

Факултет инжењерских наука

Универзитета у Крагујевцу

Милица П. Борисављевић

Анализа напрезања опруге у CAD софтверу

мастер рад

Крагујевац, 2017.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Методе прорачуна у развоју производа

Број индекса: 358/2015

Милица П. Борисављевић

Анализа напрезања опруге у CAD софтверу

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Зорица Ђорђевић, ван. проф. - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да уради:

1. Увод,
2. Преглед литературе,
3. Особине, примена и подела опруга,
4. Материјали за израду опруга,
5. Повратна опруга пиштоља CZ 999,
6. Прорачун и моделирање опруге коришћењем програма Autodesk Inventor,
7. Анализа напрезања цилиндричне завојне опруге методом коначних елемената,
8. Закључак.

Препоручена литература:

[1] Николић В., Машински елементи, Крагујевац, 2004.

[2] Огњановић М., Машински елементи, Београд, 2016.

[3] Инжењерско машински приручник, II издање, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, 1992.

Крагујевац, 2017

ментор:

др Зорица Ђорђевић, ван. проф.

Хиљаду нечијих срећних часова биће као овај,

Али овај никад више...

Хиљаду туђих љубави биће као ова,

Али ова никада више...

Никада, једина коначност.

Цео свет и цела васиона, нас троје...

Мами и деди. . .

РЕЗИМЕ

У раду је извршена анализа напрезања цилиндричне завојне опруге пиштоља CZ 999. У првом делу рада су приказани основни појмови везани за опруге и њихова подела. Затим је описан начин функционисања пиштоља кроз шест фаза, као и начин функционисања опруге у пиштољу. Други део рада се односи на прорачун и моделирање цилиндричне завојне опруге. За формирање нумеричког модела, као и анализу напрезања примењен је програмски пакет „Autodesk Inventor”. У трећем делу су приказани нумерички резултати опруга различитих дебљина жице, материјала и попречног пресека. На крају рада су изнети закључци о добијеним резултатима.

Кључне речи: Цилиндрична завојна опруга, пиштољ CZ 999, Autodesk Inventor, напонско-деформациона анализа.

ABSTRACT

In this paper, the stress analysis of the cylindrical helical springs gun CZ 999. In the first part of this paper shows the basic concepts related to the springs and their classification. Then describes how the gun through six phases, as well as the manner of functioning of the spring in the gun. The second part relates to the calculation and modeling of cylindrical helical springs. For the formation of the numerical model, and an analysis of stresses the software package "Autodesk Inventor". The third part is numeric results are shown springs of different wire thickness, material and cross section. At the end of the paper presents conclusions on the results obtained.

Keywords: cylindrical coil spring, gun CZ 999, Autodesk Inventor, stress-deformation analysis.

САДРЖАЈ

1. Увод.....	5
2. Преглед литературе.....	7
3. Основне карактеристике, подела, особине и примена опруга.....	9
3.1 Основне карактеристике опруга.....	9
3.2 Деформационо ојачање опруга.....	9
3.3 Подела опруга.....	12
3.3 Лиснате опруге.....	14
3.5 Гибњеви.....	16
3.6 Флексиона завојна опруга.....	17
3.7 Прстенасте опруге.....	18
3.8 Спиралне опруге.....	19
3.9 Тањирасте опруге.....	21
3.10 Гумени еластични елементи.....	21
3.11 Конусне завојне опруге.....	22
3.12 Цилиндричне завојне опруге.....	23
4. Материјали за израду опруга.....	28
5. Повратна опруга пиштоља CZ 999.....	30
5.1 Начин функционисања пиштоља.....	30
5.2 Повратна опруга.....	34
6. Прорачун и моделирање опруга коришћењем програма Autodesk Inventor.....	36
6.1 Прорачун завојне опруге.....	36
6.2 Моделирање опруге.....	38
6.3 Метода коначних елемената.....	39
6.4 Поступак израде завојне опруге.....	41
7. Анализа напрезања цилиндричне завојне опруге методом коначних елемената.....	44
7.1 Анализа напрезања цилиндричне завојне опруге дебљине жице од 1 mm, 1,5 mm и 2 mm.....	51
7.2 Анализа напрезања цилиндричне завојне опруге од композитног материјала.....	55
7.3 Анализа напрезања завојне опруге правоугаоног попречног пресека.....	57
8. Закључак.....	59
Литература.....	61

1. Увод

Еластични елементи служе за остваривање машинских спојева који омогућавају велика међусобна померања у споју под дејством оптерећења. Ова функција се остварује на принципу претварања механичког рада у потенцијалну енергију и обрнуто. Под дејством силе спој се деформише. Сила на путу деформације изврши рад који се у споју акумулише у виду потенцијалне енергије која може бити сачувана или ослобођена у краћим или дужим временским интервалима, при већим или мањим померањима или под дејством већих или мањих сила и спрегова. Из ове разноврсности услова произилази и разноврсност примене, разноврсност облика и других катактеристика еластичних спојева (слика 1.1). У пракси се често уместо термина еластични елементи користи термин опруга.

Опруге су механички функционални елементи способни да се под дејством спољашњег оптерећења еластично деформишу и да абсорбовану енергију поново претворе у механички рад. Рад се у опрузи акумулира у виду потенцијалне енергије која се користи у различите сврхе [1]:

- За остваривање сталне притискујуће силе или затежуће силе (код вентила, брава, затварача);
- За амортизовање удара (еластични ослонци машина, спојеви за ослањање друмских и железничких возила);
- За мерење силе, тежине или момената (код мерних уређаја);
- За остваривање сила или спрега у краћем или дужем временском интервалу (ударна сила у механизму код наоружања, разних врста избацивача, спрег у сатном механизму);
- За ограничавање највећих вредности сила, односно највећих притисака (код вентила сигурности) или највећих момената увијања (код сигурносних спојница).

Велике деформације опруга остварују се захваљујући специфичном облику и високој еластичности као и применом материјала велике чврстоће. Облик опруге се прилагођава потребном односу силе и деформације што дефинише карактеристику еластичности опруге.

Крутост опруге зависи од димензија опруге, материјала, начина и односа мотања опруге (однос пречника опруге и пречника жице).

Променом облика попречног пресека жице од које је опруга израђена може се мењати крутост опруге и смањивати или повећавати дужина опруге, што у неким случајевима, с обзиром на уградбени простор, може бити од великог значаја при избору опруге.

Једноставне опруге су се користиле кроз историју човечанства, као лук и стрела. У бронзаном добу се почињу користити сложеније опруге (пинцета). Прве завојне опруге су се појавиле у 15. веку.

Историјски развој опруга [2]:

- 4500. године пре нове ере – дрвени лук за стреле;
- 1500. године пре нове ере – прве металне опруге;
- 1400. године – прве спиралне опруге;
- 1857. године – Х. Бесемер развија поступак добијања прве челичне опруге;
- 1880. године – развијен је поступак “патентирања” (извлачења) жице;
- 1900. године – индустријска производња опруга;
- 1910. године – специјализирани погони за производњу опруга – аутомати.



Слика 1.1 – Приказ опруга

С обзиром на разноврсност примене, опруге су нашле своје место и у наоружању, као врло значајни елементи. Конструкција оружја, и у оквиру њега пиштоља као предмета примене опруга представљених у овом раду се током времена мењала прилагођавајући се захтевима тржишта, али и новим достигнућима у развоју материјала.

Полазни параметри при прорачуну и анализи напонско-деформационог стања опруга су уградбени простор и оптерећење које опруге у свом раду морају да издрже. Из тог разлога су у наредном поглављу дати основни подаци о функционисању пиштоља и процесима који доводе до оптерећења повратне опруге која је предмет овог рада.

2. Преглед литературе

Познато је да скоро свака машина, уређај или прибор у свом склопу садржи бар једну опругу. Без опруга се не може замислити рад аутомобила, мотора СУС, транспортних средстава, машина алатки, пољопривредних и текстилних машина, машина у домаћинству, часовника и многих других уређаја. Постоји велики број радова који се баве анализом различитих врста опруга, од којих су неки приказани у овом раду.

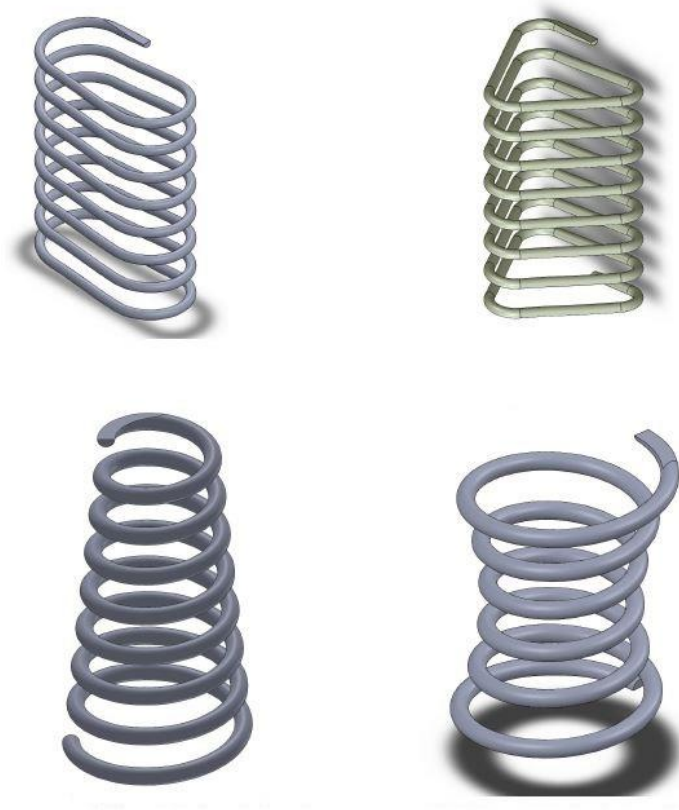
У раду [3] приказана је студија о механичким својствима и вибрацијама које настају при сабијању опруге. Широко спектар механичких испитивања изведена су да би се добиле карактеристике вибрација везане за две hold-down опруге, које се могу користити као улазни подаци за статичке и динамичке анализе. На основу извршене анализе добијена је опруга која је развијена и тренутно се користи у ОПР1000С у Кореји. Како би се проценила механичка својства опруге извршена су бројна испитивања механичких карактеристика и издржљивости.

У раду [4] је представљена методологија за пројектовање опруга које нису кружног облика и не призматичних опруга кружног попречног пресека коришћењем аналитичких и нумеричких метода. На самом почетку су приказане једноставне аналитичке формуле за прорачун деформације опруге под аксијалним оптерећењем. Затим су приказани процеси добијања CAD модела опруга (слика 2.1) и њихова каснија анализа методом коначних елемената. На крају је извршено поређење аналитичких и нумеричких резултата. Током рада, фокус је био на добијању затворене форме аналитичких израза, док би се нумеричка анализа користила само када су изрази превише компликовани, или за потврду аналитичких резултата.

Да би се смањила маса возила врши се замена челичних делова композитним, па је неопходно да се изврши оптимизација параметара материјала и промена дизајна структуре. У раду [5] приказане су нумеричке и експерименталне методе за одређивање углова оријентације влакана и пречника жице композитне опруге од карбонских влакана/епокси смоле да би се добила опруга сличних карактеристика као опруга израђена од челика. На основу анализе, применом методе коначних елемената (МКЕ), закључено је да са углом влакана од 45° потребна вредност пречник жице од композитног материјала је приближно 17,17 mm. Утврђено је да су МКЕ и експериментални резултати подударни. Коначно, применом предложених аналитичких и експерименталних резултата постигнуто је смањење масе за 55%.

У раду [6] је приказана израда SMA опруга која показује савршени повраћај упркос деформацији клизања које изазива "иницијални напон". Развијена је нова метода за изазивање иницијалног напона на SMA опругама променом оријентације спирале након подешавања облика. На крају је доказано да се опруга може вратити у првобитан положај коришћењем развијене методе.

У раду [7] су приказане опруге које имају примену код зглобова на роботима. Опруге су правоугаоног попречног пресека, једноставне за савијање, и могу да пренесу велика оптерећења. У овом раду је представљена нова и јефтина метода, где се нерђајућа жица намотава у облику спиралне опруге. Каљењем материјала опруге добијају се добре вредности напона на затезање, што је од кључне важности за зглобове робота.



Слика 2.1 – Приказ CAD модела опруга

3. Основне карактеристике, подела, особине и примена опруга

3.1 Основне карактеристике опруга

Функционисање опруга се заснива на великом деформационом раду који се остварује деловањем силе или спрега. Посебан облик и материјал велике чврстоће, од кога се опруге израђују, омогућавају да се под дејством силе остваре велике деформације односно акумулише рад у виду потенцијалне енергије. Рад акумулисан у опрузи – деформациони рад (шрафирано подручје на дијаграму, слика 3.1) пропорционалан је сили односно спрегу или деформацији:

$$\begin{aligned} A &= \int_0^f F df \\ A &= \int_0^\varphi T d\varphi \\ A &= \int_0^\varphi M d\varphi \end{aligned} \quad (3.1)$$

Ако су карактеристике еластичности опруга праволинијске:

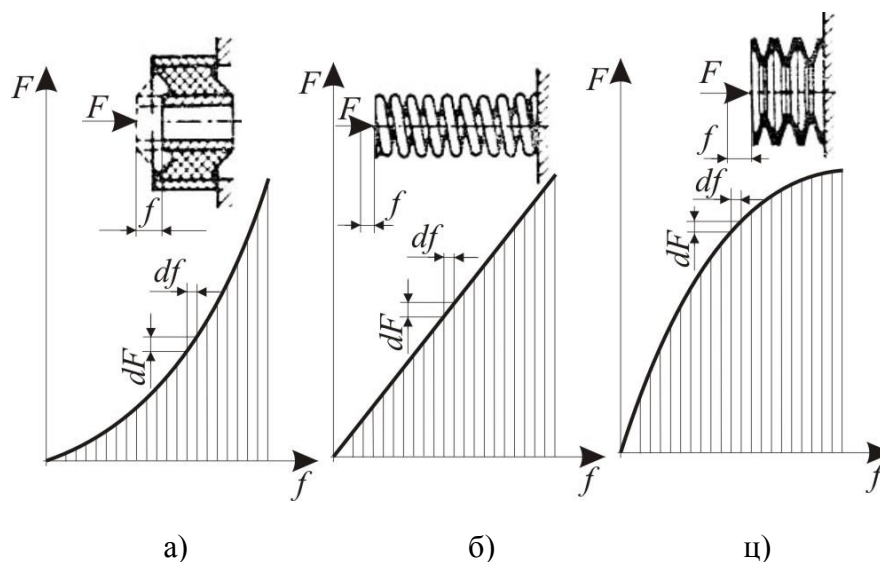
$$A = \frac{1}{2} F \cdot f, \quad A = \frac{1}{2} T \cdot \varphi, \quad A = \frac{1}{2} M \cdot \varphi \quad (3.2)$$

Крутост опруге је сила F , момент торзије T или момент савијања M потребан за остваривање јединичне деформације.

$$c = \frac{dF}{df}, \quad c_\varphi = \frac{dT}{d\varphi}, \quad c_\varphi = \frac{dM}{d\varphi} \quad (3.3)$$

Зависност силе и деформације дефинише карактеристику опруге која може бити:

- Праволинијска (линеарна);
- Прогресивна;
- Дегресивна.



Слика 3.1 – Карактеристике опруга а) прогресивна, б) праволинијска, ц) дегресивна

Код опруга са линеарном карактеристиком крутост је константна и не зависи од величине силе и деформације.

Код опруга са прогресивном карактеристиком, при порасту оптерећења расте и крутост опруге; сила брже расте у односу на деформацију. Деформација опруге је ограничена при повећању силе до максималне вредности. Овакву карактеристику имају лиснате и тањирасте опруге специјалне намене.

Код опруга са дегресивном карактеристиком, крутост опруге се смањује при повећању силе или сила спорије расте у односу на деформацију. Опруге од гуме изложене затезању и неке тањирасте опруге специјалног конструкционог извођења имају дегресивну карактеристику.

Зависност силе од деформације може бити различита при оптерећивању и растерећивању опруге, тј. акумулисана енергија може бити већа од ослобођене. Карактеристика еластичности се може мењати различитим комбиновањем опруга у слојеве [8].

3.1.1 Правилно коришћење и одржавање опруга

Правилно коришћење опруга подразумева да се:

- Не преоптерећују;
- Заштите од корозије;
- Заштите од прегревања.

При великим преоптерећењима опруга се трајно деформише и престаје да буде опруга одређене крутости. Такође, корозија утиче на губитак еластичних својства опруга. Услед прегревања материјал опруге губи карактеристике које су добијене термичком обрадом. Прегрејана опруга промени боју и постаје плавкаста. Када опруга изгуби еластична својства и еластичне карактеристике, треба је заменити новом, одређених димензија и крутости.

