

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Јасмина Д. Андрић

**Специјални модули за симулацију
композитних структура у NX Nastran-у**

мастер рад

Крагујевац, 2019.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Композитне конструкције

Број индекса: 412/2017

Јасмина Д. Андрић

**Специјални модули за симулацију
композитних структура у NX Nastran-у
мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Зорица Ђорђевић, ред. проф - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да опише основне карактеристике, особине и примену композитних материјала, укаже на специфичности анализе композитних конструкција у софтверском пакету NX Nastran и све то објасни кроз конкретне примере анализе конструкција израђених од ламинатних и сендвич композита.

Препоручена литература:

- [1] Јовановић М., Лазић В., Адамовић Д., Ратковић Н.: „Машински материјали“, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2003.
- [2] Јовановић М., Лазић В., Арсић Д.: „Наука о материјалима“, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2017.
- [3] Ђорђевић З.: „Композитне конструкције“, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2018.

Крагујевац, октобар 2019.

Ментор:

др Зорица Ђорђевић, ред. проф.

Резиме

У овом раду је извршено моделирање и структурна анализа плоче од ламинатних и сендвич композита у програму Femap v11 са NX Nastran-ом. У уводном делу рада је дат опис материјала који су данас у употреби, са освртом на композитне материјале. Такође, дат је историјат композитних материјала, као и њихова класификација, употреба, фабрикација и њихове основне предности. Након тога, извршена је симулација и урађени су конкретни примери са приказаним резултатима. На крају, извршено је поређење резултата анализе ламинатних и сендвич композита.

Кључне речи: композити, NX Nastran, анализа, деформације, напони.

Abstract

In this paper, is described modeling and structural analysis of a laminate and sandwich composite board in Femap v11 with NX Nastran. The introductory part of the paper provides a description of the materials in use today, with reference to composite materials. Also, the history of composite materials is given, as well as their classification, use, fabrication and their basic advantages. Subsequently, a simulation was performed and specific examples were made with the results presented. Finally, the results of the analysis of laminate and sandwich composites were compared.

Keywords: composites, NX Nastran, analysis, deformation, stress.

Садржај

1. Увод	1
2. Историјат композитних материјала	3
2.1. Покретање иновација првих композита	4
2.2. Већи раст коришћења композита	4
3. Композитни материјали	6
3.1. Композити ојачани честицама	8
3.2. Композити ојачани влакнима.....	9
3.3. Влакна.....	11
3.3.1. Оријентација влакана	11
3.3.2. Запремински удео влакана.....	12
3.3.3. Однос дужине и пречника влакана	12
3.3.4. Врсте влакана	12
3.4. Матрица.....	13
3.5. Ламинатни композити	13
3.6. Сендвич конструкције	14
3.7. Поређење ламинатних и сендвич конструкција.....	16
3.8. Фабрикација композита	16
3.9. Типови композитних материјала	20
3.9.1. Анизотропни материјали	20
3.9.2. Ортотропни материјали	20
3.9.3. Изотропни материјали.....	21
3.10. Предности композитних материјала	21
4. Моделирање композитних структура у NX Nastran-у	24
4.1. Симулација композитних структура	26
4.1.1. Избор алата за моделирање	26
5. Моделирање ламината у Femap-у са NX Nastran-ом	28
5.1. Важне карактеристике	28
5.2. Задавање карактеристика материјала.....	29
5.3. Задавање карактеристика елемената	30

5.4. Уређивање слојева.....	31
5.5. Додељивање углова материјалу.....	32
5.5.1. Дефинисање угла материјала на елементу.....	33
5.5.2. Дефинисање угла материјала у картици својства.....	35
5.6. Креирање геометрије, чворова и елемената	35
5.7. Задавање ограничења.....	37
5.8. Задавање оптерећења	39
5.9. Мерцовање	39
5.10. Покретање анализе	39
6. Моделирање сендвич композита у Femap-у са NX Nastran-ом	42
6.1. Креирање карактеристика материјала.....	42
6.2. Дефинисање слојева.....	43
6.3. Друге методе за моделирање сендвич композитних модела	44
7. Примери анализе композитних конструкција	46
7.1. Пример анализе ламинатне плоче	46
7.2. Пример анализе плоче од сендвич композита.....	49
7.2.1. Сендвич композит са језгром од AL 3003	49
7.2.2. Сендвич композит са језгром од HRN 10 Nomex-a (Aramid)	52
7.3. Упоредивање ламината са сендвич композитима	54
7.4. Упоредивање маса ламинатних и сендвич композита.....	55
8. Закључак	56
9. Литература	57

1. Увод

Материја је све оно што нас окружује, у коју спадају и материјали. Материјалима се може назвати све оно од чега су израђени предмети који су свуда око нас. Постоји велики број материјала и разноврсност њихових особина добија се комбинацијом 105 елемената периодног система, од којих су 76 метали [1].

Уопштено се под материјалима подразумевају полупроизводи који се користе за даљу прераду у готове производе. Постоји широк асортиман инжењерских (конструкционих) материјала који се највише употребљавају за израду различитих делова машина и уређаја, као што су: метали и металне легуре, полимери (пластика, еластомери), композити и керамике. Прве три групе представљају основне материјале, док се композити добијају комбинацијом основних материјала.

Природни композит је дрво које се састоји из целулозних влакана и природне везивне смоле (лигнина), а најстарији вештачки композит је бетон који се састоји од, у води замешаних песка, цемента и челичне арматуре [2].

Особине композитних материјала зависе од особина материјала од ког су добијени. Композитни материјали се одликују малом специфичном масом, добром чврстоћом, а неки од њих и отпорношћу према удару, постојаношћу на повишеним температурама и отпорношћу према дејству агресивних средина [3].

Савремене технологије користе материјале са комбинацијом својстава које не постоје код легура, полимера или керамичких материјала. Као пример могу да се наведу компоненте авионских конструкција, код којих материјал мора да има малу густину, велику чврстоћу, као и велику крутост. Управо оваква својства имају композитни материјали који се састоје од два или више материјала са различитим својствима у микро и/или макроскопској размери [4].

Композитни материјали попримају својства материјала другачија од њихових појединих компоненти. Ови материјали омогућавају флексибилност у дизајну, лаку израду делова сложене геометрије и имају добру хемијску отпорност. Због њихових добрих особина, очекује се већи раст употребе полимерних композита у грађевинској, аутомобилској и авио индустрији.

Као што је већ наглашено, полимерни композити се све више употребљавају у аутомобилској индустрији као замена за традиционалне материјале. Пад употребе композитних материјала забележен је 2008. и 2009. године што се може приписати економској кризи, али како она слаби, тако долази до опоравка ауто и авио индустрије и поновни раст потражње за овим материјалима [5].

Како би се смањила потрошња горива и самим тим очувала животна средина, аутомобилска индустрија је смањила масу возила за 35%, користећи композитне

материјале уместо челика. Такође, композитни материјали могу да се користе и као замена делова од алуминијума и инжењерске пластике.

Европа је лидер у коришћењу напредних угљен-епокси композита високих перформанси који се највише примењују у тркачким и луксузним аутомобилима, а посебан раст примене имају композити полипропилена. Очекује се да композит који као основу има полипропилен, буде главни материјал са највећим растом употребе у Европи [5].

Индустрија композитних материјала широм света стално улаже средства у циљу побољшања технологије израде композитних делова. Стога не чуде многе истраживачке активности у смислу развоја теоријских и нумеричких метода за анализу различитих типова композитних конструкцијских елемената. Посебно је значајно развити методе анализе поменутих конструкција још у фази пројектовања, као и у фази експлоатације у смислу упозорења на губитак носивости конструкције проузроковане губитком стабилности [6].

С обзиром да је примена композитних материјала у нашој земљи још увек ограниченог обима, за разлику од тренда у свету, треба стално истицати њихове предности и радити на развоју свести и неопходности њихове примене у инжењерству [6].

У овом раду је дат детаљан приказ поступка прорачуна композитних структура у програму Femap v11 са NX Nastran-ом као и конкретни примери анализе композитних конструкција израђених од ламинатних и сендвич композита.

2. Историјат композитних материјала

Идеја о композитним материјалима није нова, она датира још из давних времена када су своју примену имали углавном у грађевинарству [6].

Прва употреба композитних материјала датира још из 1500-их година п.н.е., када су стари Египћани као и досељеници из Месопотамије користили мешавину блата и сламе за стварање снажних и издржљивих објеката. Најчешће се слама користила као ојачање древним композитним производима, укључујући керамику и чамце. И природни материјали, као што је кост или бамбус, су у суштини истог карактера и познати су веома дуго.

Касније, 1200. године, Монголи су изумили први сложени лук од композита, који је приказан на слици 2.1. Комбинацијом дрвета, костију и „животињског лепка“, лукови су пресовани и омотани кором брезе. Ови лукови су били изузетно јаки и веома тачни. Композитни монголски лукови пружали су Џингис-Кану велику војну предност, а због композитне технологије, ово оружје је било најмоћније оружје на земљи све до проналаска барута [7].



Слика 2.1. Лук за стрелу од композита [8]

Савремено доба композита није почело све док научници нису развили пластику. До тада су природне смоле, које су добијене од биљака и животиња, биле једини извор лепљења и везива. У раним 1900-има развијала се пластика као што су винил, полистирен, фенол и полиестер. Ови нови синтетички материјали надмашили су смоле које потичу из природе.

Сама пластика није могла да обезбеди довољну јачину за употребу у конструкцијама, због тога је било потребно ојачање да се обезбеди јачина и крутост. Овенс Корнинг (*Owens Corning*) је 1935. године представио прво стаклено влакно, фиберглас. Фиберглас, у комбинацији са пластичним полимером ствара невероватно јаку структуру која је такође лагана. Ово је почетак индустрије полимера ојачаних влакнима какву данас познајемо [7].

2.1. Покретање иновација првих композита

Највећа достигнућа у композитним материјалима, настала су за време рата. Тек што су Монголи развили композитни лук, Други светски рат је индустрију извео из лабораторија у стварну производњу. Алтернативни лагани материјали били су потребни за примене у војним авионима. Инжењери су убрзо схватили друге предности композита, осим што су лагани и јаки. Откривено је да су композити од фибергласа добри за радио фреквенције, а материјал је убрзо прилагођен за употребу у склоништу електронске радарске опреме [7].

До краја Другог светског рата, мала индустрија композитних материјала била је у пуном јеку. С обзиром на то да је била све мања потражња за војним производима, неколицина иноватора композитних материјала је покушавала да уведе композите и на друга тржишта. Чамци и бродови су убрзо прављени од композита, а први комерцијални труп брода представљен је 1946. Тада је Брандт Голдсворти (*Brandt Goldsworthy*), развио нове производне процесе и производе. Заслужан је за бројна достигнућа, укључујући то што је био први који је од стаклопластике направио даску за сурфовање, што је довело до револуције спорта. Голдсворти је такође изумео производни процес познат као пултрусион. Данас, производи направљени применом овог поступка су: шине, ручке за алате, цеви, стреле, оклоп, подови воза, медицински уређаји и још много тога [7].

2.2. Већи раст коришћења композита

Индустрија композитних материјала је почела да сазрева 1970-их година. Развијене су боље пластичне смоле и побољшана ојачана влакна. ДуПонт (*DuPont*) је развио арамидна влакна позната као Кевлар, која су приказана на слици 2.2.1 и управо ова влакна имају велику издржљивост. У то време су такође развијена карбонска влакна која су од тада почела све више да замењују метал [7].



Слика 2.2.1. Кевлар [9]

Композитна индустрија се и даље развијала, али је велики део раста био фокусиран на обновљиве изворе енергије.

Лопатице код ветротурбине, приказане на слици 2.2.2, захтевају напредне композитне материјале, дизајн и производњу [7].

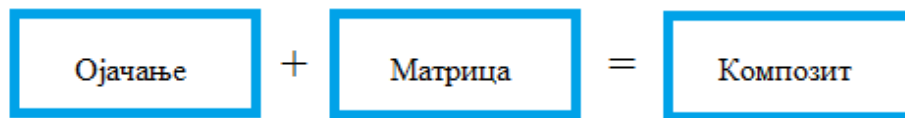


Слика 2.2.2. *Ветротурбина* [10]

За разлику од легура метала, својство композита је да сваки материјал задржава своја хемијска, физичка и механичка својства. Композитни материјали се састоје од арматуре и матрице [7].

3. Композитни материјали

Под називом композити подразумевају се материјали израђени од две компоненте или више компонената које се доста разликују како по хемијском саставу тако и по другим особинама. Композити се састоје из основе (матрице) и материјала за ојачавање (ојачивача), као што је приказано на слици 3.1 [1].



Слика 3.1. Шема формирања композитног материјала [11]

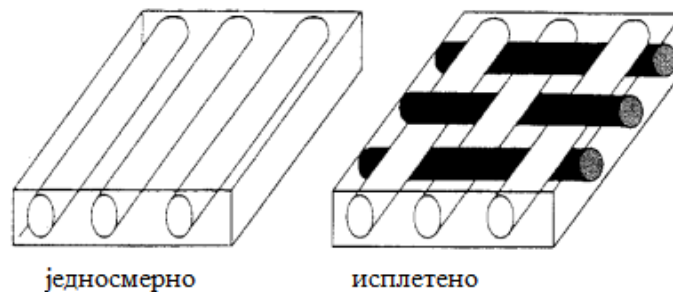
Примери ојачања, приказани на слици 3.2 су: стаклена влакна, карбонска влакна, органска влакна (кевлар-арамид и др.), влакна бора итд [6].



Слика 3.2. Карбонска, стаклена и арамидна влакна [12],[13]

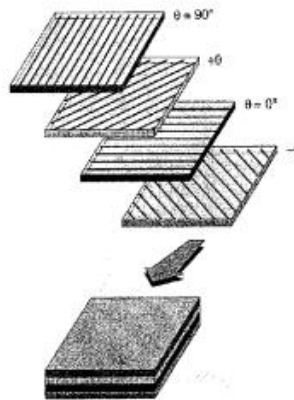
Примери матрица су: епокси, полиуретан, силикон карбид итд.

Лamina је танак слој композитног материјала и приказан је на слици 3.3. Дебљина ламине је обично између 0.1 до 1 mm [11].



Слика 3.3. Једносмерна и исплетена лamina [11]

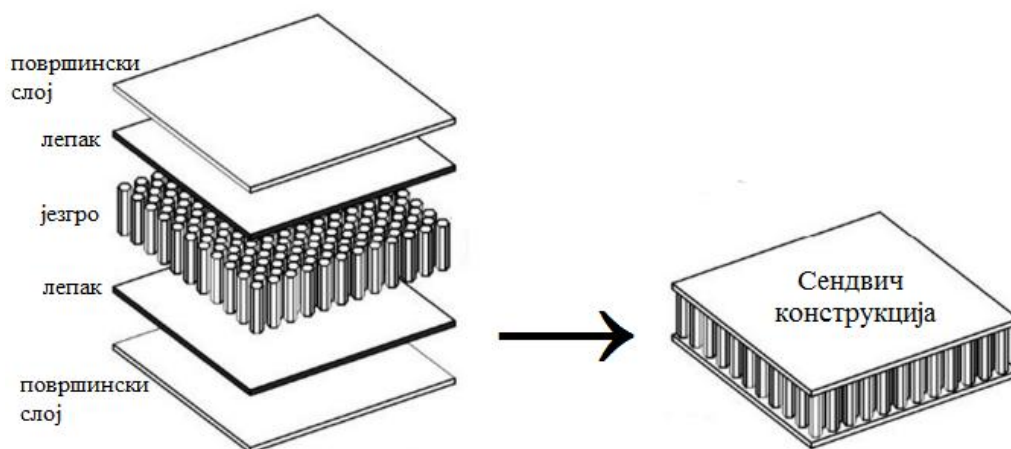
Ламинат се конструише склапањем више ламина и приказан је на слици 3.4. Градивни блок за ламинат је ламина [11].



Слика 3.4. Ламинат са приказаним ламинама [11]

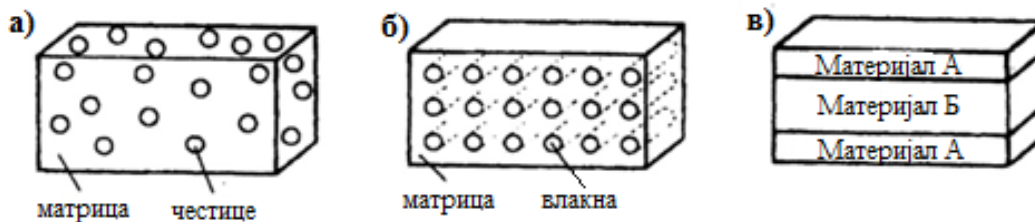
Сендвич конструкције су специфична врста композиних материјала који имају малу масу, а високе вредности специфичне чврстоће и специфичне крутости.

Сендвич конструкције се састоје из два танка површинска слоја и језгра, који су спојени лепком или неком другом техником спајања (слика 3.5). Лепак се може сматрати структурном компонентом композита [15].



Слика 3.5. Сендвич конструкција [14]

Композити могу бити: ојачани честицама, ојачани влакнима и ламинати (слика 3.6). Као пример композита ојачаног честицама, може се узети бетон који представља мешавину цемента и шљунка-песка. Композит ојачан влакнима је стаклопластика, јер је сачињена од стаклених влакана убачених у матрицу од полимера. Ламинатни композит је шперплоча која се састоји од унакрсно лепљених фурнира дрвета [4].



Слика 3.6. Композитни материјали: а) ојачани честицама, б) ојачани влакнима, в) ламинати [4]

Ако су честице распоређене равномерно, композити ојачани честицама су изотропни. Композити ојачани влакнима су по правилу анизотропни, док су ламинатни композити увек анизотропни [4].

3.1. Композити ојачани честицама

Композити ојачани честицама састоје се од матрице у коју су смештене честице у свим правцима, приближно истих димензија, али различитог облика. На својства ових композита знатно утичу величина и запремински удео честица. Како би се постигло неопходно ојачавање, потребно је да честице буду мање од $1\mu\text{m}$ у пречнику и равномерно распоређене у матрици. Запремински удео честица најчешће износи 30-40%. Из ове групе композита, најпознатији су кермети [4].

Кермети представљају комбинацију керамичких материјала и метала. Кермети који се најчешће употребљавају састоје се од тврдих честица керамике, волфрамкарбида (WC) или титанкарбида (TiC), који су распоређени у металној матрици, као што је кобалт. Најчешће се користи за израду алата за резање каљених челика. При великим брзинама резања, јављају се високе температуре, при којима тврде честице карбида обезбеђују добра режућа својства. Међутим, алати за резање који су направљени само од WC су изузетно крти. Како би се повећала жилавост, честице WC се пресују заједно са кобалтом у праху, а такође и жаре на температурама изнад температуре топљења кобалта, тако да растопљени кобалт обложи сваку честицу волфрамкарбида.

На слици 3.1.1 је приказана микроструктура волфрамкарбида са 20% кобалта. Кобалтна матрица је на слици приказана белим пољем, док су честице волфрамкарбида приказане тамним пољима. Извршено је увећање од сто пута [4].



Слика 3.1.1. *Микроструктура волфрамкарбида са 20% кобалта [4]*

3.2. Композити ојачани влакнима

Композити ојачани влакнима се добијају тако што се влакна убаце у меку матрицу. Матрица преноси силу са влакна на влакно, обезбеђује пластичност и жилавост и способност обликовања, док сама влакна преносе оптерећење. Влакна могу бити различитог распореда и дужине, што веома утиче на својства композита.

