

Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука

Вељко Ж. Вуковић
САЕ анализа процеса савијања лима у
корачним алатима
Завршни рад

Крагујевац, 2021.

Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: CAD/CAM/CAE 1

Број индекса: 149/2017

Вељко Ж. Вуковић

**CAE анализа процеса савијања лима у
корачним алатима**

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Весна Мандић - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У завршном раду је потребно укратко приказати процесе савијања лима, са фокусом на савијање у корачним алатима. Анализа такве врсте савијања треба спровести применом FE нумеричких симулација у софтверу *Simufact.forming* користећи индустријске алате за једноставнији обрадак од лима. Посебно ће се обратити пажња на ефекте еластичног исправљања.

Препоручени оквирни садржај рада:

1. Увод
2. Угаоно савијање лимова
3. Еластично исправљање при савијању лимова и конструктивна решења
4. Нумеричке симулације процеса применом методе коначних елемената,
5. САЕ моделирање процеса вишеоперационог савијања лима у корачним алатима
6. Анализа нумеричких резултата
7. Закључна разматрања

Препоручена литература:

- [1] Б. Мусафија, Обрада метала пластичном деформацијом (четврто издање), Машински факултет, Сарајево, 1979.
 - [2] С. Александровић, Производне технологије: Технологија пластичног обликовања - скрипта, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2011.
 - [3] М. Стефановић, Машине и алати у ОМД- скрипта, Факултет инжењерских наука, Крагујевац.
 - [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] Стефан Василић, Дипломски рад
 - [8] Дејан Миљојковић, Завршни рад
- Крагујевац, 2021.

ментор:

Др Весна Мандић, ред. проф.

РЕЗИМЕ

У оквиру рада, приказане су основне карактеристике процеса обраде метала деформисањем, као и основне карактеристике обраде савијањем. Поред тога, описан је и значај моделирања и симулације у обради метала деформисањем. Практични део рада обухвата анализу процеса савијања лима и процену квалитета добијеног дела кроз нумеричку симулацију, применом методе коначних елемената, извршену у *Simufact.forming* софтверу, при чему је пројектовање дела и алата извршено у софтверском пакету *ProEngineer*. На самом крају рада, приказани су добијени резултати симулације, као и њихова анализа.

Кључне речи: *алати, метода коначних елемената, моделирање, нумеричка симулација, савијање.*

ABSTRACT

Within the paper, the basic characteristics of the metal forming processes, as well as the basic characteristics of bending processes are presented. In addition, the importance of modelling and simulation in metal forming is described. The practical part of the paper includes analysis of the sheet metal bending process and assessment of the quality of the obtained part through numerical simulation, using the finite element method, performed in *Simufact.forming* software, where the design of parts and tools is performed in the software package *ProEngineer*. At the very end of the paper, the obtained simulation results are presented, as well as their analysis.

Key words: *tools, finite element method, modelling, numerical simulation, bending.*

Садржај

1. Увод	1
1.1. Обрада метала деформисањем	1
1.2. Обрада савијањем	2
2. Угаоно савијање лимова	4
2.1. Алати за угаоно савијање на пресама	4
2.2. Прорачун развијеног стања	7
2.3. Радијус савијања	10
3. Еластично исправљање при савијању лимова и конструктивна решења.....	12
4. Нумеричке симулације процеса применом методе коначних елемената.....	19
4.1. Софтвер за симулацију процеса (<i>Simufact.forming</i>)	20
4.1.1. <i>Simufact.forming</i> модул за обликовање лима	21
4.1.2. Примена методе коначних елемената у софтверу <i>Simufact.forming</i>	22
4.2. Метода коначних елемената (МКЕ).....	23
5. САЕ моделирање процеса вишеоперационог савијања лима у корачним алатима	25
5.1 Значај моделирања у пројектовању процеса и алата у ОМД	25
5.2 Опис задатка и дефинисање улазних података.....	26
6.1 Приказ расподеле ефективног напона	37
6.2 Приказ расподеле ефективне пластичне деформације	43
6.3 Процена еластичне повратности	48
7. Закључна разматрања.....	54
Литература.....	55

1. Увод

1.1. Обрада метала деформисањем

Обрада метала деформисањем обухвата процесе у којима се пластични деформисањем почетног материјала добијају потребни облик и димензије обратка. Свим врстама обрада деформисањем заједничко је то да морају постојати алат и машина. Алат, обично направљен специјално за одређени обрадак, пружа предмету геометријски облик, док машина остварује потребне силе и кретања [1].

Пластично деформисање метала одвија се под дејством одређеног спољашњег оптерећења, које узрокује унутрашња напрезања и трајну промену облика почетног материјала. Укупна деформација настаје као резултат пластичног деформисања сваког појединачног кристалног зрна материјала. Расподела деформација по запремини предмета може бити различита у зависности од врсте и услова обликовања [2].

Услед пластичног деформисања материјал мења своју структуру, што доводи до промене механичких својстава у погледу повећане чврстоће и жилавости.

Главне предности обраде метала деформисањем су [2, 3]:

- релативно лака и брза израда делова,
- високе механичке особине добијених делова,
- висок степен искоришћења материјала,
- нижи трошкови производње,
- висока тачност и квалитет површина делова,
- релативно мала потрошња енергије по јединици тежине радног предмета,
- може се произвести велики број делова у јединици времена.

Недостаци обраде метала деформисањем:

- ова технологија је оправдана само у условима серијске, великосеријске и масовне производње,
- потешкоће услед обраде материјала са врло малом почетном пластичношћу (то се углавном односи на високолегиране челике),
- појава великих сила и притисака током одређених процеса обликовања, што захтева робусне алате и машине велике снаге,
- примена процеса је ограничена због максимално дозвољеног оптерећења алата.

Области примене су [2]:

- индустрија свих врста возила, бродова, авиона и осталих летелица, машина, алата и уређаја,
- израда везивних елемената: вијака, навртки, чивија, осовиница, и сл.,
- израда резервоара, судова, лименки и друге амбалаже,
- израда грађевинских елемената (кровне и зидне конструкције и сл.),

- израда делова у електротехници и електроници,
- израда ручног алата и хируршких инструмената,
- војна индустрија.

1.2. Обрада савијањем

Обрада савијањем припада групи најчешће примењиваних поступака обраде метала деформисањем. Омогућава израду широког спектра производа, са димензијама делова од неколико милиметара до неколико метара. Делови сложене геометрије израђују се у неколико операција [2].

Савијање се често комбинује са другим технолошким процесима, као што су раздвајање, спајање, дубоко извлачење и слично. Ова технологија се најчешће користи у изради делова за лака и тешка возила, тракторе, шинска возила, пољопривредне машине, итд [4].

Основна карактеристика процеса савијања је развој локалне пластичне деформације у зони савијања. Тада деформисана зона покрива мањи део запремине комада, мада постоје и поступци у којима се деформише цела запремина [2].

Савијање се користи и у серијској и у појединачној производњи. Полазни материјал (полупроизвод) је обично лим у облику траке или табле, али може бити и жица, пун профил или цев. Дебљина лимова за савијање креће се од стотину делова милиметра до неколико десетина милиметара.

Основне методе савијања су:

- савијање помоћу алата на универзалним пресама (угаоно савијање),
- профилно савијање на специјалним пресама,
- кружно савијање,
- профилно савијање ваљцима,
- савијање цеви,
- савијање мањих делова (од траке и жице) на специјалним машинама.

Технологија израде делова савијањем нуди низ предности. Конструкције израђене технологијом савијања лакше су од ливених, а поступак производње је једноставнији, што се свакако одражава на економски утицај. Поред тога, отпорност конструкција, посебно на ударна оптерећења, је већа [4].

У зависности од димензија и облика комада, профила полупроизвода и карактера производње, поступак савијања се врши помоћу:

- алата на пресама (кривајне, коленасте, ексцентарске, фриксione, хидрауличне и специјалне пресе),
- ваљака на ротационим машинама за савијање,
- посебних уређаја на специјалним машинама за савијање.

На пресама се делови савијају преко релативно малог радијуса, у односу на савијене делове који се израђују на осталим машинама. У ту сврху се користе разне пресе, од најмање до највеће (са силом до 60.000 kN).

На ротационим машинама, делови се савијају преко великог радијуса (котлови, цилиндри, резервоари и слично).

Посебни уређаји и специјалне машине за савијање, као што су на пример, машине за савијање цеви, користе се за савијање посебних облика.

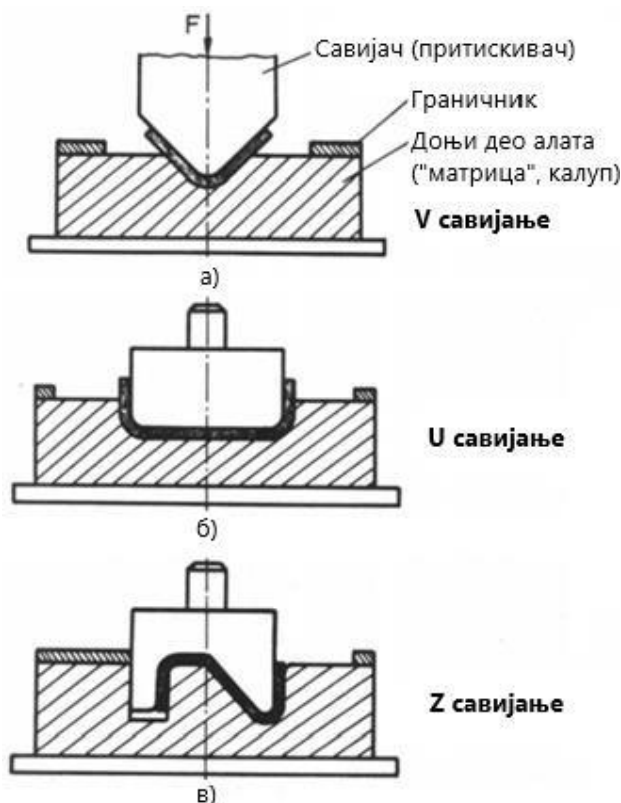
Сложенији делови се савијају у неколико операција. Технологија се може подесити тако да се за сваку операцију користи засебни алат или да се више операција савијања изводе истовремено или поступно са комбинованим алатима.

2. Угаоно савијање лимова

Угаоно савијање се најчешће изводи у алатима постављеним на универзалне пресе, које могу бити ексцентарске или угаоне, хидрауличне, или на специјалним пресама [2].

У зависности од облика и броја места савијања, угаоно савијање може бити [5]:

- једноугаоно - V савијање (слика 2.1а),
- двоугаоно - U савијање (слика 2.1б) и
- вишеугаоно - Z савијање (слика 2.1в).



Слика 2.1. Различити облици угаоног савијања: а) V савијање, б) U савијање и в) Z савијање [5]

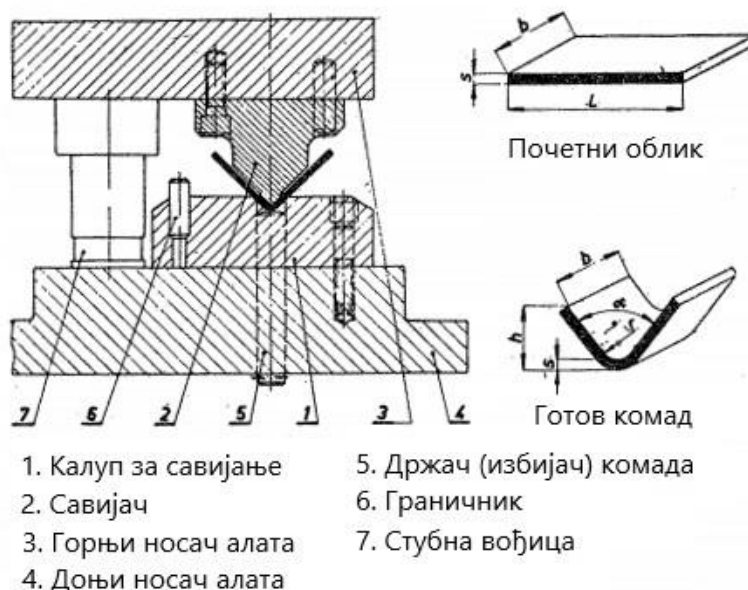
Типични примери угаоног савијања су V и U савијање. Сва остала угаона савијања представљају комбинацију ова два типа.

2.1. Алати за угаоно савијање на пресама

Алати за савијање су концептуално слични алатима за просецање и пробијање. Имају горњу и доњу плочу (кућиште алата), стубно вођење (искључиво), чеп за везу са машином и слично. Главна разлика лежи у радним елементима, а овде су то притискивач (савијач, обликач) и матрица, односно калуп за савијање [2, 5].

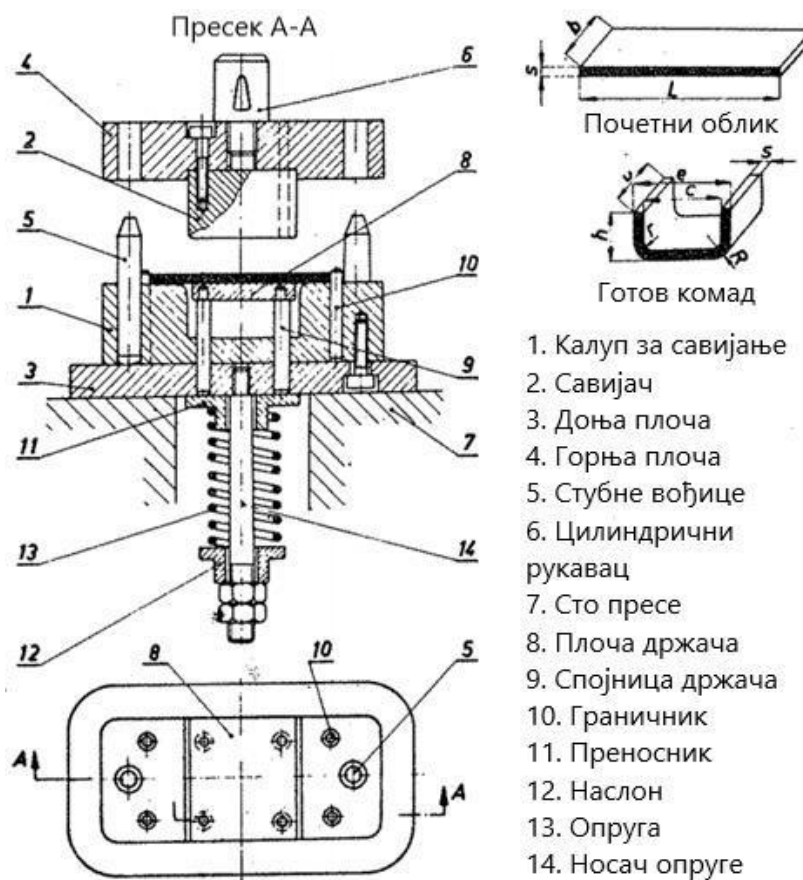
На сликама 2.2 и 2.3 приказани су примери алата за једноугаоно и двоугаоно савијање.

За савијање симетричних профила под различитим угловима ($0 < \alpha < 180^\circ$) користе се врло једноставни алати, који се називају алати за савијање V профила (слика 2.2). Припремак од лима се поставља на калуп за савијање 1, до граничника 6. Притискивач 2 савија радни комад и истовремено га придржава помоћу држача 5. Корекција угла врха притискивача врши се након пробе првог комада и тачног одређивања величине угла еластичног враћања [4].



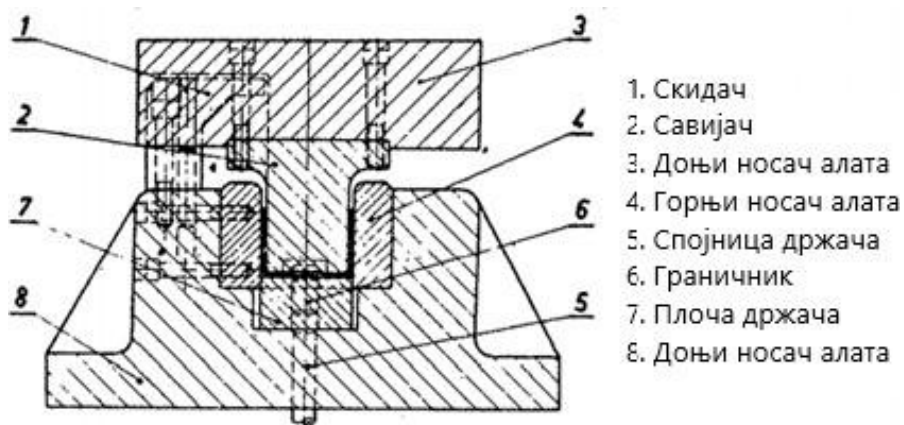
Слика 2.2. Алат за савијање V профила [4]

Радни комад на слици 2.3, развијене дужине L , ширине b и дебљине s , поставља се на једноделни калуп за савијање 1 и под притиском савијача 2, који је фиксиран у горњој плочи 4, савија се на крајњу димензију. Поред тога што је комад ограничен пре савијања (са четири граничника 10), постоји ризик од једностраног клизања лима у отвор калупа. У случају да дође до увлачења једног крака комада пре другог, добија се комад са несиметричним крацима, односно различите висине h . Да не би дошло до тога, током процеса савијања, радни комад се придржава помоћу плоче држача лима 8, која се наслања на опругу држача 13 преко спојнице 9. Током повратног хода пресе, држач преузима функцију избацивача комада из калупа. За лакше и средње тешке радове савијач и калуп за савијање израђени су од челика за побољшање (на пример, челик 1С60). Тада се радне површине савијача и калупа термички обрађују површинским каљењем. Радне површине се загревају аутогеним пламеником и непосредно хладе млазом воде (аутогено каљење). На овај начин добија се потребна тврдоћа површинског слоја материјала (тврдоће 60-62 Rc) са жилавом језгром.



Слика 2.3. Типичан алат за двоугаono савијање са једноделним калупом [4]

У случају већих алата који се добијају ливењем савијач и калуп се израђују из сегмената (слика 2.4) [6].

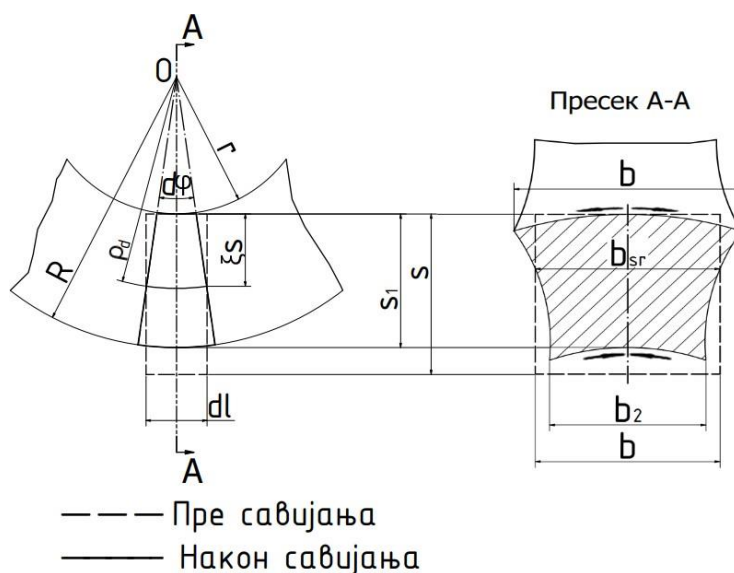


Слика 2.4. Типичан алат за двоугаono савијање са сегментним калупом [4]

2.2. Прорачун развијеног стања

На основу датог конструктивног цртежа савијеног комада одређује се развијена или почетна дужина елемента. Савијени комад чине равни краци и делови који су савијени под одређеним радијусом. Развијена (почетна) дужина елемента једнака је дужини неутралне осе савијеног комада. Треба напоменути да постоји разлика између неутралне осе напона и неутралне осе деформације. Радијус кривине неутралне напонске линије, заправо, одређује кривину влакна савијеног комада у коме нема напона. Међутим, влакно које није подвргнуто никаквој деформацији не одговара неутралном напонском влакну. Радијус кривине неутралног влакна деформације означен је са ρ_d . Ова величина је важна за одређивање развијене дужине елемента [4].

