

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Трибологија машинских система

Број индекса: 334/2016

Виолета В. Грујић

**Развој и примена трибоматеријала за
израду зупчаника
мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Блажа Стојановић, ванр.проф - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

- истакне врсте материјала и њихове карактеристике,
- истакне примену и карактеристике трибоматеријала и материјала нових генерација,
- изврши статичку анализу трибомеханичког система,
- анализира добијене резултате.

Препоручена литература:

[1] С.Танасијевић:Триболошки исправно конструисање, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац 2004.

[2] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Адамовић, Н. Ратковић: Машински материјали, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац 2003.

[3] З.Ђорђевић: Композитне конструкције, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац 2018.

Крагујевац, јун 2018.

Ментор:
Др Блажа Стојановић, ванр.проф.

Изјављујем да сам овај завршни рад урадила самостално, служећи се стеченим знањем и искуством као и наведеном литературом.

Виолета Грујић 334/2016

Садржај

1. Увод	1
2. Трибоматеријали	3
2.1 Развој материјала.....	3
2.2 Метали и металне легуре.....	5
2.2.1 Подела метала и легура	6
2.2.2 Гвожђе	6
2.2.3 Челик	7
2.2.4 Легуре обојених метала	8
2.3 Керамички материјали	9
2.3.1 Физичке особине керамичких материјала	9
2.3.2 Подела керамичких материјала.....	10
2.4 Полимерни материјали	11
2.4.1 Подела полимерних материјала	13
2.5 Композитни материјали.....	14
2.5.1 Матрице и влакна	14
2.5.2 Врсте композитних материјала	15
2.5.3 Карактеристике композитних материјала.....	16
2.5.4 Карактеристике зупчаника израђених од композитних материјала.....	17
2.6 Паметни материјали.....	18
3. Нове генерације материјала	19
3.1 Наноккомпозити.....	20
3.1.1 Нанопуниоци	20
3.2 Shape memory polymer	21
3.3 Биомиметрички материјали	21
3.4 Аерогелови.....	22
3.5 Фулерени и наноцевчице.....	23
4. Моделирање трибомеханичког система.....	24
4.1 Зупчасти преносници	24
4.1.1 Цилиндрични зупчаници са правим зупцима.....	26
4.2 Моделирање зупчастих парова	27
5. Анализа.....	30
5.1 Метода коначних елемената.....	31
5.1.1 Основе на којима се заснива МКЕ.....	31
5.1.2 Алгоритамски концепти МКЕ.....	32
5.1.3 Општа теорија МКЕ	32

5.1.4 Типови елемената.....	33
5.1.5 Типови оптерећења	35
5.2 Анализа зупчастих парова.....	36
5.2.1 Дефинисање материјала.....	37
5.2.2 Дефинисање ограничења	39
5.2.3 Дефинисање оптерећења	39
5.2.4 Генерисање мреже коначних елемената	40
6. Резултати анализе.....	43
7. Закључак.....	52
8. Литература	53

Abstract

The paper presents the basic characteristics of tribomaterials as well as their application. The emphasis is placed on the materials of new generations, whose main representatives are nanocomposites. Then it was accessed to model the tribomechanical system consisting two pair of gears. The focus of the work is on the static analysis of the gears in order to determine the maximum values of the stress and displacement. Then, the basics on which the finite element method, the types of elements and loads are given, as well as the manual for static analysis in SolidWorks. Finally, the table and histogram are given values of the stress and displacement depending on the load change, the number and size of the finite elements, as well as the number of nodes.

Key words: tribomaterials, composite materials, polymer materials, finite element method, Ravigneaux planetary mechanism.

Резиме

У раду су дате основне карактеристике трибоматеријала, као и њихова примена. Акценат је стављен на материјале новијих генерација, чији су главни представници нанокомпозити. Потом је приступљено моделирању трибомеханичког система који чине два зупчаста пара. Тежиште рада је на статичкој анализи зупчаника како би се одредиле максималне вредности напона и померања. Затим су дате основе на којима се заснива метода коначних елемената, типови елемената и оптерећења, као и упутство за рад статичке анализе у *SolidWorks*-у. На крају, табеларно и хистограмски су дате вредности напона и померања у зависности од промене оптерећења, броја и величине коначних елемената, као и броја чворова.

Кључне речи: трибоматеријали, композитни материјали, полимерни материјали, метода коначних елемената, Равињонов планетарни механизам.

1. Увод

Наука о материјалима проширила се из својих историјских корена у металургији и физици чврстог стања како би подржала многе аспекте физичке и инжењерске науке, која обухвата прорачун и мерење природе везивања у материјалима, до механичког понашања сложених инжењерских производа у екстремним условима. У индустрији у Великој Британији дошло је до прогресивног преласка од компанија које су првенствено испоручивале различите материјале, као што су метали, полимери или керамика, предузећима која снабдевају завршне компоненте у медицински, енергетски, ваздухопловни и многе друге секторе који се ослањају на развој најновијих материјала.

Током индустријске револуције у 18. и 19. веку, основни материјали за изградњу су били ретки. Углавном се могло наћи дрво, камен, цигла и малтер, као и гвожђе и челик. Међутим, тада су гвожђе и челик били много лошијег квалитета од оних који се данас користе. Абрахам Дарби је 1709. године увео пећ на кокс у производњу ливеног гвожђа и до краја 18. века, ливено гвожђе је почело да замењује ковано гвожђе, јер је било јефтиније. Доступност јефтиног гвожђа један је од фактора који води ка индустријској револуцији. Крајем педесетих година, Хенри Бесемер је измислио нови процес производње челика, који укључује испуштање ваздуха кроз сирово гвожђе, како би се произвео меки челик. Ово је учинило челик много економичнијим. Почетком 20. века, побољшани су лаки материјали као што су алуминијум, магнезијум, берилијум, титан, инжењерска пластика, структурне керамике, а такође почели су да се појављују и композити са полимерном, металном и керамичком матрицом, [1].

Након нафтне кризе седамдесетих година, пуно труда је уложено да се смањи тежина система транспорта како би се побољшала енергетска ефикасност. Овај труд је уложен упоредо са ефикаснијим моторним технологијама за сагоревање фосилних горива. Легуре алуминијума и магнезијума, епоксидни композити ојачани угљеничним и стакленим влакнима, метална и композитна пена која се тренутно користи само у возилима високе вредности, више ће се примењивати у производњи аутомобила. Напредовање неће бити омогућено не само због нових материјала, већ пре свега због сложеног дизајна и симулације хибридних структура за лакоћу и сигурност. Ове конструкције морају се састојати из различитих врста материјала, сваки оптимизован за своју специфичну геометријску, механичку и другу употребу, произведен користећи брзе процесе повезивања и монтаже.

Притисак конкуренције проузрокован повећаном употребом алуминијумских легура код шасије и каросерије у аутомобилском сектору, обезбедио је добар подстрек за постепени развој челика мањих тежина; нове хибридне и композитне структуре врше сличан притисак на компоненте на бази алуминијума и магнезијума. Све већа употреба возила на електрични погон, највероватније повећањем употребе хибрида електричних нафтних деривата, неће смањити потребу за возилима мање тежине, с обзиром на то да технологије мотора и погонских система постављају још веће захтеве на смањене тежине возила како би се обезбедиле прихватљиве перформансе. Међутим, ова повећана хибридизација материјала за смањење тежине ствара притисак са све већим захтевима за демонтажу и лаку сегрегацију материјала, на пример, ради мањег загађења животне средине.

У сектору ваздухопловства, слична конкуренција између лаких технологија довела је до тога да структурални композити сада чине до 50% или више тежине ваздухопловних

конструкција у односу на утрошак металних легура. Са друге стране, развијене су нове лаке легуре алуминијума које су стимулисане тако да је мало вероватно да ће се композитни део у цивилним летелицама додатно повећати. Будуће конструкције авиона ће садржати високо оптимизоване и компликоване смеше алуминијумских легура и композитних материјала, у системима хибридних материјала легираних легурама титана.

Данас, лаки материјали се карактеришу ниском густином. Густина се креће од $0,8 \text{ g/cm}^3$ за неиспуњене полимере, до $4,5 \text{ g/cm}^3$ за титан. Док је густина титана висока у поређењу са неиспуњеним полимерима, знатно је мања од метала који се обично пореде са легурама челика и имају густину $7,86 \text{ g/cm}^3$, и супер легурама са густинама које се крећу од $7,8$ до $9,4 \text{ g/cm}^3$. Поред тога, неиспуњени полимери имају прилично ниску затезну чврстоћу која се креће од 34 до 103 МПа , док угљеник/епокси може постићи високу затезну чврстоћу и до 2410 МПа . Неки од лаких материјала могу се користити само при температурама око 66°C , док други задржавају корисне особине на температурама и преко 1370°C , [2].

2. Трибоматеријали

Материјали су годинама били једини регулатори хабања елемената трибомеханичких система. Проблеми повећања отпорности на хабање најчешће су решавани избором челика веће тврдоће и дуго времена челик је разматран као аналогија отпорности на хабање. Данас то није сасвим тако и материјали се посматрају као несумњиво значајни, али не и једини регулатори триболошки исправне конструкције.

Трибоматеријали се обично класификују по свом саставу на следеће основне групе:

- метали и металне легуре,
- композитни материјали (са металном, полимерном и керамичком матрицом) и
- хибридни материјали.

У литератури се може наћи и подела на, [3]:

- конструкционе (машинске материјале),
- фрикционе материјале,
- материјале отпорне на хабање и
- антифрикционе материјале широке номенклатуре.

Данас постоји широк асортиман инжењерских (конструкционих) материјала који се могу користити за израду различитих делова машина и уређаја. Материјал се бира, пре свега, према радним условима елемента или конструкције и технолошким могућностима прераде тог материјала. Осим тога, увек треба имати у виду цену, као и век трајања, који зависи од радних услова везаних за хабање, корозију и рад на високим или ниским температурама.

2.1 Развој материјала

Како би учинили живот сигурнијим, лакшим и ефикаснијим људи су одувек били у потрази за новим материјалима. Свакодневно се стручњаци сусрећу с материјалима при дизајнирању и изради делова и конструкција, како у производњи тако и у њиховој обради. Потребно је правилно изабрати и искористити материјале и анализирати њихове предности и недостатке. У научним институтима велики приоритет имају истраживања материјала, јер су материјали основа за развој нових технологија. Назив материјал долази од грчке речи *materia*, која изворно значи предмет. Историја материјала уско је повезана с техничким развојем људског друштва. Позната су три доба у далекој људској историји, а она су добила назив по материјалима. Од тих материјала се израђивало оруђе, алати, украси, оружје, као и други прибор потребан за ондашњи живот људи.

Тако је постојало:

1. 600 000 до 8 000 год. п.н.е.-камено доба,
2. ~8000-5000 п.н.е.-златно и бакарно доба,
3. ~3500 год. п.н.е.-бронзано доба,
4. од 3000 год. п.н.е.-гвоздено (железно) доба.

- "Челично доба"-од 1850. до данас,
- Силиконско доба-од 1950. до данас,
- Доба нових материјала-од 1990. до данас.

Камено доба - Употреба различитих материјала за разне алатке потребне човеку везана је за саме почетке људске цивилизације. Проучавање археолошких налазишта показује да су прве примитивне алатке биле од дрвета, камена, коже и животињских костију.

Златно и бакарно доба - Људи су најпре пронашли злато, много пре проналаска ватре. Откриће ватре омогућило је да се златни прах стопи у један комад, или још касније да се изливањем у земљане калупе добију предмети сложеног облика. Та епоха, настала после каменог доба, се зове "златно доба". После злата пронађен је бакар, а затим ковање као начин његове прераде ("бакарно доба"). Температура топљења бакра износи 1085°C , а његова јачина је $R_m = 70 \text{ МПа}$.

Бронзано доба - Много касније, стапањем бакра и калаја добијена је бронза о чијем значају говори то што је читава та епоха која је трајала 5000 година названа "бронзано доба". У неолитским локалитетима код Великог Лаола (Петровац на Млави) откривено је да су становници ове насеобине знали да прерађују бакар још 4500 година п.н.е. Температура топљења калаја износи 232°C , а јачина је $R_m = 125 \text{ МПа}$.

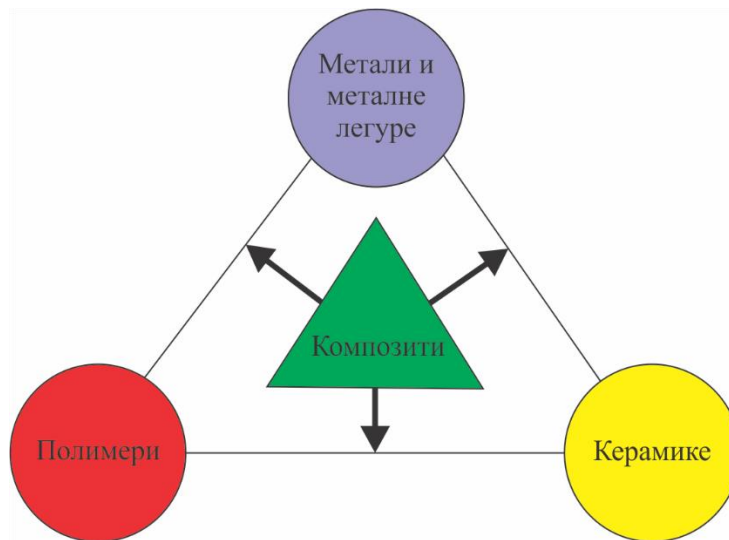
Гвоздено доба - Меки метали: злато, бакар, калај, цинк и сребро били су лако доступни древним народима јер су се налазили у површинским слојевима земље; осим тога лако су се одвајали од нечистоћа и лако прерађивали. У тим временима гвожђе је било редак и стога скупocen метал који се употребљавао само за израду накита. Један од најстаријих гвоздених украса пронађен је у Великој пирамиди (Египат) из доба 2900 година п.н.е. Дуго су, па и до 1000 година п.н.е, украсни предмети од гвожђа били скупљи од златних јер су потицали од метеорског гвожђа - комада метеора који су падали на земљу. Температура топљења гвожђа износи 1538°C , а његова чврстоћа је $R_m = 1500 \text{ МПа}$.

Све до средине 1800. године дрво, природни камен и опека били су најважнији конструкцијски материјали. Открићем ткачке машине, парне машине, алатних машина, локомотиве и железнице нагло је порасла потреба за ливеним гвожђем и челиком. У другој половини 18. века, уз помоћ Бесемерових и Мартинових метода, производи се челик. Овај јефтин, конструкцијски материјал узрокује велику индустријализацију друштва и напредак на техничким, економским и социјалним нивоима друштва. Од тада па све до данас развило се на хиљаде нових материјала. Развој материјала је тако брз да се данас може говорити о "револуцији материјала". Конструктори имају на располагању више од 70 хиљада различитих материјала.

Материјали су подељени у четири групе које чине, [4]:

- метални материјали,
- керамички материјали,
- полимерни материјали и
- композитни материјали.

Прве три групе представљају основне материјале, а композити се, као четврта група, добијају комбинацијом основних материјала (слика 2.1).



Слика 2.1 - Четири групе материјала

2.2 Метали и металне легуре

У савременом машинству још увек се већина трибоелемената израђује од металних материјала. Метални материјали су материјали које се одликују добрим својствима отпорности и пластичности, посебно електричном и термичком проводљивошћу, као и одговарајућим технолошким својствима и могућношћу рециклаже.

Својства метала опредељује електронска грађа и структура. Савремена наука о материјалима под термином структура подразумева грађу материјала дефинисану врстом атома, њиховим бројем и расподелом у основној решетки, као и зрнима која потичу из решетке.

Метали и легуре су материјали који се одликују низом карактеристичних особина, због којих су постали основа савремене технике.

Метали се састоје од чистог хемијског елемента са незнатном количином примеса других елемената. Одликују се карактеристичним металним сјајем, повећаном електро и топлотном проводљивошћу, добрим механичким особинама, отпорношћу према електрохемијским утицајима и повишеној температури, могућношћу обраде на различите начине у хладном и загрејаном стању. Све набројане особине условљене су особинама унутрашње грађе атома и њиховим међусобним везама. Густина метала се креће између $0,59 \text{ g/cm}^3$ (литијум) и $22,4 \text{ g/cm}^3$ (осмијум). Метал са највишом температуром топљења је волфрам (3400°C), а са најнижом жива (-39°C).

Легуре су сложени материјали који представљају смешу неког основног елемента са другим металима и неметалима. Елементи који чине легуре називају се компоненте легуре, од чијег броја зависи сложеност легуре и њене карактеристике. У састав легура улази најмање један метал (нпр. бронза - легура бакра и калаја, челик - легура гвожђа и

угљеника, итд.). Легуре добијају сасвим нове особине, које се разликују од особина саставних компоненти: повољније механичке особине, повећана отпорност према корозији, промена боје, повећана могућност обраде, итд. Највећи број легура се добија топљењем компоненти, али постоје и други начини добијања (нпр. металокерамичке легуре добијају се путем синтеровања). За потребе рударства најважније легуре из ове групе су тврде волфрам карбидске псеудо легуре, које се одликују великом тврдоћом и отпорношћу према хабању, [5].

2.2.1 Подела метала и легура

Једна од основних подела метала је на црне и обојене метале. Црни метали имају тамно сиву боју, високу температуру топљења, релативно високу тврдоћу. У ову групу спадају: феро метали, тешко топљиви метали, уранови метали, ретки (земни) метали. У феро метале спадају: гвожђе, кобалт, никал и манган. Кобалт, никл и манган су често додатни елементи легурама гвожђа, или су чак и основни елемент код високо легираних челика. Тешко топљиви метали имају температуру топљења већу од температуре топљења гвожђа (1539°C). Ови метали се употребљавају као легирајући елементи челика или као основни елементи код неких челика. Уранови метали (тзв. актиниди) употребљавају се углавном за легуре намењене за атомска постројења. Ретки (земни) метали као што су: лантанијум, неодијум, празеодијум и др., названи су заједничким именом лантаниди. Ови метали имају врло слична хемијска својства, али прилично различита физичка својства (нпр. температуре топљења). У природи се налазе заједно, тешко их је раздвојити, те се легурама додају као смеша метала.

Обојени метали имају карактеристичну црвену, жуту или белу боју, одликују се малом тврдоћом, високом пластичношћу, ниском температуром топљења. Обојени метали се могу поделити на: лаке метале, племените метале и лако топљиве метале. У лаке метале спадају: алуминијум, магнезијум и берилијум. Одликују се малом густином, што их са другим добрим својствима чини најперспективнијим металима. Племенити метали су: сребро, злато и метали платинске групе. Одликује их одлична отпорност према корозији. У ову групу сврстан је и полуплеменити метал бакар. Лако топљиви метали су: цинк, олово, бизмут и други. Представљају веома значајне метале с обзиром на њихову веома добру отпорност према корозији, [5].

