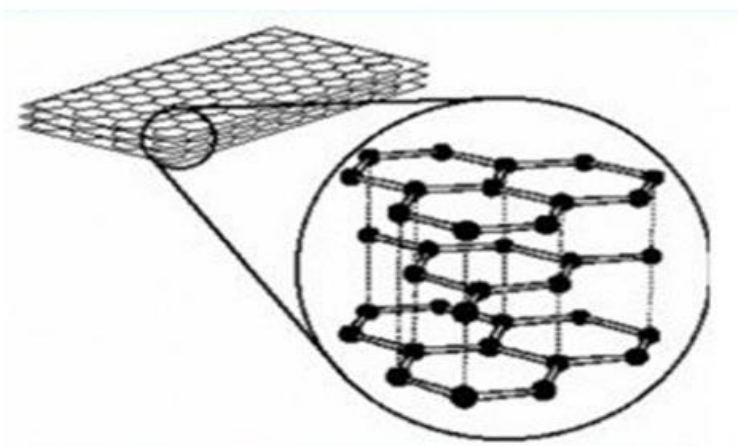
Слика 2. Утицај пречника влакна d на чврстоћу σ_f [2]

Број микроскопских пукотина може бити знатно смањен технологијом израде влакна (где је од посебне важности чистоћа сировине од које је влакно направљено) или заштитном пресвлаком око влакна. Брзина таложења молекула и брзина хлађења имају знатан утицај на структуру влакна, при чему врло велике брзине хлађења дају врло фину молекуларну структуру која се не може постићи код материјала у невлакнастој форми. Поступци који у себи укључују извлачење или вучење, због затезних напрезања у влакну имају позитиван утицај на усмереност кристала или атомске структуре у правцу влакана.

Угљенична (карбонска) влакна данас су најраспрострањенија, посебно код механички најоптерећенијих авионских конструкција. Треба нагласити да је погрешно називати угљенична влакна графитним - графит је један од облика угљеника, код којег су снажним ковалентним везама повезане хексагоналне базне равни, док је тродимензионална структура постигнута њиховим међусобним повезивањем слабир Ван дер Валсовим силама. Управо ове силе омогућавају лако клизање базних равни једне преко друге, што је и разлог зашто графит има својство подмазивања односно смањивања трења. За разлику

од графита угљенична влакна имају само дводимензионалну структуру. Већина угљеничних влакана која се користе у авионским и другим конструкцијама су направљена из полиакрилонитрил (ПАН) влакана или из различитих смола процесом карбонизације, при чему се поступци производње могу значајно разликовати. ПАН поступком се производе влакна са уделом С до 50 % док се влакна из смоле одликују уделом С до 80 %. Према основним механичким карактеристикам, угљенична влакна се класификују као:

- НМ - високог модула еластичности
- НS - високе чврстоће
- ИМ - умереног модула еластичности
- УНМ - врло високи модул еластичности



Слика 3. Микроструктура карбонских влакана [Wind Power Engineering]

Влакна добијена из смоле генерално имају већи модул еластичности, али и мању затезну и притисну чврстоћу у односу на ПАН влакна. Ова су влакна и знатно више порозна, што додатно утиче на њихову чврстоћу. Влакна од смоле могу имати и добру електричну проводљивост, просечног су пречника 10 - 11 μm , за разлику од ПАН влакана пречника 5-10 μm . У попречном пресеку, угљенична влакна могу имати радијални облик, облик концентричних слојева, трансверзално изотропни или језгро и спољну љуску (најчешћи облик, карактеристичан за ПАН влакна).[2]

Стаклена влакна се најчешће производе од силицијума (силицијум диоксид SiO_2) различитим поступцима и у правилу имају слабија механичка својства од угљеничних влакана. Врло су раширена у примени код механички мање захтевних конструкција због њихове мање цене. Могу се знатно разликовати по својствима па се означавају као А-стакло (прва произведена влакна, данас се врло ретко користе), С-стакло (користе се због побољшане отпорности на киселине и базе), Е-стакло (најчешће коришћено, побољшана

отпорност на влагу и блаже хемикалије), S-стакло (повећане чврстоће и модула еластичности, користе се код механички оптерећенијих конструкција где су потребни висока специфична крутост и чврстоћа).



Слика 4. Стаклена влакна [Langhao Trading]

Полимерна влакна су једина у потпуности синтетички створена. Међу њима су најпознатија Кевларска влакна, а у последње време се користе и полиимиди због могућности коришћења и на повишеним температурама (и преко 300 °C). Полимерна влакна се састоје од полимерних ланаца који се посебним поступцима издужују у правцу пружања влакна. Њихова својства су изражена последица њихове микроструктуре. Будући да полимерне молекуле стварају површине велике крутости, које су међусобно повезане слабир водоничним везама, читав је изглед влакна врло сличан оном радијалног распореда код угљеничног влакна. Због тога Кевларска влакна имају низак модул смицања у уздужном смеру, слаба својства у попречном смеру као и малу уздужну притисну чврстоћу, због слабих водоничних веза међу равнима. Са друге стране одликују их добра уздужна затезна чврстоћа, добра хемијска отпорност и мала густина.



Слика 5. Кевлар влакна [Polyfibre]

Посебну групу чине борова влакна. Ово су сама по себи композитна влакна будући да се бор посебним поступком наноси на угљенично (израђено из смоле) или волфрамово влакно. Борова влакна имају знатно већи пречник ($125 - 140 \mu\text{m}$) у односу на друге врсте влакана (нпр. угљенично пречника $10 \mu\text{m}$). Због врло високе тврдоће бора, ови композити се врло тешко накнадно обрађују (бушење рупа или резање), што је уз високу цену, главни разлог што су их у ваздухопловним конструкцијама у потпуности истиснули композити са угљеничним влакнима. Борова влакна су се користила у неким од првих авиона у којима су коришћени композити. Касније је бор коришћен као једно од првих влакана у композитима са металном матрицом (енгл. Metal Matrix Composites - MMC), при чему је матрица алуминијумска или титанска.

Влакна од силицијум карбида производе се сличним поступком као и борова влакна - напаравањем на језгру од угљениковог влакна (енгл. Chemical Vapor Deposition - CVD). Ова су влакна посебно погодна за ојачавање метала (алуминијумских и титанских легура) као и ојачавање керамике у форми влакна од силицијум карбида, силицијум нитрида или стакла. У другом се облику ова влакна израђују од полимера који садрже силицијум и угљеник, једно од таквих влакана познато је под трговачким именом Nicalon или у побољшаној верзији Hi-Nicalon. Ова влакна имају и својство полупроводљивости - отпор им зависи од количине нечистоћа које садрже. Nicalon влакна су знатно јефтинија него влакна произведена CVD поступком али нису погодна за примену на повишеним температурама.

2.2 Матрице

Основне функције матрице су:

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

Својства матрице изразито су важна за одређивање уздужне затетзне чврстоће, попречне притисне чврстоће као и међуслојне смицајне чврстоће и обично се каже да су ова својства условљена матрицом. У ваздухопловним конструкцијама, матрица мора бити отпорна и на погонско гориво, хидрауличке флуиде као и различите хемикалије које се користе при одржавању (нпр. средства за скидање боје). За композите се тражи да добро подносе температуре до 150 °C, изузетно и до 200 °C. Својства матрице најчешће одређују и својства композита, као и ограничења у примени. У случају изложености композита хемијским или утицајима околине, матрица је она која је прва изложена смањењу механичких својстава, па тако њене особине значајно одређују понашање композита. Врло битна физичка величина је температура преласка у круто стање (енгл. glass transition temperature - GTT) која дефинише тачку преласка из вискозног у круто стање матрице. Ова температура битно дефинише коначне особине матрице. Наиме, при употреби изнад GTT, својства матрице знатно се снижавају. Влага у композиту (понајвише матрици) знатно снижава GTT. Технологија израде композита знатно утиче на његова својства, јер мора осигурати добру везу влакна и матрице као и минималан удео шупљина или пукотина у композиту.

Када је реч о полимерима, они се деле у две велике групе: дуромери и пластомери. Дуромери при загревању стварају неповратне хемијске везе међу полимерним ланцима који су међусобно снажно умрежени. При поновном загревању, они не мењају стање, већ остају крути све док се под деловањем високе температуре потпуно не разграде. Ово указује и на велики проблем при њиховој примени, који је данас све важнији: није их могуће рециклирати размекшавањем матрице већ само механички уситнити чиме се добијају ситне грануле које у себи садрже и влакна и матрицу. За разлику од њих, пластомери имају својство да се при хлађењу стврдњавају, али се при поновном загревању размекшавају па их је могуће поново обликовати. Ово омогућује поправљање делова који су израђени од ових композита, као и њихово делимично рециклирање. Надаље, код пластомера је могућа одређена кристалност, док су дуромери искључиво аморфни. Кристалност је узрокована усмереношћу ланаца. Они делови полимера (или они

полимери) са кристалном структуром имају већу густоћу, али и боља механичка својства и отпорност према растварачима (која је узрокована смањеном молекуларном активношћу, односно већом уређеношћу молекула).[2]

Дуромери су полимери који се најчешће користе у производњи композита због релативно ниже цене, ниских производних температура и ниске вискозности при производњи. Од њих, за композите високих механичких својстава, у ваздухопловним конструкцијама најчешће су коришћене епоксидне смоле због лаког коришћења, ниске цене, извршних механичких својстава, добре хемијске постојаности и задржавања добрих механичких својстава и димензија при повишеној температури и влази. Добро реагују (остварују добру адхезију) са већином врста влакана. Будући да при производњи пролазе кроз период врло ниске вискозности, то им омогућава врло широке технике производње. Епоксиди су најчешће двокомпонентни, при чему се у процесу производње додаје очвршћивач који постаје саставни део структуре матрице. Након мешања епоксида и очвршћивача, под деловањем топлоте долази до укрућивања што се догађа неколико сати. Коначна својства епоксидне матрице показују изразиру крхкост, што доводи до знатне осетљивости обзиром на појаву пукотина. Да би се побољшала ова својства, као и отпорност према влази и топлотна стабилност, данас се епоксидима додају еластомери као и други типови полимера. Друга врста дуромера која се све више користи због отпорности према повишеним температурама јесу адицијски полиимида. Међу њима су најпознатији бизмалеимида (БМИ) који поседују добре производне карактеристике, али главни недостатак им је повишене крхкост која се може смањити додавањем одговарајућих једињења (нпр. полисулфон, полиетеримид и др.). Друге врсте ових једињења су PMR-15 полиимида са GTT од готово 300 °C. Цианати су такође дуромери који су погодни за примену на високим температурама који имају GTT око 290 °C. Одликују их добре карактеристике при примени у врућим и влажним условима (нешто слабија од епоксидне смоле) и висока тврдоћа. Често се користе и незасићени полиестери, најчешће у комбинацији са стакленим влакнима. Представник ових полимера су винил естери који су врло популарни због своје цене, отпорности на влагу и брзине и једноставности у изради композита.

Епоксидне смоле спадају у групу аморфних полимера које карактерише појава гумене (гел) фазе на вишим, а стакласте фазе на нижим температурама. Епоксиди који полимеризирају на собној температури погодни су за коришћење до 50 °C док се у зависности од типа очвршћивача остале врсте епоксида обрађују на температурама између 120 и 180 °C. Хемијске реакције које се при полимеризацији догађају су егзотермне, па употреба велике количине очвршћивача (катализатора) или превисока температура полимеризације може довести до топлотне деградације матрице, а тиме и самог композита. Ово је разлог због ког се посебна пажња мора посветити изради калупа, посебно ако се ради о дебљим или већим деловима. Да би им се променила механичка својства, епоксидима се могу додавати различите супстанце у сврси смањења вискозности

приликом обраде, повећања максималног издужења уз смањење модула еластичности, побољшање отпорности ширењу пукотина, промена густине и др. Њихов основни недостатак је крхкост праћена великом чврстоћом што се често побољшава додавањем пластимера. Главне предности епоксида јесу могућност модификовања особина према постављеним захтевима, могућност контроле жилавости и лака и сигурна производња због мале количине штетних материја које се при томе ослобађају, мало скупљање, добра хемијска отпорност и добра димензијска и топлотна стабилност. Главни недостаци су виша цена производње у односу на полиестере (специјална врста епоксида која се користи у ваздухопловству), осетљивост на влагу, спора полимеризација, мала отпорност на нека органска једињења (органске киселине и феноли) и релативно ниска највиша температура примене.

Полиестерске смоле такође припадају дуромерима, а производе се егзотермним хемијским реакцијама при којим се незасићени полиестри мешају са релативно малом количином катализатора. Као код епоксида, и овде материјал при полимеризацији прелази из текуће, преко гел, до круте фазе. Главне предности ових материјала јесу мала почетна вискозност, мала цена почетних сировина, једноставна производња и изврсна отпорност на атмосферске утицаје. Са друге стране, полимеризације је врло егзотермна са високим скупљањем чиме се у процесу производње уносе значајна заостала напрезања, крхкост и слаба хемијска отпорност према алкалима.

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

Фенолне смоле настају полимеризацијом фенола уз помоћ формалдехида у посебним условима. Ови полимери имају добру отпорност на високе температуре и горење, која је последица аблативних својстава ових смола (при горењу, одређеном брзином сагоревају слојеви материјала, стварајући слој угљеника) што им је највећа предност при употреби. Недостаци јесу високи притисци при производњи потребни за полимеризацију као и велики удео шупљина, који знатно снижава механичка својства.

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

препоручује њихово коришћење на температурама изнад 125 °C, посебно у условима повећане влаге. Основни недостаци су знатно виши трошкови производње у односу на епоксиде. Данас БМИ композити у ваздухопловним конструкцијама све чешће замењују композите са угљеничном матрицом.

Полиимидне смоле имају предност врло високе температуре примене коју нема ниједна друга врста полимера, будући да им је GTT између 200 - 400 °C. Зависно од технологије производње, могу бити и дуромери (адисиони полиимиди), као и пластомери (кондензациони полиимиди). Процеси производње су често врло комплексни јер укључују високе температуре и притиске и захтевају строго праћење параметара процеса како не би дошло до стварања експлозивних материја. Технологија производње укључује коришћење препрега или RTM (енгл. Resin Transfer Molding). У ваздухопловним конструкцијама користе се за кућишта млазних мотора или за конструктивне елементе авиона ловаца. Најквалитетнији од ових полимера имају GTT већу од 270 °C, процесну температуру од преко 370 °C, дуготрајну топлотну стабилност и изврсна механичка својства. Основна предност им је стабилност и одличне механичке особине на високим температурама, висок квалитет произведених компоненти, отпорност према већини хемикалија, док је недостатак цена и сложеност производње.

Цианатне смоле полимеризују уз помоћ катализатора релативно брзо при температурама 170 - 250 °C и са врло малим скупљањем. Након полимеризације, карактеристике су добра чврстоћа и тврдоћа на повишеним температурама, врло мало упијање влаге, иако дуготрајна изложеност влази узрокује смањење особина, што представља проблем за коришћење у ваздухопловним конструкцијама. Ови материјали се могу мешати са епоксидима или другим дуруммерима како би се добила побољшана својства.

Пластомери су најчешће подељени на аморфне и кристалне, мада сви испољавају кристалност у већој или мањој мери. Кристални еластомери показују знатно бољу отпорност на утицаје горива, хидрауличких флуида и др. у односу на аморфне. Аморфни пластомери показују велику испреплетаност полимерних ланаца, а при загревању се те везе раскидају и полимер се понаша као вискозни флуид. Аморфни пластомери су у одређеној мери осетљиви на раствараче и знатно су осетљивији на пузање и заморна оштећења него кристални. Пластомери су знатно мање склони упијању влаге и мање осетљиви на ударна оштећења. Могу се у ограниченој мери поправљати поновним загревањем и заваривати. Температуре и притисци на којима полимеризују су знатно виши у односу на дуруммере.

Кристални пластомери својство кристалности поседују због веће или мање усмерености полимерних ланаца, мада комплетну кристалност није могуће постићи. При загревању, кристалне фазе се мешају и матрица постаје аморфна, вискозни флуид. Ови су полимери у ствари поликристални будући да садрже и кристалну и аморфну фазу. Производни услови

битно утичу на степен кристалности - што је већа брзина хлађења кристалност је мања. Поликетони су група кристалних пластомера који имају изузетну топлотну отпорност. Међу њима се истичу полиетеркетон (ПЕК), полиетеркетонкетон (ПЕКК) и најчешће коришћени полиетеретеркетон (ПЕЕК). ПЕЕК има степен кристалности до 40 %, добре механичке особине и отпорност према растварачима и киселинама са изузетком концентроване сумпорне киселине. Основни недостатак је врло висока цена производње. Пластомери могу бити произведени знатно брже јер повишену температуру није потребно одржавати дуже време. Неки од њих имају знатно вишу GTT и температуру примене од епоксида и бизмалеимида. Код пластомера је уочљиво течење и знатна деформација при лому, па и знатно већа жилавост. Испољавају и пузање при повишеним температурама и константним оптерећењем.