При савијању уских комада попречни пресек се деформише. У зони притиска у правцу друге главне осе нема напона, али постоји деформација истезања ($+\varepsilon_x = +\varepsilon_y$). У зони истезања у правцу исте осе нема другог главног напона, али постоји друга главна деформација притиска ($-\varepsilon_x = -\varepsilon_y$). Због тога се правоугаони пресек деформише и поприма облик трапезоида, као што је приказано на слици 2.5. Поред тога, дебљина савијеног комада се смањује у зони деформисања. Неутрална линија деформисања се при савијању помера преко мањих радијуса ка центру кривине.



Слика 2.5. Елемент запремине код савијања [4]

Запремина елемента пре савијања (означена испрекиданом линијом - слика 2.6) се израчунава према обрасцу:

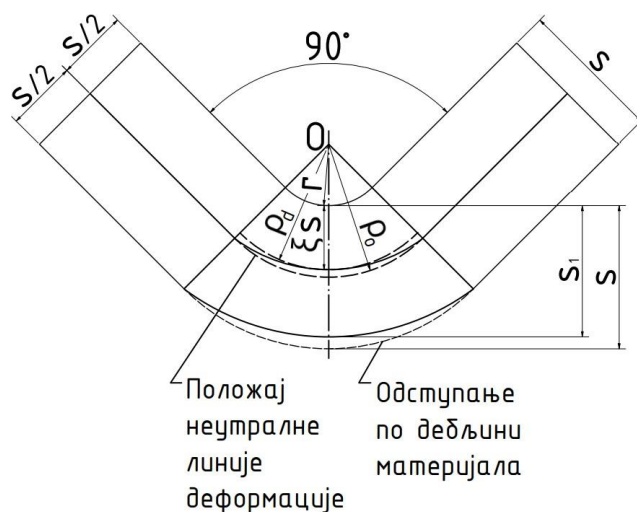
$$dV = b \cdot s \cdot dl, \quad (2.1)$$

где су:

b - почетна ширина комада,

s - почетна дебљина материјала и

dl - елементарна дужина посматраног елемента.



Слика 2.6. Неутрална линија деформације [4]

Ова запремина, према В. П. Романовском, мора бити једнака запремини савијеног елемента (означена пуном линијом - слика 2.6):

$$dV = b \cdot s \cdot dl = b_{sr} \cdot s_1 \frac{R+r}{2} \cdot d\varphi, \quad (2.2)$$

где су:

$b_{sr} = \frac{b_1+b_2}{2}$ - средња ширина савијеног комада,

s_1 - дебљина савијеног комада,

r - унутрашњи радијус савијања,

R - спољашњи радијус савијања,

$d\varphi$ - елементарни угао савијања.

Ако је ρ_d радијус кривине неутралне линије деформисања, односно радијус кривине влакна чија је дужина након савијања остала иста, онда је:

$$dl = \rho_d \cdot d\varphi, \quad (2.3)$$

па је:

$$b \cdot s \cdot \rho_d \cdot d\varphi = b_{sr} \cdot s_1 \frac{R+r}{2} \cdot d\varphi, \quad (2.4)$$

односно:

$$\rho_d = \frac{R+r}{2} \cdot \frac{s_1}{s} \cdot \frac{b_r}{b} = \frac{R+r}{2} \cdot m \cdot n. \quad (2.5)$$

Усвајањем да је:

$$R = r + s_1 = r + m \cdot s, \quad (2.6)$$

добиа се:

$$\rho_d = \left(\frac{r}{2} + \frac{m}{2} \right) \cdot s \cdot m \cdot n. \quad (2.7)$$

Услед померања неутралне линије деформисања ка центру кривине (при савијању преко малих радијуса), радијус кривине се може записати као:

$$\rho_d = r + \xi \cdot s. \quad (2.8)$$

На овај начин се добија коначан образац радијуса кривине неутралне линије деформације орема В. П. Романовском:

$$\rho_d = \left(\frac{r}{2} + \frac{m}{2} \right) \cdot s \cdot m \cdot n = r + \xi \cdot s. \quad (2.9)$$

Коефицијент $m = \frac{s_1}{s}$, представља однос између дебљине савијеног комада и почетне дебљине материјала и зависи од односа $\frac{r}{s}$.

Коефицијент $n = \frac{b_{sr}}{b}$ представља однос између средње ширине савијеног комада и почетне ширине и зависи од односа $\frac{b}{s}$. У већини случајева савијања, ширина је већа од дебљине комада, па се може усвојити $n \approx 1$.

Величина померања неутралне линије деформисања ка центру кривине означава се коефицијентом ξ .

Из обрасца (2.9), узимајући да је $n \approx 1$, следи:

$$\xi = \frac{\rho_d - r}{s} = \frac{\left(\frac{r}{2} + \frac{m}{2} \right) \cdot s \cdot m - r}{s} = \frac{m^2}{2} - \frac{r}{s} (1 - m). \quad (2.10)$$

Будући да је смањење дебљине савијеног комада различито у различитим пресецима (највеће смањење, односно најмања дебљина је у средини, као што је приказано на слици 2.6), радијус кривине неутралне линије деформисања има различите вредности у различитим пресецима. Испитивања показују да неутрална линија има облик параболе, која у средини има радијус кривине $\rho_d = r + \xi \cdot s$, а на крајевима $\rho_o = r + 0,5 \cdot s$.

У практичним прорачунима развијене дужине, ова парабола се замењује луком радијуса ρ_d .

Радијус кривине неутралне линије деформисања је мањи од радијуса кривине неутралне линије напона, односно:

$$\rho_d = r + \xi \cdot s < \rho_n = \sqrt{R \cdot r}. \quad (2.11)$$

Дужина развијеног комада се састоји од равних кракова и савијеног дела, па је:

$$L = 2l + \frac{\pi \cdot \varphi^\circ}{180} (r + \xi \cdot s). \quad (2.12)$$

Уколико се комад састоји од n равних и N савијених делова, развијена дужина елемента рачуна се на следећи начин:

$$L = \sum_{i=1}^n l_i + \frac{\pi}{180} \sum_{i=1}^N \varphi_i \cdot r_i + \xi_i \cdot s, \quad (2.13)$$

где су:

l_i - дужине равних делова,

φ_i° - углови савијања,

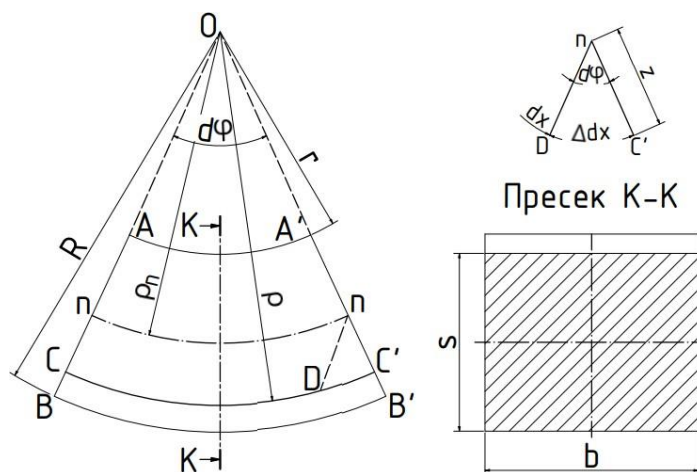
r_i - унутрашњи радијуси савијања,

$\xi_i = f\left(\frac{r_i}{s}\right)$ - коефицијент,

s - дебљина лима.

2.3. Радијус савијања

Радијус савијања представља један од најважнијих фактора који утиче на квалитет производа добијен обрадом савијањем (r на слици 2.7) и мора да се креће унутар одређених граница [4].



Слика 2.7. Неутрална линија и радијус савијања [4]

Деформација влакна удаљеног за z од неутралне осе се одређује помоћу обрасца:

$$\varepsilon = \frac{z}{\rho_n} = \frac{\rho - \rho_n}{\rho_n} \quad (2.14)$$

Највећа деформација истезања се јавља у спољашњем влакну за:

$$\rho = R = r + s. \quad (2.15)$$

Уколико се усвоји да је $\rho = r + \frac{s}{2}$, деформација истезања се може написати и као:

$$\varepsilon = \frac{(r+s) - (r + \frac{s}{2})}{r + \frac{s}{2}} = \frac{\frac{s}{2}}{r + \frac{s}{2}} \quad (2.16)$$

Уколико се деформација при којој долази до кидања спољашњих влакана означи са ε_m , а минимални радијус савијања који изазива ову деформацију са r_{min} , онда следи да је:

$$\varepsilon_m = \frac{1}{2 \cdot \frac{r_{min}}{s} + 1}, \quad (2.17)$$

одакле се добија образац за минимални радијус савијања:

$$r_{min} = \frac{s}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_m} - 1 \right). \quad (2.18)$$

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

При савијању преко великих радијуса ($r \gg s$), у обрасцу (2.16), може се занемарити $\frac{s}{2}$ као мала величина у односу на r , тако да следи да је:

$$\varepsilon = \frac{s}{2 \cdot r} \quad (2.19)$$

или:

$$r = \frac{s}{2 \cdot \varepsilon} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot R_p} \quad (2.20)$$

Како би се у крајњим влакнима савијеног комада јавиле трајне пластичне деформације (напон R_p), радијус савијања не сме премашити одређену вредност која се означава са r_{max} :

$$r_{max} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot R_p} \quad (2.21)$$

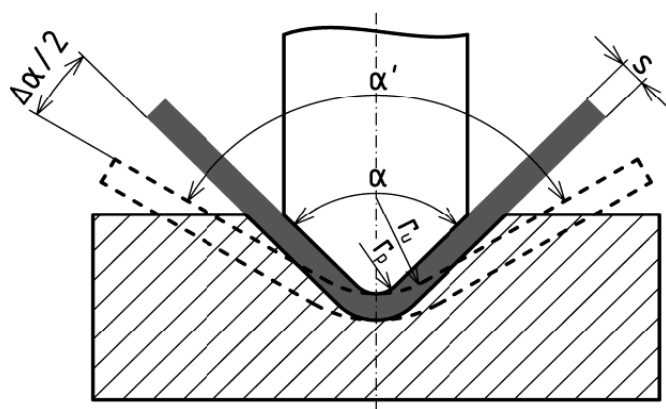
На основу претходног, по конструктивном цртежу, задати радијус савијања r мора да задовољи следећу неједначину:

$$r_{min} < r < r_{max}. \quad (2.22)$$

3. Еластично исправљање при савијању лимова и конструктивна решења

Притискивач (савијач) и калуп за савијање (матрица) се најчешће израђују од челика 1С60. Код конструкције ових алата еластична повратност је врло важна и отежава димензионисање угла притискивача и калупа [6].

Укупна деформација током савијања се, поред пластичног дела, готово увек састоји и од еластичног (нарочито око неутралног слоја). Значај еластичних деформација за тачност израђеног комада је већи када је укупна деформација релативно мала. Након ослобађања савијеног дела из алата, еластичне деформације нестају, што доводи до повећања угла савијања (слика 3.1) [2, 3].



Слика 3.1. Еластична повратност при савијању [2]

Ова појава је штетна и надокнађује се разним мерама, на пример, израдом алата са мањим углом савијања, тако да комад након еластичног исправљања добије потребне димензије [2].

Повратност се јавља не само при обради лима, већ и при савијању шипки, штапова, жица, итд. са било којим попречним пресеком [5].

Трајна деформација ε_t (пластична деформација) представља разлику између укупне ε_u и еластичне ε_{el} деформације [4]:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_u - \varepsilon_{el}. \quad (3.1)$$

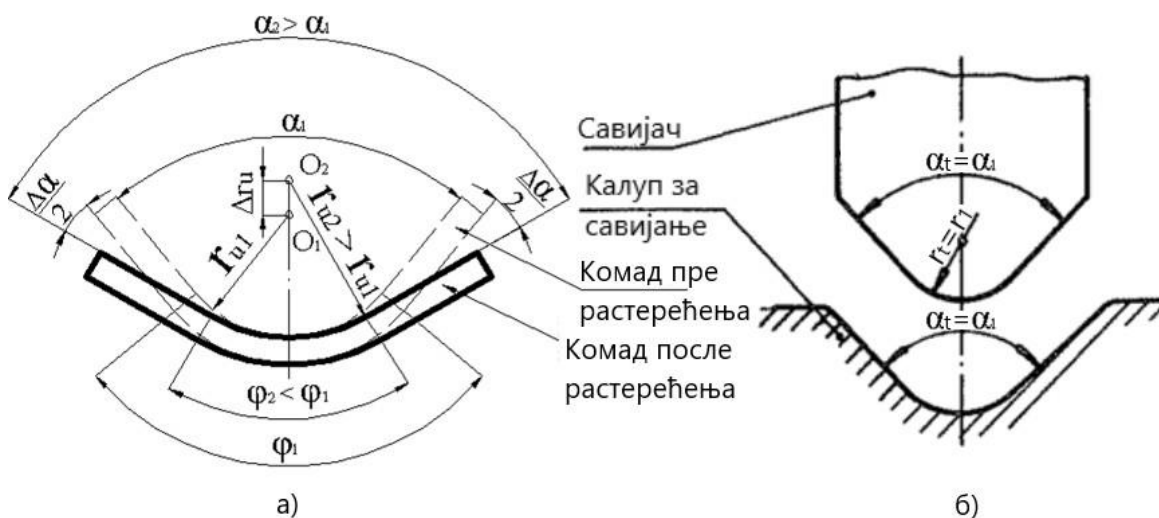
Док је савијени комад под оптерећењем (у алату), као резултат пластичне деформације (ε_{pl}), према слици 3.2а), уочавају се следеће карактеристичне димензије:

- радијус савијања $\rightarrow r_1$,
- угао савијања $\rightarrow \alpha_1$,
- угао савијене зоне $\rightarrow \varphi_1 = 180 - \alpha_1$.

Када се комад растерети (уклони из алата), долази до делимичног еластичног исправљања услед еластичних деформација (ε_{el}). Трајно деформисани комад (ε_t) има следеће димензије:

- радијус савијања $\rightarrow r_2 = r_1 + \Delta r = r_1 + \overline{OQ}$
- угао савијања $\rightarrow \alpha_2 = \alpha_1 + \Delta\alpha$,
- угао савијене зоне $\rightarrow \varphi_2 = 180 - \alpha_1$.

Радијус савијања се повећао за Δr ($r_2 > r_1$), угао савијања, такође, за $\Delta\alpha$ ($\alpha_2 > \alpha_1$), док се угао савијене зоне смањио ($\varphi_2 < \varphi_1$).



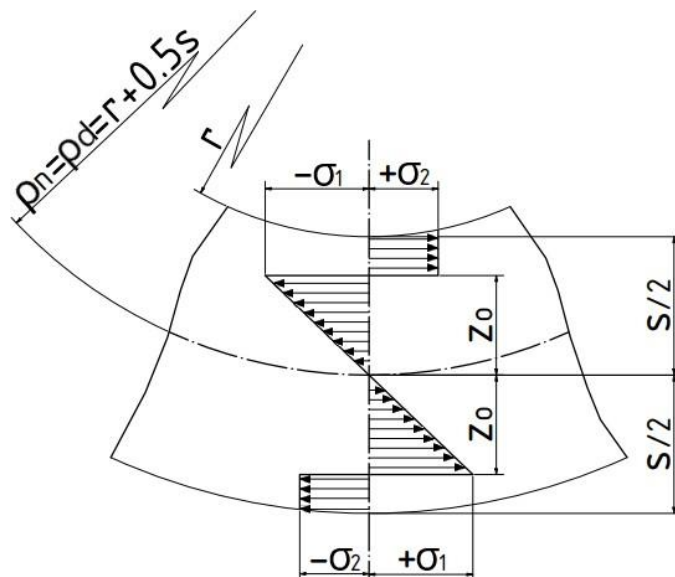
Слика 3.2. Еластично исправљање савијеног комада [4]

Уколико се захтевају димензије r_2 и α_2 , онда се притискивач (слика 3.2б) изводи са радијусом r_t и под углом α_t , који се одређују помоћу образаца:

$$r_t = r_1 = r_2 - \Delta r, \quad (3.2)$$

$$\alpha_t = \alpha_1 = \alpha_2 - \Delta\alpha. \quad (3.3)$$

Величина еластичног исправљања зависи од односа $\frac{r}{s}$. Због тога се проблем еластичног исправљања при савијању преко великих радијуса, односно при савијању у еластично-пластичном подручју, прво узима у обзир (слика 3.3).



Слика 3.3. Напони у току процеса савијања преко великих радијуса пре и после растерећења [4]

Под дејством спољашњег момента савијања носач ће се савити под одговарајућим радијусом неутралне линије ρ_1 . Након растерећења, носач се еластично исправља, његова кривина постаје мања, а радијус кривине се повећава на вредност $\rho_2 > \rho_1$.

Момент унутрашњих сила услед напона еластично деформисаног слоја (висине z_0) делује против спољашњег момента и настоји да исправи носач. Након растерећења, пластично деформисани слој (висине $s - 2z_0$) се еластично деформише под дејством момента савијања еластично деформисаног слоја. То значи да се влакна која су се издужила под дејством момента спољашњих сила сада скраћују, а она која су се скратила издужују.

Равнотежа настаје када је момент еластичних напона, који настаје у пластично деформисаном слоју (M_2), једнак моменту напона еластично деформисаног слоја (M_1), односно када:

$$M_1 = M_2. \quad (3.4)$$

Коришћењем израза за M_1 и M_2 :

$$M_1 = \sigma_1 \cdot W = \sigma_1 \cdot \frac{2}{3} b \cdot z_0^2, \quad (3.5)$$

$$M_2 = \sigma_2 \cdot S = \sigma_2 \cdot b \left(\frac{s^2}{4} - z_0^2 \right), \quad (3.6)$$

где су:

W - отпорни момент еластично деформисаног дела,

S - статички момент пластично деформисаног дела,

условна једначина равнотеже се може записати као:

$$\sigma_1 \cdot \frac{2}{3} b \cdot z_o = \sigma_2 \cdot b \left(\frac{s^2}{4} - z_o \right). \quad (3.7)$$

Нормални напон σ у влакну удаљеном за z од неутралне осе са радијусом кривине ρ_n је:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{E \cdot z}{\rho_n} \quad (3.8)$$

Након растерећења комад се исправља и има вредност радијуса кривине $\rho_2 > \rho_1$, па се у спољашњим влакнима деформисаног комада, за $z = \frac{s}{2}$, јавља нормални напон:

$$\sigma_2 = \frac{E \cdot s}{2} \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right). \quad (3.9)$$

У исто време напон унутрашњих слојева (висине $z = z_o$), за радијус кривине ρ_2 , износи:

$$\sigma_1 = \frac{E \cdot z_o}{\rho_2}. \quad (3.10)$$

Заменом једначина (3.9) и (3.10) у једначини равнотеже (3.7) добија се:

$$\begin{aligned} \frac{E \cdot z_o}{\rho_2} \cdot \frac{2}{3} b \cdot z_o &= \frac{E \cdot s}{2} \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) \cdot b \left(\frac{s^2}{4} - z_o \right) \\ \rho_2 \cdot \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{s^2}{4} - z_o \right) &= \left[\frac{2}{3} z_o + \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{s^2}{4} - z_o \right) \right] \cdot \rho_1, \end{aligned} \quad (3.11)$$

па је:

$$\rho_2 = \left[1 + \frac{\frac{2}{3} z_o^3}{\frac{s}{2} \left(\frac{s^2}{4} - z_o^2 \right)} \right] \cdot \rho_1 = \left[1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\left(\frac{s}{2 \cdot z_o} \right)^3 - \left(\frac{s}{2 \cdot z_o} \right)} \right] \cdot \rho_1. \quad (3.12)$$

Уколико се усвоји да је:

$$\frac{s}{2 \cdot z_o} = \gamma, \quad (3.13)$$

радијус кривине еластично исправљеног комада, после растерећења, може се израчунати према обрасцу A. Gelley-а као:

$$\rho_2 = \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\gamma^3 - \gamma} \right) \cdot \rho_1. \quad (3.14)$$

Уколико је крајње влакно еластично деформисаног слоја, за $z = z_o$, оптерећено напоном на граници развлачења R_p , следи да је:

$$\rho = \rho_1,$$

$$R_p = \frac{E \cdot z_0}{\rho_1},$$

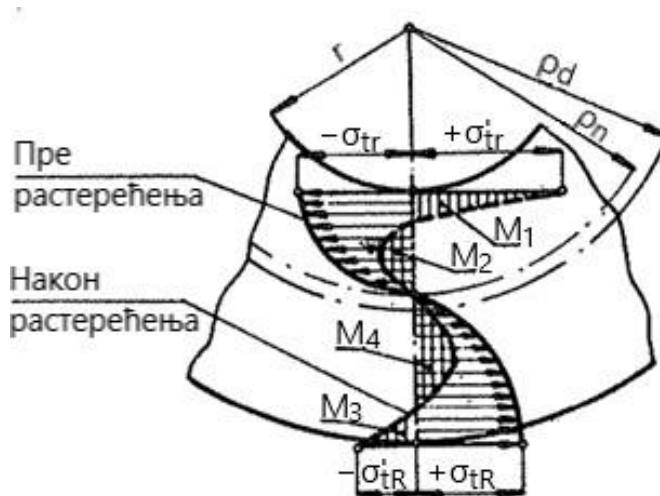
односно:

$$z_0 = \frac{\rho_1 \cdot R_p}{E},$$

па је:

$$\gamma = \frac{s}{2 \cdot z_0} = \frac{E \cdot s}{2 \cdot \rho_1 \cdot R_p}. \quad (3.15)$$

Дијаграм промене тангенцијалних напона, при савијању преко малих радијуса (чисто пластично савијање), приказан је на слици 3.4.



