

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Методе прорачуна у развоју производа

Број индекса: 359/2015

Викторија С. Јанковић

**Моделирање и структурна анализа елемената
редуктора израђених од композитних материјала**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. ванред. проф. др Зорица Ђорђевић - ментор

2. _____ - члан

3. _____ - члан

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да уради:

1. Увод,
2. Преглед литературе,
3. Основна својства, врсте и карактеристике композитних материјала,
4. Примена композитних материјала за израду елемената редуктора,
5. Прорачун и моделирање елемената редуктора израђених од композитних материјала,
6. Прорачун напона и деформација зупчаника редуктора израђених од композитних материјала применом МКЕ,
7. Закључак.

Препоручена литература:

- [1] В. Николић, Машински елементи, Крагујевац, 2004.
- [2] S. R. Dharmadhikari, S. G. Mahakalkar, J. P. Giri, N. D. Khutafale. Design and Analysis of Composite Drive Shaft using ANSYS and Genetic Algorithm A Critical Review, International Journal of modern Engineering Research, 2013.
- [3] S. Senthilvelan and R. Gnanamoorthy, Effect of rotational speed on the performance of unreinforced and glass fiber reinforced Nylon 6 spur gears, Materials and Desing, 2007.
- [4] K. Mao, W. Li, C. J. Hooke, D. Walton, Friction and wear behavior of acetal and nylon gears, Wear, 2009.

Резиме

У овом раду је моделиран редуктор у софтерском пакету Autodesk Inventor, након чега је вршена анализа зупчастих парова. Анализа се врши ради утврђивања вредности напона. У првом делу рада дата су основна својства композитних материјала, основни појмови елемената редуктора, описане су аналитичка и нумеричка метода прорачуна елемената редуктора израђених од композитних материјала. На крају рада дати су резултати нумеричке анализе зупчастих парова.

Кључне речи: Редуктор, зупчасти парови, композитни материјали, Autodesk Inventor.

Abstract

In this paper the Reducer in the Autodesk Inventor software package is modeled, after which the analysis of the toothed pairs was performed. The analysis is performed to determine the voltage value. In the first part of the paper, basic properties of composite materials are given, basic terms of the elements of the gear units, the analytical and numerical methods of calculating the elements of gear units made of composite materials are described. At the end of the paper the results of the numerical analysis of the toothed pairs are given.

Садржај

1. Увод	6
2. Преглед литературе	8
3. Основна својства, врсте и карактеристике композитних материјала.....	9
3.1 Матрице композитних материјала	13
3.2 Влакна композитних материјала	14
3.3 Облици оштећења композитних материјала	16
4. Примена композитних материјала за израду елемената редуктора	18
4.1 Композитни зупчаници	18
4.2 Композитна вратила	20
4.3 Композитни лежаји	22
4.4 Кућишта зупчастих преносника	24
5. Прорачун и моделирање елемената редуктора израђених од композитних материјала	25
5.1 Полазни подаци	25
5.2 Прорачун зупчастог пара 1-2	25
5.2.1 Прорачун носивости зупчаника	30
5.3 Прорачун зупчастог пара 3-4	30
5.3.1 Прорачун носивости зупчаника	34
5.4 Прорачун вратила 1.....	34
5.5 Прорачун вратила 2.....	37
5.6 Прорачун вратила 3.....	39
6. Анализа елемената редуктора израђених од композитних материјала методом МКЕ.....	42
6.1 Анализа зупчаника израђених од композитних материјала применом МКЕ	43
6.1.1 Анализа зупчастог пара 1-2	43
6.1.2 Анализа зупчастог пара 3-4	48
7. Закључак	51

1. Увод

Конструктивно решење редуктора, склопова и подсклопова, као и обликовање појединачних делова, одређује се на основу постављених захтева. Један од најважнијих захтева је функционалност [1]. Поред функционалности морају бити задовољени још неки захтеви, као што су: технолошки исправно конструктивно обликовање, економски захтеви и низ других мање или више значајних фактора.

Сам прорачун и моделирање редуктора захтевају од конструктора добро познавање проблематике машинских елемената, као и употребу каталога и таблица при прорачуну машинских делова. Редуктор је механички преносник снаге који служи да пренесе снагу са погонске на радну машину и да при томе број обртаја и обртни момент на вратилу погонске машине прилагоди броју обртаја и обртном моменту на вратилу радне машине [2]. Редуктор се састоји из низа делова, као што су: кућиште, зупчаници, вратила, клинови, лежајеви, заптивке, ускочници, спојнице и велики број других делова. Зупчаници могу бити различитих димензија, израђени од различитих материјала, могу бити израђени изједна са вратилом, а могу се и посебно причврстити на вратило. Вратила представљају носаче обртних машинских делова и служе за преношење снаге и обртних момената дуж осе обртања [1]. При избору материјала за вратила треба узети у обзир поред карактеристика чврстоће и отпорност материјала на концентracију напона, као и отпорност на корозију.

Композитни материјали се у великој мери користе као секундарни материјали при изради конструкција. Повећана крутост и мања маса, резултат су све веће примене композитних материјала у изради структурних елемената конструкција [3]. Композити могу бити: метално-метални, метално-керамички, метално-полимерни, керамичко-полимерни, керамичко-керамички, полимерно-полимерни и полимерно-метални. У табели 1.1 је наведена примена композитних материјала.

Табела 1.1 Примена композитних материјала [4]

Област технике	Компоненте	Захтеви
Аутомобилска индустрија	Погонска вратила, карданска вратила, клипови, клипњаче, осовинице клипова, дискови...	Висока специфична чврстоћа и крутост, топлотна проводљивост, отпорност на хабање, мали коефицијент топлотне експанзије.
Авио-индустрија	Кућишта редуктора, вратила, лопатице компресора, антене, спојни елементи...	Висока специфична чврстоћа и крутост, отпорност на хабање, отпорност на повишеним температурама, отпорност на замор.

У ужем смислу под композитним материјалом се подразумева спектар материјала који морају задовољити следеће услове:

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

Склопови од композитног материјала све су чешћи елементи у модерним техничким системима. Развојем поступака прераде и убрзаним развојем нових материјала, јављају се све веће могућности употребе зупчаника у масовној и малосеријској производњи. У поређењу са металним зупчаницима, јавља се недостатак искуствених вредности при пројектовању зупчаника од композитних материјала. Зупчаници од композитних материјала се користе у аутомобилској, текстилној и прехрамбеној индустрији, као и у многим другим областима [5].

При избору материјала за вратило мора се водити рачуна да се задовоље сви економски и технички услови. У последње време вратила се све више израђују од композитних материјала. Најчешће се за израду вратила користе карбонска влакна ојачана пластичном структуром.

Задатак композитних материјала јесте да се нађе компромисно решење између тежње да се добије минимална маса конструкције са максималним механичким карактеристикама.

2. Преглед литературе

Иако су композитни материјали били познати у различитим облицима током историје човечанства, сматра се да је историјски развој модерних композита почео 1937. године, а током Другог светског рата убрзан је развој композитних материјала. Ширењу тржишта композита је допринео развој нових и побољшаних смола, посебно за делове који раде при вишим температурама и где је потребна висока отпорност на корозију. Проналаском композитних материјала, примена композитних материјала долази до изражаја у производњи зупчаника. Примена композитних зупчаника представља релативно нову област примене у индустрији, тако да се још увек испитује који композитни материјали се могу користити при изради зупчаника, вратила и осталих делова редуктора као замена за челик. Постоји велики број радова који се баве овом проблематиком, од којих су неки приказани у овом раду.

У раду [14] је утврђено да погонска осовина на аутомобилу израђена од композитних материјала има предности у односу на погонску осовину од конвенционалног челика. Предности погонске осовине од композитних материјала су висока специфична крутост и снага те се све више употребљавају композитни материјали при изради.

У раду [6] је експериментом утврђено да се са додатком стаклених влакана полиамиду брже одводи топлота у односу на зупчанике израђене од чистог полиамида, чиме се повећава радни век зупчаника.

У раду [7] је вршено испитивање зупчаника израђених од различитих материјала. Гоњени зупчаник је израђен од полиамида, а погонски зупчаник од полиоксиметилена и обрнуто. Испитивањем је утврђено да се овом комбинацијом добија смањена отпорност на хабање.

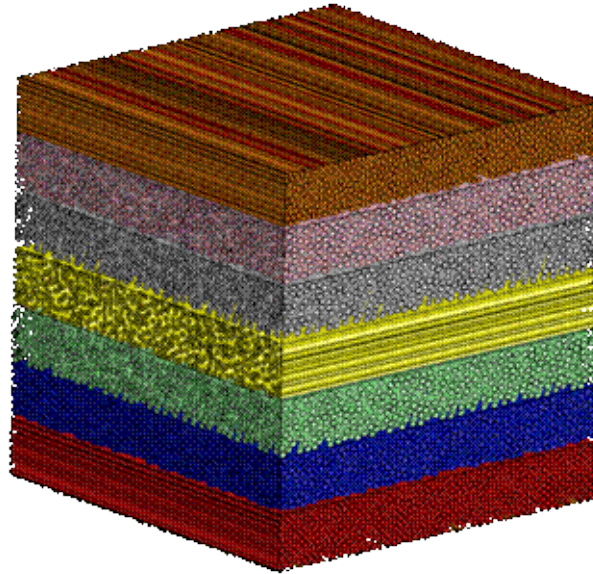
У раду [8] су вршена експериментална и нумеричка испитивања композитних вратила комбиновањем угљеничних и стаклених влакана. Утврђено је да угљенична влакна имају релативно високу чврстоћу и крутост и ниску густину, али имају већу цену која често ограничава њихову примену. Насупрот њима стаклена влакна имају нешто лошија механичка својства, али им је цена знатно повољнија. Комбиновањем угљеничних влакана добија се композит веће чврстоће и жилавости.

У раду [9] је вршено експериментално испитивање композитног шупљег вратила при различитим угловима оријентације влакана (90° и 45°) са алуминијумским ојачањем. Такође је вршена и анализа методом коначних елемената која је показала добро слагање са експерименталним резултатима.

У раду [10] је приказано како проценат апсорбоване воде утиче на механичка својства композитних материјала. Композитни материјали, за разлику од осталих, показују већу зависност од влажности ваздуха и температуре.

3. Основна својства, врсте и карактеристике композитних материјала

Композитни материјали су састављени из других готових материјала, углавном као њихова мешавина, како би заједно имали добра својства која не би имали одвојено (слика 3.1). Развој композитних материјала произишао је из потребе да се код многих конструкција постигне што већа јачина и крутост, а уз то смањи тежина конструкције.

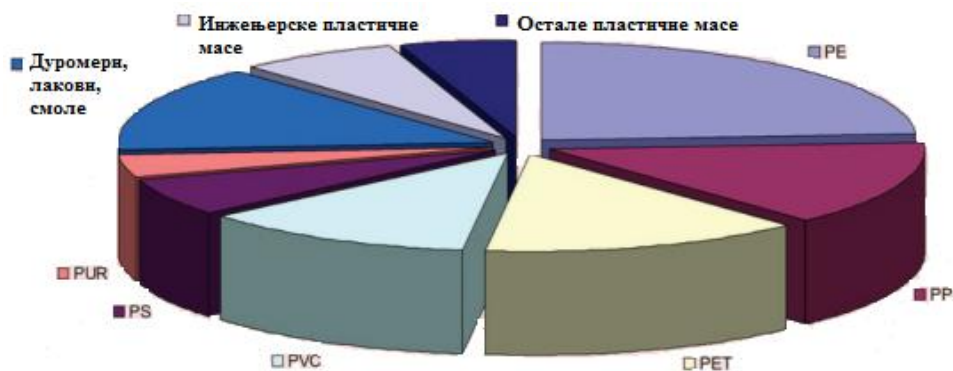


Слика 3.1. Модел композитног материјала [11]

Композитни материјали се деле у три основне групе [4]:

- полимерни композити (најчешће се користе, користе матрицу базирану на дуромерним полимерима и различите врсте влакана као ојачавачима);
- метални композити (све више се могу пронаћи у аутомобилској индустрији, ови композити користе метал као матрицу);
- керамички композити (користе се у срединама са високим температурама, ови композити користе керамичке материјале као матрице).

Полимери су природне, синтетичке и органске материје и материјали. Имају широку примену у бродоградњи, електроиндустрији, транспорту. На слици 3.2 је приказана примена коришћених полимерних материјала у свету 2002. године. Подељени су у три групе, а то су: пластомери, дуромери и еластомери.



Слика 3.2. Примена полимера у свету 2002. године

- Пластомери су најзаступљенија група полимера. За материјале из групе пластомера типично је да приликом загревања долази до њиховог омекшавања, што доводи до лакшег преобликовања. Приликом хлађења они поново отврдњавају стварајући кристалну структуру.
- Дуромери су полимерни материјали са густом структуром. Главна разлика између дуromера и пластомера јесте њихово понашање на високим температурама. Приликом прегрејавања код дуromера долази до разарања структуре и губитка почетних својстава. Приликом хлађења, за разлику од пластомера, они се враћају у веома слично првобитно стање.
- Еластомери су група синтетичких и природних полимера чији су молекули међусобно повезани мањим бројем попречних физичких и хемијских веза. Карактеришу их врло мала тврдоћа и велика еластичност [12].

Метални композити су композити код којих је матрица метална. Као материјали матрице могу се користити разни метали попут суперлегура, титанових легура, као и алуминијумских легура. Значајна предност металних матрица у односу на полимерне је могућност њихове примене при знатно вишим радним температурама, али њихова примена је ограничена, зато што су знатно скупљи од полимерних.

Керамички композити садрже керамичку матрицу додатно ојачану честицама. Према саставу разликујемо следеће керамичке композите: неоксидне и оксидне. Композити са керамичком матрицом се производе поступцима врућег пресовања, врућег изостатичког пресовања и синтеровања. Керамички композити се примењују углавном за механички и триболошки оптерећене делове изложене високим температурама, као што су на пример поједини делови мотора.

