

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Мастер студије

Предмет: Методе прорачуна у развоју производа

Број индекса: 322/2015

Невена М. Стевановић

**Анализа напонско-деформационог стања
зупчаника од композитних материјала**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

- 1. ванр. проф. др Зорица Ђорђевић - ментор**
- 2. _____ - члан**
- 3. _____ - члан**

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Крагујевац, септембар 2016.

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да обради следеће:

1. Карактеристике композитних зупчаника,
2. Прорачун напона на боку и у подножју зупца зупчаника аналитичким путем,
3. Прорачун напона и деформација челичних и композитних зупчаника применом МКЕ,
4. Анализа и поређење резултата напонско-деформационог стања зупчаника.

Препоручена литература:

- [1] В. Николић, *Машински елементи-теорија, прорачун, примери*, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [2] М. Јовановић, Д. Адамовић, В.Лазић, Н.Ратковић, *Машински материјали*, Машински факултет, Крагујевац, 2003.
- [3] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, *Damping characteristics of unreinforced, glass and carbon, fiber reinforced nylon 6/6 spur gears*, Polymer Testing, Volume 25, Issue 1, 2006.
- [4] K.D. Dearn, T.J. Hoskins, D.G. Petrov, S.C. Reynolds, R. Banks, *Applications of dry film lubricants for polymer gears*, Wear, 2013.
- [5] B.R.Ambre , D.S.Bajaj, *Investigation of Wear and Load Carrying Capacity of Polyamide Composites for Gear Application*, International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, 2016.
- [6] L.W. McKeen, *Effect of Temperature and other Factors on Plastics and Elastomers*, 2nd ed. Norwich, NY/USA, William Andrew Inc., 2008.

Крагујевац, септембар 2016.

ментор:

ванр. проф. др Зорица Ђорђевић

Резиме:

У овом раду, модел цилиндричних зупчаника је генерисан у софтверском пакету *Autodesk Inventor* и увезен у програм *Ansys* за анализу. Анализа се врши ради утврђивања вредности напона и деформација. Анализа је урађена са различитим материјалима, а то су челик 16MnCr5 (Č4320), поли-етер-етер-кетон (ПЕЕК) ојачан стакленим влакнима, поли-етер-етер-кетон ојачан карбонским влакнима, полиамид (РА6) ојачан стакленим влакнима и полиамид (РА66) ојачан стакленим влакнима и извршено је поређење резултата. Вон-Мизесови напони као резултати анализе у овом раду су приказани графички и табеларно. Закључено је да примена поли-етар-етар-кетона ојачаног карбонским влакнима показује најбоље резултате.

Кључне речи: цилиндрични зупчаници, композитни зупчаници, метода коначних елемената

Summary:

In this paper, the spur gear is generated in software *Autodesk Inventor* and imported *Ansys* for static structural analysis. Static analysis is performed to determine the deformation and Von-mises stresses. Analysis is done by considering different materials for gears like steel 16MnCr5, glass filled PEEK (Poly-ether-ether-Ketone), carbon filled PEEK, glass filled PA6 (Polyamide 6) and glass filled PA66 (Polyamide 66), and results are compared. The results of this analysis are presented in this paper as figures and tables of Von-Misses stresses. It is concluded that the use of PEEK reinforced with carbon fibres shows the best results.

Keywords: spur gears, composite gears, finite element method

Садржај:

1. УВОД	5
2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ	6
3. КОМПОЗИТНИ ЗУПЧАНИЦИ.....	8
3.1. Композитни материјали.....	8
3.2. Особине композитних зупчаника	8
3.3. Израда композитних зупчаника	19
4. ПРОРАЧУН НАПОНА НА БОКУ И У ПОДНОЖЈУ ЗУПЦА ЧЕЛИЧНИХ ЗУПЧАНИКА АНАЛИТИЧКИМ ПУТЕМ	21
4.1. Прорачун носивости зупчаника	25
5. ПРОРАЧУН НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА ЧЕЛИЧНИХ ЗУПЧАНИКА ПРИМЕНОМ МКЕ.....	28
5.1. Прорачун напона и деформација у софтверском пакету <i>Ansys</i>	28
6. ПРОРАЧУН НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА КОМПОЗИТНИХ ЗУПЧАНИКА ПРИМЕНОМ МКЕ.....	34
6.1. Анализа зупчаника од композитног материјала-РЕЕК 30GF	35
6.2. Анализа зупчаника од композитног материјала-РЕЕК 30CF	36
6.3. Анализа зупчаника од композитног материјала-РА66 30GF.....	38
6.4. Анализа зупчаника од композитног материјала-РА6 30GF.....	40
6.5. Поређење резултата анализе напонско-деформационог стања композитних зупчаника.....	42
7. ЗАКЉУЧАК	48
ЛИТЕРАТУРА	49

1. УВОД

Композитни материјали се већ дуги низ година користе у многим областима индустрије. Композити су материјали израђени од две компоненте или више компонената које се доста разликују како по хемијском саставу тако и по другим особинама. На тај начин се побољшавају механичка својства у односу на неке метале, зато се користи као замена за металне конструкције. Развој ових материјала произишао је из потребе да се код многих конструкција постигне што већа јачина и крутост, а уз то смањи тежина [1]. Они омогућавају флексибилност у дизајну, лаки су, отпорни на удар, отпорни на замор услед коришћења, имају добру хемијску отпорност. Данас они примену налазе у аутомобилској индустрији, у војном и цивилном ваздухопловству, у индустрији енергије ветра (ветротурбина код ветрогенератора). У раду су описане карактеристике зупчаника од композитних материјала. Зупчасти преносници преносе кретање и обртни момент са једног вратила на друго помоћу тзв. везе обликом, коју чини спрега зубаца зупчаника. При томе се врши одређена трансформација броја обртаја и обртног момента. Најједноставнији зупчасти преносник се састоји од два зупчаника у спрези који чини зупчасти пар. Један од ова два зупчаника је погонски, а други гоњени. Погонски зупчаник преноси кретање и обртни момент на гоњени зупчаник [2].

Композитни склопови 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 зупчаницама, постоје недостаци у познавању одговарајуће геометрије те се уопштено јавља недостатак искуствених вредности код пројектовања композитних зупчаника. Додатну тежину представља велики избор композитних материјала који због својих својстава могу бити више или мање погодни за израду зупчастих преносника. Кратко време употребе композитних материјала у конструисању зупчаника има за појаву недостатак искуствених вредности, што отвара многа нерешена питања везана за пројектовање композитних зупчастих преносника.

Показало се да при истим радним условима код различитих композитних зупчастих преносника долази до промене радног века зупчастих преносника. Исто тако, променом радних услова композитни материјали због своје структуре у поређењу са металним материјалима код зупчаника, знатно могу одступати од очекиваног радног века, односно животног века зупчастог преносника. Како промена радних услова игра велику улогу код композитних зупчаника, важно је проширити знања о примени композитних зупчастих преносника и омогућити поређење резултата са металним зупчастим преносницима.

Данас се производе зупчаници од композитних материјала, јер се на тај начин добијају боље карактеристике зупчаника. У раду је извршен прорачун цилиндричних зупчаника са правим зупцима аналитичким и нумеричким путем. Коришћењем софтверског пакета *Алтус* добијене су вредности напона на боку и у подножју зупца код челичних и композитних зупчаника. Затим је извршено поређење резултата челичних и композитних зупчаника.

2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Проналаском композитних материјала, примена композитних материјала долази до изражаја у производњи зупчаника. У развојним центрима већих индустријских предузећа и научно-истраживачким институтима испитивања се врше у циљу што потпунијег упознавања и побољшавања својстава нових материјала како би се добили материјали за нове производе, односно нова подручја примене. Примена композитних зупчаника представља релативно нову област примене у индустрији, тако да се и данас испитју који композитни материјали показују најбоље резултате при примени, који композитни материјал може послужити као замена за челик у изради зупчаника. Објављено је доста радова који се баве проблематиком композитних зупчаника. Постоји читав низ радова, од којих су неки приказани у овом мастер раду.

У раду [3] се могу видети које су карактеристике зупчаника израђених од полиамида са додатком стаклених влакана и њихова примена.

Радом [4] је утврђено да се додавањем влакана основном материјалу (полиамиду) утиче на пригушење вибрација и буке при раду зупчастог пара. Такође је приказано како оптерећење зупчаника утиче на температуру, како се променом врсте материјала може смањити температура зупчаника.

Испитане је рад зупчастог пара када су зупчаници израђени од различитих материјала, као нпр. рад зупчастог пара када је зупчаник од полиамида гоњени, а погонски зупчаник од полиоксиметилена и обрнуто. Овим радом се приказује која је комбинација најбоља, односно која комбинација даје најбоље резултате у погледу продужења радног века зупчаника [5].

Промена температуре и релативне влажности ваздуха током радног века зупчаника често није у пракси предвидљива. Композитни материјали за разлику од метала показују много већу зависност од температуре и влажности ваздуха, што се односи на њихова механичка својства. Истраживања су показала да осим промене механичких карактеристика долази и до геометријских промена на зупчанику. Радом [6] је приказано како проценат апсорбоване воде у материјалу значајно утиче на механичка својства композитног материјала.

Експериментом приказаним у раду [7] је потврђена претпоставка да се додатком стаклених влакана полиамиду јавља боље одвођење топлоте у односу на зупчаник од чистог полиамида, што доводи до смањења температуре зупчаника и на тај начин продужава животни век зупчаника.

Коришћењем различитих премаза код зупчаника од полиамида (РА 30% GF), радом [8] је приказано да се може утицати на коефицијент трења и хабање материјала. У раду [9] је истражен рад зупчаника од различитих полимерних материјала у пару са металним зупчаницима и примена различитих премаза. Један од материјала је полиетар-етар-кетон са 30% карбонских влакана (РЕЕК 450 СА30). Најбоље резултате даје примена премаза од PFTE.

У раду [10] су приказани резултати тестирања полиамида са 5%, 10% и 15% стаклених влакана. Дат је упоредни приказ резултата испитивања и закључак на основу

тих резултата. Резултати показују да је примена полиамида са додатком 15% стаклених влакана боља у односу на полиамид са са 5% стаклених влакана.

Радам [11] је приказано да зупчаник од поли-етар-етар-кетона са додатком 30% стаклених влакана показао као бољи у примени него зупчаник од поламида са додатком 30% стаклених влакана. Експеримент је урађен при различитим вредностима обртног момента и различитим вредностима броја обртаја.

Радам [12] је истражен рад зупчаника израђених од поли-етар-етар-кетона за случај када је коришћен премаз и за случај када није коришћен. У том раду је извршено поређење са зупчаницима од полиоксиметилена.

У раду [13] је објашњен који начин производње зупчаника је најисплативији, док радом [14] којим параметрима је могуће утицати на бољи квалитет израде зупчаника. Скупљање производа представља један од главних проблема код израде зупчаника, зато се и данас спроводе разна истраживања у вези тог проблема.

3. КОМПОЗИТНИ ЗУПЧАНИЦИ

3.1. Композитни материјали

Композити се састоје из основе (матрице) и материјала за ојачавање (ојачавача). Матрица која повезује ојачавач (vlakнасти или зрнасти) у заједничку структуру обично је од термореактивних смола (епоксидне, полиестарске, фенолне), а ојачавајућа влакна могу бити: стаклена, угљенична, арамидна, од бора и неких других материјала. Улога влакана је да се повећа јачина и крутост (модул еластичности E) пластичне матрице од епоксидне или полиестерске смоле. Угљенична влакна се углавном израђују из полиакрилонитрила (PAN) или катрана добијеног рафинацијом нафте или сувом дестилацијом угља. Стаклена влакна служе за ојачавање смоластих матрица композита. За разлику од угљеничних влакана, стаклена се лако и економично производе. Данас се стаклена влакна израђују од две врсте стакла: стакло Е-типа (електрично) и S-типа (високе јачине). Ако су познате особине компонената композита, могу се уз одређене претпоставке прорачунати механичке особине финалног производа [1].

3.2. Особине композитних зупчаника

Применом композитних зупчаника се добија низ предности у односу на челичне зупчанике. Зупчаници од композитних материјала се користе у аутомобилској индустрији, прехранбеној и текстилној индустрији, као и многим другим областима [3].



Слика 3.1. Зупчаник од метала (лево) и композита (десно) [15]

Предности зупчаника израђених од композита према [4,16] су:

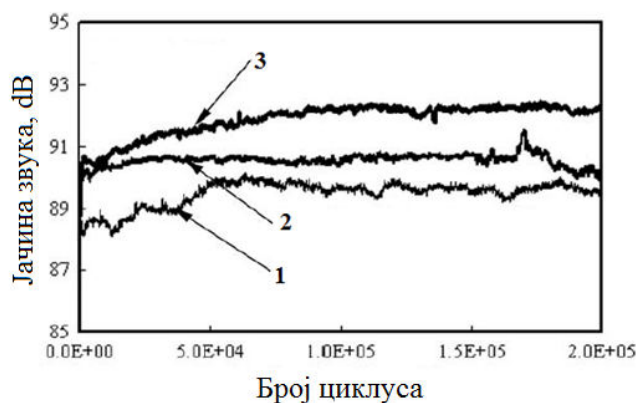
- 1) релативно мала маса,
- 2) ниски трошкови производње,
- 3) смањење буке,
- 4) смањење времена производње,
- 5) производња методом бризгања са великом тачношћу димензија,
- 6) способност рада без подмазивања,
- 7) отпорност на корозију.

Композитни материјали имају мању густину у односу на челик, нпр. код РЕЕК (поли-етер-етер-кетон) ојачан карбонским влакнима густина износи $1,4 \text{ g/cm}^3$, док код челика износи $7,85 \text{ g/cm}^3$, самим тим композитни зупчаници имају мању масу у односу на челичне зупчанике. У табели 3.1 је приказана густина за различите композитне материјале.

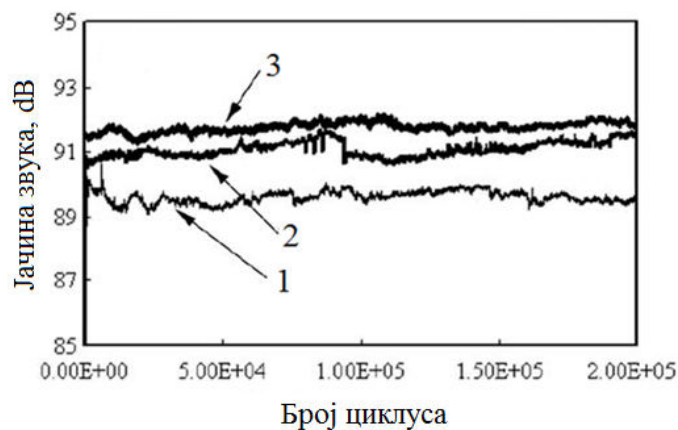
Табела 3.1 Приказ густина за различите композитне материјале [17]

Материјал	Густина, g/cm^3
Полиамид ојачан 30% карбонским влакнима	1,4
Полиамид ојачан 40% карбонским влакнима	1,33
Полиамид ојачан 35% стакленим влакнима	1,6
Полиоксиметилен ојачан 30% стакленим влакнима	1,56
Поли-етер-етер-кетон ојачан 30% стакленим влакнима	4,49
Поли-етер-етер-кетон ојачан 30% карбонским влакнима	1,4
Полиестер ојачан 35% стакленим влакнима	2,0
Полипропилен ојачан 30% стакленим влакнима	1,14
Полипропилен ојачан 20% стакленим влакнима	1,04

Јачина звука при раду зупчаника зависи од врсте материјала, оптерећења, вредности обртног момента. Применом композитних зупчаника смањује се бука при раду. Материјал код оваквих зупчаника је мекан што апсорбује ударе. Повећање процента влакана у основном материјалу (РА 66) утиче на пригушење вибрација и буке. Објашњава се да на тај начин, додавањем стаклених или угљеничних влакана полиамиду, повећава крутост материјала и тиме повећава бука у односу на полиамиде који нису ојачани. Закључује се да се додавањем стаклених или угљеничних влакана полиамиду смањује капацитет пригушења у односу на полиамиде који нису ојачани што је приказано на сликама 3.2 и 3.4 [4].

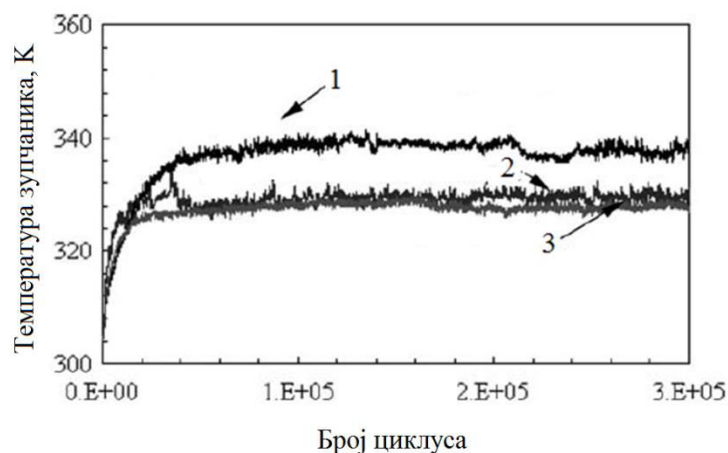


Слика 3.2. Јачина звука за полиамидне зупчанике: 1- који нису ојачани, 2- ојачани стакленим влакнима, 3- ојачани угљеничним влакнима ($T=1,5 \text{ Nm}$) [4]

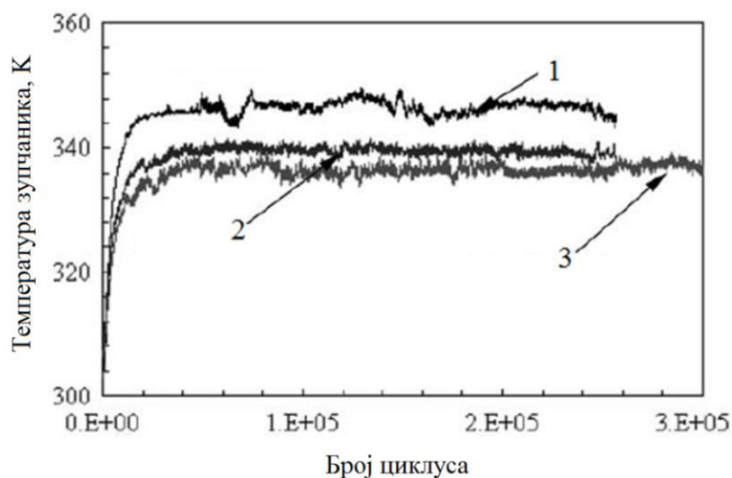


Слика 3.3. Јачина звука за полиамидне зупчанике: 1- који нису ојачани, 2- ојачани стакленим влакнима, 3- ојачани угљеничним влакнима ($T=2 \text{ Nm}$)[4]

Такође су извршена мерења температуре зупчаника. Резултати показују да повећањем обртног момента долази до повећања температуре, а најмања температура се јавља код зупчаника од полиамида ојачаног карбонским влакнима [4].



