

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: CAD/CAM/CAE I

Број индекса: 182/2007

Никола Д. Миљковић

**Симулација двоугаоног савијања у
корачном алату**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Весна Мандић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да уради анализу нумеричке симулације двоугаоног савијања у корачном алату на хидрауличној преси, користећи методу коначних елемената.

Препоручена литература:

- [1] Весна Мандић, *Физичко и нумеричко моделирање процесима обраде деформисањем*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац 2012
- [2] Весна Мандић, *Моделирање и симулација у обради деформисањем*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2005
- [3] User manual, Simufact.forming, v.11.01, 2012.

Крагујевац, датум

ментор:

др Весна Мандић

Резиме

Концепт рада је замишљен тако да се прво теоријски прикаже процес савијања и анализа напона и момента савијања у поступку ове обраде. У делу нумеричког моделирање процеса, дефинисани су основни појмови и метода на којој се базира цео концепт ове области. Након препознавања проблема дат је опис програма Simufact.forming кроз кораке уноса улазних података потребних за симулацију. После завршетка симулације приказан је преглед добијених резултата након чега је извршена анализа истих.

Кључне речи: савијање, нумеричко моделирање процеса, Simufact.forming, анализа.

Abstract

Concept of this work is designed to show theoretical process and analysis of bending stress and bending moment in the process. In part of the numerical modeling of process, basic terms and methods on who the whole concept is based on, are defined. Description of the program Simufact.forming is given through the steps of data imported for simulation, after recognizing the problem. After completion of the simulation, results are presented and analysed.

Key words: bending, numerical modeling of process, Simufact.forming, analyse.

Садржај

Садржај	4
1.0 Увод	6
2.0 Обрада метала деформисањем	7
2.1. Обликовање лима савијањем	8
2.1.1. Угаоно савијање	9
2.1.2. Кружно савијање	10
2.1.3. Остали видови савијања	12
2.2. Положај неутралног слоја	13
2.3. Одређивање развијене дужине	18
2.4. Анализа угаоног савијања	20
2.4.1. Анализа двоугаоног савијања	21
2.5. Деформације при савијању	21
2.6. Напони и моменти савијања	25
2.6.1. Моменти унутрашњих сила	25
3.0 Еластична повратност	36
4.0 Нумеричко моделирања процеса	38
4.1. Метода коначних елемената	39
4.1.1. Идентификација проблема	39
4.1.2. Дискретизација	40
4.1.3. Врсте FE елемената	41
4.1.4. Фазе FE анализе	41
4.2. FEM моделирање процеса	42
4.3. Улазни подаци за нумеричко моделирање процеса	43
4.3.1. Особине и понашање материјала	43
4.3.2. Геометрија	44
4.3.3. Генерисање FE мреже и <i>remeshing</i>	44
4.3.4. Услови у међуконтакту (трење и трансфер топлоте)	45
4.4. Карактеристика FE софтвера (поузданост и време прорачуна)	45
4.5. Примењени софтвер	46
5.0 Опис проблема за решавање	47
6.0 Нумеричка симулација двоугаоног савијања	49

6.1.	Нумеричка симулација при коришћењу „tabular motion“ пресе	49
6.1.1.	Дефинисање типа производног процеса	49
6.1.2.	Увоз геометрије алата	52
6.1.3.	Дефинисање материјала радног елемента	54
6.1.4.	Дефинисање опруга	55
6.1.5.	Формирање мреже коначних елемената	56
6.1.6.	Резултати симулације	57
6.2.	Нумеричка симулација на хидрауличној преси	59
6.2.1.	Увоз геометрије алата	60
6.2.2.	Дефинисање пресе	62
6.2.3.	Резултати симулације	63
7.0	Анализа добијених резултата	67
8.0	Закључак	70
Литература		71

1.0 Увод

У савременој индустрији 80% свих металних материјала бива обрађено у неким од технолошких процеса пластичног обликовања. Компаније које се баве овом врстом обраде метала, морају се високо позиционирати на тржишту како би осигурале добро пословање. Овај циљ постижу пратећи у корак светске трендове у производњи и пројектовању. Нумеричко моделирање процеса је једно од понуђених решења.

Један од софтверских алата који је доступан за овакав тип моделирања је Simufact.forming, водећи програмски пакет у области компјутерског подржаног инжењерства. Користи се за компјутерску симулацију индустријских процес обликовања.

Циљ овог рада је да се изврши анализа процеса савијања лима у корачном алату на хидрауличној преси. Технологија обликовања и конструктивно решење алата је добијено од произвођача фирме „Unior-componenets“ a.d из Крагујевца.

2.0 Обрада метала деформисањем

Обрада метала деформисањем или обрада без скидања струготине, подразумева методу обраде при коме се радном делу даје жељени облик пластичним деформисањем услед дејства спољашњих сила. За разлику од обраде метала стругањем, овакав тип обраде је везан за серијску производњу.

Користећи ову технологију можемо остварити производњу готових делова најразличитијих облика и димензија, користећи различите метале са траженом тачношћу и квалитетом обраде. Циљ овог начина прераде је што мањи број потребних операција са најмањим отпадом материјала.

Како би се полуфабрикант у облику лимова, плоча, цеви и др. могао прерађивати, потребно је применом оптерећења довести га у стање пластичног течења односно оптеретити га изнад границе еластичности. Потребан рад и силу остварују машине за обраду деформисањем. У ту групу спадају пресе, машине за савијање, ковачке пресе итд. Геометрију радног комада обезбеђује алат који се монтира на машину која остварује потребну силу.

Обрада се може вршити у хладном и топлом стању. У топлом стању деформабилност материјала је повећана, тако да је потребна мања сила а самим тим и мањи утрошак енергије за процес деформисањем. Током обраде у хладном стању материјал ојачава, већа је прецизност, површине су квалитетније и постижу се повољније механичке особине.

Технологија обраде је веома конкурентна у односу на друге својим техно-економским карактеристикама. Предности су:

- добре механичке особине делова
- релативно једноставна, брза и ефикасна израда делова великих димензија и сложених геометрија
- низак утрошак енергије по јединици масе комада
- ниска цена по јединици производа
- широк спектар делова је могуће произвести искључиво овом методом

У њене недостатке спадају:

- тешкоће при обради материјала које карактерише ниска почетна пластичност
- најчешће економска оправданост се постиже тек у серијској производњи
- појава великих деформационих сила и напона током појединих процеса обликовања доводи до поскупљивања израде алата и захтева машине велике снаге

За време процеса пластичног обликовања потребно је обратити пажњу на граничне вредности деформације, јер се у случају прекорачења разара структура материјала или се јављају дефекти. Како не би дошло до преоптерећења радног комада и алата, такође се не сме прекорачити интезитет контактних напона. За сваки технолошки поступак изводи се прорачун компоненти напона и деформација, а затим и прорачун деформационих сила и радова. За правилан избор машина и димензионисања алата ови параметри су неопходни.

Како пластичну деформацију увек прати и еластична, треба узети у обзир еластично исправљање при конструкцији алата. Последица ове појаве је промена димензије радног комада након растерећења. За ту величину потребно је извршити корекцију облика алата у односу на тражене димензије. У већини случајева савијања зона пластичног деформисања је локална, односно обухвата мањи део комада где честице материјала мењају своје међусобно растојање на месту где дејствују силе [1].

2.1. Обликовање лима савијањем

Обрада савијањем је веома заступљена грана технологије у металној индустрији. Као полупроизводи за даљу обраду савијањем користе се најчешће лимови и траке, док се ређе врши обрада: цеви, шипки, ваљаних профила итд. На слици 2.1 су приказани делови добијени овом технологијом деформисања.



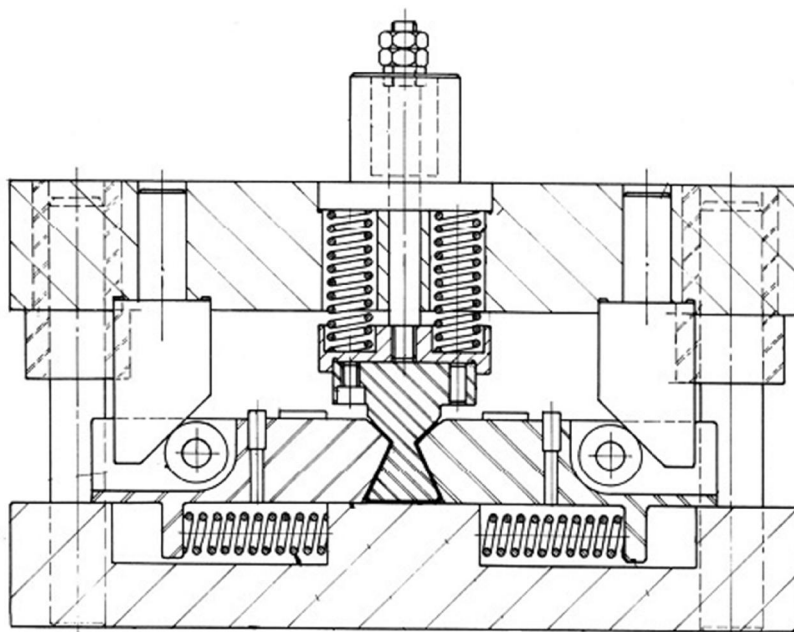
Слика 2.1 - Савијени делови

Упоредо са развојем технологије заваривања, како у малосеријској тако и у великосеријској производњи, технологија савијања прогресивно потискује друге начине обраде у металној индустрији. Комбинацијом савијања и заваривања потискују се технологије ливења и ковања тешких делова као што су: кућишта турбине, цеви под притиском, кућишта тешких преса итд. Предности се огледају у једноставнијем производном процесу што се одражава кроз економске ефекте, а конструкције су лакше од ливених и отпорније су на ударна оптерећења.

Процес савијања се обавља у зависности од димензије и облика комада, као и самог карактера производње на:

- Алатима на пресама (коленастим, кривајним, фрикционим, ексцентричним, хидрауличним и специјалним пресама)
- Ваљцима на ротационим машинама
- Посебним уређајима на специјалним машинама

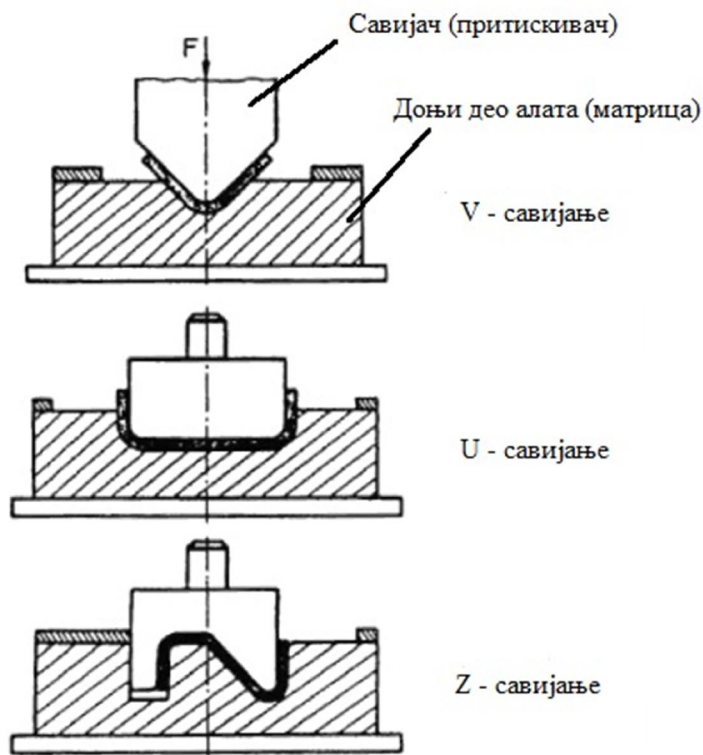
У алатима на пресама се савијају делови мањих радијуса. У ту сврху се користи широк дијапазон преса почевши од најмањих па све до преса са силама и до 60 MN. На ваљцима се савијају комади преко великог радијуса, најчешће су то котлови, цилиндри, резервоари итд. За савијање посебних облика користе специјалне машине са посебним уређајима, у ту групу спада машина за савијање цеви. Комади компликованије геометрије се израђују у неколико радних операција. Технологија може бити таква да се појединачно за сваку операцију користи посебан алат, да се неколико операција савијања врши у истом кораку или поступно користећи комбиноване алате. На слици 2.2 приказан је алат за угаоно савијање са 4 зоне на пресама [4].



Слика 2.2 - Алат за угаоно савијање са 4 зоне

2.1.1. Угаоно савијање

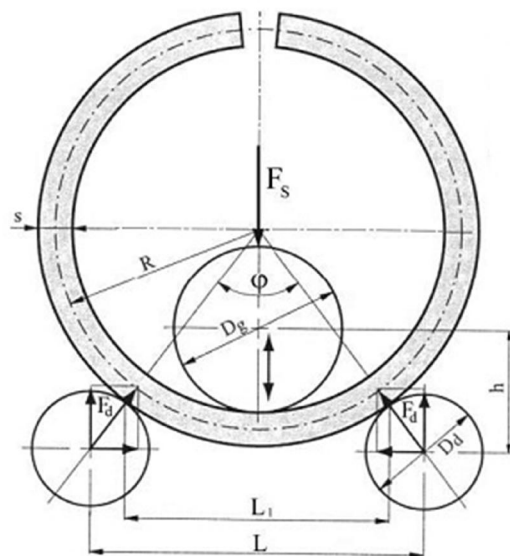
Угаоно савијање се врши у алатима постављеним на универзалним пресама (ексцентричне, хидрауличне, и др.) или на специјалним пресама за профилно савијање. По облику и броју места савијања, може бити једноугаоно, двоугаоно и вишеугаоно савијање. Дужина које се може обликовати овим принципом може бити и до неколико метара. Честа је употреба симбола којима се означава врста савијања: V за једноугаоно, U за двоугаоно и Z савијање. На слици 2.3 су приказани основни видови савијања [3].



Слика 2.3 - Основни видови угаоног савијања

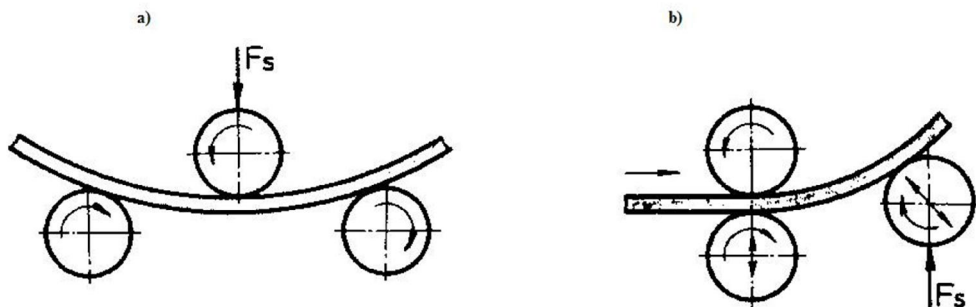
2.1.2. Кружно савијање

Кружно савијање се изводи на ротационим машинама за савијање, где су основни радни елементи ваљци (слика 2.5). Савијање се изводи без алата, те у овом случају улогу алата представљају ваљци машине. Процес се изводи помоћу одређеног броја ваљака, распоређених на одређени начин. Обликовање се врши цилиндричних или конусних обрадака лима. Погонски ваљци добијају кретање од погонских мотора. Код мањих машина, погон може бити и ручни. Потребна је извесна припрема радног комада пре уласка међу ваљке, која се врши савијањем на некој другој машини. Лимени приремак улази међу ваљке и трењем бива принуђен да пролази између њих. Ваљци могу бити дужине од пар mm до неколико m. Ова технологија се користи за израду: котлова, цилиндара, резервоара и сл. [2].



Слика 2.4 - Савијање ваљцима

Постоје две могућности остварења кружног савијања (слика 2.5). У првом случају средњи ваљак је притискивач и може мењати свој положај по висини, док су 2 доња слободно окретна око својих непомичних оса. Користи се са лимове дебљине преко 2 mm. У другом случају притискивач ваљак је крајњи, односно има ексцентрични положај. Овај начин је погодан за тање лимове [2].

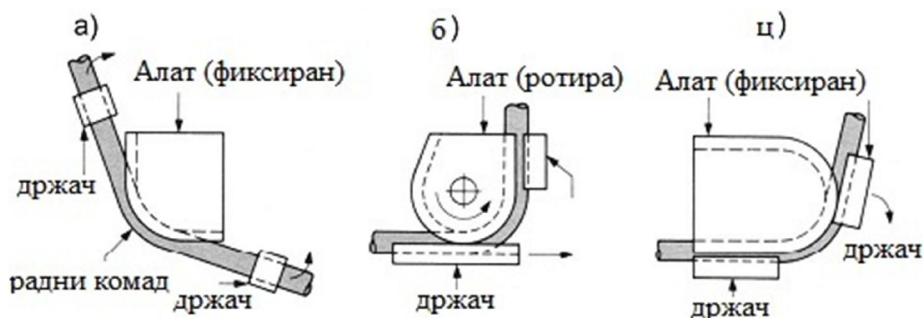


Слика 2.5 - Принципијална шема различитих могућности кружног савијања помоћу ваљака

2.1.3. Остали видови савијања

Поред угаоног и кружног савијања, постоји широк спектар и других операција које припадају групи савијања. Којим поступком ће се приступити при изради комада зависи од низа технолошких, економских и других параметара.

Савијање цеви и других кружних профила захтевају примену посебних алата и машина како би се спречила или у прихватљивој мери компезовала појава неконтролисаних деформација у зони савијања у виду набора, спљоштања профила и лома. Најстарији начин се састоји у пуњењу шупљина деформабилним материјалом. Показало се да је песак најпогодниј за ову намену, али се и поред њега користи гума и слични синтетички материјали.



Слика 2.6 - Алати за савијање цеви

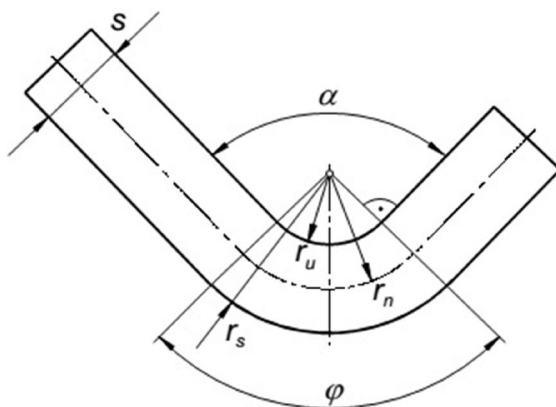
Ситни делови од жица и ужих трака израђују се на специјалним машинама са вишеоперационим обликовањем. Радни комад се добија узастопним деловањем алата који су постављени радијално у односу на централни део радне зоне машине. Одлика ових машина је веома велика производност. На слици 2.7 приказан је део асортимана делова израђених овом технологијом



Слика 2.7

2.2. Положај неутралног слоја

Неутрални слој представља замишљена метална влакна чија се дужина при савијању нити изужује нити скраћује, иако им се мења облик. Код радног комада довољне ширине уместо слоја можемо у репрезентативном пресеку дефинисати неутралну осу, линија која не мења своју дужину приликом деформације. Познавање положаја неутралне осе је веома важно због дефинисања почетних димензија комада пре савијања. На слици 2.8 су приказани параметри савијене зоне.



Слика 2.8

Где су:

s - дебљина дела

r_u - унутрашњи полупречник

r_s - полупречник спољашње линије

r_n - полупречник неутралне осе

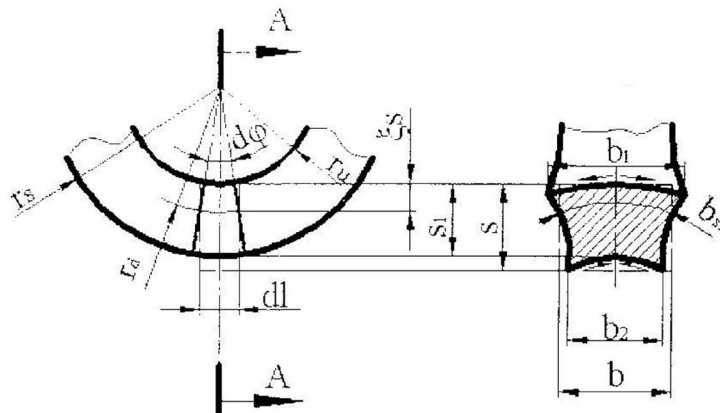
φ - угао савијене зоне

α - угао савијања

Конструктивни цртеж савијеног комада нам служи за одређивање почетне дужине елемента, односно истог у развијеном стању. Савијени комад се састоји из делова савијених под одређеним радијусом и равних кракова, што значи да је његова почетна дужина једнака дужини његове неутралне линије. Треба правити разлику између неутралне осе напона и неутралне осе деформације. Полупречник неутралне напонске линије, одређује радијус влакна савијеног комада у ком нема напона. Вlakно које није претрпело деформацију не поклапа са неутралним напонским влакном. Полупречник кривине неутралног влакна служи за одређивање развијеног комада и означава се са r_d .

