

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: CAD/CAM/CAE I

Број индекса: 25/2015

Немања Д. Кнежевић

**Анализа процеса провлачења отвора
коришћењем методе коначних елемената
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др Весна Мандић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- Проучи процес провлачења отвора и прикаже основе процеса
- Анализира литературне изворе а посебно резултате експерименталних истраживања процеса и утицајних параметара процеса на појаву дефеката
- Направи план нумеричких експеримената уз варирање вредности утицајних параметара, и реализује их коришћењем методе коначних елемената и апликативног софтвера *Simufact.forming*
- Представи добијене резултате и исте упореди са експериментално добијеним резултатима
- Уради анализу резултата и да закључке

Препоручена литература:

- [1] **Бинко Мусафија**, *Обрада метала пластичним деформисањем*, Сарајево, 1979. год.
- [2] **Весна Мандић**, *Физичко и нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем*, 2012, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
- [3] **Србислав Александровић, Милентије Стефановић**, *Технологија пластичног обликовања метала*, Крагујевац, 2010. год.
- [4] **Ранко Радоњић**, *Одређивање граничне деформабилности у процесу извлаћења отвора у лиму*, магистарски рад, Бања Лука, 2010.

Крагујевац, датум

Ментор:

Проф. Др Весна Мандић

Садржај

1. Увод	3
2. Провлачење отвора	4
2.1. Прорачун почетног пречника отвора	5
2.2. Фазе провлачења	6
3. Досадашња истраживања	8
3.1. Напонско-деформационо стање	10
4. Моделирање и симулација у ОМД	13
4.1. Опис програмског пакета Simufact.forming	13
4.2. Метода коначних елемената	14
5. План нумеричког експеримента	16
5.1. Нумеричка симулација HE-08-30-12	16
5.1.1. Дефинисање врсте нумеричке симулације	20
5.1.2. Увоз геометрије, избор материјала и пресе	20
5.1.3. Генерисање FE мреже припремка	23
5.1.4. Контролни параметри процеса	24
5.1.5. Резултати нумеричке симулације HE-08-30-12	24
5.2. Нумеричка симулација HE-08-30-16	26
5.2.1. Резултати нумеричке симулације HE-08-30-16	27
5.3. Нумеричка симулација HE-1-30-16	28
5.3.1. Резултати нумеричке симулације HE-1-30-16	31
5.4. Нумеричка симулација HE-08-50-22	32
5.4.1. Резултати нумеричке симулације HE-08-50-22	35
5.5. Нумеричка симулација HE-1-50-22	36
5.5.1. Резултати нумеричке симулације HE-1-50-22	39
5.6. Нумеричка симулација HE-1-50-24	40
5.6.1. Резултати нумеричке симулације HE-1-50-24	41
6. Анализа добијених резултата	43
7. Закључак	47
8. Литература.....	48

Резиме

У раду је извршена анализа процеса провлачења отвора на обратку од лима коришћењем методе коначних елемената, односно софтвера за виртуелну производњу. Посебно је анализиран утицај односа између почетног пречника отвора (отвор пре провлачења) и пречника отвора после процеса провлачења на појаву прекомерних напона и напрслина на ивици лима у зони провученог отвора. У завршном делу рада приказано је упоређење добијених резултата нумеричке симулације са резултатима експерименталних истраживања, а такође је дата и закључна анализа добијених резултата.

Кључне речи: Провлачење отвора, метода коначних елемената, нумеричка симулација

Abstract

This paper presents analysis of the hole-flanging process in sheet metal parts using the finite element method and software for virtual manufacturing. The influence of the relationship between the initial diameter of the hole (the hole before flanging process) and the diameter of the flanged hole after the process to the occurrence of excessive stresses and cracks at the edge of the sheet in the zone of the flanges. In the final part of the paper a comparison of the numerical simulation results and the results of experimental investigation are presented, as well as a final analysis of this comparison with main conclusions.

Keywords: *hole-flanging process, finite element method, numerical simulation*

1. Увод

Провлачење отвора представља један од битних процеса обраде метала, где је припремак израђен од лима са претходно пробијеним отвором. Држач лима чврсто држи припремак како не би дошло до померања током обраде, док притискивач увлачи припремак у отвор матрице уз помоћ силе, и формира се „грло”.

Завршни рад се састоји из два дела, теоретског и практичног.

Први део рада обухвата кратак приказ процеса провлачења отвора, где је дата основна подела и област примене. Дат је шематски приказ процеса провлачења отвора са његовим основним елементима. Наведена су досадашња истраживања у вези самог процеса обликовања. Приказан је прорачун за одређивање почетног пречника отвора, као и вредност радијуса матрице у односу на усвојену дебљину лима. Затим су приказани облици припремка који се могу обрадити технологијом провлачења и укратко су објашњене фазе провлачења отвора лима. Објашњено је какви се напони јављају приликом провлачења припремка у отвор матрице за обликовање, и дат је шематски приказ деформационог процеса при провлачењу отвора. Након тога је дат кратак увод у моделирање и симулацију у процесима обраде метала деформисањем, као и основне методе коначних елемената.

У другом делу завршног рада је представљен план спроведених нумеричких симулација, приказ улазних података за сваки нумерички експеримент, као и приказ најбитнијих излазних резултата. Анализа је спроведена за две вредности пречника притискивача (30mm и 50mm) и две дебљине лима (0,8 mm и 1 mm). У оквиру ове анализе су такође обухваћени и утицаји на процес провлачења следећих фактора:

- Утицај дебљине лима
- Утицај пречника отвора

Резултати анализе процеса провлачења који су приказани у раду су:

- Упоредба нумеричких експеримената на крају симулације са резултатима експеримената из литературе,
- Дијаграм деформациона сила-ход притискивача за све нумеричке експерименте обухваћене истраживањем,
- Вредности критеријума лома у виртуелним моделима процеса, односно обратка, и то на ивици лима провученог отвора,
- Дистрибуције максималног главног напона у току и након процеса деформисања.

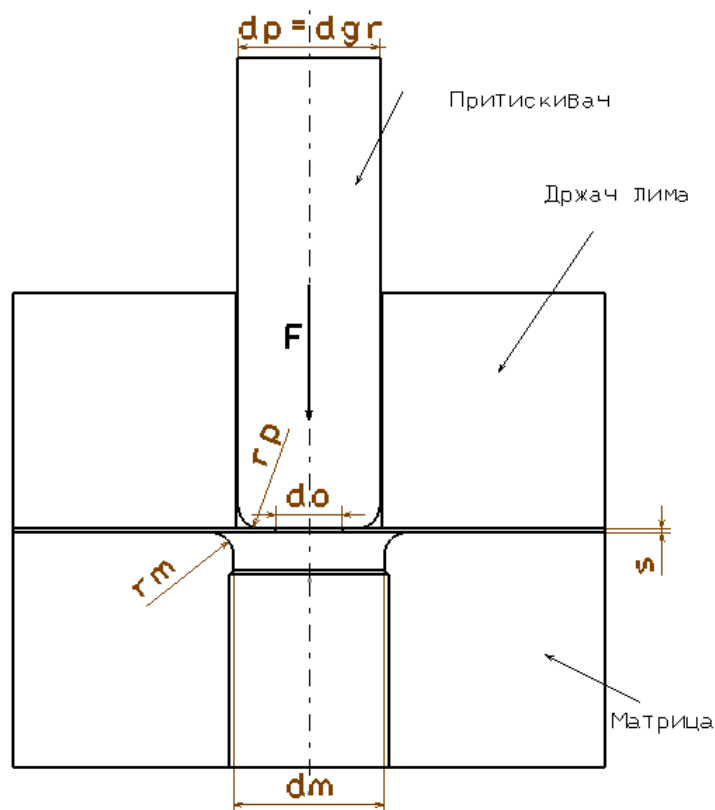
2. Провлачење отвора

Провлачење отвора је процес обраде метала (у хладном или, у посебним случајевима, у врућем стању) у којем се припремак израђен из лима извлачи у матрицу, при чему се формира „грло”. Има широку примену у аутомобилској индустрији. Ту је присутна још једна врста провлачења где је укључено истезање и обезбеђује крутост прирубнице. На припремак, на којем је претходно пробијена отвор, делује држач лима како не би дошло до кретања обода у току деформисања, и како би се спречило гужвање лима и стварање набора. Током овог процеса обраде, припремак је савијен два пута, једном око радијуса притискивача, а након тога преко радијуса матрице.

Могућа су два типа провлачења отвора и то [4]:

1. Провлачење отвора без стањења дебљине материјала и
2. Провлачење отвора са стањењем дебљине материјала

За овај рад је изабран први тип провлачења отвора. Из шематског приказа тока провлачења без промене дебљине материјала (сл.2.1), може се видети да су основни радни елементи алата за провлачење притискивач, држач лима, припремак (са својим задатим пречником D и дебљином s), и матрица.

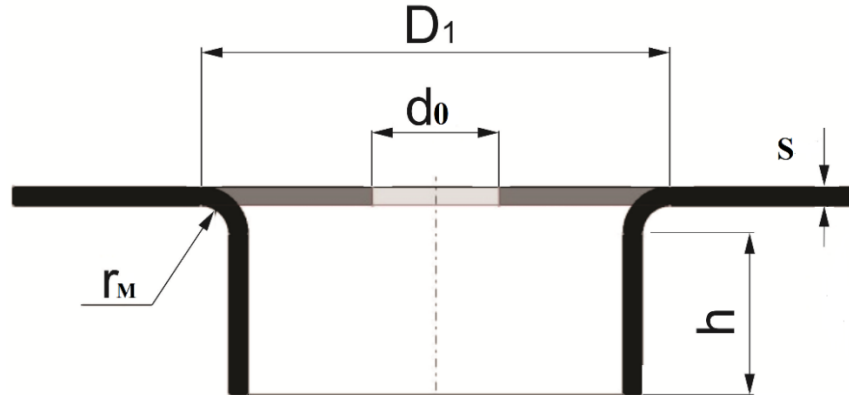


Сл.2.1 Шематски приказ процеса провлачења отвора

Делови који се обрађују првим поступком углавном се користе као подршка за спајање са цевима. Код овог поступка је изражено еластично враћање [4].

2.1 Прорачун почетног пречника отвора

За одређивање почетног пречника отвора за добијање грла у процесу провлачења, може се користити услов једнакости дужине извученог грла по средњој линији и ширине припремке.



Сл.2.2 Комад са провученим отвором

Уз помоћ сл.2.2. може се из геометријских односа добити образац за прорачун почетног пречника отвора [4].

$$\frac{D_1 - d_0}{2} = h + \left(r_M + \frac{s}{2}\right) \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{D_1 - d_0}{2} = h + \frac{\pi \cdot r_M}{2} + \frac{\pi \cdot s}{4}$$

$$2D_1 - 2d_0 = 4h + 2\pi r_M + \pi s$$

$$d_0 \cong D_1 - 2h - 3,14r_M - 1,57s$$

Међутим, помоћу ове формуле не можемо одредити иницијалне пречнике отвора које ће осигурати процес формирања без појаве пукотина.

Дефиниција иницијалног пречника која ће обезбедити процес без пукотина може се вршити експериментално или применом савремених нумеричких симулација.

Заменом у претходној једначини:

$$D_1 = d_m + 2r_m + 2s \quad \text{и} \quad h = H - r_m - s$$

где је:

D_m mm – унутрашњи пречник провученог грла

H mm- укупна висина грла

r_m mm- радијус матрице за провлачење

s mm- дебљина лима

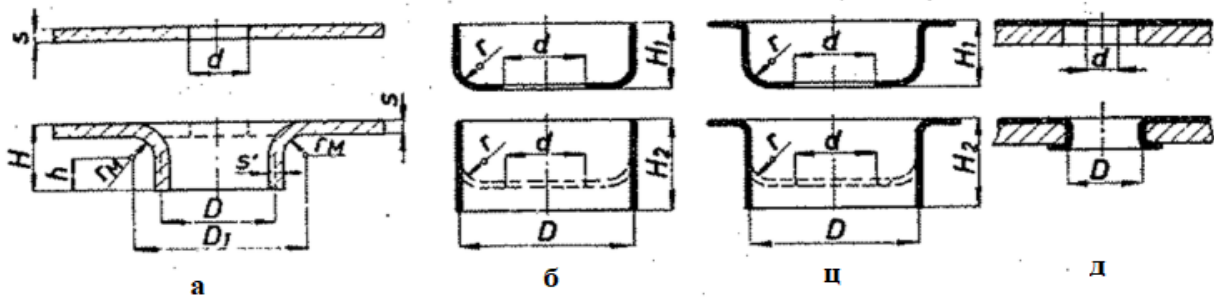
и на основу претходног обрасца може се израчунати и укупна висина провученог грла:

$$H = \frac{D-d}{2} + 0,43r_m + 0,715s$$

Пречник отвора може да варира у границама од $d = 3 \div 1000\text{mm}$, а дебљина лима $s = 0,25\text{mm} \div 30\text{mm}$.

Радијус матрице за провлачење се бира у зависности од дебљине лима и то:

- За лимове дебљине до 2mm : $r_m = (4 \div 5)s$
- За лимове дебљине преко 2mm : $r_m = (2 \div 3)s$

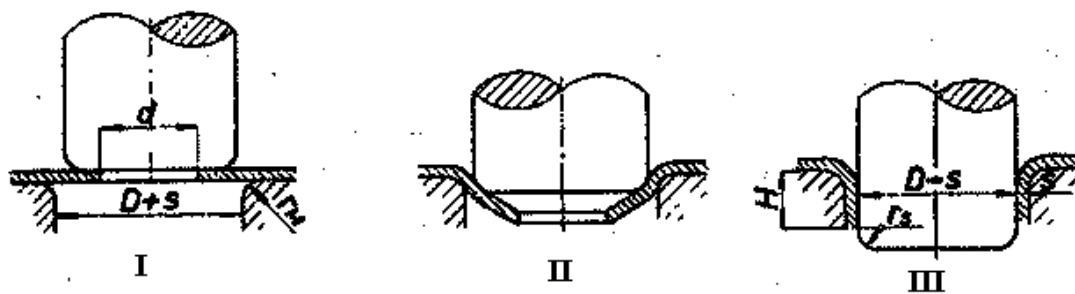


Сл.2.3 Разни облици припремка који се раде технологијом провлачења [1]

Технологијом обраде провлачењем могу се радити и прстенови (сл.2.3.б) тако што се, пре провлачења, у дну извученог припремка висине H_1 пробија отвор пречника d , који се затим провлачи и тако настаје прстен висине, $H_2 > H_1$. Сличним поступком се производе и чауре са венцем (сл.2.3.ц). Провлачење се често примењује и као метод обраде за спајање два комада (сл.2.3.д) [1].

2.2 Фазе провлачења

У првој фази провлачења (сл.2.4.І) притискивач налаже на припремак ширине $(D+s)-d$. Под дејством силе притискивача делови материјала, који су у контакту са ивицама припремка за провлачење (под радијусом r_m) су изложени сложеним напонима, услед оптерећења на савијање и истезање (сл.2.4.ІІ). Последња фаза провлачења се завршава када се чеона површина притискивача спусти за износ радијуса притискивача (r_s) испод висине грла (H) (сл.2.4.ІІІ).



Сл.2.4 Фазе провлачења припремка [1]

3. Досадашња истраживања

Током процеса провлачења отвора припремак је изложен сложеним напонима, и самим тим јављају се одређени проблеми због којих може доћи до нарушавања континуитета запремине припремка, па су истраживачи током својих истраживања покушавали да дефинишу односе између утицајних фактора и самог процеса обликовања.

Johnson W. је имао за циљ да кроз експериментална истраживања дође до резултата, праћењем деформација на „грлу“ провученог отвора на припремку кружног облика, који би му помогли да што лакше предвиди границу деформисања. Такође, истраживао је утицај пластичне карактеристике материјала и извршио експерименталну студију о деформацији кружних плоча [4].