Слика 3.4. Напони у току процеса савијања преко малих радијуса, пре и после растерећења [4]

Функција $\sigma_t = \sigma_t(\rho)$ се мења под дејством оптерећења спољашњег момента савијања:

- за зону притиска - у крајњем унутрашњем влакну за $\rho = r$ је $\sigma_t = -\sigma_{tr}$,
- за зону истезања - у крајњем спољашњем влакну за $\rho = R$, је $\sigma_t = \sigma_{tr}$.

Тангенцијални напони једнаки су нули за $\rho = \rho_n$ (неутрална напонска линија).

Након растерећења, савијени комад се еластично исправља. Стога се напони истезања ($+\sigma'_{tr}$) јављају у зони притиска (за $\rho = r$), а напони притиска ($-\sigma'_{tr}$) у зони истезања (за $\rho = R$).

Даља теоријска и експериментална испитивања показују да се величина еластичног исправљања смањује са смањењем односа $\frac{r}{s}$, односно са повећањем криве савијеног комада.

Фактор еластичног исправљања израчунава се помоћу следећег обрасца:

$$K = \frac{r_1 + \frac{s}{2}}{r_2 + \frac{s}{2}} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (3.16)$$

Фактор K зависи од:

- врсте материјала и
- односа $\frac{r_2}{s}$:
 - ако је $\frac{r_2}{s} < 5$, онда је у питању чисто пластично савијање (мања еластична повратност),
 - ако је $\frac{r_2}{s} > 5$, онда је у питању еластично-пластично савијање (већа повратност).

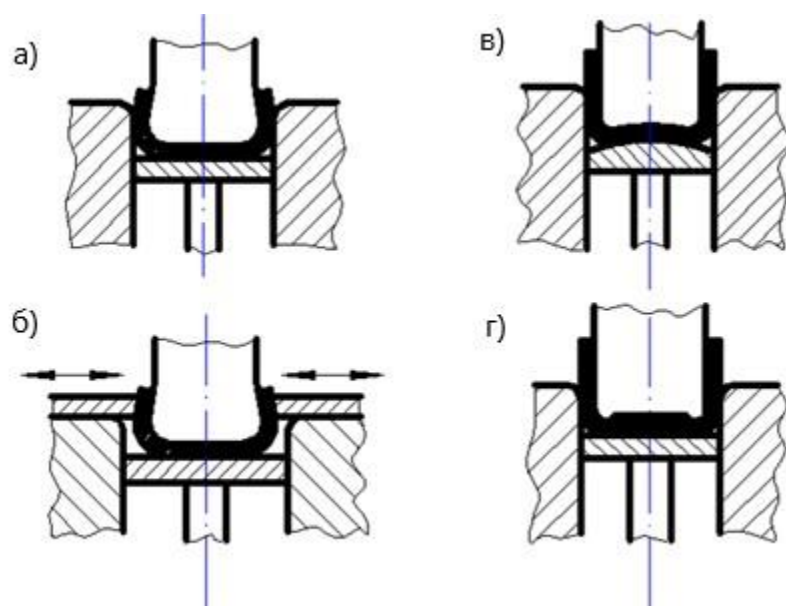
Према истраживањима *G. Sachs*-а, дијаграм на слици 3.5 омогућава проналажење фактора еластичног исправљања K за различите материјале у интервалу $1 \leq \frac{r_2}{s} \leq 100$.



Слика 3.5. Фактор еластичног исправљања по *Sachs*-у за различите материјале [5]

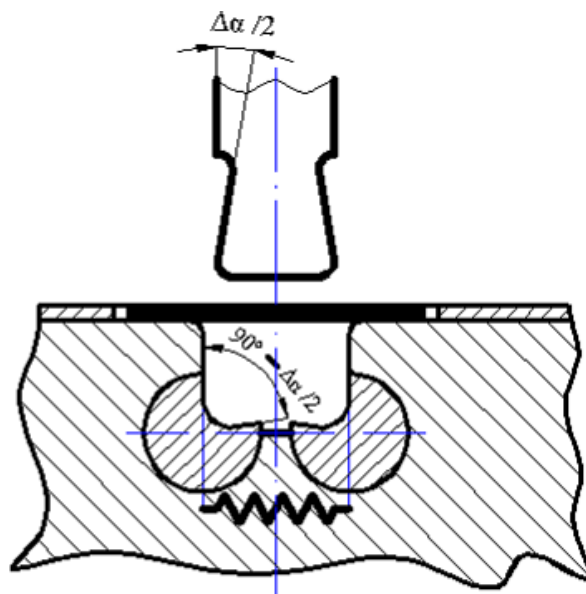
Ефекат еластичног исправљања може се компензовати или бар делимично ублажити посебним конструкцијама радних делова алата за савијање. Код двоугаоног савијања постоји неколико препорука за компензацију угла повратности (слика 3.6). Алат обезбеђује угао мањи од 90° , тако да се након исправљања добија потребна геометрија комада. Савијање приказано на слици а) постиже се умањеним зазором. Савијање на слици б) изведено је помоћу бочних клизача помоћу којих се постиже потребан „негативни“ угао савијања. На слици в) дно калупа је испупчено за износ који одговара величини еластичног исправљања комада. Након растерећења, комад се еластично опружи, тако да је дно комада поравнато. Ако је то конструктивно дозвољено, утискивањем ребра могуће је формирати

жљеб са унутрашње стране, чиме би се растеретила напрегнута метална влакна, као на слици г) [4, 5].



Слика 3.5. Алати са компензацијом еластичног исправљања [5]

Један од начина бочног савијања кракова угаоника, ради исправљања углова услед повратности, је да се кракови савију помоћу два цилиндра који се ротирају око својих оса, као што је приказано на слици 3.7 [5].



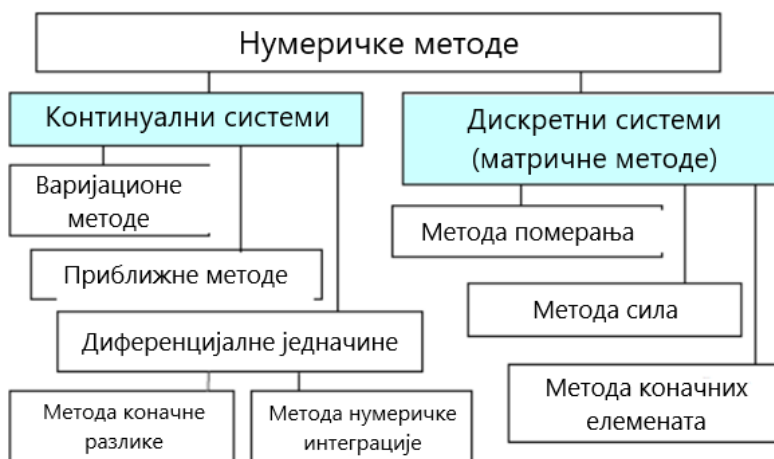
Слика 3.7. Бочно савијање кракова угаоника [5]

4. Нумеричке симулације процеса применом методе коначних елемената

Рачунарски потпомогнуто пројектовање обухвата активности у рачунарском окружењу, којима је придружена интерактивна рачунарска графика за креирање модела производа и њихових компоненти, њихову модификацију, анализу и оптимизацију. Пројектант може манипулисати добијеним моделом у фази идејног решења, размотрити све његове алтернативе и извршити брзе промене на моделу како би задовољили специфичне потребе пројектовања. Да би концепт модела производа био квалитетан и одржив, он мора да подржава не само пројектно конструктивно решење производа, већ и његову детаљну анализу, испитивање, оптимизацију, симулацију, пробну производњу, монтажу, одржавање и многе друге фазе у животном циклусу производа. Данашњи CAD/CAE алати се користе не само за геометријско моделирање и манипулацију облицима, већ и за оптимизацију пројектовања. Ови алати укључују анализу толеранција, прорачун запремине и масе модела, симулације помоћу методе коначних елемената и анализу резултата симулације [7].

Рачунарски подржан инжењеринг (CAE – *Computer Aided Engineering*) је технологија која користи рачунарске системе за анализу CAD модела, како би конструктор могао да симулира и анализира понашање производа или алата, у циљу побољшања и оптимизације његовог пројектног решења.

Ова техника се заснива на употреби рачунара и одговарајућег симулационог софтвера за решавање различитих инжењерских проблема у већини инжењерских дисциплина. Софтвер за симулацију заснован је на процесу моделирања стварног феномена користећи бројне математичке приступе. То је у основи програм који омогућава кориснику да анализира посматрани процес кроз симулацију у дигиталном окружењу и без извођења стварног експеримента. Стога нумеричке симулације на рачунарима све више допуњују традиционалне експерименталне методе у лабораторијама и самој производњи у свим областима. Рачунарски експерименти су врло блиски стварним експериментима, сигурни су и у потпуности поновљиви, што им омогућава да се изводе контролисано и да се усредсреде на суштину проблема који се испитује. Могу се временски контролисати (убрзати или успорити) и знатно су јефтинији од стварних експеримената. Софтвер за симулацију користи различите нумеричке методе, приказане на слици 4.1, међу којима се посебно издваја метода коначних елемената (МКЕ). Ова метода користи се за одређивање напона, деформација, температура, и осталих релевантних параметара у анализи различитих процеса и решавању проблема [7, 8].



Слика 4.1. Преглед нумеричких метода [9]

У пољу производног машинства, САЕ нумеричке симулације су проверено и изузетно корисно средство, које инжењерима пружа низ нових и моћних алата за правилно пројектовање технолошких поступака и процеса. Главна предност рачунарски подржаног инжењеринга је флексибилност модела и могућност извођења симулација „шта-ако“, у којима се различите пројектне алтернативе могу проценити и тестирати на виртуелном моделу, смањујући на тај начин тестирања у самој индустрији и избегавајући скупе грешке, које се у традиционалној процедури пројектовања, по принципу „*trial-and-error*“ - често јављају. Такође, могуће је анализирати ефекте појединачних параметара (сензитивна анализа) на квалитет производа и трошкове производње, предвидети недостатке производа и отказ опреме, анализирати оптерећење и хабање алата и слично, односно оптимизовати целокупан производни процес [8].

Из претходно наведеног се јасно може закључити да су САЕ технике дубоко укоренење у свим областима инжењерства и модерне индустријске производње.

4.1. Софтвер за симулацију процеса (*Simufact.forming*)

Софтвери за симулацију процеса обрада метала деформисањем еволуирали су од једноставних истраживачких алата до данашњих сложених софтверских пакета који се могу користити за конструисање свих сегмената производног система, односно пројектовање технолошких процеса. Данас је на тржишту велики број софтвера који се користе за симулације и анализе процеса обраде деформисањем. Најпознатији су: *Abaqus*, *QForm*, *DEFORM*, *Simufact.forming*, *Pam-Stamp* и *AutoForm* [8].

Програм *Simufact.forming* део је софтверског пакета *Simufact* (*Simulating Manufacturing*), који укључује низ програма који су развијени на модуларном принципу и намењени су за симулације и оптимизацију процеса у области обраде деформисањем, технологија спајања, адитивних технологија, металуршке анализе материјала, укључујући и фазне трансформације. Кориснички интерфејс софтвера прилагођен је *Windows* окружењу

и изузетно је интуитиван, јер начин на који се креира симулације подсећа на стварни индустријски и индустријско пројектовање, што увелико олакшава обуку и рад у њему. Моћан постпроцесор за визуелизацију резултата симулације (вредности, слике и анимације) пружа пројектантима потпун увид у све аспекте процеса, укључујући:

- слику течења материјала, са приказом целог модела и у жељеним пресецима,
- попуњавање алата и означавање зона без контакта,
- расподеле напона, деформација, температуре и притиска,
- процену критеријума лома и хабања алата,
- процену сила на алатима и приказ напонског стања у алатима,
- приказ дефеката, као што су преклопи и зона поремећаја у подмазивању, итд.

Simufact.forming софтвер је развијен за анализу и симулацију готово свих процеса пластичног обликовања материјала, независно од:

- температуре процеса,
- коришћене машине,
- материјала обраде,
- врсте процеса,
- типа процеса.

Овај софтвер нуди обједињена решења за симултану анализу течења материјала и понашања алата, напрезања, хабања и процене лома. То је могуће извести како за једноставне тако и за сложене алате.

4.1.1. *Simufact.forming* модул за обликовање лима

У пројектовању процеса обликовања лимова, избор погодних концепата машина/алат је подједнако важан као и технолошка изводљивост и својства производа. Уз помоћ *Simufact.forming* софтвера процењује се технолошка изводљивост датог пројекта користећи реална предвиђања геометријске тачности, деформабилности, понашања обраде од лима при појави пукотина, ризика који доводе до појаве пукотина и набора, итд. Резултати симулације показују карактеристике производа као што су расподела дебљине лима, закривљеност ивица и расподела тврдоће услед хладног обликовања [10].

Simufact.forming модул за обликовање лима помаже у симулацији процеса обликовања делова од примарних материјала у облику лима. Овај модул подржава производне процесе обликовања цеви, делова профила, структурних делова, кућишта мотора и преносника, механичких компонената и многих других производа. Висока флексибилност овог модула омогућава моделирање најзахтевнијих вишеосних померања алата. Иновативне и напредне карактеристике овог модула, са својим елементима и мрежном технологијом, дају прецизне резултате док су једноставни за употребу.

Са софтвером *Simufact.forming*, поступци вишеоперационог обликовања лима могу се аутоматски прорачунавати. Поред стварне операције обликовања лима савијањем или

дубоким извлачењем, овај модул такође може приказати пратеће операције пробијања и просецања. Поред стварне геометрије, стање напона и деформационог ојачавања материјала може се лако пренети на наредне производне операције, тачно онако како се то дешава у стварном производном процесу.

Модул обликовања лима има много функционалности и врло је флексибилан, омогућавајући симулацију различитих процеса и поступака.

Интегрисана база података материјала садржи потребна својства материјала многих комерцијално доступних материјала од челика и алуминијума који се користе у овој апликацији.

Предности *Simufact.forming* модула за симулацију процеса обликовања лима су:

- краће време развоја са мање пробних серија,
- свеобухватно разумевање процеса,
- висока стабилност и квалитет процеса,
- предвиђање својстава компонената,
- предвиђање повратних и заосталих напона,
- боља употреба машине,
- оптимална координација појединачних корака процеса,
- мање отпада и
- избегавање стварања дефеката и пукотина.

4.1.2. Примена методе коначних елемената у софтверу *Simufact.forming*

У софтверу *Simufact.forming* се користи метода коначних елемената, јер се њоме долази до најпрецизнијих резултата, а могуће је приказивање симулације у било ком тренутку процеса. У софтвер се импортује припремак или алат дефинисан као 3D објекат, а програм му аутоматски на захтев корисника креира 3D мрежу модела радног комада, која је оптимизирана за обраду танких лимова. Коришћење оваквих 3D коначних елемената се посебно ефикасно показало код приказивања варијација дебљина, еластичне повратности и заосталих напона. Битно је такође навести да програм током симулације стално коригује мрежу како би се омогућило праћење великих деформација при обликовању лима.

Најчешћи проблеми у обради танких лимова су сложени облици, контрола дебљине, стварање набора, стањење, еластична повратност, појава дефеката итд.. За успешну анализу наведених проблема у софтверском пакету *Simufact.forming* се користи нелинеарна метода коначних елемената. Овом методом се долази до најпрецизнијих резултата, а такође је омогућено транспарентно приказивање симулације.

Метода коначних елемената као улазне податке користи CAD моделе у STL или IGS формату. Тако је радни комад након импортовања дефинисан као 3D објекат. Програм креира 3D мрежу, односно алгоритам за креирање мреже аутоматски детектује правац дебљине лима, креира и оптимизује мрежу коначних елемената. Могућност коришћења

осмоугаоних елемената је јединствена и пружа најпрецизније могуће резултате. Коришћење оваквих 3D коначних елемената се посебно ефикасно показало код предвиђања варијација дебљина, еластичне повратности и заосталих напона.

Наведена нова технологија мреже за танке лимове базирана на коришћењу 3D осмоугаоних елемената представља иновативну методу која је са лакоћом интегрисана у доказни, релативно једноставан за коришћење, моћан пакет за симулацију обраде метала *Simufact.forming*. Резултат је најпрецизнија симулација најсложенијих операција.

4.2. Метода коначних елемената (МКЕ)

Метода коначних елемената (МКЕ) једна је од метода дискретне анализе. Заснована је на физичкој дискретизацији посматраног домена. Посматрани континуум са бесконачним бројем степени слободе апроксимира се дискретним моделом међусобно повезаних коначних елемената са коначним бројем степени слободе. Суштина апроксимације континуума помоћу МКЕ састоји се од следећег [11]:

- посматрани домен континуума подељен је на поддомене коначних димензија, који се називају коначни елементи и заједно чине мрежу коначних елемената,
- коначни елементи повезани су међусобно у коначном броју тачака на контури елемената, које се називају чворови,
- стање променљиве поља у сваком коначном елементу описује се интерполационим функцијама, односно функцијама облика,
- интерполационе функције су унапред дефинисане функције за један тип коначних елемената и представљају однос између вредности променљиве поља у било којој тачки коначног елемента и вредности променљиве поља у чворовима.

Начин превођења континуалних физичких система у дискретне системе, односно начин формирања система алгебарских једначина којима се апроксимира одређени контурни задатак, одређује варијанту МКЕ која се од осталих разликује само у погледу формалног приступа. Постоје четири основне врсте МКЕ, а то су:

- директна метода,
- варијациона метода,
- метода резидуума и
- метода баланса енергије.

Поступак решавања проблема методом коначних елемената састоји се од пет специфичних корака:

1. идентификација проблема,
2. дефинисање елемената,
3. формирање једначина за елеменат,
4. повезивање једначина елемената,
5. нумеричко решавање глобалних једначина.

Избор типа коначног елемента један је од најважнијих корака у коришћењу метода коначних елемената. Правилан избор је веома важан за постизање тачних резултата. Основна својства коначних елемената су:

- облик,
- број и врста чворова,
- број и врста степени слободе у појединим чворовима и
- врста интерполационих функција.

Без било ког од ових параметара, коначни елемент није у потпуности дефинисан. У зависности од облика, елементи могу имати праволинијске и криволинијске контуре. Важна је подела на:

- линијске,
- раванске и
- просторне коначне елементе.

5. САЕ моделирање процеса вишеоперационог савијања лима у корачним алатима

5.1 Значај моделирања у пројектовању процеса и алата у ОМД

Пројектовање нових или модификовање постојећих производа и процеса традиционално се изводе на основу искуства технолога и експериментисањем типа „*trial-and-error*“. Ово омогућава инжењерима да пронађу такво решење које је обично далеко од оптималног. Само у идеалном случају прво решење у пројектовању алата и процеса било би најбоље. У пракси, међутим, пробе на таквим алатима понекад резултирају производима са унутрашњим или спољашњим дефектима и услед неправилног течења материјала у неким зонама, великим радним притисцима који доводе до лома алата. Трошкови који настају услед поновног пројектовања и израде алата су веома високи, посебно код алата за запреминску обраду. Очигледно је да је овај „бржи и лакши начин за инжењере“ далеко скупљи и захтева више времена [11].