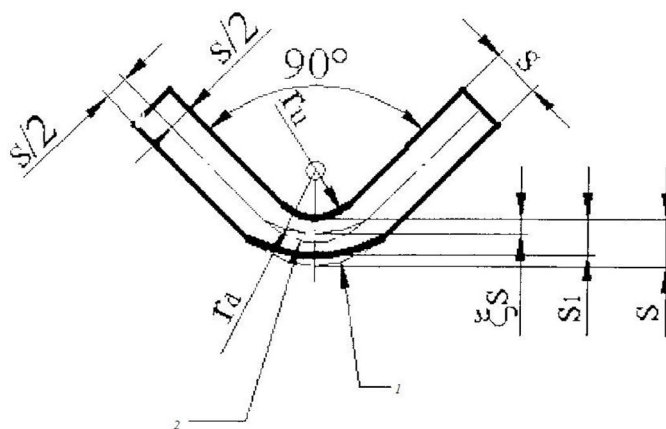
У зони притиска у правцу друге главне осе нема напона, али зато постоје деформације истезања ($+\varepsilon_x = +\varepsilon_y$). У правцу исте осе у зони истезања нема другог

главног напона, док постоји друга главна деформација притиска ($-\varepsilon_2 = -\varepsilon_y$). Због тога се правоугаони пресек савијеног комада дефинише и добија облик трапезојида. Пресек приказан на слици 2.9.



Слика 2.9

У зони савијања долази до смањивања дебљине комада као последица деформације која се јавља у њој. Тада се неутрална линија деформације код савијања преко мањих радијуса помера ка центру кривине. Полупречник кривине неутралне линије деформације се израчунава преко једнакости запремине комада пре и после савијања. Слика 2.10.



Слика 2.10

На слици:

- 1 - одступање по дебљини материјала
- 2 - положај неутралне линије деформације

Запремина комада пре савијања:

$$dV = b \cdot s \cdot dl \quad (2.1)$$

Где су:

b - почетна ширина комада

s - почетна дебљина материјала

dl - елементарна дужина посматраног елемента

Док је запремина после савијања:

$$dV = b_{sr} \cdot s_1 \cdot \frac{r_s + r_u}{2} \cdot d\varphi \quad (2.2)$$

Где су:

s_1 - дебљина савијеног комада

r_u - унутрашњи радијус савијања

r_s - спољашњи радијус савијања

$d\varphi$ - елементарни угао савијања

Изједначавањем запремине пре и после савијања добија се:

$$dV = b \cdot s \cdot dl = b_{sr} \cdot s_1 \cdot \frac{r_s + r_u}{2} \cdot d\varphi \quad (2.3)$$

Ако је r_d полупречник неутралне линије деформације, односно полупречник кривине оног влакна чија је дужина остала иста и после деформације, то јест савијања, тада је:

$$dl = r_d \cdot d\varphi \quad (2.4)$$

па је:

$$b \cdot s \cdot r_d \cdot d\varphi = b_{sr} \cdot s_1 \cdot \frac{r_s + r_u}{2} \cdot d\varphi \quad (2.5)$$

односно:

$$r_d = \frac{r_s + r_u}{2} \cdot \frac{s_1}{s} \cdot \frac{b_{sr}}{b} = \frac{r_s + r_u}{2} \cdot m \cdot n \quad (2.6)$$

Ако је:

$$r_s = r_u + s_1 = r_u + m \cdot s \quad (2.7)$$

долази се до:

$$r_d = \left(\frac{r_u}{s} + \frac{m}{2} \right) \cdot s \cdot m \cdot n \quad (2.8)$$

Услед померања неутралне линије деформације ка центру кривине, полупречнике кривине се може записати у облику:

$$r_d = r_u + \xi \cdot s \quad (2.9)$$

Коначни образац за израчунавање полупречника неутралне линије деформације:

$$r_d = \left(\frac{r_u}{s} + \frac{m}{2} \right) \cdot s \cdot m \cdot n = r_u + \xi \cdot s \quad (2.10)$$

Коефицијент $m = s_1/s$ представља однос дебљине савијеног комада и почетне дебљине материјала и зависи од односа r_u/s . За савијање челика са (0.1 - 0.2) % С под углом од 90 степени коефицијент има следеће вредности (табела 1.0).

Табела 1.0 - Вредност коефицијента m

r/s	0.1	0.25	0.5	1	2	3	4
$m = s_1/s$	0.82	0.87	0.92	0.96	0.985	0.992	0.995

Коефицијент $n = b_{sr}/b$ представља однос средње ширине савијеног комада и почетне ширине и зависи од односа b/s . За савијање челика са (0.1 - 0.2) % С под углом од 90 степени коефицијент има следеће вредности (табела 2.0).

Табела 2.0 - Вредност коефицијента n

b/s	≥ 3	2.5	2	1.5	1	0.5
$n = b_{sr}/b$	1	1.005	1.01	1.02	1.05	1.09

У најчешћим случајевима савијања ширина је већа од дебљине комада па се може предпоставити да је $n \approx 1$.

Коефицијентом ξ се одређује величина померања неутралне линије деформације ка центру кривине. Узимајући $n \approx 1$ следи даље да је:

$$\xi = \frac{r_d - r_u}{s} = \frac{\left(\frac{r_u}{s} + \frac{m}{2} \right) \cdot s \cdot m - r}{s} = \frac{m^2}{2} - \frac{r_u}{s} \cdot (1 - m) \quad (2.11)$$

Просечне вредности коефицијента ξ за метале су наведене у табели 3.0.

Табела 3.0 - Просечне вредности коефицијента ξ за метале

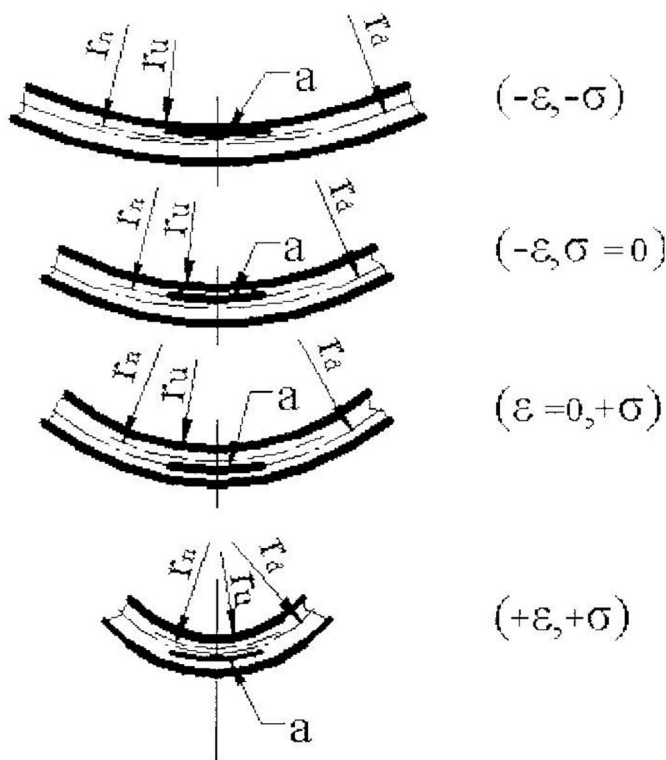
r/s	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
ξ	0.23	0.29	0.32	0.35	0.37	0.38	0.39	0.4
r/s	1	1.2	1.5	2	3	4	5	10
ξ	0.41	0.42	0.44	0.45	0.46	0.47	0.48	0.5

Смањење дебљине савијеног комада је различито у различитим пресецима (најмања дебљина је у средини, приказано на слици 4), па ће полупречник неутралне линије деформације имати такође различите вредности. Испитивањима је показано да неутрална линија има облик параболе која у средини има полупречник $r_d = r_u + \xi \cdot s$, а на крајевима $r_o = r_u + 0.5 \cdot s$. Кружним луком полупречника r_d се надомешта ова парабола код практичних прорачуна развјене дужине.

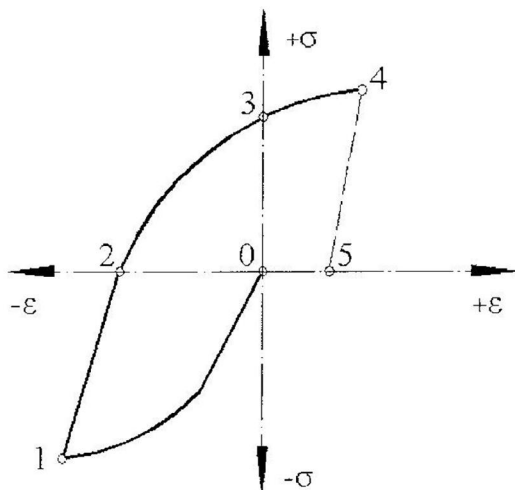
Долазимо до закључка да је упоређивањем полупречника неутралне линије деформације и полупречника кривине неутралне линије напона:

$$r_d = r_u + \xi \cdot s < r_n = \sqrt{r_s \cdot r_u} \quad (2.12)$$

Неподударање неутралне линије деформације и неутралне линије напона објашњава се појавом пластичне хистерезе (слика 2.11 и 2.12)



Слика 2.11 - Пластична хистереза



Слика 2.12 - Графички приказ промене напона и деформације у току савијања

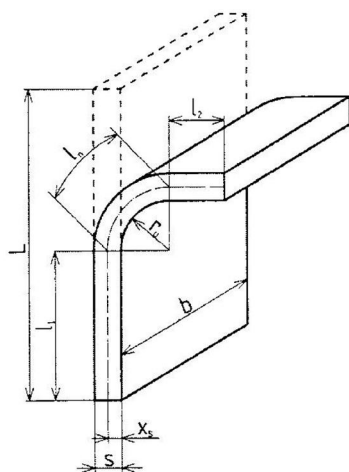
Посматра се влакно „а“ које се налази непосредно изнад неутралне линије. У влакну пре почетка савијања нема ни напона ни деформација. У тачки 1 влакно је оптерећено на притисак и због тога је краће него на почетку. Са смањењем унутрашњег радијуса савијања r_u ка центру се померају неутралне линије напона и деформације. У тачки 2 у влакну „а“ нема напона јер кроз њега пролази неутрална напонска линија, па је $\sigma = 0$. Пошто је влакно краће него на почетку савијања у њему постоје деформације сабијања ($-\epsilon$). Карактеристично за тачку 3 је то што се предзнак напона на влакну променио па је сад ($+\sigma$). Влакно поново има своју почетну дужину, односно нема деформације ($\epsilon = 0$) и неутрална деформациона линија пролази кроз влакно „а“. Напон и деформација одговарају завршетку савијања ($+\epsilon, +\sigma$) у тачки 4. Тачка 5 одговара стању растерећења. Нема напона у влакно „а“, али зато остаје трајна пластична деформација издужења.

Из образложеног се види да се пластична хистереза савијања огледа у томе што се у току самог процеса савијања неко влакно деформише на притисак и на истезање.

2.3. Одређивање развијене дужине

За одређивање димензија комада за савијање, потребно је предходно прорачунати развијену дужину истог. Почетна дужина комада једнака је збиру дужине лукова неутралне осе у зонама савијања и дужини несавијених делова.

Примена овог принципа израчунавања дата је на следећем примеру, сл. 2.13. Постоји једна савијена зона са углом φ , у којој је дужина неутралне осе l_n и две несавијене зоне дужина l_1 и l_2 . Дужина развијеног стања је L [1].



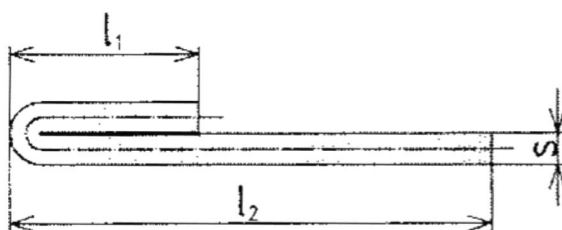
Слика 2.13

$$L = l_1 + l_2 + l_n \quad (2.13)$$

$$l_n = \frac{\pi \varphi^\circ}{180} (r_u + x_s) \approx 0,017 \varphi (r_u + x_s)^\circ \quad (2.14)$$

За одређивање карактеристичних облика савијања постоје изрази за израчунавање дужине развијеног стања. Један од тих примера је савијање са потпуним додиривањем кракова (слика 2.14). Дужина овог комада се приближно одређује следећим изразом:

$$L \approx l_1 + l_2 - 0,43s \quad (2.15)$$



Слика 2.14 - Пример савијања са превијањем

У општем случају савијања комада са n несавијеним деловима и n зонама савијања, почетна дужина се одређује следећим изразом:

$$L = L_{RAVNI} + L_{SAV} = \sum_{i=1}^n l_i + \frac{\pi}{180} \sum_{i=1}^k \varphi_i (r_{ui} + x_i \cdot s) \quad (2.16)$$

Где су:

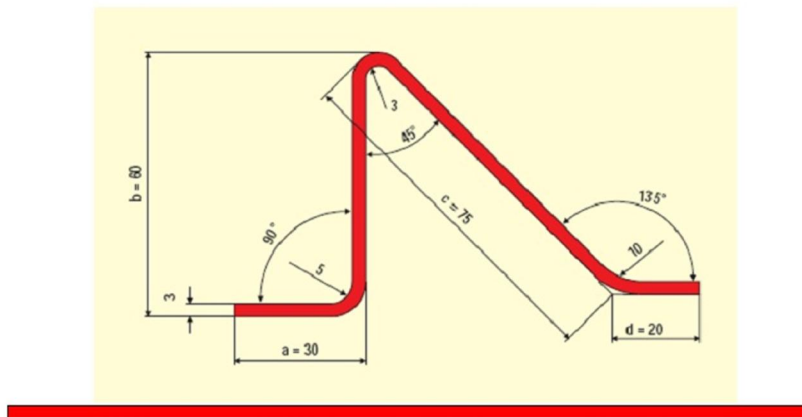
l_i - дужине несавијених делова

φ_i - углови савијених зона

r_{ui} - одговарајући унутрашњи радијуси

x_i - одговарајући фактори померања неутралне осе

На слици 2.15 приказан је пример општег случаја комада у савијеном и развијеном стању.

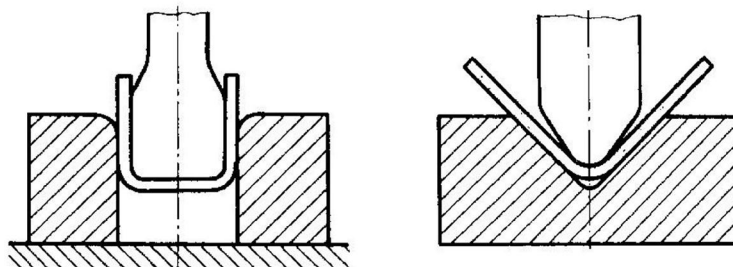


Слика 2.15

2.4. Анализа угаоног савијања

Код угаоног савијања деформација је локализована тј. ограничава се само на зону савијања. Основне технолошко-конструкционе карактеристике ове операција су полупречник и угао савијања.

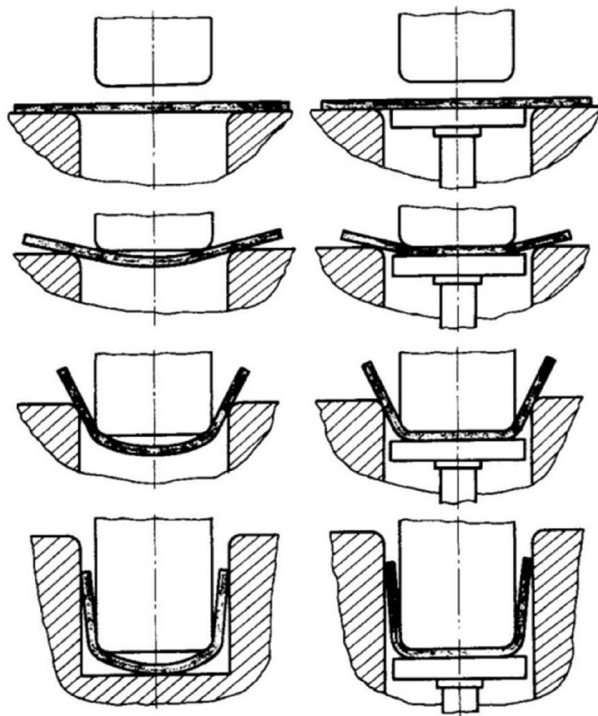
Алат је отворен ако бочне стране матрице нису закошене, тако да на њих не долази ни до каквог јачег налегања лима. Такође се притом не користи противдржач. У супротном алат је затворен. На слици 2.16 приказана су оба алата [2].



Слика 2.16 - Слободно савијање: а) у отвореном алату, б) у затвореном алату

2.4.1. Анализа двоугаоног савијања

Код двоугаоног савијања могу се уочити карактеристичне фазе процеса које највише зависе од тога да ли се изводи као слободно или са противдржачем лима. Треба напоменути да савијање без противдржача, поред разлике повећане нетачности услед евентуалног клизања дела, захтева и знатно већу силу завршног калибрисања ради поравњања савијеног средњег дела. У другом случају и поред одклањања овог недостатка треба узети у обзир да је таква метода скупља. На слици 2.17 приказан је шематски приказ оба поступка [2].

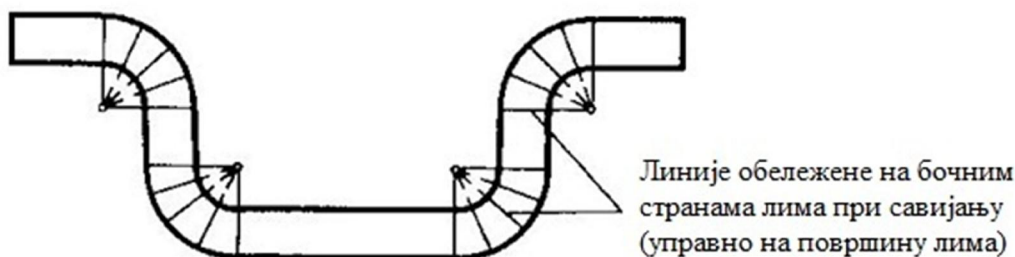


Слика 2.17 - Карактеристичне фазе процеса двоугаоног савијања: а) без противдржача, б) са противдржачем

2.5. Деформације при савијању

И ако се при савијању мора остварити пластична деформација, она се ипак не појављује у почетној фази. Често је и на крају савијања при растерећењу, удео еластичне деформације у укупно оствареној знатан. Па се може са правом рећи да цео процес савијања карактеришу еластично пластичне деформације. Ове деформације имају различит карактер са сваке стране лима који се савија. Слој материјала са стране савијача изложен притискивању па се у њему врши скраћивање влакана у подужном правцу, док се са спољне стране затеже те се влакна издужују. Између ова два слоја налази се неутрални слој чија се дужина не мења, односно његове дужинске деформације једнаке су нули.

Величине уздужних деформација расту полазећи од неутралног слоја ка спољним површинама, где достижу максималне вредности, при чему је та промена линеарна. Истраживањем се показало да се у случају савијања може без знатне грешке применити хипотеза равних пресека, према којој пресеци управни на раван лима пре савијања остају такви и после њега. Односно остају равни, мењајући само своју оријентацију у току процеса. На слици 2.18 приказано је задржавање управности положаја пресека нормалних на површину лима при савијању.



Слика 2.18

Слично је и са одговарајућим напонима у уздужном правцу. Са тим што је њихов пораст такође равномеран и линеаран само у случају еластичног савијања, док се са настанком пластичних деформација он мења одступајући минимално од линеарног распореда.

