

Садржај

1.0 Увод	3
2.0 Обрада метала деформисањем (ОМД)	4
2.1 Обликовање лима савијањем.....	5
2.1.1 Угаоно савијање	6
2.1.2 Кружно савијање	7
2.1.3 Остали видови савијања	8
2.2 Положај неутралног слоја.....	9
2.3 Одређивање развијене дужине	14
2.4 Анализа угаоног савијања	15
2.4.1. Анализа двоугаоног савијања.....	15
2.5 Деформације при савијању	16
2.6 Напони и моменти савијања.....	19
2.6.1 Моменти унутрашњих сила.....	20
3.0 Еластично исправљање савијених делова - повратност	27
4.0 Обликовање лима дубоким извлачењем	30
4.1 Дубоко извлачење осносиметричних комада	31
4.2 Показатељи степена деформисања	32
4.3 Напони и деформациона сила извлачења	33
4.3.1 Дефинисање радијалног напона на ободу	34
4.3.2 Напон услед трења на равном делу обода.....	36
4.3.3 Напон услед трења на заобљену ивицу матрице	36
4.3.4 Напон услед савијања и исправљања	38
4.3.5 Укупни напон извлачења.....	39
4.4 Одређивање силе извлачења према упрошћеним формулама	39
4.5 Одређивање облика и димензије развијеног стања.....	40
4.5.1 Графо-аналитичка метода.....	40
5.0 Опис проблема за решавање	42
6.0 Опис програмског пакета Simufact.forming	44
7.0 Дефинисање улазних података у софтверу simufact.forming	45
7.1 Дефинисање параметара процеса за прву операцију	45
7.1.1 Дефинисање типа производног процеса	45
7.1.2 Увоз геометрије алата	46

7.1.3 Дефинисање материјала радног комада	46
7.1.4 Дефинисање пресе	47
7.1.5 Дефинисање трења	48
7.1.6 Дефинисање температуре	48
7.1.7 Дефинисање опруге	49
7.1.8 Формирање мреже коначних елемената на радном комаду	49
7.1.8 Дефинисање контролних параметара процеса	50
7.1.9 Резултати прве симулације	51
7.2 Дефинисање података за другу операцију	52
7.2.1 Дефинисање типа производног процеса	52
7.2.2 Увоз геометрије алата	53
7.2.3 Дефинисање материјала радног комада, пресе, трења и температуре радног комада и алата	53
7.2.4 Дефинисање опруге	53
7.2.5 Креирање мреже коначних елемената на радном комаду	54
7.2.6 Дефинисање контролних параметара процеса	55
7.2.7 Резултати друге симулације	55
8.0 Мерење радног комада	58
8.1 Карактеристике CMM Werth VC – IP 250 3D CNC	58
8.1.1 Сензор ласер	58
8.1.2 WinWerth softer	59
8.1.3 Радно окружење WinWerthsoftera	59
8.2 Поступак скенирања	60
9.0 Анализа добијених резултата	62
9.1 Анализа резултата добијених у софтверу simufact.forming	62
9.2 Анализа резултата скенирања реалног дела и виртуелног модела у операцији 1	63
9.3 Анализа добијених резултата у операцији 2	65
9.4 Анализа одступања у унапред дефинисаном пресеку	65
9.5 Анализа одступања виртуелног модела од CAD модела у карактеристичним пресецима за прву операцију	68
9.6 Анализа одступања дела добијеног симулацијом од идеалног CAD модела за другу операцију	71
10. Закључак	73
Литература	74

1.0 Увод

Циљ завршног рада је да се изврши анализа процеса савијања и дубоког извлачења и процени квалитет добијеног дела, односно ефекат еластичног исправљања на тачност захтеване геометрије комада, кроз нумеричку анализу процеса у програмском пакету Simufact.forming. Такође ће се извршити мерење на мерној машини CMM Werth VC – IP 250 3D CNC. Циљ је био да се знање стечено на предавањима примени при решавању једног индустријског проблема. Део који је рађен у завршном раду добијен је из фабрике „UNIOR“ у Крагујевцу.

Завршни рад је конципиран тако да се у првом делу представи процес савијања и дубоко извлачење, еластична повратност, док други део садржи приказ симулације, мерења, као и анализу добијених резултата.

Теоретски део замишљен је тако да се прикаже процес савијања, дубоког извлачења, као и њихова заступљеност у односу на друге обраде пластичним деформисањем, као и предност овог процеса обраде. Затим извршена је анализа напона и момента савијања како код поступака савијања тако и код поступка дубоким извлачењем.

Даље је дат опис програмског пакета Simufact.forming који је коришћен за симулацију процеса, као и преглед добијених резултата.

У завршном делу извршена је анализа добијених резултата путем симулације, мерењем делом који је добијен из фабрике.

2.0 Обрада метала деформисањем (ОМД)

Под обрадом метала деформисањем треба подразумевати њено трајно обликовање под дејством спољашњих сила. Обрада метала деформисањем се најчешће врши на машинама па се зато може сматрати као посебан вид машинске обраде, при томе се може вршити појединачна или серијска обрада делова, од најпростијих до сложених делова [1].

Да би се материјал могао деформисати, потребно га је довести у зону пластичног течења, то подразумева да треба дефинисати силе оптерећења изнад његове границе еластичности. Потребну силу обезбеђује машина за обраду деформисањем, где спадају: пресе, ковачки чекићи, машине за савијање, аутомати итд. За машину се везују алати који имају улогу обликовања радног комада. Сила машине се преко обликача преноси на радни комад [2].

Из овога следи да правилан избор технолошког процеса деформацијом треба извршити :

- Анализу процеса пластичне деформације метала;
- Конструкцију алата;
- Избор машине.

Карактеристика процеса савијања је у већини случајева локално пластично деформисање. Деформациона зона тада обухвата мањи део запремине комада, где честице материјала мењају међусобна растојања, тј. долази до локалног померања делића материјала и то на месту дејства силе. Мада, има поступака где се деформише комплетна запремина комада.

Савијање се најчешће врши хладним деформисањем, мада се према потреби може користити и топла деформација. С обзиром да пластичну деформацију увек прате и еластичне деформације, код савијања треба увек узети у обзир при конструкцији алата еластично исправљање и за ту величину потребно је извршити корекцију облика алата у односу на усвојени облик предмета обраде. На слици 2.1 су приказани савијени делови.



Слика 2.1 – Савијени делови

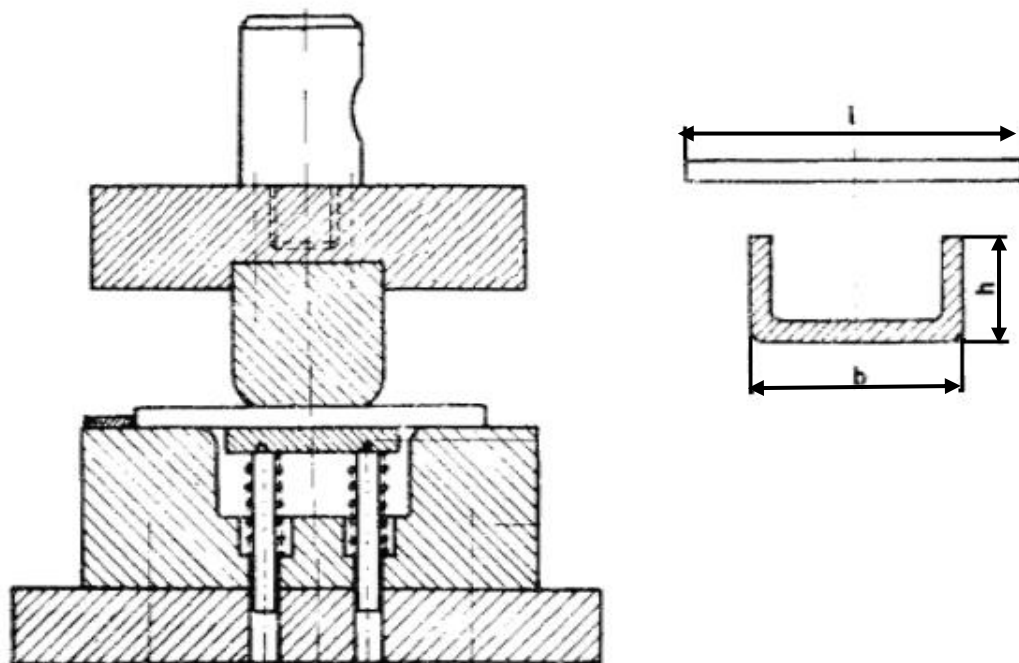
2.1 Обликовање лима савијањем

Обрада савијања, спада у групу поступака технологије пластичног деформисања који се најчешће користи, како у малосеријској, тако и у вишесеријској, масовној производњи. Омогућава израду производа са димензијама од једног милиметра до неколико метара. Примена савијања је веома широка, често се комбинује са неким другим операцијама: просецањем, пробијањем, извлачењем и разним другим обликовањем. Ова технологија заузима видно место у изради делова за лака и тешка возила, тракторе, шумска возила, пољопривредне машине итд [3].

Према технолошким карактеристикама процеса савијања и карактеру производње, савијање се може поделити на:

1. Савијање на универзалним пресама помоћу специјалних алата;
2. Профилно савијање лимова на пресама најчешће се користи за предмете релативно велике дужине;
3. Кружно савијање ваљцима на ротационим машинама са савијањем;
4. Савијање делова из жице или релативно уске траке на специјалним машинама за савијање и остале специјалне врсте савијања.

У овом делу највише пажње ће се посветити проблему угаоног савијања комада алатима на пресама (ексцентричне, хидрауличне, и др.). Савијање на пресама се врши помоћу специјално израђених алата и карактерише се тиме да је увек у питању савијање преко малог радијуса. На слици 2.2 приказан је типичан алат за савијање профила на пресама.



Слика 2.2 – Алат за савијање профила на пресама

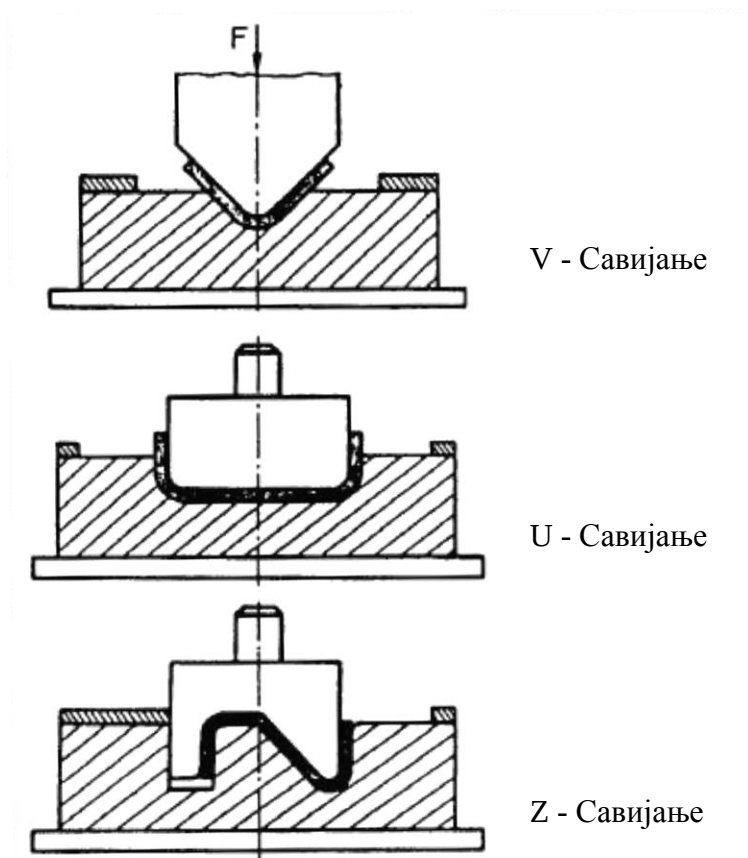
Конструкције алата за савијање на пресама могу бити веома различите :

- Са вођицама или без вођица;
- Са придрживачем или без њега;
- Са каљеним или некаљеним сегментима;
- Са скидачем или без њега;
- Са избацивачем или без избацивача,

што све зависи од врсте предмета обраде, величине серије и других фактора. Алати за савијање су веома слични алатима за просецање и пробијање, имају горњу и доњу плочу, стубно вођење и сл.

2.1.1 Угаоно савијање

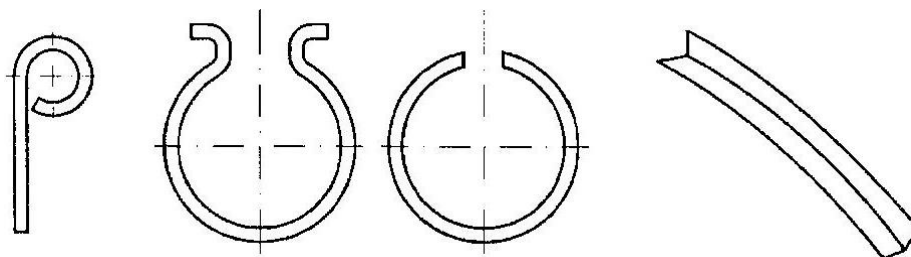
Угаоно савијање са универзалним алатима се врши на универзалним пресама, или на специјалним пресама за профилно савијање, примењује се за израду делова великих дужина. Дужина која се може обликовати овим принципом је до неколико метара. С обзиром на облик и број места савијања, може бити, једноугаоно савијање, двоугаоно савијање или вишеугаоно савијање. Често се за једноугаоно савијање користи симбол V, а за двоугаоно савијање се користи симбол U, такође је у примени и Z савијање. На слици 2.3 приказани су основни видови угаоног савијања, V, U и Z савијање.



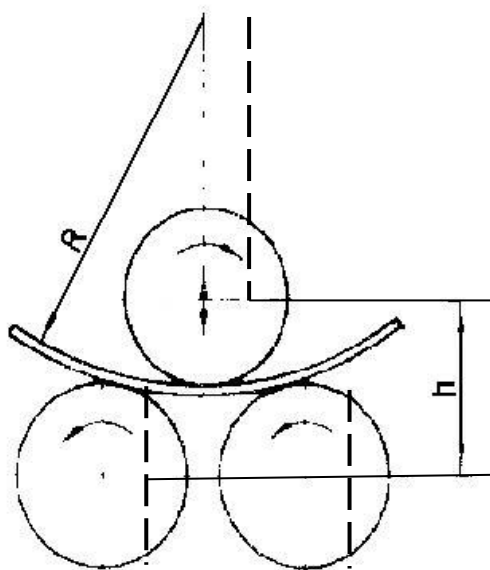
Слика 2.3— Основни видови угаоног савијања (V, U, и Z – савијање)

2.1.2 Кружно савијање

Кружно савијање се најчешће врши без алата, улогу алата преузимају ваљци машине и величина радијуса савијања, регулише се дефинисањем висине h трећег ваљка у односу на доња два (слика 2.5). Пре почетка савијања неопходно је извршити одређене припреме почетка припремка за улаз међу ваљке, савијање почетка се врши на специјалним машинама. Савијање ваљцима се примењује за израду котлова, цилиндара, резервоара, за израду уских профилисаних делова, савијања крајева лима и др. На слици 2.4 приказани су примери кружног савијања.



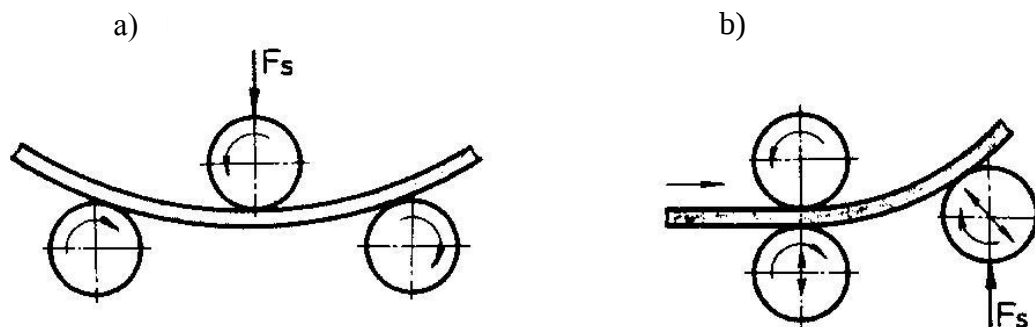
Слика 2.4 – Комади добијени кружним савијањем



Слика 2.5 – Савијање ваљцима

Понекад се у терминологији користи и назив слободно савијање, при чему се подразумева савијање без истовременог затезања, као и обично савијање без завршног јачег сабијања (понављања, калибрисања) материјала. Шема кружног савијања лимова помоћу ваљака приказана је на слици 2.6, примењује се, углавном за израду цилиндричних делова већих пречника (добоша, резервоара) [1]. На слици се види да постоје две могућности израде оваквог савијања. У првом случају (а) средњи ваљак има улогу притискивача и он може мењати свој положај по висини, док се друга два ваљка окрећу око својих оса. У другом случају (б) притискујући ваљак је крајњи, тј. он има

ексцентричан положај. Први случај се примењује за дебље лимове, преко 2 mm, док се за тање лимове примењује први случај.

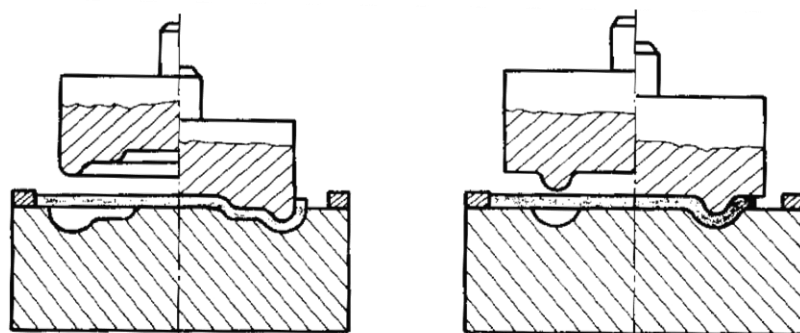


Слика 2.6 – Шема различитих могућности кружног савијања помоћу ваљака

2.1.3 Остали видови савијања

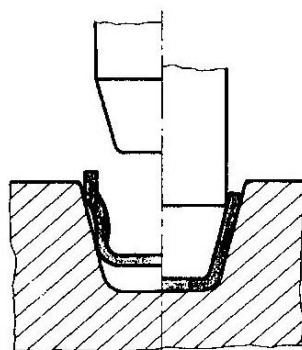
Поред поменутих савијања у претходном тексту, постоји и други низ операција које по својим поступцима савијања припадају групи савијања. На слици 2.7 приказани су само неки од таквих примера савијања. Број операција савијања за израду неког дела зависи од његове конфигурације, жељене тачности, обима, и осталих услова производње. На пример, сложенији облик могуће је добити у неколико операција применом простијих алата, или пак у једној операцији помоћу сложенијих алата. Којим поступком ће се приступити при изради жељеног комада у конкретном случају зависи од низа технолошко – економских и других околности.

Савијање делова из жице и релативно уских трака има велику примену у изради делова такозване металне галантерије. То су делови вишесеријске и масовне производње, па се израђују на специјалним аутоматским машинама са више покретних обликача [3].



Профилисање савијањем

Израда жљеба савијањем

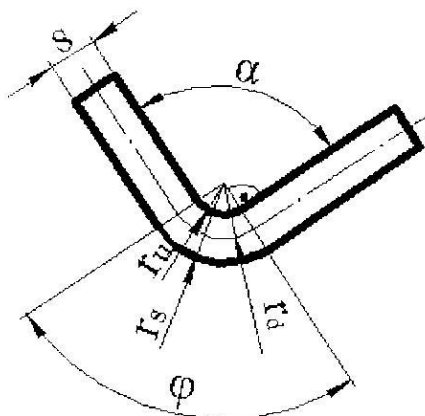


Калибрација

Слика 2.7 – Примери осталих видова савијања

2.2 Положај неутралног слоја

На једном месту по дебљини лима постоји слој материјала који се при савијању нити издужује нити скраћује. Тај слој се назива неутрални слој. Код предмета обраде већих ширина уместо слоја, довољно је да се у репрезентативном пресеку дефинише неутрална оса, то је линија која не мења своју дужину током савијања. На слици 2.8 приказани су параметри у савијеној зони.



Слика 2.8 – Параметри у савијеној зони

Где су:

$$\varphi^\circ = 180 - \alpha^\circ$$

$$\alpha^\circ = 180 - \varphi^\circ$$

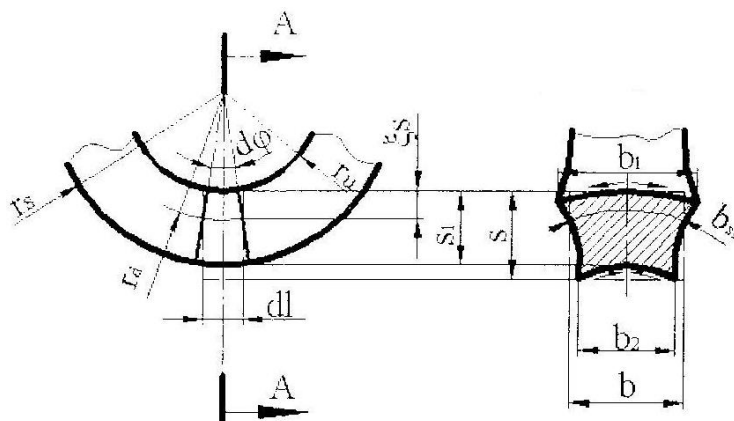
φ - угао савијене зоне

α - угао савијања

Конструктивни цртеж савијеног комада нам служи за одређивање развијене или почетне дужине елемената. Савијени комад се састоји из равних кракова и делова савијених под одређеним радијусом, што значи да је почетна дужина комада једнака дужини неутралне линије. При томе постоји разлика између неутралне осе напона и

неутралне осе деформације. Полупречник неутралне напонске линије, одређује радијус влакна савијеног комада у коме нема напона. Али, влакно које није претрпело деформацију не поклапа се са неутралним напонским влакном. Полупречник кривине неутралног влакна деформације се означава са r_d и ова величина служи за одређивање развијеног стања комада.

У правцу главне осе у зони истезања нема напона, али постоје деформације истезања ($+\varepsilon_2 = +\varepsilon_y$). У зони истезања у правцу исте осе нема другог главног напона, али постоји друга главна деформација притиска ($-\varepsilon_2 = -\varepsilon_y$). Због тога се правоугаони пресек дефинише и добија облик трапезоида слика 2.9.



Слика 2.9 – Елемент запремине код савијања

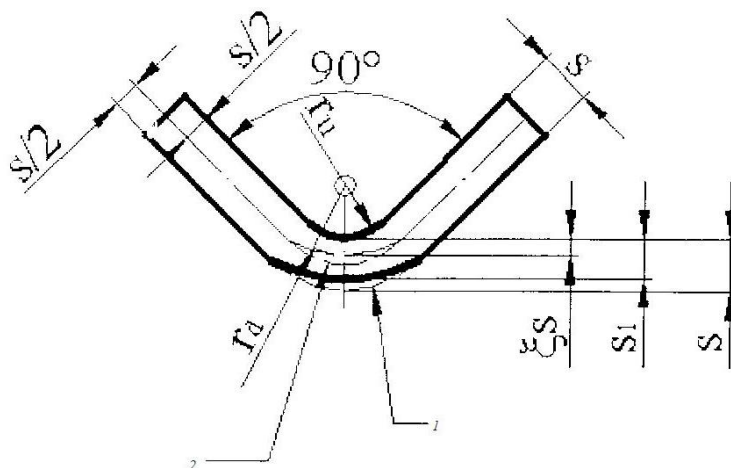
Поред деформације које се јављају у зони савијања долази до смањивања дебљине комада. У том случају неутрална линија деформације се код савијања преко мањих радијуса помера ка центру кривине.

Полупречник кривине неутралне линије деформације се израчунава из једнакости запремине комада пре и после савијања слика 2.10.

Где су на слици:

Под 1 – одступање по дебљини материјала;

Под 2 – положај неутралне линије деформације.