Због тога постоји практична потреба да се развојне и истраживачке активности одвијају изван текуће производње, у развојним лабораторијама. Активности на истраживању и развоју процеса ван производног окружења, односно у лабораторијама, могу се класификовати као моделирање и симулација.

Концепт моделирања је врло широк и покрива готово сва подручја људске делатности. У области инжењерства, потребно је дефинисати шта се подразумева под појмом моделирање.

Моделирање процеса обраде укључује активности у вези са:

- успостављањем везе између жељених својстава производа и услова обраде,
- успостављањем везе између насталих дефеката и услова обраде,
- одређивањем оптималних услова обраде на основу изабраних критеријума.

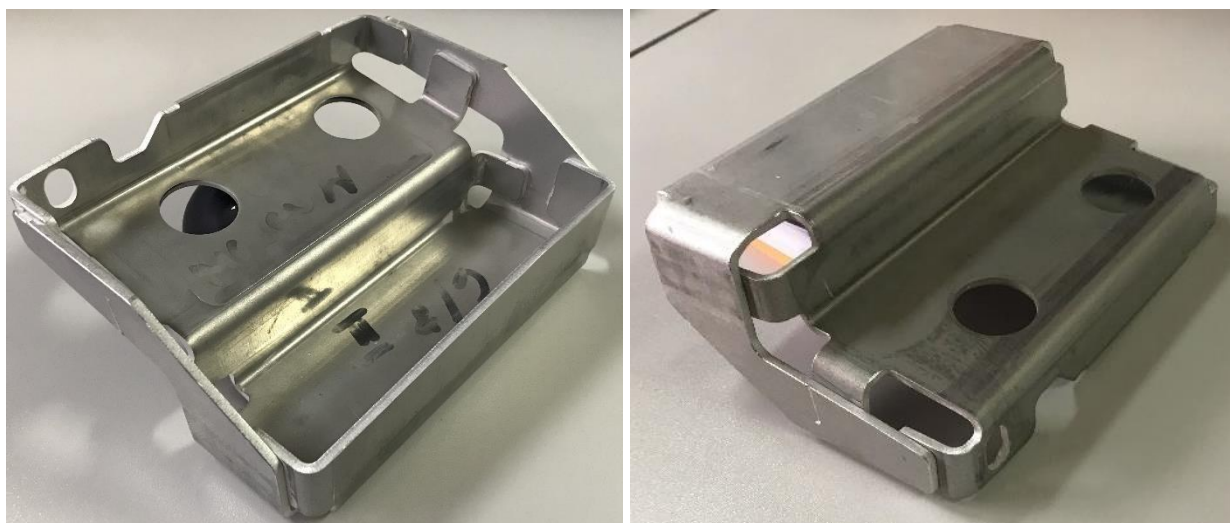
Из перспективе производног инжењерства, моделирањем се могу постићи бројни циљеви, као што су:

- оптимизација постојећег процеса и повећање продуктивности,
- побољшање квалитета производа,
- смањење броја покушаја у фази пројектовања новог или модификовања постојећег процеса или производа,
- побољшање система контроле процеса,
- побољшање производних способности добављача за компаније које се баве монтажом,
- пројектовање нове опреме и алата,
- стицање знања и едукација.

Велики напредак у развоју и примени нових технологија подржаних рачунарским системима условио је аутоматизацију пројектовања процеса и алата у ОМД-у. Бројне стратегије за употребу рачунара у готово свим фазама производње (CAD, CAM, CAP, CAE) уводе се у читав систем индустријске производње.

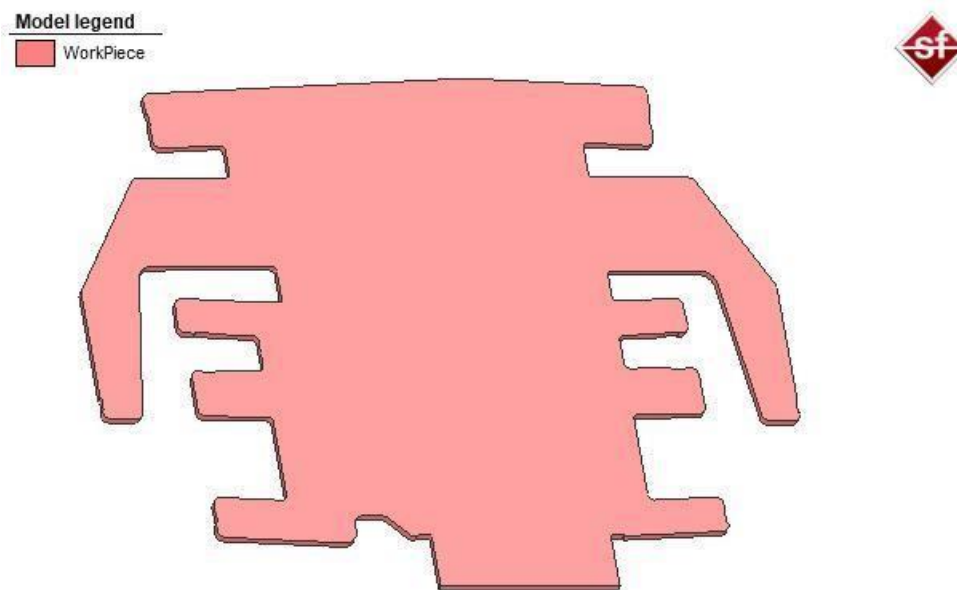
5.2 Опис задатка и дефинисање улазних података

У овом поглављу завршног рада анализиран је конкретан пример процеса савијања лима у индустријском корачном алату компаније Горење, у оквиру шест операција савијања. На слици 5.1 приказан је изглед готовог комада добијеног у прототипском корачном алату.



Слика 5.1. Изглед готовог комада

Симулација свих операција савијања обратка од лима је извршена у *Simufact.forming* софтверу. За симулацију је потребно имати 3D модел развијеног стања радног комада, као и 3D моделе индустријског алата у коме се реализују операције савијања. На слици 5.2 приказан је облик просеченог припремка од лима дебљине 3 mm, који се уводи у прву операцију савијања. У индустријском процесу се савијање реализује из траке, тако да се заправо просецање реализује пре свих операција савијања. У овој анализи процеса решено је да се свака операција савијања реализује у посебним алатима, и са већ одсеченим припремком од траке лима.

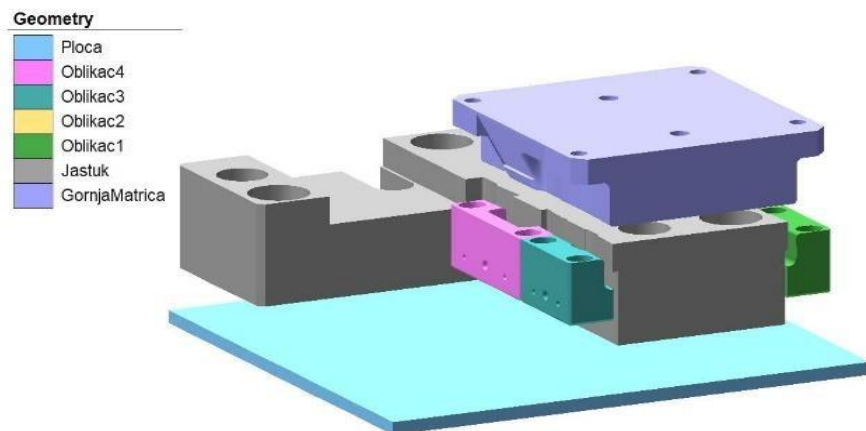


Слика 5.2. 3Д модел припремка просеченог из траке лима

3D моделирање алата и припремка је извршено у софтверском пакету *ProEngineer*, од стране инжењера из компаније Горење, који су уступљени за анализу процеса за потребе рада. Сви модели алата за шест операција савијања и модел припремка су увезени у *Simufact.forming* софтвер као IGS и/или STL фајлови.

Дефинисање осталих улазних параметара у софтверу реализовано је на следећи начин:

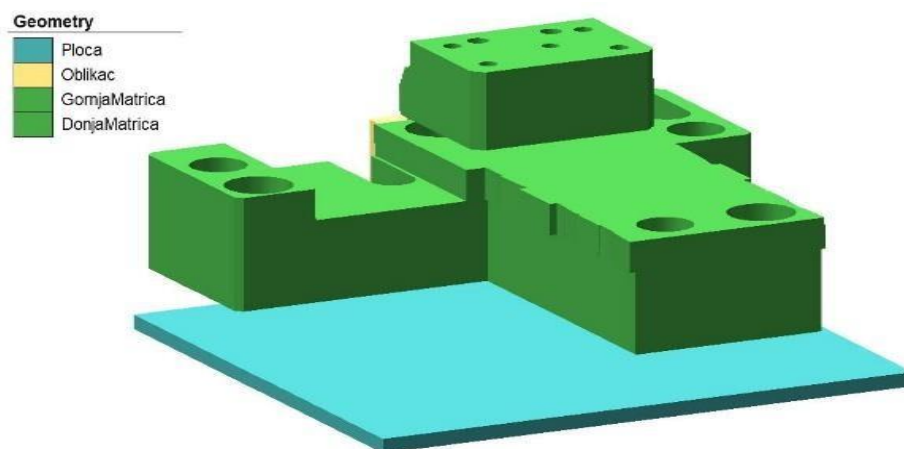
1. Први корак представља дефинисање типа просеса за САЕ анализу и услови под којим је анализа спроведена. У овом случају дефинише се процес савијања као обрада лима, уз примену *Solid Sheet Elements*, на собној температури, као 3D симулација применом методе коначних елемената.
2. Други корак је импортовање алата и развијеног стања радног комада и њихово позиционирање у програму, за подешавање прве операције савијања. За ову анализу модели алата добијени су из компаније „Горење“ из Крагујевца. Пошто се савијање састоји из шест операција, претходно обликован обрадак од лима се увози у следећу операцију савијања (*Workpiece*), са комплетном историјом деформисања (деформације, напони, темературе итд.). Алати су приказани на сликама 5.3 - 5.8.



Prva-operacija-Savijanje - Results - 1

Sub-stage: Model Generated by
Progress: 100.00%

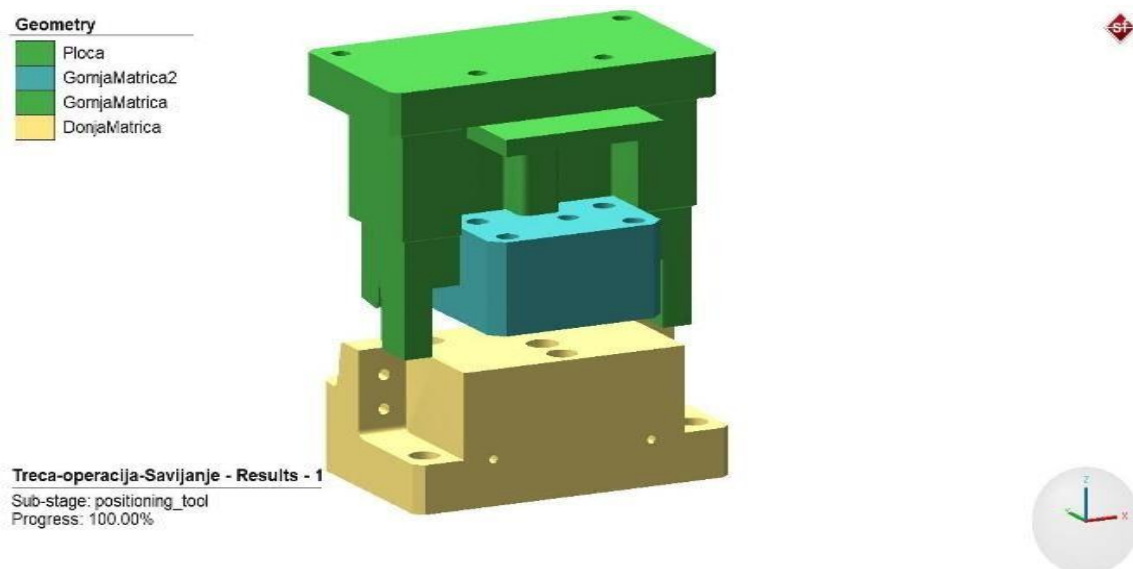
Слика 5.3. Приказ склопа алата за прву операцију савијања



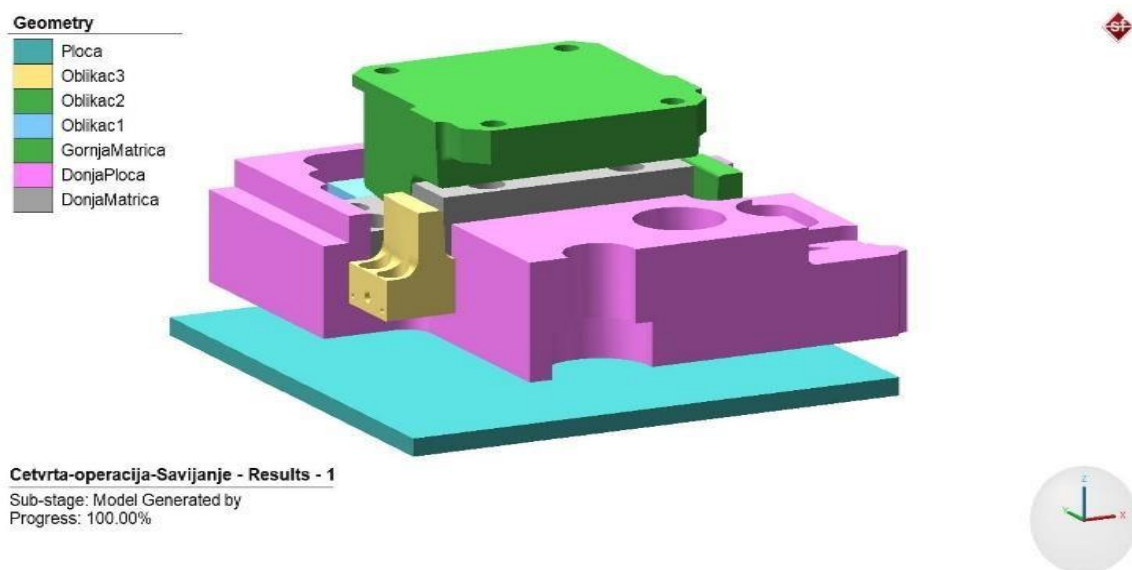
Druga-operacija-Savijanje - Results - 1

Sub-stage: positioning_tool
Progress: 100.00%

Слика 5.4. Приказ склопа алата за другу операцију савијања



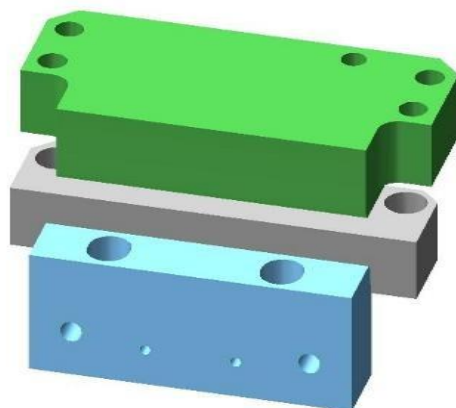
Слика 5.5. Приказ склопа алата за трећу операцију савијања



Слика 5.6. Приказ склопа алата за четврту операцију савијања

Geometry

Oblikac
GornjaMatrica
DonjaMatrica



Peta-operacija-savijanje - Results - 1

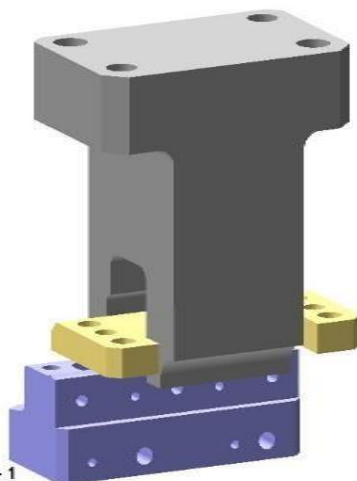
Sub-stage: Model Generated by
Progress: 100.00%



Слика 5.7. Приказ склопа алата за пету операцију савијања

Geometry

Oblikac
GornjaMatrica
Drzac



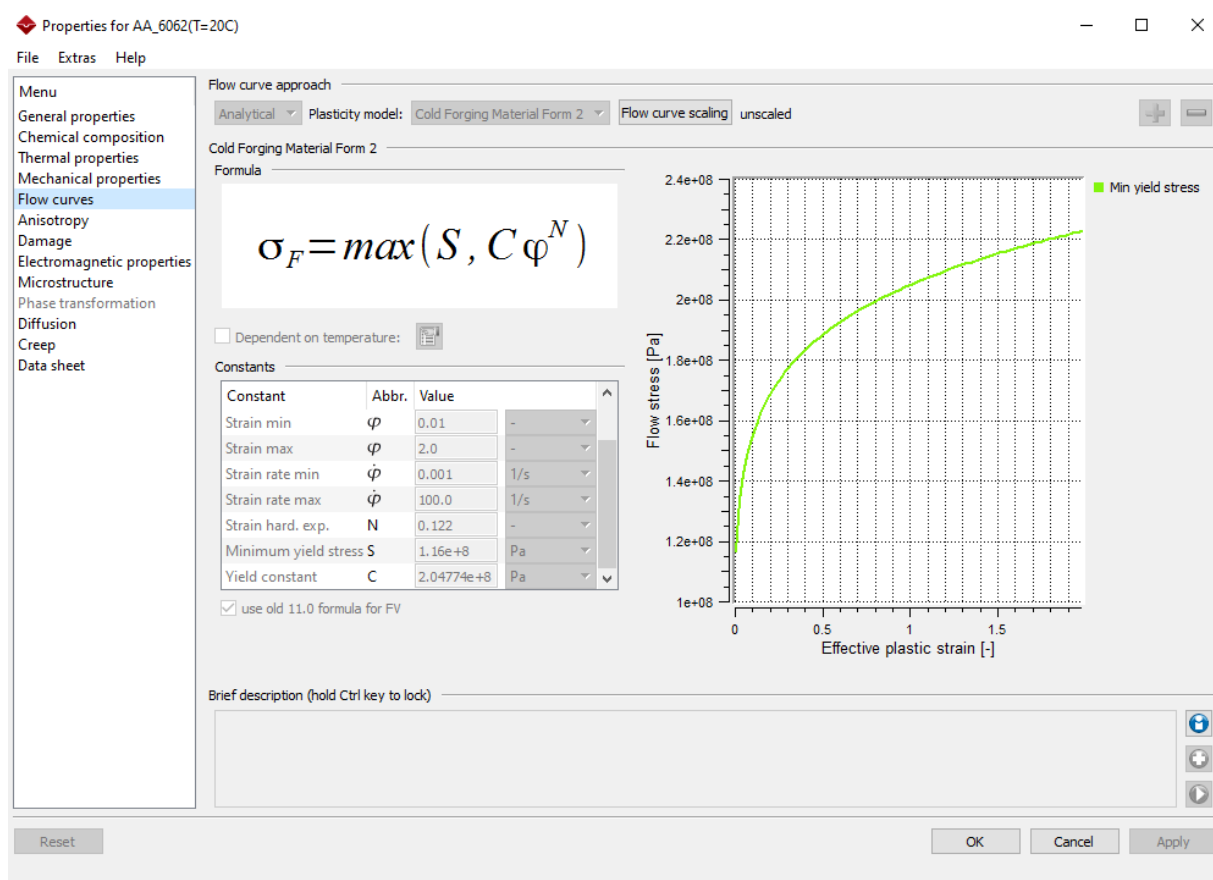
sesta-operacija-savijanje-3 - Results - 1

Sub-stage: Model Generated by
Progress: 100.00%



Слика 5.8. Приказ склопа алата за шесту операцију савијања

3. За дефинисање материјала обратка коришћени су подаци о материјалу из базе података која је садржана у софтверу. Изабран је материјал AA_6062 ($T=20^{\circ}\text{C}$). На слици 5.9 приказана је крива ојачања материјала задата у аналитичком експоненцијалном облику, на основу тестирања материјала у опсегу температура $20 - 300^{\circ}\text{C}$.