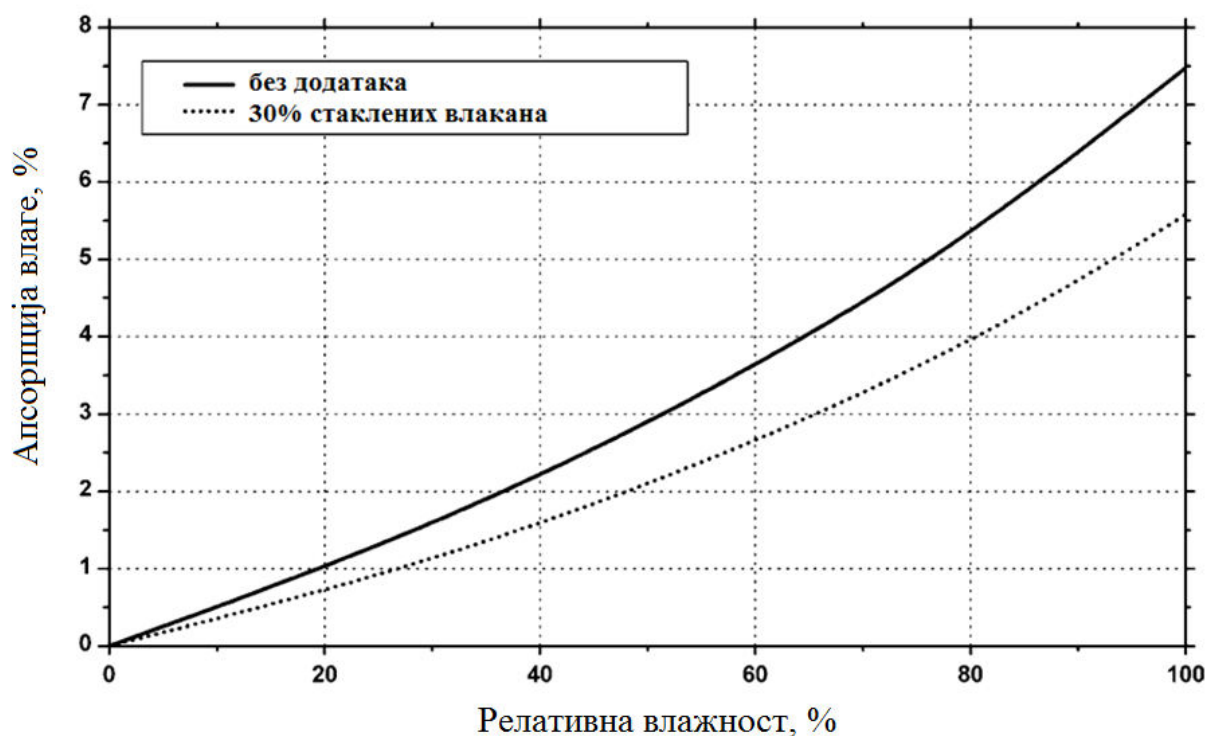
Слика 3.4. Температура зупчаника: 1- који нису ојачани, 2- ојачани стакленим влакнима, 3- ојачани угљеничним влакнима ($T=1,5 \text{ Nm}$)[4]



Слика 3.5. Температура зупчаника: 1- који нису ојачани, 2- ојачани стакленим влакнима, 3- ојачани угљеничним влакнима ($T=2 \text{ Nm}$)[4]

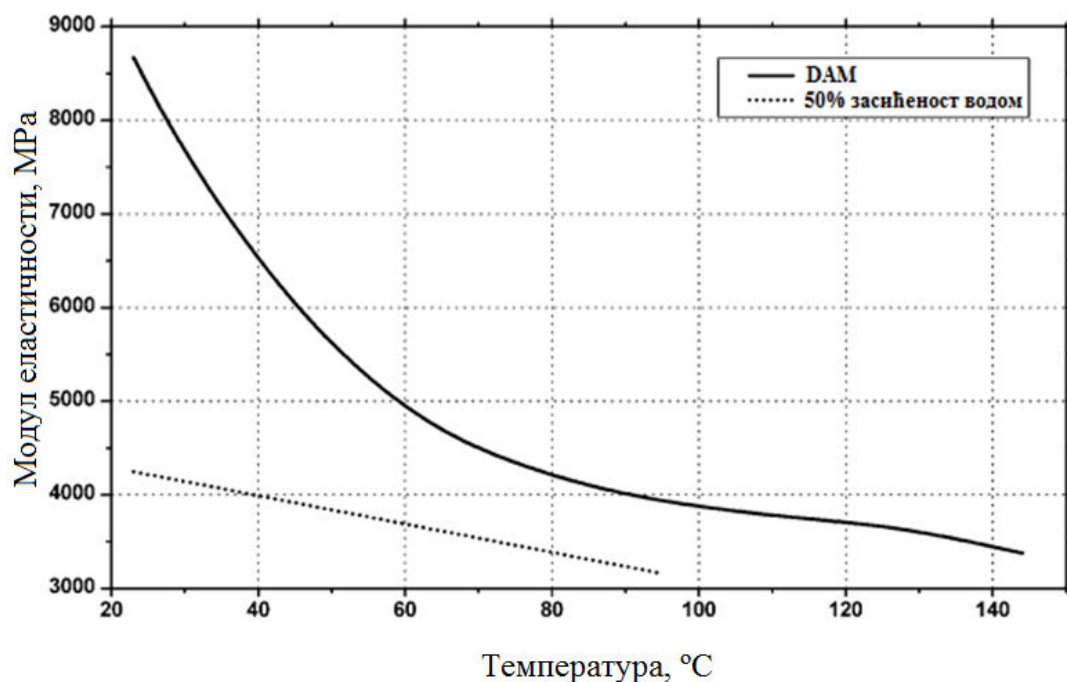
Постоји доста радова где се испитује понашање зупчаника када су погонски и гоњени зупчаник од различитих материјала. За случај када је зупчаник од полиоксиметилена погонски, а зупчаник од полиамида гоњени, резултати показују да је дошло до повећања отпорности на хабање. У случају њихове замене, односно када је гоњени зупчаник од полиоксиметилена, а погонски од полиамида, добија се смањена отпорност на хабање у односу на први случај. Полимерни и композитни зупчаници се примењују углавном због мале масе, смањења буке и ниске цене трошкова производње. Међутим полимери имају мању крутост, мању затезну чврстоћу, велику осетљивост на повећање температуре и влаге у односу на металне зупчанике. Применом одговарајућих влакана могу се знатно побољшати механичке карактеристике. На пример полиамиди (РА 6) ојачани стакленим влакнима имају боље одвођење топлоте у односу на полиамиде који нису ојачани. Осим тога, додавањем стаклених влакана може се утицати на смањење садржаја влаге у материјалу [5].

Додавањем стаклених влакана поламиду може се утицати на апсорпцију влаге у материјалу, те се додавањем стаклених влакана може смањити садржај влаге у материјалу. На слици 3.6 се може видети апсорпција влаге за материјал ојачан стакленим влакнима и без стаклених влакана [6].



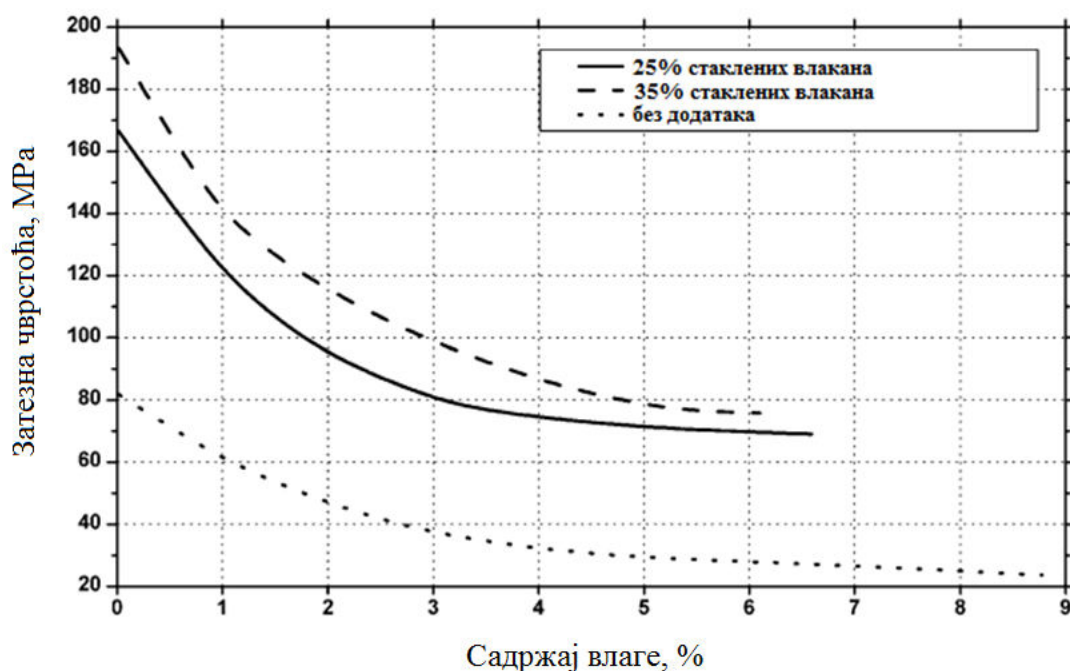
Слика 3.6. Апсорпција влаге у зависности од релативне влажности [6]

На слици 3.7 је приказан модул еластичности у зависности од температуре за материјал полиамид РА6 ојачан стакленим влакнима. Са графика се види да повећање влаге у материјалу доводи до смањења модула еластичности. На слици је приказано стање материјала – DAM (dry as molded) што значи стање материјала без воде.



Слика 3.7. Модул еластичности у зависности од температуре за полиамид PA6+30% GF [6]

На слици 3.8 приказан је график зависности затезне чврстоће полиамида PA6 од садржаја воде у материјалу. Повећање садржаја воде у материјалу утиче и на затезну чврстоћу. Тако да повећањем воде у материјалу, зависно од додатка влакана материјалу, долази до грубог пада затезне чврстоће.



Слика 3.8. Затезна чврстоћа у зависности од садржаја воде у материјалу [6]

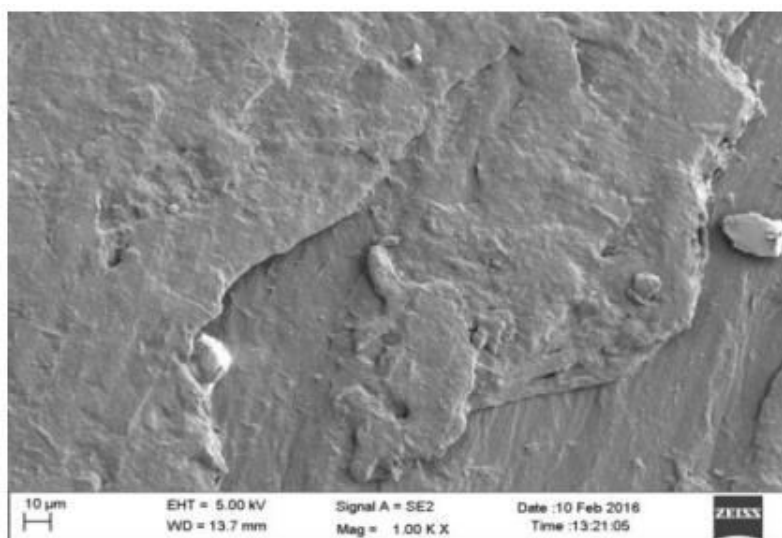
На основу горе наведеног треба очекивати да граница оптерећења зупчаника од полиамида пада са повећањем садржаја воде у материјалу и повећањем температуре.

У испитивању оштећења зупчаника од полиамида (РА 66) са различитим влакнима, уочено је да постоје разлике код зупчаника који садрже влакна и код зупчаника од чистог полиамида. Код зупчаника од полиамида је примећено слабије одвођење топлоте у односу на зупчанике од полиамида са додатком влакана. Повећана температура доводи до појаве прелина у подручју око кинематске тачке код зупчаника од чистог полиамида, док код зупчаника са влакнима нема таквог резултата. Повећано оптерећење може довести до лома у подножју зупца. Додавањем влакана основном материјалу може се повећати отпорност на лом у подножју зупца, самим тим се продужава животног век зупчаника [7].

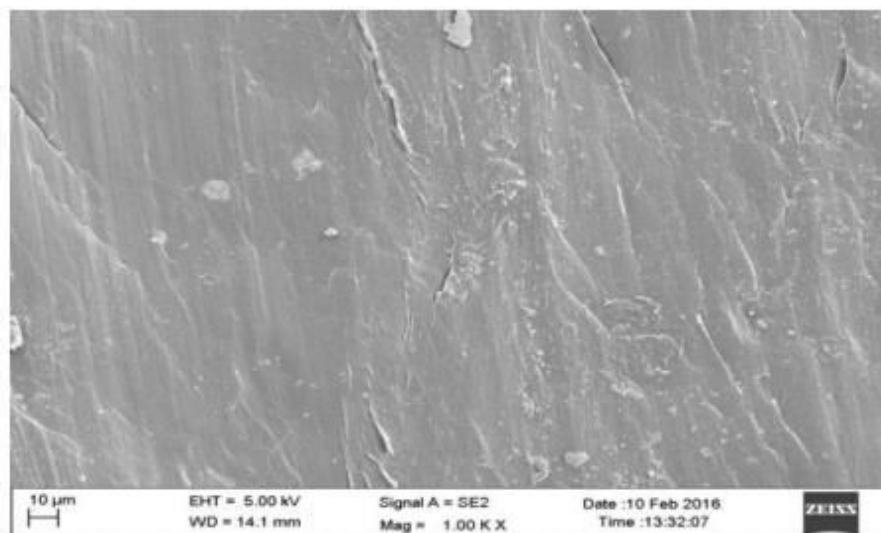
Додавањем влакана полиамиду (РА 66) је могуће утицати на коефицијент трења, а тиме и на хабање материјала у додиру. Анализа је показала да се коришћењем политетерафлуоретилена (PTFE) и молибден дисулфида (MoS_2) за подмазивање смањује коефицијент трења. Додавањем политетерафлуоретилена (PTFE) се више смањује коефицијент трења и редукује хабање постизањем заштитног слоја који смањује додир између површина у односу на примену молибден дисулфида (MoS_2). Променом оптерећења повећава се коефицијент трења као и температура у контакту. Достицањем температуре топљења између површина које клизају, ствара се танак слој растопљеног материјала који се понаша као маст, те не долази до даљег раста температуре [8].

Рад [9] описује покушај да се контролише трење и хабање кроз смањење температуре зупчаника израђених од поли-етер-етер-кетона са додатком и без додатка влакана помоћу премаза на боковима зубаца зупчаника. Коришћена су четири различита премаза, а то су молибден дисулфид, графитни премаз, BN премаз (бор нитрид) и политетрафлуоретилен премаз (PTFE). Сваки премаз је коришћен код зупчаника са и без додатака влакана. Закључује се да је најбоље користити PTFE премаз, јер у случају коришћења тог премаза се показало да се продужује животног век зупчаника.

На слици 3.9 је приказана структура РА 66 са додатком 5% стаклених влакана након тестирања при ротацији од 500 min^{-1} , а на слици 3.10 је приказана структура материјала од полиамида са додатком 15% стаклених влакана. Узорци су испитани електронским микроскопом. Сlike приказују да се јачи интензитет хабања јавља код полиамида са мањим процентом стаклених влакана [10].

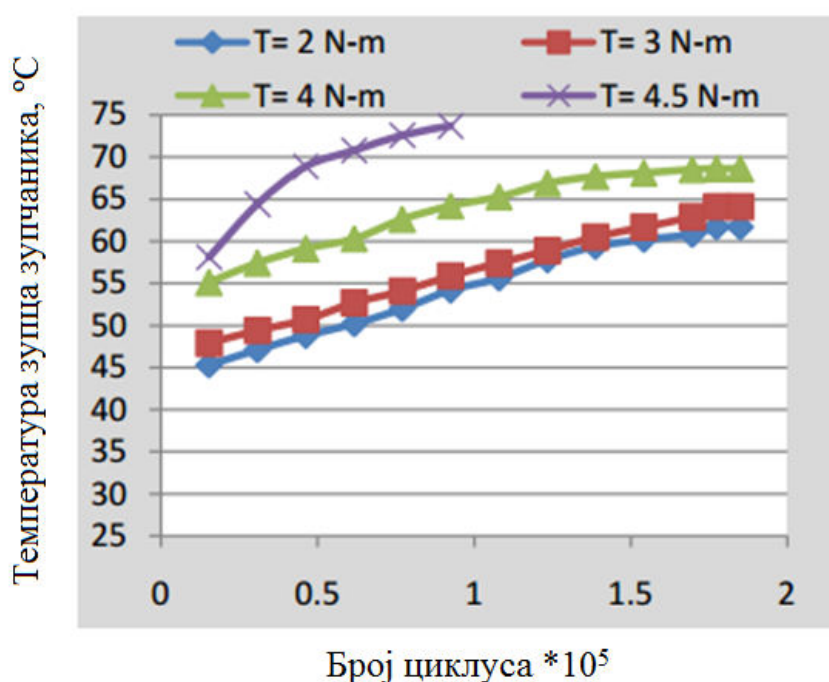


Слика 3.9. Структура полиамида РА 66 + 5% GF после тестирања [10]

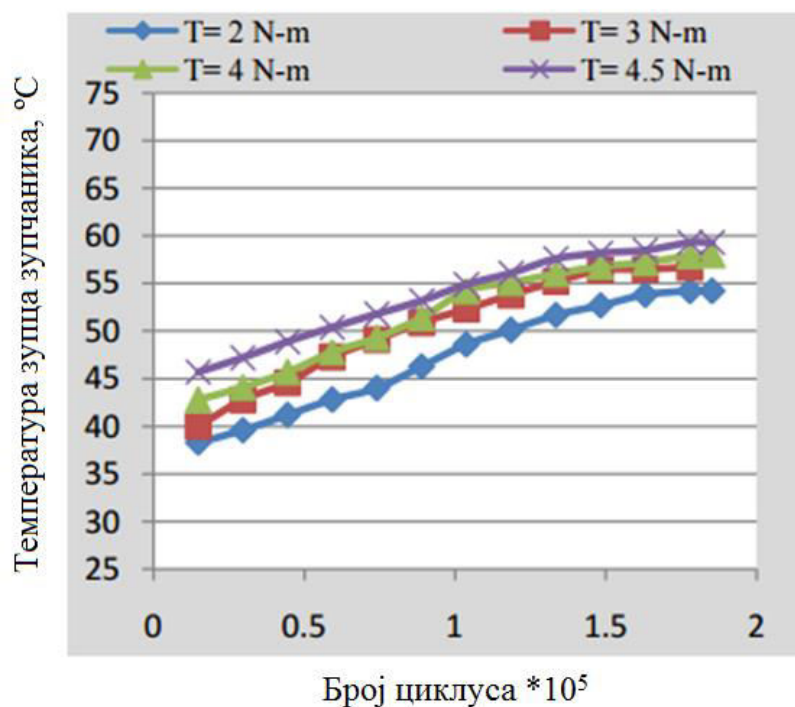


Слика 3.10. Структура полиамида PA 66 + 15% GF после тестирања [10]

Слика 3.11 приказује температуру зупца зупчаника за материјал од полиамида са додатком стаклених влакана (PA66 30GF). На слици 3.8 се примећује да се повећава температура на зупцу зупчаника са порастом вредности обртног момента. Са повећањем обртног момента температура се значајно повећава. При вредности обртног момента од 4,5 Nm, рад зупчаника стаје након 10^5 броја циклуса. Пораст температуре зупчаника је у распону од 62°C до 74°C за обртни момент од 2 Nm до 4,5 Nm. На слици 3.12 су такође приказане температуре при различитим вредностима обртног момента за зупчаник од поли-етар-етар-кетона са додатком стаклених влакана (PEEK 30 GF). Исто се са повећањем вредности обртног момента повећава температура. Пораст температуре ових зупчаника је у распону од 54°C до 59°C за обртни момент од 2 Nm до 4,5 Nm.

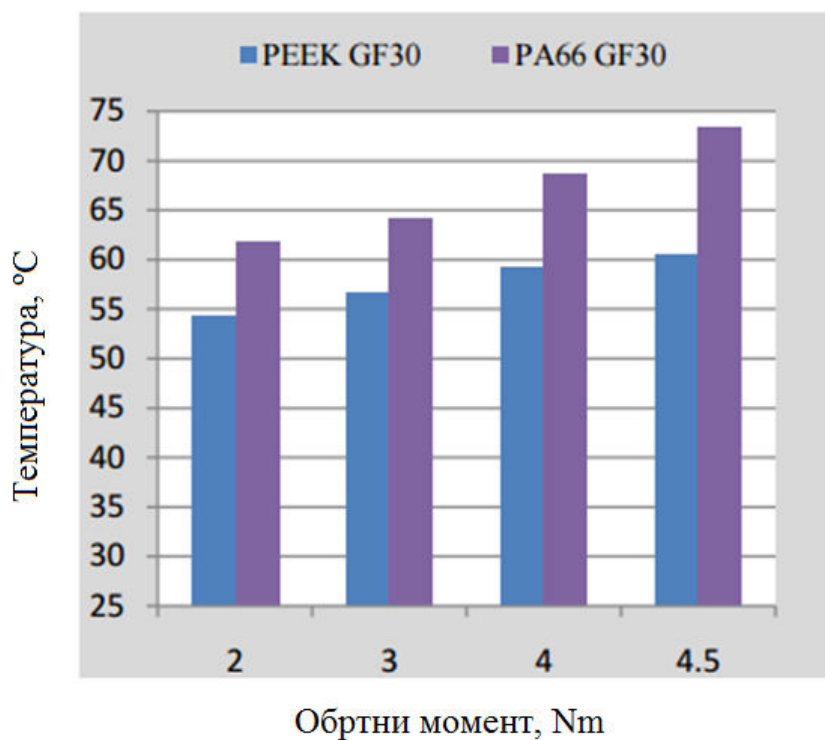


Слика 3.11. Приказ температуре у зависности од броја циклуса за PA66 30GF [11]



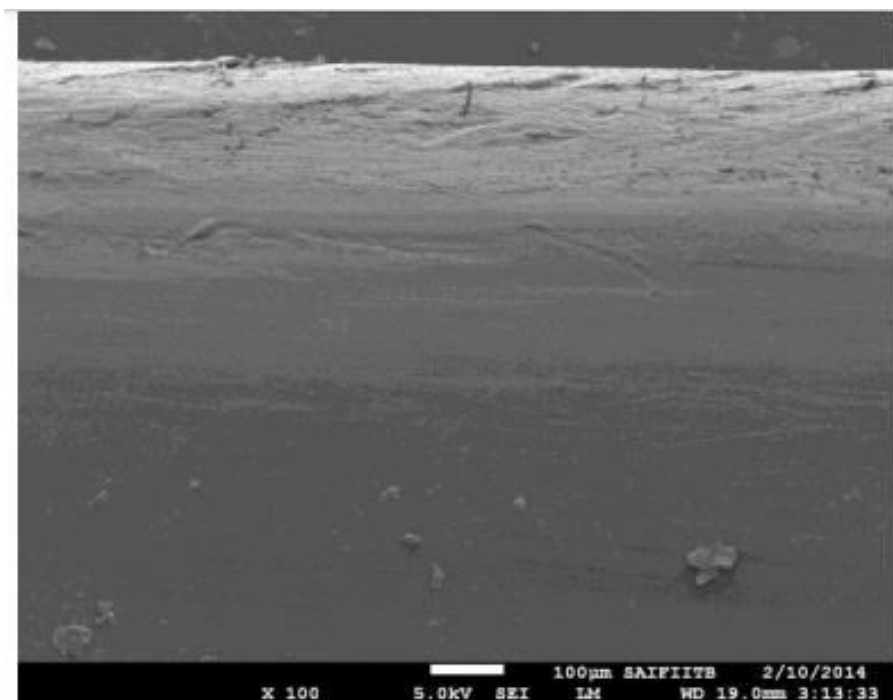
Слика 3.12. Приказ температуре у зависности од броја циклуса за PEEK 30 GF [11]

На слици 3.13 је приказан упоредни приказ температура мерених на зупцима зупчаника од материјала PEEK GF30 и PA66 GF30 при различитим вредностима обртног момента. Са слике се закључује да је температура за полиамид већа у односу на поли-етар-етар-кетон при свим вредностима обртног момента.