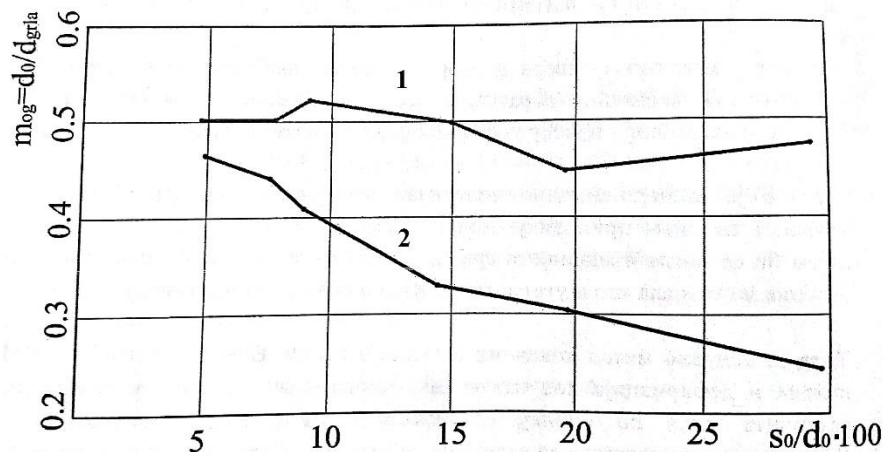
Tang се за анализу напона и деформација код провучених отвора у лиму, који су обликовани са четири различита притискивача по облику (полусферни, елипсоидан, цилиндричан и конусни), одлучио за метод коначних елемената (*Finite Element Method–FEM*). Истраживањем се доказало да утицај на величину деформација има облик притискивача у току процеса обликовања, а исто тако, облик притискивача има утицај и на величину деформационе силе [4].

Takuda и Natta су закључили да се граница деформисања при провлачењу отвора смањује заједно са мањим радијусом на притискивачу [4].

Leu је у својим експериментима користио полусферне, конусне и цилиндричне притискиваче, како би истраживао утицај облика притискивача. Дошао је до закључка да је однос између почетног пречника и пречника након провлачења отвора приближно линеаран [4].

Yamada је изучавао утицај почетног напона течења и појаве очврсћивања користећи инкременталну теорију пластичности како би одредио расподелу напона и деформација у процесу провлачења отвора. За време истраживања користио је раван цилиндрични притискивач. Поред фактора који утичу на деформабилност у процесу провлачења отвора, као што су пластична особина материјала, анизотропија, други спољашњи фактори који утичу на деформабилност су облик притискивача и зазор између притискивача и матрице [4].

Највећи утицај на величину дозвољеног коефицијента обликовања грла (m_{og}) има утицај стања метала на ивицама отвора, однос дебљине припремка и пречник почетног отвора, док мањи утицај имају облик притискивача и положај припремка у случају да је отвор израђен пробијањем, ово је установљено од стране руских истраживача [4].



Сл.3.1 Дијаграм зависности граничног коефицијента m_{og} од односа $\frac{s_0}{d_0}$ [4]

(1) - Отвор израђен пробијањем

(2) - Отвор израђен бушењем са накнадним чишћењем

На дијаграму сл.3.1. је приказан утицај стања метала припремка на ивици отвора и величине $\frac{s_0}{d_0}$ на степен обликовања, дијаграм је нацртан на основу ескеприменталних резултата за нискоугљеничне челике.

Дати експерименти су показали да је коефицијент $m_{og} = \frac{d_0}{d_{grla}}$ при деформисању припремка са отвором израђеним пробијањем, већи од коефицијента обликовања грла (m_{og}) при деформисању припремка код којег је отвор израђен бушењем са додатном обрадом (развртање и чишћење грата). Ово се може објаснити тиме, да зона ојачавања метала настаје при пробијању недалеко од површине где почиње раздвајање отвора. Ово ојачање има утицај на стање метала, јер му смањује пластичност метала, а у току обликовања грла тај ојачани слој има највећу деформацију непосредно уз отвор.

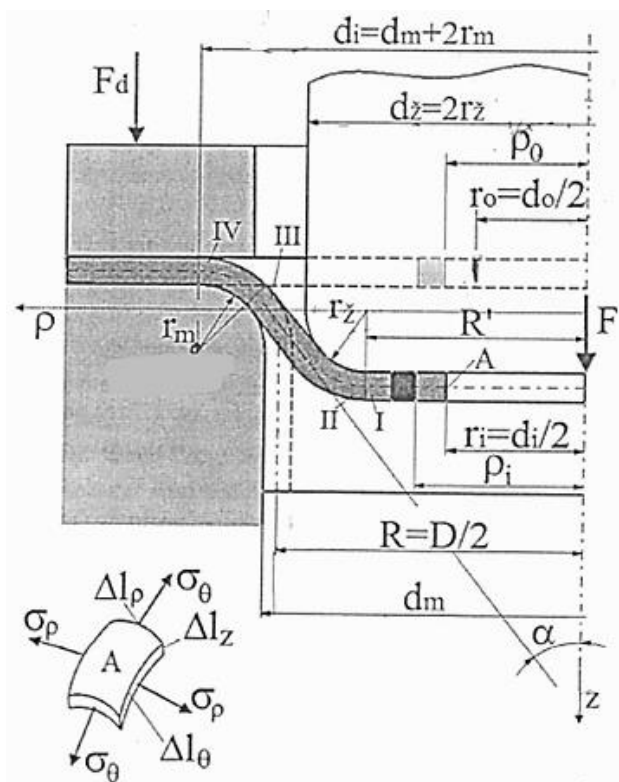
Ако се јави смањена пластичност метала непосредно уз отвор, један од узрока је превремено разарање и повећање дозвољене вредности коефицијента m_{og} .

Из дијаграма сл.3.1. се може видети, да повећање односа $\frac{s_0}{d_0}$ доприноси смањену коефицијента m_{og} (повећање дозвољене деформације).

Претходно споменути истраживачи су у својим експериментима установили, да ако се уклони ојачани слој настао услед примене операције чишћења, коефицијент m_{og} при истим осталим условима добија готово исте вредности, као и код припремка код којег је отвор израђен бушењем са накнадним развртањем. Такође је битно споменути да на величину дозвољеног коефицијента m_{og} битно утиче однос дебљине припремка и пречника почетног отвора [4].

3.1. Напонско-деформационо стање

Дефинисањем напонског и деформационог стања може се одредити радни напон код овог процеса деформисања лима. Напонско-деформационо стање се мења током процеса у зони пластичног деформисања. Провлачење отвора спада у групу проблема везане за основно-симетрично деформисање, где се повећава пречник почетног отвора и висина грла, док се дебелина зида смањује. Код овог процеса се јавља деформациона зона на делу обратка по ободу матрице за обликовање, при чему се у тој зони повећава дужина елемента обратка у тангенцијалном правцу [4].



Сл.3.2 Шематски приказ деформационог процеса при провлачењу отвора [4]

Приликом провлачења припремка у отвор матрице за обликовање, на месту припремка који се налази на ободу матрице нема деформације, али се јављају радијални напони истезања. С обзиром да се тангенцијална деформација јавља као деформација истезања, онда су и тангенцијални напони истежући. Контактни напони имају веома малу вредност, па самим тим њихова вредност нема значајан утицај за прелазак обратка у пластично стање, и зато се може рећи да је у деформационој зони шема напонског стања раванско двоосно истезање.

Пошто се на ивици отвора јавља радијални напон $\sigma_r = 0$, он мора бити променљив и мења се од нуле на ивици отвора до максимума на граници деформационе зоне на недеформисаном делу припремка. Када је максимални главни нормални напон тангенцијални напон σ_θ , тада се може одредити услов пластичности у било којој тачки припремка.

Код процеса деформисања при обликовању припремка са кружним почетним отвором, постоји осна симетрична деформација која условљава добијање осно-симетричног цилиндричног грла [4].

Са сл.3.2 се може видети да се при обликовању округлих прстенастих елемената повећава опсег припремка, при чему се елементи релативно померају у односу на чело притискивача и постепено улазе у зазор између притискивача и матрице формирајући изводницу грла. Деловање момента савијања у зони деформисања доводи до тога да се део припремка у односу на чело притискивача мало удаљава од њега, попримајући конусни облик. Сила трења се јавља на заобљеној ивици притискивача, док на површини припремка делују нормални напони. У овом раду се разматрало деформисање притискивачем са радијусом заобљења ($r_z=5\text{mm}$). Код обликовања грла које се изводи са притискивачем са релативно малим радијусом заобљења, једначина равнотеже има облик [4]:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0$$

По хипотези максималног тангенцијалног напона, једначина пластичности има облик:

$$\sigma_\theta = \sigma_s$$

Решавањем ове једначине:

$$\ln(\sigma_\rho - \sigma_s) = -\ln \rho + c$$

Константа интеграловања се одређује из граничних услова, где је $\sigma_\rho = 0$ при $\rho = r_0$;

$$C = \ln(-\sigma_s) + \ln r_0$$

Након уношења израза за константу интеграловања и трансформације добија се:

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left(1 - \frac{r_0}{\rho} \right)$$

Ово је идеализована једначина, која може да се користи за приближно одређивање поља деформације припремка при обликовању грла.

Са сл.3.2 се може видети да при одређеном кораку деформисања повећава се почетни радијус r_0 и постаје једнак r_i , док се на основу хипотезе о једнакости запремина дебљина лима смањује.

Ако се узме у обзир да се однос σ_ρ и σ_θ не мења, онда из једначине везе следи [4]:

$$\frac{\sigma_\rho - \sigma_z}{\sigma_\theta - \sigma_z} = \frac{d\varepsilon_\rho - \varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta - \varepsilon_z}$$

Из једначине пластичности $\sigma_s = \sigma_\theta$ може се добити израз да промену дебљине:

$$s_1 = s_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho_i} \right)^{\frac{\sigma_s - \sigma_\rho}{2\sigma_s - \sigma_\rho}}$$

Након уношења вредности σ_p из идеализоване једначине у једначину везе, даљим сређивањем добија се:

$$s_1 = s_0 \sqrt{\frac{r_0}{R}}$$

По завршетку процеса деформисања, коначна вредност радијуса на припремку у зони деформисања је једнака радијусу добијеног отвора грла $\rho_i = R$, па се добија [4]:

$$s_1 = s_0 \left(\frac{\rho_0}{R} \right)^{\frac{2\rho_0 - r_0}{\rho_0 - r_0}}$$

На основу добијених израза може се закључити да се при провлачењу грла у читавој деформационој зони припремак стањује, а због хипотезе о једнакости запремине површина се повећава.

4. Моделирање и симулација у ОМД

Моделирање и симулацију чине низ активности за прављење модела реалног система и његову симулацију на рачунару, коју све чешће користе студенти као изборни академски програм за различите научне дисциплине. То су дисциплине са својом сопственом облашћу знања, теорије и истраживачке методологије у чијој је основи фундаментална поставка да су модели апроксимације реалног света [5].

Моделирање и сумалиција представљају активности ван производног окружења при чему се могу остварити бројни циљеви. Ове активности успешно повећавају продуктивност, побољшавају квалитет производа, омогућавају краћи циклус пројектовања, олакшавају едукацију и стицање потребног знања, олакшавају процес пројектовања нове опреме и алата итд [2] .

Модел је апстракција реалности али упрошћена, идеализована и обично не обухвата све аспекте. Коришћење симулација а нарочито њихово креирање, омогућава дубљи и потпунији увод у демонстрацију или анализу неког проблема, као и одређивање понашања модела на основу вредности улазних података[5].

Предности увођења рачунара као начин моделирања је у томе што је техника јефтинија од традиционалног начина пројектовања, модификације на моделима алата трају краће, јефтиније су, а самим тим нуде и широк опсег информација о процесу који желите да покренете [2].

Циљ физичког моделирања и нумеричке симулације је унапређење пројектовања алата и утврђивање параметара процеса. То се постиже одређивањем течења материјала и коначних димензија дела, уочавањем и превенцијом дефеката течења материјала. Унапређења се могу постићи и симулацијом процеса у циљу провере попуњавања алата, контролом услова контактеног трења и трансфера топлоте, као и откривањем прекомерних притисака у алату [2].

Други циљ физичког моделирања и нумеричке симулације у пројектовању процеса у ОМД односи се на побољшање квалитета готовог дела и смањење трошкова производње. Циљ се остварује одређивањем деформационо – температурно – напонских поља у делу и алату, предвиђањем микроструктуре, контролом величине зрна и побољшањем течења материјала. Трошкови производње могу се смањити смањењем неуспелих покушаја у производњи, смањењем главног времена израде и шкарта [2].

4.1.Опис програмског пакета *Simufact.forming*

Софтверски пакет *Simufact.forming* развијен је за симулацију различитих процеса обраде материјала. Омогућава кориснику да препозна реалне ситуације из производње и даје увид у све аспекте процеса. Програм има моћан постпроцесор за визуелизацију резултата симулације. Користи се за анализу и симулацију готово свих метода обликовања материјала, независно од: температуре процеса, машине, материјала обраде, врсте процеса и слично. Омогућава приказ течења материјала, попуњавања алата и може приказати и безконтактне

зоне. Користи се и за праћење напона, деформација, температуре и дистрибуције притиска. Програмом се може предвидети хабање алата и проценити критеријума лома. Успешан је у процени сила на алатима и напонских дистрибуција.

Коришћењем методе коначних елемената долази се до најпрецизнијих резултата, а резултате симулације је могуће приказати у било ком тренутку процеса. Радни комад који је дефинисан као 3D објекат се импортује у софтвер, а након тога, на захтев корисника, аутоматски се креира 3D мрежа модела радног комада коју програм током симулације стално коригује како би се пратиле велике деформације. Коришћење оваквих коначних елемената се показало ефикасно за приказивање варијација дебљине, еластичне повратности и заосталих напона [6].

4.2.Метода коначних елемената

Метода коначних елемената (*Finite Element Method-FEM*) се заснива на физичкој дискретизацији одређеног домена који се анализира, при чему се тај посматрани континуум са бесконачним бројем степени слободе апроксимира дискретним моделом који се састоји од одређеног броја међусобно повезаних коначних елемената са коначним бројем степени слободе. Може се закључити да овај метод спада у методе дискретне анализе. Пре саме употребе софтвера за нумеричку симулацију која ради на принципу метода коначних елемената, потребно је знати следеће:

- Домен континуума који се посматра се дели на елементе са коначним димензијама, који се називају коначним елементима,
- Посматрани коначни елементи су међусобно повезани у коначном броју тачака које се налазе на контури елемената и називају се чворови, а скуп елемената који су повезани у чворовима чине мрежу коначних елемената посматраног домена,
- Унапред задате функције за један тип коначног елемента се називају интерполационе функције,
- Интерполационе функције су унапред задате функције за један тим коначног елемента и представљају везу између вредности променљиве поља у било којој тачки коначног елемента и вредности променљиве поља у чворовима.

Постоје четири основна типа МКЕ, а то су: директна, варијациона, метода резидуума, метода баланса енергије.

За потпуно разумевање основних поставки анализа МКЕ потребно је познавати неке основне појмове механике непрекидних средина, а то су пре свега појмови напона и деформација као и односи између њих који се називају конститутивним релацијама.

Да би се успешно решио проблем у пракси, потребно је придржавати се следећег редоследа:

1. Идентификација проблема,
2. Дефинисање врсте и величине коначних елемената за дискретизацију,
3. Формирање једначина за елемент,

4. Повезивање једначине елемената,
5. Нумеричко решавање глобалних једначина

Најважнија и најдуготрајнија фаза у процесу анализе МКЕ је припрема улазних података за анализу или препроцесирање. Квалитет операција моделирања обављених у овој фази у великој мери утиче на квалитет резултата анализе [2].