2.2.2 Гвожђе

Гвожђе се не налази у природи као хемијски чист елемент, већ се добија разним поступцима из руда гвожђа. У пракси се углавном користи техничко гвожђе које у себи има одређен проценат примеса. Хемијски чисто гвожђе (Fe) нема важности у техници због своје мале тврдоће и чврстоће. Техничко гвожђе је легура гвожђа са угљеником, манганом, силицијумом, фосфором и сумпором, а такође може садржати и додатне састојке (хром, никл, молибден, волфрам и др.). Угљеник је најважнији легирајући елемент гвожђа који и у врло малим количинама знатно утиче на својства легуре. Са повећањем процента угљеника у гвожђу опада температура топљења и густина. До 0,1% C затезна чврстоћа се повећава, а затим опада. Повећањем процента угљеника повећава се и тврдоћа, али опада способност заваривања. Угљеник утиче и на друге техничке особине: повећава границу развлачења, отпорност на хабање, кртост, а смањује истезање,

контракцију, способност извлачења, способност деформисања у топлом и хладном стању, хемијску отпорност итд.

На основу садржаја угљеника и других додатних елемената техничко гвожђе обухвата:

- челик, са садржајем угљеника практично до 1,78% C, а теоријски до 2,14% C.
- сиви лив, са садржајем угљеника преко 2,6% C.
- темперовани лив.

У легурама гвожђа угљеник се појављује у облику чврстих раствора (зависно од могуће растворљивости), у облику хемијског једињења Fe_3C и у елементарном стању у облику графита. У челицима угљеник се појављује у највећем броју случајева у облику цементита Fe_3C , с обзиром на малу растворљивост угљеника у чврстом раствору на нормалним температурама, [5].

2.2.3 Челик

Челици су годинама најбројнија и најчешће коришћена група метала. Данас је у свету познато неколико хиљада различитих врста челика добијених различитим комбинацијама садржаја угљеника и легирајућих елемената најразличитијих особина. Велики број трибоелемената израђује се од конструкционих легираних челика. Отпорност на хабање условљена је хемијским саставом и структуром, али и механизмом за настајање процеса хабања. Примери зупчаника израђених од челика приказани су на слици 2.2.



Слика 2.2 - Цилиндрични зупчаници израђени од челика, [5]

Према хемијском саставу челике делимо на:

- угљеничне челике и
- легиране челике.

Угљенични челици садрже 0,06 до 1,8% C, као и примесе других елемената у дозвољеним границама. Примесе у угљеничним челицима налазе се у следећим количинама: Si до

0,5%; Mn до 0,7%; S до 0,05%; P до 0,05%. Ови челици могу садржати и незнатне количине легирајућих елемената (микролегирани угљенични челици).

Легирани челици у свом саставу осим гвожђа и угљеника имају и специјално додате легирајуће елементе (Cr, Ni, Mn, Si, V, Mo, W, Co, Ti, Al, Cu и др.), који им дају побољшана механичка, физичка и хемијска својства, [5].

Трибомеханички системи за обраду и обликовање материјала се израђују од алатних челика. Високоугљенични челици (0,6-1,4% C) користе се за алате за просецање, за прераду хладним деформисањем, за обраду дрвета и термопласта. Појаве трибохемијског хабања и чврста ограничења која се често постављају индустријском производу и његовим извршиоцима елементарних функција условљавају коришћење нерђајућих челика. То су челици отпорни на киселине и ватроотпорни челици који се не оксидишу на ваздуху. Према хемијском саставу нерђајући челици могу бити: хромни, хром-никлови и хром-мангански, а према стању испоруке ваљани и ливени. [3]

2.2.4 Легуре обојених метала

Легуре обојених метала обухватају легуре тешких и легуре лаких обојених метала. У погледу тешких метала најчешће су у употреби легуре бакра и калаја (Cu-Sn), бакра и цинка (Cu-Zn), бакра и никла (Cu-Ni) и др., док код лаких метала то су легуре: алуминијума, бакра и магнезијума (Al-Cu-Mg), алуминијума, магнезијума и силицијума (Al-Mg-Si) и др.

Најпознатије легуре бакра су месинг и бронза. *Месинг (CuZn)* је легура бакра (најмање 50% Cu) и цинка (од 40-50% Zn). Најбоља механичка својства има месинг при садржају цинка око 40% (чврстоћа $R_m=330$ МПа). Према врсти и начину обраде месинге делимо на месинг за гњечење и месинг за ливење. Употребљава се за: арматуре, машинске делове, лим, жицу, траке, за лежајеве, елементе отпорне на морску воду, у металургији праха за разне пресоване и синтероване производе и др. *Бронза* је легура бакра са калајем (5-20% Sn) и другим металима. Према врсти метала који улази у ову легуру постоје: калајне, алуминијумове, оловне, силицијумове и манганске бронзе. Бронзе се одликују знатном чврстоћом, отпорношћу према корозији, добром ливкошћу и знатном тврдоћом. Употребљавају се за ливење арматура, лежишних постељица, цеви, жице.

Легуре алуминијума обухватају врсте са најмање 87% алуминијума и додатком лаких и тешких метала. Одликују се малом масом, знатном чврстоћом и тврдоћом, а поједине врсте знатном отпорношћу према корозији. У погледу могућности обраде, легуре алуминијума деле се на легуре за ливење и легуре за гњечење. Најпознатије легуре алуминијума су *дуралуминијум*, *силумин* и *хидроналијум*.

Легуре магнезијума обухватају легуре са најмање 89% Mg и додатком алуминијума, цинка, мангана и других елемената, које се једним именом називају електрони. Електрони се не могу употребљавати у конструкционе сврхе због своје мале чврстоће. Велики недостатак електрона је мала отпорност на корозију. Добро се обрађују резањем. Деле се на електроне за ливење и електроне за гњечење. У рударству се користе за ливење кућишта ручних ротационих бушилица, [5].

2.3 Керамички материјали

Керамички материјали су кристална једињења добијена комбинацијама металних и неметалних елемената. Ови материјали су добри електрични изолатори и слаби проводници топлоте. Керамике су крти, тврди и крути материјали, који су јачи на притисак него на затезање. Приликом оптерећења не деформишу се пластично, већ само еластично. У односу на метале и органске материје, поседују већу отпорност на хемикалије. Температура топљења керамика је веома висока и износи од 1930 до 3870°C, [6]. На слици 2.3 приказани су зупчаници израђени од керамике.



Слика 2.3 - Зупчаници израђени од керамике, [7]

2.3.1 Физичке особине керамичких материјала

Неки керамички материјали су лакши од метала и слабији од полимера. Температуре топљења су више од температуре топљења већине метала. Електрична и топлотна проводљивост већине керамичких материјала су ниже него код метала, али у керамици је опсег ових вредности велик, тако да неке делују као изолатори, а друге као електроде. Коефицијент топлотног ширење је мањи него код метала, али његови ефекти су много штетнији због кртости. Одређена стакла (она са високим садржајем SiO_2) и стаклена керамика имају ниску термичку експанзију и отпорни су на термичко пуцање.

Неки керамички материјали појављују се у стакленој или аморфној фази, а не у кристалном стању (нпр. стакло). Хемијски, већина стакала се састоји од силиконских једињења. Боја и својства се постижу додавањем других стаклокерамичких материјала као што су оксиди бора, калцијума, алуминијума и магнезијума. Осим чистих стакала, постоје и бројне керамике које имају кристалну структуру, а стаклена фаза која се у њима појављују понаша се као везиво кристалне фазе. Стога, важност керамике као конструкционог материјала долази из свог богатства природе и њихових механичких и физичких карактеристика које се потпуно разликују у односу на металне материјале, [7].

2.3.2 Подела керамичких материјала

У керамичке материјале спадају: глинени производи, стакло, цемент, као и модерни керамички материјали као што су волфрам-карбид и кубични бор-нитрит. Најважнији керамички материјали су SiO_2 , који је главни састојак већине стакала, Al_2O_3 - глинаца, која има јако широк спектар примене од абразивних материјала до вештачких костију, затим комплекснија једињења као што је хидратизовани алуминијум-силикат $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ - каолинит, који је главни састојак глинених производа. И прозорска стакла, такође, спадају у керамичке материјале јер су крта.

У архитектонско-грађевинској пракси се користе разне врсте керамичких материјала и производа чија се класификација може извршити на основу:

- структуре која се формира после печења,
- особина које их карактеришу и
- места примене.

Грађевинска керамика обухвата зидну керамику, керамику за израду међуспратних конструкција, канализационе цеви, плочице, чија је основна маса израђена од цигле и керамичких глина, док ватростална керамика обухвата цигле и друге производе од ватросталне глине.

На основу структуре која се формира након печења разликују се:

- груба керамика, која је углавном обојена и чија је структура крупнозрнаста и нехомогена и
- фина керамика, која је беле боје или слабо обојена и чија је структура микросталнаста и хомогена. У ову групу се убраја санитарна керамика, зидне и подне плочице, електропорцелан, порцелан и др.

Према намени, керамичке материјале можемо поделити у три основне групе:

- традиционална керамика у којој се користе силикатни материјали за производњу грађевинске керамике, цемента и абразива,
- нова керамика где спада група керамика развијенијих у новије време на бази оксалата и карбида (несиликатне керамике), које поседују значајно боље механичке и физичке особине од традиционалне керамике и
- стакла која су у основи базирана на силицијуму, али се од других керамика разликују по некрystalној структури.

Уз ова три основна типа, постоје и стаклокерамике, а то су стакла која се на високим температурама трансформишу у велике кристале, [8].

Традиционални керамички материјали подразумевају силикатну и алумосиликатну керамику. У ову групу спадају:

- порцелан, фина и санитарна керамика,
- порцелан за електротехнику,
- грађевинска керамика,

- ватростални материјали,
- техничко стакло и
- цемент и друга неорганска везива.

Савремени керамички материјали обухватају велики број нових конструкционих материјала, који су по својој хемијској природи веома различити. У ову групу убрајају се:

- чиста оксидна керамика,
- неоксидна керамика,
- нуклеарна керамика,
- керамика за електронику,
- специјални керамички материјали,
- композитни керамички материјали и
- угљенични материјали.

Керамички композитни материјали припадају новој класи триботехничких материјала и настали су из потребе повећања носивости машинских склопова и трибоелемената у екстремним условима оптерећења, брзина и температура. Развој ових врста композита је у врло раној фази и постоји још низ технолошких проблема, те се њихова шира примена очекује тек за десетак година. Жилавост керамичких композита повећавају влакна на тај начин што се енергија за ширење пукотине троши за ломљење, одвајање и извлачење влакана из матрице. Што су влакна тања и мрежна структура боље пројектована, то се може очекивати боља механичка отпорност. Ови композити су тежи за израду јер су потребне више температуре, а керамичка матрица се теже прилагођава ојачивачу од полимерне или металне, [9].

2.4 Полимерни материјали

Полимери представљају врло специфичну групу материјала јер с једне стране чине основу живе ћелије и хранљивих материја (биолошки полимери), а с друге стране се од њих израђују различити употребљиви делови (инжењерски полимери). Инжењерски полимери могу да буду синтетички (вештачки полимери као што су пластични материјали, лепкови и еластомери (гуме)) и природни полимери-нпр. каучук, вуна и целулоза. Полимери имају малу густину, лошу топлотну и електричну проводљивост, малу чврстоћу, добру отпорност према корозији, ниску цену и нису подесни за употребу при повишеним температурама.

Полимери су вештачке материје аморфне структуре које чине велику групу конструкционих материјала и често се, једном речју, називају пластике, [10]. Пример зупчаника израђених од пластике дат је на слици 2.4.



Слика 2.4 - Цилиндрични зупчаници израђени од пластике, [10]

Полазне сировине за производњу пластика могу бити минералног и органског порекла. Минералне сировине су нафта, угаљ и земни гас, од којих се најпре израђују основна хемијска једињења за даљу прераду. Ова се једињења различитим процесима преводе у полупроизводе који могу бити у облику гранула, праха, течности, смола, таблета. Даљи процеси прераде ових полупроизвода у финалне производе (ливењем или пресовањем) утичу не само на промену облика и структуре, већ такође и на промену хемијских веза које чине основу материје. Органске сировине за израду пластика могу бити биљног или животињског порекла. Полупроизводи и финални производи добијају се из фракција сирове нафте високе температуре кључања (око 300°C), тако што се те фракције загревају под високим притиском и при високој температури, те настаје распад великих молекула (макромолекула) на мање, погодне за индустрију вештачких производа.

Поред сирове нафте, данас се све више користи као хемијска сировина и земни гас, у чији састав улази метан (око 90%), као и етан, пропан, бутан, пентан, хексан и њихови изомери. Земни гас се прерађује непотпуним сагоревањем или термичким разлагањем (пиролизом при око 700°C). Непотпуним сагоревањем настаје ацетилен, као и мешавина CO_2 и H_2 погодна за синтезу уреје (карбамида) и амонијака. Путем пиролизе добија се етилен, пропилен, ацетилен и друга једињења која се користе за даљу хемијску синтезу.

Из угља се добијају разна хемијска једињења путем тзв. суве дестилације (коксовања). Она се заснива на загревању угља без присуства ваздуха при температури $1100\text{--}1300^{\circ}\text{C}$. У том процесу настају гасни производи, течни производи (тзв. смоле) и чврсти производи (кокс).

Назив пластичне масе (пластике) потиче отуда што су у некој фази прераде оне биле деформабилне; код једних врста пластика деформабилност се стално задржава, а производи се могу рециклирати, док се код других деформабилност трајно губи при завршној преради (дуропласти).

Термопластични материјали (*термопласти*) омекшавају под дејством топлоте, а при хлађењу опет отврдњавају. Супротно томе, термореактивне пластике (*дуропласти*) отврдњавају при загревању и добијају трајан облик те се више не може успоставити стање пластичности. Примери термопласта су: полистирен, полиетилен, најлон, плексиглас, тефлон, а дурупласта бакелит, гума, силикон, епокси смоле. Термопласти углавном нису отпорни на повишеним температурама (изузетак је тефлон), док дурупласти не горе већ се на довољно високим температурама угљенишу и разграђују (деградирају).

Температура топљења пластика је знатно нижа него код већине метала, док неке од њих пузају и при собној температури. Зато се код неких пластика особине мењају и при малим температурним варијацијама. Слично као метали, и полимерни материјали се најпре деформишу еластично па затим пластично. Што је пластика мекша, имаће мању границу еластичности, а веће процентуално издужење (дуктилност). Повећање брзине деформисања, као и пад температуре доводе до преласка пластике из дуктилног у крто стање. Већи је утицај температуре, па ће њеним снижењем пластике прећи у крто стање иако се прерађују малим брзинама деформисања. При механичким испитивањима пластика (нарочито жилавости) боље је узорке исећи из готових производа, а не изливати их посебно, [6].

2.4.1 Подела полимерних материјала

Према механизму полимеризације полимери се деле на:

- полимеризационе и
- поликондензационе.

Према карактеристичним својствима, полимери се деле на:

- термопласте који се на повишеним температурама топе, могу да се прерађују, након хлађења задржавају облик, могу се поново прерађивати без значајних промена својстава (полиетилен, полипропилен, поливинилхлорид, полистирен).
- термореактивне (термочвршћавајуће) код којих са повећањем температуре долази до хемијских реакција (умрежења) што доводи до трајног очвршћавања полимера (фенолформалдехидне смоле, епокси смоле, полиуретан, меламин формалдехид).
- термопластичне еластомере који на собној температури имају својства еластомера, док се на високим температурама понашају као термопласти.

Полимерни материјали се према областима примене деле на:

- пластичне масе,
- гуме тј. еластомере,
- премазе (боје и лакови),
- везива (лепкови) и
- текстилна влакна.

У зависности од броја и врсте полимера, као и додатака који улазе у састав полимерних материјала, они се деле на, [10]:

- бленде, тј. смеше два полимера или кополимера и
- композите - полимерни материјали ојачани са неорганским материјалима (нпр. полиамид ојачан стакленим влакнима).

Подела полимерних материјала врши се на различите начине према различитим критеријумима. У циљу израде производа различитих врста и облика, ови материјали се прерађују на различите начине и разним поступцима и на тај начин се добијају полимери жељених карактеристика и својстава.

2.5 Композитни материјали

Под композитним материјалима подразумевају се вештачки створени материјали, састављени од две или више хемијски разнородних и нерастворљивих фаза, који по својим физичко-хемијским и механичким својствима представљају нове материјале, у чијем саставу постоје јасно утврђене границе раздвајања међу саставним компонентама. Одговарајућим избором саставних елемената и њиховим запреминским односом у структури композита могу се добити материјали са контролисаним и жељеним својствима.

Велика предност композитних материјала, у односу на класичне материјале, је висока вредност специфичне чврстоће (R_m/ρ) и специфичног модула (E/ρ), што омогућава израду делова знатно мање масе при потпуном задовољењу критеријума носивости, што је веома важно тамо где је маса делова од виталног значаја, [11].

2.5.1 Матрице и влакна

Влакнима ојачани композитни материјали добијени су сједињавањем чврстих, крутих и кртих влакана (прекидна и дисперзна фаза) са меком и пластичном матрицом (непрекидна фаза). Матрица служи да преноси силу са влакана на влакно, да обезбеђује пластичност, жилавост и способност обликовања, док влакна преносе оптерећење. Ојачавајућа влакна у композиту могу бити различито распоређена и оријентисана.

Основни захтеви који се постављају пред влакна су:

- висока чврстоћа влакана,
- високи модул еластичности,
- одговарајуће димензије и облик влакана,
- постојаност својстава,
- једноставност израде,
- добра адхезивност са матрицом и др.

Најчешће коришћена влакна за конструкционе композите су: стаклена, угљенична, органска влакна (кевлар-арамид и др.) и влакна бора.

Најпознатије органско влакно је „кевлар“, познатије као арамидно влакно. Арамидна влакна имају веома високу затезну чврстоћу, малу густину, поседују изванредну отпорност на удар, имају одлична изолациона и топлотна својства, постојана су у широком температурном опсегу, не топе се и не скупљају, лако се обликују, израђују се и у облику ткања. Недостатак им је ниска притисна чврстоћа, нешто мањи модул еластичности, отежано добијање влакана, висока производна цена. Због тога се често прибегава комбиновању ових влакана са влакнима угљеника или бора, те се добијају тзв. хибридни композити.