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

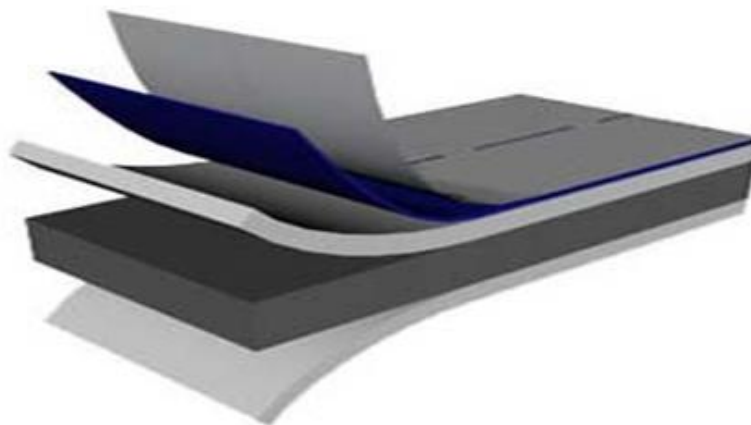
Полиетеримид (ПЕД) је аморфан еластомер високих механичких карактеристика. Димензионо је стабилан (због аморфне структуре), има мало изражено скупљање, а високо изражену изотропију са већином кристалних полимера. Висока GTT омогућава коришћење на температурама до 200 °C. Хемијски је врло отпоран на велики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

Иако су полимеру доминантни као материјали матрице, у великој се мери користе још и метали (енгл. Metal Matrix Composites) и керамика. Композити са металном матрицом се одликују одличним механичким својствима. За матрицу се користе лаки метали, алуминијум и његове легуре, магнезијум, титанске легуре и др. Ови композити омогућују коришћење на температурама вишим од 700 °C, али уз врло високу цену производње која је условљена компликованом технологијом израде. Основни проблем при производњи је хемијска (не)компатибилност металне матрице и влакна због хемијских реакција међу њима, што и сужава број комбинација влакана и матрица које је могуће мешати. За ојачавање металних матрица најбоље су се показали SiC, Al₂O₃, и Borsic (борово влакно пресвучено силицијум карбидом). Коришћење угљеничних влакана је врло ограничено, обично на алуминијумске и магнезијумове матрице, ако је изложеност високим температурама минимална.[2]

3. Теоријске основе функционално градијентно распоређених материјала

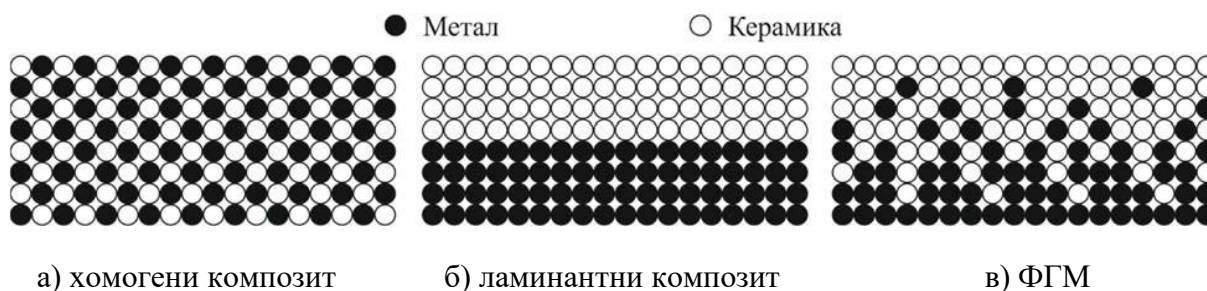
Развој индустрије и примена нових решења довела је до замене конвенционалних материјала, где год је то могуће, новијим и савременијим. Модерне конструкције такође захтевају нове материјале са карактеристикама које могу да одговоре на постављене захтеве. Коришћење материјала из органских и неорганских једињења, довело је до развоја полимера, инжењерских легура, структурне керамике и др.

ФГМ су савремени материјали у групи инжењерских композита. ФГМ су материјали који се одликују континуалним или дисконтинуалним променама хемијског састава и/или микроструктуре (величина зрна, густина, порозност) у односу на геометријско растојање. Градијенти могу бити континуални или дисконтинуални на микроскопском нивоу. За производњу ФГМ користе се различите технике, уз помоћ којих се контролишу састав и структура. Развој ових метода омогућио је да се концептом градијентних материјала креирају нови системи и реше сложени инжењерски проблеми. После више деценија истраживања и развоја, ФГМ чине класу атрактивних материјала у којима је могуће креирати јединствен градијент особина, који није могуће постићи код било ког просторно хомогеног материјала. Данас је могуће креирати ФГМ са градијентом електричних, магнетних, механичких или термичких карактеристика и сл. Механичке особине као што су модул еластичности, Поасонов коефицијент, модул смицања, као и густина материјала, мењају се континуално у препорученим правцима. Ови материјали добијају све већу примену у различитим пољима инжењерства и технологије са циљем да се њихове особине искористе на најбољи могући начин. Неки од примера су смањивање раванских напона, смањивање попречних напона по дебљини плоче, побољшање термичких својстава, жилавости итд. Код конвенционалних композитних ламината уочавају се различита механичка својства на граници услед спајања два дискретна материјала. На међуслоју се јавља концентрација напона, која доводи до оштећења ламината као што су раслојавање, ломљење матрице и слабљење међусобних веза.



Слика 6. Раслојавање ламинантног композита [4]

Деламинација слојева изазвана високим, локалним, међуслојним напонима, доводи до смањења крутости и губитка структурног интегритета конструкције, што доводи до функционалног отказа. Да би се избегли ови недостаци користе се ФГМ, који као најновији и најнапреднији материјали добијају све више на значају, у применама за иновативне инжењерске конструкције. За разлику од ламинантних композита, где постоји јасна граница између два материјала (нпр. керамике и метала), код ФГМ је тај прелаз континуиран. Доња површина је од чистог метала, горња од чисте керамике, а између је прелаз од једног до другог материјала.[4]



Слика 7. Конвенционални композит наспрам ФГМ [5]

Идеја за ову врсту материјала је заправо, добијена из природе. Кроз историју су људи проналазили и користили материјале који су поседовали градијентну структуру. Ова врста материјала јавља се у структурама као што су: кост, ткиво коже, дрво бамбуса итд. Тако на пример, кожа човека има градијентну структуру у правцу дебљине са циљем да пружи одговарајућу жилавост, осетљивост, еластичност у зависности од локације на телу и дубине коже. На увећаним фотографијама попречног пресека стабла бамбуса могу се уочити снопови (у облику зрна) који имају улогу влакана у овим биљкама. Може се рећи да ове биљке имају структуру налик на композитне материјале са ојачаним сноповима влакана, при чему су влакна за око 10 пута јача од матрице. Поред тога, дистрибуција

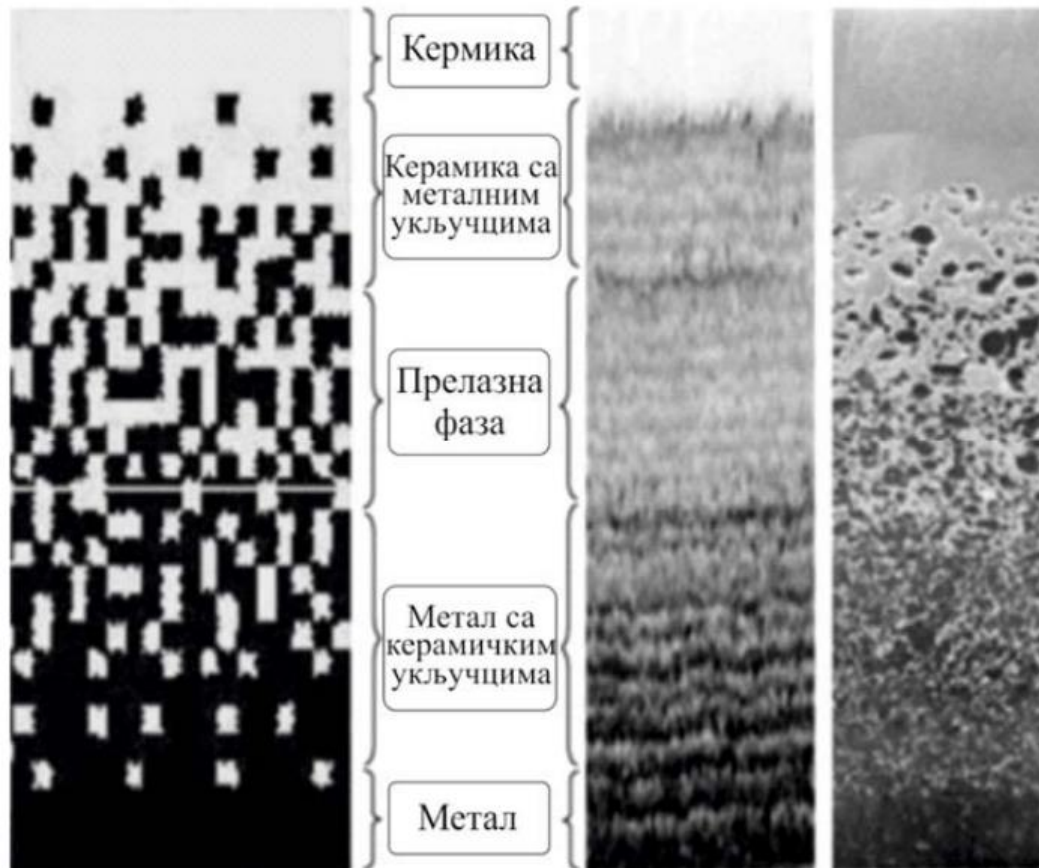
vlakana је гушћа у спољашњем региону и смањује се ка унутрашњем региону, па се може рећи да дистрибуција vlakana формира градијентну структуру.



Слика 8. Примери природних ФГМ [4]

На бази тог концепта настали су ФГМ који најчешће садрже две изотропне материјалне фазе. Ове компоненте често укључују легуре магнезијума, алуминијума, бакра, титанијума и напредне структурне керамике као што су циркон, силицијум карбид и волфрам карбид. Први пут се помињу у националном програму јапанске владе у оквиру којег је формиран програм развоја структурног материјала који ће моћи да одговори на потребе модерних технологија. Након Првог интернационалног симпозијума о функционално градијентним материјалима у Јапану, почиње убрзани развој ових материјала. Формиран је пројекат развоја структурног материјала који ће моћи да се користи као термички штит за космичке бродове. При уласку великим брзинама у оксидациону атмосферу, екстремни услови на површини космичког брода, као што су температура од око 1800 - 2000 °C уз велику температурску разлика између спољашњег и унутрашњег зида трупа летелице, захтевале су материјале који су термостабилни и отпорни на оксидацију на спољашњој, високотемпературној страни и који поседују довољну механичку чврстоћу на унутрашњој, нискотемпературној страни. У том тренутку није постојао индустријски материјал који може да издржи наведене екстремне услове и изузетно термомеханичко оптерећење. Како би се овај проблем превазишао, конструисана је термичка баријера чија је спољашња површина, која је у контакту са високотемпературним гасовима, израђена од керамичких материјала који обезбеђују адекватну термичку стабилност, док је са нискотемпературне стране ова баријера била израђена од тврдог метала, чиме је постигнута неопходна термичка проводљивост и механичка чврстоћа. Структура баријере начињена је од градијентних слојева, почевши од керамике до метала. Обезбеђивањем оптималне дистрибуције састава, микроструктуре и/или порозности између нискотемпературне и високотемпературне површине обезбеђена је ефикасна релаксација термичког напрезања. Резултат континуалне промене састава у јединственој компоненти било је формирање градијента особина, односно формирање функционално градијентно распоређених материјала.

Најчешће коришћени ФГМ је метал/керамика, при чему се керамика одликује високом топлотном отпорношћу, док је удео метала значајан у погледу механичке чврстоће и жилавости. ФГМ који се састоје од металних и керамичких компоненти побољшавају термомеханичка својства на граници слојева, чиме се деламинација на међуслоју своди на минимум, услед континуираног прелаза између својстава конституената. Променом запреминског удела два или више материјала, ФГМ се формира са жељеним градијентом особина у потребним правцима.



Слика 9. Континуално градијентни ФГМ са метал/керамика конституентима [4]

Приликом анализа ФГМ, врши се апроксимација, при чему се посматрају као континуум чија се механичка својства равномерно мењају у правцу одређене координате. Оваква хомогенизација је потребна у циљу анализирања ФГМ на ефикасан начин.

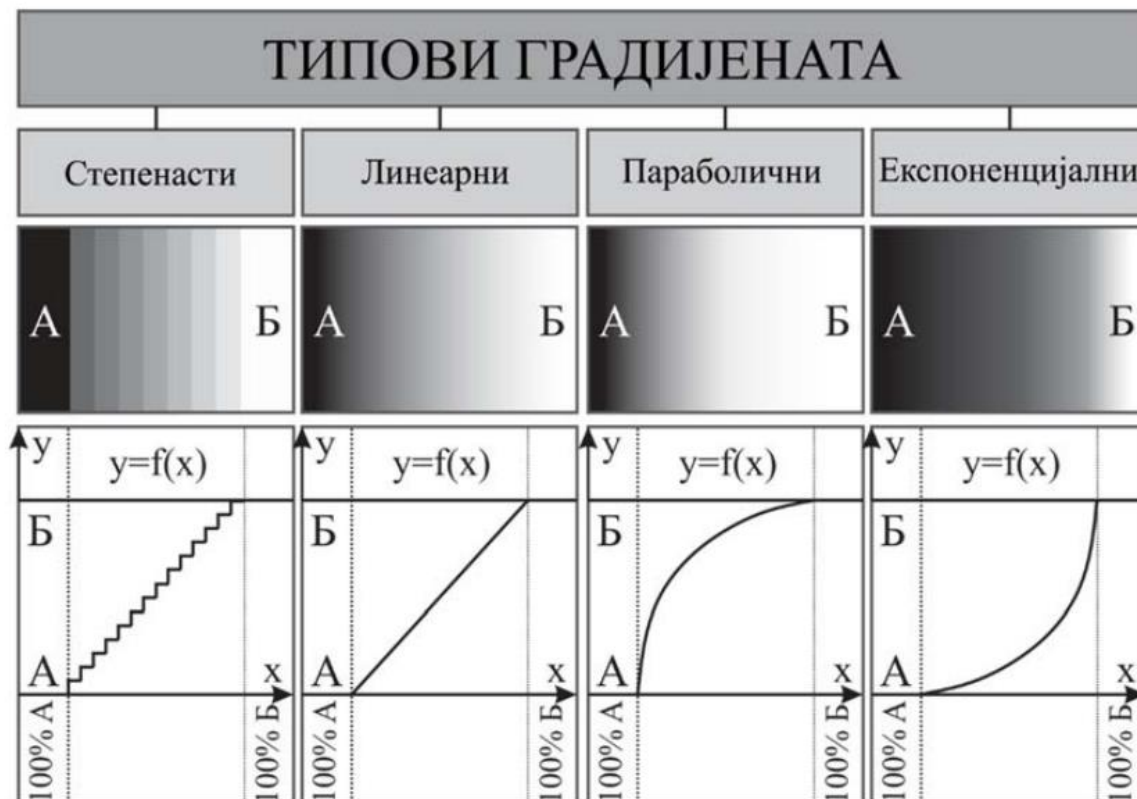
ФГМ као нови концепт материјала и даље има проблеме које је потребно решити. Неки од тих проблема су:

- фокус на варирању градијента материјала у циљу добијања нових који могу да се примене у различитим конструкцијама у којима тренутно још увек нису присутни
- истраживања у области физичких карактеристика материјалног модела ФГМ. Потребно је одредити микроскопску структуру и квантитативне везе у зависности од услова производње
- побољшање теоријских поставки које се користе у анализи ФГМ, у циљу добијања што тачнијег модела за нумеричку анализу и симулације понашање ФГМ у различитим статичким и динамичким условима
- развијање одговарајуће базе градијентних материјала (укључујући материјалне параметре, припрему материјала, процену перформанси и слично)
- развијање техника за производњу делова од ФГМ великих димензија и комплексних облика
- развијање технологија производње које ће омогућити још прецизнију контролу градијента особина
- смањивање укупних трошкова производње ФГМ, односно развијање јефтинијих и аутоматизованијих техника производње
- детаљније студије оправданости знатно масовније производње и примене ФГМ него што је то сада случај

3.1 Подела ФГМ

Особине ФГМ се градијентно мењају са положајем, а у зависности од типа градијента, ФГМ могу бити са [6]:

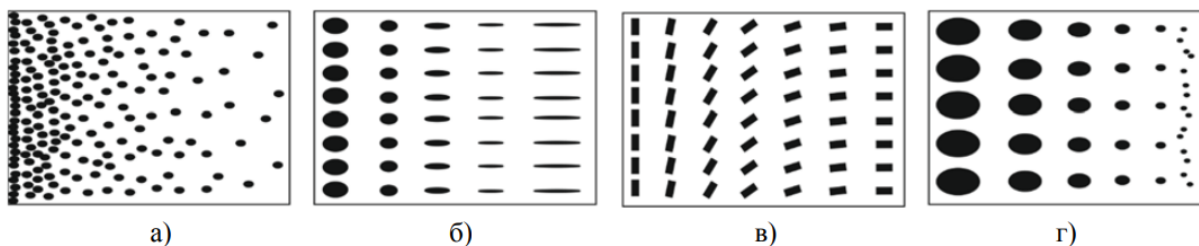
- степенастим градијентом (скоковит)
- континуалним градијентом (линеаран, параболичан или експоненцијалан)



Слика 10. Графички приказ типова градијената [6]

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

- запреминског удела честица
- облика честица
- оријентације честица
- величине честица



Слика 11. ФГМ са различитим типом градијента заснованим на а) запреминском уделу честица, б) облику честица, в) оријентацији честица, г) величини честица [7]

На основу димензија, ФГМ се деле на [7]:

- ФГМ филмове
- ФГМ међуслојеве
- масивне ФГМ

ФГМ филмови су танке градијентне превлаке (дебљине од 10^{-6} до 10^{-4} m) које се користе за повезивање филмова и супстрата између којих постоји неслагање у термомеханичком погледу. ФГМ међуслојеви (дебљине од 10^{-4} до 10^{-3} m) користе се за спајање два различита материјала. Развијене су различите технике за производњу ФГМ филмова и међуповршина. Масивни ФГМ имају велики попречни пресек (дебљине од 10^{-2} до 10^{-1} m) и велику запремину.

3.2 Методе производње ФГМ

Постоји велики број различитих метода за производњу ФГМ које омогућавају контролу састава и структуре. Ове методе деле се на формирање ФГМ из прахова или из растопа.

Методе засноване на металургији прахова које се најчешће примењују су пресовање слојева, формирање мешавине праха центрифугалном силом, седиментација гравитационом силом и седиментација центрифугалном силом. Методе за производњу ФГМ из растопа су: центрифугално ливење, центрифугална метода талоба и центрифугална метода мешавине прахова. Физичко и хемијско напаравање су врсте техника које се користе за производњу ФГМ филмова са градијентном структуром састава на нанометарском нивоу.