Слика 3.13. Упоредни приказ температура [11]

Даље на слици 3.14 је изглед материјала пре почетка експеримента, док је на слици 3.15 приказано оштећење зупца зупчаника за полиамид после експеримента. До лома зупца зупчаника је дошло услед замора материјала.

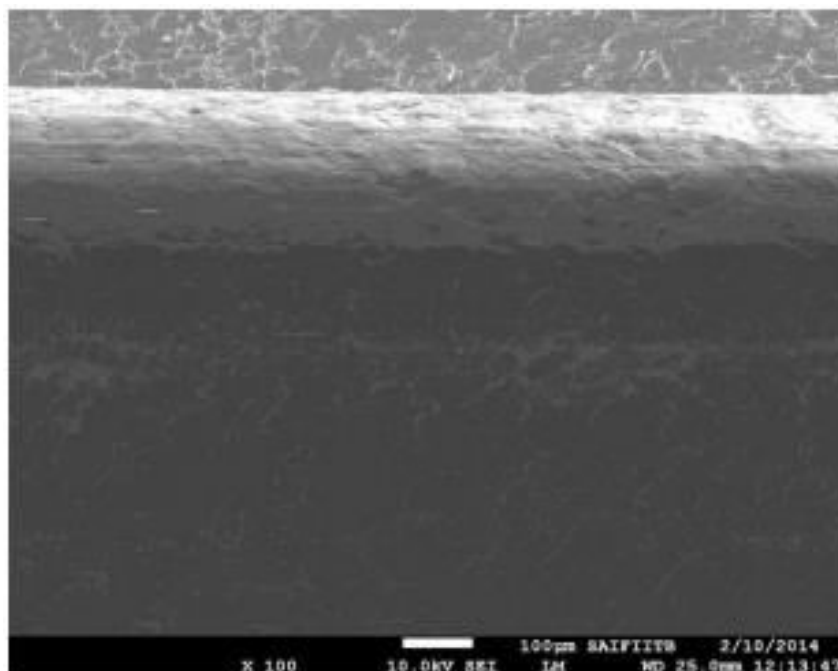


Слика 3.14. Изглед материјала PA66 GF30 пре извођења експеримента [11]

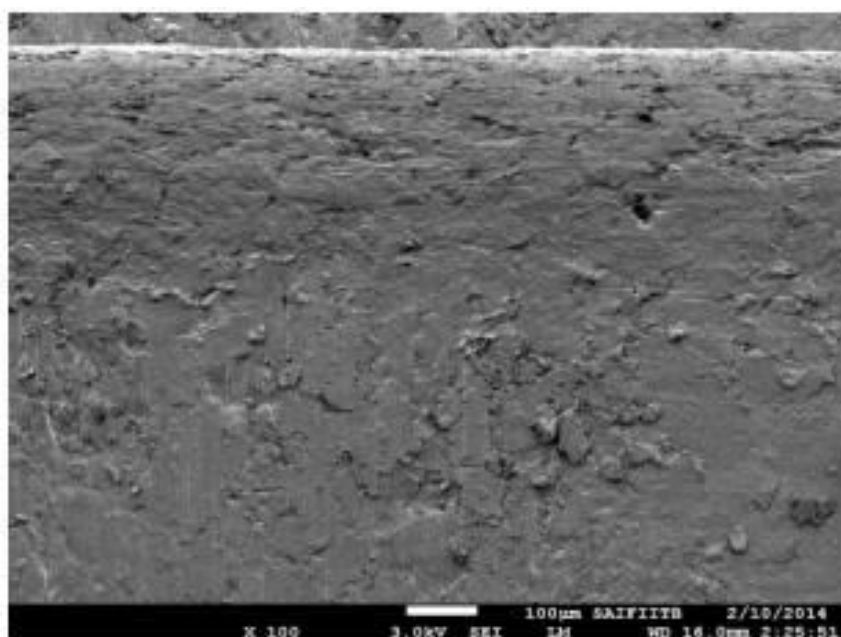


Слика 3.15. Изглед материјала PA66 GF30 након извођења експеримента [11]

На слици 3.16 је изглед материјала пре почетка експеримента за PEEK 30 GF, док је на слици 3.17 приказан изглед материјала после експеримента. Зупчаник од поламида са додатком стаклених влакана достиже веће вредности температуре него зупчаник од поли-етар-етар-кетона са додатком стаклених влакана. Зупчаник од PEEK 30 GF се у експерименту показао издржљивији него зупчаник од PA66 GF30.



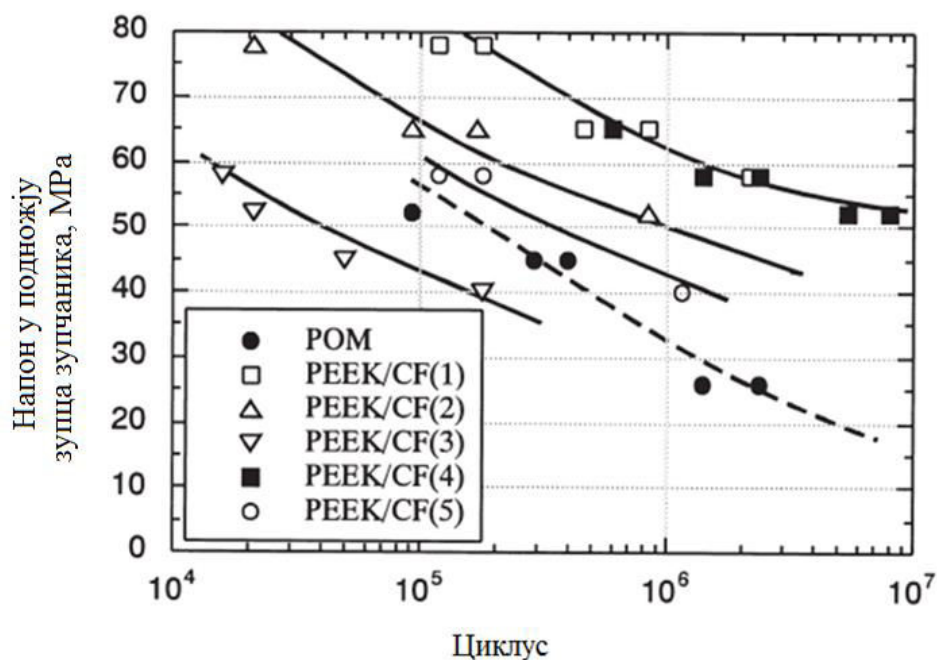
Слика 3.16. Изглед материјала PEEK 30 GF пре извођења експеримента [11]



Слика 3.17. Изглед материјала PEEK 30 GF након извођења експеримента [11]

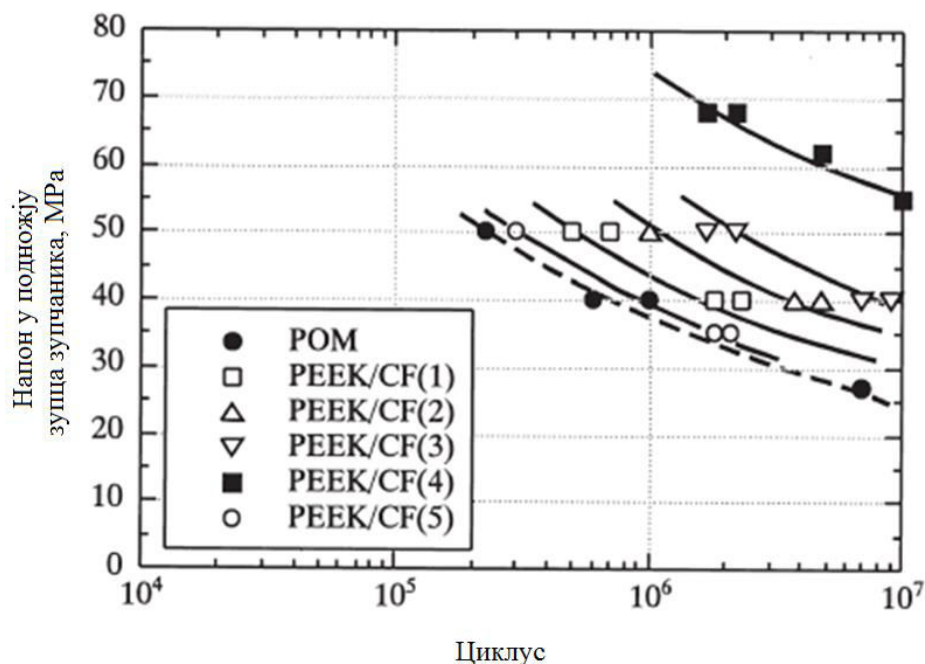
Постоји такође и истраживање о понашању зупчаника који су израђени од полиоксиметилена и поли-етер-етер-кетона [12]. Извршено је испитивање где је погонски зупчаник био израђен од материјала PEEK/CF, а гоњени од челика и није коришћено средство за подмазивање.

На слици 3.18 је приказан график оптерећења зупчаника израђених од различитих врста материјала PEEK/CF у односу на зупчаник израђен од POM. На графику је приказано да се најмањи напон у подножју зупца јавља код зупчаника од PEEK/CF (3), а највећи код зупчаника од PEEK/CF(1) и PEEK/CF(4). До лома зупчаника је дошло услед замора материјала.



Слика 3.18. Дијаграм оптерећења зупчаника од PEEK/CF и од POM без подмазивања [12]

На слици 3.19 је приказан дијаграм напона у подножју зубаца добијен спрезањем зупчаника од истог материјала, при чему је као средство за подмазивање коришћена литијумска маст. У поређењу са претходним графиком, види се да се највећи напон јавља код истог материјала PEEK/CF(4). Овде је до лома зупчаника дошло код PEEK/CF(1) и PEEK/CF(5) услед хабања на зупцима зупчаника, а код других услед замора материјала.



Слика 3.19. Дијаграм оптерећења зупчаника од PEEK/CF и од POM са подмазивањем [12]

Долази се до закључка да се код зупчаника од РЕЕК/CF(4) и РЕЕК/CF(3) уз примену литијумске масти оптерећење у подножју зубаца зупчаника повећава, а код зупчаника од РЕЕК/CF(5) опада, али се јавља интезивно хабање.

У табели 3.3 су дате карактеристике зупчаника од РЕЕК ојачаних карбонским влакнима (РЕЕК/CF).

Табела 3.3. Карактеристике зупчаника од РЕЕК/CF[12]

Зупчаник	Затезна чврстоћа, МПа	Издужење, %	Чврстоћа подножја зубаца, МПа
РЕЕК/CF (1)	200	5,4	265
РЕЕК/CF (2)	225	5,4	305
РЕЕК/CF (3)	150	4	195
РЕЕК/CF (4)	205	6,5	270
РЕЕК/CF (5)	160	4,5	200

3.3. Израда композитних зупчаника

Производња делова од композита може се извести: пресовањем, ињекционим ливењем, вучењем-екструзијом и намотавањем филамената. Поступак пресовања углавном се односи на плочасте облике, а ињекционо ливење на носеће делове конструкције или сендвич конструкције. Вучење-екструзија се користи за израду производа константног попречног пресека. Намотавање филамената примењује се при изради округлих делова, као нпр. цеви [1].

Композитни зупчаници се могу изградити као једноделна или дводелна конструкција (са уметнутом главчином од метала), са унутрашњем озубљењем, са ребрима, изједна са вратилом, при чему се, у односу на металне зупчанике, који захтевају машинску обраду и додатну монтажу, смањује број делова, монтажа и трошкови израде. На слици 3.20 је приказан зупчаник од композита са уметнутом главчином од метала, који има могућност преношења великог обртног момента, уз истовремено смањење буке и вибрација.



Слика 3.20. Зупчаник од композита [18]

Зупчаници се израђују бризгањем у калупе, чиме се добијају готови делови. Ова технологија израде спада у економичне, ефикасне и прецизне технологије израде, код којих није потребна завршна обрада. Скупљање представља проблем у процесу производње. Међутим додавањем влакана, уз правилну оријентацију влакана, смањује се скупљање материјала при хлађењу, односно зупчаници израђени од полиамида са стакленим влакнима показују мање одступање профила зупца у односу на зупчанике од чистог полиамида [13].

У раду [14] су резултати тестирања полиамида са додатком и без додатка стаклених влакана. У табели 3.4 је приказана релативна промена пречника теменог и подножног круга зупчаника, као и лучне дебљине зупца.

Табела 3.4. Промене димензија зупчаника [14]

Материјал	Релативна промена димензија, %		
	Лучна дебљина зупца зупчаника	Пречник теменог круга	Пречник подножног круга
РА6	9,28	2,25	1,95
РА6 15% GF	5,32	0,92	0,78
РА6 30% GF	4,83	0,58	0,49

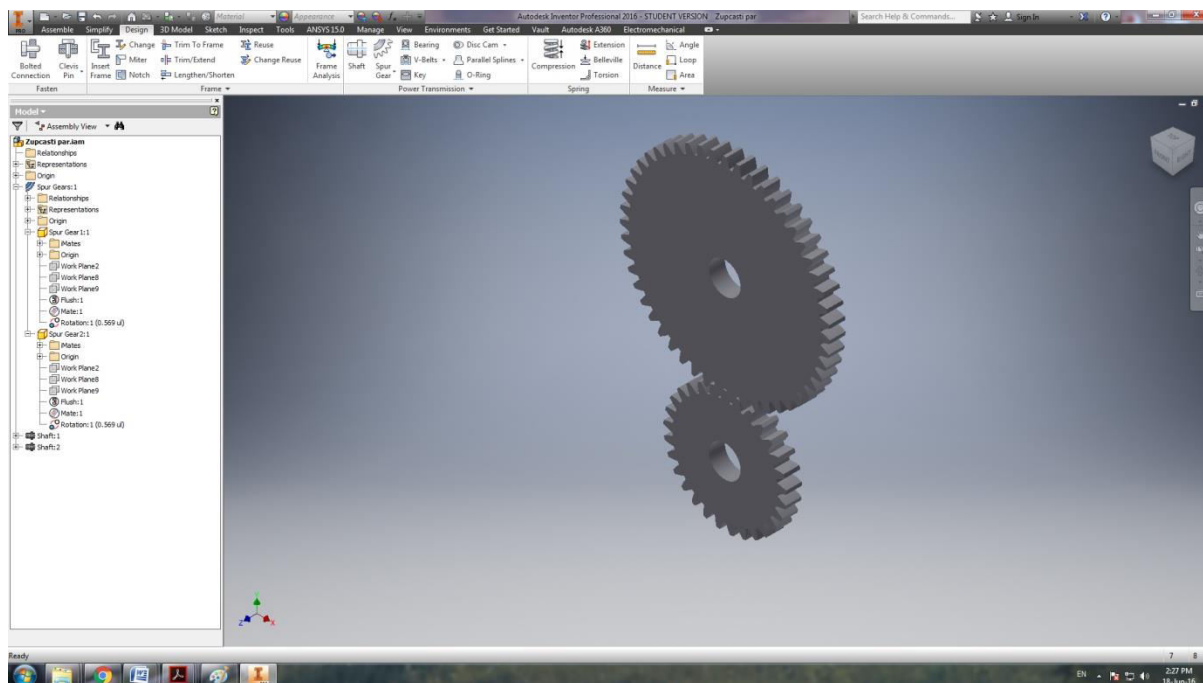
На основу табеле 3.4 види се да се промене вредности димензија смањује са додатком влакана. Најмање скупљање материјала јавља се код зупчаника са додатком 30% стаклених влакана.

Различити материјали за израду зупчаника, због своје структуре, различито реагују на промену радних услова. Брзина рада композитних зупчаника утиче на пораст радне температуре. Код неких материјала, ако је оптерећење велико и зупчаници раде великом брзином, модул еластичности се не мења. Висока температура смањује модул еластичности. Зато је потребно узети у обзир ове услове при изради зупчаника.

4. ПРОРАЧУН НАПОНА НА БОКУ И У ПОДНОЖЈУ ЗУПЦА ЧЕЛИЧНИХ ЗУПЧАНИКА АНАЛИТИЧКИМ ПУТЕМ

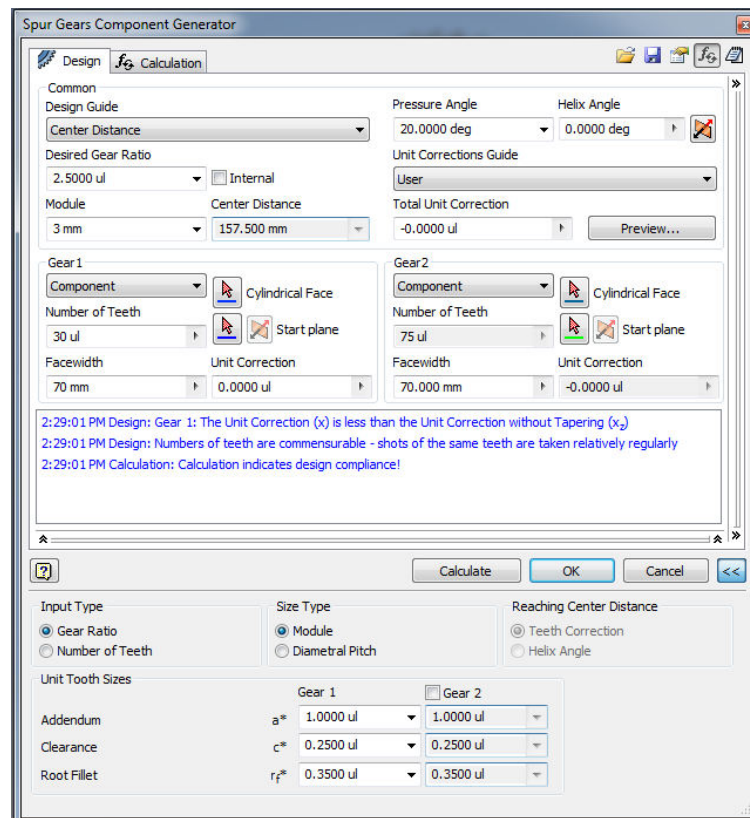
Избор материјала за израду зупчаника зависи од више фактора као што су оптерећење, начин израде, цена, квалитет, величина серије, бука и вибрације у току рада. Употребљавају се материјали као што су метали (челик, сиви лив, црни темпер лив...), синтеровани материјали, пластичне масе... Челик се веома много примењује, јер се различитим поступцима механичке и термичке обраде могу постићи жељене карактеристике зупчаника у погледу носивости.

У оквиру софтверског пакета *Autodesk Inventor* постоји модул *Design Accelerator* намењен прорачуну машинских елемената. У софтверском пакету *Autodesk Inventor* је извршен прорачун цилиндричних зупчаника.

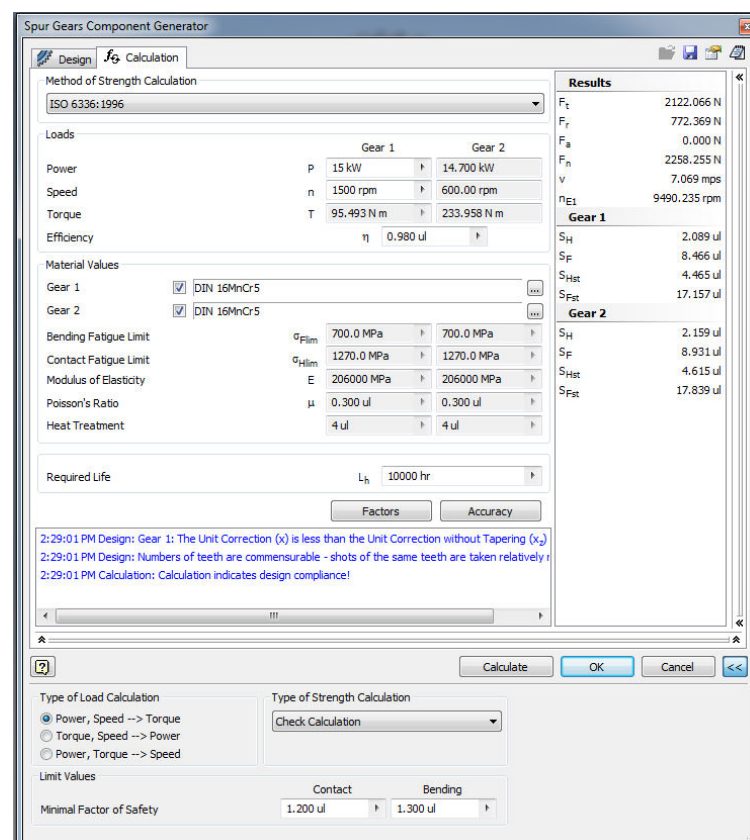


Слика 4.1. Изглед прозора Autodesk Inventor

На слици 4.2 је приказан изглед прозора када је означена картица *Design*. Приказана су поља у која је потребно унети величине као што су модул, осно растојање, ширина зупчаника... На слици 4.3 су приказана поља у која је такође потребно унети вредности, изабрати материјал за гоњени и погонски зупчаник. Унета је вредност снаге 15 kW, број обртаја 1500 min^{-1} . Кликком на дугме *Calculate* добијају се резултати. Са десне стране су приказани резултати, односно могу се видети вредности радијалне, нормалне и обимне силе, вредности степена сигурности гоњеног и погонског зупчаника. Ако поједини степени сигурности немају задовољавајуће вредности (означени црвеном бојом), онда је потребно исправити унете податке (повећање димензија зупчаника, изабрати квалитетнији материјал...). Као материјал изабран је 16MnCr5 (Č4320) из понуђене базе материјала у програму *Inventor*.