Слика 5.9. Крива ојачања материјала AA_6062

4. За потребе симулације операција савијања алати су виртуелно монтирани на хидрауличну пресу и дефинисана је брзина деформисања 4 mm/s.
5. Мрежа коначних елемената је креирана на припремку и на свим радним конадима за сваку о операција помоћу опције „Mesh“. У овом кораку је дефинисан тип мреже и величина елемената у зависности од сложености геометрије комада, и то тип мреже „Sheetmesh“, а величина елемената се разликује у зависности од операције до операције, док програм аутоматски прорачунава укупан број елемената. На сликама 5.10 - 5.15 је приказано дефинисање мреже, а у табели 5.1 дате су величине и број елемената за сваку операцију.

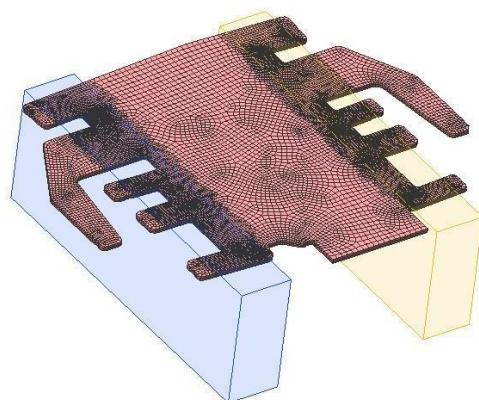
Такође, на сликама су приказани и „refinement box“-еви. Ове кутије се постављају у зони савијања и у том делу се мрежа уситњава. Дужина кутије се дефинише за сваку операцију у односу позицију алата.

Табела 5.1. Величина и број елемената

Број операције	Величина елемената [mm]	Број елемената
1	4	43746
2	2.2887	43437
3	2.2887	43437
4	4	130989
5	4	130989
6	4	130989

Model legend

WorkPiece (Output)

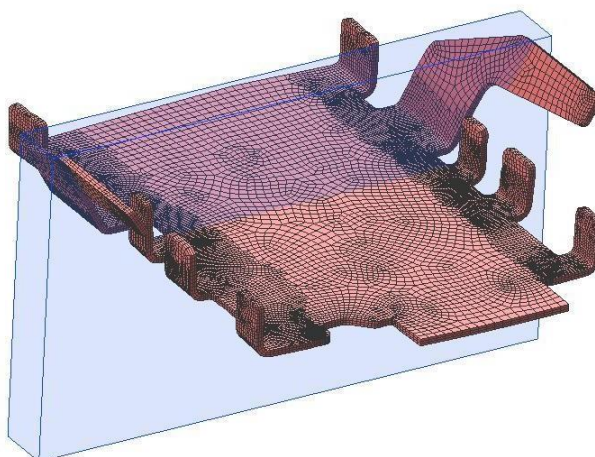


Information

Слика 5.10. Дефинисање мреже за прву операцију савијања

Model legend

WorkPiece (Output)

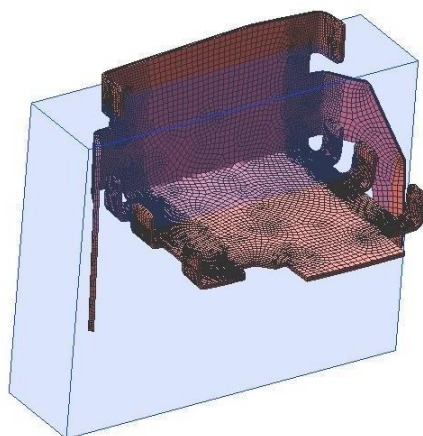


Information

Слика 5.11. Дефинисање мреже за другу операцију савијања

Model legend

WorkPiece (Output)

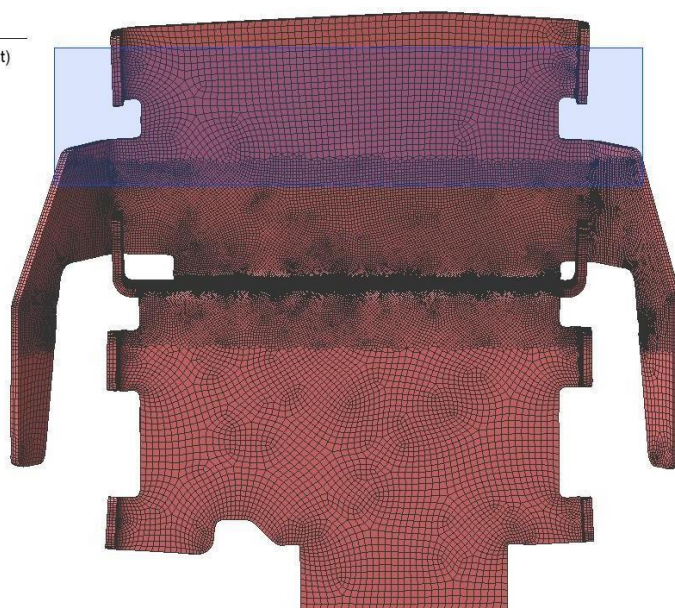


Information

Слика 5.12. Дефинисање мреже за трећу операцију савијања

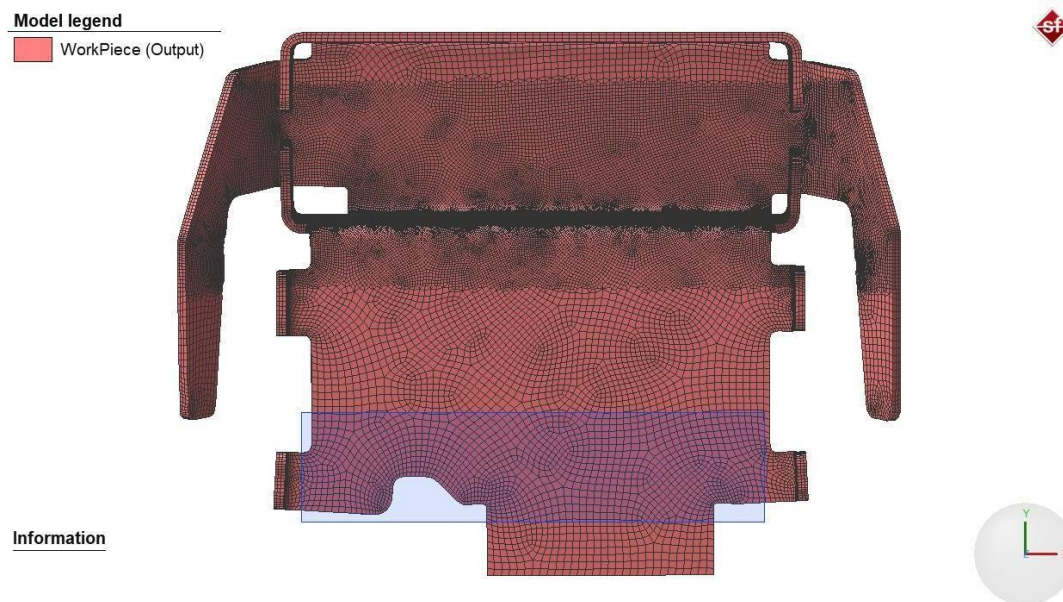
Model legend

WorkPiece (Output)

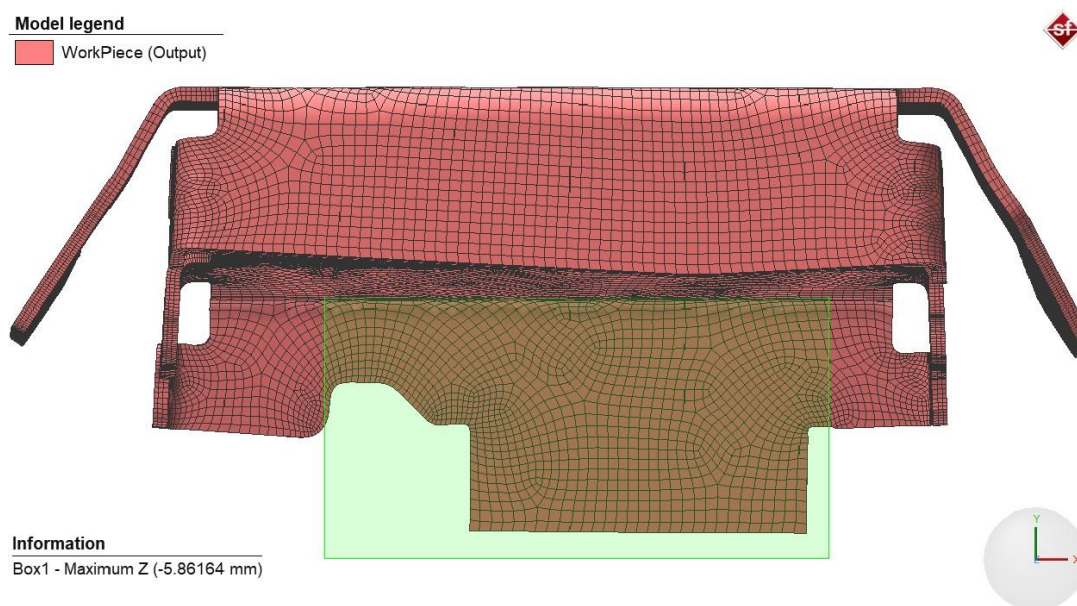


Information

Слика 5.13. Дефинисање мреже за четврту операцију савијања



Слика 5.14. Дефинисање мреже за пету операцију савијања



Слика 5.15. Дефинисање мреже за шесту операцију савијања

- Пре пуштања симулације потребно је дефинисати ходове алата и смер кретања обликача (доле). У табели 5.2 дате су вредности хода горњег дела алата за сваку операцију савијања. Модел трења је дефинисан Кулоновим законом, а коефицијен трења је задат вредношћу $\mu = 0.1$.

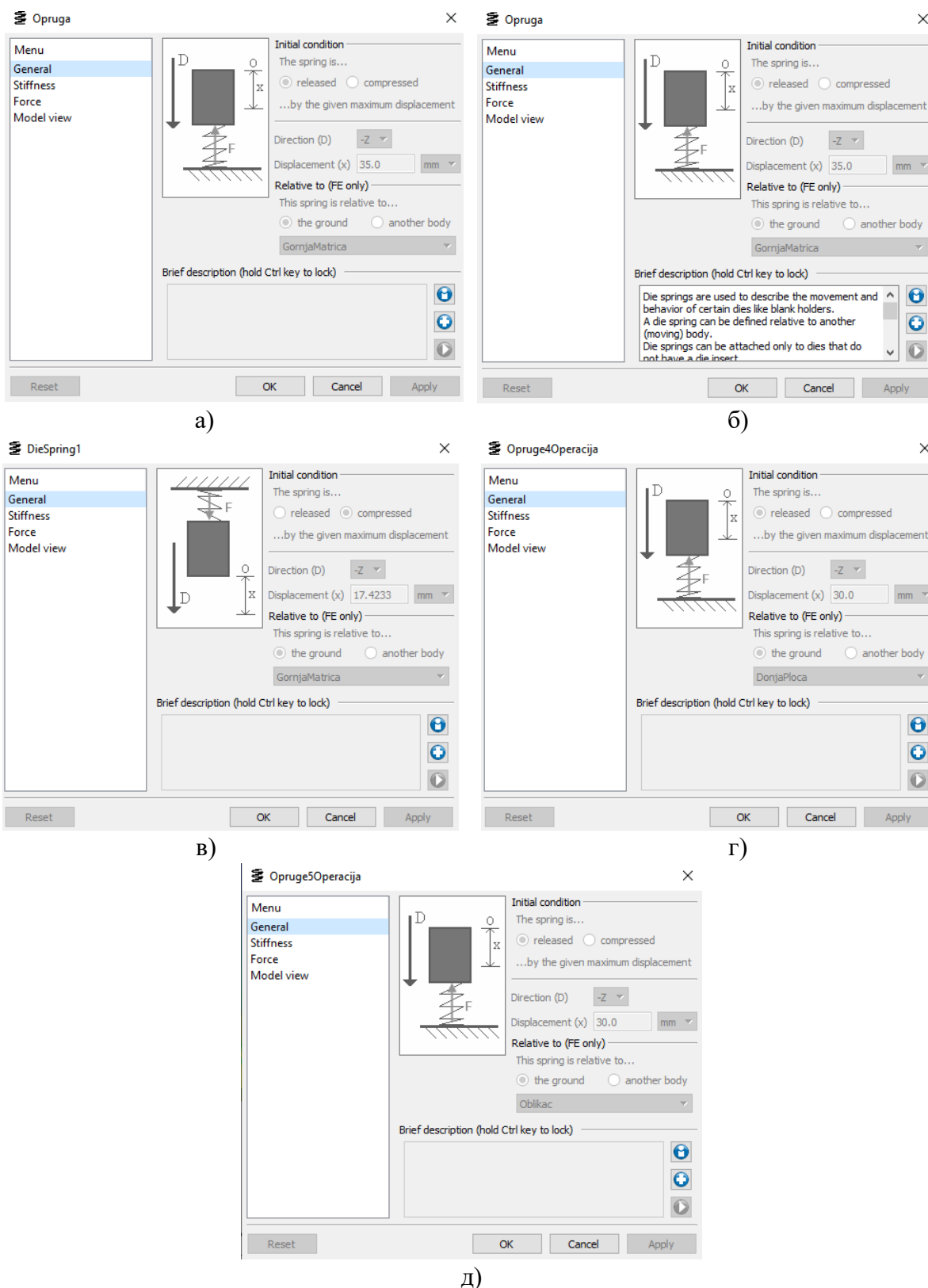
Табела 5.2. Радни ход алата

Број операције	Радни ход [mm]
1	47
2	40
3	47.42
4	32
5	37
6	32

7. Пошто корачни алат за сваку операцију савијања има еластичне елементе, односно опруге, на које се ослањају радни и помоћни делови алата, потребно је дефинисати виртуелне опруге и услове њиховог деловања (слика 5.16). Све дефинисане опруге се савијају у току процеса у правцу -Z. Остали параметри дефинисаних опруга су дати у табели 5.3.

Табела 5.3. Померање опруга

Број операције	Померање [mm]
1	35
2	35
3	17.42
4	30
5	30
6	/



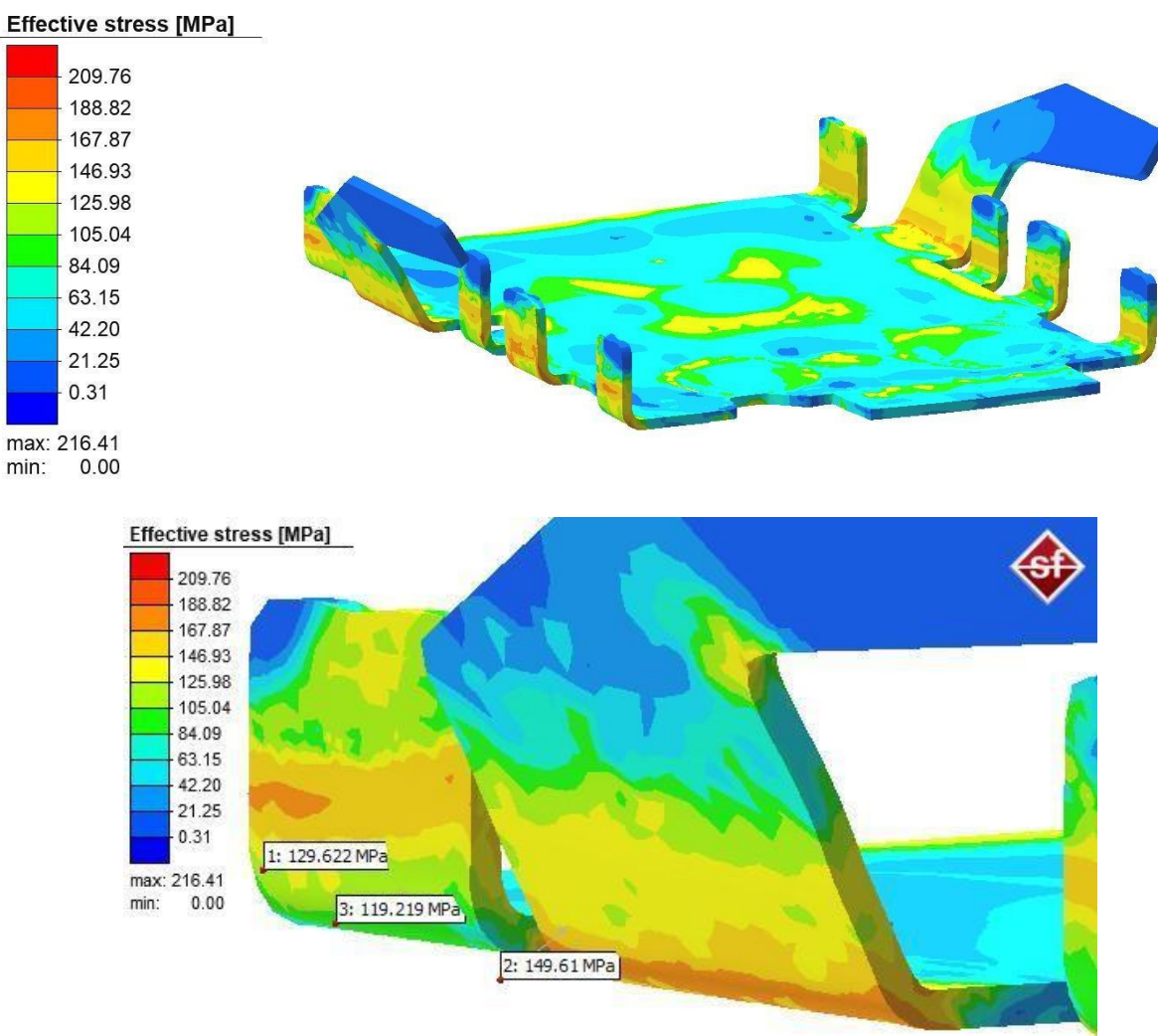
Слика 5.16. Дефинисање виртуелних опруге за: а) прву, б) другу, в) трећу, г) четврту и д) пету операцију савијања

6. Анализа нумеричких резултата

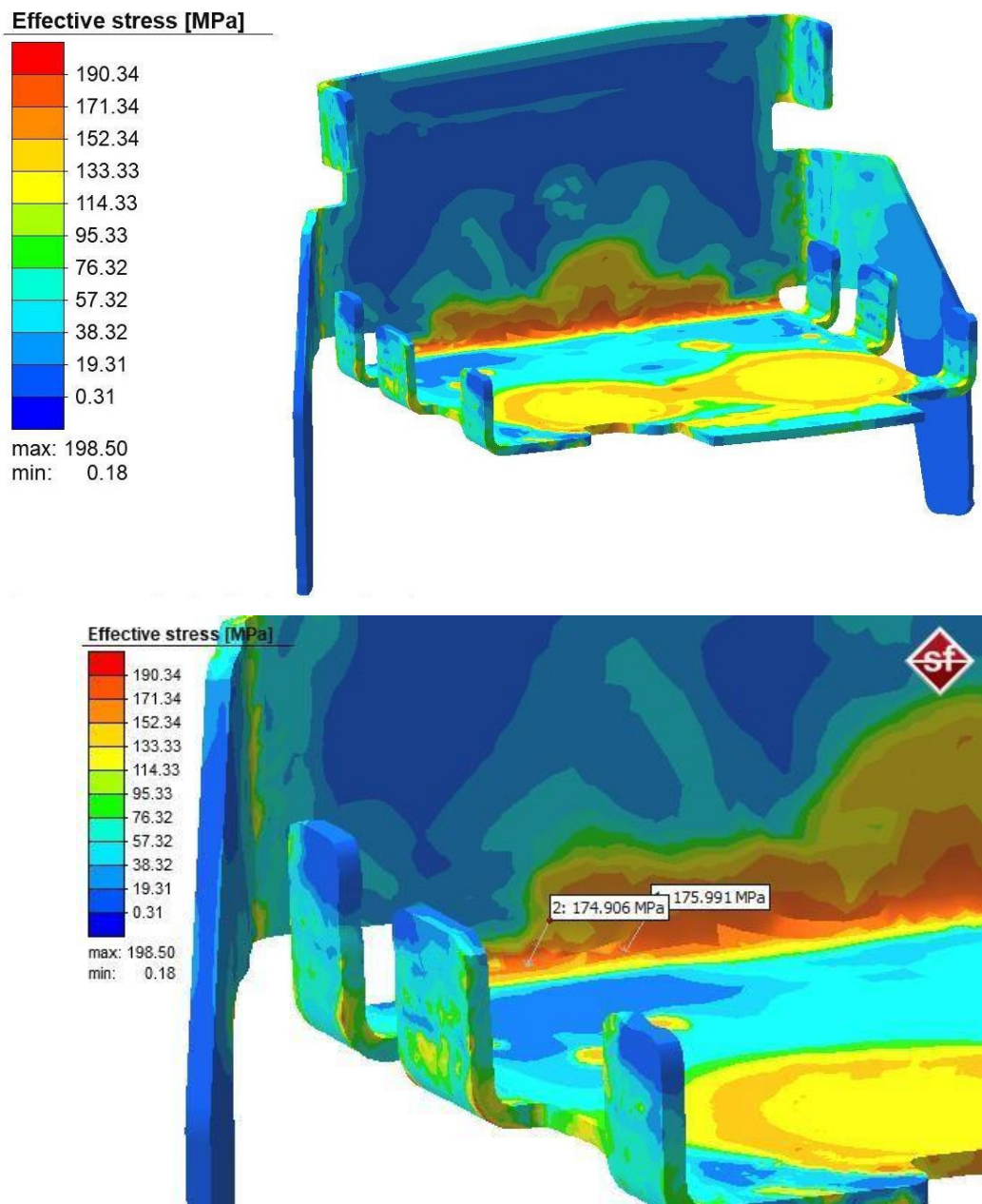
Након дефинисања улазних параметара за свих шест операција савијања лима у корачном алату реализовани су прорачуни и нумеричке симулације на бази методе коначних елемената везано за деформационо понашање материјала при обликовању. *Simufact.forming* омогућава преглед великог броја излазних резултата, а резултати који се најчешће анализирају у процесима савијања лима су расподела ефективног напона, расподела ефективне пластичне деформације, као и процена еластичне повратности.

