

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: 77/2015

Марко Н. Поповић

**Реинжењеринг технологије савијања
дебљих лимова кроз FE нумеричку
симулацију и процену ефекта еластичног
исправљања
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др Весна Мандић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- изврши прикупљање литературних података о обради савијањем са посебним нагласком на појаву еластичног исправљања у процесу савијања,
- опише карактеристике процеса угаоног савијања, узроке и ток настанка еластичне повратности као и да представи начине компензације ове појаве,
- кроз FE нумеричку симулацију процеса савијања у програмском пакету *Simufact.forming* процени ефекте еластичног исправљања и квалитет добијеног дела са аспекта технологичности и тачности,
- предложи реинжењеринг технологије и конструкције алата за добијање прецизног дела без дефеката.

Препоручена литература:

[1] Бинко Мусафија, *Обрада метала пластичним деформисањем*, Сарајево, 1979. год.

[2] Србислав Александровић, Милентије Стефановић, *Технологија пластичног обликовања метала*, Крагујевац, 2010. год.

[3] Милан Ћурчић, *FE симулација процеса савијања са проценом еластичног исправљања*, дипломски рад, Крагујевац, 2008

Крагујевац, датум

Ментор:

Проф. Др Весна Мандић

Садржај

1. Увод.....	3
2. Обрада метала деформисањем.....	4
3. Основе процеса савијања лимова	6
3.1 Угаоно савијање	6
3.2 Алат за савијање.....	7
4. Анализа једноугаоног савијања.....	9
4.1 Положај неутралне осе	10
4.2 Одређивање димензија почетног комада.....	11
5. Еластично исправљање савијених делова.....	12
5.1 Фактор еластичног исправљања.....	14
6. Препоруке за успешно угаоно савијање у алатима	16
6.1 Минимална вредност радијуса савијања	16
6.2 Максимална вредност радијуса савијања	17
6.3 Препоруке за алате са компензацијом еластичног исправљања	18
7. Моделирање и симулација у ОМД.....	19
7.1 Опис програмског пакета Simufact.forming	19
7.2 Метода коначних елемената	20
8. Опис задатка.....	21
8.1 Иницијални улазни подаци за нумеричку симулацију прве операције савијања.....	22
8.1.1 Дефинисање врсте нумеричке симулације.....	24
8.1.2 Увоз геометрије, избор материјала, пресе и дефинисање опруге.....	24
8.1.3 Генерисање FE мреже радног комада.....	27
8.1.4 Генерисање FE мреже граничника.....	28
8.1.5 Контролни параметри процеса.....	28
8.1.6 Дефинисање контакт табеле	29
8.1.7 Резултати нумеричке симулације прве операције савијања.....	29
8.2 Иницијални улазни подаци за нумеричку симулацију друге операције савијања	31
8.2.1 Резултати нумеричке симулације за другу операцију препоручене технологије	34
9. Реинжењеринг технологије	38
9.1 Реинжењеринг друге операције савијања	38
9.1.1 Кориговање хода притискивача	38
9.1.2 Модификације на моделима алатима	39
9.1.3 Резултати реинжењеринга друге операције савијања.....	40

9.2 Реинжењеринг технологије савијања применом припремка без отвора.....	42
9.2.1 Резултати нумеричке симулације процеса савијања припремка без отвора.....	42
9.3. Реинжењеринг технологије савијања са компензацијом углова еластичног исправљања.....	46
9.3.1 Нумеричка симулација прве операције савијања са компензацијом угла еластичног исправљања.....	46
9.3.2 Резултати нумеричке симулације прве операције савијања са компензацијом угла еластичног исправљања.....	47
9.3.3 Нумеричка симулација друге операције савијања са компензацијом угла еластичног исправљања.....	49
9.3.4 Резултати нумеричке симулације друге операције савијања са компензацијом угла еластичног исправљања.....	49
10. Анализа добијених резултата и закључна разматрања	52
Литература	55

Резиме

У овом раду се описују главне карактеристике процеса угаоног савијања. Посебно се разматрају ефекти еластичног исправљања и препоруке за успешно угаоно савијање. Кроз FE нумеричку симулацију извршена је анализа процеса савијања дебљег лима на примеру реалног индустријског процеса и иницијалне технологије. На основу уочених дефеката и непрецизности дела урађен је реинжењеринг технологије и конструкције алата за добијање квалитетног дела са одговарајућом компарацијом и анализом добијених резултата.

Кључне речи: савијање, еластична повратност, FE нумеричка симулација

Abstract

In this paper we describe the main characteristics of the angular bending process. Particular consideration is given to the effects of springback and recommendations for successful bending. Through the FE numerical simulation, an analysis of the thick-sheet bending process in the case of a real industrial process and initial technology was performed. On the basis of observed defects and inaccuracy of the work, reengineering of technology and tool construction for obtaining quality work was done with appropriate comparison and analysis of the obtained results.

Key words: bending, springback, FE numerical simulation

1. Увод

Савијање представља једну од најзаступљенијих и најбитнијих метода обраде метала деформисањем која има важну улогу у металопрерађивачкој индустрији због низа предности и погодности које нуди.

Циљ завршног рада је да се изврши анализа процеса савијања лима са посебним нагласком на еластичну повратност, и процени квалитет добијеног дела, односно ефекат еластичног исправљања кроз FE нумеричку симулацију у програмском пакету *Simufact.forming*. Рад се састоји се из два дела, теоретског и практичног.

Први део рада обухвата кратак опис обраде метала деформисањем, дата је основна подела, описано подручје примене и представљене су предности обраде. Следи опис савијања где је дата подела савијања и основне фазе процеса. Такође, описане су карактеристике процеса савијања, предности и недостаци, и дат је илустративни приказ алата за савијање са основним елементима. Поглавље које се бави анализом једноугаоног савијања даје основне параметре, а такође је описан поступак одређивања неутралне осе и развијеног стања комада.

Важнији део рада представља поглавље у којем је описана појава еластичне повратности са главним карактеристикама и узроцима исте. У раду су дате методе за процену еластичне повратности у процесима угаоног савијања, као препоруке за компензацију еластичне повратности кроз конструктивне елементе алата.

Други део завршног рада представља поставке и резултате анализе индустријског процеса савијања применом методе коначних елемената и реинжењеринг технологије за елиминисање уочених дефеката и нетачности димензија обратка. Овај део обухвата и анализу и упоређивање резултата добијених FE нумеричком симулацијом и оцену квалитета добијеног дела.

2. Обрада метала деформисањем

Обрада метала деформисањем представља обраду метала без скидања струготине. Код ове обраде пластична деформација се остварује под дејством довољно великог спољашњег оптерећења. У току процеса долази до значајних квалитативних промена у материјалу, а механичка, технолшка и друга својства готовог дела се разликују од својстава које је готов део имао пре процеса [2].

Циљ обраде метала деформисањем је да се најмањим бројем радних операција и са минималним отпатком материјала добије комад коначног облика. Методе обраде метала деформисањем налазе најширу примену у металопрерађивачкој, аутомобилској, авио индустрији, индустрији полуфабриката, прецизној механици итд. За обраду метала деформисањем може се рећи да је везана искључиво за серијску производњу, док обрада метала са скидањем струготине налази примену и у појединачној производњи. Пластична деформација метала се може вршити у хладном или у топлотном стању. Отпор којим се метал супроставља деформацији опада са порастом температуре метала што олакшава услове обраде [1].

Код ове обраде разликују се две фазе процеса. У првој фази процеса тело се деформише еластично. Након тога почиње остваривање трајних пластичних деформација. То је почетак друге фазе процеса и траје до коначне промене облика [2].

Материјал који се прерађује овом методом потребно је довести у стање пластичног течења, а то значи да га је неопходно оптеретити изнад границе еластичности. Машине за обраду деформисањем остварују потребан рад и силу (оптерећење) и у ове машине спадају: пресе, ковачки чекићи, машине за савијање, маказе, аутомати итд. Функцију обликовања има алат који се прикључује машини. Потребна сила се преноси са машине на алат, а затим на радни комад. Машина остварује динамику обраде, док алат обезбеђује геометрију радног комада. Подручје обраде метала се са становишта деформације дели у две групе: прва група је деформисање до разарања, а друга пластично деформисање [1].

Лимови се пластичном деформацијом обрађују процесима: савијања, дубоког извлачења и разним пластичним обликовањима. Тела сложеног облика се обрађују процесима: пресовања, истискивања и ковања. Због преплитања операција у индустријској производњи, не може се говорити о прецизној подели јер се савијањем обрађују и компактна тела, а поједине цеви израђене процесом ковања често се подвргавају сужавању. Поред низа основних операција обраде, постоје и разне комбинације као што су: просецање и пробијање са савијањем, просецање са извлачењем, комбинације разних обликовања и сл [1].

Делови који се добијају оваквом обрадом имају добре механичке карактеристике и израђују се једноставно, брзо и ефикасно. Такође велики број делова може се произвести само поступцима ТПО. Степен искоришћења материјала је висок, а технологију прати релативно низак утрошак енергије по једини масе комада.

Недостаци обраде метала деформисањем су [2]:

- пуна економска оправданост најчешће се постиже у серијској, великосеријској и масовној производњи,
- материјали који имају ниску почетну пластичност тешко се обрађују,
- појава великих деформационих сила и напона током појединих процеса обликовања што захтева снажне машине и скупе алате.

3. Основе процеса савијања лимова

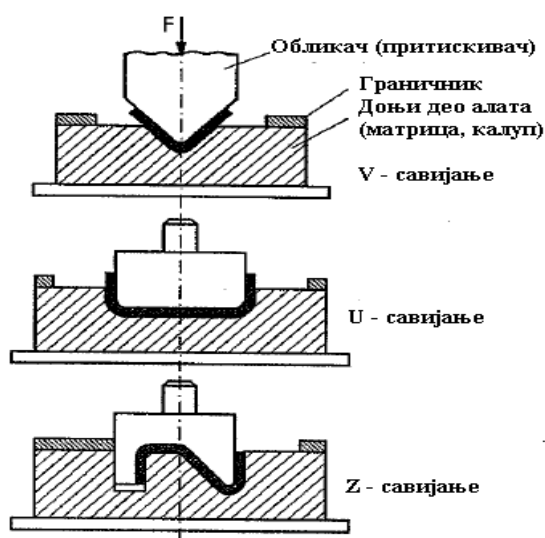
Обрада савијањем припада подручју обраде метала пластичним деформисањем. Веома је заступљена као грана технологије у металопрерађивачкој, како у малосеријској тако и у вишесеријској производњи [1].

Савијање се може поделити према технолошким карактеристикама процеса и карактеру производње. Угаоно савијање се може обављати на универзалним пресима (кривајним, коленастим, ексцентар, хидрауличним и фриксионим). За профилно савијање намењене су специјалне „абкант” пресе и ваљци за савијање. Кружним савијањем могу се обликовати лимови и профили. Поред наведених метода постоји још и савијање цеви и савијање делова мањих димензија (од траке и жица) [1].

Технологија савијањем у комбинацији са заваривањем често замењује технологију ливења и ковања, а производни процес је једноставнији. Конструкције израђене технологијом савијања су лакше од ливених, а при ударним оптерећењима имају већу отпорност. Процес савијања у већини случајева карактерише локално пластично деформисање. Деформисана зона обухвата мањи део запремине комада, док се у појединим поступцима деформише комплетна запремина (кружно савијање) [2].

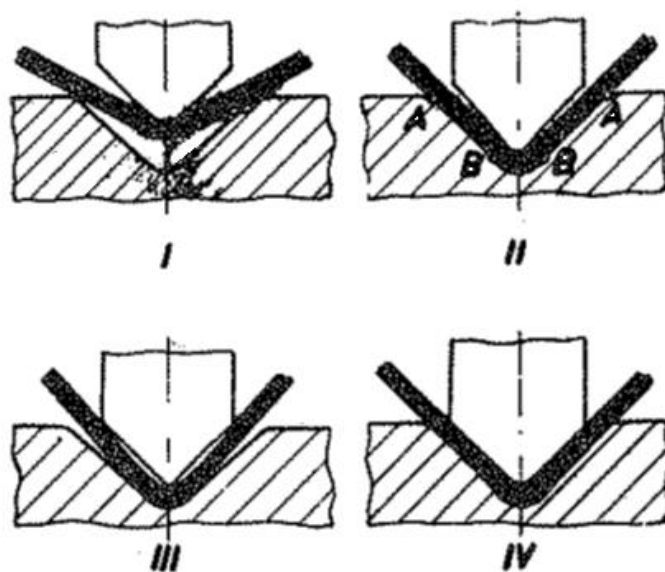
3.1 Угаоно савијање

Угаоно савијање се најчешће изводи на алатима постављеним на универзалне пресе (ексцентарске, хидрауличне, коленасте). Карактеристика угаоног савијања је да се обрада врши у једном или у више алата, специјално израђеним за извођење ових операција. Основни облици угаоног савијања су U и V савијање. Z савијање представља комбинацију претходна два начина савијања. На слици 3.1. приказани су основни облици угаоног савијања.



Слика 3.1. Основни облици угаоног савијања [2]

У току процеса савијања V-профила у калупу могу се уочити четири различите фазе. У првој фази (I) врши се слободно савијање и растојање између ослонаца једнако је ширини отвора калупа. Фаза траје све док кракови комада не постану паралелни са бочним странама калупа и не налегну на калуп (II фаза). Место додира комада и бочних површина калупа премештено је из тачке А у тачку В а то доводи до смањења растојања између ослонаца. Следи даље смањење растојања између ослонаца, а истовремено се смањује и угао између кракова комада све док се не дотакну са бочном страном обликача (III фаза). Када се оствари контакт бочних површина обликача, калупа и кракова комада по целој њиховој дужини средњи део деформисаног комада се коначно обликује по радијусу обликача (IV фаза). Реализацијом четврте фазе процес савијања се завршава [1]. На слици 3.2. приказане су фазе процеса једноугаоног савијања у затвореном алату.

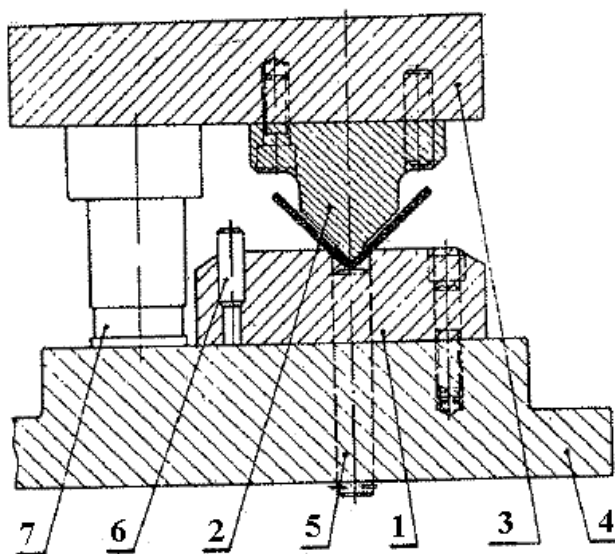


Слика 3.2. Фазе процеса савијања

3.2 Алат за савијање

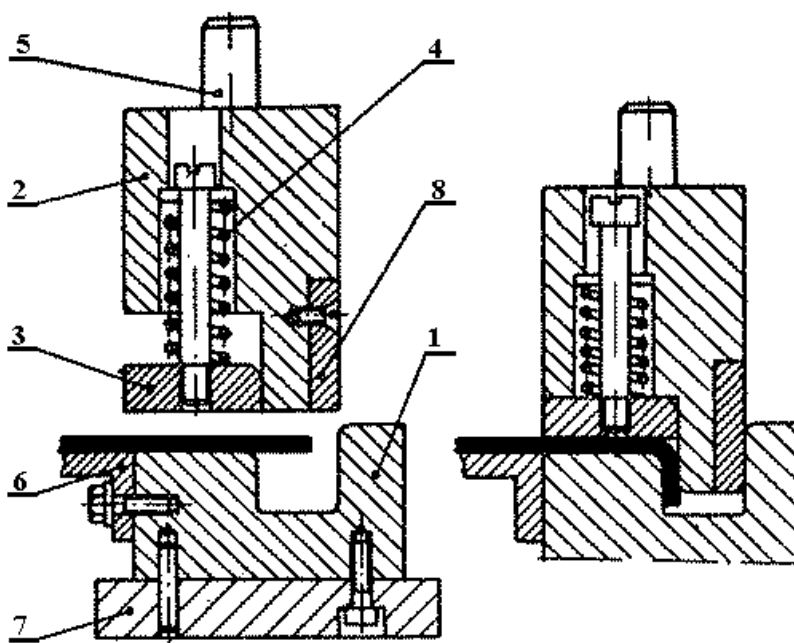
Алати за савијање су по конструкцији слични алатима за пробијање и просецање, састоје се из доње и горње плоче (кућиште алата), имају стубно вођење, рукавац за везу са машином и сл. Радни елементи код алата за савијање су савијач (притискивач, обликач) и матрица (калуп) за савијање [2].

Једноставан алат за савијање V - профила, приказан је на слици 3.3. и користи се за савијање симетричних профила под разним угловима ($0 < \alpha < 180$). Радни комад се поставља на калуп за савијање, до граничника. Основна функција обликача је да савије радни комад који је причвршћен помоћу држача. Након пробе првог комада и након тачног установљивања величине угла еластичног исправљања врши се корекција угла врха обликача [1].



Слика 3.3. Алат за савијање V - профила: 1 - калуп за савијање, 2 - обликач, 3 – горњи носач алата, 4 – доњи носач алата, 5 – држач комада, 6 – граничник, 7 – стубна вођица [1]

Типичан пример алата за једнострано савијање представљен је на слици 3.4. Користи се уколико је потребно дуже или краће комаде савити само на једном крају. Представља најекономичније решење када се предмет обраде савија из више операција. Припремак се поставља на калуп за савијање који се савија под притиском притискивача, а држање припремак је обезбеђено плочом држача помоћу опруге [1].

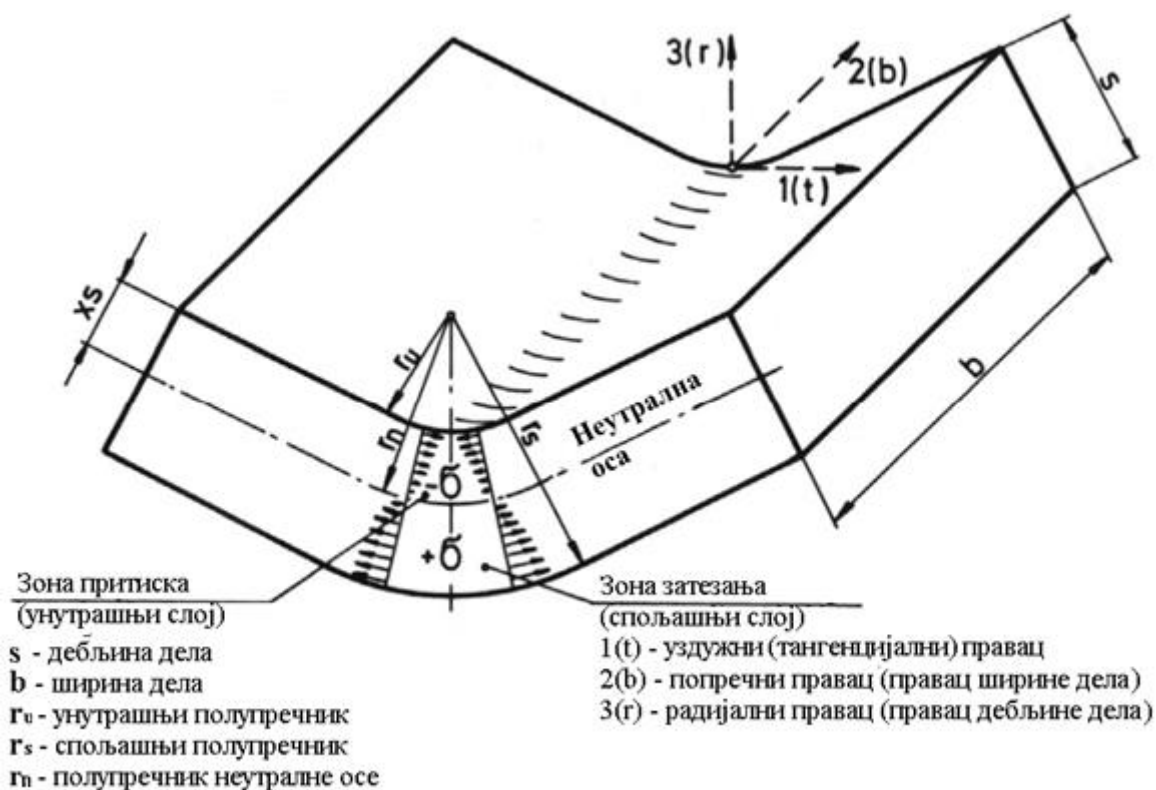


Слика 3.4. Алат за једнострано савијање: 1 – калуп за савијање, 2 – притискивач, 3 – плоча држача лима, 4 – опруга држача лима, 5 – цилиндрични рукавац, 6 – носач лима, 7 – доњи носач алата, 8 – подложна плоча [1]

4. Анализа једноугаоног савијања

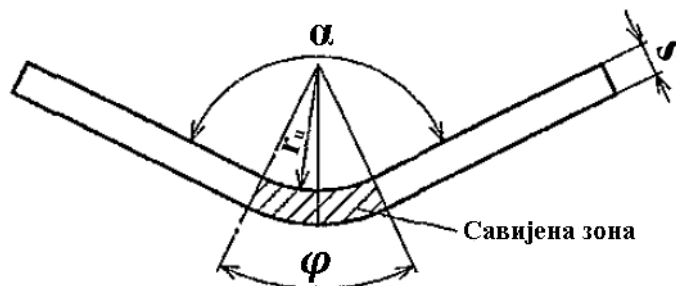
При савијању лимова могу се уочити два слоја у којима напони и деформације имају различит карактер. У унутрашњем слоју материјала (зона притиска) владају притискајући напони и метална влакна се скраћују, а у спољашњем слоју (зона затезања) владају затежући напони тако да се метална влакна у тој зони издужују [2].