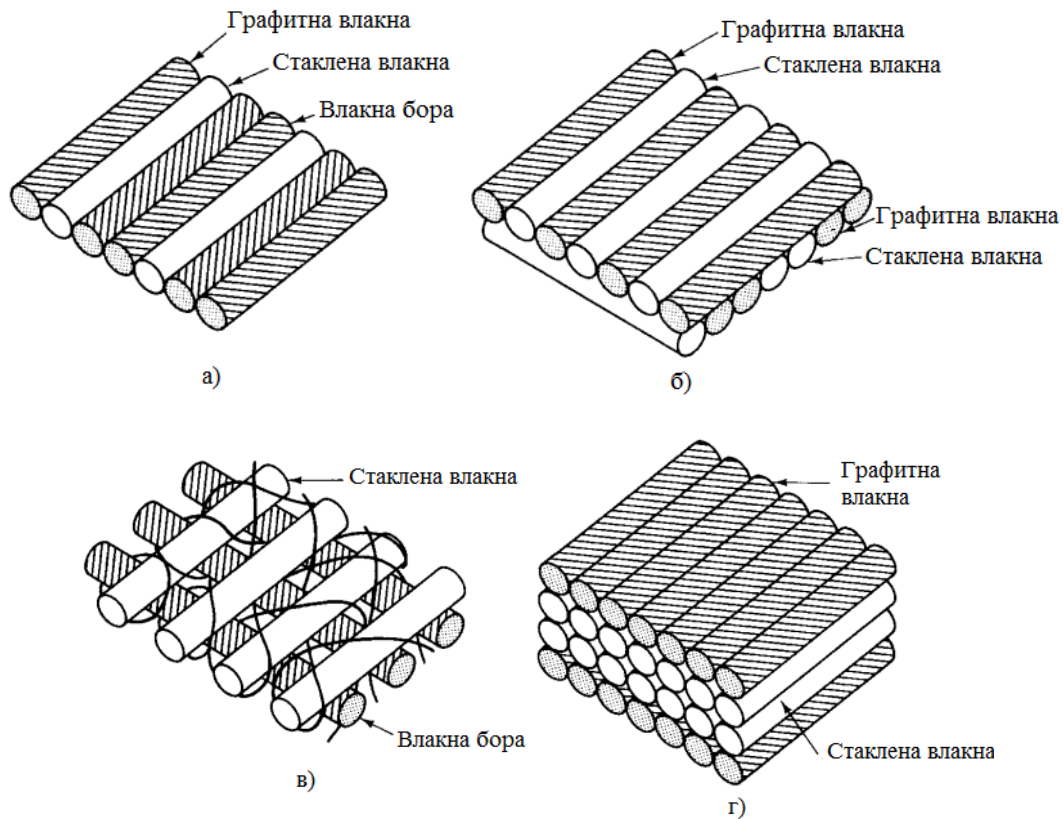
Чврстоћа композита ојачаних влакнима зависи од чврстоће влакана и њихове оријентације, као и од запреминског удела влакана у композиту, али и од односа дужине и пречника влакна [4].

Ако су познате особине компонената композита, могу се уз одређене претпоставке прорачунати механичке особине финалног производа. Конструктор у ствари прописује технолошке услове за производњу, бирајући одговарајући тип и размештај влакана, односно начин њиховог слагања у врсте, број врста као и узајамну оријентацију влакана, да би се добиле тражене механичке особине [1].

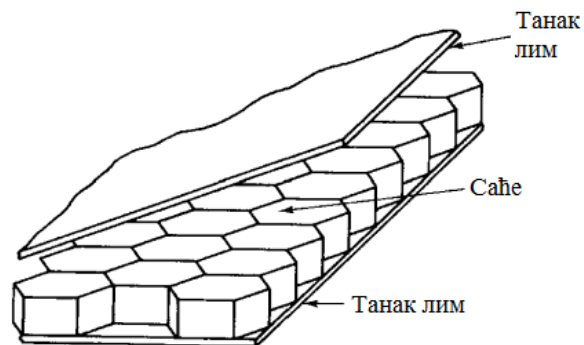
Влакна од истих или различитих материјала за ојачање се обично размештају према слици 3.2.1. Једнослојно распоређена влакна (слика 3.2.1, а) одговарају само за производе код којих се правац деловања спољних сила поклапа са оријентацијом влакана (на пример ојачани штапови). Композити се у већини случајева израђују као вишеслојни, тј. у облику ламината (слика 3.2.1, б,в,г), или као сендвич конструкција (слика 3.2.2). Међусобно, као и између слојева, влакна се повезују термореактивним смолама које очвршћивањем образују матрицу [1].

Неки слојеви могу бити комбинације два или више материјала (хибридни композити). Структура у облику сендвича има језгро у облику пчелињег саћа (слика 3.2.2). Облога саћа може бити од Аl-лима или неких других материјала, а само саће од стаклених влакана, арамидних влакана и папира, повезаних епокси смолом. Кад се ћелије испуне стакленом вуном или пенастим полиуретаном добијају се облоге за термичку и антизвучну изолацију. Језгро је смештено између лимова од танког материјала велике јачине. Овако комбинована структура има око 4% већу јачину и крутост него челични I-профил и око 2,5

пута већу јачину од челика пуног правоугаоног попречног пресека. Танки лимови који облажу саћасту конструкцију, могу бити од различитих материјала, па и од бора. Језгро мора да буде лако и довољно круто да спречи деформације при радном деловању спољних сила или момената [1].



Слика 3.2.1. Распоред влакана за ојачавање: а) једнослојно слагање, б) попречно слагање (ламинат), в) слагање преплетањем, г) селективни размештај [1]



Слика 3.2.2. Сендвич структура композита [1]

3.3. Влакна

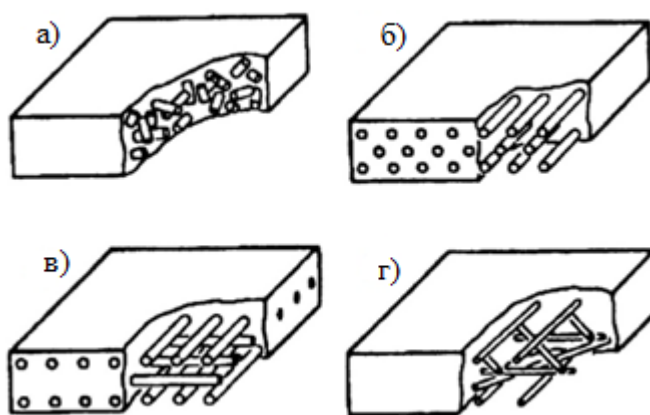
Влакна могу да се дефинишу као твеврине код којих је дужина много већа од пречника и то под условом да је пречник мањи од 1 mm. Уобичајени пречници влакана су 3 – 30 μm . С обзиром да се повећањем преноса оптерећења са матрице на влакна, повећава чврстоћа композита, помоћу врло малих пречника влакана, могу да се постигну велике чврстоће композитних материјала. Влакна би по правилу требало имати високу тачку топљења [15].

Највећи модул еластичности имају материјали ниског атомског броја као што су угљеник и бор. Ова два материјала такође имају високу чврстоћу и тачку топљења. Влакна за ојачање морају имати врло велики модул еластичности и затезну чврстоћу него матрица задовољавајуће температуре постојаности и израженог еластичног понашања приликом оптерећивања. Како би се побољшале функције влакана, врши се површинска обрада помоћу заштитног премаза, затим хемијска и физичка обрада за побољшање адхезије, тј. пријањања између матрице и влакана [15].

3.3.1. Оријентација влакана

Композити који су са произвољном оријентацијом влакана, понашају се изотропно, али је мали ефекат ојачавања. Композити са влакнима у једном правцу имају оптималне вредности чврстоће и крутости ако оптерећење делује у правцу валкана, али су наведена својства лоша ако је оптерећење управно на правац влакана. Да би се постигла добра својства у више правца, користе се слојеви са различитом оријентацијом (ткањем) влакана [4].

На слици 3.3.1.1 су приказана влакна, под а) кратка, произвољно оријентисана, б) дуга, у једном правцу, в) дуга, у два међусобно управна правца, г) дуга, испреплетена, произвољно оријентисана.



Слика 3.3.1.1. Оријентација влакана [4]

3.3.2. Запремински удео влакана

Када се повећева запремински удео влакана у композиту, расту његова чврстоћа и крутост. Горња граница запреминског удела влакана је око 80% [4].

3.3.3. Однос дужине и пречника влакана

Димензије влакна могу да се дефинишу односом дужине l и пречника d . Својства композитних материјала се побољшавају са повећањем односа l / d . Влакна која имају већу дужину ($l / d = 200-500$) су боља, зато што крајеви сваког влакна преносе мањи део оптерећења него остатак влакна. Дуга влакна је веома тешко произвести и укомпоновати у матрицу, док се кратка влакна ($l / d = 20-50$) веома лако спајају са матрицом, али дају релативно слабо ојачавање [4].

3.3.4. Врсте влакана

Од влакана се захтева висока вредност специфичне чврстоће (количник чврстоће и густине) и специфичне крутости (количник модула еластичности и густине) [4].

У влакнима ојачаним композитним материјалима, влакна могу да буду поликристална и аморфна, у облику: ровинга (благо увијене нити), ужета (уплетене нити), тканине (атлас ткање, сатенско или нека друга врста ткања) или мата. За производњу влакана користе се стакло, угљеник, бор и арамид.

Стаклена влакна настају тако што се растопљено стакло извлачи кроз мале отворе у алату од платине, и то од две врсте стакла: Е-стакла (52-56% SiO_2 , 12-16% Al_2O_3 , 16-25% CaO , 8-13% B_2O_3) и S-стакла (65% SiO_2 , 25% Al_2O_3 , 10% MgO). Е-стакло има добру затезну чврстоћу и модул еластичности, а највише се користи за израду других влакана. S-стакло има већу вредност специфичне чврстоће и крутости од Е-стакла, али је знатно скупље. Стаклена влакна су јефтинија од других влакана [4].

Угљенична влакна се добијају хемијским разлагањем других влакана полиакрилнитрида (PAN) на повишеним температурама. Процес добијања угљеничних влакана се одвија у две или три фазе: фаза стабилизације, фаза карбонзације и фаза графитизације. Фаза графитизације се користи само ако се захтева висока вредност модула еластичности. Угљенична влакна садрже око 93-95% C, а графитна влакна 99% C [4].

Арамидна влакна се добијају од ароматичних полиамидних полимера, ојачаних бензеловним прстеном (комерцијални назив “Кевлар”). Ова влакна имају највећу специфичну чврстоћу и крутост, због мале густине, али се њихова својства на температури вишој од 1000°C знатно смањују [4].

Борна влакна се добијају напаривањем бора на влакна волфрама, пречника 0,01 mm. С обзиром на то да је основа ових влакана волфрам, она имају велику чврстоћу и крутост, отпорна су према високим температурама, али им је густина већа од других влакана [4].

3.4. Матрица

Матрица код композита ојачаних влакнима има неколико функција. Прва функција јесте да повезује влакна међусобно и делује као посредник који спољна оптерећења преноси и распоређује на влакна, док само мали део оптерећења прима матрица. Друга функција матрице јесте да штити влакна од механичких оштећења или хемијских утицаја средине. У суштини, матрица служи томе да раздвоји влакна и тиме спречи ширење кртог лома од влакна до влакна. Другим речима, матрица служи као баријера ширењу прслина [15].

За израду матрица могу да се користе метали (Al, Mg, Ti, Cu), полимери (епоксиди, полиестри, полиетарсулфан, полиамиди и силикони) и керамика (SiC и Al₂O₃). Највише се користе епоксидне смоле, а затим полиестер из разлога што је знатно јефтинији од епоксидних смола [4].

Композити ојачани влакнима највише се примењују за израду компонената авиона, ракета и хеликоптера, затим заштитних шлемова, делова каросерије аутомобила, лиснатих опруга, цеви, посуда под притиском, бродских корита и спортске опреме [4].

3.5. Ламинатни композити

Ламинатни композити су сви они композити који се састоје од танких превлака, дебљих заштитних површина, биметала, ослојених метала, ламината и композита ојачаних влакнима у облику танких слојева [4].

Ламинати су слојеви материјала слагани и међусобно повезани органским лепком. Лепљени ламинати имају малу масу, добру ударну жилавост, корозиону отпорост и излоациона својства. Шперплоча је ламинат који је сачињен од непарног броја фурнира сложених тако да дрвена влакна фурнира буду оријентисана под међусобно правим углом.

Сигурносна стакла су такође ламинати код којих су два стакла спојена пластичним лепком (поливинилбитурил). Пластични лепак између два стакла спречава да се приликом разбијања разлете делови разбијеног стакла [4].

Превасходна намена:

- Повећање корозионе и абразивне отпорности основног материјала и
- Повећање чврстоће влакнасто ојачаних композитних материјала у више равни [14].

На основу правила о мешању, својства ламинатних композитних материјала, као што су густина, топлотна и електрична проводност и модул еластичности, могу се прорачунати са малом грешком [14].

3.6. Сендвич конструкције

Сендвич конструкције се састоје од танких спољних слојева и лаганог средњег дела који служи за попуњавање. Материјал за попуњавање и спољни слојеви не морају бити чврсти нити крути, али ће сендвич конструкција имати оба ова својства. Сендвич конструкције садрже сложене тродимензионалне податке – језгра (vlakна су једнодимензионална, а слојеви дводимензионални), намењена пре свега да повећавају крутост и чврстоћу при савојним и смичућим попречним оптерећењима, а такође и локалним оптерећењима на притисак [6].

- **Саће сендвич конструкције**

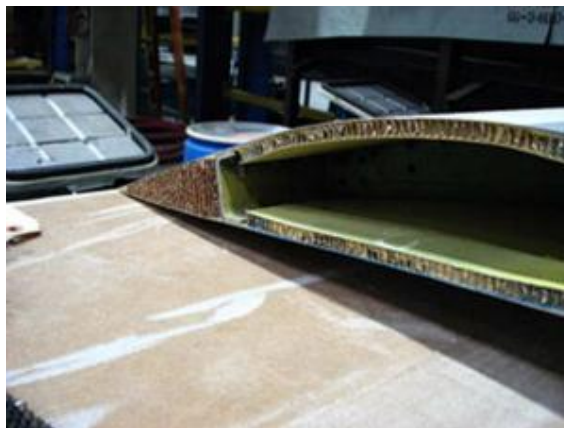
Материјал саћа (испуна) и материјал спољних површина, немају појединачно велику вредност чврстоће и крутости, али сендвич конструкција-комполит поседује високе вредности оба својства.

Код сендвич конструкције спољне површине служе да преносе највећи део оптерећења и напоне услед напрезања на савијање. Материјали спољних површина могу бити: легуре алуминијума, титан, нерђајући челици, легуре никла, влакнасто ојачани полимери и шпер плоче [14].

Саће сендвич конструкција има две функције:

- Да раздвоји спољне плоче и појаву деформације управне на раван плоча,
- Да обезбеди одређен степен чврстоће на смицање дуж равни које су управне на плоче [14].

На слици 3.6.1 је приказан један сендвич панел који се користи као зидна и кровна изолација [14].

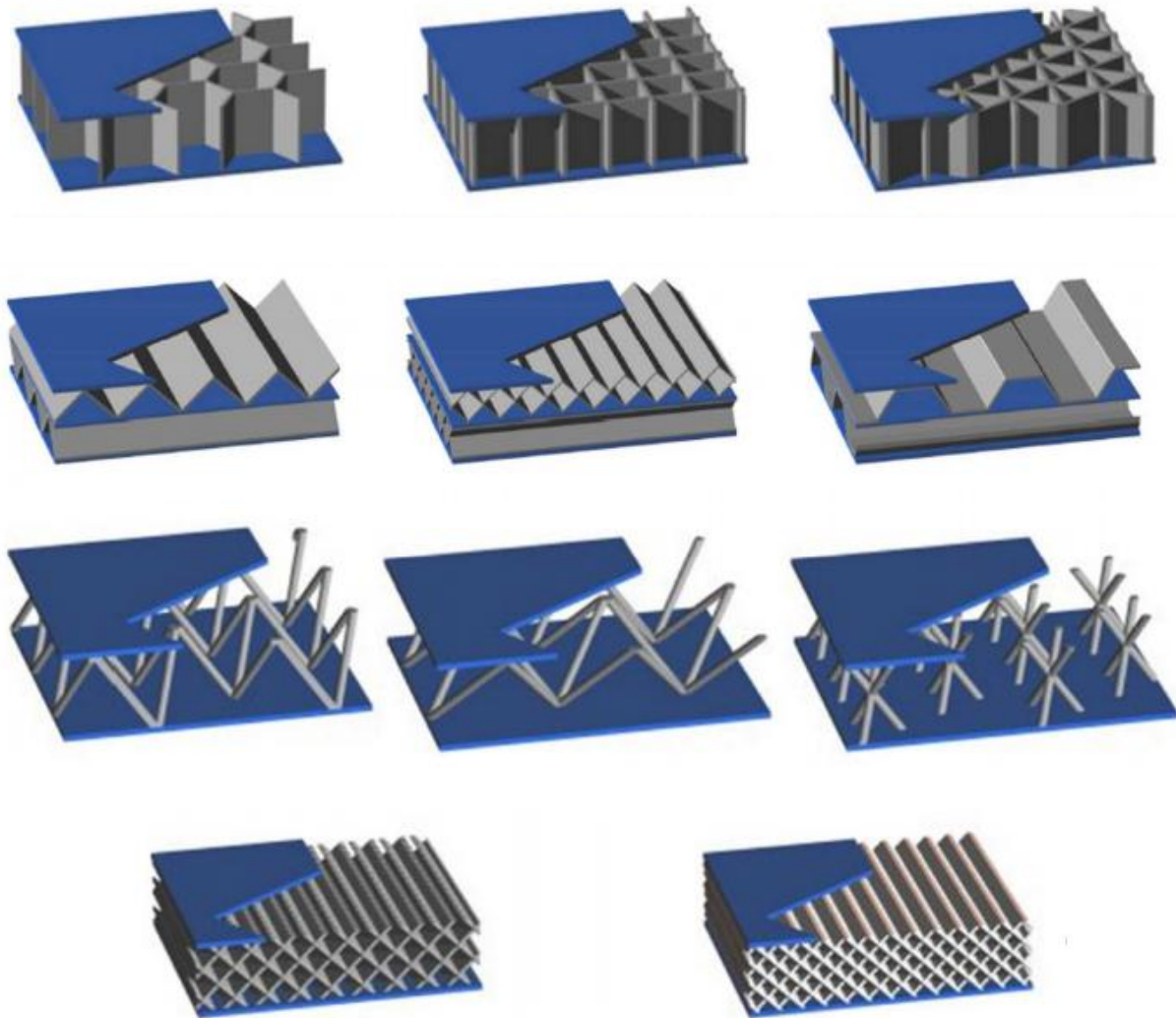


Слика 3.6.1 Сендвич панел [14]

Материјали саћа могу бити: експандирани полимери, синтетичка гума и балза (врста лаког дрвета) [14].

Још једна доста распрострањена испуна која се користи у сендвич конструкцијама има облик саћа. То је танка фолија обликована у затворене ћелије хексагоналног, квадратног, правоугаоног и синусоидног облика са осом оријентисаном управно на спољне површине.

На слици 3.6.2 су приказани облици саћа код сендвич конструкција [14].



Слика 3.6.2. Облици саћа код сендвич конструкција [14]

3.7. Поређење ламинатних и сендвич конструкција

Уколико се изврши поређење ламинатних и сендвич конструкција доћи ће до следећих предности и недостатака.

Предности ламинатних конструкција:

- За стварање оштећења потребна је велика енергија удара,
- Обезбеђују добру херметичност,
- Ниски трошкови производње.

Недостаци ламинатних конструкција:

- За побољшану отпорност на увијање потребна су боља структурна својства,
- Тежи су у поређењу са сендвич конструкцијама [6].

Предности сендвич конструкција:

- Мала оштећења на површинским и подповршинским слојевима се лако уочавају,
- Добра отпорност на увијање,
- Најповољнији однос чврстоће и масе.

Недостаци сендвич конструкција:

- Оштећења настају и при малим ударима,
- Могуће истицање течности након оштећења,
- Високи трошкови производње [6].

3.8. Фабрикација композита

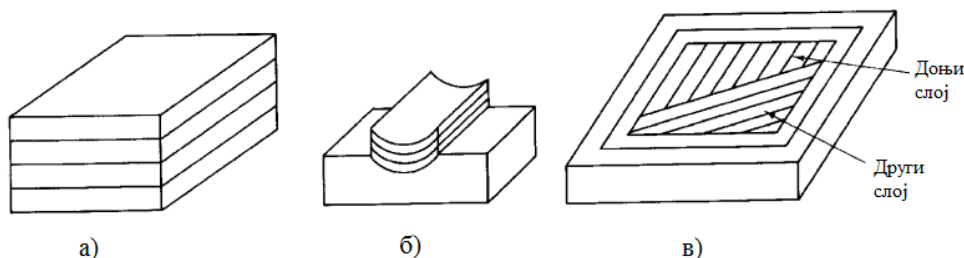
Производња делова од композита може се извести:

- пресовањем,
- ињекционим ливењем,
- вучењем-екструзијом,
- намотавањем филамената [1].

Поступак пресовања се односи на плочасте облике, док се ињекционо ливење односи на носеће делове конструкције или сендвич конструкције. Вучење-екструзија се користи за

израду производа константног попречног пресека, а намотавање филамената се примењује при изради округлих делова, као нпр. цеви [1].