Ако дође до оштећења опруга, биће у виду великог угиба, истезања или лома [9].

3.2 Деформационо ојачање опруга

У случају када се захтевају опруге малих димензија оправдано је вршити њихово оптерећивање изнад границе течења како би се по растерећењу у њима створило поље заосталих напона које има супротан смер од радних напона тако да су укупни напони који се јављају при раду опруге мањи.

Деформационо ојачање опруга представља последњу операцију технолошког просеца израде опруга. Оно се састоји у томе што се опруга сабија или издужује изнад границе течења и држи у напетом стању 6 – 48 часова. Услед тога се у периферним слојевима попречног пресека завојка стварају пластичне деформације, а у централном делу попречног пресека завојка се задржава еластична зона, тј. еластично језгро. Димензије опруге пре деформационог ојачавања морају се предвидети тако да после настанка пластичних деформација опруга има потребне конструктивне димензије.

При растерећењу опруге еластично језгро тежи да се врати у првобитни положај. Пластично деформисани слојеви, који се налазе у површинском делу пресека завојка се савијају услед дејства еластичног језгра, при чему се поново врши деформација пластично деформисаног слоја и добијају напони који су по смеру супротни од напона које су ти слојеви имали при првобитном оптерећењу. Из узајамног дејства еластичне зоне и пластично деформисане зоне завојка резултира самоуравнотежено поље заосталих тангенцијалних напона [10].

Да би се утврдиле математичке зависности напонских и геометријских величина у случају деформационог ојачања опруга за опруге кружног попречног пресека жице полази се од теорије еласто-пластичне торзије греде.

3.3 Подела опруга

Основу за поделу опруга представља материјал од кога су оне израђене тако да се деле на:

- Металне опруге;
- Неметалне опруге;
- Пнеуматске опруге.

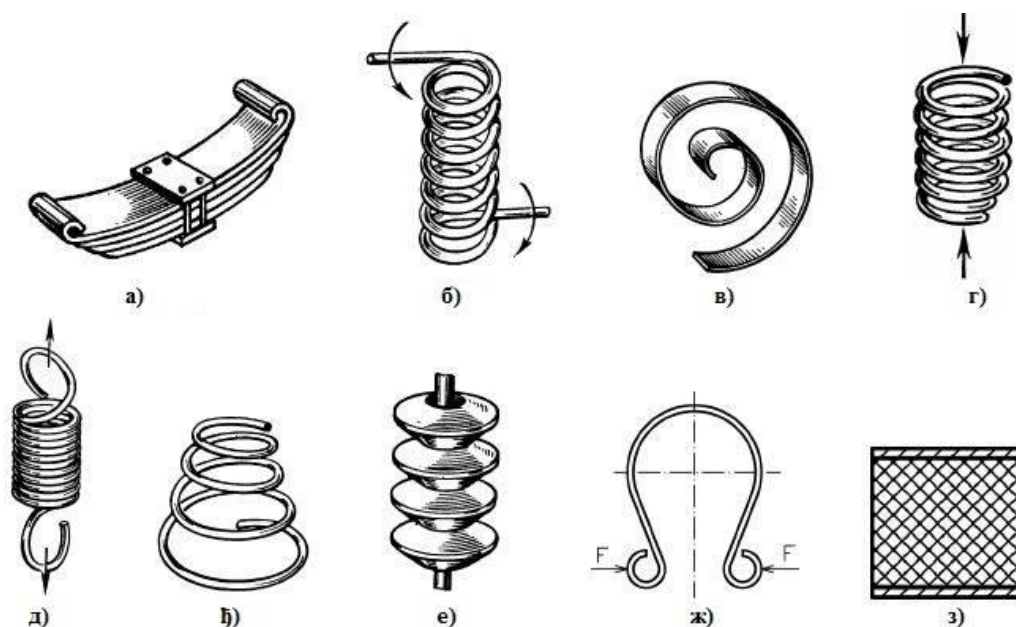
Еластичност металних опруга првенствено зависи од конструктивног облика и од карактеристика материјала.

Еластичност неметалних опруга заснива се на високој способности еластичне деформације материјала.

Еластичност пнеуматских опруга зависи од особина компресивног ваздуха у затвореној запремини [11].

Подела опруга се обично врши према врсти напрезања којем су изложене [13]:

- Флексионе - изложене савијању (слика 3.2, а, б и в);
- Торзионе - изложене увијању (слика 3.2, г, д и ђ);
- Сложено напегнуте опруге (слика 3.2 е, ж и з).



Слика 3.2 – Врсте опруга

Флексионе опруге су:

- Лиснате опруге;
- Гибњеви;
- Завојне опруге;
- Спиралне опруге;

Торзионе опруге су:

- Цилиндричне завојне опруге;
- Конусне завојне опруге.

Према димензијама разликују се:

- Велике опруге израђене од жица пречника већих од 12 mm;
- Средње опруге израђене од жица пречника 1,5 – 12 mm;
- Мале опруге израђене од жица пречника 0,2 – 1,5 mm.

Подела опруга према попречном пресеку [9]:

- Округли попречни пресек материјала;
- Квадратни попречни пресек материјала;
- Правоугаони попречни пресек материјала;
- Остали пресеци.

3.4 Лиснате опруге

Лиснате опруге су једноставног облика и користе се за ручне алате као што су маказе за резање и слично. Поред тога, користе се за еластично приљубљивање и размицање делова у браварској и прецизној механици, за разне алате и сл. Тада је обично један крак причвршћен, а други је слободан. На слици 3.3 је приказана сложена лисната опруга.



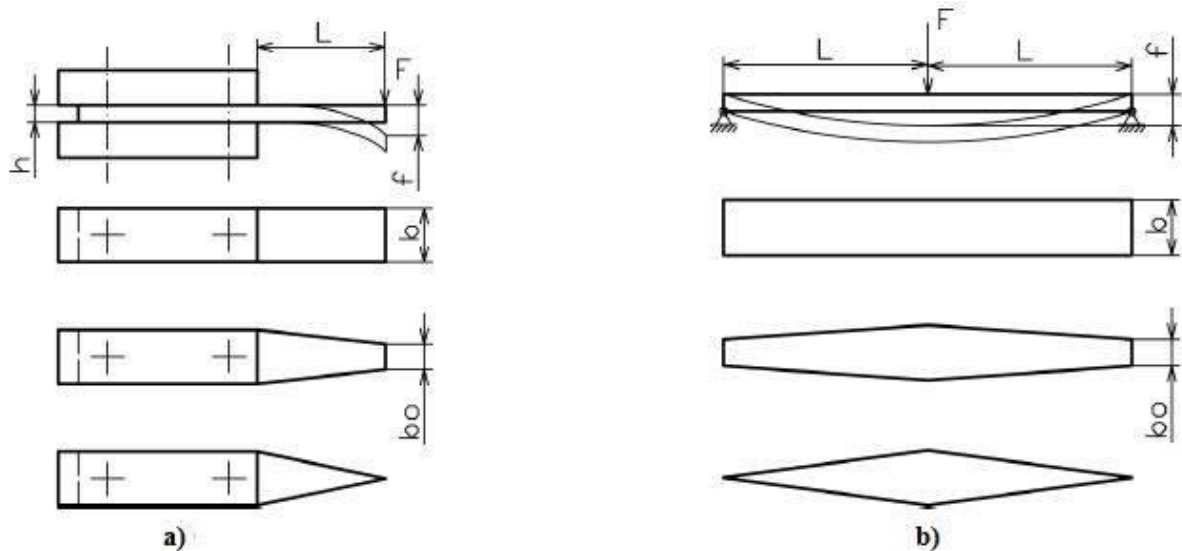
Слика 3.3 – Лисната опруга

Лиснате опруге могу бити:

- Једнокраке;
- Двокраке.

Најједноставнија лисната једнокрака опруга је конзола од опружног материјала. Критичан попречни пресек димензија $h \times b$ је на месту уклештења и изложен је напрезању на савијање и смицање. Вредност напона на савијање је највећа на месту уклештења, а смањује се за попречне пресеке који су ближи дејству силе F . У попречном пресеку дејства силе F напон на савијање је једнак нули. Како би се уштедело на материјалу, који је за опруге скуп, ширина b није константна по дужини L већ се смањује до b_0 или $b_0 = 0$ (слика 3.4, а).

На исти начин се праве и двокраке опруге. Критичан попречни пресек двокраке лиснате опруге је на средини. Стога је на овом месту највећи попречни пресек, а смањује се према крајевима на b_0 или до $b_0 = 0$ (слика 3.4, б) [12].



Слика 3.4 – а) Једнокрака и б) двокрака лисната опруга

Ако је висина h и ширина b лиснате једнокраке опруге константна, напон на савијање, угиб f и крутост опруге c одређују се на основу израза:

$$\sigma_f = \frac{6 \cdot F \cdot L}{b \cdot h^2}, N/mm^2 \quad (3.4)$$

$$f = \frac{4 \cdot F \cdot L^3}{b \cdot h^3 \cdot E}, mm \quad (3.5)$$

$$c = \frac{b \cdot h^3 \cdot E}{4 \cdot L^3}, N/mm. \quad (3.6)$$

Код двокраких лиснатих опруга, угиб се рачуна на основу израза:

$$f = k \cdot \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (3.7)$$

где је k корекциони фактор односа ширина b_0/b .

Једнокраке лиснате опруге се употребљавају за остваривање сталне силе притиска код брава, поклопаца, затварача и електричних контакта, док се двокраке лиснате опруге користе за постоља која осцилују [13].

3.5 Гибњеви

Гибњеви (слика 3.5) чине већи број лиснатих опруга трапезног облика повезаних у једну целину. При већим оптерећењима и већим деформацијама лиснате опруге не могу да задовоље конструкционе захтеве. Листови опруге исте ширине али различите дужине тако су повезани да је лист највеће дужине постављен са горње стране и најчешће има савијене крајеве (за шинска возила). Испод овог листа налази се још један лист исте дужине, а остали краћи листови поређани су испод и на средини повезани најчешће завртњевима. Гибњеви се најчешће примењују код теретних, путничких и шинских возила.

Уколико између листова постоји одговарајуће трење онда је карактеристика гибња права линија. Линије оптерећења и растерећења гибња се не поклапају, односно гибња има одговарајуће пригушење. Код гибњева за возила пожељна је прогресивна карактеристика. То се постиже одговарајућим конструкционим извођењем појединих листова, тако да се они укључују у рад нешто касније. Сличан ефекат има и скраћење појединих листова опруге са додиром у тачки, чиме се смањује трење.



Слика 3.5 – Гибњеви

Врсте гибњева су [12]:

- Елиптични;
- Полуелиптични;
- Три-четврт елиптични;
- Четврт елиптични.

3.6 Флексиона завојна опруга

Флексиона завојна опруга настаје када се жица округлог попречног пресека намота на ваљак под одређеним углом успона опруге и корака p (слика 3.6, а). Жица има такве завршетке да се може оптеретити силом F која делује управно на уздужну осу опруге, најчешће у смеру завојака опруге. Под дејством силе F опруга се савије за угао φ (слика 3.6, б, ц) и тиме је изложена напрезању на савијање:

$$\sigma_f = \frac{M}{W_x} = \frac{F \cdot L}{W_x} \leq \sigma_{df} \quad (3.8)$$

Угао заокретања опруге је:

$$\varphi = \frac{M \cdot L_u}{E \cdot I} \quad (3.9)$$

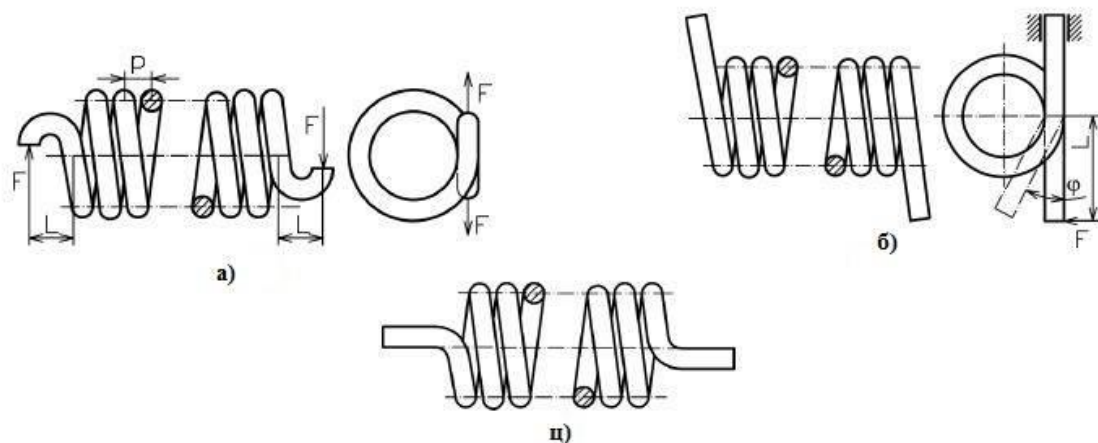
где је:

M – момент;

W_x – напон савијања;

L_u – укупна дужина жице опруге;

I – момент инерције попречног пресека завојака жице.



Слика 3.6 – Флексионе завојне опруге

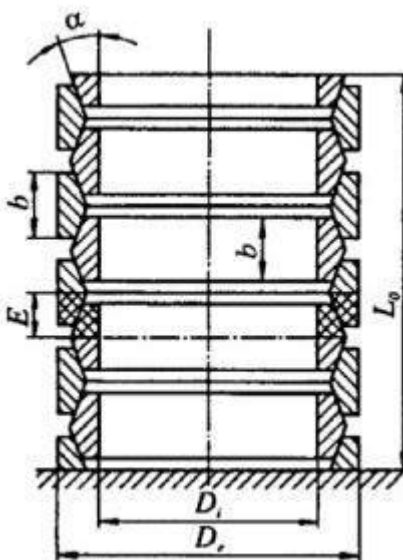
Завојне флексионе опруге се примењују за остваривање силе притиска на поклопцима, затварачима, бравама, за повратно кретање полуга, у индустрији апарата и уређаја и у прецизној механици [9].

3.7 Прстенасте опруге

Прстенаста опруга се састоји од затворених спољашњих и унутрашњих прстенова са дуплим конусним површинама које клизе једна по другој. Аксијална притисна сила преко конусних додирних површина прстенова напреже спољашње прстенове на затезање, а унутрашње на притисак. Прстенаста опруга има знатно пригушење, тако да је сила растерећења три пута мања од силе оптерећења. Због пригушења знатан део механичке енергије претвара се у топлоту [14].

За исправно функционисање ових опруга потребно је добро подмазивање које је истовремено и заштита опруге од утицаја влаге и нечистоће.

Спољашњи пречник D_e код прстенастих опруга се креће у границама од 18 до 400 mm, оптерећење F од 5 до 1800 kN и деформација f од 0,4 до 7,6 mm. Деформација ових опруга је јако мала (слика 3.7).



Слика 3.7 – Склоп прстенасте опруге

Због своје пригушне способности прстенасте опруге су погодне за амортизовање великих удара, па налазе примену код одбојника железничких возила, чекића, тешких преса, алата за акумулирање велике енергије, а уграђују се и у спојевима ужади дизалично-транспортних машина [13].

3.8 Спиралне опруге

Спиралне опруге су опруге намотане у облику Архимедове спирале. За израду спиралних опруга најчешће се употребљавају округла жица за опруге према DIN 17223 и челичне траке од топло ваљаног челика за опруге према DIN 17211.

Спиралне опруге се праве од ваљаних трака правоугаоног попречног пресека (b $\times$ h), савијених у архимедову спиралу унутрашњег полупречника r и спољашњег полупречника R , са почетним бројем навојака N_0 (слика 3.8). Један крај опруге је чврсто уклештен у тачки A , док је други крај оптерећен силом F при чему је опруга напрегнута на савијање. Након дејства силе F смањују се вредности полупречника r и R , а повећава се број завојака на N . Карактеристика спиралних опруга је да се са малим вредностима силе F постиже велика деформација, која се карактерише смањеним вредностима полупречника r и R и повећаним бројем завојака N . Спирална опруга је углавном у почетном стању напрегнута на савијање, након чега обавља своју функцију, на пример код часновника да помера казаљке [12].



Слика 3.8 – Приказ спиралне опруге

Спиралне опруге се користе за акумулирање енергије за рад сатних механизма, остваривање повратног хода казаљке мерних инструмената и др.

3.9 Тањирасте опруге

Тањирасте опруге (слика 3.9) су опруге предвиђене за велике силе и користе се код разних уређаја за амортизацију. У малом простору тањираста опруга може преузети велику силу. Тањирасте опруге се користе при статичким и једносмерно променљивим динамичким оптерећењима.