Слика 2.10 – Неутрална линија деформације

Запремина комада пре савијања

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

Где је:

b – почетна ширина комада;

s – почетна дебљина материјала;

dl – елементарна дужина посматраног елемента, док је запремина после савијања:

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

Где је:

s_1 – дебљина савијеног комада;

r_u - унутрашњи радијус савијања;

r_s - спољашњи радијус савијања;

$d\varphi$ – елементарни угао савијања,

изједначавањем запремине пре и после савијања, добија се:

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

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

$$dl = r_d \cdot d\varphi$$

па је:

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

односно:

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

Ако је:

$$r_s = r_u + s_1 = r_u + m \cdot s$$

долази се до:

$$r_d = \left(\frac{r_u}{s} + \frac{m}{2} \right) \cdot s \cdot m \cdot n \quad 2.4$$

Услед померања неутралне линије деформације ка центру кривине (при савијању преко малих радијуса), полупречник кривине се може записати и у облику:

$$r_d = r_u + \xi \cdot s \quad 2.5$$

Што доводи до коначног обрасца за полупречник неутралне линије деформације:

$$r_d = \left(\frac{r_u}{s} + \frac{m}{2} \right) \cdot s \cdot m \cdot n = r_u + \xi \cdot s \quad 2.6$$

Коефицијент $m = s_1/s$ (однос дебљине савијеног комада и почетне дебљине материјала), зависи од односа r_u/s . За савијање челика са (0.1 – 0.2) % С под углом од 90 степени коефицијент m има следеће вредности (табела 2.1).

Табела 2.1 – Вредности коефицијента m

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

Коефицијент $n = b_{sr}/b$ (однос средње ширине савијеног комада и почетне ширине) зависи од односа b/s . За исте услове савијања као у претходном примеру коефицијент n има вредности као у табели 2.2.

Табела 2.2 – Вредности коефицијента n

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

Код већине конкретних случајева савијање ширина је већа од дебљине комада, па се може узети $n \approx 1$.

Коефицијентом ξ се одређује величина померања неутралне линије деформације ка центру кривине. Из обрасца 2.6 узимајући $n \approx 1$ следи:

$$\xi = \frac{r_d - r_u}{s} = \frac{\left(\frac{r_u}{s} + \frac{m}{2} \right) \cdot s \cdot m - r_u}{s} = \frac{m^2}{2} - \frac{r_u}{s} \cdot (1 - m) \quad 2.7$$

Просечне вредности коефицијента ξ за метале су наведене у табели 2.3.

Табела 2.3 – Просечне вредности коефицијента ξ за метале

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

Пошто се зна да је смањење дебљине савијеног комада различито у различитим пресецима (најмања дебљина је у средини што је приказано на слици 2.2), па ће и

полупречник неутралне линије деформације имати различите вредности. Разна испитивања су показала да неутрална линија има облик параболе, која у средини има полупречник $r_d = r_u + \xi \cdot s$, а на крајевима $r_o = r_u + 0.5 \cdot s$.

Код практичних прорачуна развијене дужине, ова парабола се надомешта кружним луком полупречника r_d .

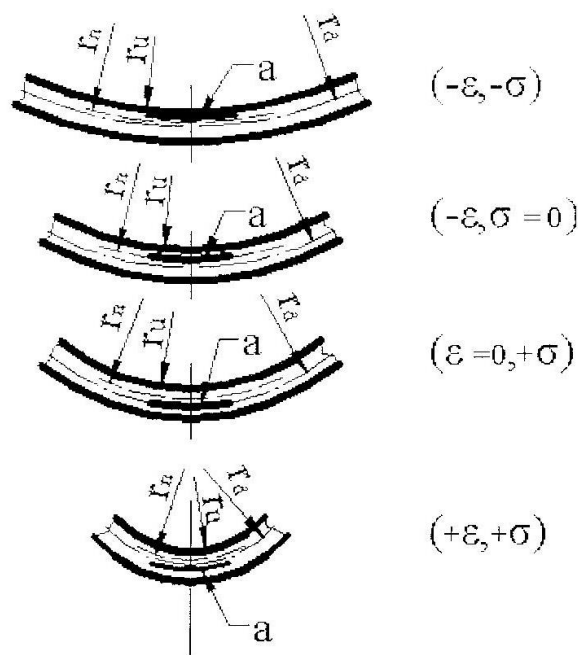
Приликом упоређивања полупречника неутралне линије деформације и полупречника кривине неутралне линије напона долазимо до закључка да је:

$$r_d = r_u + \xi \cdot s < r_n = \sqrt{r_s \cdot r_u} \quad 2.8$$

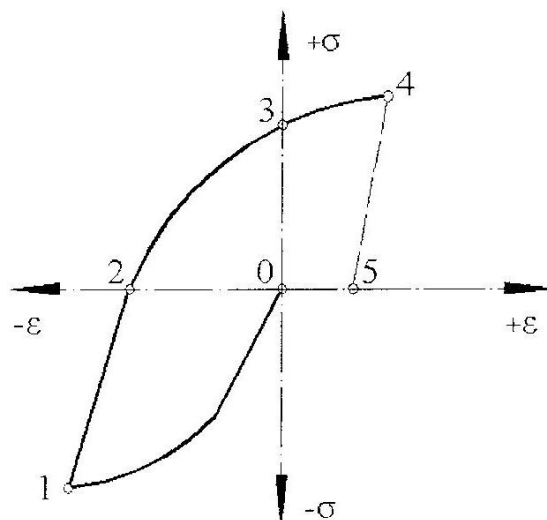
Неподударање неутралне линије деформације и неутралне линије напона објашњава се појавом пластичне хистерезе, приказано на сликама 2.11 и 2.12 [3].

Ако се посматра влакно „а“ које се налази непосредно изнад неутралне линије пре почетка савијања у овом влакну нема ни напона ни деформације.

У тачки 1 је ово влакно оптерећено на притисак и услед тога је краће него на почетку. Са смањењем унутрашњег радијуса савијања r_u неутралне линије напона и деформације се померају ка центру кривине. Тако у тачки 2 у влакно „а“ нема напона (јер неутрална напонска линија пролази кроз то влакно, па је $\sigma = 0$), док у њему постоје деформације сабијања ($-\varepsilon$), јер је влакно краће него на почетку савијања. Тачка 3 је карактеристична по томе што се предзнак напона у влакно „а“ променио и сад је $(+\sigma)$, а влакно поново има своју почетну дужину, тј нема деформације ($\varepsilon = 0$) и неутрална деформациона линија пролази кроз влакно „а“. Напон и деформација у тачки 4 одговарају завршетку савијања $(+\varepsilon, +\sigma)$. Тачка 5 одговара стању растерећења. У влакно „а“ нема напона, али остаје трајна пластична деформација издужења. Из изложеног се види да се пластична хистереза савијања огледа у томе што се неко влакно у току самог процеса савијања деформише и на притисак и на истезање.



Слика 2.11 – Пластична хистереза

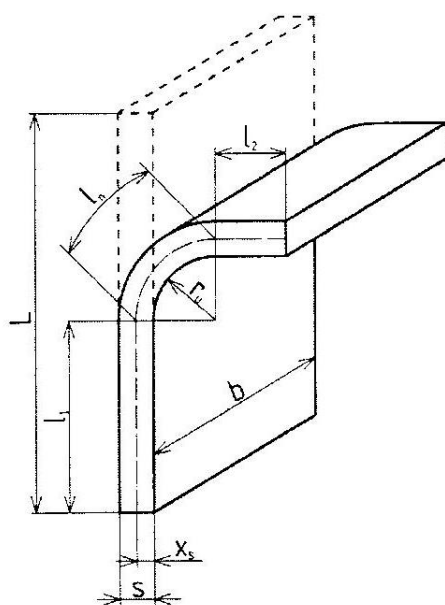


Слика 2.12 – Графички приказ промене напона и деформације у току савијања

2.3 Одређивање развијене дужине

Ако се зна положај неутралног слоја може се одредити почетна дужина несавијеног комада, јер је тај положај и одређен на основу претпоставке да се дужина неутралног слоја при савијању не мења. Почетна дужина комада једнака је збиру дужина несавијених делова (ван зоне савијања).

Примена овог савијања дата је на следећем примеру (слика 2.13). Постоји једна савијена зона са углом φ , у којој је дужина неутралне осе l_n и две несавијене зоне дужина l_1 и l_2 . Дужина развијеног стања је L [4].



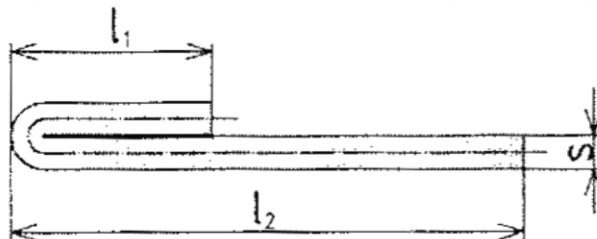
$$L = l_1 + l_2 + l_n$$

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

Слика 2.13 – Принцип одређивања развијене дужине

За карактеристичне облике савијања постоје готови изрази за израчунавање дужине развијеног стања. На пример за савијање са потпуним додиривањем кракова (Слика 2.14) приближно се одређује развијена дужина L према изразу:

$$L \approx l_1 + l_2 - 0.43s \quad 2.9$$

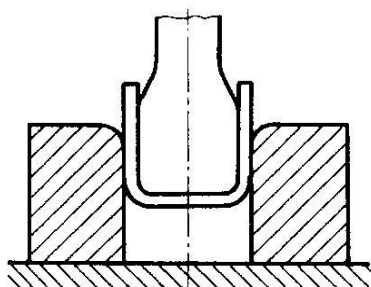


Слика 2.14 – Пример савијања са превијањем

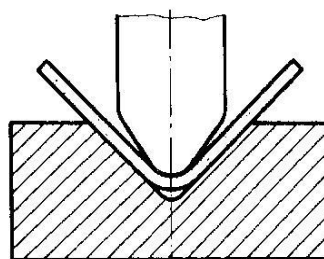
2.4 Анализа угаоног савијања

Код угаоног савијања деформација је локализована тј. ограничава се само на зони савијања. Основне технолошко – конструкционе карактеристике ове операције су: полупречник и угао савијања [1].

Алат је отворен ако бочне стране матрице нису закошене, тако да не долази ни до каквог јачег налегања лима на њих. Притом се не користи ни противдржач (слика 2.15). У противном алат је затворен (слика 2.16).



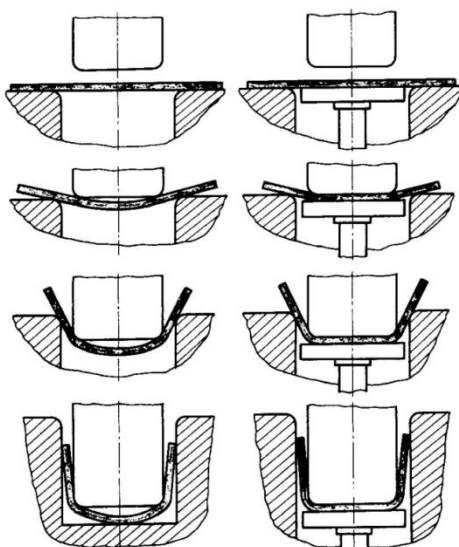
Слика 2.15. – Слободно савијање у отвореном алату



Слика 2.16. – Слободно савијање у затвореном алату

2.4.1. Анализа двоугаоног савијања

Код двоугаоног савијања могу се уочити карактеристичне фазе процеса, оне највише зависе од тога да ли се изводи као слободно, или са противдржачем лима. На слици 2.17 приказан је шематски приказ ових односа. Важно је напоменути да би савијање без противдржача, поред разлике повећане нетачности услед евентуалног клизања дела, захтевало и знатно већу силу завршног калибрисања ради поравнања савијеног средњег дела. Наравно треба имати у виду да је примена другог случаја са противдржачем у великој мери скупља метода.

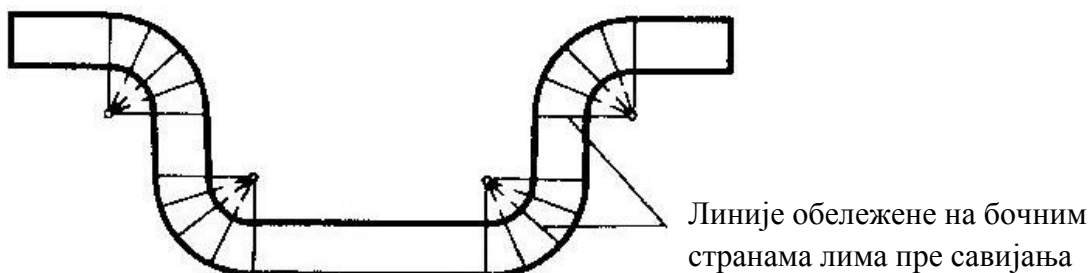


Слика 2.17 – Карактеристичне фазе процеса двоугаоног савијања : а) без противдржача, б) са противдржачем

2.5 Деформације при савијању

Мада се при савијању мора остварити пластична деформација, важно је знати да се она не појављује у почетној фази. Осим тога, често је и на крају савијања, а пре растеређења, удео еластичне деформације у укупно оствареној фази савијања знатан. На основу овога може се рећи да читав процес савијања карактеришу еластично – пластичне деформације. Поменуте деформације, односно одговарајући напони, имају различит карактер са сваке стране лима који се савија, јер је слој материјала са стране савијача изложен притискивању, а спољашња страна затезању. Неутрални слој се налази између ова два слоја, чија се дужина у односу на првобитну не мења услед савијања. При разматрању шематских приказа обично се говори о неутралној оси.

Величине уздужних деформација расту идући од неутралног слоја ка спољним површинама, где достижу максималне износе. Истраживања су показала да се у случају савијања може без веће грешке применити такозвана хипотеза равних пресека према којој пресеци управни на раван лима пре савијања остају такви и после њега, мењајући само своју оријентацију у току процеса (слика 2.18) [1].



Слика 2.18 – Задржавање управности положаја пресека нормалних на површину лима при савијању

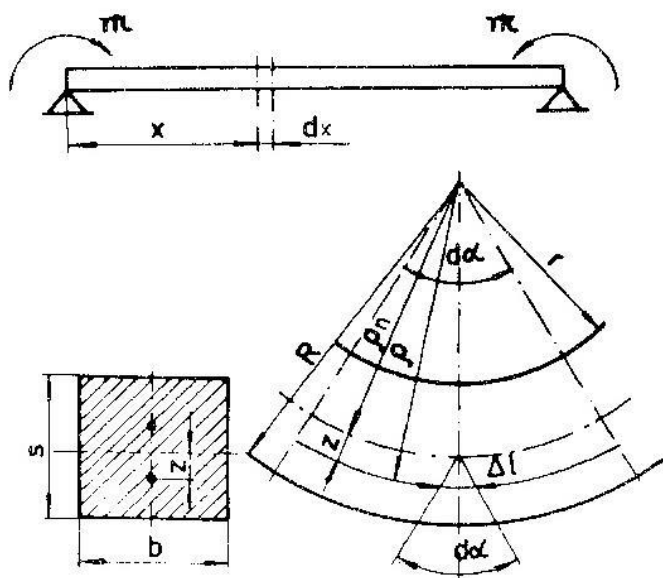
На месту савијања може доћи под одређеним условима до јаког деформисања дела, тј. до промене његовог попречног пресека. Услед тога неутрални слој неће пролазити кроз геометријску средину пресека већ ће се померити за одговарајући износ ка притиснутој зони.

Посматрајући елемент носача дужине dx , оптерећен моментима савијања, могу се уочити две зоне деформације. Испод неутралне линије јавља се истезање, а са унутрашње стране неутралне линије јавља се сабијање. Јединична деформација се добија посматрањем промене дужине неког влакна материјала на одстојању z од неутралне линије [3].

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

или

$$\varepsilon = \frac{\rho d\alpha - \rho_n d\alpha}{\rho_n d\alpha} = \frac{\rho - \rho_n}{\rho_n}$$



Слика 2.19 – Деформације при савијању

Једначина деформација код савијања може се изразити преко одстојања влакна од неутралне линије z и полупречника кривине влакна и полупречника кривине неутралне линије у облику:

$$\varepsilon = \frac{z}{\rho_n} = \frac{\rho - \rho_n}{\rho_n} \quad 2.10$$

Из израза 2.10 јасно је да се у различитим влакнима у материјалу остварује у току савијања различита деформација у зависности од њиховог одстојања од неутралне линије. У обради метала деформисањем најзначајније су максималне вредности деформација које се јављају при савијању [3]. При максималном растојању влакна од неутралне линије настаје максимална вредност деформације, тј за $s/2$ се добија

$$\varepsilon_{max} = \frac{s/2}{\rho_n} = \frac{s}{2\rho_n} = \frac{R - \rho_n}{\rho_n} = \frac{\rho_n - r}{\rho_n} \quad 2.11$$

где је :

s – дебелина материјала;

R – спољни радијус савијања;

r – унутрашњи радијус савијања;

ρ_n – радијус савијања неутралне линије.

У зависности од врсте и величине напона који се јављају при савијању носача, као и величине редукованог полупречника кривине, разликујемо две врсте савијања и то:

- Савијање у еластично – пластичном подручју;
- Чисто пластично савијање.

Савијање у еластично – пластичном подручју слика 2.20 спада у проблем линеарног напонског стања.

Стварни напон који се јавља у носачу лежи у интервалу:

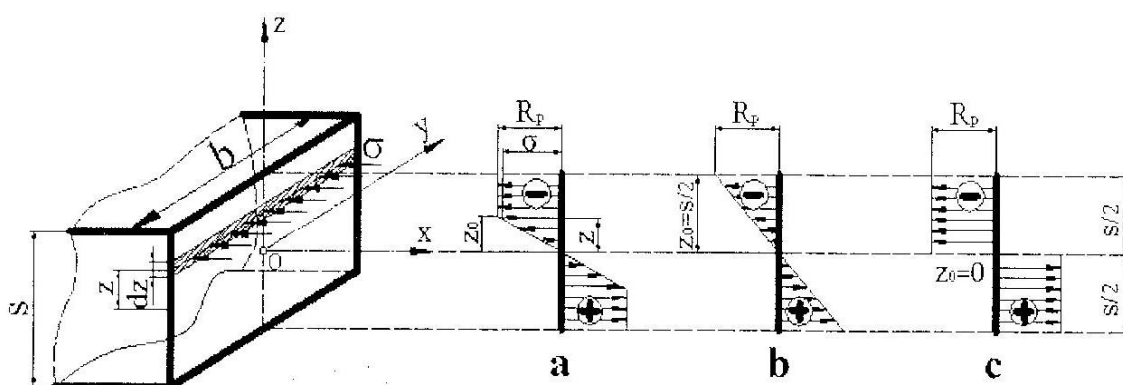
$$0 < k < k_m \quad 2.12$$

док се редуковани полупречник кривине налази у интервалу:

$$5 \leq r_r \leq 200 \quad 2.13$$

При томе могу наступити следећи случајеви:

- а. Језгро носача је до висине z_0 оптерећено еластично, а изнад те висине до крајних влакана пластично (слика 2.20 а).

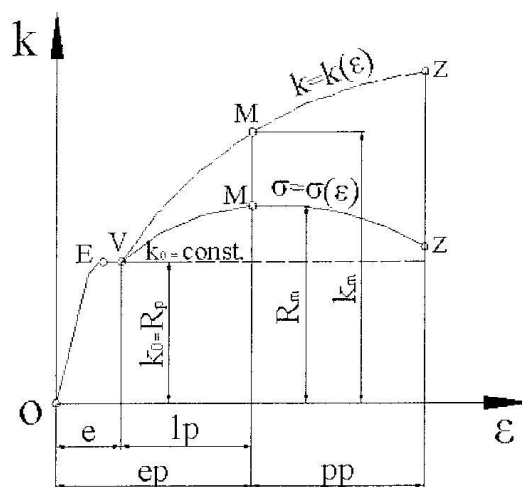


Слика 2.20 – Напони код савијања у еластично – пластичном подручју

С обзиром да је језгро носача оптерећено еластично, а слојеви ближи крајним влакнима пластично, то се ова врста оптерећења и означава као еластично – пластично савијање (слика 2.21) [2].

- b. Напон је директно пропорционалан растојању влакана од неутралне осе (слика 2.20 б), тако да максимална вредност напона не прелази вредност напона на граници развлачења, ова врста оптерећења спада у линеарно – пластично подручје.
- c. Напон је по целом пресеку носача константан и једнак напону на граници течења R_p (слика 2.20 c). Под претпоставком да нема очвршћивања, односно да је материјал идеално пластичан, ова врста се своди на савијање у еластичном подручју.

Чисто пластично савијање у зависности од ширине носача b посматра се као проблем просторног напонског, или просторног деформационог стања. До чисто пластичног савијања се долази приликом савијања преко малих радијуса.



Слика 2.21 – Разграничавање напонско – деформационих подручја

Где је :

- e – еластично подручје савијања;
- lp – линеарно пластично подручје савијања;
- ep – еластично – пластично савијање;
- pp – чисто пластично савијање.

2.6 Напони и моменти савијања

Из услова равнотеже момената спољашњих и унутрашњих сила добија се релација која даје везу између момената спољашњих сила и напона у радном комаду.

$$M = \int z \cdot dF_x = \int_A z \cdot \sigma \cdot dA \quad 2.14$$

где су :

M – момент спољашњих сила;

Z – растојање тежишта посматраног елемента од неутралне осе;

σ – напон у посматраном елементу

dA – елемент површине.

2.6.1 Моменти унутрашњих сила

Код савијања у еластично – пластичном подручју, пошто су у овом случају обично у питању велике ширине предмета обраде, деформације се по ширини могу занемарити, па се проблем своди на равно напонско – деформационо стање. Код ове врсте савијања уочавају се две зоне (слика 2.20). Језгро носача до одређене висине ($2z_0$) се дефинише еластично (зона еластичних деформација). Док су, спољни слојеви предмета обраде, висине $2\left(\frac{s}{2} - z_0\right)$ деформисани пластично (зона линеарне пластичне деформације). Дијаграм напона (слика 2.20 b) је нацртан упрошћено и једнак је напону на граници течења ($R_p = const.$). Подразумева се да се овом претпоставком уноси извесна грешка у прорачун, јер се занемарујући ефекти очвршћивања тј. реалним металима приписује својство идеално пластичних материјала.