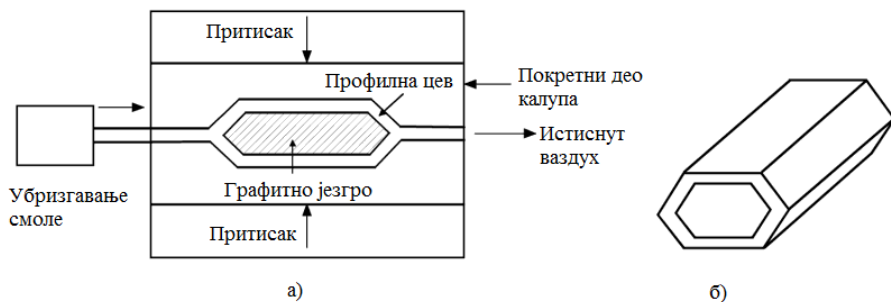
Процес пресовања захтева претходну импрегнацију ојачивача неким везивом, а затим паковање у калупну шупљину, тј. реплику (одраз) финалног продукта. Овако спаковани слојеви смолом импрегнираних ојачивача подвргавају се дејству притиска и топлоте. У калупу се могу обликовати раван, олучаст или укрштен уложак, као што је приказано на слици 3.8.1 [1].



Слика 3.8.1. Облици уложака после калуповања: а) раван, б) олучаст, в) укрштен [1]

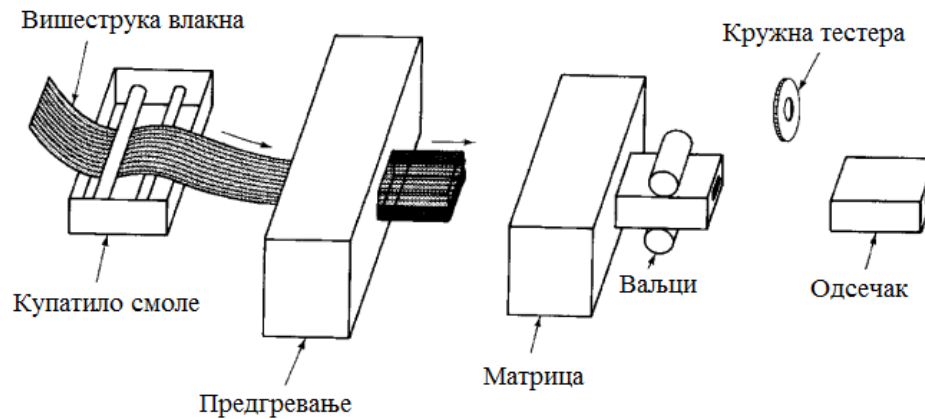
У процесу пресовања на повишеној температури одвија се полимеризација термореактивне смоле, па се добија матрица дуропласта која повезује влакна. Композит је могуће и ручно обликовати у калупу. Потребно је да се зидови калупа обложе получврстим премазом полиестера, а затим да се убаци ојачивач од тканине стаклених влакана. Матрична смола измешана са катализатором уводи се у калуп било ливењем или премазивањем четком. Када су потребни дебљи зидови, додају се стаклене тканине са лабавом основом. На овај начин се израђују трупови чамаца, резервоари за гориво, заштитне облоге мотора итд [1].

Ињекционо ливење смола изводи се у дводелном калупу пошто се у њега претходно поставе одговарајући материјал за ојачавање и затим повежу горњи и доњи део калупа (слика 3.8.2). Шупљина у профилној цеви, која се израђује ливењем, добија се графитним језгром које се после очвршћивања композита, лако разбија и истреса из финалног производа (профилне цеви) [1].



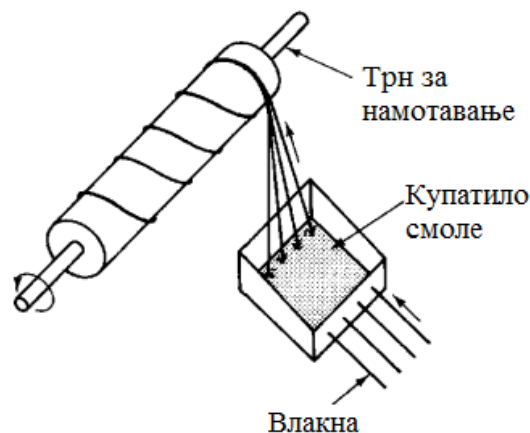
Слика 3.8.2. Ињекционо ливење профилне цеви (а) и финални производ (б) [1]

Вучење-екструзија започиње провлачењем паралелних влакана кроз купатило смоле и даље кроз комору за загревање и најзад кроз матрицу (калуп), приказано на слици 3.8.3. Екструдирани профили секу се на одређену дужину. На овај се начин производе шипке, олуци, цеви и профилне цеви [1].



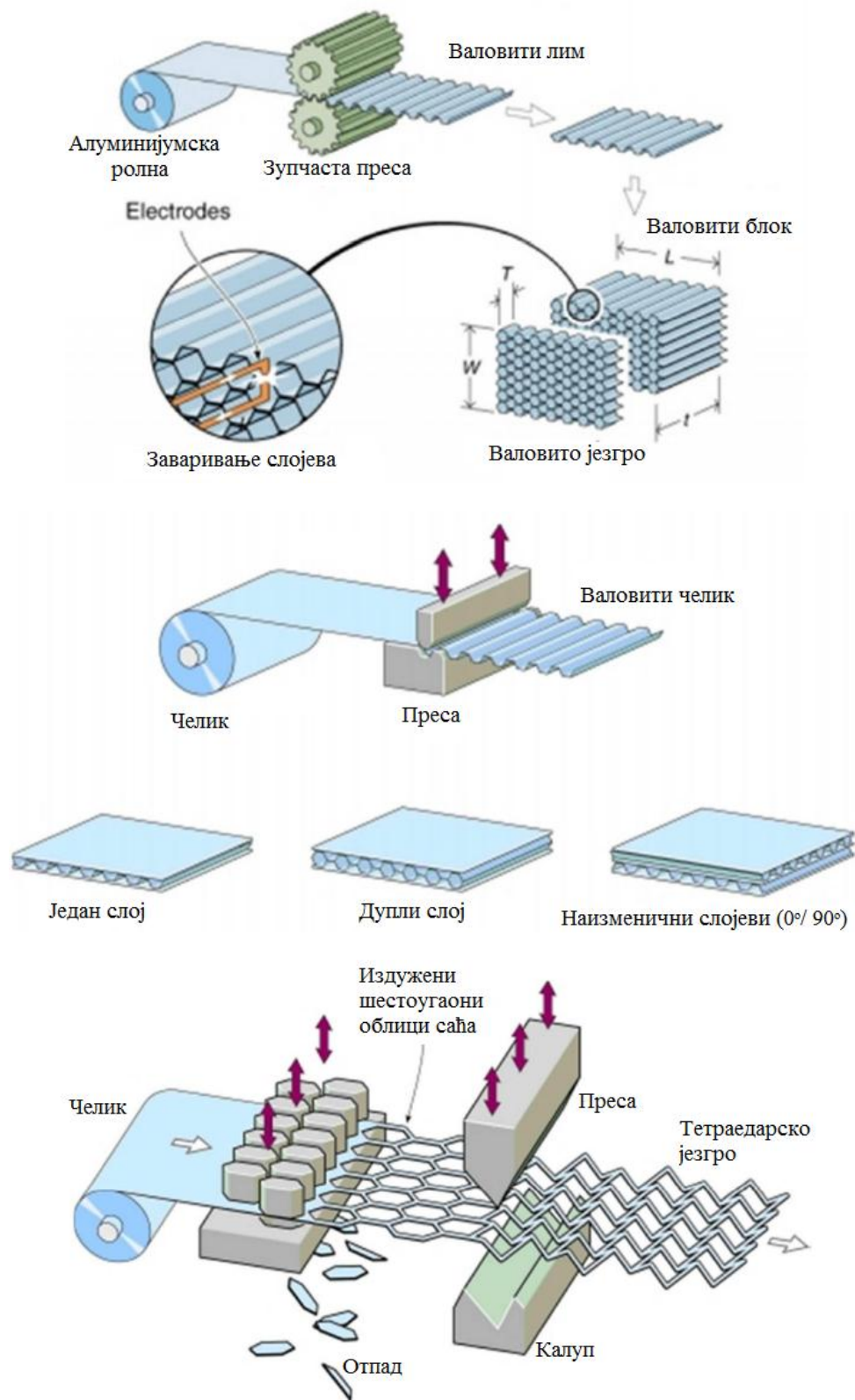
Слика 3.8.3. Вучење-екструзија композита [1]

Намотавање филамената састоји се из три фазе: провлачења танких нити ојачивача кроз купатило смоле, изласка нити и упредања и на крају намотавања на ваљак (слика 3.8.4). Све ове фазе одвијају се континуално, тј. непрекидним довођењем нити, све док се не намота довољно слојева. После очвршћивања везивне смоле, било на собној или повишеној температури (зависно од врсте смоле), вретено се извлачи па остаје шупљи цилиндар. Овако се праве посуде за хемијске процесе, судови под притиском, облоге ракетних мотора итд [1].



Слика 3.8.4. Израда цеви од композита [1]

На слици 3.8.5. је приказан начин производње саћа код сендвич констукција.



Слика 3.8.5. Начин производње саћа [14]

3.9. Типови композитних материјала

У инжењерству, материјали могу бити класификовани као анизотропни, ортотропни и изотропни. Анизотропни материјал има уопштену формулацију, док друга два произилазе из неких поједностављења [6].

3.9.1. Анизотропни материјали

Анизотропни материјали немају раван материјалне симетрије. Примери анизотропних материјала су композити са кратким влакнима. Број константи који је потребан да опише анизотропне материјале је двадесет један. Матрица крутости, која је приказана изразом 1.1, је симетрична у односу на главну дијагоналу. Сходно томе, сви чланови на главној дијагоналии чланови изнад/испод главне дијагонале, морају бити дефинисани у материјалном моделу [11].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.1)$$

3.9.2. Ортотропни материјали

Ортотропни материјали имају три равни материјалне симетрије. Примери ортотропних материјала су: дрво, једносмерна ламина итд. Број константи који је потребан да опише ортотропне материјале је девет. Матрица крутости је симетрична и сви чланови на главној дијагоналии и чланови изнад/испод главне дијагонале, морају бити дефинисани. Међутим, комерцијални софтвер за анализу применом методе коначних елемената допушта дефинисање модула еластичности (E_1, E_2, E_3), модула смицања (G_{12}, G_{13}, G_{23}) и Поасоновог коефицијента ($\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$), уместо израчунавања сваког елемента матрице крутости (приказана изразом 1.2). Софтвер за анализу методом коначних елемената, може интерно проценити ове услове чврстоће [11].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.2)$$

3.9.3. Изотропни материјали

У случају изотропних материјала, све области су области симетрије. Пример изотропних материјала су челик, алуминијум итд. Постоје само две независне константе (C_{11} и C_{12}) за изотропне материјале. Слично ортотропним материјалама, може се дефинисати модул еластичности E и Поасонов коефицијент ν , уместо израчунавања елемента матрице крутости (приказано изразом 1.3) [11].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.3)$$

3.10. Предности композитних материјала

Композитни материјали се састоје од низа предности, које су описане у наставку.

Мала маса - Композити су мале масе у поређењу са већином метала и дрвета. Њихова лакоћа је важна, на пример, у аутомобилима и авионима, где мања маса значи бољу ефикасност горива. Инжењери који пројектују авионе увелико су заокупљени масом, јер смањење масе смањује количину горива која му је потребна и повећава брзину коју може да достигне. Неки модерни авиони направљени су са више композита него метала, укључујући нови „Boeing 787“ [7].

Велика чврстоћа - Композити могу бити дизајнирани тако да буду далеко јачи од алуминијума или челика. Метали су подједнако снажни у свим правцима, али композити могу да се конструишу и дизајнирају тако да буду јаки у одређеном смеру.

Отпорност на корозију - Композити могу одолети временским неприликама и јаким хемикалијама. Композити су добар избор за руковање или складиштење хемикалија. На отвореном, они подносе лоше време и велике промене температуре.

Апсорпција удара - Композити се могу направити тако да апсорбују ударце - на пример, да буду отпорни на метке или експлозију. Због овог својства, композити се користе у непробојним прслуцима и плочама, као и за заштиту авиона, зграда и војних возила од експлозија [7].

Флексибилност дизајна – Од композита се могу направити компликовани облици лакше него од већине других материјала. То даје дизајнерима слободу да стварају готово било који облик или форму. На пример, већина бродова данас је направљена од композита од фибергласа јер се ови материјали могу лако обликовати у сложене облике, који побољшавају дизајн брода, а смањују трошкове. Површина композита такође се може обликовати тако да има било који површински слој или текстуру, од глатке до хрпаве.

Смањење броја делова - Један комад направљен од композитних материјала може заменити цео склоп металних делова. Смањење броја делова у машини или конструкцији штеди време и смањује потребно одржавање током радног века производа [7].

Стабилност димензија - Композити задржавају облик и величину када су врући или хладни, влажни или суви. С друге стране, дрво се рашири и скупља са променом влажности. Композити могу бити бољи избор у ситуацијама које захтевају налегања која не варирају. На пример, користе се у крилима авиона, тако да се облик и величина крила не мењају како авион добија или губи висину.

Непроводност - Композити су непроводни, што значи да не спроводе електричну енергију. Ова особина их чини погодним за предмете попут електричних стубова и електронских склопова. Ако је потребна електрична проводљивост, могуће је направити неке композите проводним [7].

Немагнетни композити - Композити не садрже метале, према томе, они нису магнетни. Могу се користити око осетљиве електронске опреме. Композити се користе како у кућишту опреме, тако и споља. Поред тога, конструкција болничке собе користи композите да ојача бетонске зидове и подове у болници.

Невидљиви за радар – Својство да радарски сигнали пролазе право кроз композите, чини их идеалним материјалима за употребу било где са радарском опремом, било на земљи или у ваздуху. Композити играју кључну улогу у авионима, као што је тајни Бомбардер Б-2 америчког ратног ваздухопловства, који је скоро невидљив за радар.

Мала топлотна проводљивост - Композити су добри изолатори - не подносе лако топлоту или хладноћу. Користе се у зградама за врата, плоче и прозоре код којих је потребна додатна заштита од јаких временских неприлика.

Изддржљивост - Конструкције направљене од композита имају дуг животни век и потребно им је мало одржавање. Не зна се тачно колико дуго композити могу да трају. Многи композити су у функцији око пола века [7].

Утврђена је широка скала примене композита што чини кључну улогу у проширењу тржишта. Међутим, упркос бројним наведеним предностима, композити још увек не налазе тако велику примену у индустрији. Највећи разлог јесте још увек висока цена сировина – вештачки створених материјала [6].

С обзиром на то да је примена композитних материјала у нашој земљи још увек ограниченог обима, за разлику од тренда у свету, треба стално истицати њихове предности и радити на развоју свести о неопходности њихове примене у инжењерству [6].

4. Моделирање композитних структура у NX Nastran-у

До развоја ефикасних прорачунских метода, довела је потреба за редукијом трошкова још у фази пројектовања композитних конструкција. Дуги низ година инжењери су спроводили бројне напоре како би оптимизовали перформансе композитних материјала. За анализу су се, у почетку, углавном користиле експерименталне методе за чије је спровођење било потребно време, а исто тако биле су јако скупе [6].

Нумеричке симулације повезане са експериментима обезбедиле су, уз знатно мање трошкове, детаљну процену карактеристика композитних конструкција. Такође, нумеричке симулације пружају увид у понашање материјала и механизме отказа, насталих у конструкцијама услед оптерећења. Са софистицираним техникама нумеричке симулације и моћним рачунарима, какви су данас, без обзира на сложеност конструкције или чињеницу да ли се ради о статичком или динамичком оптерећењу до резултата се долази веома брзо. Данас се за анализу композитних конструкција користи велики број софтверских пакета, а међу њима највећу примену имају: ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS, NX Nastran и други [6].

За нумеричку симулацију композитних структура развијени су различити 2D или 3D модели. Сваки од њих има одговарајуће карактеристике, тачност и примену у одређеним доменима [6].

NX Nastran је моћан софтверски пакет *Finite Element Analysis* (FEA) који се користи за решавање линеарних и нелинеарних модела за структурне и топлотне системе. Софтвер нуди могућности за разне врсте анализа, а такође садржи добар програм за моделирање [16].

Програм Femap спада у напредни инжењерски симулациони пакет (CAE) и служи за креирање мреже коначних елемената сложених техничких производа и састава, као и графичко приказивање резултата анализе. Femap може да се користи без обзира на CAD програм у којем се моделира. Овај програм има уграђене транслаторе за преузимање геометрије из свих водећих CAD програма, као што су NX, CATIA, SolidWorks, Autodesk Inventor, AutoCAD итд [17].

Метода коначних елемената омогућава инжењерима да практично моделирају компоненте, склопове или системе.

NX Nastran име дугује свом историјском развоју. Прва верзија Nastran-а је настала давних седамдесетих година прошлог века, а направила ју је NASA за потребе дизајна космичких ракета Saturn V, па име долази од NAsa STRuctural ANalysis. Програм је комерцијализован, а данас се користи као NX Nastran. FEMAP v11 са NX Nastran-ом користи Linear static, Normal modes, Buckling, Heat transfer, Basic nonlinear, Spot weld и

Dynamic response, док се за сложеније проблеме докупљују солвери Advanced nonlinear, Superelements, Direct matrix abstraction programming (DMAP) и Design optimization [17].

Када се покрене програм Femap, у горњем делу екрана се појављују различите опције и алати. На левој ивици екрана је тзв. трака ресурса. Садржи картице назване „навигатори“ за сваки ниво пројекта на којем се ради. Унутар табеле се налазе информације за сваку извршену команду у програму.

На пример, ако је део моделиран у NX-у, део навигатор даје кориснику хронолошки списак геометријских карактеристика, познатих као стабло модела, креиране приликом израде дела. Помоћу овога, корисник може боље разумети како промена може утицати на друге геометрије у делу; све геометрије створене након измене геометрије подложне су грешкама [17].

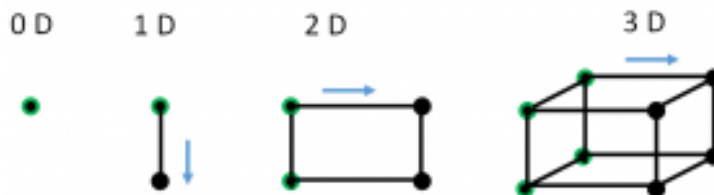
Без обзира на ком нивоу пројекта корисник ради, навигатор је неопходан да би се постигао напредак. Трака ресурса такође садржи и друге корисне картице, од којих су најзначајније картица улога и историја. Картица улога одређује степен сложености икона алата које корисник види на читавом екрану. Важно је напоменути да су функције још увек доступне за употребу, тако да је картица улога само покушај да се алатима који су најпотребнији корисницима учини што доступнијим. Картица „Историја“ прати све датотеке на којима је корисник обављао рад, хронолошким редоследом, у последње 3 недеље и касније [16].

Дуж горње ивице екрана налази се трака са алатима за брзи приступ. Алатна трака за брзи приступ садржи уобичајене опције датотека као што су чување, поништавање, недавно отворени делови итд.

Након што се измоделира део или склоп, потребно је поставити одређене услове, тј. ограничења и оптерећења, који могу довести до лома тог дела. То је проблем који постоји, за који анализа може да помогне у проналажењу равнотеже између ризика и употребе материјала, другим речима, тражи се инжењерско решење [16].

Затим се модел припрема за решавање применом ситуације и креирањем мреже. Ситуација укључује сва оптерећења, ограничења, својства материјала у деловима или склопу и било које друге посебне услове. Мрежа је низ „чворова“ који су распоређени по моделу. Чворови су тачке у којима ће се проблем решити. Сваки чвор повезан је како би створио модел који се састоји од низа „елемената“, на којима ће се приказати резултати. Елемент може приказати одређену комбинацију резултата повезаних са сваким од његових чворова [16].

Мрежа може да садржи елементе који су 0D (тачка), 1D (линија), 2D (раван) или 3D (чврсто тело), приказано на слици 4.1.