Под дејством оптерећења висина опруге се смањује и опруга тежи облику равне плоче. Карактеристика опруга је линеарна или дегресивна. Посебним комбиновањем опруга може се остварити и прогресивна карактеристика [12].



Слика 3.9 – Приказ тањирастих опруга

Најважније особине тањирастих опруга су [15]:

- Велика сила при малом угибу;
- Знатно боље искоришћење простора за уградњу него код других врста опруга;
- Према потреби може се добити права или повијена карактеристична линија;
- Са различитим начином слагања тањирастих опруга на вођице – стубове и са њиховим различитим димензијама могу се добити и прогресивне карактеристичне линије;
- Повећање угла слога тањирастих опруга њиховим слагањем у наизменичном поретку;
- Повећање сила опруге слагањем тањирастих опруга и истосмерном поретку;
- Избором односа величина спољашњег према унутрашњем пречнику $D_s/D_u=2$, постиже се најповољније искоришћење материјала.

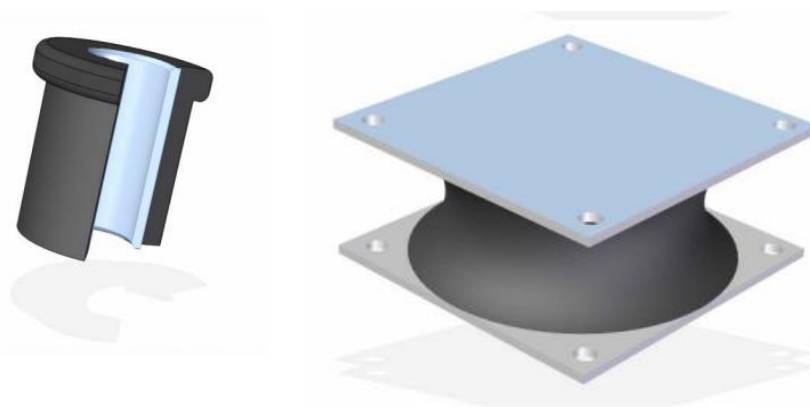
Према димензијама и начину израде разликују се три групе тањирастих опруга:

- Прву групу чине хладно обликоване опруге (опруге чија је дебљина плоче мања од 1 mm);
- Другу групу чине опруге дебљине 1 - 4 mm које се такође процесирају из хладно ваљаних трака и извлачењем доводе у облик коничне љуске. Унутрашње и спољашње ивице се обрађују резањем.
- Трећа група су топло обликоване опруге са обрађеним ивицама на месту ослањања. Дебљина плоче је већа од 4 mm.

3.10 Гумени еластични елементи

Гумени еластични елементи су једноставне опруге које имају способност да пригушују ударна оптерећења и вибрације. Као материјал користи се гума различитих еластичних карактеристика. Ове опруге су погодне за еластично спајање делова машина које су динамички оптерећене и које вибрирају. Гумени еластични елементи могу бити изложени притиску, смицању или увијању. Напрезање на истезање ових еластичних елемената није погодно, јер би изазвало брзо старење гуме.

Деформације ових опруга зависе од материјала, димензија и оптерећења. Гумени еластични елементи најчешће се налазе између челичних плоча или чаура, које на тај начин еластично спајају (слика 3.10).



Слика 3.10 – Различити типови гумено-металних опруга

3.11 Конусне завојне опруге

Конусне завојне опруге (слика 3.11) примењују се при високим оптерећењима у циљу постизања прогресивне карактеристике. Пречник ове опруге се постепено смањује идући од једне ка другој ослоној површини. При дејству силе, више се деформишу завојци већег пречника. Карактеристика опруге је линеарна све до тренутка када завојак највећег пречника додирне ослону површину.



Слика 3.11 – Приказ конусне завојне опруге

Код опруга са малим углом конуса долази до слегања или "насадања" завојака, једних на друге. При већим угловима конуса мањи завојци упадају у веће и при већим силама опруга се толико сабије да сви завојци могу бити у истој равни.

Телескопске опруге се израђују од жице правоугаоног попречног пресека. Завојници код ових опруга при деформисању улазе један у други, чиме се остварује велика деформација и прогресивна карактеристика. Опруге се примењују код вагонских одбојника [16].

3.12 Цилиндричне завојне опруге

Цилиндричне завојне опруге спадају у групу торзионих опруга и имају најширу примену у машинству (слика 3.12).



Слика 3.12 – Приказ цилиндричне завојне опруге

Цилиндричне завојне опруге се могу обликовати хладним и топлим поступком. Хладним поступком се добијају опруге од танке жице, а топлим поступком се добијају опруге веће сигурности и оне се у пракси много више користе.

Израда завојних опруга се обавља у неколико фаза:

- Припрема материјала;
- Обликовање (механичко и термичко);
- Испитивање;
- Заштита;
- Обележавање;
- Складиштење.

Код ових врста опруга могу се јавити две врсте оптерећења:

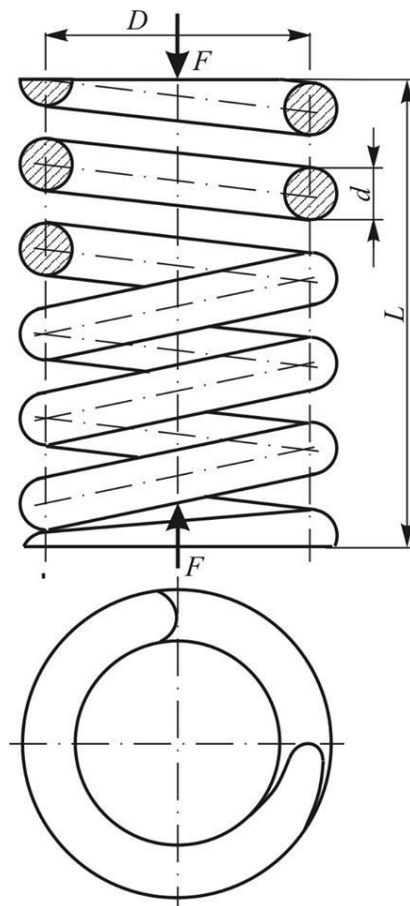
а) Ретко променљиво оптерећење где спадају опруге:

- Све опруге статички оптерећене;
- Све опруге које имају прилично променљиво оптерећење у дужим временским размацима са мање од 10 000 промена оптерећења за време предвиђеног трајања опруге.

б) Осцилаторно оптерећење где спадају опруге:

- Све код којих се оптерећење мења осцилујући изнад предвиђене дужине. Век трајања ових опруга се изражава бројем промена оптерећења до лома [12].

На слици 3.13 је приказана притисна завојна опруга кружног попречног пресека.



Слика 3.132 – Приказ притисне завојне опруге кружног попречног пресека

Потребна дужина жице за навијање опруге сразмерна је активном броју завојака z_a . Ослањање притисних опруга врши се преко 0,75 – 1 завојака са стране који су после навијања опруге поравнати те је потребна дужина жице $L = D\pi(z_a + 1,5 - 2)$. Дужина жице за вучну опругу може се израчунати по сличном образцу јер су крајеви обликовани у виду кука укупне дужине l_H .

Размак између завојака, односно корак, притисних опруга треба да је изабран тако да се при пуном оптерећењу завојци не додирују. Завојци вучних опруга су преднапрегнути – притиснути један уз други. То се постиже преднапрезањем жице при навијању у хладном стању, те функција силе у зависности од деформације има облик $F=F_0 + cf$, где је F_0 – сила услед преднапрезања. Термичком обрадом изгубили би се преднапони [14].

Момент торзије цилиндричних завојних опруга:

$$T = \frac{F \cdot D}{2} \quad (3.9)$$

Деформациони рад опруге:

$$A = \frac{F \cdot f}{2} = \frac{T \cdot \psi}{2} = \frac{F \cdot D}{4} \cdot \psi \quad (3.10)$$

Деформација опруге:

$$f = \frac{8 \cdot F \cdot D^3 \cdot z_a}{G \cdot d^4} \quad (3.11)$$

где је:

z_a – број завојака;

G – модул клизања.

Угао увијања:

$$\psi = \frac{16 \cdot D^2 \cdot z_a \cdot F}{G \cdot d^4} \quad (3.12)$$

Крутост опруге:

$$c = \frac{G \cdot d}{8 \cdot z_a \cdot K^3} \quad (3.13)$$

где је: $K = \frac{D}{d}$

Радни напон:

$$\tau = k \cdot \frac{T_t}{W_p} \leq \tau_{doz} \quad (3.14)$$

Поступак провере степена сигурности завојних цилиндричних опруга, од жице кружног попречног пресека заснива се на поређењу радног напона увијања и критичног напона при радним условима опруге.

$$S = \frac{\tau_{D(-1)M}}{\tau} \geq 2 \dots 3 \quad (3.15)$$

Дозвољени напон:

$$\tau_{doz} = \frac{\tau_{TM}}{S} \quad (3.16)$$

где је:

τ_{TM} - критичан напон;

S – степен сигурности.

3.12.1 Завојне цилиндричне опруге израђене од жице правоугаоног попречног пресека

Опруге од профилисаних материјала се због својих специфичних својстава и предности у односу на жицу кружног попречног пресека, примењују када је потребно остварити мању или већу силу у опрузи и смањити или повећати дужину опруге.

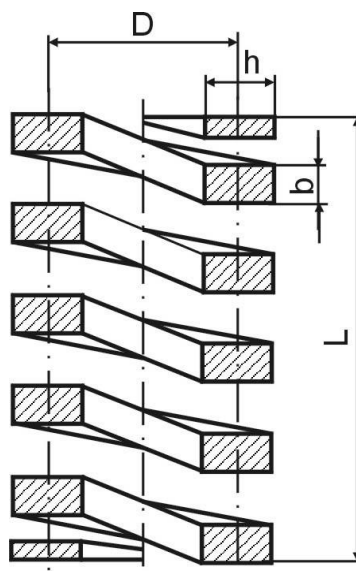
Према начину савијања ове опруге се деле на:

- Опруге навијене од квадратне жице при чему се у односу на округлу жицу постиже већа опружна сила, а мања висина опруге;
- Опруге навијене од жице правоугаоног попречног пресека када се жица савија преко уже стране правоугаоника чиме се постиже већа опружна сила и паралелно томе повећа висина блока, а смањује спољашњи пречник опруге.
- Опруге навијене од жице правоугаоног попречног пресека када се опруга савија преко шире стране правоугаоника чиме се битно смањује опружна сила и висина блока, а повећава спољњи пречник опруге.

Код завојних опруга правоугаоног попречног пресека (слика 3.14) жице су сложено напегнуте, а расподела напона по пресеку је неуједначена.

На основу теорије о напрезању штапа правоугаоног попречног пресека изложеног торзији види се да се највећи напони јављају на средини веће стране правоугаоника. Међутим, код опруга место највећих напона по површини завојка неће увек бити на средини веће стране правоугаоника. Због закривљености штапа и положаја страница пресека према оси опруге, тј. да ли је већа страница паралелна оси

опруге или не, као и односа пречника опруге са величином странице нормалне на осу опруге највећи напони могу бити и на мањој страници правоугаоника.



Слика 3.14 – Цилондрична притисна завојна опруга правоугаоног пресека жице и расподела напона у завојку

Поред челичне патентиране жице за израду ових опруга могу се користити и друге врсте материјала, као рецимо вентилска жица. Могућа је израда ове врсте опруга и топлим поступком.

Жица правоугаоног попречног пресека се користи за израду опруга како би се смањио смештајни простор за опругу или да би се у ограничен простор сместила опруга захтеваних карактеристика која ће имати поуздан рад. Функционисање опруга и еластичних елемената израђених од жице правоугаоног попречног пресека је исто као и у случају жице кружног попречног пресека. Материјали од којих се израђују ове опруге су исти као и за опруге кружног попречног пресека завојка [8].

4. Материјали за израду опруга

Избор материјала опруге је први корак у конструисању опруга и заснива се на низу фактора, укључујући опсег температура, затезну чврстоћу, модул еластичности, замор материјала, отпорност на корозију, електричне особине, цену итд.

Материјали за израду опруга морају бити изузетно еластични и чврсти, да поднесу врло високе напоне који су најчешће променљиви и могу се поделити у неколико група [13].

Високо угљенични челици за опруге су најчешће коришћени материјали за израду опруга. Они су најјефтинији, лако приступачни, лако обрадиви и веома популарни, али немају задовољавајуће карактеристике на високим и ниским температурама или при ударним оптерећењима. Пример су:

- Челична патентирана вучена жица (врста А, В, С, D);
- Специјална челична патентирана вучена опружна жица;
- Вентилска опружна жица.

Лигирани челици за опруге се користе у условима високих напона и појаве ударних оптерећења. Лигирани челици за опруге боље подносе високе и ниске температуре у односу на високо угљеничне челике. Пример су:

- Хром ванадијум челик;
- Хром сицилијум челик.

Нерђајући челици за опруге се карактеришу отпорнишћу према корозији и утицају агресивних материја. Ови челици имају садржај хрома од најмање 16 % и садржај никла од најмање 6 %, пошто ови проценти легирајућих елемената дају жељену постојаност према корозији. Сви ови материјали се могу корисити на високим температурама до 350⁰ С. Пример су:

- X12CrNi177;
- X5CrNiMo1810;
- X7CrNiAl177.

Легуре бакра су значајни материјали за израду опруга због њихових добрих електричних особина и одличне отпорности на корозију, мада су знатно скупљи од високо угљеничних и легираних челика, али се и поред тога често употребљавају у електричним компонентама и на температурама испод нуле. Све легуре бакра су немагнетне. Пример су:

- Менсигана жица за опруге;
- Бронзана жица за опруге;

- Фосфор бронза;
- Берилијум бакар;
- Монел 400;
- Монел К 500.

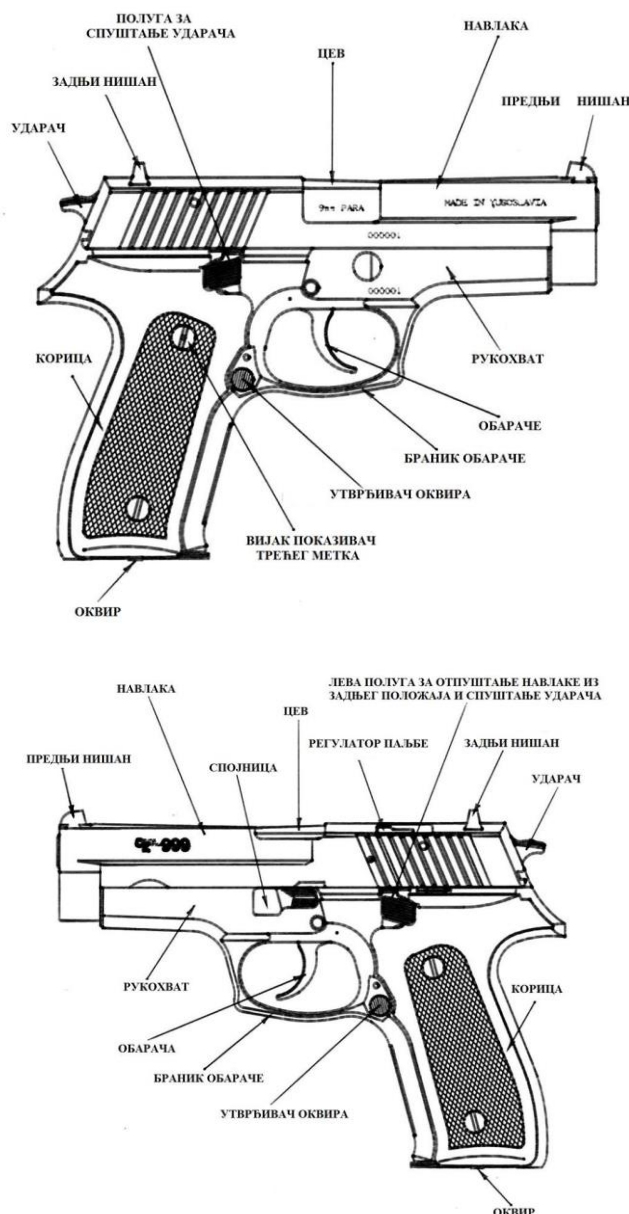
Полуфабрикати за израду опруга су жице, шипке или траке вруће ваљане, хладно вучене или хладно ваљане. Зависно од величине и полазног полуфабриката опруге се могу обликовати у хладном и у топлом стању. Опруге великих пресека се обликују у топлом стању после чега следи термичка обрада, каљење у уљу при температурама $820 - 880^{\circ}\text{C}$ и отпуштање при $430 - 520^{\circ}\text{C}$. Ради повећања динамичке издржљивости може се површински слој излагати дејству удара челичних куглица у смеши са ваздухом под притиском (сачмарење). Опруге малих димензија обликују се у хладном стању навијањем хладно вучених (патентираних) или брушених жица и хладно ваљаних трака или просецањем хладно ваљаних трака (плочасте опруге). Хладним ваљањем или вучењем после побољшања знатно се повећава чврстоћа, издржљивост и модул клизања полуфабриката. Загревањем би се ови ефекти изгубили. За рад на повишеним температурама користе се челици чије се карактеристике на овим температурама најмање снижавају.