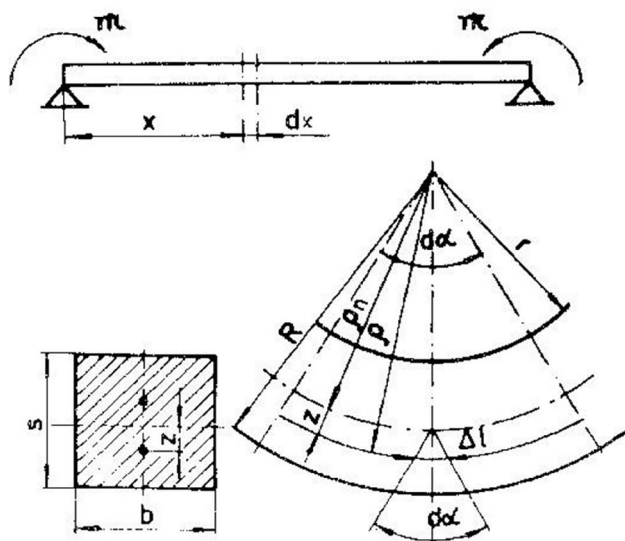
На месту савијања под одређеним условима може са јавити релативно јако деформисање дела, односно може доћи до промене његовог попречног пресека (смањење дебљине у затегнутој зони, односно повећања у притисној и евентуалне промене ширине). Услед тога неутрални слој неће пролазити геометријску средину пресека. Помериће се за одговарајући износ ка притисној зони. Услед тога, максималне уздужне деформације на унутрашњој и спољној површини неће бити исте [2].

На елементу носача дужине dx , оптерећеног моментом савијања, могу се уопчити две зоне деформисања (Слика 2.19). Изнад неутралне линије јавља се сабијање, док испод истезање. Јединична деформација се добија посматрањем промене дужине неког влакна материјала на одстојању z од неутралне линије [3].

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\Delta dx}{dx} = \frac{z \cdot d\alpha}{\rho_n \cdot d\alpha} = \frac{z}{\rho_n} \quad (2.17)$$

или

$$\varepsilon = \frac{\rho d\alpha - \rho_n d\alpha}{\rho_n d\alpha} = \frac{\rho - \rho_n}{\rho_n} \quad (2.18)$$



Слика 2.19 - Деформације при савијању

Јединична деформација се може изразити преко одстојања влакна од неутралне линије и полупречника кривине влакна и полупречника кривине неутралне линије.

$$\varepsilon = \frac{z}{\rho_n} = \frac{\rho - \rho_n}{\rho_n} \quad (2.19)$$

Из израза се види да се у различитим влакнима у материјалу у току савијања остварују различите деформације у зависности од одстојања од неутралне линије. Максимална вредност деформације се јавља при максималном растојању влакна од неутралне линије тј. за $z = s/2$ добија се:

$$\varepsilon_{max} = \frac{s/2}{\rho_n} = \frac{s}{2\rho_n} = \frac{R - \rho_n}{\rho_n} = \frac{\rho_n - r}{\rho_n} \quad (2.20)$$

Где је:

s - дебљина материјала

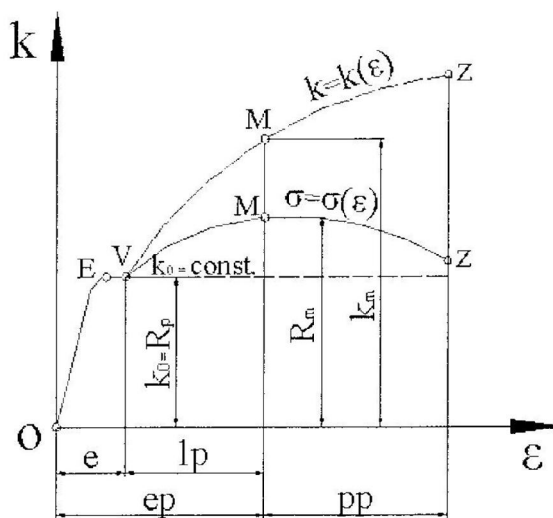
R - спољни радијус савијања

r - унутрашњи радијус савијања

ρ_n - радијус савијања неутралне линије

Редуковани полупречник кривине неутралне линије ρ_r представља однос полупречника кривине неутралне линије и дебљине материјала. У зависности од величине напона у материјалу и редукованог полупречника кривине неутралне линије,

проблем савијања се третира као еластично-пластично савијања или чисто пластично савијање. На слици 2.20 приказан је дијаграм подручја савијања.



Слика 2.20 - Подручје савијања

Где је:

e - еластично подручје савијања

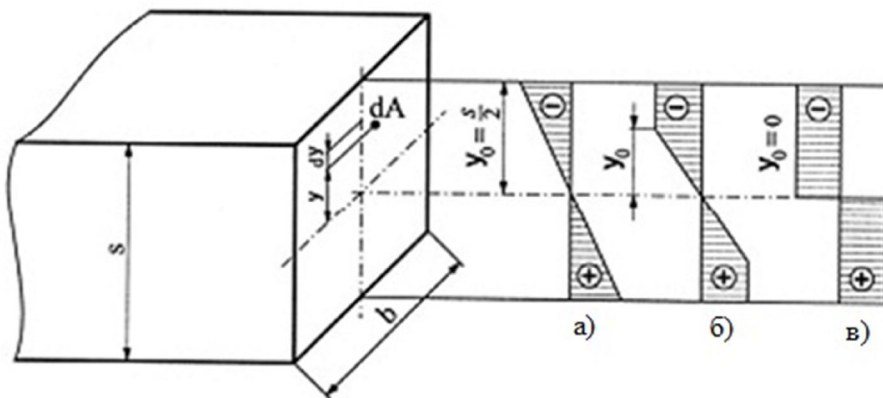
lp - линеарно пластично подручје савијања

ep - еластично-пластично савијање

pp - чисто пластично савијање

Еластично-пластично савијање настаје ако су испуњени услови $5 \leq \rho_r \leq 200$ и $0 < k < k_m$. Док чисто пластично савијање настаје при условима $\rho_r < 5$ и $k_m < k < k_z$.

На слици 2.21 приказане су промене напона у влакнима у зависности од одстојања од неутралне линије.



Слика 2.21 - Промена напона на пресеку код савијања

Први случај (слика 2.17-а) представља еластичну деформацију. Напон је пропорционалан растојању влакна од неутралне осе, тако да максимална вредност не прелази вредност напона на граници развлачења. Други случај (слика 2.17-б) еластично пластично савијање. Влакна на одстојању z_0 од неутралне линије подвргнута су еластичним деформацијама, док у осталим влада најмање напон на граници развлачења. Трећи случај (слика 2.17-в) представља линеарно пластично савијање. Напон је по целом пресеку константан и једнак напону на граници течења. При чистом пластичном савијању влада запреминско-напонско-деформационо стање [3].

2.6. Напони и моменти савијања

Деформационе силе савијања одређују се на основу услова о једнакости момента спољашњих сила са моментом унутрашњих сила. Момент спољашњих сила зависи од шеме савијања, односно деловања спољашњих сила, а момент унутрашњих сила од напонских односа при савијању [1]

Из услова равнотеже момента спољашњих и унутрашњих сила у равни савијања, добија се релација која даје везу између момента спољашњих сила и напона у радном комаду.

$$M = \int z \cdot dF_x = \int_A z \cdot \sigma \cdot dA \quad (2.21)$$

Где је:

M - момент спољашњих сила

z - растојање тежишта посматраног елемента од неутралне осе

σ - напон у посматраном елементу

dA - елемент површине

2.6.1. Моменти унутрашњих сила

Код савијања у еластично-пластичном подручју можемо уочити 2 зоне напонских односа (слика 2.21 б). Језгро носача до одређене висине ($2z_0$) се деформише еластично (зона еластичне деформације). Спољни слојеви висине $2\left(\frac{s}{2} - z_0\right)$ се деформишу пластично (зона линеарне пластичне деформације). Дијаграм напона (слика 2.21 б) је нацртан упрошћено и под претпоставком да напони који одговарају пластичној деформацији остају константни и једнаки напону на граници течења $R_p = const$. Овом претпоставком се уноси извесна грешка у прорачун, зато што се

занемарују ефекти очвршћивања. То значи да се реалним металима преписују својства идеално пластичних материјала [4].

Момент савијања се може представити као збир момента савијања за еластичну и пластичну зону:

$$M = 2 \int_0^{z_0} z \cdot \sigma \cdot dA + 2 \int_{z_0}^{s/2} z \cdot \sigma_v \cdot dA \quad (2.22)$$

Пошто се σ (који се креће у границама $0 \leq \sigma \leq R_p$) представља напон у било ком елементу површине у интервалу $0 \leq z \leq z_0$, може се према слици 2.21 б представити однос

$$\sigma : R_p = z : z_0 \quad \text{или} \quad \sigma = R_p \cdot \frac{z}{z_0} \quad (2.23)$$

па је

$$M = R_p \left[\frac{2}{z_0} \cdot \int_0^{z_0} z^2 \cdot dA + 2 \int_0^{z_0} z \cdot dA \right] \quad (2.24)$$

Први члан израза представља отпорни момент еластично деформисаног дела (висине $2z_0$) у односу на у осу:

$$w = \frac{2}{z_0} \cdot \int_0^{z_0} z^2 \cdot dA = \frac{2}{z_0} I \quad (2.25)$$

где је аксијални момент инерције

$$I = \int_0^{z_0} z^2 \cdot dA \quad (2.26)$$

док други члан представља статички момент пластично деформираног дела (висине $s - 2z_0$) у односу на исту осу

$$S = 2 \int_{z_0}^{s/2} z \cdot dA \quad (2.27)$$

Момент савијања у еластично-пластичном подручју:

$$M = R_p \left[\frac{2}{z_0} \cdot \int_0^{z_0} z^2 \cdot dA + 2 \int_{z_0}^{s/2} z \cdot dA \right] = R_p (W + S) \quad (2.28)$$

За правоугаони пресек:

$$dA = b \cdot dz \quad (2.29)$$

$$W = \frac{2}{z_0} \int_0^{z_0} z^2 \cdot dA = \frac{2 \cdot b}{z_0} \int_0^{z_0} z^2 \cdot dz = \frac{2}{3} \cdot b \cdot z_0^2 \quad (2.30)$$

$$S = 2 \int_{z_0}^{s/2} z \cdot dA = 2b \int_{z_0}^{s/2} z \cdot dz = b \left[\frac{s^2}{4} - z_0^2 \right] \quad (2.31)$$

Када се ове вредности унесу у образац 2.28, добија се момент савијања правоугаоних пресека у облику:

$$M = R_p [w + s] = R_p \cdot b \left[\frac{2}{3} z_0^2 + \frac{s^2}{4} - z_0^2 \right] \quad (2.32)$$

$$M = \frac{R_p \cdot b}{12} \cdot (3s^2 - 4z_0^2) \quad (2.32)$$

На основу Хуковог закона, висина еластично деформисаног дела се може израчунати:

$$R_p = E \cdot \varepsilon_0 \quad (2.33)$$

за деформацију се користи образац 2.28:

$$\varepsilon_0 = \frac{z_0}{r_n} \quad (2.34)$$

одакле је:

$$z_0 = \varepsilon_0 r_n = \frac{R_p \cdot r_n}{E} \quad (2.35)$$

Уношењем ове вредности у образац 2.32 може се записати као:

$$M = \frac{R_p \cdot b}{12} \cdot \left[3s^2 - \left(\frac{2 \cdot R_p \cdot r_n}{E} \right)^2 \right] \quad (2.36)$$

односно користећи се образцем:

$$r_r = \frac{r_n}{s} \text{ или } r_n = s \cdot r_r \quad (2.37)$$

момент савијања се може изразити и помоћу редуцираног полупречника кривине:

$$M = R_p \frac{b \cdot s^2}{12} \left[3 - \left(\frac{2 \cdot R_p \cdot r_r}{E} \right)^2 \right] \quad (2.38)$$

Код савијања у еластично-пластичном подручју ($5 \leq \rho_r \leq 200$) утицај другог члана у загради је занемарљив, па се код практичних прорачуна занемарује. Занемаривање овог члана је претпоставка да је цели пресек оптерећен линеарном пластичном деформацијом (слика 2.21 ц), па је момент савијања:

$$M = R_p \frac{b \cdot s^2}{12} \cdot 3 = R_p \frac{b \cdot s^2}{4} \quad (2.39)$$

Исти израз се добија уврштавањем услова $z_0 = 0$ у образац 2.32, чиме се добија да је статички момент пластично деформисаног целог пресека:

$$S = b \cdot \left(\frac{s^2}{4} - z_0^2 \right) = \frac{b \cdot s^2}{4} \quad (2.40)$$

$$W = \frac{2}{3} b \cdot z_0^2 = 0 \quad (2.41)$$

Друга граница, уз услов да $z_0 = \frac{s}{2}$ да је отпорни момент еластично деформационог целог пресека:

$$W = \frac{2}{3} b \cdot z_0^2 = \frac{2}{3} b \left(\frac{s}{2} \right)^2 = \frac{b \cdot s^2}{6} \quad (2.42)$$

$$S = b \cdot \left(\frac{s^2}{4} - \left(\frac{s}{2} \right)^2 \right) = 0 \quad (2.43)$$

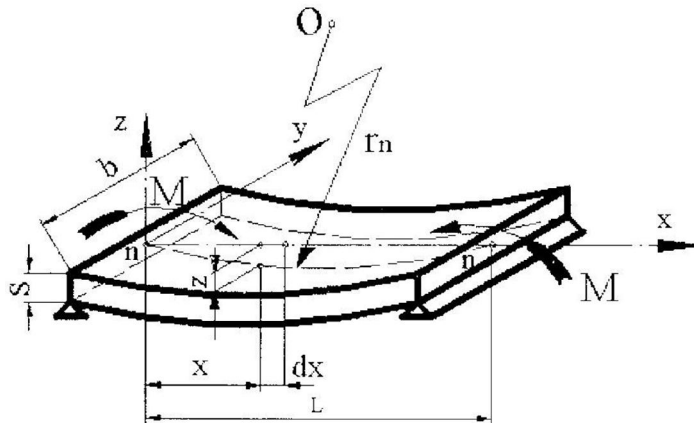
па је при чистој еластичној деформацији (слика 2.21 а) момент савијања:

$$M = R_p \cdot W = R_p \frac{b \cdot s^2}{6} \quad (2.44)$$

Момент савијања носача оптерећеног напонима у линеарном-пластичном подручју се према тома рачуна према следећем образцу:

$$M = R_p \cdot S = 1,5 \cdot R_p \cdot W = R_p \frac{b \cdot s^2}{4} \quad (2.45)$$

Код чистог савијања (слика 2.22) еластична линија је део круга са полупречником r_n .



Слика 2.22 - Савијање носача

Ако се у интегралу:

$$M = \int_A z \cdot \sigma \cdot dA \quad (2.46)$$

уврсти за σ вредност:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \frac{z}{r_n} \quad (2.47)$$

тада се момент савијања изражава као:

$$M = \frac{E}{r_n} \int_A z^2 \cdot dA = \frac{E \cdot I}{r_n} \quad (2.48)$$

Израз EI представља крутост при савијању. За одређени материјал и исти пресек по целој дужини носача (L) крутост EI има константну вредност. Обзиром да је код чистог савијања и $M = \text{const}$ то је:

$$r_n = \frac{E \cdot I}{M} = \frac{1}{K} = \text{const} \quad (2.49)$$

Еластична линија се може дефинисати преко следећег образаца:

$$\frac{z'''}{(1 + z'^2)^{\frac{3}{2}}} = -\frac{M}{E \cdot I} = -K = \text{const} \quad (2.50)$$

Ако се ова диференцијална једначина интегралом, водећи рачуна о томе да је:

$$z'' = \frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{dz'}{dx} \text{ и } z' = \frac{dz}{dx} \quad (2.51)$$

тада је њен општи интеграл у облику:

$$z = \frac{1}{K} \sqrt{1 - (-Kx + C_1)^2} + C_2 \quad (2.52)$$

а из граничних услова:

$$\text{за } x = 0 \text{ је } z = 0$$

$$\text{за } x = L \text{ је } z = 0$$

следе вредности интеграционих константи:

$$C_1 = \frac{K \cdot L}{2} \text{ и } C_2 = -\frac{1}{K} \sqrt{1 - \left(\frac{K \cdot L}{2}\right)^2} \quad (2.53)$$

тако да је партикуларни интеграл:

$$z = \frac{1}{K} \sqrt{1 - \left(-Kx + \frac{K \cdot L}{2}\right)^2} - \frac{1}{K} \sqrt{1 - \left(\frac{K \cdot L}{2}\right)^2} \quad (2.54)$$

што се може свести на облик:

$$\left(x - \frac{L}{2}\right)^2 + \left[z + \sqrt{r_n^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}\right]^2 = r_n^2 \quad (2.55)$$

Последња једначина представља једначину круга чиме је доказано да је еластична линија део кружног лука полупречника r_n .

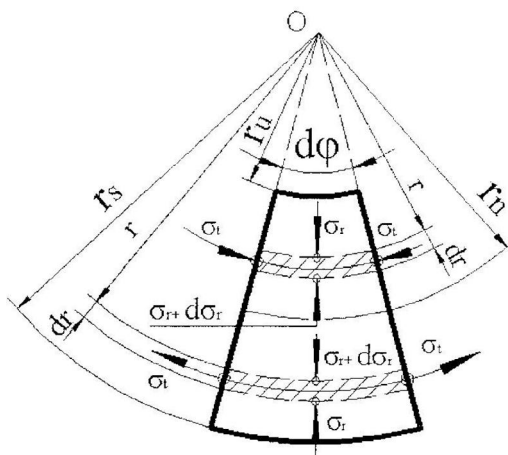
Услов равнотеже свих сила у правцу x - осе:

$$\Sigma F_x = \int_A \sigma \cdot dA = \frac{E}{r_n} \int_A z \cdot dA = C \int_A z \cdot dA = C \cdot S_y = 0 \quad (2.56)$$

ће бити задовољен само онда ако је y - оса тежишна оса. Како је за све тачке ове осе $z = 0$, то ће бити и $\sigma = 0$. Може се закључити да неутрална линија пролази кроз тежиште пресека. Због тога је код правоугаоног пресека полупречник кривине неутралне линије:

$$r'_n = r + \frac{s}{2} = R - \frac{s}{2} \quad (2.57)$$

Код чистог пластичног савијања највеће деформације се јављају у тангенцијалном правцу (ϵ_t), тако да се у елементу савијеног комада (слика 2.23) влакна изнад неутралне линије оптерећена тангенцијалним напонима притиска ($-\sigma_t$), а испод неуталне линије тангенцијалним напонима истезања ($+\sigma_t$).



Слика 2.23

У подручју чисто пластичног савијања (преко малих радијуса $\rho_r < 5$) долази до сабијања радијалних слојева. Услед радијалне деформације (ϵ_r), дебљина комада се смањује. Радијални напони ($-\sigma_r$) настали као последица описаних појава по целом пресеку су негативног предзнака, односно напони притиска.

Промена ширине је незнатна код ширих комада ($b > 3s$), тако да се може претпоставити да нема деформацију у правцу ширине ($\epsilon_y = 0$). Под претпоставком да нема смицајних напона ($\tau_{yz} = 0$), правци координатног система ($Oxyz$ - слика 2.22) се

поклапају са главним правцем. У том случају су главни нормални напон и главне нормалне деформације:

$$\sigma_1 = \sigma_x = \sigma_t ; \quad \sigma_2 = \sigma_y ; \quad \sigma_3 = \sigma_z = \sigma_r ;$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x = \varepsilon_t ; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_y ; \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_z = \varepsilon_r ;$$

Посматрани случај ($\varepsilon_s = 0$ - слика 2.24) се своди на проблем раванског деформационог стања код којег је напон у правцу друге главне осе уједно и средњи нормални напон:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad \text{или} \quad \sigma_y = \frac{\sigma_t + \sigma_r}{2} \quad (2.58)$$

Код савијања уских комада ($b < s$) долази до деформација облика попречног пресека, што значи да постоји деформација у правцу друге главне осе ($\varepsilon_2 = \varepsilon_y \neq 0$). С обзиром да је напон у правцу друге главне осе једнак 0 ($\sigma_2 = \sigma_y = 0$), такође се и овај проблем своди на проблем раванског напонског стања.