Слика 4.1. 0D, 1D, 2D, 3D елементи [18]

3D мрежа ће садржати више чворова него 2D мреже, која се користи за представљање чврстог модела, и на тај начин има више чворова за решавање. NX поседује могућност која се назива мрежном контролом, што омогућава кориснику да одабере функцију геометрије и прилагоди квалитет мреже унутар те геометрије. Корисник може одабрати ивицу, површину или тело и подесити број елемената или величину елемената за избор [16].

4.1. Симулација композитних структура

Сама природа композитних материјала (више слојева са различитим физичким и хемијским особинама, различитом оријентацијом влакана у појединим слојевима и различитом дебљином слојева) чини их специфичним за моделирање и анализу. При спровођењу симулације композитних материјала, потребно је прецизно дефинисати све ове компоненте. Тако један модел може да захтева на десетине, па и више, слојева различитих карактеристика [6].

Анализа лома композитних структура се такође разликује од анализе конвенционалних материјала. Када се ради анализа композитних материјала, дизајнер анализира у ком слоју је, од десетине, дошло до појаве лома. Анализе су показале да у случају оштећења једног слоја, композитна конструкција углавном може без проблема да настави са радом. Задатак аналитичара јесте да открије тренутак када ће доћи до отказа. Дobar симулациони модел открива који ће слој први отказати при одређеним околностима [6].

4.1.1. Избор алата за моделирање

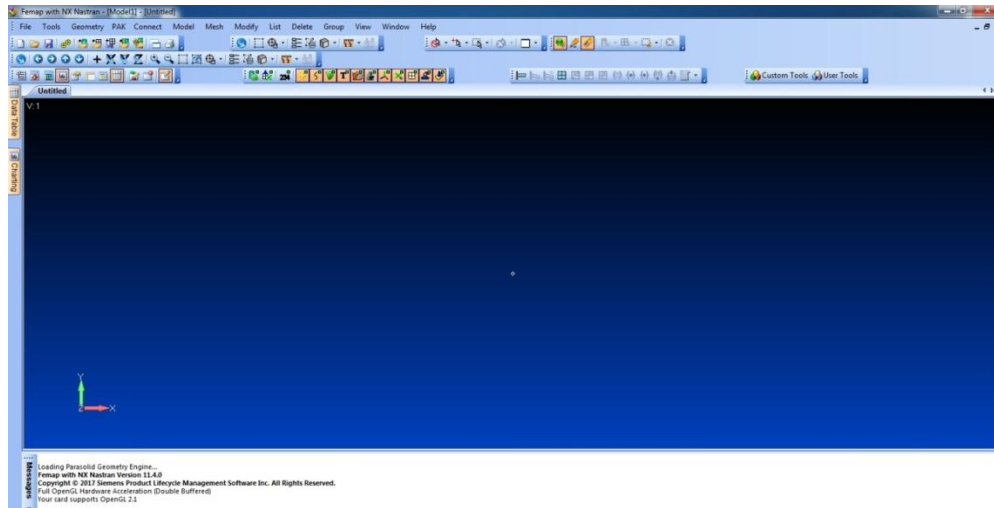
Избором одговарајућег симулационог алата за моделирање композитних структура може се знатно побољшати квалитет и перформансе производа и смањити потреба за физичким прототиповима. Дизајнери, приликом избора алата за симулацију, треба да процене могућности алата да уради следеће:

- Идентификује различите начине отказа, укључујући лом унутар слоја (оштећења или потпуни отказ влакана и/или матричног материјала), лом између слојева (деламинација) као и извлачење влакана (одвајање влакна и матрице),

- Идентификује критичне области, притом наглашавајући начин отказа као и слој у коме је дошло до лома,
- Дефинише композитне слојеве у случају ламинатних композита дајући податке о дебљини слоја и углу влакана у сваком слоју,
- Изврши тродимензионалну анализу напонског стања,
- Рад са постојећим алатима за симулацију нудећи могућност и неких других анализа као што су термичка анализа и др.,
- Могућност за унос свих података потребних за дефинисање једног композитног материјала,
- Предвидети појаву заосталих напона насталих током обраде конструкције.

5. Моделирање ламината у Femap-у са NX Nastran-ом

Након покретања програма Femap, добија се радно окружење, приказано на слици 5.1.



Слика 5.1 Радно окружење у Femap-у

5.1. Важне карактеристике

Моделирање композита може бити лакше, ако се прате карактеристике који су пажљиво додељене (слика 5.1.1).

Важно је изабрати координатни систем који ће одговарати за дати композитни ламинат. У већини случајева, обичан правоугли координатни систем ће бити одговарајући. Ипак, треба бити опрезан када се ради о закривљеним ламинатима. Индивидуални слој оријентације додељен у уређивачу поставки, односиће се на координатни систем који је додељен у овом кораку.

За композитне ламинате требало би да се додели тип материјала. Обично коришћени материјали су 2D/3D ортотропни материјали за композитне ламинате са ојачаним ламинатима.

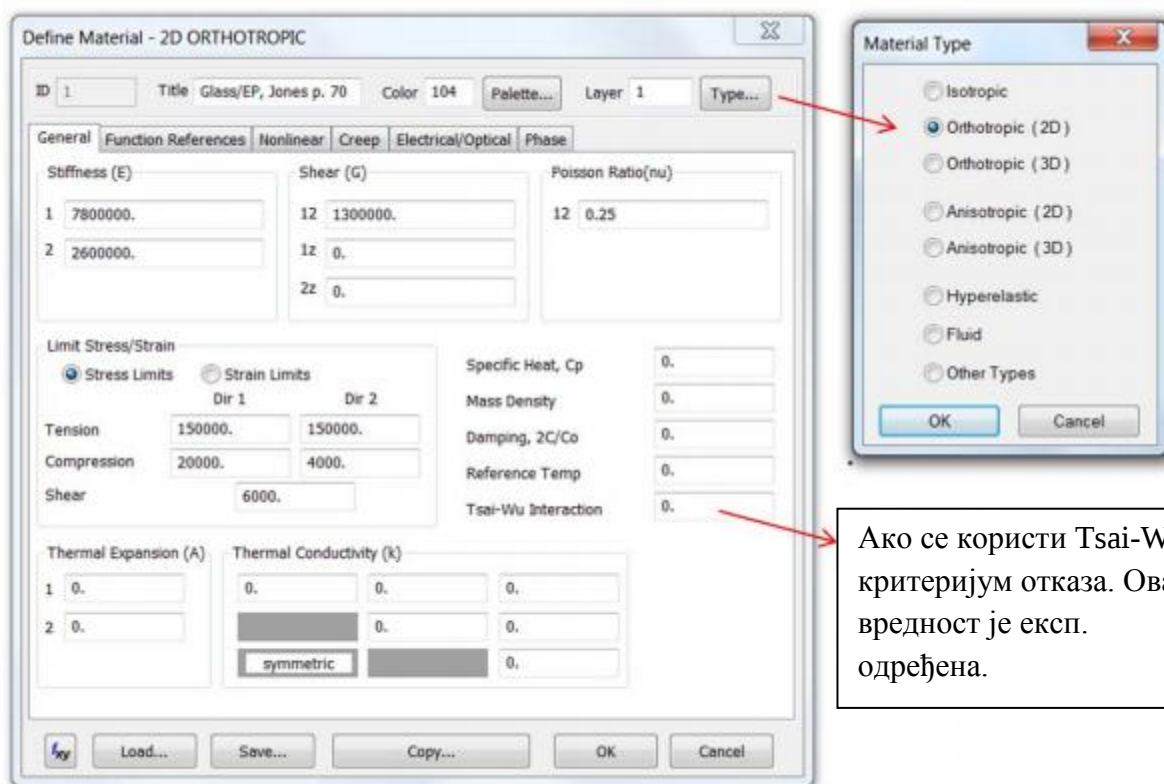
Картица карактеристика мора одговарати композитном ламинату. За 2D моделирање, елемент може бити ламинантног типа. Слично је и за 3D моделирање, где елемент мора бити ламинантпросторног типа. Одговарајући критеријум отказа, може бити дефинисан коришћењем картице карактеристика.

Конфигурација слојева композитних ламината, је одређена коришћењем едитора за слојеве. Коришћењем овог едитора, може се видети: слагање слојева (број и смер), материјал слоја, индивидуална оријентација слоја и дебелина слоја.

Слика 5.1.1. Карактеристике композита

5.2. Задавање карактеристика материјала

Када су у питању композитни ламинати ојачани влакнима најчешће коришћени типови материјала су 2D/3D ортотропни материјали. Задавање карактеристика оваквих материјала у Femap-у врши се командом Model > Material > 2D (3D) orthotropic, као што је приказано на слици 5.2.1. При томе треба имати на уму да се разликују својства материјала у уздужном (E_1) и попречном правцу (E_2). У зависности од типа анализе потребно је навести различита својства материјала.



Слика 5.2.1. Карактеристике материјала

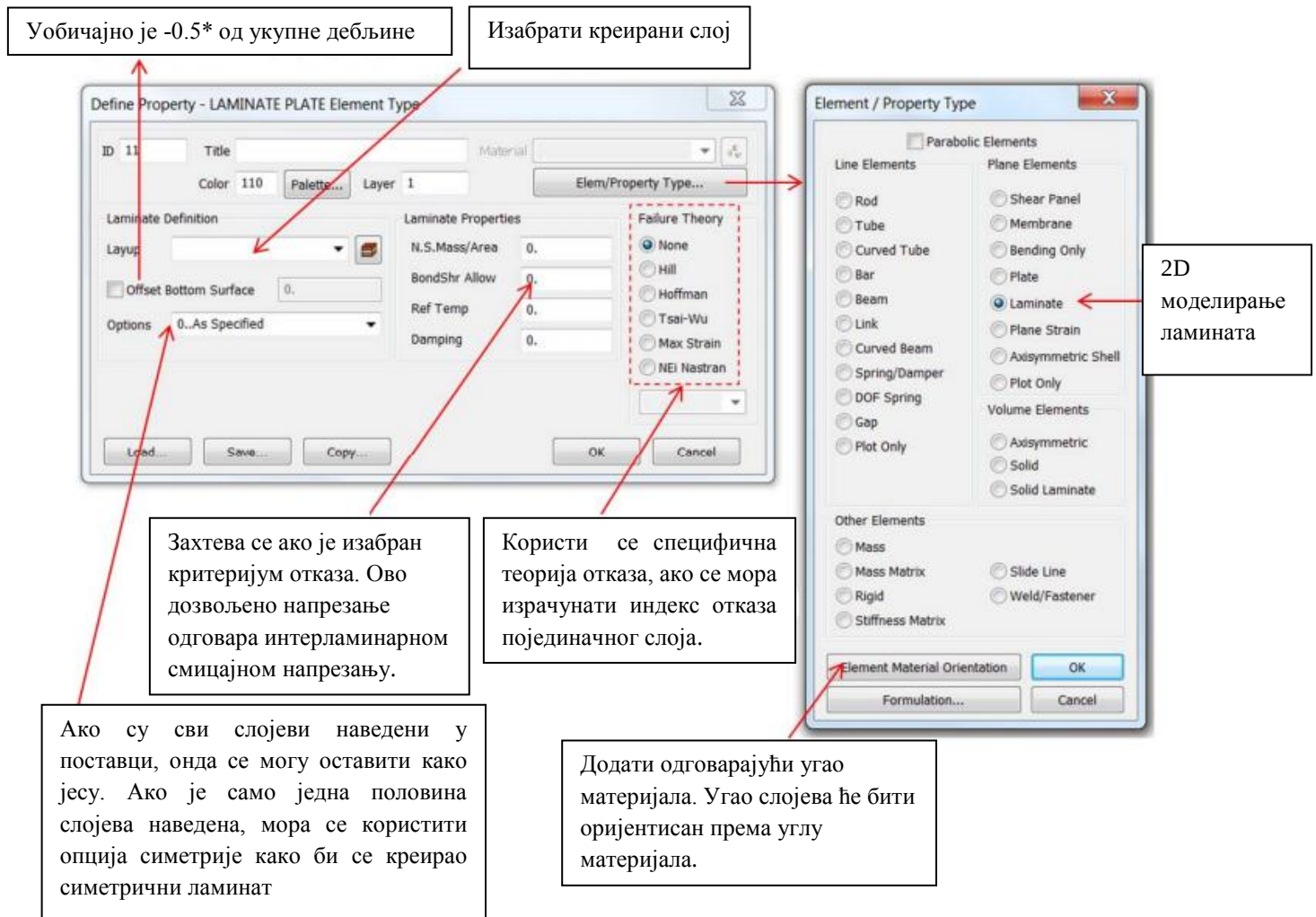
Ако постоје карактеристике влакна и матрица, још увек се могу проценити карактеристике композита коришћењем правила мешавине или неке друге методе.

Дефинисање особина материјала за 3D ламинатни модел је слично 2D моделу осим што је тип материјала сада 3D ортотропни. Сходно томе треба дефинисати и особине материјала у правцу 3.

При задавању карактеристика материјала треба проверити да ли су примењене одговарајуће јединице.

5.3. Задавање карактеристика елемената

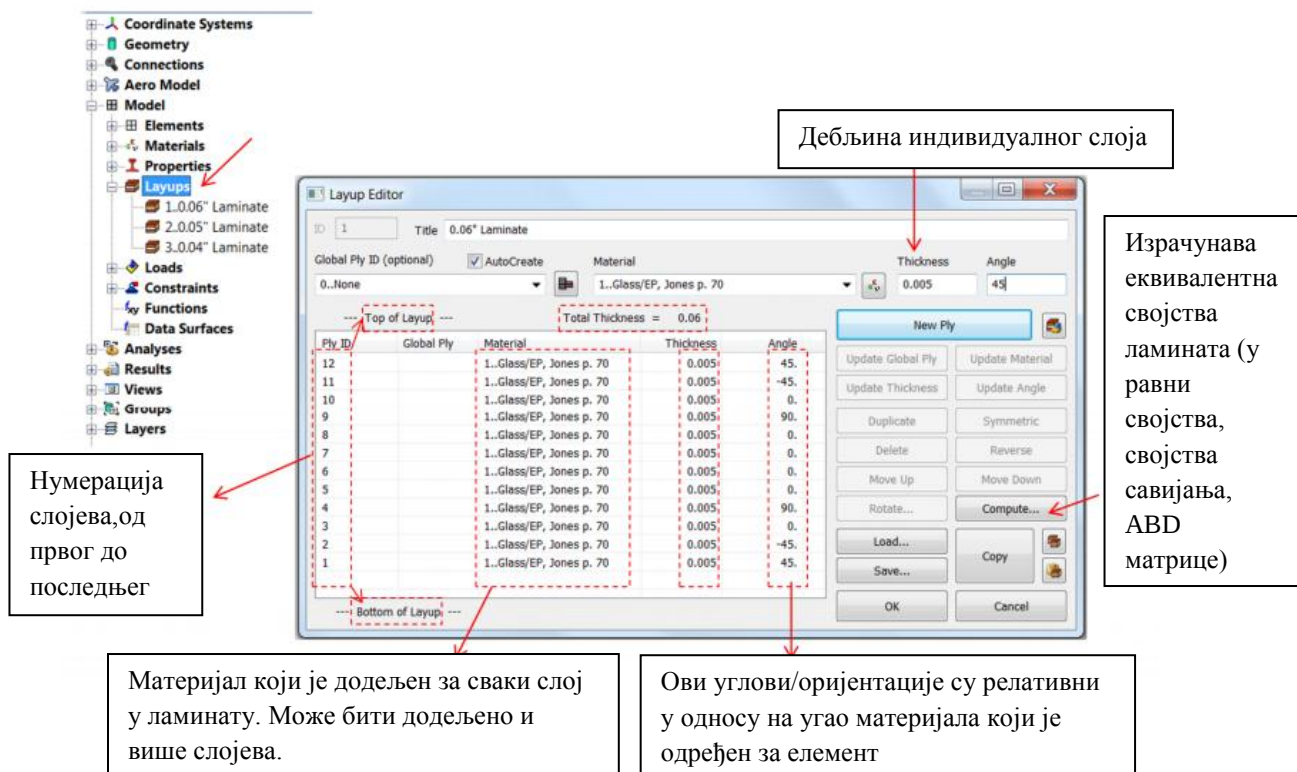
Потребно је одредити Property картицу која одговара композитном ламинату. За 2D моделе бирати опцију Laminate (Model > Property > Laminate, слика 5.3.1), а када су у питању 3D модели онда треба бирати Solid елементе (Model > Property > Solid Laminate).



Слика 5.3.1. Моделирање 2D ламината

5.4. Уређивање слојева

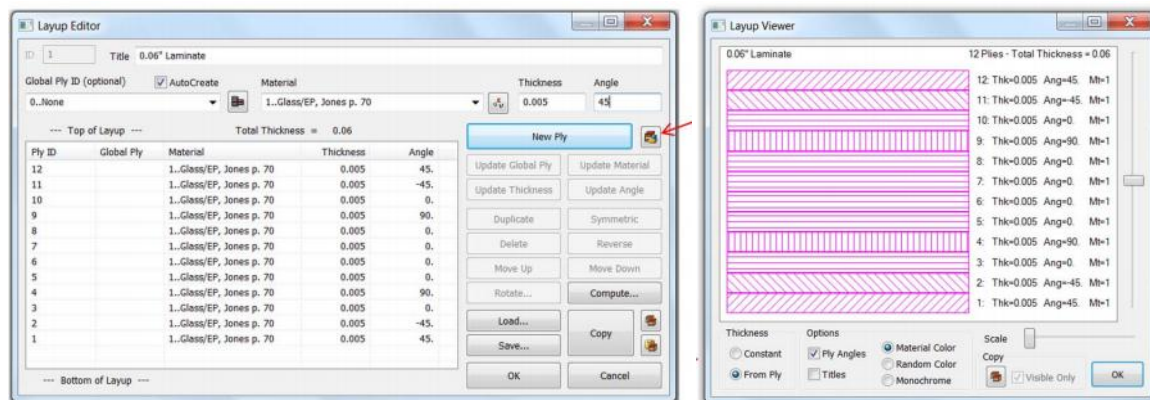
За сваки ламинатни слој потребно је дефинисати врсту материјала, дебљину слоја и угао оријентације влакана у слоју, приказано на слици 5.4.1.



Слика 5.4.1. Уређивање слојева

Опција за прегледање слојева Layup Viewer, показује слојеве који су креирани.

Важно је приметити да су ови углови релативни у односу на угао материјала (који је наведен у картици својстава). Како би се избегла конфузија, може се тражити приказ оријентација уз додељени угао материјала и проверити да ли углови одговарају стварној оријентацији у датим слојевима (слика 5.4.2).

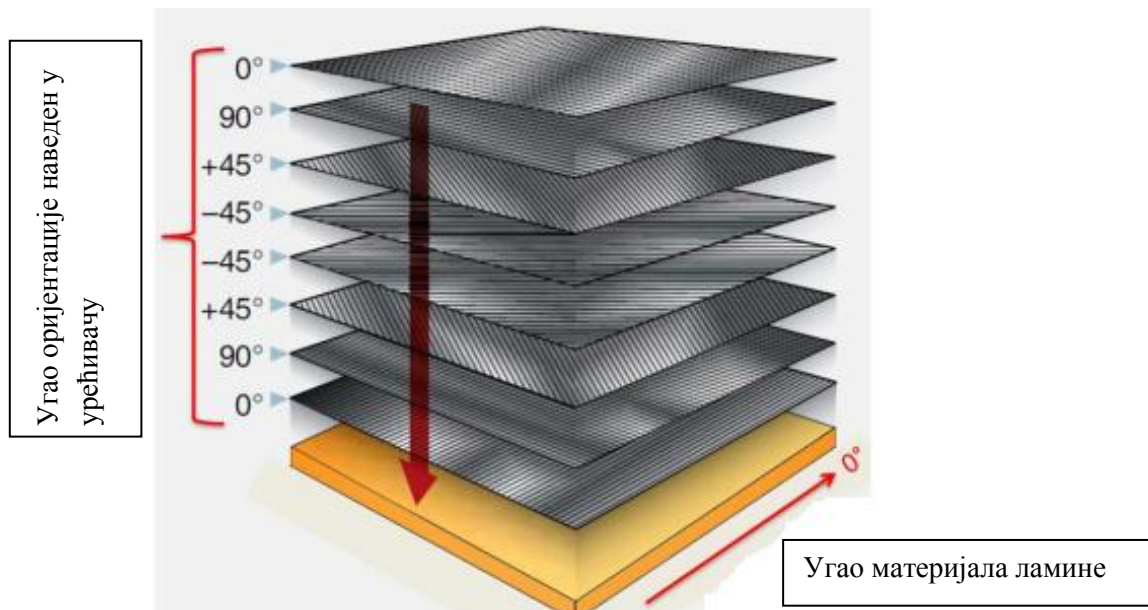


Слика 5.4.2. Оријентација углова

5.5. Додељивање углова материјалу

Иако су углови оријентације дефинисани за сваку ламину појединачно, Фетар не може да разуме за који референтни правац одговарају ове оријентације тј. углови. Дакле, мора да се одреди угао материјала, како би све оријентације узеле тај вектор као референцу. Као пример, ако је угао материјала дефинисан по x-оси, онда ће све оријентације користити x-осу као референцу.