Матрице за израду композитних материјала могу бити: полимерне, металне, керамичке, угљеничне и полиматричне. Код композита са металном матрицом и њеним додацима трајно се смањују деформације на повишеним температурама, код композита са керамичком матрицом и њеним додацима повећава се жилавост, а код композита са полимерном матрицом и њеним додацима повећавају се чврстоћа и крутост.

Матрица представља основу композитног материјала и сврха јој је, [11]:

- веза између влакана,
- преношење оптерећења са влакана на влакно,
- заштита површине влакана чиме се спречава утицај абразије,
- обезбеђује обрадивост композита,
- спречава контакт влакно-влакно, а тиме се уједно спречава оштећење влакана, и
- спречава ширење пукотина, односно кидање влакана.

2.5.2 Врсте композитних материјала

Композити се могу класификовати на различите начине и према различитим критеријумима. Према облику димензија конституената композити се деле на:

- макроскопски композитне материјале,
- микроскопски композитне материјале и
- нанокompозитне материјале.

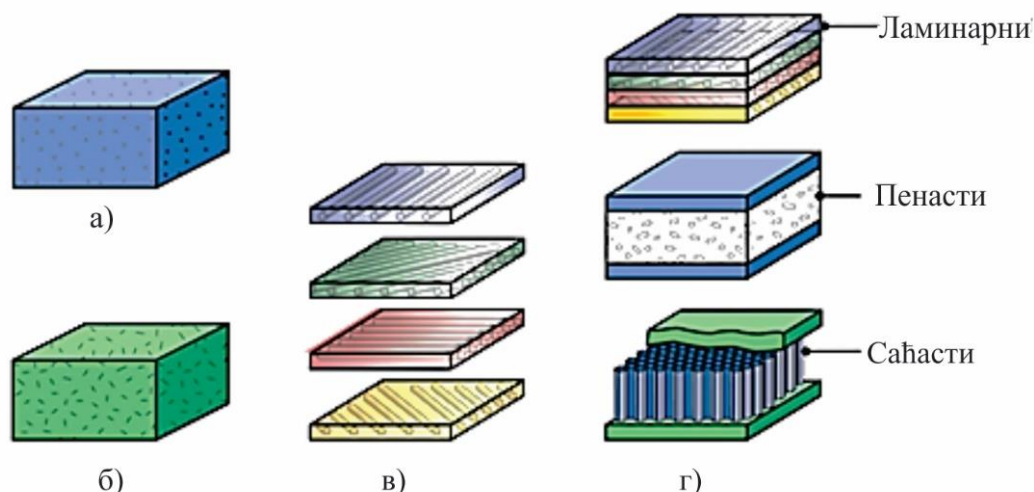
Композитни материјали могу да буду:

- изотропни (иста својства материјала у свим правцима) и
- анизотропни (различита својства материјала у различитим правцима).

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

Према облику додатака композити могу бити (слика 2.5):

- композити са дискретним честицама уграђеним у матрице,
- влакнима ојачани композити и
- слојевити композити-ламинати.



Слика 2.5 - Композитни материјали: а) ојачани честичама, б) ојачани кратким или дугим влакнима у различитим правцима, в) ојачани континуираним влакнима, г) сендвич конструкције - ламинатне, сендвич структуре са пеном, саћасте, [11]

Композити са дискретним честичама уграђеним у матрице имају најдужу примену и најједноставније се добијају, с обзиром да најчешће представљају случајан распоред честича једног материјала унутар основног материјала матрице, са циљем побољшања особина.

Влакнима ојачани композити се састоје од јакних влакана убачених у матрицу од слабијег материјала. Матрица обезбеђује монолитност композита, даје производу одговарајући облик и фиксира узајамни положај влакана.

Слојевити композити или ламинати се састоје од слојева два или више материјала који се тако бирају и међусобно повезују да се добије материјал са захтеваним механичким својствима. Основни циљ код формирања ламината је да се дирекциона зависност отпорности и крутости прилагоди захтевима конструкције, [11].

2.5.3 Карактеристике композитних материјала

Предност примене композитних материјала, у односу на конвенционалне материјале, огледа се у могућности широког варирања практично свих особина материјала од којих су састављени, што се постиже путем избора саставних компонената, њихове количине, распореда и оријентације у оквиру материјала, а са циљем да се искористе њихова најбоља својства.

Неке од најзначајнијих предности композитних материјала у поређењу са традиционалним материјалима се огледају у следећем:

- знатно мања маса конструкције (чак и до 50% у поређењу са челичном конструкцијом истих димензија),
- добра ударна жилавост,
- повећана отпорност на замор, хабање, вибрациона и акустичка оптерећења,
- мала осетљивост на концентрацију напона,

- знатно смањење броја саставних делова конструкције,
- већа поузданост у експлоатацији и корозиона постојаност делова,
- велика чврстоћа и тврдоћа (затезна чврстоћа композита је неколико пута већа у поређењу са челиком или алуминијумом),
- могућност израде делова сложеног облика,
- изузетно хармонично ублажавање вибрација,
- успоравање развоја пукотине и
- дужи животног век и лако одржавање.

Избор материјала зависи од захтеваног радног века, броја позиција, сложености облика производа, вештине прорачуна оптималних карактеристика композита и др. У неким случајевима најбољи резултати могу бити постигнути коришћењем комбинације композита и традиционалних металних материјала, [12].

2.5.4 Карактеристике зупчаника израђених од композитних материјала

Развојем технологије и индустрије захтевају се боље механичке карактеристике машинских елемената и конструкција, тако да зупчаници израђени од композитних материјала добијају све већи значај. Разлог за њихову све ширу примену лежи у предностима које поседују: апсорбција удара и вибрација, мала маса, отпорност на корозију, могућност рада без подмазивања, израда компликованих облика. Ови зупчаници налазе све ширу примену у аутомобилској, електронској, прехранбеној и текстилној индустрији, код компјутера и медицинске опреме.

Међутим, у односу на металне зупчанике, зупчаници израђени од композитних материјала (слика 2.6) имају мању затезну чврстоћу (до 200 МПа), мању крутост (модул еластичности до 1000 МПа), максимална температура примене је знатно мања (до 200°C), велики коефицијент топлотног издужења.



Слика 2.6 - Цилиндрични зупчаник израђен од метала (лево) и композита (десно), [11]

Присуство влаге, при раду зупчаника од композитних материјала, у комбинацији са повишеном температуром, доводи до погоршања њихових механичких својстава. Композитни материјали упијају влагу преко матрице и дуж границе влакно-матрица, што изазива пластификацију и ширење смоле, слабљење веза у структури смоле, слабљење веза влакно-смола и настајање индукованих напона, [11].

2.6 Паметни материјали

Израз "паметан" односи се на материјале који мењају своју микроструктуру и својства под деловањем околних услова (температура, механички напон, хемијска дејства, електрично или магнетно поље, светлост итд.).

Хибридни материјали су једињења неколико материјала у полуфабрикатној конструкцији, у којима основне компоненте обављају самосталне функције. Карактеристични хибридни материјали су тракасти металофлуоропластни полуфабрикати у којима метална трака носи конструкцију, а слој бронзе обавља улогу међуслоја за полимере. Знања и велики број информација из области трибологије усмеравају напоре у правцу стварања „интелектуалних“ триболошких материјала и трибоелемената. То су материјали:

- способни да се у условима фрикционих оптерећења прилагођавају спољашњим деловањима, а све у циљу достизања оптималних триболошких карактеристика,
- који поседују резервне могућности за спречавање неповољних стања или катастрофалних разарања трибоелемената при наглим променама параметара оптерећења или средине окружења.

Реализација „способности“ и „поседовања“ могућа је како на нивоу макроструктуре трибоматеријала, тако и при изради трибоелемената. За сада су најкарактеристичнији представници ове групе нових материјала композити са неколико нивоа самоподмазивања, [3].

Фероелектрични (FE) и феромагнетски (FM) материјали заједно са легурама које одговарају облику (Shape Memory Alloy - SMA) имају фазне трансформације на нижим температурама повезаним са променом волумена и облика. Ови ефекти ограничавају величину промене облика. Пиезоелектрични материјали (PE) су погодни за сензоре у условима механичких оптерећења и деформација.

Понашање SMA-а одређује се са три могућа дејства формирања:

- једносмерни ефекат (псеудопластичност)-релативно велика пластична деформација под напоном,
- двосмерни ефекат-деформација је последица промене температуре, али се легура пре тога мора „научити“,
- псеудоеластичност-материјал се након структурне деформације додатно деформише при константном напрезању. Након растерећења деформација нестаје.

Развој SMA легура почиње са Ni-Ti и касније се откривају тернарне легуре засноване на Cu: Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al и Cu-Al-Be (+ 0,5 % Si и мали додаци Cr, V, Mn или Ti), као и остале легуре на бази гвожђа, [9].

3. Нове генерације материјала

Савремена достигнућа науке о материјалима нуде широк асортиман инжењерских материјала који се могу употребити за израду трибоелемената. Традиционалне комбинације типа: метал-метал, метал-керамика, метал-полимер, метал-композит...могу се делити на велики број подкласа, употпуњујући на тај начин широку лепезу могуће понуде.

Свака подкласа материјала одређена је механичким особинама и карактеристикама структурних компоненти које утичу на механизам и развој процеса хабања. Процеси контакта трибоелемената дискретне су природе и у већини случајева одвијају се у условима термичке нестабилности.

Избор најподеснијих спајања и оптимална комбинација материјала трибопарова мора бити резултат пажљиве анализе сваког случаја појединачно. При томе је неопходно посебно узети у обзир: услове рада трибомеханичког система, почетна својства материјала, очекиване промене у граничним слоју, могуће утицаје појединих фактора и др. Опште препоруке при комбиновању парова материјала су, [3]:

- Спајати трибопарове од тврдих метала (челик, ливено гвожђе, сиви лив, нодуларни лив). Такви парови поседују велику отпорност на хабање услед малог узајамног продирања у унутрашње граничне слојеве.
- Спајати тврде са меким материјалима чија је температура рекристализације нижа од средње температуре контактних површина у експлоатацији.
- Избегавати спајање меких материјала са меким, а и трибопарове од истоимених материјала (некаљени челик-некаљени челик, алуминијумска легура-алуминијум, бакарна легура-алуминијум, хром-хром, никл-никл, полимер-полимер). Слични парови имају малу отпорност на хабање и непоуздани су у раду.
- У отежаним условима подмазивања трибомеханичких система користити порозне, прашкасте материјале и антифрикционе легуре.
- Користити кад год је могуће полимерне материјале. У многим случајевима они повећавају поузданост и век трајања, смањују укупну масу конструкције, вибрације и побољшавају акустична својства производа.
- На хабање полимера велики утицај имају материјали другог трибоелемента у контакту. Најбоље резултате дају комбинације полимер-челик и полимер-ливено гвожђе, осим у условима интензивног загађења.
- Избегавати спајање материјала са јако израженим својствима адсорбовања, посебно водоника.

На основу ових препорука потребно је вршити одређена експериментална испитивања како би се изабрали најадекватнији материјали за израду жељених машинских елемената и делова.

Интензиван развој нових материјала у свету резултира све већом количином информација о поступцима њиховог добијања (производње и обликовања), о њиховим својствима и о већ провереним примерима примене. Тек у новијој историји, користећи

квантитативна знања из математике, физике, механике, термодинамике, хемије и из осталих подручја, откривају се поступци за добијање савременијих материјала (легираних челика, алуминијумских легура, полимерних материјала, композита), [12].

3.1 Нанокмозити

Последњих година полимерни нанокмозити су предмет великог броја истраживања у полимерној науци и науци о материјалима. Нанотехнологије пружају многобројне могућности развоја материјала побољшаних својстава за примене у електроници, оптоелектроници, машинству, хемијском инжењерству, штампарству, микробиолошким и биомедицинским областима. Велику примену нанокмозити имају у развоју грађевинских материјала, као и проналажењу нових материјала за санацију и рестаурацију културно-историјских споменика. Полимерни нанокмозити (термопластични и еластомерни) данас представљају све већу област истраживања и сматрају се модерном технологијом или технологијом будућности.

Нанокмозити су материјали добијени уношењем наночестица, честица реда 10^{-9} m, у макроскопске једноставне материјале, тачније матрице. На овај начин могу се побољшати својства материјала као што су: топлотна и електрична проводљивост, оптичка, магнетна и механичка својства. Наночестице чине свега 0,5 до 5% материјала, али њихов распоред доприноси великој специфичној површини честица што даље доприноси бољим својствима добијеног нанокмозита. Последњих неколико деценија наука и технологија поклањају све више пажње полимерним нанокмозитима. Разлог томе је што су уочена изванредна својства ових материјала. Честице величине од 1 до 100 nm дефинишу се као нано-пуњења. Изванредност наночестица не крије се само у њиховој величини већ и у њиховој специфичној површини. Специфична површина може достићи и $700 \text{ m}^2/\text{g}$, исто када бисмо цео фудбалски терен ставили у кап кише. Овај феномен наночестица и чини нанокмозите посебним материјалима.

Полимерни нанокмозитни материјали су изузетно значајни за савремену индустрију, њихова трајност и термичка стабилност у различитим условима експлоатације, као и могућност разградње након употребе су такође значајни са аспекта екологије. Комерцијални производи од еластомерних материјала представљају композите са неорганским или органским пуниоцима чије су примарне честице нано величина, па у ствари такви производи представљају нанокмозите. Синтетички полимерни материјали све брже замењују традиционалне неорганске материјале, као што су метали, као и природне полимерне материјал (дрво, влакна), [13].

3.1.1 Нанопуниоци

Под нанопуниоцима подразумевају се аорганске честице које имају најмање једну димензију реда величине нанометра. Најчешће коришћени нанопуниоци се деле на плочасте пуниоце, нановлакна и наноцевчице, као и истоосне пуниоце.

Нановлакна и наноцевчице су пуниоци у облику влакана и цевчица које имају пречник мањи од 100 nm, а однос димезија дужине и пречника $l/d = 100 - 10^6$ (наноцевчице). Најважнији представник су угљеникове наноцевчице које су произведене и почетком деведесетих година приликом проучавања површине угљикових електрода које су се

користиле при производњи фулерена (угљеникова структура са 60 С атома, сферичне грађе, комбинација хексагонских и пентагонских структура). Разликују се наноцевчице са више зидова, које се састоје од два или више концентричних цилиндричних слојева графена (један слој графита) коаксијално смештених око централне шупље средине, и наноцевчице са једном зидом.

Слојевити или плочасти нанопуниоци укључују слојевите силикате (филосиликати или сместичне глине) и слојевите силикатне киселине. Филосиликате карактеришу слабе везе између слојева који су заправо мале плочице, ширине око 1 nm. За примену истоосних нанопуниоца наночестица метала (Ag, Au...) или металних оксида (TiO₂, ZnO...) у полимерима, важно је синтетизовати честице пуниоца са контролисаном величином честица и степеном агрегације, [14].

3.2 Shape memory polymer

Shape memory polymer (SMP) су полимерни паметни материјали који имају могућност да се врате из деформисаног стања (привремени облик) у њихов првобитни (трајни) облик, индукован спољним стимулансом (окидачем), као што је промена температуре.

SMP могу задржати два или понекад три облика, а прелаз између њих је индукован температуром. Поред промене температуре, промена облика ових материјала се може покренути и путем електричног или магнетског поља или светлости. Генерално, као и полимери, они такође обухватају широк опсег својстава, од стабилног до биоразградивог, од меког до тврдог и од еластичног до крутог, у зависности од структурних јединица које чине SMP. SMP укључују термопластичне и термосетске (ковалентно укрштене) полимерне материјале. Познато је да ови материјали могу да чувају до три различита облика у меморији. Док већина традиционалних полимерних облика може имати само трајни или привремени облик, недавни технолошки напредак омогућио је увођење троструких облика SMP материјала. Традиционални полимер двоструког облика ће се променити од привременог облика до сталног облика на одређеној температури, док полимери са троструком формом ће се пребацивати од једног привременог облика на други при првој температури преласка, а затим назад на стални облик на другој, већој температури.

Једна од првих замишљених индустријских примена била је у роботизи. Ове пене могу накнадно бити отврднуте хлађењем, што омогућава прилагођавање облика. Од тада, ови материјали су видели широку употребу у грађевинској индустрији (пена која се шири на топлоти, за затварање прозора), код спортске одеће (шлемови, цудо и карате одећа), а у неким случајевима са термохромним додацима ради лакшег посматрања термичког профила. [15]

3.3 Биомиметрички материјали

Истраживање синтетичких материјала на основи материјалне бионике спада у интердисциплинарно подручје између биологије, хемије, машинства и медицине. Током природног еволуцијског процеса, непрестана селекција допринела је томе да данашњи животни облици на земљи нуде решења која су оптимално прилагођена одређеним

функцијама и условима у околини. Из природе се учи како из једноставних и расположивих једињења биолошким процесима настају сложене полимерно/керамичке структуре високе чврстоће, крутости, тврдоће и жилавости, као нпр. оклопи, рогови, зуби, бодље животиња, паукова мрежа итд. На основу проучавања и опонашања састава и структуре таквих система развијају се вештачки процеси синтезе оксида, сулфида и других једињења у воденим или полимерним растворима са циљем добијања вештачких костију и ткива, разградивих влакана за зашивање рана, различитих композита, мембрана за дијализу, функционалних материјала.

Биолошки иницирани процеси одвијају се при собној температури и тешко се могу убрзати. Због тога су брзине издвајања (талочења) јако ниске. У природи постоји низ физичко-хемијских ефеката, који се нуде као модел техничким системима, као нпр. електроактивност код риба или луминисценција разних животиња и мањих биљака. Често природа фаворизује мултифункционална или чак интелигентна решења. Претпоставља се да ће у скорој будућности генетичко инжењерство донети нова сазнања, корисна и за управљање процесима настајања природних обновљивих и других бионичких материјала, [9].

3.4 Аерогелови

Аерогелови су високопорозни материјали са екстремно малом густином, која се креће између 30 и 300 kg/m³. Док је величина пора код стандардних порозних материјала, као што су сунђери или пене за изолацију, у микрометрима или милиметрима, код аерогелова се поре мере у нанометрима. Аерогелови се могу састојати 99 % од ваздушних канала, што резултује великом унутрашњом специфичном површином. Класични поступци стварања аерогелова, познати су већ 60 година, произлазе из тзв. со-гел процеса код ког из течне мешавине (со) расте аморфна, чврста мрежа (гел). У међувремену су се развиле врло сигурне варијанте поступака, које омогућују већу производњу тих материјала. Поред најраспрострањенијих аерогелова из кременог стакла, који се базирају на силициј-оксиду, данас се користе други основни материјали као што су алуминиј-оксид, титан-оксид или мешани оксиди. Пре неколико година је успела производња органских аерогелова који су у поређењу са керамичким геловима мање порозни и боље задржавају топлоту. Осим тога, загревањем без довода ваздуха могу се преобликовати у угљеничне аерогелове који проводе струју. Њихов развој још је у релативно раној фази. Практично све могућности за употребу аерогелова базирају се на њиховој врло порозној наноструктури. Она је одговорна за низак индекс лома, низак модул еластичности и малу топлотну проводљивост. У појединим случајевима је корисна и висока оптичка транспарентност.