Композитни материјали на бази стаклених или угљеничних влакана комбинују уштеду у тежини, што води до смањене потрошње горива и емисије CO_2 , уз огромну снагу, нудећи тако побољшану безбедност и добро понашање приликом судара. Лисната опруга од композитних материјала ојачана влакнима користи се за шасије модела аутомобила Volvo XC90, премијум кросовер SUV возила за који иновативни концепт задње опруге служи као платформа за серије других модела [9].

5. Повратна опруга пиштоља CZ 999

5.1 Функционисање пиштоља

Пиштољ Застава CZ 999 је полуаутоматско оружје које функционише на принципу кратког трзања цеви. Брављење се остварује вертикалним осциловањем цеви, када цев залази у отвор на навлаци. Механизам за окидање је двоструког дејства (DA / SA). На слици 5.1 је приказан изглед пиштоља са леве и десне стране.

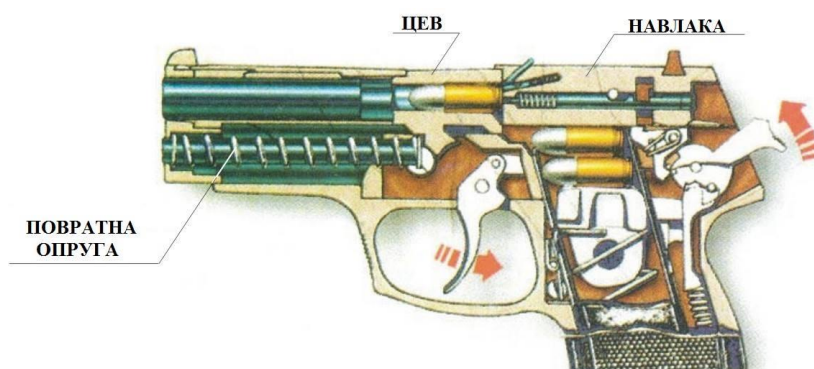


Слика 5.1 – Пиштољ CZ 999, изглед са десне и леве стране

Термин забрављен пиштољ означава стање пиштоља у коме су цев и навлака у таквом међусобном положају у склопу да се после опаљивања метка заједнички крећу уназад. После приближно 5 mm поменути склоп се раздваја на тај начин што се цев

зауставља ударом у део рукохвата, а навлака наставља даље да се креће уназад једним делом због инерције коју је стекла претходним кретањем, а делом услед притиска заосталих барутних гасова. Тада се каже да је пиштољ одбрављен.

Повлачењем налаке уназад запиње се ударач и пуштањем да се врати у предњи положај навлака захвата метак из оквира и убацује га у цев, тада је пиштољ напуњен, запет, забрављен и спреман за опаљење. Повратна опруга је сабијена на монтажно стање и десним крајем се ослања на рукохват, а левим на навлаку, као што је приказно на слици 5.2.



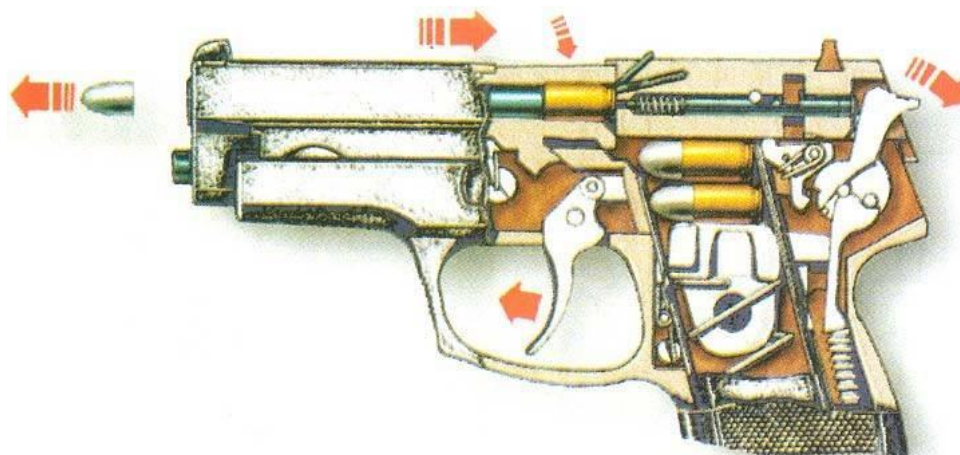
Слика 5.2 – Прва фаза у раду пиштоља

Повлачењем обараче, ослобађа се ударач који под дејством своје опруге креће напред, потискује ударну иглу која својим врхом удара у капсулу метка и опаљење је извршено. По опаљењу метка под дејством барутних гасова зрно излази из цеви. Теоретски истог тренутка и забрављени склоп навлака - цев креће уназад. Практично он због инерције креће за неку милисекунду касније. Истовремено се сабија и повратна опруга (слика 5.3).



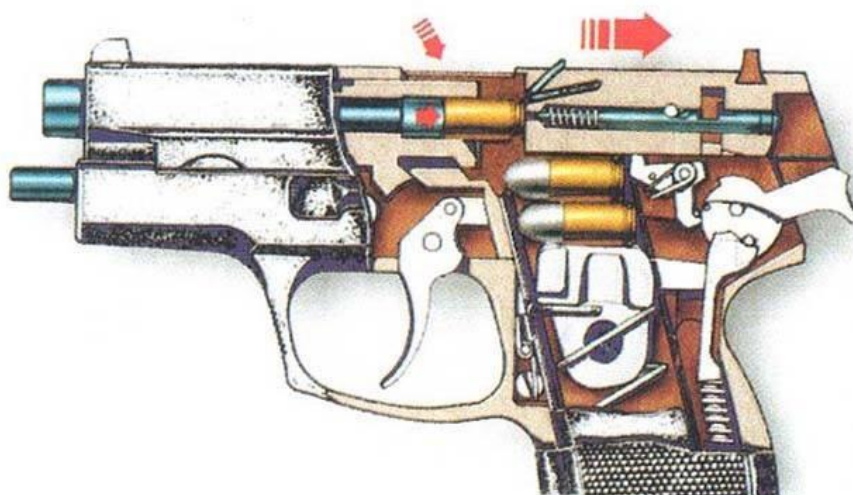
Слика 5.3 – Друга фаза у раду пиштоља

После приближно 5 mm заједничког кретања цеви и навлаке, цев бива свучена на доле и пиштољ је тада одбрављен (слика 5.4).



Слика 5.4 – Трећа фаза у раду пиштоља

Код одбрављеног стања цев се зауставља и навлака наставља самостално да се креће уназад. При томе извлакач који је у саставу навлаке придржава празну чауру, коју притискују заостали барутни гасови, уз навлаку (слика 5.5).



Слика 5.5 – Четврта фаза у раду пиштоља

У склопу рукохвата је и такозвани избацач. На њега у одређеном тренутку налеће чаура, тада се кид веза између чауре и навлаке и навлака наставља да се креће још приближно 15 mm уназад, а чаура испада кроз отвор на навлаци (слика 5.6). Кретањем уназад навлака је својим задњим крајем преко удараца запела ударну иглу.



Слика 5.6 – Пета фаза у раду пиштоља

При свом кретању уназад навлака сабија повратну опругу. У тренутку када се навлака заустави ударањем у непокретни рукохват повратна опруга је максимално сабијена. Важно је нагласити да крајњи задњи положај навлаке не дефинише блок стање повратне опруге, које је недопустиво у функционисању пиштоља.

Навлаку сада ништа не спречава да се под дејством повратне опруге покрене напред. При том кретању напред навлака синхронизовано прво извлачи нови метак из оквира, затим га убацује у цев и почиње да потискује цев напред и при том заједничком кретању цеви и навлаке напред долази до забрављивања (слика 5.7).



Слика 5.7 – Шеста фаза у раду пиштоља

Након шесте фазе циклус почиње да се одвија испочетка.

5.2 Повратна опруга

Сагорели барутни гасови при опаљењу метка са једне стране делују на дно зрна покрећући га дуж осе цеви ка устима цеви, а са друге стране преко дна чауре на навлаку покрећући цев и покретне делове у смеру супротном од смера кретања зрна. При овом кретању покретни делови пушке сабијају повратну опругу.

У притиснутој опрузи се јавља додатно напрезање на смицање када услед ударног оптерећења крај опруге добије одређену брзину. Овај талас удара пролази кроз завојке опруге и рефлектује се са краја опруге. Висина овог ударног оптерећења зависи од брзине удара, а не од мера опруге.

Завојци опруге при дејству навлаке добијају одређену брзину и понекад долази до сударања навоја што је веома опасно. Начин сабијања опруге и произведени напони зависе од:

- величине оптерећења;
- дужине трајања оптерећења;
- законитости пораста оптерећења у току времена;
- конструкције опруге;
- носивости њених завојака.

Критична брзина сабијања опруге је брзина при којој долази до сударања навоја и рачуна се према обрасцу:

$$v_{kr} = \frac{\tau_{blok} - \tau_g}{\sqrt{2 \cdot 10^{-3}} \cdot \gamma \cdot G} \quad (5.1)$$

τ_{blok} - индуковани напон у опрузи када је она сабијена на блок стање;

τ_g - индуковани напон у опрузи у максимално сабијеном радном стању;

γ – специфична тежина материјала опруге у kg/dm^3 ;

G – модул смицања у N/mm^2 .

Ако је брзина кретања покретног краја опруге мања од критичне брзине неће доћи до сударања навоја.

Сабијањем повратне опруге пиштоља у њој се акумулише потенцијална енергија чијим се ослобађањем, на крају процеса сабијања, покретни делови враћају у првобитни положај. Приликом пројектовања опруге морају се одабрати параметри опруге такви да енергија покретних делова буде довољна за сабијање опруге до дужине која је конструкцијом захтевана за нормално функционисање пиштоља. Ход повратне опруге зависи од енергије покретних делова. Ако су крутост опруге и њена дужина велики, енергија покретних делова неће бити довољна за сабијање опруге до захтеване дужине. Тада ће се енергија покретних делова искористити за сабијање опруге и акумулисање енергије у њој пре него што навлака обави потребан радни ход и функција пиштоља је угрожена. Карактеристику опруге треба тако одабрати да енергија покретних делова буде довољна за сабијање до дужине захтеване конструкцијом. Такође, за ниске вредности крутости опруге, енергија покретних делова пиштоља ће бити већа од акумулисане енергије у опрузи при сабијању до захтеване дужине тако да ће доћи до непотребног ударања покретних делова по непокретним. Ниска вредност акумулисане енергије у опрузи производи споро враћање навлаке у првобитни положај и тиме је функција пиштоља угрожена.

У максимално сабијеном радном стању сила у опрузи мора да буде у распону од 60 до 80 N. Уколико би сила у опрузи била мања од 60 N отпор опруге при кретању навлаке уназад не би био довољан да спречи непотребно ударање покретних делова пиштоља о рукохват као непокретни део. Такође, ако би сила у опрузи била већа од 80 N, нормално развијеном стрелцу би било онемогућено ручно повлачење навлаке у задњи положај и запињање пиштоља.

6. Прорачун и моделирање опруга коришћењем програма Autodesk Inventor

6.1 Прорачун завојне опруге

У овом поглављу дат је прорачун цилиндричне завојне опруге која се користи код пиштоља CZ 999. Дужина опруге је 113 mm, а дебљина жице 1,6 mm. Опруга је изложена дејству силе од 69 N.

Полазни подаци:

- Материјал: 67SiCr5
- Сила: $F=69 \text{ N}$
- Пречник: $D=10,5 \text{ mm}$, $d=1,6 \text{ mm}$
- Број завојака: $z_a=22$
- Карактеристике материјала 67SiCr5 [17]: $R_e=1350 \text{ N/mm}^2$, $R_m=1500 \text{ N/mm}^2$
- Модул клизања [17]: $G=83\,000 \text{ N/mm}^2$.

Решење:

Момент торзије:

$$T_t = \frac{F \cdot D}{2} = \frac{69 \cdot 10,5}{2} = 358,8 \text{ Nmm}$$

Крутост опруге:

$$c = \frac{G \cdot d}{8 \cdot z_a \cdot K^3} = \frac{83000 \cdot 1,6}{8 \cdot 22 \cdot 6,5^3} = 2,747 \text{ N/mm}$$

$$K = \frac{D}{d} = \frac{10,5}{1,6} = 6,5$$

Угао увијања:

$$\psi = \frac{16 \cdot D^2 \cdot z_a \cdot F}{G \cdot d^4} = \frac{16 \cdot 10,5^2 \cdot 22 \cdot 69}{83000 \cdot 1,6^4} = 4,830 \text{ rad}$$

Деформација опруге:

$$f = \frac{8 \cdot z_a \cdot K^3 \cdot F}{G \cdot d} = \frac{8 \cdot 22 \cdot 6,5^3 \cdot 69}{83000 \cdot 1,6} = 25,113 \text{ mm}$$

Радни напон:

$$\tau = k \cdot \frac{T_t}{W_p} = 1,26 \cdot \frac{358,8}{0,803} = 562,998 \text{ N/mm}^2$$

$$k = \frac{4K-1}{4K-4} + \frac{0,615}{K} = \frac{25}{22} + \frac{0,615}{6,5} = 1,23$$

$$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16} = \frac{\pi \cdot 1,6^3}{16} = 0,803 \text{ N/mm}^3$$

Критичан напон:

$$\tau_{D(-)M} = \tau_{D(-)} \cdot \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3 \cdot \xi_R \cdot \xi_N = 500 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1,73 = 1245,6 \text{ N/mm}^2$$

Вредности фактора корекције ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 , ξ_R и ξ_N су [13] :

$$\xi_1 = 1,2$$

$$\xi_2 = 1$$

$$\xi_3 = 1$$

$$\xi_R = 1,2$$

$$\xi_N = \sqrt{\frac{N_D}{n}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^6}{10^6}} = 1,73$$

$$\tau_{D(-)} = 500 \text{ N/mm}^2$$

Степен сигурности:

$$S = \frac{\tau_{D(-)M}}{\tau} \geq 2 \dots 3$$

$$S = \frac{1245,6}{562,998} = 2,2$$

На основу спроведеног прорачуна закључује се да услов задовољава.

Дозвољени напон:

$$\tau_{doz} = \frac{\tau_{TM}}{S_{min}} = \frac{1245,6}{2} = 622,8 \text{ N/mm}^2$$

6.2 Моделирање опруге коришћењем програма Autodesk Inventor

Autodesk Inventor у потпуности подржава пројектовање сложених конструкција у машинској индустрији. Параметарско пројектовање 3D модела у верзији програма Autodesk Inventor је ефикасно повезано са модулима програма који омогућавају израду цртежа у 2D као и израду остале неопходне документације за реализацију производње. Садржи комплетну верзију програма за напредно управљање изградом документације који у потпуности подржава тимски рад на пројекту. Поседује библиотеке са око милион 3D делова и облика по светским техничким стандардима (ISO, DIN, GOST, ANSI, BSI, GB, JIS). Документација за производњу је комплетно усаглашена са изабраним техничким стандардом и у потпуности је асоцијативна са 3D моделом.

Autodesk Inventor, као напреднија варијанта овог производа, представља моћан алат за пројектовање у машинству кроз 3D CAD обликовање делова и склопова, трасирање каблова, цеви и црева, провере напонских стања и симулацију рада покретних делова и склопова машина и уређаја. Осим опција из програма Autodesk Inventor са модулима за опште машинство, поседује и модуле који омогућавају провере механички оптерећених делова и склопова са оптимизацијом конструкције. Могућност реалне симулације у потпуности отклања могућност грешака у пројектовању и драстично смањује трошкове развоја производа због тога што физичку израду прототипа конструкције, ради провера пројектовних параметара, чини непотребном. Autodesk Inventor садржи следеће модуле [18]:

- Design Accelerator – Пројектовање погонских трансмисија;
- Sheet Metal – Рад са танким лимовима;
- Frame Generator – Рад са металним рамовима;
- Weldments – Рад са завареним спојевима;
- Inventor Studio – Креирање фотореалистичних приказа и анимација;
- Stress Analysis – Анализе оптерећења;
- Dynamic Stimulation – Динамичка симулација кретања;
- Tube and Pipe – Рад са цевима и цревима;
- Cable and Harness – Каблови и електроинсталације;
- Plastic injection molding tools – Алати за делове од пластике.