Слој материјала између зоне притиска и зоне затезања назива се неутрална оса (неутрални слој) која је такође савијена, али без промене своје дужине у односу на првобитну. На слици 4.1. дата је шема једноугаоног савијања [2].



Слика 4.1. Општа шема једноугаоног савијања [2]

На слици 4.2. представљени су карактеристични углови при савијању: α - угао савијања, φ - угао савијене зоне, а $\alpha + \varphi = 180^\circ$.

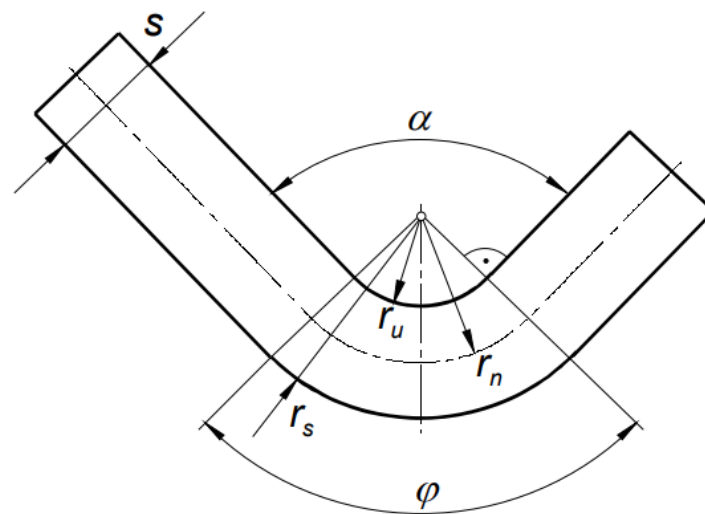


Слика 4.2. Зона савијања и карактеристични углови при савијању [2]

4.1 Положај неутралне осе

Под неутралним слојем (неутралном осом) подразумева се слој материјала између зоне притиска и зоне затезања, то су она замишљена метална влакна чија се дужина не мења, иако им се облик променио при савијању.

То је неутрална деформациона оса чији се положај битно не разликује од неутралне напонске осе. Код те осе, тангенцијални напони једнаки су нули. За одређивање почетних димензија комада пре савијања неопходно је познавање тачног положаја неутралне осе. Пре процеса савијања, неутрална оса и геометријска оса се поклапају. У току обраде, савија се са радијусом r_n и помера ка центру радијуса савијања. Када је унутрашњи радијус r_u мањи померање је интензивније [2].



Слика 4.3. Положај радијуса неутралне осе [2]

Код савијања са великим полупречником, неутрална оса и геометријска оса се поклапају. Радијус r_n се налази на половини дебљине лима. Може се закључити да је:

$$r_n = r_u + \frac{s}{2} \text{ за } \frac{r_u}{s} \geq 10$$

У општем случају, полупречник r_n се може одредити и преко коефицијента померања неутралног слоја (x):

$$r_n = r_u + x \cdot s$$

Коефицијент x је емпиријска величина, даје се табеларно и зависи од односа r_u/s . Користи се најчешће за угао савијања од 90° , мада се и за друге углове могу користити те вредности [2].

$$\text{На пр. за } \frac{r_u}{s} = 10 ; x = 0,5 \rightarrow r_n = r_u + 0,5s$$

$$\frac{r_u}{s} = 0,1 ; x = 0,3 \rightarrow r_n = r_u + 0,3s$$

4.2 Одређивање димензија почетног комада

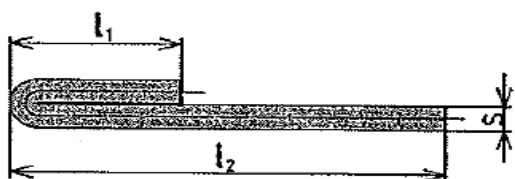
Почетна дужина комада или развијено стање одређује се на основу заданог конструктивног цртежа савијеног комада. Почетна (развијена) дужина елемента је једнака дужини неутралне осе савијеног комада [1].

Дужина развијеног комада једнака је збиру дужина несавијених делова ван зоне савијања и дужина лукова неутралне осе у зонама савијања. Ако има n равних (несавијених) делова и k зона савијања, дужина почетног комада се одређује помоћу следећег израза:

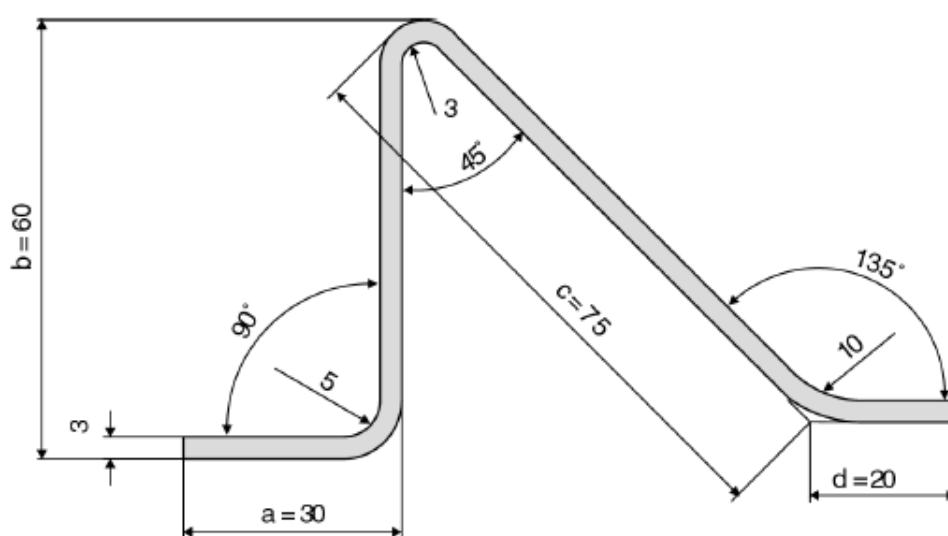
$$L = L_{RAV} + L_{SAV} = \sum_{i=1}^n l_i + \frac{\pi}{180} \sum_{i=1}^k \varphi_i (r_{ui} + x_i \cdot s)$$

У овом изразу l_i представља дужине несавијених делова, φ_i [°] - углове савијених зона, r_{ui} - одговарајуће унутрашње радијусе, x_i - одговарајуће факторе померања неутрално осе. Постоје и готови изрази за израчунавање дужине развијеног стања за карактеристичне облике савијања. За савијање са потпуним додиривањем кракова (слика 4.4.) развијена дужина L се приближно одређује према изразу:

$$L \approx l_1 + l_2 - 0,43s$$



Слика 4.4. Савијање са превијањем [2]

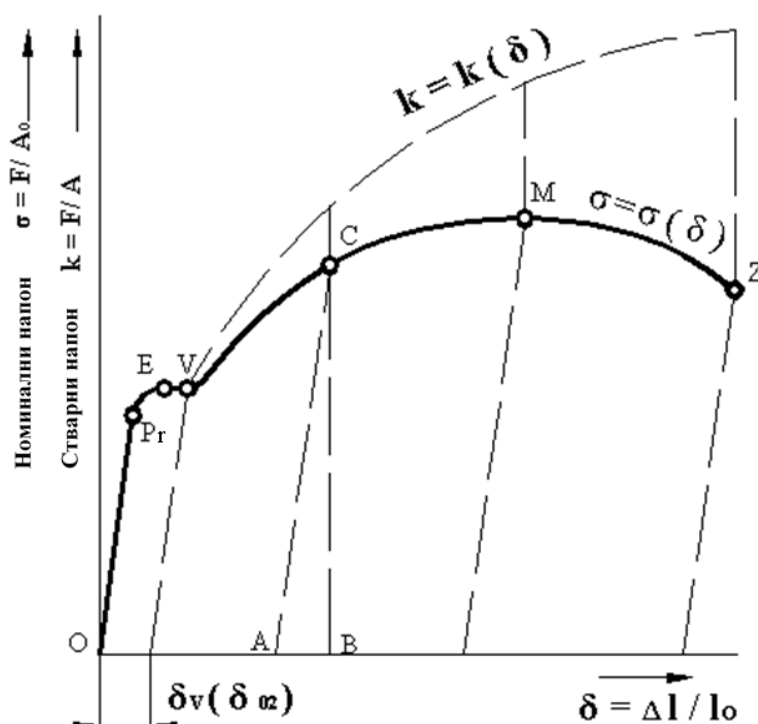


Слика 4.5. Пример савијеног комада чија је развијена дужина $L = 174,2 \text{ mm}$ [8]

5. Еластично исправљање савијених делова

Сви материјали поседују одговарајући коефицијент еластичности. Као последица тога сваку пластичну деформацију прати и еластична деформација [1].

Резултат ове појаве је промена димензија пластично деформисаног комада након растерећења, односно еластична повратност (*springback*). Ова појава се јавља код обраде лимова, шипки, штапова, жица итд. Један од важнијих ефеката обраде је ојачање метала деформисањем и повећање његове чврстоће. На слици 5.1. приказан је дијаграм затезања који је коришћен за анализу ове појаве и за оцену пластичности и одређивања механичких особина материјала [1].



Слика 5.1. Дијаграм затезања: P_r – граница пропорционалности, E- граница еластичности, V – граница течења, M – затезна чврстоћа, Z – тачка прекида, $\overline{OB}$ – пластична деформација, $\overline{AB}$ – еластична деформација, $\overline{OA}$ – трајна деформација [1]

Дијаграм затезања је графички представљена функција номиналног напона

$\sigma = F/A_0$ у зависности од јединичног издужења $\delta = \Delta l / l_0$.

У подручју малих деформација функција $\sigma = \sigma(\delta)$ је линеарног карактера и до тачке P_r важи закон пропорционалности, који се изражава једначином:

$$\frac{\sigma}{\delta} = \tan \alpha = E = \text{const},$$

где је E –модул еластичности [1].

При повећању оптерећења изнад тачке R_r деформације су и даље еластичног карактера до тачке E . Минималним повећањем оптерећења почиње развлачење (течење) епрувете. Напон на граници течења R_p се означава као почетак течења материјала. Повећавањем оптерећења (изнад тачке V) крива благо расте, што значи да издужења брже расту од пораста оптерећења. У овом подручју се врши пластична обрада метала. Међутим, и пластичне деформације су праћене еластичним [1].

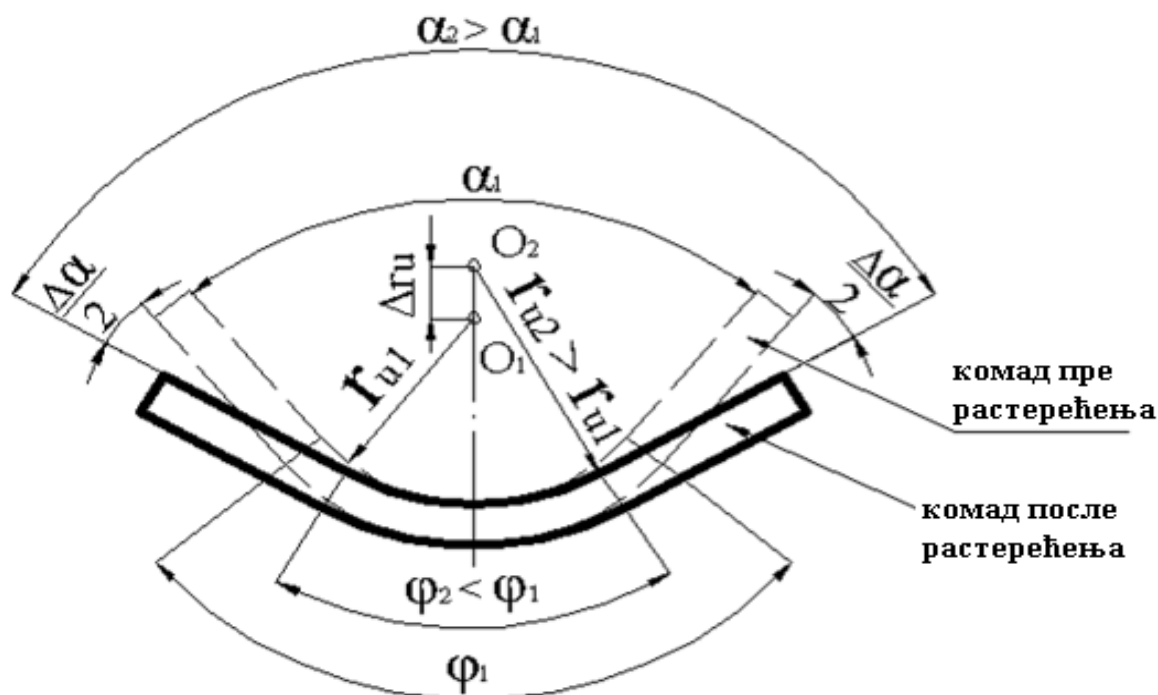
Ако се тело након оптерећења у тачки C растерети силом F тада ће линија растерећења бити $\overline{CA}$ која је паралелна са линеарним делом графика, тако да је дуж $\overline{OB}$ представља пластичну деформацију, а дуж $\overline{AB}$ еластичну деформацију док је трајна деформација једнака њиховој разлици:

$$\delta = \overline{OB} - \overline{AB} = \overline{OA}.$$

Трајна деформација (ε_t) представља разлику пластичне (ε_{pl}) и еластичне (ε_{el}) деформације и може се представити у следећем облику [1]:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{pl} - \varepsilon_{el}.$$

По ослобађању савијеног дела из алата нестају еластичне деформације, затим долази до промене геометрије комада која је дефинисана обликом алата. Повећавају се углови и радијуси савијања што значајно утиче на коначан облик комада [2].



Слика 5.2. Еластична повратност савијеног комада [9]

Када се савијени комад налази под оптерећењем (у алату), могу се уочити карактеристичне димензије као последица пластичне деформације [1]:

- радијус савијања - r_{u1} ,
- угао савијања - α_1 ,
- угао савијене зоне - $\varphi_1 = 180 - \alpha_1$.

Растеређивањем комада долази до еластичне деформације, а трајно деформисан комад имаће следеће димензије [1]:

- радијус савијања - $r_{u2} = r_{u1} + \Delta r_u = r_{u1} + \overline{O_1 O_2}$,
- угао савијања - $\alpha_2 = \alpha_1 + \Delta \alpha$,
- угао савијене зоне - $\varphi_2 = 180 - \alpha_1$.

Радијус савијања се повећава за Δr ($r_2 > r_1$). Угао савијања се повећава за $\Delta \alpha$ ($\alpha_2 > \alpha_1$), а угао савијене зоне је мањи ($\varphi_2 < \varphi_1$), што се може закључити са слике 5.2.

Ако су r_{u2} и α_2 захтеване димензије савијеног комада на основу конструктивног цртежа, обликач се израђује са радијусом r_o и углом α_o који се добијају преко обрасца [1]:

- радијус обликача - $r_o = r_{u1} = r_{u2} - \Delta r_u$,
- угао обликача - $\alpha_o = \alpha_1 = \alpha_2 - \Delta \alpha$.

Величина еластичног исправљања зависи од односа r/s и од низа фактора међу којима су: особине материјала предмета обраде, дебљина лима, полупречник савијања, начин савијања итд [1].

5.1 Фактор еластичног исправљања

Фактор K зависи од врсте материјала и односа r_{u2}/s , а за израчунавање вредности фактора еластичног исправљања користи се образац:

$$K = \frac{r_{u1} + \frac{s}{2}}{r_{u2} + \frac{s}{2}} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$$

Ако је [1]:

- $r_{u2}/s < 5$ - чисто пластично савијање (еластична повратност је мања),
- $r_{u2}/s > 5$ - еластично - пластично савијање (већа повратност).

По испитивањима *G. Sachs*, дијаграм на слици 5.3. омогућава одређивање фактора K за разне материјале у интервалу $1 \leq r_{u2}/s \leq 100$.



Слика 5.3. Фактор еластичног исправљања [9]

Препоруке за одређивање величине угла повратности $\Delta\alpha$ [°] су [1]:

- За Č.0260 $\Delta\alpha \approx 0,43 \cdot \frac{r_u}{s} - 0,61$
- За Č.0545 $\Delta\alpha \approx 0,79 \cdot \frac{r_u}{s} - 1,62$
- За однос >10 потребно је кориговати r_o по изразу:

$$r_o = \frac{1}{\frac{1}{r_u} + 3 \cdot \frac{R_p}{E \cdot s}}, \text{ а угао повратности } \Delta\alpha = (180 - \alpha) \cdot \left(\frac{r_u}{r_o} - 1 \right).$$

Табела 5.1. Величине угла еластичног исправљања $\Delta\alpha(^{\circ})$ при савијању за $\alpha = 90^{\circ}$ [9]

ВРСТА МАТЕРИЈАЛА	r/s	Дебљина материјала, s [mm]		
		до 0,8	0,8 - 2	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 $R_m > 550 \text{ N/mm}^2$	до 1	7	4	3
	1 - 5	9	5	3
	преко 5	12	7	5

6. Препоруке за успешно угаоно савијање у алатима

При савијању лима могу се јавити два гранична случаја која треба утврдити пре израде алата како би се избегло [1]:

1. Да се услед исувише великог полупречника савијања целокупна промена облика врши у области еластичних деформација, што доводи до појаве еластичне повратности;
2. Да је полупречник савијања исувише мали, тако да у спољашњим слојевима деформација пређе границу кидања, што доводи до појаве лома или појаве пукотина.

Радијус савијања (r_u) један је од најбитнијих фактора који утиче на квалитет производа. Да би производ био што квалитетнији, неопходно је да се радијус савијања креће унутар одређених граница. С једне стране је ограничен минималном вредношћу тако да не дође до лома, тј. да напон у спољашњим слојевима не прелази вредност R_M (затезна чврстоћа), и с друге стране максималном вредношћу да у материјалу дође до напона изнад границе течења, како би дошло до пластичне деформације [1].

6.1 Минимална вредност радијуса савијања

Минимална вредност радијуса савијања $r_{u \min}$ се одређује на основу деформације (ϵ) која неће довести до разарања. Ова деформације претходи тачки М на дијаграму затезања. Образац за одређивање минималног радијуса савијања је [1]:

$$r_{u \min} = \frac{s}{2} \left(\frac{1}{\epsilon_m} - 1 \right).$$

За практичну употребу се користи образац:

$$r_{u \min} = c \cdot s.$$

За одређивање фактора c код лаких метала може се користити емпиријски образац који предлаже *H. Mäkelt*:

$$c = 0,85 \frac{R_m}{\delta_{10}} + 0,5,$$

из којег се види да са порастом затезне чврстоће расте и фактор c , а опада са порастом вредности јединичног истезања материјала који се савија. Фактор c зависи и од врсте и стања материјала и положаја комада у односу на правац ваљања полуфабриката [1].