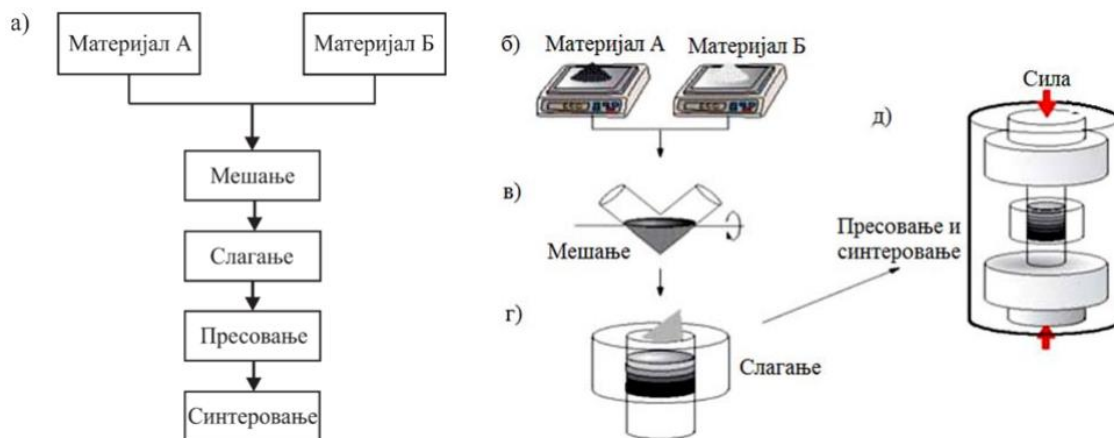
3.2.1 Металургија прахова

Металургија прахова је једна од најчешће коришћених техника за производњу ФГМ. Овај технолошки поступак за производњу материјала састоји се из производње прахова, формирања мешавине компонената и синтеровања. Поред синтеровања може се

користити и нека друга метода укрупњавања. Ова метода може да се примени на велики број прахова, металних легура и керамике, са величином честица од неколико нанометара до неколико стотина микрометара. Металургија праха има пуно предности, као што су већа доступност сировина, једноставнија опрема за производњу, мања потрошња енергије, краће време обраде, а самим тим и мањи трошкови. Основни недостатак методе металургије прахова је тај што је врло тешко добити ФГМ са континуалном променом особина, већ се углавном добијају ФГМ са градијентом особина степенастог типа.

3.2.1.1 Пресовање слојева

Производња ФГМ применом пресовања састоји се из четири корака. У првом кораку, прахови се налазе у одвојеним посудама и контролисано се врши мерење жељене количине материјала А и материјала Б, од односа 100 % материјала А и 0 % материјала Б до односа 0 % материјала А и 100 % материјала Б. Затим се поменута два материјала мешају помоћу "V" - миксера. Након тога, добијена мешавина прахова се слаже у калуп у одвојеним слојевима дебљине око 0,2 - 1 mm. Степенасто - градијентна структура у калупу постиже се тако што се у претходној фази, фази мешања прахова, различито дозира однос материјал А/материјал Б. Код ове методе главни акценат стављен је на прецизност у мерењу количина прахова, јер ће се тако одредити градијент особина формираног ФГМ и зато је потребно прецизно и пажљиво реализовати тај корак. Након попуњавања калупа, материјал се пресује и синтерује.



Слика 12. Фабрикација ФГМ методом металургије прахова (пресовање слојева) [8]

Пресовање може бити хладно и топло. Код хладног пресовања, процес синтеровања следи након завршетка процеса сабијања и добијања компактне структуре. Код топлог пресовања, синтеровање се врши заједно са фазом пресовања. Најчешћи начини синтеровања су: синтеровање у присуству течне фазе, ласерско и плазма синтеровање. Важно је да се током синтеровања очува градијент који је формиран током фазе попуњавања калупа. Плазма синтеровање (енгл. spark plasma sintering - SPS) је једна од

најнапреднијих метода синтеровања која омогућава добијање висококвалитетних материјала помоћу високог притиска сабијања.

3.2.1.2 Формирање мешавине праха центрифугалном силом

Смеша прахова са континуалном (компјутерски контролисаном) променом састава поставља се на ротирајући дистрибутивни диск. Услед ротације диска, честице се убрзавају и рапосређују по унутрашњем зиду ротирајућег цилиндра. Слој праха и слој органског везива се смењују при наношењу. Ова метода је ограничена на формирање цилиндричних ФГМ, али нуди велику флексибилност у погледу креирања градијента који је независан од карактеристика прахова.

3.2.1.3 Седиментација гравитационом силом

Седиментација гравитационом силом се изводи у стубном калупу кроз који се честице праха крећу различитим брзинама услед разлике у густини или величини. Тако се формира градијент порозности или састава. Уколико се талог у стубном калупу појави без честица, формира се градијент са континуалним порастом или смањењем концентрације једне врсте честица. Ако је талог директно формиран од суспензије, тешко се постиже жељени градијент особина. Доњи слој талоба ће имати просечни састав суспензије, затим расте удео праха, док ће врх талоба садржати само честице праха са најнижом брзином седиментације. Ако се таложјење обавља са великом количином суспензије, често се јављају проблеми због интеракција између честица. Проблем који се јавља код ове методе је ограничење у типу градијента који се може постићи, односно произвести. У лабораторијским условима, овом методом су формиран цилиндрични ФГМ пречника 50 mm. Након крајњег укрупњавања, дебљина ФГМ може да буде 10 mm или већа. Упркос својим ограничењима, ова метода се, због једноставности, користи за производњу плочастих ФГМ већих димензија.

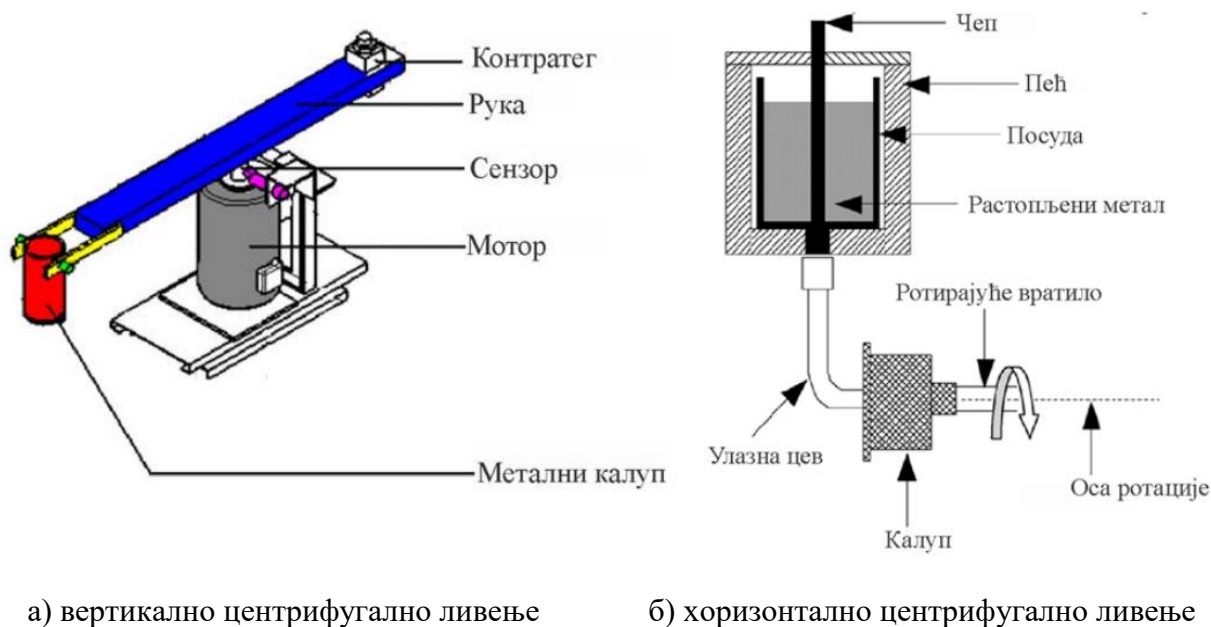
3.2.1.4 Седиментација центрифугалном силом

Седиментација центрифугалном силом омогућава формирање градијентне структуре уз помоћ суспензије прахова (финих честица). Услед ограничене концентрације у суспензији, овом методом могу да се формирају само танки филмови. При седиментацији из суспензије, основни параметри који утичу на процес и омогућавају формирање градијентне структуре су особине прахова (густина, облик и величина зрна), особине течности (густина, вискозност и способност квашења) и контрола запреминског односа између њих.

3.2.2 Центрифугално ливење

Центрифугално ливење представља једну од најефикаснијих метода за производњу ФГМ. Приликом овог процеса могуће је контролисати састав и микроструктуру у

широком опсегу. Центрифугална сила се користи како би се формирала градијентна структура у растопљеном металу који садржи неку другу чврсту фазу (чврсте честице ојачања). Две основне врсте уређаја за центрифугално ливење су: уређај вертикалног типа, код кога калуп ротира око вертикалне осе и уређај хоризонталног типа, где је ротација око хоризонталне осе. Хоризонталне центрифугалне машине за ливење се обично користе за добијање цеви, чаура и цилиндричних или цевних одливака од ФГМ.



Слика 13. Уређаји за центрифугално ливење [9]

Производња ФГМ методом центрифугалног ливења дели се у две категорије, у односу на температуру при којој долази до топљења честица ојачања. Уколико је радна температура производње већа од температуре топљења честице ојачања, оне такође прелазе у течну фазу, а центрифугална сила се примењује у фази очвршћавања честица ојачања и матрице. Ова метода је у литератури позната под називом центрифугална “in situ” метода (енгл. centrifugal in situ method - CISM). Механизам формирања градијентне структуре у ФГМ овом методом се састоји из следећих фаза:

1. делимично одвајање материјала А и Б у течној фази које настаје услед разлике у густини,
2. формирање градијентне структуре пре фазе очвршћавања (кристализације) примарног кристала,
3. примарни кристал у матрици се појављује у складу са локалним хемијским саставом,

4. услед разлике у густини, примарни кристал се креће и на тај начин се формира градијентна структура [9]

Ако је радна температура, при којој се производи ФГМ, мања од температуре топљења честица ојачања, оне остају у чврстом стању у растопљеној матрици. Ова метода се назива центрифугална метода чврстих честица (енгл. centrifugal solid-particle method - CSPM). Ослобађањем чепа, растопљени метал се директно лије из пећи у центрифугални калуп. Пре ливења, центрифугални калуп је загрејан. Ротирањем калупа ствара се центрифугална сила која потискује метал према зиду калупа. Вредност центрифугалне силе је изражена преко G броја. G број представља однос центрифугалне силе и убрзања земљине теже, g , према једначини:

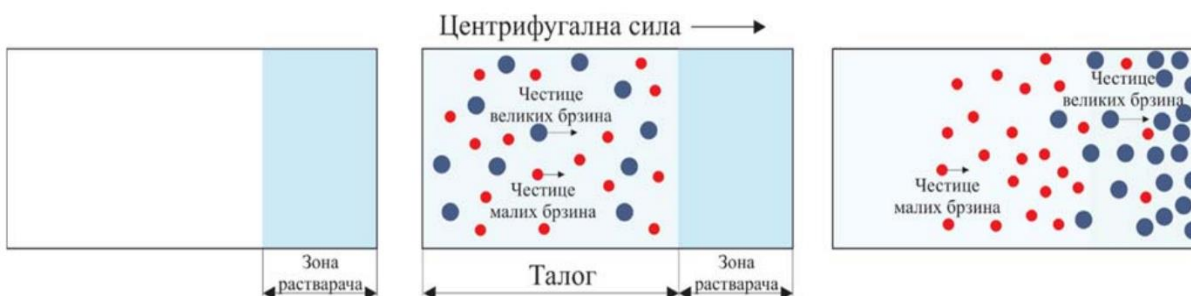
$$G = \frac{r\omega^2}{g}$$

где је: r - полупречник калупа за ливење [m], ω - угаона брзина калупа [s^{-1}], а g - убрзање земљине теже [m/s^2].

На градијентну расподелу у ФГМ произведеном центрифугалном методом значајно утичу параметри који укључују разлику у густини између честица ојачања и истопљеног метала, тежину G , величину честица, вискозитет растопљеног метала, средњи запремински удео честица, амплитуду центрифугалне силе и време очвршћавања. Како су густина и вискозност материје константне, један од лако променљивих параметара којим се може контролисати и добијати жељена градијентна структура особина је величина честица. Брзина кретања честица линерано расте од центра ка зидовима калупа. На крају се пећ уклања и калуп се хлади до потпуног очвршћавања одливка. Центрифугално ливење се углавном користи за добијање цилиндричних делова. [11]

3.2.3 Центрифугална метода талога

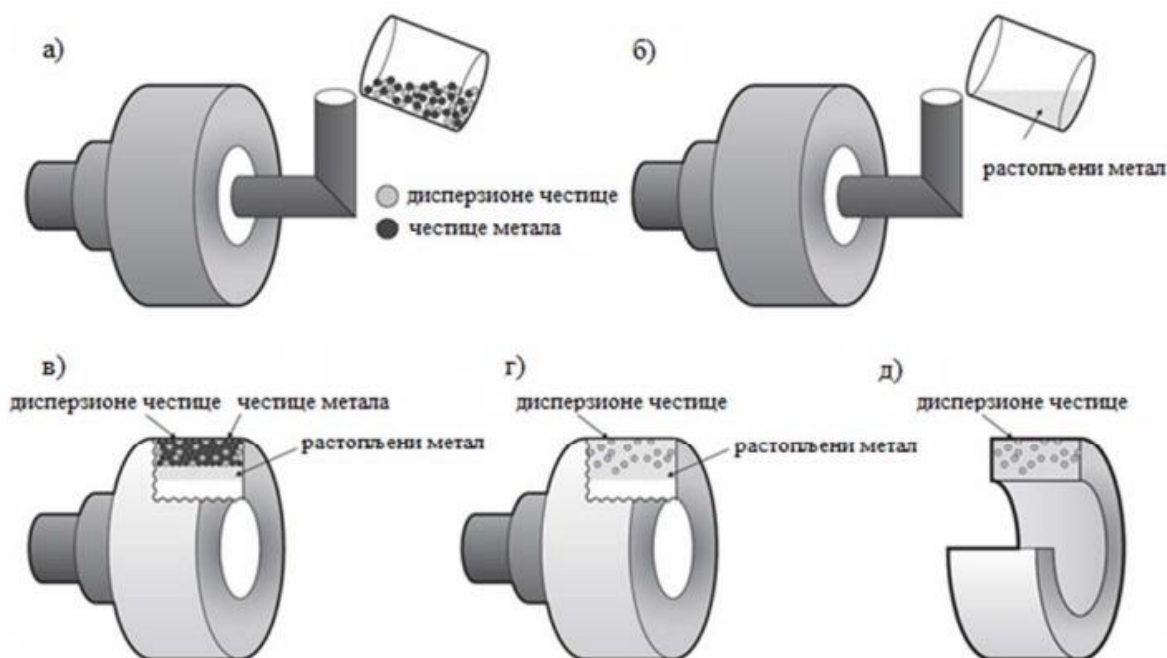
Иако металургија праха има пуно предности у производњи ФГМ, још увек је изазов добити ФГМ са континуалним градијентом особина, овом методом. Комбинацијом металургије праха и центрифугалне методе талога, може се превазићи овај недостатак. Код ове методе се користе два типа чврстих честица у таложењу. Један тип честица са великим брзинама кретања, већом густином и већом величином честица и други тип са мањом брзином, мањом густином и мањом величином честица. Градијент честица контролише се на основу различите брзине кретања између два типа честица. После завршетка процеса седиментације, течност из левог дела посуде се уклања и добија се тело са континуалним градијентом. Добијено тело се затим синтерује неком од метода за синтеровање и као крајњи резултат се добија ФГМ са континуалним градијентом особина.



Слика 14. Шематски приказ центрифугалне методе талоба [8]

3.2.4 Центрифугална метода мешавине прахова

Ова метода представља унапређену варијанту центрифугалне методе чврстих честица (CSPM). Основна разлика је што је поменутом методом тешко добити ФГМ који садржи нано-честице. На слици је приказана центрифугална метода мешавине прахова за производњу ФГМ. На почетку се узима мешавина, честица метала А и дисперзионих честица Б и убацују се у центрифугални калуп. У следећем кораку, растопљени метал А се лије у центрифугални калуп са мешавином прахова А+Б. Због центрифугалне силе, растопљени метал А, продире у простор између честица. Истовремено, због врелине растопљеног метала, прах метала А се топи. У последњем кораку, добија се ФГМ прстен са распршеним честицама Б, које се простиру на површини.



Слика 15. Шематски приказ центрифугалне методе мешавине прахова [10]

3.2.5 Техника напаравања

Напаравање је процес у коме се материјали у фази паре кондезују да би формирали чврст материјал. Овај процес се обично изводи да би се формирале превлаке које ће побољшати својства, као што су механичке, електричне, термичке особине и сл. У основи, метода напаравања се класификује у две групе:

- хемијско напаравање
- физичко напаравање

Како би се произвела жељена превлака (филм), користећи процес хемијског напаравања, супстрат је изложен дејству испарљивих прекурсора (једињење које учествује у хемијској реакцији која производи друго једињење), да би се омогућила реакција и разлагања на површини супстрата. Ове методе су интензивне у погледу ослобађања енергије, а отровни гас се ослобађа као споредни производ. Техником напаравања може се добити одлична микроструктура, међутим, овако се формира само танак површински слој. Предност ове методе подразумева да се могу производити веома танки слојеви и да је могуће лако контролисати градијент особина једноставним мењањем састава гасне фазе. Са друге стране, мора се обратити пажња на процес термичког третирања како би се избегла дифузија између подлоге (супстрата) и танке превлаке (филма).

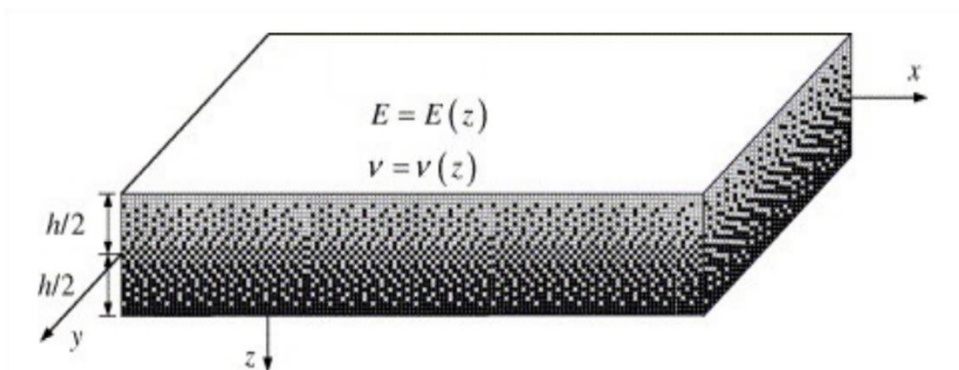
3.3 Градијент материјала ФГМ плоча

ФГМ могу бити различито пројектовани и произведени контролисаним распоредом и уделом компоненти у жељеном правцу. Услед тога и математичке функције које описују добијени градијент особина у одређеном правцу су различите. Најчешће коришћене функције за опис промене механичких особина при креирању математичког модела ФГМ су:

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

Различити аутори дефинисали су на бројне начине запремински удео керамичких честица у квазихомогеним метало – керамичким композитним структурама. Најизраженије особине ФГМ јесу неуниформна микроструктура са континуално распоређеним макроособинама. ФГМ могу да се дефинишу према варијацији у запреминском уделу компоненти.