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

$$M = 2 \int_0^{z_0} z \cdot \sigma \cdot dA + 2 \int_{z_0}^{s/2} z \cdot \sigma_v \cdot dA \quad 2.15$$

Како σ (који се креће у границама $0 \leq \sigma \leq R_p$) представља напон у ма ком елементу површине у интервалу $0 \leq z \leq z_0$, то се према слици 2.20a може представити однос:

$$\sigma : R_p = z : z_0 \quad \text{или} \quad \sigma = R_p \cdot \frac{z}{z_0} \quad 2.16$$

Па је:

$$M = R_p \left[\frac{2}{z_0} \cdot \int_0^{z_0} z^2 \cdot dA + 2 \int_0^{z_0} z \cdot dA \right] \quad 2.17$$

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

$$w = \frac{2}{z_0} \cdot \int_0^{z_0} z^2 \cdot dA = \frac{2}{z_0} I \text{ где је } I = \int_0^{z_0} z^2 \cdot dA - \text{аксијални момент инерције}$$

Други члан представља статички момент пластично деформисаног дела (висине $s-2z_0$) у односу на исту осу:

$$S = 2 \int_{z_0}^{s/2} z \cdot dA$$

Момент савијања у еластично – пластичном подручју се може записати као:

$$M = R_p \left[\frac{2}{z_0} \cdot \int_0^{z_0} z^2 \cdot dA + 2 \int_{z_0}^{s/2} z \cdot dA \right] = R_p (W + S) \quad 2.18$$

За правоугаони пресек важи следеће:

$$dA = b \cdot dz$$

$$W = \frac{2}{z_0} \int_0^{z_0} z^2 \cdot dA = \frac{2 \cdot b}{z_0} \int_0^{z_0} z^2 \cdot dz = \frac{2}{3} \cdot b \cdot z_0^2 \quad 2.19$$

$$S = 2 \int_{z_0}^{s/2} z \cdot dA = 2b \int_{z_0}^{s/2} z \cdot dz = b \left[\frac{S^2}{4} - z_0^2 \right] \quad 2.20$$

Када се уврсти ова вредност у образац 2.18, добија се момент савијања правоугаоног пресека у облику:

$$M = R_p [w + s] = R_p \cdot b \left[\frac{2}{3} z_0^2 + \frac{s^2}{4} - z_0^2 \right] = \frac{R_p \cdot b}{12} \cdot (3s^2 - 4z_0^2) \quad 2.21$$

Висина еластично деформационог дела се може израчунати на основу Хуковог закона:

$$R_p = E \cdot \varepsilon_0$$

За дефиницију се користи образац 2.18 :

$$\varepsilon_0 = \frac{z_0}{r_n}, \text{ што даље даје :}$$

$$z_0 = \varepsilon_0 r_n = \frac{R_p \cdot r_n}{E} \quad 2.22$$

Уношењем ове вредности у образац 2.21 добија се :

$$M = \frac{R_p \cdot b}{12} \cdot \left[3s^2 - \left(\frac{2 \cdot R_p \cdot r_n}{E} \right) \right] \quad 2.23$$

Односно користећи образац $r_r = \frac{r_n}{s}$, момент савијања се може написати и помоћу редукованог полупречника кривине:

$$M = R_p \frac{b \cdot s^2}{12} \left[3 - \left(\frac{2 \cdot R_p \cdot r_r}{E} \right) \right] \quad 2.24$$

Код савијања у еластично – пластичном подручју ($5 \leq \rho_r \leq 200$) други члан у загради је веома мали, па се код практичних прорачуна може занемарити. На овај начин је уведена претпоставка да је цели пресек оптерећен линеарном пластичном деформацијом (слика 2.20 с), па је момент савијања:

$$M = R_p \frac{b \cdot s^2}{12} \cdot 3 = R_p \frac{b \cdot s^2}{4} \quad 2.25$$

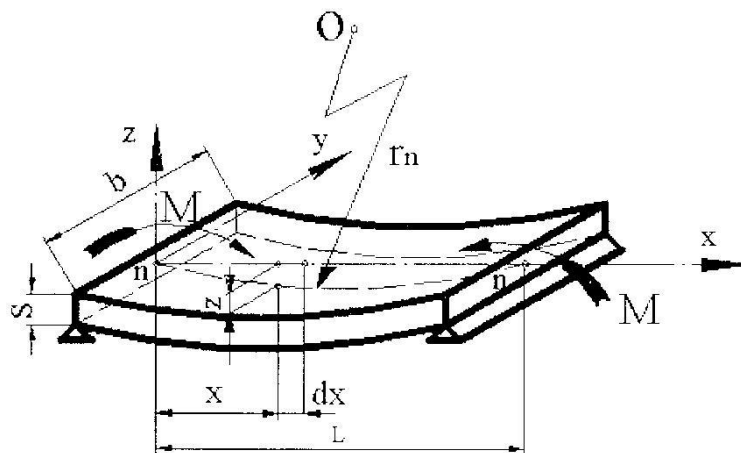
Са слике 2.20 може се закључити да се до истог израза може доћи коришћењем услова $z_0 = 0$ у обрасцу 2.21 па је у целом деформисаном пресеку статички момент једнак:

$$S = b \cdot \left(\frac{s^2}{4} - z_0^2 \right) = \frac{b \cdot s^2}{4} \quad 2.26$$

$$W = \frac{2}{3} b \cdot z_0^2 = 0 \quad 2.27$$

Момент савијања носача оптерећеног напонима у линеарно-пластичном подручју се рачуна по обрасцу:

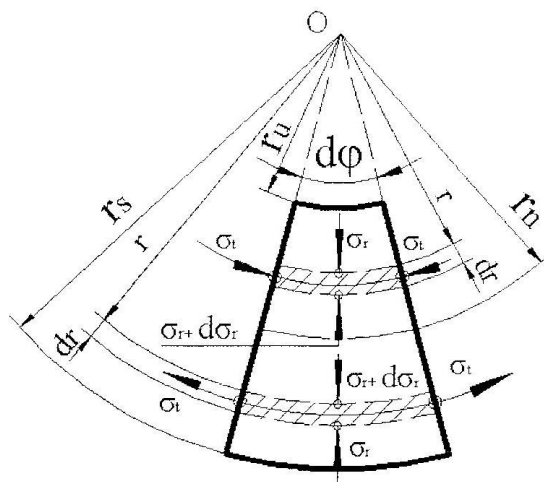
$$M = R_p \cdot S = 1.5 \cdot R_p \cdot W = R_p \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} \quad 2.28$$



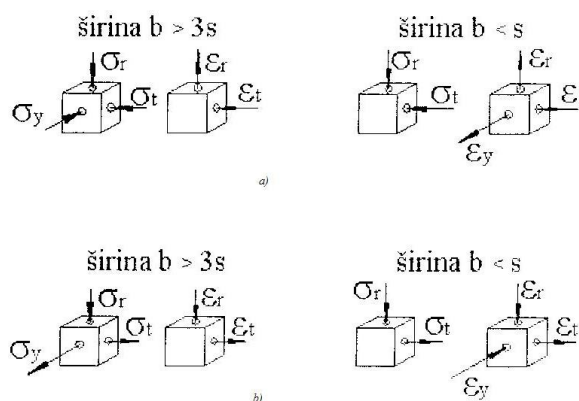
Слика 2.22 – Савијање носача

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

У подручју чисто пластичног савијања (преко малих радијуса $\rho_r < 5$) долази поред тога и до сабијањарадијалних слојева. Услед радијалне деформације(ϵ_r) дебелина комада се смањује. Радијални напони ($-\sigma_r$), настали као последицаописане појаве, по целом пресеку су негативног предзнака (напони притиска) [2].



Слика 2.23 – Шема оптерећења – чисто пластично савијање



Слика 2.24 – Напонско – деформациони односи – чисто пластично савијање а) зона притиска, б) зона истезања

Код обликовања савијања ширих комада ($b > 3$) занемарљива је промена ширине (услед великог унутрашњег отпора), тако да се може претпоставити да нема деформације у правцу ширине (ϵ_y). Да се сматра да нема смицајних напона ($\tau_{yz} = 0$), тада би се правци координатног система поклапали са главним правцем. У том случају су главни нормални напони и главне нормалне деформације:

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

$$\epsilon_1 = \epsilon_x = \epsilon_t ; \quad \epsilon_2 = \epsilon_y ; \quad \epsilon_3 = \epsilon_z = \epsilon_r ;$$

Посматрани случај ($\epsilon_s=0$ слика 2.25) се своди на проблем раванског деформационог стања, код кога су напони у правцу друге главне осе уједно и средњи нормални напони.

Код савијања уских комада ($b < s$) долази до појаве деформације облика попречног пресека, то значи да постоји деформација у правцу друге главне осе ($\epsilon_2 = \epsilon_y \neq 0$). С обзиром да је напон у правцу друге главне осе једнак нули ($\sigma_2 = \sigma_y = 0$), те се овај случај своди на проблем раванског напонског стања.

Даље ће се разматрати савијање широких комада правоугаоног пресека преко малих радијуса, што је најчешћи пример код технолошких процеса обраде савијањем алатима на пресама.

Равнотежна једначина пројекције свих сила у радијалном правцу ($\sum F_p = 0$) за јединицу ширине ($b = 1$), елемента посматраног комада се представљају према слици 2.23 у облику:

$$\sigma_r \cdot r \cdot d\varphi - (\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + dr) \cdot d\varphi + 2\sigma_t dr \sin \frac{d\varphi}{2} = 0 \quad 2.29$$

Ако за мале углове важи $\sin \frac{d\varphi}{2} \approx \frac{d\varphi}{2}$ и ако се цела једначина скрати са $-d\varphi$, тада је:

$$r \cdot d\sigma_r + \sigma_r \cdot dr - d\sigma_r \cdot dr - \sigma_t dr = 0 \quad 2.30$$

С обзиром да је $d\sigma_r dr \approx 0$ долази се до диференцијалне једначине посматраног елемента у облику:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0 \quad 2.31$$

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

$\sigma_r - \sigma_t = \beta k$, где је $\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.15$ за раванско деформационо стање па се то уврсти у образац 2.31, добија се:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\beta \cdot k}{r} = 0 \quad 2.32$$

Тада се интегрисањем ове диференцијалне једначине добија:

$$\int_0^{\sigma_r} d\sigma_r = -\beta \cdot k \int_{r_n}^r \frac{dr}{r} \quad 2.33$$

Из чега се добија образац за радијални напон у зони притиска:

$$\sigma_r = -\beta \cdot k \cdot \ln \frac{r}{r_n} \quad 2.34$$

С обзиром да је $\sigma_t = \sigma_r - \beta k$ добија се тангенционални напон за исту зону:

$$\sigma_t = -\beta \cdot k \left(1 + \ln \frac{r}{r_n} \right) \quad 2.35$$

Док је у зони истезања услов пластичног течења $\sigma_t - \sigma_r = \beta \cdot k$ и с обзиром на однос $\sigma_r < \sigma_v < \sigma_t$ и $\sigma_t = \sigma_{\max}$ односно $\sigma_r = \sigma_{\min}$, може се поставити:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\beta \cdot k}{r} = 0$$

или

$$\int_0^{\sigma_r} d\sigma_r = \beta \cdot k \int_{r_s}^r \frac{dr}{r}$$

Одакле добијамо израз за радијални напон у зони истезања:

$$\sigma_r = -\beta \cdot k \cdot \ln \frac{r_s}{r} \quad 2.36$$

А на основу: $\sigma_t = \sigma_r + \beta \cdot k$, и до тангенцијалног напона у истој зони:

$$\sigma_t = \beta \cdot k \left(1 - \ln \frac{r_s}{r} \right) \quad 2.37$$

Радијални напони на граници зона притиска и истезања (за $r = r_n$) морају бити једнаки (као континуална функција), што значи да је:

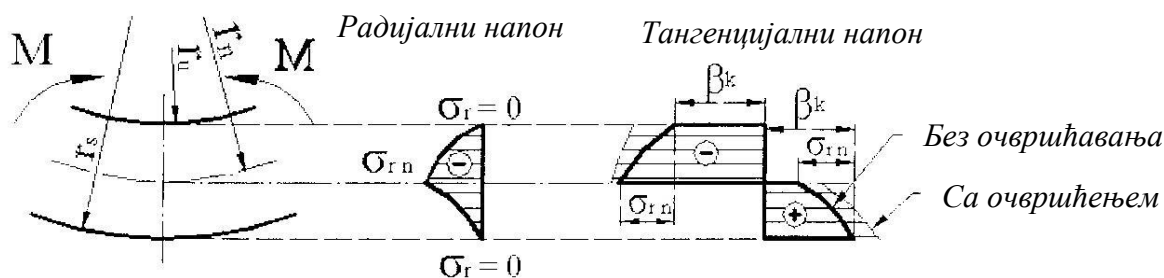
$$r_n \sigma_r = \sigma_{r_n} = -\beta \cdot k \cdot \ln \frac{r_n}{r_n} = -\beta \cdot k \cdot \ln \frac{r_s}{r_n}$$

Из чега добијамо образац за полупречник неутралне линије:

$$r_n = \sqrt{r_s \cdot r_n} \quad 2.38$$

Из обрасца 2.38 може се видети да код чистог пластичног савијања неутрална оса не пролази кроз средиште пресека, него се помера према центру кривине, и то утолико више уколико је мањи однос унутрашњег радијуса савијања и дебљине материјала (r_u/s).

Просторно напонско стање које се јавља код чистог пластичног савијања битно утиче на карактер деформације савијеног комада. За разлику од савијања у еластичном подручју, код пластичног савијања се повећава дужина савијеног комада, смањује његова дебљина, мења се облик попречног пресека и положаја неутралне линије.



Слика 2.25 – Промена напона код чистог пластичног савијања

Промена радијалних и тангенцијалних напона (обрасци 2.34 – 2.36) у интервалу $r_u \leq r_n \leq r_s$ (дебљини предмета обраде) могу се приказати графички (криве нацртане пуним линијама на слици 2.25).

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

$$M = b \cdot \left[\int_{r_n}^{r_s} \sigma_t \cdot r \cdot dr + \int_{r_u}^{r_n} \sigma_t \cdot r \cdot dr \right] \quad 2.39$$

За σ_t из првог интеграла се користи израз по обрасцу 2.17 а из другог по обрасцу 2.15, чијом се заменом у претходни израз добија:

$$M = b \cdot \left[\int_{r_n}^{r_s} \beta \cdot k \cdot \left(1 - \ln \frac{r_s}{r} \right) \cdot r \cdot dr - \int_{r_u}^{r_n} \beta \cdot k \cdot \left(1 + \ln \frac{r}{r_u} \right) \cdot r \cdot dr \right] \quad 2.40$$

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

Ако се ове вредности уврсте у израз за момент савијања, добија се:

$$M = \beta \cdot k \cdot b \left[\frac{r_n^2}{2} \ln \frac{r_s \cdot r_n}{r_n^2} + \frac{r_s^2 - 2r_n^2 + r_u^2}{4} \right] \quad 2.41$$

При чему се r_n може заменити обрасцем 2.38 тако да се момент савијања у чистом пластичном подручју може записати у облику:

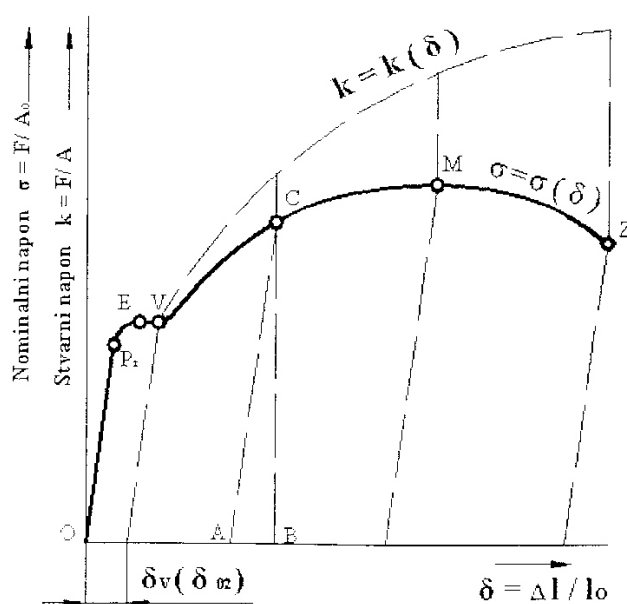
$$M = \beta \cdot k \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} \quad 2.42$$

Целокупни проблем (извођење образаца 2.34–2.37, за радијалне и тангенцијалне напоне и образац 2.42 за момент савијања) решаван је претпоставком да је специфични деформациони отпор константна величина (а не функција деформације).

3.0 Еластично исправљање савијених делова - повратност

Јасно је да сви материјали поседују одговарајући коефицијент еластичности. Због тога сваку пластичну деформацију прати и еластична. Последица ове појаве је промена димензија пластично деформисаног комада након растерећења. Ова појава је позната као повратност. Повратност се не јавља само код обраде лимова већ и код савијања шипки, штапова и жица било ког пресека. Да би се повратност боље разумела прво је дато објашњење природе пластичних деформација као и криве очвршћивања.

За анализу ове појаве, одређивање механичких особина и оцену пластичности коришћен је дијаграм истезања, који се добија истезањем пробне епрувете на кидалици. На овим машинама је могуће добити дијаграм зависности силе F као апсолутног издужења пробне епрувете.



Слика 3.1 –Дијаграм номиналних и стварних напона

У подручју малих деформација функција $\sigma = \sigma(\delta)$ је линеарног карактера, тако да до тачке P_r важи закон пропорционалности, који се може изразити једначином 3.1:

$$\frac{\sigma}{\delta} = \tan \alpha = E = \text{const} \quad 3.1$$

При повећању, оптерећења деформације су еластична све до тачке E, што значи да се пробна епрувета након растерећења враћа на првобитну дужину l_0 .

Напон на граници течења (R_p) представља почетак течења материјала. За границу течења узима се напон за границу течења који одговара трајној деформацији од 0,2 %. Према томе напон на граници течења се може изразити као:

$$\sigma_{02} = \frac{F_{02}}{A_0} \quad 3.2$$

Ако се пробна епрувета подвргла истезању до максималне силе F која одговара тачки C (слика 3.1), а затим се извршило растерећење. Тако да је:

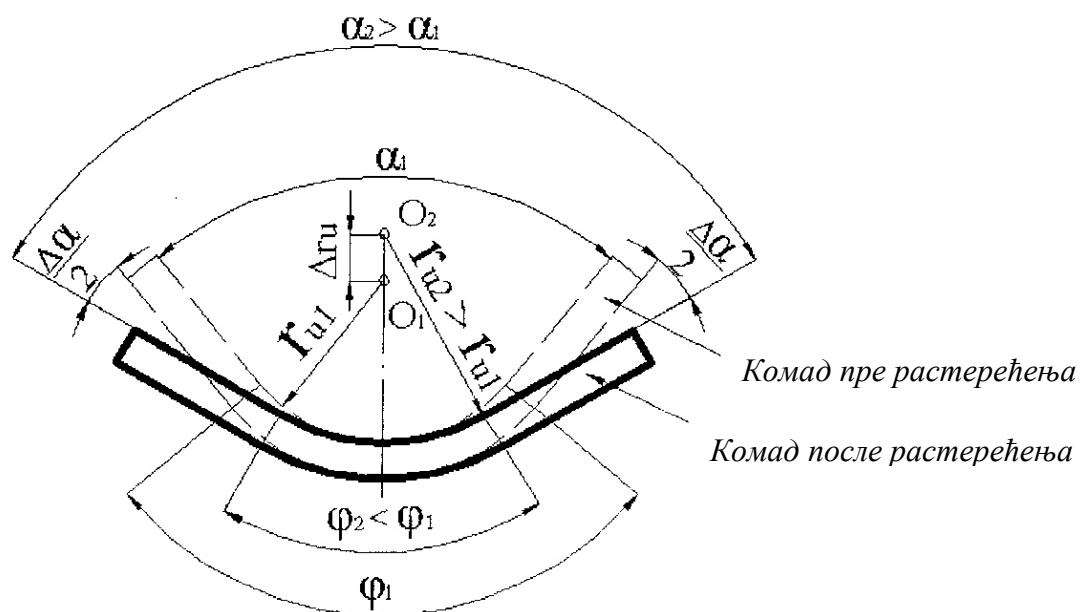
$\overline{CA}$ - линија растерећења;

$\overline{OB}$ - пластична деформација;

$\overline{AB}$ - еластична деформација;

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

Док се савијени део налази под оптерећењем (у алату), на њему се као последица пластичне деформације (e_{pl}) уочавају следеће карактеристичне димензије (слика 3.2):



Слика 3.2 – Еластично исправљање савијеног комада

- радијус савијања (r_{u1});
- угао савијања (α_1);
- угао савијене зоне ($\varphi_1 = 180 + \alpha_1$).

Када се комад растерети (извади из алата), долази до појаве еластичног исправљања, услед еластичне деформације (ε_{el}). Трајно деформисан комад има следеће димензије:

- радијус савијања ($r_{u2} = r_{u1} + \Delta r_u = r_{u1} + \overline{O_1O_2}$);
- угао савијања ($\alpha_2 = \alpha_1 + \Delta\alpha$);
- угао савијене зоне ($\varphi_2 = 180 - \alpha_1$).

Величина еластичног исправљања зависи од односа r/s .

Фактор еластичног исправљања се рачуна по обрасцу:

$$K = \frac{r_{u2} + \frac{s}{2}}{r_{u2} + \frac{s}{2}} \quad 3.3$$

У табели 3.1 приказане су вредности еластичног исправљања $\Delta\alpha(^{\circ})$ у зависности од врсте и дебљине материјала и односа r/s , када је угао савијања $\alpha = 90^{\circ}$.

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

Врста материјала	r / s	Дебљина материјала s (mm)		
		До 0,8	0,8	Преко 2
Челик Rm < 350 N/mm2 Месинг Rm < 350 N/mm2 Al,Zn	до 1	4	2	0
	1 – 5	5	3	1
	преко 5	6	4	2
Челик Rm = 40- 500 N/mm2 Месинг Rm = 40 – 500 N/mm2 Бронза	до 2	5	3	1
	1 – 5	6	4	2
	преко 5	8	5	3
Челик Rm > 55 N/mm2	до 1	7	4	3
	1 – 5	9	5	3
	преко 5	12	7	5

4.0 Обликовање лима дубоким извлачењем

Под појмом дубоко извлачење подразумева се такав вид обликовања при коме се од почетног недеформисаног, равног облика (развијене плоче, развијеног стања) добија тело непрекидне просторне конфигурације. Најчешће је то облик посуде отворене са једне стране, док са друге стране има затворено дно [4].

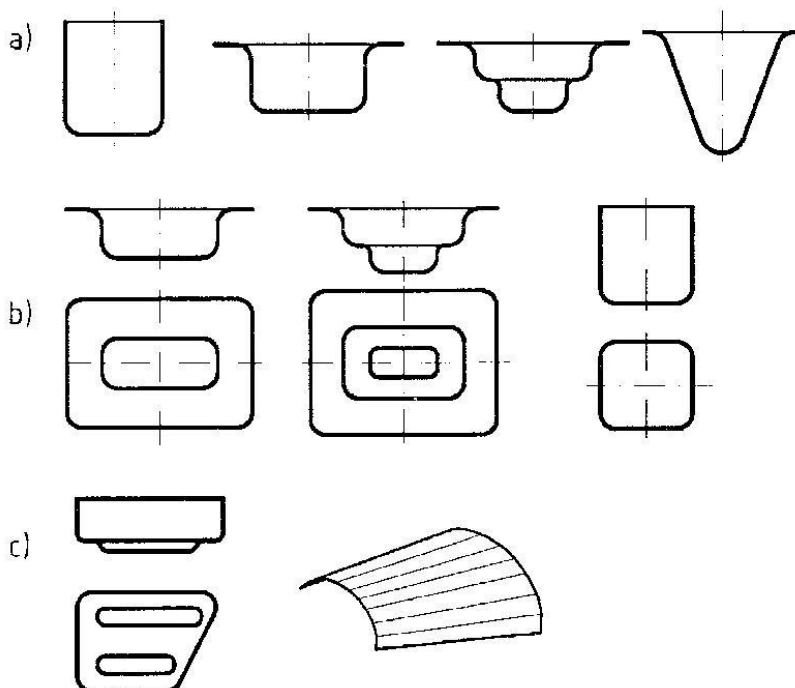
Обликовање лима дубоким извлачењем се најчешће врши у хладном стању, осим у посебним случајевима када се дати предмет мора загревавати (погоршани услови обраде – мала пластичност).

У зависности од дебљине лима током процеса обликовања могу се разликовати два поступка:

- 1) дубоко извлачење без промене дебљине лима (примењује се код танких лимова и има једно од доминантних места у индустрији прерада метала уопште);
- 2) дубоко извлачење са стањењем (примењује се код дебљих лимова, има карактеристике запреминске обраде и посебно се изучава).

Подела према геометрији готовог комада:

- a. „Чисто дубоко извлачење“ (извлачење шупљег цилиндричног тела са равним дном) и дубоко извлачење комада ротационе форме;
- b. Дубоко извлачење осталих делова правилног геометријског облика (тзв. кутијаста делови);
- c. Извлачење делова сложеног или тзв. „неправилног“ облика (нпр. делови каросерије аутомобила).



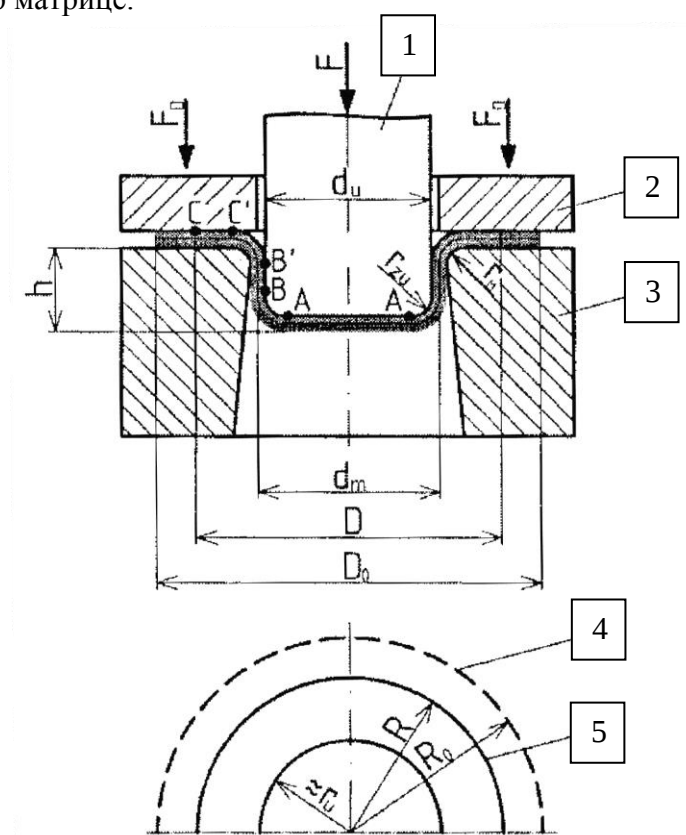
Слика 4.1 – Основни облици делова који се добијају дубоким извлачењем

4.1 Дубоко извлачење осносиметричних комада

Најчешћи геометријски облик за овај случај је цилиндрични комад са или без обода и са равним дном. Поступак обликовања је познат по термину „чисто дубоко извлачење“.

У односу на остале поступке (просецање, савијање) у овом процесу постоје три главна елемента алата и то: извлакач (најчешће преноси деформациону силу), матрица (прстен за извлачење) и држач лима, приказано је на слици 4.2.

Полазни комад се пре почетка процеса обликовања поставља на горњу површину матрице, најчешће има кружну контуру D_0 (слика 4.2). Тада се активира дејство држача који силом F_D притеже обод комада са циљем да спречи појаву набора. После тога извлакач главним дејством отпочиње обликовање комада све до потпуног пролаза кроз отвор матрице.