Вредност фактора c за челик и тешке метале по подацима *G.Oehlera* се очитава табеларно [3].

Табела 6.1. Фактор c за челик и тешке метале [9]

Материјал	c	Материјал	c
JUS		JUS	
Č.0210	1,5	Cu 60 Zn – месинг	0,4
Č.0300	1,8	Cu 63 Zn – месинг	0,4
Č.0400	2,0	Cu 12 Zn – месинг	0,3
Č.0145	0,6	Cu 90 Zn – месинг	1,0
Č.0146	0,5	Cu Sn 2 - коситрена бронза	1,2
Č.0147	0,5	Cu Sn 6 - коситрена бронза	0,6
Č.0148	0,5	Титан	0,4
Бакар	0,25	Титан	0,5

6.2 Максимална вредност радијуса савијања

Поред минималног радијуса савијања (доње границе), потребно је одредити и максимални радијус савијања (горњу границу).

Да би се оствариле трајне пластичне деформације, односно $\sigma = R_p$, радијус савијања не сме премашити одређену вредност која се означава са $r_{u\ max}$ [1]:

$$r_{u\ max} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot R_p}.$$

На основу добијене минималне и максималне вредности радијуса савијања, може се закључити да радијус савијања r_u мора да задовољи следећу неједначину да би обрада била успешна [1]:

$$r_{u\ min} < r_u < r_{u\ max}$$

или

$$r_{u\ min} = c \cdot s < r_u < r_{u\ max} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot R_p}.$$

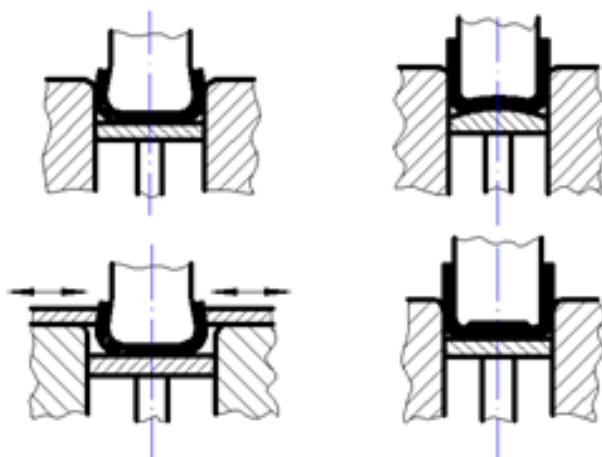
У случају да неједначина није испуњена, могу се уочити два гранична стања код којих:

1. За $r_u < r_{u\ min} = c \cdot s$ долази до прскања и прекида вањских влакана савијеног комада;
2. За $r_u > r_{u\ max} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot R_p}$ у савијеном комаду нема трајних пластичних деформација, а то значи да се након вађења из алата комад поново еластично исправља [1].

6.3 Препоруке за алате са компензацијом еластичног исправљања

Угао еластичног исправљања се може компензовати или бар делимично ублажити. Код једноугаоног савијања еластична повратност се може компензовати израдом алата са умањеним углом савијања α и радијусом притискивача r_p , док код двоугаоног савијања постоји неколико варијанти за компензацију ове појаве [2].

Неке од тих могућности приказане су на слици 6.1.



Слика 6.1. Алати са компензацијом угла еластичног исправљања [1]

При двоуганом савијању (под углом $\alpha = \alpha_2 = 90^\circ$), угао обликача је мањи од 90° , за износ угла еластичног исправљања. Слична конструкција је и код једностраног савијања. У другој варијанти, дно калупа је испупчено за онај износ који одговара величини еластичног исправљања. Након растерећења, комад ће се еластично исправити јер се дно комада поравнало. Постоје и други начини компензације угла еластичног исправљања као што је коришћење бочних клизача, умањених зазора, утискивањем ребра, уз помоћ два цилиндра који ротирају око својих оса и сл. [1]

7. Моделирање и симулација у ОМД

Примена традиционалних метода пројектовања и модификовања производа и процеса доводи до низа негативних последица, при чему је пројектно решење далеко од оптималног. Таквим пројектовањем јављају се унутрашњи и спољашњи дефекти, прекомерни притисци, мали век алата, велики трошкови и сл [4].

Моделирање и сумалиција представљају активности ван производног окружења при чему се могу остварити бројни циљеви. Ове активности успешно побољшавају квалитет производа, помажу у оптимизацији постојећег процеса, доносе значајно смањење времена и трошкова, повећавају продуктивност, успешно смањују број покушаја у фази пројектовања, олакшавају процес пројектовања нове опреме и алата итд. Модел представља умањену верзију неких реалних ствари што има смисла копирати, а симлација представља демонстрацију или анализу неког проблема [4].

У скоро свим фазама индустријске производње уводи се читав низ стратегија коришћења рачунара. Предност оваквог начина моделирања је техника која је јефтинија од традиционалног начина пројектовања. Модификације на моделима алата су јефтиније, захтевају мање времена, а доступан је и велики број информација о процесу (деформациона сила, течење материјала, евентуални дефекти, промена микроструктуре и слично) које се брже добијају [4].

Циљ физичког моделирања и нумеричке симулације је унапређење пројектовања алата и утврђивање параметара процеса. То се постиже одређивањем течења материјала и коначних димензија дела, уочавањем и превенцијом дефеката течења материјала. Унапређења се могу постићи и симулацијом процеса у циљу провере попуњавања алата, контролом услова контактеног трења и трансфера топлоте, као и откривањем прекомерних притисака у алату.

Други циљ физичког моделирања и нумеричке симулације у пројектовању процеса у ОМД односи се на побољшање квалитета готовог дела и смањење трошкова производње. Циљ се остварује одређивањем деформационо – температурно – напонских поља у делу и алату, предвиђањем микроструктуре, контролом величине зрна и побољшањем течења материјала. Трошкови производње могу се смањити смањењем неуспелих покушаја у производњи, смањењем главног времена израде и шкарта [4].

7.1 Опис програмског пакета Simufact.forming

Софтверски пакет *Simufact.forming* развијен је за симулацију различитих процеса обраде материјала. Омогућава кориснику да препозна реалне ситуације из производње и даје увид у све аспекте процеса. Програм има моћан постпроцесор за визуелизацију резултата симулације. Способан је за анализу и симулацију готово свих метода обликовања материјала, независно од: температуре процеса, машине, материјала

обратка, врсте процеса и слично. Омогућава приказ течења материјала, попуњавања алата и способан је за уочавање безконтактних зона. Користи се и за праћење напона, деформација, температуре и дистрибуције притиска. Програмом се може предвидети хабање алата и проценити критеријума лома. Успешан је у процени сила на алатима и напонских дистрибуција.

Коришћењем методе коначних елемената долази се до најпрецизнијих резултата, а симулацију је могуће приказати у било ком тренутку процеса. Радни комад који је дефинисан као 3D објекат се импортује у софтвер, а након тога, на захтев корисника, аутоматски се креира 3D мрежа модела радног комада коју програм током симулације стално коригује како би се пратиле велике деформације. Коришћење оваквих коначних елемената се показало ефикасно за приказивање варијација дебљине, еластичне повратности и заосталих напона [10].

7.2 Метода коначних елемената

Посматрани домен континуума се дели на поддомене коначних димензија који се називају коначним елементима и заједно чине мрежу коначних елемената. Коначни елементи су међусобно повезани у коначном броју тачака који се називају чворовима. Стање променљиве поља у сваком коначном елементу се описује помоћу интерполационих функција. Интерполационе функције представљају везу између вредности променљиве поља у било којој тачки коначног елемента и вредности променљиве поља у чворовима. Постоје четири основна типа МКЕ: директна, варијациона (метода сила, метода деформација, мешовита метода), метода резидуума, метода баланса енергије.

Процедура решавања проблема методом коначних елемената састоји се из пет корака. Први корак представља идентификацију проблема, а након тога се врши дефинисање елемената (други корак). Трећи корак подразумева формирање једначина елемената. Повезивање формираних једначина елемената представља четврти корак. Последњи корак у процедури решавања проблема методом коначних елемената је нумеричко решавање глобалних једначина.

Најважнија и најдуготрајнија фаза у процесу анализе МКЕ је припрема анализе или препроцесирање. Квалитет операција моделирања обављених у овој фази у великој мери утиче на квалитет резултата анализе.

Избор типа коначног елемента један је од најважнијих корака у примени методе коначних елемената и утиче на добијање тачних резултата. Основне особине без којих је немогуће дефинисати коначне елементе су: облик, број и врста чворова, број и врста степени слободе у појединим чворовима, као и врста интерполационих функција [4].

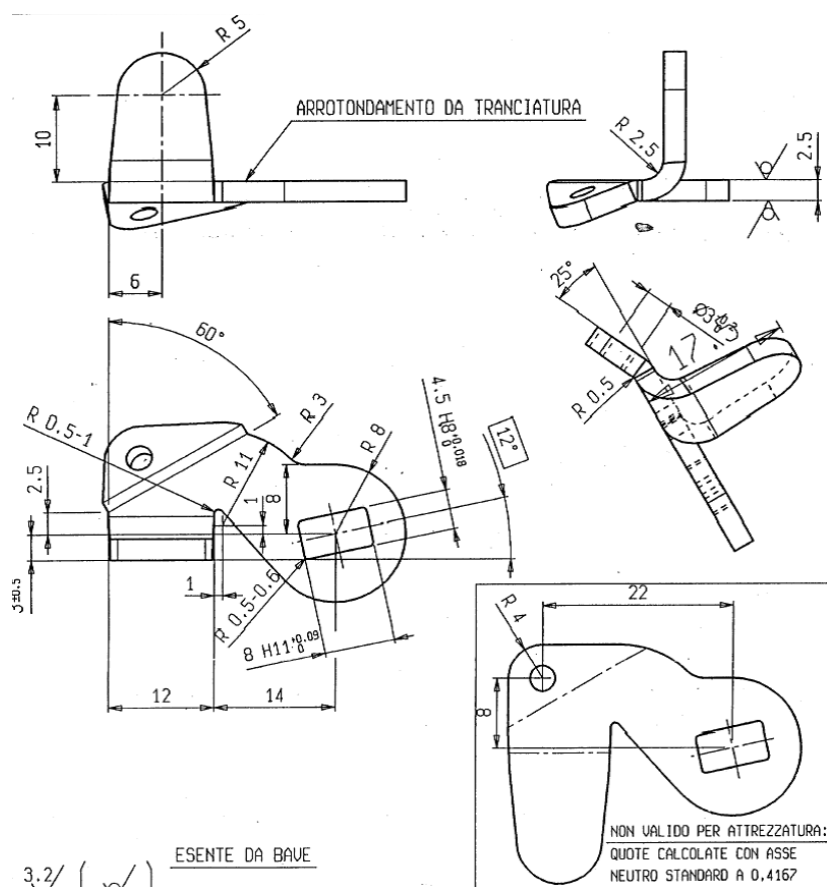
8. Опис задатка

Циљ завршног рада је анализа технологије и конструкције алата која је предложена од стране конструктора једног домаћег предузећа. Радионички цртеж готовог дела је приказан на слици 8.1. Део се добија у две операције угаоним савијањем, и то у првој операцији савињем на циљани угао од 90° , а у другој операцији се реализује угаоно савијање за добијање циљаног угла од 25° .

Да би се проверила препоручена технологија и конструкција алата за добијање прецизног дела урађена је нумеричка FE симулација коришћењем софтверског пакета *Simufact.forming* верзија 12.

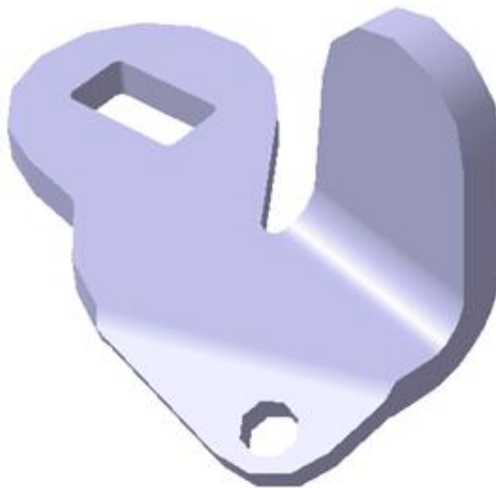
Пошто су у првом делу рада дати аналитички модели и табеларни алати за процену еластичне повратности, овде ће бити дате, за конкретан обрадак, који је тема практичног дела рада, и те аналитичко - табеларне процене еластичне повратности при угаоном савијању лима.

За нумеричку симулацију се користе CAD модели алата, а CAD модел готовог дела се користи за упоређење са FE моделом добијеним у виртуелној производњи, односно као резултат нумеричке FE симулације. Радионички цртеж готовог дела приказан је на слици 8.1.



Слика 8.1. Радионички цртеж готовог дела

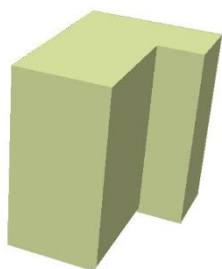
На крају је било неопходно извршити анализу добијених резултата, свих упоређивања, и урадити реинжењеринг технологије, односно циљане измене конструкције алата, како би се побољшао процес савијања и ублажио ефекат еластичног исправљања, и добио прецизан обрадак.



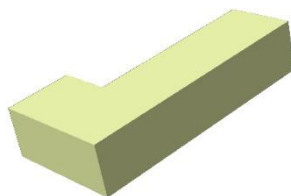
Слика 8.2. CAD модел готовог дела

8.1 Иницијални улазни подаци за нумеричку симулацију прве операције савијања

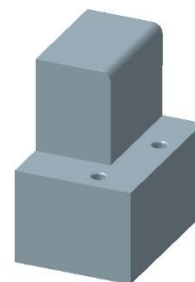
Неопходан склоп 3D модела алата за прву операцију процеса препоручене технологије савијања направљен је у програму *CATIA*. Алат за прву операцију се састоји из: горњег дела алата (обликач), доњег дела алата (матрица) и покретног ослонаца. Алати су приказани на сликама 8.3. - 8.5. Пројектовани су тако да после процеса савијања припремак добије жељени облик. Затим је одрађен склоп алата (слика 8.6.) коришћењем модула *Assembly Design* како би се добиле одговарајуће позиције сваког алата у односу на заједнички референтни координатни систем. Делови алата су сачувани у IGES формату како би били импортовани у програм *Simufact.forming*.



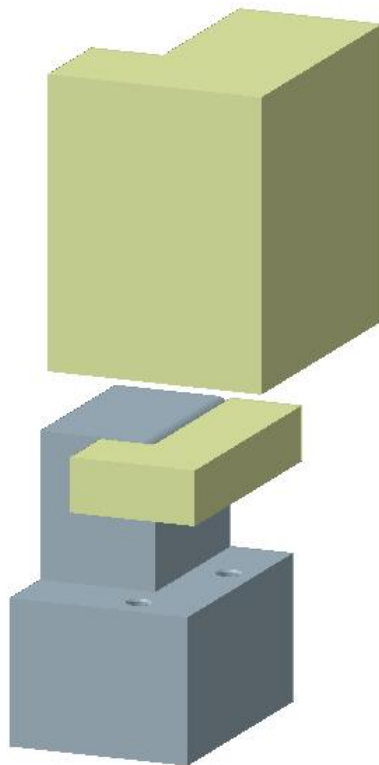
Слика 8.3. Обликач



Слика 8.4. Ослонац

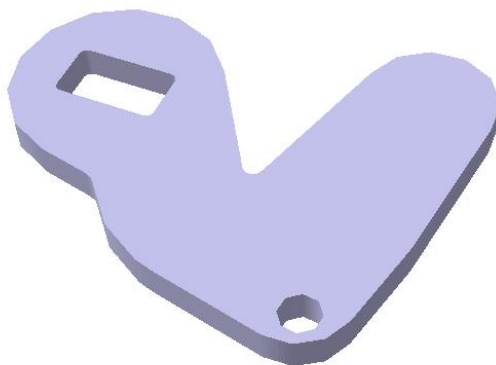


Слика 8.5. Матрица



Слика 8.6. CAD модел склопа алата за прву операцију савијања

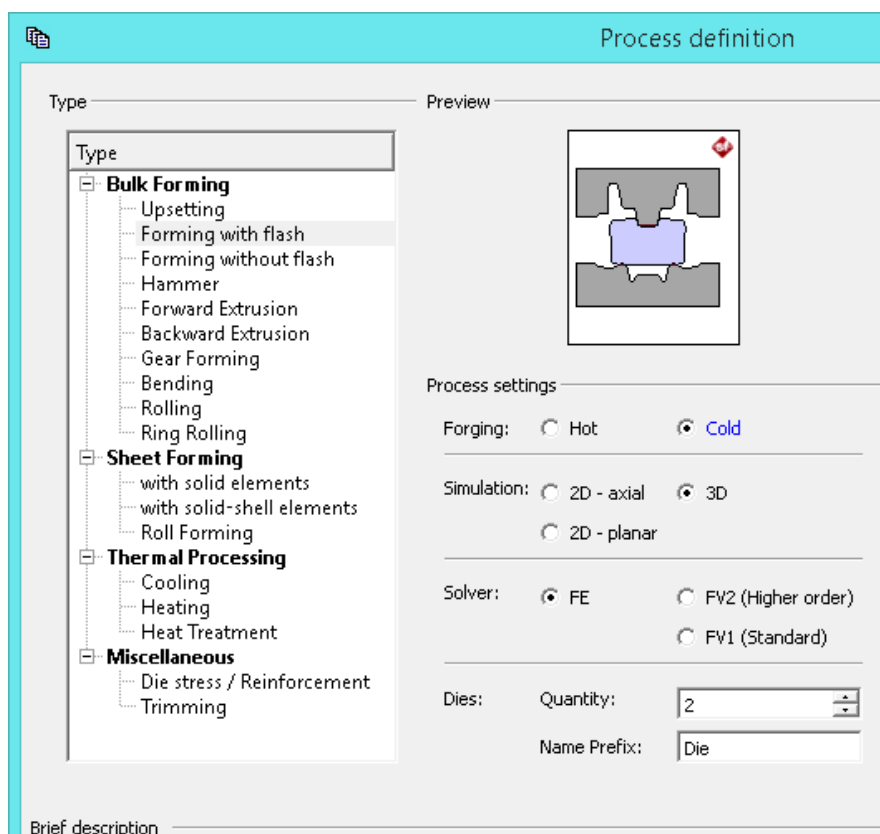
За симулацију прве операције било је потребно развијено стање 3D модела готовог дела. У програму *CATIA*, коришћењем модула за обликовање лима (*Generative Sheetmetal Design*), према радионичком цртежу, направљен је 3D модел готовог дела са захтеваним димензијама, а уз помоћ одговарајуће опције (*Fold/Unfold*) добијено је развијено стање (слика 8.7.). Развијено стање (припремак) CAD модела сачувано је у IGES формату како би се импортовао у програм *Simufact.forming* који је коришћен за симулацију процеса савијања.



Слика 8.7. CAD модел развијеног стања

8.1.1 Дефинисање врсте нумеричке симулације

Дефинисање врсте нумеричке симулације извршено је у прозору *Process definition* који је приказаном на слици 8.8. За тип процеса изабран је *Bulk Forming* јер се ради о савијању лима дебљине 2,5 mm. У операцију је укључено два алата: обликач (горњи алат) и матрица (доњи алат). Процес се одвија у хладном стању (на собној температури), симулација се приказује у просторном (3D) облику, коришћењем методе коначних елемената (FE).



Слика 8.8. Прозор за дефинисање процеса

8.1.2 Увоз геометрије, избор материјала, пресе и дефинисање опруге

Након дефинисања типа и особина процеса, потребно је импортовати и прецизно позиционирати алате и развијено стање радног комада. Дефинисање геометрије се може извршити на два начина. Први начин представља дефинисање геометрије у инвентору за цртање, а други начин је увоз геометрије из других CAD програма.