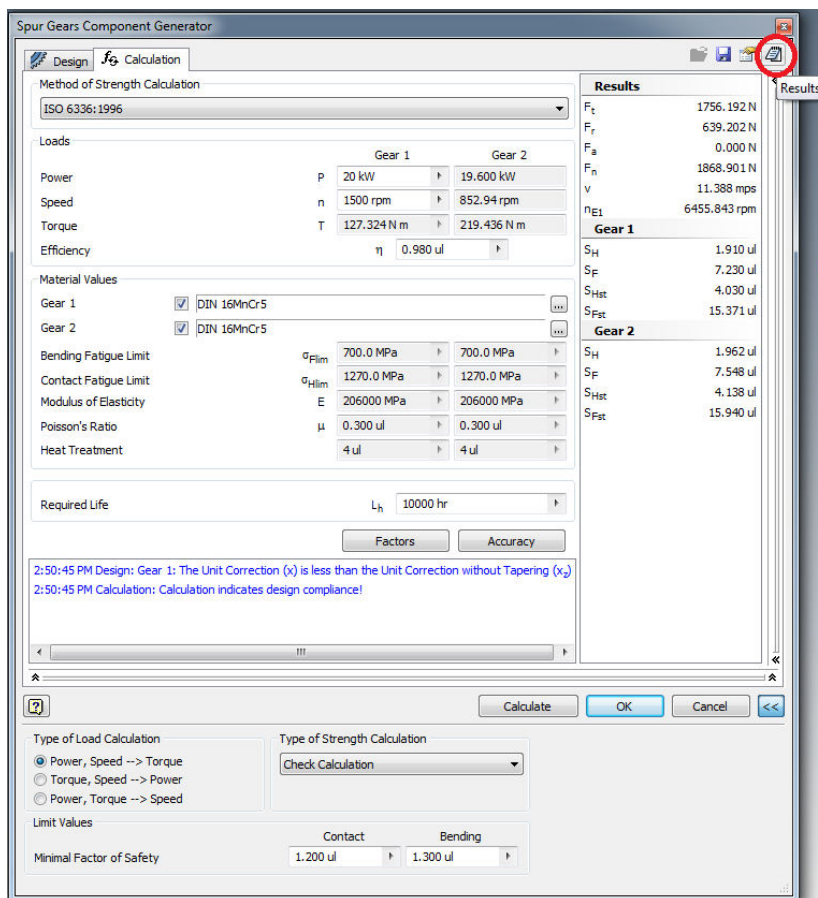


Слика 4.2. Изглед прозора Spur Gear Component Generator (Design)

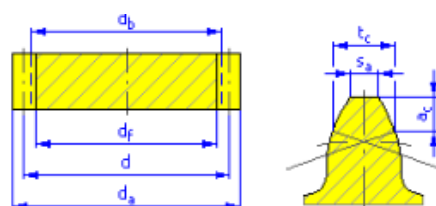


Слика 4.3. Изглед прозора Spur Gear Component Generator (Calculation)

Кликом на означену иконицу у горњем десном углу, добија се извештај са свим подацима везаним за зупчасти пар (Слика 4.4). На слици 4.5 је приказ једног дела извештаја.



Слика 4.4. Изглед прозора Spur Gear Component Generator (Calculation)



□ Loads

		Gear 1	Gear 2
Power	P	20.000 kW	19.600 kW
Speed	n	1500.00 rpm	852.94 rpm
Torque	T	127.324 N m	219.436 N m
Efficiency	η	0.980 ul	
Radial Force	F_r	639.202 N	
Tangential Force	F_t	1756.192 N	
Axial Force	F_a	0.000 N	
Normal Force	F_n	1868.901 N	
Circumferential Speed	v	11.388 mps	
Resonance Speed	n_{E1}	6455.843 rpm	

Слика 4.5. Изглед извештаја

У табели 4.1 су приказане димензије зупчаника, док су у табели 4.2, 4.3, 4.4 и 4.5 приказане вредности резултата добијених прорачуном у софтверском програму *Autodesk Inventor*.

Табела 4.1. Димензије цилиндричних зупчаника са правим зупцима

		Зупчаник 1	Зупчаник 2
Преносни однос	u	1,759	
Модул	m	5 mm	
Угао основног профила	α	20°	
Угао додирнице	α_w	20°	
Угао нагиба зубаца	β	0°	
Осно растојање	a	200 mm	
Број зубаца	z	29	51
Пречник подеоног круга	d	145 mm	255 mm
Ширина зупчаника	b	20 mm	20 mm
Материјал		16MnCr5 (Č4320)	16MnCr5 (Č4320)

Табела 4.2. Оптерећење зупчаника

		Зупчаник 1	Зупчаник 2
Снага	P	20 kW	19,6 kW
Број обртаја	n	1500 min ⁻¹	852,94 min ⁻¹
Обртни момент	T	127,324 Nm	219,436 Nm
Обимна сила	F_t	1756,192 N	
Радијална сила	F_r	639,202 N	
Нормална сила	F_n	1868,901 N	

Табела 4.3. Фактори оптерећења

Фактор радних услова	K_A	1,2
Фактор унутрашњих динамичких сила	K_V	1,431
Фактори расподеле оптерећења дуж додирне линије бокова	$K_{H\beta}$	1,85
	$K_{F\beta}$	1,18
Фактори расподеле оптерећења на парове зубаца	$K_{H\alpha}$	1,1
	$K_{F\alpha}$	1,08

Табела 4.4. Корекциони фактори за прорачун напона на боку зупца зупчаника

Фактор облика бока зупца	Z_H	2,495
Фактор еластичности материјала	Z_E	189,812 $\sqrt{N/mm^2}$
Фактор степена спрезања бока зупца	Z_ϵ	0,875
Фактор радног века	Z_{NT}	1
Фактор подмазивања	Z_L	0,967
Фактор храпавости	Z_R	1
Фактор обимне брзине	Z_V	1,004
Фактор утицаја разлике тврдоћа спрегнутих бокова	Z_W	1
Фактор величине зубаца	Z_X	1

Табела 4.5. Корекциони фактори за прорачун напона у подножју зупца зупчаника

		Зупчаник 1	Зупчаник 2
Фактор облика зупца	Y_{Fa}	2,562	2,336
Фактор концентрације напона	Y_{Sa}	1,632	1,727
Фактор степена спрезања	Y_{ϵ}	0,691	
Фактор радног века	Y_{NT}	1	
Фактор концентрације напона опитног зупчаника	Y_{ST}	1	
Релативни фактор осетљивости материјала на концентрацију напона	$Y_{\delta relT}$	1,176	1,184
Релативни фактор храпавости	Y_{RrelT}	1	
Фактор величине пресека	Y_X	1	

4.1. Прорачун носивости зупчаника

Користећи вредности добијене извештајем у софтверском пакету *Autodesk Inventor*, а које су приказане у табелама 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 и 4.5 рачуна се вредност радног напона на боку зупца зупчаника 1 [2]:

$$\sigma_{H0} = Z_H \cdot Z_E \cdot Z_{\epsilon} \cdot \sqrt{\frac{F_t}{d_1 \cdot b} \cdot \frac{u+1}{u} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}} \quad (4.1)$$

$$\sigma_{H0} = 2,495 \cdot 189,812 \cdot 0,875 \cdot \sqrt{\frac{1756,192}{145 \cdot 20} \cdot \frac{1,759+1}{1,759} \cdot 1,2 \cdot 1,461 \cdot 1,08 \cdot 1,278}$$

$$\sigma_{H0} = 628,957 \text{ N/mm}^2$$

Вредност критичног напона се рачуна на основу израза [2]:

$$[\sigma_H] = \sigma_{Hlim} \cdot Z_{NT} \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V \cdot Z_W \cdot Z_X \quad (4.2)$$

где је:

$\sigma_{Hlim} = 1270 \text{ N/mm}^2$ за 16MnCr5 (Č4320) [2].

$$[\sigma_H] = 1270 \cdot 1 \cdot 0,967 \cdot 1 \cdot 1,004 \cdot 1 \cdot 1$$

$$[\sigma_H] = 1233 \text{ N/mm}^2$$

Степен сигурности против разарања бокова зубаца се рачуна на основу израза [2]:

$$S_H = \frac{[\sigma_H]}{\sigma_{H0}} \quad (4.3)$$

$$S_H = \frac{1233}{628,957}$$

$$S_H = 1,96 > S_{Hmin} = 1,25$$

Радни напон у подножју зубаца се рачуна на основу израза [2]:

$$\sigma_F = Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_\epsilon \cdot \frac{F_t}{b \cdot m} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad (4.4)$$

Вредност радног напона у подножју зубаца за погонски зупчаник је:

$$\sigma_{F_1} = 2,562 \cdot 1,632 \cdot 0,691 \cdot \frac{1756,192}{20 \cdot 5} \cdot 1,2 \cdot 1,461 \cdot 1,08 \cdot 1,19$$

$$\sigma_{F_1} = 114,328 \text{ N/mm}^2$$

Вредност критичног напона у подножју зубаца се рачуна на основу израза [2]:

$$[\sigma_F] = \sigma_{Flim} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{\delta relT} \cdot Y_{RelT} \cdot Y_X \quad (4.5)$$

где је:

$$\sigma_{Flim} = 700 \text{ N/mm}^2 \text{ за } 16\text{MnCr}5 \text{ (}\check{\text{C}}4320\text{) [2].}$$

Вредност критичног напона у подножју зубаца за погонски зупчаник износи:

$$[\sigma_F]_1 = 700 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,176 \cdot 1 \cdot 1$$

$$[\sigma_F]_1 = 823,2 \text{ N/mm}^2$$

Степен сигурности у подножју зубаца се рачуна на основу израза [2]:

$$S_F = \frac{[\sigma_F]}{\sigma_F} \quad (4.6)$$

Степен сигурности у подножју зубаца за погонски зупчаник износи:

$$S_{F_1} = \frac{823,2}{114,328}$$

$$S_{F_1} = 7,2 > S_{Fmin} = 1,25$$

Радни напон у подножју зубаца гоњеног зупчаника је:

$$\sigma_{F_2} = 2,336 \cdot 1,727 \cdot 0,691 \cdot \frac{1756,192}{20 \cdot 5} \cdot 1,2 \cdot 1,461 \cdot 1,08 \cdot 1,19$$

$$\sigma_{F_2} = 110,311 \text{ N/mm}^2$$

Вредност критичног напона у подножју зубаца гоњеног зупчаника је:

$$[\sigma_F]_2 = 700 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,184 \cdot 1 \cdot 1$$

$$[\sigma_F]_2 = 828,8 \text{ N/mm}^2$$

Степен сигурности у подножју зубаца за гоњени зупчаник је:

$$S_{F_2} = \frac{828,8}{110,311}$$

$$S_{F_2} = 7,51 > S_{Fmin} = 1,25$$

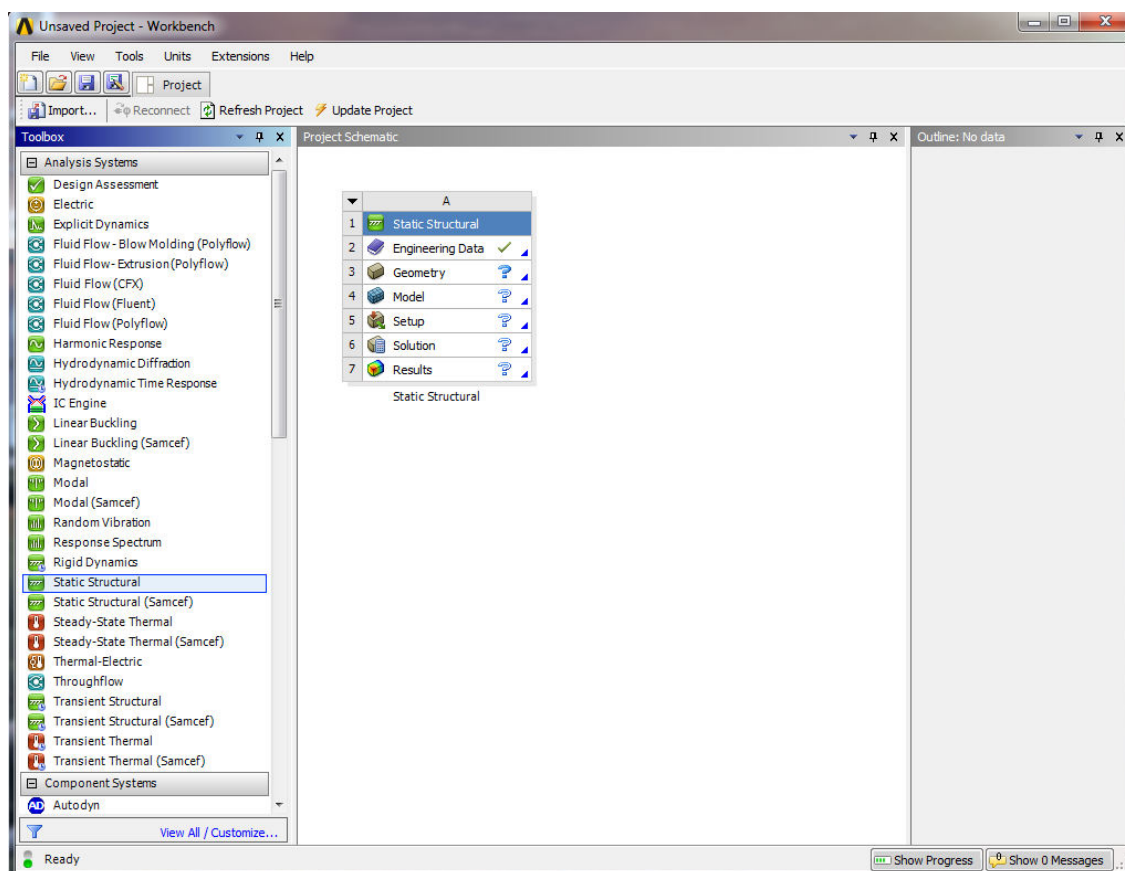
Прорачунате вредности степена сигурности за погонски и гоњени зупчаник су веће од препоручене вредности, па у току рада неће доћи до лома зубаца у подножју.

5. ПРОРАЧУН НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА ЧЕЛИЧНИХ ЗУПЧАНИКА ПРИМЕНОМ МКЕ

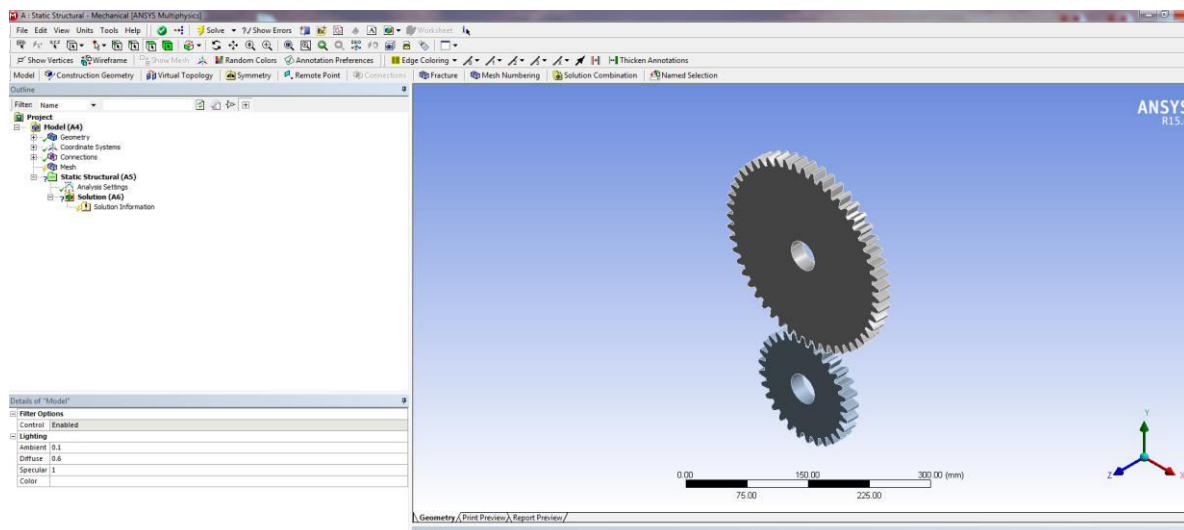
Метода коначних елемената је једна од најшире прихваћених савремених метода у свим областима физике и технике. Примена ове методе због обимности рачунања, подразумева искључиво примену рачунара. Помоћу ове методе, за разлику од аналитичких, могу се решавати најсложенији проблеми, узимати скоро потпуно реални гранични услови, сложени геометријски облици и др. Метода коначних елемената је савремена нумеричка метода која се користи за пројектовање и прорачун машинских конструкција уз примену рачунара.

5.1. Прорачун напона и деформација у софтверском пакету *Ansys*

Прорачун напона зупчаника израђених од материјала 16MnCr5 (Č4320) је рађен у софтверском пакету *Ansys*. Као модул за анализу бира се *Static structural* (Слика 5.1). Да би се унела геометрија (*Geometry*) која ће се анализирати потребно је да се модел зупчастог пара урађен у програму *Inventor* сачува у .IGES формату. Након унете геометрије, стартује се *Model*, након чега се појављује нови прозор са зупчастим паром (Слика 5.2) [19].



Слика 5.1. Изглед прозора за модул *Static structural*



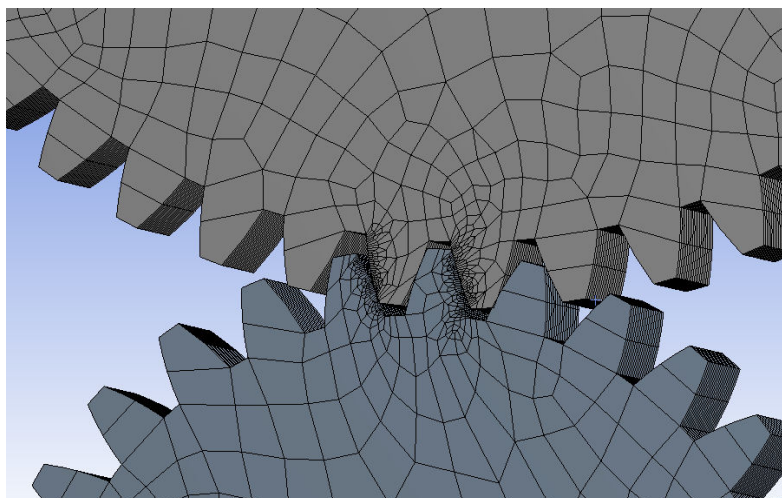
Слика 5.2. Изглед прозора за анализу

У оквиру овог прозора прво се задаје материјал. На слици 5.3 је приказано да је као материјал изабран 16MnCr5 (Č4320).