5. Нумерички експерименти процеса провлачења отвора

План нумеричких експеримената (Табела 5) је направљен на основу резултата физичких експеримента и истраживања процеса провлачења отвора реализованих у раду (*Ранко Радоњић, 2010*), а који ће се у овом раду користити за упоређење са резултатима нумеричких експеримената.

Табела 5. Нумерички експерименти

Нумерички експеримент	s дебљина лима	D_{gr} пречник грла	d_0 пречник почетног отвора
НЕ-08-30-12	0.8	30	12
НЕ-08-30-16	0.8	30	16
НЕ-1-30-16	1	30	16
НЕ-08-50-22	0.8	50	22
НЕ-1-50-22	1	50	22
НЕ-1-50-24	1	50	24

При нумеричкој симулацији одређеног броја припремака за пречник грла $d_{grla} = 30mm$ и $d_{grla} = 50mm$ дата је и процена коефицијента деформабилности на основу *Cocroft-Latham* модела. На основу резултата реализованих нумеричких експеримената формиран су и дијаграми зависности силе деформисања од хода притискивача за одређене вредности почетних пречника отвора и две дебљине лима.

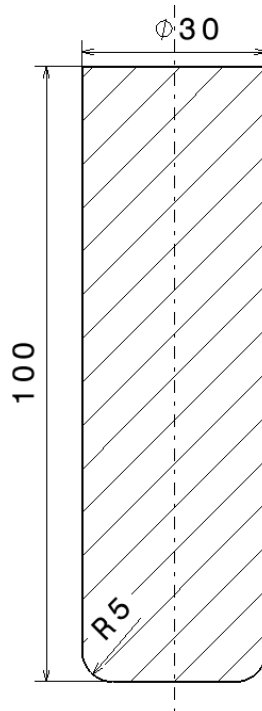
У наставку су у посебним одељцима приказани улазни подаци за нумеричке експерименте као и релевантни резултати.

5.1. Нумерички експеримент НЕ-08-30-12

3D склоп модела алата за НЕ-08-30-12 направљен је у програму *CATIA*. Неопходни алат за овај експеримент се састоји из: притискивача (горњи део алата), држача лима, матрице (доњег дела алата).

На слици 5.1 је дат приказ притискивача са његовим димензијама.

Радијус притискивача r_p износи 5 мм, пречник грла D_{gr} је 30 мм, док његова висина је произвољно узета и износи 100 мм.



Сл.5.1 Притискивач за HE-08-30-12

Држач лима је приказан на слици 5.2.

Пречник унутрашњег отвора држача лима је већи од пречника притискивача и узета је вредност:

$$D_{dr} = 31 \text{ mm}$$

Одређивање зазора је изведено према обрасцу [6]:

$$z = s + c\sqrt{10s}$$

$$z = 0.8 + 0.07\sqrt{8} = 0.9 \text{ mm} \approx 0.9 \text{ mm}$$

$$c=0.07 \text{ за челик}$$

Пречник држача лима мора бити исти као и пречник припремка, $D = 125 \text{ mm}$.

Димензије матрице су приказане на слици 5.3.

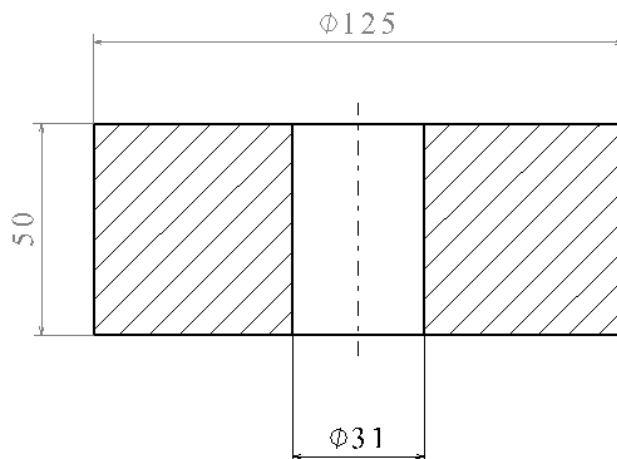
Пречник матрице мора бити исти као и пречник припремка због остваривања бољег контакта дуж целе површине припремка. Унутрашњи пречник матрице се рачуна као:

$$d_m = d_p + 2z$$

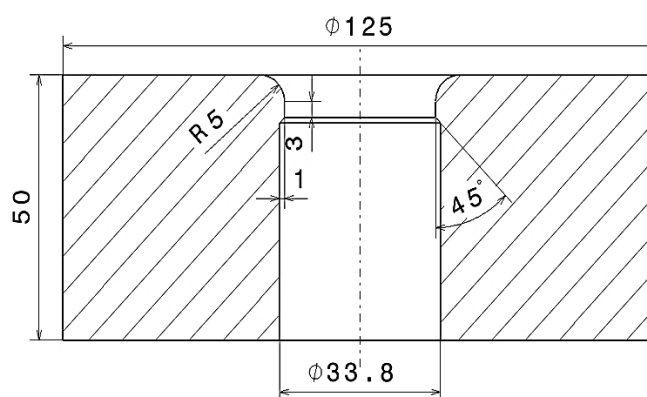
$$d_m = 30 + 1,8$$

$$d_m = 31,8 \text{ mm}$$

Радијус матрице је $r_m = 5 \text{ mm}$, као што је приказано на слици 5.3.

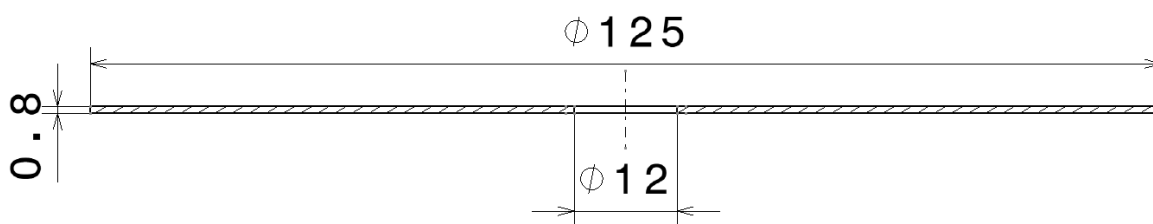


Сл. 5.2 Држач лима за HE-08-30-12



Сл. 5.3 Матрица за HE-08-30-12

На слици 5.4. дат је припремак за HE-08-30-12 са његовим димензијама.

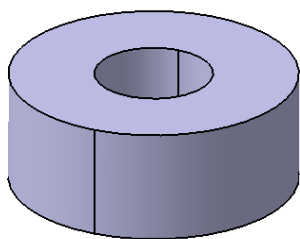


Сл. 5.4 Припремак за HE-08-30-12

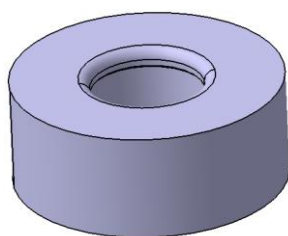
Пречник почетног отвора $d_0 = 12$ mm а спољашњи пречник припремка је $D = 125$ mm, и вредност је усвојена према магистарском раду (Ранко Радоњић, 2010) ради даљег упоређења резултата.

Слике креираних алата су приказани на (сл.5.5-5.7). У модулу *Assembly Desing*, програма *CATIA*, урађен је склоп алата како би се алати довели у њихов заједнички координатни систем. Делови алата су сачувани у *STL* формату како би били импортовани у програм *Simufact.forming*.

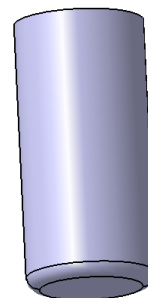
Модел склопа алата за процес провлачења је дат на слици 5.8.



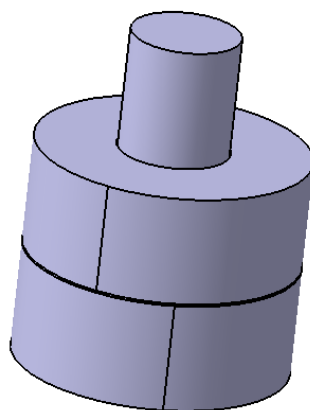
Сл.5.5 Држач лима



Сл.5.6 Матрица

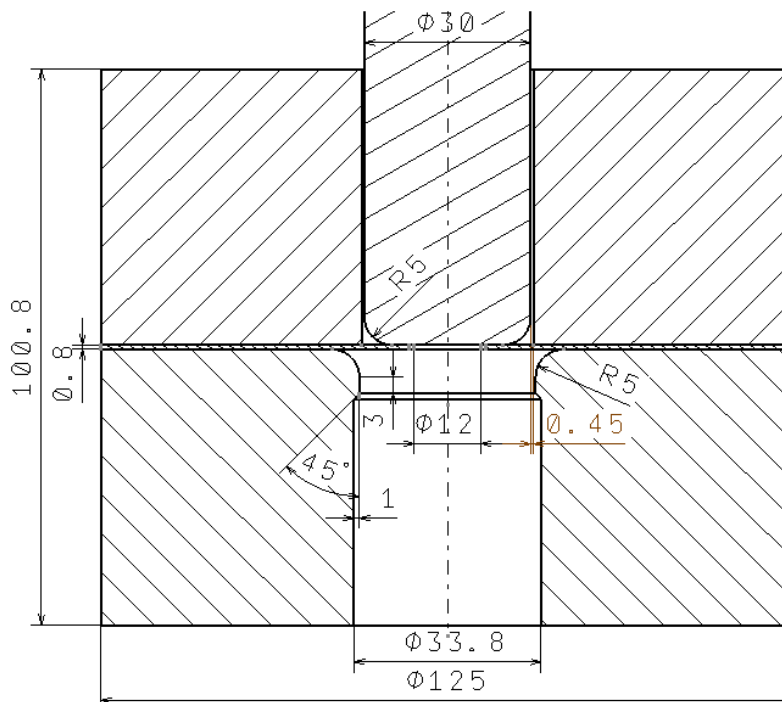


Сл.5.7 Притискивач



Сл.5.8 CAD модел склопа алата за процес провлачења

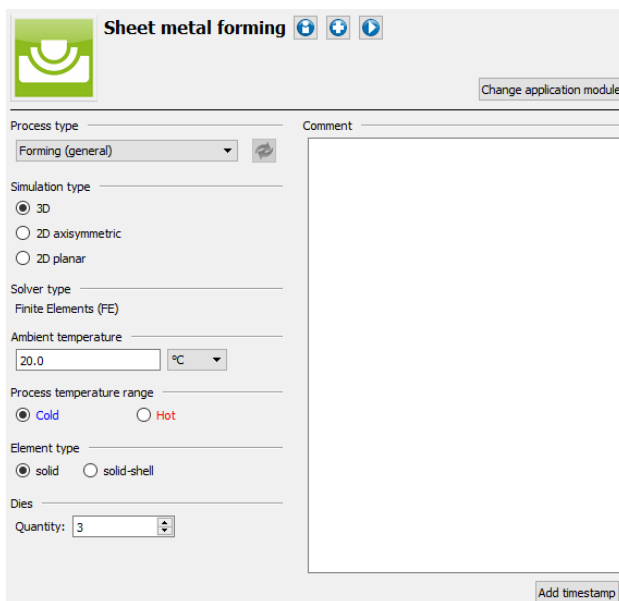
Ради бољег и лепшег приказа склопа алата, исти је приказан као технички цртеж у пресеку на слици 5.9.



Сл. 5.9 Модел склопа алата HE-08-30-12 приказан у пресеку

5.1.1. Дефинисање врсте нумеричке симулације

Врста нумеричке симулације се бира у прозору *Process Definition*, програмског пакета *Simufact.forming*, на слици 5.10. дат је приказ прозора у коме се бира врста симулације. За тип процеса је изабран *Forming(General)*. Процес се одвија у хладном стању (на собној температури), симулација је изведена коришћењем 3D прорачунског модула, коришћењем методе коначних елемената (FE), а број алата потребни за ову операцију је три, и то: притискивач, држач лима, матрица.



Сл.5.10 Прозор за дефинисање процеса

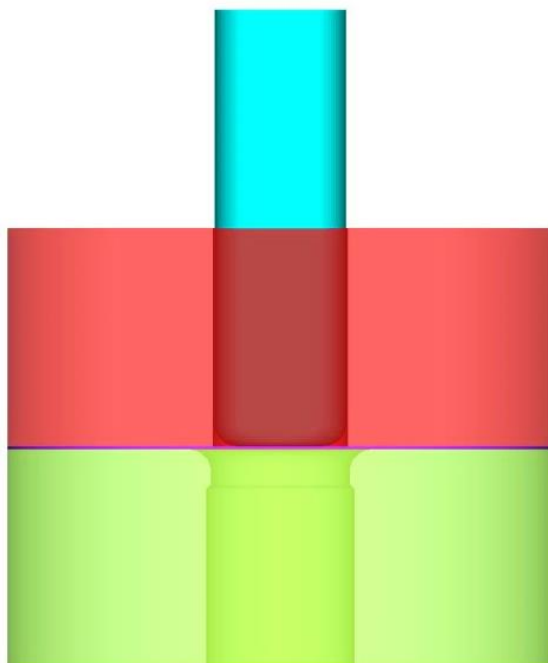
5.1.2. Увоз геометрије, избор материјала и пресе

Након дефинисања типа процеса, потребно је алате импортовати и прецизно позиционирати. Позиционирање алата је претходно урађено у програму *CATIA*, и самим тим, након импортовања алата у програм *Simufact.forming*, њихове позиције су биле задржане и није било потребно вршити додатно дефинисање геометрије у едитору програма.

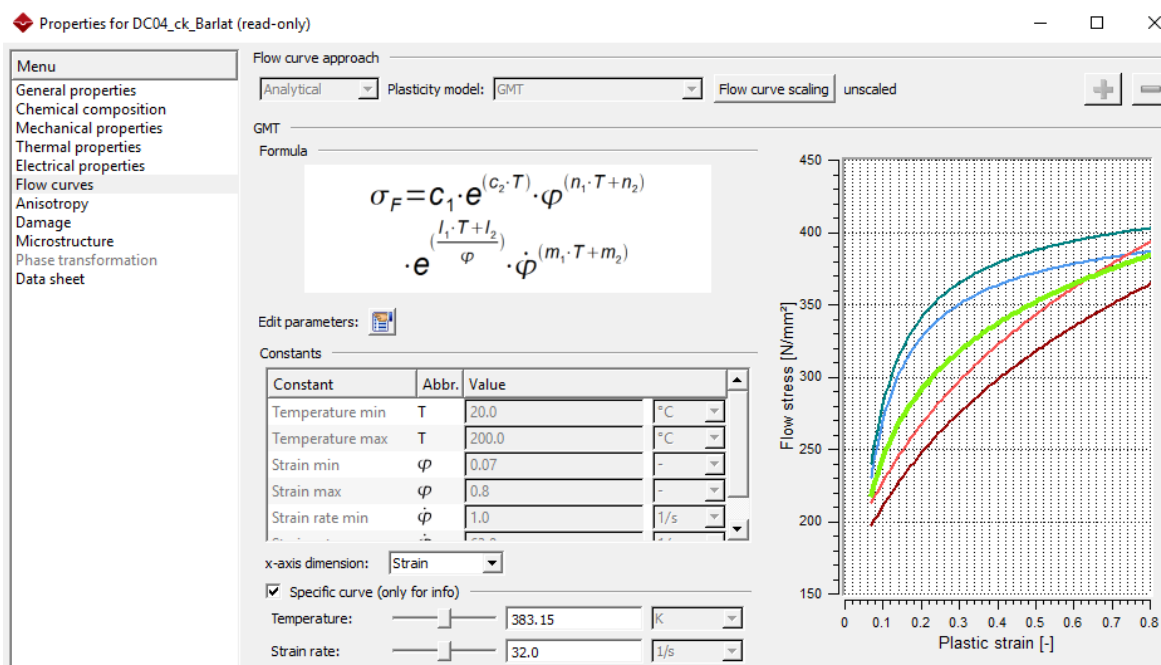
Изглед склопа алата и припремка у програму *Simufact.forming*. приказан је на слици 5.11.