Слика 4.2 – Шема извлачења осносиметричног комада

Где су:

1. Извлакач;
2. Држач лима;
3. Матрица (прстен за извлачење);
4. Контура развијене плоче;
5. Спољна контура лима у приказаном тренутку извлачења.

Сила деформације се преноси преко чела – врха извлачења, где је главни отпор деформисања на ободу, с обзиром да прстенасту површину обода треба превести у цилиндричну. Уколико је сила држача сувише велика и постоје неповољни услови

трења, доћи ће до отежаног клизања или заустављања лима на ободу и разарања у критичном пресеку.

Критичан (носећи) пресек је најчешће изнад радијуса дна комада:

$$A \approx d_n \pi s \quad 4.1$$

Да би се добио жељени облик предмета обраде обликовањем, немогуће је извршити само у једној операцији, него је потребно две или више операција. Због тога у изразу 4.1 d_n означава номинални пречник комада за n-ту операцију. Са s је означена дебљина лима.

Најчешће се користе за ову обраду пресе двоструког дејства, које имају посебне погоне за дејство извлакача и дејство држача. Такође могу се користити и пресе једноструког дејства ако се догради пнеуматски, гасни или хидраулични цилиндар за обезбеђивање дејства држача (F_D).

4.2 Показатељи степена деформисања

У примени су различити показатељи који дефинишу степен деформисања извршеног дубоког извлачења. Код примене једнооперационог процеса извлачења то су следеће карактеристике, при чему је због једноставних ознака усвојено $d_1 = d$; $r_1 = r = d/2$:

а) Степен – однос извлачења:

$$\beta = \frac{D_o}{d} = \frac{R_o}{r} \quad ; \quad \beta > 1 \quad 4.2$$

б) Коефицијент извлачења:

$$m = \frac{d}{D_o} = \frac{r}{R_o} = \frac{1}{\beta} \quad ; \quad 0 < m < 1 \quad 4.3$$

в) Релативна деформација при извлачењу:

$$\varepsilon = \frac{D_o - d}{D_o} = 1 - m \quad 4.4$$

г) Природна деформација:

$$\varphi = \ln \frac{D_o}{d} \quad 4.5$$

Везе између појединих показатеља су:

$$m = \frac{d}{D_o} = 1 - \varepsilon = \frac{1}{e^\varphi} \quad 4.6$$

$$\beta = \frac{D_o}{d} = \frac{1}{m} = \frac{1}{1 - \varepsilon} = e^\varphi \quad 4.7$$

$$\varepsilon = 1 - m = \frac{\beta - 1}{\beta} = \frac{e^{\varphi} - 1}{e^{\varphi}} \quad 4.8$$

Ако се прекораче дозвољене вредности показатеља извлачења при обради, нпр. гранични степен извлачења β_{max} ; ($\beta > \beta_{max}$), доћиће до лома, односно доћиће до разарања на критичном месту комада.

Од ове величине наведених показатеља зависе:

- Величине напона и силе извлачења;
- Број потребних операција;
- Сила држања F_D и сл.

Треба напоменути још један показатељ, тзв. релативну дебљину лима:

$$s_r = \frac{s}{D_o} 100, \% \quad 4.9$$

4.3 Напони и деформациона сила извлачења

Деформациона сила је параметар потребан за избор машине и од практичног је значаја познавања њеног максималног интензитета, који се увек постиже у првој операцији извлачења. Да би се одредила та вредност потребно је познавати уздужни напон у цилиндричном омотачу комада, који представља и укупни напон извлачења (σ_u) [4].

$$F = \sigma_u \cdot A = \sigma_u d_1 \pi s \quad 4.10$$

$$\sigma_u = \sigma_r + \sigma_{trd} + \sigma_{trm} + \sigma_{sav} \quad 4.11$$

Напон σ_u сачињавају 4 основне компоненте:

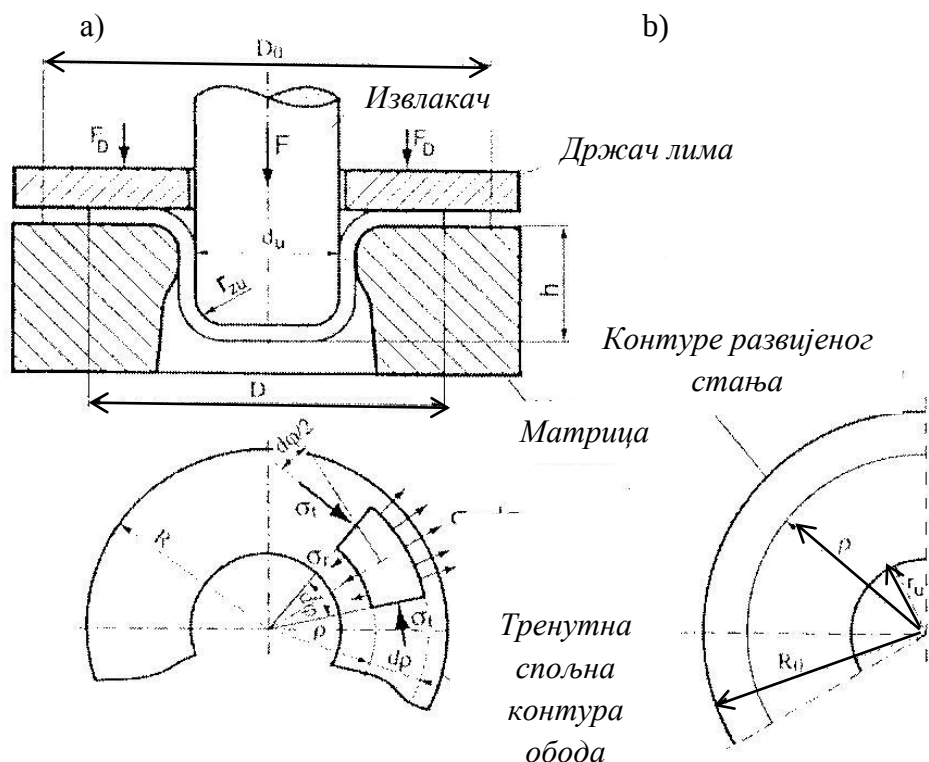
σ_r - радијални напон на ободу, који настаје при повлачењу обода ка централној зони комада. Директно је повезан са тангенцијалним напоном који изазива бочно савијање лима. Има највећу вредност, изнад 70% од σ_u .

σ_{trd} - део укупног напона који настаје услед трења на равном делу обода, између лима и матрице, односно држача и износи око 10% од σ_u .

σ_{trm} - напон који настаје услед савијања и исправљања лима при клизању преко заобљења ивице матрице и преласку у вертикални цилиндрични омотач комада. Вредност му је око 5% од σ_u .

Централни део процеса обликовања изводи се на ободу комада и заобљењу матрице под дејством два напона: тангенцијалног притисног и радијалног затежућег (слика 4.3). Поред сабијања лима, тангенцијални напон тежи да изазове наборе на ободу и то се спречава деловањем силе држања. Наиме, превелика сила држања и отежани услови трења на ободу доводе до преоптерећења комада и разарања у

критичном пресеку. Због тога се, поред правилног избора силе држања, трење на ободу максимално смањује (глатке површине, одговарајућа мазива).



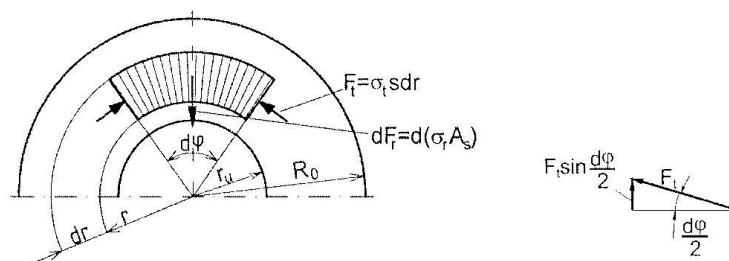
Слика 4.3 – Шема извлачења са деловањем напона на ободу

4.3.1 Дефинисање радијалног напона на ободу

На сликама 4.3 и 4.4 приказано је деловање силе на издвојени сегмент обода комада. F_t представља притискујуће дејство које узрокује тангенцијални напон. Док dF_r има затежуће дејство и настаје дејством радијалног напона σ_r , тангенцијални напон расте од ивице матрице ка спољашњој ивици обода где достиже максимум. Док радијални напон има потпуно супротан тренд, расте према ивици матрице (слика 4.3 десно).

На слици 4.4 приказано је деловања силе при раванском напонском стању, где се примењује услов равнотеже свих сила у вертикалном правцу. Усваја се позитиван смер надолу.

Површина на коју делује σ_t има правоугаони облик ($s \cdot dr$). Површина на коју делује σ_r је лучног облика ($A_s = sr d\varphi$).



Слика 4.4–Шема деловања напона на ободу

$$dF_r - 2F_t \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} = 0$$

$$d(\sigma_r \cdot r)sd\varphi = 2\sigma_t \cdot s \cdot dr \cdot \sin \frac{d\varphi}{2}$$

$$r \cdot d\sigma_r \cdot s \cdot d\varphi + \sigma_r \cdot dr \cdot s \cdot d\varphi = 2\sigma_t \cdot s \cdot dr \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} /: sd\varphi$$

$$s \text{ и } d\varphi \text{ су константне величине, а за мале углове важи: } \sin \frac{d\varphi}{2} = \frac{d\varphi}{2}$$

$$r \cdot d\sigma_r + \sigma_r \cdot dr = \sigma_t \cdot dr /: r$$

$$d\sigma_r = -(\sigma_r - \sigma_t) \frac{dr}{r} \quad 4.12$$

Поред претходног израза користи се и модификовани услов пластичности према максималном смицајном напону:

$$\sigma_{max} - \sigma_{min} = \pm \beta \cdot K$$

$$\sigma_r - \sigma_t = \beta \cdot K \quad 4.13$$

Ако се израз 4.13 примени у 4.12 добија се:

$$d\sigma_r = -\beta \cdot K \frac{dr}{r} \quad 4.14$$

$$\sigma_r = \int_{\sigma_r}^0 d\sigma_r = -\beta \int_{r_u}^{R_0} K \frac{dr}{r}$$

усваја:

$$K = \bar{K} = const. ; \quad \bar{K} = \frac{K_{R0} + K_{ru}}{2}$$

Уместо радијуса r_u може се користити номинални радијус комада $r_{k1} = d_1/2$.

$$\sigma_r = \beta \bar{K} \ln \frac{R_0}{r_{k1}} = \beta \bar{K} \ln \frac{D_0}{d_1} \quad 4.15$$

На основу досадашњих израза, препоручује се да се деформациона чврстоћа одређује узимајући у обзир чврстоће на спољашњем пречнику обода и унутрашњем, односно номиналном пречнику комада. Међутим, најчешће се вредност деформационе чврстоће $\bar{K}$ одређује као аритметичка средина чврстоћа на почетку обраде ($K_0 = R_p$) и на крају извлачења (K_1) према одговарајућој деформацији

$$\bar{K} \approx \frac{K_0 + K_1}{2} \quad 4.16$$

4.3.2 Напон услед трења на равном делу обода

Овакав напон настаје као последица трења на контактним површинама обода комада, држача дела матрице.

Сила трења на ободу:

$$F_T = \mu F_D \quad 4.17$$

Напон услед сила трења су две силе трења, јер делују на поменуте две контактне површине:

$$\sigma_{trd} = \frac{2\mu F_D}{d_1 \pi s} \quad 4.18$$

μ – коефицијент трења, најчешће $\mu = 0,1-0,15$

F_D - сила држача.

$$F_D = A_D \cdot q = \frac{D^2_0 - d^2_1}{4} \pi \cdot q \quad 4.19$$

A_D - површина држања

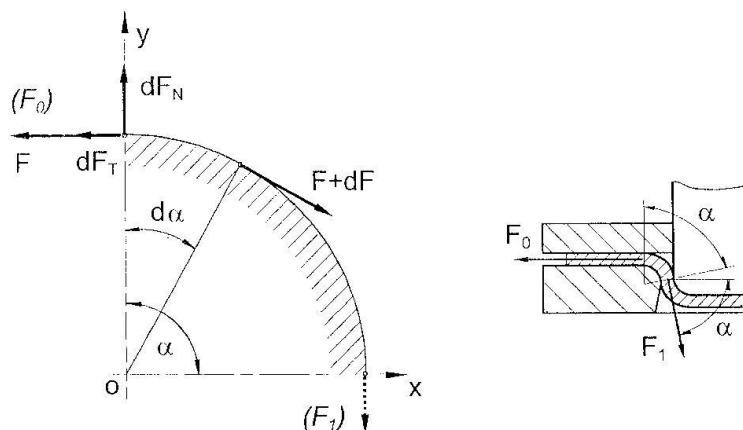
q - специфични притисак држања, најчешће $q=2-3$ Мпа

4.3.3 Напон услед трења на заобљену ивицу матрице

Сила извлачења услед напона на ободу (σ_r, σ_{trd}) која делује у радијалном правцу износи:

$$F_0 = A(\sigma_r + \sigma_{trd})$$

Због трења на ивици ова сила се увећава на силу F_1 (слика 4.5). До потребних односа се долази пројектовањем свих сила на вертикални и хоризонтални правац у зони угла $d\phi$.



Слика 4.5 – Силе у зони заобљења ивице матрице

Примењују се услови равнотеже за правце x и y.

$$\sum F_i^x = 0$$

$$-F - dF_T + (F + dF) \cos d\alpha = 0 \quad 4.20$$

$$\sum F_i^y = 0$$

$$dF_N - (F + dF) \sin d\alpha = 0 \quad 4.21$$

$dF_T = \mu \cdot dF_N$ - елементарна сила трења

Због мале вредности угла $d\varphi$ важи следеће:

$\sin d\varphi = d\alpha$; $\cos d\alpha = 1$; $dF \cdot d\alpha \approx 0$, па изрази 4.20 и 4.21 добијају облик:

$$-F - dF_T + F + dF = 0$$

$$dF_N - F - d\alpha = 0$$

$$dF_T = dF \text{ или } \mu \cdot dF_N = dF$$

$$dF_N = F \cdot d\alpha$$

Међусобним дељењем претходних једначина добија се:

$$\mu = \frac{dF}{F \cdot d\alpha} \rightarrow \frac{dF}{F} = \mu \cdot d\alpha ; \int_{F_0}^{F_1} \frac{dF}{F} = \mu \int_0^\alpha d\alpha ; \ln \frac{F_1}{F_0} = \mu \cdot \alpha$$

$$F_1 = F_0 \cdot e^{\mu \cdot \alpha} \quad 4.22$$

За

$$\alpha = \frac{\pi}{2} ; e^{\mu \frac{\pi}{2}} \approx 1 + \mu \frac{\pi}{2} = 1 + 1,6 \cdot \mu$$

$$F_1 = A(\sigma_r + \sigma_{trd}) e^{\mu \frac{\pi}{2}} \approx A(\sigma_r + \sigma_{trd})(1 + 1,6 \cdot \mu) \quad 4.23$$

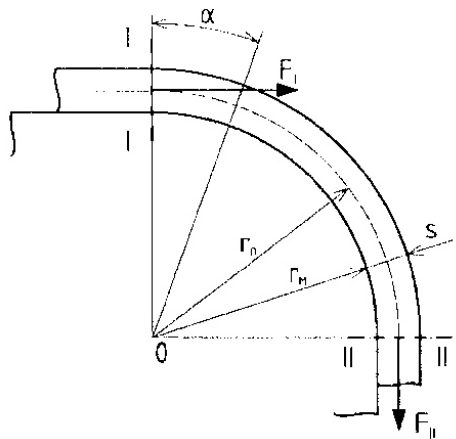
Напон који настаје у овом случају може да се напише као:

$$\sigma_{trd} = (\sigma_r + \sigma_{trd})e^{\mu\alpha} - (\sigma_r + \sigma_{trd})$$

$$\sigma_{trd} = (\sigma_r + \sigma_{trd})(e^{\mu\alpha} - 1) \quad 4.24$$

4.3.4 Напон услед савијања и исправљања

При клизању лима преко заобљене ивице матрице, поред осталог, остварује се савијање, а затим и исправљање појединих зона комада. Деформациони рад савијања елемента ширине b и дебљине s , извршен при савијању над радијусом r_n , на посматраном углу α (слика 4.6), може се изразити на следећи начин:



Слика 4.6 – Савијање преко заобљење матрице

$$F_I \cdot r_n \cdot \alpha = M \cdot \alpha \quad 4.25$$

$$F_I = \frac{M}{r_n} \quad 4.26$$

M – момент унутрашњих сила

$$M = K_S \frac{b \cdot s^2}{4}$$

$K_S \approx R_M$ пошто је лим током деформисања обода већ знатно ојачао

$$r_n \approx r_m + 0,5s$$

Ако се претходне зависности уврсте у израз 4.26 добија се:

$$F_I = R_M \frac{bs^2}{4(r_m + 0,5s)}$$

У пресеку II – II лим треба поново исправити, при чему се троши рад и за савијање, па је укупна сила:

$$F_{II} = 2F_I = R_M \frac{bs^2}{2r_M + s} = F_S$$

Целокупна деформациона сила савијања односи се на савијање по обиму комада, па је ширина зоне савијања: $b = d_1 \cdot \pi$

$$F_S = R_M \frac{\pi d_1 s^2}{2r_M + s} \quad 4.27$$

Имајући у виду критични пресек комада, напон услед савијања и исправљања износи:

$$\sigma_{sav} = \frac{F_S}{\pi d_1 s} = \frac{R_M}{2 \frac{r_M}{s} + 1} \quad 4.28$$

4.3.5 Укупни напон извлачења

Према изразу 4.9 укупни напон износи:

$$\sigma_u = \sigma_r + \sigma_{trd} + \sigma_{trm} + \sigma_{sav}$$

Имајући у виду изразе 4.13; 4.18; 4.24 и 4.28 коначно се добија израз за највећи укупни напон прве операције дубоког извлачења:

$$\sigma_u = \left(1,1 \bar{K} \ln \frac{D_0}{d_1} + \frac{2\mu F_D}{d_1 \pi s} \right) e^{\mu \alpha} + \frac{R_M}{2 \frac{r_M}{s} + 1} \quad 4.29$$

С обзиром на критични попречни пресек комада, максимална сила прве операције извлачења износи:

$$F_M = d_1 \pi s \cdot \sigma_u \quad 4.30$$

Меродавна сила за избор машине:

$$F_{MA\check{s}} = 1,3 F_M$$

Деформациони рад:

$$W = F_M \cdot x \cdot h \quad 4.31$$

$x = \frac{F_{sr}}{F_M}$ - емпиријски фактор средње силе који се бира из одговарајућих препорука

h - укупна дубина комада, односно укупни ход извлакача.

4.4 Одређивање силе извлачења према упрошћеним формулама

У пракси се веома често користи упрошћена формула за одређивање силе извлачења, нпр. за прву операцију може се користити следећи образац:

$$F_{M(1)} = d_1 \pi s R_M k_1 \quad 4.32$$

Коефицијент k_1 зависи од врсте материјала, степена извлачења и релативне дебљине лима. Даје се у одговарајућим препорукама.

За друге и остале операције важи следећа формула:

$$F_{M(n)} = d_n \pi s R_M k_n \quad 4.33$$

Слично коефицијенту k_1 одређује се и коефицијент k_n . Усваја се из одговарајућих табела са емпиријским вредностима.

4.5 Одређивање облика и димензије развијеног стања

Димензије развијеног стања се одређују из услова једнакости запремине полазног и готовог комада.

$$V_{PКОМ} = V_{GКОМ}$$

Иако при обликовању лима дубоким извлачењем долази до промене дебљине лима у појединим зонама комада, може се сматрати да је дебљина приближно константна. Из тих разлога може се написати:

$$A_{PКОМ} \cdot S_{PКОМ} = A_{GКОМ} \cdot A_{GКОМ} ; S_{PКОМ} \cong S_{GКОМ}$$

$$A_{PКОМ} = A_{GКОМ}$$

На овај начин се услов једнакости запремине претвара у услов једнакости површина полазног и готовог комада.

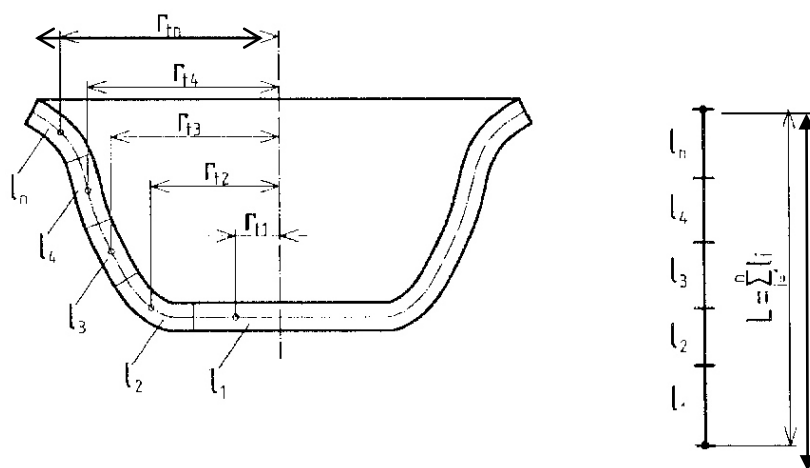
При одређивању димензија развијеног стања делова ротационог облика у основи постоје три методе:

- а. Аналитичка метода;
- б. Графо – аналитичка метода;
- с. Графичка метода.

Овим методама се могу придодати и дефиниције развијеног стања емпиријским путем или претходним експерименталним пробама. У даљем тексту биће приказана једна метода.

4.5.1 Графо-аналитичка метода

Ова метода се заснива на графичком одређивању растојања тежишта појединих елемената ротационе криве од осе ротације (r_{ti}), њене дужине (L) и примене Гулденовог правила.



Слика 4.7 – Шема разлагања сложене линије на мање делове

Укупна ротациона површина:

$$A = 2\pi(r_{t1}l_1 + \dots + r_{tn}l_n) = 2\pi \sum_{i=1}^n r_{ti} l_i = D_0^2 \frac{\pi}{4}$$

На основу претходног израза коначно се добија вредност пречника развијеног стања.

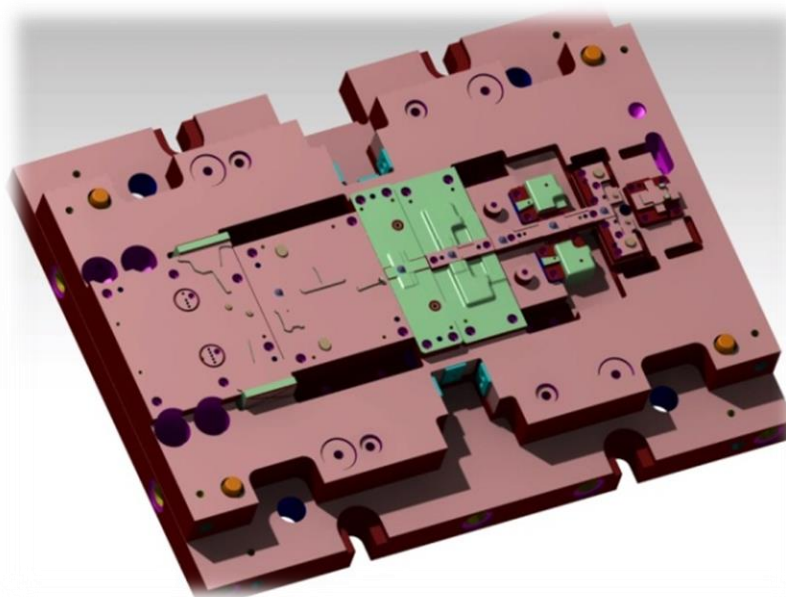
$$D_0 = \sqrt{8 \sum_{i=1}^n r_{ti} l_i} = \sqrt{8Lr_{tsr}} \quad 4.34$$

Чисто графичка метода се заснива на коришћењу Гулденовог правила, уз примену верижног полигона ради одређивања положаја тежишта криве која ротира. Ова метода се ређе користи од претходно наведене [4].