Аерогелови имају у будућности тенденцију за изоловање топлоте. Пошто силициј-оксидни аерогелови тешко горе и могу се рециклирати, погодни су као замена за изолационе пене које садрже фреон. Прикладни су за пасивно коришћење сунчеве енергије на зидовима кућа или као кровни прозори јер пропуштају светлост. Брзина звука у аерогеловима знатно је нижа него у ваздуху и може се мењати варирањем производних параметара. Због велике специфичне површине и лаке уградње каталитички активних супстанци, аерогелови имају огроман потенцијал као носиоци катализатора за хемијске процесе. Слаба страна аерогелова је релативно висока осетљивост на околне утицаје.

Тако се морају силицијум-оксидни аерогелови чувати од влаге, јер је њихова мрежа (костур) таква да упија воду, [9].

3.5 Фулерени и наноцевчице

Фулерени представљају велике молекуле који се састоје искључиво од угљеника, а садрже у себи затворене кугласте структуре. Најважнији представник је молекула C_{60} у облику фудбалске лопте, састављен од 12 пентагона и 20 хексагона. Овај фулерен има пречник око 0,7 nm, а унутрашњост је празна. Фулеренске наноцевчице пречника од 1 до 10 nm и дужине до 1000 nm показују импресивна механичка и електрична својства. Затезна чврстоћа је око 10 пута већа од чврстоће 17 угљеничних влакана, а густина упола мања. Електрична проводљивост је као код бакра, а топлотна проводљивост тако висока као код дијаманта.

За будућа истраживања нових материјала, заснованих на фулеренима, занимљиво је формирање кавеза у који би се додавали различити елементи и њихова једињења. Широки спектар својства може се остварити током поступка производње, а потенцијалне примене су за хемијске сензоре, ултрачврсте композите, за танке мреже за пренос информација у бионичким материјалима, итд. Стручњаци интензивно раде на примени наноцевчица у изградњи нових врста процесора, али прве примене очекују за десетак година. НАСА сматра да би истраживања у правцу добијања корисних наноцевчица могла довести до револуционарних употреба у различитим областима, [9].

4. Моделирање трибомеханичког система

Зупчасти преносници играју виталну улогу у индустрији преноса снаге и карактеришу се својим једноставним обликом. Зупчаници су обично изложени променљивим оптерећењима. Због ових оптерећења у зупчаницама се јавља момент савијања и притисак. При њиховом дизајнирању веома је важно анализирати напон за сигуран рад, а смањење тежине је један од критеријума дизајна. Последњих година потребно је руковати машинама при различитим оптерећењима и брзинама. Зупци зупчаника обично слабе када се оптерећење повећава изнад дозвољене границе. Због тога је потребно истражити алтернативне материјале за њихову производњу. [16]

4.1 Зупчасти преносници

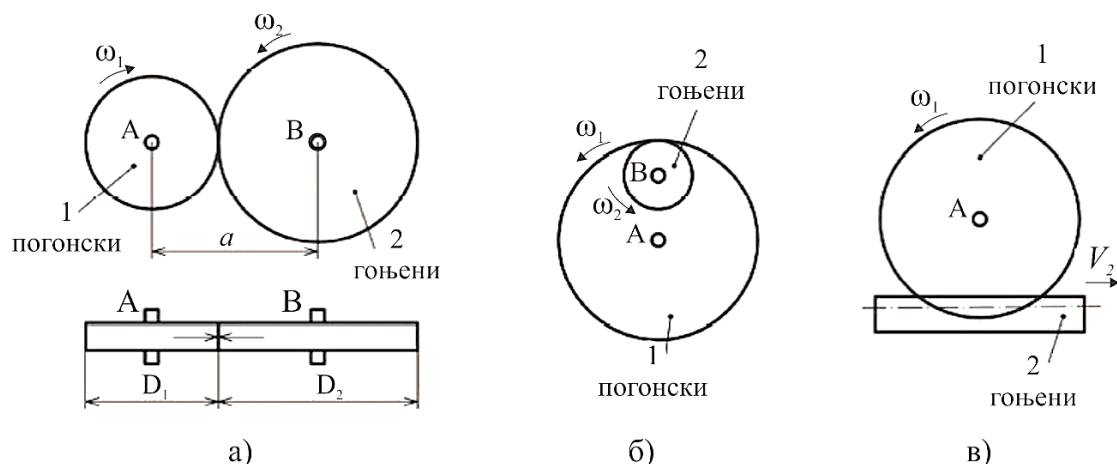
Зупчасти преносници снаге су машински елементи који служе за пренос кретања и снаге са једног на друго вратило. При том, вратила могу бити међусобно паралелна, да се секу или да се мимоилазе.

Зупчаник се састоји од средишњег дела који се назива главчина, венца на коме се налазе зупци и тела које се налази између главчине и венца. Главчина је у склопу са вратилом. Тело може бити са отворима или са паоцима. Зупчаници малих димензија немају изражену главчину и тело, већ је зупчаник у виду кружне плоче. Зупчаници врло малих кинематичких пречника израђују се заједно са вратилом.

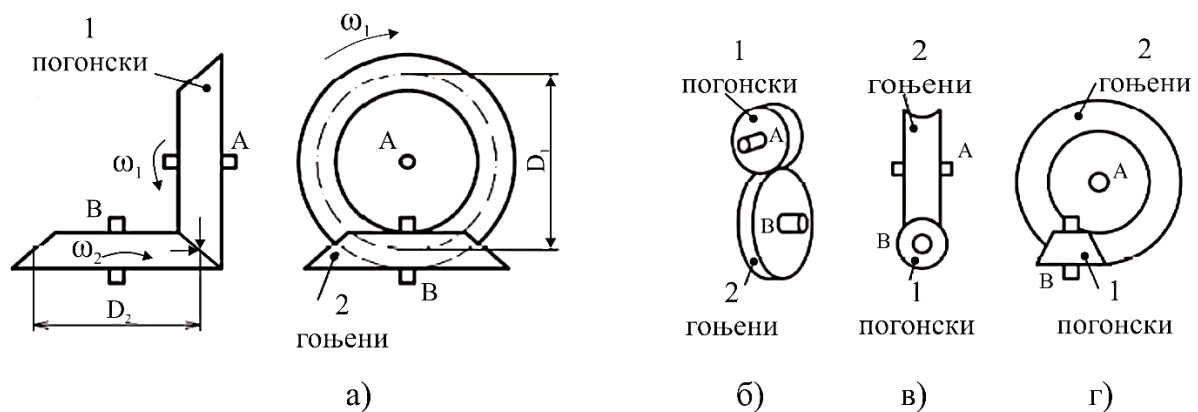
Зупчасти преносници снаге деле се:

а) Према положају оса вратила на:

- Цилиндричне зупчанике за паралелна вратила са спољашњим (слика 4.1, а) и са унутрашњим озубљењем (слика 4.1, б);
- Цилиндричне зупчанике са равним озубљењем (слика 4.1, в). У спреси је само један зупчаник са зупчастом летвом, за разлику од осталих где су у спреси увек два зупчаника;
- Конусне зупчанике за вратила која се секу (слика 4.2, а) и
- Хиперболоидне зупчанике за вратила које се мимоилазе (слика 4.2, б, в и г).

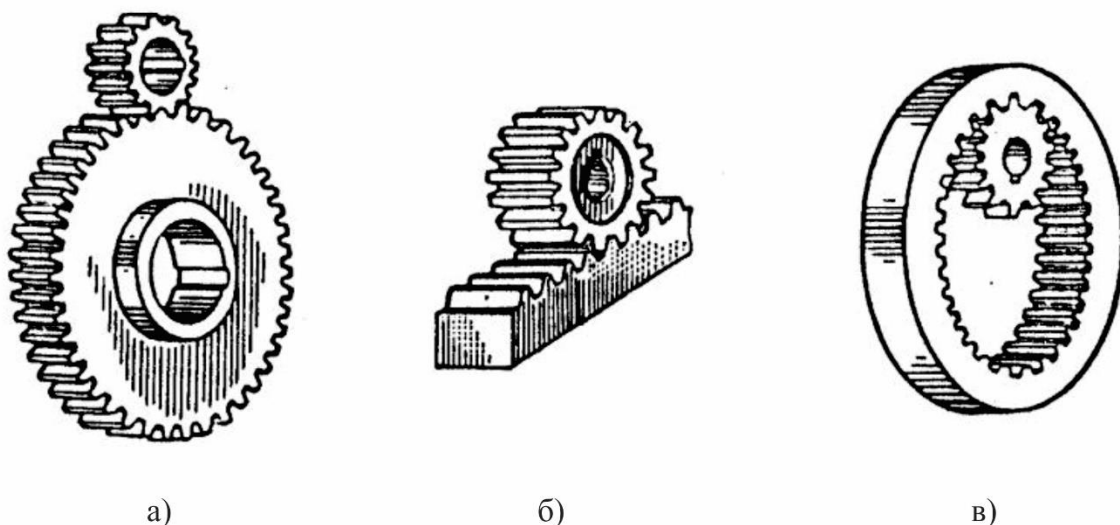


Слика 4.1 - Зупчасти преносници за паралелна и мимоилазна вратила, [17]



Слика 4.2 - Зупчasti преносници за вратила која се секу (а) и за вратила које се мимоилазе (б), (в), (г), [17]

Цилиндрични зупчаници са спољашњим озубљењем okreћу се у супротним смеровима, а зупчаници са унутрашњим озубљењем имају исти смер окретања. Зупчasti пар са равним озубљењем, зупчаник (1) и зупчаста летва (2) (слика 4.1, в), обртно кретање зупчаника трансформишу у равно кретање зупчaste летве (слика 4.3, б). У зупчастом пару један од зупчаника је погонски, а други је гоњени. Венац на којем се налазе зупци је витални део сваког зупчастог пара, било са спољашњим (слика 4.3, а), равним (слика 4.3, б) или унутрашњим озубљењем (слика 4.3, в).



Слика 4.3 - Цилиндрични зупчаници са спољашњим (а), равним (б) и унутрашњим озубљењем (в), [17]

б) Према правцу зубаца, зупчаници се деле на оне са:

- правим зупцима,
- косим зупцима,
- стреластим зупцима,
- завојним зупцима и
- спиралним зупцима.

в) Према покретности оса окретања, зупчанике делимо на:

- зупчанике са непокретним осама окретања и
- зупчанике са покретним осама окретања.

г) Према облику бока зубаца, зупчанике делимо на:

- еволвентне,
- циклоидне и
- новикове.

д) Према конструкционом облику, зупчанике делимо на:

- округле и
- неокругле.

ђ) Према начину израде, зупчанике делимо на оне израђене, [17]:

- резањем,
- ковањем,
- ливењем,
- заваривањем и
- исецањем.

У зависности од захтева и потреба бирају се одређене врсте зупчастих преносника, а затим у комбинацији са најпогоднијим начином израде и одговарајућим материјалом задовољавају се почетни услови.

4.1.1 Цилиндрични зупчаници са правим зупцима

Цилиндрични зупчасти преносници са правим зупцима преносе снагу и врше претварање једног обртног кретања у друго или обртног у праволинијско кретање. То су такви преносници код којих су осе вратила спрегнутих зупчаника међусобно паралелне. Кинематске површине зупчастих парова су цилиндри који се котрљају један по другом без клизања. У пракси се примењују:

- цилиндрични зупчасти преносници са спољашњим озубљењем,
- унутрашњи зупчасти парови и
- равни цилиндрични зупчасти парови.

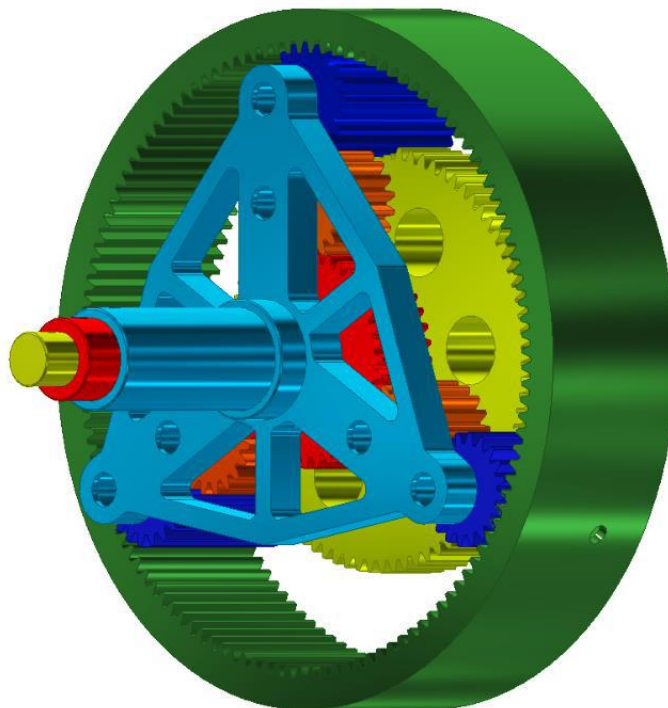
Код цилиндричних зупчастих парова са спољашњим озубљењем, спрегнути зупчаници имају супротне смерове обртања, за разлику од унутрашњих зупчастих парова где спрегнути зупчаници имају исте смерове обртања. Равним зупчастим паром врши се претварање обртног у праволинијско кретање. [18]

Најмањи број зуба на зупчанику са нормалним углом од 20 степени је 18. Овај цилиндрични облик има највеће примене, а такође се и најлакше производи. Они су једноставни за конструкцију, лаки за производњу и цена је ниска. Имају велику ефикасност и одличну прецизност. Користе се при великим брзинама и високом

оптерећењима. Проналазе широку примену од сатова, кућних уређаја, мотора, аутомобила и до авиона и железница. [19]

4.2 Моделирање зупчастих парова

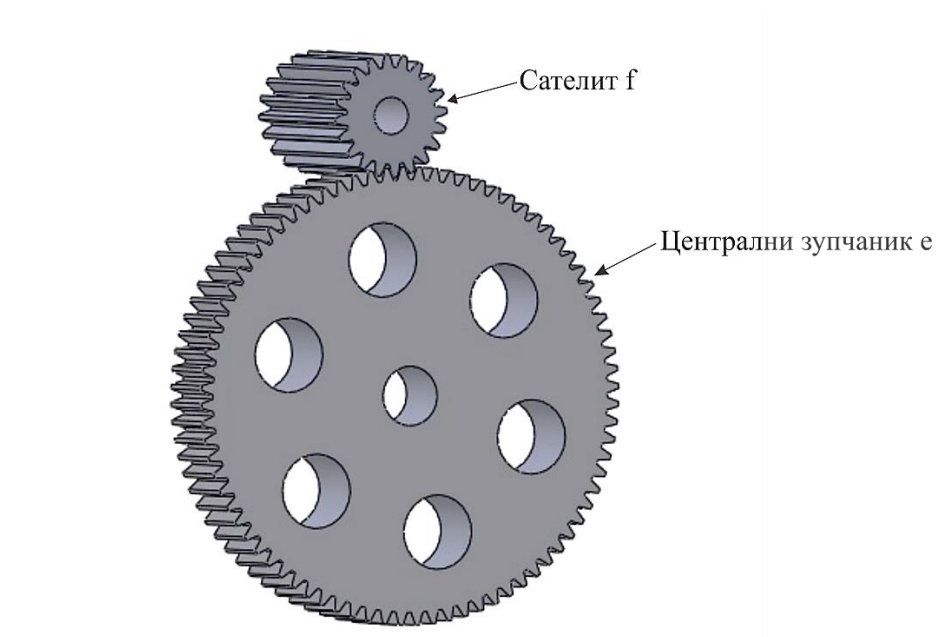
При дизајнирању зупчаника веома је важно анализирати напон за сигурносни рад, а смањење тежине је такође један од критеријума дизајна. Зупчаници су моделирани у софтверском пакету *Autodesk Inventor 2016*, а потом увезени у *Solidworks 2014*, у коме је урађена и статичка анализа. Изабрани зупчаници су део Равињоновог планетарног преносника приказаног на слици 4.4. Равињонов планетарни механизам (*Ravigneaux gearset*) је дупли планетарни механизам кога је измислио Пол Равињон (*Pol Ravigneaux*). Овај механизам патентиран је 28. јула 1949. године у Француској. Настао је као последица унапређивања претходних мењачких преносника, као што је Симпсонов.



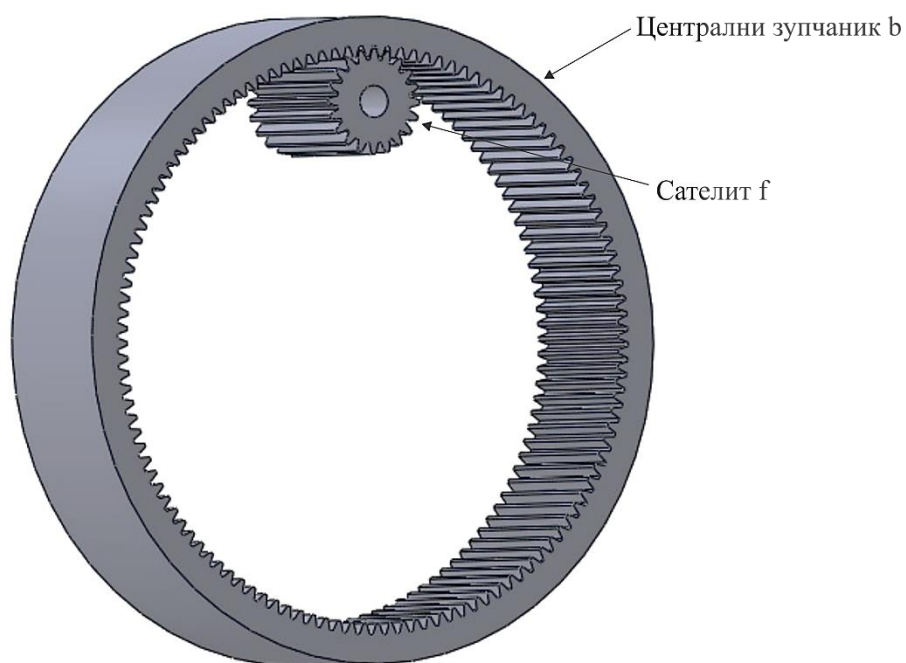
Слика 4.4 - Пример Равињоновог планетарног механизма

Састоји се од два централна зупчаника са спољашњим озубљењем (црвени и жути зупчаници) и једног централног зупчаника са унутрашњим озубљењем (зелени зупчаник), између којих се налазе два сателита (плави и наранџасти зупчаници) повезани једним носачем.