6.3 Метода коначних елемената

Метода коначних елемената (МКЕ) је савремена нумеричка метода која се користи за пројектовање и прорачун машинских конструкција уз примену рачунара. За разлику од других нумеричких метода које се заснивају на математичкој дискретизацији једначина граничних проблема, МКЕ се заснива на физичкој дискретизацији разматраног континуума деловима коначних димензија и једноставног облика који се зову коначни елементи.

Први радови из области методе коначних елемената појавили су се четрдесетих година прошлог века. Hrenikoff је 1941. године решавао проблеме у области структурне и напонске анализе чврстог тела.

Први универзитетски уџбеник у области МКЕ написао је Кук 1974. године, у време када је метода већ била прихваћена.

Посебан значај у развоју МКЕ имали су Варијациони принципи механике континуума који су примењени на формулацију МКЕ, па је МКЕ добио општи приступ. Даљи развој МКЕ одвијао се у правцу раванских елемената.

Математичари су седамдесетих година прошлог века дефинитивно генерализовали теорију тако је Oden увео низ генерализација и проширио примену на вишедимензионално подручје, еуклидске просторе и подручје нелинеарне анализе. Од тада се МКЕ развија са развојом рачунара [19].

За дефинисање и извођење основних једначина у методи коначних елемената користи се једна од следећих метода:

- Директна метода;
- Варијациона метода;
- Метода резидуума;
- Метода баланса енергије.

Сама процедура решавања проблема методом коначних елемената састоји се из пет специфичних корака:

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

Фазе анализе одређеног проблема методом коначних елемената се састоје из пет фаза:

- Постављање задатка;
- Припрема анализе (препроцецирање);
- Анализа (процесирање);
- Обрада резултата (постпроцесирање);
- Провера и анализа резултата.

Изложена процедура МКЕ анализе се понавља до достизања жељене прецизности очекиваних резултата.

У МКЕ анализи производних процеса, сам процес се мора посматрати као систем међусобно повезаних релевантних параметара. Кључни технички проблеми који се морају разматрати у анализи процеса се односе на:

- Припремак: величина и облик, материјал, хемијски састав и микроструктура, особине течења у условима обраде, термичке и физичке особине;
- Алат: геометрија, стање површина, материјал и тврдоћа, температура прегревања, крутост и тачност;
- Услове у међуконтакту: финализација површина, подмазивање, трење и трансфер топлоте;
- Деформациону зону: механика пластичног деформисања, течење материјала, напони, брзине и температуре;
- Производну опрему: брзина, продуктивност, капацитет у погледу максималне силе и енергије, крутост и прецизност.

Произвољан приступ формирању модела у методи коначних елемената доводи до различитих решења. Да би се елиминисао индивидуалан приступ, развијени су поступци који контролишу апроксимације модела.

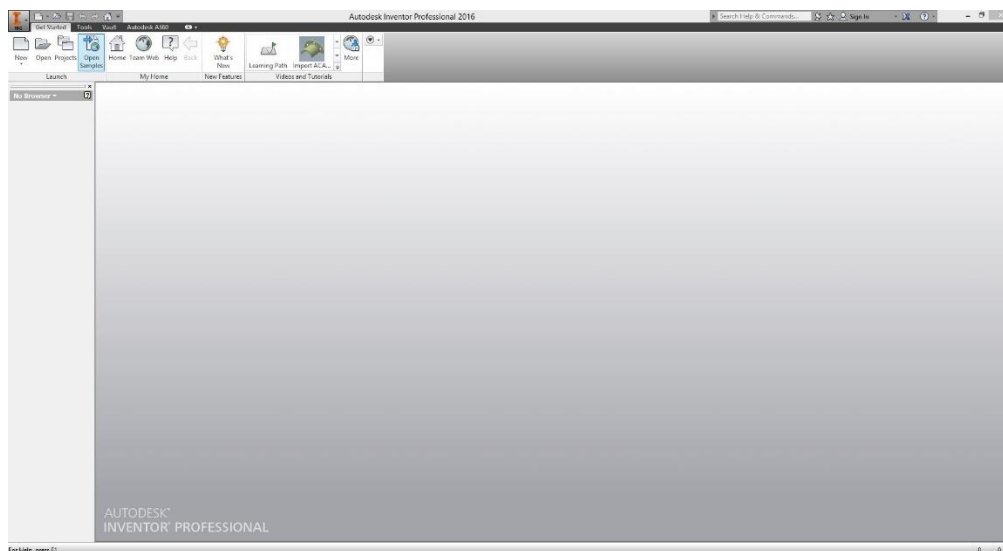
Први коришћен принцип ограничавања апроксимација изводи се процедуром доказа **конвергенције**.

Друга савременија метода је изведена софтверски, путем аутоматске процедуре којом се редефинише топологија почетног модела све док сукцесивним смањењем апроксимација, анализа не задовољи задату тачност – **метода адаптивних мрежа** [20].

6.4 Поступак израде завојне опруге

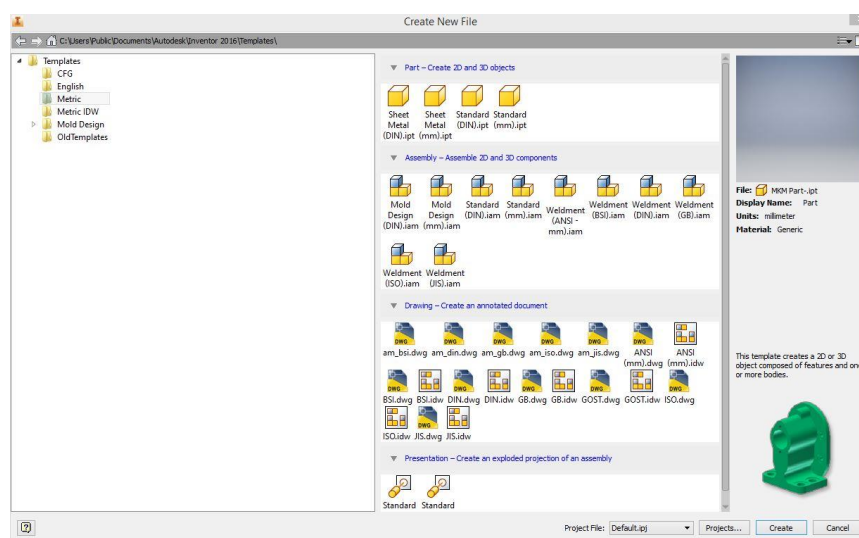
По покретању програма појавиће се основни прозор програма *Autodesk Inventor* (слика 6.1).

Избор модула, односно радног простора у *Autodesk Inventor*-у, врши се по покретању програма бирањем опције *New*.



Слика 6.1 – Основни прозор програма *Autodesk Inventor*

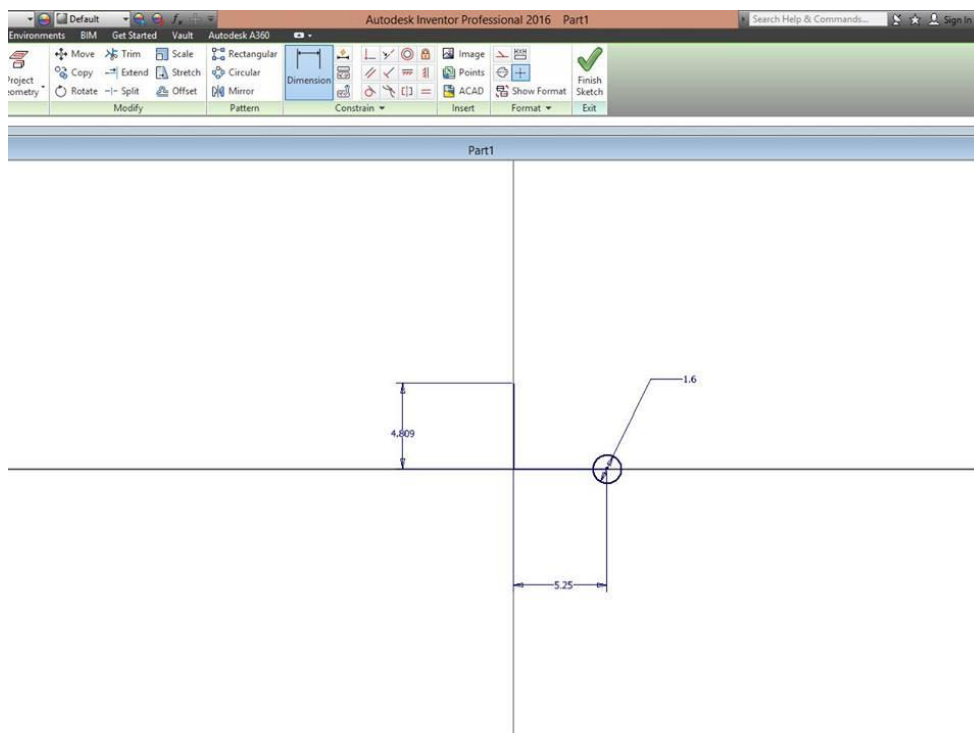
Одабиром опције *New* појавиће се прозор за креирање нове датотеке – *Create New File* (слика 6.2), где се може одабрати једна од неколико понуђених опција. Потребно је одабрати *Metric*, због метричког састава мерних јединица.



Слика 6.2 – Прозор за креирање нове датотеке – *Create New File*

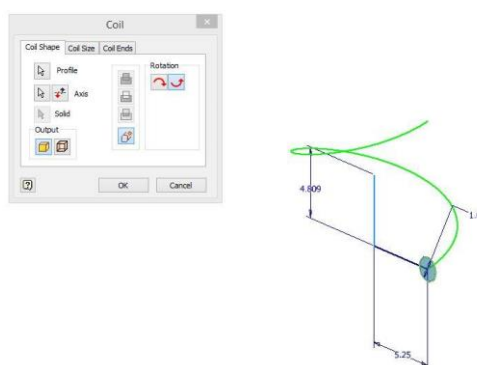
За креирање дела у *Autodesk Inventor*-у потребно је у прозору за креирање нове датотеке, *Create New File* одабрати опцију *Standard (mm).ipt*. По избору ове опције добија се основни прозор за скицирање.

За настајање модела потребно је прво дефинисати скицу помоћу алатки са *2D Sketch Panel –a* (слика 6.3). Скица се црта приближно, користећи алатке за цртање на панелу као што су *Line* и *Circle*.



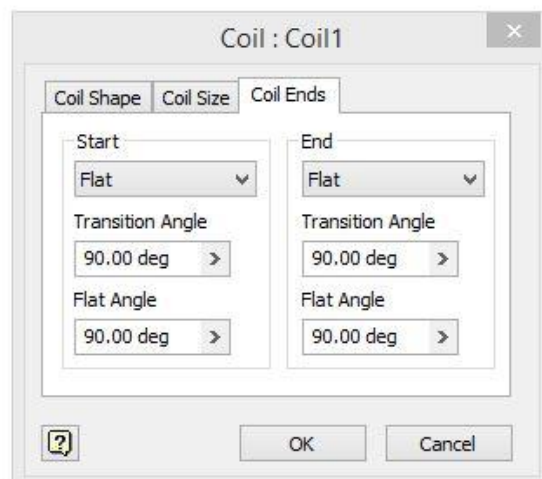
Слика 6.3 – Креирање скице са задатим ограничењима

По дефинирању скице прелази се у модул за креирање 3D објекта, а затим се бира опција *Coil* (слика 6.4).



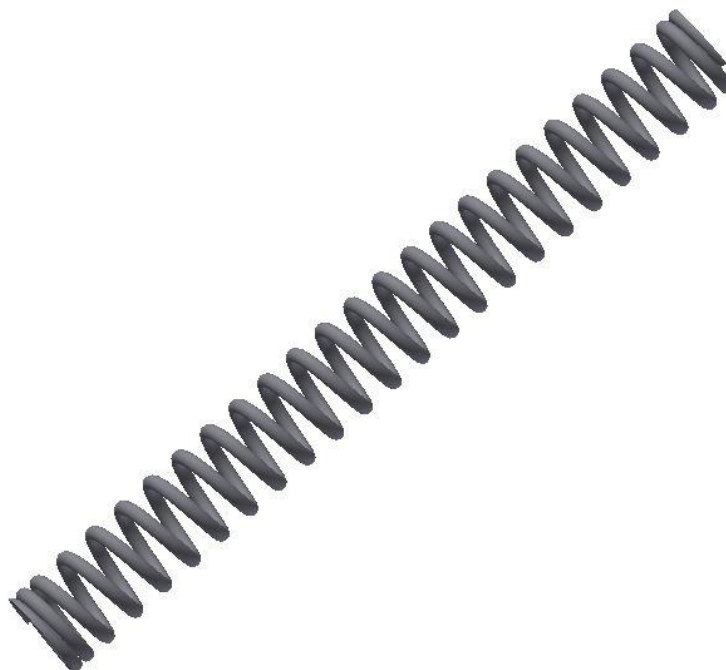
Слика 6.4 –Изглед прозора *Coil* и дефинисање профила од претходно дефинисане скице

У оквиру опције *Coil* треба дефинисати и *Coil Ends* (слика 6.5).



Слика 6.5 – Изглед опције Coil Ends

У оквиру опције *Coil* дефинише се растојање, број навоја и крајеви опруге након чега се добија коначан модел завојне опруге (слика 6.6).



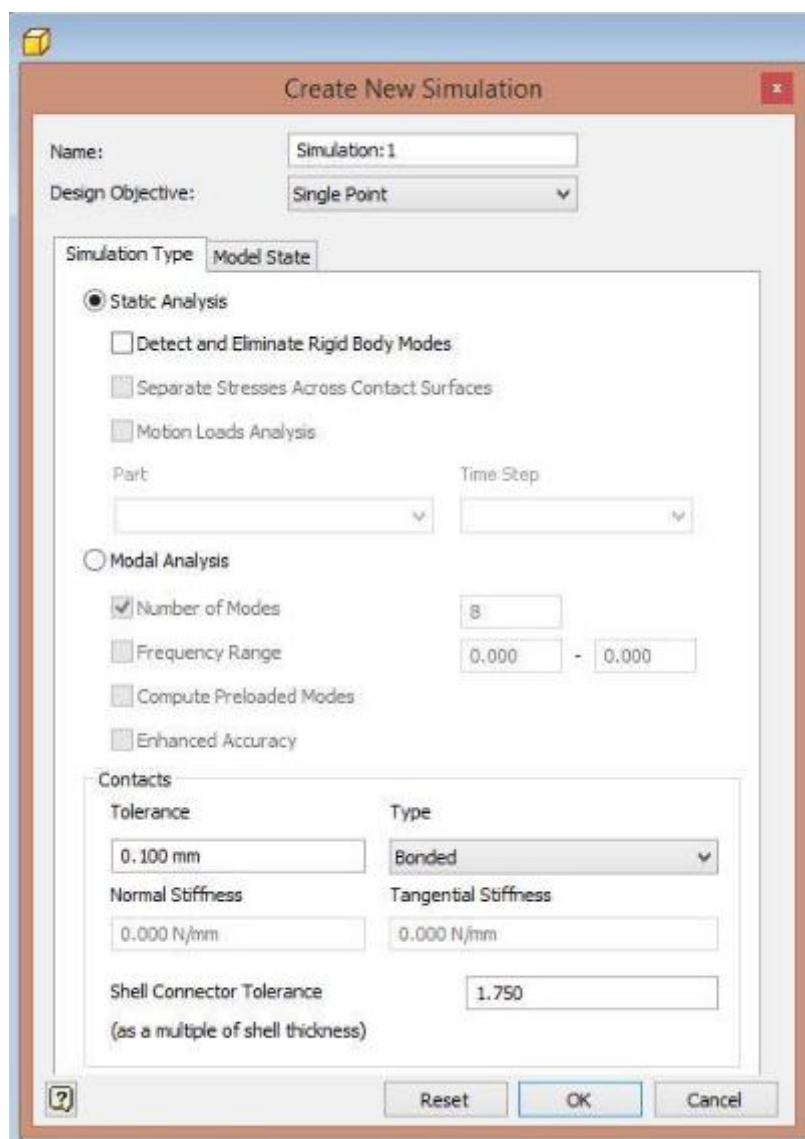
Слика 6.6 –Приказ завојне опруге

Слика 6.6 приказује добијени 3D објект, након чега је могуће дефинисати и визуални изглед модела, као и материјал од кога је сачињен.