+ Graphics Properties	
+ Definition	
- Material	
Assignment	16MnCr5
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
+ Bounding Box	
+ Properties	
+ Statistics	

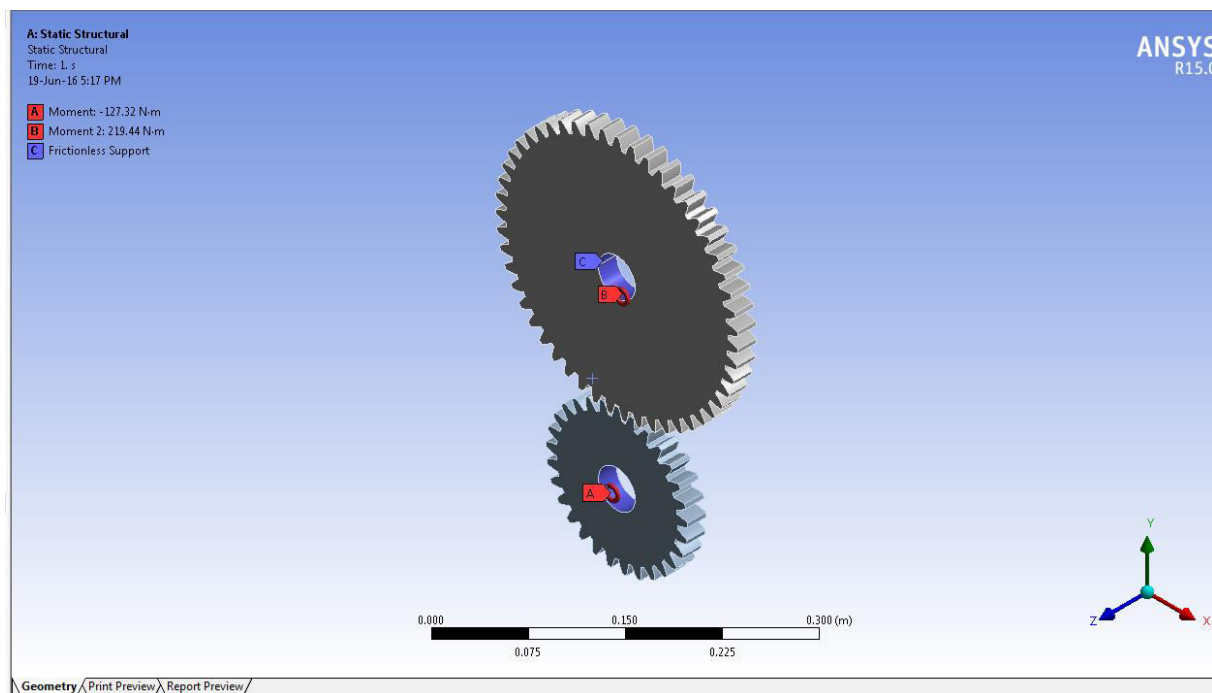
Слика 5.3. Избор материјала за анализу

Затим се бира врста коначног елемента и величина коначног елемента. На слици 5.4 је приказан изглед модела зупчаника са генерисаном мрежом коначних елемената. Мрежа је у области контакта зубаца уситњена.

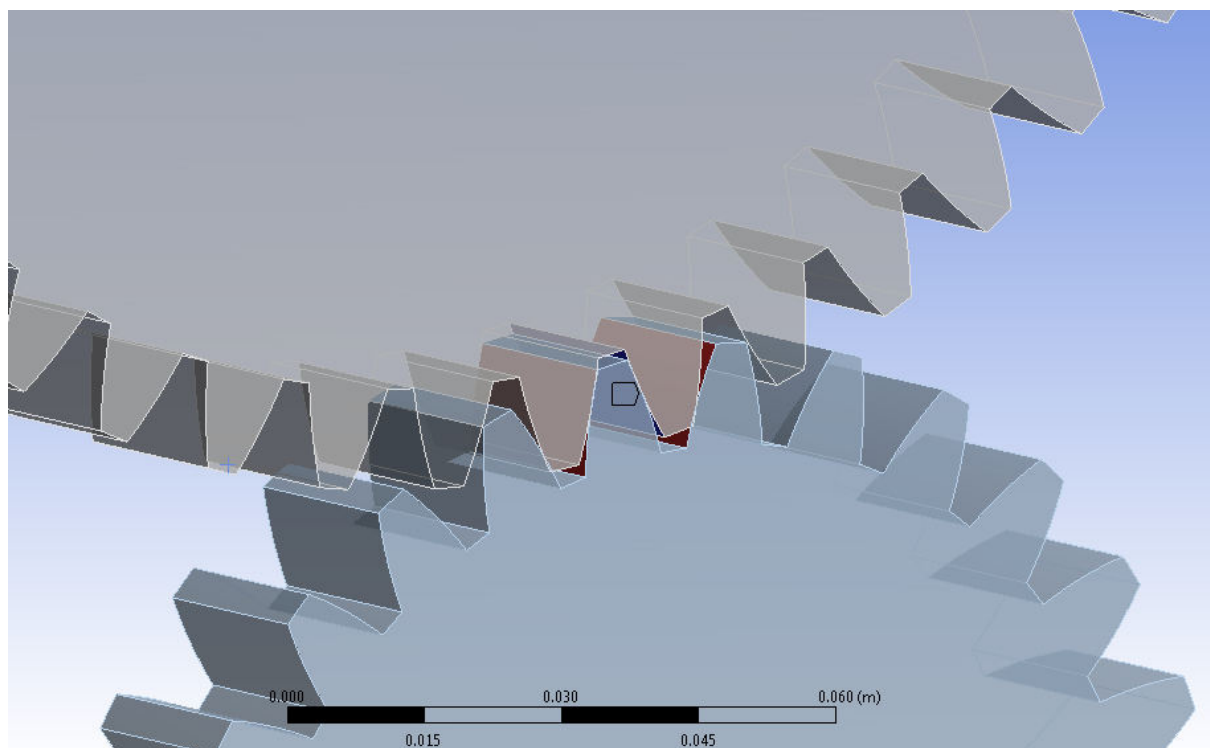


Слика 5.4. Генерисана мрежа коначних елемената

На слици 5.5 су приказана оптерећења која су задата, као и остали услови, док су на слици 5.6 приказане површине у контакту зубаца зупчаника.

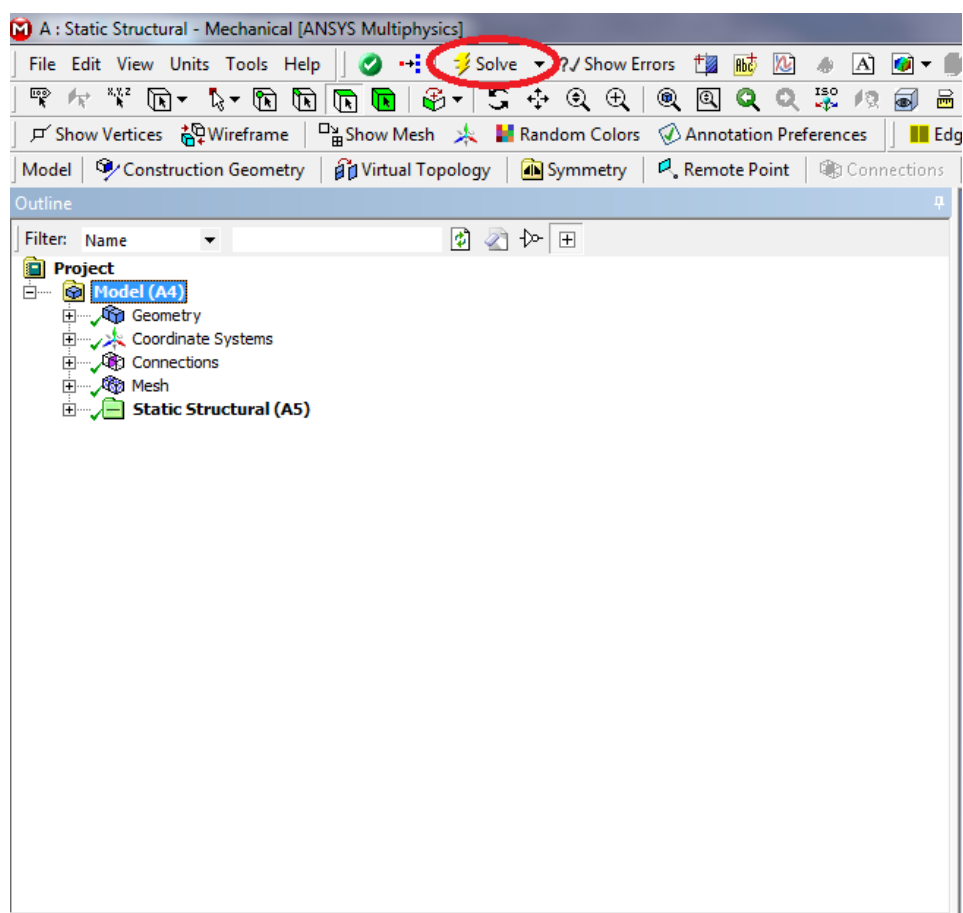


Слика 5.5. Оптерећења и ограничења на зупчаницима

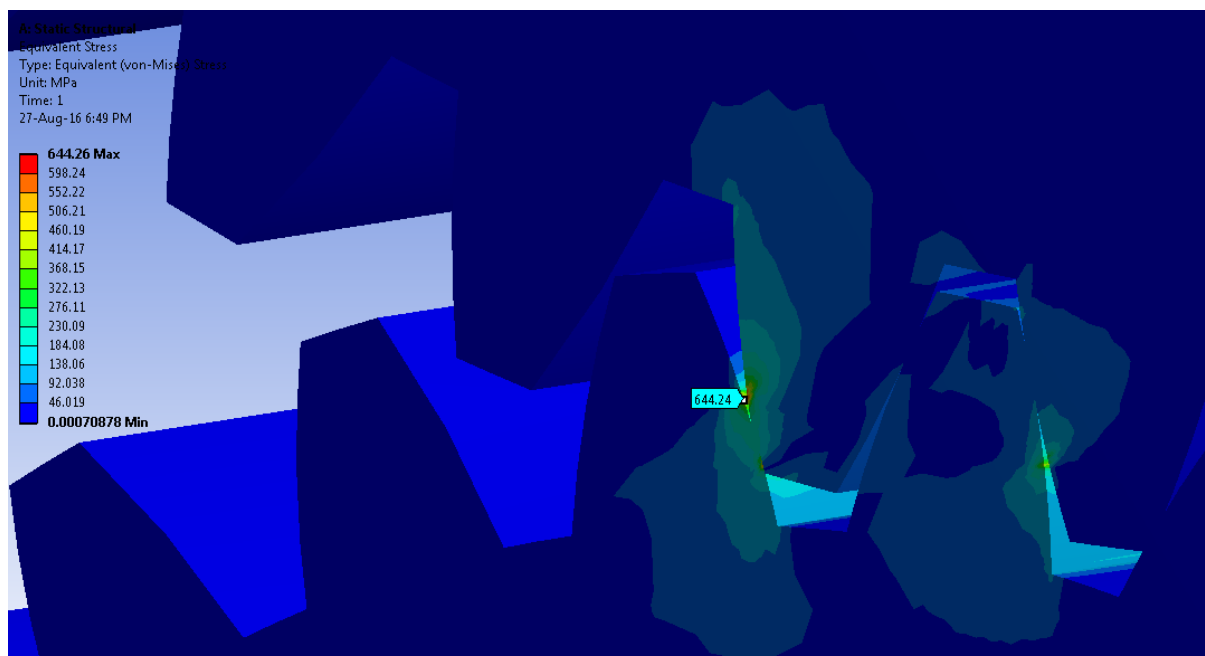


Слика 5.6. Контакт зубаца погонског и гоњеног зупчаника

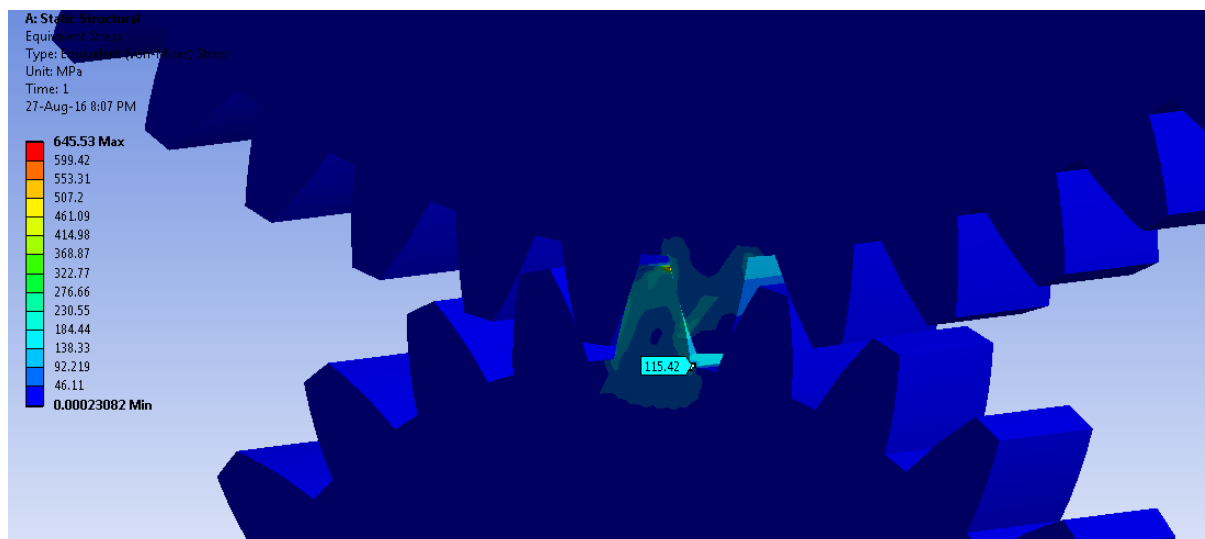
Када се дефинишу сви потребни услови, кликом на дугме *Solve*, покреће се анализа, затим се испитују резултати анализе (Слика 5.7). На слици 5.8 је приказана вредност напона на боку зупца, на слици 5.9 је приказана вредност напона у подножју зупца зупчаника, а на слици 5.10 деформационо стање зупчаника.



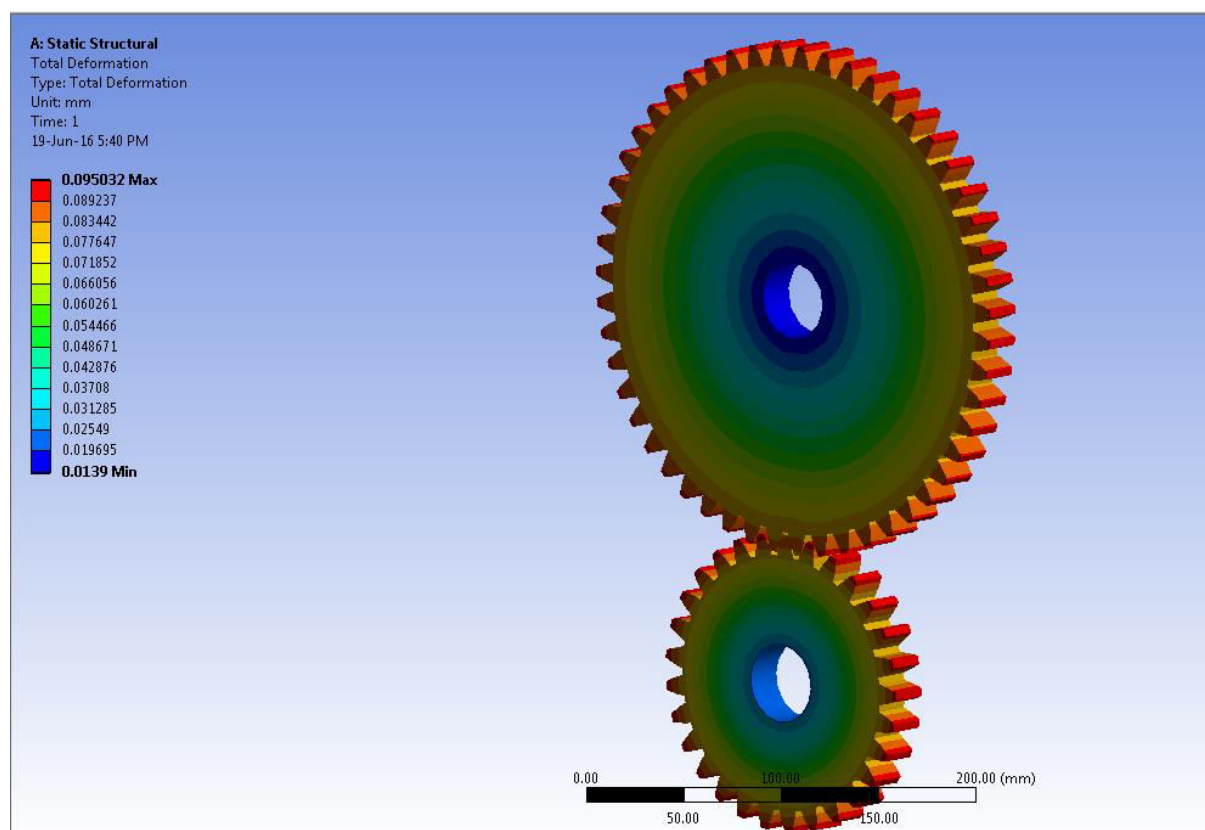
Слика 5.7. Покретање анализе



Слика 5.8. Вредност напона на боку зупца зупчаника

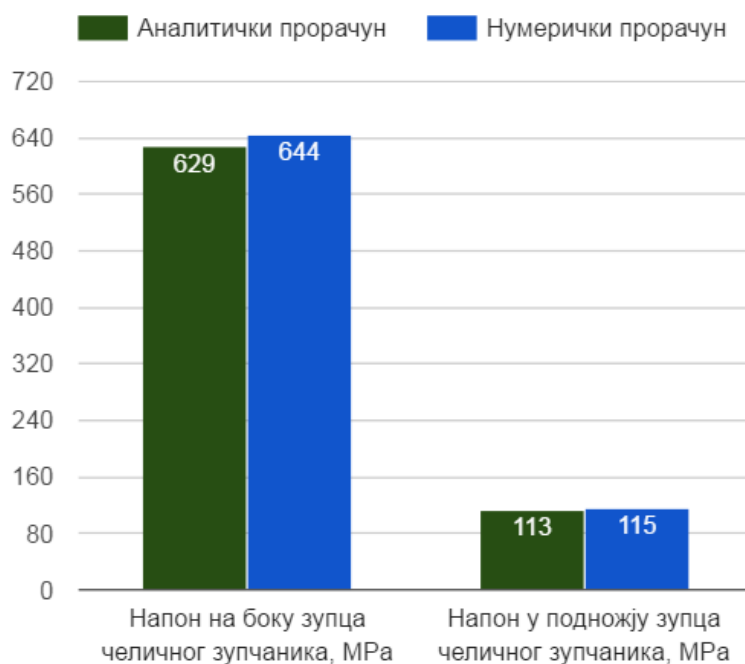


Слика 5.9. Вредност напона у подножју зупца зупчаника



Слика 5.10. Деформационо стање зупчаника

На слици 5.11 је дат табеларни приказ резултата, а у табели 5.1. је дат приказ вредности напона добијених аналитичким и нумеричким путем. Извршено је њихово поређење, где су вредности одступања такође приказане у табели 5.1. Вредности одступања показују да овај модел урађен у софтверском пакету *Ansys* потврђен, тако да се овај модел усваја за испитивање зупчаника од композитних материјала.



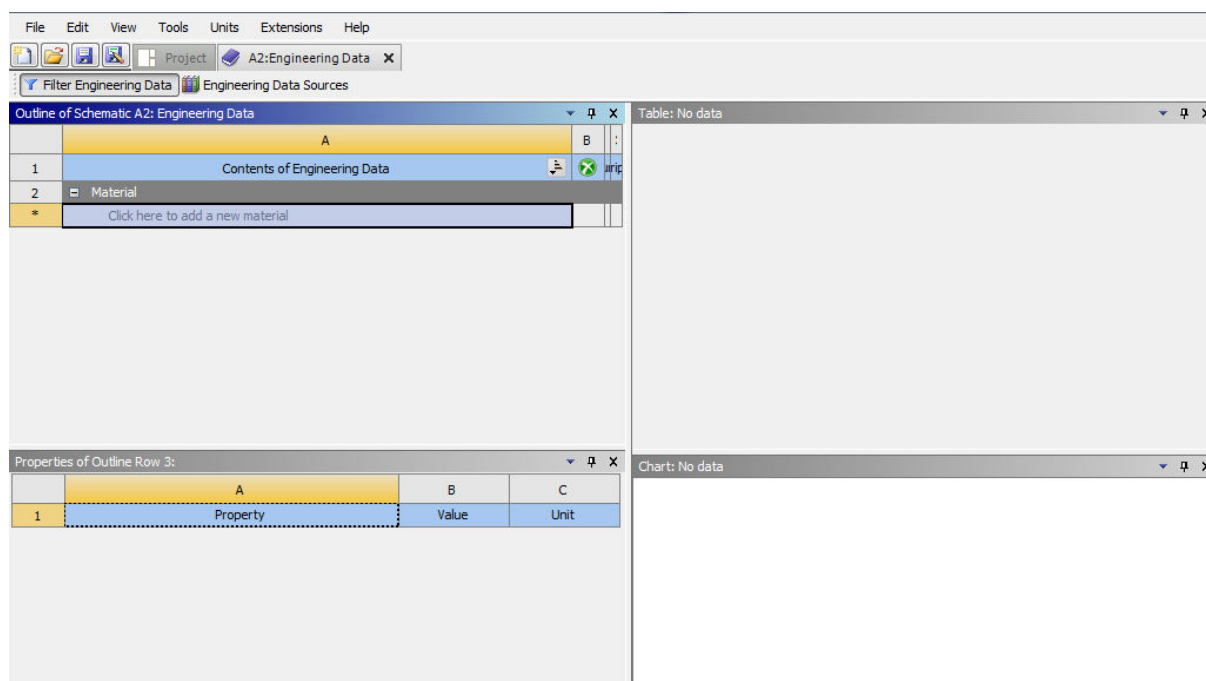
Слика 5.11. Табеларни приказ резултата

Табела 5.1. Поређење вредности напона

	Аналитички прорачун	Нумерички прорачун	Одступање
Напон на боку зупца челичног зупчаника	629 МПа	644 МПа	2,38 %
Напон у подножју зупца челичног зупчаника	113 МПа	115 МПа	1,77 %

6. ПРОРАЧУН НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА КОМПОЗИТНИХ ЗУПЧАНИКА ПРИМЕНОМ МКЕ

У овом поглављу су приказани резултати за неколико врста композитних зупчаника. Исто је као и у претходном поглављу, анализа извршена у софтверском пакету *Ansys*. Као материјали за анализу напонско-деформационог стања коришћени су поли-етар-етар-кетон ојачан карбонским и стакленим влакнима, полиамид РА6 ојачан стакленим влакнима и полиамид РА 66 ојачан стакленим влакнима. Користи се исти модел, иста ограничења као у претходном поглављу, и у оквиру истог примера бира се други материјал (Слика 6.2).