Следећи корак је додељивање материјала радном комаду. Програм *Simufact* у својој бази садржи већ развијене моделе материјала које корисник може да изабере за свој проблем. Материјал који је изабран из базе података за све нумеричке експерименте споменуте у раду је *DC04_ck_Barlat*. Овај материјал су развили *Barlat* и *Lian* 1989. године за моделирање обликовања лимова при чему се узима у обзир и анизотропија. Напон на граници течења R_p за материјал припремка на собној температури износи 240 МПа, а затезна чврстоћа материјала R_m је 400 МПа, као што се може утврдити преко криве ојачања која је дата на слици 5.12.

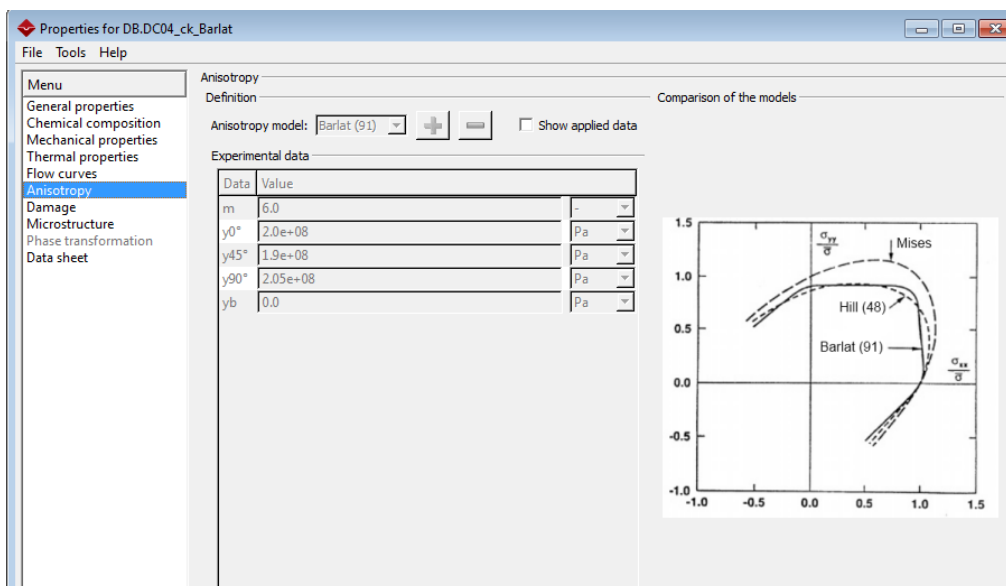
На слици 5.13. дат је приказ модела анизотропије лима и његови подаци.



Сл.5.11 Изглед склона алата у Simufact.forming едитору



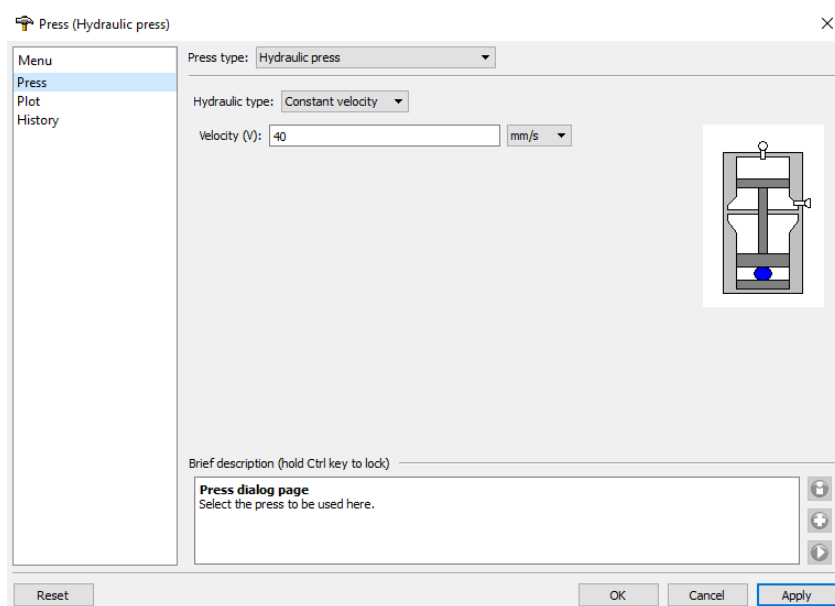
Сл.5.12 Крива ојачања за материјал припремка



Сл. 5.13 Модел дефинисања анизотропије изабраног лима у Simufact.forming бази материјала

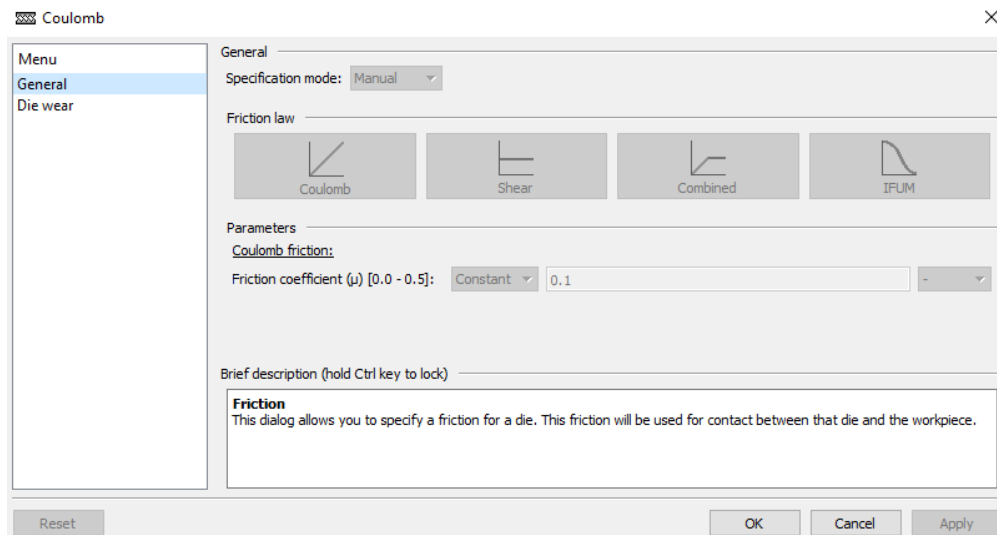
Након дефинисања материјала за радни комад, следио је избор пресе, дефинисање контактних услова, температура алата и радног комада и на крају креирање мреже коначних елемената на припремку.

При избору пресе, узета је хидраулична преса брзине 40 mm/sec. Дефинисање пресе у програму за све нумеричке експерименте је приказано на слици 5.14.



Сл.5.14 Избор пресе и брзине деформисања

Као модел трења је узето Кулоново трење „Coulomb“, које представља једноставан модел описивања контактних услова при обради лима у процесу провлачења отвора. Вредност коефицијента трења је 0,1 као што је приказано на слици 5.14.

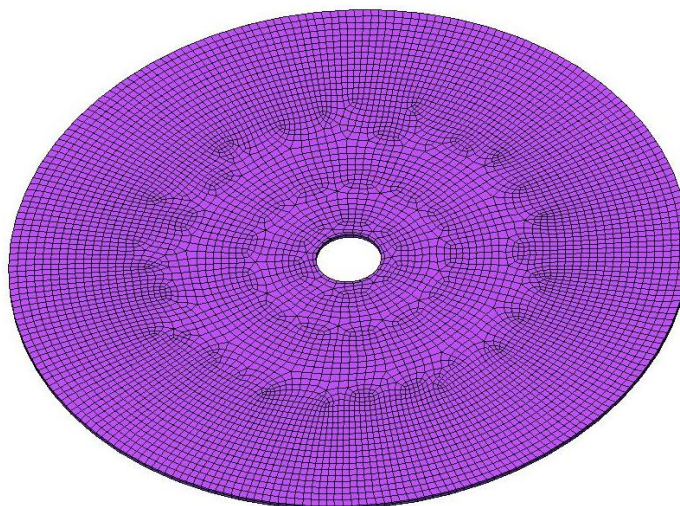


Сл.5.14 Дефинисање трења

5.1.3. Генерисање FE мреже припремка

Simufact.forming софтверски пакет има модул за аутоматско генерисање мреже коначних елемената. Услед деформисања обрадак се подвргава великим деформацијама при чему искривљеност мреже у појединим областима ће постајати значајна. Због тога, регенерација мреже (*Remeshing*) је понекад неопходна како би се симулација успешно наставила. Овај поступак је такође аутоматизован и не захтева интервенцију корисника.

Величина елемената мреже припремка за HE-08-30-12 износи 1,5 мм, а број елемената је 13606. Тип мреже коришћен за нумеричке експерименте (*Mesher*) је *Sheetmesh*, док је за тип елемената одређен *Hexahedral* (слика 5.16).

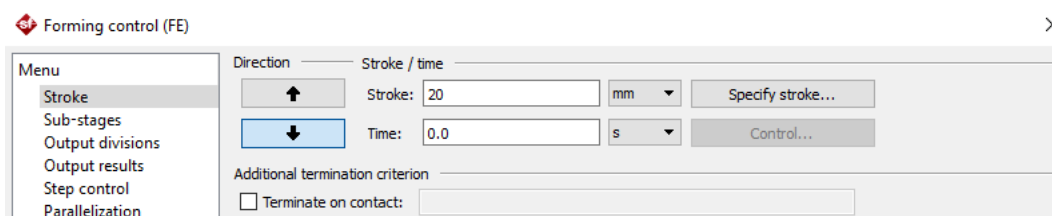


Сл.5.16 Генерисана FE мрежа припремка

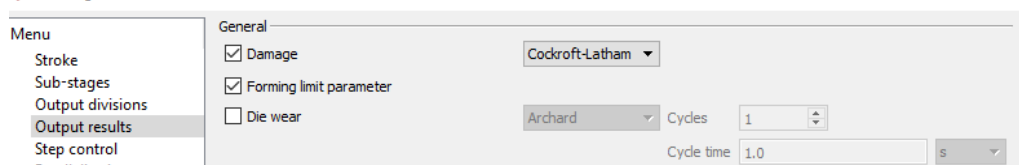
5.1.4. Контролни параметри процеса

Када су сви претходни кораци урађени, неопходно је подесити и параметре процеса у прозору *Forming control* који је приказан на слици 5.17. Ход алата (притискивача) који се креће по Z оси надоле износи 20 мм. Фазе процеса обухватају позиционирање покретних елемената, обликовање радног комада, и вађење готовог дела из алата након процеса провлачења.

За посебно дефинисане додатне излазне резултате изабрана је и (сл. 5.18.) опција *''Damage''* са критеријумом лома *Cockroft-Latham*, помоћу које можемо пратити зоне у којима постоји опасност од појаве пукотина.



Сл. 5.17 Подешавање хода у *Forming control* прозору



Сл. 5.18 Подешавање излазних резултата у *Forming control* прозору

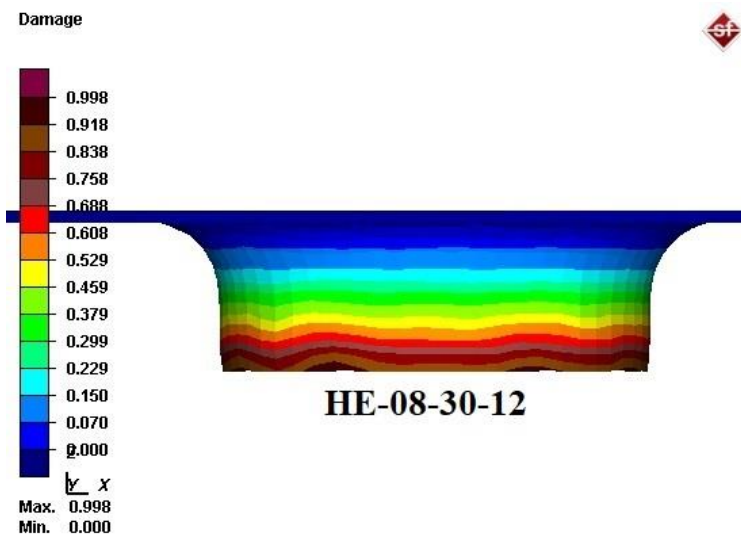
Параметри за подешавање хода су исти за HE-08-30-12, HE-08-30-16, HE-1-30-16.

5.1.5. Резултати нумеричке симулације HE-08-30-12

Након успешног подешавања свих претходних параметара неопходних за покретање прорачуна и симулације могуће је у постпроцесору програма *Simufact.forming* прегледати великог број излазних резултата.

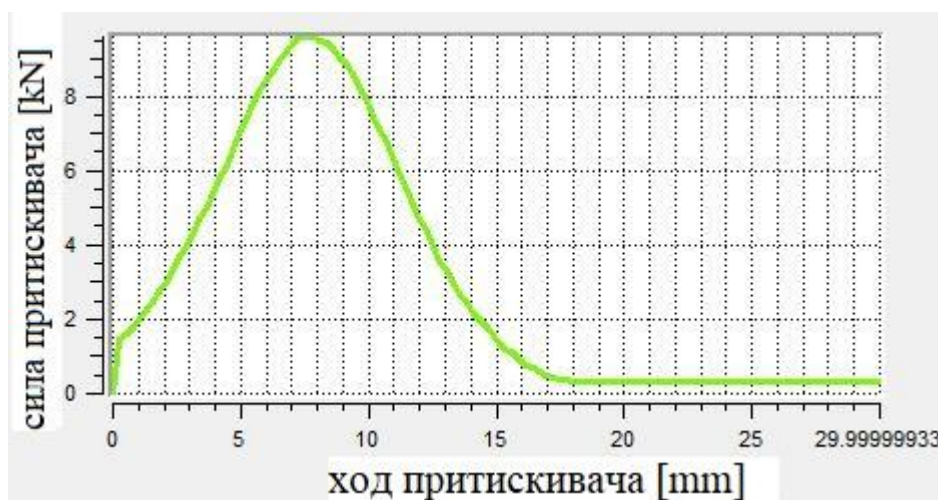
У овом одељку биће представљени резултати HE-08-30-12 који су релевантни за праћење ефеката варирања утицајних параметара на ток процеса провлачења, односно на појаву дефеката напрстина на ивици грла, и то: коефицијент деформабилности као критеријума пластичног лома у зони провученог отвора са избором опције нумеричког резултата *''Damage''*, дијаграм деформационе силе, као и дистрибуције максималног главног напона у обратку.

На слици 5.19. може се видети дистрибуција коефицијента критеријума лома, односно његових вредности на крају процеса деформисања. Најкритичније место за појаву пукотина јесте на ивици лима у зони провученог отвора, односно грла. Максимална вредност је 0,998.