7. Анализа напрезања цилиндричне завојне опруге методом коначних елемената

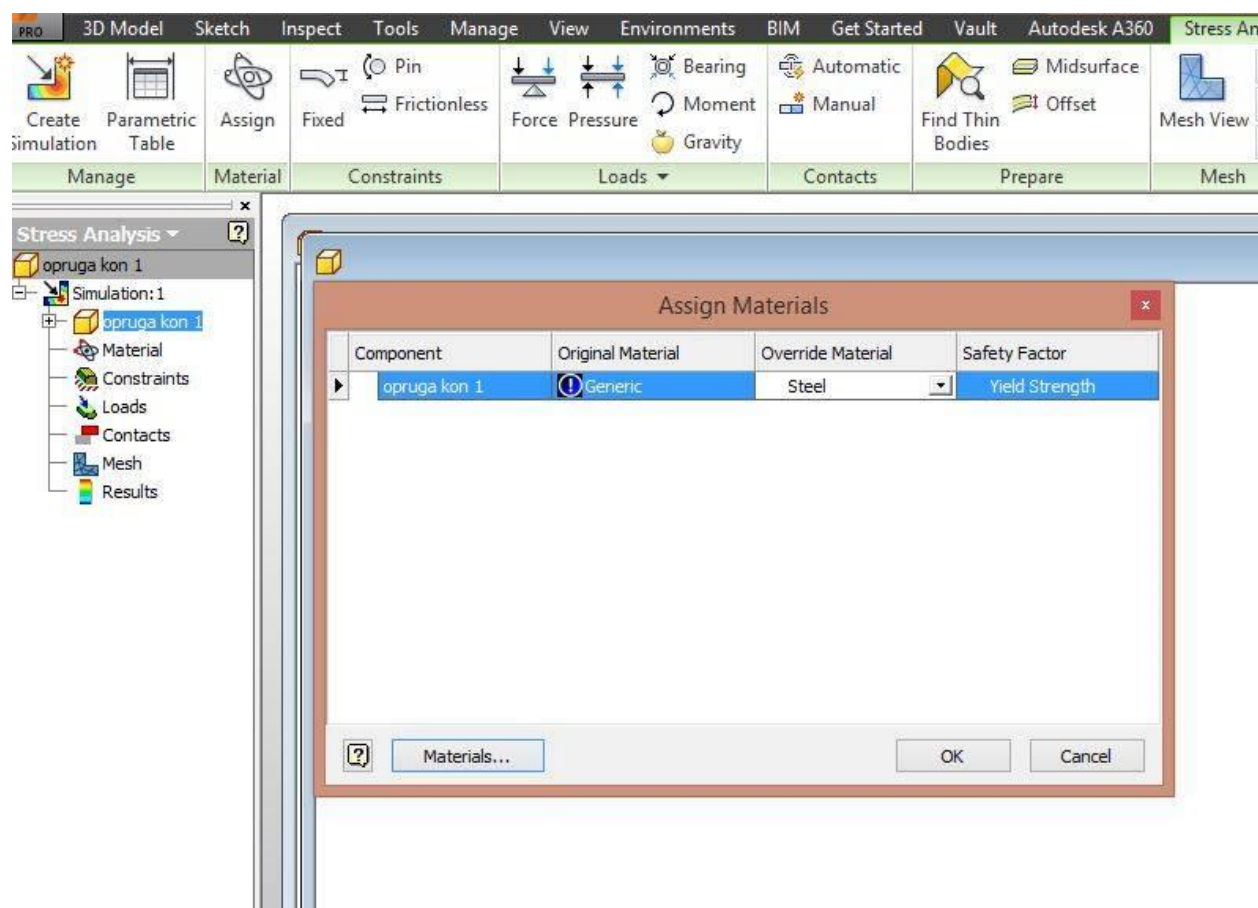
У овом делу рада дата је упоредна анализа напонских стања цилиндричне завојне опруге различитих материјала, попречних пресека и дебљине жице. Испитивање ове опруге се врши у програму *Autodesk Inventor* помоћу команде *Stress Analysis*. На овој картици за испитивање налазе се команде које се користе приликом испитивања: *Create Simulation*, *Assign*, *Fixed*, *Force*, *Mesh View* и *Simulate*.

Кликом на палету алата *Stress Analysis* бира се прва помоћна команда *Create Simulation* у оквиру које је потребно дефинисати име и врсту симулације (слика 7.1).



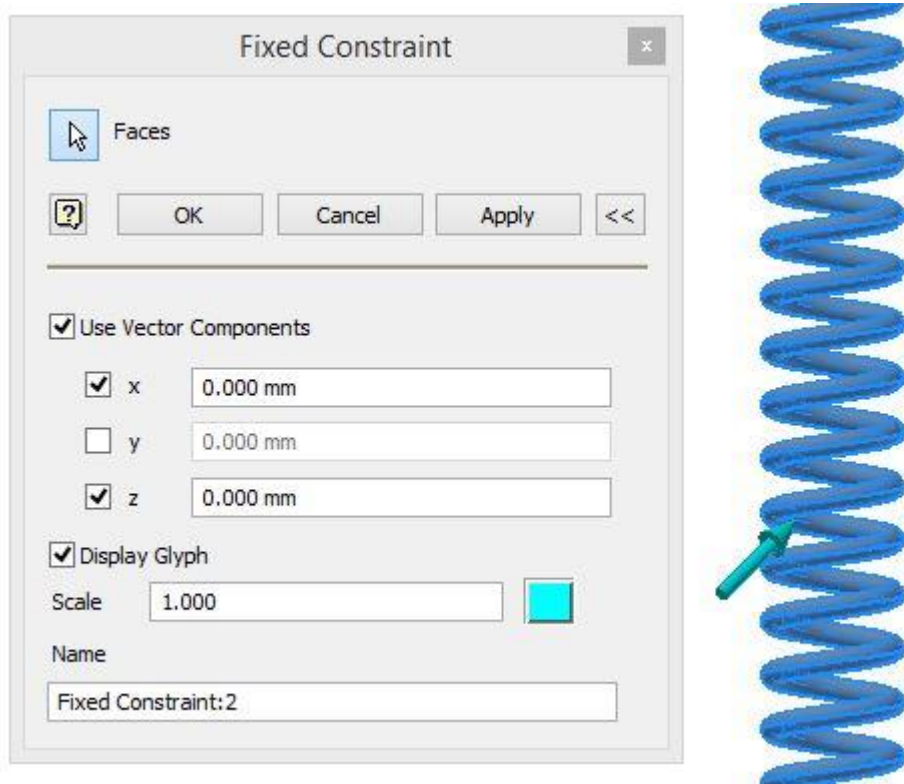
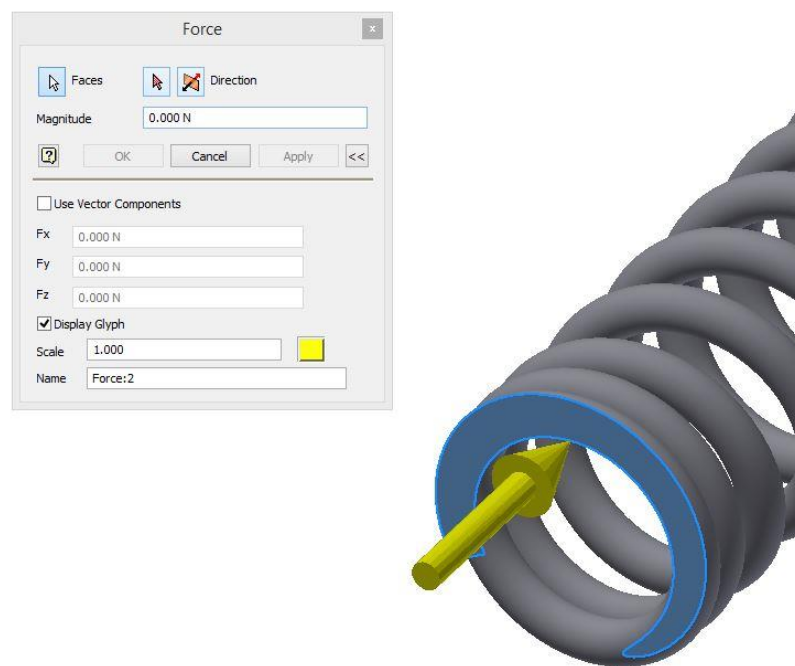
Слика 7.1 – Команда за покретање анализе

Након команде *Create Simulation* бира се команда *Assign*, и кликом на ову команду отвориће се нови прозор где се задаје врста материјала (слика 7.2).



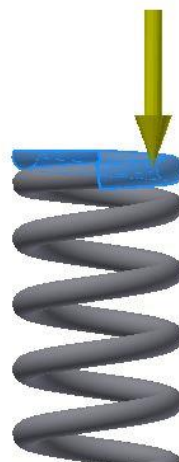
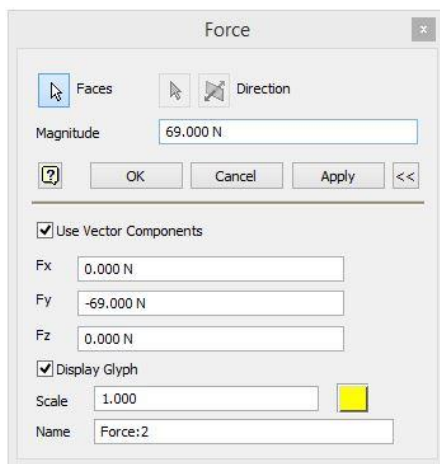
Слика 7.2 – Команда за задавање материјала

Следећи корак је дефинисање површине која ће бити фиксирана. Задавање ограничења је од изузетне важности за креирање симулације и има веома велики утицај на резултате. То се остварује помоћу команде *Fixed*. Кликком на ову команду отвара се нови прозор и селекује се површина која ће бити фиксирана. Могуће је прошири *dialog box* за још детаљнија подешавања. У овом случају потребно је фиксирати *x* и *z* компоненте како не би дошло до померања опруге у тим правцима, што је приказано на слици 7.3.



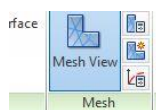
Слика 7.3 – Приказ команде Fixed

Помоћу команде *Force* задаје се оптерећење. Кликом на ову команду отвориће се нови прозор где се уноси вредност силе и место где та сила делује (слика 7.4).



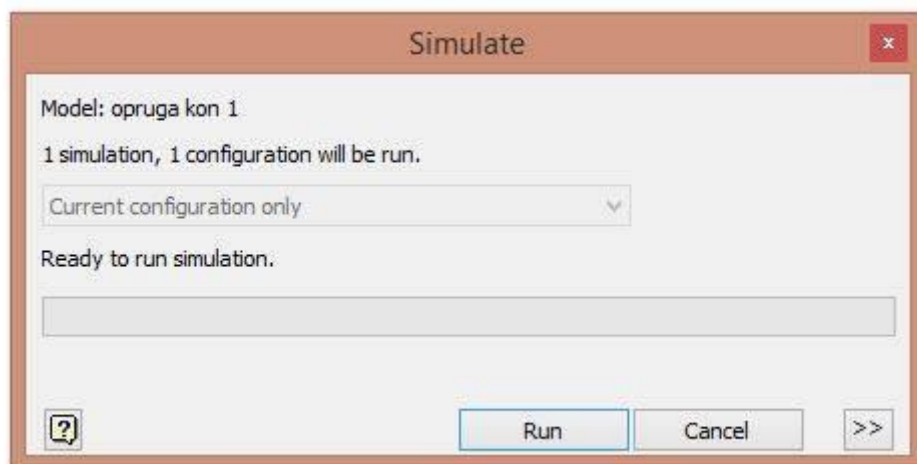
Слика 7.4 – Приказ команде *Force*

Након задавања силе потребно је генерисати мрежу коначних елемената. То се остварује кликом на команду *Mesh View* (слика 7.5).



Слика 7.5 – Приказ команде *Mesh View*

Кликом на опцију *Simulate*, а након тога на *Run* покренуће се испитивање ове опруге. Када се испитивање заврши у стаблу је могуће видети резултате испитивања (слика 7.6).