Композити се према грађи деле на [5]:

- композите ојачане честицама;
- композите ојачане влакнима;
- композите ојачане љускама;

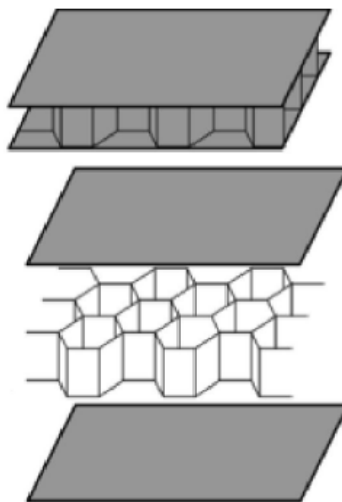
- композите ојачане зрнима;
- композите ојачане тракама-ламелама (сендвич композите).

Композити **ојачани честицама** састоје се од матрице у коју су смештене честице различитог облика, али приближно истих димензија. Величина и запремински удео честица знатно утичу на својства композита. Битна карактеристика честица је да су оне по својој природи невлакнасте. Честице могу бити: сферне, кубне, тетрагоналне, плочасте или неправилног облика. Најпознатији композити из ове групе су кермети[5].

Композити **ојачани влакнима** се добијају убацивањем влакана у меку матрицу. Матрица преноси силу са влакана на влакно, обезбеђује пластичност и жилавост као и способност обликовања, док влакна преносе оптерећење. Чврстоћа композита ојачаних влакнима зависи од чврстоће влакана и њихове оријентације, односа дужине и пречника влакана, као и од запреминског удела влакана у композиту. Са повећањем запреминског удела влакана у композиту, расту његова чврстоћа и крутост.

Структурни композити су састављени из хомогеног и композитног материјала чија својства не зависе само од својства конструктивних материјала, већ и од геометријског распореда елемената конструкције. Структурни композити се деле на сендвич конструкције и ламинате [13].

Сендвич конструкције (слика 3.3) се састоје из сложених тродимензионалних додатака, језгра намењеног за повећање чврстоће и крутости. Језгра су са обе стране везана за облогу. Сендвич конструкције примену налазе при изradi кровова, подова, зидова, врата. Такође, веома често се користе и у аутомобилској индустрији.



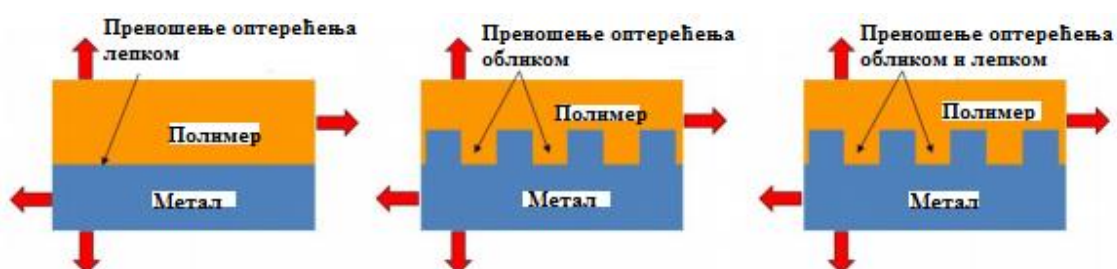
Слика 3.3. Сендвич конструкција [13]

Ламинати су израђени од слојева различитих врста, карактеристика и дебљина. Ламинати су слојеви материјала слагани и међусобно повезани органским лепком. Лепљени ламинати имају малу масу, добру ударну жилавост, корозиону отпорност и изолациона својства. Шперплоча је ламинат 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 [5].

Производња делова од композита се може извести ињекционим ливењем, вучењем-екструзијом и пресовањем. Поступак ињекционог ливења се односи на сендвич конструкције, пресовање на плочасте облике, а вучење-екструзија се користи за израду делова константног попречног пресека [4].

Спојеви композитних материјала (слика 3.4) могу се поделити у две групе: механичке и адхезивне спојеве. Механички спојеви преносе оптерећења обликом, адхезивни спојеви користе разне врсте лепка како би спојили два дела. Уз механичке и адхезивне спојеве често се користи и комбинација механичко-адхезивних спојева.



Слика 3.4. Спојеви полимер-метал (адхезивни, механички и механичко-адхезивни спој)

Предности композитних материјала [15]:

- висока чврстоћа;
- висок модул еластичности;
- мала густина;
- висока специфична чврстоћа;
- отпорност на корозију;
- дужи век трајања;
- пригушење;
- лако састављиви делови.

Недостаци композитних материјала [15]:

- висока цена;
- спора производња;
- запаљивост;

- осетљивост на температуру;
- осетљивост на влагу;
- слабо познавање у стручним круговима.

3.1 Матрице композитних материјала

Својства композита зависе од врсте материјала матрице и ојачавача. Својства матрице најчешће одређују и својства композита, као и ограничења у примени. У случају изложености композита хемијским утицајима или утицајима околине, матрица је она која је прва изложена смањењу механичких својстава [5]. Матрица има задатак да:

- држи ојачаваче заједно;
- преноси оптерећења на ојачаваче;
- штити ојачаваче од спољних утицаја;
- штити композит од утицаја атмосфере;
- даје спољни изглед композиту.

У табели 3.1 су дате предности и недостаци материјала матрице код композитних материјала [16].

Табела 3.1. Предности и недостаци материјала матрице

Материјал матрице	Предности	Недостаци
Полиестер	- једноставан за употребу; - ниска цена.	- умерена механичка својства; - високе вредности стезања приликом отврдњавања; - ограничен век трајања; - високе емисије честица приликом отврдњавања у отвореним калупима.
Епоксиди	- висока механичка својства; - висока отпорност на продор честица; - лака употреба; - ниске вредности скупљања код отврдњавања.	- висока цена; - склон корозији.

Задатак ојачавача је да осигура високу чврстоћу, високи модул еластичности и отпорност на хабање композита. Матрица се израђује од термоактивних смола које могу бити епоксидне, полиестарске и фенолне, а ојачавајућа влакна могу бити: стаклена, арамидна, угљенична, од бора и неких других материјала [4].

3.2 Влакна композитних материјала

У поизводњи елемената од композитних материјала користи се неколико врста влакана. Влакна која се најчешће употребљавају при изради елемената од композитних материјала су: стаклена, арамидна и угљенична.

Стаклена влакна (слика 3.5) су најстарија и најчешће коришћена влакна. Направљена су од врло финих стаклених нити. Одликују се малом тежином, добром отпорношћу на притисак и на динамичка напрезања. Чврстоћа и крутост су им нешто мањи у односу да угљенична и арамидна влакна, али су знатно јефтинија. Постоји неколико врста стаклених влакана која се користе при изради елемената од композитног материјала, а то су: A-glass, AR-glass, C-glass, D-glass, E-glass, ECR-glass, R-glass, S-glass, S-2-glass. Најчешће коришћена стаклена влакна су E-glass и S-glass.

E-glass стаклена влакна одликују се високом чврстоћом и крутошћу, ниском ценом, незапаљивошћу, релативно ниском густином, отпорношћу на високим температурама, отпорношћу на влагу, итд. Недостаци E-glass стаклених влакана су низак модул еластичности, релативно мала отпорност на замор материјала.

S-glass стаклена влакна пружају најбоља својства од свих врста стаклених влакана као што су: висока затезна чврстоћа, одлична отпорност на високе температуре, високу отпорност на ударе и ударна оптерећења.



Слика 3.5. Стаклена влакна

Арамидна влакна (слика 3.6) су веома ефикасна влакна, са молекулима који су грађени од релативно крутих полимерних ланаца. Ти молекули су повезани снажном водониковом везом која врло ефикасно преноси механичко оптерећење, па тиме омогућује коришћење ланаца релативно мале молекулске масе.

Најчешће коришћено арамидно влакно је кевлар. Одликује се високом затезном чврстоћом, у односу на своју тежину, и отпорношћу на ударе и абразију. Недостатак кевлара је што се тешко реже.



Слика 3.6. Арамидна влакна

Угљенична влакна (слика 3.7) су направљена од угљеничних кристала. Према уделу угљеника у молекулској структури разликујемо анизотропна и изотропна угљенична влакна. Најчешће се употребљавају анизотропна угљенична влакна са графитном структуром угљеника која се називају графитна влакна. Графитна влакна се користе за ојачавање композита.

Угљенична влакна се одликују врло високим односом чврстоће и тежине, високом крутошћу, отпорношћу на корозију, електричном проводљивошћу, отпорношћу на замор материјала, незапаљивошћу, самоподмазивошћу као и одличном изолацијом на електромагнетно поље. Недостаци угљеничних влакана су то што они захтевају посебну опрему и велико искуство код коришћења и знатно су скупља у односу на стаклена и арамидна влакна.



Слика 3.7. Угљенична влакна

У табели 3.2 је приказано поређење својства стаклених, арамидних и угљеничних влакана [4].

Табела 3.2 Поређење својства влакана од различитих материјала

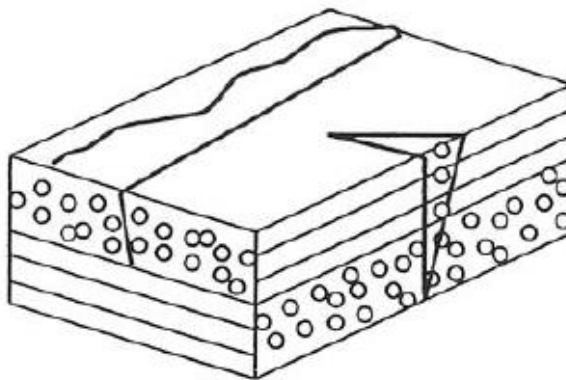
Својства	Стаклена влакна	Арамидна влакна	Угљенична влакна
Густина	Лоша	Идеална	Идеална
Затезна чврстоћа	Добра	Одлична	Идеална
Крутост	Добра	Одлична	Идеална
Отпорност материјала на замор	Одлична-Идеална	Идеална	Одлична
Отпорност на абразију	Добра	Идеална	Лоша
Отпорност на високе температуре	Идеална	Добра	Идеална
Отпорност на влагу	Одлична	Добра	Одлична
Цена	Одлична	Добра	Лоша

3.3 Облици оштећења композитних материјала

Развој оштећења у композитним материјалима је комплексна појава, а основне врсте оштећења које се јављају су: попречни лом матрице, одвајање влакна и матрице, лом влакана, попуштање везе влакно-матрица и раслојавање.

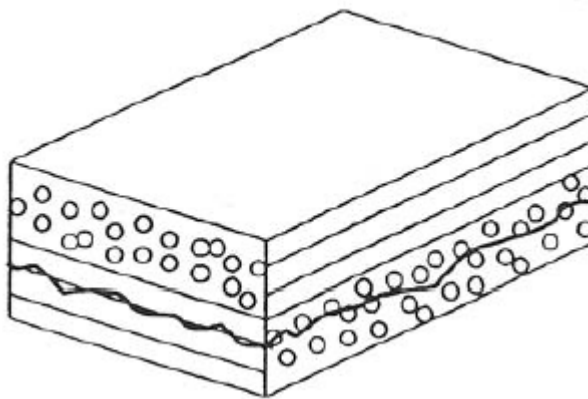
Разлог појаве лома може бити велики број шупљина које су настале током израде композита. Постоји најмање два типа лома ламината, а то су лом унутар слоја и лом између слојева.

Код лома унутар слоја микропукотине се јављају у влакнима или полимерној матрици ламината. Микропукотине у влакнима су кратке и случајно распоређене. При напрезању долази до лома влакана и прекидања везе влакно-матрица [5]. Микропукотине у матрици се спајају и протежу уздуж влакана као што је приказано на слици 3.8.



Слика 3.8. Шематски приказ лома ламината унутар слоја

Код лома између слојева лом почиње на ивицама ламината, на местима великих напрезања због којих се јављају микропукотине између слојева које се могу проширити кроз цео ламинат и поделити га на два дела (слика 3.9).



Слика 3.9. Шематски приказ лома ламината између слојева

Посебно су опасне грешке скривене између унутрашњих слојева ламината које визуелно није могуће уочити, а при њиховој појави долази до знатног смањења чврстоће.

4. Примена композитних материјала за израду елемената редуктора

Циљ производње композитних материјала је добијање карактеристика као што су: велика отпорност на замор, велика тврдоћа и повећана кртост. Са развојем технологије при изради елемената редуктора све чешће се челични материјали замењују композитним материјалима. Влакна композитних материјала могу бити: стаклена, угљенична, арамидна и борна влакна. Метална основа највише се користи за израду композитних материјала изложених високим температурама. Керамичка основа користи се за композитне материјале чија је употреба на високим температурама. Предност у односу на металну основу је у томе да је лакша [5].

Композитни материјали имају широку примену. Све чешће се примењују у машинству за израду зупчаника, вратила, лежаја, заштитног поклопца, кућишта редуктора, дизалица, руке робота, цеви, радијалних пнеуматика,... Примењују се у грађевинарству, аутомобилској и авио индустрији, бродоградњи (стаклена влакна која се користе за јахте), спорту као материјали нових технологија (голф штапови, тениски рекети, скије), ракетној и нуклеарној техници, медицини, железничкој и војној индустрији.

Редуктори су неизоставни елементи већине машина у данашње време, било по питању смањења броја обртаја или повећања обртног момента. Служе за пренос обртног момента са погонског вратила на гоњено. Разликујемо више врста редуктора, а то су: планетарни редуктори, пужни редуктори, варијатори и зупчасти редуктори [1].

Елементи редуктора се обично израђују од металних материјала. Међутим, у данашње време се све чешће користе композитни материјали при изради делова редуктора. Елементи редуктора који се најчешће израђују од композитних материјала су: зупчаници, вратила, клинови и лежаји. Стандардни делови редуктора се израђују од метала.

4.1 Композитни зупчаници

Композитни зупчаници имају низ предности у односу на челичне зупчанике. Имају релативно малу масу, отпорни су на корозију, јефтинији су од челичних зупчаника, имају способност рада без подмазивања и имају широку примену у прехранбеној, аутомобилској, текстилној и многим другим индустријама [17].