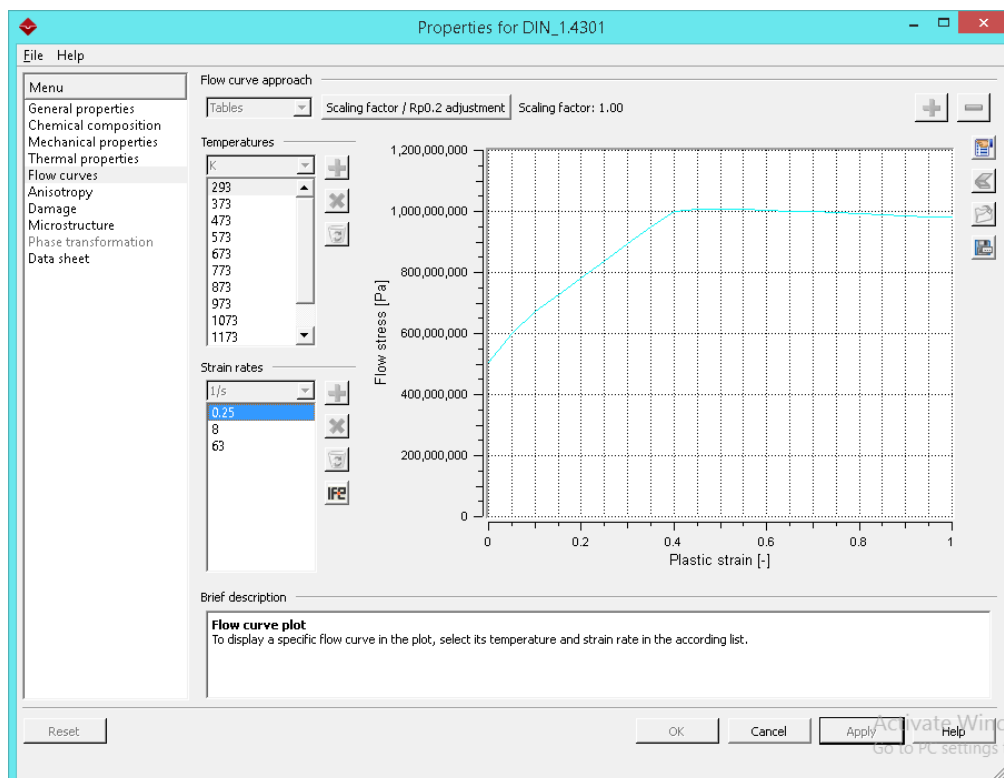
Алати и развијено стање који су импортовани у *Simufact.forming* представљени су на сликама 8.3., 8.4., 8.5. и 8.7. Након њиховог импортовања остварен је контакт држача, горњег и доњег алата са предметом обраде транслаторним померањем елемената. Тачно позиционирани алати и припремак у програму *Simufact.forming* приказани су на слици 8.9.



Слика 8.9. Прва операција савијања у програму Simufact.forming

Следећи корак је додељивање материјала радном комаду. Материјал који је изабран из базе података је DIN 1.4301. и представља стандардни аустенитни нерђајући челик, има добру корозиону отпорност, одличну заварљивост, погодан је за обликовање и пружа фин естетски изглед у полираном, брушеном и четканом стању [7].

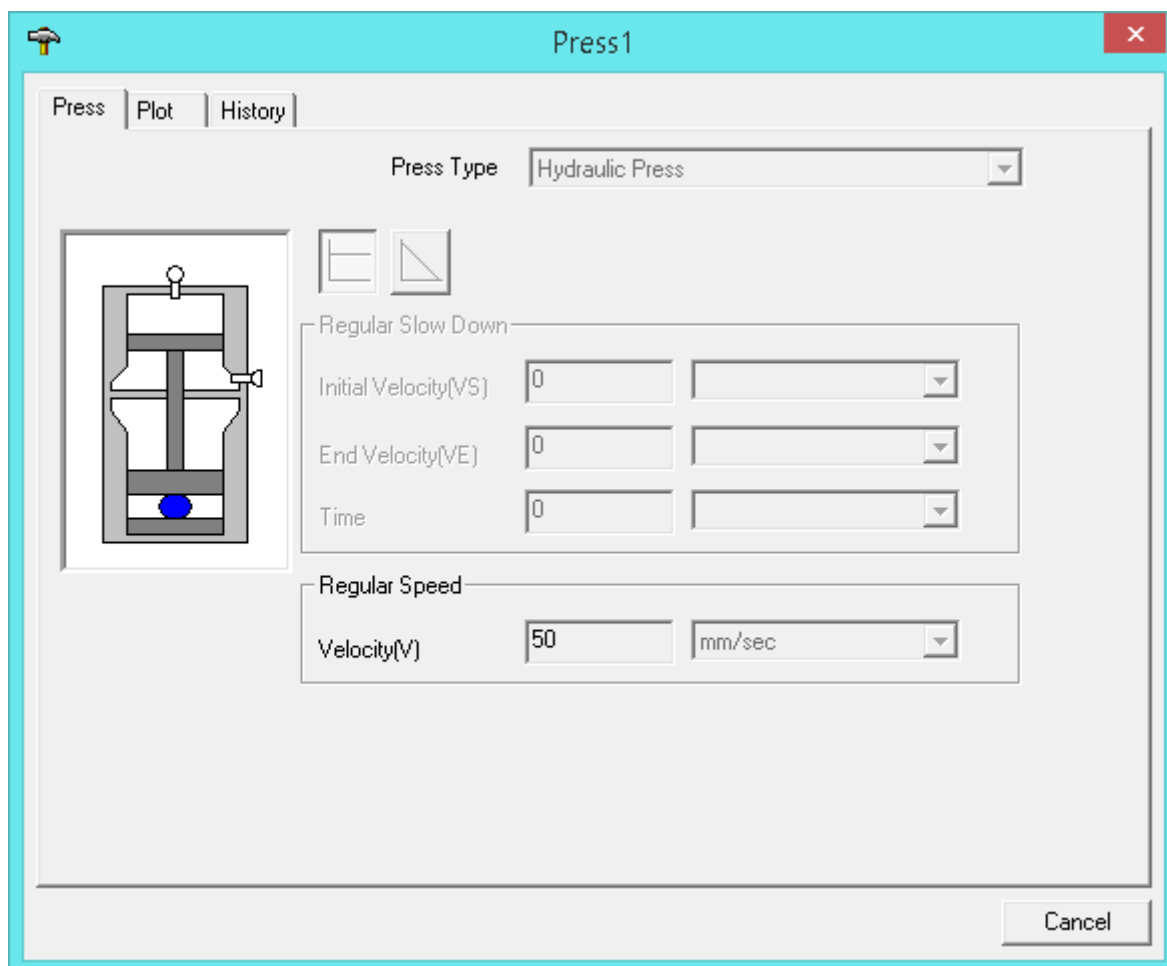
Напон на граници течења R_p за материјал припремка на собној температури износи 500 МПа, а затезна чврстоћа материјала R_m је 1000 МПа што се може утврдити преко криве ојачања која је дата на слици 8.10.



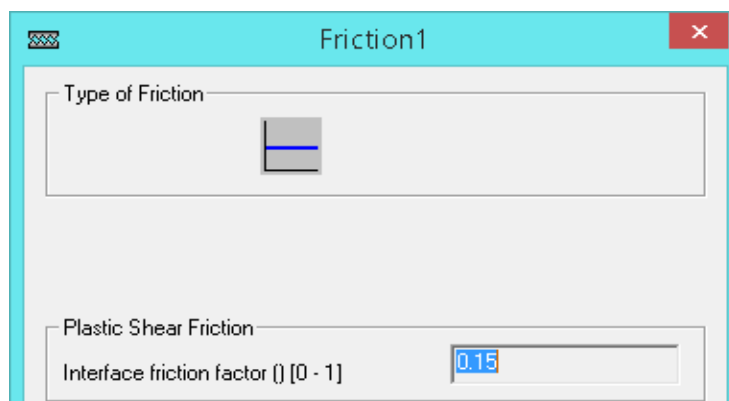
Слика 8.10. Крива ојачања за материјал припремка

Након дефинисања материјала радном комаду, у следећим корацима врши се избор пресе, дефинисање контактних услова, температура алата и радног комада, опруга и креирање мреже.

Код избора пресе, узета је хидраулична преса брзине 50 mm/sec. Прозор за дефинисање пресе приказан је на слици 8.11.

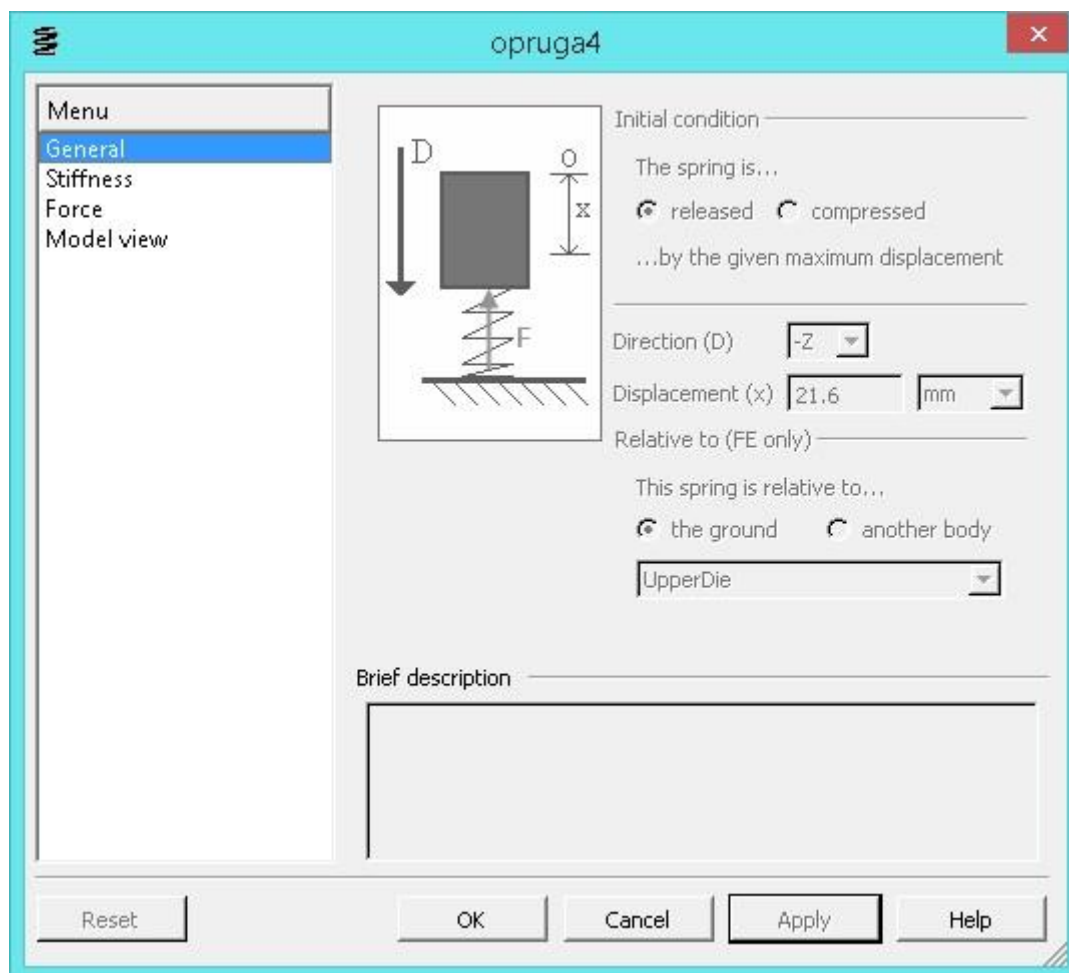


Слика 8.11. Избор пресе



Слика 8.12. Дефинисање трења

Прозор за дефинисање потребних карактеристика опруге која је додељена граничнику приказан је на слици 8.13. и служи као избацивач радног комада из алата након прве операције савијања. Сила опруге је 49,0331 kN, делује по Z оси и има ход од 21.6 mm. Неадекватно дефинисање опруге може довести до деформације припремка.



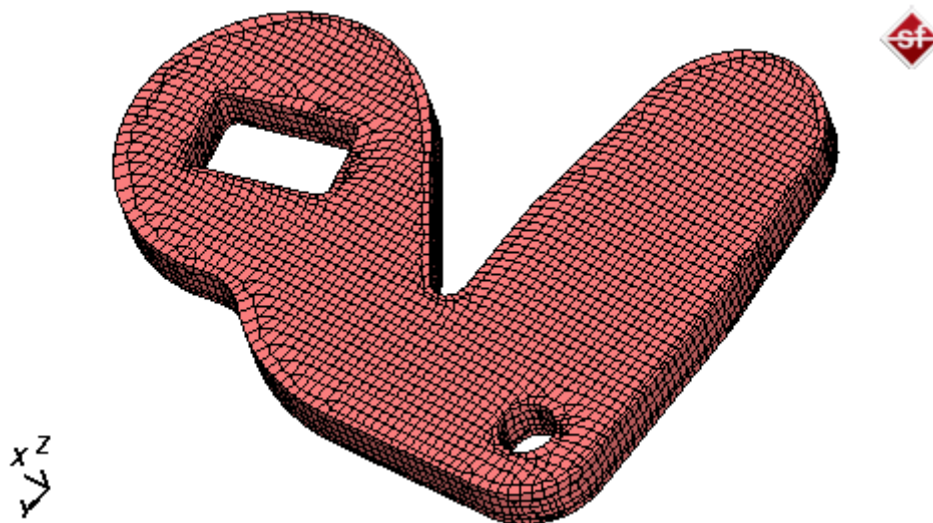
Слика 8.13. Дефинисање опруге

8.1.3 Генерисање FE мреже радног комада

Програм *Simufact.forming* намењен FE нумеричкој симулацији и анализи процеса запреминског обликовања има модул за генерисање мреже коначних елемената. Након дефинисања основних параметара процеса, следи креирање мреже коначних елемената на радном комаду. Мрежа радног комада креира се опцијом *Mesh* где се дефинише тип мреже, број, величина и тип елемената мреже.

Величина елемената мреже припремка за прву операцију савијања износи 0.51597 mm, а број елемената је 13073. Тип мреже (*Mesher*) је *Overlay Hex*, док је за тип елемената одређен *Hexahedral* (слика 8.14). Регенерација мреже (*Remeshing*) је неопходна када се мрежа у току симулације толико деформише да даља анализа не може да се изведе без

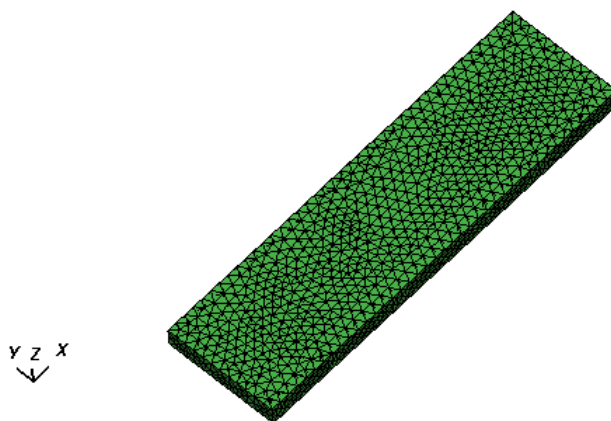
грешака. Овај поступак је као и поступак генерисања мреже аутоматизован и не захтева интервенцију корисника.



Слика 8.14. Генерисана FE мрежа радног комада

8.1.4 Генерисање FE мреже граничника

На слици 8.15. приказан је изглед FE мреже граничника. Величина елемената мреже износи 1,68081 mm, а број елемената је 7884. За тип мреже одређен је *slMesh Tetra*, а за тип елемената *Tetrahedral* (134).

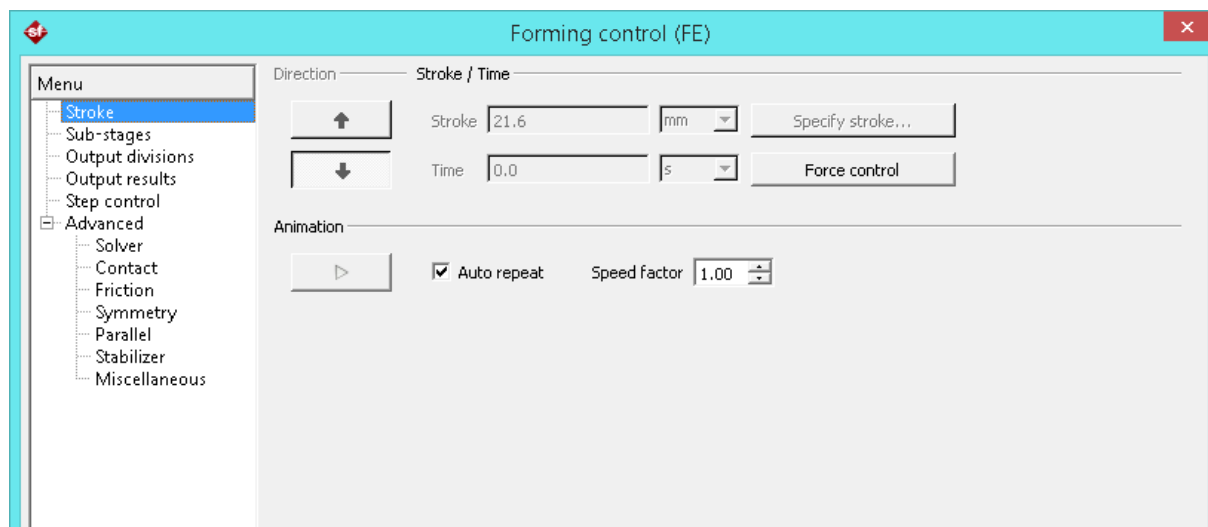


Слика 8.15. FE мрежа граничника

8.1.5 Контролни параметри процеса

Пре пуштања симулације потребно је подесити параметре процеса у прозору *Forming control* који је приказан на слици 8.16. Алат (обликач) се креће надоле у правцу Z осе и његов ход износи 21.6 mm. Фазе процеса обухватају позиционирање елемената,

обликовање радног комада, и вађење готовог дела из алата након процеса савијања. Такође, неопходно је подесити интервале у којима ће се снимати резултати симулације.



Слика 8.16. Подешавање хода у Forming control прозору

8.1.6 Дефинисање контакт табеле

Контакт табела за прву операције савијања приказана је на слици 8.17.