Даље ће се разматрати најчешћи случај код технолошког прецеса обраде савијањем алатима на пресамa, савијање широких комада правоугаоног пресека.

Условна равнотежна једначина пројекција свих сила у радијалном правцу ($\sum F\rho = 0$), за јединицу ширине ($b = 1$), елемената посматраног комада ће се поставити према слици 2.23 у облику:

$$\sigma_r \cdot r \cdot d\varphi - (\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + d\rho) \cdot d\varphi + 2\sigma_t dr \sin \frac{d\varphi}{2} = 0 \quad (2.59)$$

Ако се због величине угла узме $\sin \frac{d\varphi}{2} \approx \frac{d\varphi}{2}$ и цела једначина пократи за $-d\varphi$, тада је:

$$r \cdot d\sigma_r + \sigma_r \cdot dr - d\sigma_r \cdot dr - \sigma_t dr = 0 \quad (2.60)$$

постављањем $d\sigma_r dr \approx 0$ добија се равнотежа диференцијалних једначина посматраног елемента у облику:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0 \quad (2.61)$$

Ако се зона притиска, за коју важи $\sigma_t < \sigma_y < \sigma_r$, постави услов пластичног течења по образцу 2.62:

$$\sigma_{max} - \sigma_{min} = \beta k \quad (2.62)$$

где је $\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.15$, као релација:

$$\sigma_r - \sigma_t = \beta k \quad (2.63)$$

па се исти уврсти у образац 2.61 и добија се:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\beta \cdot k}{r} = 0 \quad (2.64)$$

тада се интеграљењем ове диференцијалне једначине:

$$\int_0^{\sigma_r} d\sigma_r = -\beta \cdot k \int_{r_n}^r \frac{dr}{r} \quad (2.65)$$

добија образац за радијални напон притиска:

$$\sigma_r = -\beta \cdot k \cdot \ln \frac{r}{r_n} \quad (2.66)$$

а на основу $\sigma_t = \sigma_r - \beta k$ тангенцијални напон:

$$\sigma_t = -\beta \cdot k \left(1 + \ln \frac{r}{r_n} \right) \quad (2.67)$$

Услов пластичног течења за зону истезања је $\sigma_t - \sigma_r = \beta \cdot k$. Обзиром на однос $\sigma_r < \sigma_v < \sigma_t$ и $\sigma_t = \sigma_{\max}$ односно $\sigma_r = \sigma_{\min}$, може се поставити следеће:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\beta \cdot k}{r} = 0 \quad \text{или} \quad \int_0^{\sigma_r} d\sigma_r = \beta \cdot k \int_{r_s}^r \frac{dr}{r} \quad (2.68)$$

добијамо радијални напон у зони истезања:

$$\sigma_r = -\beta \cdot k \cdot \ln \frac{r_s}{r} \quad (2.69)$$

а на основу:

$$\sigma_t = \sigma_r + \beta \cdot k \quad (2.70)$$

тангенцијални напон у зони истезања:

$$\sigma_t = \beta \cdot k \left(1 - \ln \frac{R}{r_n} \right) \quad (2.71)$$

Радијални напон на граници зоне притиска и истезања мора бити једнак, што значи да је за:

$$\sigma_r = \sigma_{rn} = -\beta \cdot k \cdot \ln \frac{r_n}{r_u} = -\beta \cdot k \cdot \ln \frac{R}{r_n} \quad \text{или} \quad \frac{r_n}{r_u} = \frac{R}{r_n} \quad (2.72)$$

одакле следи да је полупречник кривине неутралне напонске линије:

$$r_n = \sqrt{R \cdot r_u} \quad (2.73)$$

Из предходног образа се види да неутрална оса код чисто пластичног савијања не пролази кроз средиште пресека, већ се помера ка центру кривине, и то утолико више уколико је мањи однос унутрашњег радијуса савијања и дебљине материјала. За разлику од савијања у еластичном подручју, код пластичног се повећава дужина савијеног комада, смањује дебљина, мења облик попречног пресека и положај неутралне линије.

Промена радијалних и тангенцијалних напона (обрасци 2.66 - 2.69) у интервалу $r_u \leq r_n \leq r_s$ могу се приказати и графички (слика 2.24)



Слика 2.24 - Промена напона код чисто пластичног савијања

Момент унутрашњих сила се може представити као сума момената тангенцијалних сила у зони истезања и притиска:

$$M = b \cdot \left[\int_{r_n}^{r_s} \sigma_t \cdot r \cdot dr + \int_{r_u}^{r_n} \sigma_t \cdot r \cdot dr \right] \quad (2.74)$$

σ_t из првог интеграла се замењује обрасцем 2.24, док се у другом замењује обрасцем 2.22:

$$M = b \cdot \left[\int_{r_n}^{r_s} \beta \cdot k \cdot \left(1 - \ln \frac{r_s}{r} \right) \cdot r \cdot dr - \int_{r_u}^{r_n} \beta \cdot k \cdot \left(1 + \ln \frac{r}{r_u} \right) \cdot r \cdot dr \right] \quad (2.75)$$

$$M = \beta \cdot k \cdot b \left[\int_{r_n}^{r_s} r \cdot dr - \int_{r_n}^{r_s} r \cdot \ln \frac{r_s}{r} \cdot dr - \int_{r_u}^{r_n} r \cdot dr - \int_{r_u}^{r_n} r \cdot \ln \frac{r}{r_u} \cdot dr \right] \quad (2.76)$$

Ако вредност добијених интеграла уврстимо у израз за момент савијања, добиће се:

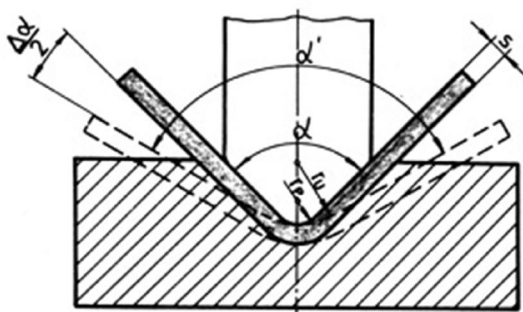
$$M = \beta \cdot k \cdot b \left[\frac{r_n^2}{2} \ln \frac{r_s \cdot r_u}{r_n^2} + \frac{r_s^2 - 2r_n^2 + r_u^2}{4} \right] \quad (2.77)$$

при чему се r_n мења вредношћу по обрасцу 2.73, тако да крајњи израз за момент савијања у чисто пластичном подручју изгледа овако:

$$M = \beta \cdot k \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} \quad (2.78)$$

3.0 Еластична повратност

У укупну деформацију која се остварује поред пластичне укључена је и еластична. У зони око неутралног слоја најчешће постоји еластично деформисање. Ослобађањем савијеног дела из алата ове еластичне деформације већим делом нестају, услед чега се мења угао савијања α , као и полупречник савијања r_u (слика 3.1). Ова појава се зове еластично исправљање или повратност [2].



Слика 3.1 - Промена угла савијања услед еластичног исправљања

Да би се добио радни комад савијен под одређеним углом, мора се приликом израде алата узети у обзир промена угла услед повратности и умањити за тај однос. Такође би требало и полупречник заобљења алата r_p изградити умањен. Тиме се постиже након исправљања жељени угао и полупречник савијања. При релативно великим полупречницима $\frac{r_u}{s} > 10$, промена полупречника савијања се најчешће занемарује.

Угао повратности при слободном савијању зависи највећим уделом од: еластичности материјала, његове дебљине, облика дела, степена деформације, угла савијања, врсте савијања, зазора између притискивача и матрице и др. С обзиром да је велики број чинилаца, као и разноврсност облика радних комада, није могуће теоријски формулисати поуздане и универзалне обрасце за израчунавање углова повратности. Зато се ти углови обично одређују на основу експерименталних података сврстаних у табеле, дијаграме и номограме, или приближно помоћу емпиријских образаца.

У табели 3.1 приказани су подаци величине угла еластичног исправљања при савијању за $\alpha = 90^\circ$, за поједине врсте материјала, у зависности од њихове дебљине и односа $\frac{r_u}{s}$ [3].

Табела 3.1 - Величина угла еластичног исправљања при савијању $\alpha = 90^\circ$

Врста материјала	r / s	Дебљина материјала s (mm)		
		До 0,8	0,8	Преко 2
Челик $R_m < 350 \text{ N/mm}^2$ Месинг $R_m < 350 \text{ N/mm}^2$ Al,Zn	до 1	4	2	0
	1 – 5	5	3	1
	преко 5	6	4	2
Челик $R_m = 40- 500 \text{ N/mm}^2$ Месинг $R_m = 40 – 500 \text{ N/mm}^2$ Бронза	до 2	5	3	1
	1 – 5	6	4	2
	преко 5	8	5	3
Челик $R_m > 55 \text{ N/mm}^2$	до 1	7	4	3
	1 – 5	9	5	3
	преко 5	12	7	5

4.0 Нумеричко моделирања процеса

Алати за нумеричке симулације који предвиђају проблеме у индустријској производњи и смањују време у развоју нових производа су доказано проверени и екстремно корисни. За разлику од тестирања алата и корекције у више наврата које су приступе у „*trial-and-error*“ пројектовању процеса, представљају јефтинији приступ решавању проблема [5].

Концепт конкурентног инжењеринга подразумева симултивно извођење свих активности пројекта, па су технологије виртуалне производње нашле пуну примену у анализама производа и процеса, у раној фази пројектовања. Њихова основна предност је могућности извођења „шта-ако“ симулација, пружајући могућност пројектантима да процене различите алтернативе на виртуелним моделима процеса. Како су ти модели јако флексибилни, омогућавају испитивања утицаја измена у пројекту, како геометрије производа тако и параметара процеса, на квалитет производа и трошкова производње. Тако је могућа оптимизација пројектовања и производа и процеса, предвиђање отказа и појаве дефекта у производу, оптимално коришћење опреме и алата, повећавајући њихов век смањењем хабања и превенцијом лома. Оптимални избор битних параметара производње се позитиван утицај на трошкове производње, материјала и алата, финални квалитет производа и његов животни век.

Нумеричке симулације базиране су на знањима физичких процеса и проверене су експерименталним путем. Користе се за предвиђања течења материјала, одређивање дистрибуције напона и температуре, напрезања на алатима, потенцијалних извора дефеката и ломова, особина и микроструктуре производа, као и процену еластичног исправљања и заосталих напона.

Најшире примењивани и најмоћнији алат за нумеричке симулације је метода коначних елемената (FEM). Последњих десет година развијено је доста комерцијалних пакета, на бази методе коначних елемената, за решавање проблема у процесима обраде метала. При избору истих треба узети у обзир:

- концепт пластичног течења;
- карактеристике материјала дела и алата;
- дефинисање геометрије;
- дефинисање контактних услова;
- аутоматско генерисање и регенерисање мреже
- компјутерско време

4.1. Метода коначних елемената

Метода коначних елемената (FEM) спада у методе дискретне анализе и заснива се на физичкој дискретизацији посматраног домена. Посматрани домен представља континуум са бесконачним бројем степена слободe који се апроксимира дискретним моделом међусобно повезаних коначних елемената са коначним бројем степена слободe [5].

Суштинска апроксимација се састоји у следећем:

- посматрани домен континуума се деле на поддомене коначних димензија који се називају коначним елементима и заједно чине мрежу коначних елемената;
- коначни елементи су међусобно повезани у коначном броју тачака које се налазе на контури елемената и називају се чворови
- стање променљиве поља у сваком коначном елементу се описује помоћу интерполационих функција (или функција облика)
- интерполационе функције су унапред задате функције за један тип коначног елемента и представљају везу између вредности променљиве поља у било којој тачки коначног елемента и вредност променљиве поља у чворовима.

Да би се разумеле основне претпоставке FEM анализе, није потребно познавати различите дисциплине механике, али је неопходно разумети основне појмове. То су пре свега појмови напона и деформације, као и односи између ових величина, који се називају конститутивним релацијама.

Процедура решавања проблема овом методом се састоји из следећих корака:

- идентификација проблема
- дефинисање елемената
- формирање једначина елемената
- повезивања једначина елемената
- нумеричко решавање глобалних једначина

4.1.1. Идентификација проблема

Идентификација проблема представља први корак у решавању методом коначних елемената. Он утиче на количину информација која се тражи, како ће се проблем решавати и која ће се решења примењивати. Без њега у анализи проблема не може се добити добар модел процеса [5].

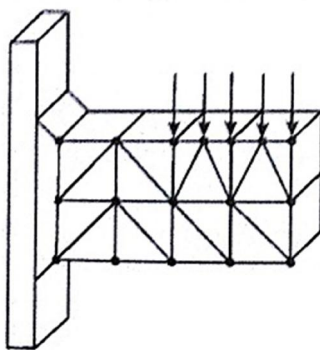
При дискретизацији проблема и нумеричког решавања мора се донети одлука који се детаљи могу сматрати сувишним и занемарити у даљем процесу. Потребно је

одлучити се за теорију, односно математичку формулацију која најбоље описује понашање система. У овој фази је могуће је игнорисати неке геометријске неравномерности, одступања од симетрије и неравнине, оптерећења свести на концентрисана, или ослонце дефинисати као фиксне, уколико се не ремети суштина проблема. Модел материјала се може дефинисати као линеарни или изотропни. Идеализовањем у зависности од геометрије, оптерећења и граничних услова проблем се може свести на решавање као осносиметричног или раванског, једначинама теорије еластичности или неком другом једноставнијом теоријом за анализу.

4.1.2. Дискретизација

Дискретизација представља процес поделе континуума на дискретне делове, који се називају коначни елементи. Постоје различити типови елемената на чији избор утичу врсте проблема, геометрија, захтевана прецизност, расположивост у оквиру алата који се користи, природа физичког проблема и знање и искуство корисника [5].

У FEM анализи се моделирана структура дели на одређени број елемената, који чине FE мрежу и сам процес се назива *meshing*. На слици 4.1 приказана је једноставна структура греде, на којој се уочава FE мрежа коначних елемената. Троугаони коначни елементи су међусобно спојени у ивичним угловима, који се називају чворови. Греда је у њима оптерећена концентрисаним силама. За напонску анализу користе се основне једначине зависности напона-деформација. Померања у чворовима услед дејства сила, се користи за прорачуне деформације елемената. На основу конститутивних једначина прорачунавају се напони у њима. Елементи се понашају слично систему опруга и угибају се све док се све силе не доведу у равнотежу. Ово доводи до сложеног система симултивних једначина, те је неопходно применити матричну алгебру за управљање и решавање гломазних система једначина.

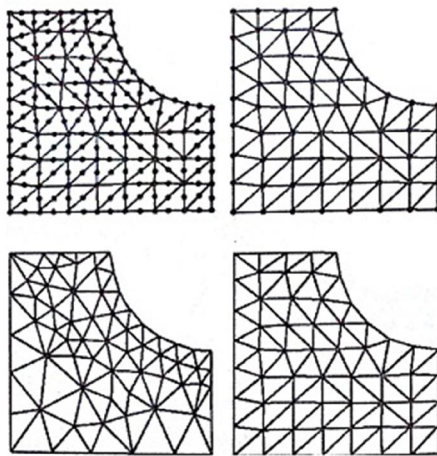


Слика 4.1 - Једноставно FE представљање греде

4.1.3. Врсте FE елемената

С обзиром да се у FE анализи креира модел са циљем да предвиди понашање континуума под дејством оптерећења, избор врсте и величине елемената је веома важан. FEM алати имају могућност аутоматског генерисања мреже и *remeshing* са троугаоним, четвороугаоним, тетраедарским и хексаедарским елементима. Прецизност модела се одређује грешком конвергенције [5].

Користе се 2 различите методе у решавању проблема. У *h-element* методи (h-величина елемената) величина елемената се смањује, како би модел што верније приказао реалну геометрију система. До се у *p-element* методи (p-полином) повећава ред полинома, без мењања оригиналне мреже. Наведени приступи су приказани на слици 4.2.



Слика 4.2 - Remeshing у: *h* и *p-elementu*-у

P-елемент боље представља криве површине и погоднија је за коришћење када су градијенти напона велики. Овај приступ међутим захтева моћније компјутерске перформансе и не може се користити код нелинеарних модела материјала. Поред тога, величина елемената, ако су исувише велики, може утицати значајно на прецизност резултата.

4.1.4. Фазе FE анализе

У практичном смислу, фазе анализе одређеног проблема методом коначних елемената могу се набројати на следеће:

1. Постављање задатка
2. Припрема анализе (препроцесирање)

3. Анализа (процесирање)
4. Обрада резултата (постпроцесирање)
5. Провера и анализа резултата

Идентификацијом геометрије и улазних података о понашању материјала, са одговарајућим једначинама починње фаза препроцесирања. У најбољем случају геометрија се уноси као CAD модел. Након тога се приступа генерисању почетне FE мреже обрадка и алата, што представља најтежи али и најважнији корак у анализи. Потребно је знати коју врсту елемената изабрати као и густину мреже, да би се обезбедило решење за захтеваном прецизношћу и ефикасношћу [5].

У фази нумеричке анализе програм аутоматски генерише матрице које описују понашање сваког појединачног елемента, спаја матрице у велике матричне једначине, које представљају FE структуру, и решава једначине за одређивање непознатих величина у чворовима.

Добијени резултати се даље интерпретирају и прегладају у следећој фази од стране корисника. Савремени FE алати имају широке могућности приказа излазних резултата. У виду напонских поља, поља деформација, брзина деформација, температуре, дијаграма деформационих сила, приказа критеријума лома, хабање алата и тд.

С обзиром да се FE анализом добија математички модел процеса, он се мора на неки начин проверити и верификовати. Најчешће се ради експериментална провера у лабораторијским условима.

4.2. FEM моделирање процеса

У FE анализи производних процеса, сам процес се посматра као систем међусобно повезаних релевантних параметара. Кључни технички проблеми који се морају разматрати се односе на [5]:

- припремак: величина и облик, материјал, хемијски састав и микроструктура, особине течења, термичке и физичке особине;
- алат: геометрија, стање површина, материја и тврдоћа, температура прегревања, крутос и тачност;
- услове у међуконтакту: финализација површина, подмазивање, трење и пренос тополоте
- 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

Да би резултати анализе били поуздани и употребљиви за процену реалних процеса, пре моделирања морају се размотрити неколико тема:

- особине и понашање материјала;
- презентација геометрије;
- услови у међуконтакту;
- могућност *remeshing-a*
- правилан избор FE алата

4.3. Улазни подаци за нумеричко моделирање процеса

4.3.1. Особине и понашање материјала

У анализи процеса методом коначних елемената потребно је математички описати пластично течење материјала. Користе се две формулације за описивање понашање материјала при деформисању [5]:

1. структурна формулација (*structural formulation*)
2. формулација течења (*flow formulation*)

Формулација течења се генерално примењује у анализи процеса топле запреминске обраде метала, где су механичке особине материјала сензитивне на брзину деформације. Структурна формулација се примењује на процес хладне обраде, где је занемарљив утицај брзине деформације на карактеристике течења материјала. Како би се спровело прецизно нумеричко одређивање течења материјала при пластичном деформисању, деформационе силе и енергија процеса, веома је важно одредити карактеристике течење материјала, односно криву течења. Криве течења се одређују експериментално, најчешће тестом притискивања, затезања и увијања.

Савремени FEM алати располажу богатим базама података о материјалима, који садрже податке о стандардним карактеристикама материјала, као и податке о кривама течења у функцији деформације, брзине деформације и температуре. Оваква погодност омогућава бржу припрему улазних података за симулацију. Материјалима који не постоје у овим базама података, мора се експериментално утврдити недостајући подаци.

4.3.2. Геометрија

Анализе нумеричке симулације процеса могу се изводити као дводимензионалне (у условима осносиметричног или раванског деформационог стања) или тродимензионалне [5].

У 2D проблемима геометрија комада и алата се представља произвољном геометријом у равни, формираном комбинацијом линија, лукова или сплајнова. Геометрија комада се увек формира са затвореним контурама, пошто је неопходно формирати FE мрежу за нумеричку симулацију његовог обликовања.

У 3D симулацијама геометрија се дефинише површински, а у најбољем случају запремински моделима. Они се могу импортовати из других CAD/CAM алата, преко стандарних формата за трансфер података о геометрији.