Сл. 5.19 Критеријум лома HE-08-30-12

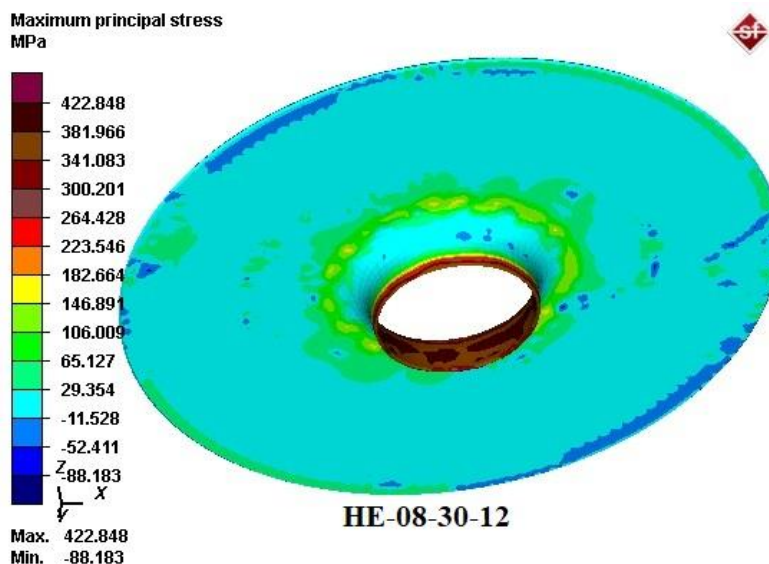
На слици 5.20. приказан је дијаграм деформационе силе у зависности од активног хода притискивача.



Сл. 5.20 Дијаграм деформационе силе у HE-08-30-12
($d_{gr} = 30 \text{ mm}$; $d_o = 12 \text{ mm}$; $s = 0,8 \text{ mm}$)

Са дијаграма се види да при обликовању отвора у тренутку додира притискивача и обратка долази до пораста силе. Тада долази до ширења отвора уз комбинацију процеса савијања и развлачења и услед тога долази до брзог пораста силе. Сила расте док не дође до формирања грла на обратку, а онда након тога долази до смањивања вредности силе.

На слици 5.21. приказана је дистрибуција максималног главног напона у обратку на крају процеса деформисања, односно, када симулација достигне *100% forming*. Максимална вредност напона је 422,848 Мпа. За овај експеримент се очекује појава напрслине на ивици лима, јер је $R_m = 400 \text{ Мпа} < 422,848 \text{ Мпа}$. Као што се може видети, највећи максимални главни напони се јављају око унутрашње ивице провученог отвора.

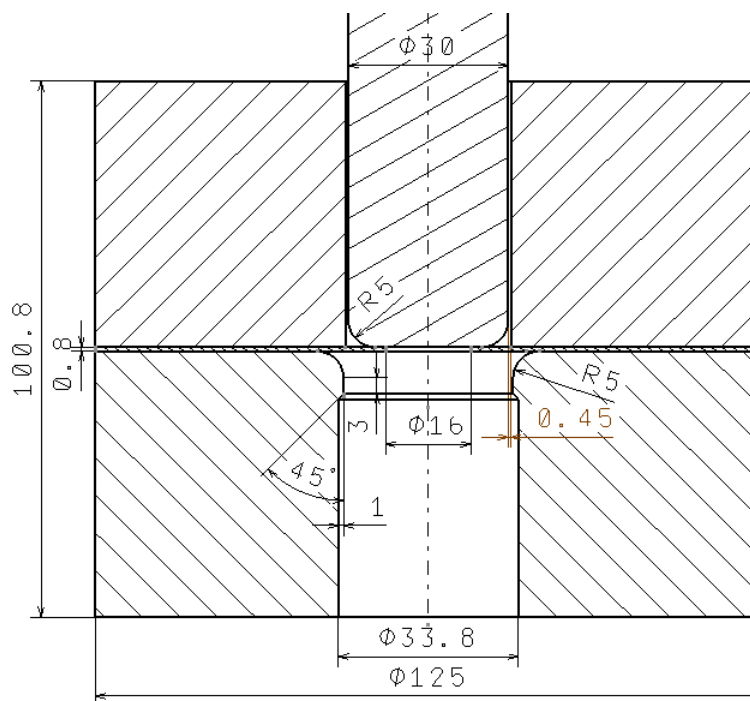


Сл. 5.21 Максимални главни напон HE-08-30-12

5.2. Нумерички експеримент HE-08-30-16

Као што се може видети из ознаке експеримента, једина разлика у односу на HE-08-30-12 јесте почетни пречник отвора који износи $d_0 = 16 \text{ mm}$, тако да промене што се тиче димензија притискивача, матрице, држача лима нема. Величина елемената мреже припремка за HE-08-30-16 износи 1,5 mm, а број елемената је 14124.

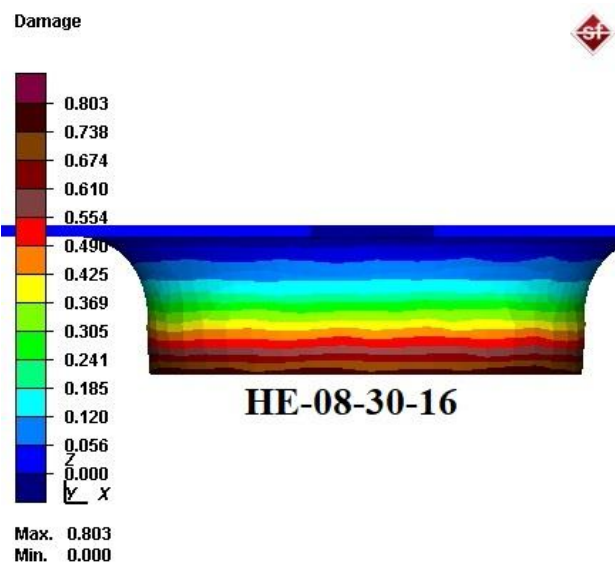
Пресек склопа алата за HE-08-30-16 са промењеним припремком дат је на слици 5.22.

Сл. 5.22 Пресек склопа алата за HE-08-30-16 са $d_0 = 16 \text{ mm}$

5.2.1. Резултати нумеричке симулације HE-08-30-16

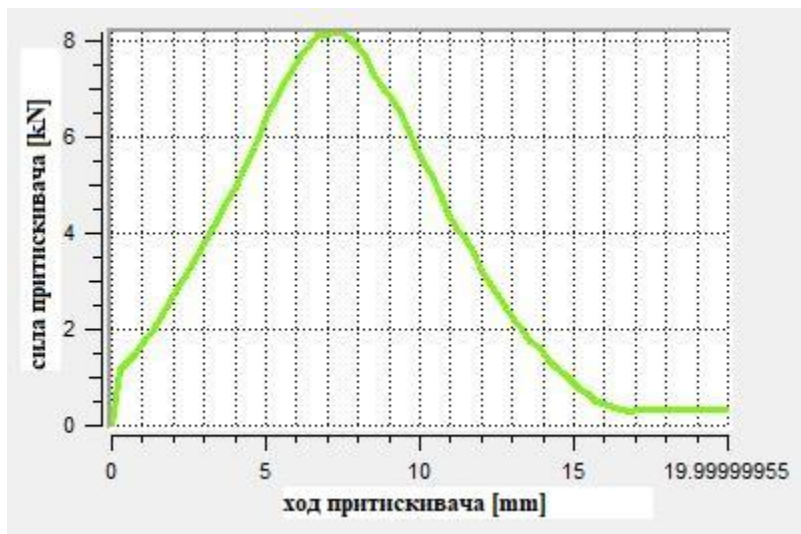
У овом одељку биће представљени резултати HE-08-30-16 на основу иницијалних улазних података, а резултати који су узети у разматрање су коефицијент критеријум лома у обратку на крају процеса за нумерички резултат "Damage", дијаграм деформационе силе и дистрибуција максималног главног напона као у претходном случају.

На слици 5.23 приказана је дистрибуција коефицијента критеријума лома, односно његових вредности на крају процеса деформисања. Најкритичније место за појаву пукотина јесте на ивици лима у зони провученог отвора, односно грла. Максимална вредност је 0,803.



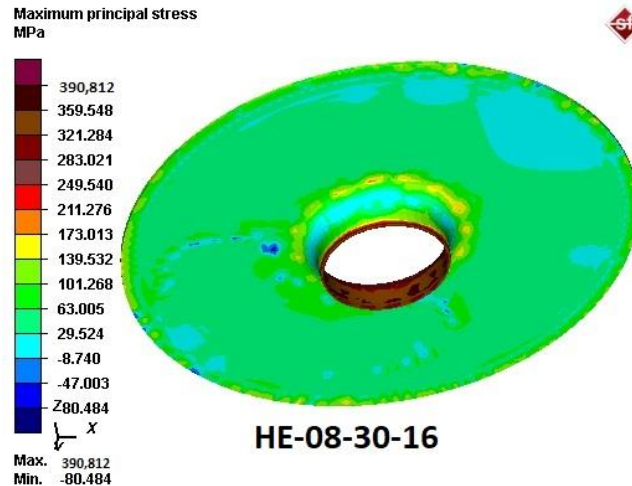
Сл. 5.23 Критеријум лома HE-08-30-16

На слици 5.24. приказан је дијаграм зависности деформационе силе од хода притискивача.



Сл. 5.24 Дијаграм деформационе силе у HE-08-30-16
($d_{gr} = 30 \text{ mm}$; $d_o = 16 \text{ mm}$; $s = 0,8 \text{ mm}$)

На слици 5.25. је дата дистрибуција максималног главног напона на крају процеса деформисања, односно, када симулација достигне *100% forming*. Максимална вредност напона је 390,812 Мпа. За овај експеримент се не очекује појава напрслина на ивици грла, јер је $R_m = 400 \text{ Мпа} > 390,812 \text{ Мпа}$.



Сл. 5.25 Максимални главни напон HE-08-30-16

5.3. Нумерички експеримент HE-1-30-16

Што се тиче креирања алата за овај нумерички експеримент, разлике у димензијама постоје, у односу на претходне нумеричке експерименте, и то код: држача лима, матрице, припремка. Притискивач је идентичан са претходним са пречником грла од $d_{gr} = 30 \text{ mm}$. Величина елемената мреже припремка за HE-1-30-16 износи 1,5 мм, а број елемената је 14256.

На слици 5.26 је приказан држач лима са његовим димензијама. Пречник унутрашњег отвора држача лима је изабран као:

$$D_{dr} = 31,2 \text{ mm}$$

Са z је означен зазор. Одређивање зазора је изведено према обрасцу [6]:

$$z = s + c\sqrt{10s}$$

$$z = 1 + 0.07\sqrt{10} = 1,1 \text{ mm}$$

$$c=0.07 \text{ за челик}$$

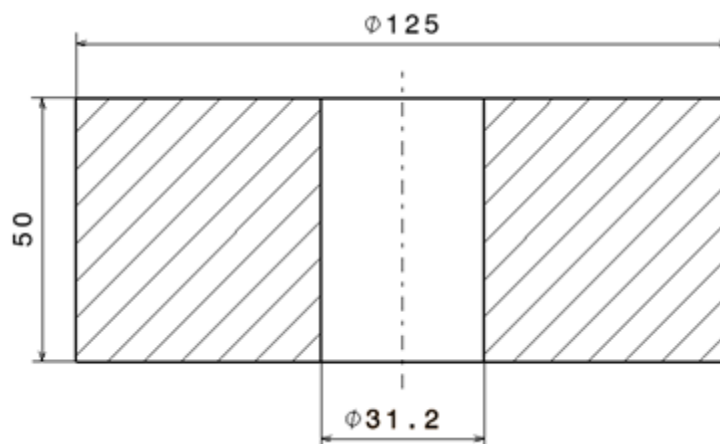
Димензије матрице су приказане на слици 5.27.

Унутрашњи пречник матрице се рачуна као:

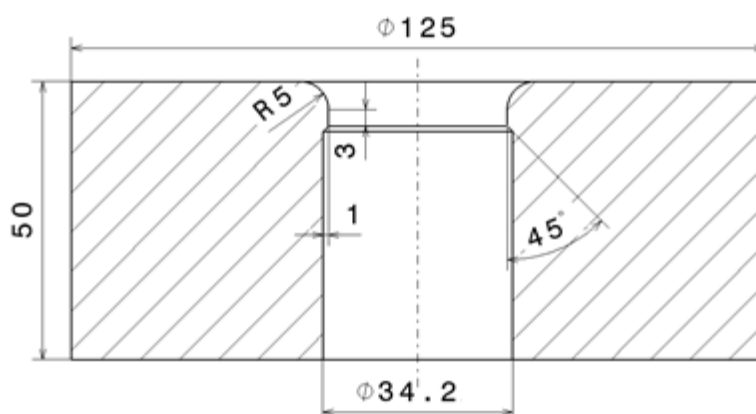
$$d_m = d_z + 2z$$

$$d_m = 30 + 2,2$$

$$d_m = 32,2 \text{ mm}$$

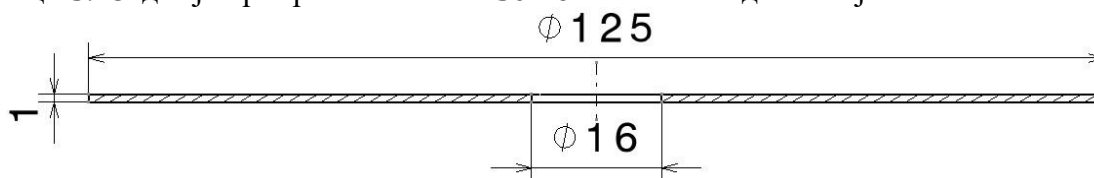


Сл. 5.26 Држач лима за HE-1-30-16



Сл. 5.27 Матрица за HE-1-30-16

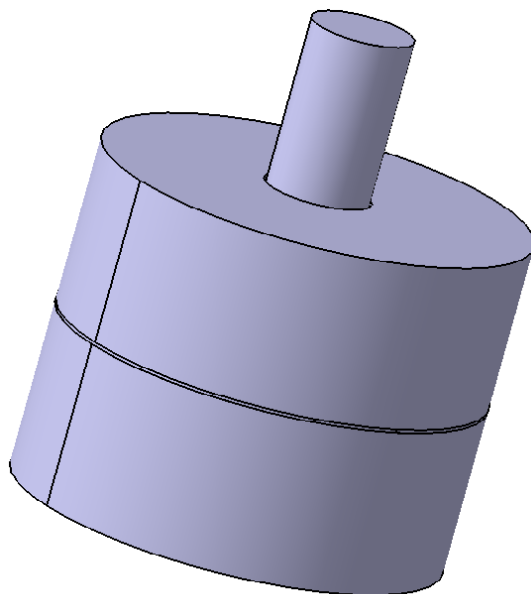
На слици 5.28. дат је припремак за HE-1-30-16 са његовим димензијама.