За потребе рада и анализе, узет је зупчасти пар са спољашњим озубљењем кога чине централни зупчаник (сунце) e и сателит f (слика 4.5), као и зупчасти пар са унутрашњим озубљењем кога чине централни зупчаник (сунце) b и сателит f (слика 4.6). Ови зупчасти парови су изабрани за анализу како би се утврдило да ли се применом различитих материјала може смањити маса целокупног Равињоновог планетарног механизма, као и могу ли зупчаници издржати оптерећење коме су изложени.

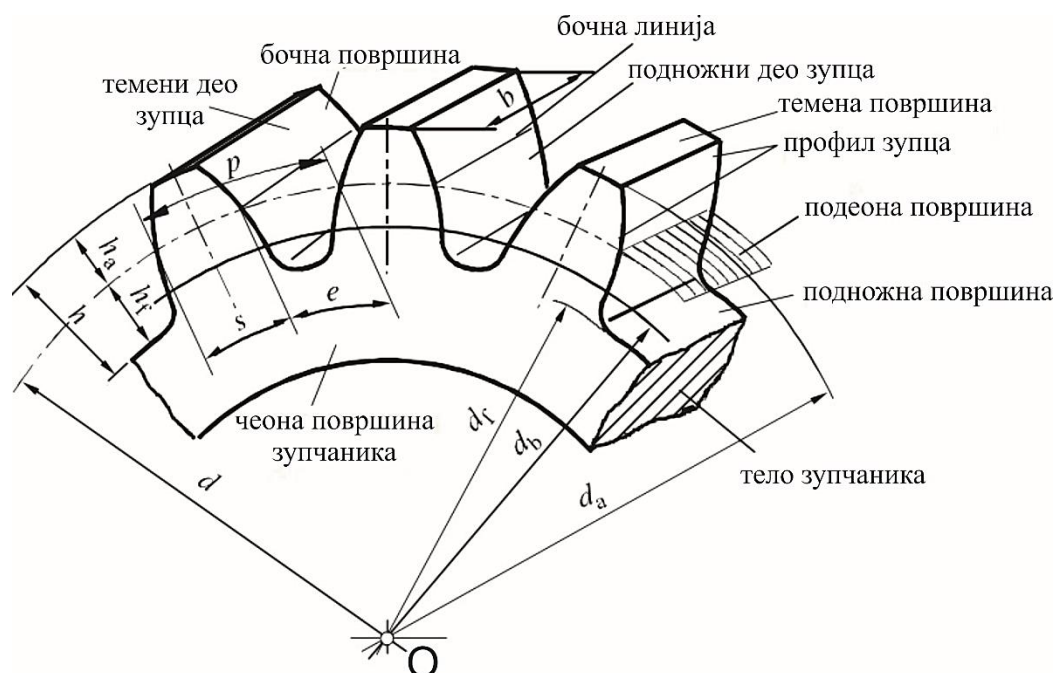


Слика 4.5 - Зупчасти пар са спољашњим озубљењем



Слика 4.6 - Зупчасти пар са унутрашњим озубљењем

На слици 4.7 приказане су ознаке величина код цилиндричних зупчаника са правим зупцима, док су вредности за изабране зупчасте парове дате у табели 4.1.



Слика 4.7 - Ознаке величина код цилиндричних зупчаника са правим зупцима

У табели 4.1 дате су основне геометријске карактеристике зупчаника. Ове вредности добијене су прорачуном у Autodesk Inventor-у.

Табела 4.1: Геометријске карактеристике зупчаника

Основне геометријске величине	Ознаке	Сателит- f	Централни зупчаник (сунце)- e	Централни зупчаник (сунце)- b
Број зуба	z	20	80	120
Модул	m	1,5	1,5	1,5
Ширина	b	50 mm	20 mm	50 mm
Пречник теменог круга	d_a	33 mm	123 mm	177 mm
Пречник подеоног круга	d	30 mm	120 mm	180 mm
Пречник подножног круга	d_f	26,25 mm	116,25 mm	183,75 mm
Пречник основног круга	d_b	28,191 mm	112,763 mm	169,145 mm
Лучна дебљина зупца	s	2,356 mm	2,356 mm	2,356 mm
Подеони корак	p	4,712 mm	4,712 mm	4,712 mm
Угао додирнице	α	20°	20°	20°

5. Анализа

Данас су испитивања и прорачуни достигли још виши ниво, коришћењем рачунара и напредних софтвера лакше и брже се долази до жељених резултата. Анализа се изводи:

- теоријско-аналитичким методама,
- нумеричким методама и
- експерименталним методама.

Анализом “корак по корак” се усавршава конструкција док се не постигну жељени циљеви. Прикупљају се подаци који омогућавају корекцију конструктивних решења, односно еволуцију постојећих и усавршавање новоразвијених конструкција. Прикупљају се подаци и знања на којима ће се заснивати развој будућих машинских конструкција. У раној фази се може развити више конструктивних варијанти и од њих изабрати најповољније решење.

У анализи конструкција, матричне методе имају веома широку примену нарочито при увођењу у прорачун сложених спољашњих оптерећења и историје претходног оптерећења конструкција, одређивању крутости, итд. Основне зависности између геометријских и физичких величина у механици континуума свODE се углавном на успостављање веза између стања напона и стања деформација и спољашњег оптерећења. Решавање задатака се тако своди на решавање диференцијалних једначина (обичних или парцијалних) уз задовољење одговарајућих контурних и почетних услова.

Што се тиче нумеричке методе, диференцијалне једначине које описују стање напона и стање деформација тела сложених геометрија, структура или контурних услова решавају се приближним нумеричким методама. Добијена решења су приближна, али могу бити увек довољно блиска тачном решењу онолико колико се у датом проблему жели.

Код методе коначних елемената (Finite Element Analysis) - МКЕ крајњи резултат се добија решавањем система алгебарских једначина. Неопходно је добро познавање природе проблема који се решава. Постоје 3 вида МКЕ, [20]:

1. метода померања (метода деформација) - непозната померања-деформације,
2. метода сила - непознате силе и
3. мешовита метода.

Неки од софтвери који се користе: FEMAP, COSMOS, NASTRAN, ANSYS, I-DEAS, PAK, SAP, итд.

5.1 Метода коначних елемената

Метода коначних елемената (МКЕ) спада у савремене методе нумеричке анализе. Њена примена прво је почела у области рачунарства инжењерских конструкција. Основна идеја о тзв. физичкој дискретизацији континуума, на коме се заснива МКЕ, је врло стара, приближно као и људска тежња да се тешко решавају проблеми замене једноставнијим, за које се лакше налазе решења.

Као пример за илустрацију може се навести проблем одређивања опсега или површине круга, на основу његовог поделе на мање делова правилног облика. Грчки математичар и физичар Архимед, рачунао је број π , односно границе између којих се налази нумеричка вредност овог броја, тако што је контуру круга апроксимирао уписаним односно описаним полигоном са коначним бројем страница. Са повећањем броја страница полигона, односно са смањењем њихове дужине, смањена је и разлика између граница у којима се налази број π , а повећала се прецизност нумеричке вредности. Отприлике у исто време, на сличан начин, у старом Египту се рачунају запремина пирамида и површина сфере, а у Кини је дат доказ познате Питагорине теореме. Са овим првим једноставним примерима, отворена су нека фундаментална питања, као што су: тачност решења, горња и доња граница апроксимације, монотоност и брзина конвергенције и др, која су и данас у МКЕ веома актуелна и значајна са теоријског и практичног становишта.

Развој методе коначних елемената почео је половином прошлог века. У почетној фази се одвијао кроз два међусобно независна приступа, прво инжењерски, а одмах затим математички. Сложене просторне конструкције, у инжењерским прорачунима, замењене су дискретним системима који су састављени од штапова и који се рачунају по познатим поступцима статике линијских носача. Од стране математичара, тражена су приближна решења одређених граничних задатака помоћу дискретних модела уз примену варијацијских поступака. Ова два прилаза, инжењерски и математички, касније су удружени, што је било од велике важности за даљи бржи развој и широку примену МКЕ, [20].

5.1.1 Основе на којима се заснива МКЕ

Метода коначних елемената спада у методе дискретне анализе. За разлику од осталих нумеричких метода, који се заснивају на математичкој дискретизацији једначине граничних проблема, МКЕ се заснива на физичкој дискретизацији разматраног подручја. Уместо елемента диференцијално малих димензија, основу за сва истраживања представља део подручја коначних димензија, мање подручје или коначни елемент. Због тога су основне једначине којима се описује стање у појединим елементима, а помоћу којих се формулише и проблем у целини, уместо различитих или интегралних, обичне алгебарске.

Са становишта физичке интерпретације, значи да се разматрана област, као континуум са бесконачно много степени слободе, замењује дискретним моделом међусобно повезаних коначних елемената, са коначним бројем степени слободе. С обзиром на то да је број дискретних модела за један гранични проблем неограничено велики, основни задатак је да се изабере онај модел који најбоље апроксимира одговарајући гранични проблем, [20].

5.1.2 Алгоритамски концепти МКЕ

Анализа и решавање проблема механике континуума по МКЕ увек се свде на тзв. процес „корак по корак“, што је од огромног практичног значаја за примену рачунара у ефективном буџету. У том процесу, који се може приказати као једноставан алгоритам, издваја се следећих шест најважнијих корака:

1. дискретизација континуума,
2. избор интерполационих функција,
3. рачунање карактеристика елемената,
4. формирање једначина за мрежу коначних елемената,
5. решавање система једначина,
6. прорачун потребних утицаја.

Од наведених шест корака, прва три су посебно важна. Начин дискретизације, избор облика елемената, као и укупан број елемената, зависе од природе проблема који се решава и потребне тачности траженог решења. Поред броја и облика елемената важан је избор чворова, основних непознатих и интерполационих функција. Помоћу интерполационих функција дефинише се поље променљивих у сваком елементу. Од њиховог избора директно зависи и континуитет на границама између појединих елемената, а самим тим и прецизност апроксимације. Променљиве у елементу могу бити скаларне, векторске или тензорске величине.

Карактеристике појединачних елемената одређују се независно од мрежних елемената као целине. Матрица крутости се формира аутономно за поједине елементе, а потом на основу њих, формира се матрица за систем у целини. С обзиром на то да је геометрија елемената по правилу једноставна, практично значи да се комплексни проблем развија на низ једноставних. Последња три корака, иако су за практичне рачуне од великог значаја, данас спадају у оквир рутинског посла, прилагођеног аутоматском раду рачунара, [21].

5.1.3 Општа теорија МКЕ

Основни принцип на коме се заснива МКЕ, састоји се у подели разматраног подручја на коначан број мањих подручја, односно елемената, тако да се анализом појединачних елемената, уз претпоставку њихове међусобне повезаности, анализира целина. Овај приступ у анализи, где се од посебног иде ка општем, од индивидуалног ка универзалном, у коме се анализом делова закључује о целини, је познат индуктивни приступ који се примењује на многим подручјима науке. Код инжењерских и других проблема код којих се општа решења не могу добити у затвореном облику, индуктивни приступ је од посебног значаја.

У оквиру МКЕ, разматрано подручје замењује се великим бројем малих делова коначних димензија, који су међусобно повезани одређеним бројем тачака. На овај начин, област са бесконачно много степени слободе, замењује се дискретним системом са коначним бројем степени слободе и анализира се методама дискретне анализе. У математичкој формулацији, ово значи да се разматрани проблем преводи из области анализе у област алгебре. Метода коначних елемената се може схватити као метод нумеричке анализе у оквиру које се дефинише начин превођења континуираних физичких система у

дискретне, односно начина формирања система алгебарских једначина којим се апроксимира одређени контурни задатак.

Основна идеја анализе методом коначних елемената је моделирање проблема подразумевајући да је просторни домен проблема подељен - дискретизован на поддомене на којима се примењују општа знања и искуства из механике континуума и нумеричке математике. Поддомени о којима је реч терминологички означени су као коначни елементи. Анализа система спрегнутих коначних елемената, добијених дискретизацијом континуума, омогућава нумеричку симулацију одзива континуума на задате иницијативе. Физичке величине које су обухваћене моделом добијају се у дискретном облику, тј. у тачкама које произилазе из дискретизације. Ове тачке се зову чворне тачке, или једноставно чворови. Најчешће коришћени коначни елементи су 2D и 3D коначни елементи континуума. Моделирањем реалног објекта помоћу ових елемената, затим дефинисање ограничења и оптерећења, као и свих потребних механичких особина материјала од кога су сачињени, и коначно решавањем проблема нумеричким методама, доводи до жељених резултата. Да би се дошло до конкретних вредности за чворове, односно да се они правилно дефинишу у простору, као и да се одреде сва ограничења и оптерећења, потребно је поседовати софтверски пакет који се базира на визуелном приступу, [21].

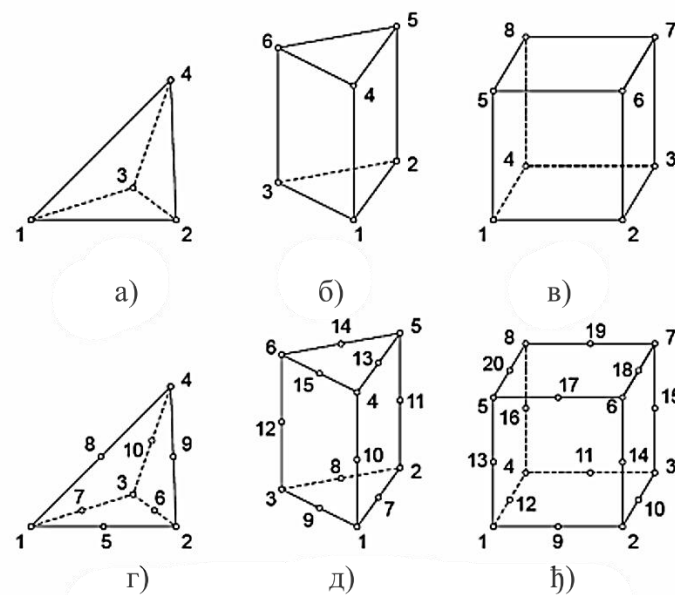
5.1.4 Типови елемената

Тродимензионални елементи

Ови коначни елементи се користе за моделирање тродимензионалних тела општег облика (3D континуума). Елемент може имати различит број чворова - обично је број од 8 до 21. Овакав елемент се назива основним и ограничен је са шест површина. Од оваквог елемента се могу формирати и други просторни облици, као што су призма, тетраедар или четворострана пирамида. Овакви елементи настали поклапањем неких основних елемента називају се дегенерисани 3D елементи. У актуелној верзији програма подржани су следећи елементи:

1. тетраедар,
2. тетраедар са међучворовима,
3. призма,
4. призма са међучворовима,
5. основни 3D елемент и
6. основни 3D елемент са међучворовима.

На 5.1 дат је приказ ових елемената и начин на који се дефинишу уз помоћ чворова (елементи са међучворовима, у општем случају имају криволинијске ивице).



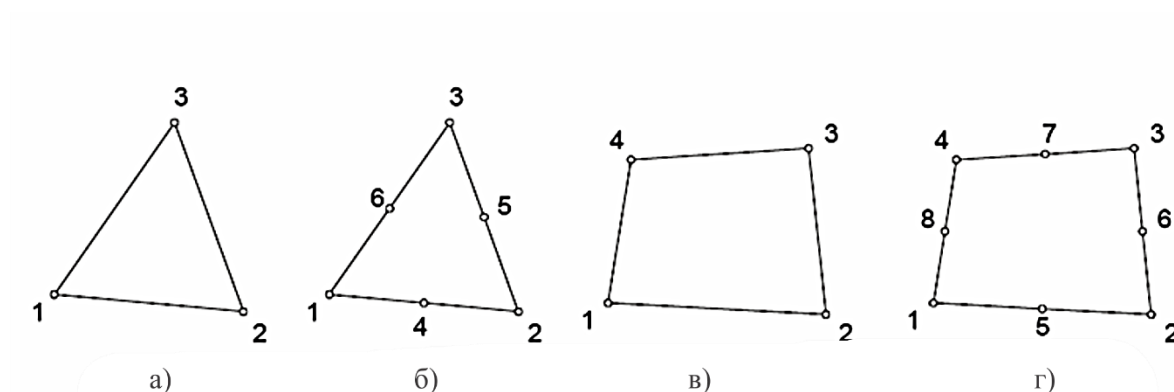
Слика 5.1 - Типови тродимензионалних елемената - (а) тетраедар, (б) призма, (в) основни 3D елемент, (г) тетраедар са међучворовима, (д) призма са међучворовима, (ђ) основни 3D елемент, [22]

Дводимензионални елементи

У случају 2D елемената, као и код 3D елемената, постоји више врста, тако да они чине фамилију 2D коначних елемената за моделирање континуума. Програмом су подржани следећи 2D елементи, [22]:

1. троугао,
2. троугао са међучворовима,
3. четвороугао и
4. четвороугао са међучворовима.

На слици 5.2 дат је приказ ових елемената и начин на који се дефинишу уз помоћ чворова.



Слика 5.2 - Типови дводимензионалних елемената - (а) троугао, (б) троугао са међучворовима, (в) четвороугао, (г) четвороугао са међучворовима, [22]

5.1.5 Типови оптерећења

У решавању реалних проблема, може се срести више врста оптерећења. Оптерећења представљају побуду физичког система, а у инжењерским проблемима су то углавном силе, моменти, притисак и сл. Оптерећења која се најчешће могу срести у МКЕ могу се поделити у три групе:

1. Глобална оптерећења:

- а) убрзање,
- б) брзина и
- в) температура.

2. Оптерећења у чворовима:

- а) сила / момент,
- б) померање,
- в) брзина,
- г) температура,
- д) извор топлоте (топлотна енергија / јединична запремине) и
- ђ) топлотни флуks (топлотна енергија / јединична површине).

3. Оптерећења по елементима:

- а) континуално,
- б) притисак,
- в) температура,
- г) извор топлоте (топлотна енергија / јединична запремине),
- д) топлотни флуks (топлотна енергија / јединична површине),
- ђ) конвекција и
- е) радијација.