Слика 6.1. Додавање новог материјала



Слика 6.2. Избор другог материјала за даљу анализу

6.1. Анализа зупчаника од композитног материјала-PEEK 30GF

Материјал PEEK 30GF је отпоран на високе температуре, отпоран на корозију, на хабање, налази примену у многим областима.

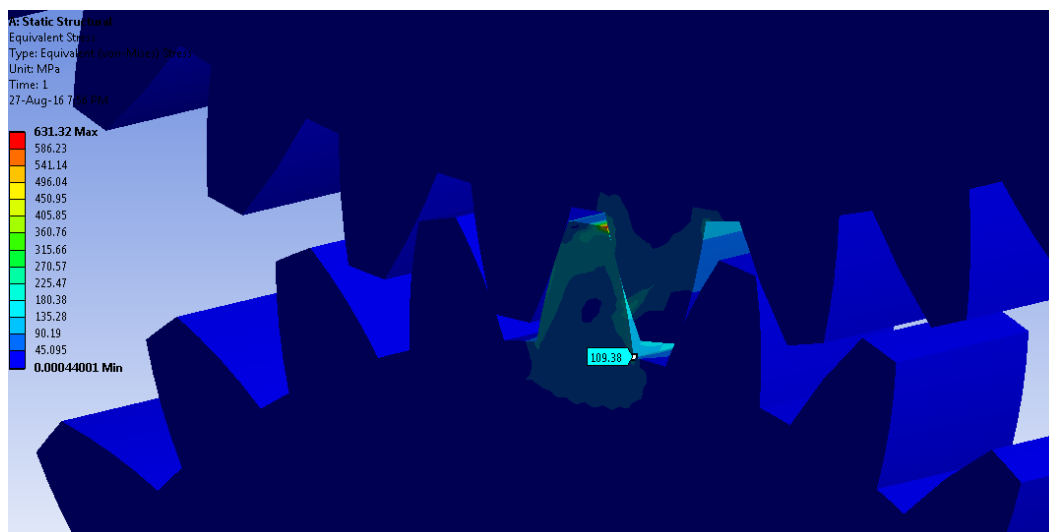
Табела 6.1. Карактеристике материјала PEEK 30GF [20]

Материјал	Модул еластичности	Поасонов коефицијент
PEEK 30GF	10300 MPa	0,4

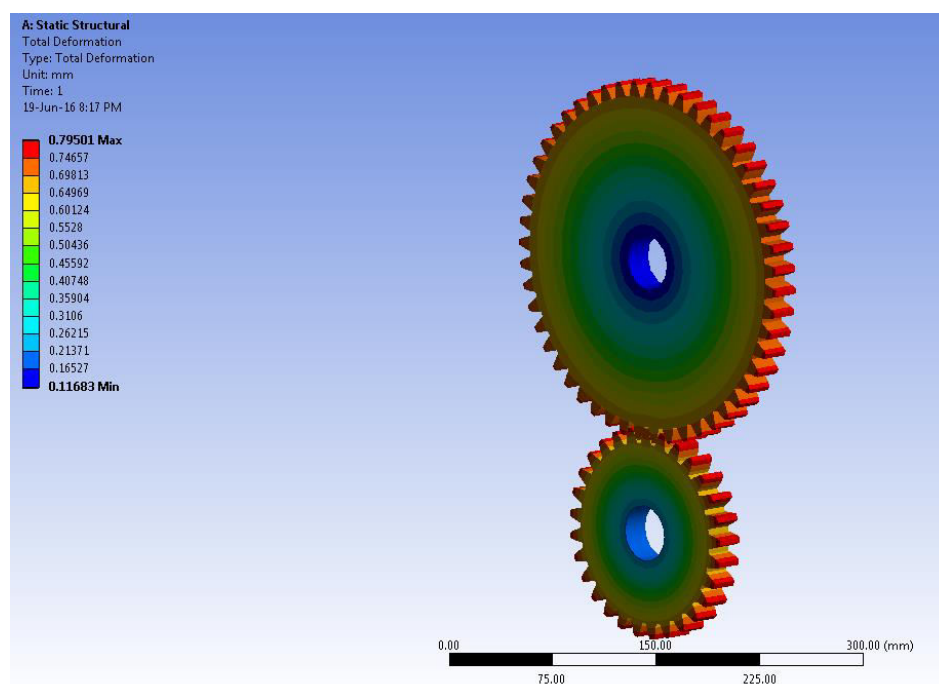
На сликама 6.3 и 6.4 су приказани резултати напона добијених за материјал поли-етар-етар-кетон ојачан 30% стакленим влакнима, а на слици 6.5 деформационо стање зупчаника. Напон на боку зупца зупчаника је 631 MPa, а напон у подножју зупца зупчаника 109 MPa. Вредност деформације је 0,79 mm.



Слика 6.3. Вредност напона на боку зупца зупчаника од PEEK 30GF



Слика 6.4. Вредност напона у подножју зупца зупчаника од PEEK 30GF



Слика 6.5. Деформационо стање зупчаника од PEEK 30GF

Табела 6.2. Резултати за материјал PEEK 30GF

Материјал	Напон на боку зупца зупчаника, МПа	Напон у подножју зупца зупчаника, МПа	Деформација, mm
PEEK 30GF	631	109	0,79

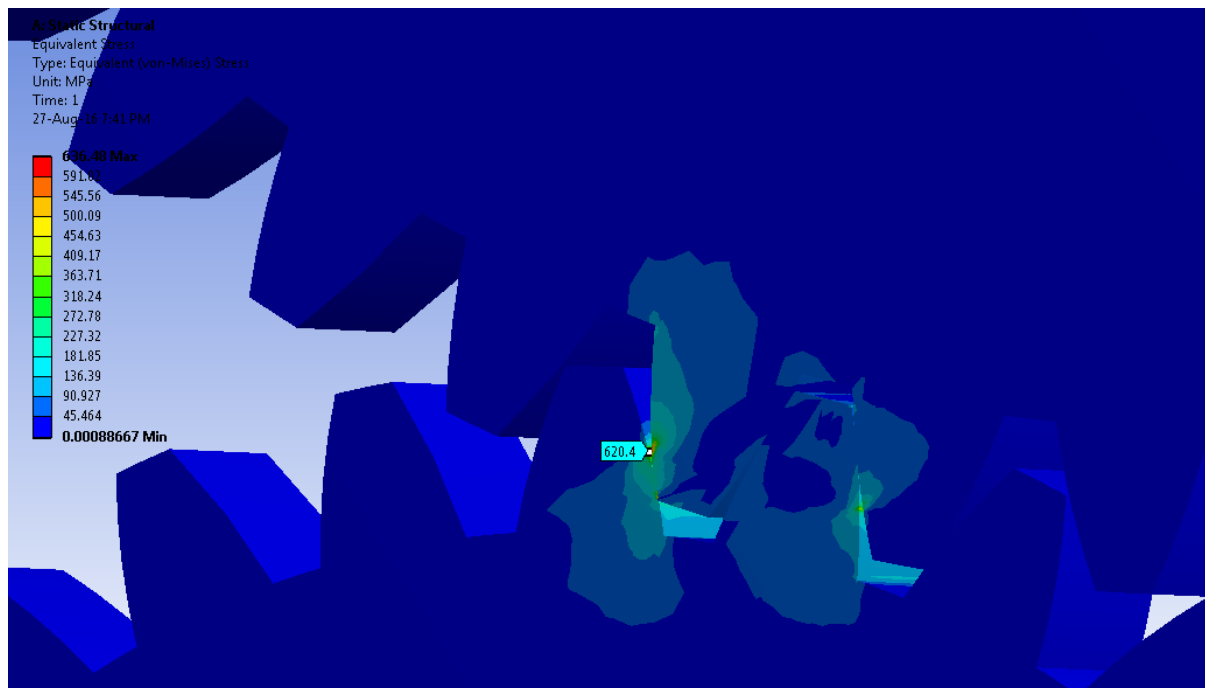
6.2. Анализа зупчаника од композитног материјала-PEEK 30CF

Поли-етар-етар-кетон ојачан 30% карбонским влакнима има такође примену у многим областима као што су медицина, фармацеутска индустрија, аутомобилска индустрија, хемијска индустрија, текстилна индустрија и др. Користи се за израду клизних лежајева, за израду компоненти за многе машине, и других машинских делова. Има отпорност на високе температуре, на корозију, лак за машинску обраду, отпоран је на гама зрачење, има димензионалну стабилност.

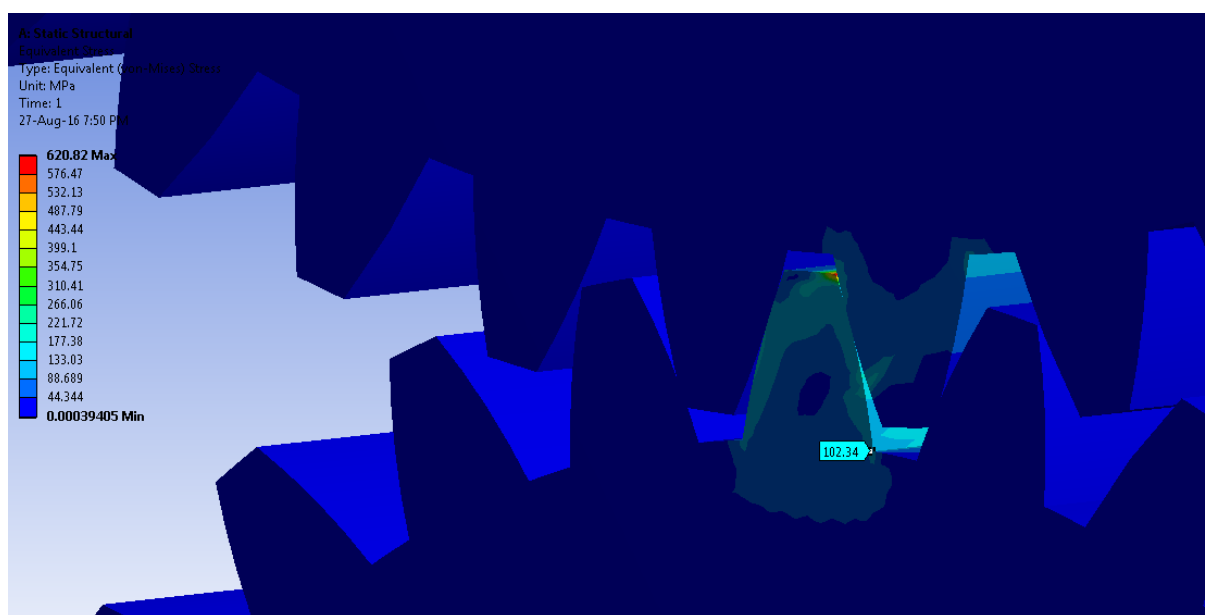
Табела 6.3. Карактеристике материјала PEEK 30CF [21]

Материјал	Модул еластичности	Поасонов коефицијент
PEEK 30CF	28000 МПа	0,4

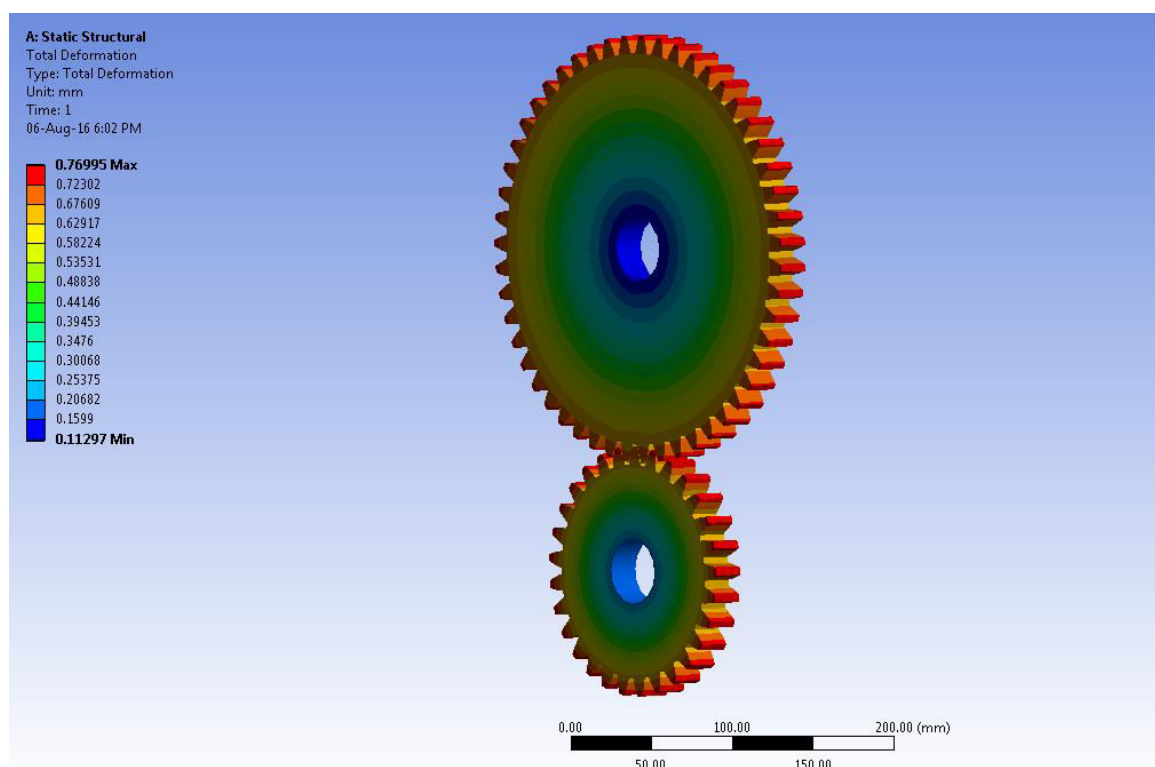
На сликама 6.6, 6.7 и 6.8 су приказани резултати добијени за материјал поли-етар-етар-кетон ојачан 30% карбонским влакнима. Вредност напона на боку зупца зупчаника износи 620 МПа, а вредност напона у подножју зупца зупчаника је 102 МПа. Вредност деформације, као што је приказано на слици 6.8 јесте 0,76 mm.



Слика 6.6. Вредност напона на боку зупца зупчаника од PEEK 30CF



Слика 6.7. Вредност напона у подножју зупца зупчаника од PEEK 30CF



Слика 6.8. Деформационо стање зупчаника од PEEK 30CF

Табела 6.4. Резултати за материјал PEEK 30CF

Материјал	Напон на боку зупца зупчаника, МПа	Напон у подножју зупца зупчаника, МПа	Деформација, mm
PEEK 30CF	620	102	0,76

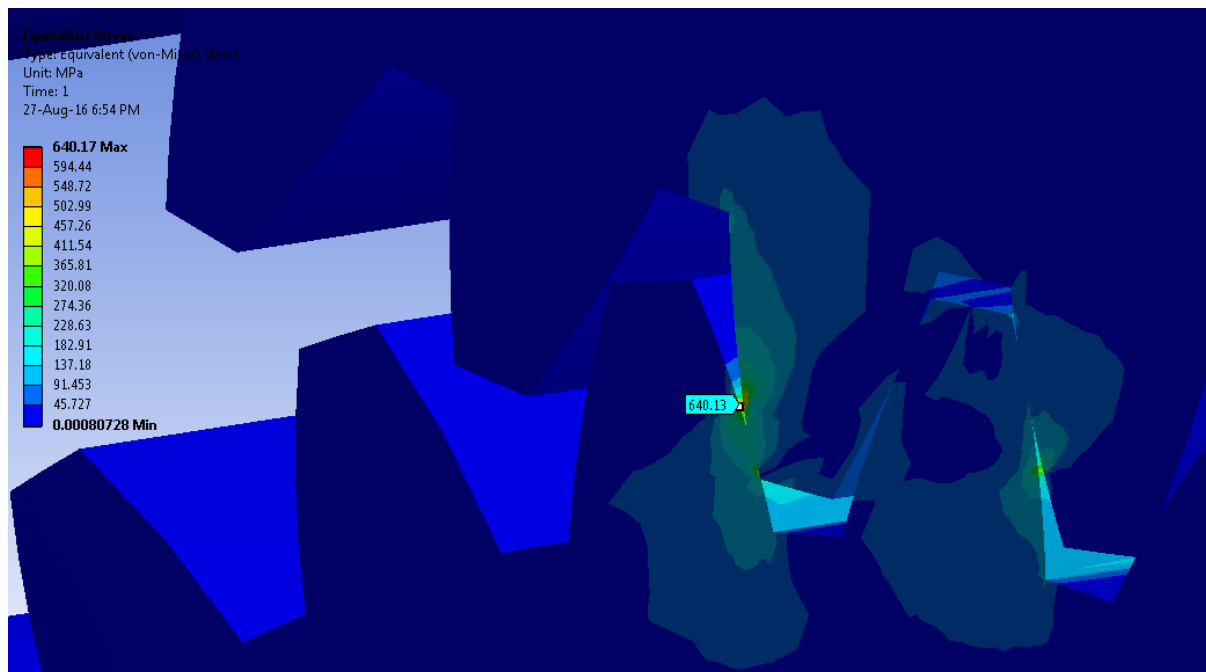
6.3. Анализа зупчаника од композитног материјала-PA66 30GF

Због додатка 30% стаклених влакана повећана је крутост овог материјала у односу на неојачани полиамид. Користи се у технологији транспорта, покретних трака, аутомобилском и механичком инжењерингу и прецизној механици. Типична примена овог материјала је за машинске делове који се користе у условима високих температура, полуге, носеће прстенове, изолаторе као и делове за разна кућишта. PA 66 са стакленим влакнима се користи тамо где су потребне значајно боље механичке особине у односу на PA66 без додатка. Посебно се користи за израду елемената изложених променљивим оптерећењима, вибрацијама и сл.