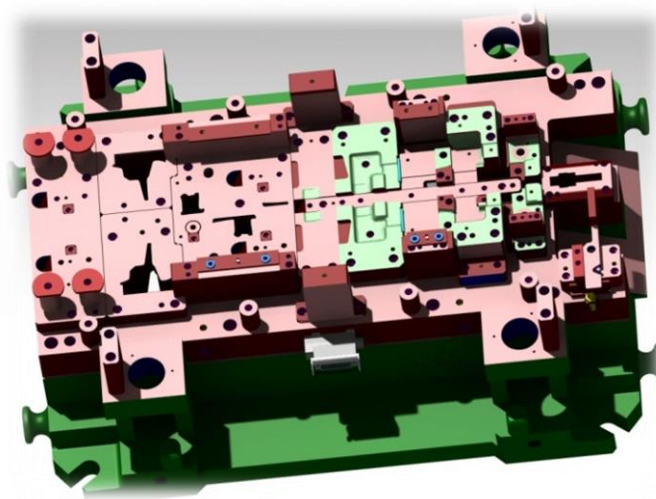
5.0 Опис проблема за решавање

До сада је теоретски приказано дубоко извлачење, двоугаоно савијање као и појаве еластичног исправљања. Даље ће бити анализиран конкретан проблем. Алат који смо користили у завршном ради конструисан је и израђен у фирми „Unior - components“ a.d у Крагујевцу. Целокупно конструктивно решење алата приказано је на сликама 5.1 и 5.2, док је на слици 5.3 приказана технологија израде дела ткз. „метода“.

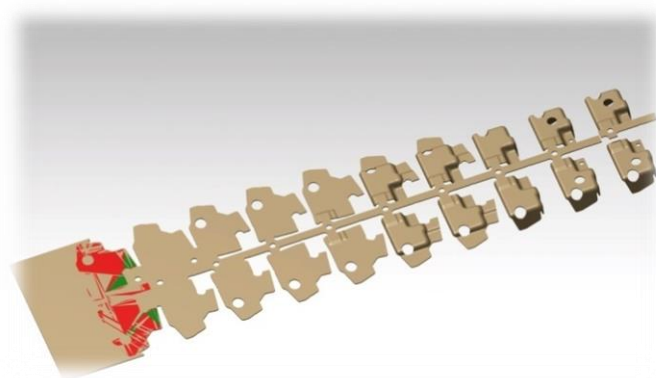
Циљ завршног рада је упоређивање геометрије идеалног 3D CAD модела са геометријом комада који се добија у реалном процесу, као и са геометријом нумеричког модела који се добија као резултат симулације у програмском пакету simufact.forming. Идеални 3D CAD модел је модел радног комада који је потребно испоручити наручиоцу посла (слика 5.4). Да бисмо урадили упоређивања идеалног 3D CAD модела са реалним радним комадом потребно је скенирати карактеристичне елементе геометрије реалног радног комада. Скенирање радног комада извршено је на координатој мерној машини CMM Werth VC – IP 250 3D CNC, у оквиру Кооперативног Тренинг Центра Универзитета у Крагујевцу.



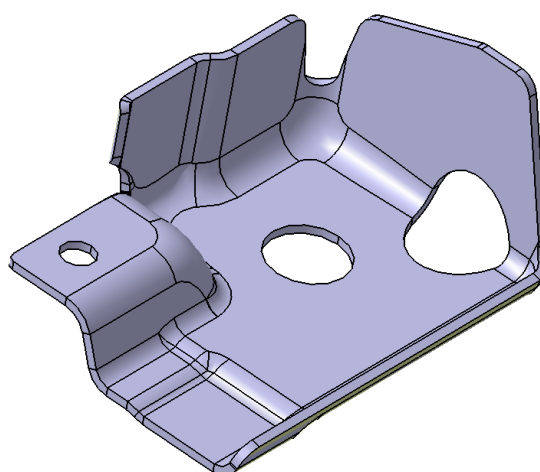
Слика 5.1 – Горњи део алата



Слика 5.2 – Доњи део алата



Слика 5.3 – Метода израде комада



Слика 5.4 Геометрија радног комада

6.0 Опис програмског пакета Simufact.forming

Simufact.forming је софтверски пакет који је проистекао као обједињена варијанта претходних програма MSC.SuperForm и MSC.SuperForge, развијен од стране FEMUTEC и MSC.Software за компјутерску 2D и 3D симулацију индустријских процеса обликовања, коришћењем интегрисаних FE (Finite Element) и FV (Finite Volume) технологија. Представља комбинацију сложеног софтвера и једноставног корисничког окружења које је посебно прилагођено за 3D симулације запреминског обликовања.

Комплетна презентација процеса који се симулира, односно унос улазних података, коришћењем квалитетног интуитивног корисничког интерфејса, може се извести веома брзо, укључујући:

- Увоз CAD геометрије алата и припремка преко STL, DXF Nastran и VRLM формата;
- Избор коришћене праксе из базе података о пресама;
- Избор карактеристика материјала припремка и алата из базе података;
- Дефинисање услова контактнoг трења, избор модела трења и задавање фактора трења;
- Дефинисање температурних режима процеса, за генерисање и трансфер топлоте;
- Аутоматско – ручно позиционирање припремка у алату;
- Избор параметара FE/FV анализе и
- Стартовање анализе.

Simufact.forming има моћан постпроцес за визуелизацију резултата симулације, који омогућава пројектантима и инжењерима потпун увид у све аспекте процеса, укључујући:

- Слику течења материјала, са приказом целог модела и у жељеним пресецима;
- Попуњавање алата и маркирање ванконтактних зона;
- Напонске, деформационе, температурне и дистрибуције притиска;
- Хабање алата и процену критеријума лома;
- Процену сила на алатима и напонских дистрибуција;
- Приказ дефеката преклопа и зона поремећаја у подмазивању.

Кроз симулацију процеса коришћењем Simufact.forming компаније могу побољшати своју конкурентну позицију смањењем:

- Број прототипова у пројектовању алата;
- Број дефеката;
- Шкарта;
- Број физичких прототипова;
- Времена развоја производа;
- Броја отказа у серијској производњи.

7.0 Дефинисање улазних података у софтверу simufact.forming

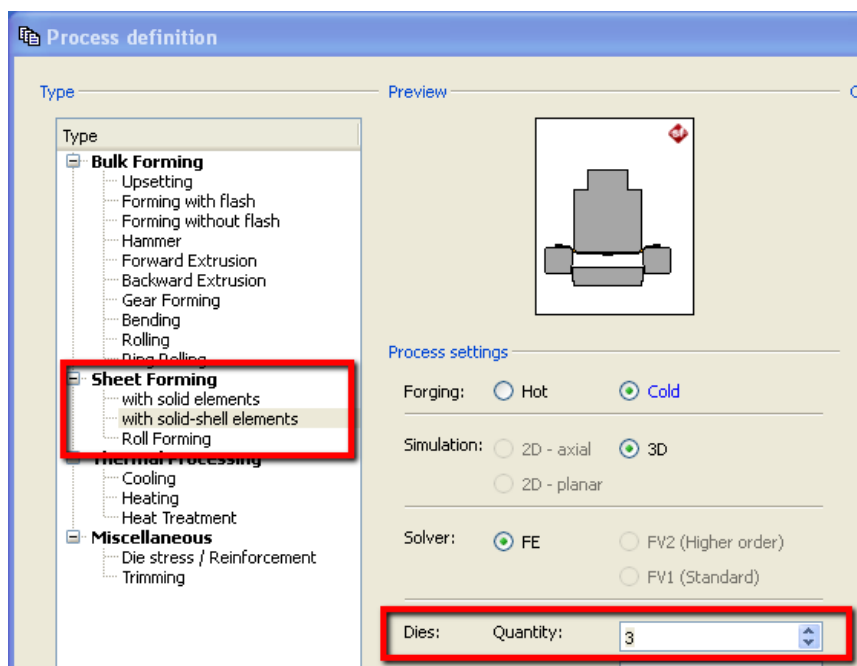
Резултати нумеричких симулација процеса зависе од параметара које се дефинишу на улазу. Због тога је веома важно да ти параметри што реалније описују процес који се симулира.

Параметри за дефинисање производног процеса у софтверу simufact.forming биће приказани у наставку.

7.1 Дефинисање параметара процеса за прву операцију

7.1.1 Дефинисање типа производног процеса

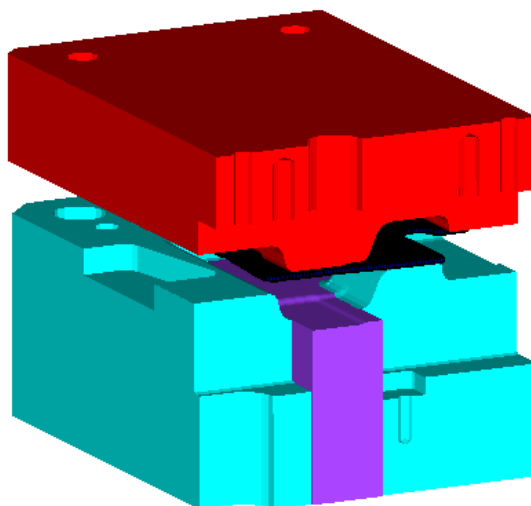
На слици 7.1 приказан је прозор (Process definition) у коме се врши избор процеса, из опције Type / Sheet Forming / with solid-shell elements. Тај избор смо извршили пошто нам је дебљина лима 1.75 mm. Затим смо дефинисали колико алата је укључено у операцију. У нашем случају имамо три елемента: горњи обликач, доњи обликач, и доњи јастук. Такође, дефинисан је солвер, метода коначних елемената, као и да се симулација производног процеса ради у хладном стању у 3D.



Слика 7.1 – Избор типа процеса

7.1.2 Увоз геометрије алата

Конструкција алата у фирми „Unior“ је урађена у програмском пакету CATIA. За потребе симулације потребно је да модели алата буду у STL формату које смо претходно припремили. На слици 7.2 приказана је геометрија алата за прву операцију.



Слика 7.2 – Геометрија алата за прву операцију

7.1.3 Дефинисање материјала радног комада

Материјал радног комада је STANL EN 10268 – 1.0548. Материјал смо дефинисали ручно из разлога што задати материјал није постојао у бази података па смо га креирали у софтверу simufact.forming. Крива ојачања материјала дата је на слици 7.3. Због немогућности фирме да нам обезбеди узорке материјала за тестирање коришћене су карактеристике овог материјала које смо преузели са интернета. Математички облик криве течења је приказан у следећем обрасцу:

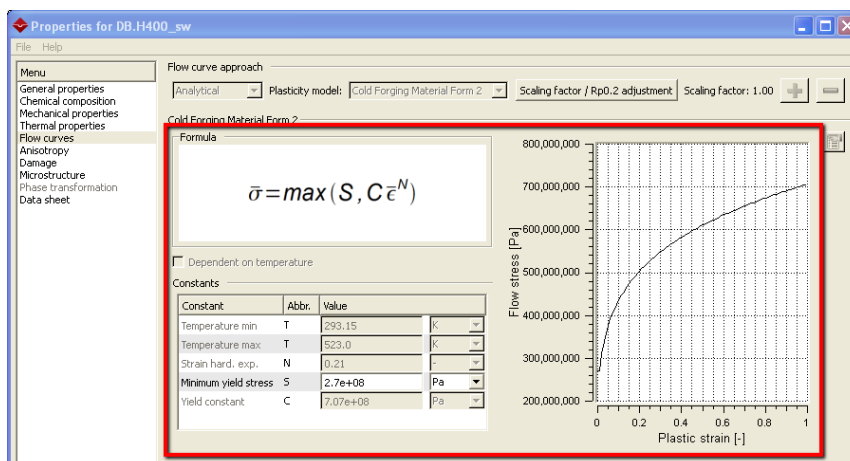
$$\sigma = 707 \cdot \varepsilon^{0,24}$$

подаци који су коришћени:

$$R_p = 270 \text{ MPa};$$

мин. температура: 293,15 K;

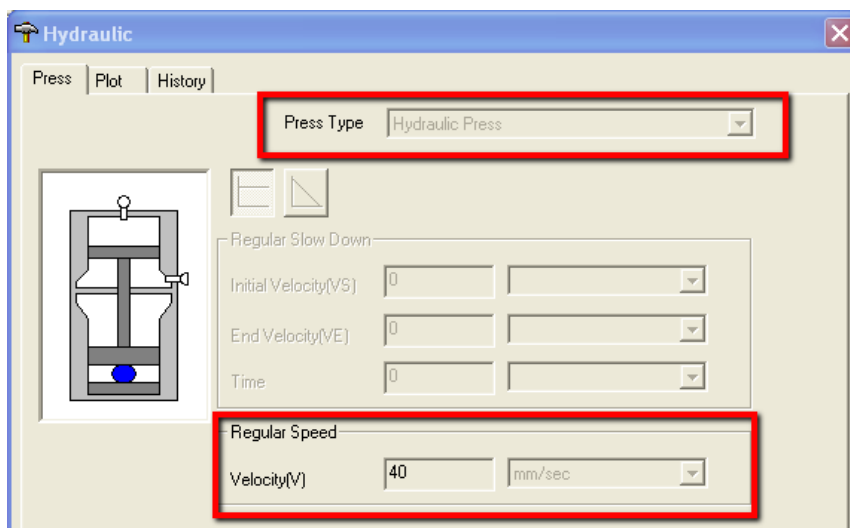
макс. температура: 523 K.



Слика 7.3 – Крива ојачања материјала

7.1.4 Дефинисање пресе

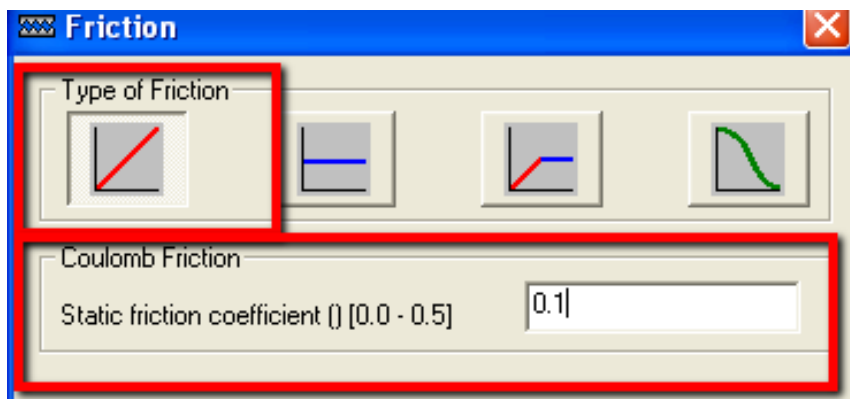
У реалном процесу производње користи се хидраулична преса са параметрима који су приказани на слици 7.4.



Слика 7.4 – Дефинисање пресе

7.1.5 Дефинисање трења

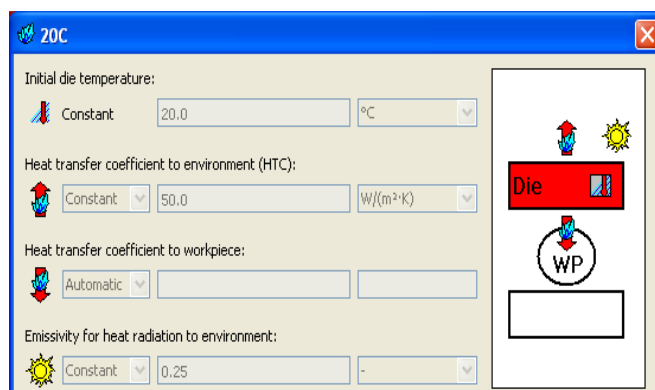
Коришћен је модел Кулоновог трења, са задатим коефицијентом трења 0.1, као што је приказано на слици 7.5.



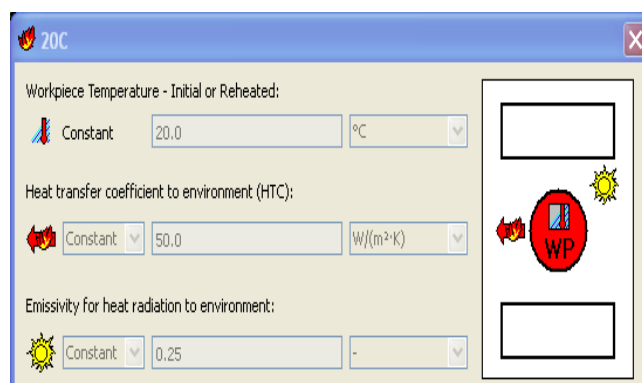
Слика 7.5 – Дефинисање трења

7.1.6 Дефинисање температуре

На слици 7.6 приказани су параметри за дефинисање температурног режима за алат, док су на слици 7.7 приказани параметри температуре за радни комад.



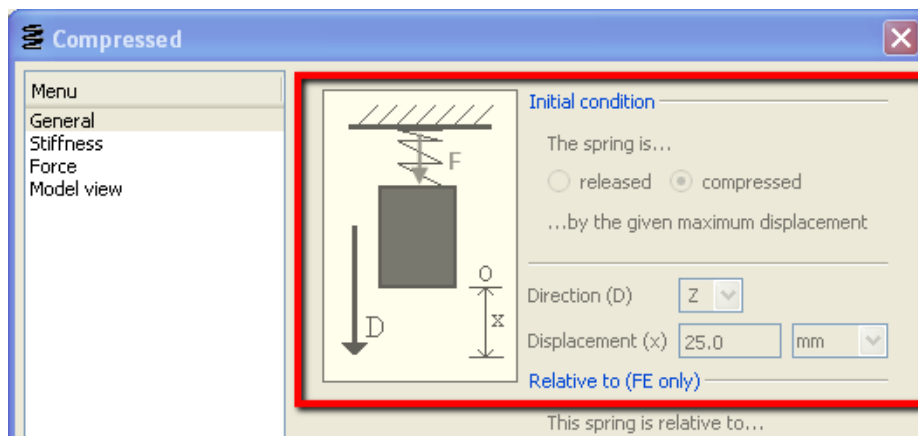
Слика 7.6 – Дефинисање параметара температуре алата



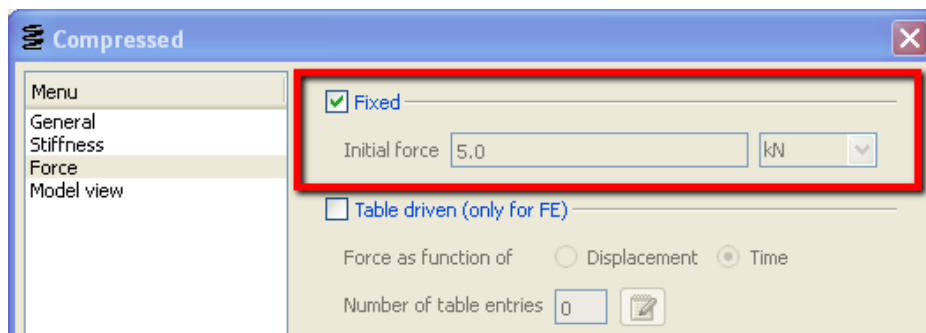
Слика 7.7 – Дефинисање параметара температуре радног комада

7.1.7 Дефинисање опруге

Из разлога што је алат корачни потребно је обезбедити подизање траке у алату. Један од елемената алата који служи за подизање траке је „јастук“ и овај део алата се поставља на опругу, а уједно служи да обезбеди силу држања радног комада. Конструктивним решењем предвиђено је да сила држања буде 5 kN. На слицама 7.8 и 7.9 приказани су параметри опруге која се користе у овој операцији (иницијална сила држања, ход, крутост).



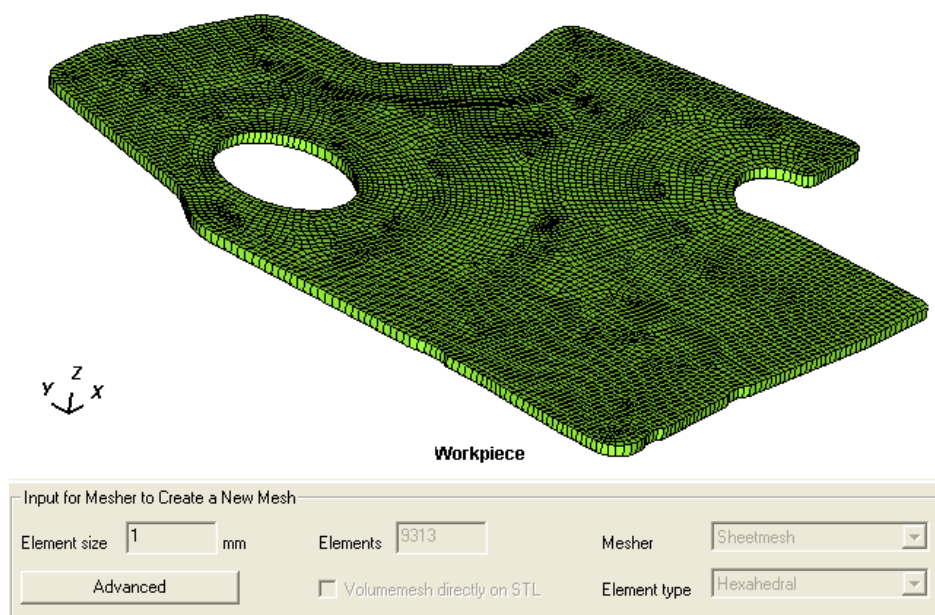
Слика 7.8 – Дефинисање опруге



Слика 7.9 – Дефинисање опруге

7.1.8 Формирање мреже коначних елемената на радном комаду

Када смо дефинисали основне параметре процеса, прелазимо на креирање мреже коначних елемената на радном комаду. Величина елемената мреже коначних елемената је 1 mm, а коришћен је „Mesher“ – Sheetmesh.

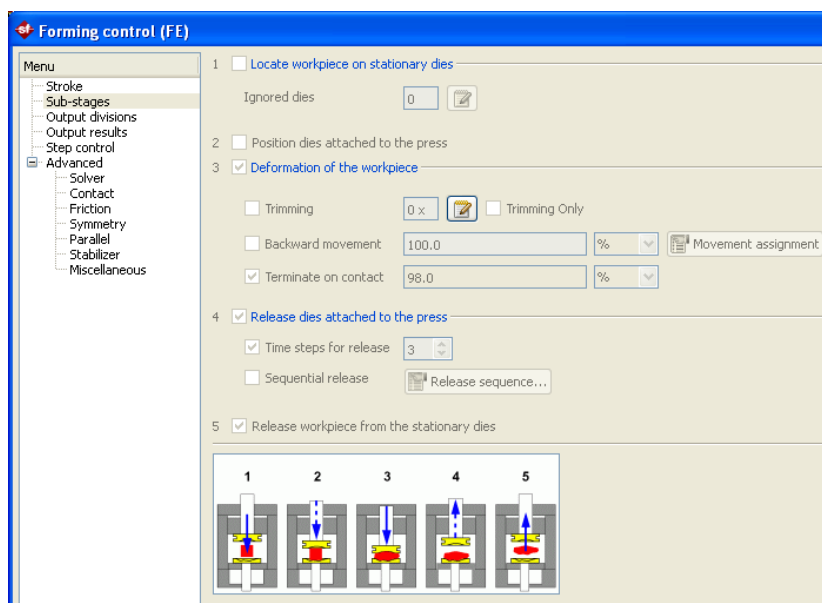


Слика 7.10 – Креирање мреже коначних елемената

7.1.8 Дефинисање контролних параметара процеса

У дијалог боксу „Forming control“ дефинишу се следећи параметри процеса:

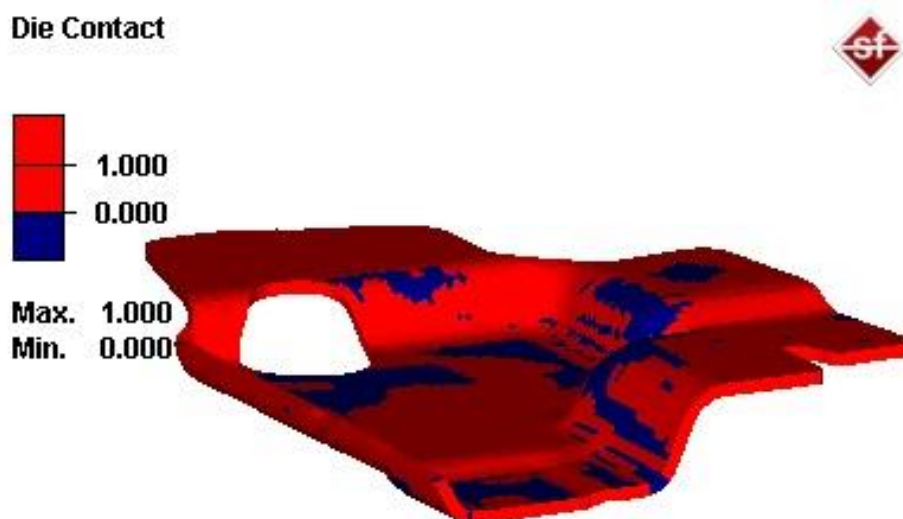
- ход – 15 mm;
- фазе обликовања – приказане су на слици 7.11;
- интервали у којима се снимају резултати симулације;
- излазни резултати;
- солвер;
- контактни услови итд.