Применом композитних материјала смањује се бука при раду. Повећање процента влакана у основном материјалу доводи до смањења буке и вибрација. Полимерни и композитни зупчаници се углавном примењују због мале масе, ниске цене коштања и смањене буке. Међутим, полимери имају мању затезну чврстоћу, мању кртост и велику остепљивост на повећане температуре у односу на челичне зупчанике. Применом одговарајућих влакана механичке карактеристике се могу знатно побољшати. Додавањем влакана основном материјалу продужава се век трајања зупчаника.

Јачина звука при раду зупчаника зависи од врсте материјала. Применом композитних материјала при изради зупчаника смањује се бука при раду. Материјал композитних зупчаника је мекан што апсорбује ударе.

Повећање процената влакана у основном материјалу утиче на пригушење буке и вибрација. Додавањем влакана основном материјалу, може се повећати отпорност зупчаника на лом. Употребом угљеничних влакана, повећава се тврдоћа бока зубаца, што доводи до смањења температуре, али због нешто мањих адхезивних сила између основног материјала и угљеничних влакана долази до појава микро пукотина на боку зубаца. Код стаклених влакана због већих адхезивних сила између основног материјала и влакана, нема појаве микро пукотина [4].

На слици 4.1 су приказани зупчаници од композитних материјала.



Слика 4.1. Зупчаници од композитног материјала

Проналаском синтетичких полимера, примена полимерних материјала долази до изражаја код израде зупчаника. Нарочито је велика примена пластомера који су данас најзаступљенија врста полимера са уделом од око 90%.

Препоручени пластомери за производњу полимерних зупчаника најчешће су: полиамид (РА), поликарбонат (РС), полиимид (РІ), поли (окси-метилен) (РОМ), полиетилен врло високе молекуларне масе и сл. [18].

На слици 4.2. су приказани зупчаници од полиамида (РА) ојачани угљеничним влакнима. Додавањем влакана полиамиду је могуће утицати на коефицијент трења, а самим тим и на хабање материјала у додиру [12].



Слика 4.2. Композитни зупчаник

4.2 Композитна вратила

Вратила представљају носаче обртних машинских делова и служе за преношење обртних момената и снаге дуж осе обртања. На вратилима се налазе елементи за пренос снаге као што су: зупчаници, ланчаници, каишници, спојнице, итд. Вратила омогућавају обртно кретање ових елемената као и њихово спајање са елементима за пренос снаге који се налазе на другим вратилима. Према облику вратила се деле на: права, коленаста, брегаста, карданска и гупка вратила.

При избору материјала за вратила потребно је узети у обзир отпорност материјала на концентracију напона и отпорност на корозију. Најчешће се за израду вратила користе карбонска влакна ојачана пластичном структуром. Такође, за израду вратила погодна је и комбинација стаклених или графитних влакана и полиестерске смоле.

Основне карактеристике металних и композитних материјала које се најчешће користе при изради вратила дате су у табели 4.1. Ознаке у табели су: E_1 - модул еластичности у подужном правцу, E_2 - модул еластичности у попречном правцу, G - модул клизања, ν - Поасонов коефицијент, ρ - густина материјала.

Табела 4.1. Карактеристике металних и композитних материјала

Материјал	E_1 , МПа	E_2 , МПа	G , МПа	ν	ρ , $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Челик	210000	210000	83000	0,3	7830
Алуминијум	70000	70000	28000	0,28	2600
Карбонска vlakна/епокси смола	131600	8200	4500	0,281	1550
Стаклена vlakна/епокси смола	43300	14700	4400	0,3	2100
Арамидна vlakна/епокси смола	81800	51000	1510	0,31	1380
Борна vlakна/ епокси смола	211000	24100	6900	0,36	1967

Композитна вратила користе се за преношење широког спектра оптерећења насталих услед преношења торзионог момента. Управо из тог разлога имају широку примену.

Вршена су бројна испитивања како би се пронашло оптимално решење за обликовање и анализу композитних вратила са различитим материјалима и оријентацијом влакана. Испитивањима је утврђено да композитна вратила имају знатно мању масу у односу на челична вратила. Такође је испитивањима утврђено да оријентација влакана композитног вратила знатно утиче на обртни момент [15]. Начин оријентације влакана дат је на слици 4.3.



Слика 4.3. Начин оријентације влакана [15]

Приликом конструисања композитног вратила морају се испунити одређени услови. Ти услови се најчешће односе на врсте оптерећења, габаритне мере као и буџет којим се располаже. Приликом конструисања такође треба обратити пажњу на врсту

оптерећења којом ће вратило бити изложено, вратило мора преносити обртни момент, а да при томе не дође до лома вратила [4].

Композитна вратила могу бити пуног попречног пресека или шупља. Пуна вратила омогућавају пренос већих обртних момената. Спољашњи део вратила преноси највећи део оптерећења, док унутрашњи спојеви преносе мањи део, па је употреба шупљих вратила најбоље решење.

Композитна вратила могу бити израђена од стаклених, угљеничних и арамидних влакана. Избор влакана зависи од жељене чврстоће, крутости и отпорности на корозију. Угљенична и арамидна влакна имају већу кртост од стаклених влакана, али су она знатно јефтинија. Угљенична влакна имају веома добре карактеристике као што су: велика кртост, чврстоћа, отпорност на корозију и електрична проводност [14].

Предности композитних вратила у односу на метална вратила су: мања тежина, већа чврстоћа, добра отпорност на корозију што смањује трошкове одржавања и продужује радни век.

Недостаци композитних вратила у односу на метална вратила су: сложеније конструисање, скупа производња, сложена и скупа поправка.

Приликом конструисања композитног вратила веома је битно пажњу усмерити на врсту оптерећења којом ће вратило бити оптерећено. Композитна вратила се конструишу тако да би могла пренети обртни момент, а да не дође до лома вратила.

На слици 4.4. је приказано вратило од композитног материјала, где је цилиндрични део израђен од композитног материјала, а прирубница је направљена од метала [4].



Слика 4.4. Вратило од композитног материјала

4.3 Композитни лежаји

Избор материјала за израду клизног лежаја зависи од режима експлоатације и то од специфичног притиска и карактера брзине клизања. Приликом доношења одлуке о избору материјала посебно се води рачуна о прорачуну конструкције лежаја, увећању зазора, о искошењима која се јављају при експлоатацији и монтажи, а посебан акценат се ставља на начин довођења мазива. Материјали за лежаје морају испунити следеће услове:

- Могућност одвођења топлоте;
- Мали коефицијент трења;
- Висока отпорност на хабање лежишта;
- Отпорност на ударе при експлоатацији и монтажи, као и могућност пригушења вибрација;
- Способност рада без подмазивања;
- Отпорност на корозију;
- Цена.

Поједини метали и њихове легуре су близу испуњења свих ових захтева, али не у потпуности. Решење овог проблема и постизање најбољег материјала, било би да се комбинују два материјала са комплементарним особинама. Композитни материјали омогућавају флексибилност у дизајну, лаку израду делова сложене геометрије, отпорни су на удар, отпорни су на замор, лаки су и имају добру хемијску отпорност. Композитни материјали посебно су значајни за делове чије је функционисање повезано са релативним кретањем елемената у контакту од којих су најпознатија клизна лежишта.

Лежаји се веома често израђују од композитног материјала са циљем побољшања готовог производа. Композитни лежаји имају низ предности у односу на металне лежаје као што су: одлична својства отпорности на хабање, мали коефицијент трења, димензијску стабилност, дуг век трајања [19].

Лажаји за висока оптерећења израђују се од термопластичних материјала или синтетичких композита. Код термопластичних полимера поступак хлађења и загревања може се понављати више пута, што омогућава лако обликовање и накнадну поправку композита. Композити са термопластичном матрицом имају већу отпорност на удар и жилавост. Представници термопластичних везива су полиамид, полиетилен и политетрафлуоретилен. На слици 4.5. су приказани котрљајни лежаји од композитног материјала.



Слика 4.5. Лежаји од композитног материјала

На слици 4.6. је приказан клизни лежај од композитног материјала [20].



Слика 4.6. Лежиште од композитног материјала

4.4 Кућишта зупчастих преносника

Улога кућишта је осигурање положаја осовина, вратила и зупчаника у свим условима рада, заштита унутрашњих делова преносника од околних утицаја, задржавање мазива у преноснику, одвођење топлоте и пригушивање вибрација насталих од стране зупчаника, вратила и лежаја.

Кућишта, према технологији израде, се деле на заварена (користе се код мањих серија и за појединачну производњу) и ливена (користе се код већих серија).

Материјали за израду кућишта су:

- Легуре лаких метала користе се код мањих преносника;
- Челични лив и сиви лив најчешће су коришћени материјали код ливених кућишта;
- Конструкцијски челици користе се код заварених кућишта. Код ових челика битно је да су им својства и хемијски састав погодни за заваривање.

5. Прорачун и моделирање елемената редуктора израђених од композитних материјала

У раду је из датих каталога изабран редуктор одговарајућих параметара и извршен прорачун елемената.

5.1 Полазни подаци

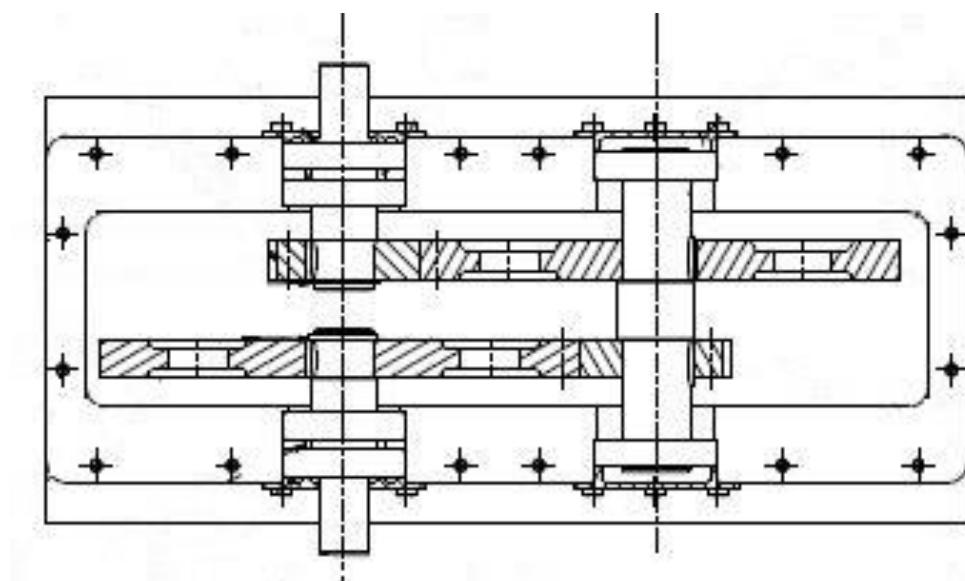
Снага погонске машине: $P_{pm} = 10 \text{ kW}$