4.3.3. Генерисање FE мреже и *remeshing*

Чак ако је почетна мрежа припремка добро генерисана, услед настанка великих деформација у току процеса искривљености мреже у појединим зонама постаје значајна. У том случају неопходно је генерисати нову FE мрежу, да би се симулација процеса наставила, и трансформирати податке са старе мреже на нову, да би се добили прецизни резултати. Процес генерисања нове мреже (*remeshing*) је захтеван посао и склон грешкама. FEM програмски пакети намењени за нумеричке симулације и анализе процеса, углавном имају модуле за аутоматско генерисање мреже коначних елемената [5].

Густина FE мреже се треба прилагодити геометријским детаљима комада и алата у свим корацима симулације. За добијање потребне густине мреже, корисник мора да изабере максималан број елемената довољан да се симулација изведе до краја са захтеваном прецизношћу. Претеран број елемената успорава симулацију, захтева већу снагу процесора и моћнији хардвер, посебно у 3D симулацијама, али даје далеко прецизније резултате.

У процесу генерисања нове мреже корисник може дефинисати зоне за које претпоставља да могу постојати проблеми при аутоматском *remeshing*-у, и у њима захтевати гушћу FE мрежу.

4.3.4. Услови у међуконтакту (трење и трансфер топлоте)

Значајан утицај на течење материјала и износ деформационе силе имају услови контактнoг трења и трансфер топлоте у међуконтакту између алата и комада. Поред улазних података о материјалу, њихово дефинисање има значајан утицај за прецизност резултата нумеричке симулације. Најчешће се гранични услови граничног трења одређују стандардним тестовима, од који је слободно савијање прстена (*ring test*) најшире примењивана, универзална метода. Поред одређивања вредности коефицијента/фактора трења неопходно је изабрати математички модел којим се он описује. У нумеричким симулацијама боље резултате даје закон константног трења од Colulomb-овог закона, па се углавном задаје вредност фактора трења m као улазни податак [5].

Услови трансфера топлоте у међуконтакту алата и материјала се најчешће дефинишу експерименталним утврђивањем коефицијента трансфера топлоте (НТС). Када се добије експериментална расподела температуре, она се упоређује са добијеном FE симулацијом са различитим задатим вредностима коефицијента трансфера топлоте.

4.4. Карактеристика FE софтвера (поузданост и време прорачуна)

Да би програм који је развијен на бази методе коначних елемената и поставки фундаменталне пластичности био примењен у нумеричким симулацијама од стране корисника, мора испунити одређене захтеве и поседовати пратеће програме [5]:

1. Програмске модуле или процедуре за:
 - интерактивно пре-процесирање које обезбеђује унос почетне геометрије, улазних података о карактеристикама материјала дела и алата, података о ограниченим условима и параметара за генерисање и регенерисање FE мреже;
 - аутоматско генерисање и регенерисање мреже;
 - интерактивно пост-процесирање за презентацију резултата.
2. Одговарајуће улазне податке који описују
 - термичке и физичке карактеристике материјала дела и алата;
 - трансфер топлоте и трења у међуконтакту;
 - течење материјала и његово понашање при релативно високим деформацијама.
3. Могућност анализе процеса при:
 - симулацији обраде под условима да је алат крут, ради смањења времена потребног за прорачун;
 - коришћење контактних напона и дистрибуције температуре дела, ради добијања напонско-температурне анализе алата

Време које је потребно за нумеричку симулацију зависи од врсте проблема, 2D или 3D, као и од перформанси компјутера. Симулација 2D проблема може трајати у распону од неколико минута до неколико сати, до се код 3D проблема очекује обрада у трајању од неколико сати до чак неколико дана. Брзина припреме и уноса података такође зависи од корисничког интерфејса и од вештине и знања корисника који га опслужује.

4.5. Примењени софтвер

Simufact.forming је софтверски пакет који омогућава лакшу и јефтинију производњу кроз моделирање и симулацију производног процеса. Представља програмско решење софтверске куће Simufact Engineering GmbH и њиховог стратешког партнера MSC.Software, лидера у CAE (Computer Aided Engineering - Компјутерски подржано инжењерство). Проистекао је као обједињена варијатна програма MSC.SuperForm и MSC.SuperForge.

Користи се за компјутерску 2D и 3D симулацију индустријских процеса обликовања. Представља комбинацију једноставног корисничког окружења, технологије FE (Finite Element - Коначни елементи) и FV (Finite Volume - Коначне запремине), и сложеног софтвера.

Програм поседује постпроцесор за визуелизацију резултата који омогућује увид у следеће аспекте симулираног процеса:

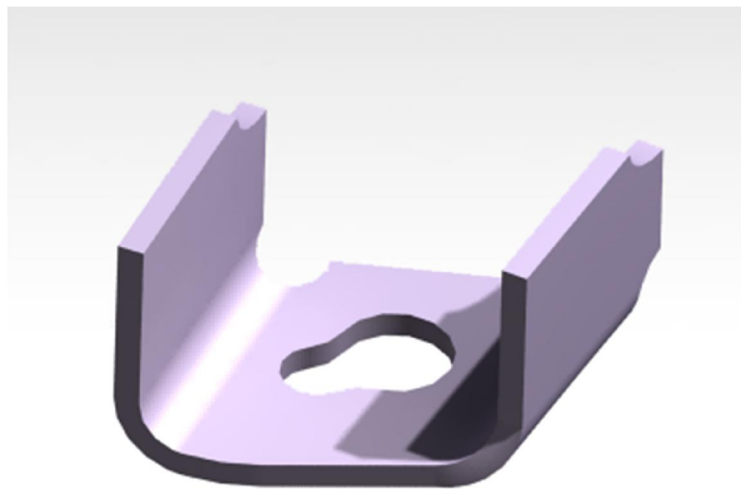
- слику течења материјала;
- попуњивање алата и маркирање ванконтактних зона;
- напонске, температурне, деформационе и дистрибуције притиска;
- хабање алата и процену критеријума лома;
- процену сила на алатима и напонских дистрибуција;
- приказ дефекта преклопа и зона поремећаја у подмазивању.

Коришћењем симулације процеса преко програма Simufact.forming, постиже се смањење: броја прототипова у пројектовању као и физичких прототипова, броја дефеката, шкартова и времена развоја производа. Све ово утиче на боље позиционирање компанија који га користе на тржишту, што га чини веома моћним и корисним алатом.

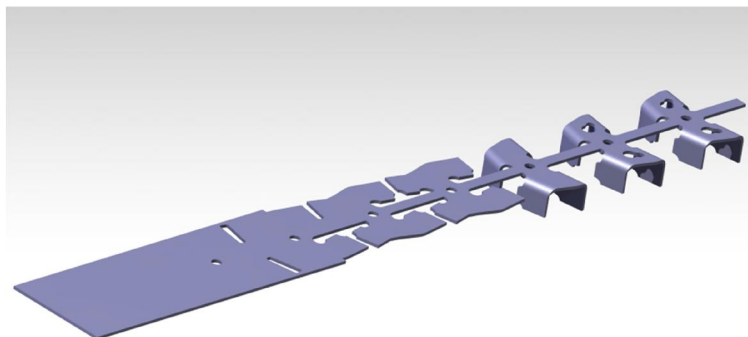
5.0 Опис проблема за решавање

Циљ завршног рада је анализа процеса савијања лима од челика S355J2 у корачном алату на хидрауличној преси за добијање дела приказаног на слици 5.1. Алат који је коришћен у овом раду је конструисан и израђен у фирми „Unior - components“ a.d у Крагујевцу.

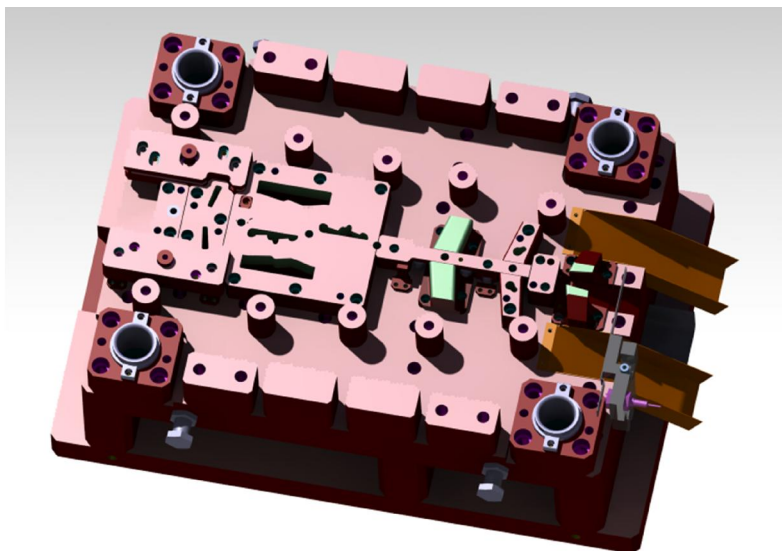
Целокупна технологија израде дела, ткз. „метода“ приказана је на слици 5.2, заједно са конструктивним решењем алата, слике 5.3 и 5.4. Технологија израде представља скуп операција: просецања, савијања, пробијања и одсецања за израду дела. У овом раду обрадићемо операцију двоугаоног савијања. Алат према решењу је корачни са стубним вођењем, израђен из више модула за појединачне операције.



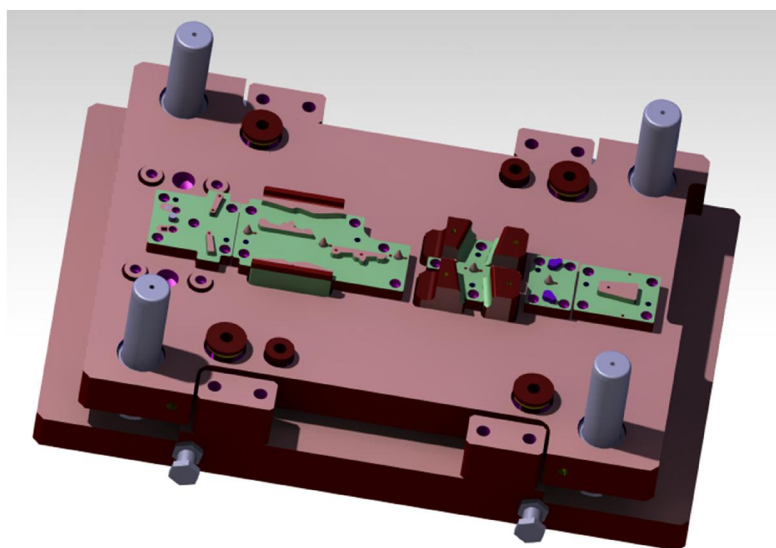
Слика 5.1 - Геометрија комада



Слика 5.2 - Технологија израде



Слика 5.3 - Доњи део алата



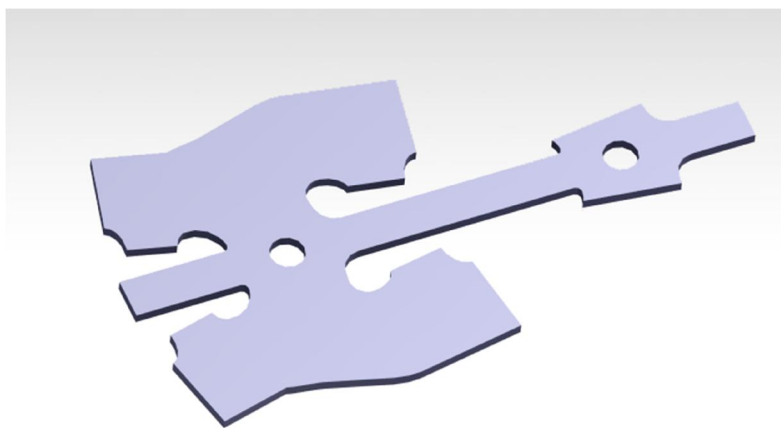
Слика 5.4 - Горњи део алата

6.0 Нумеричка симулација двоугаоног савијања

Добијени резултати симулација зависе од тачности параметара који се дефинишу од стране корисника. Важно је да ти улазни параметри што реалније описују процес, како би излазни резултати што верније приказали индустријски процес, и у фази постпроцесирања приказали мноштво информација о самом процесу.

Услед захтева поручиоца алата да се исти конструише у задатом кординатном систему, наишли смо на проблем уношења CAD модела алата и припремака (слика 6.1) у кординатни систем Simufact.forming-a. Алат и припремак су били диспозиционирани у односу на кординатни систем у ком делује хидраулична преса. Решење је коришћење *tabular motion* пресе за симулацију или корекција позиције алата и припремака. Припремак је извучен из методе, коришћењем програма CATIA, и приказан на слици 6.1.

У даљем раду урађене се обе симулације истог процес ради упоређивања добијених резултата.



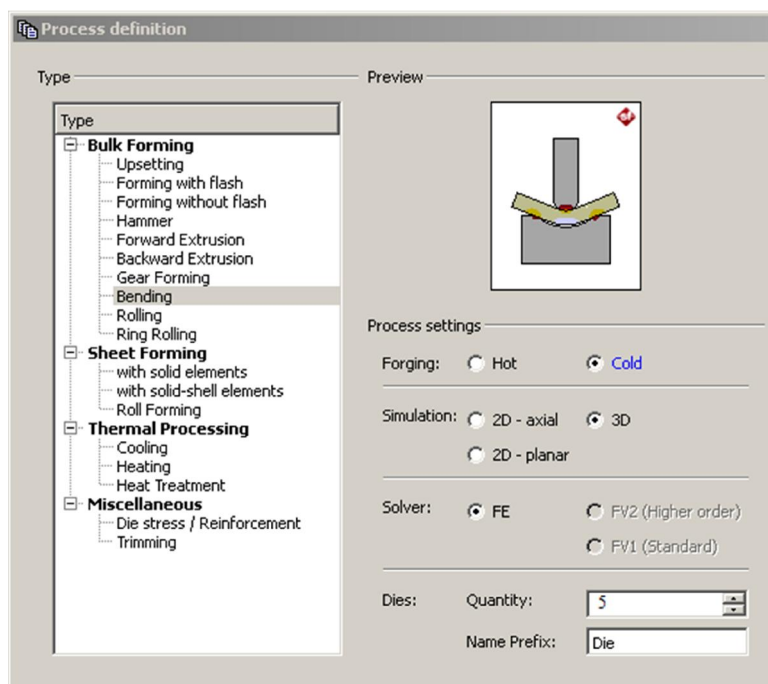
Слика 6.1 - Припремак

6.1. Нумеричка симулација при коришћењу „*tabular motion*“ пресе

6.1.1. Дефинисање типа производног процеса

На слици 6.2 приказан је прозор (Process definition). У њему се дефинише врста избора процеса, у нашем случају то је *Bulk Forming / Bending*. Након изабраног процеса

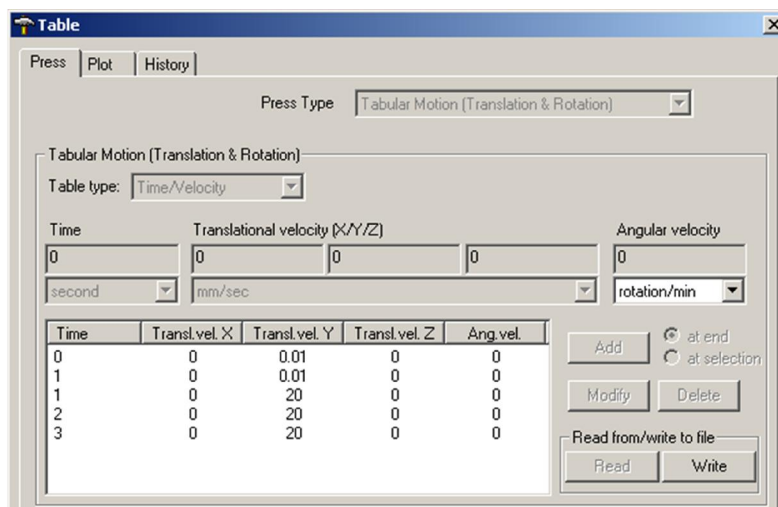
дефинише се температура обраде, Cold зато што се обрада изводи на собној температури. Симулацију изводимо у 3D окружењу користећи FE солвер. Најзад се дефинише број алата укључених у симулацији, који у нашем случају чине: два горња и један доњи обликач, подизач траке и притискивач.



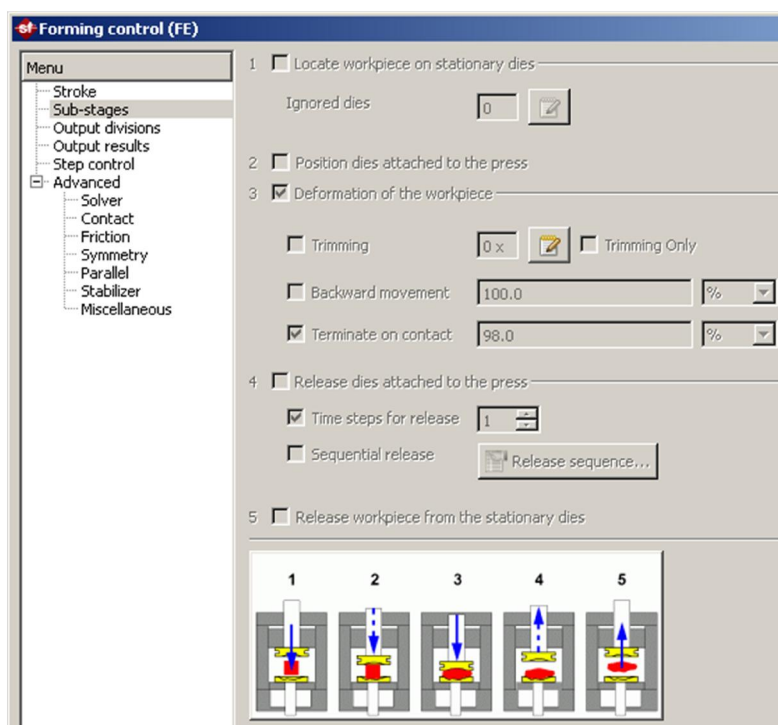
Слика 6.2 - Избор процеса

У процесу ове симулације, због већ поменутог проблема постављања алата и припремка у кординатном систему, користимо *tabular motion* пресу која се користи за процесе сложене кинематика (транслације и ротације). Таква преса омогућава нам избор правца њеног деловања на алат, у нашем случају потребно деловање је у правцу Y осе. При коришћењу ове пресе није могуће радити анализу понашања материјала обратка након вађења из алата већ само симулацију обликовања.

На слици 6.3 у прозору (*Table*) приказана је дефиниција пресе са њеним кретањем у правцу Y осе, док је у прозору (*Forming controle / Sub-stages*) на слици 6.4 дефинисане фазе симулације, тј. само фаза 3 обликовања материјала.