Посматрајмо случај еластичне правоугаоне плоче. Координате x и y дефинишу раван плоче док је z – оса усмерена управно на раван, у правцу дебљине са координатним почетком на половини дебљине плоче. Материјалне особине плоче: Јангов модул, Поасонов коефицијент на горњој и доњој површини су различити и унапред одређени у складу са захтевима перформансе плоче. [13]



Слика 16. Геометрија ФГМ плоче [13]

Јангов модул и Поасонов коефицијент су континуално променљиви само у правцу дебљине плоче (z – оса) $E = E(z)$ и $\nu = \nu(z)$. На основу рада Delale и Erdogan из 1983. утврђено је да је ефекат Поасоновог коефицијента на деформацију много мањи него утицај Јанговог модула еластичности. Сматра се да је утицај Поасоновог коефицијента на деформацију константан. Такође се претпоставља да се Јангов модул еластичности у правцу дебљине плоче мења према степеној (П-ФГМ), експоненцијалној (Е-ФГМ) или сигма функцији (С-ФГМ).

3.3.1 Материјалне карактеристике П-ФГМ плоча

Запремински удео П-ФГМ материјала се понаша према степеној функцији:

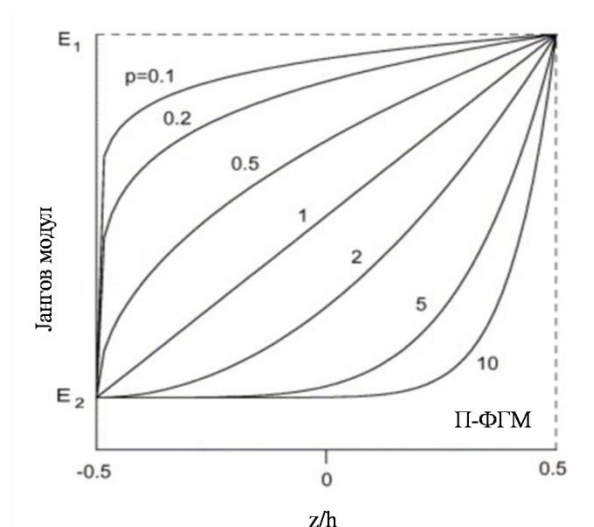
$$g(z) = \left(\frac{z + \frac{h}{2}}{h} \right)^p \quad (3.1)$$

где је p - параметар материјала и h - дебљина плоче.

Када се дефинише локални запремински удео $g(z)$, особине материјала се могу добити у складу са правилом мешања:

$$E(z) = g(z)E_1 + [1 - g(z)]E_2 \quad (3.2)$$

где је: E_1 - Јангов модул еластичности најниже површине плоче $z = h/2$, E_2 - Јангов модул еластичности највише површине плоче $z = -h/2$.



Слика 17. Варијација Јанговог модула еластичности П-ФГМ плоче [20]

Варијација Јанговог модула еластичности у правцу дебљине П – ФГМ плоче, показује да се модул еластичности мења убрзано у близини најниже површине $p > 1$ и расте великом брзином у близини горње површине за $p < 1$. Приликом производње плоча од ФГМ, уколико је потребно добити бољу термичку отпорност, отпорност на корозију, потребно је узети у обзир мањи индекс p , што ће дати плочу код које је заступљенија керамика. Ако је циљ добити плочу велике носивости и жилавости, потребно је узети већи индекс p , што практично значи производњу плоче са већим уделом метала.

3.3.2 Материјалне карактеристике С-ФГМ плоча

У случају спајања ФГМ у вишеслојни композит, концентрација напона јавља се на једној од додирних површина где је распоред материјала континуалан, али се убрзано мења. Због тога су Chung и Chi дефинисали запремински удео коришћењем две степене фукције како би осигурали равномерну дистрибуцију. Ова функција се највише примењује код слојевитих ФГМ плоча, на пример, плоча са керамиком у центру и градијентном променом особина до метала на обе крајње ивице плоче (сендвич плоча). У таквим случајевима, ако се користи једна степенa функција, јавља се концентрација напона на међуслоју, због нагле промене карактеристика. Према томе, да би се описала равномерна промена напона, потребно је користити две степене функције, при чему се добија сигмоидна функција. Ове функције су дефинисане као:

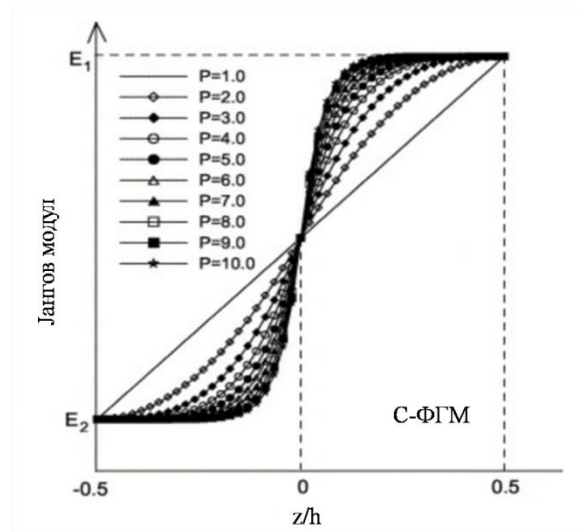
$$g_1(z) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{h}{2} - z}{\frac{h}{2}} \right)^p \quad \text{за } 0 \leq z \leq \frac{h}{2} \quad (3.3)$$

$$g_2(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{h}{2} + z}{\frac{h}{2}} \right)^p \text{ за } -\frac{h}{2} \leq z \leq 0 \quad (3.4)$$

Употребом правила мешања Јангов модул за случај С-ФГМ плоче може се записати као:

$$E(z) = g_1(z)E_1 + [1 - g_1(z)]E_2 \text{ за } 0 \leq z \leq \frac{h}{2} \quad (3.5)$$

$$E(z) = g_2(z)E_1 + [1 - g_2(z)]E_2 \text{ за } -\frac{h}{2} \leq z \leq 0 \quad (3.6)$$



Слика 18. Варијација Јанговог модула према сигма функцији [20]

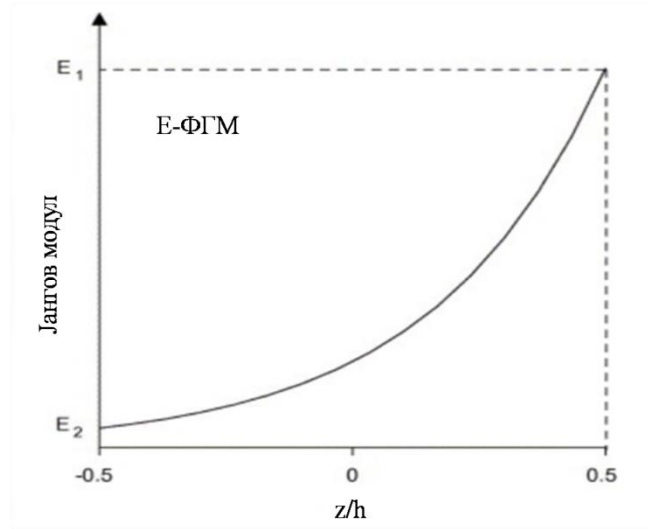
3.3.3 Материјалне карактеристике Е-ФГМ плоча

Ова врста функције за апроксимацију ФГМ се најчешће користи код решавања и анализирања проблема у механици лома. Многи истраживачи су користили експоненцијалне функције да опишу материјална својства ФГМ, према дефиницији она су изражена у следећој форми:

$$E(z) = Ae^{B(z+\frac{h}{2})} \quad (3.7)$$

где је:

$$A = E_2 \text{ и } B = \frac{1}{h} \ln \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (3.8)$$



Слика 19. Варијација Јанговог модула у случају експоненцијалне функције [20]

3.3.4 Мори - Танака метода процене материјалних карактеристика

Мори-Танака метода процене најчешће се примењује код градијентне микроструктуре која има јасно дефинисану континуалну матрицу и насумично распоређену фазу сферних честица. Ова метода се бави ефектом еластичних поља и интеракцијом између суседних честица компонената. $K(z)$ - модул стишљивости и $G(z)$ - модул смицања су дефинисани следећим изразима:

$$\frac{K(z) - K_b}{K_t - K(z)} = \frac{V_f^p}{1 + (1 - V_f^p) \left(\frac{K_t - K_b}{K_b + \frac{4}{3}G_b} \right)} \quad (3.9)$$

$$\frac{G(z) - G_b}{G_t - G(z)} = \frac{V_f^p}{1 + (1 - V_f^p) \left(\frac{G_t - G_b}{G_b + f_b} \right)} \quad (3.10)$$

где су f_b и V_f^p :

$$f_b = \frac{G_b(9K_b + 8G_b)}{6(K_b + 2G_b)} \quad (3.11)$$

$$V_f = \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^p \quad (3.12)$$

Вредности модула еластичности $E(z)$, Поасоновог коефицијента $\nu(z)$ и коефицијента термичког ширења $\alpha(z)$ рачунају се на основу $K(z)$ - модула стишљивости и $G(z)$ - модула смицања према следећим изразима:

$$E(z) = \frac{9K(z)G(z)}{3K(z) + G(z)} \quad (3.13)$$

$$\nu(z) = \frac{3K(z) - 2G(z)}{2(3K(z) + G(z))} \quad (3.14)$$

$$\frac{\alpha(z) - \alpha_b}{\alpha_t - \alpha(z)} = \frac{\frac{1}{K(z)} - \frac{1}{K_b}}{\frac{1}{K_t} - \frac{1}{K_b}} \quad (3.15)$$

Иако постоји више поменутих метода хомогенизације које се примењују за апроксимацију ефективних термомеханичких карактеристика ФГМ у правцу дебљине плоче, Мори-Танака метода и степена функција се најчешће користе за анализу.

4. Примена функционално градијентних материјала

Функционално градијентни материјали имају велики потенцијал за примену у условима експлоатације који захтевају добру отпорност на повишену температуру и топлотне ударе, отпорност на оксидацију, корозију, трење, хабање, а такође имају и добру топлотну и електричну проводљивост.



Слика 20. Различите области примене ФГМ [17]

Концепт ФГМ је своју прву примену нашао током пројекта израде свемирске летелице у Националној свемирској лабораторији у Јапану, у циљу елиминисања напона на споју плоча које су се користиле као облоге на свемирској летелици. Касније, примена ФГМ је проширена на многе друге гране индустрије и области, као што су: енергетски и нуклеарни сектор, индустрија електронике, медицина, стоматологија, војна, аутомобилска индустрија и разне друге гране индустрије.

Иницијална идеја за концепт и пројекат развоја ФГМ је била потреба да се развије и произведе материјал који ће моћи да се користи као термички штит за космичке бродове. ФГМ термички штитови су у експлоатацији изложени екстремним условима у којима се температура мења за неколико стотина, а врло често и до 1000 - 2000 °C. Термичка баријера се конструише тако што се спољашња површина, која је изложена екстремним условима, формира од термоотпорних керамичких материјала који обезбеђују адекватну термичку стабилност, док се са унутрашње, нискотемпературске стране баријере налази метал, чиме се постиже велика термичка проводљивост и механичка чврстоћа. Кроз термичку баријеру састав се градијентно варира од керамике до метала, при чему се обезбеђивањем оптималне дистрибуције састава, микроструктуре и/или порозности ниско и високо температурске површине, обезбеђује и ефикасна релаксација термичког напрезања.

Концепт ФГМ применљив је на готово сва поља у науци о материјалима. Примењују се у транспортним системима, системима за конверзију енергије, алатима за сечење, деловима машина, полупроводницима, оптици и биосистемима. Користе се у структурним и инжењерским проблемима који захтевају комбинацију више особина, као што су ватроотпорност и тврдоћа са жиљавошћу, или хемијска инертност са жиљавошћу. У ваздухопловству и нуклеарним системима, кључни проблем представља поузданост, а не цена. Са друге стране алати за сечење, ваљци са високом радном температуром и делови мотора који захтевају отпорност на хабање и топлоту, механичке ударе и корозију се израђују са пажњом на однос цена и перформанси. Комерцијализована је употреба алата за сечење од Волфрам карбида/Кобалта (WC/Co) и оштрица од Алуминид/Нерђајућег челика (FeAl/SS) базираних на принципима ФГМ. Поузданији облик вештачког кука, код кога се ствара биокомпатибилан слој између кости и импланта је такође успешно остварен у клиничкој пракси. Услед релативно мале величине исплативо их је правити.

Заштита животне средине и очување необновљивих енергетских ресурса као и изградња система који не загађују атмосферу једна је од највећих проблема модерног доба. Коришћењем принципа ФГМ у термоелектричним конвертерима, горивним ћелијама и соларним батеријама, повећава се ефикасност конверзије, оптимизацијом њиховог електричног потенцијала, отпорношћу на температуру и хемијске издржљивости. [3]

4.1 Транспортни системи

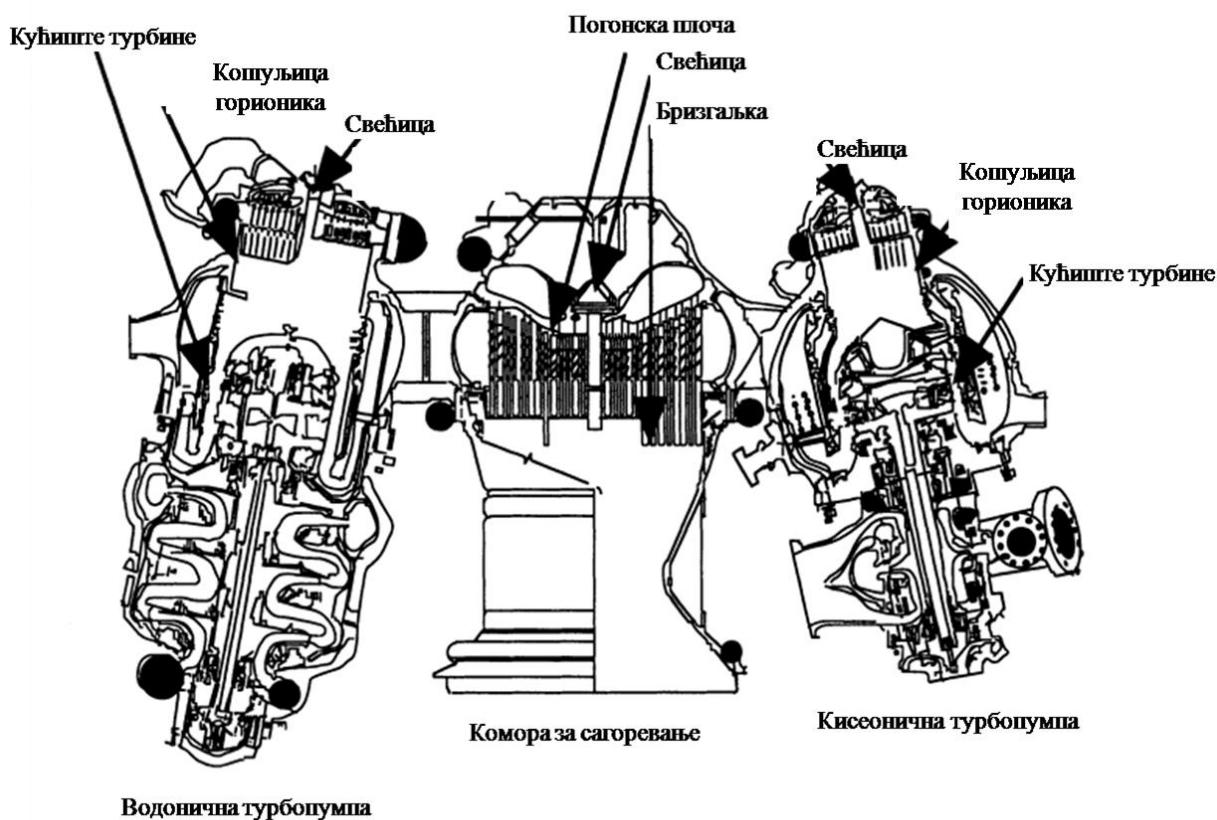
4.1.1 Делови свемирских летелица

Свемирске летелице, које се крећу хиперсоничним брзинама изложене су екстремно високим температурама, које настају услед аеродинамичног загревања због трења између летелице и површине атмосфере. Делови који су изложени највећим температурама као што су врх, предње ивице, крма и крилца морају бити направљена од угљеничних композита са адекватном заштитом од оксидирања. Никлове и титанијумове легуре се могу користити у другим деловима летелице који су изложени мањим температурама. Ово може довести до веће масе целокупне летелице. За температуре до 1200 °C користе се керамичке плочице, а за температуре између 300 °C и 500 °C може се користити алтернативна заштита од неколико слојева титанијума.

Већина ракетних мотора користи термалну заштитну облогу од материјала који су се пре користили за турбине. Топлота која се ствара од врелих гасова је много већа у ракетним моторима него у турбинама. Заштитни слој је изложен високим температурама, при брзим променама, али у краћим временским интервалима. Услед тога заштитни слој је углавном мале дебљине ($< 0,2\text{mm}$), да би се смањила вероватноћа пропадања премаза. У великим коморама за сагоревање, флуks топлоте је толико велики да је потребно користити високо проводне бакарне легуре, како би се топлота усмерила супротно унутрашњој површини. Термална заштита се у овим случајевима не може користити, услед тога да се топлота не

може довољно брзо расипати, што доводи до стварања локалних тачака са високом температуром која оштећује заштитни слој.

У великим ракетним моторима са течним горивом, термална заштита се углавном користи у водоничним и оксидантним турбопумпама. Свећице, горионици, кућишта пумпе, дршке турбине, као и лопатице имају термалну заштиту у облику кошуљице. Градијентна термална заштита је нашла своју примену у ракетним моторима, код малих потисних комора у маневрисању орбиталних система. Ове циркон/никл (ZrO_2/Ni) функционално градијентне коморе, праве се комбинацијом галванизације и спрејем плазме. Градијентни слој прво садржи до 25% ZrO_2 на никловој комори, а затим се спрејем плазме наноси слој до 100% ZrO_2 .