Body	Contact	Direction	Type	Tolerance [mm]	Bias factor	Near contact tol. [mm]	Separation at [N]
WorkPiece	UpperDie	1st to 2nd	Touching	0	0	0	0.0
WorkPiece	WorkPiece	1st to 2nd	Touching	0	0	0	0.0
GRANICNIK	LowerDie	1st to 2nd	Glued	0.01	0	0	0.0
WorkPiece	Drzac	1st to 2nd	Touching	0	0	0	0.0
WorkPiece	LowerDie	1st to 2nd	Touching	0	0	0	0.0

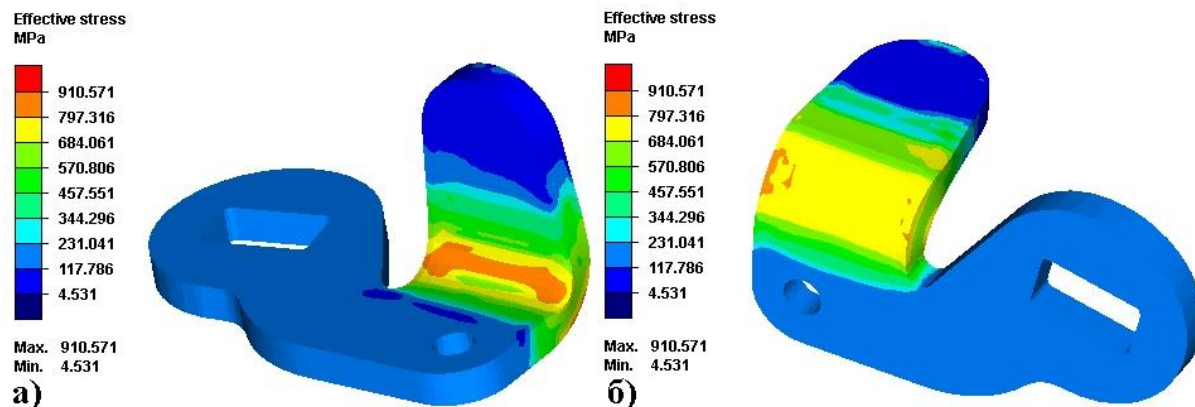
Слика 8.17. Контакт табела за прву операцију савијања

8.1.7 Резултати нумеричке симулације прве операције савијања

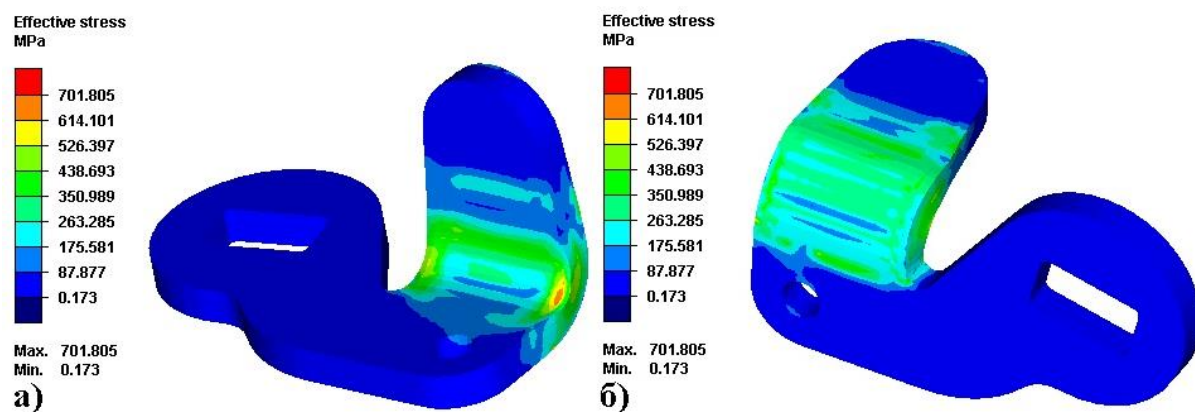
Након завршене FE нумеричке симулације процеса савијања, програм *Simufact.forming* омогућава преглед великог броја излазних резултата.

У овом одељку представљени су резултати FE нумеричке симулације за прву операцију препоручене технологије процеса савијања на основу иницијалних улазних података, а резултати који су узети у разматрање су расподела ефективног напона, расподела ефективне пластичне деформације и угао еластичног исправљања.

Расподела ефективног напона за прву операцију препоручене технологије пре и након растерећења дата је на сликама 8.18. и 8.19.

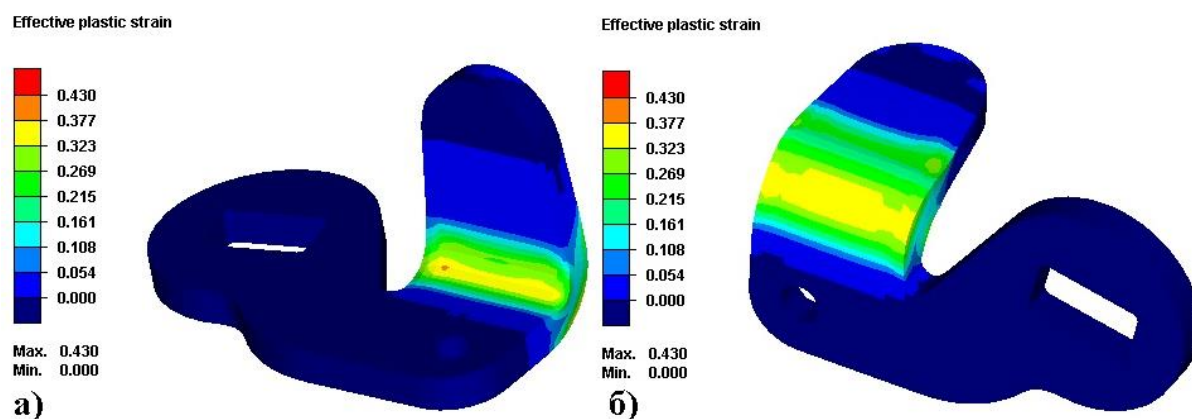


Слика 8.18. Расподела ефективног напона пре растерећења: а) унутрашњи слој, б) спољашњи слој



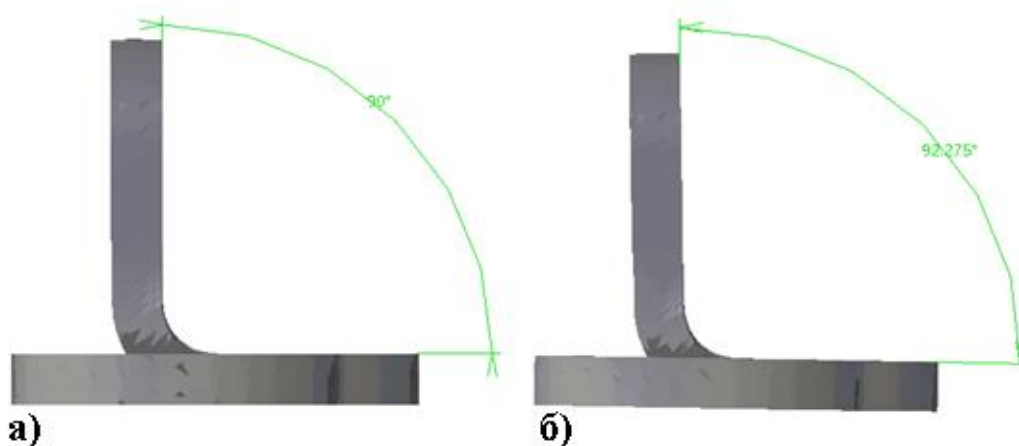
Слика 8.19. Расподела ефективног напона након растерећења: а) унутрашњи слој, б) спољашњи слој

Расподела ефективне пластичне деформације код радног комада за прву операцију препоручене технологије савијања дата је на слици 8.20.



Слика 8.20. Расподела ефективне пластичне деформације након растерећења: а) унутрашњи слој, б) спољашњи слој

На слици 8.21. приказан је референтни угао добијен у првој операцији савијања под углом од 90° пре и после растерећења. Након растерећења долази до еластичног исправљања и угао савијеног пера износи $92,275^\circ$.



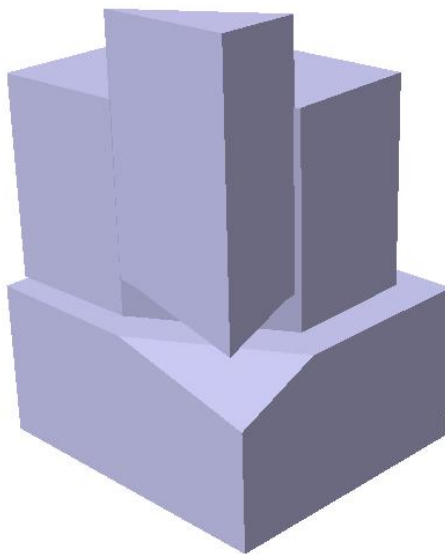
Слика 8.21. Угао савијеног пера: а) пре растерећења, б) након растерећења

8.2 Иницијални улазни подаци за нумеричку симулацију друге операције савијања

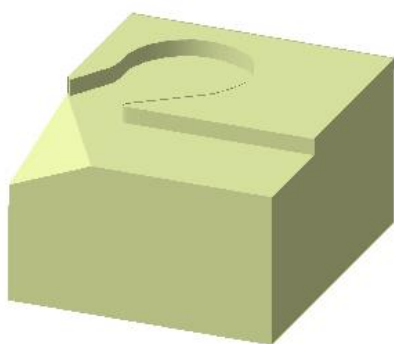
У овом одељку представљени су иницијални улазни подаци за другу операцију препоручене технологије савијања дела под углом од 25° у зони кружног отвора.

Коришћењем програма *CATIA* моделирани су 3D CAD модели алата који су потребни за нумеричку симулацију друге операције савијања. Алат се састоји из горњег

алата (обликач), доњег алата (матрица) и држача. Делови алата су сачувани у IGES формату, а склоп алата је приказан на слици 8.22.



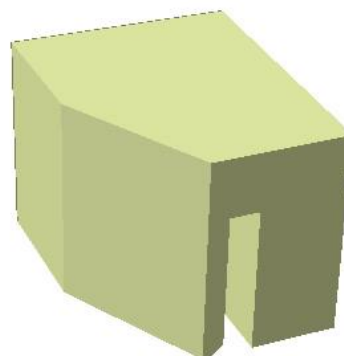
Слика 8.22. CAD модел склопа алата за другу операцију процеса савијања



Слика 8.23. Матрица



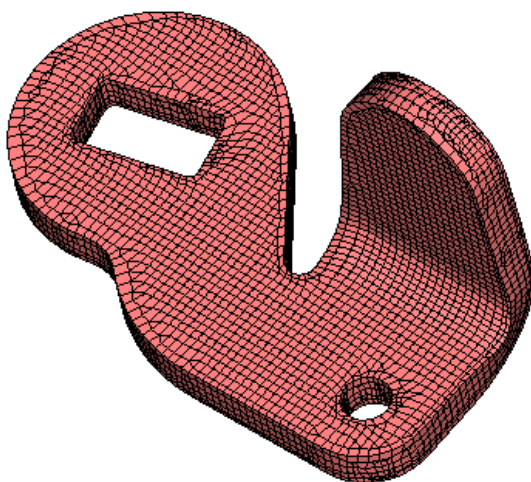
Слика 8.24. Обликач



Слика 8.25. Држач

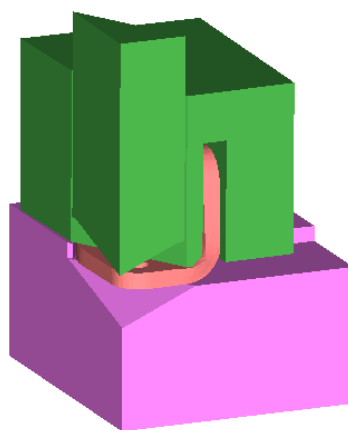
Модел алата за другу операцију савијања који су сачувани у IGES формату импортовани су у програм *Simufact.forming* преко опције за увоз потребне геометрије. Позиционирање је извршено на исти начин као и позиционирање алата за прву операцију савијања.

За припремак друге операције савијања импортован је виртуелни обрадак из резултата нумеричке симулације прве операције, тачније готов део након прве операције савијања. Припремак са генерисаном мрежом за другу операцију савијања приказан је на слици 8.26.



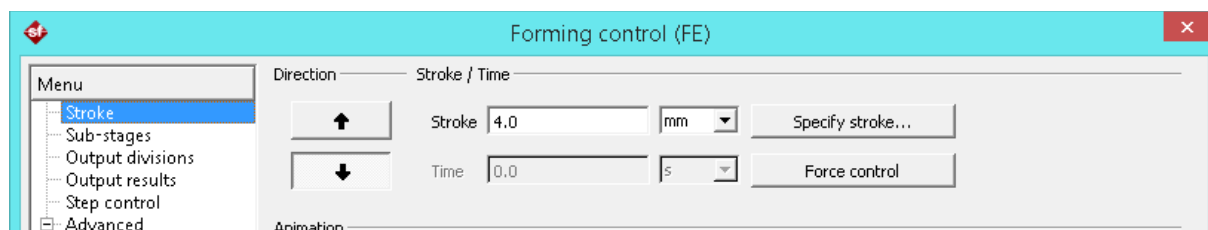
Слика 8.26. Припремак након прве операције

Слика 8.27. представља приказ тачно позиционираних алата и припремак за нумеричку симулацију друге операције савијања обратка под углом од 25° у програму *Simufact.forming*.



Слика 8.27. Позиционирани алати и припремак за другу операција савијања у програму *Simufact.forming*

На слици 8.28. приказан је прозор *Forming control*. Притискивач (обликач) се креће ка радном комаду надоле и његов ход износи 4 mm. Има задатак да оствари правилан контакт радног комада са обликачем и матрицом при савијању под углом од 25° .



Слика 8.28. Подешавање хода обликача у *Forming control* прозору

Одговарајућа контакт табела за симулацију друге операције процеса савијања приказана је на слици 8.29.

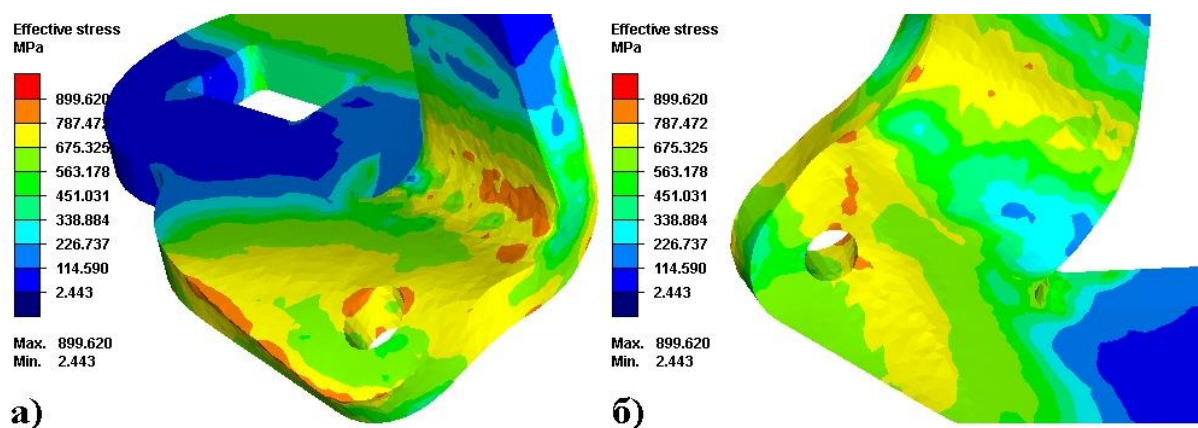
Contact table					
Overview					
Body	Contact	Direction	Type	Tolerance [mm]	Bias factor
WorkPiece	UpperDie	1st to 2nd	Touching	0	0
WorkPiece	LowerDie	1st to 2nd	Touching	0	0
WorkPiece	WorkPiece	1st to 2nd	Touching	0	0
WorkPiece	DRZAC1	1st to 2nd	Touching	0	0

Слика 8.29. Контакт табела за другу операцију савијања

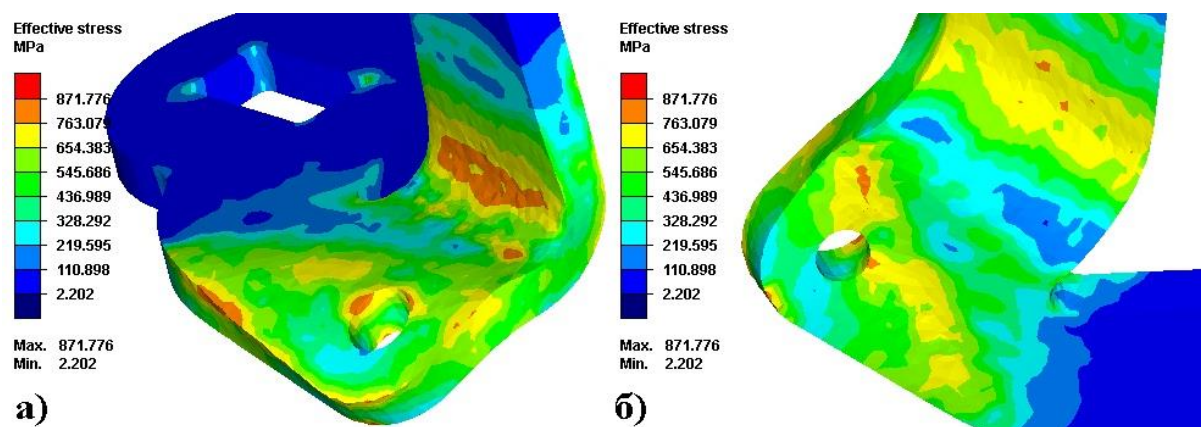
8.2.1 Резултати нумеричке симулације за другу операцију препоручене технологије

Као и код прве операције савијања, на основу иницијалних података за прву препоручену технологију савијања за другу операцију и након извршене ФЕ нумеричке симулације добијени су резултати који су представљени у овом одељку (расподела ефективног напона, расподела ефективне пластичне деформације, угао еластичног исправљања).

Расподела ефективних напона код радног комада за другу операцију препоручене технологије савијања дата је на сликама 8.30. и 8.31.

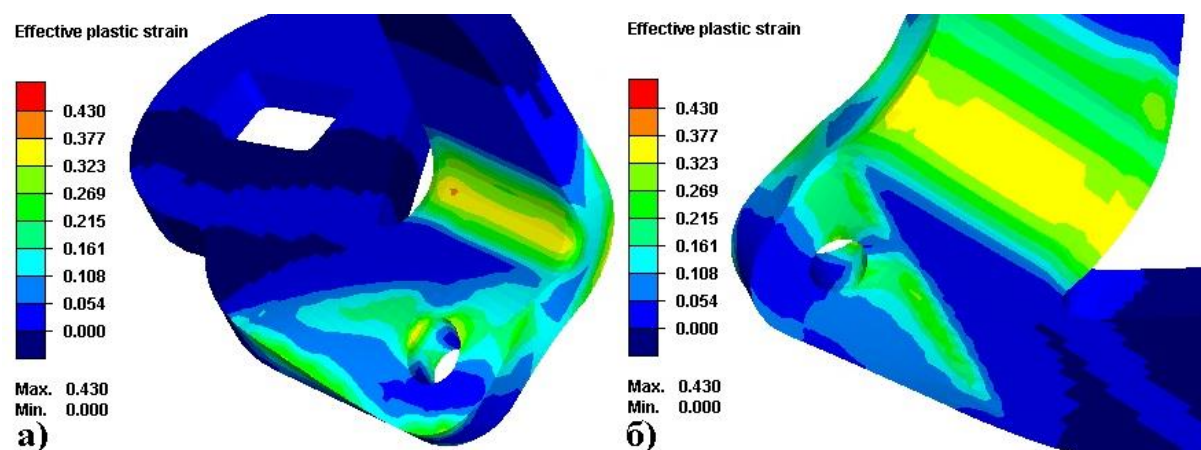


Слика 8.30. Расподела ефективног напона пре растерећења: а) спољашњи слој, б) унутрашњи слој



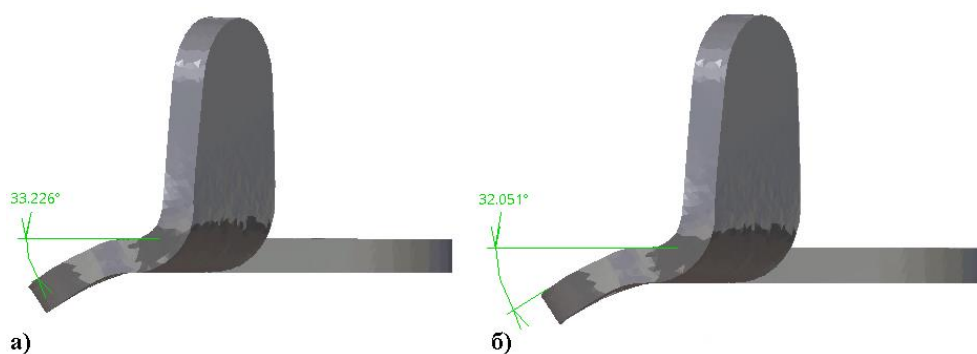
Слика 8.31. Расподела ефективног напона након растерећења: а) спољашњи слој, б) унутрашњи слој

Расподела ефективне пластичне деформације код радног комада за другу операцију препоручене технологије савијања дата је на слици 8.32.