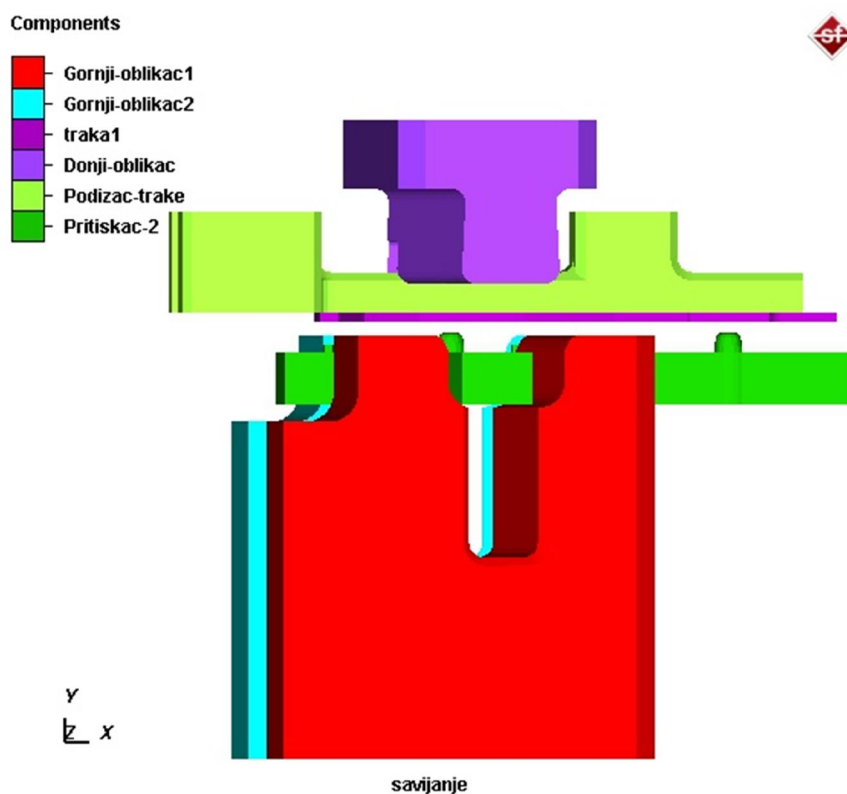
Слика 6.3 - Дефинисање „tabular motion“ пресе



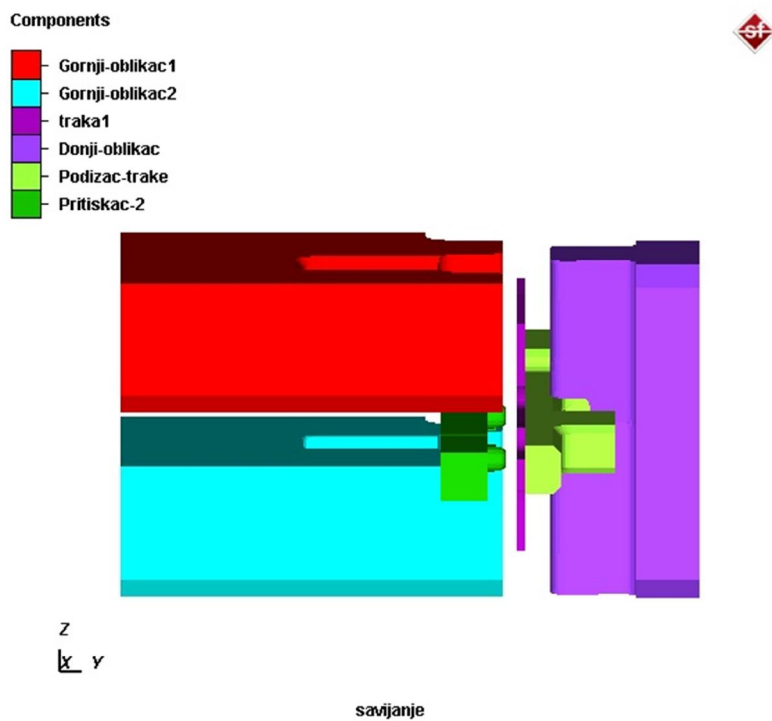
Слика 6.4 - Дефинисање фаза симулације

6.1.2. Увоз геометрије алата

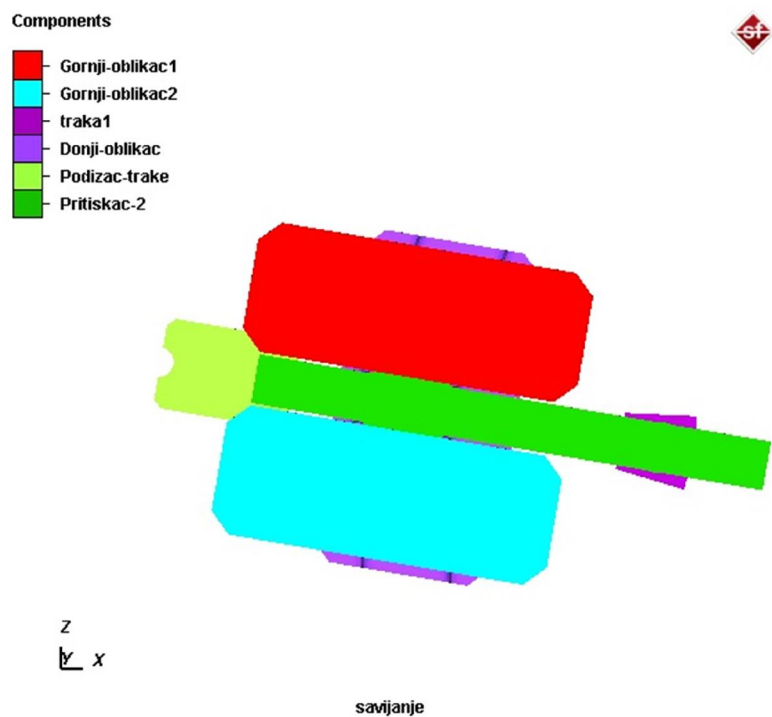
Како је конструкција алата урађена у програмском пакету CATIA, потребно је извести моделе у формату које је препознатљив програму Simufact.forming. У овом случају сви делови алата и радни комад потребни за симулацију извезени су у STL формату. На слици 6.5, 6.6 и 6.7 приказана је геометрија алата и радног комада увезених у програм, са кординатним системом које је задао наручилац, тј. реалном позицијом дела у склопу.



Слика 6.5 – Склоп делова алата у YX раван



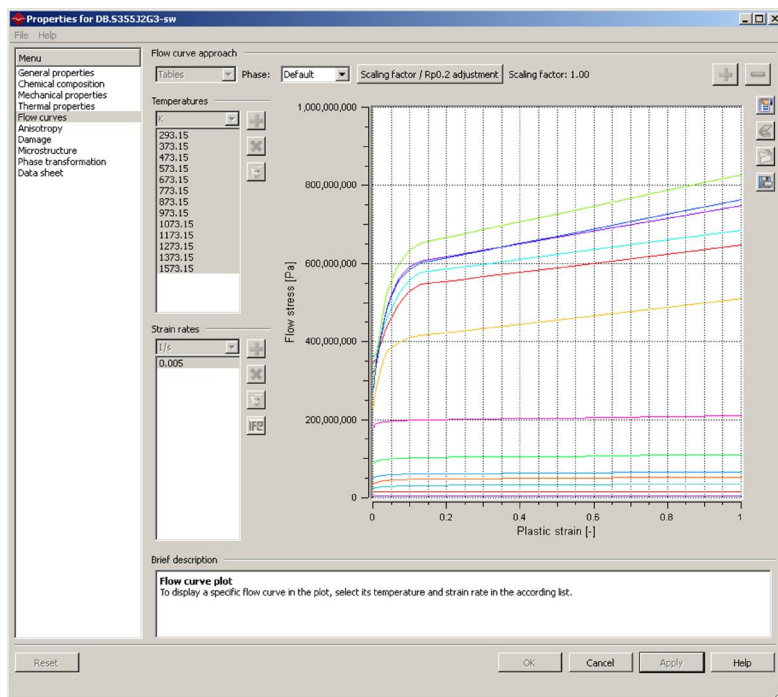
Слика 6.6 – Склоп делова алата у ZY раван



Слика 6.7 – Склоп делова алата у ZX раван

6.1.3. Дефинисање материјала радног комада

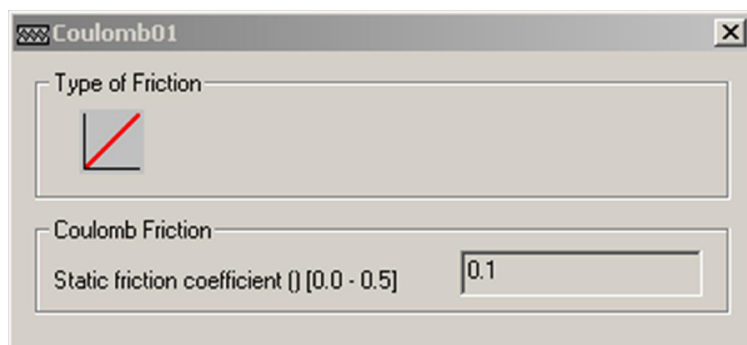
Материјал радног комада је S355J2+N који се налази у бази података материјала програма Simufact.forming. На слици 6.8 приказана је крива течења изабраног материјала.



Слика 6.8 - Крива течења

6.1.1 Дефинисање трења

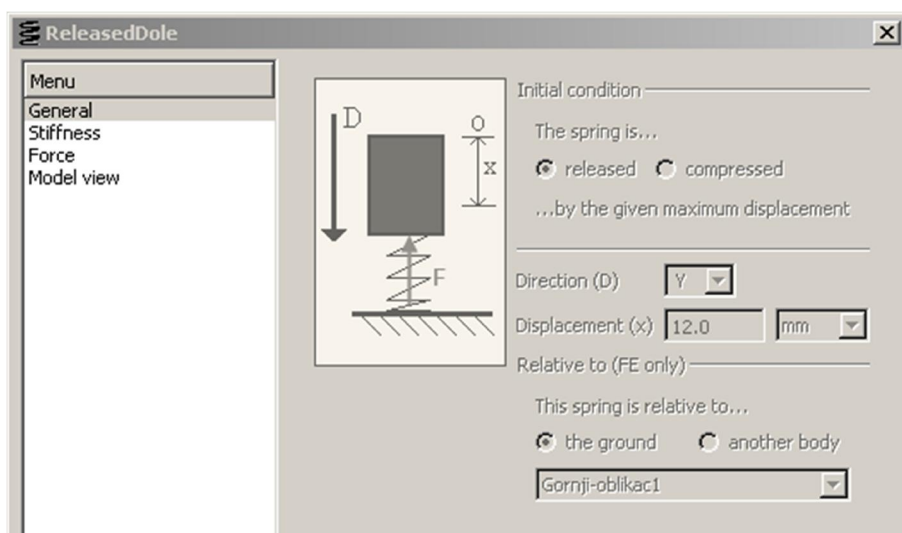
Коефицијент трења вредности 0,1 је дефинисан преко модела Кулоновог трења (слика 6.9)



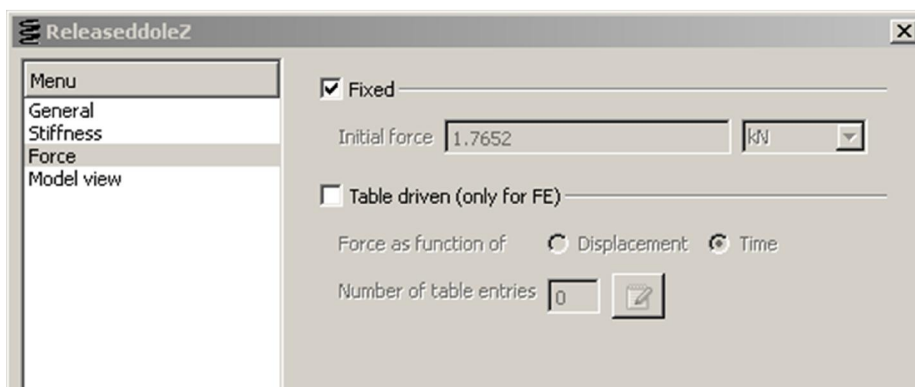
Слика 6.9 - Дефинисање трења

6.1.4. Дефинисање опруге

Пошто је у питању корачни алат, потребно је дефинисати подизање траке у алату. За ту операцију у процесу израде је задужен подизач траке, који уједно служи да обезбеди силу држања радног комада. Овај део алата се поставља на опруге, а конструктивним решењем предвиђено је да сила држања буде 1,7652 kN. На слици 6.10 и 6.11 приказани су параметри опруге.

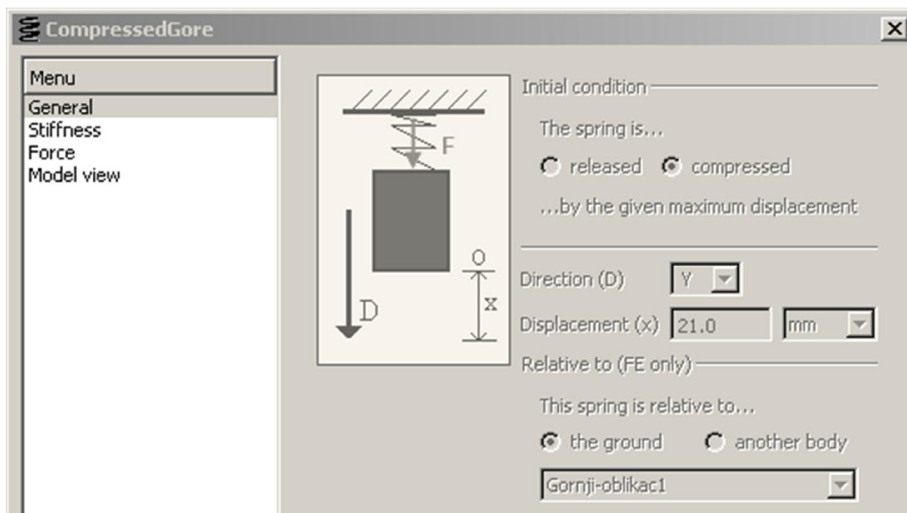


Слика 6.10 - Дефинисање опруге

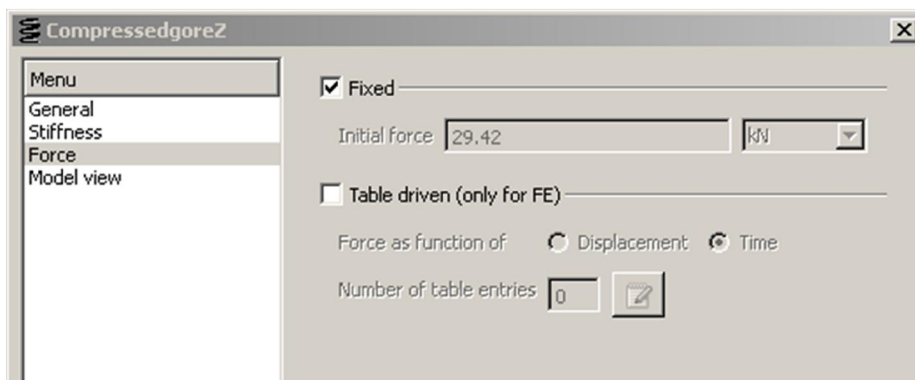


Слика 6.11 - Дефинисање силе у опрузи

Конструкцијом алата предвиђена је сила држања са горње стране радног комада коју обезбеђују притискач. Потребна сила обезбеђује се преко опруга и износи 29,42 kN. На слици 6.12 и 6.13 приказани су дефинисани параметри опруге.



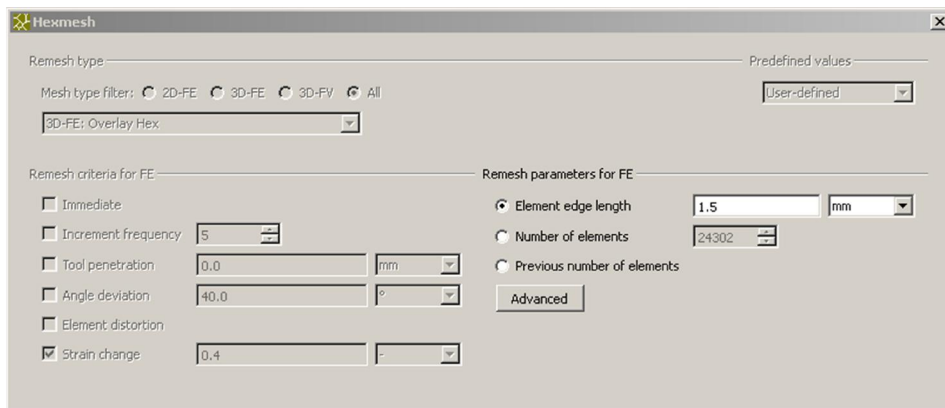
Слика 6.12 - Дефинисање опруге



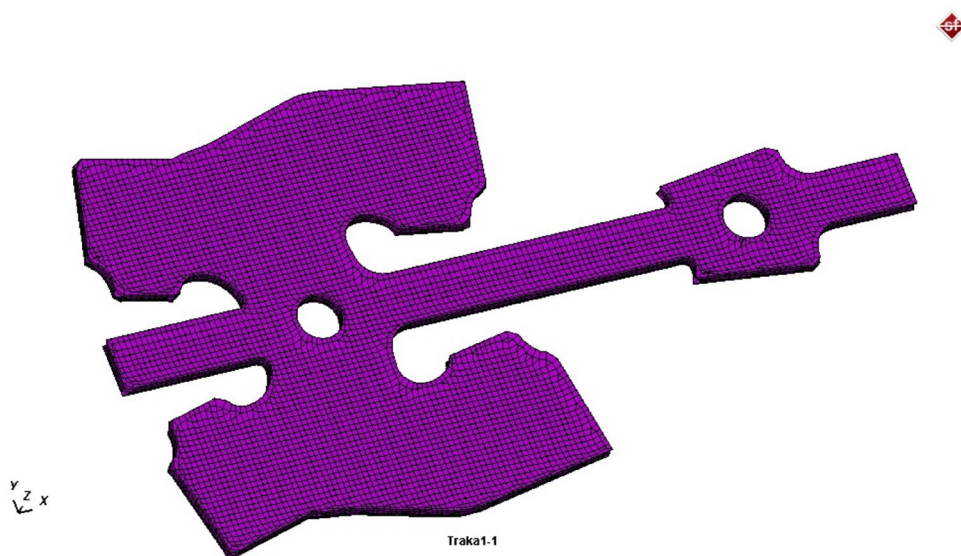
Слика 6.13 - Дефинисање силе у опрузи

6.1.5. Формирање мреже коначних елемената

Након дефинисања основних параметара процеса, креира се мрежа коначних елемената на радном комаду. На слици 6.14 представљен је прозор подешавања. Величина елемената је 1,5 mm, тако да је након генерисања мреже добијено 24302 појединачна елемента. На слици 6.15 приказана је креирана мрежа коначних елемената радног комада.