Сл. 5.28 Припремак за HE-1-30-16

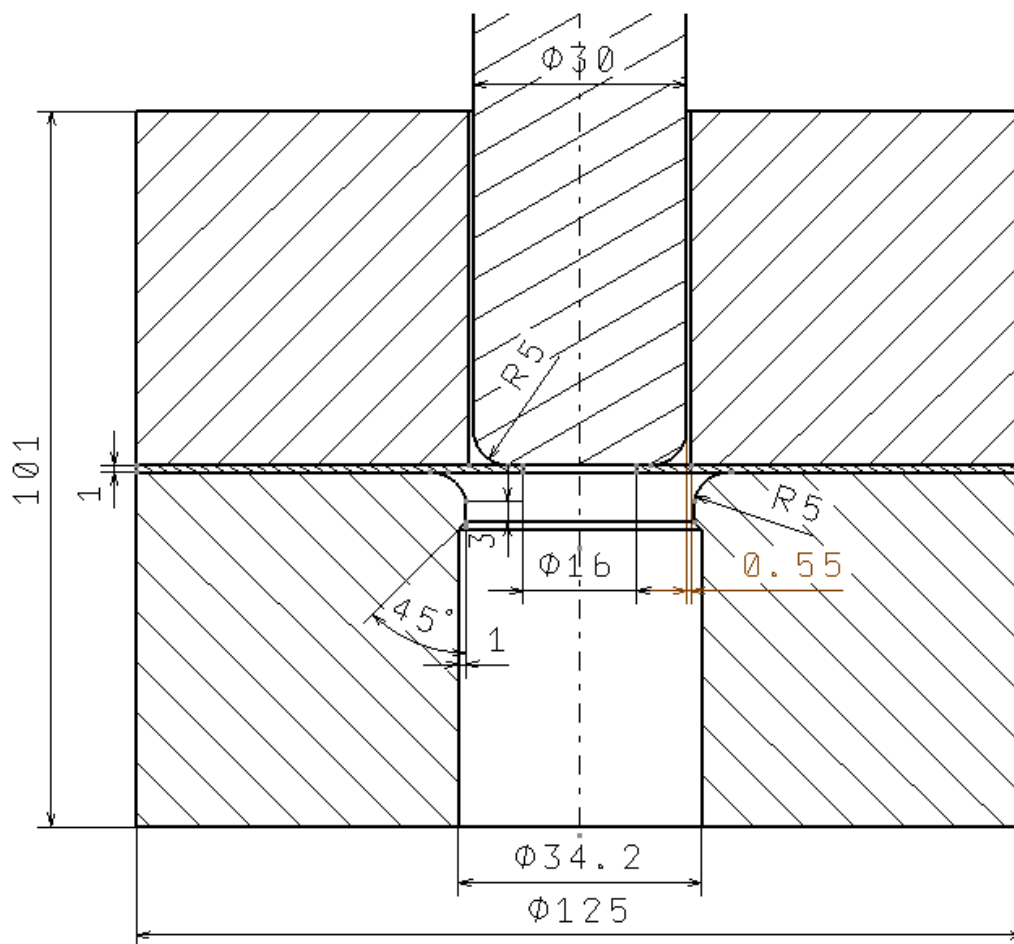
У модулу *Assembly Desing*, програма *CATIA*, урађен је склоп алата како би се алати довели у њихов заједнички координатни систем. Делови алата су сачувани у *STL* формату како би били импортовани у програм *Simufact.forming*.

Модел склопа алата за процес провлачења је дат на слици 5.29.



Сл. 5.29 CAD модел склопа алата за процес провлачења HE-1-30-16

Пресек склопа алата за HE-1-30-16 са промењеним припремком је дат на слици 5.30.

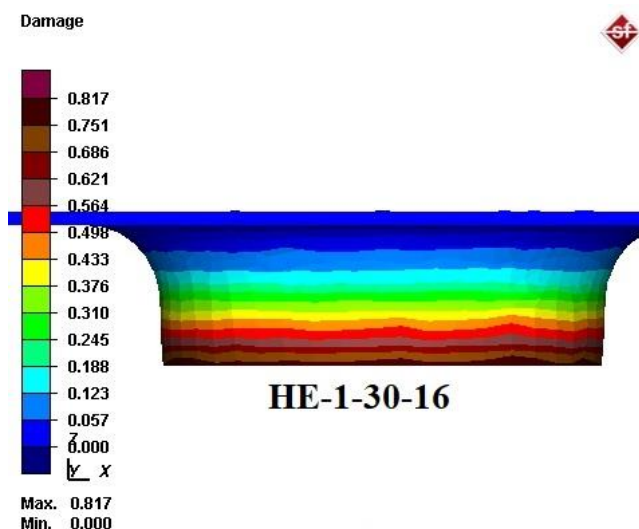


Сл. 5.30 Пресек модела склопа алата HE-1-30-16

5.3.1 Резултати нумеричке симулације HE-1-30-16

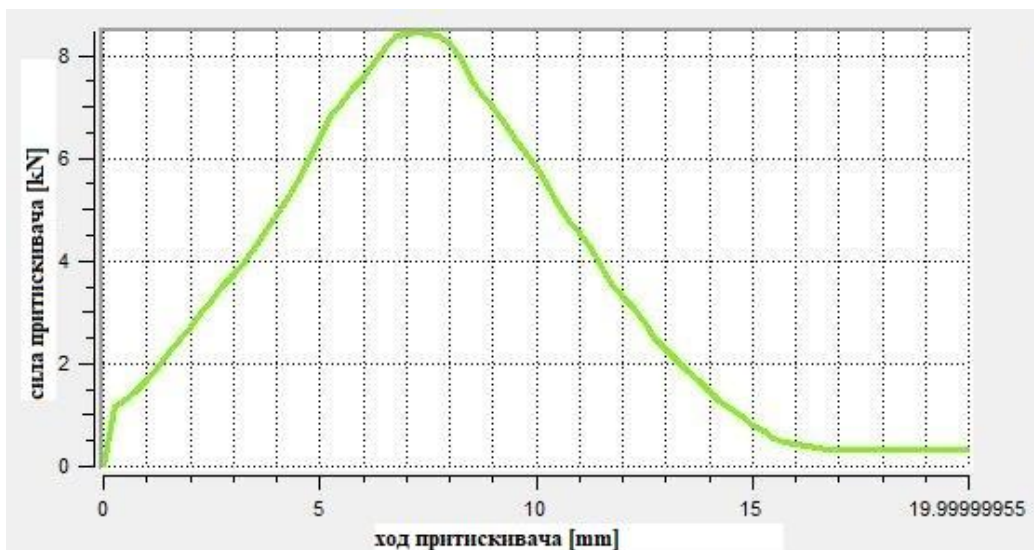
У овом одељку су приказани резултати HE-1-30-16 на основу улазних података, као и у претходним нумеричким експериментима..

На слици 5.31 је дата дистрибуција коефицијента критеријума лома, односно његових вредности на крају процеса деформисања.. Максимална вредност коефицијента је 0,817 и она је достигнута на самој ивици грла.



Сл. 5.31 Критеријум лома HE-1-30-16

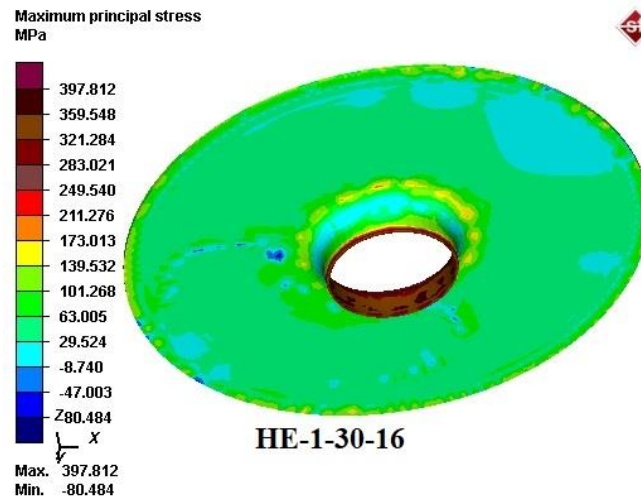
На слици 5.32 приказан је дијаграм који даје зависност деформационе силе од хода притискивача у овом нумеричком експерименту.



Сл. 5.32 Дијаграм деформационе силе у HE-1-30-16
($d_{gr} = 30 \text{ mm}$; $d_o = 16 \text{ mm}$; $s = 1 \text{ mm}$)

На слици 5.33. је приказана дистрибуција максималног главног напона у обратку на крају процеса провлачења.. Максимална вредност напона је 397,812 Мра у зони провученог грла.

За овај експеримент нема појаве напрслине, јер је $R_m = 400 \text{ Мпа} < 397,812 \text{ Мпа}$, али процес може бити нестабилан јер је износ напона веома близу критичног.



Сл. 5.33 Максимални главни напон HE-1-30-16

5.4. Нумерички експеримент HE-08-50-22

На слици 5.34 је дат приказ притискивача са његовим димензијама. Радијус притискивача r_p износи 5 мм, пречник грла D_{gr} је 50 мм. Величина елемената мреже припремка за HE-08-50-22 износи 1,5 мм, а број елемената је 12808.

На слици 5.35 је приказан држач лима са његовим димензијама.

Пречник унутрашњег отвора држача лима је прорачунат као:

$$D_{dr} = 51 \text{ mm}$$

Одређивање зазора је изведено према обрасцу [6]:

$$z = s + c\sqrt{10s}$$

$$z = 0.8 + 0.07\sqrt{8} = 0.9 \text{ mm} \approx 0.9 \text{ mm}$$

$$c=0.07 \text{ за челик}$$

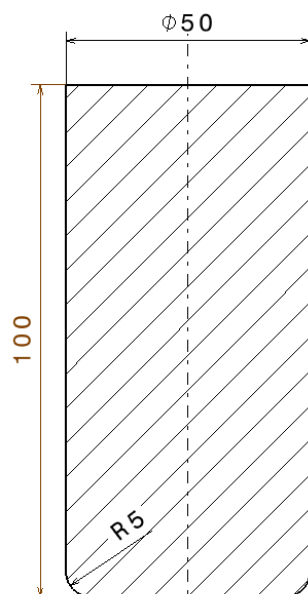
На слици 5.36. дат је приказ матрице за HE-08-50-22.

Унутрашњи пречник матрице се рачуна као:

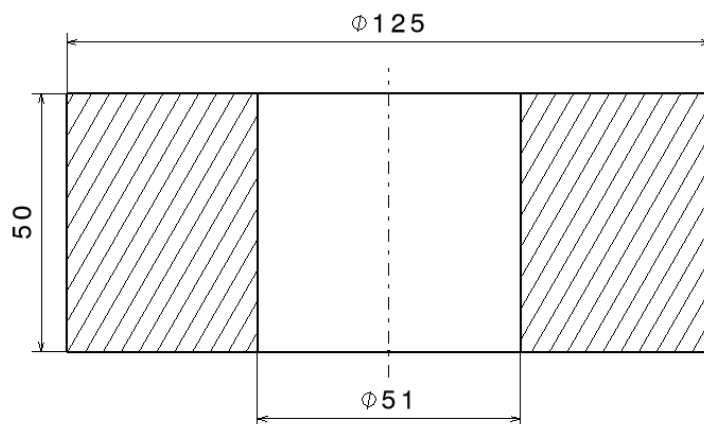
$$d_m = d_p + 2z$$

$$d_m = 50 + 1,8$$

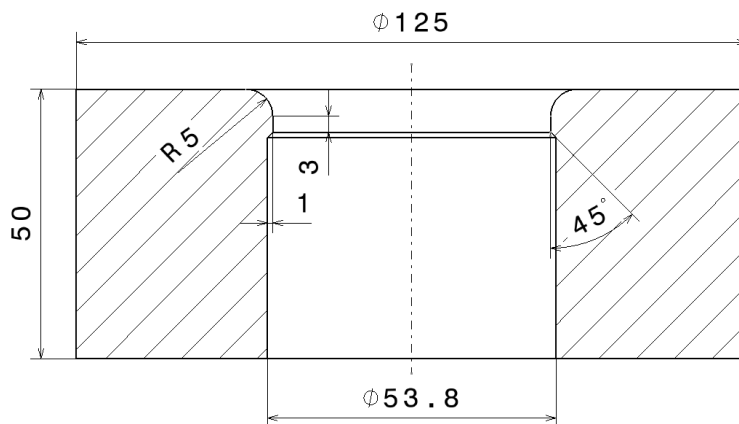
$$d_m = 51,8 \text{ mm}$$



Сл. 5.34 Притискивач за HE-08-50-22

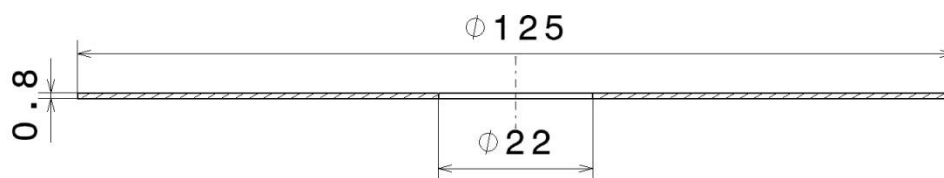


Сл.5.35 Држач лима за HE-08-50-22



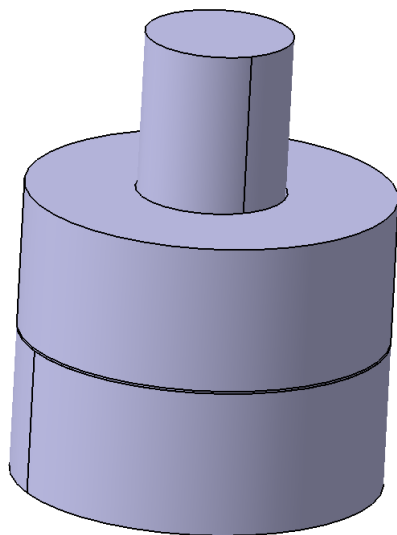
Сл. 5.36 Матрица за HE-08-50-22

На слици 5.37. дат је припремак за HE-08-50-25 са његовим димензијама.



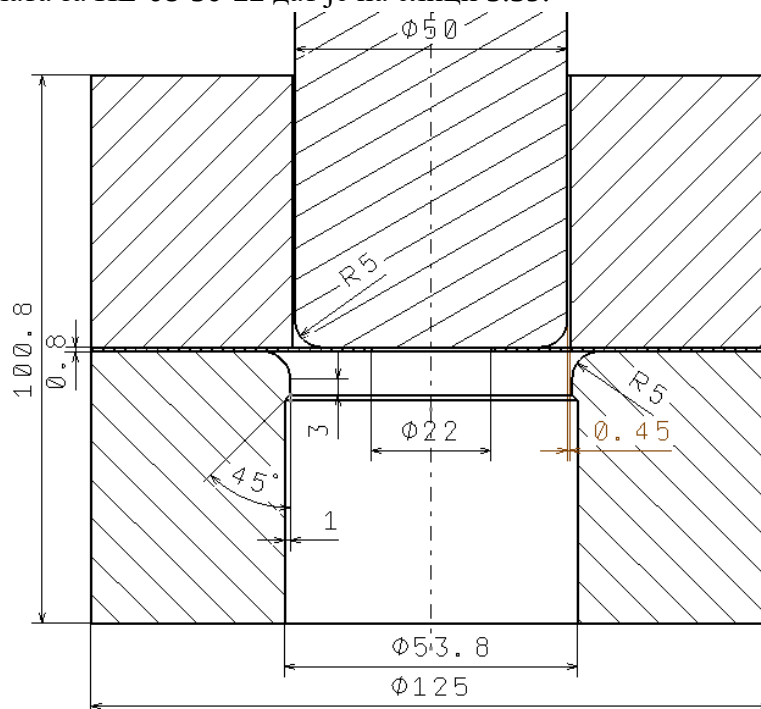
Сл. 5.37 Припремак за HE-08-50-22

Модел склопа алата за процес провлачења HE-08-50-22 је дат на слици 5.38.



Сл. 5.38 CAD модел склопа алата за процес провлачења HE-08-50-22

Пресек склопа алата за HE-08-50-22 дат је на слици 5.39.