Број обртаја погонског вратила: $n_{pvt} = 2400 \text{ min}^{-1}$

Број обртаја гоњеног вратила радне машине: $n_{vrm} = 280 \text{ min}^{-1}$

Врста радне машине: Кран

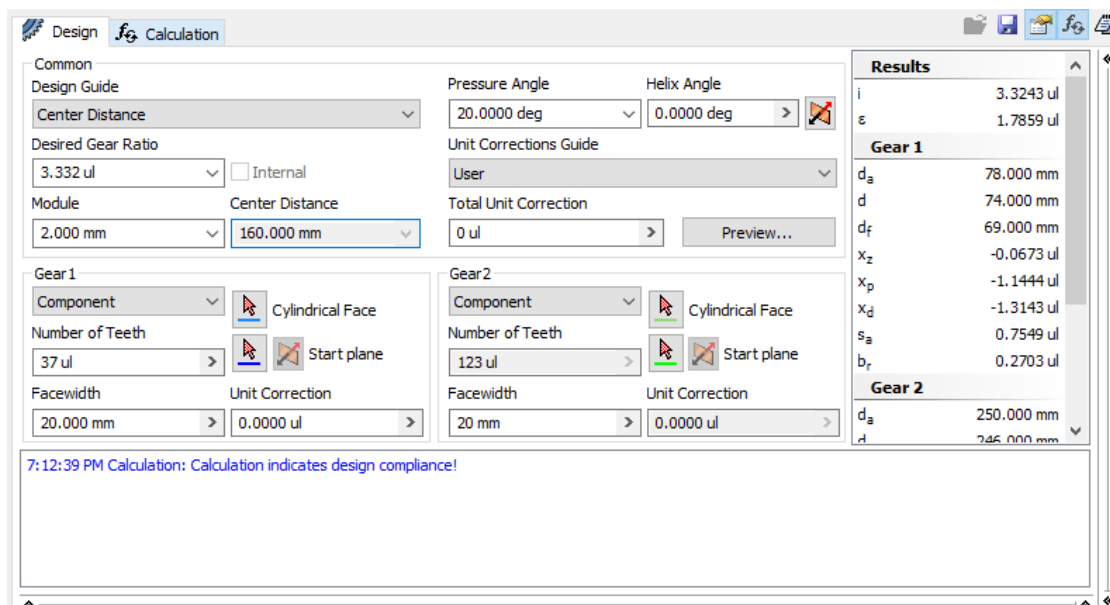
Врста погонске машине: ЕМ



5.2 Прорачун зупчастог пара 1-2

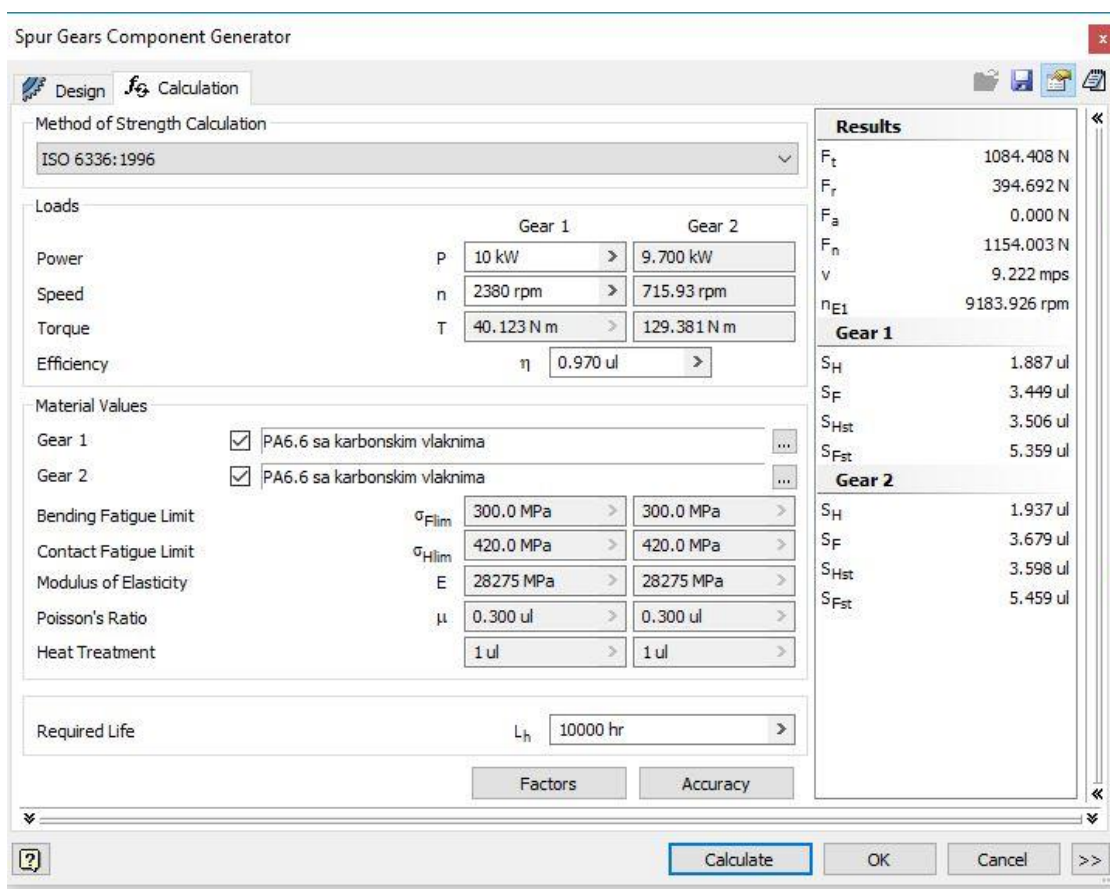
Прорачун цилиндричних зупчаника је извршен у софтверском пакету Autodesk Inventor. Autodesk Inventor поседује модул Desingn Accelerator који служи за прорачун машинских елемената.

На слици 5.1 је приказан изглед прозора Desingn Accelerator у који се уносе: број зупца зупчаника, модул, осно растојање, ширина зупчаника, итд.



Слика 5.1.- Прозор Desingn Accelerator

На слици 5.2 су приказана поља у прозору Desingn Accelerator у које је потребно унети следеће параметре: снагу, број обртаја, обртни момент, материјал зупчастог пара и карактеристике материјала.



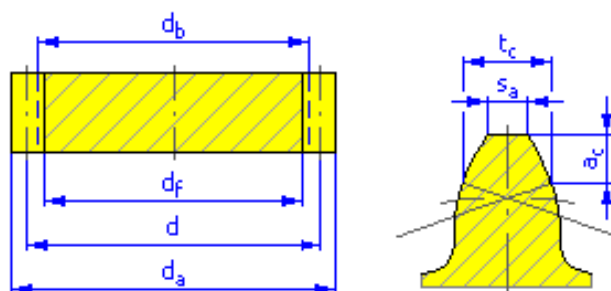
Слика 5.2- Прозор Desingn Accelerator

У табели 5.1 су дати основни подаци зупчастог пара 1-2

Табела 5.1.- Подаци зупчастог пара 1-2

		Gear 1	Gear 2
Type of model		Component	Component
Number of Teeth	z	37 ul	123 ul
Unit Correction	x	0.0000 ul	0.0000 ul
Pitch Diameter	d	74.000 mm	246.000 mm
Outside Diameter	d_a	78.000 mm	250.000 mm
Root Diameter	d_f	69.000 mm	241.000 mm
Base Circle Diameter	d_b	69.537 mm	231.164 mm
Work Pitch Diameter	d_w	74.000 mm	246.000 mm
Facewidth	b	20.000 mm	20.000 mm
Facewidth Ratio	b_r	0.2703 ul	0.0813 ul
Addendum	a^*	1.0000 ul	1.0000 ul
Clearance	c^*	0.2500 ul	0.2500 ul
Root Fillet	r_f^*	0.3500 ul	0.3500 ul
Tooth Thickness	s	3.142 mm	3.142 mm
Tangential Tooth Thickness	s_t	3.142 mm	3.142 mm
Chordal Thickness	t_c	2.774 mm	2.774 mm
Chordal Addendum	a_c	1.495 mm	1.495 mm
Chordal Dimension	W	27.606 mm	83.153 mm
Chordal Dimension Teeth	z_w	5.000 ul	14.000 ul
Dimension Over (Between) Wires	M	78.927 mm	251.045 mm
Wire Diameter	d_M	3.500 mm	3.500 mm
Limit Deviation of Helix Angle	F_β	0.0110 mm	0.0110 mm
Limit Circumferential Run-out	F_r	0.0210 mm	0.0280 mm
Limit Deviation of Axial Pitch	f_{pt}	0.0075 mm	0.0085 mm
Limit Deviation of Basic Pitch	f_{pb}	0.0070 mm	0.0080 mm
Virtual Number of Teeth	z_v	37.000 ul	123.000 ul
Virtual Pitch Diameter	d_n	74.000 mm	246.000 mm
Virtual Outside Diameter	d_{an}	78.000 mm	250.000 mm
Virtual Base Circle Diameter	d_{bn}	69.537 mm	231.164 mm
Unit Correction without Tapering	x_z	-0.0673 ul	-2.6671 ul
Unit Correction without Undercut	x_p	-1.1444 ul	-6.1744 ul
Unit Correction Allowed Undercut	x_d	-1.3143 ul	-6.3444 ul
Addendum Truncation	k	0.0000 ul	0.0000 ul
Unit Outside Tooth Thickness	s_a	0.7549 ul	0.8135 ul
Tip Pressure Angle	α_a	26.9372 deg	22.3832 deg

На слици 5.3 су приказане одговарајуће величине из табеле 5.1.



Слика 5.3- Цилиндрични зупчасти пар 1-2

У табели 5.2 су дата оптерећења зупчастог пара 1-2

Табела 5.2- Оптерећења

		Gear 1	Gear 2
Power	P	10.000 kW	9.700 kW
Speed	n	2380.00 rpm	715.93 rpm
Torque	T	40.123 N m	129.381 N m
Efficiency	η	0.970 ul	
Radial Force	F_r	394.692 N	
Tangential Force	F_t	1084.408 N	
Axial Force	F_a	0.000 N	
Normal Force	F_n	1154.003 N	
Circumferential Speed	v	9.222 mps	
Resonance Speed	n_{E1}	9183.926 rpm	

У табели 5.3 су дате карактеристике материјала зупчастог пара 1-2. Материјал зупчаника 1 и 2 је полиамид 6.6 ојачан карбонским влакнима.

Табела 5.3- Карактеристике материјала

Gear 1	Gear 2		
		PA6.6 sa karbonskim vlaknima	PA6.6 sa karbonskim vlaknima
Ultimate Tensile Strength	S_u	275 MPa	275 MPa
Yield Strength	S_y	260 MPa	260 MPa
Modulus of Elasticity	E	28275 MPa	28275 MPa
Poisson's Ratio	μ	0.300 ul	0.300 ul
Bending Fatigue Limit	σ_{Flim}	300.0 MPa	300.0 MPa
Contact Fatigue Limit	σ_{Hlim}	420.0 MPa	420.0 MPa
Hardness in Tooth Core	JHV	210 ul	210 ul
Hardness in Tooth Side	VHV	615 ul	615 ul
Base Number of Load Cycles in Bending	N_{Flim}	3000000 ul	3000000 ul
Base Number of Load Cycles in Contact	N_{Hlim}	50000000 ul	50000000 ul
Wöhler Curve Exponent for Bending	q_F	6.0 ul	6.0 ul
Wöhler Curve Exponent for Contact	q_H	10.0 ul	10.0 ul
Type of Treatment	type	1 ul	1 ul

У табели 5.4 су приказани фактори расподеле оптерећења, а у табели 5.5 су приказани фактори спрезања.

Табела 5.4.- Фактори расподеле оптерећења

Application Factor	K_A	1.200 ul	
Dynamic Factor	K_{Hv}	1.550 ul	1.550 ul
Face Load Factor	$K_{H\beta}$	1.017 ul	1.012 ul
Transverse Load Factor	$K_{H\alpha}$	1.000 ul	1.000 ul
One-time Overloading Factor	K_{AS}	1.000 ul	

Табела 5.5.- Фактори спрезања

Elasticity Factor	Z_E	70.322 ul	
Zone Factor	Z_H	2.495 ul	
Contact Ratio Factor	Z_ϵ	0.859 ul	
Single Pair Tooth Contact Factor	Z_B	1.026 ul	1.000 ul
Life Factor	Z_N	1.000 ul	1.000 ul
Lubricant Factor	Z_L	0.937 ul	
Roughness Factor	Z_R	1.000 ul	
Speed Factor	Z_v	0.995 ul	
Helix Angle Factor	Z_β	1.000 ul	
Size Factor	Z_X	1.000 ul	1.000 ul
Work Hardening Factor	Z_W	1.000 ul	

У табели 5.6 су приказана фактори оптерећења.

Табела 5.6.- Фактори оптерећења

Form Factor	Y_{Fa}	2.446 ul	2.173 ul
Stress Correction Factor	Y_{Sa}	1.674 ul	1.850 ul
Teeth with Grinding Notches Factor	Y_{Sag}	1.000 ul	1.000 ul
Helix Angle Factor	Y_β	1.000 ul	
Contact Ratio Factor	Y_ϵ	0.670 ul	
Alternating Load Factor	Y_A	1.000 ul	1.000 ul
Production Technology Factor	Y_T	1.000 ul	1.000 ul
Life Factor	Y_N	1.000 ul	1.000 ul
Notch Sensitivity Factor	Y_δ	1.609 ul	1.685 ul
Size Factor	Y_X	1.000 ul	1.000 ul
Tooth Root Surface Factor	Y_R	1.000 ul	

На основу задатих вредности и прорачунате носивости израчунат је степен сигурности који задовољава минималне вредности (Табела 5.7).

Табела 5.7.- Степени сигурности

Factor of Safety from Pitting	S_H	1.887 ul	1.937 ul
Factor of Safety from Tooth Breakage	S_F	3.449 ul	3.679 ul
Static Safety in Contact	S_{Hst}	3.506 ul	3.598 ul
Static Safety in Bending	S_{Fst}	5.359 ul	5.459 ul
Check Calculation	Positive		

5.2.1 Прорачун носивости зупчаника

На основу вредности добијених извештајем из софтверског пакета Autodesk Inventor, приказане у предходним табелама, рачуна се вредност радног напона на боку зупца зупчаника.

$$\sigma_H = Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\epsilon \cdot \sqrt{\frac{F_t}{d_1 \cdot b} \cdot \frac{u+1}{u} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}} \quad (5.1)$$

$$\sigma_H = 2,495 \cdot 70,322 \cdot 0,859 \cdot \sqrt{\frac{1084,408}{74 \cdot 20} \cdot \frac{3,33+1}{3,33} \cdot 1,2 \cdot 1,55 \cdot 1,017 \cdot 1}$$

$$\sigma_H = 202,306 \text{ N/mm}^2$$

Вредност критичног напона рачуна се на основу израза:

$$[\sigma_H] = \sigma_{Hlim} \cdot Z_{NT} \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V \cdot Z_W \cdot Z_X \quad (5.2)$$

$$[\sigma_H] = 420 \cdot 1 \cdot 0,937 \cdot 1 \cdot 0,995 \cdot 1 \cdot 1$$

$$[\sigma_H] = 391,572 \text{ N/mm}^2$$

Вредност радног напона у подножју зупца се рачуна на основу израза:

$$\sigma_{F1} = Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_\epsilon \cdot \frac{F_t}{b \cdot m} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{F1} = 2,446 \cdot 1,674 \cdot 0,670 \cdot \frac{1084,408}{20 \cdot 2} \cdot 1,2 \cdot 1,550 \cdot 1,012 \cdot 1$$

$$\sigma_{F1} = 139,995 \text{ N/mm}^2$$

Вредност критичног напона у подножју зупца се рачуна на основу израза:

$$[\sigma_F] = \sigma_{Flim} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{\delta rel T} \cdot Y_{Rel T} \cdot Y_X \quad (5.4)$$

$$[\sigma_F] = 300 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,609 \cdot 1,685 \cdot 1$$

$$[\sigma_F] = 813,349 \text{ N/mm}^2$$

5.3 Прорачун зупчастог пара 3-4

У табели 5.7 су дати параметри зупчастог пара 3-4.

Табела 5.7.- Параметри зупчастог пара

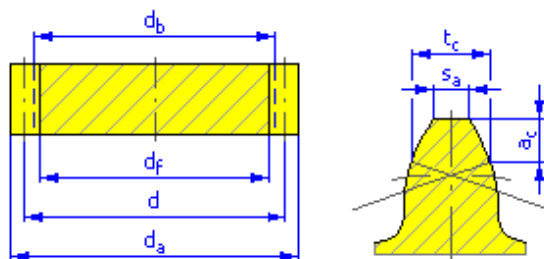
Gear Ratio	i	2.5556 ul
Desired Gear Ratio	i_{in}	2.5510 ul
Module	m	2.500 mm
Helix Angle	β	0.0000 deg
Pressure Angle	α	20.0000 deg
Center Distance	a_w	160.538 mm
Product Center Distance	a	160.000 mm
Total Unit Correction	Σx	0.2180 ul
Circular Pitch	p	7.854 mm
Base Circular Pitch	p_{tb}	7.380 mm
Operating Pressure Angle	α_w	20.5214 deg
Contact Ratio	ϵ	1.7386 ul

У табели 5.8 су приказани основни подаци зупчастог пара 3-4.