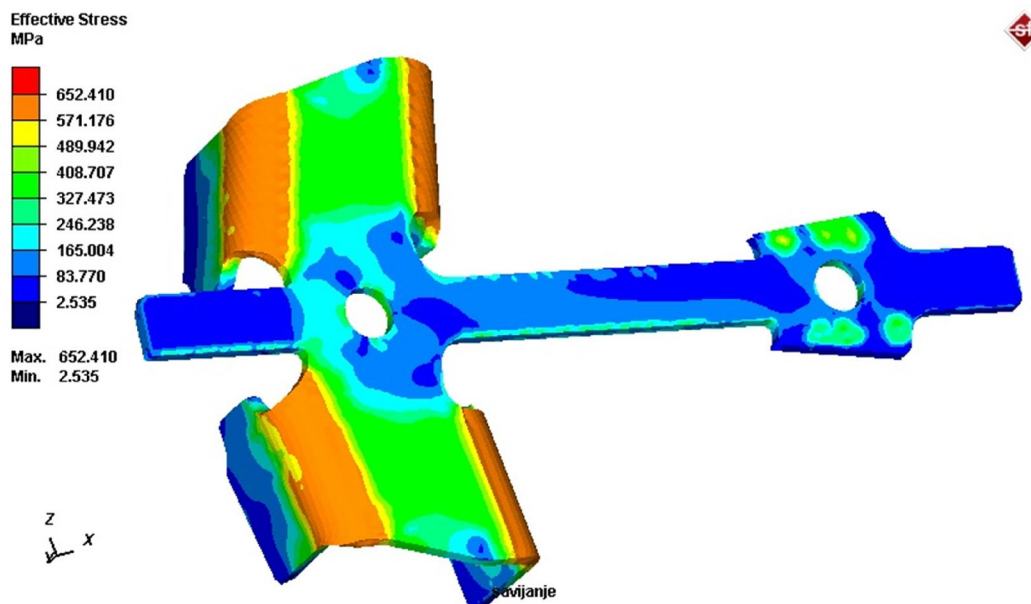
Слика 6.14 - Подешавање мреже коначних елемената



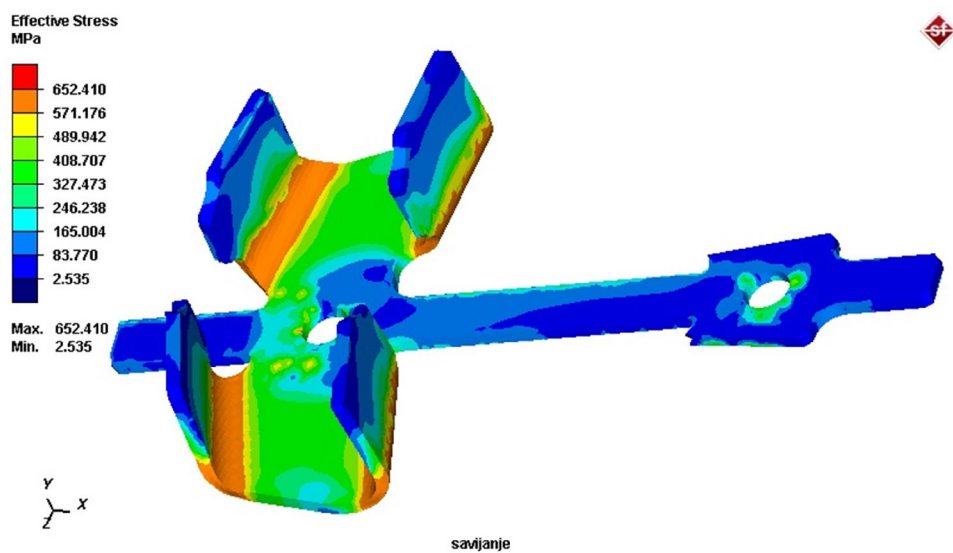
Слика 6.15 - Мрежа коначних елемената радног комада

6.1.6. Резултати симулације

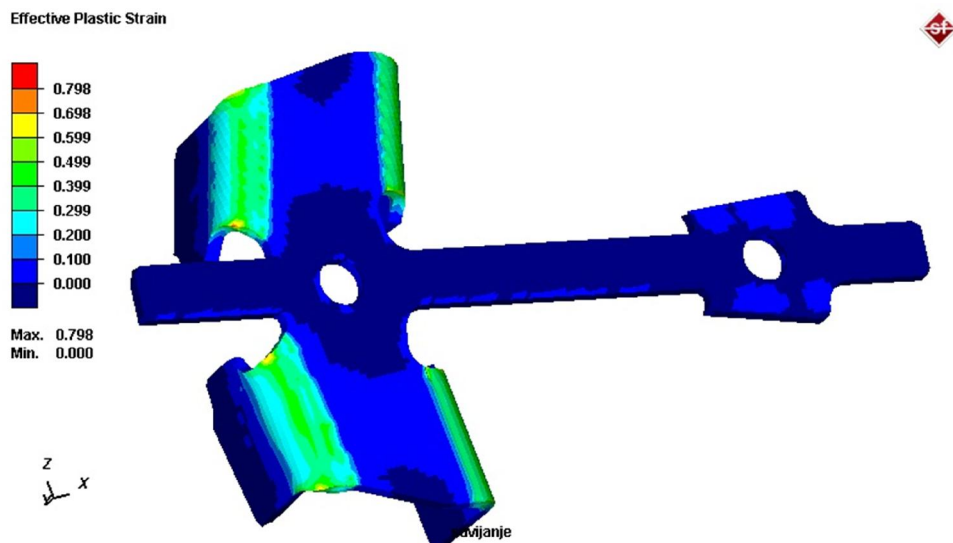
Након завршене симулације програм у постпроцесирању нуди преглед великог броја резултата симулације. На сликама 6.16 и 6.17 приказана је расподела ефективног напона на радном комаду, док се на сликама 6.18 и 6.19 види расподела пластичне деформације.



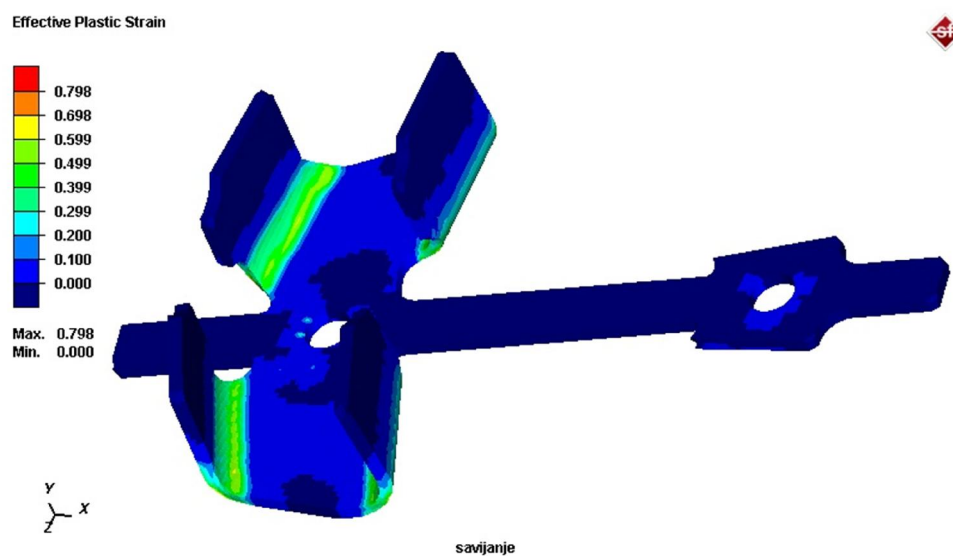
Слика 6.16 - Расподела ефективног напона (поглед 1)



Слика 6.17 - Расподела ефективног напона (поглед 2)



Слика 6.18 - Расподела пластичне деформације (поглед 1)



Слика 6.19 - Расподела пластичне деформације (поглед 2)

6.2. Нумеричка симулација при коришћењу хидрауличне пресе

Друга симулација код које је коришћена хидраулична преса, изведена је са одређеним променама у односу на прву. Задржани су следећи параметри:

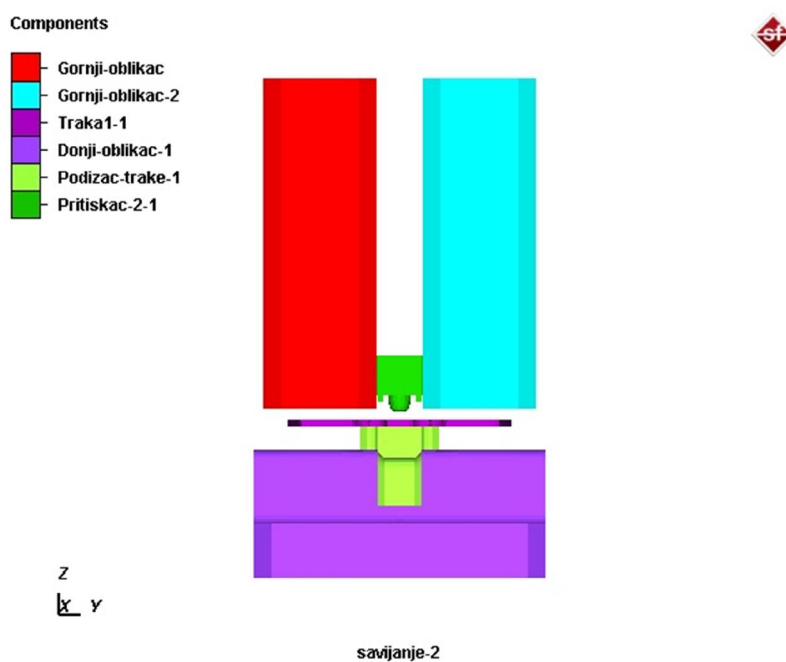
- дефинисање типа производног процеса;
- дефинисање материјала радног комада;

- дефинисање трења;
- дефинисање опруге;

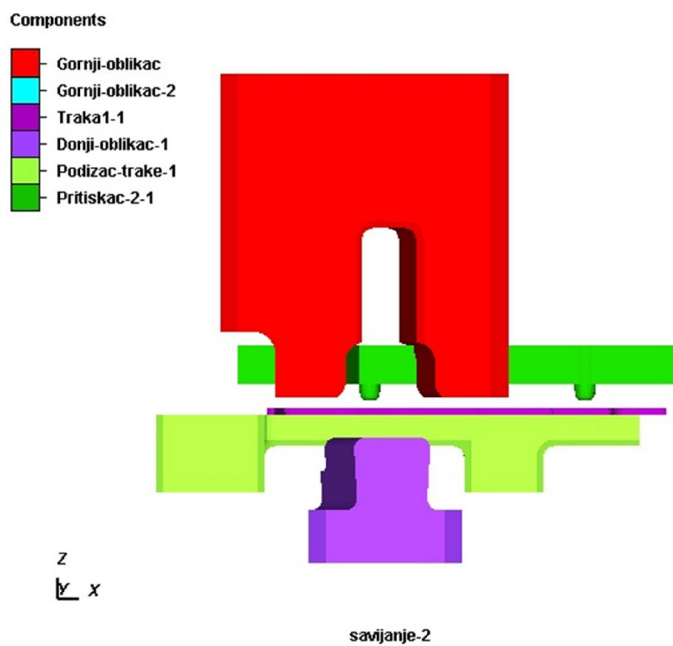
6.2.1. Увоз геометрије алата

За разлику од предходне симулације у којој су постављени делови алата и радни комад са њиховим претходно дефинисаним кординатним системом, у овој симулацији су сви делови алата и радни комад постављени у односу на апсолутни кординатни систем. Након корекције у програму CATIA, сви делови су извезени у STL формату, како би се увезли у Simufact.forming едитор.

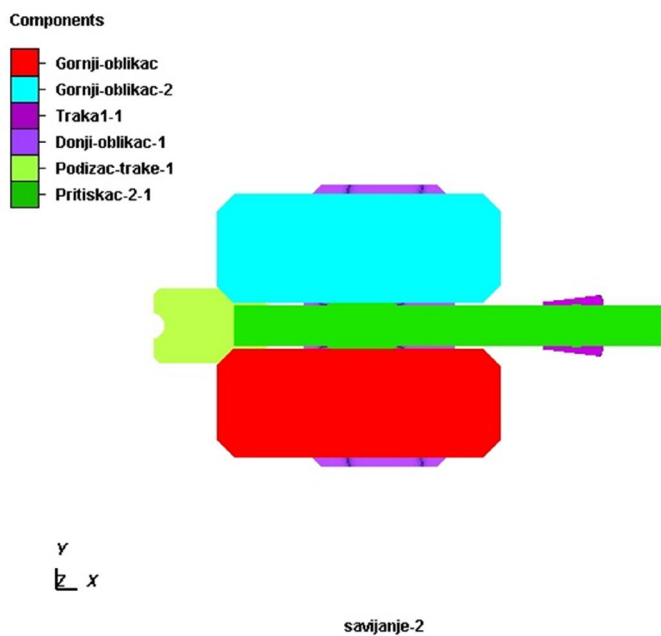
На сликама 6.20, 6.21 и 6.22 су приказани увезени делови алата и радни комад.



Слика 6.20 – Склоп алата у ZY равни



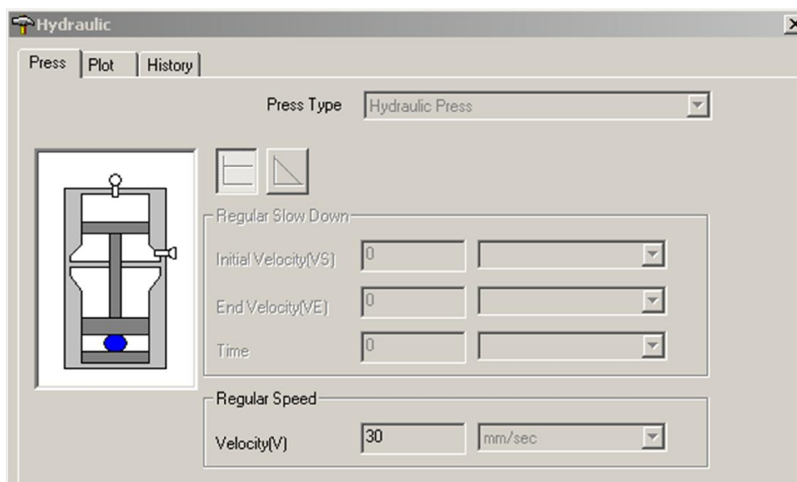
Слика 6.21 - Склоп алата у ZX равни



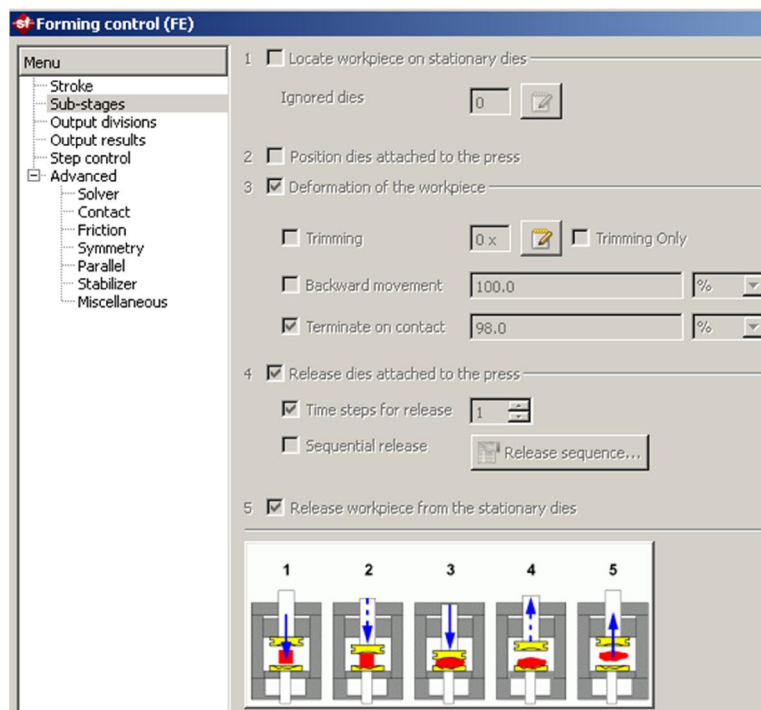
Слика 6.22 - Склоп алата у YX равни

6.2.2. Дефинисање пресе

У реалном процесу производње користи се хидраулична преса брзине 30 mm/sec са карактеристикама дефинисаним на слици 6.23, док је избор фаза симулације приказан на слици 6.24. За разлику од *tabular motion* пресе, при коришћењу хидрауличне пресе може се симулирати не само обликовање материјала већ и растеређење обратка након вађења из алата.



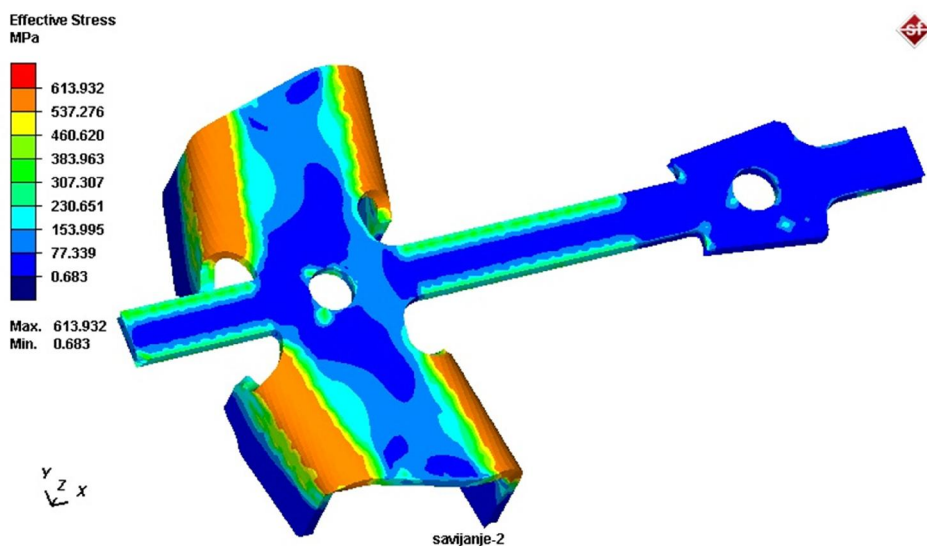
Слика 6.23 - Дефинисање хидрауличне пресе



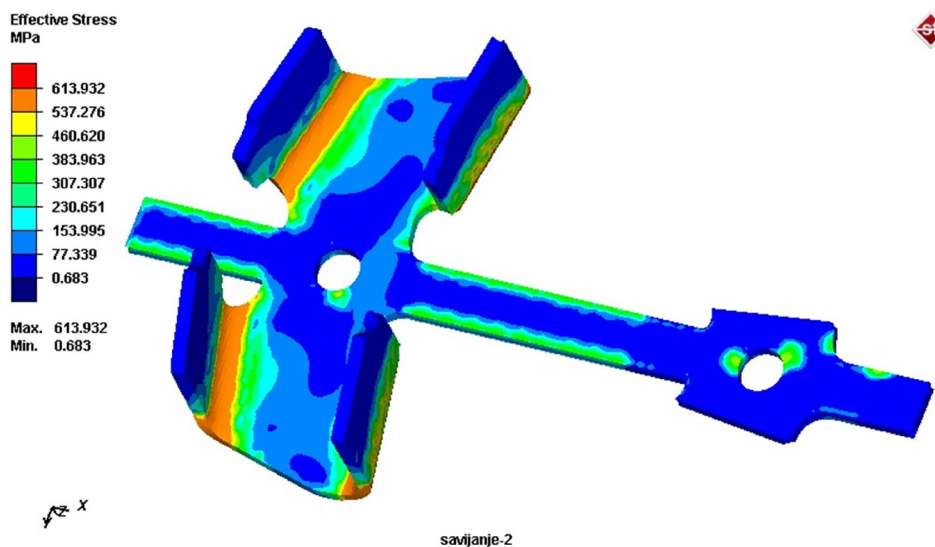
Слика 6.24 - Дефинисање фаза симулације (обликовање, растеређење алата, вађење радног комада)

6.2.3. Резултати симулације

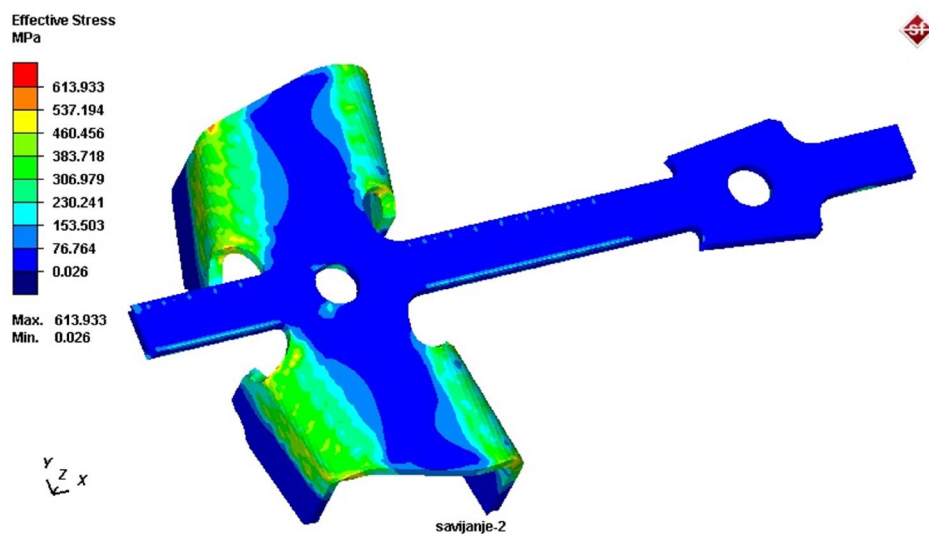
Након завршене друге симулације могу се прегледати резултати прорачуна: расподела ефективног напона и расподела пластичне деформације у радном комаду. У постпроцесирању резултате можемо погледати у различитим тренуцима процеса деформисања. Овде је то приказано на крају процеса обликовања, и након вађења радног комада из алата и његовог растеређења (*release*). На сликама 6.25 и 6.26 је приказана расподела ефективног напона до је радни комад у алату, док је на сликама 6.27 и 6.28 приказана расподела напона након растеређења радног комада.