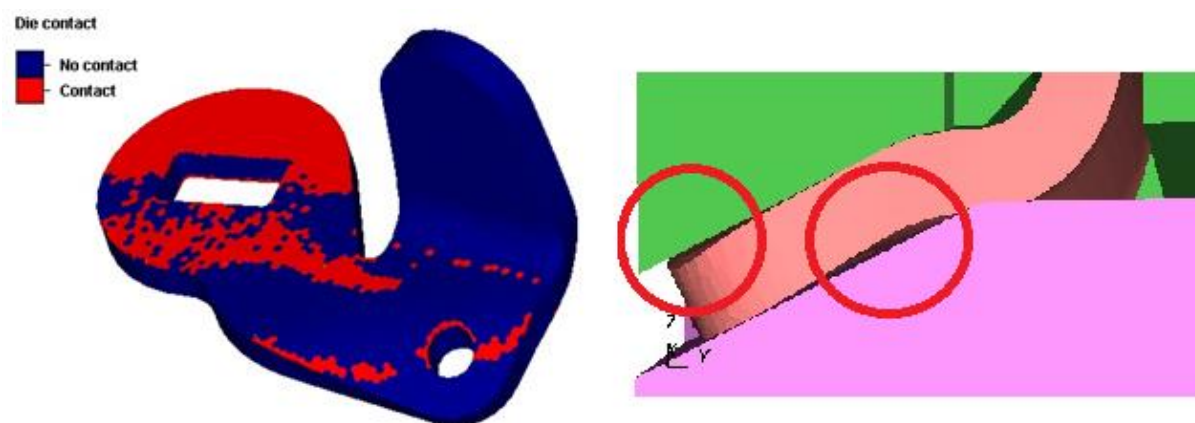


Слика 8.32. Расподела ефективне пластичне деформације након растерећења: а) спољашњи слој, б) унутрашњи слој

Слика 8.33. представља приказ друге операције савијања дела у зони отвора пре растерећења и након растерећења. Пре растерећења део предмета обраде се налази под углом од $33,226^\circ$, а након растерећења под углом од $32,051^\circ$, што је последица лоше оствареног контакта (слика 8.34.) између алата и предмета обраде и лоше измоделираних алата.

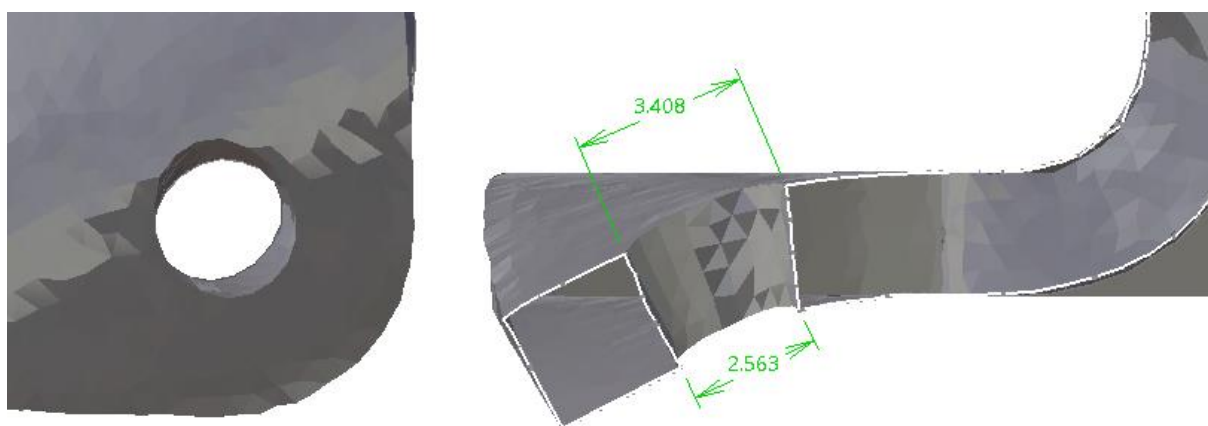


Слика 8.33. Угао савијеног дела у зони отвора: а) пре растерећења, б) након растерећења

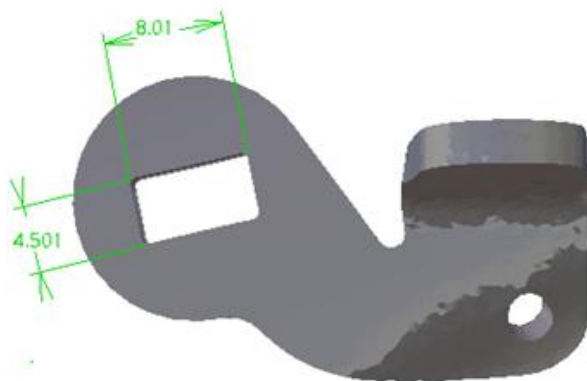


Слика 8.34. Приказ лоше оствареног контакта између алата и предмета обраде

На следећим сликама приказан је изглед отвора у зони савијања. Закључено је да се отвор деформисао и да нема првобитни облик. Уместо кружног облика пречника 3 mm (према радионичком цртежу), након друге операције савијања, отвор је добио облик елипсе (слика 8.35). Промена димензија код отвора који се не налази у зони савијања (слика 8.36.) је толика да се може заменарити.



Слика 8.35. Изглед отвора након друге операције савијања



Слика 8.36. *Изглед другог отвора ван зоне савијања*

9. Реинжењеринг технологије

У претхоном поглављу представљена је геометрија готовог комада који је добијен као резултат FE нумеричке симулације прве пројектоване технологије која не одговара геометрији CAD модела израђеног на основу радионичког цртежа. Ово поглавље описује ток реинжењеринга препоручене технологије савијања.

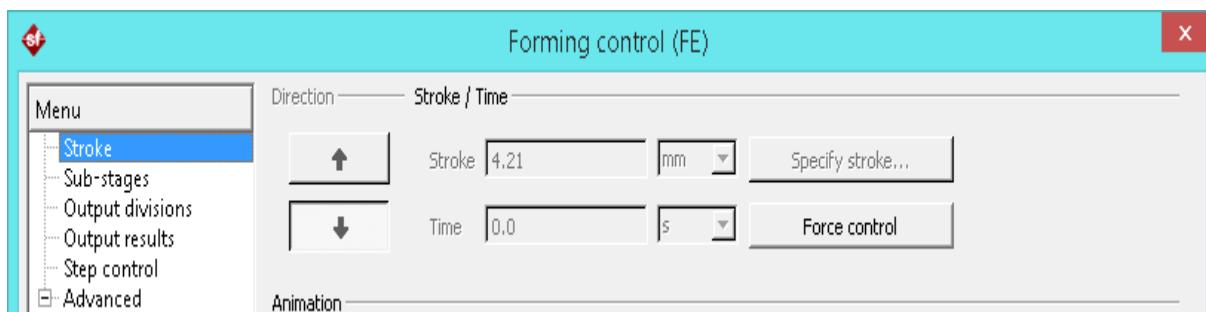
Реинжењеринг технологије је у првој нумеричкој симулацији (одељак 9.1) обухватио подешавање хода притискивача за добијање пуног контакта и жељеног угла од 25° у другој операцији савијања и последичну измену алата за ту операцију. Друга симулација у реинжењерингу (одељак 9.2) је обухватила измену геометрије припремка с обзиром да је уочен дефекат отвора у току савијања и утицај на еластичну повратност због прекида влакана. У трећој симулацији је извршен редизајн алата за обе операције савијања за компензацију угла еластичног исправљања и то у, првој операцији савијања за компензацију угла од $2,3^\circ$, а у другој операцији за компензацију угла од $0,4^\circ$.

9.1 Реинжењеринг друге операције савијања

Код препоручене технологије савијања за другу операцију, контакт алата и припремка је био недовољно остварен (слика 8.34.) и савијање није било могуће остварити под углом од 25° . Реинжењеринг друге операције савијања обухватио је кориговање хода притискивача (обликача) како би се обезбедио одговарајући контакт између алата и припремка. Такође, извршене су модификације на моделима алата за добијање жељеног угла од 25° .

9.1.1 Кориговање хода притискивача

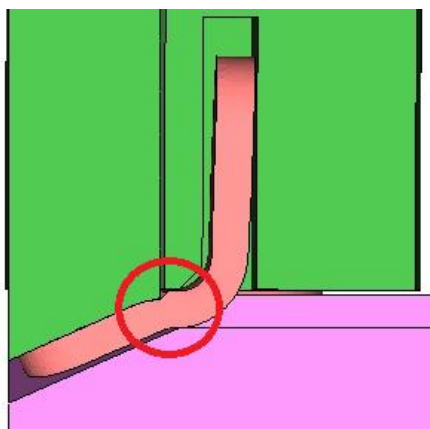
Нова вредност хода притискивача представља удаљеност притискивача од припремка која износи 4,21 mm (слика 9.1.) чиме је остварен одговарајући контакт алата и предмета обраде.



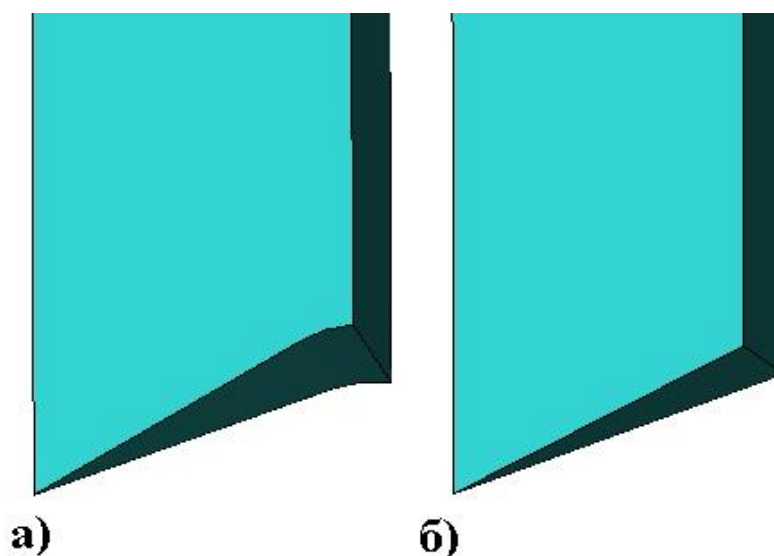
Слика 9.1. Подешавање хода притискивача у другој операцији савијања

9.1.2 Модификације на моделима алатима

Модификације на моделима алата су извршене због уочене неодговарајуће геометрије на првобитним моделима алата. Првобитни обликач (притискивач) и матрица нису могли да обезбеде угао савијања од 25° степени. Површине првобитних алата које обезбеђују контакт са припремком биле су под углом од 27° . Према томе, вредност тог угла је смањена за 2° . Такође, уклоњено је непотребно заобљење на притискивачу чиме се избегло гњечење лима. Гњечење лима је последица лошег хода притискивача и неадекватне геометрије алата и приказано је на слици 9.2. Према томе, савијање у другој операцији извршено је са притискивачем са равном површином (без заобљења) под углом од 25° (слика 9.3).



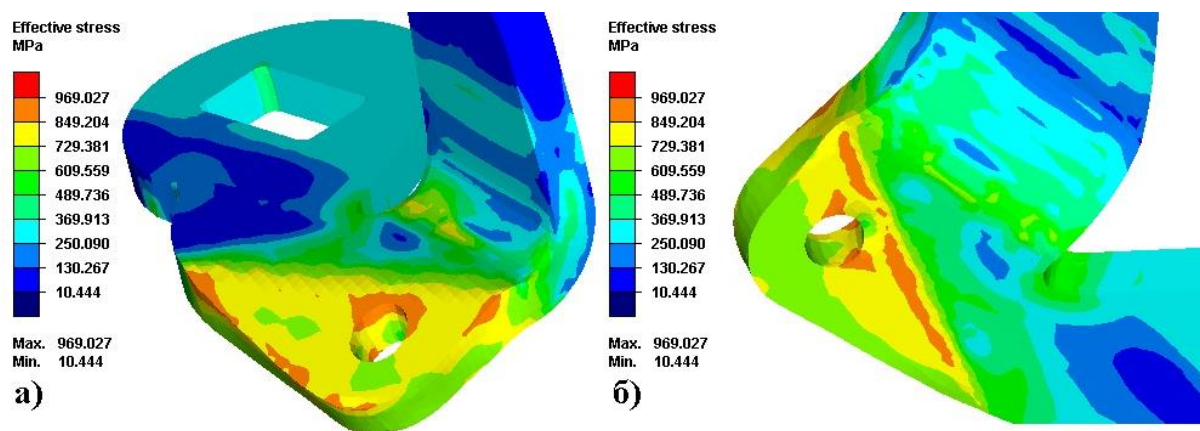
Слика 9.2. Гњечење лима



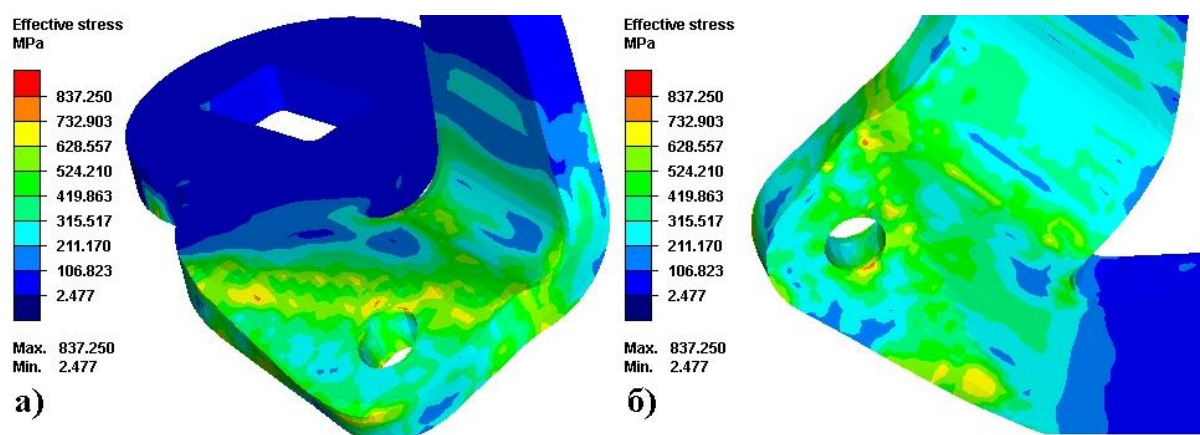
Слика 9.3. Притискивач: а) првобитни, б) модификован

9.1.3 Резултати реинжењеринга друге операције савијања

Расподела ефективног напона код радног комада за другу операцију након првог реинжењеринга технологије савијања дата је на сликама 9.4 и 9.5.

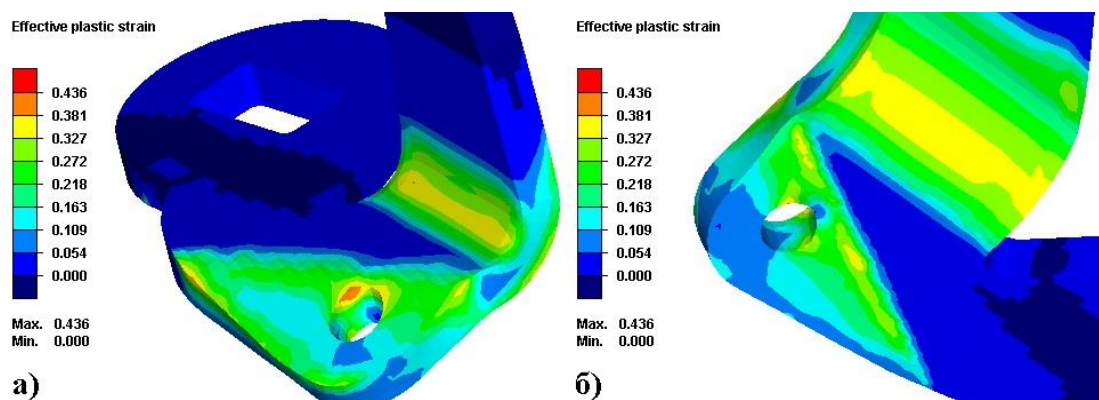


Слика 9.4. Расподела ефективног напона пре растерећења: а) спољашњи слој, б) унутрашњи слој



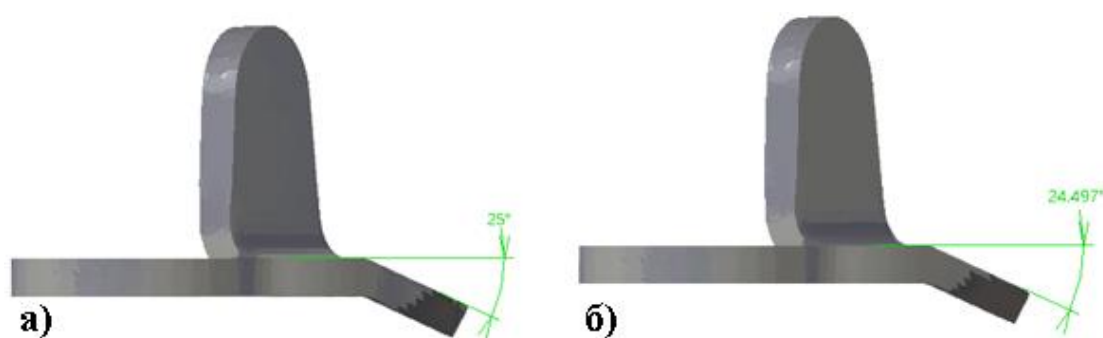
Слика 9.5. Расподела ефективног напона након растерећења: а) спољашњи слој, б) унутрашњи слој

Расподела ефективне пластичне деформације код радног комада за другу операцију након реинжењеринга технологије савијања дата је на слици 9.6.

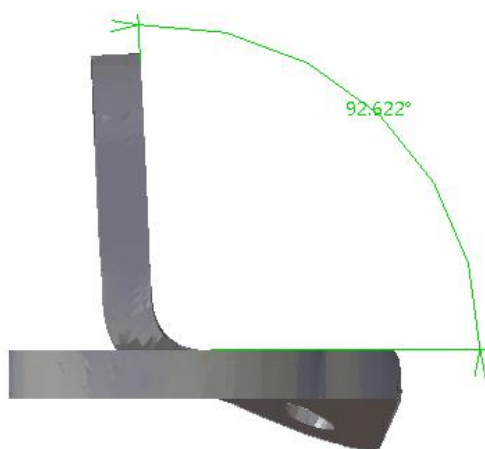


Слика 9.6. Расподела ефективне пластичне деформације након растерећења: а) спољашњи слој, б) унутрашњи слој

Након растерећења долази до еластичног исправљања и савијени део се налази под углом од $24,497^\circ$ (слика 9.7), а угао савијеног пера се повећао након друге операције савијања и износи $92,622^\circ$ (слика 9.8.).



Слика 9.7. Угао савијеног дела у зони отвора: а) пре растерећења, б) након растерећења

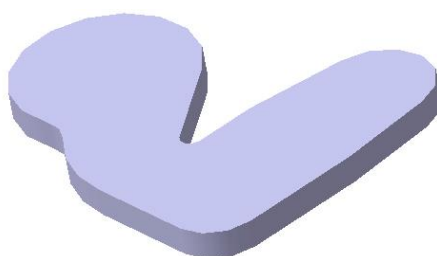


Слика 9.8. Готов комад након растерећења

9.2 Реинжењеринг технологије савијања применом припремка без отвора

С обзиром на резултате FE нумеричке симулације и уочене дефекте на готовом делу након процеса савијања, симулиран је процес савијања припремка без отвора. Симулација процеса савијања припремка без отвора извршена је са претпоставком да ће се ефекат еластичног исправљања ублажити.

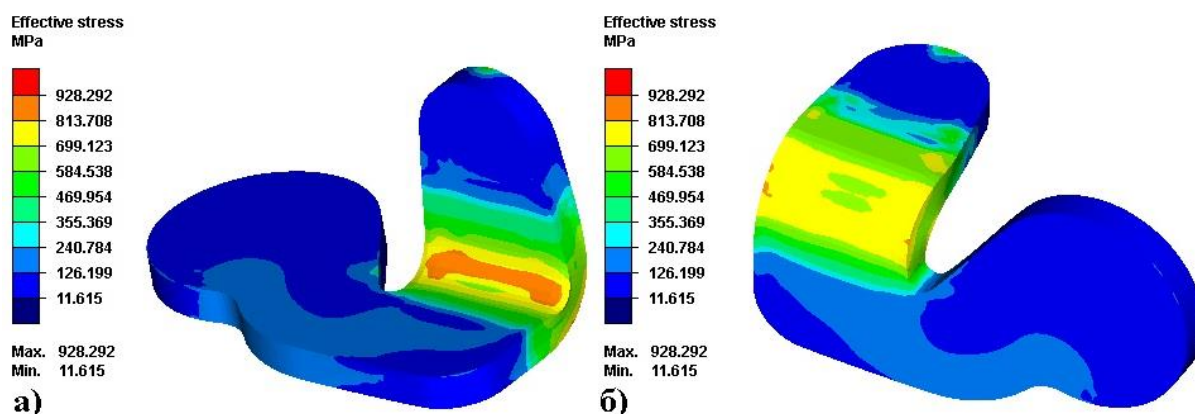
За анализу ефекта еластичног исправљања савијањем припремка без отвора био је неопходан 3D модел припремка без отвора израђен у програму *CATIA* који је направљен на основу радионичког цртежа који је дат у опису задатка. Нови припремак без отвора (слика 9.9.) је сачуван у IGES формату како би био импортован у програм *Simufact.forming*.