Све три врсте оптерећења се користе за:

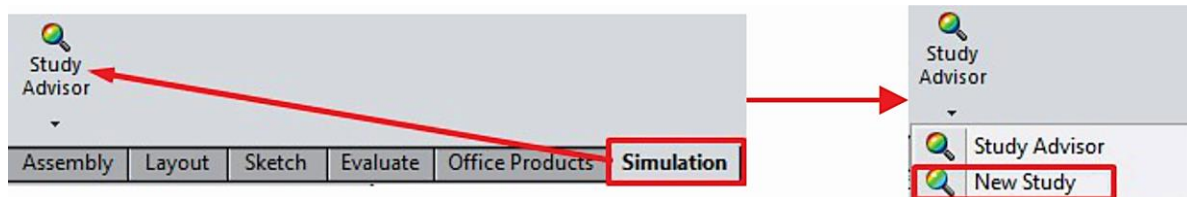
- статичке / стационарне,
- материјалне и
- динамичке / нестационарне анализе.

Глобална оптерећења се примењују на читаво тело, и из тог разлога се за један скуп оптерећења дефинишу само једном. Оваква оптерећења се најчешће користе да симулирају утицај гравитације, или да дефинишу температуру околине и тела за термичка прорачунавања. Оптерећења у чворовима и оптерећења по елементима су углавном силе, моменти, притисак, итд. [23]

5.2 Анализа зупчастих парова

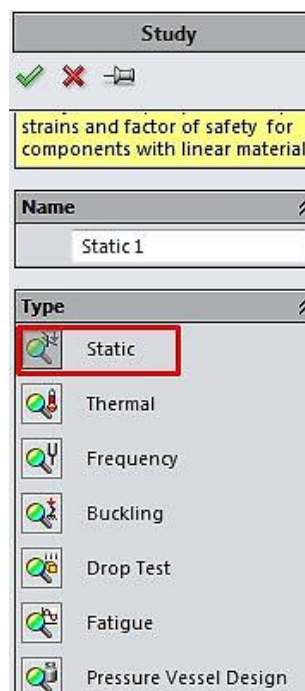
Метода коначних елемената за изабране зупчaste парове урађена је у софтверском пакету *SolidWorks 2014*. Извршена статичка анализа подразумева одређивање напона, деформација, померања и степена сигурности.

Након покретања програма и отварања жељеног зупчастог пара, из картице *Simulation* потребно је изабрати *Study Advisor*, а затим из падајућег менија одабрати *New Study* (слика 5.3).



Слика 5.3 - Покретање нове симулације

Потом, *SolidWorks 2014* нуди избор различитих врста анализа, од којих се бира статичка. Изглед прозора дат је на слици 5.4



Слика 5.4 - Прозор за избор типа анализе

Напонска анализа представља математичку идентификацију одређеног физичког система који се састоји од:

- модела дела или склопа,
- карактеристика материјала,
- граничних услова (оптерећења, ослонаца), контактних услова, параметара мреже,
- решења проблема и
- анализе резултата.

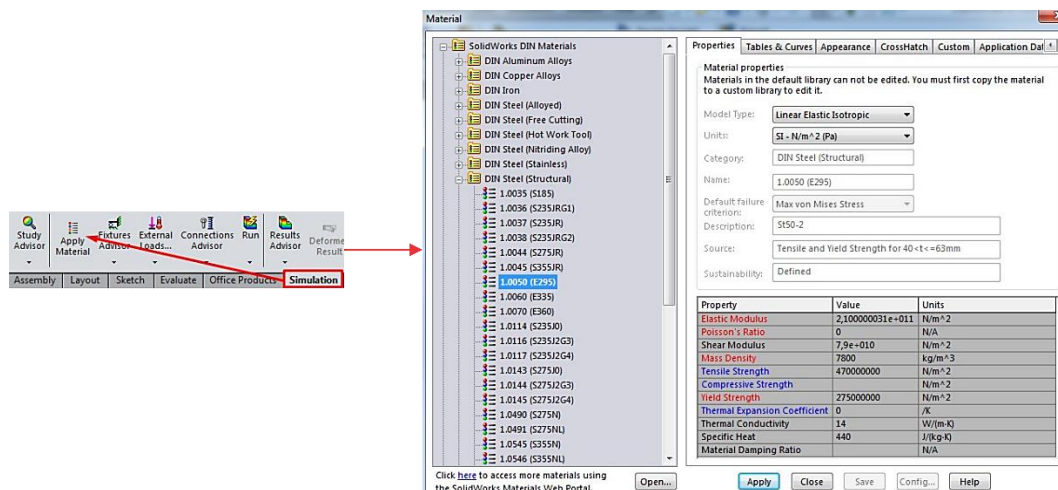
Што су карактеристике материјала, гранични и контактни услови модела ближи реалном физичком моделу, резултати ће бити тачнији.

Модел је потребно припремити за анализу. Да би се извршила анализа напонско-деформационог стања, неопходно је дефинисати:

- материјал,
- оптерећења,
- граничне услове,
- услове контакта (ако постоје),
- параметре мреже коначних елемената,
- додати ограничења,
- додати оптерећења,
- дефинисати контактне услове (ако постоје),
- дефинисати мрежу коначних елемената,
- стартовати симулацију и
- погледати резултате.

5.2.1 Дефинисање материјала

Први корак јесте дефинисање и задавање материјала. Из картице *Simulation* сада је потребно изабрати картицу *Apply Material*, где се отвара нов прозор у коме *SolidWorks* нуди већ постојеће материјале, али и могућност дефинисања нових (слика 5.5).



Слика 5.5 - Прозор за избор и дефинисање материјала

За потребе рада и анализе зупчастих парова, у *SolidWorks*-у су креирани нови материјали које он у својој листи не нуди. Као нови материјали изабрани су челик, Al/SiC, Al/Al₂O₃ и кевлар из групе композита, као и најлон и ацетал из групе полимера. Њихове најзначајније механичке карактеристике дате су у табели 5.1. Ови материјали су изабрани због својих различитих карактеристика, а самим тим узрокују и различите вредности напона и деформација. Применом композитних и полимерних материјала

постиже се мања маса конструкције, већа отпорност на корозију што директно доводи до дужег века трајања, олакшава се начин израде.

Табела 5.1: Механичке карактеристике материјала

Материјал	Јангов модул, E	Поасонов коефицијент, ν	Густина, ρ	Затезна чврстоћа, R_e	Граница течења, R_m
Č0545 (E295)	210 GPa	0,28	7800 kg/m ³	470 MPa	275 MPa
Al/SiC	150 GPa	0,27	2989,43 kg/m ³	600 MPa	150 MPa
Al/Al ₂ O ₃	370 GPa	0,22	3958,23 kg/m ³	299,9 MPa	200 MPa
Nylon 6 - PA 6	2,75 GPa	0,41	1098,89 kg/m ³	100 MPa	110 MPa
Кевлар 149	100 GPa	0,35	1439,36 kg/m ³	3000 MPa	900 MPa
Acetal Polyoxymethylene Copolymer	3 GPa	0,21	1140 kg/m ³	65,6 MPa	73 MPa

Č0545 (E295) спада у групу конструкционих челика који се користе за машиноградњу. Служе за израду вратила, осовина, зупчаника, клинова. Иако имају виши садржај угљеника, нису намењени за каљење (Č0545 садржи 0,3% C). Зупчаници од конструкционих челика се примењују код пумпи за гориво, зупчастих пумпи, мењача, [24].

Al/SiC је композит који се састоји од алуминијумске матрице и силицијум-карбида као ојачивача, који је јефтин материјал са високим модулом еластичности. Употреба овог композита стално се повећава у последњих неколико година због својих јединствених особина, као што су мала тежина, висока чврстоћа, висок специфични модул, висока заморна чврстоћа, велика тврдоћа и ниска густина. Al/SiC се производи помоћу машине за центрифугално ливење, [25].

Al/Al₂O₃ је композит настао додавањем кристалих нано честица Al₂O₃ у алуминијумску матрицу. Предности су мала маса, одлично механичко пригушење, висока чврстоћа. Користи се за делове полупроводничке опреме, делове екрана, прецизне делове код работа, [26].

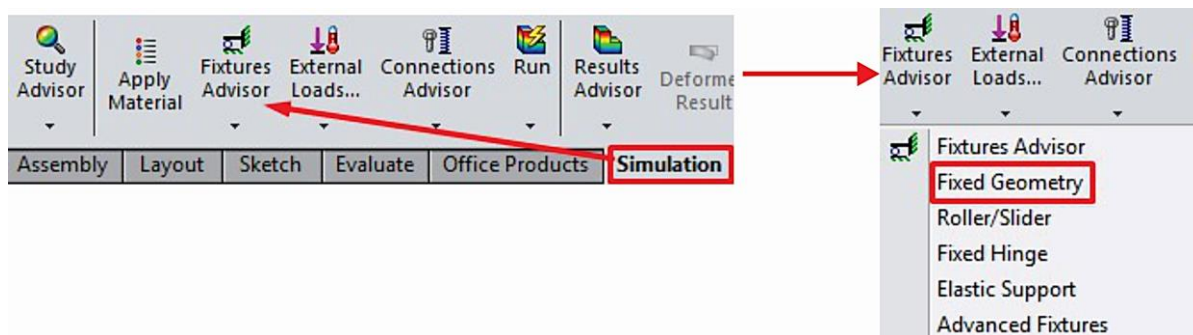
Nylon 6 - PA 6 је један од најсвестранијих инжењерских термопластика. Због одличне равнотеже чврстоће, дуктилности и отпорности на топлоту, овај најлон је изузетан кандидат за замену метала. Веома је једноставан за обраду што омогућава широку примену. Користи се за израду зупчаника, лежајева, матица и вијака, кућишта електричних алата, резервоара за гориво за аутомобиле, кухињског прибора. Зупчаници од најлона се користе у областима у којима су веће снаге и обртни моменти. Типична примена је код транспортних система, опрема за паковање. Такође, ови зупчаници се користе како би смањили буку и вибрације, [27].

Кевлар 149 је друго име арамидних (поли-пара-фенилен терефталамида) влакана. Кевлар влакна су оригинално развијена као замена челика у аутомобилским гумама. Кевлар има широку примену, од бициклистичких гума до заштитних прслука, због високог односа чврстоће и тежине је до 5 пута јачи од челика. Неке од најзначајнијих карактеристика су висока затезна чврстоћа, висок модул еластичности, мала тежина, висока хемијска инертност, висока отпорност на резање, отпорност на пламен, [28].

Acetal Polyoxymethylene Copolymer - POM је термопластични материјал познат и као ацетал. То је молекул који садржи функционалну групу угљеника везану за две ОР групе. Полиацетали имају механичка својства слична најлону. Оне су међу најјачим и најтежим термопластима. Постоје два типа полиацетала који се лако користи у бризгањухомополимер и кополимер. Оба типа имају следећа својства: одлична чврстоћа, ударна жилавост, отпорност на хабање, отпорност на лупање и отпорност на растварање, мали коефицијент трења. Зупчаници од ацетала се користе код већине предмета за кућну употребу, као што су апарати за лед, штампачи, електрични алати, [29.]

5.2.2 Дефинисање ограничења

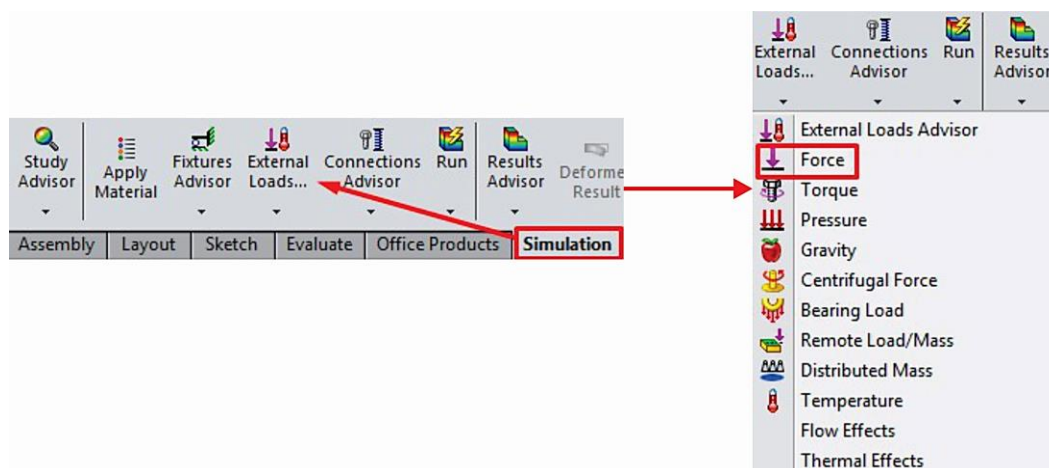
Након избора одговарајућег материјала, приступа се дефинисању ограничења (слика 5.6). Задавање ограничења је од изузетне важности за креирање симулације и има веома велики утицај на резултате. Неопходно је да задата ограничења у највећој могућој мери одговарају реалним ограничењима физичког модела. Из картице *Simulation* бира се *Fixed Advisor*, а потом из падајућег менија *SolidWorks* нуди различите типове ограничења. За потребе ове анализе изабрана је опција *Fixed Geometry* којом су фиксирани отвори за вратило оба зупчаника.



Слика 5.6 - Прозор за задавање ограничења

5.2.3 Дефинисање оптерећења

Постоје различите врсте оптерећења. Неопходно је да задата оптерећења у највећој могућој мери одговарају реалним оптерећењима физичког модела. Из картице *Simulation* бира се *External Loads*, а потом из падајућег менија *SolidWorks* нуди различите типове оптерећења као што су силе, моменти, притисак, гравитациона сила (слика 5.7).



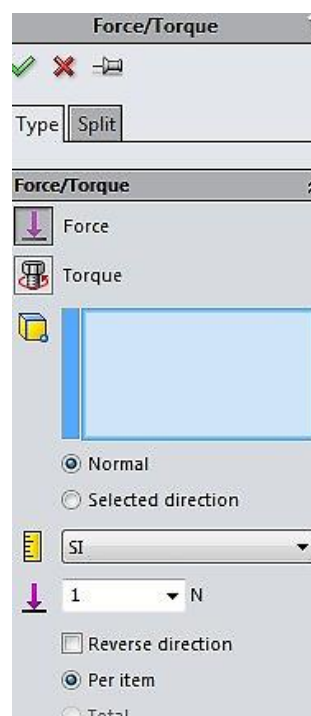
Слика 5.7 - Прозор за задавање оптерећења

Силе које оптерећују изабране зупчасте парове добијене су прорачуном у софтверском пакету *Autodesk Inventor 2016* и њихове вредности дате су у табели 5.2. Силе оптерећења су заправо тангенцијалне и радијалне силе које се јављају у тачки спрезања зупчаника.

Табела 5.2: Силе зупчастих парова

Зупчасти пар	F_t	F_r
Централни зупчаник e - сателит f	603,993 N	219,835 N
Централни зупчаник b -сателит f	591,791 N	215,394N

На слици 5.8 је приказан прозор у коме се бира површина на којој сила делује, затим се уноси вредност и одређује правац деловања.

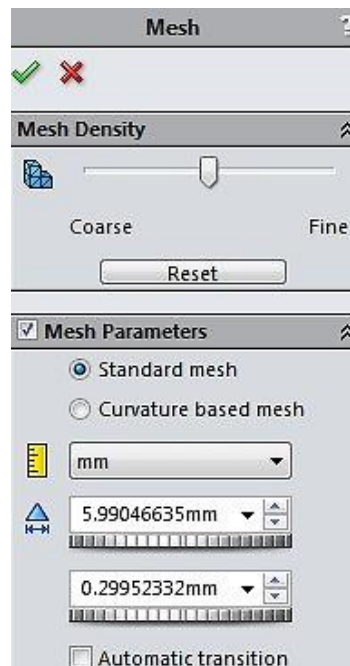


Слика 5.8 - Прозор за задавање силе

Након избора материјала и дефинисања ограничења и оптерећења, присупа се генерисању мреже коначних елемената.

5.2.4 Генерисање мреже коначних елемената

Генерисање мреже је последњи корак пред покретање симулације. Из стабла, десним кликом на *Mesh* бира се опција *Create Mesh*, након чега се отвара дијалог приказан на слици 5.9. *SolidWorks* нуди могућност бирања величине коначног елемента, при чему корисник сам уноси вредност.



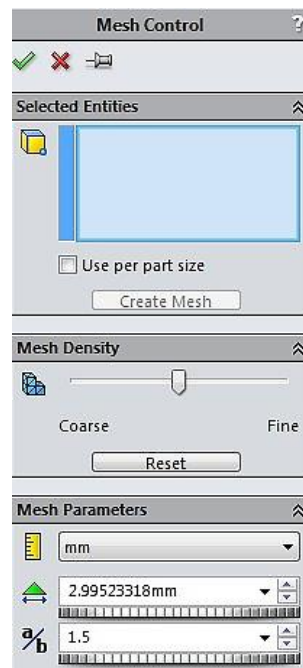
Слика 5.9 - Дијалог за генерисање мреже

Након креирања мреже, у картици *Details* налазе се параметри везани за мрежу, од којих су најважнији број коначних елемената, величина коначног елемента и број чворова. Вредности ових параметара су дате у табели 5.3.

Табела 5.3: Параметри мреже

Зупчасти пар	Величина коначног елемента	Број коначних елемената	Број чворова
Централни зупчаник e -сателит f	6,322	16213	28261
Централни зупчаник b -сателит f	7,087	29776	52297

SolidWorks даје могућност уситњавања мреже на одређеним, жељеним местима на моделу. Из стабла, десним кликом на *Mesh* бира се опција *Apply Mesh Control* након чега се отвора дијалог у коме се бира површина која ће бити уситњена, а потом се и уноси величина коначног елемента (слика 5.10).



Слика 5.10 - Дијалог за уситњавање мреже

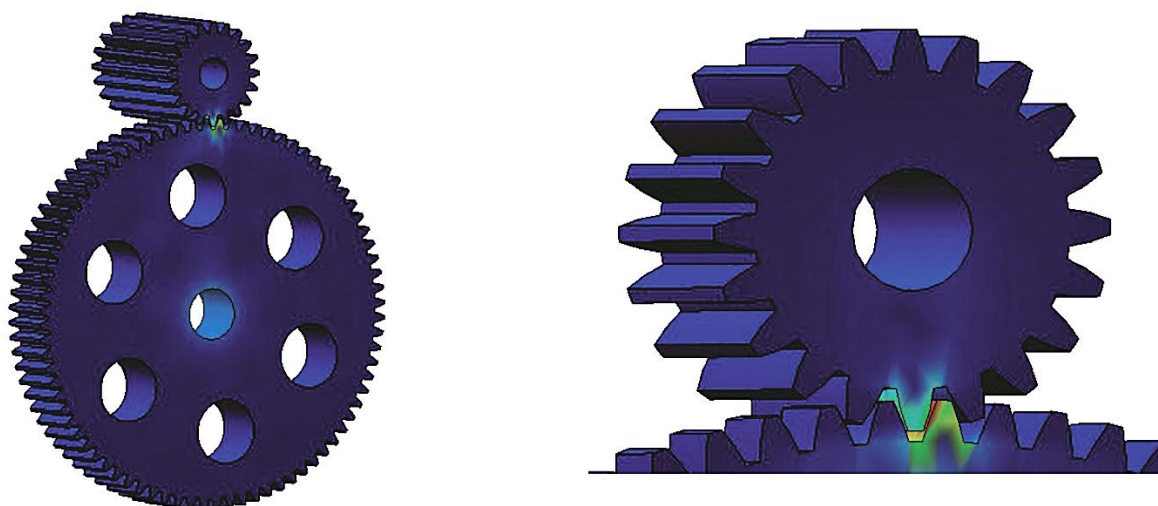
Последњи корак јесте покретање симулације кликом на иконицу , након чега програм даје резултате анализе.