6.1 Приказ расподеле ефективног напона

Расподеле ефективног напона радног комада током свих шест операција савијања приказане су на сликама 6.1 - 6.6.

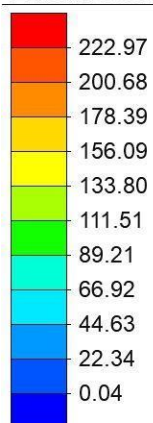


Слика 6.1. Расподела ефективног напона у првој операцији савијања лима

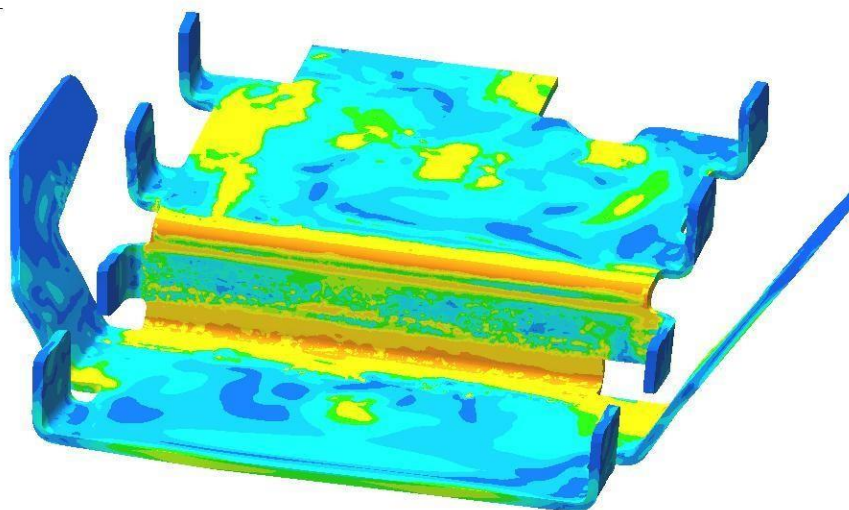


Слика 6.2. Расподела ефективног напона у другој операцији савијања лима

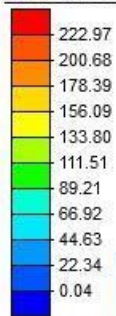
Effective stress [MPa]



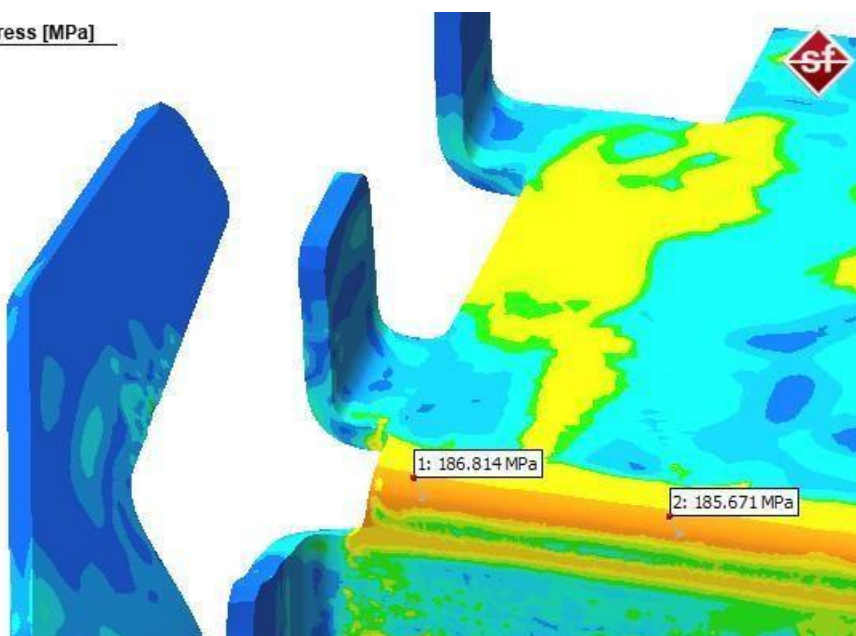
max: 222.97
min: 0.04



Effective stress [MPa]

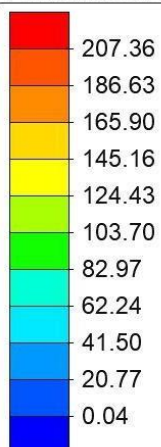


max: 222.97
min: 0.04

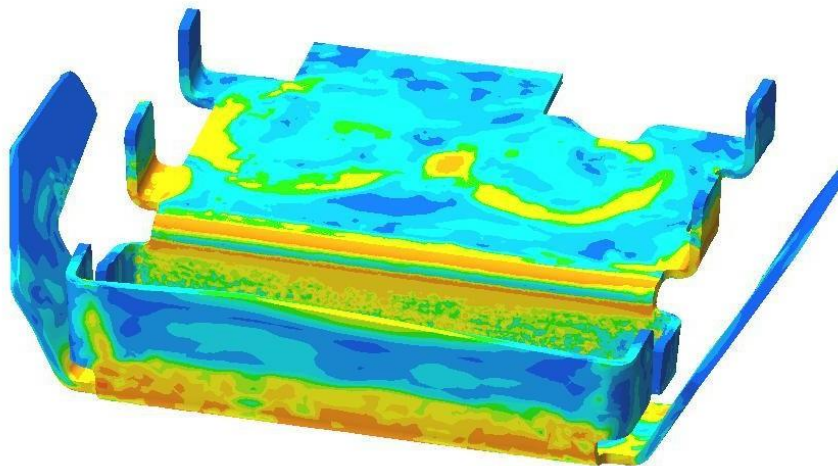


Слика 6.3. Расподела ефективног напона у трећој операцији савијања лима

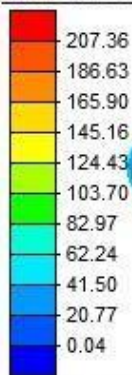
Effective stress [MPa]



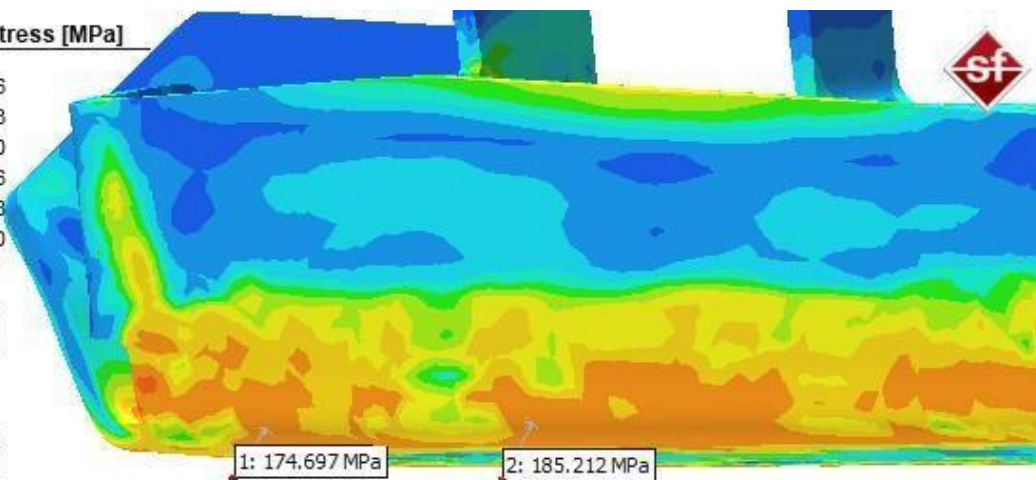
max: 207.42
min: 0.04



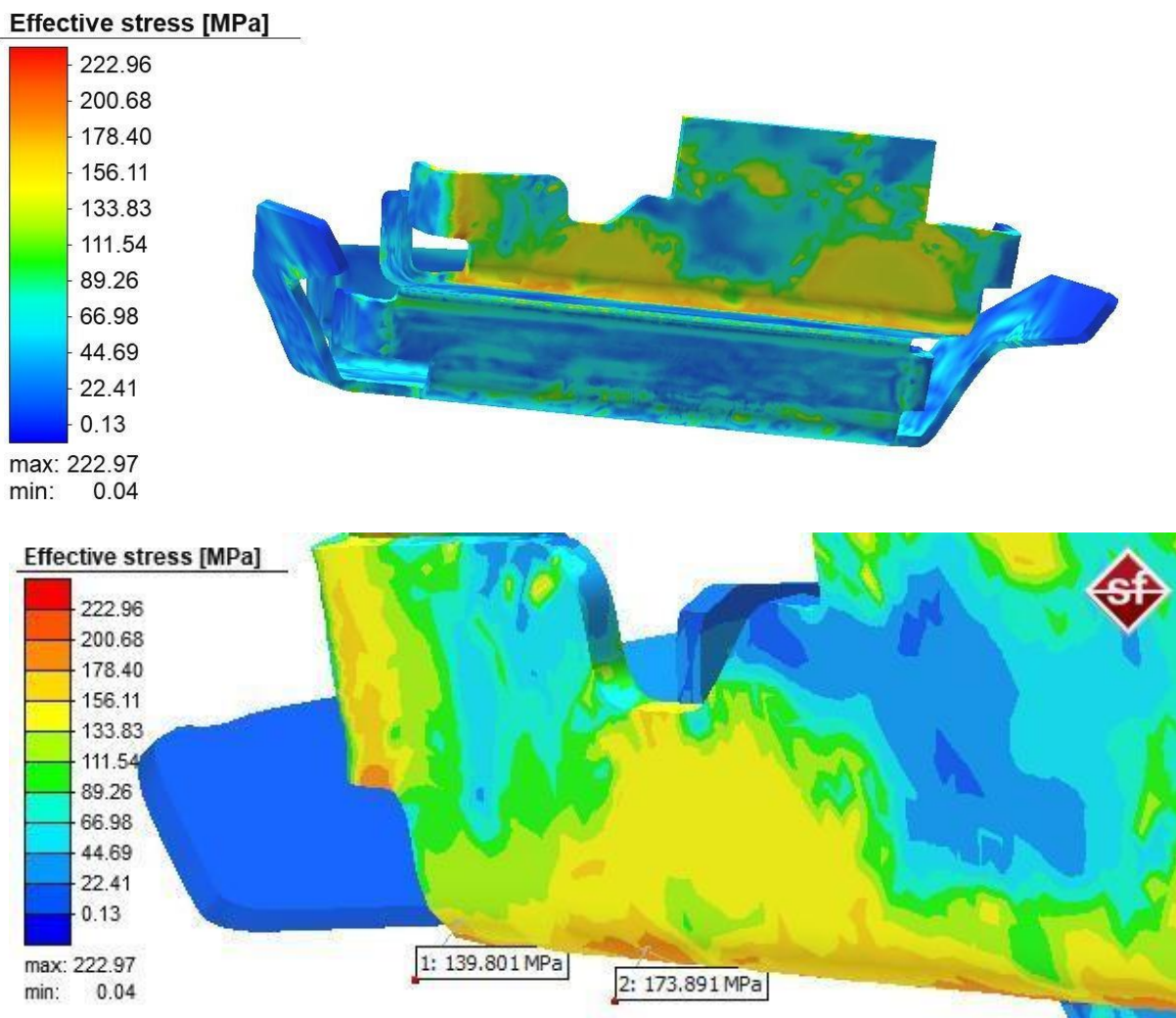
Effective stress [MPa]



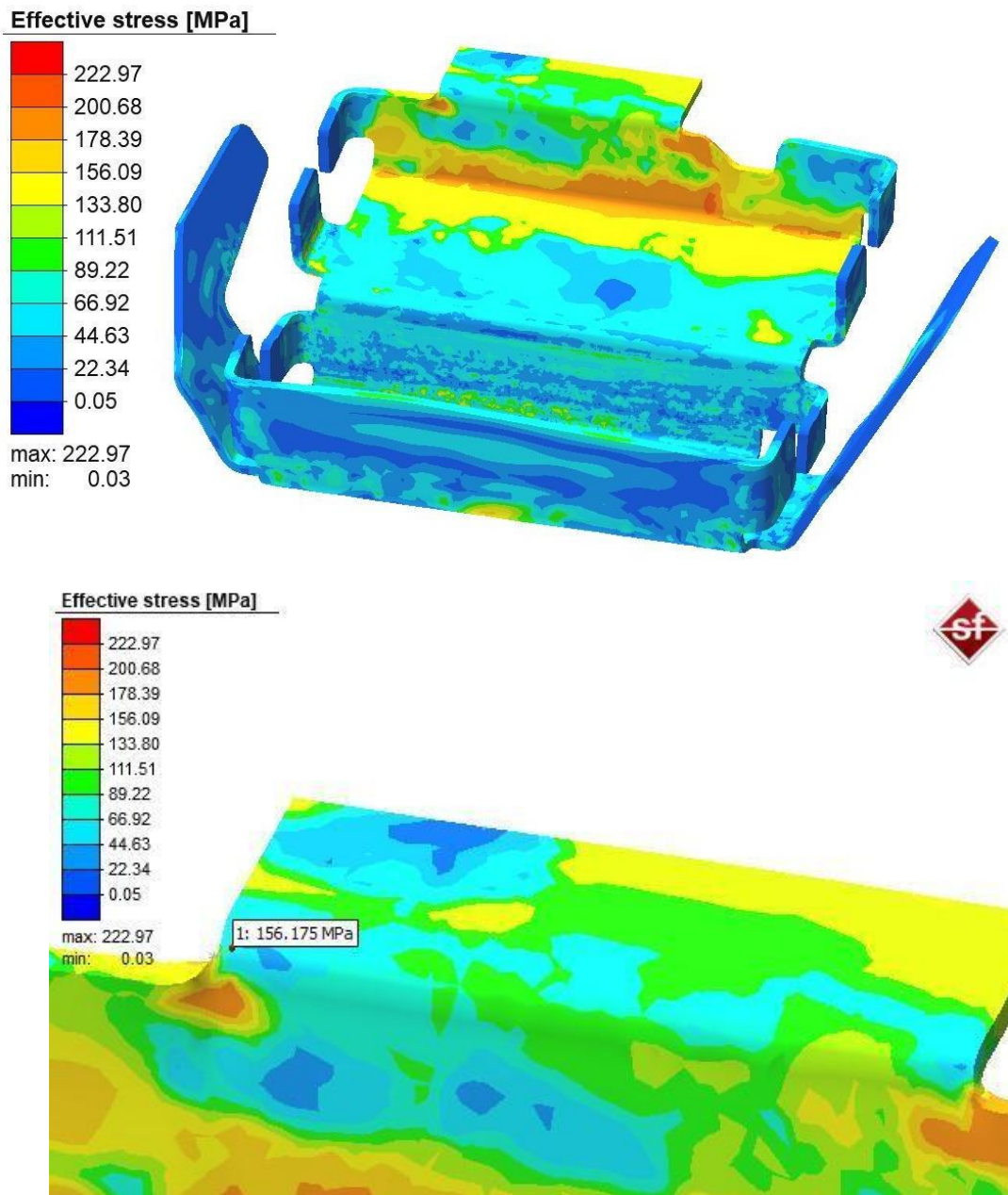
max: 207.42
min: 0.04



Слика 6.4. Расподела ефективног напона у четвртој операцији савијања лима



Слика 6.5. Расподела ефективног напона у петој операцији савијања лима



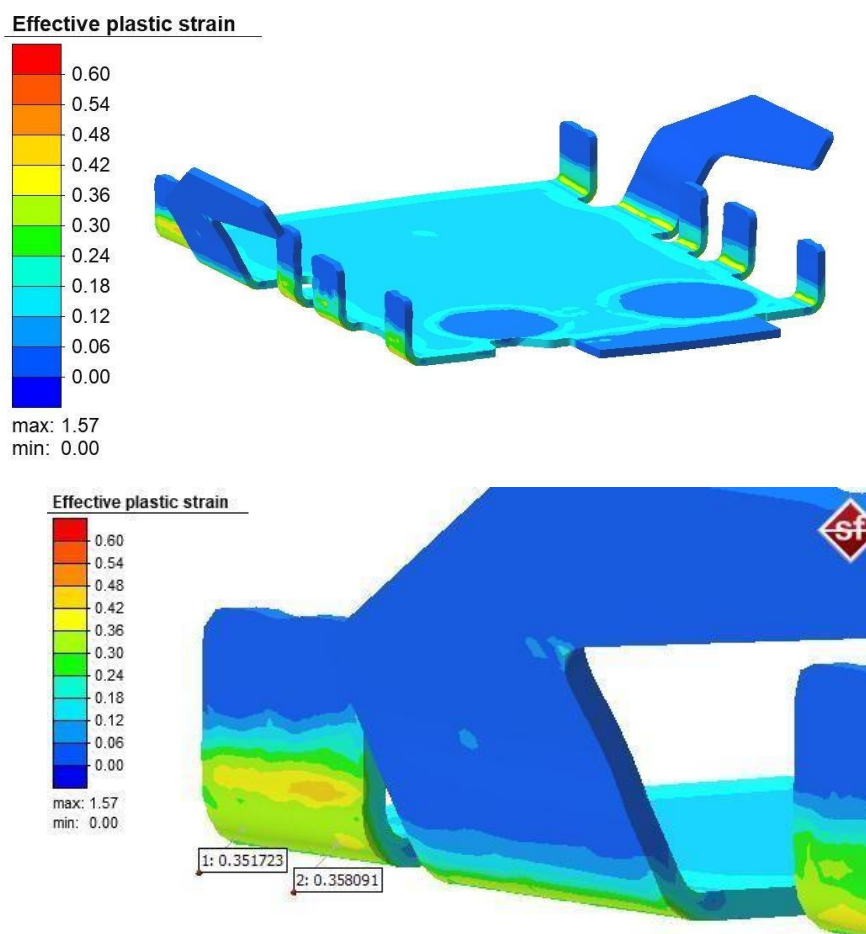
Слика 6.6. Расподела ефективног напона у шестој операцији савијања лима

У процесу савијања карактеристични напони се остварују само у зонама савијања односно у зонама радијуса, на местима где се део савија, и крећу се у границама до 223 МПа, док су најниже вредности напона на крацима радног комада. Уколико су напони изнад напона на граници течења материјала (R_p), материјал се чисто пластично деформише, а уколико су напони испод те границе долази до еластично-пластичног савијања материјала, и може се очекивати појава еластичног исправљања лима. Такође, уколико су напони у карактеристичним зонама, посебно у спољним влакнима лима који се савија, већи од напона затезне чврстоће материјала (R_m), може се очекивати појава пуцања лима што није пожељно у обради.