Табела 5.8.- Основни подаци зупчастог пара

Gear 3	Gear 4		
Type of model		Component	Component
Number of Teeth	z	36 ul	92 ul
Unit Correction	x	0.0000 ul	0.2180 ul
Pitch Diameter	d	90.000 mm	230.000 mm
Outside Diameter	d_a	94.986 mm	236.077 mm
Root Diameter	d_f	83.750 mm	224.840 mm
Base Circle Diameter	d_b	84.572 mm	216.129 mm
Work Pitch Diameter	d_w	90.303 mm	230.774 mm
Facewidth	b	20.000 mm	20.000 mm
Facewidth Ratio	b_r	0.2222 ul	0.0870 ul
Tooth Thickness	s	3.927 mm	4.324 mm
Tangential Tooth Thickness	s_t	3.927 mm	4.324 mm
Chordal Thickness	t_c	3.468 mm	3.818 mm
Chordal Addendum	a_c	1.862 mm	2.344 mm
Chordal Dimension	W	34.472 mm	81.088 mm
Chordal Dimension Teeth	z_w	5.000 ul	11.000 ul
Dimension Over (Between) Wires	M	96.683 mm	237.789 mm
Wire Diameter	d_M	4.500 mm	4.500 mm
Limit Deviation of Helix Angle	F_β	0.0110 mm	0.0110 mm
Limit Circumferential Run-out	F_r	0.0210 mm	0.0280 mm
Limit Deviation of Axial Pitch	f_{pt}	0.0085 mm	0.0090 mm
Limit Deviation of Basic Pitch	f_{pb}	0.0080 mm	0.0085 mm
Virtual Number of Teeth	z_v	36.000 ul	92.000 ul
Virtual Pitch Diameter	d_n	90.000 mm	230.000 mm
Virtual Outside Diameter	d_{an}	94.986 mm	236.077 mm
Virtual Base Circle Diameter	d_{bn}	84.572 mm	216.129 mm
Unit Correction without Tapering	x_z	-0.0368 ul	-1.7323 ul
Unit Correction without Undercut	x_p	-1.0859 ul	-4.3613 ul
Unit Correction Allowed Undercut	x_d	-1.2558 ul	-4.5312 ul
Unit Outside Tooth Thickness	s_a	0.7554 ul	0.7839 ul
Tip Pressure Angle	α_a	27.0813 deg	23.7225 deg

На слици 5.4 су приказане одговарајуће величине из табеле 5.8.



Слика 5.4- Цилиндрични зупчасти пар 3-4

У табели 5.9 су дата оптерећења зупчастог пара 3-4.

Табела 5.9- Оптерећења

Gear 3	Gear 4		
Power	P	9.700 kW	9.409 kW
Speed	n	2380.00 rpm	931.30 rpm
Torque	T	38.919 N m	96.477 N m
Efficiency	h	0.970 ul	
Radial Force	F_r	322.646 N	
Tangential Force	F_t	861.975 N	
Axial Force	F_a	0.000 N	
Normal Force	F_n	920.381 N	
Circumferential Speed	v	11.215 mps	
Resonance Speed	n_{E1}	7891.201 rpm	

У табели 5.10 су дате карактеристике материјала зупчастог пара 3-4. Материјал зупчаника 3 и 4 је полиамид 6.6 ојачан карбонским влакнима.

Табела 5.10- Карактеристике материјала

Gear 3	Gear 4		
		PA6.6 sa karbonskim vlaknima	PA6.6 sa karbonskim vlaknima
Ultimate Tensile Strength	S_u	275 MPa	275 MPa
Yield Strength	S_y	260 MPa	260 MPa
Modulus of Elasticity	E	28275 MPa	28275 MPa
Poisson's Ratio	μ	0.300 ul	0.300 ul
Bending Fatigue Limit	σ_{Flim}	300.0 MPa	300.0 MPa
Contact Fatigue Limit	σ_{Hlim}	420.0 MPa	420.0 MPa
Base Number of Load Cycles in Bending	N_{Flim}	3000000 ul	3000000 ul
Base Number of Load Cycles in Contact	N_{Hlim}	50000000 ul	50000000 ul
Wöhler Curve Exponent for Contact	q_H	10.0 ul	10.0 ul
Type of Treatment	type	1 ul	1 ul

У табели 5.11 су приказани фактори расподеле оптерећења, а у табели 5.12 су приказани фактори спрезања.

Табела 5.11.- Фактори расподеле оптерећења

Application Factor	K_A	1.200 ul	
Dynamic Factor	K_{Hv}	1.633 ul	1.633 ul
Face Load Factor	$K_{H\beta}$	1.018 ul	1.013 ul
Transverse Load Factor	$K_{H\alpha}$	1.000 ul	1.000 ul
One-time Overloading Factor	K_{AS}	1.000 ul	

Табела 5.12.- Фактори спрезања

Elasticity Factor	Z_E	70.322 ul	
Zone Factor	Z_H	2.460 ul	
Contact Ratio Factor	Z_ϵ	0.868 ul	
Single Pair Tooth Contact Factor	Z_B	1.034 ul	1.000 ul
Life Factor	Z_N	1.000 ul	1.000 ul
Lubricant Factor	Z_L	0.937 ul	
Roughness Factor	Z_R	1.000 ul	
Speed Factor	Z_v	1.007 ul	
Helix Angle Factor	Z_β	1.000 ul	
Size Factor	Z_x	1.000 ul	1.000 ul
Work Hardening Factor	Z_W	1.000 ul	

У табели 5.13 су приказана фактори оптерећења у подножју зупца.

Табела 5.13.- Фактори оптерећења

Form Factor	Y_{Fa}	2.454 ul	2.140 ul
Stress Correction Factor	Y_{Sa}	1.670 ul	1.883 ul
Teeth with Grinding Notches Factor	Y_{Sag}	1.000 ul	1.000 ul
Helix Angle Factor	Y_β	1.000 ul	
Contact Ratio Factor	Y_ϵ	0.681 ul	
Alternating Load Factor	Y_A	1.000 ul	1.000 ul
Production Technology Factor	Y_T	1.000 ul	1.000 ul
Life Factor	Y_N	1.000 ul	1.000 ul
Notch Sensitivity Factor	Y_δ	1.526 ul	1.612 ul
Size Factor	Y_x	1.000 ul	1.000 ul
Tooth Root Surface Factor	Y_R	1.000 ul	

На основу задатих вредности и прорачунате носивости израчунат је степен сигурности који задовољава минималне вредности (Табела 5.14).

Табела 5.14.- Степен сигурности

Factor of Safety from Pitting	S_H	2.214 ul	2.290 ul
Factor of Safety from Tooth Breakage	S_F	4.791 ul	5.148 ul
Static Safety in Contact	S_{Hst}	4.065 ul	4.204 ul
Static Safety in Bending	S_{Fst}	7.851 ul	7.984 ul
Check Calculation	Positive		

5.3.1 Прорачун носивости зупчаника

На основу вредности добијених извештајем из софтверског пакета Autodesk Inventor, приказане у предходним табелама, рачуна се вредност радног напона на боку зупца зупчаника.

$$\sigma_H = Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{F_t}{d_1 \cdot b} \cdot \frac{u+1}{u} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}} \quad (5.5)$$

$$\sigma_H = 2,460 \cdot 70,322 \cdot 0,868 \cdot \sqrt{\frac{861,975}{90 \cdot 20} \cdot \frac{2,55+1}{2,55} \cdot 1,2 \cdot 1,633 \cdot 1 \cdot 1,018}$$

$$\sigma_H = 173,159 \text{ N/mm}^2$$

Вредност критичног напона рачуна се на основу израза[1]:

$$[\sigma_H] = \sigma_{Hlim} \cdot Z_{NT} \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V \cdot Z_W \cdot Z_X \quad (5.6)$$

$$[\sigma_H] = 420 \cdot 1 \cdot 0,937 \cdot 1 \cdot 1,007 \cdot 1 \cdot 1$$

$$[\sigma_H] = 396,294 \text{ N/mm}^2$$

Вредност радног напона у подножју зупца се рачуна на основу израза:

$$\sigma_{F1} = Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_\varepsilon \cdot \frac{F_t}{b \cdot m} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad (5.7)$$

$$\sigma_{F1} = 2,454 \cdot 1,670 \cdot 0,681 \cdot \frac{861,975}{20 \cdot 2,5} \cdot 1,2 \cdot 1,663 \cdot 1 \cdot 1,013$$

$$\sigma_{F1} = 95,508 \text{ N/mm}^2$$

Вредност критичног напона у подножју зупца се рачуна на основу израза:

$$[\sigma_F] = \sigma_{Flim} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{\delta relT} \cdot Y_{RrelT} \cdot Y_X \quad (5.8)$$

$$[\sigma_F] = 300 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,526 \cdot 1,612 \cdot 1$$

$$[\sigma_F] = 737,973 \text{ N/mm}^2$$

5.4 Прорачун вратила 1

У табели 5.15 су дате карактеристике материјала вратила.

Табела 5.15.- Карактеристике материјала

Material		Karbonska vlakna/epoxi smola
Modulus of Elasticity	E	131600 MPa
Modulus of Rigidity	G	4500 MPa
Density	ρ	1550 kg/m ³

У табели 5.16 је дат приказ особина вратила.

Табела 5.16.- Приказ особина вратила

Include			
Yes	Density	ρ	1550 kg/m ³
Yes	Shear Displacement Ratio	β	1.188 ul
	Number of Divisions		1000 ul
	Mode of reduced stress		HMH

У табели 5.17 су дата оптерећења која делују на вратило: радијална сила, момент савијања, итд.

Табела 5.17.- Оптерећења

Index	Location	Radial Force				Torque
		Y	X	Size	Direction	
1	15 mm	0.000 N	1084.408 N	1084.408 N	90.00 deg	
2	15 mm	394.692 N		394.692 N		
3	15 mm					40.123 Nm
4	116 mm					40.123 Nm

Index	Location	Deflection				Deflection Angle
		Y	X	Size	Direction	
1	15 mm	11.895 microm	32.703 microm	34.799 microm	70. 01 deg	0.04 deg
2	15 mm	11.895 microm	32.703 microm	34.799 microm	70. 01 deg	0.04 deg
3	15 mm	11.895 microm	32.703 microm	34.799 microm	70. 01 deg	0.04 deg
4	116 mm	8.825 microm	24.243 microm	25.799 microm	250.00 deg	250.00 deg

У табели 5.18 су дате вредности сила отпора у ослонцима.

Табела 5.18.- Силе у ослоњцима

Index	Type	Locatin	Reaction Force				
			Y	X	Size	Direct.	Axi. For.
1	Fixed	50 mm	1102.007 N	3030. 781 N	3224.912 N	250.02 deg	
2	Free	69.5mm	708. 628 N	1946.373 N	2071.358 N	69.99 deg	

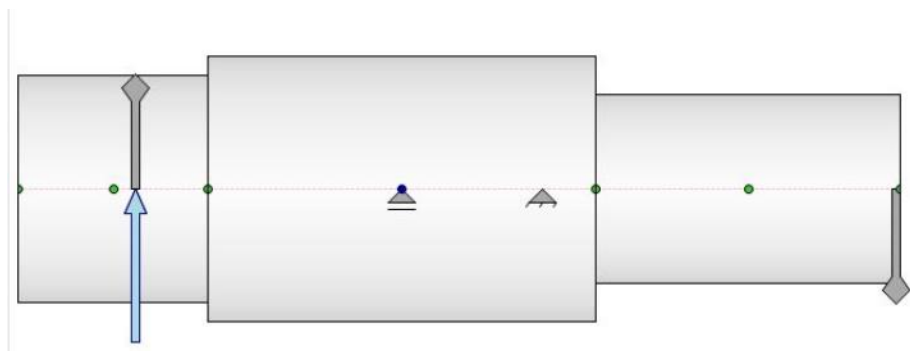
Type	Deflection				Deflection Angle
	Y	X	Size	Direction	
User	0.000 microm	0.000 microm	0.000 microm	241.21 deg	0.05 deg
User	0.000 microm	0.000 microm	0.000 microm	238.11 deg	0.00 deg

У табели 5.19. су дате вредности напона и деформација.

Табела 5.19.- Вредности напона и деформација

Length	L	116.000 mm
Mass	Mass	0.134 kg
Maximal Bending Stress	σ_B	9.594 MPa
Maximal Shear Stress	τ_s	2.153 MPa
Maximal Torsional Stress	τ	13.078 MPa
Maximal Tension Stress	σ_T	0.000 MPa
Maximal Reduced Stress	σ_{red}	22.652 MPa
Maximal Deflection	f_{max}	44.900 microm
Angle of Twist	φ	0.77 deg

На слици 5.5 је приказан распоред сила на вратилу 1.



Слика 5.5- Расподела сила на вратилу 1

5.5 Прорачун вратила 2

У табели 5.20 су дате карактеристике материјала.

Табела 5.20.- Карактеристике материјала

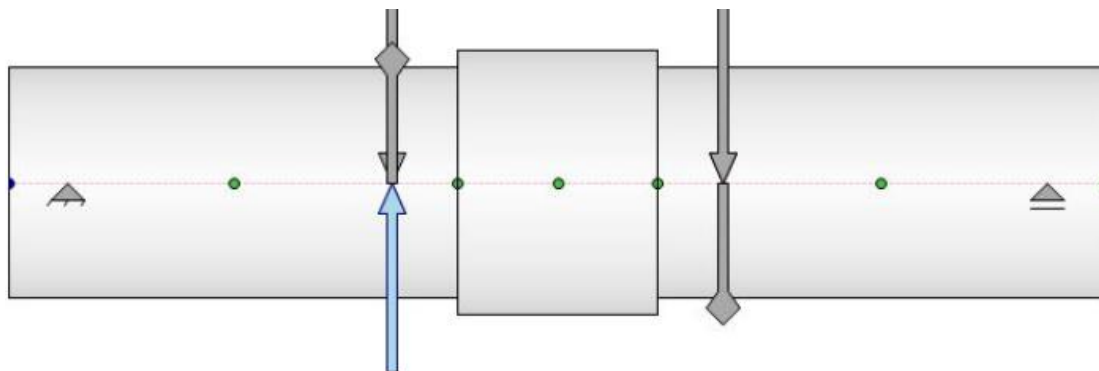
Material		Karbonska vlakna/epoxi smola
Modulus of Elasticity	E	131600 MPa
Modulus of Rigidity	G	4500 MPa
Density	ρ	1550 kg/m ³

У табели 5.21 су дате особине вратила.