Применом методе коначних елемената симулирају се стварна ограничења и оптерећења и самим тим се уочавају проблеми у фази развоја конструкције који би јој могли нашкодити. Прикупљају се подаци који омогућавају корекцију конструктивних решења, односно еволуцију постојећих и усавршавање новоразвијених конструкција.

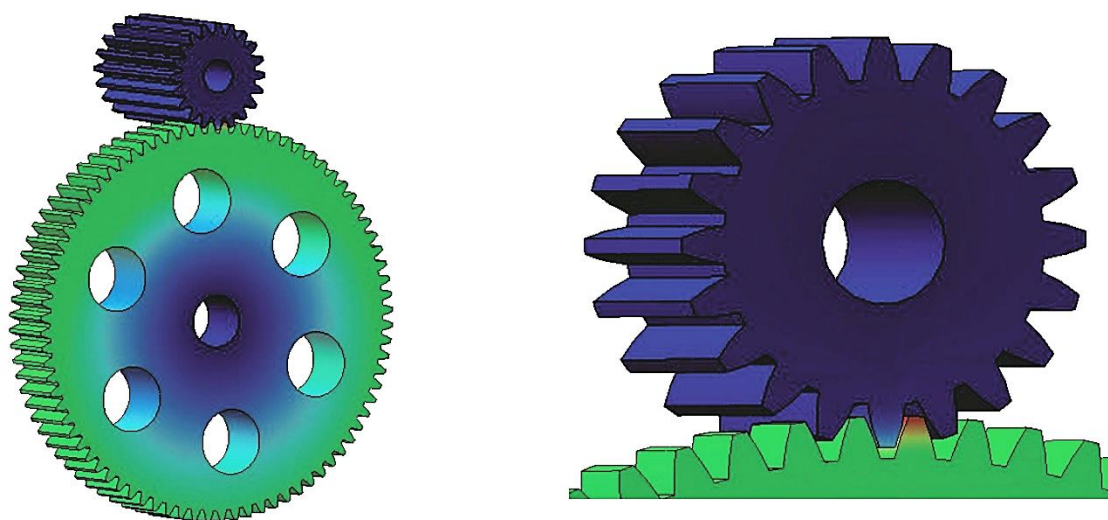
6. Резултати анализе

Након завршене симулације, добија се графички приказ модела са *Von Mises*-овим напонима и померањима. Зоне са највећим напоном су обележене црвеном бојом, док су оне са најмањим напоном обележене плавом бојом.

На сликама 6.1 и 6.2 приказан је зупчасти пар централни зупчаник (сунце) *e*-сателит *f* израђен од челика Č0545 и након симулације може се уочити да је место максималног деловања напона и максималног померања заправо место контакта два зупца.

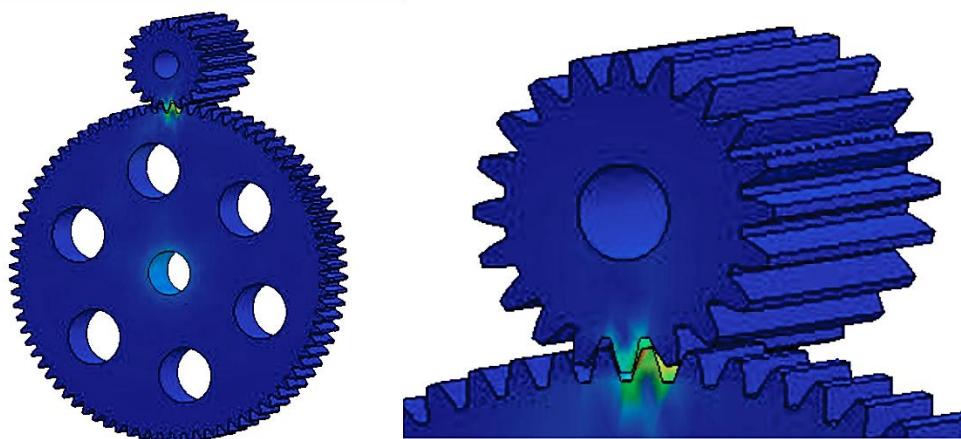


Слика 6.1 - Изглед зупчастог пара израђеног од челика након анализе и место деловања максималног напона

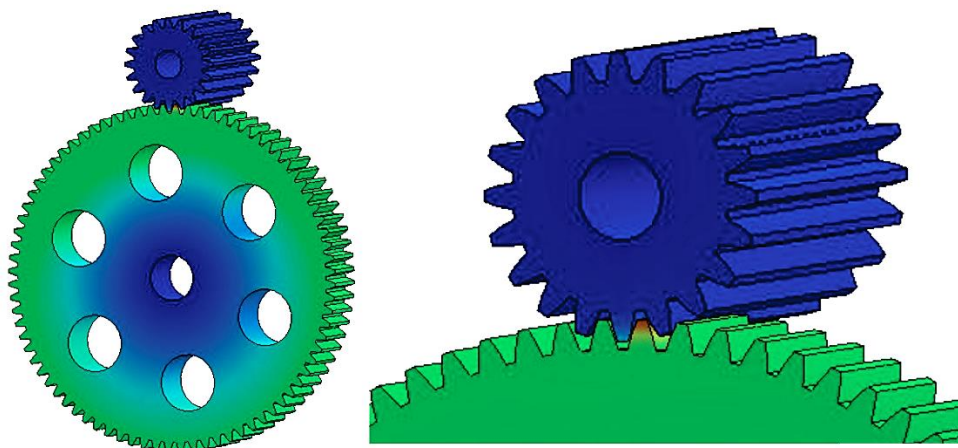


Слика 6.2 - Изглед зупчастог пара израђеног од челика након анализе и место максималног померања

На сликама 6.3 и 6.4 приказан је изглед зупчастог пара централни зупчаник (сунце) *e*-сателит *f*, израђеног од композита Al/SiC, након симулације.

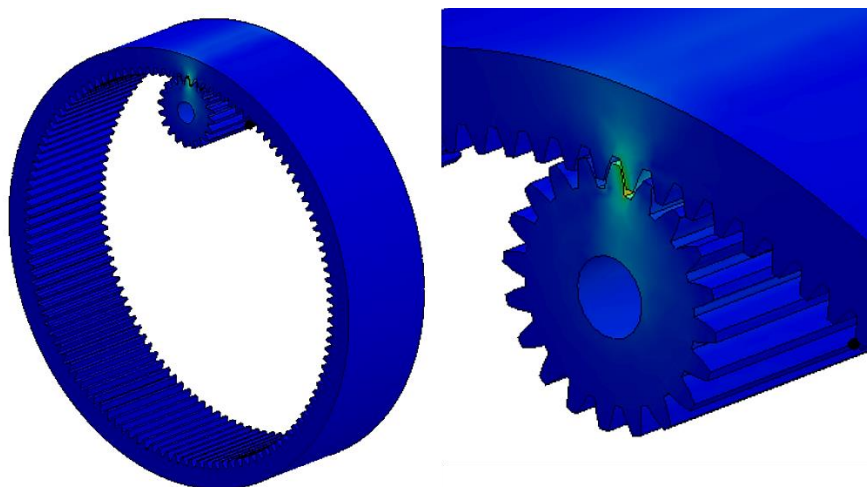


Слика 6.3 - Изглед зупчастог пара израђеног од композитног материјала Al/SiC након анализе и место деловања максималног напона

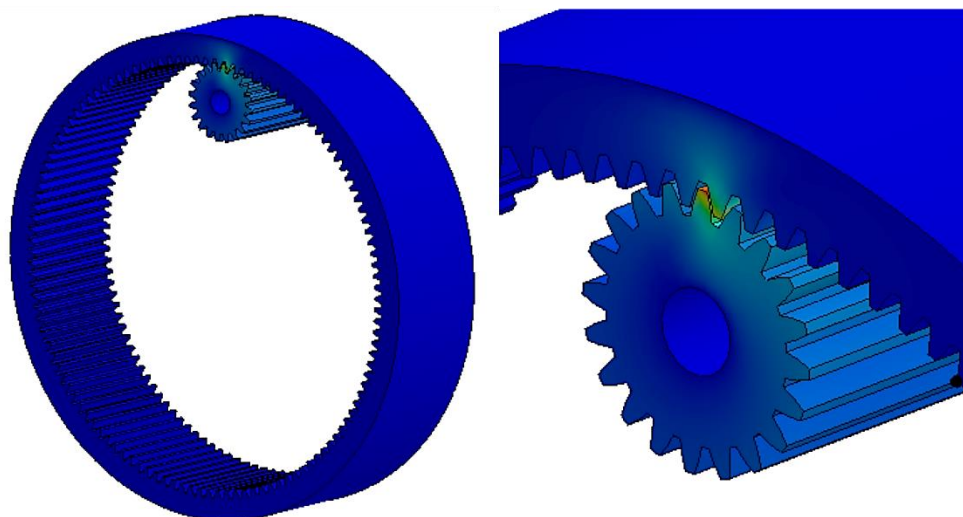


Слика 6.4 - Изглед зупчастог пара израђеног од композитног материјала Al/SiC након анализе и место максималног померања

На сликама 6.5 и 6.5 приказан је изглед зупчастог пара централни зупчаник (сунце) b -сателит f , израђеног од полимерног материјала (ацетала), након симулације.



Слика 6.5 - Изглед зупчастог пара израђеног од ацетала након анализе и место деловања максималног напона



Слика 6.6 - Изглед зупчастог пара израђеног од ацетала након анализе и место максималног померања

У табелама 6.1 и 6.2 дате су вредности *Von Mises*-овог напона и померања добијене након симулације за зупчasti пар централни зупчаник (сунце) *e*-сателит *f*. За различите материјале и ове вредности се разликују.

Табела 6.1 - *Von Mises*-ови напони за зупчasti пар са спољашњим озубљењем *e-f*

Материјал	F	2F	3F	5F
Č0545	50,607 MPa	101,231 MPa	151,871 MPa	253,2 MPa
Al/SiC	49,609 MPa	99,245 MPa	148,908 MPa	248,313 MPa
Al/Al ₂ O ₃	49,608 MPa	99,243 MPa	148,904 MPa	248,298 MPa
Nylon	47,994 MPa	96,712 MPa	146,016 MPa	245,076 MPa
Кевлар 149	48,181 MPa	96,389 MPa	144,622 MPa	241,163 MPa
Acetal Polyoxymethylene Copolymer	52,504 MPa	106,096 MPa	160,539 MPa	270,571 MPa

Табела 6.2 - Померања за зупчasti пар са спољашњим озубљењем *e-f*

Материјал	F	2F	3F	5F
Č0545	0,004621 mm	0,009242 mm	0,01386 mm	0,02311 mm
Al/SiC	0,008822 mm	0,01765 mm	0,02647 mm	0,04414 mm
Al/Al ₂ O ₃	0,008483 mm	0,01697 mm	0,02546 mm	0,04244 mm
Nylon	0,3526 mm	0,7080 mm	1,066 mm	1,789 mm
Кевлар 149	0,009686 mm	0,01938 mm	0,02907 mm	0,04846 mm
Acetal Polyoxymethylene Copolymer	0,003228 mm	0,6489 mm	0,9775 mm	1,642 mm

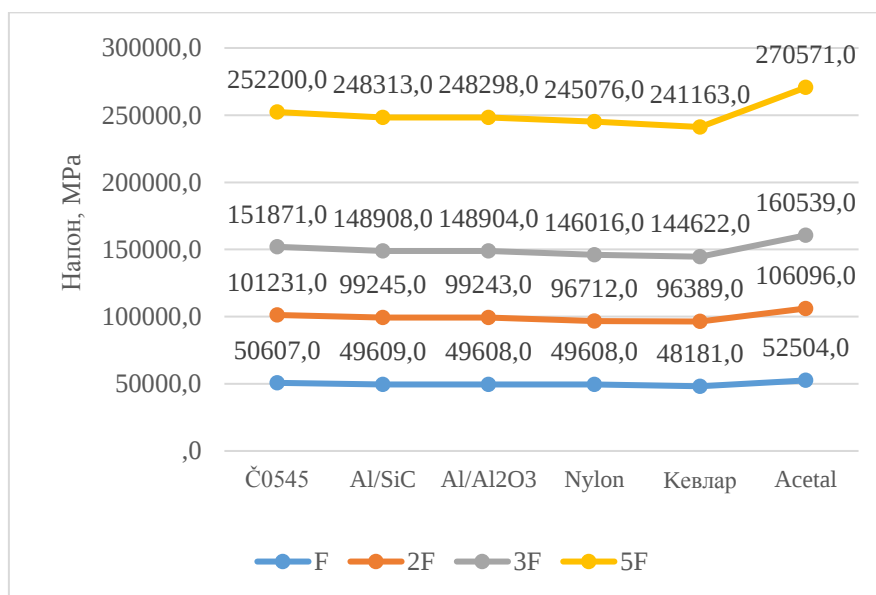
Услед грешака монтаже, израде, саосности, у једном тренутку, централни зупчаник улази у спрежу само са једним сателитом који трпи целокупно оптерећење. Након тог тренутка, централни зупчанике се спреже и са осталим сателитима и оптерећење се равномерно распоређује. За потребе анализе, силе које делује на зупчанике увећане су 2,3 и 5 пута у зависности од броја сателита. Из табела се може закључити да како се мењају силе, тако се мењају и вредности напона и померања.

При деловању почетног оптерећења најмањи напон се јавља код најлона, а највећи има ацетал. Што се тиче померања, закључује се да су изузетно мала код свих материјала. Најмање померање има зупчасти пар израђен од кевлара, а највеће зупчасти пар од најлона.

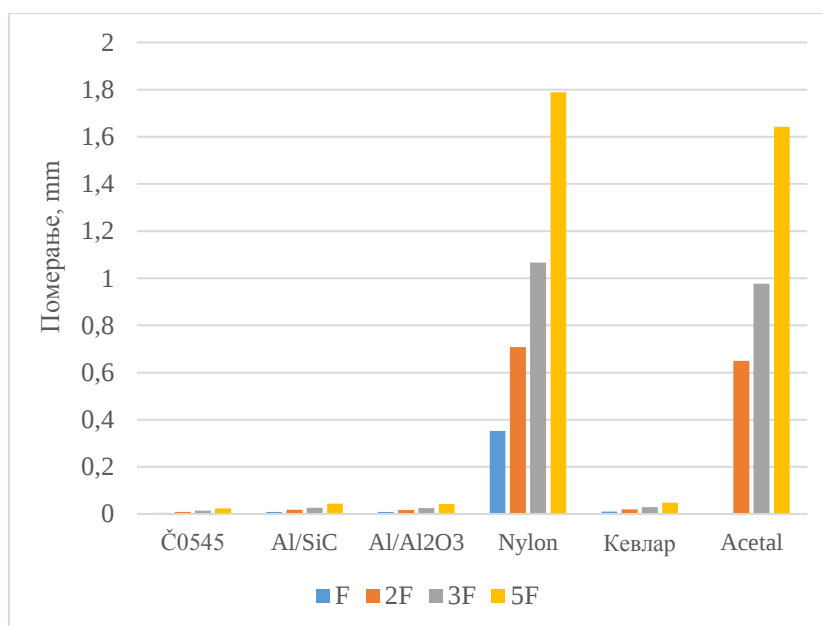
Примена композита са металном основом уместо челика је оправдана у случају када се тежи мањој маси конструкције. Ови материјали су способни да обезбеде већу отпорност на хабање, способни су да апсорбују буку и вибрацију, као и за рад без подмазивања. Начин израде композитних зупчаника са металном матрицом је знатно бржи и економичнији јер се израђују бризгањем у калупе, а не глодањем. Примена ових материјала је оправдана зато што цена може бити чак и за половину смањена у односу на металне зупчанике.

Примена полимерних композита је удвостручена у последњих 10 година. Главни разлог је то што су 60% лакши од челика. Предност у односу на челик је и већа отпорност на корозију и хабање. Погодни су за рад при мањим оптерећењима и температурама.

На дијаграмима 6.1 и 6.2 графички је приказано како се мењају напони и померања у зависности од коришћеног материјала и величине сила које делује на зупчанике.



Дијаграм 6.1 - Графички приказ промене напона зупчастог пара са спољашњим озубљењем e-f



Дијаграм 6.2 - Хистограмски приказ промене померања зупчастог пара са спољашњим озубљењем *e-f*

Као и код зупчастог пара *e-f* и за зупчasti пар са унутрашњим озубљењем централни зупчаник *b*-сателит *f* вршено је повећање силе која оптерећује зупчанике. Добијене вредности дате су у табелама 6.3 и 6.4.