Слика 21. Шематски приказ пресека ракетног мотора [3]

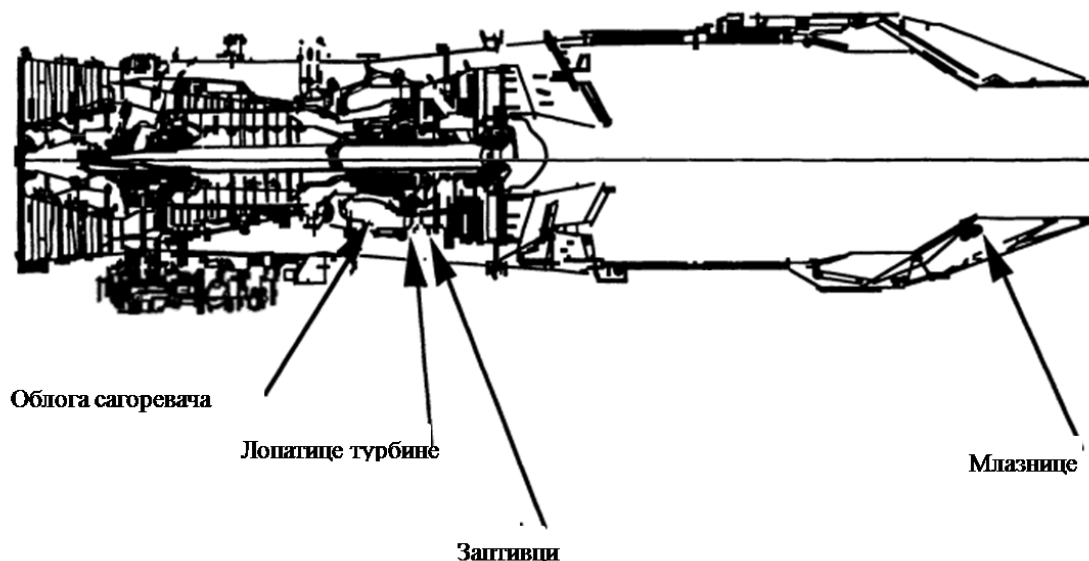
Тајност је неопходна особина модерних оружја. Делови направљени од специфичних материјала могу се користити да апсорбују електромагнетну енергију и тако смањују количину таласа који се одбијају у правцу непријатељског радара. У неким применама, на пример код ракета великих брзина, ови материјали су изложени великом термомеханичком напону. Због тога су најбољи материјали за ове потребе композити са

керамичком матрицом, ојачани керамичким ткањем. Проводна својства ових керамичких композита зависе од влакна, матрице, прелаза између слојева као и самог распореда истих. Силиконска влакна дају материјалу полупроводничке особине. Диелектрична влакна могу имати електричне карактеристике које варирају од директне струје до микроталаса. Формула $\text{Na}_{1+x}\text{Zr}_2\text{Si}_x\text{P}_{3-x}\text{O}_{12}$ ($0 \leq x \leq 3$), у зависности од x даје различите особине керамичким композитима.

4.1.2 Аеромотори

Термална заштита се користи код војних, као и код комерцијалних аеромотора. Нашла је своју примену и код турбина мотора аутомобила, хеликоптера и електричних генератора. Термална заштита се углавном користи на путањи врелог гаса, да би се повећала температура усиса турбине. У односу на заштиту дизел мотора, термална заштита турбина је изложена већем флуксу топлоте, вишим температурама и већим променама температуре. Такође, јавља се утицај вреле корозије и разарања структуре. Заштита на путањи врелог гаса је углавном танка ($< 0.4 \text{ mm}$) да би се спречило расипање. За заптивке који нису изложени струјању, заштита може бити и дебља.

Комерцијални мотори имају сличну примену термалне заштите као и војни, али немају догоревање и млазнице. Термална заштита се код комерцијалних ваздухоплова налази на унутрашњим облогама (плоче и зидови) сагореваача где се гориво пали ваздухом, као и на лопатицама турбина. Војне турбине користе термалну заштиту код репних излаза, топлотних штитова, облога канала и млазница.

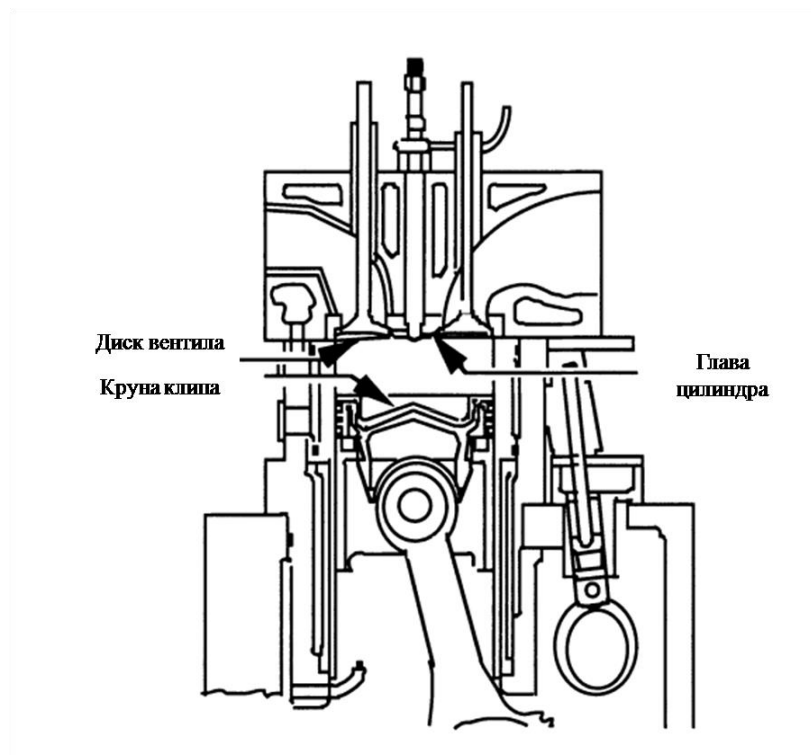


Слика 22. Шематски приказ пресека турбине војног мотора [3]

Оштрице турбине су највише оптерећене од свих ротирајућих делова гасне турбине. Да би се повећала ефикасност и перформансе турбомотора, улазна температура гаса у турбинама високог притиска, се мора повећати, а хлађење компоненти се смањује. Кључну улогу овде има керамичка термална заштита са ниском термалном проводљивошћу. Одликује је глатка површина коју не треба полирати, добра отпорност на разарање, као и то да нема затварања расхладних рупа. Њихова највећа предност је у отпорности на ударе, услед стубасте микроструктуре. Због ових особина имају дугачак век трајања. Керамичка термална заштита је повезана са деловима уз помоћ танке металне облоге, која такође чува компоненте од рђе и оксидовања.

4.1.3 Дизел мотори

Термална заштита се код дизел мотора примењује у различитим системима као што су камиони, бусеви, локомотиве, тенкови, пољопривредна возила. Предност термалне заштите у овим система су повећана снага, смањење губитака топлоте, као и потрошње горива. Такође, смањује се и емисија издвних гасова. Дебела (2,5 mm) термална заштита се користи на круни клипа, док се тања (0,5 mm) користи на вентилима и глави цилиндра. Експериментална термална заштита је тестирана на облогама цилиндра, издувним вентилима и седиштима вентила. Експерименти су показали да је потрошња горива смањена за 5 %, изоловањем коморе за сагоревање са термалном заштитом од 2 mm. Ова добит омогућава повећање термалне ефикасности за око 54 %, код напредних дизел мотора. Такође је показано да градијентне термалне заштите имају доста дуже време трајања.



Слика 23. Шематски приказ пресека дизел мотора са локацијама термалне заштите [3]

4.2 Системи за претварање енергије

4.2.1 Делови конвенционалних горивих система

Већина данашњих електрана и даље сагорева конвенционална горива. Оптимизацијом техника сагоревања и комбиновањем стационарних гасних са парним турбинама, достигнута је ефикасност од скоро 60 %. Коришћење нових материјала, као што су ФГМ, може повећати ову ефикасност. Највећа пажња је усмерена на замену тешких супер-легура лакшим материјалима. Основи захтеви за ширу употребу заменских материјала су виша специфична вредност пузања од већ коришћених, као и еластичност од најмање 1 - 2 %. Мала специфична маса од $3,9 \text{ kg/m}^3$ омогућава легури γ -титанијум алуминид (TiAl) да се користи за турбомашине на средњим вредностима температуре (600 - 800 °C), уместо супер-легура. Међутим, ове легуре су или довољно чврсте, или довољно еластичне, у зависности од микроструктуре, али не задовољавају оба услова у исто време. Термичка обрада у α фази даје потпуно ламеларну структуру са одличним пузањем, али слабом еластичношћу. Обрада у $\alpha + \beta$ фазама даје двоструку микроструктуру са задовољавајућим вредностима пузања и еластичности.

Код гасних турбина, највећа вредност еластичности мора да буде при корену, где су температуре ниже, због хлађења диска турбине. Пузање је од малог значаја у корену

делу. Насупрот њима, аеропрофил мора да издржи велику температуру и да има високе вредности пузања. Еластичност нема толики значај код лопатица турбине. Градијент који би на врху имао потпуно ламеларну структуру, а на самом дну имао двоструку структуру би омогућио одличне карактеристике за обе средине.

Принцип по коме се добија овакав материјал је такав да се направи градијент са равнотежним $\alpha + \beta$ фазама током изотермалног каљења. Ово се постиже додавањем терцијарног елемента у градијент, као што је на пример Cr, уз помоћ кога се мења однос запремина. При хомогеном каљењу од 1375 °C, двострука микроструктура се ствара од TiAl, док се ламеларна микроструктура добија ако је присутна довољна количина Cr. Лопатице турбина од титанијум алуминида са градијентом хрома, производе се врелим изостатичким пресовањем.

У врелим деловима гасних турбина, гасови за сагоревање улазе у сектор турбина при температурама од 1400 °C. Унутрашњи систем за хлађење, са веома напредним дизајном смањује температуру на површини лопатица на 1050 °C или мање. Супер-легури које се користе за аеропрофиле, као и системе за хлађење су достигли свој максимум при температурама на којима могу да функционишу. Уз помоћ термичке заштите са веком трајања од барем 25000 сати и неколико хиљада накнадних стартова је могуће унапредити овај недостатак.

Мешање горива и ваздуха пре сагоревања је метода која има висок потенцијал за оптимизовање ефикасности горива са малим ослобађањем чађи, угљоводоника и оксида азота (NO_x). Критични корак за овакво сагоревање представља поуздано раздвајање испаравања течног горива из гориве зоне. Ово се постиже наношењем течног горива на порозну спољну површину испаривачке цеви. Испарено гориво се преноси путем ваздуха до унутрашње стране цеви где се одиграва сагоревање. Због тога, унутрашња страна цеви мора бити херметички затворена и мора постојати порозни градијент од спољне до унутрашње стране цеви.

Порозне силиконске карбидне керамике су се показале као најбољи материјал за цеви за испаравање горива у гасним турбинама са пред-мешањем. Током рада ових цеви, температурни градијент износи 1500 °C на унутрашњем и 550 °C на спољашњем зиду и нормалан је на зид цеви.

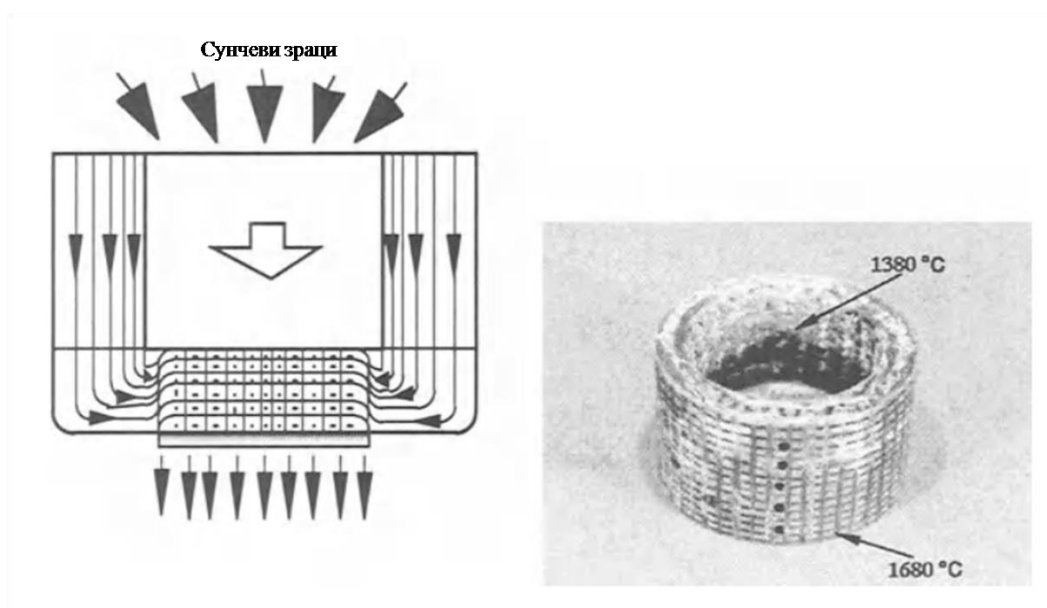
4.2.2 Делови за интегрисане термојонске/термоелектричне системе

Циљ јапанског ФГМ програма био је да развије хибридни систем за претварање енергије са високом ефикасношћу (40 %), користећи различите претвараче за различите распоне температуре. Били су то термојонски елементи на 2000 K, термоелектрични са нижом температуром од 1100 K и топлотни радијатори на 300 K. Да би развили ефикасан и дуготрајан уређај, систем је морао бити оптимизован са ниским губицима топлоте и

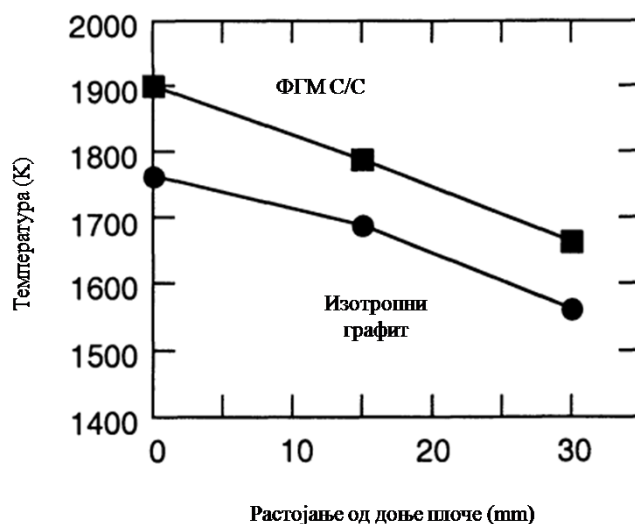
минималним оштећењима. Велики број проблема, који се односе на пренос топлоте, спој материјала, утицај температуре, електрични контакт као и изолација под високим температурама. Решење које је усвојено је реализовано тако да пријемник сунчеве топлоте буде израђен у облику удубљења, од ФГМ и то као угљенични композит (C/C).

Проток топлоте кроз угљенични композит може се контролисати уз помоћ архитектуре влакана. Оптимална температура на пријемнику добија се уз помоћ високог флукса температуре са горње површине, где се концентровани сунчеви зраци апсорбују, до доње површине која преноси топлоту до трансформатора. Губитак топлоте услед вертикалног смера топлотног флукса од врха до дна, мора бити минималан. Угљенична шупљина је заштићена вишеструко савијеним молибденским цилиндрима.

Прописно дизајниран цилиндрични пријемник треба да омогући високу проводљивост са равне горње површине до дна, и малу термичку проводљивост на спољне зидове цилиндра. Градијентна угљенична шупљина има прелаз у запремини влакана, повећавајући се ка централној оси шупљине, као и смеру влакана, која је фактички у средишњој површини паралелна оси цилиндричне шупљине. На спољним зидовима шупљине све више и више влакана је усмерено по ободу цилиндра. Температура на доњој површини пријемника је повећана за 100 до 150 °C услед ФГМ од кога је сачињена шупљина.



Слика 24. Шематски приказ композитне шупљине топлотног пријемника са смером влакана [3]



Слика 25. Упоредба температура на дну градијентног и неградијентног колектора [3]

Термојонски претварачи раде на принципу отпуштања електрона са врелог емитера до ниско температурног колектора, који се налази са супротне стране. Употребом ФГМ, перформансе термојонског претварача се могу оптимизовати, смањивањем губитака енергије између емитера и колектора (индекс баријере). Енергија коју треба довести до емитера треба се оптимизовати, док се енергија на колектору мора смањити што је више могуће.

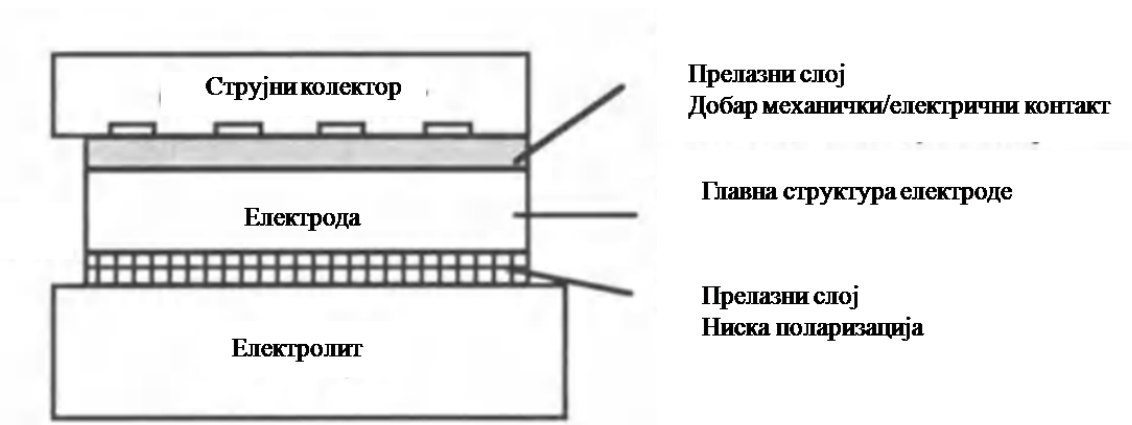
Топлота са доње стране угљеничне шупљине скупља се на титанијум карбидном панелу. Титанијум карбид има високу тачку топљења као и високу емисију ($\approx 0,9$), која омогућава ефикасно упијање широког спектра сунчевих зрака. Топлота се спроводи до ренијумског панела који се понаша као термојонски претварач. Прелазни слој између титанијумског и ренијумског панела мора да има одличну топлотну проводљивост, да смањује термичке напоне и да има улогу баријере између ренијума и титанијум карбида. Овај прелаз је остварен коришћењем комбинације градијентних слојева TiC/Mo - MoW - WRe. Електрода колектора израђена је од молибдена са ниобијум оксидом као превлаком. Са овом поставком термојонски систем има излазну снагу од $80 \text{ kW} / \text{m}^2$ са распоном температура емитера и колектора од $1600 - 760 \text{ }^\circ\text{C}$. Фабрикација композитних електрода емитера представља изазов услед високих термичких напона као и спојева између керамичких и металних слојева. Коришћењем ФГМ концепта ови термички напони могу бити смањени.