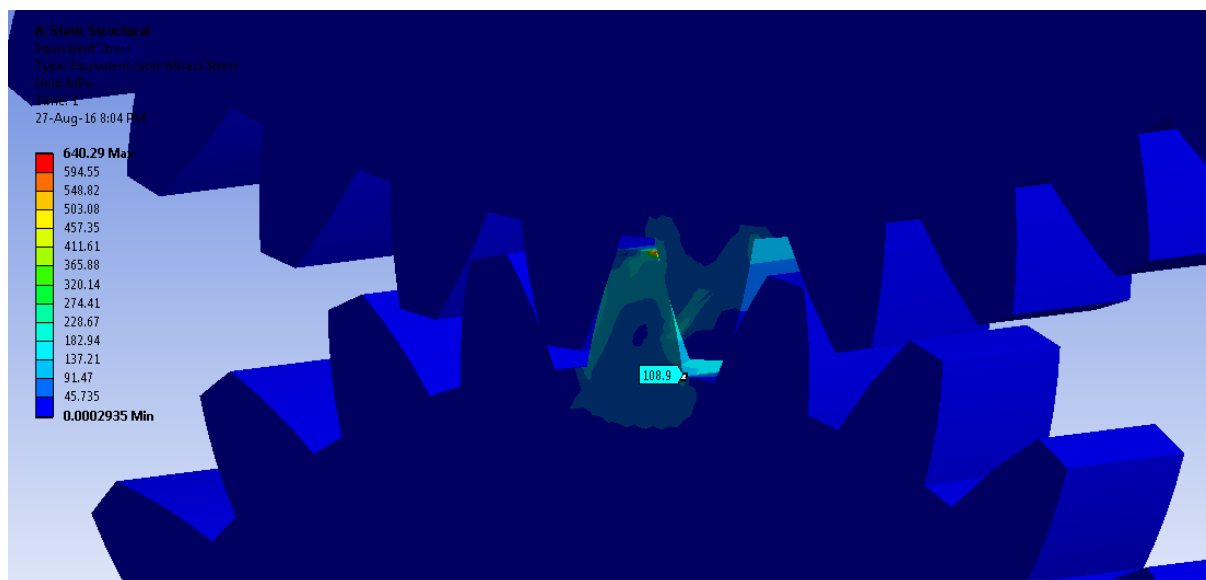
Табела 6.5. Карактеристике материјала PA66 30GF [22]

Материјал	Модул еластичности	Поасонов коефицијент
PA66 30GF	9000 МПа	0,34

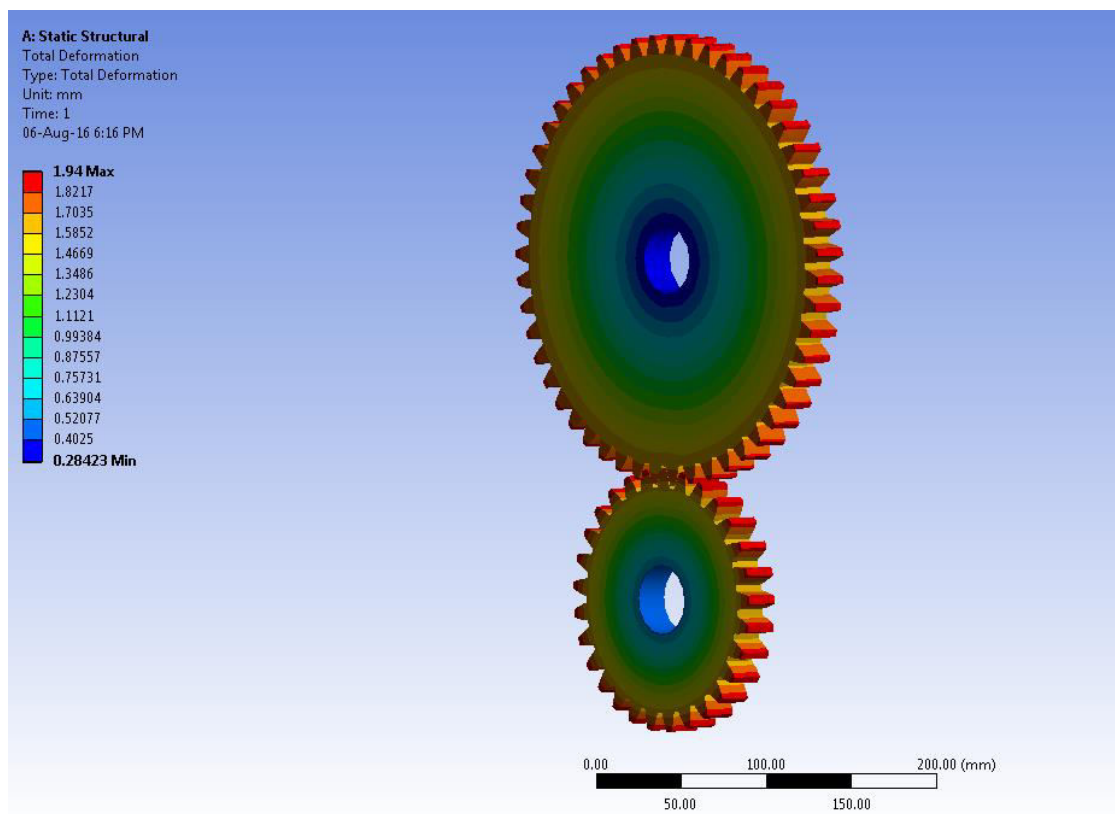
На сликама 6.9 и 6.10 су приказани резултати добијени за материјал поли-етар-етар-кетон ојачан 30% карбонским влакнима, а на слици 6.11 деформационо стање зупчаника. Напон на боку зупца зупчаника од полиамида износи 640 МПа, док напон у подножју зупца зупчаника износи 109 МПа. На слици 6.11 се види деформационо стање зупчаника, чија максимална вредност јесте 1,94 mm.



Слика 6.9. Вредност напона на боку и у подножју зупца зупчаника од PA66 30GF



Слика 6.10. Вредност напона на боку и у подножју зупца зупчаника од PA66 30GF



Слика 6.11. Деформационо стање зупчаника од PA66 30GF

Табела 6.6. Резултати за материјал PA66 30GF

Материјал	Напон на боку зупца зупчаника, МПа	Напон у подножју зупца зупчаника, МПа	Деформација, mm
PA66 30GF	640	109	1,94

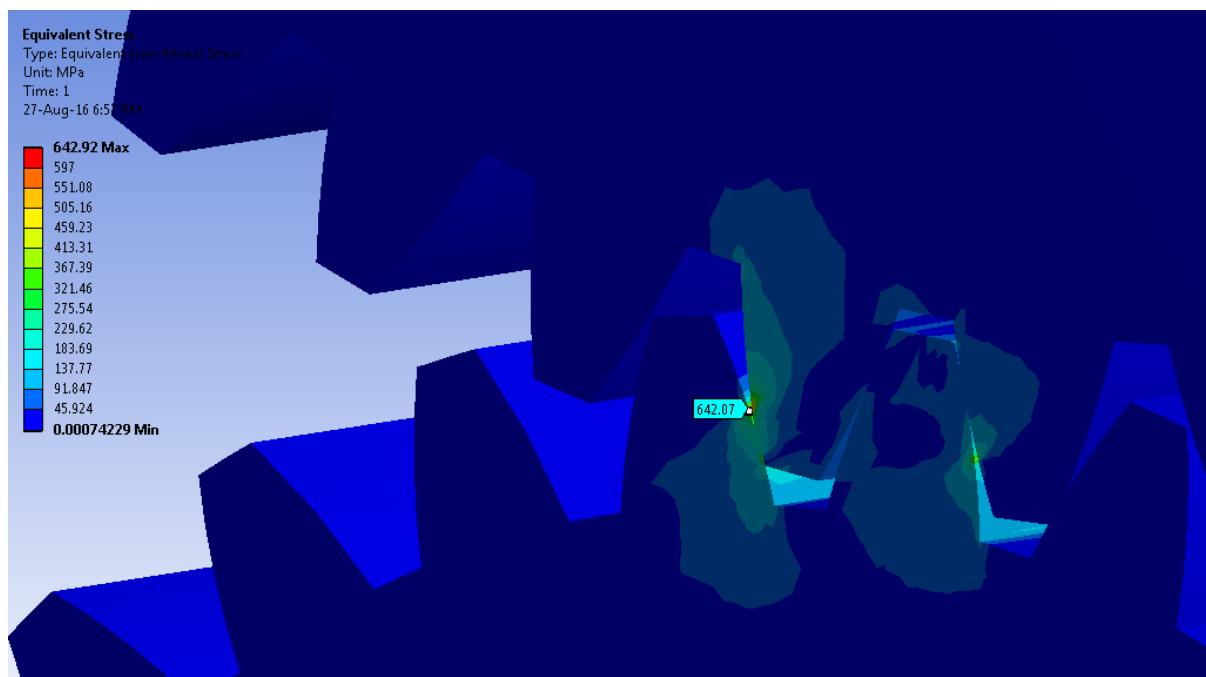
6.4. Анализа зупчаника од композитног материјала-PA6 30GF

Полиамид PA6 са додатком 30% стаклених влакана показује већу крутост и димензионалну стабилност у односу на PA6 без додатака. Карактеришу га особине као што су висока механичка чврстоћа, отпорност на високе температуре, висок степен жиравости.

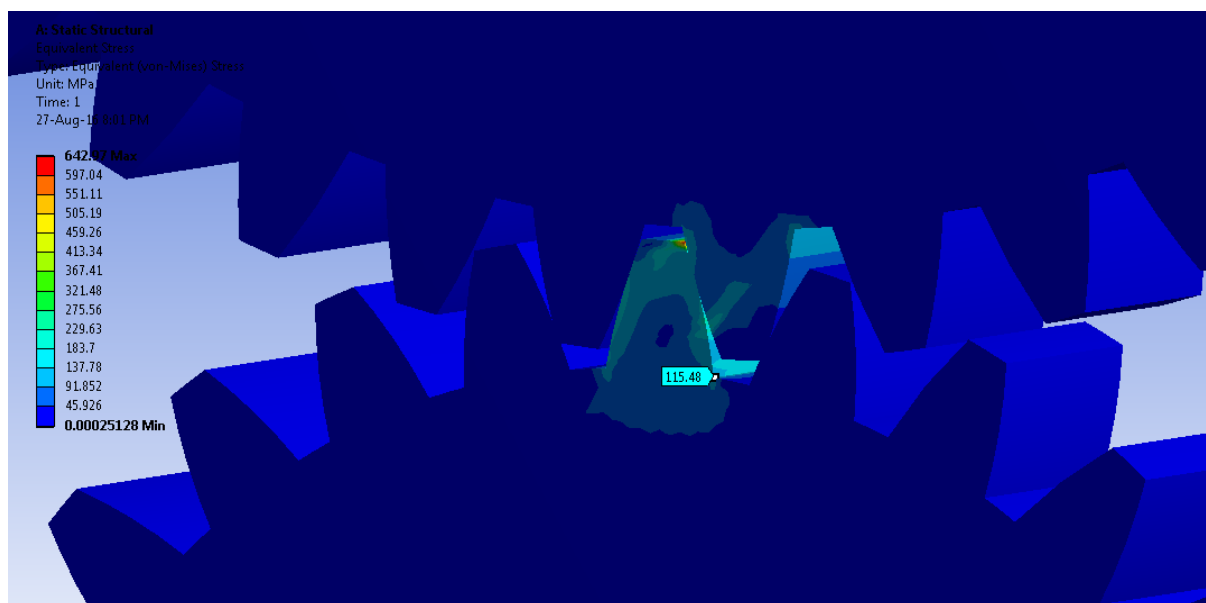
Табела 6.7. Карактеристике материјала [23]

Материјал	Модул еластичности	Поасонов коефицијент
PA6 30GF	8700 МПа	0,314

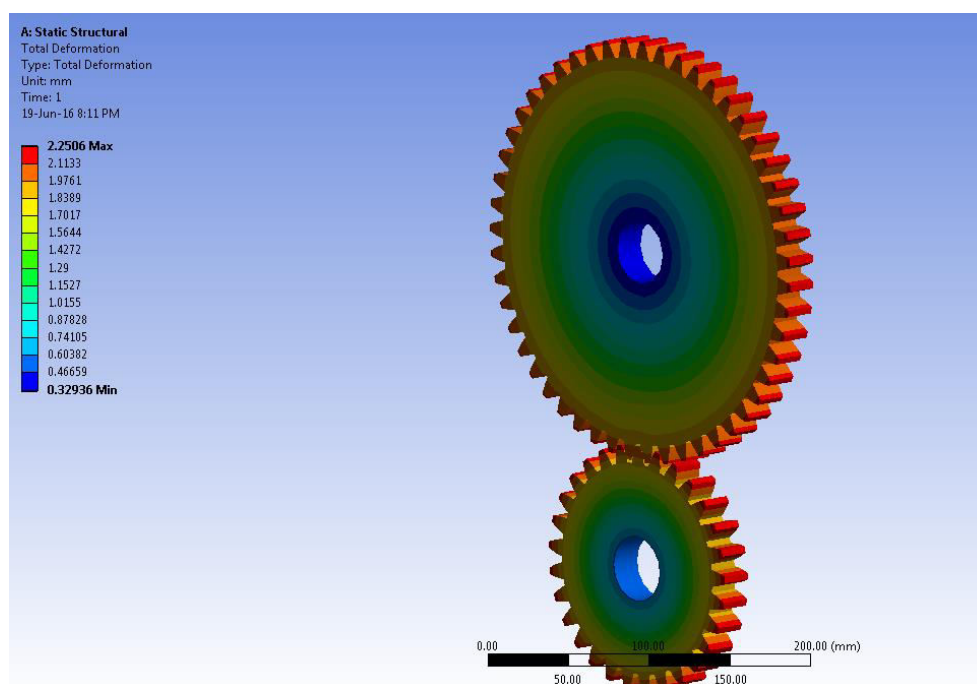
На сликама 6.12 и 6.13 је приказано напонско стање зупчаника од поменутог материјала, где вредност напона на боку зупца зупчаника износи 642 МПа, а у подножју зупца зупчаника вредност напона је 115 МПа. На слици 6.14 је приказано деформационо стање зупчаника, где максимална вредност износи 2,25 mm.



Слика 6.12. Вредност напона на боку и у подножју зупца зупчаника од PA6 30GF



Слика 6.13. Вредност напона на боку и у подножју зупца зупчаника од PA6 30GF



Слика 6.14. Деформационо стање зупчаника од PA6 30GF

Табела 6.8. Резултати за материјал PA6 30GF

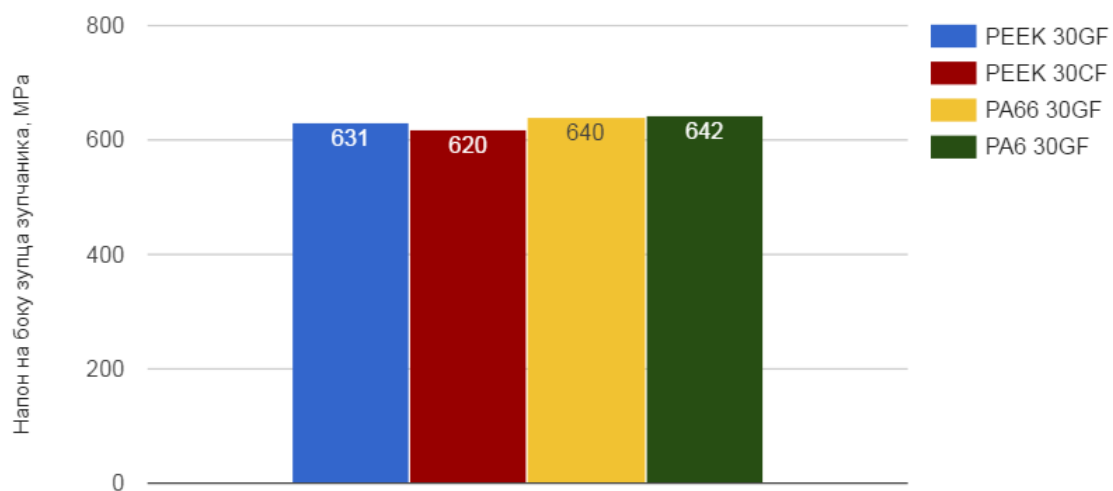
Материјал	Напон на боку зупца зупчаника, МПа	Напон у подножју зупца зупчаника, МПа	Деформација, mm
PA6 30GF	642	115	2,25

6.5. Поређење резултата анализе напонско-деформационог стања композитних зупчаника

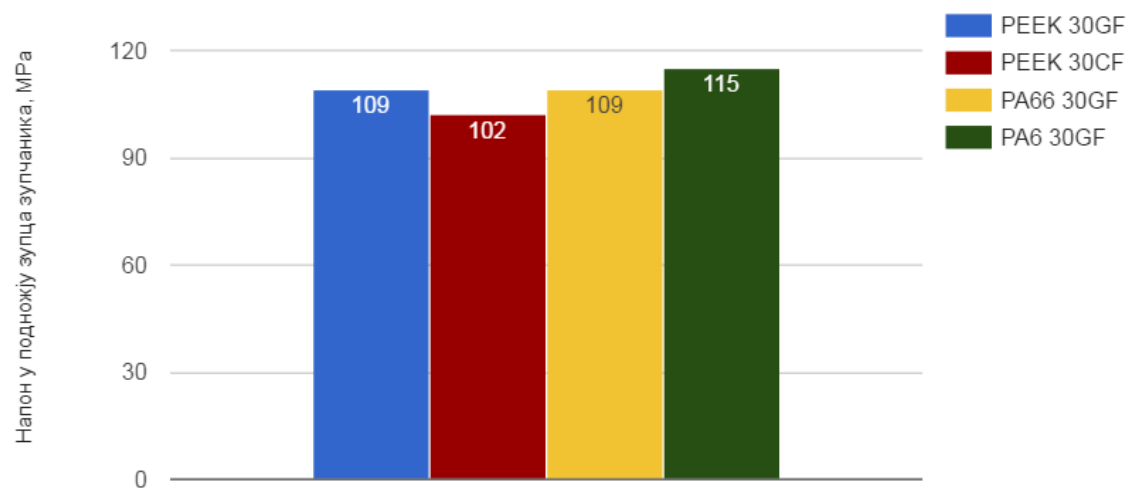
У овом поглављу је представљен упоредни приказ резултата добијених у претходним поглављима, као и графички приказ резултата анализе. У табели 6.9 су приказани резултати за све материјале, вредности напона на боку и у подножју зупца композитног зупчаника и резултати деформационог стања композитног зупчаника.

Табела 6.9. Резултати за све композитне зупчанике

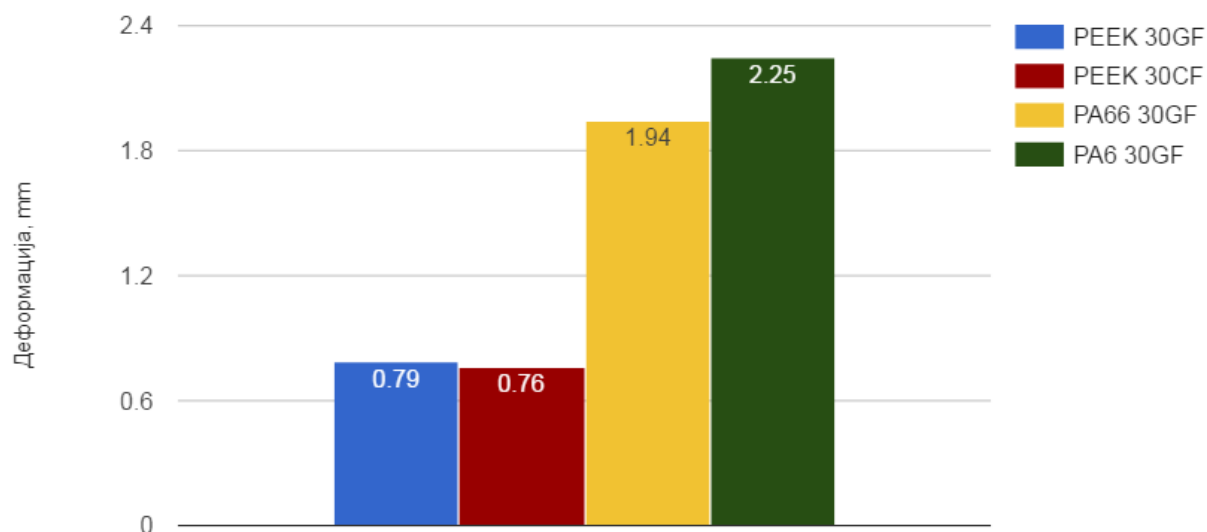
Материјал	Напон на боку зупца зупчаника, МПа	Напон у подножју зупца зупчаника, МПа	Деформација, mm
PEEK 30GF	631	109	0,79
PEEK 30CF	620	102	0,76
PA66 30GF	640	109	1,94
PA6 30GF	642	115	2,25