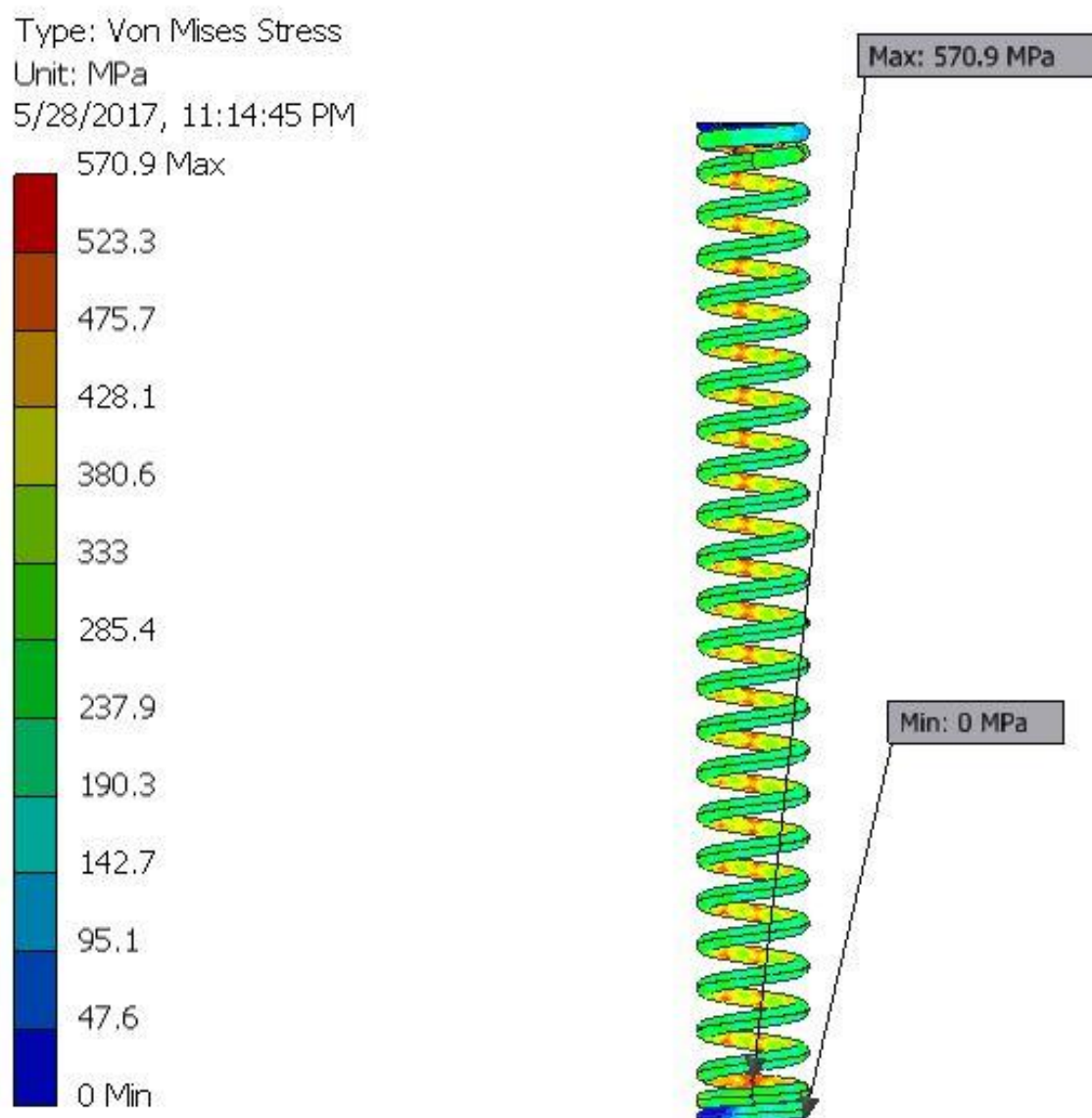


Слика 7.6 – Приказ покретања симулације

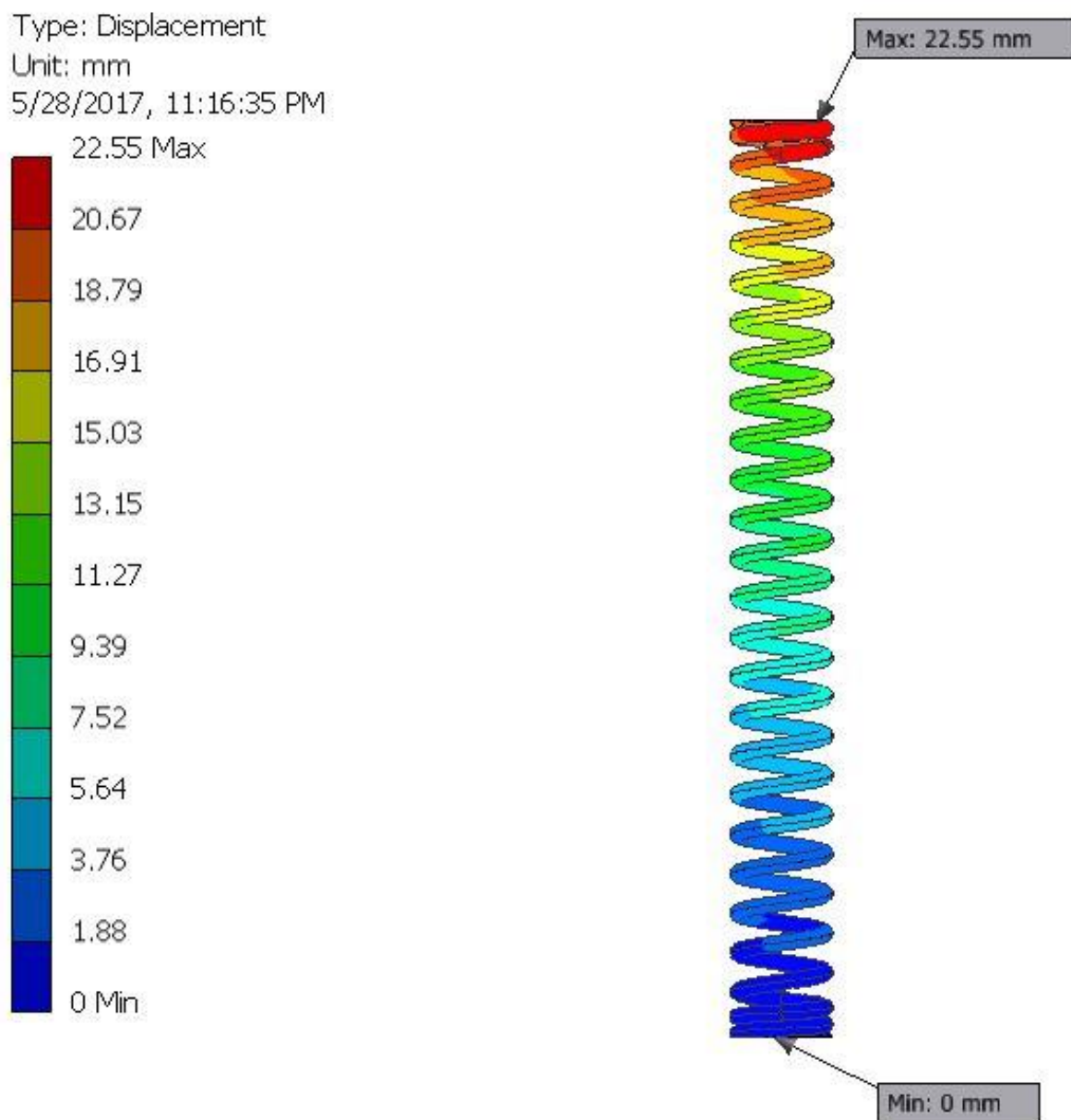
На основу приказаних резултата истраживања, на слици 7.7 је дат приказ Von Misesovog напона, док је на слици 7.8 дат приказ померања. Резултати напона добијених прорачуном и симулацијом у програму Autodesk Inventor се скоро поклапају, разлика је пар процената (табела 7.1).

Табела 7.1 – Аналитичке и нумеричке вредности напона и деформација

	Нумерички	Аналитички	Разлика у %
Напон, N/mm ²	570,9	562,998	1,38
Померање, mm	22,55	25,113	9,4



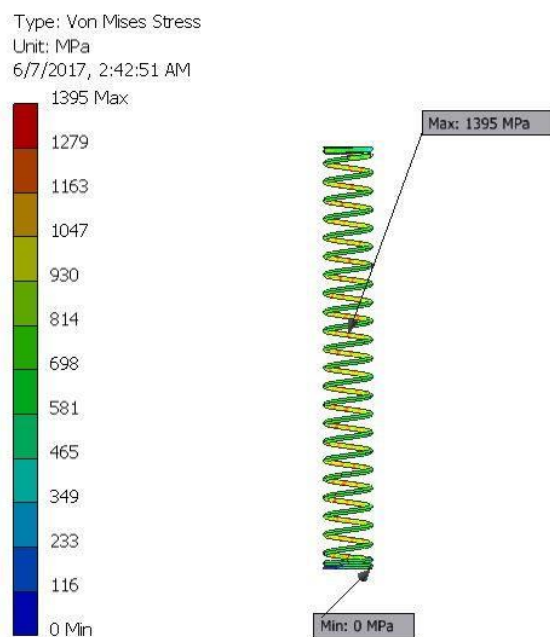
Слика 7.7 – Приказ напона



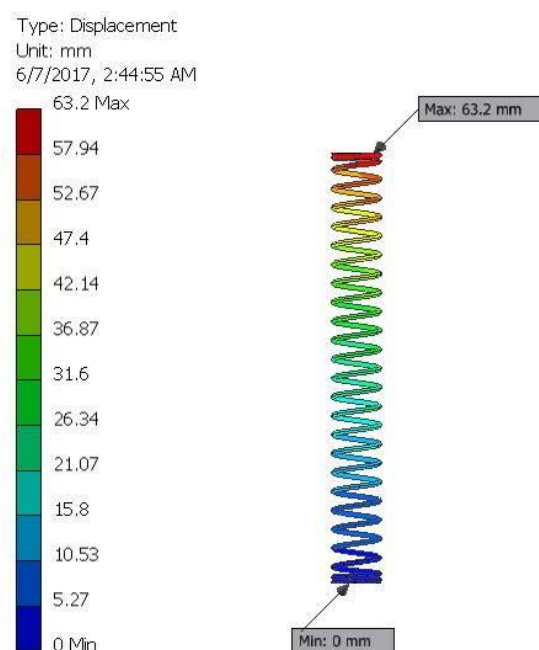
Слика 7.8 – Приказ померања

7.1 Анализа напрезања цилиндричне завојне опруге дебљине жице од 1 mm, 1,5 mm и 2 mm

Испитивање ових опруга такође се врши у програму *Autodesk Inventor* помоћу команде *Stress Analysis*. Анализа је вршена на исти начин као и претходна, с тим што је једина разлика у дебљини жице. На слици 7.9 је дат приказ напона опруге дебљине жице од 1 mm, а на слици 7.10 је дат приказ померања.

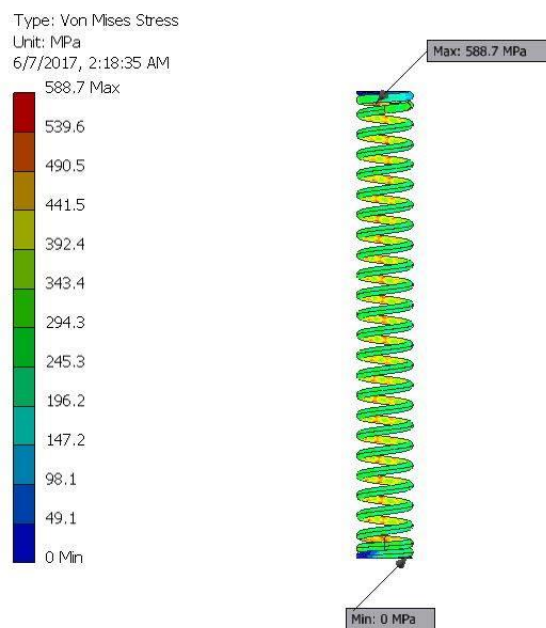


Слика 7.9 – Приказ напона опруге дебљине жице од 1 mm

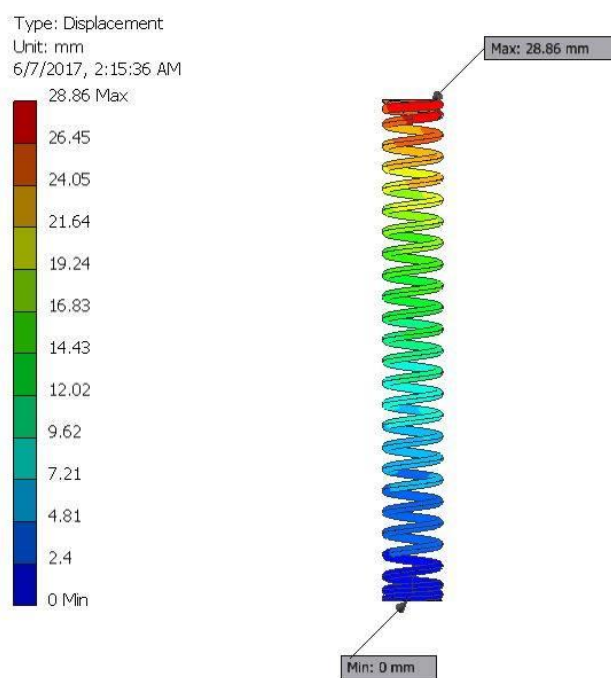


Слика 7.10 – Приказ померања опруге дебљине жице од 1 mm

На слици 7.11 је дат приказ напона опруге дебљине жице од 1,5 mm, а на слици 7.12 је дат приказ померања.

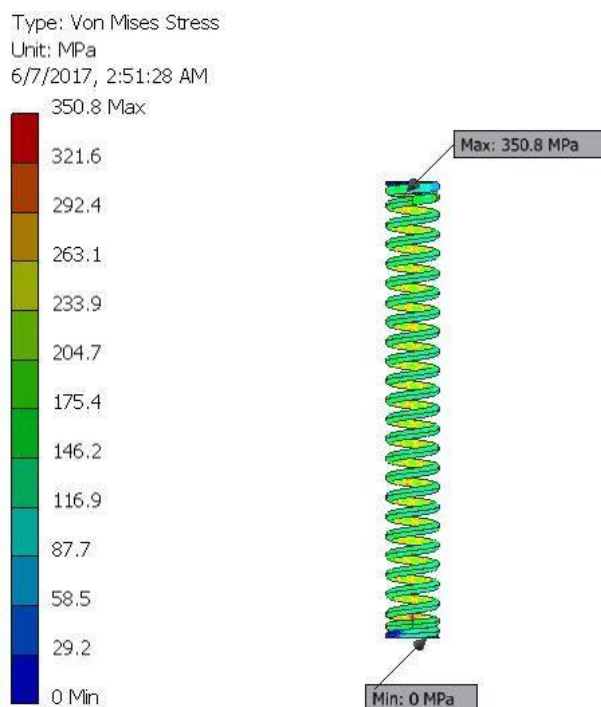


Слика 7.11 – Приказ напона опруге дебљине жице од 1,5 mm

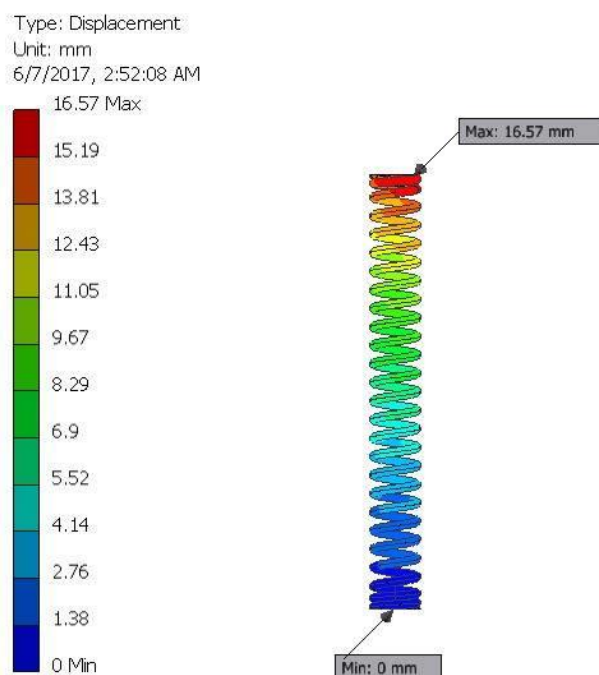


Слика 7.12 – Приказ померања опруге дебљине жице од 1,5 mm

На слици 7.13 је дат приказ напона опруге дебљине жице од 2 mm, а на слици 7.14 је дат приказ померања.



Слика 7.13 – Приказ напона опруге дебљине жице од 2 mm

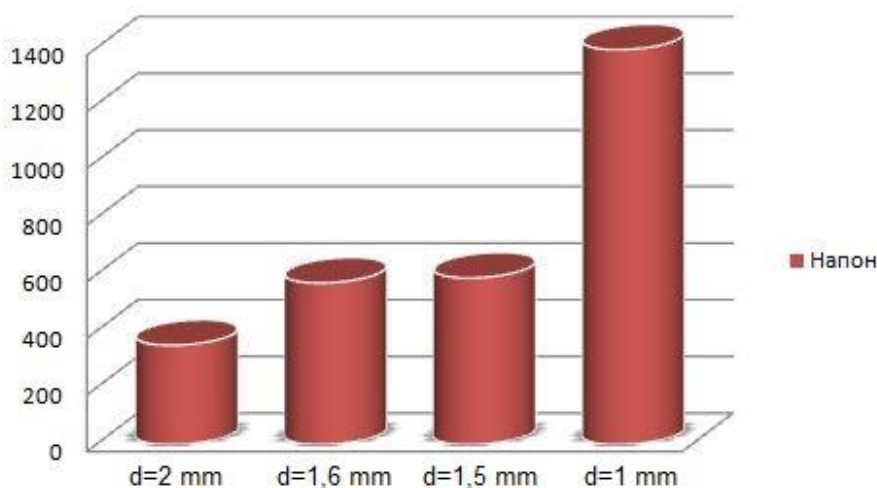


Слика 7.14 – Приказ померања опруге дебљине жице од 2 mm

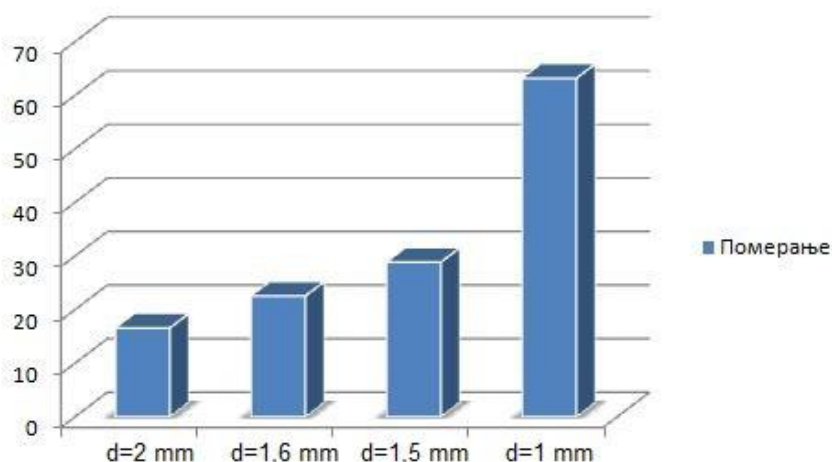
Упоређујући резултате анализе цилиндричних завојних опруга различитих дебљина жице закључује се да се резултати знатно разликују (табела 7.2, дијаграми 7.1 и 7.2). При повећању пречника опруге долази до смањења напона и померања, и обрнуто. Са смањењем пречника жице знатно расте напон, као и померање.