4.2.3 Делови горивних ћелија

Горивне ћелије су електрохемијски уређаји који претварају хемијску енергију у електричну. Електрична енергија и топлота се добијају помоћу електрохемијске комбинације горива и оксиданта. Имају неколико предности које укључују релативно

високу ефикасност конверзије енергије, низак ниво емисије загађења, потенцијал за заједничко стварање електрицитета и топлоте, разноврсност горива и минимална ограничења у виду постављања.

Горивне ћелије деле се на основу материјала електролита. Један тип представља чврсто оксидна горивна ћелија. Састоји се од катодe, која се налази на страни ваздуха и аноде, која је на страни горива. Обе стране су одвојене оксидним електролитима са високом јонском проводљивошћу. Кисеоник из ваздуха редукован је на страни катодe на O^{2-} додавањем два електрона и креће се кроз електролит до аноде. Горива као што су H_2 , CH_4 , природни гас, се оксидују на страни аноде у H_2O или CO и тако ослобађају електроне у спољно коло на катоди. Чврсте оксидне горивне ћелије захтевају већи број функционалних електрохемијских компоненти и контактних материјала. Електроде су повезане на електролит спојем са ниском поларизацијом и хемијском компатибилношћу. Овај прелазни део може имати три фазе (електрода, електролит, гас) или може бити мешани проводник.



Слика 26. Електрохемијске компоненте и материјали од којих се израђују чврсте оксидне горивне ћелије [3]

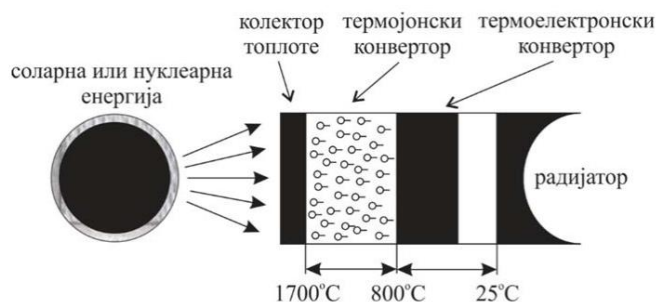
Главна електрода мора бити ниске отпорности и са довољно пропусности за гасну дифузију. Струјни колектор је повезан са електродом уз помоћ прелазног региона који мора да омогући добар механички и електрични контакт између електроде и струјног колектора, а такође мора бити и хемијски компатибилан. Радни услови су тешки, неколико десетина хиљада сати, на температурама између $800 - 1000\text{ }^{\circ}C$, у оксидирајућој атмосфери. Већина компоненти направљена је од керамике или од метала са високом температуром оксидовања. За чврсте оксидне горивне ћелије које раде на нижим температурама, да би

биле техничке изводљиве, отпорност електролита мора бити смањена. Ово се постиже смањивањем дебљине електролитног слоја, и минимизовањем губитака у међуслоју електролита/електроде. Градијентна конфигурација побољшала би рад оваквих горивних ћелија.

Код садашњих горивних ћелија, највећи део губитака напона дешава се на страни катоде (страна са ваздухом). Пожељно је оптимизовати слојеве катода, као и међуслојеве између катоде и електролита. Материјал катоде мора да задовољи следеће захтеве: висока електрична проводљивост, висока јонска проводљивост, висока катализа за редуковање кисеоника, хемијска компатибилност са електролитом, стабилност на високим температурама и могућност да се обликује у танку превлаку. Користећи градијентни вишеслојни материјал стронцијум лантан хромит, чија је термичка дилатација слична као и дилатација електролита, такође је и хемијски компатибилан са цирконијум диоксидом, главним материјалом горивне ћелије. Да би се повећала електрична проводљивост количина стронцијума се градијентно повећава од стране електроде. Заменом оригиналног међуслоја који је направљен од хомогеног материјала, повећава се излазна снага за 40 %.

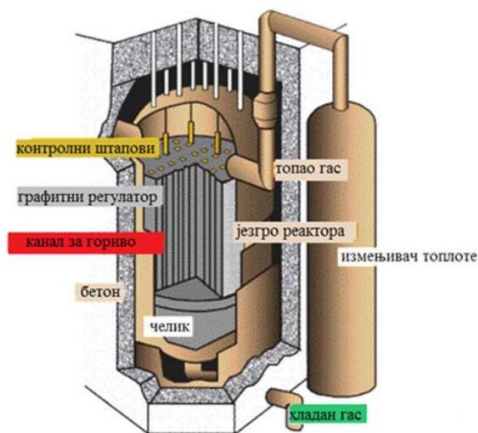
4.2.4 Делови нуклеарног реактора

ФГМ налазе своју примену и код система за конверзију сунчеве или нуклеарне енергије у топлотну енергију. Различити конвертори се користе за различите интервале температуре: термојонски елементи се користе на високим температурама (око 1700 °C), термоелектронски елементи на око 800 °C и радијатори на око 25 °C.



Слика 27. ФГМ конвертор енергије [11]

Комбинација способности керамике да апсорбује енергију са једне стране и добре жилавости метала са друге, искоришћења је код унутрашњег зида нуклеарног реактора који се производи од керамика/метал ФГМ.



Слика 28. Нуклеарни реактор [12]

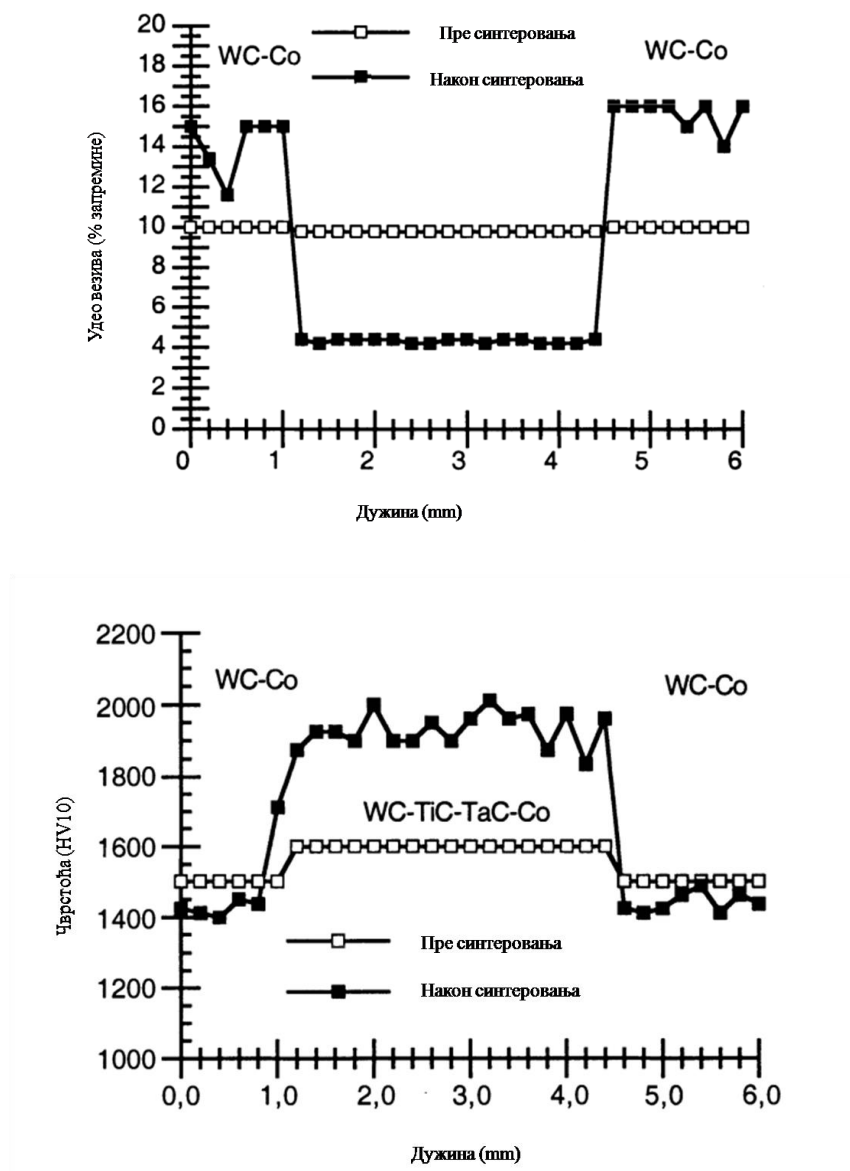
4.3 Резни алати

4.3.1 Материјали отпорни на хабање

Јапански мач илуструје класичну примену концепта ФГМ. Начињен је од челика са градијентом угљеника од површине ($\approx 0,6$ % угљеника) до унутрашњости ($\approx 0,25$ % угљеника). Овакав састав резултује чврстим мачем са оштрим ивицама, које остају оштре и након дугог коришћења. Ова софистицирана технологија, која је откривена пре око 1000 година, дала је овим мачевима и ножевима супериорну чврстоћу и жилавост.

У новије доба, да би се продужила ефикасност машина, брзине сечења и количине обрађеног материјала су се битно увећале. Из тих разлога, модерни алати за сечење морају да издрже велике термомеханичке напоне и захтевају термохемијску отпорност на реакције са деловима који се обрађују. Коришћене су разне технике које омогућавају фабрикацију композитних градијентних алата и вишеслојних превлака, да би се превазишли тешки услови на резним ивицама. Конструкциони делови и алати су под великим напорима који се не могу превазићи само једним материјалом или композитом. На пример, цементиран карбид (волфрам карбид-кобалт WC-Co) захтева велику чврстоћу на деловима резних ивица, али јачи и чвршћи базни материјал.[3]

Цилиндрични или композити у облику шипке (формирани при притиску од 150 - 300 МПа), фабриковани су у три слоја. Величина зрна у два периферна слоја другачија је него код централног слоја. Количина кобалта варира између 5,5 и 11 % масе, величина зрна волфрам карбида у синтерованој легури је између 0,4 и 4 μm . Током фазе течног синтеровања (1400 - 1450 °C) проток топљења контролише се уз помоћ распореда фаза и величине зрна карбидне фазе. Ако слојеви садрже карбиде исте величине, део кобалта се изједначаје кроз композит неvezеано у односу на почетни распоред.



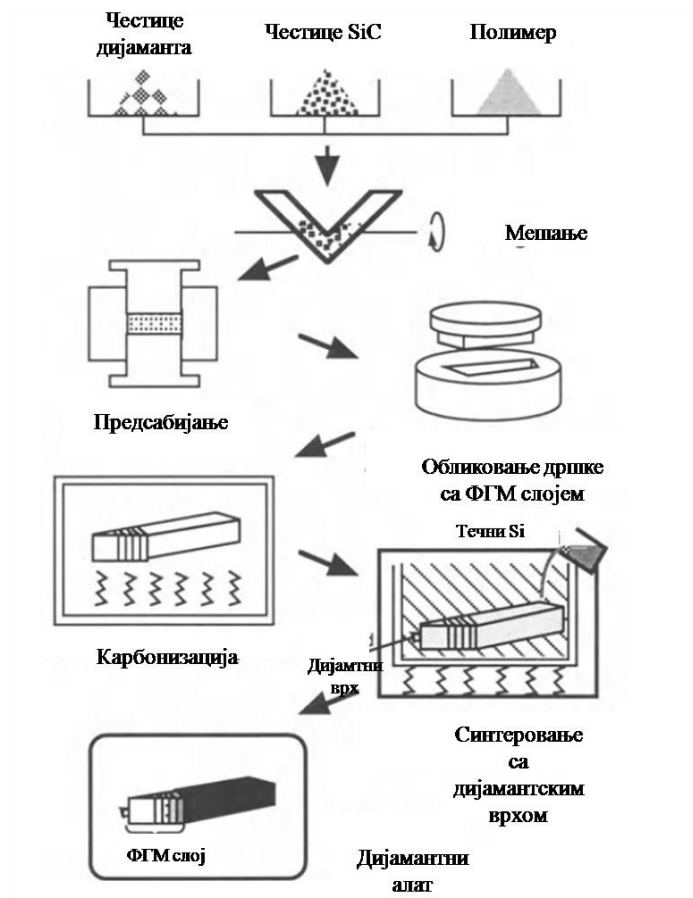
Слика 29. Ток у трослојном композиту, у односу на разлике у карбидној фази пре и након синтеровања [3]

Градијентни резни алати такође су направљени за непрекидно сечење уз помоћ керамичких металних композита TiC-NiMo код којих проценат TiC у градијентном слоју варира од 95 % масе на врху до 86 % масе у прелазном појасу до самог челика. Градијентна структура је добијена лемљењем сегмената различитих особина. Успешно сечење показује појачане особине уз помоћ концепта градијентних материјала.

Дијамантни резни алати се све више користе за прецизно сечење меких делова, као што су пластична сочива, огледала за ласерске штампаче и подлоге хард дискова направљених од

алуминијумских легура. Конвенционални дијамантни резни алати праве се повезивањем дијамантног кристала на металну дршку уз помоћ сребрног лема са активним металима. Прецизност овог поступка у почетку била је на релативно ниском нивоу услед слабе крутости сребра, које изазива вибрације током поступка производње. Овај проблем решен је употребом ФГМ са градијентним слојем дијаманта и силицијум карбида између дијамантског врха и дршке.

Ови дијамантни резни алати производе се синтеровањем. Дршка се прави од више слојева силицијум карбидног праха са прелазом од 0 до 80 % дијамантског праха и полимерног везива. Композит се загрева да би се матрица карбонизовала и напунила течним силиконом. Силикон и угљеник реагују и формирају нова влакна која везују силицијум карбид и дијамантне честице. Танак слој дијамантног врха се градијентно претвара у силицијум карбид, резултујући чврсто повезаним делом. Анализа коначним елементима показује да овај градијентни слој смањује термичке напоне на прелазу између два слоја са 400 МПа на 150 МПа. Прецизност производње увећала се скоро шест пута, док је век трајања алата продужен за 30 %. Упркос својим предностима, ФГМ резни алати су и даље доста скупи да би били индустријски конкурентни.



Слика 30. Шема процеса производње дијамотног/силицијум карбид ФГМ резног алата [3]

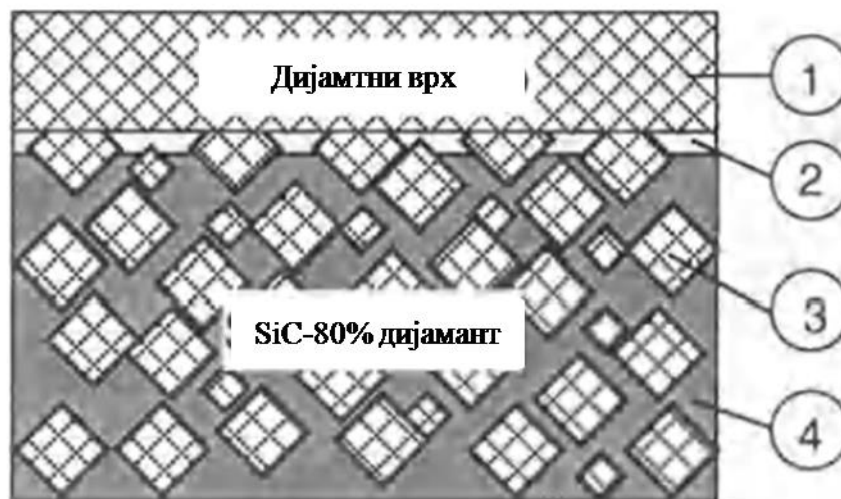
ФГМ концепт је ипак лакше применити на резне алате, у односу на неке веће и комплексније компоненте, пошто се њихова ефикасност може брзо проверити уз помоћ неколико лаких тестова. Из овог разлога, очекивано је да ће примена ФГМ у овој грани индустрије расти.

4.3.2 Превлаке отпорне на хабање

Више типова градијентних превлака за резне ивице алата су развијане у последње време. Код ових превлака карбид или нитрид варира од подлоге до површине, а такође постоје и случајеви код којих се нитриди или различити метали спајају тако да њихова крајња структура буде градијентна. За специјалне примене као што су бушење и глодање, превлака има двоструку улогу. Спречавају хабање уз помоћ титанијум нитрида и имају улогу само-подмазивања уз помоћ волфрам карбида.

Градијентни цементиран карбид на челичним подлогама смањује термичке напоне, са WC/Co превлаком. Ова градијентна превлака прави се слагањем челичних нивоа, на које се настављају слојеви цементираног карбида у којима се проценат Co постепено повећава. Затим се процес наставља синтеровањем уз помоћ електричне струје. Због ниске

температуре синтеровања и кратког времена, добија се жељена структура без пукотина. ФГМ је нашао своју примену и код апарата за бријање. Оштрице бријача на самом врху имају чврсти спој гвожђа и алуминијума који се таложи на површини. Овакав материјал даје чврсту али флексибилну површину за угодно бријање.



Слика 31. Шема везивања дијамантног врха и дијамант/SiC ФГМ [3]

1-дијамантни врх, 2-везивна фаза, 3-дијамнтне честиче, 4- синтерован SiC

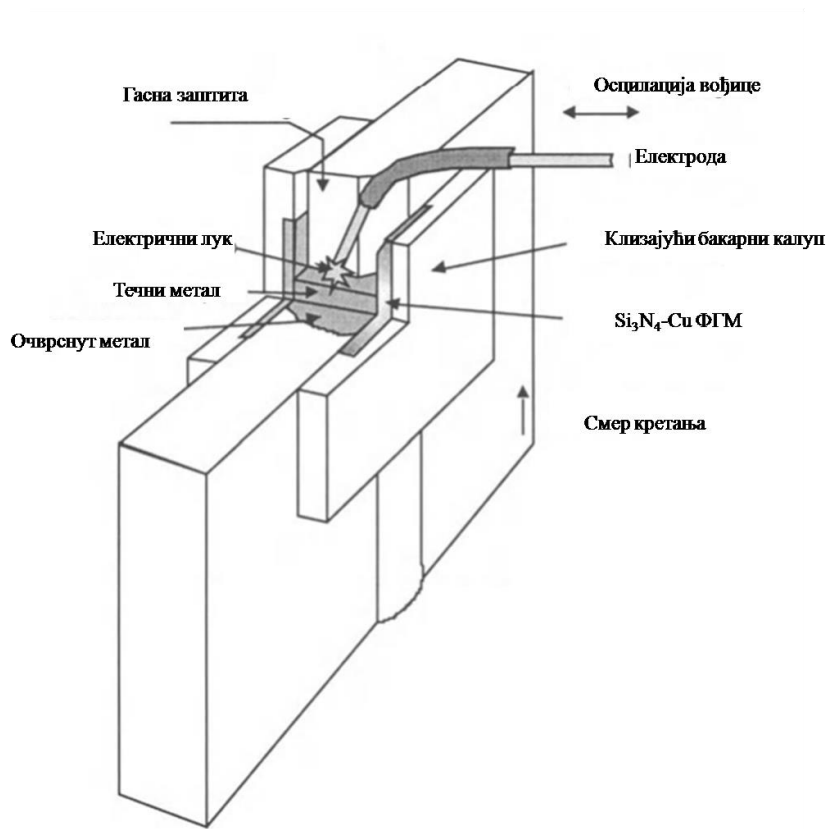
4.4 Делови машина

ФГМ имају највећу примену код зглобова машина, посебно као метал-керамика зглобови за парне и гасне турбине. Предности градијентних зглобова првенствено су смањивање термичких напона и побољшавање чврстоће зглобова. Затезна чврстоћа ових зглобова већа је 3-8 пута у односу на стандардне, тако да имају дужи век трајања на повишеним температурама.