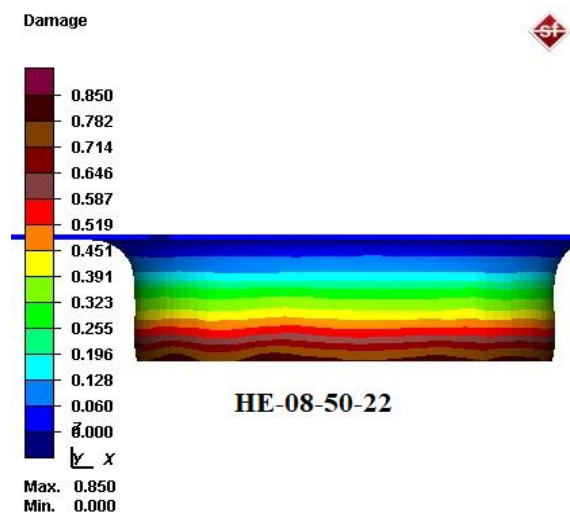


Сл. 5.39 Модел склопа алата за HE-08-50-22 приказан у пресеку

5.4.1. Резултати нумеричке симулације HE-08-50-22

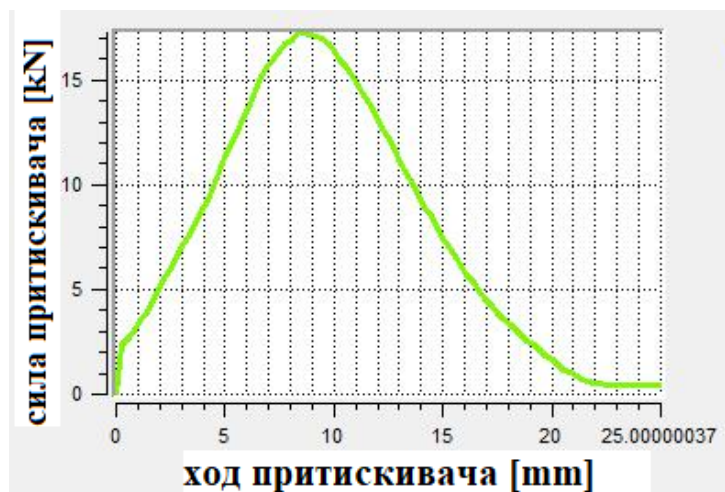
На основу иницијалних улазних података у овом нумеричком експерименту реализован је прорачун и симулација процеса и овде су дати излазни резултати као и у претходним прорачунима. Ход алата (притискивача) код HE-08-50-22, HE-1-50-22 и HE-1-50-24 је већи у односу на претходне нумеричке експерименте, због већег пречника притискивача и иницијалног отвора у лиму, па је и висина грла већа, а износи 25 мм. Сви остали контролни параметри су задржани идентични као у претходним.

На слици 5.40. се може видети дистрибуција коефицијента критеријума лома, односно његових вредности на крају процеса деформисања. Максимална достигнута вредност коефицијента на ивици лима у делу грла је 0,850.



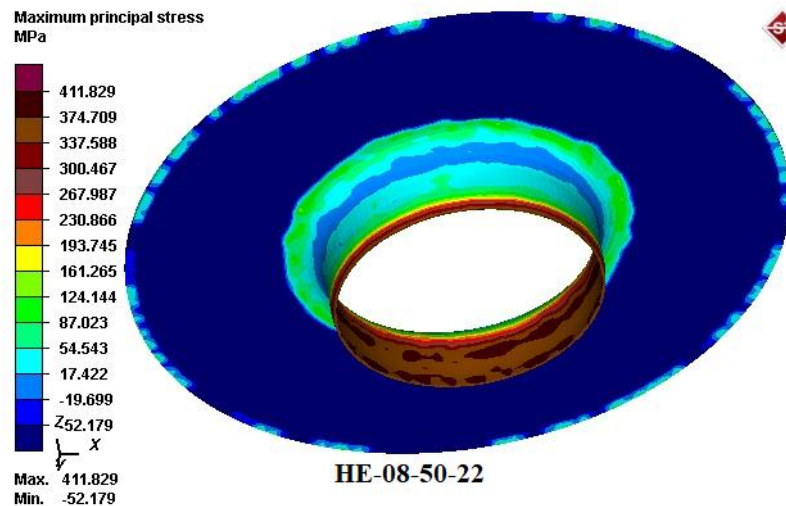
Сл. 5.40 Критеријум лома HE-08-50-22

На слици 5.41. приказан је дијаграм који показује зависност деформационе силе од хода притискивача.



Сл. 5.41 Дијаграм деформационе силе у HE-08-50-22
($d_{gr} = 50 \text{ mm}$; $d_o = 22 \text{ mm}$; $s = 0,8 \text{ mm}$)

На слици 5.42. је приказана дистрибуција максималног главног напона у обратку на крају процеса деформисања. Максимална вредност је 411,829 Мпа. За овај експеримент се очекује појава напрслина на ивици грла јер је $R_m = 400 \text{ Мпа} < 411,829 \text{ Мпа}$.



Сл. 5.42 Максимални главни напон HE-08-50-22

5.5. Нумерички експеримент HE-1-50-22

Код HE-1-50-22 притискивач је идентичан као у претходном експерименту, док су димензије матрице, држача лима и припремка промењене. На слици 5.43. дат је приказ држача лима са његовим димензијама.

Величина елемената мреже припремка за HE-1-50-22 износи 1,5 мм, а број елемената је 12760.

Пречник унутрашњег отвора држача лима је моделиран на вредност:

$$D_{dr} = 51,2 \text{ mm}$$

Одређивање зазора је изведено према обрасцу [6]:

$$z = s + c\sqrt{10s}$$

$$z = 1 + 0.07\sqrt{10} = 1,1 \text{ mm}$$

$$c=0.07 \text{ за челик}$$

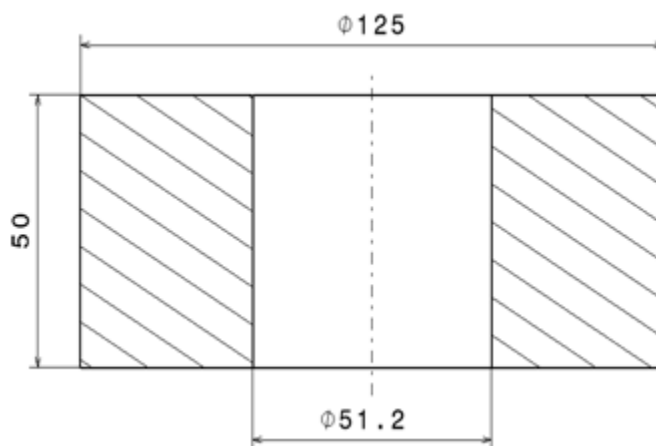
На слици 5.44. дат је приказ матрице за HE-1-50-22.

Унутрашњи пречник матрице је прорачунат као:

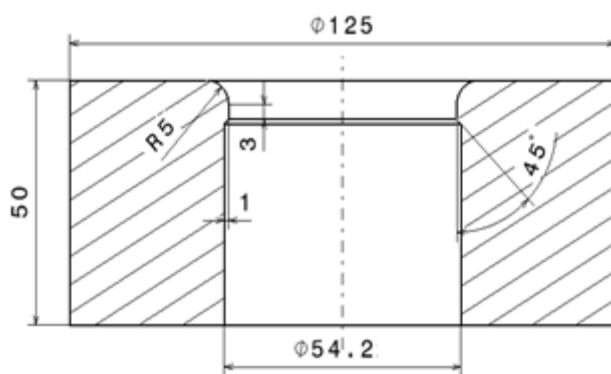
$$d_m = d_p + 2z$$

$$d_m = 50 + 2,2$$

$$d_m = 52,2 \text{ mm}$$

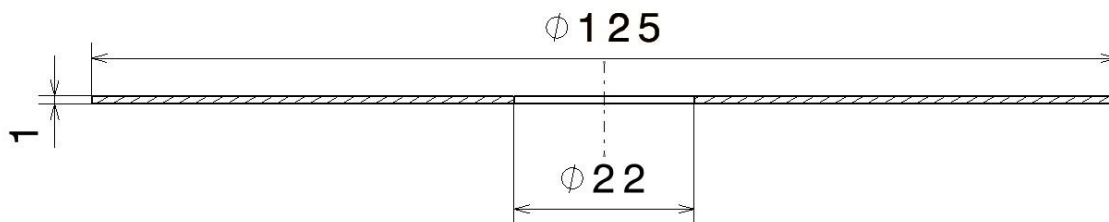


Сл. 5.43 Држач лима за HE-1-50-22



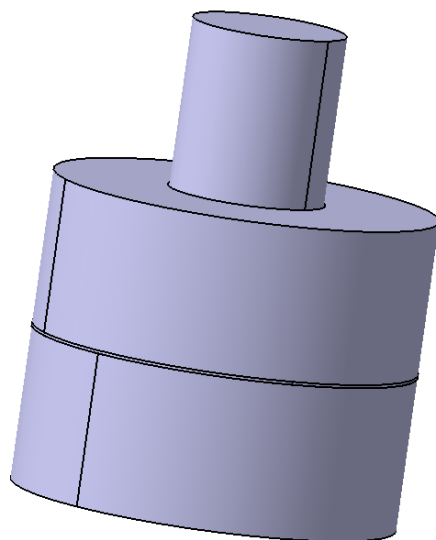
Сл. 5.44 Матрица HE-1-50-22

На сл. 5.45 дат је припремак за HE-1-50-22 са $d_o = 22$ mm.



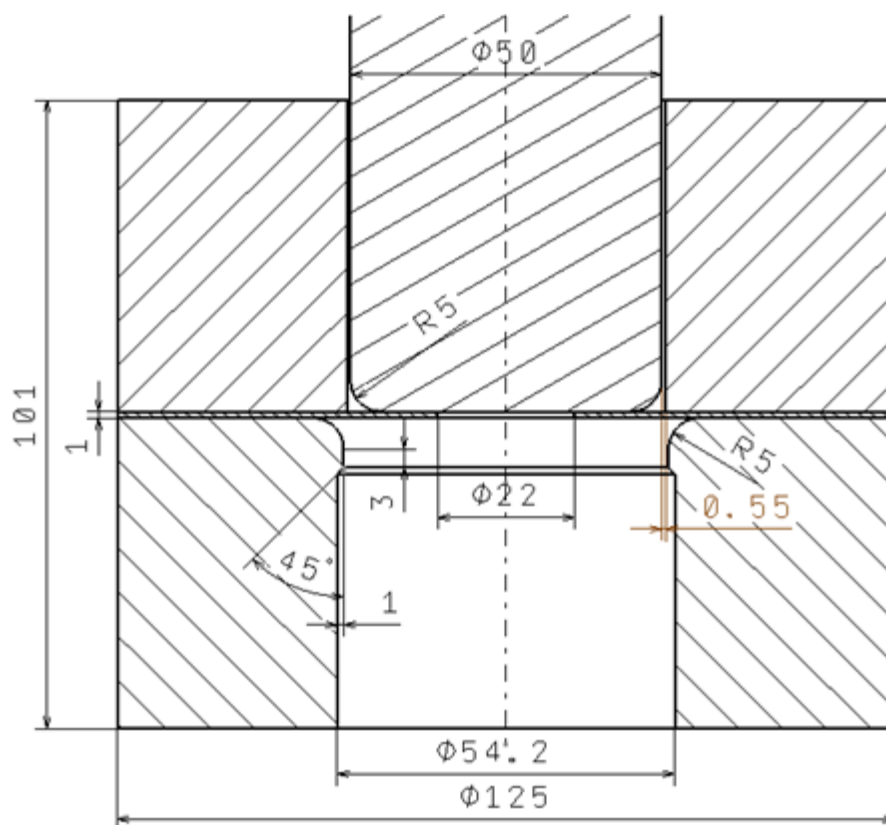
Сл. 5.45 Припремак за HE-1-50-22

Модел склопа алата за процес провлачења HE-1-50-22 је дат на слици 5.46.



Сл. 5.46 CAD модел склопа алата за процес провлачења HE-1-50-22

Пресек склопа алата за HE-1-50-22 са промењеним припремком дат је на слици 5.47.

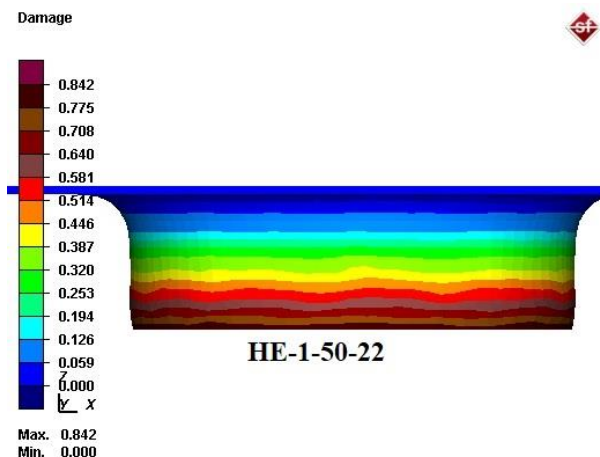


Сл. 5.47 Пресек склопа алата HE-1-50-22 са $d_0 = 22 \text{ mm}$ и $s = 1 \text{ mm}$

5.5.1. Резултати нумеричке симулације HE-1-50-22

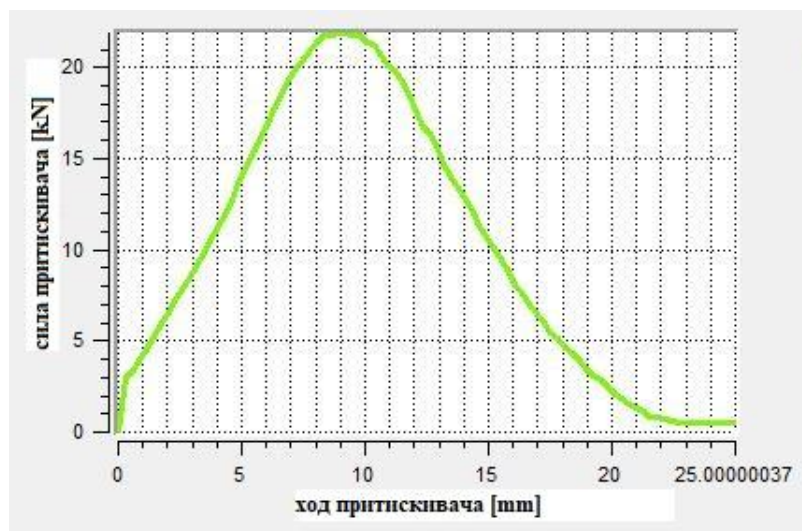
Приказ резултата нумеричке симулације HE-1-50-22 је дат у овом одељку, и ради упоређења са осталим нумеричким експериментима су приказани исти излазни резултати.

На слици 5.58. дата је дистрибуција коефицијента критеријума лома у обратку на крају процеса деформисања. Максимална вредност коефицијента је на ивици лима у зони провученог отвора, односно грла и износи 0,842.



Сл. 5.58 Критеријум лома HE-1-50-22

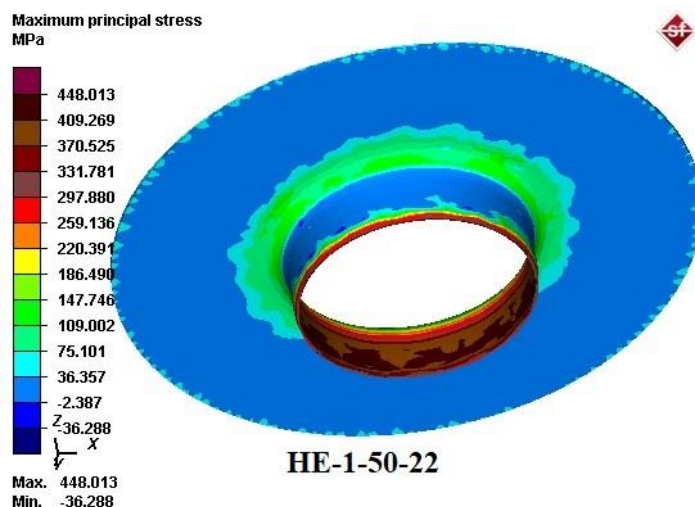
На слици 5.59. приказан је дијаграм деформационе силе за овај нумерички експеримент.



Сл. 5.59. Дијаграм деформационе силе у HE-1-50-22
($d_{gr} = 50 \text{ mm}$; $d_o = 22 \text{ mm}$; $s = 1 \text{ mm}$)

На слици 5.60. је дата дистрибуција максималног главног напона на крају процеса деформисања, односно, када симулација достигне 100% forming.

Максимална вредност напона је 448,013 Мра на местима где се очекује појава пукотина на ивици провученог грла с обзиром да је већа од $R_m = 400 \text{ Мра}$.