Табела 7.2 – Нумеричке вредности напона и померања опруге различитих дебљина

	d=2 mm	d=1,6 mm	d=1,5 mm	d=1 mm
Напон, N/mm²	350,8	570,9	588,7	1395
Померање, mm	16,57	22,55	28,86	63,2



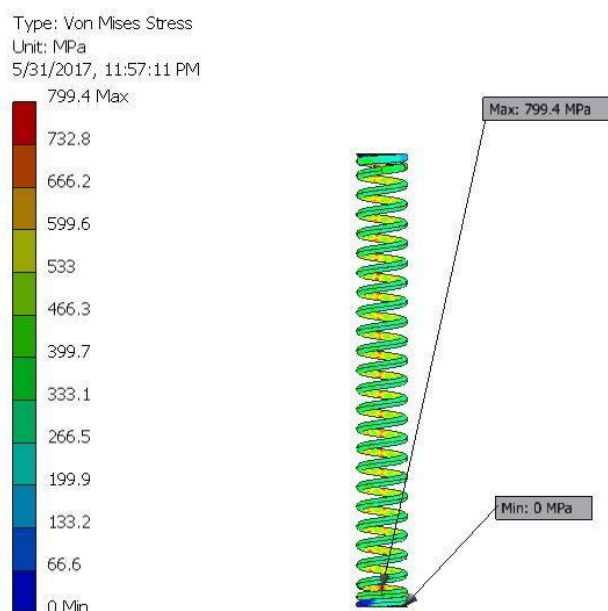
Дијаграм 7.1 – Вредности напона (MPa) опруга различитих дебљина жице



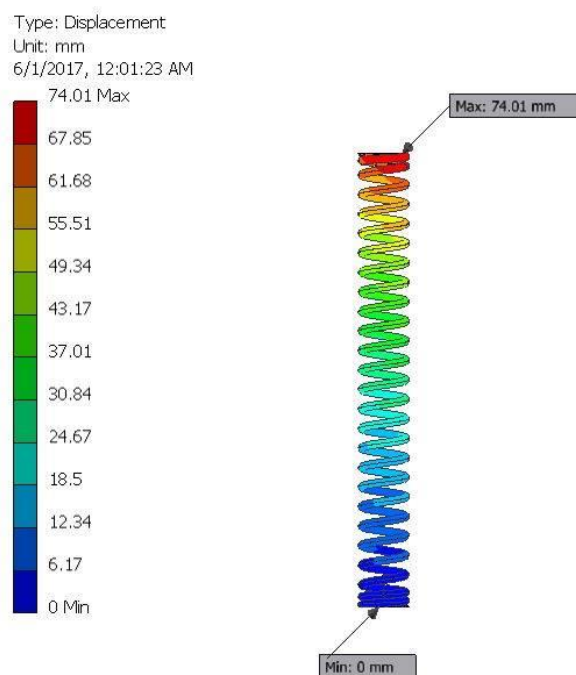
Дијаграм 7.2 – Вредности померања (mm) опруга различитих дебљина жице

7.2 Анализа напрезања цилиндричне завојне опруге од композитног материјала

Анализа је вршена на исти начин као и претходна, с тим што је једина разлика у материјалу опруге. Испитана опруга је израђена од композитног материјала (nylon 6/6). На слици 7.15 је дат приказ напона, а на слици 7.16 је дат приказ померања.



Слика 7.15 – Приказ напона опруге израђене од композитног материјала

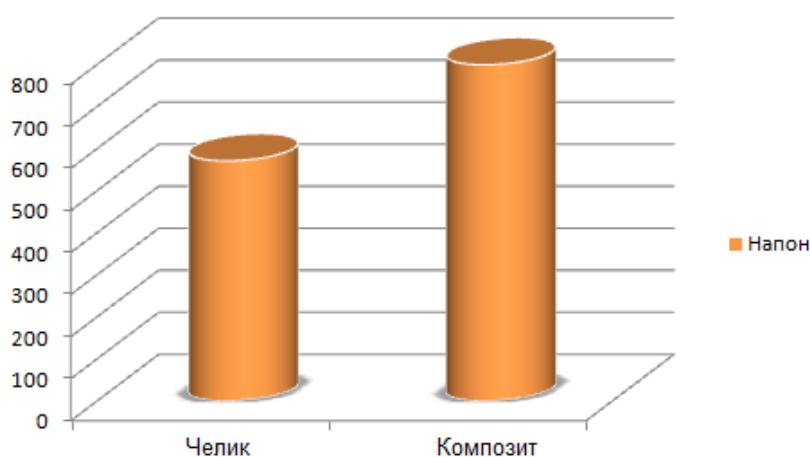


Слика 7.16 – Приказ померања опруге израђене од композитног материјала

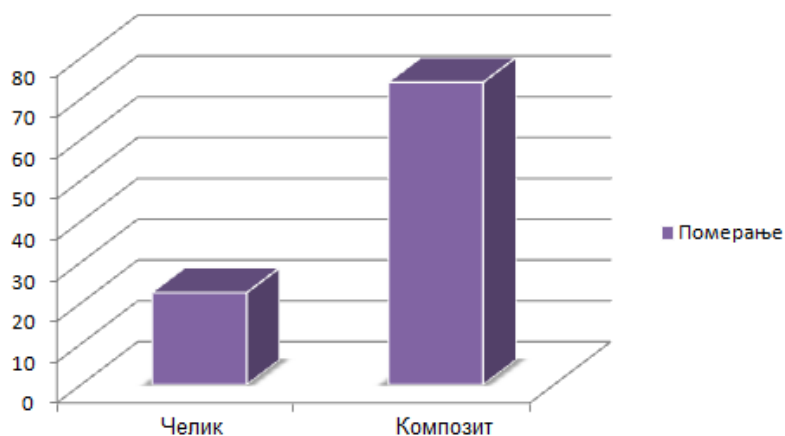
Резултати анализе цилиндричне завојне опруге израђене од челика и опруге од композитног материјала приказани су у табели 7.3. Напон и померање код опруге израђене од композитног материјала су знатно већи него код опруге израђене од челика, и изнад су дозвољених вредности. Њихово поређење је дато на дијаграмима 7.3 и 7.4.

Табела 7.3 – Нумеричке вредности напона и померања опруге различитих материјала

	Опруга од челика	Опруга од композита
Напон, N/mm ²	570,9	799, 4
Померање, mm	22,55	74,01



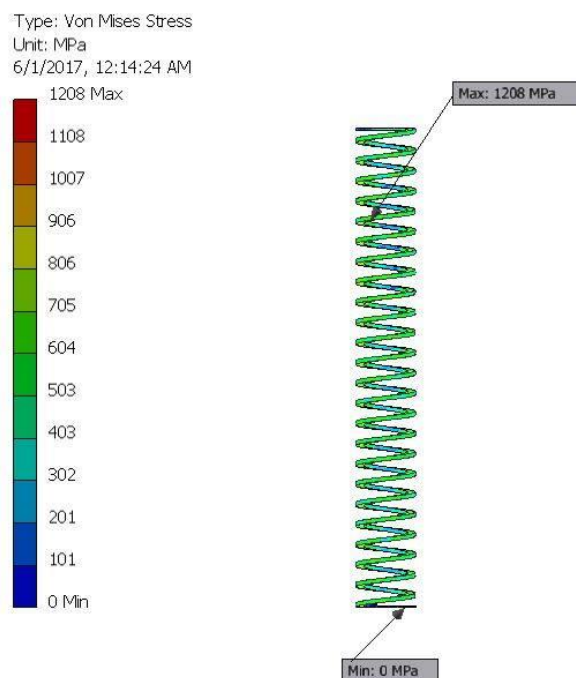
Дијаграм 7.3 – Вредности напона (Мра) опруга различитих материјала



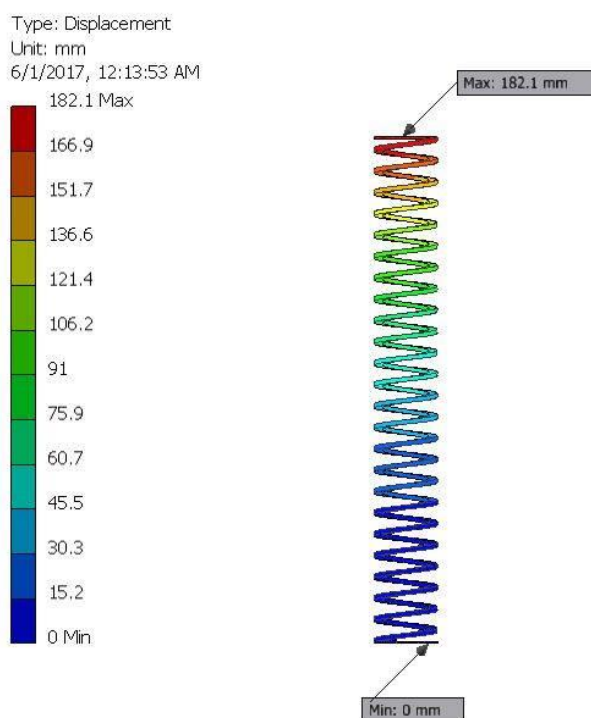
Дијаграм 7.4 – Вредности померања (mm) опруга различитих материјала

7.3 Анализа напрезања завојне опруге правоугаоног попречног пресека

У овом поглављу извршена је анализа завојне опруге правоугаоног попречног пресека димензија 1,6 x 0,8 mm. На слици 7.17 је дат приказ напона, а на слици 7.18 је дат приказ померања.



Слика 7.17 – Приказ напона опруге правоугаоног попречног пресека

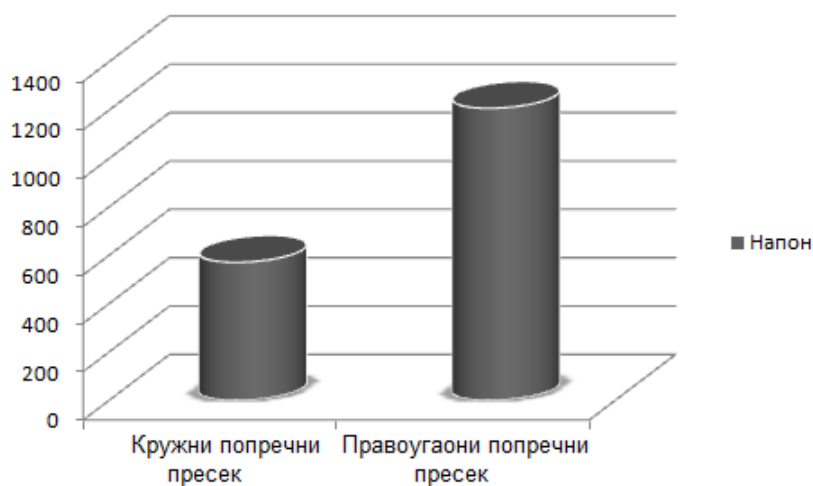


Слика 7.18 – Приказ померања опруге правоугаоног попречног пресека

Осим облика попречног пресека, остале карактеристике су у потпуности исте као и код опруге кружног попречног пресека. Добијене вредности напона и померања за обе опруге су приказане у табели 7.4, као и на дијаграмима 7.5 и 7.6.

Табела 7.4 – Нумеричке вредности напона и померања опруге различитог попречног пресека

	Кружни попречни пресек	Правоугаони попречни пресек
Напон, N/mm ²	570,9	1208
Померање, mm	22,55	182,1



Дијаграм 7.5 – Вредности напона (Мра) опруга различитог попречног пресека



Дијаграм 7.6 – Вредности померања (mm) опруга различитог попречног пресека

8. Закључак

Завојне цилиндричне опруге су веома чест елемент у различитим видовима наоружања. Услови под којима се сабија повратна опруга пиштоља и њен даљи рад зависе од:

- Карактеристика муниције која доводи систем, у коме се налази опруга, у кретање;
- Маса елемената за које је опруга везана.

Приликом пројектовања опруге морају се задовољити специфични захтеви конструкције у коју се уграђују и саме намене опруге. Код повратне опруге пиштоља захтеви који произилазе из функције пиштоља могу се сврстати у две групе:

- Захтеве дефинисане геометријом и динамичким карактеристикама покретних делова;
- Ергономске захтеве.

Да би била задовољена прва група захтева крутост опруге мора бити тако изабрана да се енергија покретних делова искористи за сабијање опруге до дужине која обезбеђује исправно функционисање пиштоља. Са друге стране не сме бити ни веома мала крутост опруге јер би у том случају енергија покретних делова била много већа од енергије акумулисане у опрузи њеним сабијањем и долазило би до непотребног ударања покретних о непокретне делове пиштоља, а такође би и брзина којом се обавља повратни ход била мала и угрожавала функцију.

Испуњењем ергономских захтева обезбеђује се лако повлачење навлаке у задњи положај као и компактност конструкције при кретању нормално развијеног стрелца.

Да би се испунили претходно дефинисани захтеви могу се пројектовати опруге израђене од жице кружног и правоугаоног попречног пресека или вишежилне опруге. Свака од ових опруга има своје специфичности. Због завојног облика опруга расподела напона по попречном пресеку завојка је неравномерна и максимални напони се јављају ближе оси опруге, а тачно место највећих напона зависи од облика и димензија попречног пресека.

У овом раду су анализиране цилиндричне завојне опруге кружног попречног пресека. Место појаве највећих напона је на унутрашњој страни кривине завојака и ове опруге имају најбоље искоришћење материјала у односу на остварени рад у опрузи.

У раду је извршено упоређивање опруга различитих дебљина жице, материјала и попречних пресека. Дошло се до закључка да са смањењем дебљине жице долази до повећања напона и деформација, и обрнуто. Такође је закључено да су применом опруге мање дебљине жице од прописане вредности (1,6 mm) у случају поштоља CZ 999, напони и деформације изнад дозвољених вредности чиме је елиминисана могућност корекције дебљине жице.

Промена облика попречног пресека завојка са кружног на правоугаони утиче на повећање напона при коме долази до губитка носивости опруге односно до потпуног пластичног деформисања завојка. Завојне цилиндричне опруге од жице правоугаоног попречног пресека имају низ предности, али и мана у односу на опруге од жице кружног попречног пресека. Променом начина намотавања опруге, односно променом положаја страница правоугаоника према оси опруге утиче се на смањење или повећање силе у опрузи, као и на њене геометријске величине и положај места максималних напрезања. Материјал у опругама од жице правоугаоног попречног пресека је знатно мање искоришћен, него што је то случај код опруга са кружним попречним пресеком.

Анализом могућности замене кружног попречног пресека опруге правоугаоним у случају опруге пиштоља CZ 999 закључено је да напони и деформације, у случају правоугаоних профила, знатно превазилазе дозвољене вредности, те оваква замена није могућа.

Још једна карактеристика која може утицати на избор облика попречног пресека завојка је и технологија намотавања опруга. Жица кружног облика се директно са котура води на машину за намотавање опруга, док се жица правоугаоног облика прво “пегла” између ваљака па се навија опруга.

У раду је извршена и анализа опруге израђене од композитног материјала (nylon 6/6). За дати материјал вредности напона и деформација су знатно изнад вредности добијених у случају опруге израђене од челика, чиме је елиминисана могућност њихове примене у конкретном случају. Применом опруге израђене од челика могу се избећи проблеми који се јављају при коришћењу опруге од композитног материјала. Композитне опруге још увек нису довољно испитане. Требало би радити на испитивању нових материјала (од карбонских или стаклених влакана), који поседују боље карактеристике. Тренутно се анализира могућност примене ових опруга код аутомобила Volvo XC90, који још увек није пуштен у рад.

На основу свега изреченог у овом раду предлаже се да се као опруга пиштоља CZ 999 и даље користи цилиндрична завојна опруга кружног попречног пресека израђена од челика јер обезбеђује сигурно и стабилно функционисање пиштоља.

Литература

- [1] Милтеновић В., Огњановић М, Машински елементи III, Ниш – Београд, 1995.
- [2] Стојановић П., Опруге, семинарски рад, Ниш, 2013.
- [3] Kim K., A study on mechanical properties and flow-induced vibrations of coil-shaped holddown spring, *Nuclear Engineering and Design*, 240, 2010., p. 747-755.
- [4] Chaudhury A.N., Datta D., Analysis of prismatic springs of non-circular shape and non-prismatic springs of circular coils shape by analytical and finite element methods, *Journal of Computational Design and Engineering*, 81, 2017., p. 550-579.
- [5] Choi B., Numerical method for optimiying design variables of carbon-fiber-reinforces epoxy composite coil springs, *Composites Part B*, 82, 2014., p. 42-49.
- [6] K.E.Kim, J.H.Han, Y.M.Sung, K.K.Jee, W.Y.Jang, Effect of changed in coil orientation for SMA spring, *Journal of Alloys and Compounds*, 577, 2012., p. 741-744.
- [7] Tsubouchi T., Takahashi K., Kuboki T., Development of coiled springs with high rectangular ratio in cross-section, *Procedia Engineering*, 81, 2014., p. 574 – 579.
- [8] Инжењерско машински приручник, II издање, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, 1992.
- [9] Вукан В., Опруге, II издање, Бугојно, 1991.
- [10] Лубарда В., Отпорност материјала, НИО Универзитетска ријеч, Титоград, 1985.
- [11] Недељковић М., Прорачун и конструкција еластичних елемената – металне опруге, Ниш, 1982.
- [12] Глигорић Р., Машински елементи, Нови Сад, 2015.
- [13] Николић В., Машински елементи, Крагујевац, 2004.
- [14] Милтеновић М., Машински елементи – облици, прорачун и примена, Ниш, 2001.
- [15] Огњановић М., Машински елементи, Београд, 2016.
- [16] Дедић А., Основи машинства II део, Београд 2008.
- [17] Николић В., Ђорђевић З., Благојевић М., Машински елементи – збирка задатака, Крагујевац, 2008.

- [18] <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>, посећено 01.04.2017.
- [19] Вучковић Д., Анализа напрезања опруга коришћењем програма SolidWorks, мастер рад, Чачак, 2012.
- [20] Којић М., Славковић Р., Ивковић М., Грујовић Н., Метода коначних елемената I, Крагујевац, 1998.