У овом случају затезна чврстоћа за материјал AA_6062 је $R_m = 360$ МПа, а напон на граници течења $R_p = 116$ МПа. Из приказаних расподела ефективног напона у свим операцијама савијања лима може се видети да напони у зонама савијања не прелазе критичну вредност од 360 МПа, што значи да се наведеном анализом може потврдити да обрада није критична за појаву пуцања лима. Међутим, у зонама савијања преовлађује еластично-пластично савијање, па су очекивана еластична исправљања савијених зона, односно повећање углова савијања након вађења обратка из алата, што је и показано у одељку 6.3.

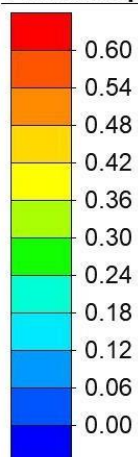
6.2 Приказ расподеле ефективне пластичне деформације

На сликама 6.7 - 6.12 приказана је расподела ефективне пластичне деформације, а њихов опсег се креће од 0 до 0.8, што са аспекта успешне обраде није критична вредност, с обзиром да у зони савијања преовлађују притискујући и затежући напони, односно деформације, и да су њихове вредности мање (0.3-0.5) од максималне вредности у легенди дистрибуције.

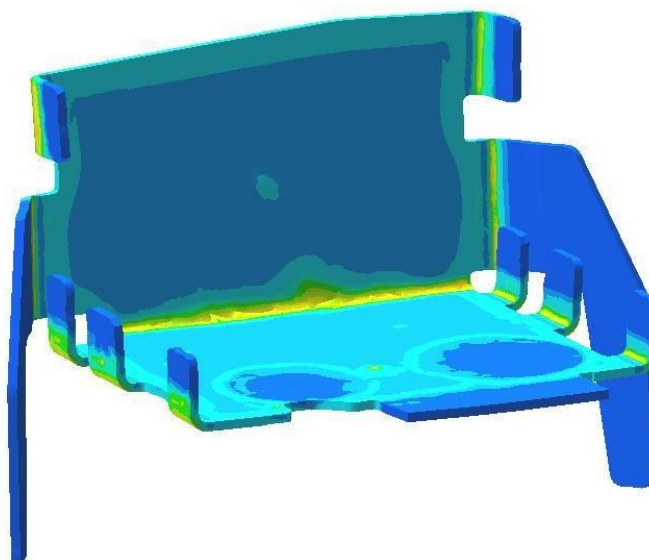


Слика 6.7. Расподела ефективне пластичне деформације у првој операцији савијања

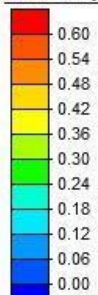
Effective plastic strain



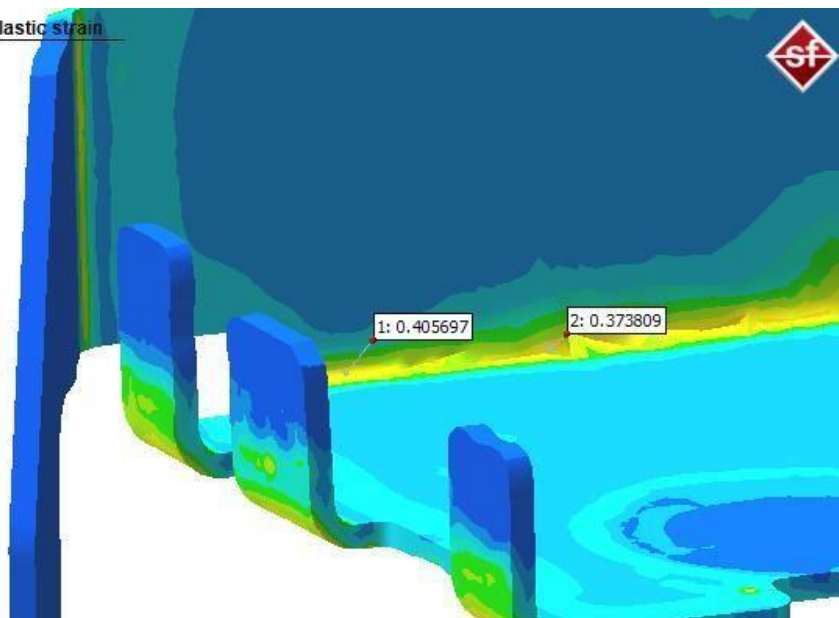
max: 1.57
min: 0.00



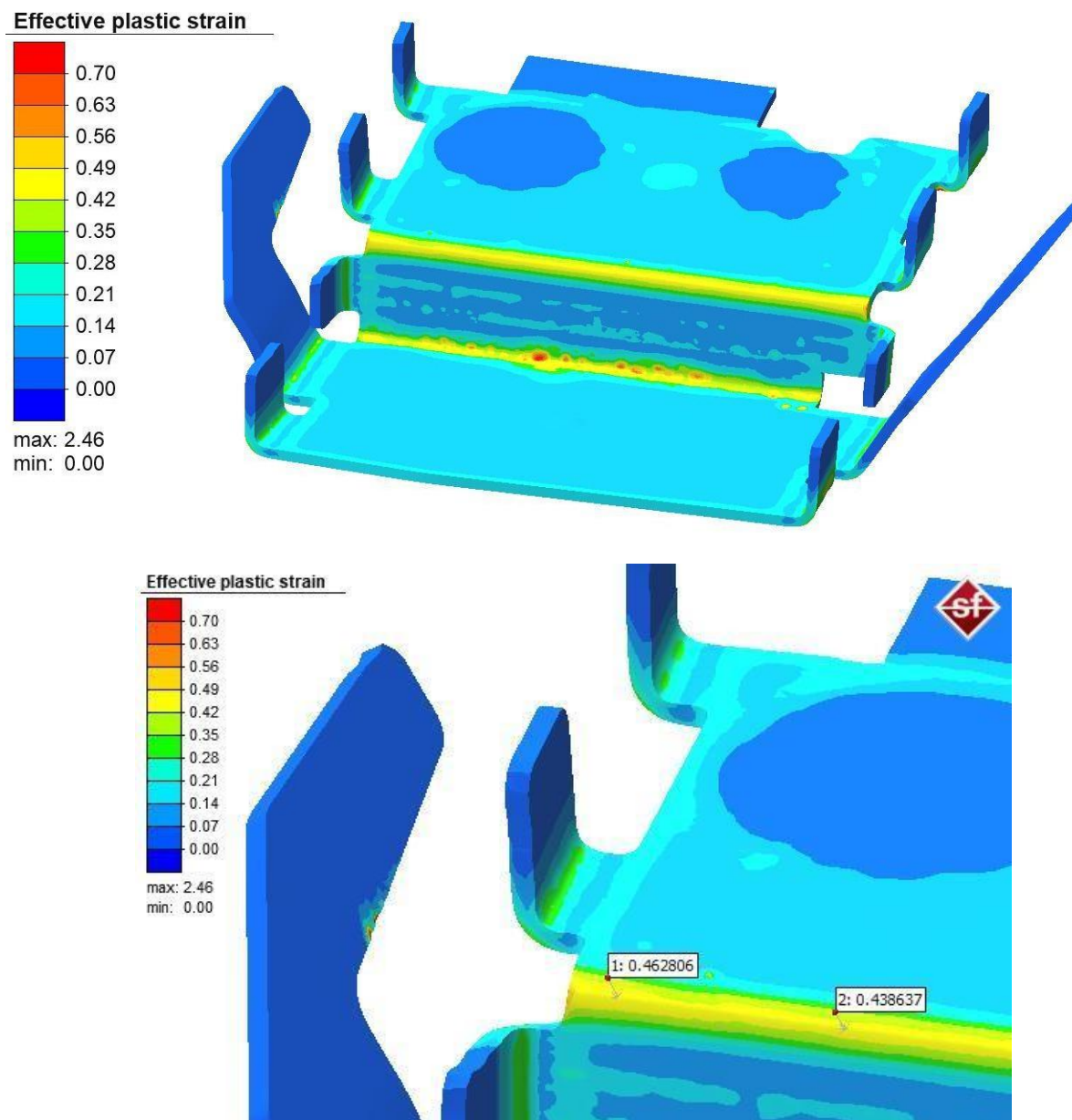
Effective plastic strain



max: 1.57
min: 0.00

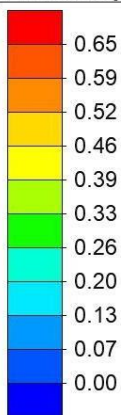


Слика 6.8. Расподела ефективне пластичне деформације у другој операцији савијања

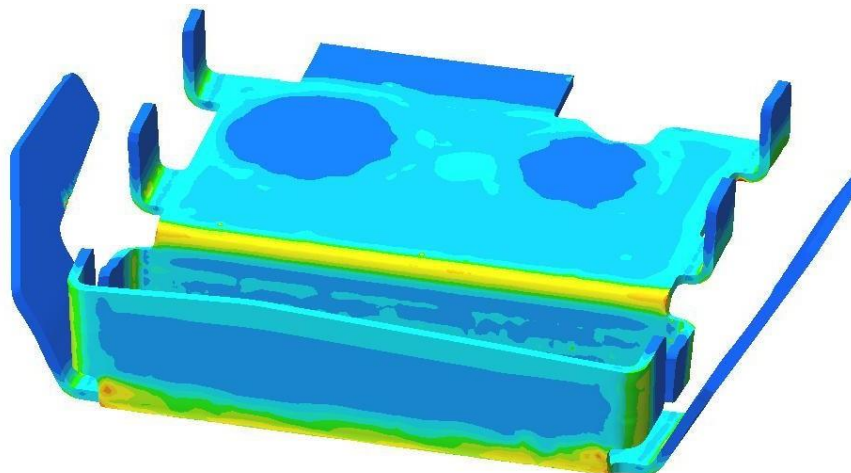


Слика 6.9. *Расподела ефективне пластичне деформације у трећој операцији савијања*

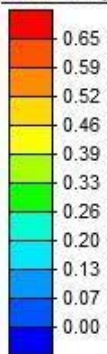
Effective plastic strain



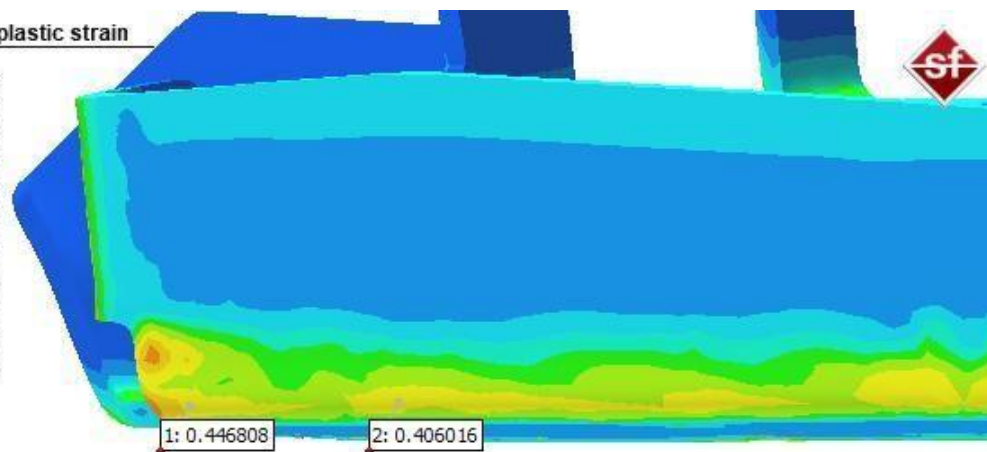
max: 2.13
min: 0.00



Effective plastic strain

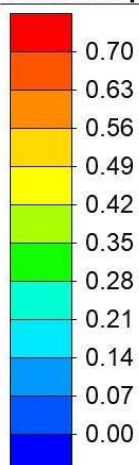


max: 2.13
min: 0.00

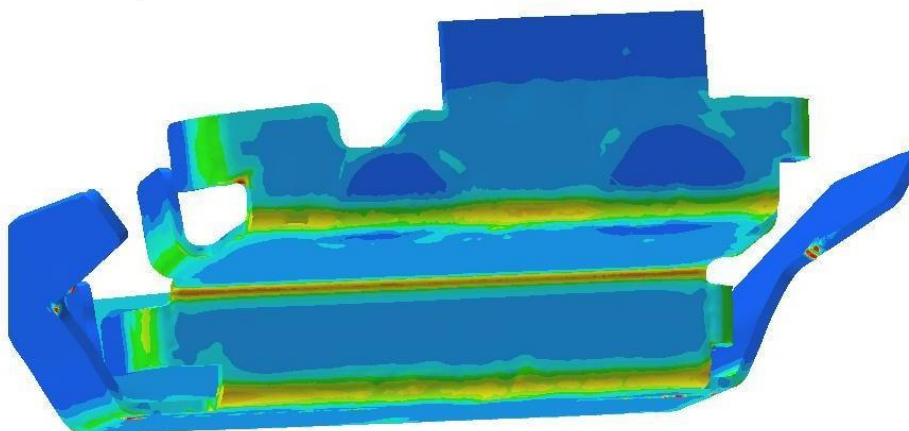


Слика 6.10. Расподела ефективне пластичне деформације у четвртог операцији савијања

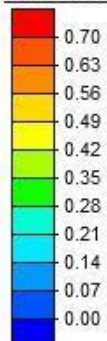
Effective plastic strain



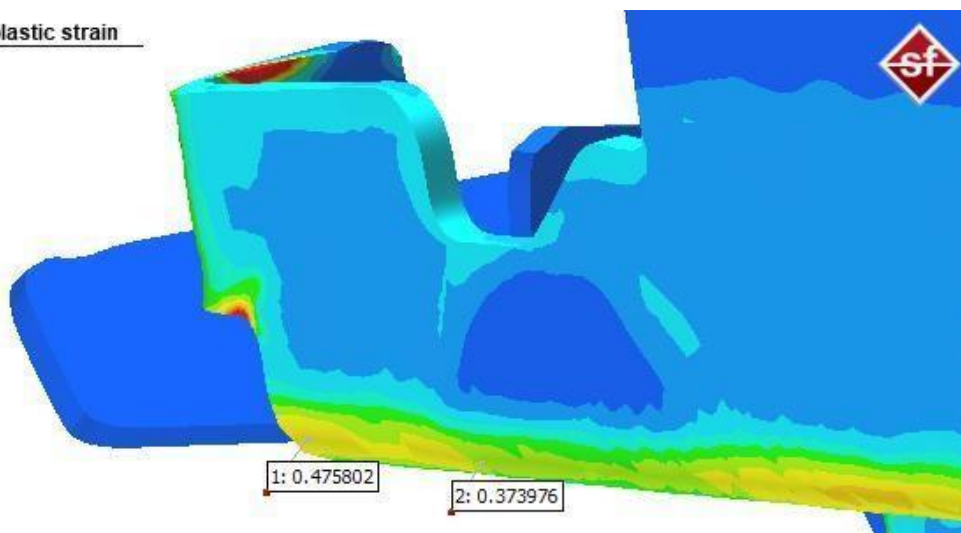
max: 2.12
min: 0.00



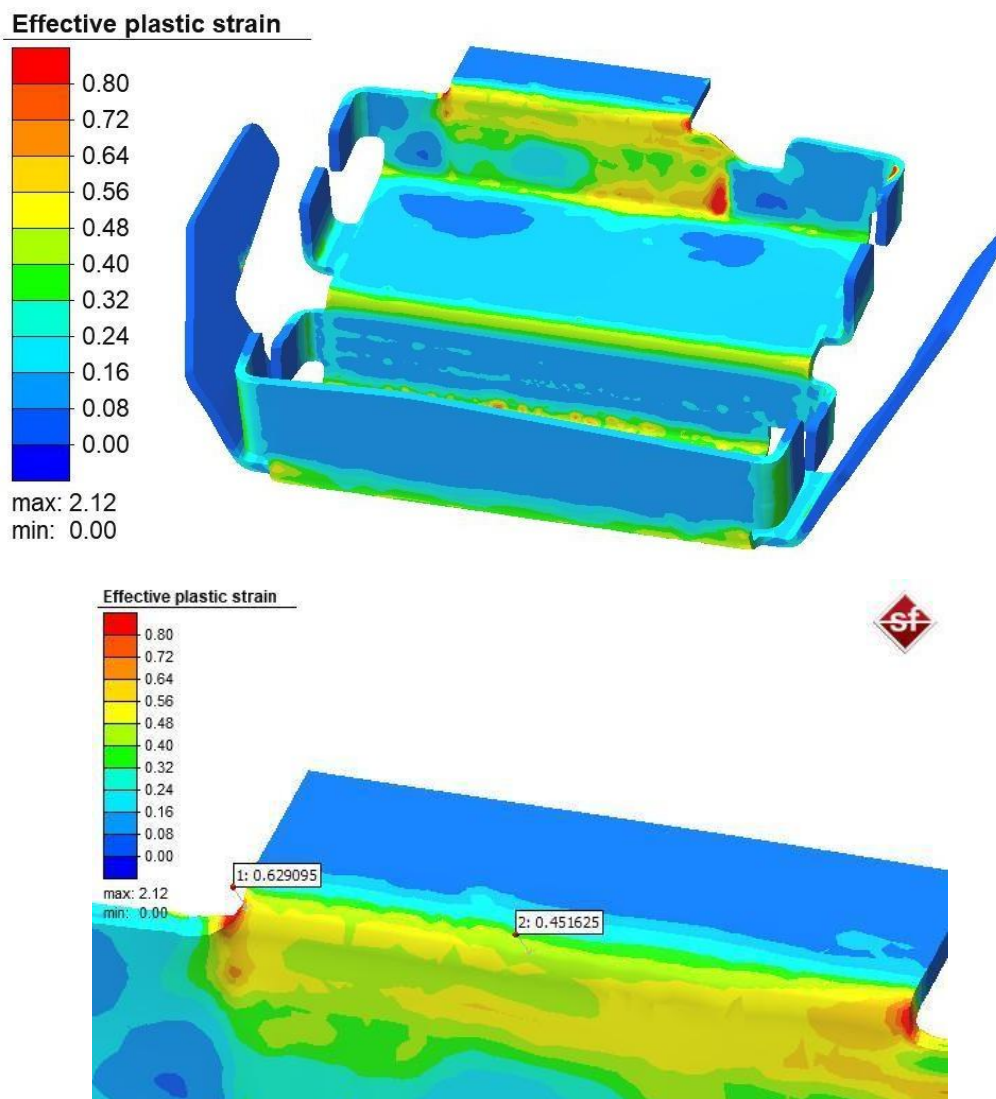
Effective plastic strain



max: 2.12
min: 0.00



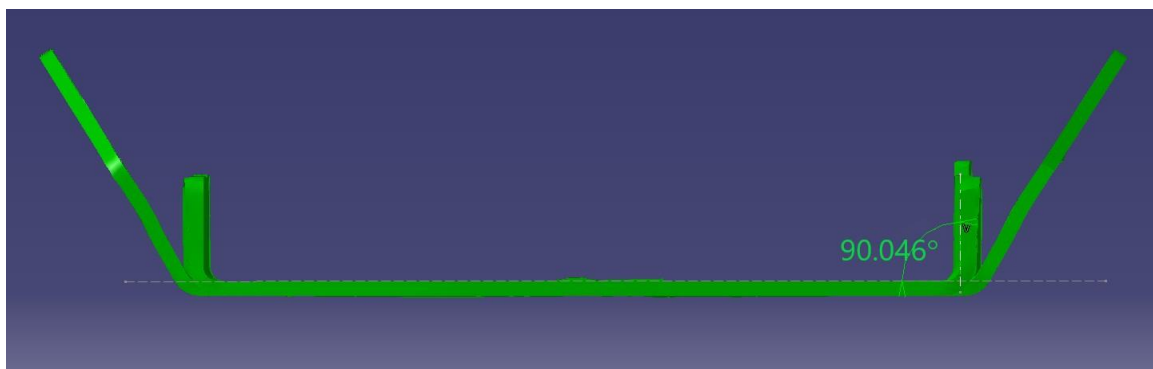
Слика 6.11. Расподела ефективне пластичне деформације у петој операцији савијања



Слика 6.12. Расподела ефективне пластичне деформације у шестој операцији савијања

6.3 Процена еластичне повратности

Након операције савијања, односно када се радни комад ослободи из алата долази до његовог исправљања за величину еластичне деформације. Утврђивање еластичне повратности се врши мерењем угла савијања док је обрадак у алату, на крају процеса савијања, и угла савијања након вађења обратка из алата. На сликама 6.13 - 6.18 приказани су углови савијања мерени на виртуелном обратку у тренутку *100% Forming* док је обрадак у алату и на крају симулације растерећења обратка, у тренутку *Release*.