Слика 9.9. CAD модел припремка без отвора

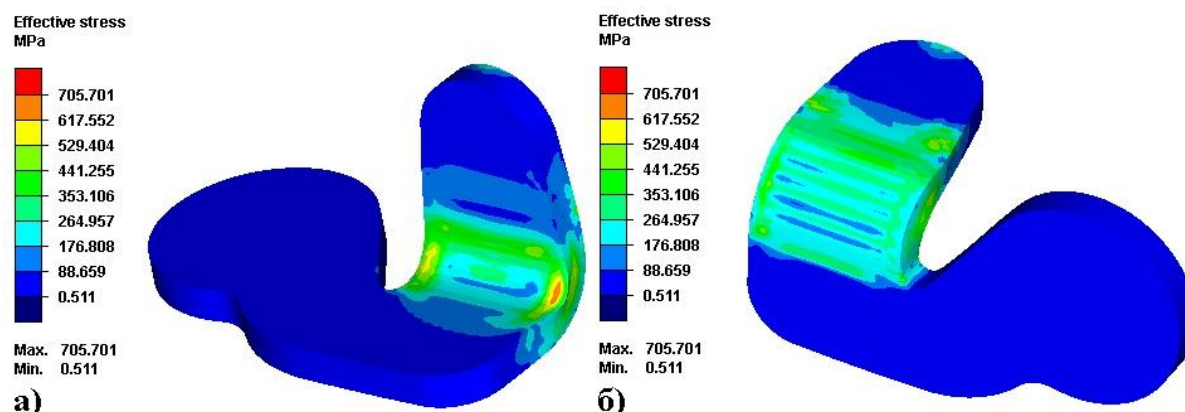
9.2.1 Резултати нумеричке симулације процеса савијања припремка без отвора

Расподела ефективног напона за прву операцију савијања припремка без отвора пре растеређења дата је на слици 9.10.



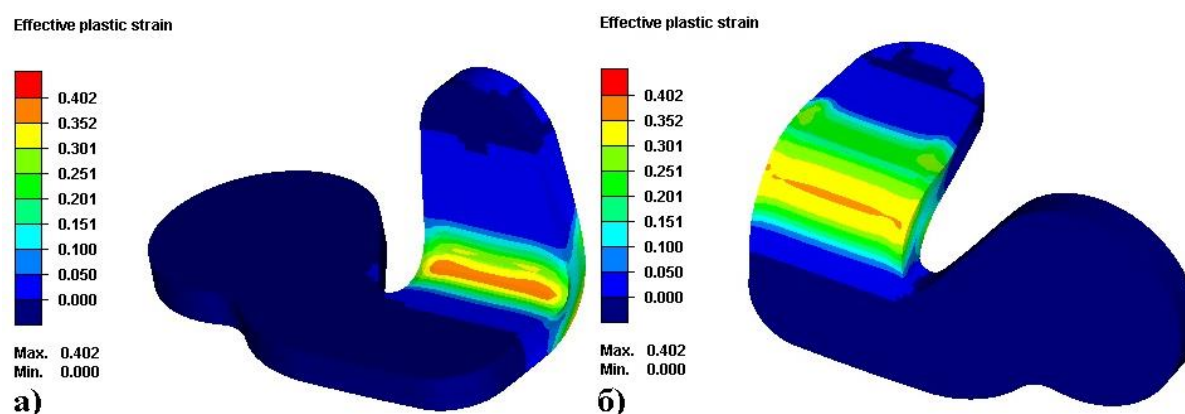
Слика 9.10. Расподела ефективног напона пре растеређења: а) унутрашњи слој, б) спољашњи слој

Расподела ефективног напона за прву операцију савијања припремка без отвора након растерећења дата је на слици 9.11.



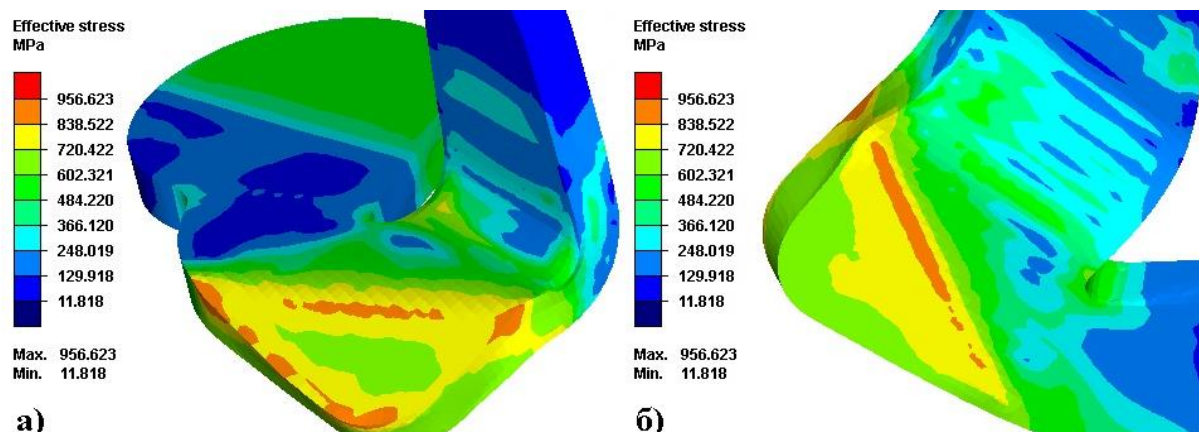
Слика 9.11. Расподела ефективног напона након растерећења: а) унутрашњи слој, б) спољашњи слој

Расподела ефективне пластичне деформације за прву операцију савијања припремка без отвора дата је на слици 9.12.



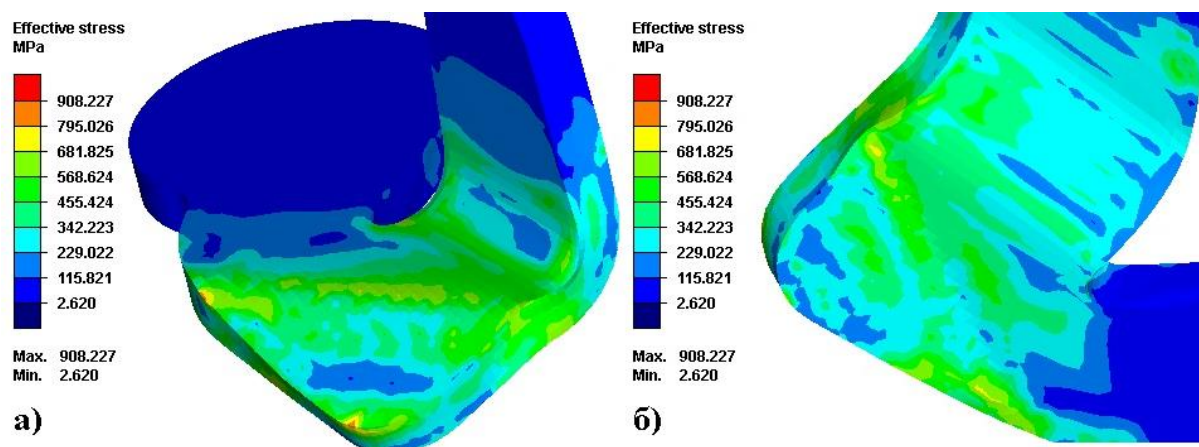
Слика 9.12. Расподела ефективне пластичне деформације након растерећења: а) унутрашњи слој, б) спољашњи слој

Расподела ефективног напона за другу операцију савијања пуног профила пре растерећења дата је на слици 9.13.



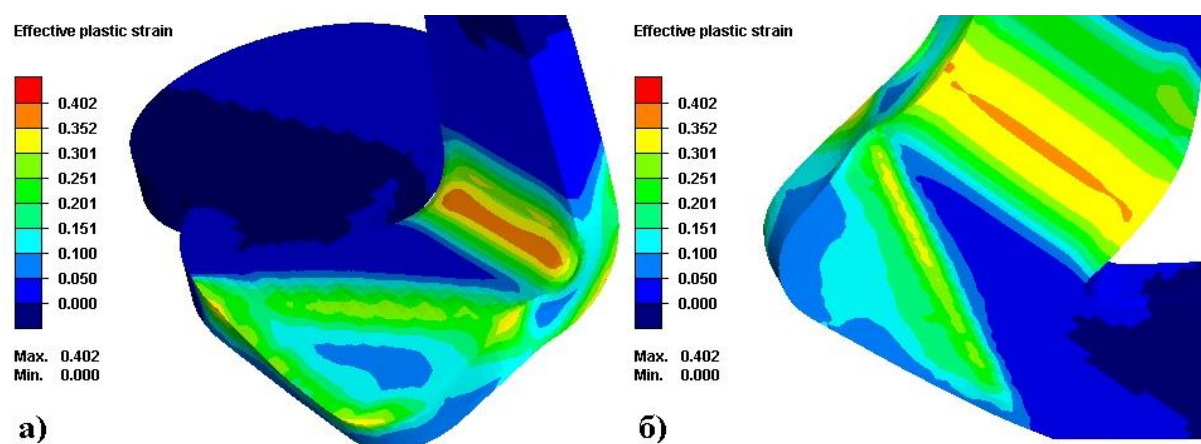
Слика 9.13. Расподела ефективног напона пре растерећења: а) спољашњи слој, б) унутрашњи слој

Расподела ефективног напона за другу операцију савијања пуног профила након растерећења дата је на слици 9.14.



Слика 9.14. Расподела ефективног напона након растерећења: а) спољашњи слој, б) унутрашњи слој

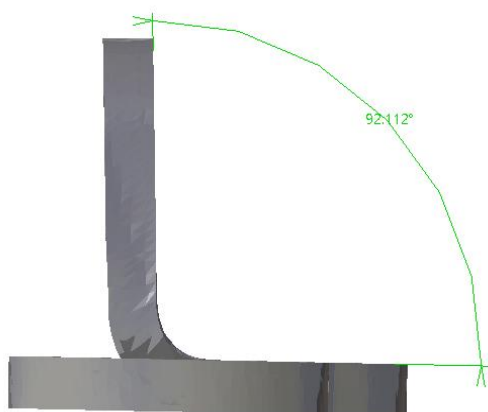
Расподела ефективне пластичне деформације за другу операцију савијања пуног профила дата је на слици 9.15.



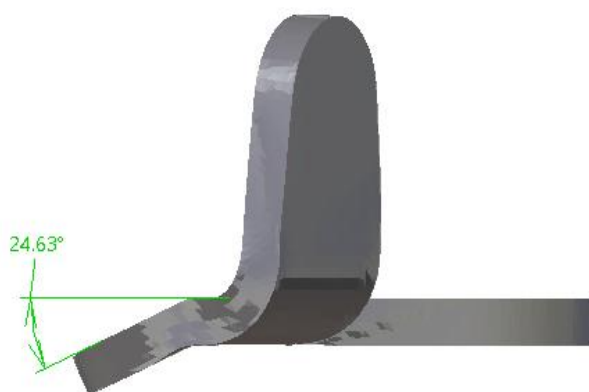
Слика 9.15. Расподела ефективне пластичне деформације након растерећења:
а) спољашњи слој, б) унутрашњи слој

Претпоставка да ће се ефекат еластичног исправљања ублажити савијањем припремка без отвора испоставила се тачном и приказано је на сликама 9.16., 9.17. и 9.18.

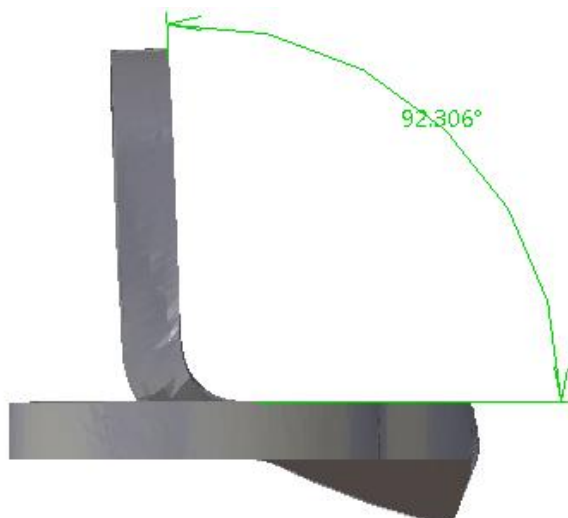
На слици 9.16. приказан је положај пера након растерећења после прве операције савијања који износи $92,112^\circ$. Након друге операције савијања у зони где је предвиђена накнадна израда отвора део се налази под углом од $24,63^\circ$ (слика 9.17.). Угао дела обратка који је предвиђен да буде савијен под углом од 90° након друге операције савијања износи $92,306^\circ$ (слика 9.18.).



Слика 9.16. Прва операција савијања припремка без отвора након растерећења



Слика 9.17. Друга операција савијања припремка без отвора након растерећења



Слика 9.18. Готов комад без отвора након друге операције савијања

9.3. Реинжењеринг технологије савијања са компензацијом углова еластичног исправљања

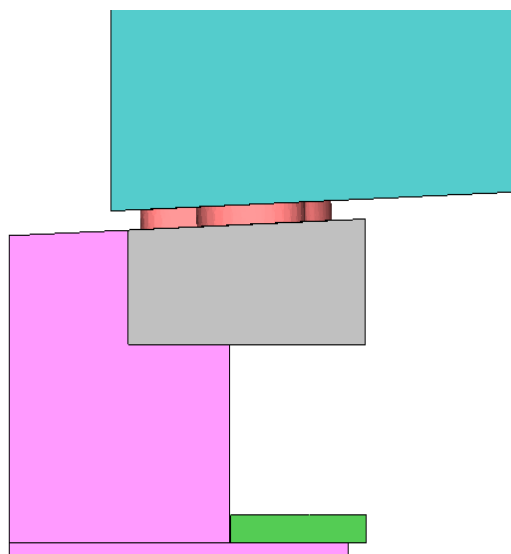
Симулацијом процеса савијања припремка без отвора утврђено је да отвор у зони савијања негативно утиче на појаву еластичног исправљања, тако да се за ФЕ нумеричку симулацију процеса савијања са компензацијом угла еластичног исправљања користио модел припремка без отвора. Компензација угла еластичног исправљања извршена је у првој операцији савијања где се перо савија под углом од 90° и у другој операцији савијања дела обратка под углом од 25° .

9.3.1 Нумеричка симулација прве операције савијања са компензацијом угла еластичног исправљања

Како се савијени део припремка након растерећења налази под углом од $92,306^\circ$ (слика 9.18.), савијање је извршено под мањим углом. Угао еластичног исправљања износи $2,3^\circ$ према резултатима ФЕ нумеричке симулације. Према томе, савијање у првој операцији изведено је под углом од $87,7^\circ$.

За израду симулације процеса савијања са компензацијом угла еластичног исправљања било је потребно извршити одређене модификације на алатима потребним за савијање. Потребне модификације извршене су у програму *CATIA* коришћењем једноставних опција *Pad* и *Pocket* како би се остварио потребан нагиб од $2,3^\circ$ на алатима. Горњем алату (обликач), матрици (доњи алат) и покретном ослоњу обезбеђена је површина под нагибом од $2,3^\circ$. Алати су сачувани у *IGES* формат како би се импортовали у програм *Simufact.forming*. Припремак је такође ротиран за $2,3^\circ$ око *X* осе и налази се на

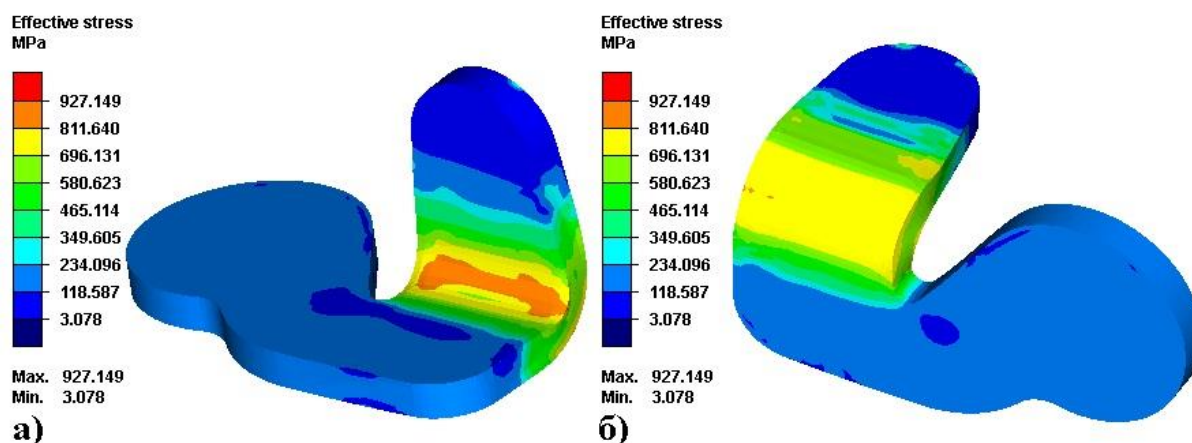
површинама покретног ослоња и матрице (доњег алата) које су под нагибом од $2,3^\circ$. Положај модификованих алата и припремка спремних за симулацију процеса савијања у програму *Simufact.forming* приказан је на слици 9.19.



Слика 9.19. Положај алата и припремка спремних за симулацију процеса савијања са компензацијом угла еластичног исправљања

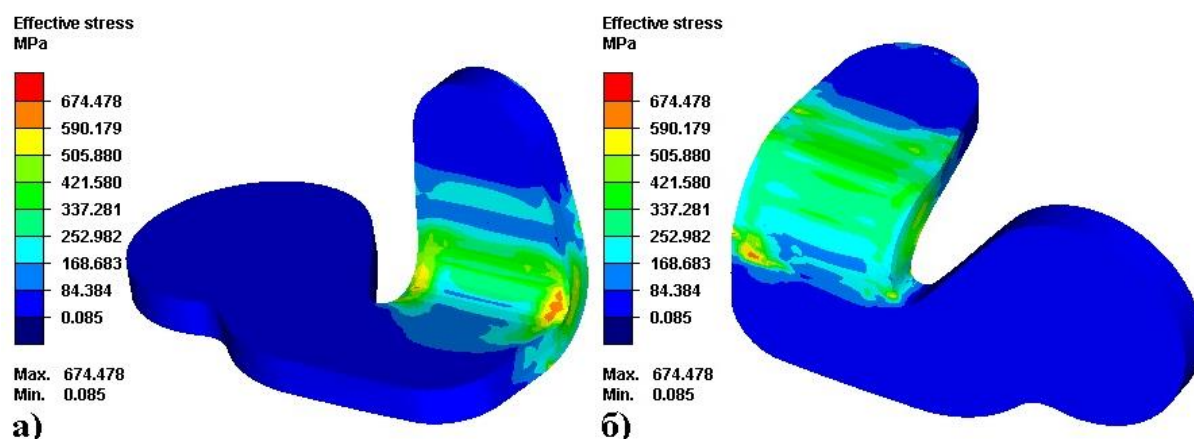
9.3.2 Резултати нумеричке симулације прве операције савијања са компензацијом угла еластичног исправљања

Расподела ефективног напона за прву операцију савијања пуног профила са компензацијом угла еластичног исправљања пре растеређења дата је на слици 9.20.