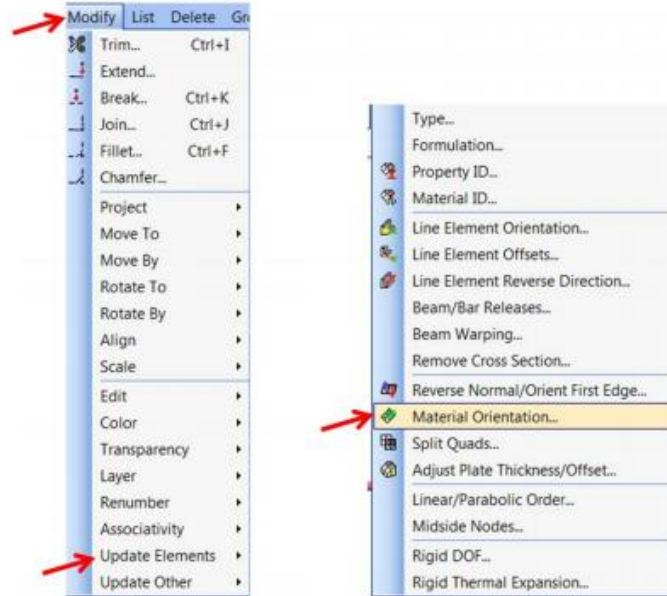
У терминологији не треба бити забуне између назива „угао материјала" и „угао оријентације" који се појављује у едитору. Угао материјала је референтна оса која се додељује елементу и она је независан облик од елемента. Угао оријентације је оријентација ламине (усмерење влакана). Фетар не додељује никакав угао материјала који се подразумева. Потребно је користити било коју методу за одређивање угла материјала (слика 5.5.1) [11].



Слика 5.5.1. Углови материјала [11]

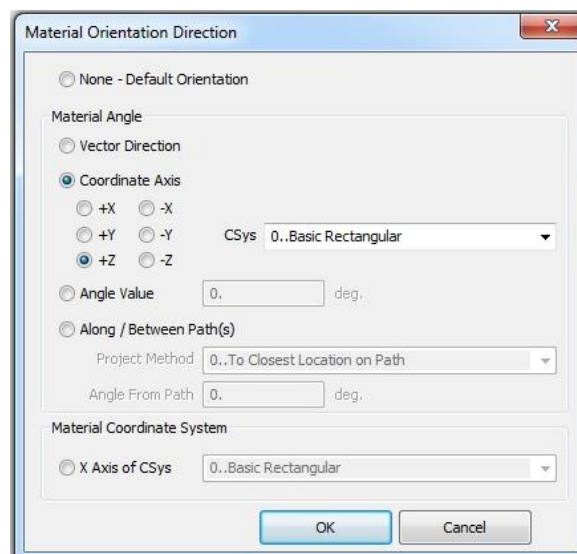
5.5.1. Дефинисање угла материјала на елементу

Угао материјала може се дефинисати или ажурирати коришћењем тулбара Modify > Update Elements > Material Orientation (слика 5.5.1.1).



Слика 5.5.1.1. Дефинисање угла материјала

Ова метода дозвољава да се дефинише угао материјала за изабрани елемент или за све елементе у исто време (слика 5.5.1.2).

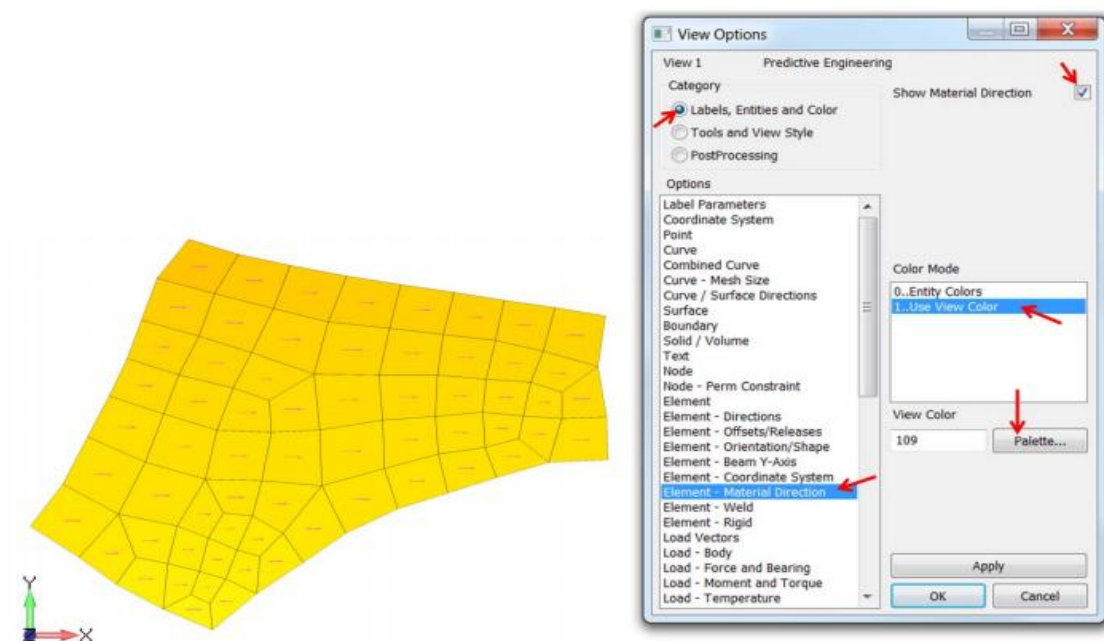


Слика 5.5.1.2. Дефинисање угла материјала

Важно је напоменути да је угао материјала независан од елемената координатног система и од облика елемента.

Међутим, углови материјала су сви поравнати са x-осом. Ако угао материјала није дефинисан, Femap ће показати да постоји грешка. Ако се пропустило дефинисање угла материјала за неколико елемената у моделу, биће тешко уочити елемент коме недостаје дефинисани угао [11].

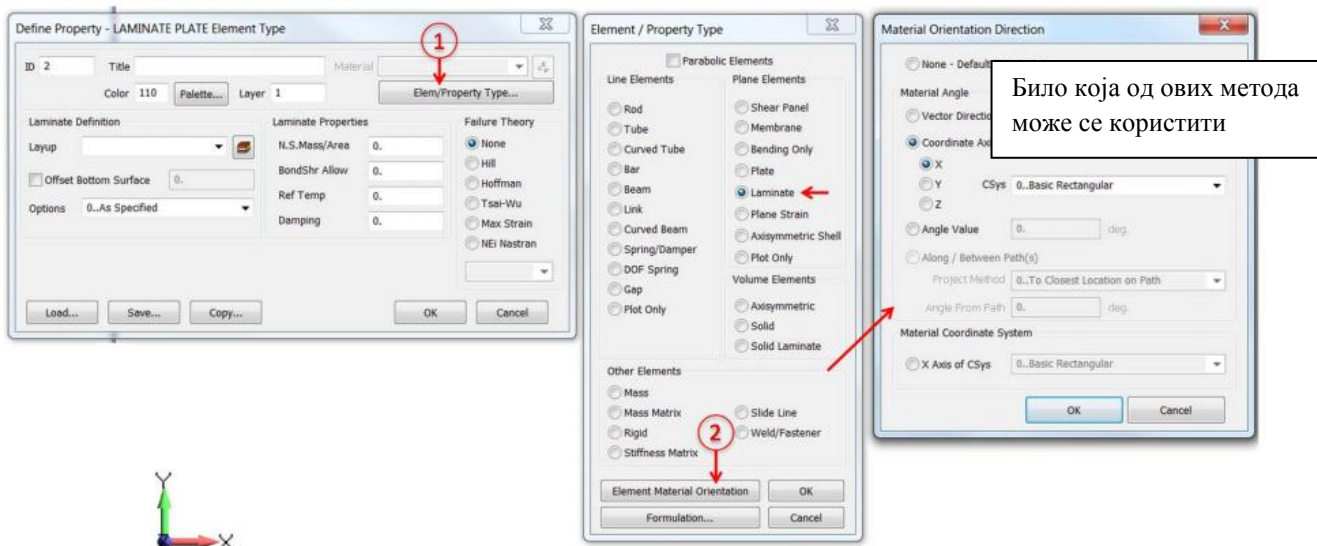
Креирани су API филтери који групишу елементе са тим недостатком. Приступањем овој новој креираној групи, може се доделити или ажурирати угао материјала, али само за оне елементе који су у овој групи. API се зове угао провере композитних материјала. Углови материјала у елементима ламине, могу се потврдити притиском F6 или командом View Options (слика 5.5.1.3) [11].



Слика 5.5.1.3. Картица са опцијама прегледа углова материјала [11]

5.5.2. Дефинисање угла материјала у картици својства

У овом приступу, може се дефинисати угао материјала директно у картици карактеристика. Међутим, ово ће доделити угао материјала свим елементима који су повезани у тој картици својства. Додељени углови, могу се проверити и ажурирати у случају да има погрешно дефинисаних углова, тако што ће се користити процедура један (слика 5.5.2.1).



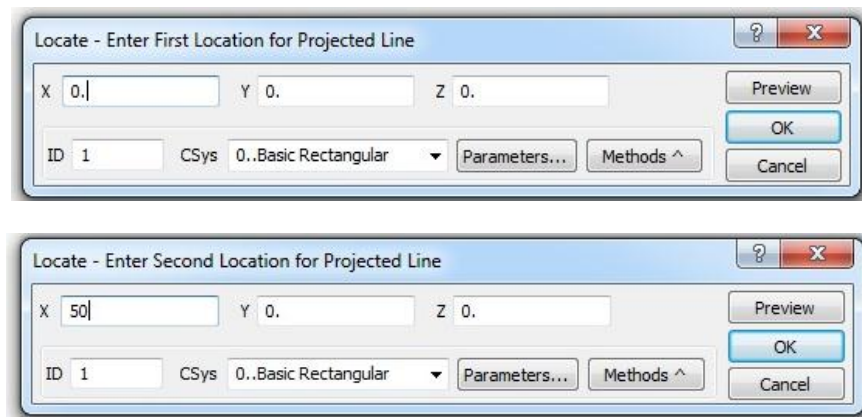
Слика 5.5.2.1. Оријентација материјала

У случају комплексне геометрије са закривљеним површинама, углови материјала, могу се дефинисати коришћењем цилиндричног координатног система, коришћењем тангентног правца ако вектор прати закривљену површину. Увек треба проверити угао материјала.

5.6. Креирање геометрије, чворова и елемената

Креирање геометрије се изводи преко опција Geometry > Curve-Line (Curve circle) > Project Points (Radius).

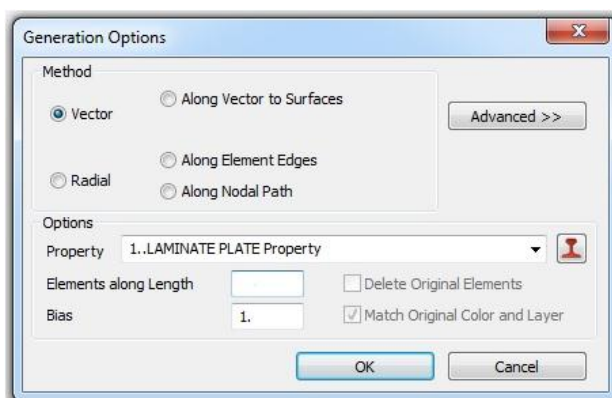
У добијеном прозору који је приказан на слици 5.6.1, потребно је дефинисати положај почетне тачке (најчешће уношењем броја 0 за све три осе, како би креирање геометрије почело из координатног почетка). Притиском на ОК, добија се нови прозор, где је потребно унети ширину дела који се моделира.



Слика 5.6.1. Креирање геометрије

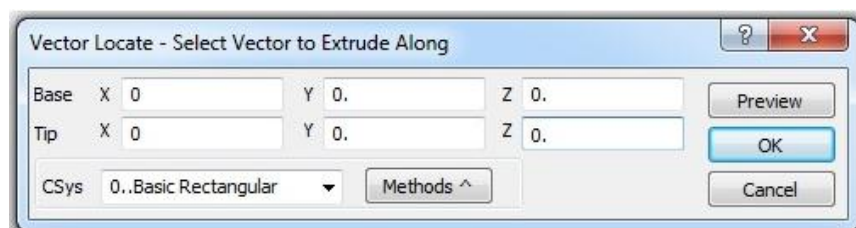
Како би се унео број елемената по ширини модела, потребно је извршити: Mesh > Mesh Control > Size Along Curve, а затим изабрати опцију Select All>OK и унети жељени број елемената.

Следеће што је потребно урадити је унети број елемената у аксијалном правцу, а то се може извршити помоћу команди Mesh > Extrude > Curve > Select All > OK. Добија се прозор приказан на слици 5.6.2, у који је потребно унети број елемената по дужини модела.



Слика 5.6.2. Дефинисање броја елемената по дужини модела

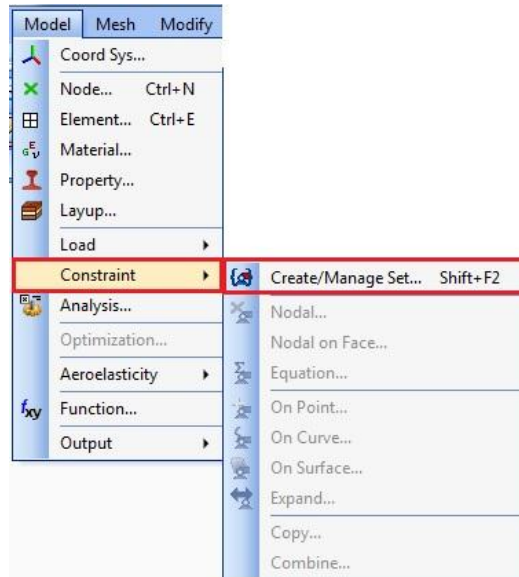
Након тога се добија прозор као на слици 5.6.3, где је потребно унети дужину модела.



Слика 5.6.3. Дефинисање дужине модела

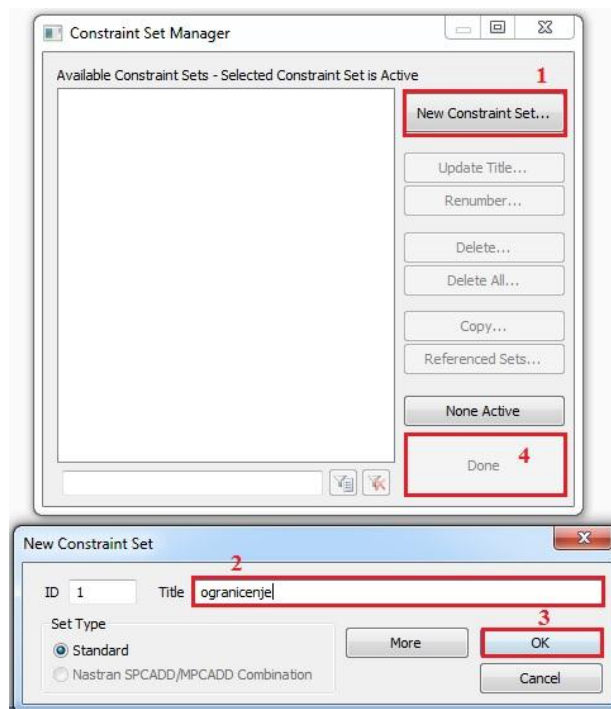
5.7. Задавање ограничења

Како би се задао ограничење на неком делу, потребно је прво креирати то ограничење, а то се постиже командама Model > Constraint > Create/Manage Set, као што је приказано на слици 5.7.1.



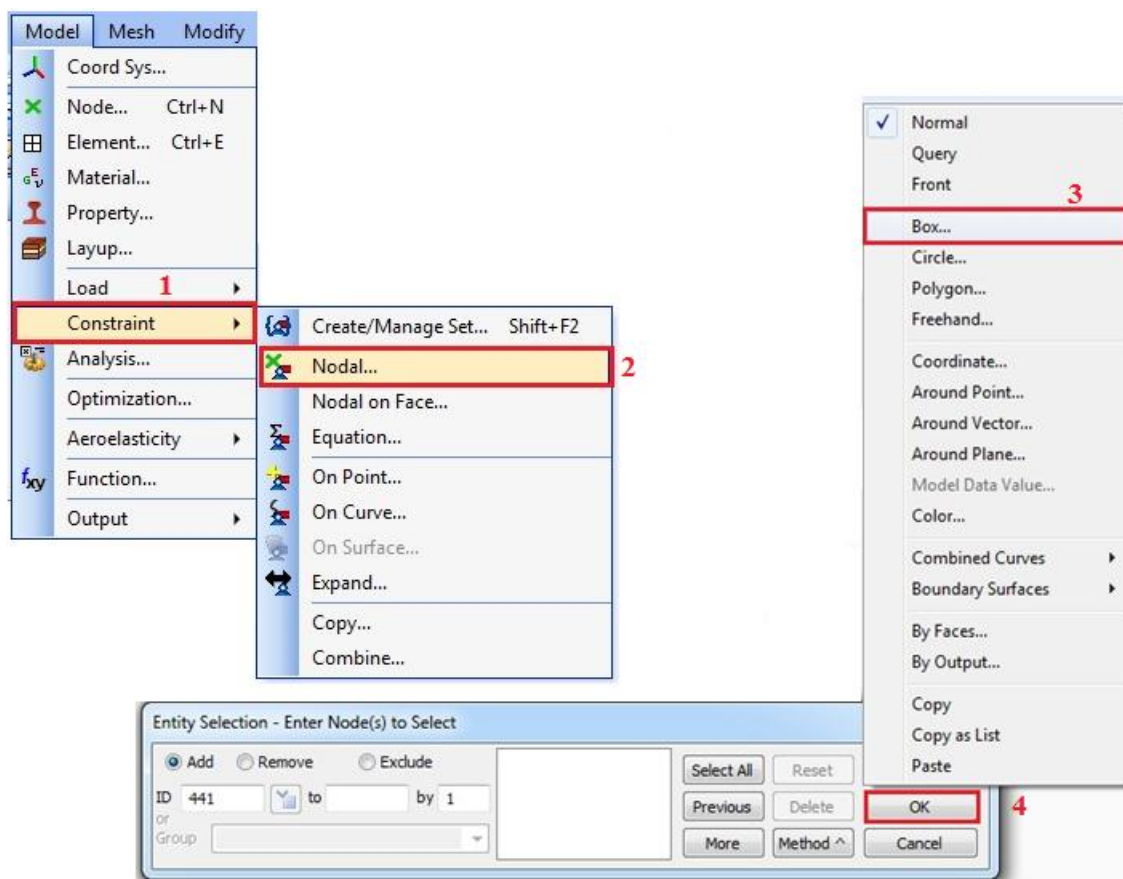
Слика 5.7.1. Креирање ограничења

Затим је потребно унети назив и потврдити притиском на Done (слика 5.7.2).



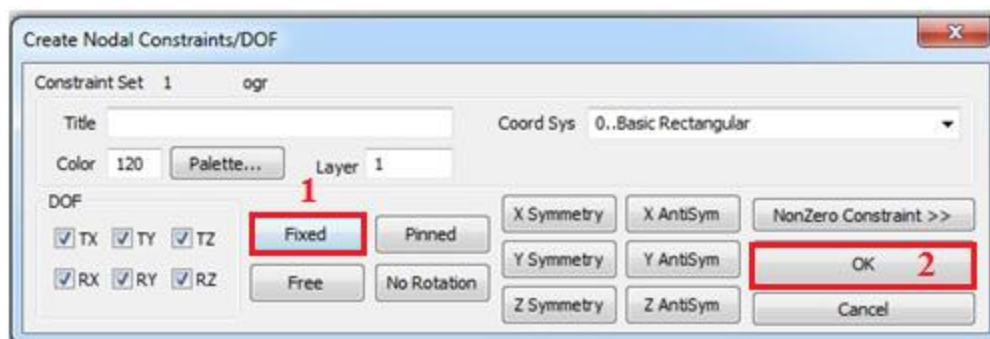
Слика 5.7.2. Креирање ограничења

Задавање ограничења у ослонцима се врши помоћу команди Model > Constraint > Nodal > Pick > Box, као што је приказано на слици 5.7.3.