Табела 6.3 - Von Misses-ови напони за зупчasti пар са унутрашњим озубљењем *b-f*

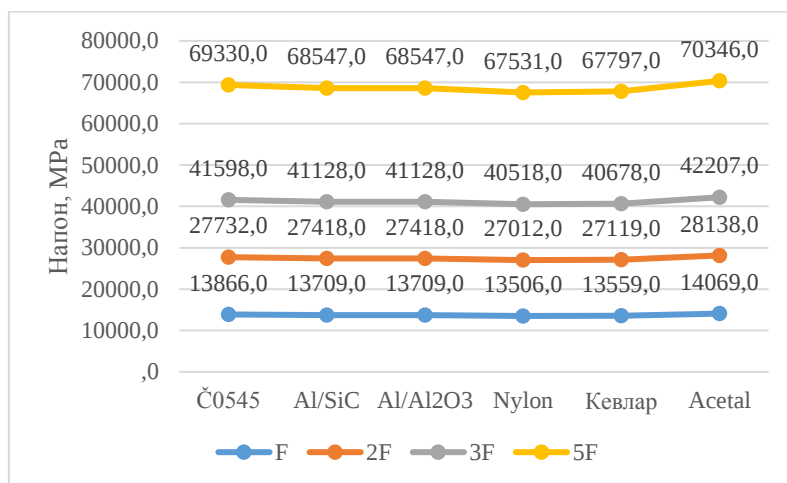
Материјал	F	2F	3F	5F
Č0545	13,866 MPa	27,732 MPa	41,598 MPa	69,330 MPa
Al/SiC	13,709 MPa	27,418 MPa	41,128 MPa	68,547 MPa
Al/Al ₂ O ₃	13,709 MPa	27,418 MPa	41,128 MPa	68,547 MPa
Nylon	13,506 MPa	27,012 MPa	40,518 MPa	67,531 MPa
Кевлар 149	13,559 MPa	27,119 MPa	40,678 MPa	67,797 MPa
Acetal Polyoxymethylene Copolymer	14,069 MPa	28,138 MPa	42,207 MPa	70,346 MPa

Табела 6.4 - Померања за зупчasti пар са унутрашњим озубљењем *b-f*

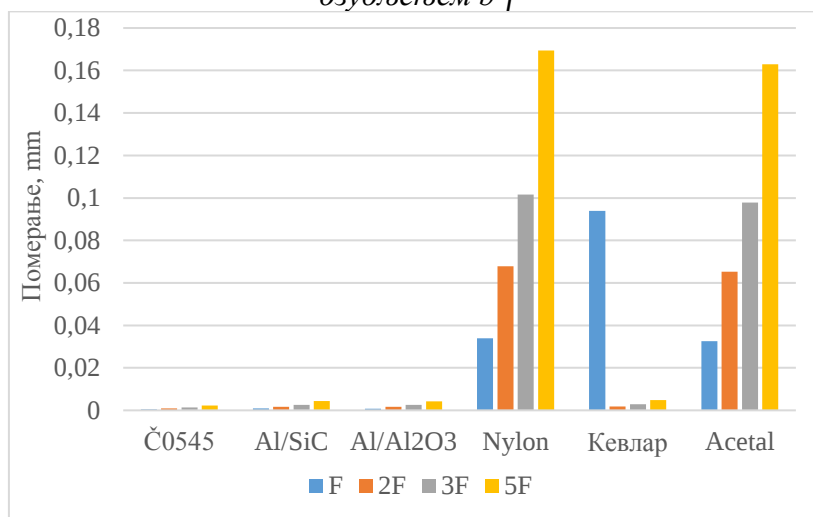
Материјал	F	2F	3F	5F
Č0545	0,0004613 mm	0,0009225 mm	0,001384 mm	0,002306 mm
Al/SiC	0,0008680 mm	0,001736 mm	0,002604 mm	0,004340 mm
Al/Al ₂ O ₃	0,0008347 mm	0,001669 mm	0,002504 mm	0,004173 mm
Nylon	0,03388 mm	0,06776 mm	0,1016 mm	0,1694 mm
Кевлар 149	0,09387 mm	0,001877 mm	0,002816 mm	0,004693 mm
Acetal Polyoxymethylene Copolymer	0,03260 mm	0,06521 mm	0,09781 mm	0,1630 mm

Највећи напон за зупчasti пар са унутрашњим озубљењем се јавља код ацетала, док је најмањи код најлона (табела 6.3) и може се закључити да се идентично јавља и код зупчастог пара са спољашњим озубљењем. Из табеле 6.4 се закључује да је максимално померање код најлона, а минимално код челика.

На дијаграмима 6.3 и 6.4 графички је приказано како се мењају напони и померања у зависности од коришћеног материјала и величине силе која делује на зупчанике.



Дијаграм 6.3 - Графички приказ промене напона за зупчasti пар са унутрашњим озубљењем b-f



Дијаграм 6.4 - Хистограмски приказ промене померања за зупчasti пар са унутрашњим озубљењем b-f

Како би се добили што прецизнији и тачнији резултати, приступљено је локалном уситњавању мреже. Промена величине коначних елемената урађена је на месту контакта зупчаника у спрези. Вредности напона и померања након уситњавања мреже дате су у табелама 6.5, 6.6, 6.7 и 6.8.

Табела 6.5 – Von Misses-ови напони за зупчasti пар са спољашњим озубљењем e-f приликом уситњавања мреже

Материјал	0,25 mm	0,5 mm	1 mm
Č0545 (E295)	100,532 MPa	80,308 MPa	68,220 MPa
Al/SiC	99,359 MPa	78,340 MPa	67,153 MPa
Al/Al ₂ O ₃	99,357 MPa	78,355 MPa	67,152 MPa
Nylon 6 - PA 6	99,841 MPa	77,639 MPa	66,143 MPa
Кевлар 149	98,536 MPa	76,859 MPa	65,844 MPa
Acetal Polyoxymethylene Copolymer	105,780 MPa	84,414 MPa	70,874 MPa

Табела 6.6 - Померања за зупчasti пар са спољашњим озубљењем $e-f$ приликом уситњавања мреже

Материјал	0,25 mm	0,5 mm	1 mm
Č0545 (E295)	0,004856 mm	0,004826 mm	0,004819 mm
Al/SiC	0,009295 mm	0,009236 mm	0,009221 mm
Al/Al ₂ O ₃	0,008938 mm	0,008882 mm	0,008866 mm
Nylon 6 - PA 6	0,3749 mm	0,3726 mm	0,3715 mm
Кевлар 149	0,01026 mm	0,01020 mm	0,01017 mm
Acetal Polyoxymethylene Copolymer	0,3391 mm	0,3369 mm	0,3364 mm

Табела 6.7 - Von Misses-ови напони за зупчasti пар са унутрашњим озубљењем $b-f$ приликом уситњавања мреже

Материјал	0,25 mm	0,5 mm	1 mm
Č0545 (E295)	28,764 MPa	23,143 MPa	18,482 MPa
Al/SiC	27,517 MPa	22,489 MPa	18,126 MPa
Al/Al ₂ O ₃	27,517 MPa	22,489 MPa	18,126 MPa
Nylon 6 - PA 6	25,489 MPa	21,522 MPa	17,758 MPa
Кевлар 149	26,008 MPa	21,758 MPa	17,822 MPa
Acetal Polyoxymethylene Copolymer	30,508 MPa	24,122 MPa	19,089 MPa

Табела 6.8 - Померања за зупчasti пар са унутрашњим озубљењем $b-f$ приликом уситњавања мреже

Материјал	0,25 mm	0,5 mm	1 mm
Č0545 (E295)	0,0004961 mm	0,0004971 mm	0,0004955 mm
Al/SiC	0,0009424 mm	0,0009400 mm	0,0009394 mm
Al/Al ₂ O ₃	0,0009062 mm	0,0009039 mm	0,0009033 mm
Nylon 6 - PA 6	0,03732 mm	0,03722 mm	0,03715 mm
Кевлар 149	0,001030 mm	0,001027 mm	0,001026 mm
Acetal Polyoxymethylene Copolymer	0,03494 mm	0,03490 mm	0,03483 mm

Изабране вредности за величину коначног елемента су 0,25; 0,5 и 1 mm. Из добијених резултата се може закључити да што је величина коначног елемента мања, то су напони већи. Померања за зупчasti пар са спољашњим озубљењем се смањују, док се за зупчasti пар са унутрашњим озубљењем повећавају, приликом уситњавања мреже.

Приликом уситњавања мреже, долази и до промене броја коначних елемената и броја чворова. У табелама 6.9 и 6.10 дати су бројеви коначних елемената и чворова након уситњавања мреже.

Табела 6.9 - Промена броја коначних елемената и чворова код зупчастог пара са спољашњим озубљењем $e-f$

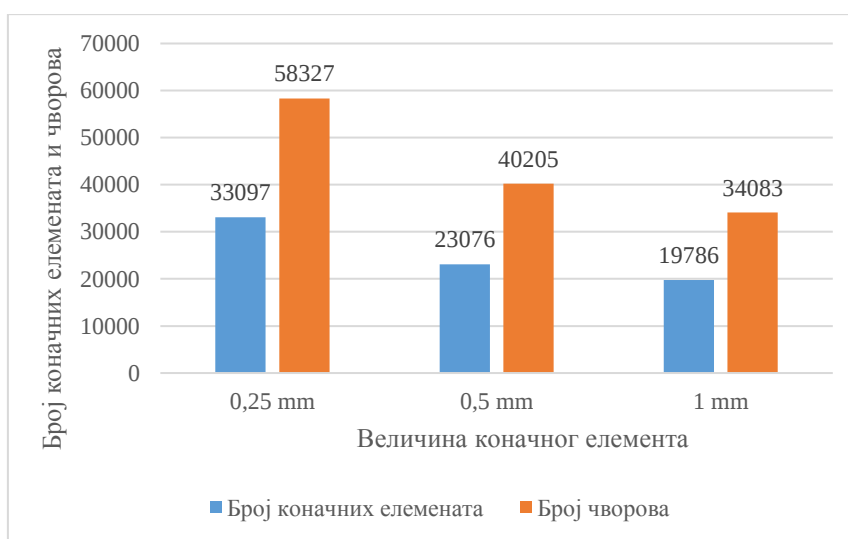
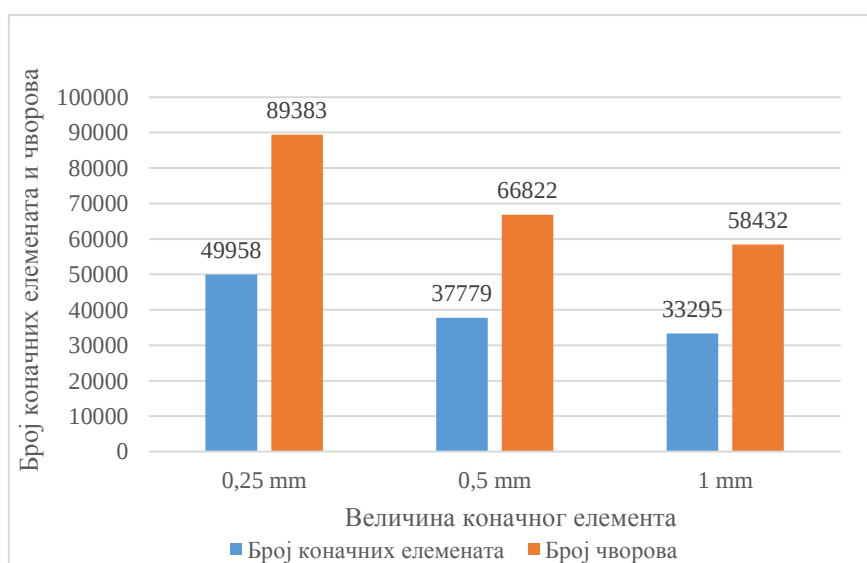
Величина коначног елемента	Број коначних елемената	Број чворова
0,25 mm	33097	58327
0,5 mm	23076	40205
1 mm	19786	34083

Табела 6.10 - Промена броја коначних елемената и чворова код зупчастог пара са унутрашњим озубљењем $b-f$

Величина коначног елемента	Број коначних елемената	Број чворова
0,25 mm	49958	89383
0,5 mm	37779	66822
1 mm	33295	58432

Из табела 6.9 и 6.10 може се закључити да што је мрежа ситнија, број коначних елемената и чворова је већи. Када је потребно добити што тачније резултате, препоручује се уситњавање одређених подручја, односно већи број коначних елемената и чворова.

На дијаграмима 6.5 и 6.6 графички је приказано како се мењају бројеви коначних елемената и чворова у зависности од величине коначног елемента.

**Дијаграм 6.5** - Хистограмски приказ промене броја коначних елемената и чворова код зупчастог пара са спољашњим озубљењем $e-f$ **Дијаграм 6.6** - Хистограмски приказ промене броја коначних елемената и чворова код зупчастог пара са унутрашњим озубљењем $b-f$

На основу извршене анализе може се закључити да на вредности напона и померања највећи утицај има задати материјал. Највеће вредности *Von Misses*-овог напона се јављају код челика, као и код ацетала. Такође, уситњавањем одређених делова зупчастих парова доприноси се тачности резултата и закључује се да што је мрежа ситнија, напони су већи. Генерисана мрежа након уситњавања садржи већи број коначних елемената и чворова.

Након методе коначних елемената вршено је и упоређивање маса зупчастих парова. У табели 6.11 дате су масе зупчастих парова у зависности од изабраног материјала.

Табела 6.11 - Маса зупчастих парова

Материјал	Зупчасти пар <i>e-f</i>	Зупчасти пар <i>b-f</i>
Č0545 (E295)	2,044 kg	2,823 kg
Al/SiC	0,307 kg	0,664 kg
Al/Al ₂ O ₃	0,359 kg	0,650 kg
Nylon 6 - PA 6	0,294 kg	0,406 kg
Кевлар 149	0,3 kg	0,61 kg
Acetal Polyoxymethylene Copolymer	0,371 kg	0,406 kg

На основу табеле се закључује да, у колико би се челични зупчасти пар *e-f* заменио композитним, маса конструкције би се смањила за око 90%, док код зупчастог пара *b-f* би се смањила приближно 70%. У случају замене челика полимером, конструкција би се олакшала око 80%. Из добијених резултата се може закључити да би челик требало замењивати композитима и полимерима у колико услови рада и област примене то дозвољавају.

7. Закључак

Савремен развој материјала обележен је применом научних приступа из различитих дисциплина, квантитативних метода и рачунара. Према неким тврдњама у последњих шездесетак година у примену је ушло толико врста материјала колико у свим претходним столећима. Процене показују да се данас располаже са 70 000 до 100 000 различитих врста материјала. Последњих десетак година као један од напредних трибоматеријала све више се користе композитни материјали због својих добрих механичких и триболошких својстава. Правилном заменом материјала са адекватним композитним материјалом, могуће је смањити триболошке губитке и на тај начин остварити уштеде.

Примена разматраних материјала за израду зупчаника је урађена како би се указало на то да ли зупчаници могу издржати оптерећење за које су намењени и да ли се може смањити маса. Челици су годинама најбројнија и најчешће коришћена група метала, али се тежи да се замене композитним и полимерним материјалима.

Методом коначних елемената утврђено је да на вредности напона и померања највећи утицај има материјал. Највеће вредности *Von Misses*-овог напона се јављају код челика и ацетала, док најмање вредности имају најлон и кевлар. Ове метода је коришћена због низа предности, као што су: непостојање ограничења у геометрији, оптерећењу, граничним условима, материјалима; комбиновање различитих типова коначних елемената; тачност решења се може повећати повећањем броја коначних елемената.

Анализом масе се дошло до резултата који показују да зупчасти пар од челика има највећу масу. У зависности од области примене и радних услова, заменом челичних зупчаника полимерним, маса би се смањила за приближно 80%, док у случају композитних зупчаника за око 70-90%. На овај начин би се конструкција знатно олакшала, а самим тим долази и до уштеде материјала, али међутим, оно што представља проблем је то што су композитни и полимерни материјали знатно скупљи од челика.

8. Литература

- [1] https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/283886/ep10-new-and-advanced-materials.pdf, приступљено 15.05.2018.
- [2] https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05355G_Sample.pdf, приступљено 15.05.2018
- [3] С.Танасијевић: Триболошки исправно конструисање, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац 2004.
- [4] http://moodle.mfkg.rs/pluginfile.php/147/mod_resource/content/0/Predavanje_1a_-_2008-9.pdf, приступљено 15.05.2018
- [5] <https://www.scribd.com/doc/49190080/metali-i-legure>, приступљено 17.05.2018.
- [6] М. Јовановић, В. Лазих, Д. Адамовић, Н. Ратковић: Машински материјали, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац 2003.
- [7] <http://www.skripta.info/wpcontent/uploads/2016/05/OPSTA-HEM.-TEH.-III-deo.pdf>, приступљено 17.05.2018.
- [8] <https://www.scribd.com/document/348760663/Keramika-i-Primjena-Keramike-Seminarski-Rad>, приступљено 19.05.2018.
- [9] http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/razvoj_mater_tehn_razvoj.pdf, приступљено 19.05.2018.
- [10] http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/dokumenti/Laboratorija_za_deformisanje/FiFSP/Knjiga%20Struktura%20i%20svoystva%20polimernih%20materijala.pdf, приступљено 19.05.2018.
- [11] З. Ђорђевић: Композитне конструкције, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац 2018.
- [12] М. Бабић, С. Митровић: Триболошке карактеристике композита на бази ZnAl легура, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац 2007.
- [13] <https://www.scribd.com/document/90373378/kompoziti-polimeri>, приступљено 21.05.2018.
- [14] https://bib.irb.hr/datoteka/901647.Tena_Juric_ZAVRSNI_RAD.pdf, приступљено 21.05.2018.
- [15] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702107700470>, приступљено 21.05.2018.
- [16] <https://www.irjet.net/archives/V3/i1/IRJET-V3I1120.pdf>, приступљено 21.05.2018.
- [17] Р. Глигорић: Машински елементи, Пољопривредни факултет, Нови Сад, 2015.
- [18] В. Николић: Машински елементи, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац 2004.
- [19] <http://www.rsisinternational.org/Issue6/42-53.pdf>, приступљено 01.06.2018.
- [20] Јурица Сорић: Метода коначних елемената, Техничка књига, Загреб, 2004.
- [21] Младен Мештровић: Метода коначних елемената, Загреб, 2018.
- [22] [ftp://nozdr.ru/biblio/kolxo3/E/EM/Doyle%20J.F.%20Modern%20experimental%20stress%20analysis%20\(Wiley,%202004\)\(435s\)_EM_.pdf](ftp://nozdr.ru/biblio/kolxo3/E/EM/Doyle%20J.F.%20Modern%20experimental%20stress%20analysis%20(Wiley,%202004)(435s)_EM_.pdf), приступљено 01.06.2018

[23]<https://www.scribd.com/document/276075781/Vstss-Osnovne-Metode-Konacnih-Elementata>, приступљено 01.06.2018

[24]<https://www.scribd.com/doc/14026883/Konstrukcioni-%C4%8Delici>, приступљено 03.06.2018.

[25]<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/161/1/012070/pdf>, приступљено 03.06.2018.

[26]https://ac.els-cdn.com/S1018363912000062/1-s2.0-S1018363912000062-main.pdf?_tid=2607dc73-7b4f-46f1-b14e7994dc811fc0&acdnat=1527172014_a63c5bc5647591a32570f355328b1910, приступљено 03.06.2018.

[27]<https://www.rtpcompany.com/products/product-guide/nylon-66-pa-polyamide-66/>, приступљено 03.06.2018.

[28]http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=kevlar_aramid_fiber_reinforced_polymers, приступљено 03.06.2018.

[29]<https://www.steinwall.com/wp-content/uploads/2016/05/Polyacetals.pdf>, приступљено 03.06.2018.