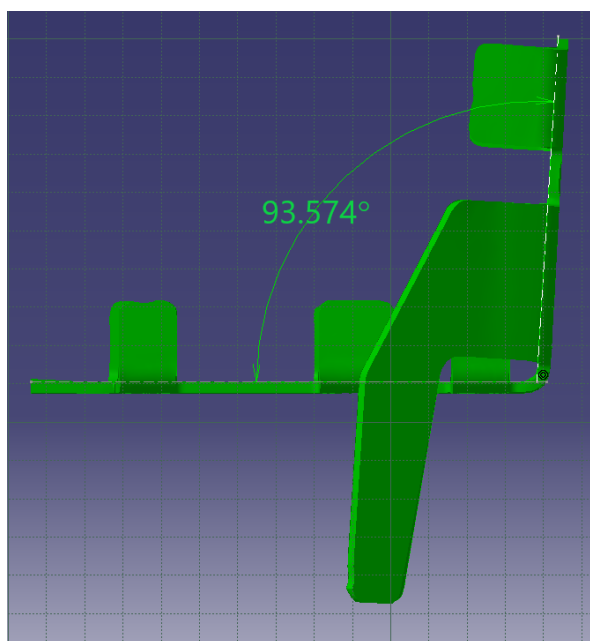


Пре растерећења

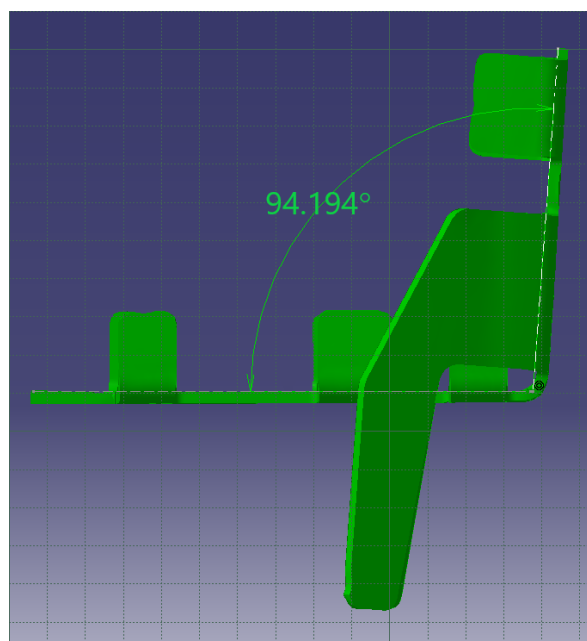


После растерећења

Слика 6.13. Углови савијања у виртуелном обратку у првој операцији савијања и након растерећења

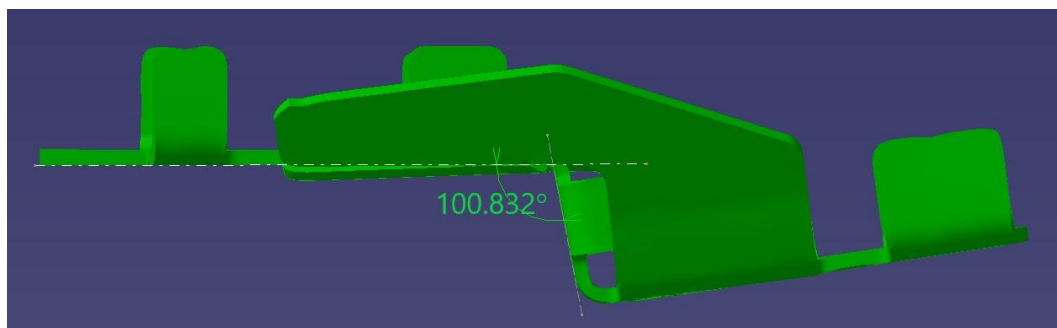


Пре растерећења

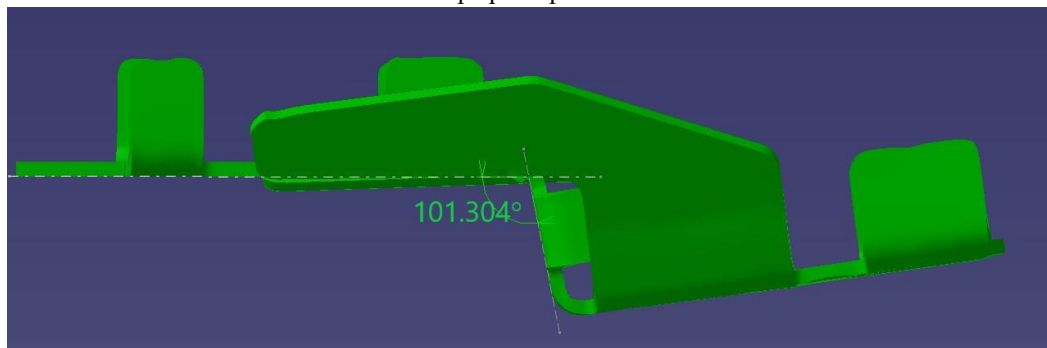


После растерећења

Слика 6.14. Углови савијања у виртуелном обратку у другој операцији савијања и након растерећења

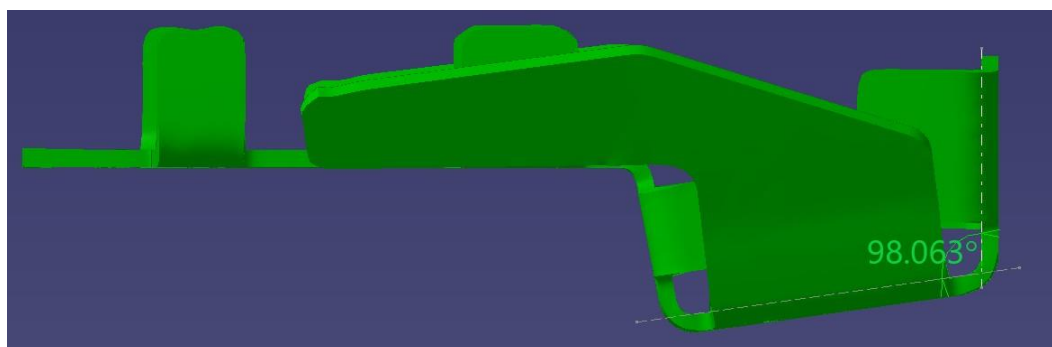


Пре растеређења

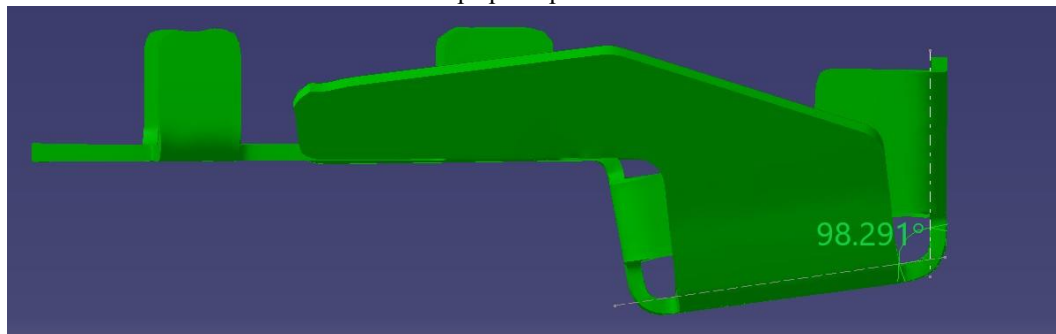


После растеређења

Слика 6.15. Углови савијања у виртуелном обратку у трећој операцији савијања и након растеређења

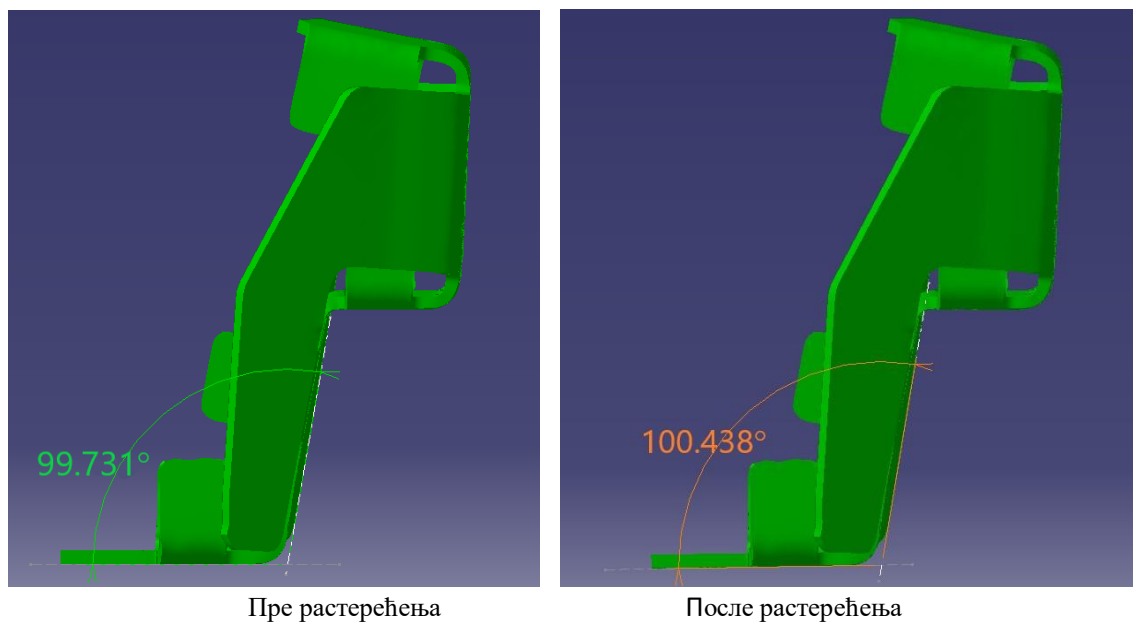


Пре растеређења

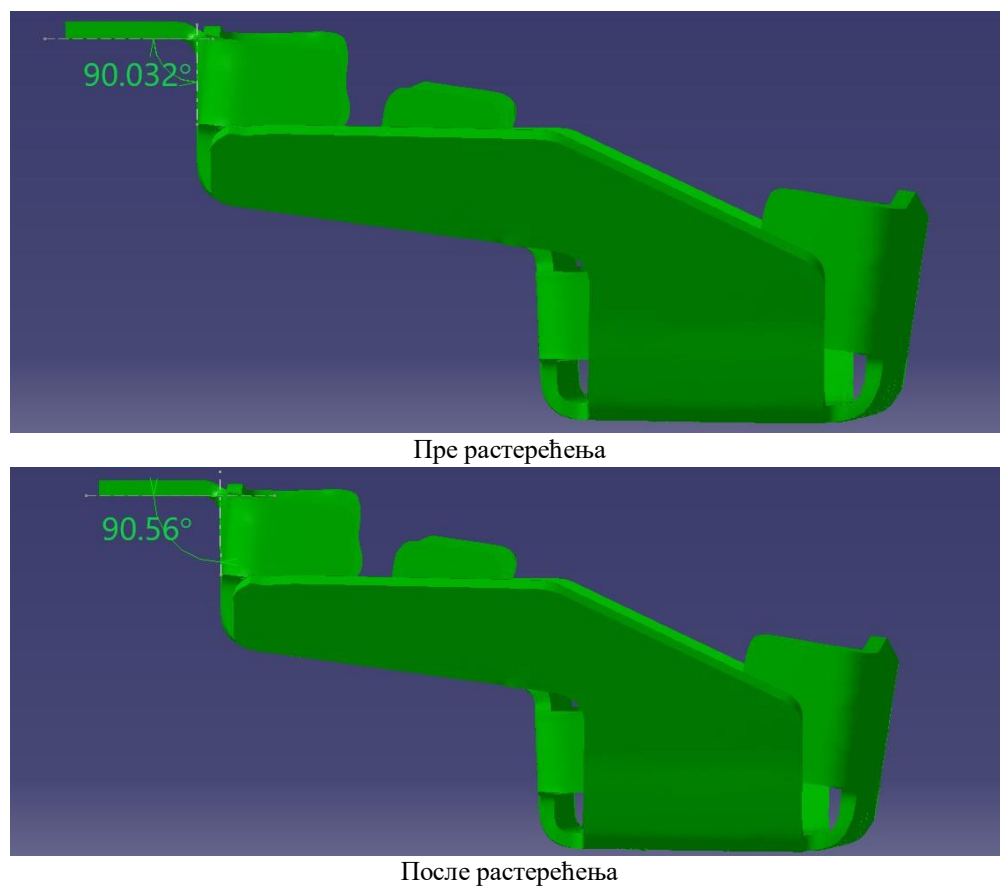


После растеређења

Слика 6.16. Углови савијања у виртуелном обратку у четвртој операцији савијања и након растеређења



Слика 6.17. Углови савијања у виртуелном обратку у петој операцији савијања и након растеређења



Слика 6.18. Углови савијања у виртуелном обратку у шестој операцији савијања и након растеређења

Резултати еластичног исправљања повезани су са нивоом напона. На местима где су напони већи, преовлађују пластичне (трајне) деформације и на тим местима је мање изражена еластична повратност након растерећења обратка, односно вађења из алата. Међутим, изузетак представља прва операција, код које су велики краци само делимично савијени, с обзиром да се финално савијају при склапању кутије, са зазором. Због тога су за ову операцију битни само углови на краћим крацима, односно у зонама у којима је угао савијања око 90° , приказани на слици 6.13.

На основу измерених вредности углова савијања пре и после растерећења обратка у свакој од операција савијања могу се срачунати промене углова савијања, односно углови савијене зоне за сваку операцију. Добијене вредности су приказане у табели 6.1. Применом једначине за прорачун фактора еластичног исправљања K ($K = \varphi_2/\varphi_1$) могу се добити вредности за K за сваку операцију савијања виртуелног обратка добијеног нумеричким симулацијама. Прорачунате вредности су дате у табели 6.2. Оне се могу упоредити са вредностима за K очитаним за А1 легуру са дијаграма на слици 3.5. Очитане графичке вредности су у функцији односа $\frac{r_u}{s}$, па су у табели приказане и те вредности заједно са очитаним графичким вредностима за K . Евидентно је одлично поклапање нумерички добијених вредности за K са графички очитаним.

Табела 6.1. Углови савијања и савијене зоне пре и после растеређивања

Број операције	Угао савијања пре растеређења $\alpha_1 [^\circ]$	Угао савијања после растеређења $\alpha_2 [^\circ]$	Промена угла савијања $\Delta\alpha [^\circ]$	Угао савијене зоне пре растеређења $\varphi_1 [^\circ]$	Угао савијене зоне после растеређења $\varphi_2 [^\circ]$
1	90.046	91.01	0.964	89.954	88.99
2	93.574	94.194	0.620	86.426	85.806
3	100.832	101.304	0.472	79.168	78.696
4	98.063	98.291	0.228	81.937	81.709
5	99.731	100.438	0.707	80.269	79.562
6	90.032	90.56	0.528	89.968	89.44

Табела 6.2. Фактори еластичног исправљања

Број операције	Фактор еластичног исправљања K (нумеричка симулација)	Однос $\frac{r_u}{s}$	Фактор еластичног исправљања K (график, слика 3.5)
1	0.989283	1.14	0.99
2	0.992826	1.1	0.99
3	0.994038	1	0.995
4	0.997217	0.99	0.995
5	0.991192	1.19	0.99
6	0.994131	1.11	0.995

Може се закључити да је нумеричком симулацијом процеса савијања лима у корачним алатима могуће добити добру процену еластичне повратности лима, односно одступања од жењених углова савијања, па сходно томе извршити неопходне корекције CAD модела алата пре његове физичке израде и саме производње дела од лима.

7. Закључна разматрања

САЕ моделирање процеса обраде лима у корачним алатима применом нумеричких МКЕ симулација омогућава тестирање виртуелних модела процеса и пројектованих алата пре саме производње. Осим праћења пластичног течења материјала, деформисања, уочавања дефеката, могуће је дати процене понашања обратка након вађења из алата, односно еластичне повратности при процесу савијања. Осим тога, могу се проверити технологичност обратка, максимални и минимални дозвољени радијуси савијања, напони у зонама савијања, максималне деформације по дебљини лима, итд. На овај начин се постиже смањење броја протитипова алата, као и смањење трошкова и времена развоја производа и алата.

У раду је примењена нумеричка симулација процеса савијања лима у индустријском корачном алату применом методе коначних елемената и процена еластичне повратности лима након шест операција савијања. На основу спроведене анализе утврђено је да се највећи ефективни напони и ефективне пластичне деформације јављају управо у зонама радијуса савијања, односно на местима где се лим савија, док су вредности напона и деформација најниже на крацима радног комада ван радијуса савијања. Из приказаних резултата може се закључити да је трајно деформисање лима у зонама савијања остварено при напонима већим од напона на граници течења. У зависности од износа напона при еластично-пластичном савијању лима постоји веће или мање еластично исправљање након вађења обратка из алата. Процена еластичне повратности савијеног лима је важна за тачност израде делова процесом савијања. У ту сврху могу се користити препоруке, у виду образаца, табела и графикана за различите врсте материјала и у зависности од односа r_u/s . Евидентно је добро поклапање нумеричких резултата и графички очитаних вредности за процене еластичне повратности лима у свих шест операција савијања у корачном алату.

Из приказаних расподела ефективног напона и ефективне пластичне деформације у свим операцијама савијања лима може се видети да напони и деформације у зонама савијања не прелазе критичну вредност, што значи да се наведеном анализом може потврдити да обрада није критична.

На основу тачности и поузданости добијених резултата може се закључити да је примена савремених техника виртуелног инжењеринга неопходана у развоју нових производа. Такође, применом ових алата, у будућности се могу очекивати још већа и боља поузданост и тачност добијених резултата, као и већа економичност и производност.

Литература

- [1] И. Планчић, Обрада метала деформисањем - скрипта, Универзитет у Зеници, Машински факултет, Зеница, 2011. SKR
- [2] С. Александровић, Производне технологије: Технологија пластичног обликовања - скрипта, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2011.
- [3] М. Краишник, С. Тодоровић, Технологија обраде деформисањем - скрипта, Универзитет у Бања Луци, Машински факултет, Бања Лука, 2015/2016.
- [4] Б. Мусафија, Обрада метала пластичном деформацијом (четврто издање), Машински факултет, Сарајево, 1979.
- [5] Весна Мандић, „Moodle portal“, наставни материјали за предмет „Машине и алати у обради деформисањем“.
- [6] М. Стефановић, Машине и алати у ОМД- скрипта, Факултет инжењерских наука, Крагујевац.
- [7] http://www.wbc-vmnet.kg.ac.rs/pub/download/138133901838_ubl-case_study.pdf, приступљено: 01.12.2020.
- [8] М. Милутиновић, Д. Вилотић, П. Скакун, С. Ранђеловић, Д. Моврин, Љ. Стефановић, М. Вилотић, Нумеричке симулације - Моћне алатке у образовању инжењера производног машинства, XXVI скуп трендова развоја: „Иновације у модерном образовању“, Копаоник, 2020.
- [9] http://ttl.masfak.ni.ac.rs/ANALIZA%20NOSECIN%20STRUKTURA%202006_2007%20S%20A%20J%20T/Predavanje-4%20%20%20%20ANS.pdf, приступљено: 01.12.2020.
- [10] <https://www.simufact.com/>, приступљено: 08.12.2020.
- [11] Весна Мандић, Моделирање и симулација у обради деформисањем, Машински факултет, Крагујевац, 2005.