Табела 5.21.- Особине вратила

Include			
Yes	Density	ρ	1550 kg/m ³
Yes	Shear Displacement Ratio	β	1.188 ul
	Number of Divisions		1000 ul
	Mode of reduced stress		HMH

На слици 5.6 је приказан распоред сила и момената на вратилу 2.



Слика 5.6.- Расподела сила и момената вратила 2

У табели 5.22 су дата оптерећења која делују на вратило: радијална сила, момент савијања, итд.

Табела 5.22.- Оптерећења

Index	Location	Radial Force				Torque
		Y	X	Size	Direction	
1	58 mm	0.000 N	2875.147 N	2875.147 N	90.00 deg	
2	58 mm	1046.468 N		1046.468 N		
3	58 mm					129.381 Nm
4	108 mm	0.000 N	1084.408 N	1084.408 N		
5	108 mm					129.381 Nm
6	108 mm	394.692 N		394.692 N		

Index	Location	Deflection				Deflection Angle
		Y	X	Size	Direction	
1	58 mm	17.539 microm	29.323 microm	34.168 microm	120.88 deg	0.03 deg
2	58 mm	17.539 microm	29.323 microm	34.168 microm	120.88 deg	0.03 deg
3	58 mm	17.539 microm	29.323 microm	34.168 microm	120.88 deg	0.03 deg
4	108 mm	14.413 microm	10.334 microm	17.735 microm	144.36 deg	0.03 deg
5	108 mm	14.413 microm	10.334 microm	17.735 microm	144.36 deg	0.03 deg
6	108 mm	14.413 microm	10.334 microm	17.735 microm	144.36 deg	0.03 deg

У табели 5.23 су дате вредности сила отпора у ослонцима.

Табела 5.23.- Силе у ослонцима

Index	Type	Locatin	Reaction Force				
			Y	X	Size	Direct.	Axi. For.
1	Fixed	9 mm	831.958 N	1564.213 N	1771.699 N	298.01 deg	
2	Free	157mm	611.764 N	226.526 N	652.356 N	339.68 deg	

Type	Deflection				Deflection Angle
	Y	X	Size	Direction	
User	0.000 microm	0.000 microm	0.000 microm	180.00 deg	0.02 deg

User	0.000 microm	0.000 microm	0.000 microm	180.00 deg	0.02 deg
------	--------------	--------------	--------------	------------	----------

У табели 5.24 су дате вредности напона и деформација.

Табела 5.24- Вредности напона и деформација

Length	L	166.000 mm
Mass	Mass	0.261 kg
Maximal Bending Stress	σ_B	20.622 MPa
Maximal Shear Stress	τ_s	1.841 MPa
Maximal Torsional Stress	τ	15.369 MPa
Maximal Tension Stress	σ_T	0.000 MPa
Maximal Reduced Stress	σ_{red}	33.823 MPa
Maximal Deflection	f_{max}	34.168 microm
Angle of Twist	φ	0.42 deg

5.6 Прорачун вратила 3

У табели 5.25 су дате карактеристике материјала вратила.

Табела 5.25.- Карактеристике материјала

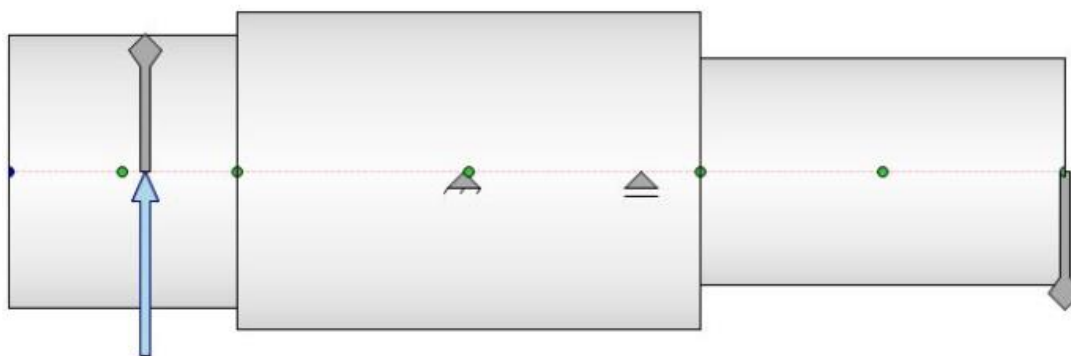
Material		Karbonska vlakna/epoxi smola
Modulus of Elasticity	E	131600 MPa
Modulus of Rigidity	G	4500 MPa
Density	ρ	1550 kg/m ³

У табели 5.26 је дат приказ особина вратила.

Табела 5.26.- Приказ особина вратила

Include			
Yes	Density	ρ	1550 kg/m ³
Yes	Shear Displacement Ratio	β	1.188 ul
	Number of Divisions		1000 ul
	Mode of reduced stress		HMH

На слици 5.6 је приказана расподела сила и момената вратила 3.



Слика 5.6.- Расподела сила и момената на вратилу 3

У табели 5.27 су дата оптерећења која делују на вратило. Радијална сила, момент савијања, итд.

Табела 5.27.- Оптерећења

Index	Locatin	Radial Force				Torque
		Y	X	Size	Direction	
1	15 mm	1046.468 N		1046.468 N		
2	15 mm	0.000 N	2875.147 N	2875.147 N	90.00 deg	
3	15 mm					320.723 N m
4	116 mm					320.723 N m

Index	Locatin	Deflection				Deflection Angle
		Y	X	Size	Direction	
1	15 mm	31.551 microm	86.707 microm	92.269 microm	70.00 deg	0.10 deg
2	15 mm	31.551 microm	86.707 microm	92.269 microm	70.00 deg	0.10 deg
3	15 mm	31.551 microm	86.707 microm	92.269 microm	70.00 deg	0.10 deg
4	116 mm	23.396 microm	64.277 microm	68.402 microm	250.00 deg	0.08 deg

У табели 5.28 су дате вредности сила отпора у ослонцима.

Табела 5.28.- Силе у ослонцима

Index	Type	Locatin	Reaction Force
-------	------	---------	----------------

			Y	X	Size	Direct.	Axi. For.
1	Fixed	50mm	2923.638 N	8035.667 N	8551.000 N	250.01 deg	
2	Free	69.5mm	1878.483 N	5160.520 N	5491.782 N	70.00 deg	

Type	Deflection				Deflection Angle
	Y	X	Size	Direction	
User	0.000 microm	0.000 microm	0.000 microm	246.54 deg	0.14 deg
User	0.000 microm	0.000 microm	0.000 microm	245.23 deg	0.00 deg

У табели 5.29 су дате вредности напона и деформација.

Табела 5.29.- Вредности напона и деформација

Length	L	116.000 mm
Mass	Mass	0.134 kg
Maximal Bending Stress	σ_B	25.440 MPa
Maximal Shear Stress	τ_s	5.708 MPa
Maximal Torsional Stress	τ	104.539 MPa
Maximal Tension Stress	σ_T	0.000 MPa
Maximal Reduced Stress	σ_{red}	181.068 MPa
Maximal Deflection	f_{max}	119.050 microm
Angle of Twist	φ	6.19 deg

6. Анализа елемената редуктора израђених од композитних материјала методом МКЕ

За решавања инжењерских проблема користе се разне методе, које се деле на:

- нумеричке;
- аналитичке и
- експерименталне.

У зависности од врсте проблема који решавамо, разликујемо следеће нумеричке методе:

- МКЕ- метода коначних елемената;
- МКР- метода коначних разлика;
- МКЗ- метода коначних запремина;
- МГЕ- метода граничних елемената.

Метода коначних елемената МКЕ је савремена нумеричка метода која се користи за прорачун машинских конструкција. МКЕ врши се анализа структура, рачунају ток флуида, температурна поља, итд.

Основни принципи на којима се заснива МКЕ, састоје се у подели разматраног подручја на коначан број мањих елемената, тако да се анализом појединих елемената, уз претпоставку да су међусобно повезани, анализира целина [11].

Процедура решавања проблема састоји се из следећих корака:

- Идентификација проблема;
- Дефинисање елемената;
- Формирање једначина елемената;
- Повезивање једначина елемената;
- Нумеричко решавање.

Основни кораци методе коначних елемената:

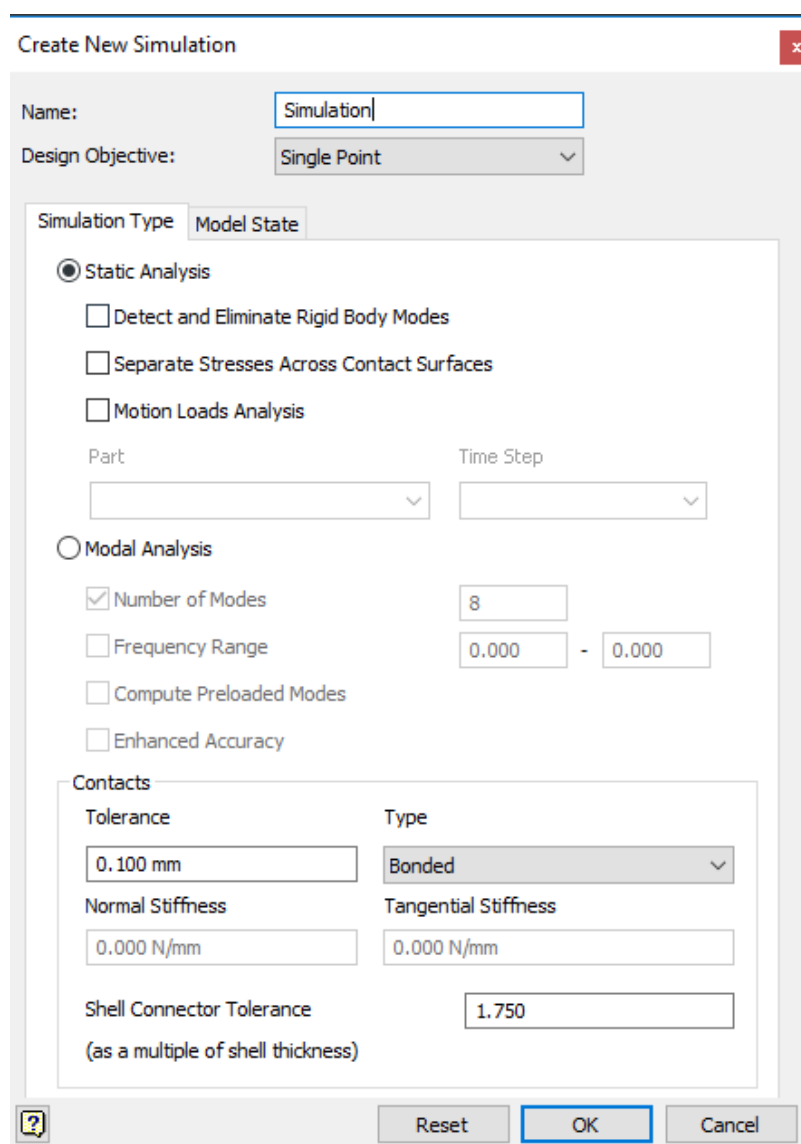
- Планирање;
- Предпроцесирање;
- Решавање;
- Постпроцесирање;
- Провера и анализа резултата.

6.1 Анализа зупчаника израђених од композитних материјала применом МКЕ

У овом делу рада се врши испитивање зупчаника израђених од материјала РА 6.6 ојачан карбонским влакнима. Испитивање напона зупчаника се врши у софтверском пакету Autodesk Inventor помоћу команде Stress Analysis.

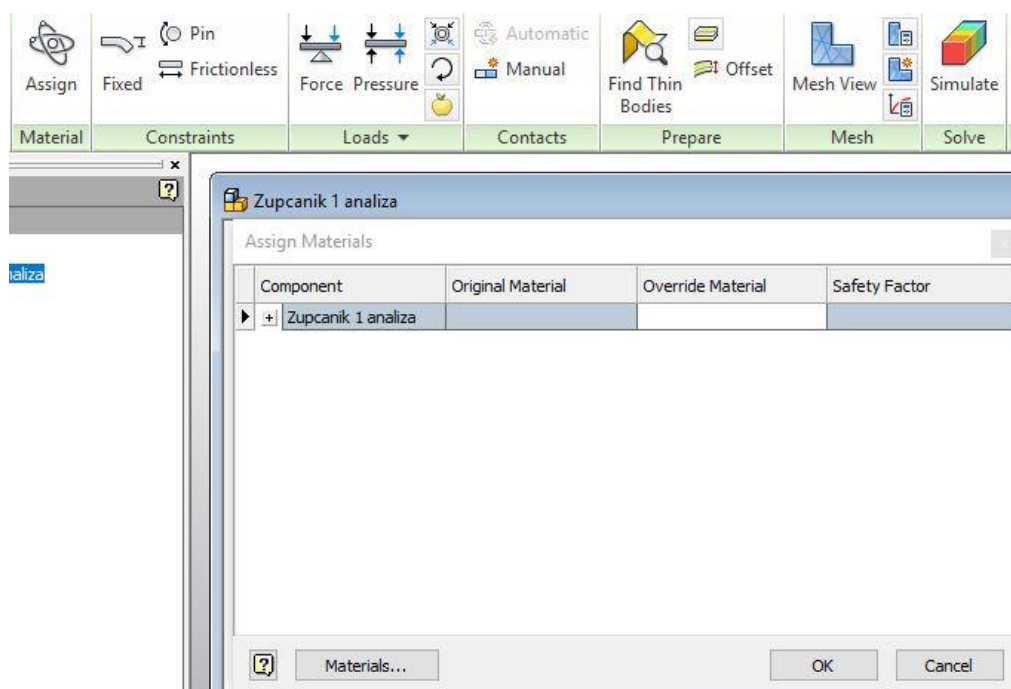
6.1.1 Анализа зупчастог пара 1-2

Кликом на палету алата Stress Analysis бира се команда Create Simulation у оквиру које се дефинише име и врста симулације, као што је приказано на слици 6.1.