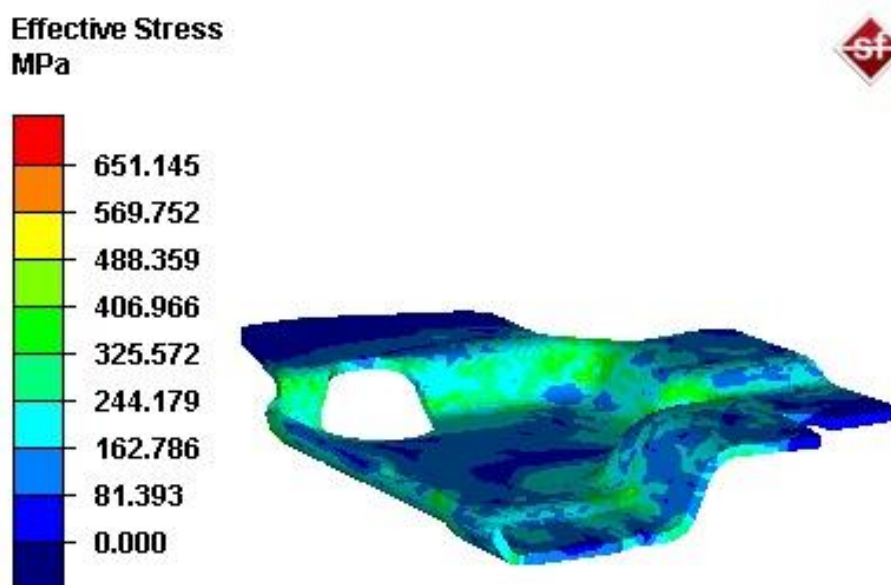
Слика 7.11 Контролни параметри процеса

7.1.9 Резултати прве симулације

У даљем тексту приказаше се на сликама резултати добијени након симулације прве операције, и то: контакт алата са радним комадом (слика 7.12), расподела ефективног напона на радном комаду (слика 7.13), расподела пластичне деформације на радном комаду (слика 7.14). Анализа добијених резултата биће детаљно презентована у следећим поглављима.

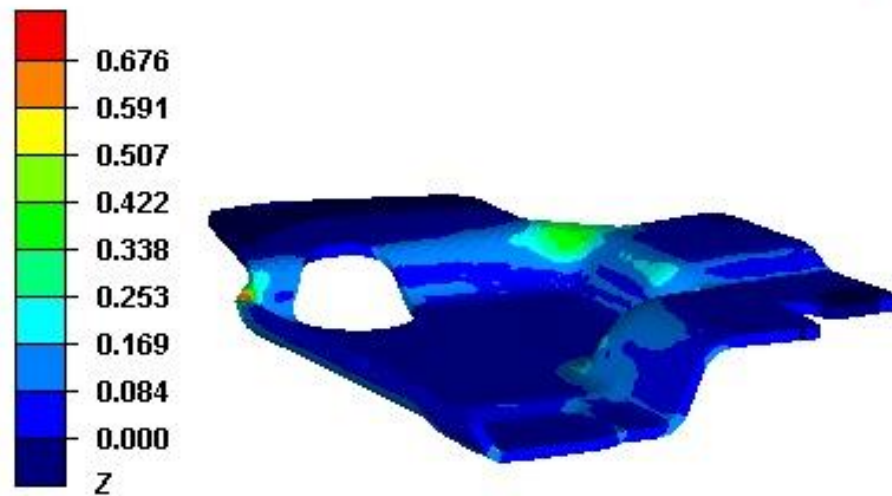


Слика 7.12 – Контакт алата са радним комадом



Слика 7.13 – Расподела ефективног напона на радном комаду

Effective Plastic Strain

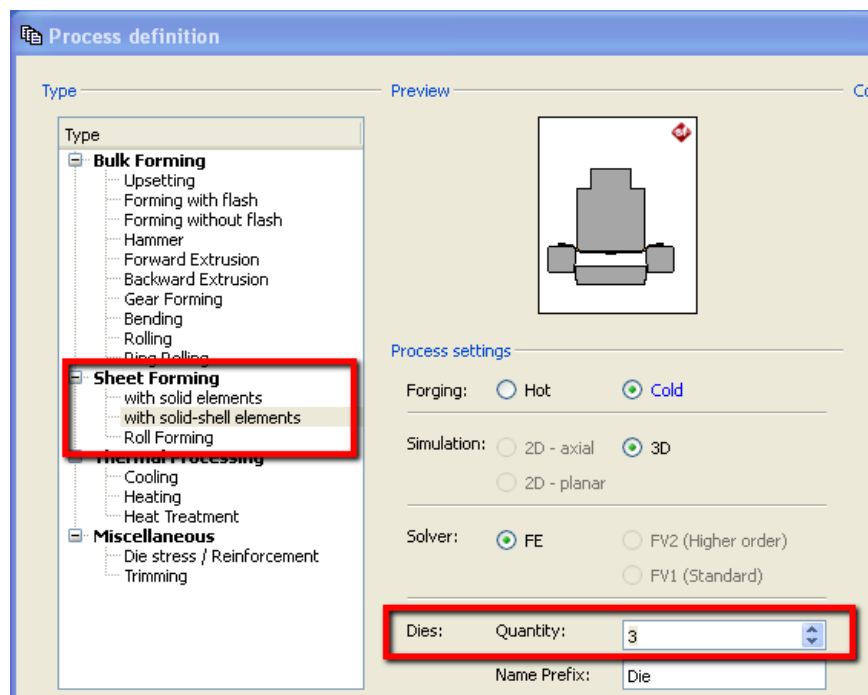


Слика 7.14 – Расподела пластичне деформације на радном комаду

7.2 Дефинисање података за другу операцију

7.2.1 Дефинисање типа производног процеса

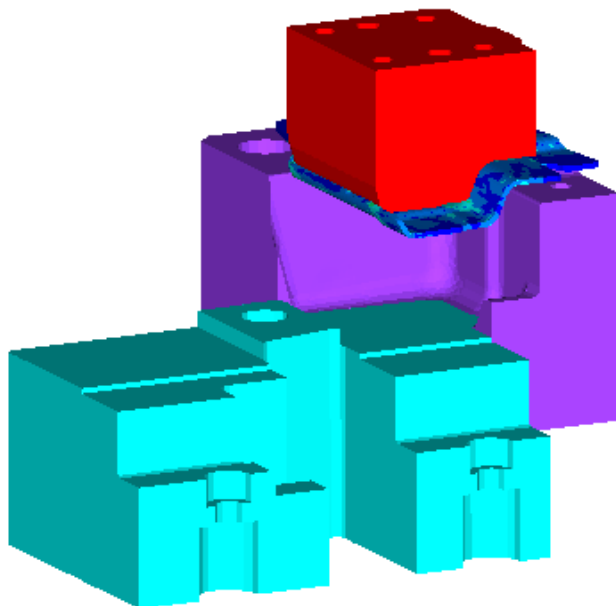
Изабрани тип процеса за другу операцију је исти као и за прву операцију.



Слика 7.15 – Избор типа процеса

7.2.2 Увоз геометрије алата

Геометрија алата за другу операцију приказана је на слици 7.16. Геометрија радног комада за другу операцију извезена је из прве операције из разлога да би се пренела историја претходног обликовања.



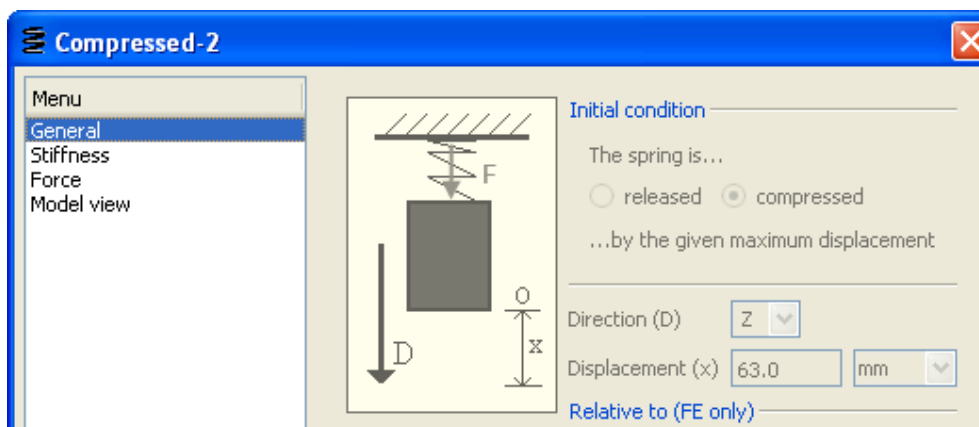
Слика 7.16 – Геометрија алата за другу операцију

7.2.3 Дефинисање материјала радног комада, пресе, трења и температуре радног комада и алата

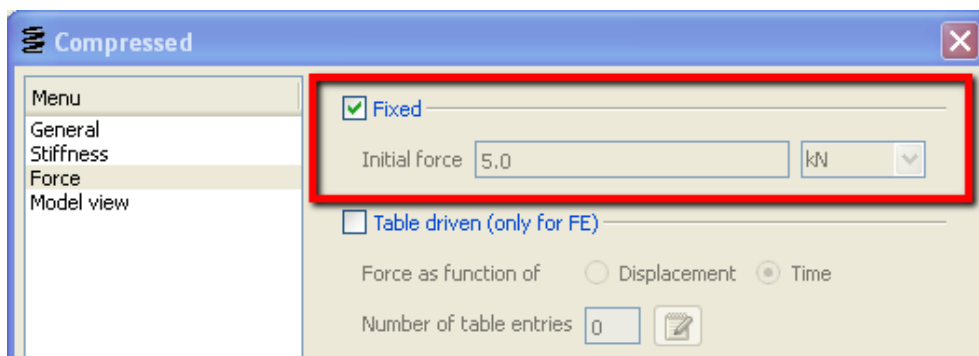
Сви ови параметри су исти као и првој операцији.

7.2.4 Дефинисање опруге

Конструктивним решењем предвиђено је да сила држања у другој операцији буде 5 kN. На сликама 7.17 и 7.18 приказани су параметри опруге која се користи у другој операцији (иницијална сила држања, ход, крутост).



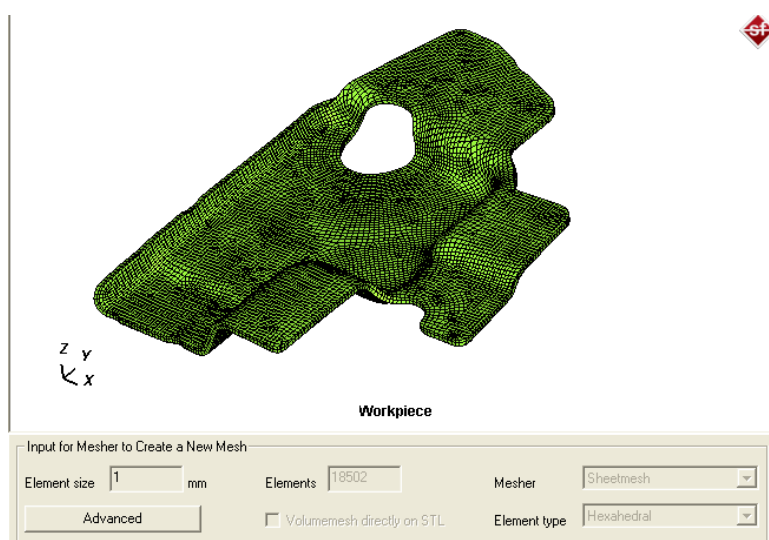
Слика 7.17 – Дефинисање опруге



Слика 7.18 – Дефинисање опруге

7.2.5 Креирање мреже коначних елемената на радном комаду

Када смо дефинисали основне параметре процеса, прелазимо на креирање мреже коначних елемената на радном комаду. Величина елемената мреже коначних елемената је 1 mm, а коришћен је „Mesher“ – Sheetmesh.

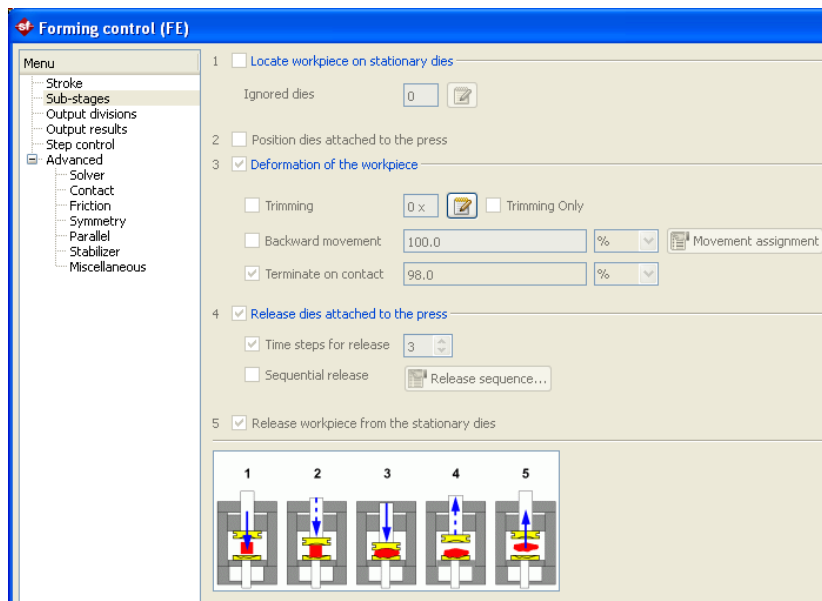


Слика 7.19 – Креирање мреже коначних елемената

7.2.6 Дефинисање контролних параметара процеса

У дијалог боксу „Forming control“ дефинишу се следећи параметри процеса:

- ход – 45 mm;
- фазе обликовања – приказане су на слици 7.20;
- интервали у којима се снимају резултати симулације;
- излазни резултати;
- солвер;
- контактни услови ИТД.

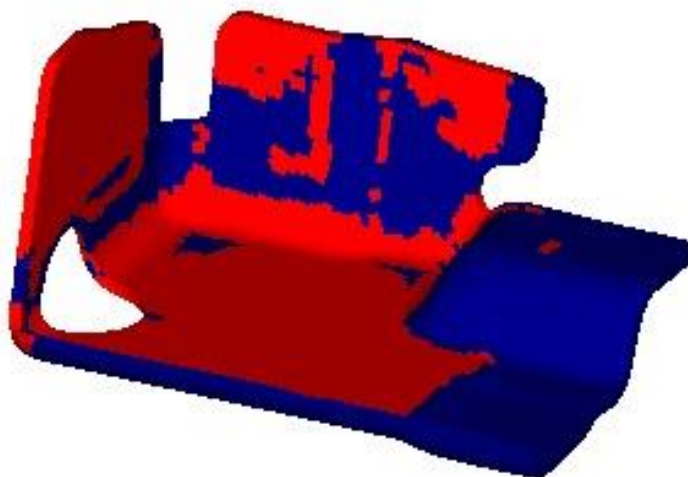
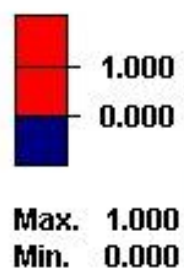


Слика 7.20 Контролни параметри процеса

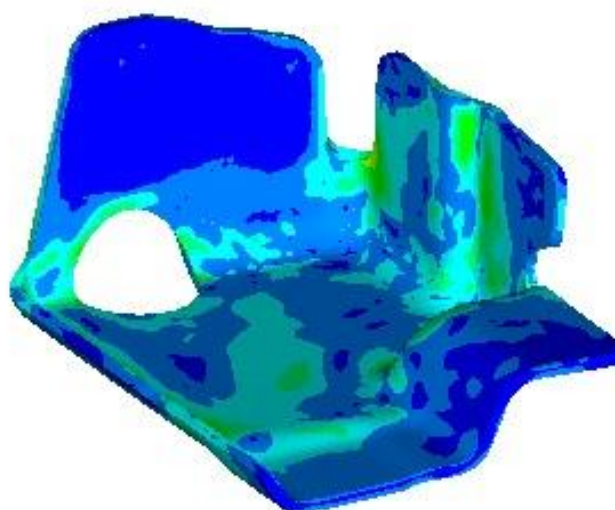
7.2.7 Резултати друге симулације

У даљем ће бити приказани неки од резултата симулације друге операције обликовања, и то: контакт алата са радним комадом (слика 7.21), расподела ефективног напона на радном комаду (слика 7.22), расподела пластичне деформације на радном комаду (слика 7.23). Анализа добијених резултата биће детаљно презентирана у следећим поглављима.

Die Contact

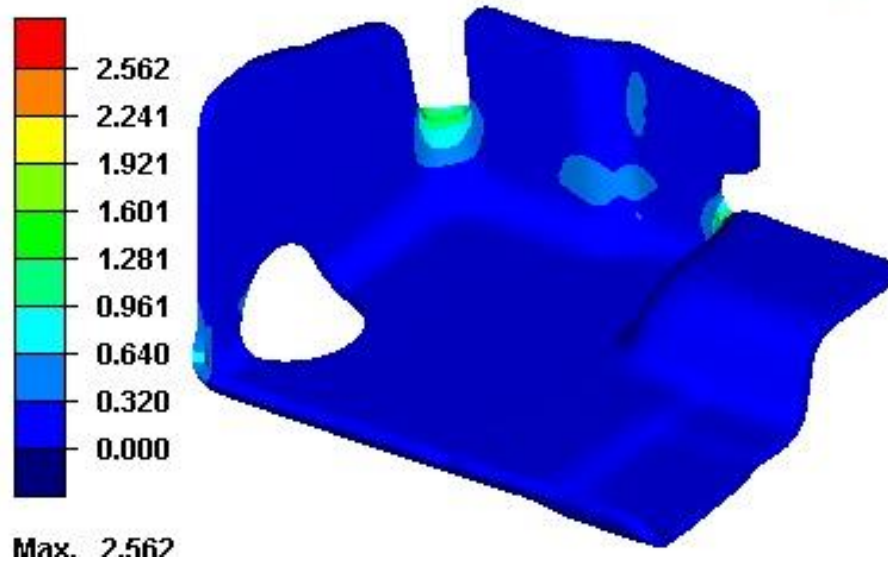


Слика 7.21 – Контакт алата са радним комадом

Effective Stress
MPa

Слика 7.22 – Расподела ефективног напона на радном комаду

Effective Plastic Strain



Слика 7.23 – Расподела пластичне деформације на радном комаду

8.0 Мерење радног комада

Контрола квалитета игра веома значајну улогу у свету високо – технолошке индустрије. Неки од главних изазова на које треба да се одговори су рационално мерење радног комада, идентификација његових димензија и њихова статистичка евалуација.

8.1 Карактеристике CMM Werth VC – IP 250 3D CNC

Мултисензорска координатна мерна машина Werth VC – IP 250 3D CNC (слика 8.1) представља одговор на изазове које се јављају код дводимензионалних и тродимензионалних мерења и контроле. Неке од њених главних карактеристика су:

- Веома прецизно мерење, захваљујући stress – free систему за вођење радног стола;
- Постоје три сензора – ово нам омогућава различите стратегије и налажење решења за велики број мерења без померања радног комада;
- Аутоматско оптичко препознавање и мерење основних геометријских елемената;
- Велико увећање Werth зоом оптике – 320 пута.

Максимална дозвољена грешка:

- Приликом мерења оптиком: $1.5 - 3 \mu m$
- Приликом мерења ласером: $2.5 - 3.5 \mu m$
- Приликом мерења фибром: $0.5 \mu m$

Врсте сензора:

- Оптика;
- Ласер;
- Фибер.

Област примене:

Производња алата и машина, аутомобилска индустрија, електронска индустрија, производња пластике, гуме, стакла...

8.1.1 Сензор ласер

Сензор ласер је класификован као безконтактни сензор посебно погодан за брзо мерење равни, као и за линијско скенирање површина различитог облика. Ласер има могућност да скенира широк спектар материјала (нпр. метал, пластику, керамику, гуму) са површинама до 80° нагиба. Због вертикалног смера ласерског зрака могуће је мерење и најмањих облика и отвора.

Максимална дозвољена грешка MPE која може да се јави код мерења ласером (по стандарду ISO 10360):

- Од тачке до тачке: $2.5 \mu m$
- Приликом скенирања: $3.5 \mu m$

Да би се оптимизовао ласер на различитим површинама (и на тај начин се обезбедили добијање што прецизнијих резултата мерења), могуће је конфигурисати ласер за актуелни материјал који се користи.

Процедура за ласерско мерење (скенирање):

- Конфигурације параметара ласера за површине мерног објекта;
- Калибрација ласера за површину мерног објекта;
- Одређивање површине за скенирање;
- Одређивање почетне и крајње тачке;
- Подешавање параметра скенирања;
- Стартовање процеса скенирања.

На мултисензорској координатној мерној машини Werth VC – IP 250 3D CNC се користи Фуков ласер који може да мери и скенира површине са веома високом тачношћу.

8.1.2 WinWerth softer

WinWerth је графички интерактивни софтвер за мерење који је лак за коришћење базиран на Windows оперативном систему. Користи се за тродимензионална мерења стандардних геомертијских облика и слободних облика.

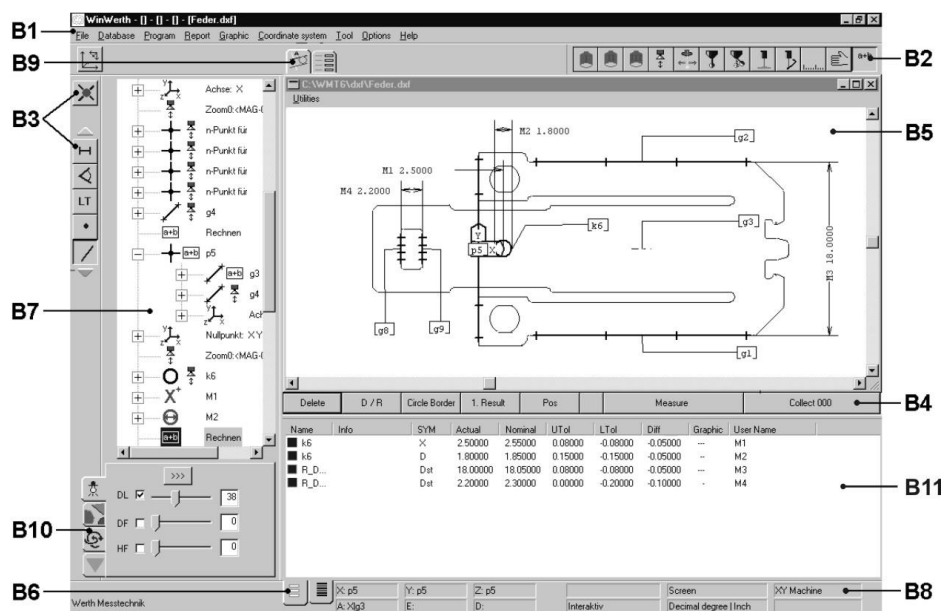
Користи се на свим Werth координатним мерним машинама и Werth профил пројекторима и најпогоднији је за коришћење са Werth мултисензорском технологијом, али могуће је да се користи, уз одређена прилагођавања, и на другим мерним системима.

8.1.3 Радно окружење WinWerthsoftera

Након стартовања WinWerth софтвера на екрану се појављује кориснички интерфејс који може да се подели, у зависности од конфигурације коју нам корисник дефинише на:

- B1 – мени функција;
- B2 – сензори;
- B3 – елементи и избор стратегије мерења;
- B4 – планета функција за добијање мерних вредности;
- B5 – графички прозор;
- B6 – избор за излазни прозор;
- B7 – историја догађаја;
- B8 – статусна линија;

- B9 – 3D приказ;
- B10 – мени;
- B11 – излазни прозор.