Још једна примена ФГМ која се односи на смањивање термичких напона и низак коефицијент трења јесте код апарата за заваривање. Аутоматске електричне машине за заваривање великих алуминијумских плоча, које се користе за бродоградњу примењују принципе ФГМ. Ови апарати користе клизајући бакарни калуп који се креће дуж шавова и подупире течни алуминијум. Електрични лук осцилује између калупа. Умци који спречавају реакцију између алуминијума и бакра, такође онемогућавају да се калуп залепи за алуминијум, су углавном направљени од силикон нитрида да би омогућили ниско трење и добар шав. Њихов век трајања је лимитиран услед цикличних термичких напона током

коришћења. Овај проблем је ублажен уз помоћ $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Cu}$ ФГМ. Овај материјал побољшава стабилност уметака, смањује термичке напоне и задржава низак коефицијент трења.

Керамички градијентни материјали такође се користе за делове мотора, повећавајући топлотну изолацију, а самим тим и век трајања. Код клипова дизел мотора, керамика се градијентно смањује од врха до дна.



Слика 32. Процес заваривања две алуминијумске плоче и микроструктура уметка од градијентног материјала [3]

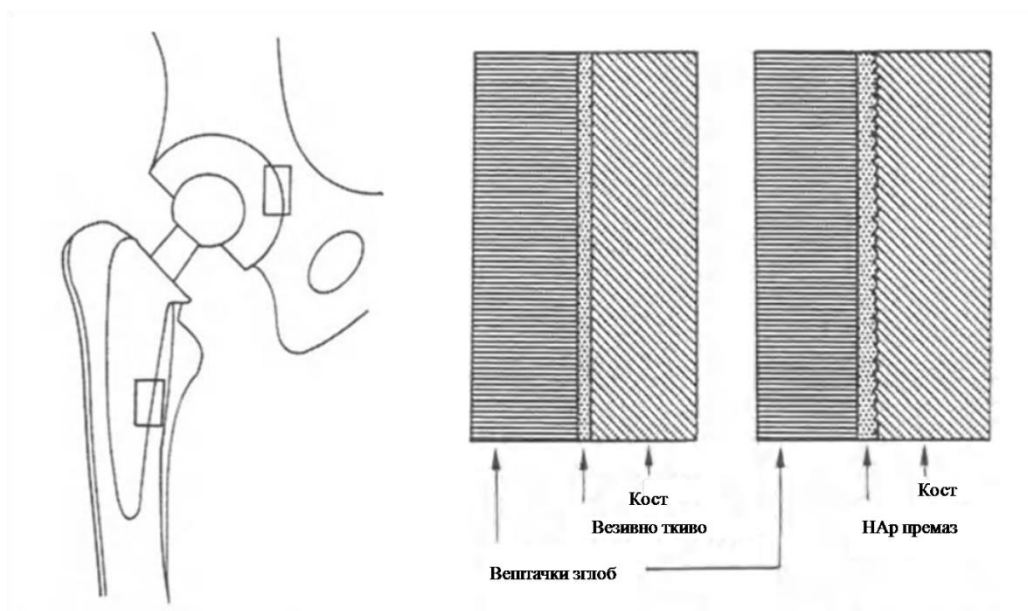
4.5 Функционално градијентни биоматеријали за вештачке зглобове

Више органа животиња, као што су кожа, крвни судови, кости су састављени од више слојева са раличитим карактеристикама. Ови слојеви се везују, креирајући функционално градијентни материјал. Некомпатибилност и раслојавање на међуслојевима се не догађа под нормалним физиолошким стањима. Идеална техника била би да се то природно везивање опонаша уз помоћ протеза.

4.5.1 Градијентни међуслој за кости у ортопедским имплантатима

Конвенционалне методе фиксирања вештачке кости и зглоба на кост укључују: близак контакт протезе и кости, директно механичко фиксирање уз помоћ вијака или клинаца и попуњавање простора између протезе и кости коштаном цементом. У скорије време, протезе прекривене порозним металом, користе се за фиксирање. Очекује се да кост урасте у поре метала и тако оствари чврсту везу. Неколико калцијумових фосфата који могу да се вежу за кост, као што су биоактивна керамика и хидроксиапатит су тестирани у клиничким условима. Пошто ови биоактивни материјали немају довољну чврстоћу, почело је развијање металне превлаке која би побољшала својства ових материјала, ефективно их претварајући у композит.

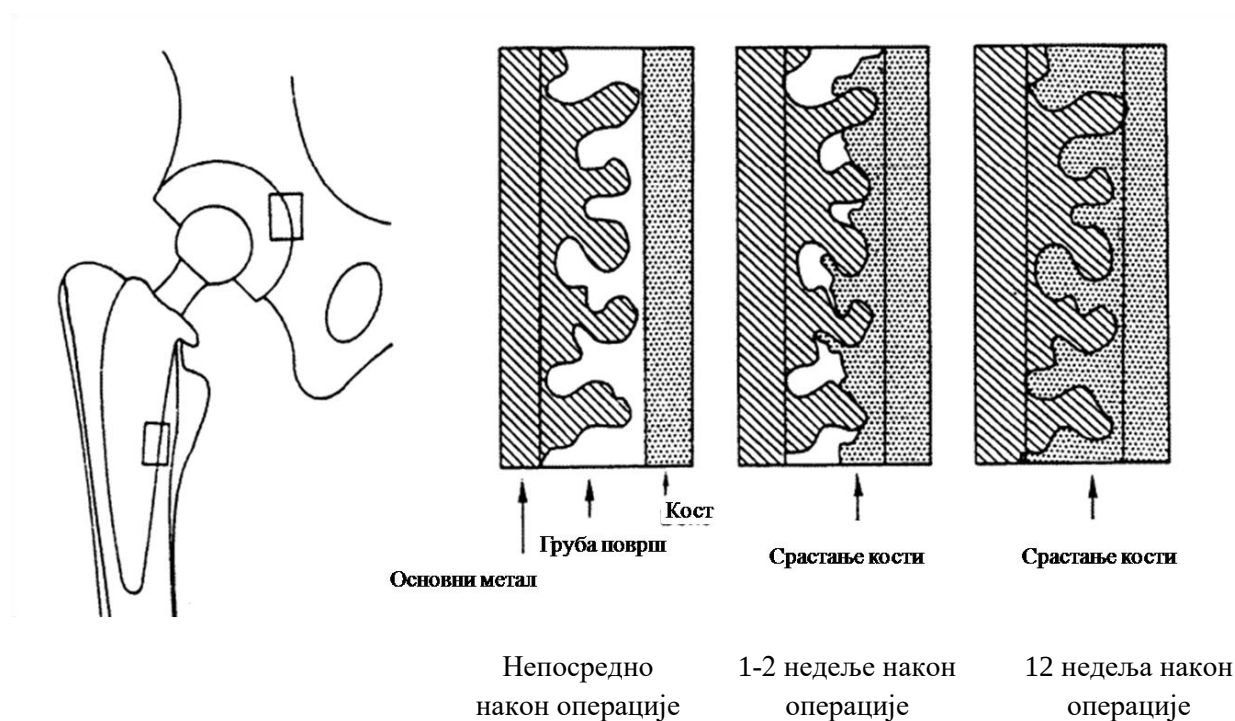
У овој методи, протеза је фиксирана за кост без коштаног цемента. Током операције, протеза са глатком површином се чврсто повезује са коштаном шупљином. Да би се повећала контактна површина, шупљина се обликује као и протеза. У овом случају везивно ткиво мембране је међуслој између протезе и кости. Ово може изазвати бол током ходања, услед микропомерања протезе у кости. Да би се спречили потенцијални проблеми, површина протезе је премазана слојем хидроксиапатита (ХАп) дебљине 50-100 μm . Уз помоћ премаза протеза се хемијски везује за кост. Уколико се протеза помери у року од 2-3 недеље може доћи до оштећења и кривог срастања.



Слика 33. Шематски приказ међуслоја између вештачке протезе и кости [3]

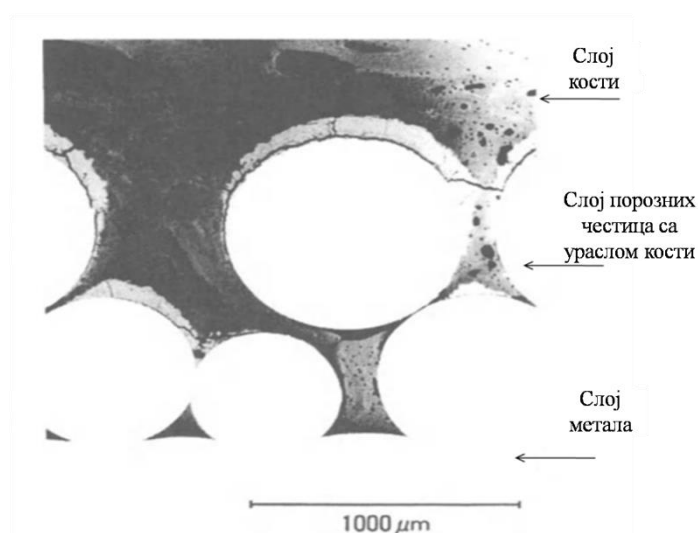
Проблем који се може јавити, након неколико година замене кука, је тај да се премаз хидроксиапатита одвоји од основног метала, или се кук у потпуности одвоји, услед ходања и смицајног напона који делује на бутну кост. Овај проблем је могуће превазићи градијентацијом слоја. Међутим, пошто је слој најближи кости од чистог хидроксиапатита, и даље постоји могућност лома међуслоја.

Друга, ефикаснија метода пријањања протезе за кост, је таква да се протеза пресвлачи порозним металом. Нова кост ураста у поре након имплантације. Брзина пријањања је најбржа, а такође се и постиже највећа снага када су величине пора од 300-600 μm . Порозна површина може се направити прскањем метала или пресвлачењем мрежом. Да би се направила порозна површина, наносе се зрнца титанијумске легуре 750 μm у пречнику у два слоја. Након 7-10 дана почиње урастање кости у поре. На крају процеса цела количина хидроксиапатита која се налазила на површини протезе, спаја се са кости.



Слика 34. Шематски приказ међуслоја између порозног метала и кости [3]

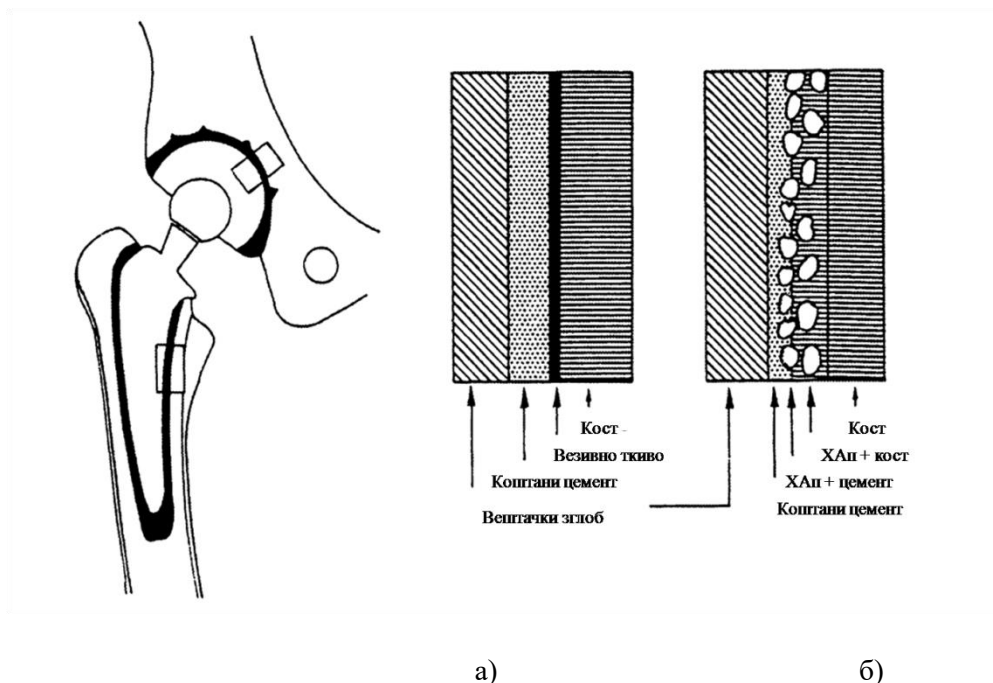
Када се честице титанијумске легуре премажу хидроксиапатитом, већа количина кости срасте заједно са протезом у краћем временском периоду, формирајући чврсту везу. Вероватноћа успешног фиксирања се знатно увећава пресвлачењем протезе. Смањује се бол током ходања, који би настајао услед микро померања протезе.



Слика 35. Хистолошки приказ срастања, 6 месеци након операције [3]

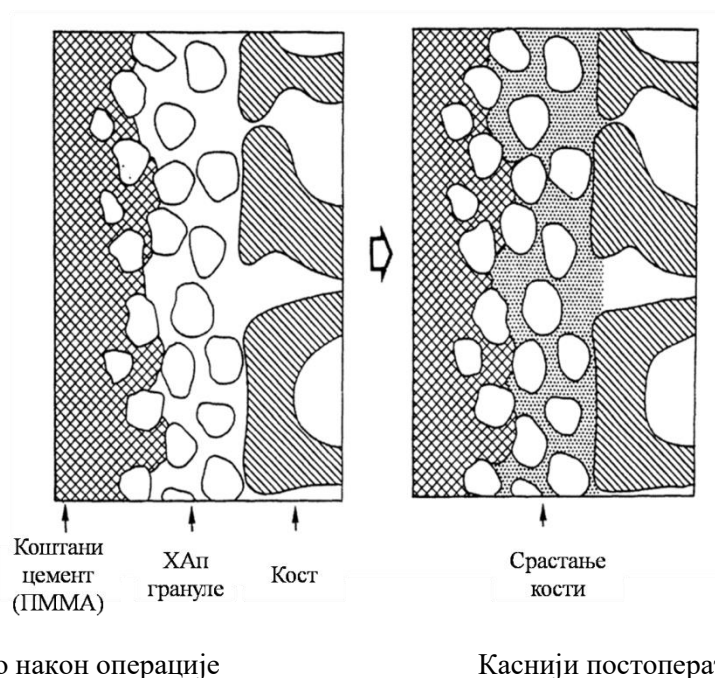
Још једна конвенционална техника за срастање укључује коришћење полиметил метакрилата (ПММА), коштаног цемента, да би се протеза причврстила уз кост. Ова

смеша се припрема током операције мешањем и гњечењем полимерног праха и течног мономера. Након припреме, сипа се у шупљину кости а затим се протеза фиксира заједно са њом. Цемент се стврдне (полимеризује) за 10 - 15 минута након припреме. Овом методом могуће је фиксирати протезу непосредно након операције. Међутим, мембрана везивног ткива може се уметнути између кости и цемента неколико недеља након операције. Овај проблем може довести до слабљења веза на међуслоју између протезе и кости.



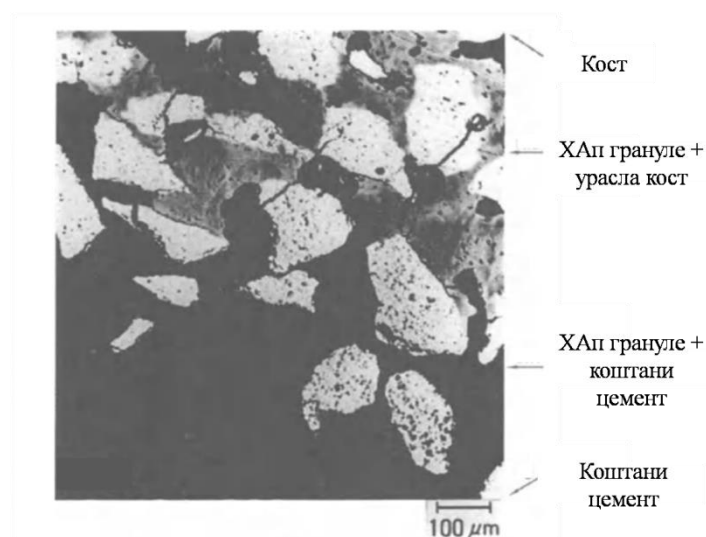
Слика 36. Шематски приказ а) међуслоја између полиметлил метакрилата и кости, б) биоактивног међуслоја [3]

Биоактиван међуслој побољшава цементацију и решава проблеме који се могу јавити у међуслоју између ПММА и кости. Уз помоћ једног до три слоја ХАп гранула (100 - 300 μm у пречнику), који се постављају између кости и коштаног цемента, ХАп грануле се хемијски везују за кост.



Слика 37. Формирање порозне површине на кости услед премаза гранулама ХАп-а [3]

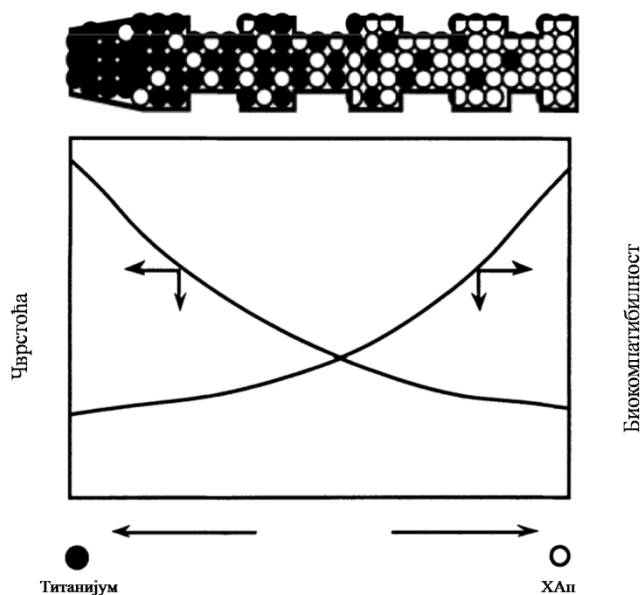
Хистолошки гледано, након 6 недеља формирају се четири градијентне зоне: зона кости, зона ХАп гранула са ураслом кости, зона ХАп гранула са копштаним цементом и зона коштаног цемента.