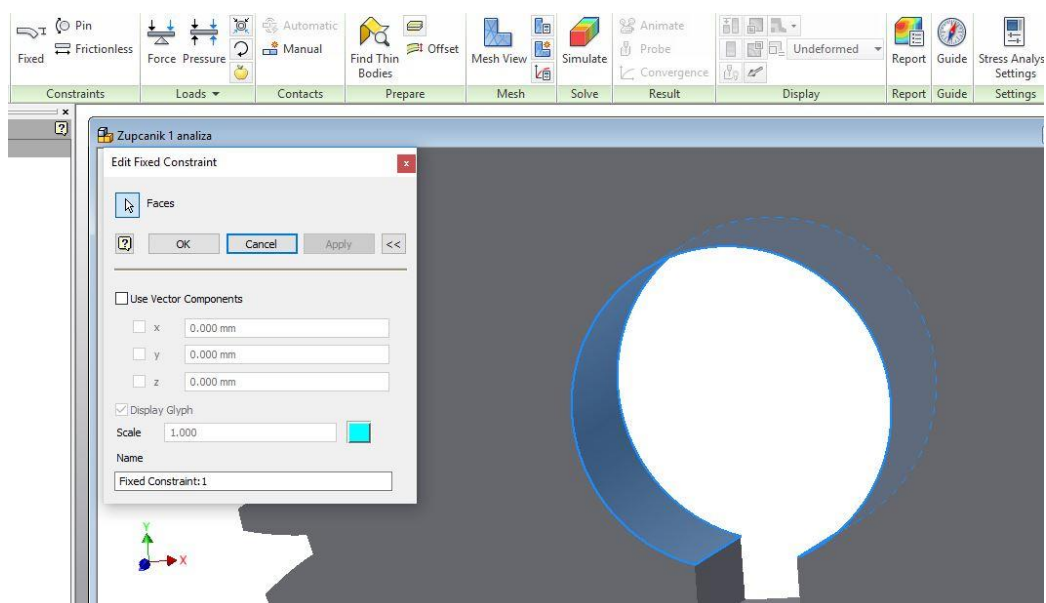
Слика 6.1. – Команда Create Simulation

Следећи корака јесте задавање материјала помоћу команде Assigning (слика 6.2).



Слика 6.2 – Команда Assign за задавање материјала

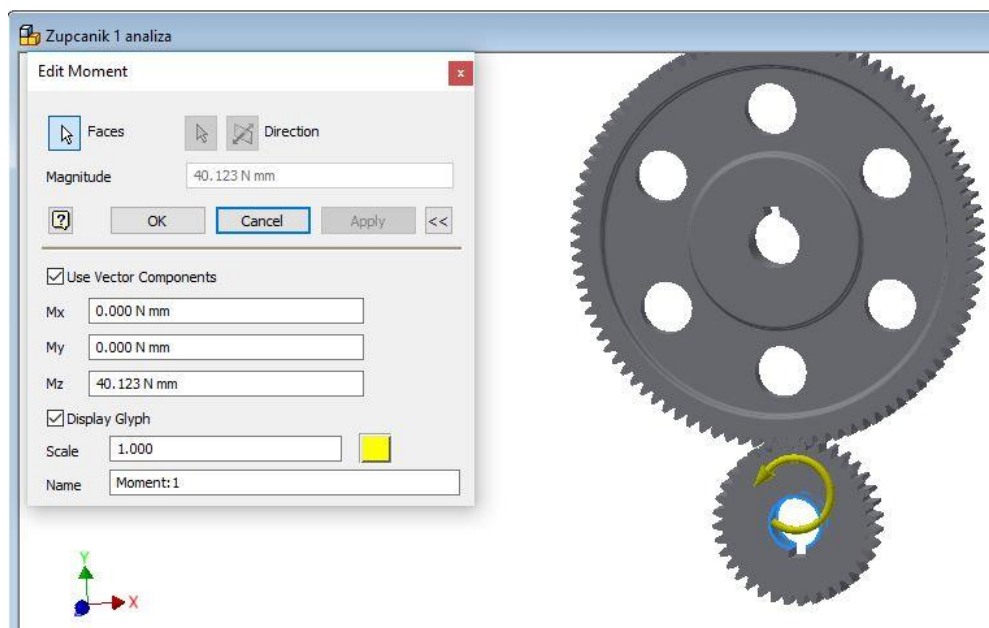
Следећи корак јесте задавање ограничења, које је од изузетне важности за креирање симулације и има велики утицај на добијање резултата (слика 6.3).



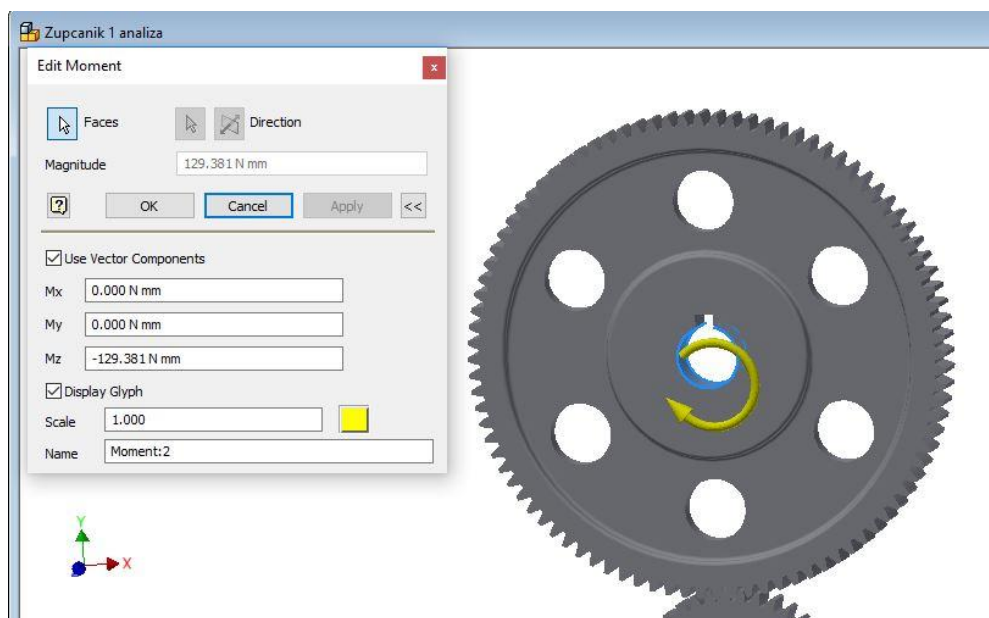
Слика 6.3. – Команда за задавање ограничења Fixed

Задавање обртних момената се врши помоћу команде Moment. Кликом на ову команду отвара се нов прозор у који је потребно унети моменте који делују на зупчасти

пар и означити место на којој моменти делују као што је приказано на сликама 6.4 и 6.5.

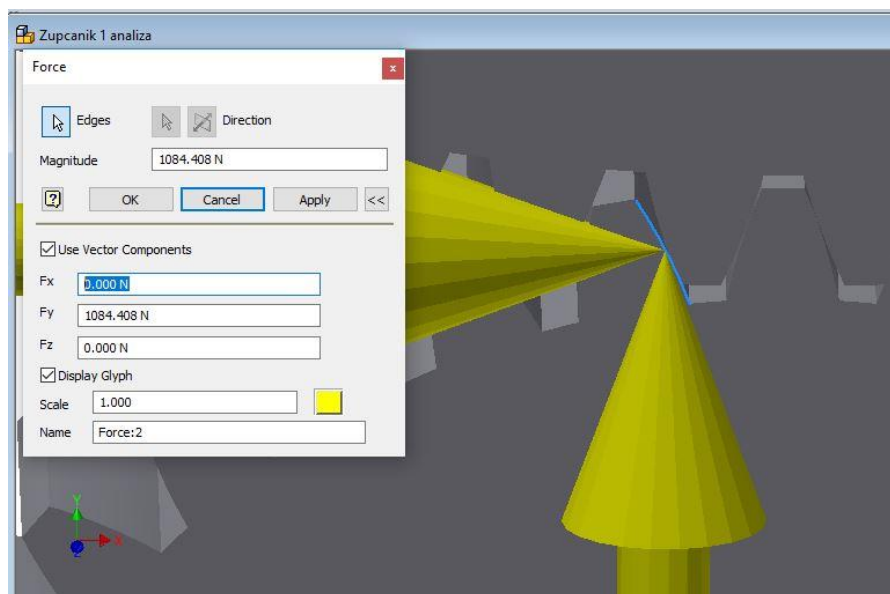


Слика 6.4. – Задавање момента на зупчанику 1



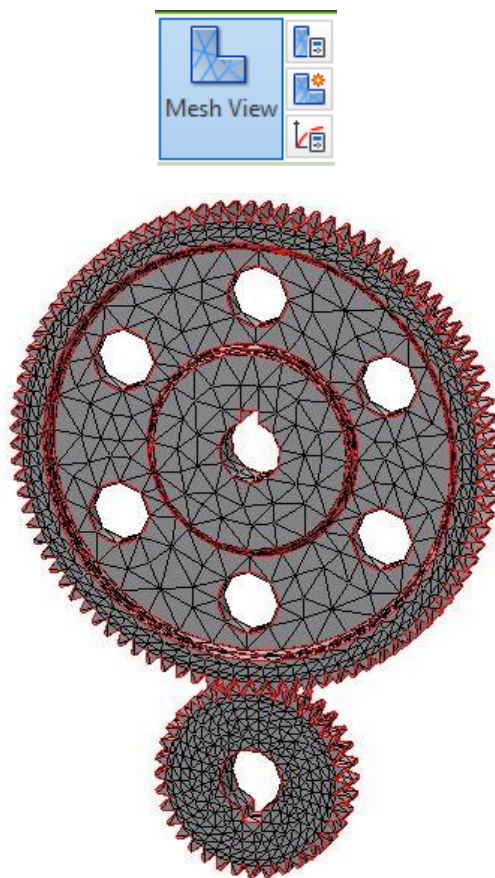
Слика 6.5. – Задавање момента на зупчанику 2

Задавање оптерећења се врши помоћу команде Force. Кликом на ову команду отвара се нов прозор у који је потребно унети место на којем силе делују, као и вредност сила (слика 6.6).



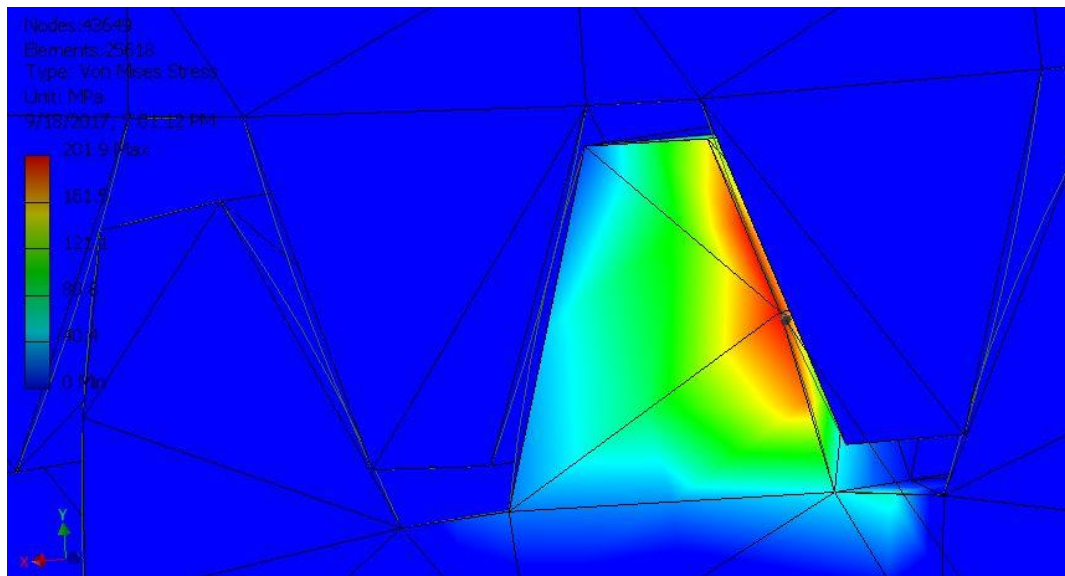
Слика 6.6. – Место дејства сила

Следећи корак јесте генерисање мреже коначних елемената помоћу команде Mesh View (слика 6.7).



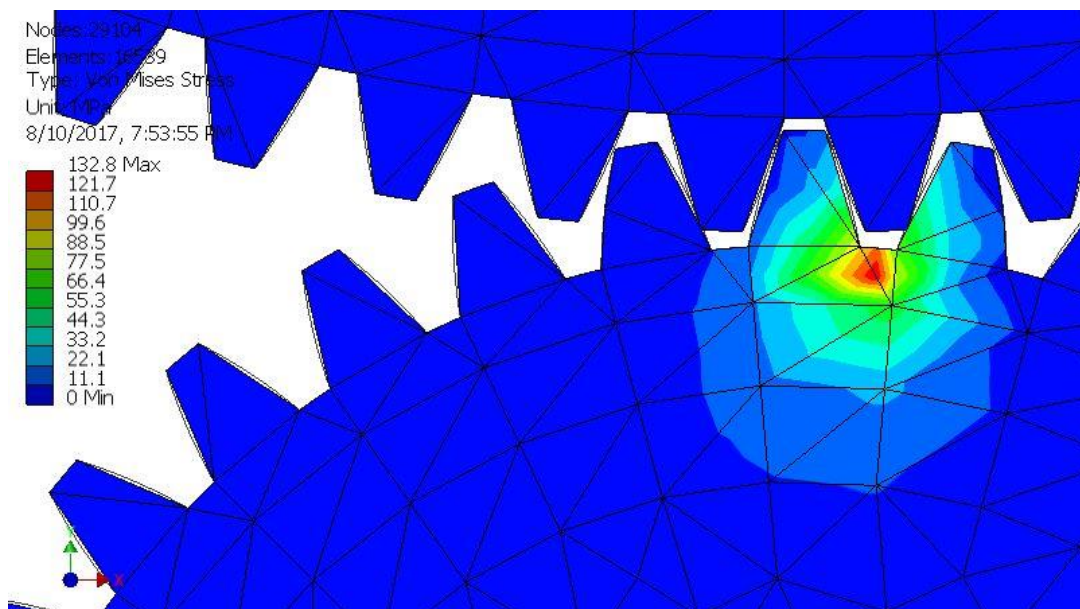
Слика 6.7. – Задавање мреже коначних елемената

Када се дефинишу сви потребни услови кликом на дугме Simulate, након тога кликом на команду Run покреће се испитивање зупчастог пара. На слици 6.8 приказани су резултати анализе.