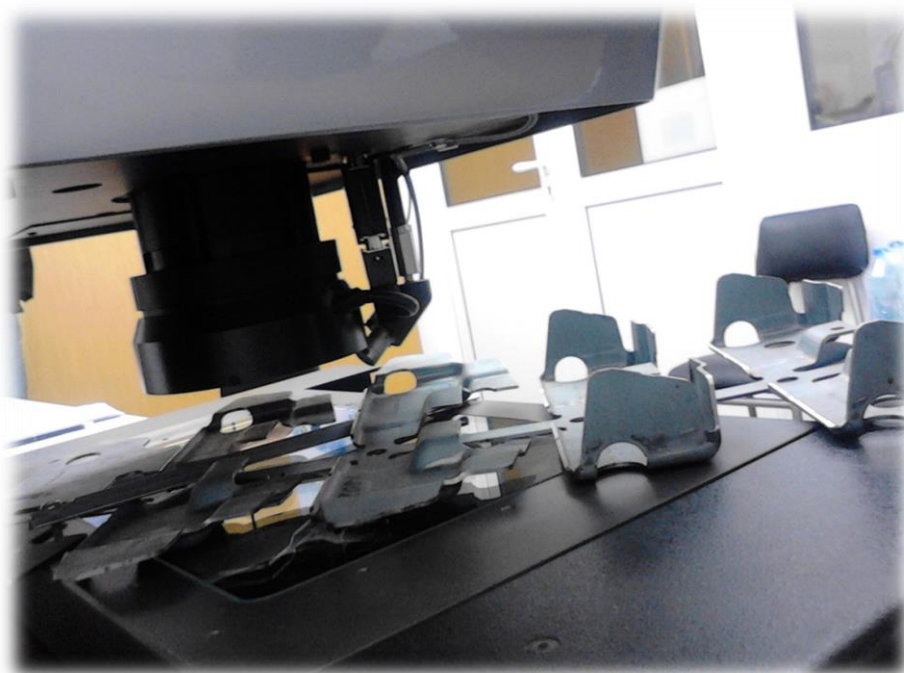


Слика 8.1 – WinWerth 2D-CAD-OFFline програмирање

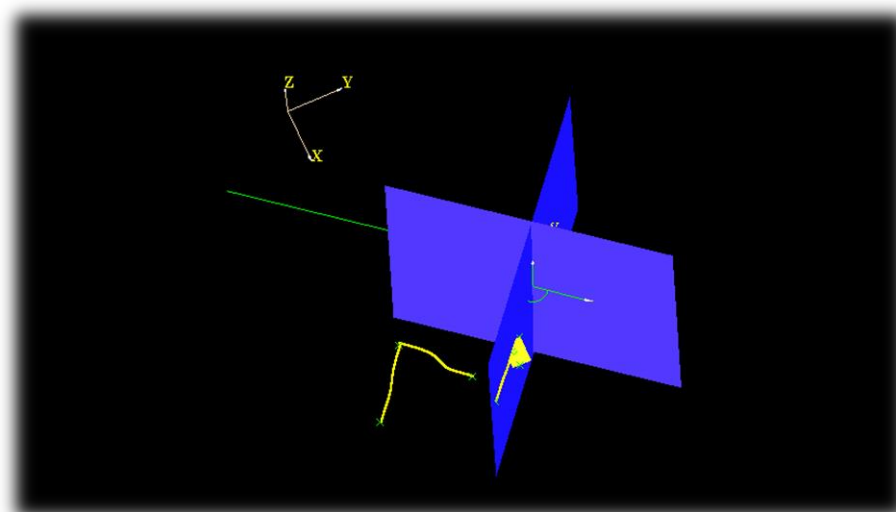
8.2 Поступак скенирања

Пошто смо поставили предмет за мерење на радни сто мерне машине (слика 8.2), следеће што радимо јесте дефинисање координатног система. Одређивање положаја координатног система врши се по договору. У нашем случају координатини почетак је постављен кроз отвор за одређивање корака алата. Мерење смо вршили ласер сензором.

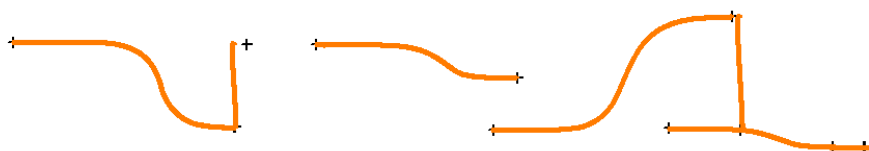
На слици 8.3 приказане су скениране површине, равни као и координатни систем.



Слика 8.2 – Приказ дела постављеног на мерној машину



Слика 8.3 – Приказ скениране површине, равни и координатни систем
На слици 8.4 приказане су све скениране линије у 2D пројекцији



Слика 8.4 – Приказ 2D пројекције скенирних линија

9.0 Анализа добијених резултата

Након што је урађена симулација у програмском пакету Simufact.forming, као и након скенирања реалног комада на мерној машини CMM Werth VC – IP 250 3D CNC у могућности смо да извршимо упоређивање добијених резултата са идеалним CAD моделом који смо добили из фабрике „Unior“.

Прво ћемо урадити анализу добијених резултата у програмском пакету simufact.forming, а након тога ћемо урадити упоређивање геометрије идеалног 3D CAD модела са 3D CAD моделима извезеним из програмског пакета simufact.forming. Такође, урадићемо упоређивање геометрије идеалног 3D CAD модела са геометријом радног комада добијеног у алату. Ова анализа ће се урадити само у карактеристичним пресцима.

9.1 Анализа резултата добијених у софтверу simufact.forming

Прво ће бити анализирани резултати добијени симулацијом у програмском пакету Simufact.forming. Да би смо правилно урадили анализу добијеног комада морали смо да урадимо симулацију свих корака обликовања процесом савијања и дубоког извлачења. У даљем тексту биће анализирано добијене резултати на завршном кораку, тј на завршном жељеном облику.

- Контакт алата са радним комадом (слика 7.12 и слика 7.22)

Са слике се може видети да је остварен добар контакт између алата и радног комада, пошто се у пракси сматра задовољавајућим ако је остварени контакт преко 75 % од укупне контактне површине.

- Расподела ефективног напона на радном комаду (слика 7.13 и слика 7.23)

На слици (7.13, 7.23) је приказано расподела напона по радном комаду, уочавамо да су зоне са највишим напоном управо зоне деформисања, што је у складу са теоријском претпоставком, у овим зонама напон се креће у границама од 500 – 600 МПа. Такође могу се уочити критичне зоне са напонима вишим од дозвољеног максималног напона.

- Расподела пластичне деформације на радном комаду (слика 7.14 и слика 7.24)

Износи остварених пластичних деформација у првој операцији дубоког извлачења нису критични, док у другој операцији савијања долази до појаве прекомерних деформација у угловима. То је резултирало у потреби редизајна припремка, односно развијеног стања. Такође, у другој операцији савијања је изражен мањи ефекат еластичног исправљања, што утиче на финалну прецизност дела.

Друго се анализира резултати добијени мерењем на мерној машини Werth VC – IP 250 3D CNC, што је приказано у поглављу 8.0 на сликама 8.3, 8.4.

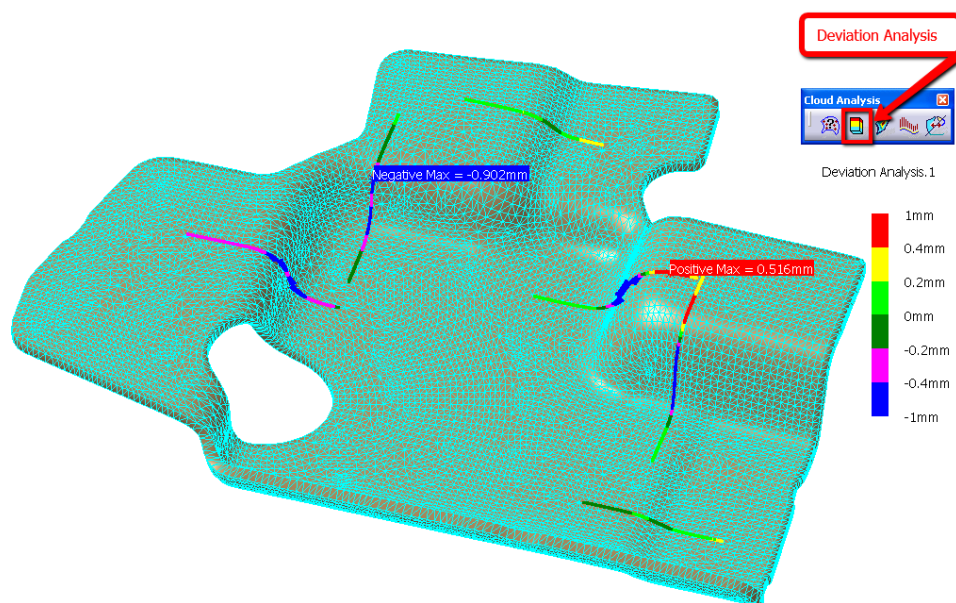
9.2 Анализа резултата скенирања реалног дела и виртуелног модела у операцији 1

У анализи резултата прве операције користићемо резултате које смо добили у симулацији и извезли у STL формату из програмског пакета Simufact.forming, такође користићемо резултате добијених скенирањем, као и идеални CAD модел.

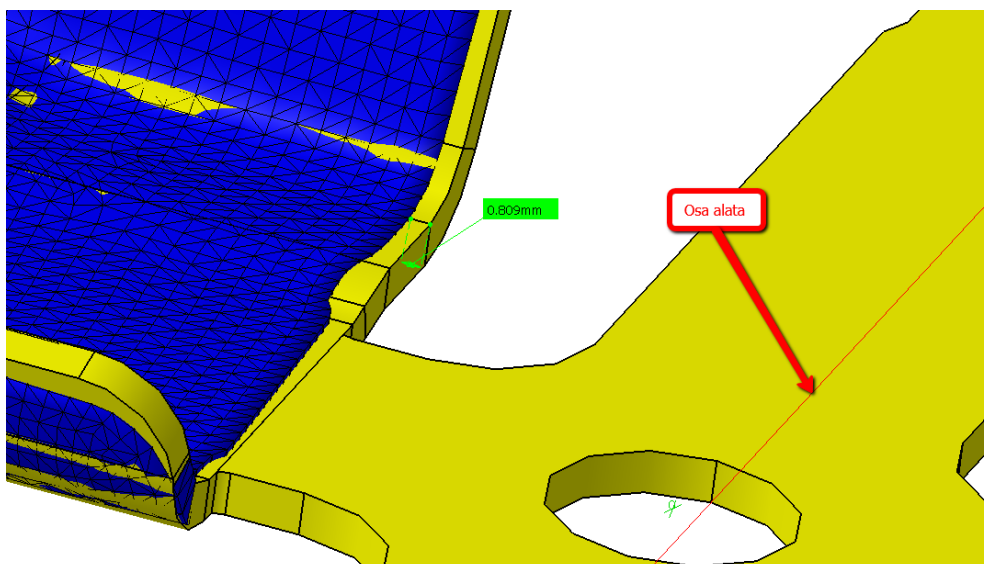
Да би смо могли да извршимо анализу резултата исте смо увезли у програм CATIA. Позиционирање резултата једне у односу на друге извршено је преклапањем координатних система као референтних елемената, као што је приказано на слици 9.1.

На слици 9.1 је приказано нормално одступање скен линија од STL модела изведеног из Simufact.forming-a. Анализа је извршена у модулу CATIA за рад са STL фајловима „Quick Surface Reconstruction“ користећи палету алата „Cloud Analysis“ и команду „Deviation Analysis“.

На слици је приказана легенда са одступањима. Зеленом бојом су означена одступања до 0.2 mm док су са жутом и лила одступања од 0.2 до 0.4 mm. Потребно је напоменути да су одступања означена на слици 9.1 плавом и црвеном бојом највећа и она износе до 1 mm, а настала су због тога што се у симулацији није користила цела трака која се у реалном процесу води помоћу „ловаца“ приказаних отворима на слици 9.2. На слици 9.2 се види да се део померио од осе алата за приближно 0.8 mm.

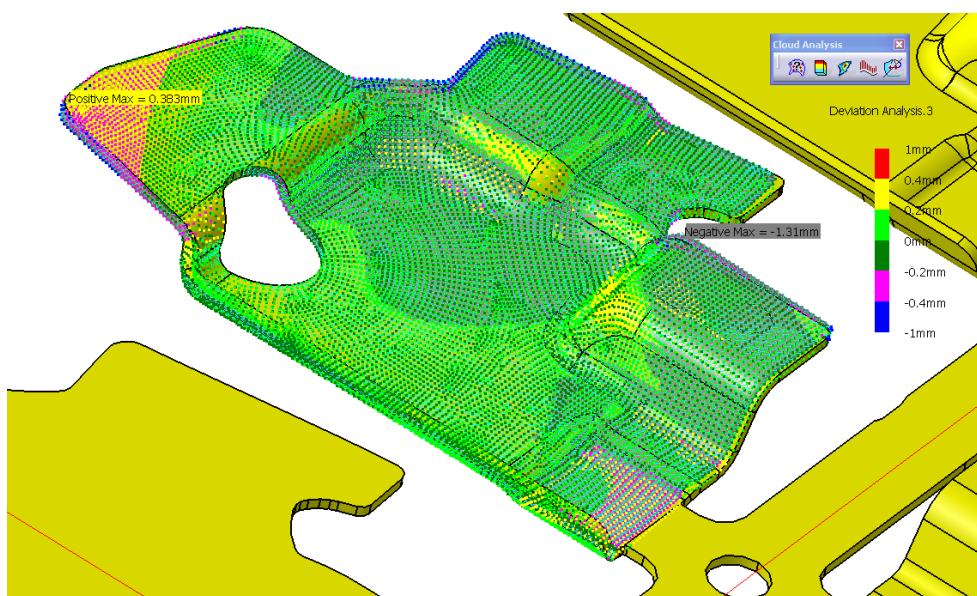


Слика 9.1 – Одступање STL модела од скен линије



Слика 9.2 – Приказ померања STL од осе идеалног CAD модела

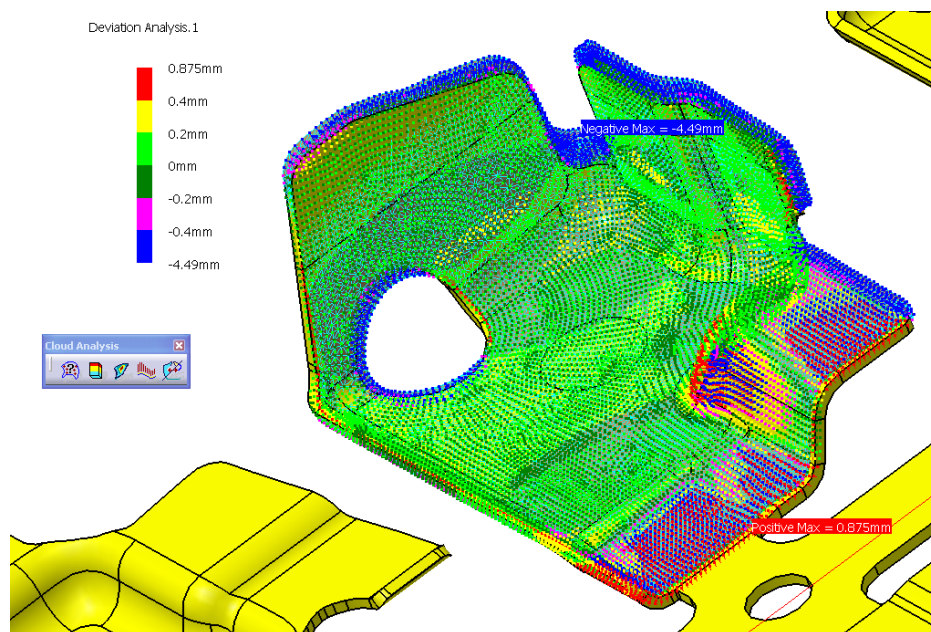
На слици 9.3 приказано је нормално одступање STL модела извезеног из Simufact.formong-a од идеалног CAD модела. Са слике а из легенде се види да су зеленом бојом означена одступања до 0.2 mm, док су већа одступања карактеристична за зоне дуж ивица радног комада (црвена и плава боја), што указује на помереност модела од централне осе траке као последица претходно поменутог. Иначе, остале зоне обликовања показују добру подударност симулационог и идеалног модела (зелене зоне).



Слика 9.3 – Одступање STL модела од идеалног CAD модела

9.3 Анализа добијених резултата у операцији 2

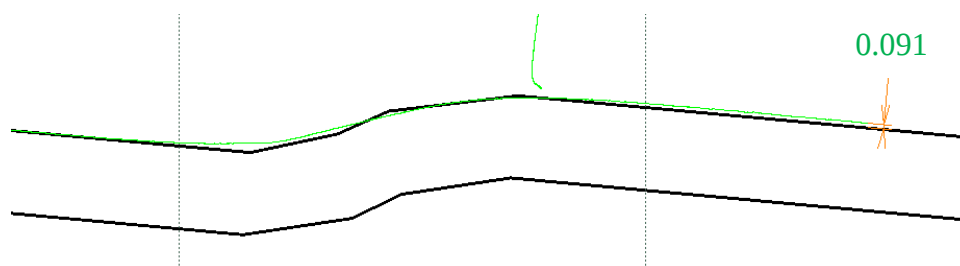
На слици 9.4 приказано је нормално одступање STL модела извезеног из Simufact.formong-a од идеалног CAD модела. Закључак је да је у највећем делу комада толеранција до 0.2 mm. У зонама црвене боје одступања до 0.85mm су последица еластичне повратности и померања радног комада од осе алата због тога што трака није вођена помоћу „ловаца“. То је уједно и разлог великог одступања ивичних зона од идеалног CAD модела.



Слика 9.4 – Одступање STL модела од идеалног CAD модела

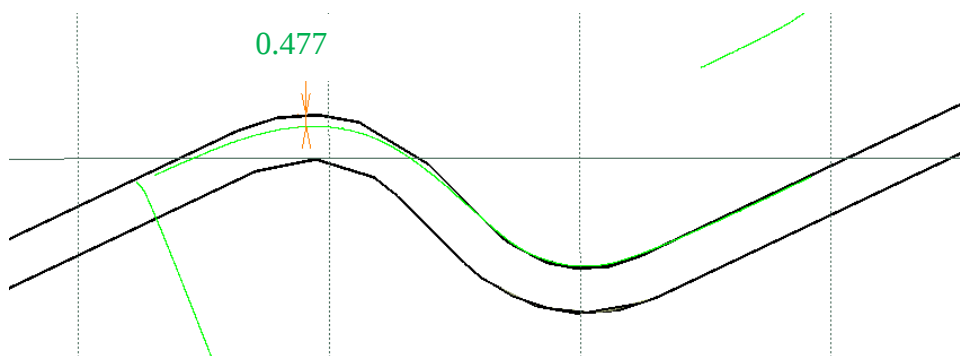
9.4 Анализа одступања у унапред дефинисаном пресеку

На слици 9.5 приказана је први пресек као и анализа провере одступања скен линије од идеалног CAD модела. Са слике може да се види да скен линија добијена мерењем реалног дела одступа за 0.091 mm од идеалног CAD модела. У зони радијуса се уочава веће одступање скен линије и идеалног CAD модела што је последица графичког приказа радијуса на монитору.



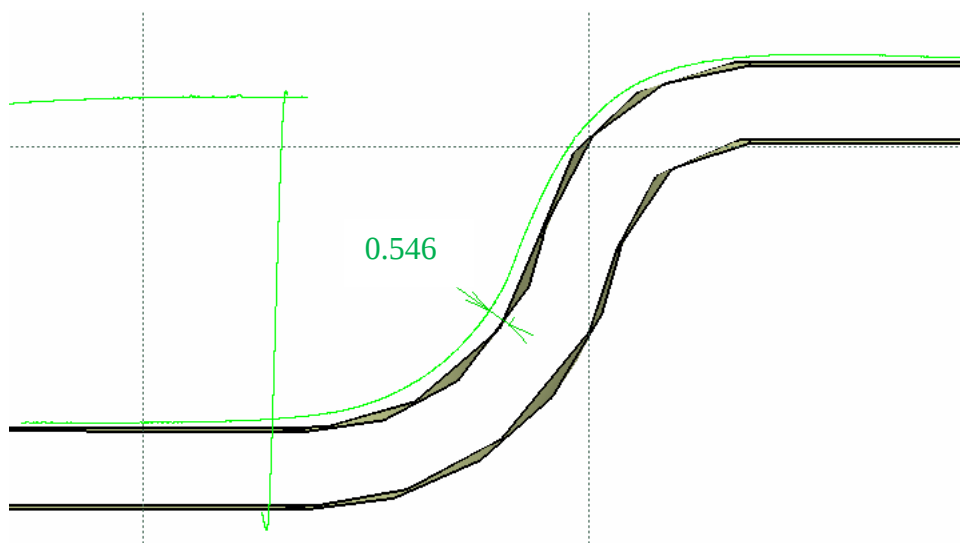
Слика 9.5 – Приказ првог пресека

На слици 9.6 приказан је други пресек скен линије реалног дела и идеалног CAD модела. Са слике се уочава да је одступање скен линије (зелено) од идеалног CAD модела за 0.477 mm, услед деформације лима у правцу дебљине у зони радијуса.



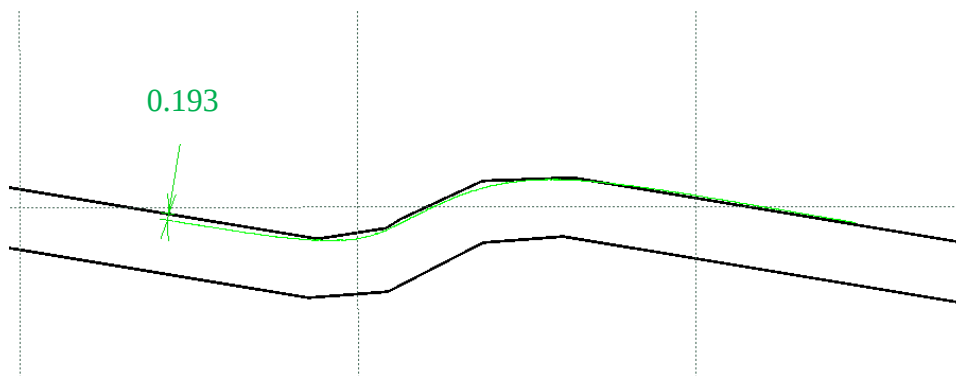
Слика 9.6 – Приказ другог пресека

На слици 9.7 приказана је провера одступања код трећег пресека. Са слике се види да скен линија (зелено) одступа од идеалног CAD модела за 0.546 mm, што је захтевало мање корекције алата у овој зони деформисања.



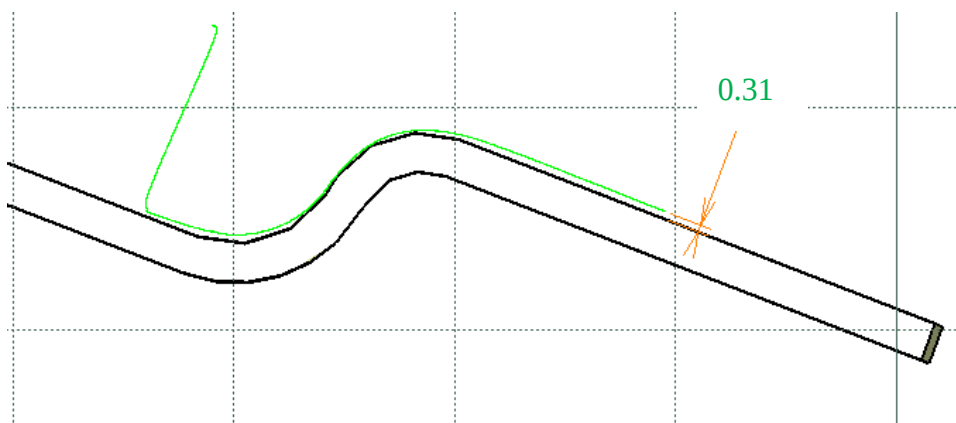
Слика 9.7 – Приказ трећег пресека

На слици 9.8 приказан је четврти пресек. Са слике се види да скен линија одступа од идеалног CAD модела за 0.193 mm.



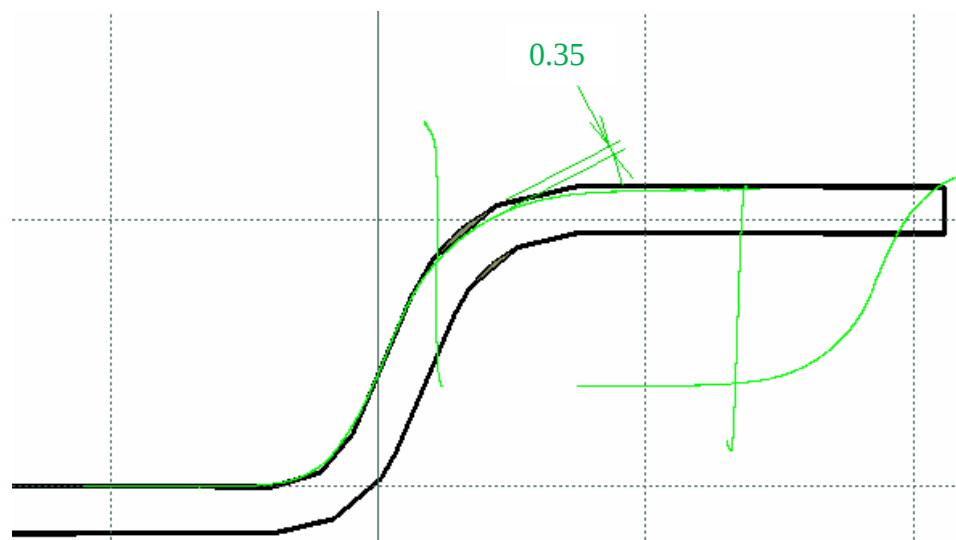
Слика 9.8 – Приказ четвртог пресека

На слици 9.9 приказана је анализа која је извршена ради добијања резултата одступања скен линије од идеалног CAD модела. Са слике се види да је одступање за 0.31 mm.