Слика 6.15. Упоредни резултати за напон на боку зупца зупчаника

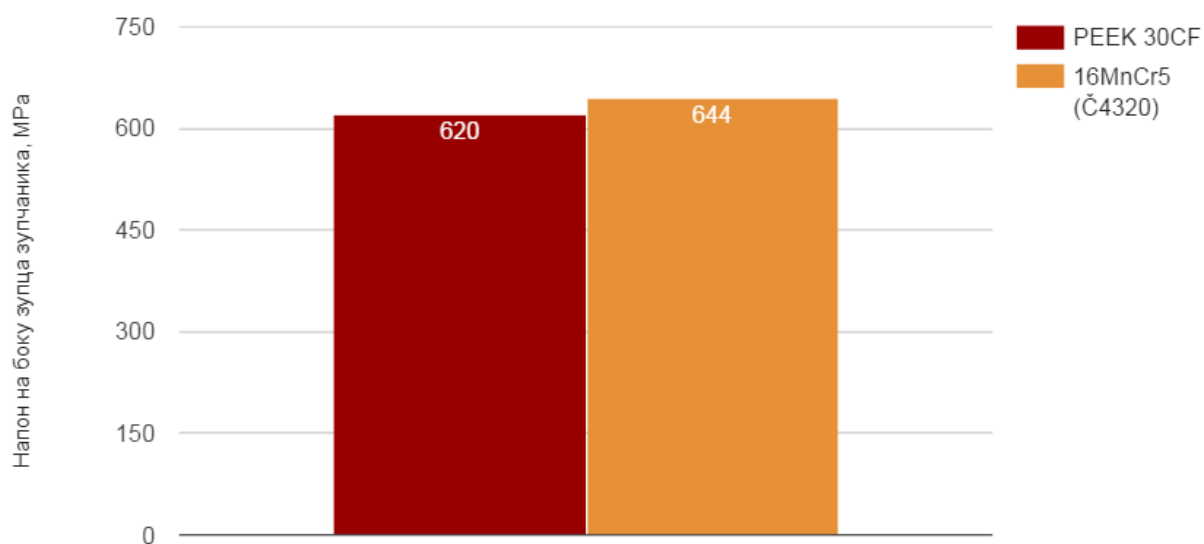


Слика 6.16. Упоредни резултати за напон у подножју зупца зупчаника

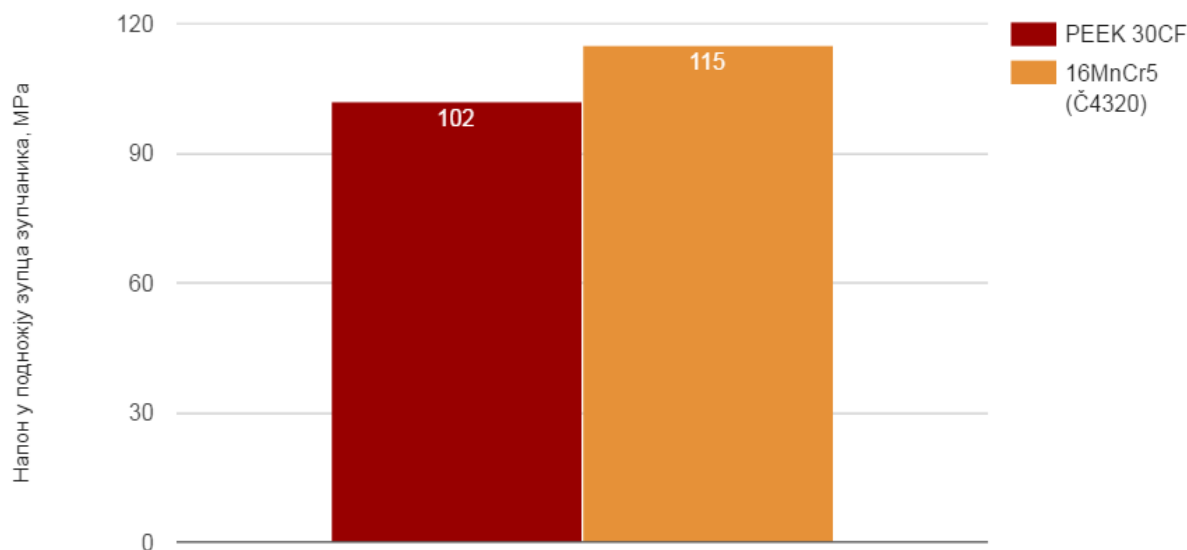


Слика 6.17. Упоредни резултати вредности деформација

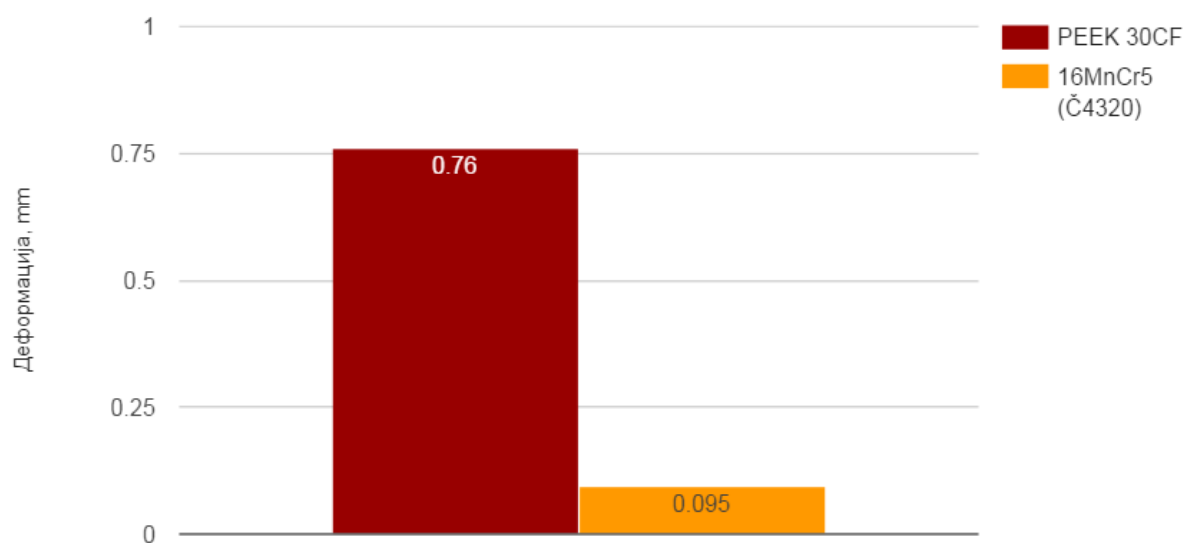
Резултати показују који материјал од четири композитна материјала има најбоље карактеристике. Најбоље резултате показује зупчаник од поли-етар-етар-кетона ојачан 30% карбонским влакнима. На сликама 6.18, 6.19 и 6.20 су приказани упоредни резултати челичног зупчаника и зупчаника од поли-етар-етар-кетона ојачаног са 30% карбонских влакна за напон на боку и у подножју зупца зупчаника и деформационо стање.



Слика 6.18. Упоредни резултати напона на боку зупца за зупчаник од композитног материјала PEEK 30CF и од челика

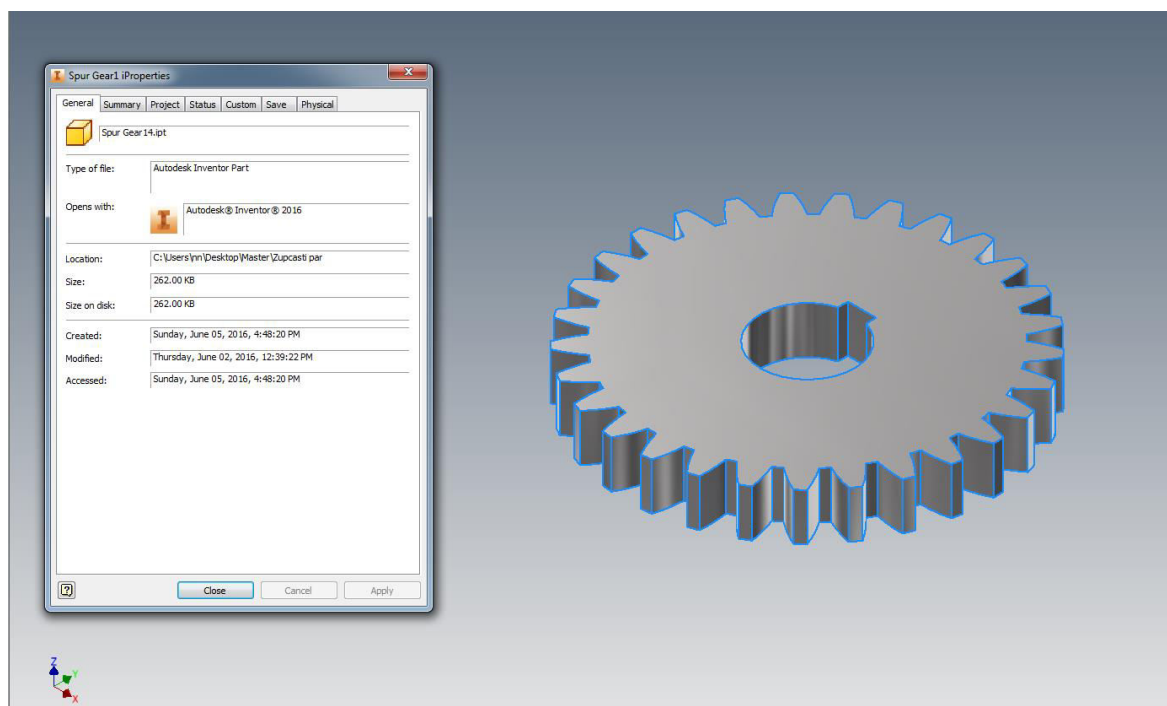


Слика 6.19. Упоредни резултати напона у подножју зупца за зупчаник од композитног материјала PEEK 30CF и челика

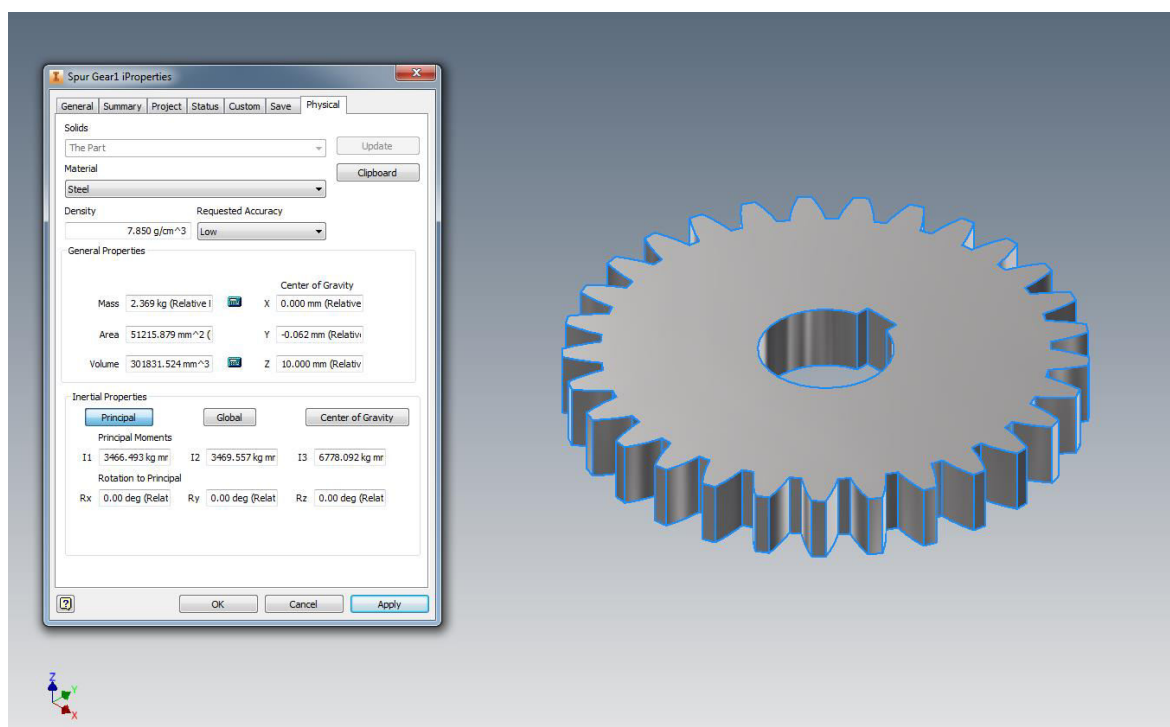


Слика 6.20. Упоредни резултати деформација за зупчаник од челика и композитног материјала PEEK 30CF и челика

Иако се мања деформација јавља код зупчаника од челика, композитни зупчаник има предност у томе што је маса композитног зупчаника доста мања у односу на челичне зупчанике. У софтверском пакету *Autodesk Inventor* постоји опција да се израчуна маса зупчаника. На слици 6.21 се налази изглед прозора у оквиру којег се може видети маса изабраног тела. У овом случају ће се упоређивати масе погонског зупчаника од различитих материјала. На слици 6.22 је изглед прозора када је означена картица *Physical*, где је приказана густина материјала која износи $7,85 \text{ g/cm}^3$. Прорачун масе у *Inventor*-у је приближно тачан са релативном грешком од 0,006528%. Маса за зупчаник од челика износи 2,369 kg.



Слика 6.21. Изглед прозора *Propertis*

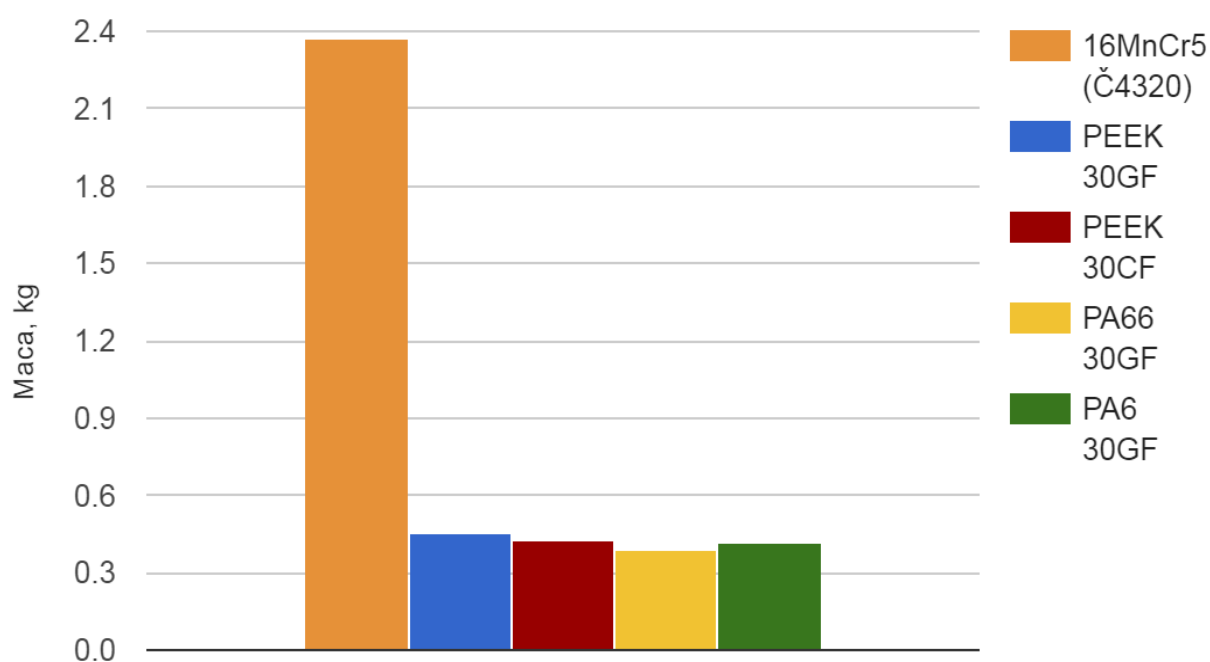


Слика 6.22. Изглед прозора када је означена картица *Physical*

У табели 6.10 приказане су густине за све композитне материјале који су у овом раду коришћени. Маса је на исти начин добијена као и за зупчаник од челика који је приказан и објашњен на претходним сликама.

Табела 6.10. Вредности густина и масе за зупчаник од челика и композитних материјала

Материјал	Густина, g/cm ³	Маса, kg
16MnCr5 (Č4320)	7,85	2,369
PEEK 30GF	1,48	0,455
PEEK 30CF	1,4	0,423
PA66 30GF	1,35	0,389
PA6 30GF	1,38	0,417



Слика 6.23. Поређење маса зупчаника од челика и различитих врста композитних материјала

Са слике 6.23 се могу видети међусобне разлике у маси између зупчаника израђених од челика, поли-етар-етар-кетона (PEEK) ојачаног стакленим влакнима, поли-етар-етар-кетона (PEEK) ојачаног карбонским влакнима, од поламида (PA66) ојачаног стакленим влакнима и поламида (PA6) ојачаног стакленим влакнима. Уочава се да најмању масу има зупчаник од полиамида PA66 ојачаног 30% стакленим влакнима (PA66 30GF). Маса зупчаника од израђеног од материјала-PA66 30GF је 6 пута мања од зупчаника израђеног од челика. Мала је међусобна разлика у маси између зупчаника израђених од PEEK 30GF, PEEK 30CF, PA66 30GF и PA6 30GF. Зупчаник израђен од материјала PA66 30GF има за 0,066 kg мању масу него зупчаник израђен од PEEK 30GF. У погледу масе, сва четири композитна материјала су погоднија за употребу у изради зупчаника у односу на употребу челика.

7. ЗАКЉУЧАК

Велика примена композитних материјала је у знатној мери заснована на добром понашању у отежаним радним условима, високом притиску, брзини, ударима, вибрацијама, а све захваљујући својој структури и специфичним механизмима при различитим оптерећењима. То посебно показује да се могу применити и за изградњу машинских конструкција већих одговорности. Самим тим и развој и истраживање нових и још захтевнијих материјала представља један од најзначајнијих задатака за истраживање.

У оквиру овог мастер рада испитано је напонско-деформационо стање зупчаника израђених од следећих материјала:

- челика - 16MnCr5 (Ћ4320),
- поли-етар-етар-кетона ојачаног 30% стакленим влакнима,
- поли-етар-етар-кетона ојачаног 30% карбонским влакнима,
- полиамида РА6 ојачаног 30% стакленим влакнима,
- полиамида РА66 ојачаног 30% стакленим влакнима.

У раду је извршено поређење напона на боку и у подножју зупца зупчаника од челика добијених аналитичким и нумеричким путем. Као услов је постављено да резултати добијени аналитичким и нумеричким путем покажу одступања мање од 10%. Како је услов задовољен, модел зупчаника од челика урађен у софтверском пакету *Ansys* се користио за даљу анализу, односно анализу са другим материјалима, у овом случају композитним материјалима.

У овом раду је извршена анализа напонско-деформационог стања зупчаника од композитних материјала. Циљ је био да се покаже које предности даје примена композитног материјала за израду зупчаника. На основу резултата који су добијени коришћењем софтверског пакета *Ansys* најбоље карактеристике показује материјал поли-етер-етер-кетон ојачан карбонским влакнима (РЕЕК 30CF). Упоредјујући њихове масе и вредности напона, зупчаници од пол-етер-етер-кетона са додатком карбонских влакана су се показали бољи од челичних зупчаника, док се у погледу деформационог стања показали лошије резултате од челичних зупчаника.

Примена композитног зупчаника даје многе предности у односу на челичне зупчанике, као што је отпорност на корозију и високе температуре. Они могу послужити и као замена за челичне зупчанике у циљу постизања смањења масе. Маса погонског зупчаника од поли-етар-етар-кетона ојачаног са 30% карбонских влакана је за 82,14% мања од масе зупчаника од челика. Тиме се показује колику предност доноси примена композитног материјала у изради зупчаника. Коришћењем зупчаника од поли-етар-етар-кетона ојачаног са 30% карбонских влакана (РЕЕК 30CF), на основу анализе извршене у овом раду, добија се смањење вредности напона на боку зупца зупчаника за скоро 4% у односу на вредност напона на боку зупца код зупчаника од челика. Такође анализа је показала да вредност напона у подножју зупца зупчаника од поли-етар-етар-кетона ојачаног са 30% карбонских влакана (РЕЕК 30CF) је за 11% мања у односу на вредност напона у подножју зупца зупчаника од челика.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] М. Јовановић, Д. Адамовић, В.Лазић, Н.Ратковић, *Машински материјали*, Машински факултет, Крагујевац, 2003.
- [2] В. Николић, *Машински елементи-теорија, прорачун, примери*, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [3] К. Мао, *A new approach for polymer composite gear design*, Wear, 2007.
- [4] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, *Damping characteristics of unreinforced, glass and carbon fiber reinforced nylon 6/6 spur gears*, Polymer Testing, Volume 25, Issue 1, 2006.
- [5] K. Mao, W. Li, C. J. Hooke, D. Walton, *Friction and wear behaviour of acetal and nylon gears*, Wear, 2009.
- [6] L.W. McKeen, *Effect of Temperature and other Factors on Plastics and Elastomers*, 2nd ed. Norwich, NY/USA, William Andrew Inc., 2008.
- [7] S.Senthilvelan and R.Gnanamoorthy, *Effect of rotational speed on the performance of unreinforced and glass fiber reinforced Nylon 6 spur gears*, Materials and Design, 2007.
- [8] Y. Xing, G. Zhang, K. Ma, T. Chen, X. Zhao, *Study on the Friction and Wear Behaviors of Modified PA66 Composites*, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2009.
- [9] K.D. Dearn, T.J. Hoskins, D.G. Petrov, S.C. Reynolds, R. Banks, *Applications of dry film lubricants for polymer gears*, Wear, 2013.
- [10] B.R.Ambre, D.S.Bajaj, *Investigation of Wear and Load Carrying Capacity of Polyamide Composites for Gear Application*, International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, 2016.
- [11] A.D. Dighe, A.K. Mishra, V.D. Wakchaure, *Investigation of Wear Resistance and Torque Transmission Capacity of Glass Filled Polyamide and PEEK Composite Spur Gear*, International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2014.
- [12] Masaya Kurokawa, Yoshitaka Uchiyama, Susumu Nagai, *Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced polyether-ether-ketone*, Tribology International 33, 2000.
- [13] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, *Fiber Reinforcement in Injection Molded Nylon 6/6 Spur Gears*, Applied Composite Material, 2006.
- [14] N.M. Mehat, S. Kamaruddin, A.R. Othman, *Optimized Injection Molding of Unfilled and Glass Filled PA6 Gears*, International Journal of Manufacturing Engineering, 2014.
- [15] <http://www.compositesworld.com/articles/new-aerocomposites-niche-helicopter-transmission-gears>, преузето 10.05.2016.

- [16] K. Mao, *A numerical method for polymer composite gear flash temperature prediction*, Wear, 2007.
- [17] <https://www.matbase.com/material-categories/natural-and-synthetic-composites/polymer-matrix-composites-pmc/>, преузето 15.05.2016.
- [18] <http://www.sdp-si.com/products/Gears/Index.php>, преузето 07.06.2016.
- [19] S.Mahendran, K.M.Eazhil, L.Senthil Kumar, *Design and Analysis of Composite Spur Gear*, International Journal of Research and Scientific Innovation, 2014.
- [20] <http://catalog.ides.com/Datasheet.aspx?I=92041&FMT=PDF&U=0&CULTURE=en-US&E=107282>, преузето 30.06.2016.
- [21] <http://www.makeitfrom.com/material-properties/30-Percent-Carbon-Fiber-30-CF-PEEK#Properties>, преузето 30.06.2016.
- [22] <http://www.materialdatacenter.com/ms/en/Staramide/SABIC+Innovative+Plastics/Staramide+RF006SXS/385d0ec5/1531>, преузето 30.06.2016.
- [23] <http://www.materialdatacenter.com/ms/en/Staramide/SABIC+Innovative+Plastics/Staramide+PF006ES/ea410f3d/1531>, преузето 30.06.2016.