Слика 6.8. – Вредност напона у контакту зупца зупчаника

На слици 6.9 је приказана вредност напона у подножју зупца зупчаника.



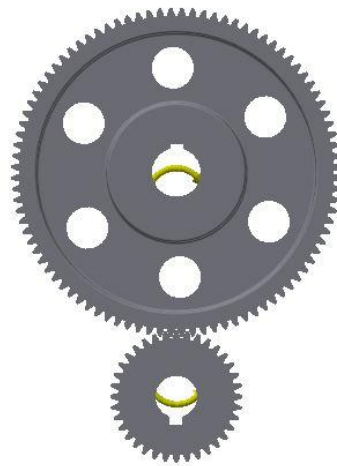
Слика 6.9. – Вредност напона у подножју зупца зупчаника

6.1.2 Анализа зупчастог пара 3-4

Анализа зупчастог пара 3-4 се врши на исти начин као и предходна анализа. Кликом на Stress Analysis бира се команда Create Simulation у оквиру које се дефинише име и врста симулације. Следећи корака јесте задавање материјала помоћу команде Assing.

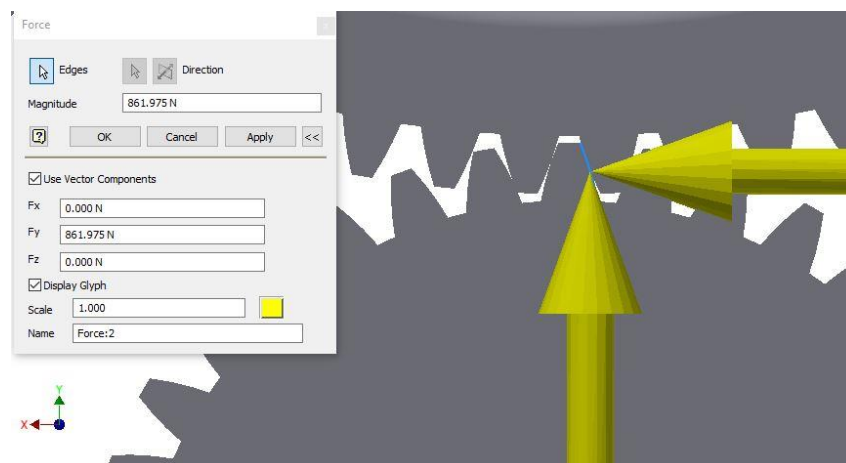
Следећи корак јесте задавање ограничења, које је од изузетне важности за креирање симулације и има велики утицај на добијање резултата.

Задавање момента се врши помоћу команде Moment. Кликом на ову команду отвара се нов прозор у који је потребно унети моменте који делују на зупчasti пар и означити место на којој моменти делују као што је приказано на слици 6.10.



Слика 6.10. – Задавање момента зупчастог пара 3-4

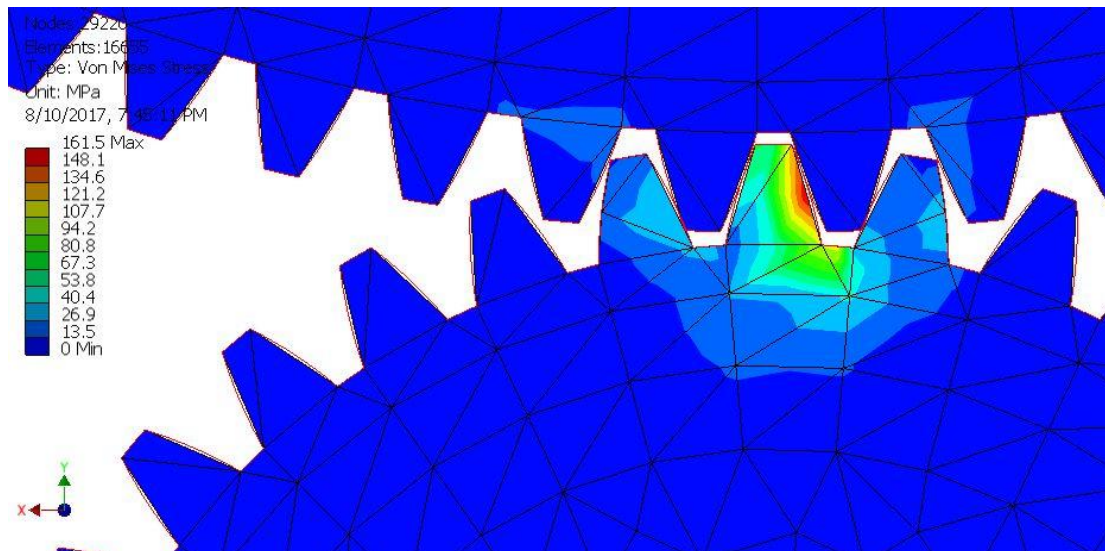
Задавање оптерећења се врши помоћу команде Force. Кликом на ову команду отвара се нов прозор у који је потребно унети место на којем силе делују, као и вредност сила (слика 6.11).



Слика 6.11. – Место дејства сила

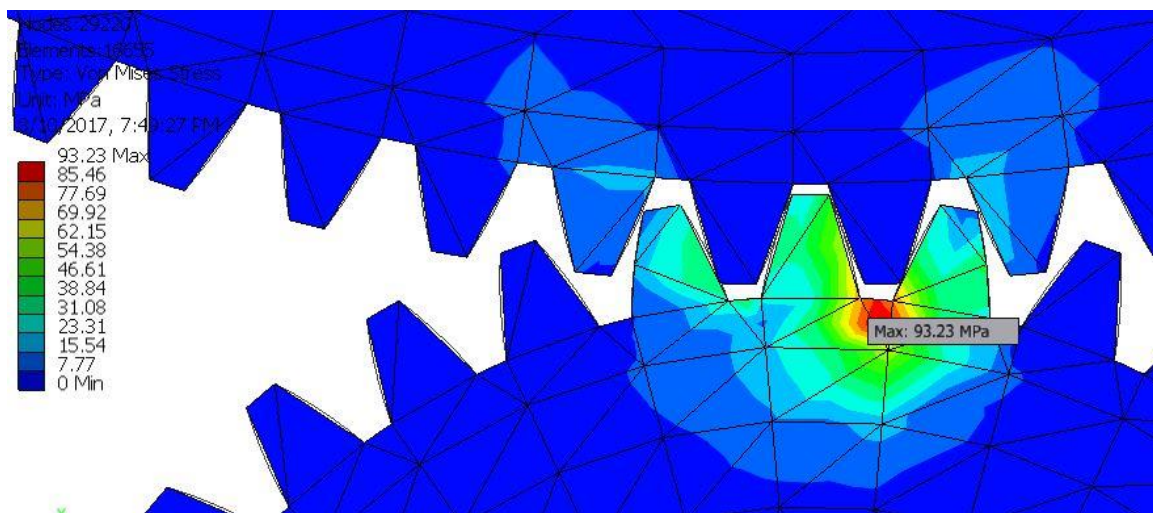
Следећи корак јесте генерисање мреже коначних елемената помоћу команде Mesh View.

Када се дефинишу сви потребни услови кликом на дугме Simulate, након тога кликом на команду Run покреће се испитивање зупчастог пара. На слици 6.12 приказани су резултати анализе.



Слика 6.12. – Вредност напона у контакту зупчастог пара 3-4

Следећи корак јесте испитивање напона у подножју зупца зупчаника (слика 6.13).



Слика 6.13. – Вредност напона у подножју зупца зупчаника

У табели 6.1. су приказани резултати на боку зупца зупчаника добијени аналитичком и нумеричком анализом, као и њихово одступање у процентима. Сагласност добијених резултата је сасвим задовољавајућа.

Табела 6.1. – Напони на боку зупца зупчаника добијени аналитичком и нумеричком анализом

	Напон на боку зупца зупчаника (аналитички) N/mm^2	Напон на боку зупца зупчаника (нумерички) N/mm^2	Одступање
Зупчасти пар 1-2	202,306	201,9	0,21%
Зупчасти пар 3-4	173,159	161,5	6,73%

У табели 6.2. су приказани резултати у подножју зупца зупчаника добијени аналитичком и нумеричком анализом, као и њихово одступање у процентима. Разлика у добијеним резултатима и у овом случају је мала.

Табела 6.2. – Напони у подножју зупца зупчаника добијени аналитичком и нумеричком анализом

	Напон у подножју зупца зупчаника (аналитички) N/mm^2	Напон у подножју зупца зупчаника (нумерички) N/mm^2	Одступање
Зупчасти пар 1-2	139,995	132,8	5,13%
Зупчасти пар 3-4	95,508	93,23	2,3%

7 Закључак

Све чешћа примена композитних материјала је заснована на добром понашању материјала у отежаним условима рада, високом отпорношћу, брзини, ударима, а све захваљујући својој структури.

Композитни материјали се у великој мери користе као секундарни материјали при изради конструкција. Повећана крутост и мања маса, резултат су све веће примене композитних материјала у изради структурних елемената конструкција. Примена композитног зупчаника има низ предности у односу на челичне зупчанике, као што су отпорност на високе температуре, отпорност на корозију, висока чврстоћа, висок модул еластичности, дужи век трајања, итд.

У раду је, коришћењем софтверског пакета Autodesk Inventor, извршено димензионисање и прорачун напонског стања главних елемената редуктора (зупчаника и вратила) израђених од композитних материјала.

Такође је, применом методе коначних елемената (МКЕ), извршена анализа напона на боку и у подножју зупца зупчаника од композитног материјала. Композитни материјал који је коришћен за прорачун и анализу зупчаника је полиамид РА 6.6 ојачан карбонским влакнима.

Поређењем вредности напона на боку и у подножју зупца зупчаника од полиамида РА 6.6 ојачаног карбонским влакнима добијених аналитичким и нумеричким путем закључено је да је постигнута сасвим добра сагласност резултата јер одступања нису већа од 7%. Нумеричка анализа је рађена у софтверском пакету Autodesk Inventor који није уско специјализовани софтвер за овакве анализе. Отуда, као и због доста крупне мреже коначних елемената, дошло је до малих одсупања у расподели напона у подножју зупца од очекиваних. Свакако да би се уситњавањем мреже у зони контакта зубаца, а пре свега применом софтвера који су специјализовани за анализе овог типа, поготово за анализе композитних материјала (NX Nastran, Ansys и др), добили још поузданији резултати. Међутим, резултати показују да је и оваква анализа довољно поуздана за инжењерску примену.

Литература

- [1] В. Николић, Машински елементи-теорија, прорачун, примери, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [2] http://repozitorij.fsb.hr/611/1/14_05_2009_Diplomski_rad_Trostupnjevani_reduktor.pdf, преузето 25.03.2017.
- [3] Т. Филетин, Ф. Ковачичек, Ј. Индоф, Својства и примена материјала, Факултет стројства и бродоградње, Загреб, 2002.
- [4] http://repozitorij.fsb.hr/5169/1/Kuzmic_2016_zavrsni_prediplomski.pdf, преузето 05.04.2017.
- [5] М. Стевановић, Влакнима ојачани полимерни композити-компоненте, структура, испитивања, Београд, 2002.
- [6] S. Senthilvelan and R. Gnanamoorthy, Effect of rotational speed on the performance of unreinforced and glass fiber reinforced Nylon 6 spur gears, Materials and Desing, 2007.
- [7] K. Mao, W. Li, C. J. Hooke, D. Walton, Friction and wear behavior of acetal and nylon gears, Wear, 2009.
- [8] E. Sevkat, H. Tumer, Residual torsional properties of composite shafts subjected to impact loadings, Materials and Desing, 2013.
- [9] S. Misri, S. M. Sapuan, Z. Leman, M. R. Ishak, Torsional behaviour of filament wound kenaf yarn fibre reinforced unsaturated polyester composite hollow shafts, Materials and Desing, 2014.
- [10] L. W. McKeen, Effect of Temperature and other Factors on Plastics and Elastomers 2nd, Norwich NY/USA, William Andrew Inc., 2008.
- [11] http://www.np.ac.rs/downloads/nm/nm_teh/gradj/mke-1.pdf, преузето 07.04.2017.
- [12] М. Šercer, В. Križan, R. Basan: Konstruiranje polimernih proizvoda, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, Rijeka, 2008.
- [13] М. Раденковић, Композитни материјали, завршни рад, Крагујевац, 2013.
- [14] S. R. Dharmadhikari, S. G. Mahakalkar, J. P. Giri, N. D. Khutafale. Design and Analysis of Composite Drive Shaft using ANSYS and Genetic Algorithm A Critical Review, International Journal of modern Engineering Research, 2013.
- [15] file:///D:/Users/Wikilix/Desktop/os25000_predavanje-12a-b.pdf, преузето 05.04.2017.
- [16] http://repozitorij.fsb.hr/1191/1/04_02_2011_Zavrsni_rad_Jambrek_Filip.pdf, преузето 15.04.2017.
- [17] Н. Стевановић, Анализа напонско-деформационог стања зупчаника од композитних материјала, мастер рад, Крагујевац, 2016.

[18] http://repozitorij.fsb.hr/2749/1/04_03_2014_PHD_DOMITRAN-V0_%28FINAL-isp15%29-FINAL.pdf, преузето 16.04.2017.

[19] <http://nardus.mpn.gov.rs/bitstream/handle/123456789/7458/Disertacija7445.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, преузето 18.04.2017

[20] <https://www.indiamart.com/rktraders-newdelhi/spherical-plain-bearings.html>, преузето 18.04.2017