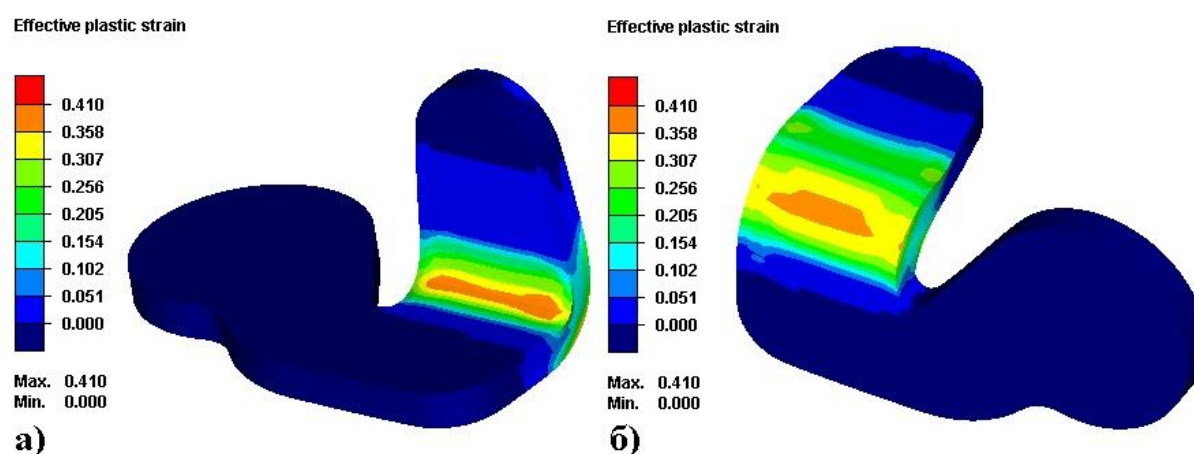
Слика 9.20. Расподела ефективног напона пре растеређења: а) унутрашњи слој, б) спољашњи слој

Расподела ефективног напона за прву операцију савијања пуног профила са компензацијом угла еластичног исправљања након растерећења дата је на слици 9.21.



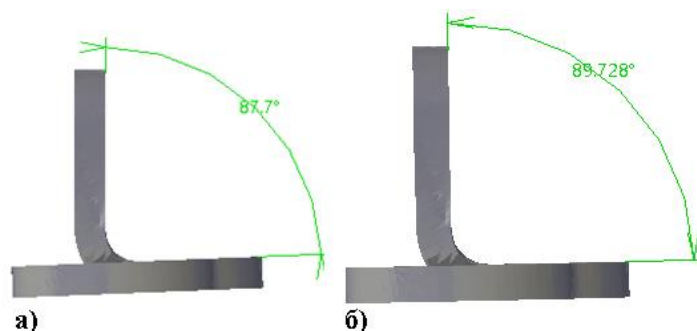
Слика 9.21. Расподела ефективног напона након растерећења: а) унутрашњи слој, б) спољашњи слој

Расподела ефективне пластичне деформације за прву операцију савијања пуног профила са компензацијом угла еластичног исправљања дата је на слици 9.22.



Слика 9.22. Расподела ефективне пластичне деформације након растерећења: а) унутрашњи слој, б) спољашњи слој

У првој операцији савијања пре растерећења перо дела се налази под углом од $87,7^\circ$ (слика 9.23.) због савијања под углом умањеним за $2,3^\circ$. Након растерећења долази до еластичног исправљања и угао савијеног пера износи $89,728^\circ$ што значи да се ефекат еластичног исправљања ублажио.



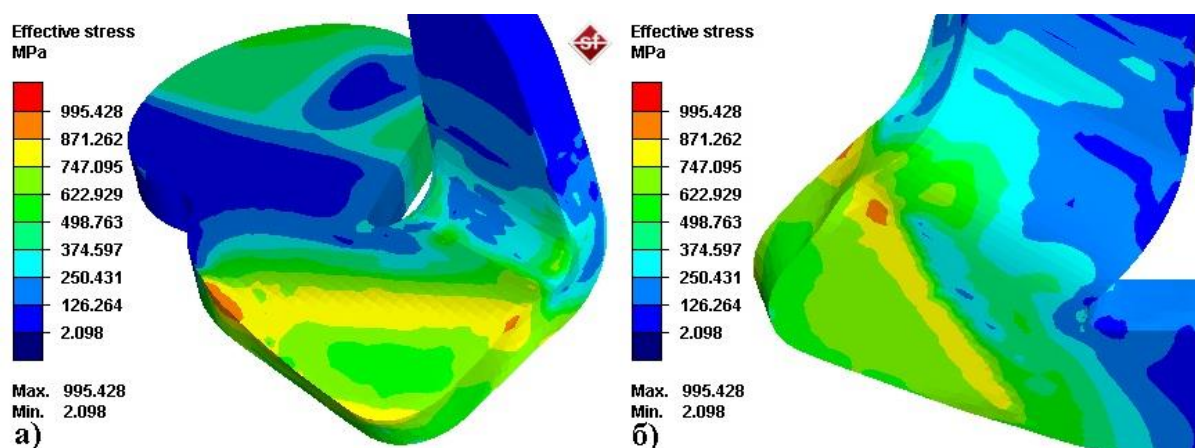
Слика 9.23. Угао савијеног дела пера у првој операцији савијања: а) пре растеређења, б) након растеређења

9.3.3 Нумеричка симулација друге операције савијања са компензацијом угла еластичног исправљања

Савијени део припремка у другој операцији савијања, након растеређења, налази се под углом од $24,63^\circ$ према резултатима FE нумеричке симулације (слика 9.17.). Пре растеређења део је био савијен под углом од 25° што значи да је дошло до еластичног исправљања. Како је вредност угла еластичног исправљања $0,4^\circ$, алати су модификовани тако да предмет обраде у другој операцији буде савијен под углом од $25,4^\circ$.

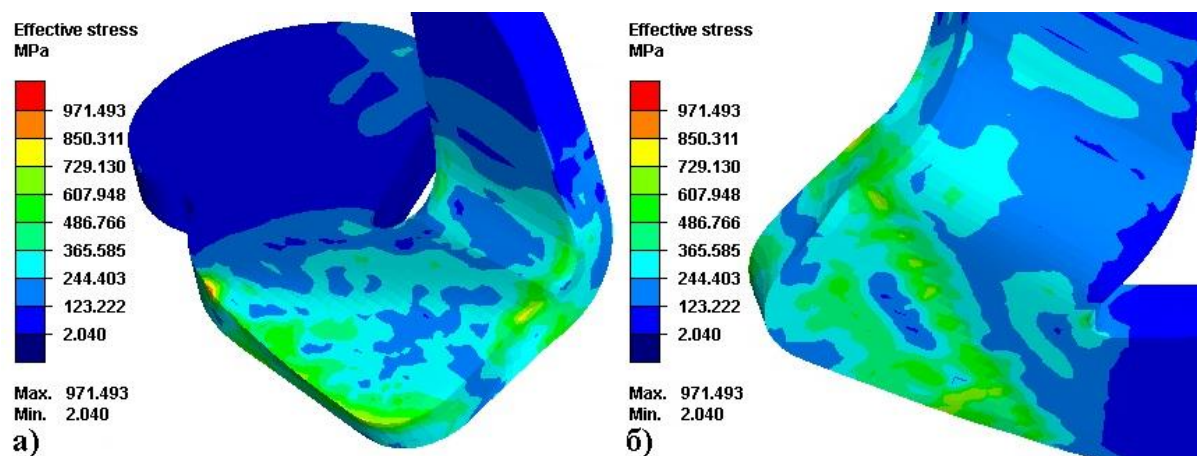
9.3.4 Резултати нумеричке симулације друге операције савијања са компензацијом угла еластичног исправљања

Расподела ефективног напона за другу операцију савијања пуног профила са компензацијом угла еластичног исправљања пре растеређења дата је на слици 9.24.



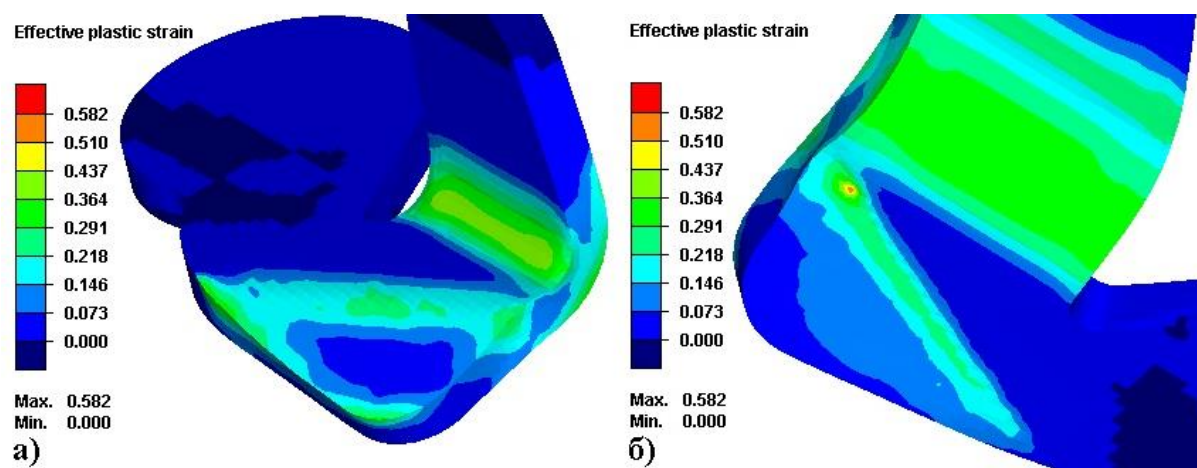
Слика 9.24. Расподела ефективног напона пре растеређења: а) спољашњи слој, б) унутрашњи слој

Расподела ефективног напона за другу операцију савијања пуног профила са компензацијом угла еластичног исправљања након растерећења дата је на слици 9.25.



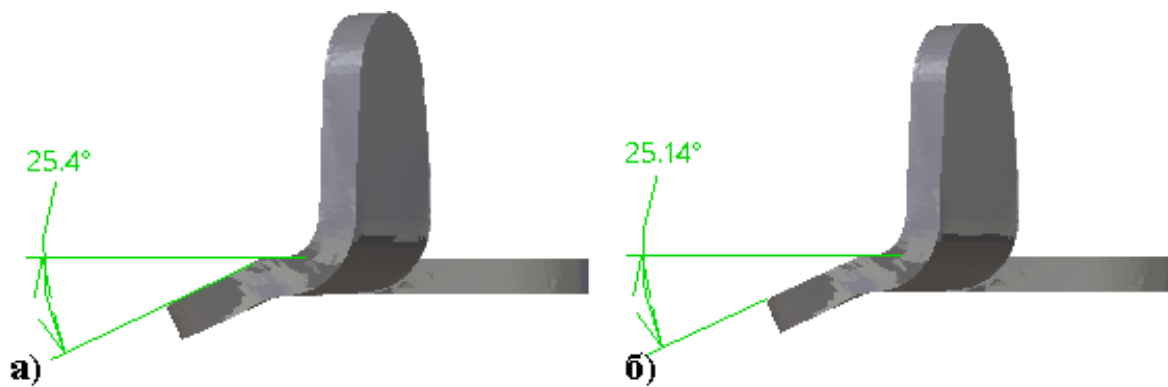
Слика 9.25. Расподела ефективног напона након растерећења: а) спољашњи слој, б) унутрашњи слој

Расподела ефективне пластичне деформације за другу операцију савијања пуног профила са компензацијом угла еластичног исправљања дата је на слици 9.26.



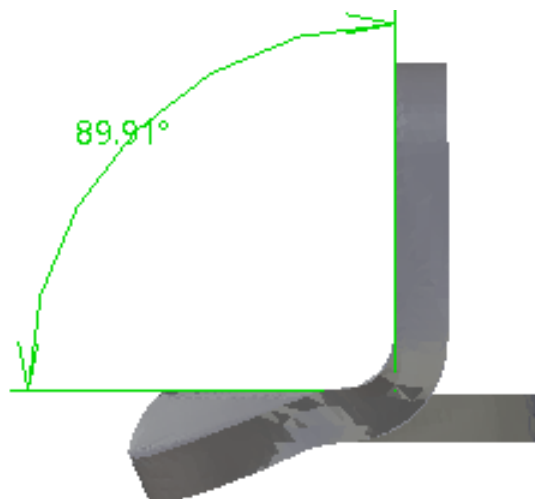
Слика 9.26. Расподела ефективне пластичне деформације након растерећења: а) спољашњи слој, б) унутрашњи слој

На слици 9.27. приказан је угао под којим се налази део обратка који се добија савијањем у другој операцији савијања са компензацијом угла еластичног исправљања пре и након растерећења. Део је пре растерећења савијен под углом од $25,4^\circ$. Након растерећења долази до еластичног исправљања и тај угао износи $25,14^\circ$.



Слика 9.27. Угао савијеног дела у другој операцији: а) пре растерећења, б) након растерећења

Након друге операције савијања променио се и угао савијеног пера који је добијен првом операцијом. Измерени угао савијеног пера у након друге операције савијања износи $89,91^\circ$ и приказан је на слици 9.28.



Слика 9.28. Угао савијеног пера након друге операције савијања

10. Анализа добијених резултата и закључна разматрања

У овом поглављу анализирани су резултати свих извршених ФЕ нумеричких симулација процеса савијања. Поред расподеле ефикасног напона и расподеле ефективне пластичне деформације разматрана је и вредност угла еластичног исправљања. Такође, анализиран је и утицај отвора на ефекат еластичног исправљања као и резултати технологије са алатима за компензацију еластичног исправљања.

У првој операцији препоручене технологије савијања угао савијеног пера пре растерећења износи 90° , након растерећења износи $92,275^\circ$ као последица еластичног исправљања. Део обратка који је предвиђен да буде савијен под углом од 25° у зони отвора, за препоручену технологију, пре растерећења био је савијен под углом од $33,226^\circ$, а након растерећења тај угао је износио $32,051^\circ$. С обзиром на добијене резултате кроз ФЕ нумеричку симулацију и на чињеницу да је део обратка морао бити савијен под углом од 25° пре растерећења, утврђено је да није остварен адекватан контакт алата и предмета обраде што је довело до реинжењеринга технологије у виду кориговања хода притискивача и модификација на алатима. Такође, утврђено је да се отвор у зони савијања деформисао и да је изгубио првобитни кружни облик пречника 3 mm. Закључак тога је да се израда кружног отвора мора извршити након процеса савијања, за разлику од отвора правоугаоног облика који није изгубио свој облик и димензије јер се не налази у зони савијања.

Први реинжењеринг технологије за другу операцију савијања обухватио је модификације на алатима и кориговање хода притискивача чиме је остварен одговарајући контакт између алата и предмета обраде. Део припремка савијен је под углом од 25° пре растерећења, а након растерећења као последица еластичног исправљања део обратка је савијен под углом од $24,497^\circ$. Након друге операције савијања, вредност угла савијеног пера се повећала и износи $92,622^\circ$.

Претпоставка да ће се ефекат еластичног исправљања ублажити, савијањем истог припремка али без кружног отвора, испоставила се тачном. Након прве и друге операција савијања, перо дела било је савијено под углом од $92,306^\circ$, док је део који се добија другом операцијом савијања савијен под углом од $24,63^\circ$. Резултатима ФЕ нумеричке симулације савијања припремка без отвора закључено је да ће се припремак без отвора користити и за симулацију савијања са компензацијом угла еластичног исправљања.

За материјал припремка чија је дебљина лима преко 2 mm, а затезна чврстоћа већа од 550 N/mm^2 и за однос радијуса савијања и дебљине лима (r/s) 1, при савијању лима под углом од 90° , величина угла еластичног исправљања према табели 5.1. износи 3° . Резултат ФЕ нумеричке симулације је показао да је угао еластичног исправљања $2,3^\circ$ при савијању под углом од 90° у првој операцији, и закључено је да су кроз нумеричку симулацију процеса савијања добијени прецизнији резултати од табеларних.

Анализом резултата ФЕ нумеричке симулације са компензацијом угла еластичног исправљања за прву и другу операцију савијања закључено је да се ефекат еластичног

исправљања на прецизност готовог обратка може елиминати изменом конструкције алата. У првој операцији савијања перо припремка је савијено под углом од $87,7,3^\circ$ пре растерећења у алату, а након растерећења угао савијеног пера износи $89,728^\circ$. У другој операцији савијања део предмета обраде је савијен под углом од $25,4^\circ$, а након растерећења под углом од $25,14^\circ$. Након друге операције савијања, угао савијеног пера се се повећао и износи $89,91^\circ$.

Радијус савијања r_u мора да задовољи неједначину да би обрада била успешна:

$$r_{u \min} < r_u < r_{u \max}.$$

Вредност минималног и максималног радијуса савијања за материјал припремка:

$$r_{u \min} = \frac{s}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_m} - 1 \right) = \frac{2,5}{2} \left(\frac{1}{0,45} - 1 \right) = 1,52 \text{ mm},$$

$$r_{u \max} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot R_p} = \frac{2,5 \cdot 2,1 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 500 \cdot 10^6} = 525 \text{ mm}.$$

За прву операцију, радијус савијања $r_u = 2,5 \text{ mm}$ што значи да је неједначина задовољена и обрада у првој операцији савијања није критична.

Код друге операције према радионичком цртежу дела потребно је реализовати савијање са радијусом савијања $r_u = 0,5 \text{ mm}$. Како је минимални радијус савијања $r_{u \min} = 1,52 \text{ mm}$, неједначина није задовољена. Међутим, резултати FE нумеричке симулације показују да радијус савијања $r_u = 0,5 \text{ mm}$ не утиче на обраду, односно не доводи до појаве прекомерних затежућих напона у спољашњим влакнима. Имајући у виду да је величина коначног елемента 1 mm и да је STL мрежа алата у зони радијуса такође са већим елементима, тако мали детаљ у геометрији је нумерички занемарен у конткату обратка и алата. Тиме је савијање у овој зони нумерички реализовано без идентификације проблема. Због веће дебљине лима и малог угла савијања не очекују се критични напони затезања ни у реалном процесу обраде савијањем.

Затезна чврстоћа материјала предмета обраде износи $R_m = 1000 \text{ MPa}$, а напон на граници течења је $R_p = 500 \text{ MPa}$. Уколико напони у зонама савијања достигну вредност преко 1000 MPa обрада ће бити критична и доћи ће до појаве пукотина у спољашњим влакнима у зони савијања на радном комаду. Резултати FE нумеричке симулације су показали да се највећа вредност напона јавља у зонама савијања и креће се у границама дозвољеног, тачније, вредност напона не прелази вредност затезне чврстоће. Вредност деформација се креће у распону од $0 - 0,4$ што представља мању деформацију од критичне деформације при достизању R_m (0,45).

На крају анализе може се закључити да обрада није критична и да неће доћи до разарања материјала и појаве пукотина у току процеса савијања, што значи да је готов обрадак технологичан. Реинжењеринг технологије са предложеним изменама

конструкције алата за компензацију углова савијања и коришћењем припремка без отвора су потврђене сетом нумеричких симулација процеса савијања што је дало жељене резултате у добијању боље прецизности обратка и достизању димензија и облика обратка дефинисаних радионичким цртежом.

Литература

- [1] **Бинко Мусафија**, *Обрада метала пластичним деформисањем*, Сарајево, 1979. год.
- [2] **Србислав Александровић, Милентије Стефановић**, *Технологија пластичног обликовања метала*, Крагујевац, 2010. год.
- [3] **Милан Ћурчић**, *FE симулација процеса савијања са проценом еластичног исправљања*, дипломски рад, Крагујевац, 2008 год.
- [4] **Весна Мандић**, *Физичко и нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем*, 2012, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
- [5] **Весна Мандић**, *Виртуелни инжењеринг, Машински факултет у Крагујевцу*, 2007
- [6] **Весна Мандић**, *Моделирање и симулација у обради деформисањем*, Машински факултет у Крагујевцу, 2005 год.
- [7] **Academia**; Интернет страница:
https://www.academia.edu/28671772/Specifikacija_materijala_inox_W.Nr._1.4301_ili_AISI_304?auto=download, приступљено 7.9.2018 год.
- [8] **ФТН**; Интернет страница:
http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/dokumenti/Laboratorija_za_deformisanje/Masinogradnja/Savijanje.pdf, приступљено 20.9.2018 год.
- [9] **Весна Мандић**, Материјал са предавања, *Машине и алати у обради метала деформисањем*: <http://moodle.mfkg.rs/mod/resource/view.php?id=2155>, приступљено 22.9.2018 год.
- [10] **User Manual**, *Simufact.forming*