Слика 5.7.3. Задавање ограничења

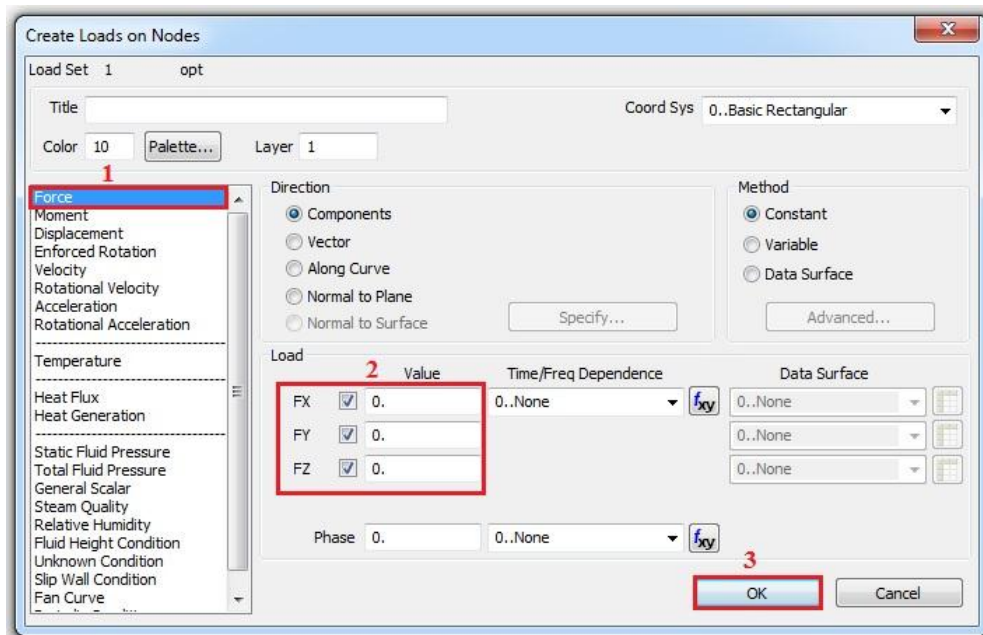
Уколико се жели да модел буде фиксиран са једне стране (нема ротације, нити транслације), потребно је селектовати иконицу Fixed, као што је приказано на слици 5.7.4.



Слика 5.7.4. Фиксирање модела

5.8. Задавање оптерећења

Сличан поступак као и код постављања ограничења, прво је потребно креирати оптерећење помоћу команди Model > Load > Create/Manage Set, а затим задати оптерећење. Ово се врши помоћу команди Model > Load > Nodal > Pick > Box, а затим је потребно селектовати елементе на оптерећеној страни. Добија се прозор као што је приказан на слици 5.8.1.



Слика 5.8.1. Задавање оптерећења

5.9. Мердовање

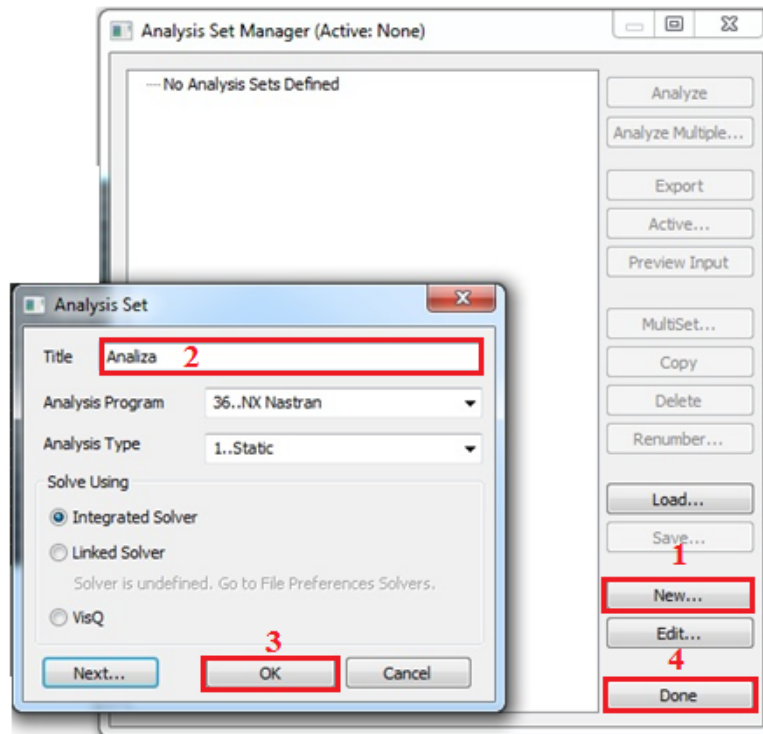
Користити команде Tools > Check > Coincident Nodes > Select All > OK > OK. Затим извршити ренумерацију опцијама Modify > Renumber > Node > Select All > OK.

5.10. Покретање анализе

Након притиска на иконицу за анализу, као што је приказано на слици 5.10.1 (1), потребно је креирати нову анализу и доделити назив као на слици 5.10.2. Како би се прегледали резултати потребно је изабрати иконицу означену бројем 2 на слици 5.10.1.

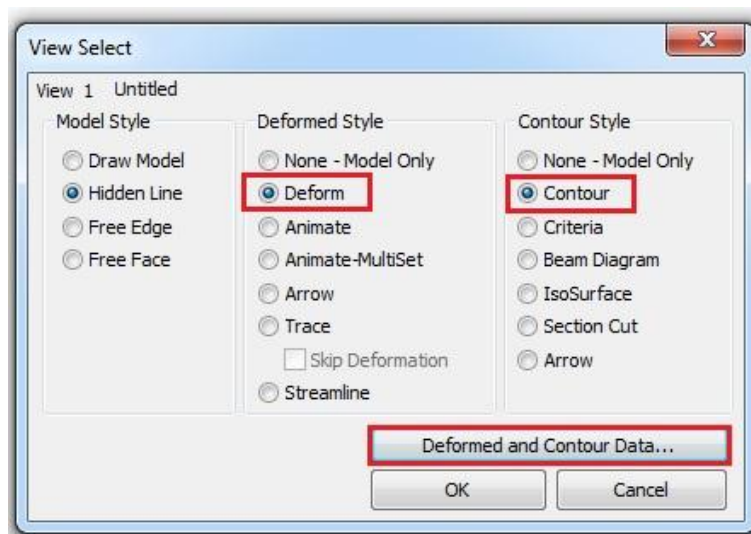


Слика 5.10.1. Анализа и резултати



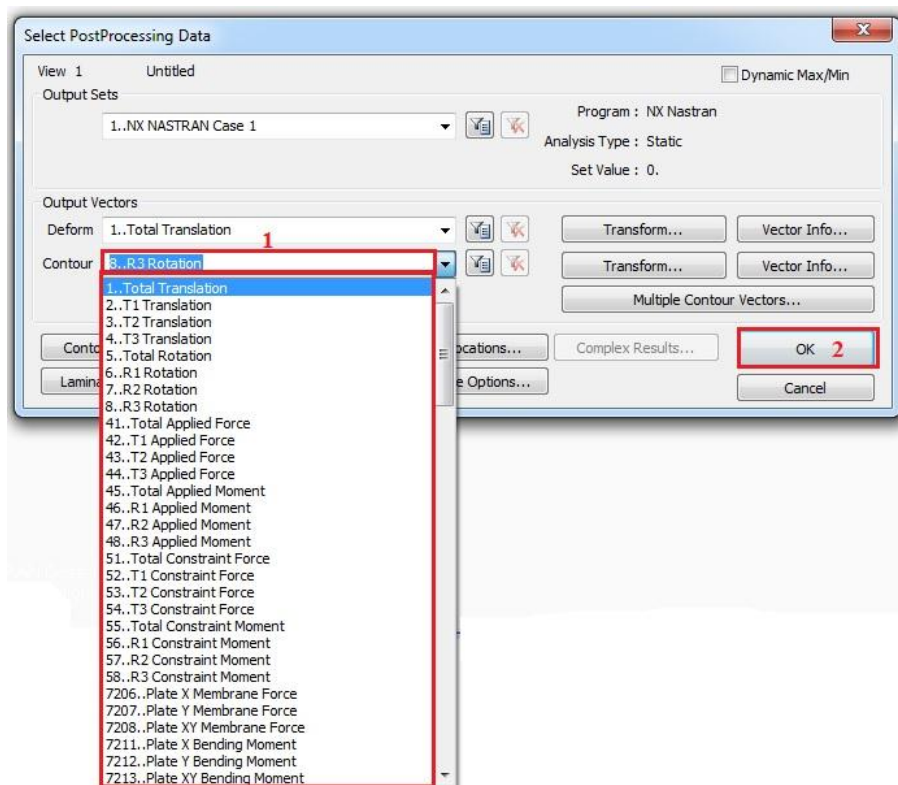
Слика 5.10.2. Креирање нове анализе

Добијамо нови прозор у коме је потребно изабрати опције Deform и Contour (слика 5.10.3).



Слика 5.10.3. Преглед анализе

Међу понуђеним опцијама потребно је изабрати резултат који је потребно приказати: напон, померање, угао увијања итд (слика 5.10.4).



Слика 5.10.4. Преглед резултата анализе

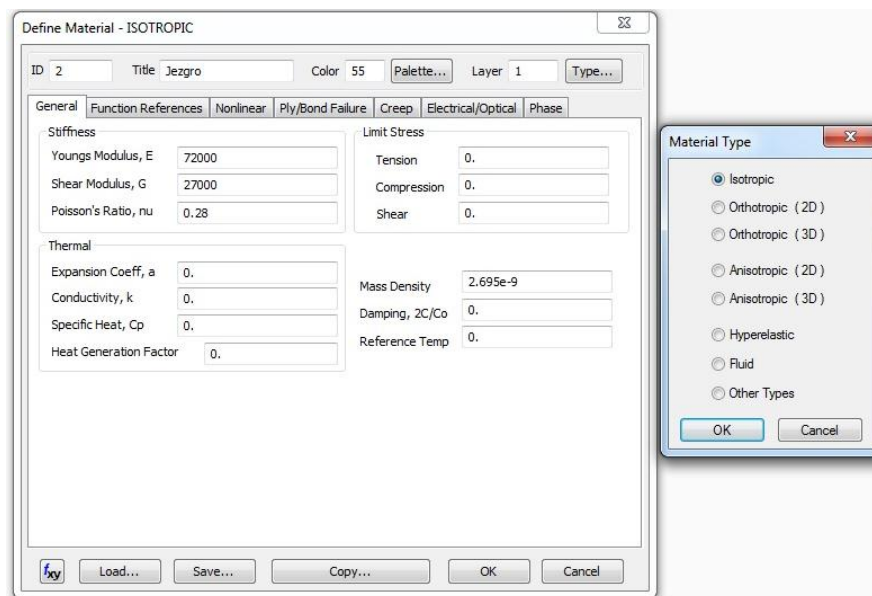
6. Моделирање сендвич композита у Femap-у са NX Nastran-ом

Као што је познато сендвич композити се састоје од језгра (у облику саћа или пене) постављеног између два површинска слоја. Типично, површински слојеви су оптерећени на савијање, док је језгро оптерећено на смицање.

Сендвич композити су погодни за моделирање коришћењем 2D ламинатног модела, тако што се језгро дефинише као један од слојева у уређивачу. При задавању карактеристика материјала за спољашње површине се бирају ортотропни материјали, док се језгро може дефинисати као изотропни материјал. Треба нагласити да међуламинарни напон смицања постаје битан у сендвич композитима. Све остало је исто као и при дефинисању ламинатног композита.

6.1. Креирање карактеристика материјала

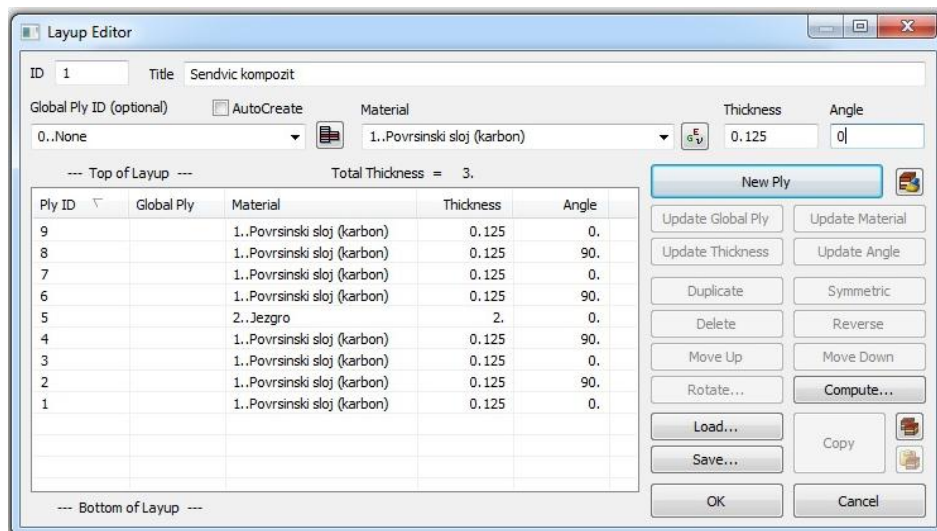
Потребна су два модела материјала, сваки је дефинисан за по један површински слој (*facesheet*) композита и за језгро (*core*). Један површински слој композита се моделира као 2D ортотропни материјал, док се језгро моделира као изотропни материјал (слика 6.1.1).



Слика 6.1.1. Дефинисање материјала језгра

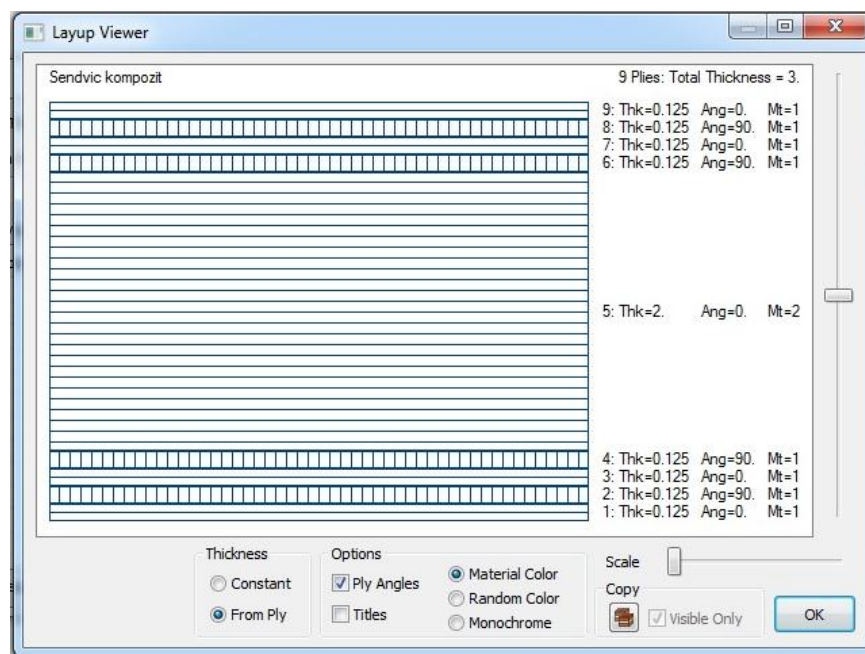
6.2. Дефинисање слојева

Дефинисање ламинатног слоја за оба површинска слоја је исто као у претходном примеру. На слици 6.2.1 се може видети распоред слојева код сендвич композита.



Слика 6.2.1. Распоред слојева

На слици 6.2.2, помоћу команде *Layup Viewer* може се видети како изгледа распоред слојева у сендвич композитима.

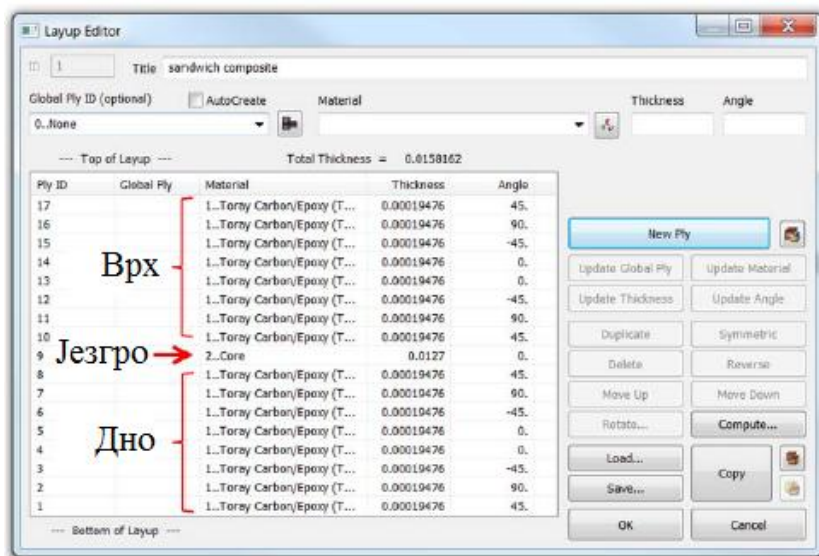


Слика 6.2.2. Распоред слојева у сендвич композитима

6.3. Друге методе за моделирање сендвич композитних модела

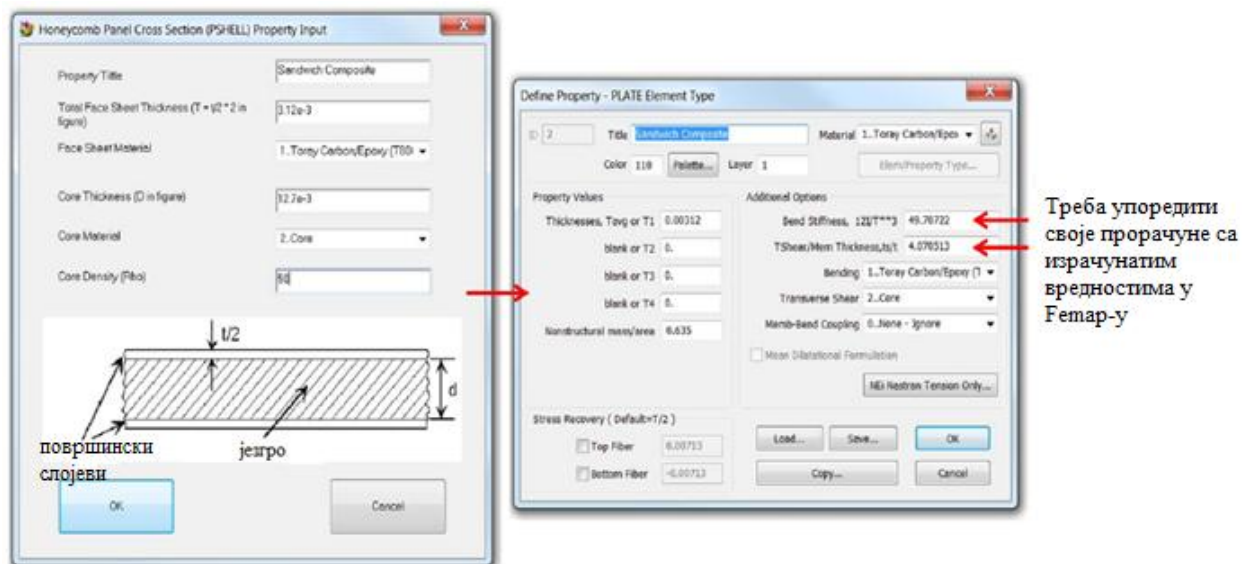
Други начини помоћу којих се горе описани проблем може анализирати су:

1. 2D сендвич композитно моделирање у којем су површински слојеви и језгро сви 2D и могу се дефинисати у једној картици слојева (слика 6.3.1). Ово је добар приступ, међутим, као што је раније речено, 2D ламинатни модели базирани су на класичној теорији ламинације и не узимају у обзир напоне који нису у слоју. Тада се друге методе користе за процену међу ламинарних напона.