Слика 9.9 – Приказ петог пресека

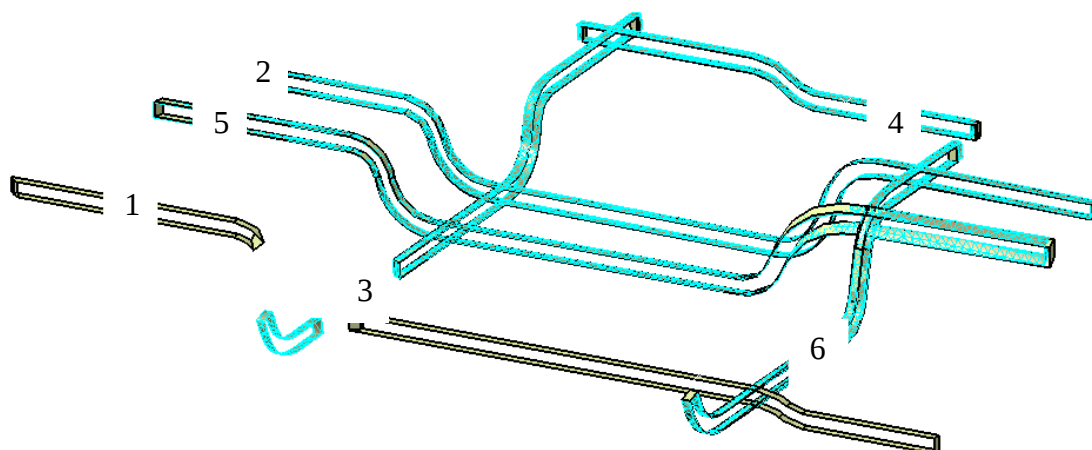
На слици 9.10 дата је анализа одступања шесте скен линије од идеалног CAD модела, са слике се види да је то одступање за 0.35 mm у зони радијуса услед деформације лима у правцу дебљине.



Слика 9.10 – Приказ шестог пресека

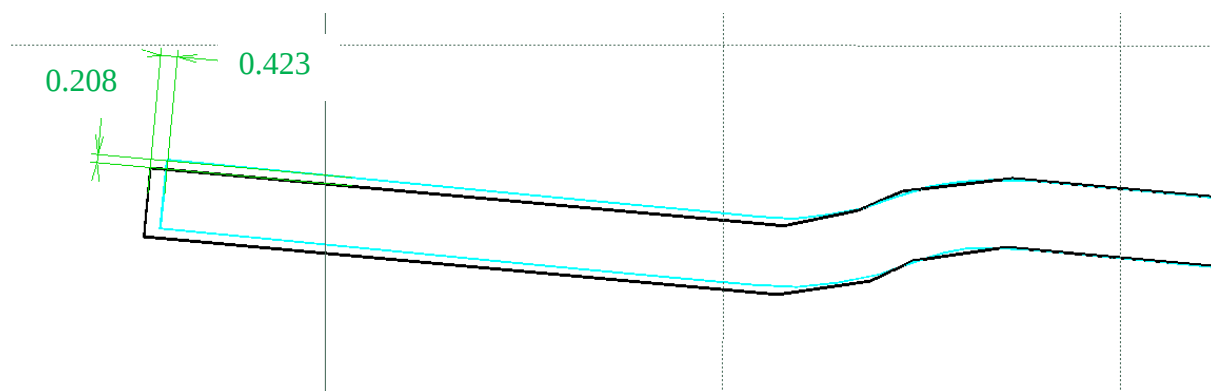
9.5 Анализа одступања виртуелног модела од CAD модела у карактеристичним пресецима за прву операцију

На слици 9.11 приказан је изглед свих пресека дела добијених симулацијом са идеалним CAD моделом. Зелена површина представља симулирани део, док жутом површином је представљен идеални CAD модел. У даљем тексту биће анализирани сви пресеци.



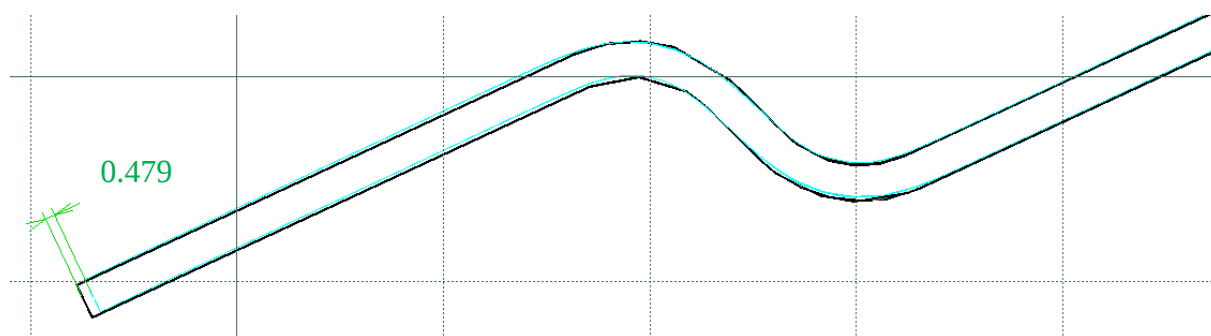
Слика 9.11 – Приказ свих пресека

На слици 9.12 приказан је први пресек симулираног дела са идеалним CAD моделом. Са слике се види да постоји одступање виртуелног модела од идеалног CAD модела и то за вредности 0.423mm у правцу дужине и 0.208 mm у правцу висине. Проблем одступања у правцу дужине је последица благог померања обратка у симулацији, који се не држи симетрично посредством тзв. ловаца, као у реалном делу.



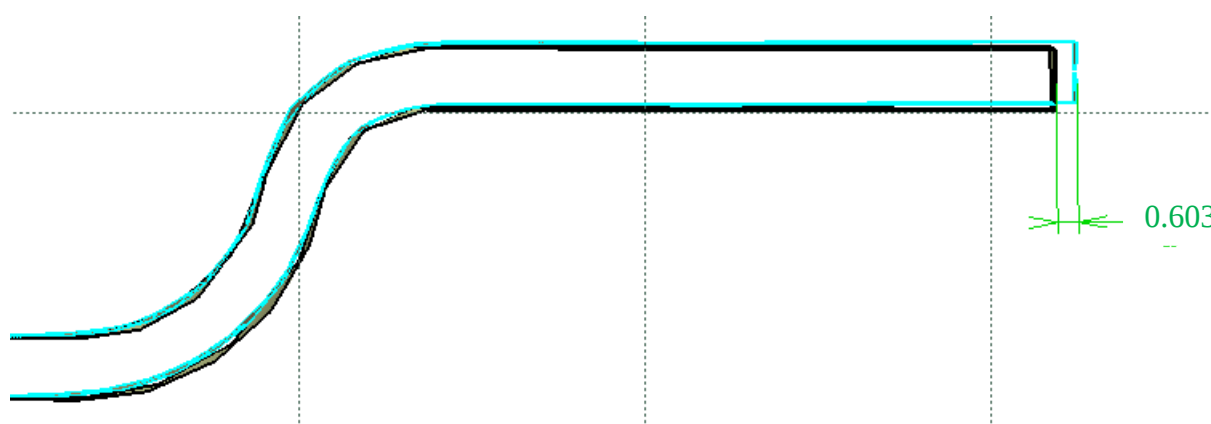
Слика 9.12 – Приказ првог пресека

На слици 9.13 приказан је други пресек. Са слике се уочава одступање за вредност од 0.479 mm, као последица претходно поменутог. Иначе у правцу дебљине лима постоји одлично поклапање резултата.



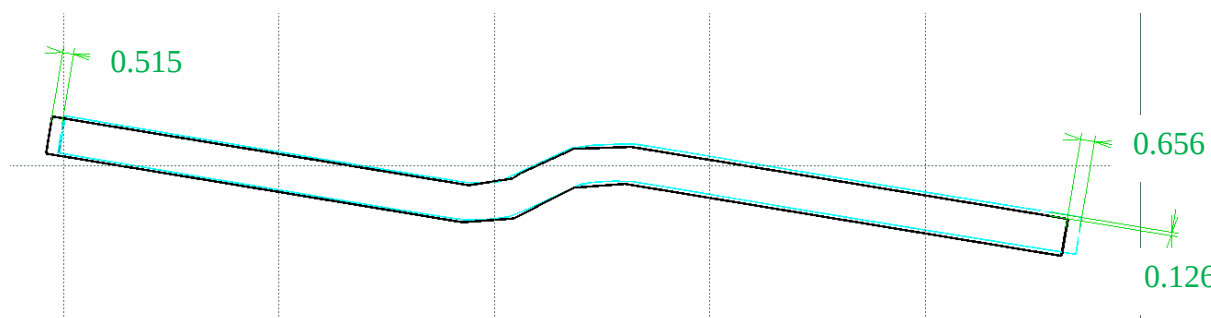
Слика 9.13 – Приказ другог пресека

На слици 9.14 приказан је трећи пресек. Са слике се види да је одступање симулираног дела од идеалног CAD модела за вредност 0.603 mm у правцу дужине, док су одступања по дебљини лима занемарљива.



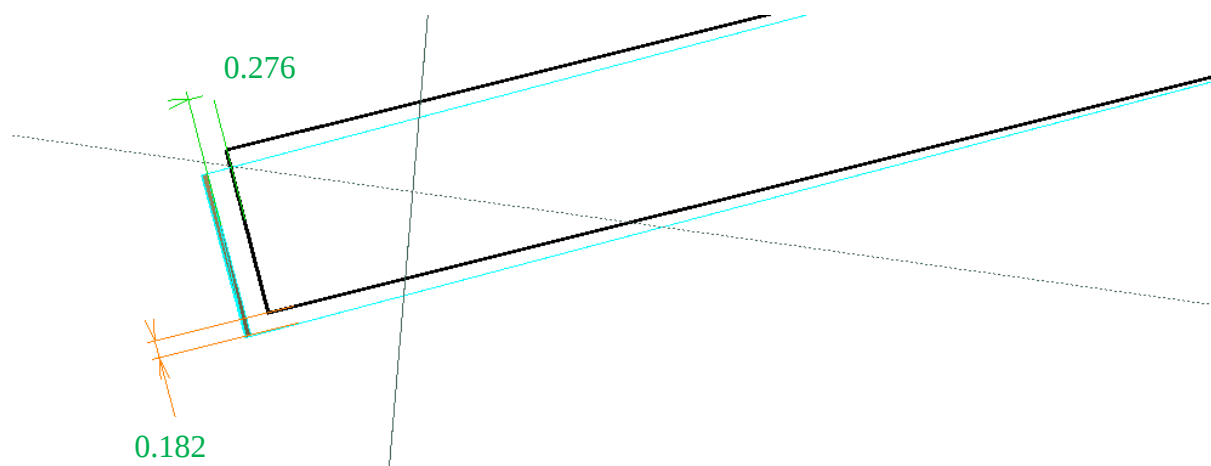
Слика 9.14 – Приказ трећег пресека

На слици 9.15 приказан је четврти пресек за контролу одступања виртуелног модела од CAD модела. То одступање по дужини износи са једне стране за 0.515 mm, са друге стране - 0.656 mm, а у правцу дебљине само 0.162 mm. Дужинска одступања указују на помереност обратка у алату при симулацији.



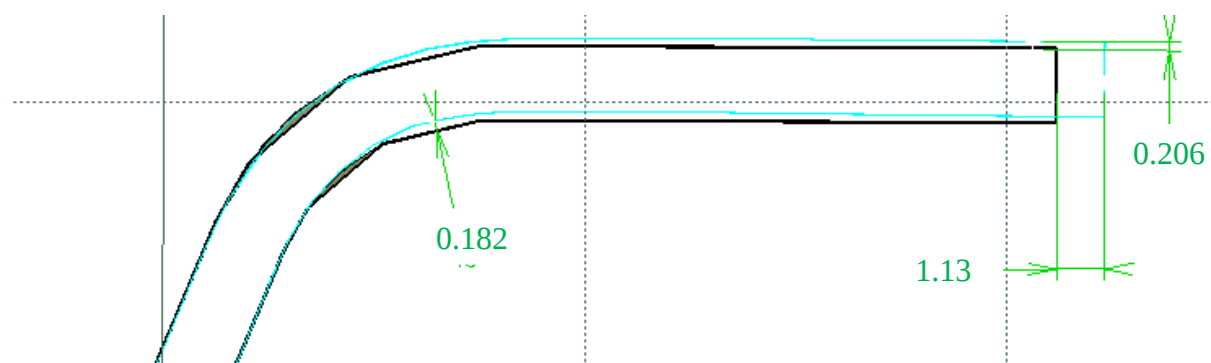
Слика 9.15 – Приказ четвртог пресека

На слици 9.16 приказано је упоређење петог пресека симулираног дела са CAD моделом. Са слике се примећује да то одступање на крају радног комада износи 0.276 mm у правцу дужине, док у правцу висине износи 0.182 mm. Последње указује на еластичну повратност и њену процену у симулацији.



Слика 9.16 – Приказ петог пресека

На слици 9.17 приказан је шести пресек да би се урадила анализа одступања симулираног дела од идеалног CAD модела. То одступање износи 0.206 mm, 1.13mm а у зони радијуса 0.182 mm. Већ је поменуто проблем померања обратка у симулацији, па је највеће одступање у овом пресеку последица тога. Остала одступања су мања и указују на ефекте еластичне повратности.

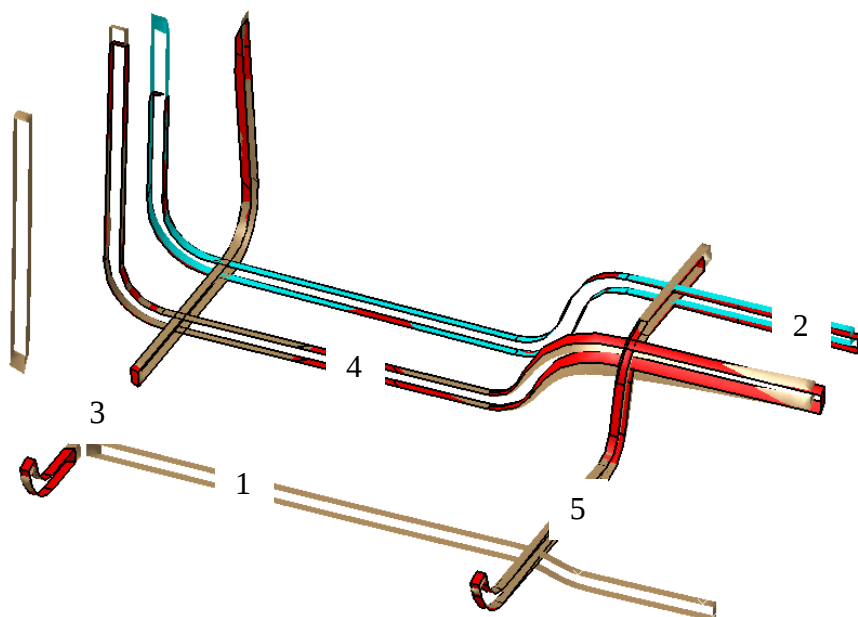


Слика 9.17 – Приказ шестог пресека

Из датих пресека види се да постоји знатна одступања виртуелног дела добијеног из процеса симулације од идеалног CAD модела у хоризонталном правцу због померености припремка на почетку симулације и у току, јер је разматран само један карактеристични део траке лима, потпуно симетричан и репрезентативан за цео процес. Међутим, може се закључити да при симулацији обликовања лима у корачним алатима треба узети у обзир и другу половину траке, зону алата са тзв. ловцима, како би се обезбедила реална представа целог процеса. То може резултирати у знатно дужем нумеричком прорачуну (чак неколико дана), али ће резултати симулације верно представити реални процеса. Приказани резултати у правцу дебљине лима имају задовољавајуће поклапање са реалним процесом.

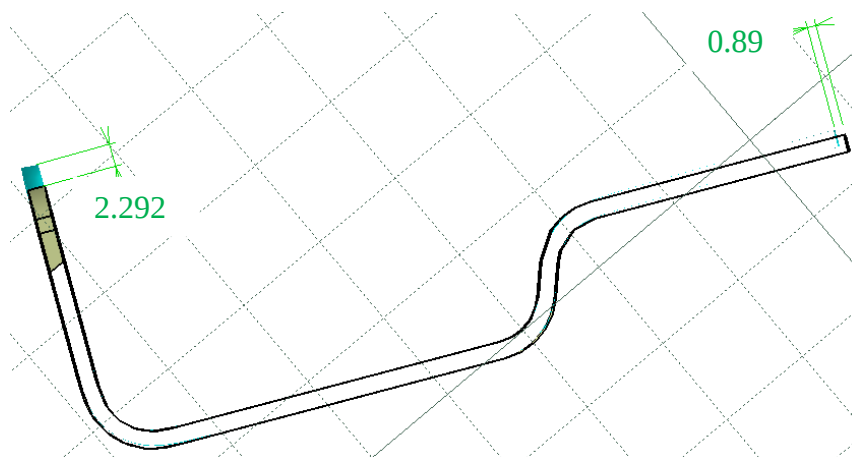
9.6 Анализа одступања дела добијеног симулацијом од идеалног CAD модела за другу операцију

На слици 9.18 приказан је изглед свих пресека дела добијених симулацијом са идеалним CAD моделом. Зелена површина представља симулирани део, док жутом површином је представљен идеални CAD модел. У даљем тексту биће анализирани сви пресеци. Овде ће се анализирати само пресеци два и три, јер у њима се дешава савијање два пера, и желимо да проверимо и упоредимо нумеричку процену обликовања са жељеним моделом радног комада.



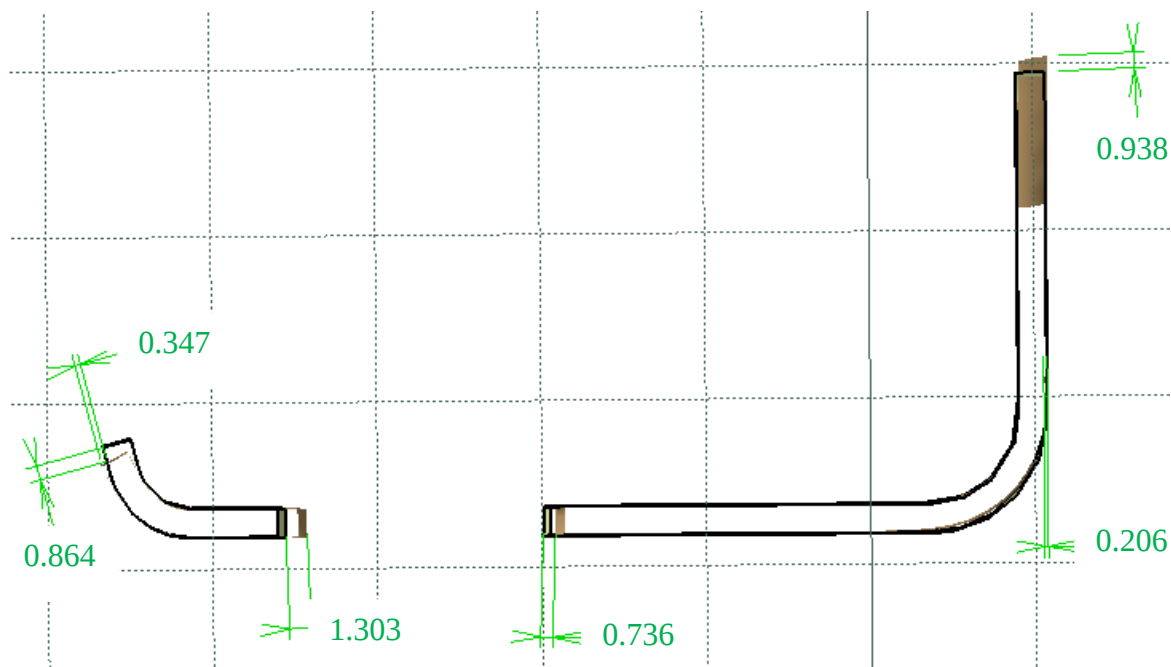
Слика 9.18 – Приказ свих пресека

На слици 9.19 приказан је други пресек у операцији 2. Са слике се види да део добијен путем симулације одоступа од идеалног CAD модела за: 2.292 mm и -0.89 mm али само у правцу равни лима, док у правцу дебљине нема значајних одступања. Посебно је важно истаћи да симулација савијања левог крака у пресеку показује добро поклапање са идеалним моделом, чак и процена еластичне повратности.



Слика 9.19 – Приказ другог пресека

На слици 9.20 приказан је трећи пресек урађен ради провере одступања дела добијеног симулацијом од идеалног CAD модела. Осим већих одступања у равни лима, због већ наведеног проблема позиционирања и држања обратка у току симулације, процена положаја десног крака који се савија је задовољавајућа, са одступањем од реалног за 0.206 mm, а на десном краку 0.347 mm.



Слика 9.20 – Приказ трећег пресека

Са датих пресека може се закључити да је последица померања припремка приликом прве симулације знатно утицала на одступања дела добијеног из симулације у односу на идеални CAD модел и у другој симулацији. Процена операције савијања и ефеката еластичне повратности је задовољавајућа.

10. Закључак

Ако се водимо чињеницом да се техника и технологија из дана у дан све више усавршава и мења, а самим тим постављају се нови стандарди квалитета на тржишту, чиме се условљава разне измене на постојећем производу или пуштањем новог производа у производњу, та савремена производња мора бити довољно флексибилна и способна да одговори на све те нове захтеве. Данас се ни једна савремена производња не може замислити без употребе рачунарске технике, опремљене неопходним софтвером, у свим областима производње од развоја, конструкције, симулације, провере тачности па до маркетинга и пласмана производа на тржиште.

У завршном раду у процесу обликовања лима, била је укључена рачунарска технологија, уз примену адекватних софтверских пакета попут Simufact.forming, Catia и др. Catia служи за пројектовање 3D модела, док Simufact.forming служи за симулацију технологија и проверу алата, у нашем случају корачног алата за обраду лима. То омогућава увид у значајне аспекте саме обраде деформисањем, утицаје параметара процеса на квалите производа, тј. обратка. Применом напредних техника мерења, координатне и оптичке метрологије може се извршити упоређење добијених модела процеса, обратка са реалним делом добијеним у индустријском процесу. Такође ја јако важно установити разлоге евентуалних одступања у виртуелном моделу добијеном симулацијом, и предупредити грешке у будућем раду и примени ових напредних техника пројектовања.

Један од разлога одступања добијених резултата симулације од идеалног и реалног дела је у прецизном описивању понашања материјала у току обликовања на бази испитивања материјала тестом затезања. За нумеричку анализу у раду коришћене су карактеристике материјала преузете за интернета. Додатно, за прецизније резултате симулације потребно је као репрезентативни узорак узети цео пресек траке, не само једну половину, тако да се ефекти померања припремка у виртуелном алата предупредите. Остале процене обликовања у операцији дубоког извлачења, и касније савијања два пера, као процена еластичне повртаности је задовољавајућа.

Коришћењем симулације приказаном у завршном раду у великој мери помогло је фабрици у решавању проблема који се појавио. Добијени су резултати напонског стања у комаду, величине деформационе силе, еластична повртаност. Добијени резултати омогућили су правилну корекцију алата, а самим тим и смањење времена потребног за проналажење разлога за појаву непрецизности у обраду само кроз индустријске пробе и претпоставке.

И на крају имајући у виду све што је речено у завршном раду може се закључити да примена напредних технологија виртуелног инжењеринга и техника мерења и скенирања може у великој мери унапредити пројектовање индустријских алата, посебно корачних алата за обраду лима.

Литература

- [1] Бранислав Девеџић, *Обрада метала деформисањем*, Београд 1981
- [2] Бинко Мусафија, *Обрада метала пластичном деформацијом*, Универзитет у Сарајеву, Сарајево 1969
- [3] Владо Вујовић, *Технологија пластичности у машинству*, Нови сад 1990
- [4] Србислав Александровић, Милентије Стефановић, *Технологија пластичног обликовања метала*, Крагујевац 2010.
- [5] Весна Мандић, *Физичко и нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем*. Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац 2012
- [6] Весна Мандић, *Виртуелни инжењеринг*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2007
- [7] Весна Мандић, *Моделирање и симулација у обради деформисањем*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2005
- [8] User manual, Simufact.forming, v.11.01, 2012.
- [9] http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=559