Слика 38. Хистолошки приказ међуслоја, 7 месеци након операције [3]

4.5.2 Зубни имплантати

ФГМ састављени од титанијума, са додавањем ХАп имају добру биокомпатибилност и механичку чврстоћу. Овај ФГМ добија се синтерованем (на 1300 °C у аргону, користећи радио фреквенције. Градијент се састоји од различитих композиција титанијума, 5% паладијума и 20 - 30% ХАп. Савојна чврстоћа (150 МПа) овог материјала слична је људској кости.



Слика 39. Шема структуре ФГМ од ког се праве зубни имплантати [3]

5. Математички опис понашања ФГМ

Посматрајмо пример линерано – еластичне, танке правоугаоне плоче ФГМ подвргнуте трансверзалном оптерећењу. Претпоставља се да је плоча униформне дебљине h и да је дебљина h у распону од $1/20$ – $1/100$ свог опсега. Деформације и напони на плочи базирају се на следећим претпоставкама [13]:

- линијски елементи управни на средње површи плоче при деформацији остају нормални и недеформисани по завршетку деловања оптерећења
- угиб плоче је занемарљиво мали у поређењу са дебљином, тако да важе линеарне везе између напона и померања
- нормални напони у правцу дебљине плоче могу да се занемаре јер се претходно претпостављена дебљина креће у занемарљиво малом опсегу
- за нехомогене еластичне плоче, Јангов модул и Поасонов коефицијент су функције променљиве у односу на просторну координату z

5.1 Напонско поље ФГМ плоче

У складу са претпоставком 1, тачка А на ФГМ плочи на растојању z од средње површи помериће се у тачку А' након деформације. Последице, компоненте трансверзалног оптерећења ε_{zz} , ε_{zz} и γ_{yz} су занемарљиво мале. Према томе, померања у тачки А у x , y и z правцу су:

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) - z \frac{dw}{dx} \quad (5.1)$$

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) - z \frac{dw}{dy} \quad (5.2)$$

$$w(x, y, z) = w_0(x, y) \quad (5.3)$$

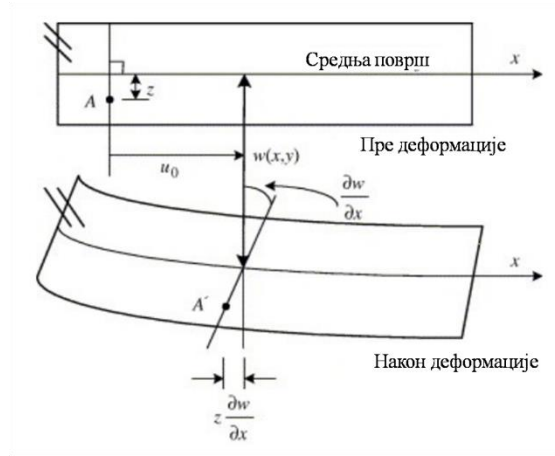
где су променљиве померања средње површине. Под претпоставком мале деформације, напонско поље ФГМ плоче је:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \varepsilon_{x_0} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \varepsilon_{y_0} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (5.5)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{xy_0} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \quad (5.7)$$



Слика 40. Деформисана конфигурација ФГМ плоче [13]

Познато је да занемаривање трансверзалне смицајне деформације може да доведе до значајних грешака у случају примене на плочама већих дебелина, односно преко 10 % од укупне дебелине. Овакав случај прорачуна применљив је на плочама испод 10 % дебелине са задовољавајућим резултатима.

На основу претпоставки претходно наведених, релације за напон – деформацију у равни плоче изражавају се у следећем облику:

$$\sigma_x = \frac{E(z)}{1 - \nu(z)^2} \left\{ \varepsilon_{x_0} + \nu(z)\varepsilon_{y_0} - z \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu(z) \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \right\} \quad (5.8)$$

$$\sigma_y = \frac{E(z)}{1 - \nu(z)^2} \left\{ \varepsilon_{y_0} + \nu(z)\varepsilon_{x_0} - z \left[\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu(z) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \right\} \quad (5.9)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E(z)}{1 - \nu(z)^2} \left(\frac{1 - \nu(z)}{2} \right) \left[\gamma_{xy_0} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] \quad (5.10)$$

5.2 Аксијалне силе, нормалне силе и момент савијања ФГМ плоча

Резултанте напона по јединици дужине средње површи дефинишу се као интеграл напона по дебљини плоче. Раванске аксијалне силе N_x , N_y и N_{xy} дефинишу се као:

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz, \quad N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz, \quad N_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz \quad (5.11)$$

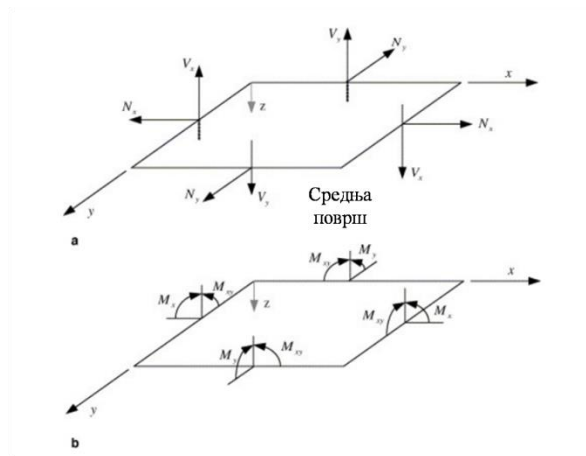
Трансверзалне силе V_x и V_y су дефинисане као:

$$V_x = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xz} dz, \quad V_y = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{yz} dz \quad (5.12)$$

а моменти савијања M_x , M_y и M_{xy} као:

$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} z \sigma_x dz, \quad M_y = \int_{-h/2}^{h/2} z \sigma_y dz, \quad M_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} z \tau_{xy} dz \quad (5.13)$$

Конвенција о знацима аксијалних и трансверзалних сила као и напона савијања илустрована је на слици 40.



Слика 41. Позитивни смерови аксијалних, трансверзалних сила и напона савијања [13]

Заменом израза (5.8), (5.9) и (5.10) у изразе (5.11) и (5.12) изражавамо аксијалне силе и моменте савијања у матричној форми као:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{11} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x_0} \\ \varepsilon_{y_0} \\ \varepsilon_{xy_0} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{11} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (5.14)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{11} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x_0} \\ \varepsilon_{y_0} \\ \varepsilon_{xy_0} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{11} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (5.15)$$

Где су коефицијенти A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} добијени интеграцијом својстава материјала ФГМ плоче и имају следећи облик:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)^2} dz, & A_{12} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)v(z)}{1-v(z)^2} dz \\ B_{11} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{zE(z)}{1-v(z)^2} dz, & B_{12} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{zE(z)v(z)}{1-v(z)^2} dz \\ C_{11} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{z^2 E(z)}{1-v(z)^2} dz, & C_{12} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{z^2 E(z)v(z)}{1-v(z)^2} dz \\ A_{66} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)^2} \left(\frac{1-v(z)}{2} \right) dz, & B_{66} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{1-v(z)^2} \left(\frac{1-v(z)}{2} \right) dz \\ C_{66} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{z^2 E(z)}{1-v(z)^2} \left(\frac{1-v(z)}{2} \right) dz \end{aligned} \quad (5.16)$$

5.3 Једначине равнотеже и компатибилности ФГМ плоча

Претпоставимо да је плоча подвргнута дистрибуираним оптерећењима q_x , q_y , q_z , дуж x , y , z праваца. Посматра се мала запремина димензија dx , dy , dz . Када је елемент у стању равнотеже, резултујуће силе у x правцу морају бити једнаке нули.[13]

$$\left(N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx\right) dy + \left(N_{yx} + \frac{\partial N_{yx}}{\partial y} dy\right) dx - N_x dy - N_{yx} dx + q_x dx dy = 0$$

или:

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{yx}}{\partial y} + q_x = 0 \quad (5.17)$$

Слично томе и у правцу y, z морају бити нула:

$$\frac{\partial N_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} + q_y = 0 \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + q_z = 0 \quad (5.19)$$

Моментне једначине у правцима x и y дају још две једначине равнотеже:

$$V_x = \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} \quad (5.20)$$

$$V_y = \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} \quad (5.21)$$

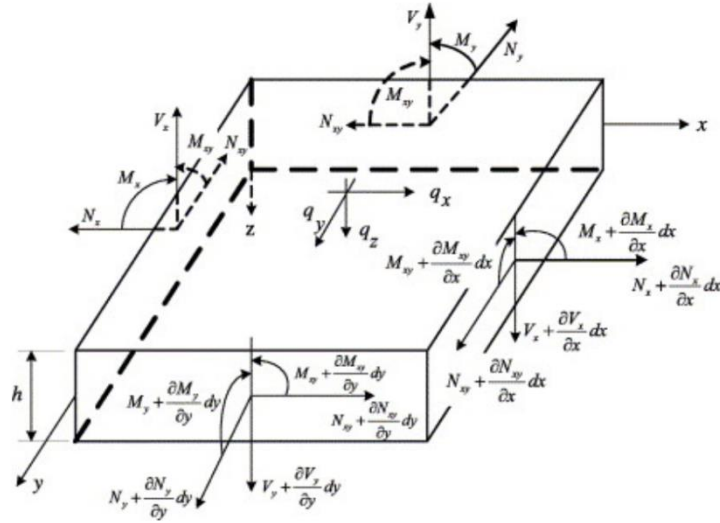
Заменом једначина (5.20) и (5.21) у (5.19), добија се једначина равнотеже у зависности од момента савијања:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -q_z(x, y) \quad (5.22)$$

Постоје три компоненте момента у једначини (5.22), па је потребно разматрати деформације. Применом једначине (5.15), (5.22) може се записати као:

$$\begin{aligned} B_{11} \left(\frac{\partial^2 \varepsilon_{x_0}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{y_0}}{\partial y^2} \right) + B_{12} \left(\frac{\partial^2 \varepsilon_{x_0}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{y_0}}{\partial x^2} \right) + 2B_{66} \frac{\partial^2 \gamma_{xy_0}}{\partial x \partial y} - C_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \\ - (2C_{12} + 4C_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} - C_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = -q_z(x, y) \end{aligned} \quad (5.23)$$

Напони на средњој површи ε_{x_0} , ε_{y_0} , γ_{xy_0} и утиб w су међусобно зависни. Овај феномен је различит у односу на хомогене плоче код којих су напони на средњој површи независни.



Слика 42. Силе у издвојеном сегменту плоче [13]

Ако је плоча подвргнута само трансверзалном оптерећењу q_z , када је $q_x = 0$, $q_y = 0$, онда се равanske једначине (5.17) и (5.18) могу решити у оквирима напонске функције $\varphi(x, y)$, која је дефинисана као:

$$N_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}, \quad N_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \quad N_{xy} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \quad (5.24)$$

Коришћењем једначина (5.14) и (5.24), напони на средњој површини се изражавају у оквирима функције напона $\varphi(x, y)$ и угиба w :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 \\ P_{12} & P_{11} & 0 \\ 0 & 0 & P_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (5.25)$$

Моменти савијања су коришћењем једначина (5.25) и (5.15) изражени као:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -Q_{11} & -Q_{12} & 0 \\ -Q_{12} & -Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & -Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{11} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (5.26)$$

где је :

$$P_{11} = \frac{A_{11}}{\Delta}, P_{12} = \frac{-A_{12}}{\Delta}, P_{66} = \frac{-1}{A_{66}}$$

$$Q_{11} = \frac{A_{12}B_{12} - A_{11}B_{11}}{\Delta}, Q_{12} = \frac{A_{12}B_{11} - A_{11}B_{12}}{\Delta}, Q_{66} = -B_{66}/A_{66}$$

$$S_{11} = B_{11}Q_{11} + B_{12}Q_{12} + C_{11}, S_{12} = B_{11}Q_{12} + B_{12}Q_{11} + C_{12}, S_{66} = C_{66} + B_{66}Q_{66},$$

$$\Delta = A_{11}^2 - A_{12}^2$$

У циљу налажења односа између функције напона $\varphi(x, y)$ и угиба w , заменом једначине (5.25) у (5.23), једначина равнотеже постаје:

$$\begin{aligned} Q_{12} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2(Q_{11} - Q_{66}) \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + Q_{12} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} + S_{11} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} \\ + 2(S_{12} + 2S_{66}) \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + S_{11} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = q_z(x, y) \end{aligned} \quad (5.27)$$

Како су напонска функција $\varphi(x, y)$ и угиб w у једначини (5.27) непознати, потребна је још једна једначина. Једначина компатибилности се користи да се запише конститутивна једначина за $\varphi(x, y)$. Коришћењем једначина (5.4) - (5.7):

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (5.28)$$

постаје:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{x_0}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{y_0}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy_0}}{\partial x \partial y} \quad (5.29)$$

Последично, заменом (5.25) у (5.29) добија се релација између напона $\varphi(x, y)$ и угиба w :

$$\begin{aligned} P_{11} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2(P_{12} - P_{66}) \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + P_{11} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} - Q_{12} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \\ - 2(Q_{11} - Q_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} - Q_{12} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = 0 \end{aligned} \quad (5.30)$$

Једначине (5.27) и (5.30) обезбеђују обједињену једначину за решавање напонске функције $\varphi(x, y)$ и угиба w .

6. Закључак

ФГМ представљају релативно нов облик композитних материјала. У овом раду описана је структура самих композита. Дат је приказ теоријских основа ФГМ као што су подела, методе фабрикације и градијент материјала. За процесирање ФГМ користе се различите технике, којима је могуће контролисати састав и структуру. Предности ових материјала огледају се у продуженом радном веку, ефикаснијем утрошку материјала, спајањем некомпатибилних материјала као и контроли физичких карактеристика које су потребне за специфичан проблем. Модул еластичности, Поасонов коефицијент, модул смицања, као и густина материјала мењају се континуално. Најчешће коришћени ФГМ је метал/керамика, при чему керамика има добру топлотну отпорност, док је удео метала значајан у погледу механичке чврстоће, жилавости. Због својих побољшаних механичких, топлотних и проводних карактеристика ФГМ нашли су своју примену у разним гранама индустрије попут електронике, енергетике, медицине. У сфери машинства користе се код мотора са унутрашњим сагоревањем, као и код резних алата. Поред великог броја предности, ови материјали имају одређене мане које се односе на скупе технике и процесе израде, које је такође и тешко контролисати. За даљи развој ФГМ потребно је смањити трошкове израде, како би се ови материјали комерцијализовали и нашли примену у масовној производњи.

7. Литература

- [1] Адамовић, Д., Јовановић, М., Лазић, В., Ратковић Н. (2003) *Машински материјали*, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац
- [2] Smojver, I. (2007) *Mehanika kompozitnih materijala*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [3] Miyamoto, Y., Kaysser, W.A., Rabin, B.H., Kawasaki, A., Ford, R.G. (1999) *Functionally Graded Materials: Design, Processing and Applications*
- [4] Jha, D.K., Kant, T., Singh, R.K. (2013) *A critical review of recent research on functionally graded plates*
- [5] Kohli, G.S., Singh, T. (2015) *Review of functionally graded materials*, Journal of Production Engineering
- [6] Pietrzak, K., Kaliński, D., Chmielewski, M. (2007) *Interlayer of Al_2O_3 –Cr functionally graded material for reduction of thermal stresses in alumina–heat resisting steel joints*, Journal of the European Ceramic Society
- [7] Bharti, I., Gupta, N., Gupta, K.M. (2013) *Novel Applications of Functionally Graded Nano, Optoelectronic and Thermoelectric Materials*, International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing
- [8] Watanabe, Y., Sato, H. (2011) *Review Fabrication of Functionally Graded Materials under a Centrifugal Force*, in Nanocomposites with Unique Properties and Applications in Medicine and Industry, Dr. John Cuppoletti (Ed.), ISBN: 978-953-307-351-4, China, InTech
- [9] Saiyathibrahim, A., Nazirudeen, M.S.S., Dhanapal, P. (2015) *Processing Techniques of Functionally Graded Materials – A Review*, in International Conference on Systems, Science, Control, Communication, Engineering and Technology 2015 [ICSSCET 2015] ISBN:978-81-929866-1-6, Coimbatore, India
- [10] Watanabe, Y., Fujiwara, E. M., Sato, H. (2009) *Fabrication of functionally graded materials by centrifugal slurry-pouring method and centrifugal mixed-powder method*, Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy
- [11] EL-Wazery, M.S., EL-Desouky, A.R. (2015) *A review on Functionally Graded Ceramic-Metal Materials*, Journal of Materials and Environmental Science
- [12] Koizumi, M. (1997) *FGM activities in Japan, Composites Part B: Engineering*

- [13] Shyang-Ho C., Yen-Ling C. (2006) *Mechanical behavior of functionally graded material plates under transverse load—Part I: Analysis*, International Journal of Solids and Structures
- [14] Shen, H-S. (2009) *Functionally graded materials: nonlinear analysis of plates and shells*
- [15] Elishakoff, I., Pentaras, D., Gentilini, C. (2015) *Mechanics of Functionally Graded Material Structures*
- [16] Богдановић, Г. (2011) *Динамичко понашање композитних ламината* - докторска дисертација, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу
- [17] Чукановић, Д. (2017) *Статичка и динамичка анализа плоча од функционално градијентно распоређених материјала* - докторска дисертација, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука
- [18] Радаковић, А. (2015) *Примена смицајних деформационих теорија вишег реда у макомеханичкој анализи композитних материјала* - докторска дисертација, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука
- [19] Чукановић, Д., Радаковић А., Богдановић Г., Милановић М., Рецовић, Х., Драговић, Д. (2018) *New Shape Function for the Bending Analysis of Functionally Graded Plate*, Materials vol. 11 br. 12 str
- [20] Delale, F., Erdogan, F., (1983) *The crack problem for a nonhomogeneous plane*, ASME Journal of Applied Mechanics 50