Слика 6.3.1. Слојеви композитног материјала

2. Комбинација 2D ламината и 3D језгра. У овом поступку, површински слојеви се могу моделирати као 2D, а језгро се може моделирати 3D solid елемент. Треба обратити пажњу на дефинисање ламината за ову конфигурацију. Са сваке стране језгра дефинише се једна половина ламинатних слојева.
3. Користећи класичну теорију плоча за моделирање сендвич композита. Овај модел захтева израду неког ручног прорачуна и комплексан је у поређењу са 2D ламинатним моделом. Картица карактеристика у Nastran-у, која одговара моделу плоча је картица PSHELL. У горе описаном поступку 1, Nastran претвара картицу PCOMP у еквивалентни PSHELL. Према томе, и метода 1 и метода 2 би требало да дају сличне резултате ако су све карактеристике прецизно дефинисане. Да би се смањила грешка прорачуна, метода један је пожељнија у односу на методу два. Алтернативно, Femar има прилагођени алат за дефинисање сендвич композита користећи PSHELL методу. Може се извршити прорачун ручно и упоредити добијене вредности са израчунатим вредностима у софтверу Femar. Овом прилагођеном алату за сендвич композите може се приступити командама Custom tools > Honeycomb PSHELL > Honeycomb PSHELL Property (слика 6.3.2) [11].



Слика 6.3.2. Добијене вредности за поређење са сопственим прорачунима [11]

7. Примери анализе композитних конструкција

7.1. Пример анализе ламинатне плоче

У овом примеру извршена је анализа ламинатне призматичне плоче димензија 50 x 50 x 7 mm. Плоча је израђена од петнаест слојева угљеничних влакана/епокси смоле (оријентација $[45^\circ/0^\circ]$) и десет слојева стаклених влакана/епокси смоле (оријентација $[45^\circ/0^\circ]$), са по 20 елемената по дужини и ширини плоче. Плоча је на једној страни уклештена док је на слободном крају оптерећена силом од 50 N.

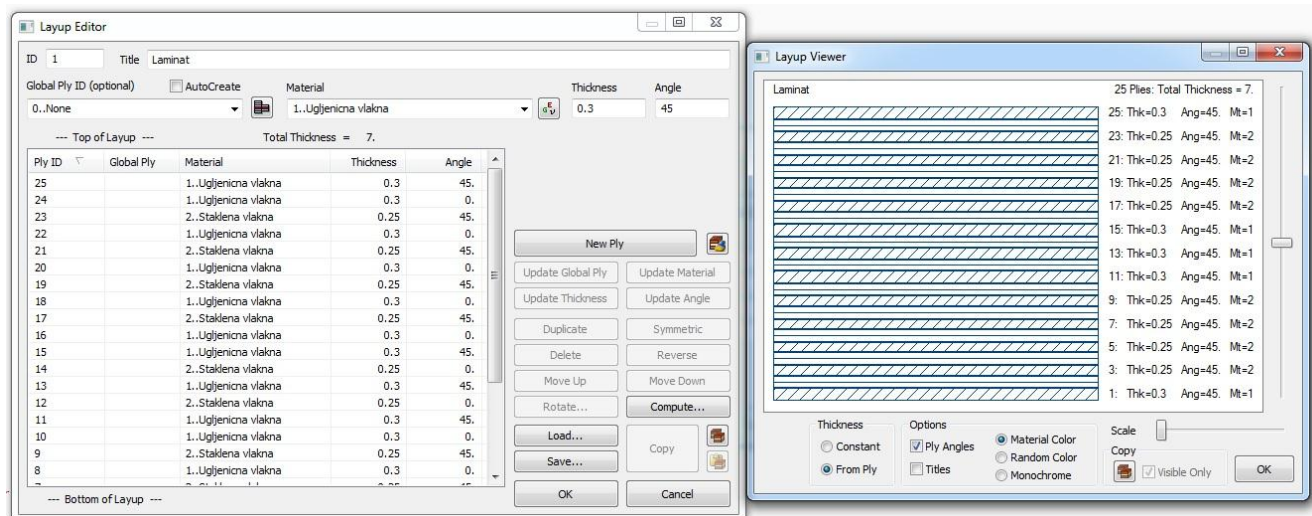
Карактеристике угљеничних влакана/епокси смоле и стаклених влакана/епокси смоле су дате у табели 7.1.1.

Табела 7.1.1. Карактеристике материјала [6]

Материјал	Угљенична влакна/епокси композит (USN150)	Стаклена влакна/епокси композит (UGN150)
E_1 (GPa)	131,6	43,3
E_2 (GPa)	8,20	14,7
G_{12} (GPa)	4,5	4,4
G_{23} (GPa)	3,5	3,5
ν	0,281	0,3
S_1^t (MPa)	2000	1050
S_1^c (MPa)	-1400	700
S_2^t (MPa)	61	65
S_2^c (MPa)	-130	-120
S_{13} (MPa)	70	40
S_{23} (MPa)	40	65
ρ (kg/m ³)	1550	2100
t_{sl} (mm)	0,3	0,25

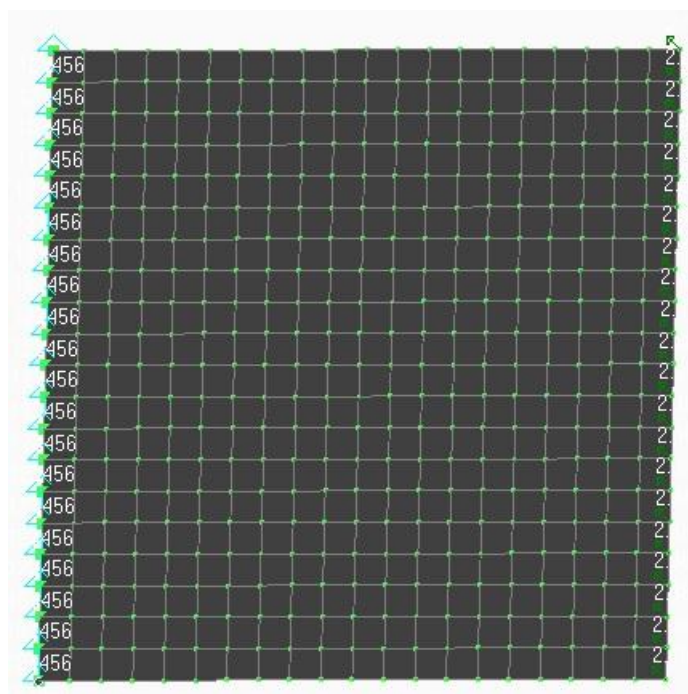
Ознаке у табели 7.1.1 су: E_1 – модул еластичности у подужном правцу; E_2 – модул еластичности у попречном правцу; G_{12} , G_{23} – модули клизања; ν – Poisson-ов коефицијент; S_1^t , S_1^c – чврстоћа на затезање и притисак у подужном правцу; S_2^t , S_2^c – чврстоћа на затезање и притисак у попречном правцу; S_{13} , S_{23} – чврстоћа смицања; ρ – густина материјала; t_{sl} – дебљина слоја композита.

Након што се задају карактеристике материјала, потребно је уредити слојеве (слика 7.1.1)



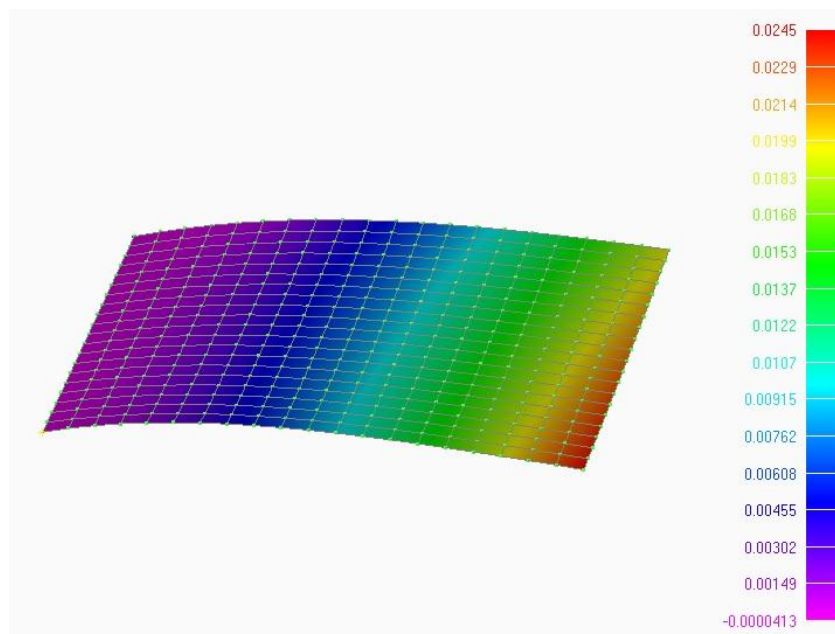
Слика 7.1.1. Слојеви са одређеним дебљинама и оријентацијама

Након тога је потребно нацртати плочу према претходно написаном упутству, а затим је са једне стране ограничити, а са друге оптеретити, као што је приказано на слици 7.1.2.



Слика 7.1.2. Плоча са постављеним ограничењима и оптерећењем

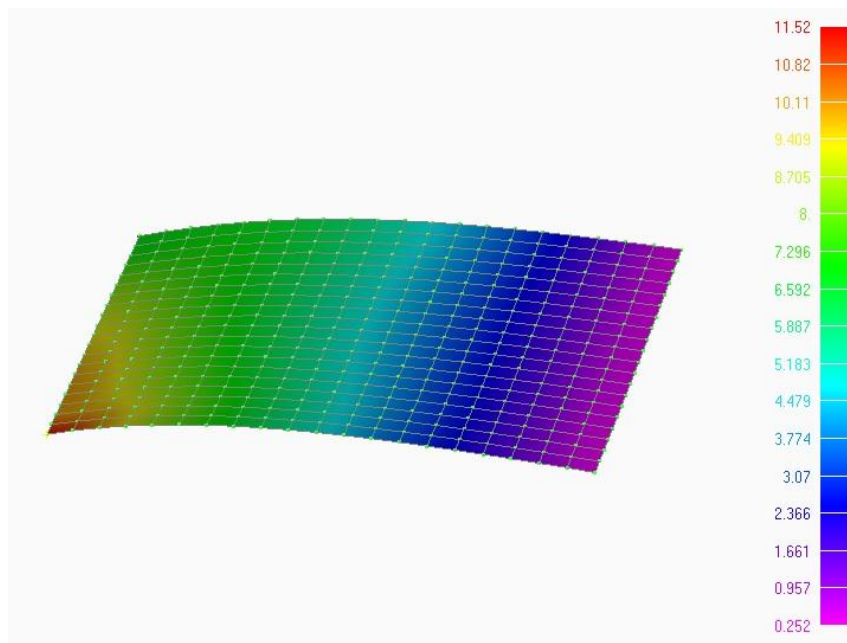
Затим је потребно извршити анализу према упутству. У првом случају врши се анализа померања плоче у правцу дејства оптерећења - T2 Translation (слика 7.1.3).



Слика 7.1.3. Добијене вредности померања ламинатне плоче у вертикалној равни (T2 Translation)

Са слике се може закључити да максимална вредност померања износи 0,0245 mm.

Такође, потребно је извршити анализу напона у најоптерећенијем слоју. У овом случају два слоја имају исту вредност напона, а то су Lam Ply 2 VonMises Stress и Lam Ply 24 VonMises Stress и њихова вредност износи 11.52 MPa (слика 7.1.4)



Слика 7.1.4. Вредности VonMises-ових напона у најоптерећенијем слоју плоче (Lam Ply 2)

7.2. Пример анализе плоче од сендвич композита

7.2.1. Сендвич композит са језгром од AL 3003

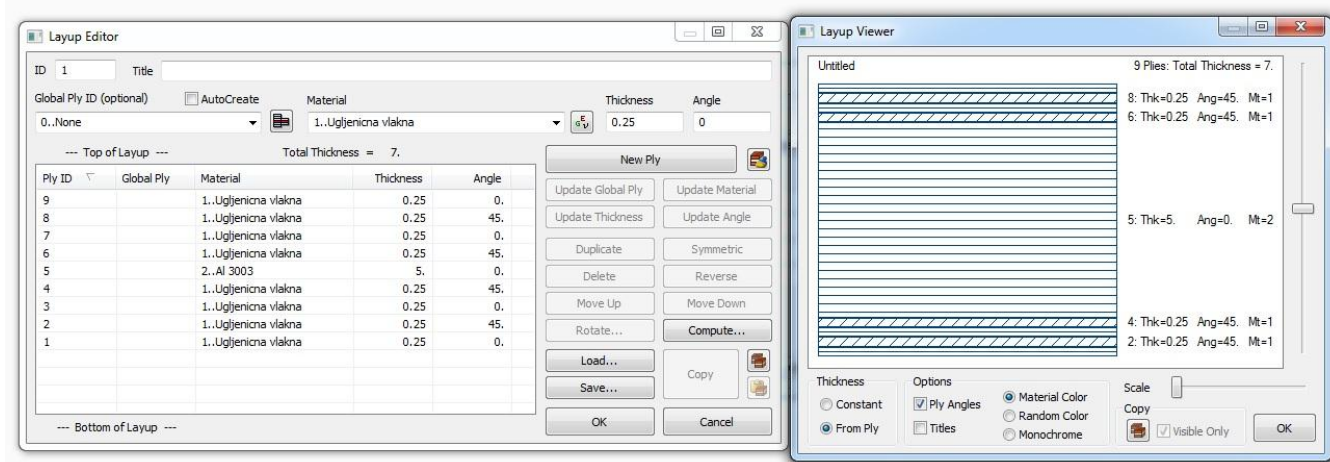
У овом примеру извршена је анализа призматичне плоче од сендвич композита, такође димензија 50 x 50 x 7 mm. Плоча се састоји од површинских слојева које чине осам слојева угљеничних влакана/епокси смоле оријентација $[0^\circ/45^\circ]$ (са сваке стране по четири) и језгра које је израђено од 3003 Aluminium-а. Дебљина једног слоја је 0,25 mm, док дебљина језгра износи 5 mm. Као и у претходном примеру, плоча је на једној страни уклештена док је на слободном крају оптерећена силом од 50 N и садржи по 20 елемената по дужини и ширини.

Карактеристике угљеничних влакана/епокси смоле су дате у табели 7.1.1, док су карактеристике AL 3003 дате у табели 7.2.1.

Табела 7.2.1. Карактеристике материјала [19]

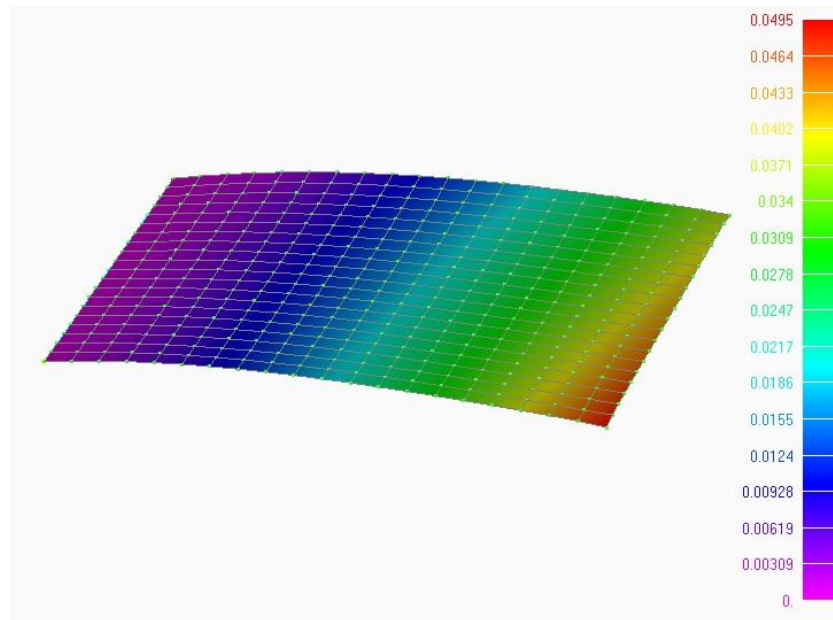
Материјал	3003 Aluminium
E_1 (MPa)	1000
E_2 (MPa)	1000
G_{12} (MPa)	440
G_{23} (MPa)	220
ν	0,33
ρ (kg/m ³)	83

Потребно је задати карактеристике материјала, а затим уредити слојеве (слика 7.2.1.1)



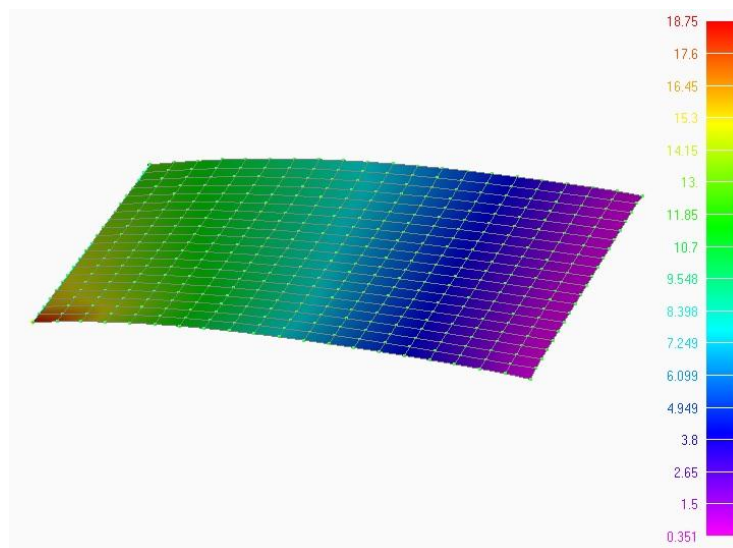
Слика 7.2.1.1. Слојеви са одређеним дебљинама и оријентацијама

Након завршене анализе, добијене вредности максималних померања (T2 Translation) износе 0,0495 mm (слика 7.2.1.2).



Слика 7.2.1.2. *Добијене вредности померања сенвич плоче у вертикалној равни (T2 Translation)*

Затим се врши анализа VonMises-ових напона у најоптерећенијем слоју, а то су у овом случају површински слојеви (Lam Ply 1 и Lam Ply 9) и њихова вредност износи 18,75 MPa (слика 7.2.1.3).



Слика 7.2.1.3. *Вредности VonMises-ових напона у најоптерећенијем слоју плоче (Lam Ply 1)*

На графику 7.2.1.1 се може видети како повећање дебљине саћастог језгра сендвич композита за 5 mm, са језгром од 3003 Al, може утицати на смањење померања. При томе карактеристике материјала, оптерећење, гранични услови и поступак спровођења анализе су остали исти као и у претходном примеру (једина разлика је била у дебљини језгра). Дакле, повећањем дебљине сендвич композита дошло би до смањења вредности померања.

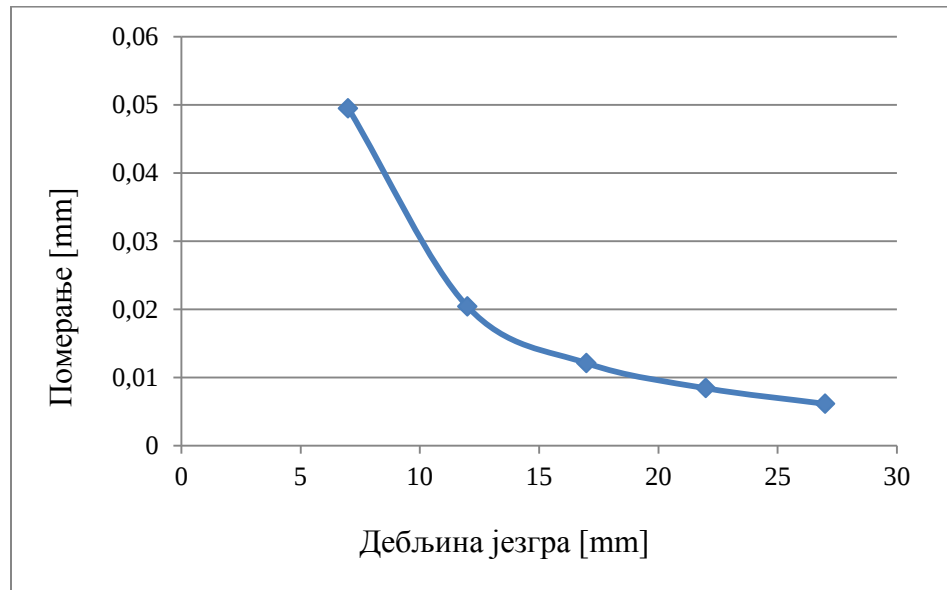


График 7.2.1.1. Утицај дебљине језгра сендвич композита на величину померања

Исто тако, са повећањем дебљине језгра долази до смањења VonMises-ових напона (график 7.2.1.2).