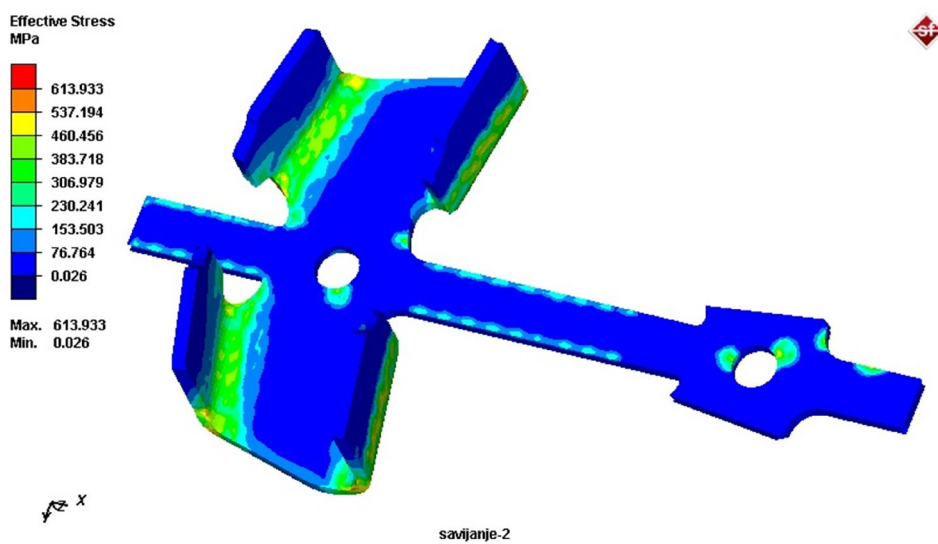
Слика 6.25 - Расподела ефективног напона (поглед 1)



Слика 6.26 - Расподела ефективног напона (поглед 2)

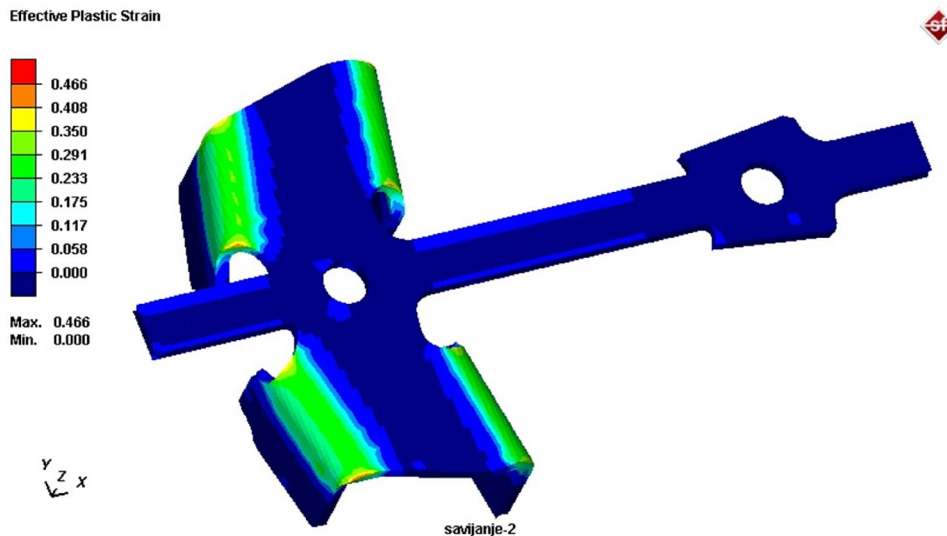


Слика 6.27 - Расподела ефективног напона - release (поглед 1)

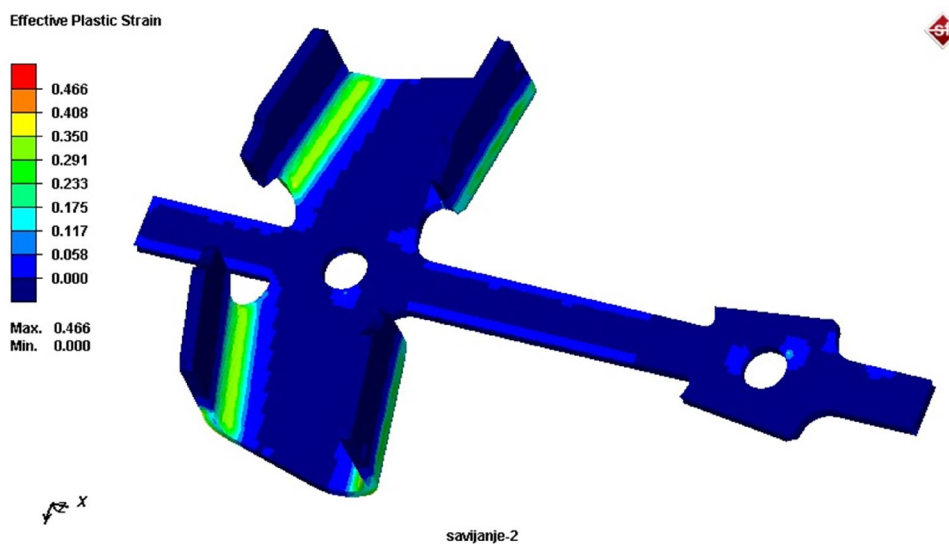


Слика 6.28 - Расподела ефективног напона - release (поглед 2)

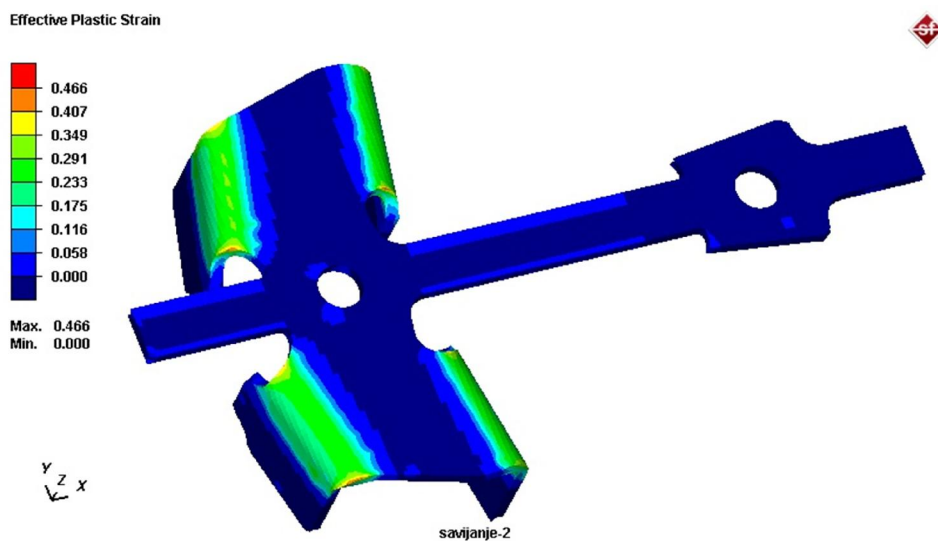
На сликама 6.29 и 6.30 је приказана расподела ефективне пластичне деформације на крају процеса обликовања док је радни комад у алату, док је на сликама 6.31 и 6.32 приказана расподела деформација након растерећења.



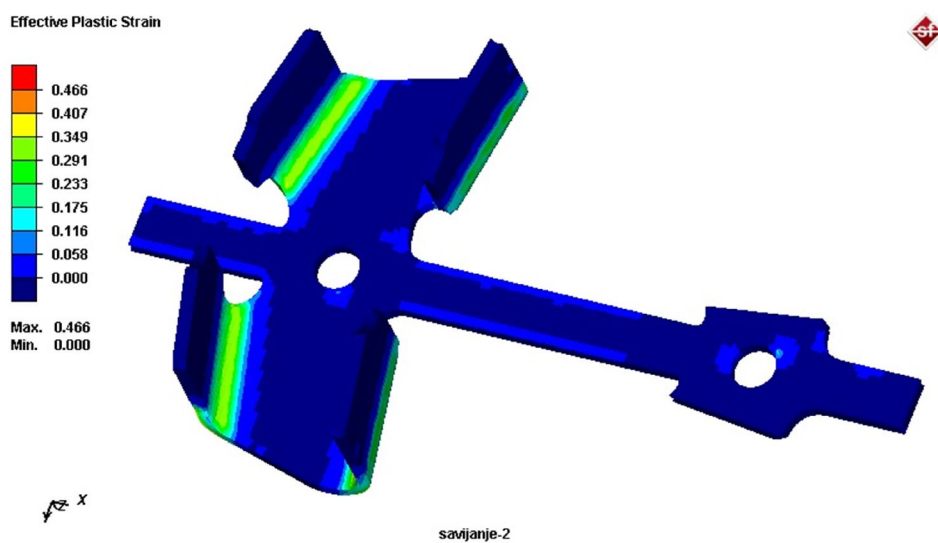
Слика 6.29 - Расподела пластичне деформације (поглед 1)



Слика 6.30 - Расподела пластичне деформације (поглед 2)



Слика 6.31 - Расподела пластичне деформације - release (поглед 1)

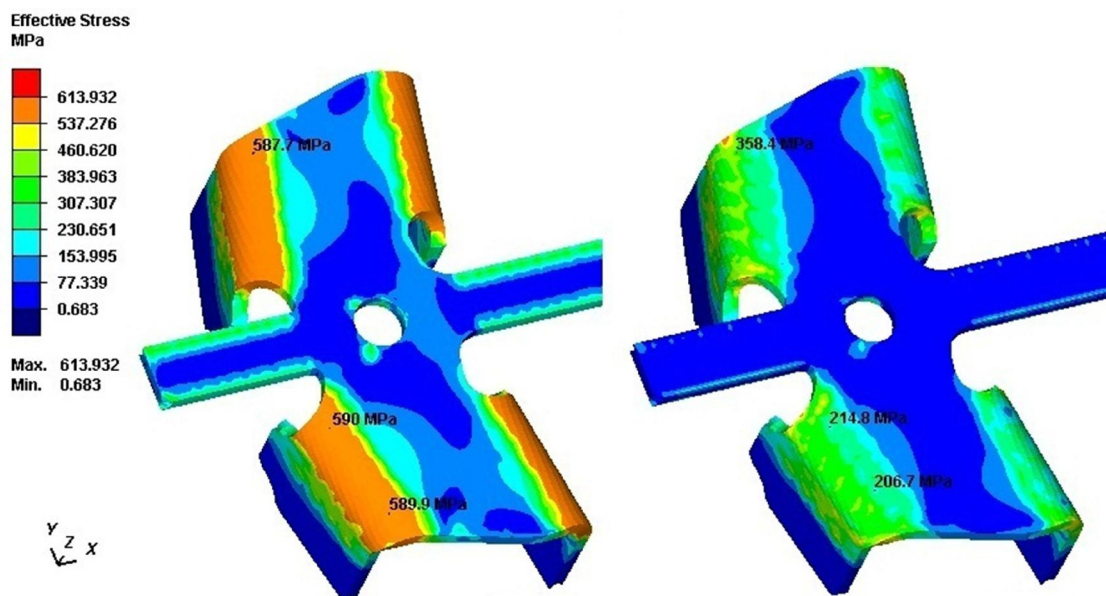


Слика 6.32 - Расподела пластичне деформације- release (поглед 1)

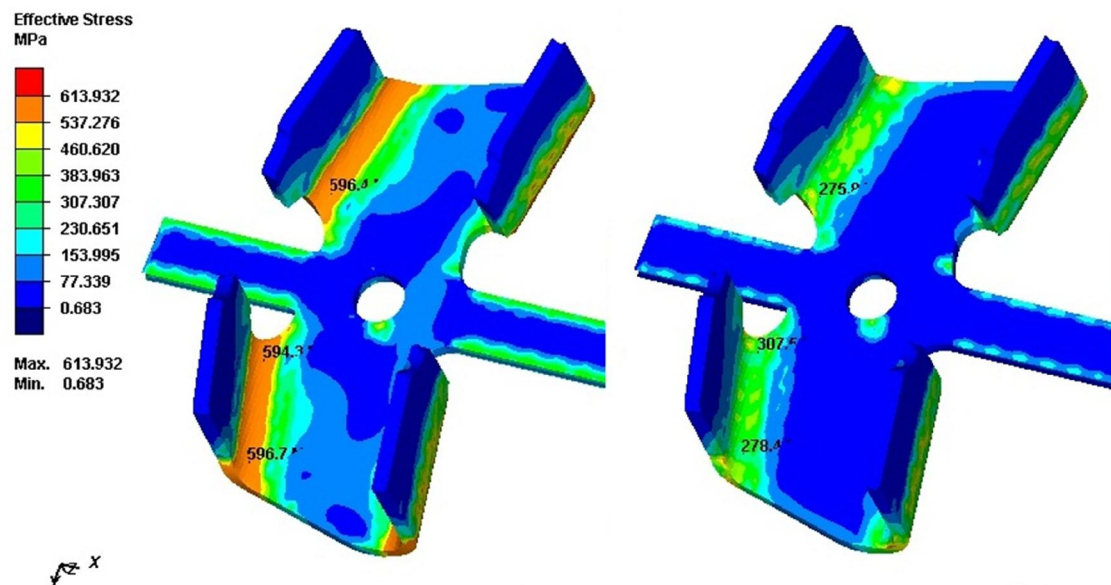
7.0 Анализа добијених резултата

Након завршетка обе симулације можемо закључити да избор различитих преса због проблема постављања у кординатном систему није давао различити резултате симулација. Подаци који су уношени: материјал припремка, опруге, коефицијенти трења и наравно геометрија алата и припремка остали су исти, тако да је деформисање дела текло у оба случаја исто. Добијени део је задовољавао захтевану геометрију од стране наручиоца алата, те се сматра да је конструктивно решење истог урађено успешно.

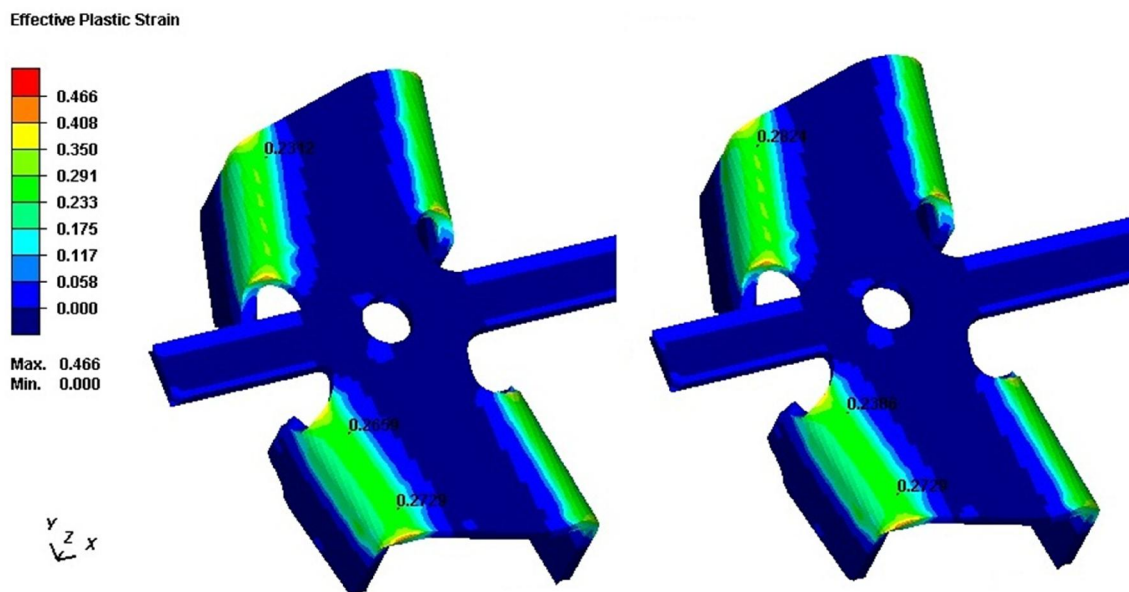
У другој симулацији на хидрауличној преси, која дозвољава преглед резултата пре и након растерећења, измерили смо расподеле ефективног напона и пластичне деформације у оба случаја и резултате графички упоредили. На слици 7.1 и 7.2 приказано је упоређивања расподеле ефективног напона, док је на сликама 7.3 и 7.4 приказана расподела пластичне деформације.



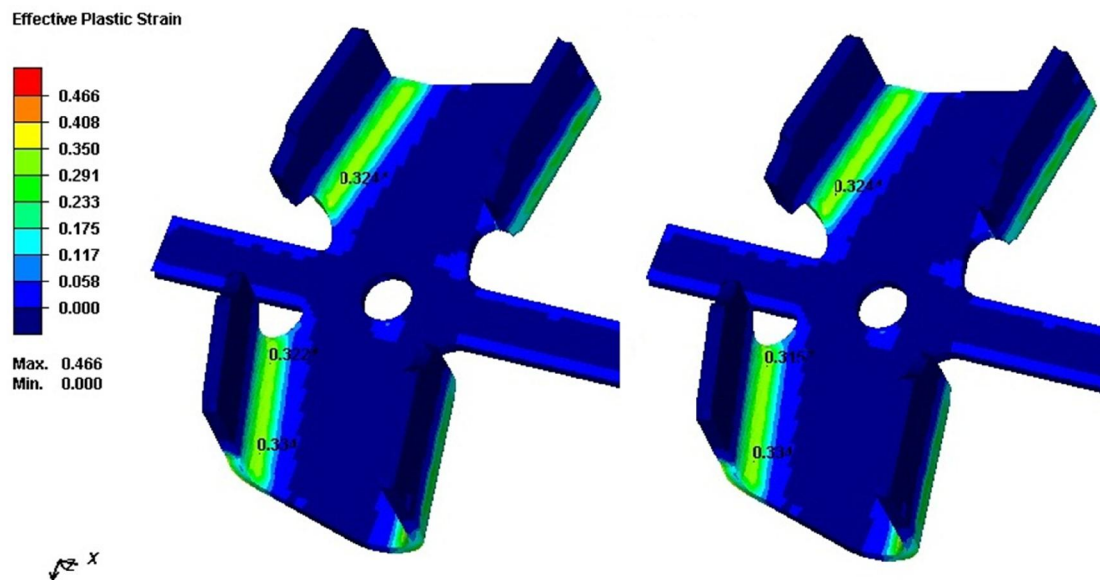
Слика 7.1 – Упоређивање расподеле ефективног напона пре и после растерећења (поглед 1)



Слика 7.2 – Упоређивање расподеле ефективног напона пре и после растерећења (поглед 2)



Слика 7.3 – Упоређивање расподеле пластичне деформације пре и после растерећења (поглед 1)



Слика 7.4 – Упоредивање расподеле пластичне деформације пре и после растерећења (поглед 2)

8.0 Закључак

Данас се ниједна савремено производња или пројектовање не може замислити без употребе рачунарских алата. Уз коришћење адекватних софтвера који прате потражњу тржишта за идејним решењима проблема са којима се инжењери сусрећу, могуће је искористити све могућности рачунарских технологија. Савремена производња мора бити спремна да одговори на захтеве тржишта па се у свим њеним сферама од развоја, конструкције, симулације, па до провере квалитета и тачности користе софтвери.

Процес који се приказан у раду представља обавезан корак у конструисању приликом израде алата, пре његове физичке израде, који конструктор треба проћи. Он омогућава проверу изводљивости идејног решења проблема који му је задат. За разлику од приступа пројектовању „*trial-and-error*“ методом, елиминишу се уочене грешке тако што се цео процес симулира у 3D окружењу. При појави грешака исте се у процесу конструисања накнадно исправљају, чиме се избегава трошак нетачне израде алата.

У овом раду је процес симулације урађен накнадно пошто је алат физички произведен у фирми „Unior-componentes“ a.d из Крагујевца од које су добијени CAD модели алата. Након тога у истој фирми произведен је завршни радни комад, као потврда тачности конструктивног решења алата. Ово нам је омогућило увид у тачност програма и резулата симулације, чиме је потврђена поузданост моделирања реалног процеса обраде применом нумеричких ФЕМ и ФВМ метода.

Ако знамо да се технологија и техника незаустављиво свакодневно усавршавају, можемо очекивати да ће примена напредних технологија виртуелног инжењеринга у великој мери унапредити квалитет и начин пројектовања индустријских алата.

Литература

- [1] Србислав Александровић, Милентије Стефановић, *Технологија пластичног обликовања метала*, Крагујевац 2010.
- [2] Бранислав Деведић, *Обрада метала деформисањем*, Београд 1981
- [3] Владо Вујовић, *Технологија пластичности у машинству*, Нови сад 1990
- [4] Бинко Мусафија, *Обрада метала пластичном деформацијом*, Универзитет у Сарајеву, Сарајево 1969
- [5] Весна Мандић, *Физичко и нумеричко моделирање процесима обраде деформисањем*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац 2012
- [6] Весна Мандић, *Моделирање и симулација у обради деформисањем*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2005
- [7] User manual, Simufact.forming, v.11.01, 2012.