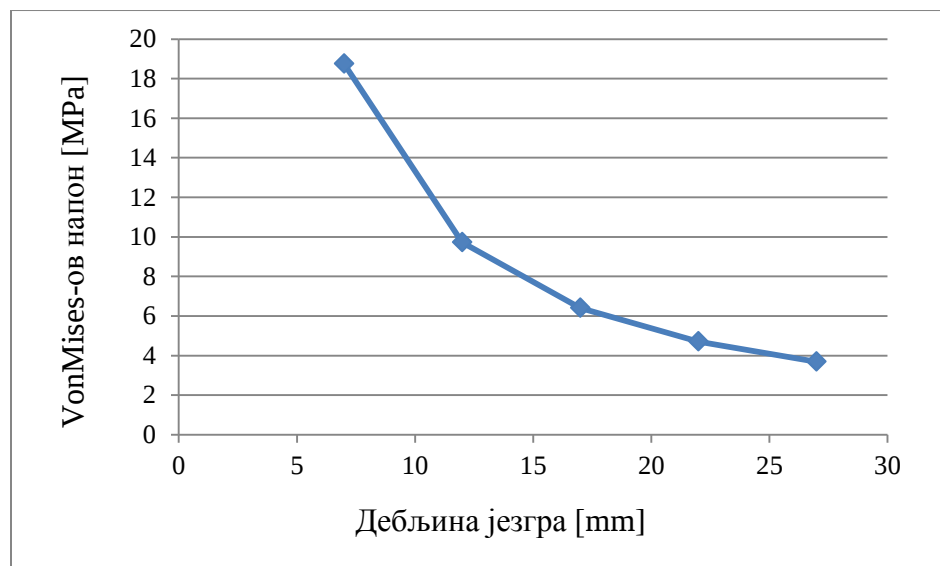


График 7.2.1.2. Утицај дебљине језгра сендвич композита на величину напона

7.2.2. Сендвич композит са језгром од HRH 10 Nomex-a (Aramid)

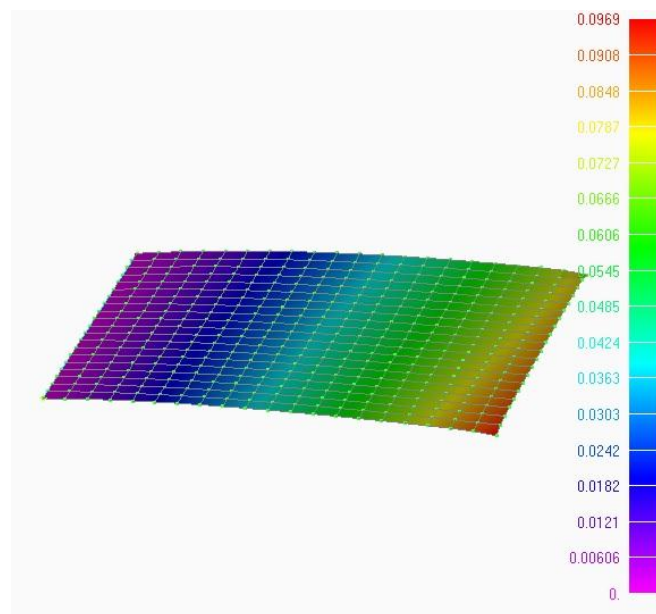
Као и у претходном примеру извршена је анализа призматичне плоче од сендвич композита димензија 50 x 50 x 7 mm. Плоча се састоји од површинских слојева које чине осам слојева угљеничних влакана/епокси смоле оријентација $[0^\circ/45^\circ]$ (са сваке стране по четири) и језгра које је израђено од HRH 10 Nomex-a. Дебљина једног слоја је 0,25 mm, док дебљина језгра износи 5 mm. Као и у претходном примеру, плоча је на једној страни уклештена док је на слободном крају оптерећена силом од 50 N и садржи по 20 елемената по дужини и ширини.

Карактеристике HRH 10 Nomex-a дате у табели 7.2.2.

Табела 7.2.2. Карактеристике материјала [19]

Материјал	HRH 10 Nomex
E_1 (MPa)	600
E_2 (MPa)	600
G_{12} (MPa)	115
G_{23} (MPa)	69
ν	0,20
ρ (kg/m ³)	144

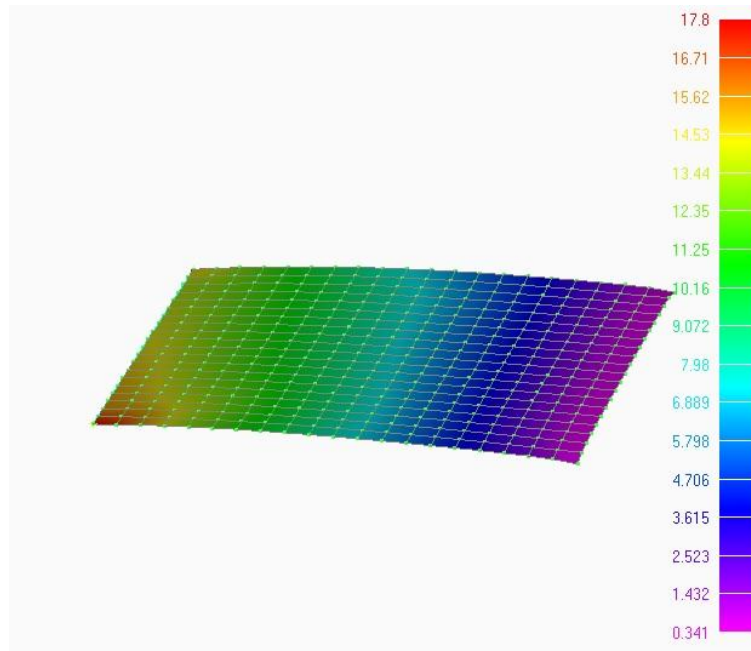
Добијене вредности максималних померања (T2 Translation) су приказане на слици 7.2.2.1.



Слика 7.2.2.1. Добијене вредности померања сендвич плоче у вертикалној равни (T2 Translation)

Са слике се може закључити да вредност максималног померања износи 0,0969 mm.

Добијене вредности VonMises-ових напона за најоптерећенији слој, у овом случају Lam Ply 1 су приказане на слици 7.2.2.2.



Слика 7.2.2.2. Вредности VonMises-ових напона у најоптерећенијем слоју плоче (Lam Ply 1)

Као и у претходном случају, са повећањем дебљине саћастог језгра код сендвич композита поново долази до смањења померања (график 7.2.2.1).

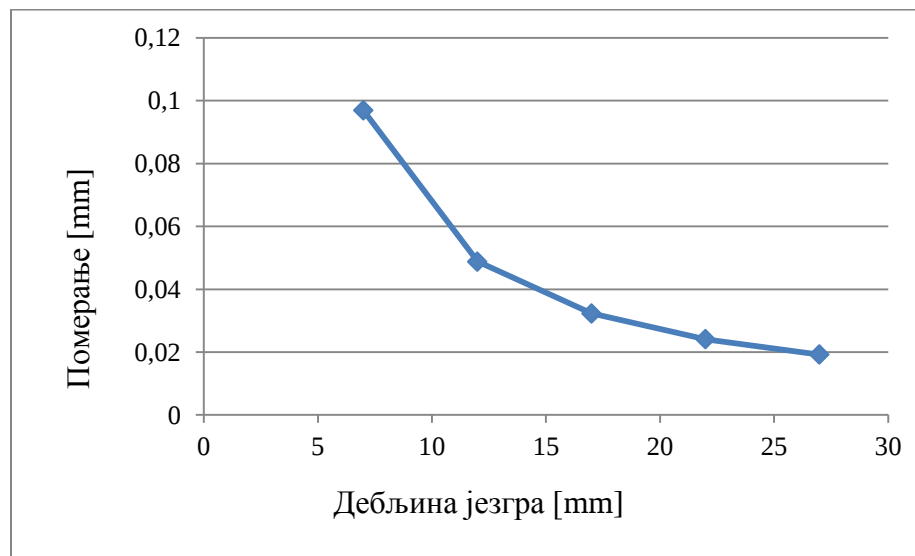


График 7.2.2.1. Утицај дебљине језгра сендвич композита на величину померања

Као и код сендвич композита са 3003 Al језгром, такође долази до смањења VonMises-ових напона када се повећава дебљина језгра (график 7.2.2.2).

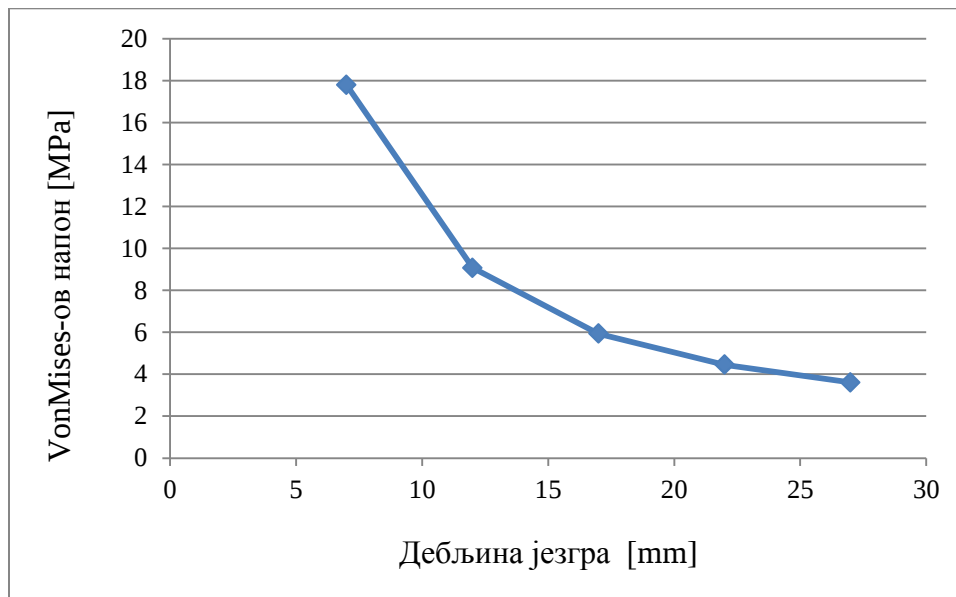


График 7.2.2.2. Утицај дебљине језгра сендвич композита на величину напона

7.3. Упоредивање ламината са сендвич композитима

За ламинатне, сендвич композите са језгром од 3003 Al и сендвич композите са језгром од HRN 10 Nomex је коришћена иста укупна дебљина слојева која износи 7 mm. Са графика 7.3.1 се може видети да ламинати имају мање померање од сендвич композита при деловању силе од 50 N.

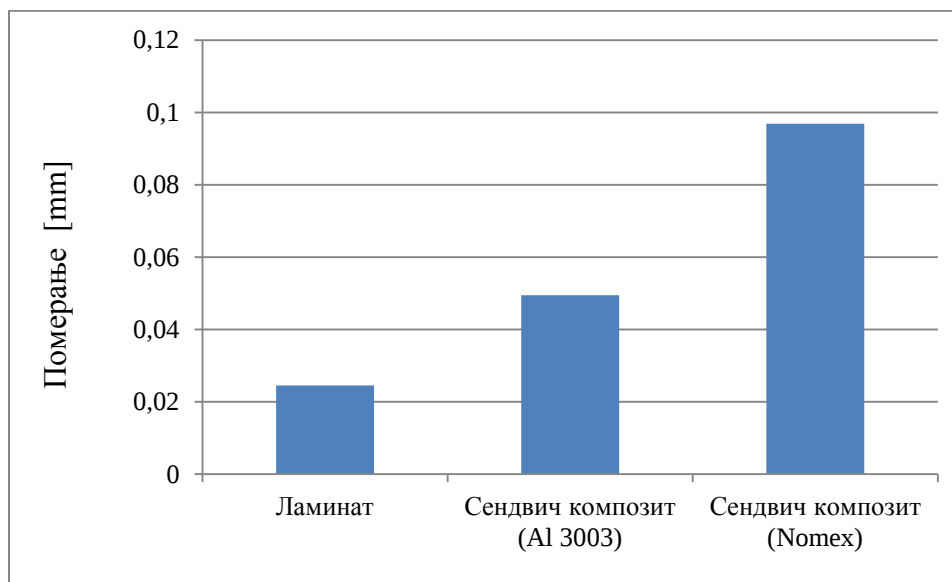


График 7.3.1. Упоредивање померања код ламината и сендвич композита

Слична ситуација је и код VonMises-ових напона. На графику 7.3.2 се може видети да су VonMises-ови напони знатно мањи код ламината.

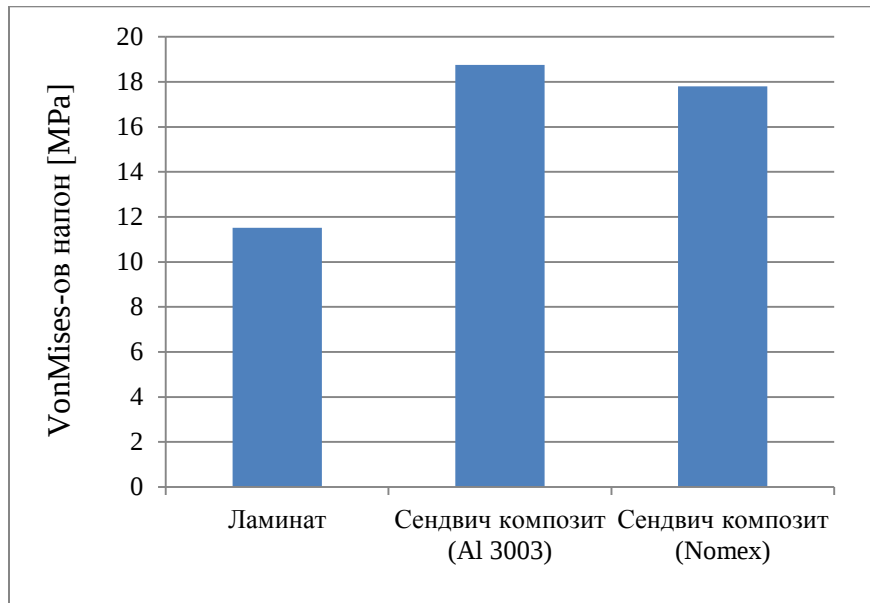


График 7.3.2. Упоређивање VonMises-ових напона код ламината и сендвич композита

7.4. Упоређивање маса ламинатних и сендвич композита

На графику 7.4.1. су приказане вредности израчунатих маса за ламинатне и сендвич композите.

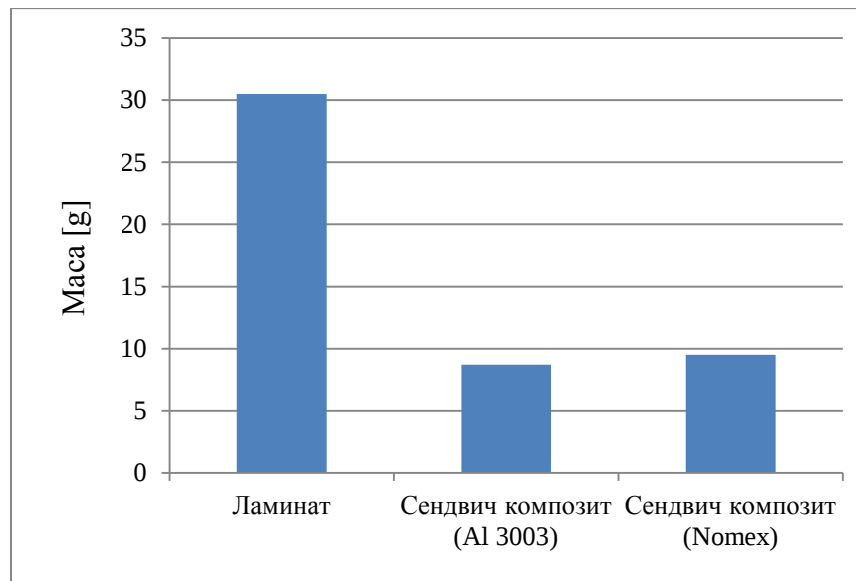


График 7.4.1. Упоређивање маса ламинатних и сендвич композита

Са графика се може закључити да ламинати имају знатно већу масу од сендвич композита.

8. Закључак

У сталном истраживању материјала који би били лаки, а да поседују велику отпорност и модул еластичности, учињени су многи напори који су довели до технолошког развоја савремених материјала. Те критеријуме су испунили композитни материјали. Предност композита је та што се код њих најчешће користе најбоље особине саставних материјала и често се постижу такве особине које саставни материјали појединачно уопште не поседују. Такође, предност композитних материјала, у односу на класичне материјале, је висока вредност специфичне чврстоће и специфичног модула, што доприноси изради делова знатно мање масе, што је веома важно тамо где је маса делова од великог значаја.

У овом раду, моделирање и структурна анализа плоче је извршена у софтверу Femap v11 са NX Nastran-ом. Измоделирана је ламинатна плоча, као и плоче од сендвич композита које су истих димензија, али различитих материјала. Оне су на крају подвргнуте оптерећењу и извршена је анализа напонско-деформационог стања.

На основу добијених резултата може се закључити да ламинатна плоча боље подноси оптерећење на савијање од сендвич композита и да самим тим има мање померање. Исто тако VonMises-ови напони су знатно мањи код ламината у поређењу са сендвич композитима.

Са повећањем дебљине језгра сендвич композита, долази до знатног смањења померања и смањења VonMises-ових напона. Упоређујући сендвич композите са језгром од 3003 Al и језгром од HRN 10 Nomex (Aramid), може се закључити да сендвич композити са језгром од 3003 Al имају мање вредности померања, док сендвич композити са језгром од Nomex-а имају мање вредности VonMises-ових напона.

При анализи резултата, треба узети у обзир све предности и мане споменутих материјала. Ламинати у поређењу са сендвич композитима имају добру носивост, ниске трошкове производње и обезбеђују добру херметичност. С друге стране, сендвич композити имају боља структурна својства и знатно мању масу.

9. Литература

- [1] Јовановић М., Лазић В., Адамовић Д., Ратковић Н.: „Машински материјали“, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2003.
- [2] Јовановић М., Лазић В., Арсић Д.: „Наука о материјалима“, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2017.
- [3] <https://ironlady003.wordpress.com/2013/09/12/znacaj-podela-i-vrste-materijala/>, приступљено јула 2019.
- [4] <https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/>, приступљено јула 2019.
- [5] <http://www.plastikainfo.com/tehnologija/kompozitni-materijali-materijali-budunosti>, приступљено јула 2019.
- [6] Ђорђевић З.: „Композитне конструкције“, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2018.
- [7] International Journal of Mechanical and production Engineering: „Composite materials – history, types, fabrication techniques, advantages and application“, Kakatiya Institute of Technology & Science, India, 2017.
- [8] <https://www.merlinarchery.co.uk/unic-laminated-mongolian-bow.html>., приступљено јула 2019.
- [9] <https://www.indiamart.com/proddetail/carbon-fiber-kevlar-cloth-6331477397.html>., приступљено јула 2019.
- [10] <https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/3199/820/veca-efikasnost-vetrotrubina-uz-lopatice-pokrivene-tkaninom>., приступљено јула 2019.
- [11] Reddy V. B., Jensen A., Laird G.: „Composite Laminate Modeling“, Handbook for Femap, NX Nastran and LS-DYNA Users, Predictive Engineering, Portland Oregon, 2015.
- [12] <https://www.fsb.unizg.hr/kmb/200/230/kmb234.htm>., приступљено јула 2019.
- [13] <https://www.ceneje.si/Izdelek/2172573/sporti-na-prostem/modelarstvo/modelarski-rezervni-deli-oprema/toolcraft-2051201-aramidna-vlakna-805-tex-145-gm3-20-m>., приступљено јула 2019.
- [14] Бајић Д.: „Композитни материјали“, Скрипта у електронској форми, Машински факултет Подгорица, 2010.
- [15] Антић М.: „Композитни материјали“, Скрипта у електронској форми, Београд, 2016.

- [16] Rolewicz B. M.: „Structural Analysis Using NX Nastran 9.0“, Kennedy Space Center (KSC), Major: Mechanical Engineering, Program: Structural or Fluids Analysis, 2014.
- [17] <http://pc.pcpres.rs/tekst.php?id=6973>, приступљено септембра 2019.
- [18] <http://feaforall.com/why-do-fea-engineers-use-1d-2d-3d-elements/>, приступљено септембра 2019.
- [19] Zenkert D., Bitzer T.: „Honeycomb sandwich design technology“, London, 2000.