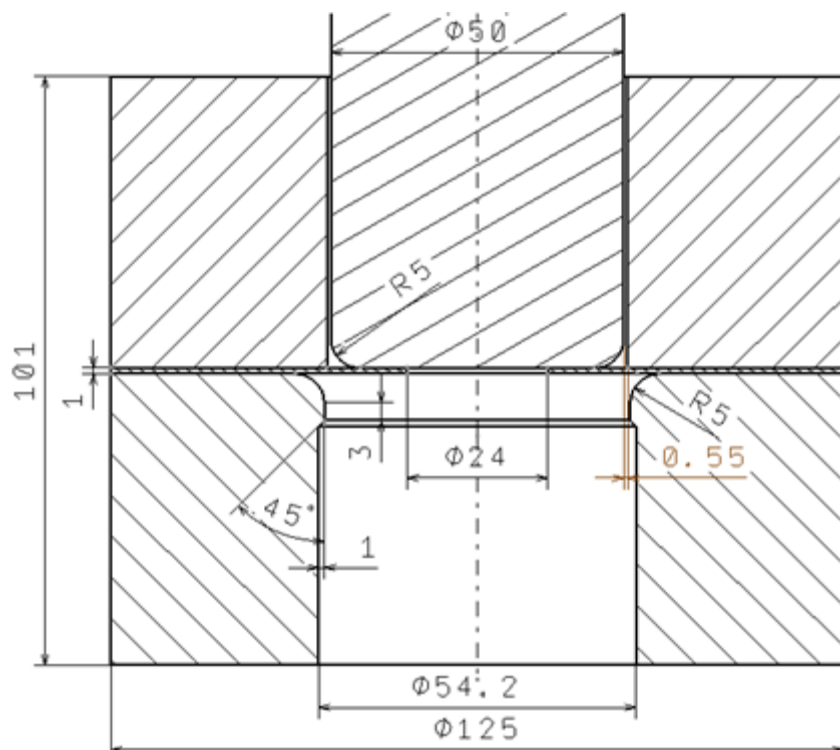


Сл. 5.60 Максимални главни напон HE-1-50-22

5.6. Нумерички експеримент HE-1-50-24

Као што се може видети по називу експеримента, једина разлика у односу на HE-1-50-22 јесте почетни пречник отвора који износи $d_0 = 24 \text{ mm}$, тако да промене димензија притискивача, матрице, држача лима није било. Величина коначног елемента мреже припремка за HE-1-50-24 износи 1,5 мм, а укупан број елемената на припремку је 13840.

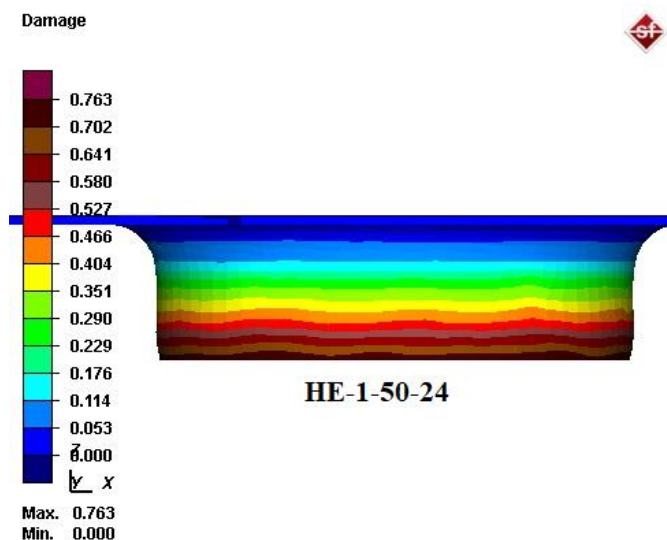
Пресек склопа алата за HE-1-50-24 са промењеним припремком дат је на слици 5.61.

Сл. 5.61 Пресек склопа алата за HE-1-50-24 са $d_0 = 24 \text{ mm}$

5.6.1. Резултати нумеричке симулације HE-1-50-24

У овом одељку су дати резултати HE-1-50-24 релевантни за процену критеријума лома и максималног главног напона у зони грла. Такође се прати и ток и максимални износ деформационе силе.

На слици 5.62. је приказана дистрибуција коефицијента критеријума лома, односно његових вредности на крају процеса деформисања. Најкритичније место као и у претходним експериментима је ивица лима у зони провученог грла. Максимална вредност коефицијента је 0,763.



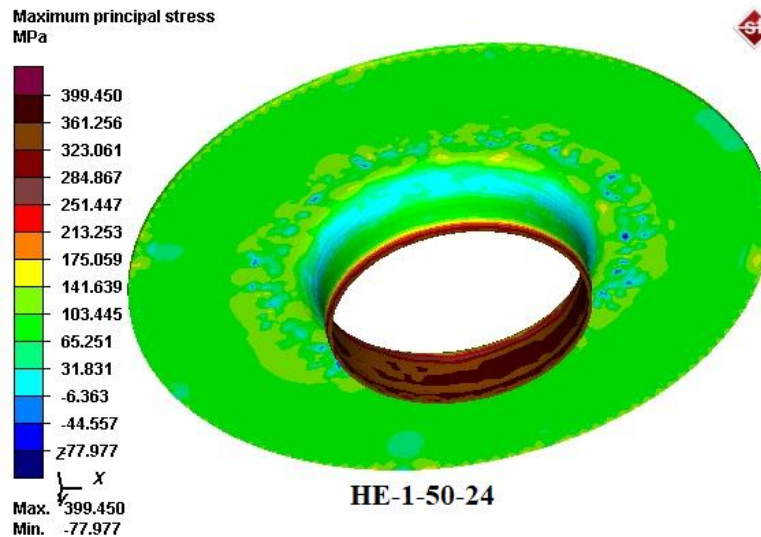
Сл. 5.62 Критеријум лома HE-1-50-24

На слици 5.63. приказан је дијаграм деформационе силе.



Сл. 5.63 Дијаграм деформационе силе у HE-1-50-24
($d_{gr} = 50 \text{ mm}$; $d_o = 24 \text{ mm}$; $s = 1 \text{ mm}$)

На слици 5.64. може се видети дистрибуција максималног главног напона на крају процеса деформисања. Максимална вредност напона је 399,450 Мпа и врло близу је вредности затезне чврстоће (R_m 400 Мпа). Имајући у виду максималну вредност коефицијента критеријума лома не очекује се појава пукотина на ивици грла али се може очекивати нестабилан процес, тако да се препоручују веће вредности пречника иницијелног отвора у припремку.



Сл. 5.64 Максимални главни напон HE-1-50-24

6. Анализа добијених резултата

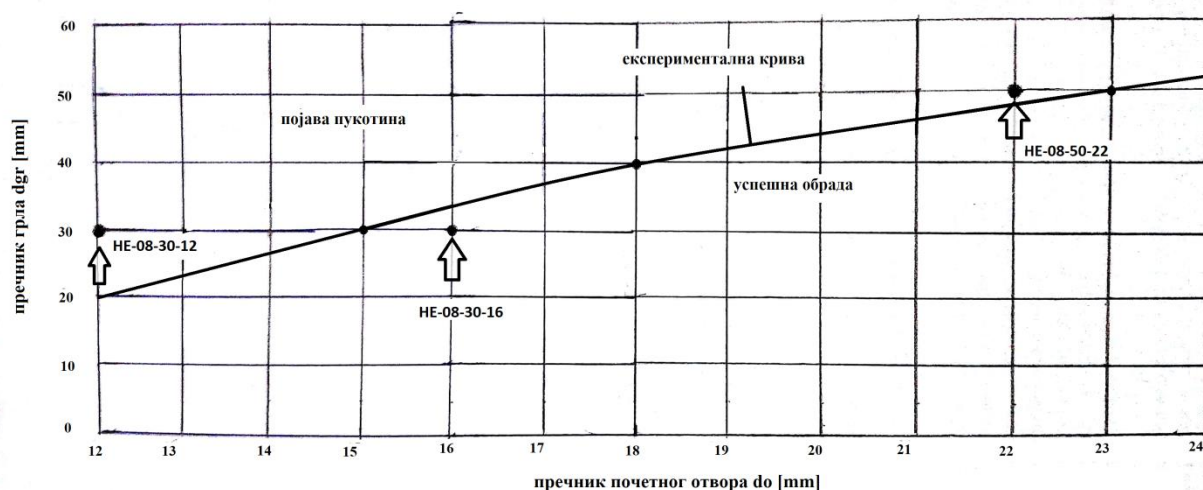
У овом поглављу анализирани су добијени резултати свих реализованих нумеричких експеримената процеса провлачења отвора у обратку од лима. Граничне вредности почетних пречника отвора у припремку за појаву пукотина на ивици лима у зони провученог отвора, односно добијеног грла обратка су добијене експерименталним истраживањем и приказани у раду [4], дати су у Табели 6. Физички експерименти су изведени за три пречника грла притискивача (30 мм, 40 мм, 50 мм), и две дебљине лима (0,8 мм и 1 мм).

Табела 6. Граничне вредности почетних пречника отвора d_o за одређене пречнике грла d_{gr} за појаву пукотина [4].

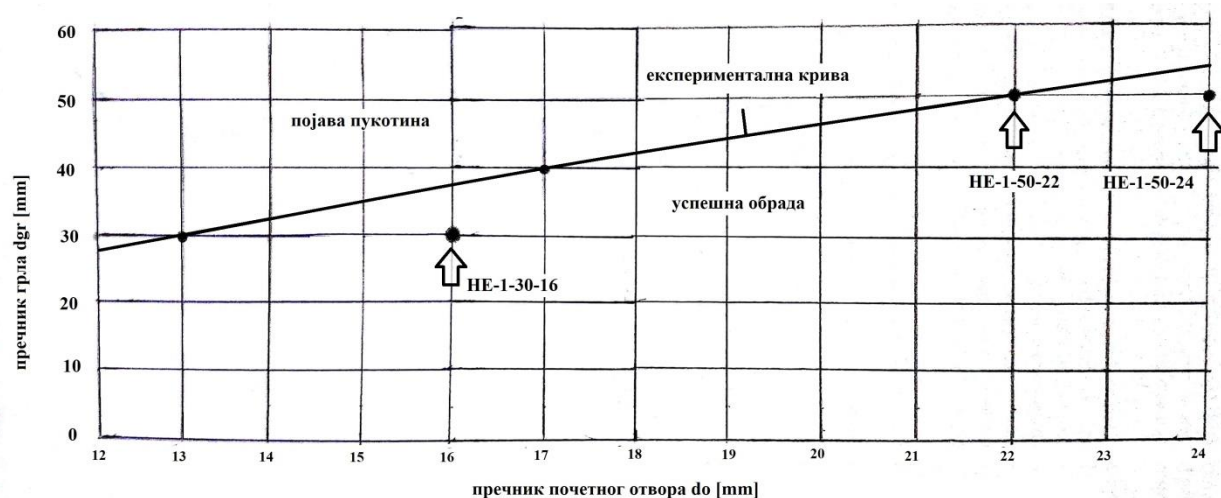
дебљина лима 0,8 мм		дебљина лима 1,0 мм	
d_{gr}	d_o	d_{gr}	d_o
30	15	30	13
40	18	40	17
50	23	50	22

На основу ових експерименталних резултата и резултата нумеричких експеримената спроведених у овом раду (види табелу 5) формиран су дијаграми границе успешног/неуспешног деформисања у процесу провлачења отвора зависно од пречника почетног отвора и пречника грла на крају процеса обликовања. На сл. 6.1 је приказан дијаграма границе деформисања за лим дебљине 0,8 мм а на слици 6.2 дијаграм границе деформисања за лим дебљине 1,0 mm.

Са дијаграма (сл. 6.1 и сл. 6.2) може се видети да је зависност између почетног пречника отвора и пречника отвора грла (после провлачења) приближно линеарна, односно да се крива са ових дијаграма може апроксимирати кривом првог реда. Ако погледамо експерименталну криву, која је формирана на основу експерименталних резултата из већ наведене литературе, на основу ње се може закључити да појава пукотина настаје код почетних пречника отвора чија је вредност мања од приказаних вредности у Табели 6.



Сл. 6.1 Дијаграм границе деформисања за лим 0,8 mm



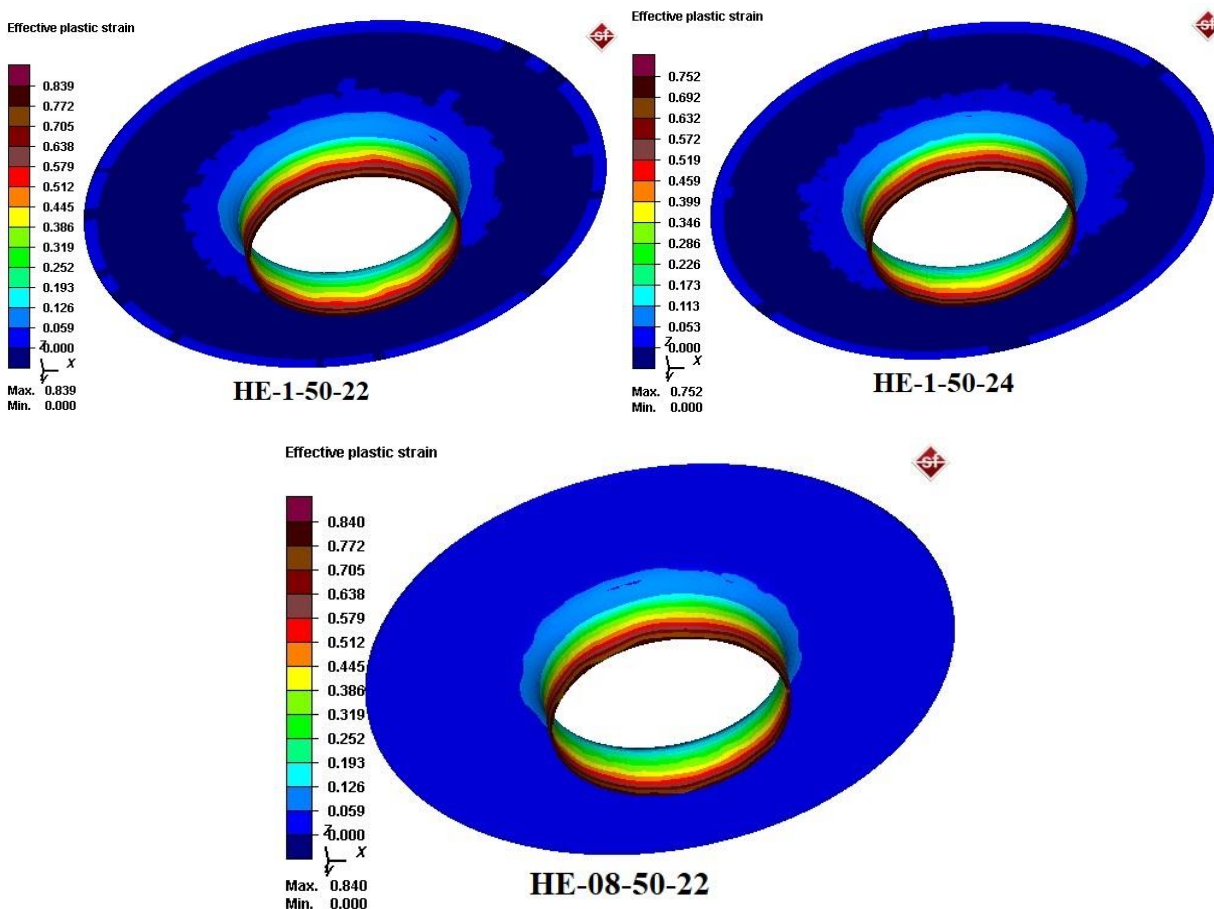
Сл. 6.2 Дијаграм границе деформисања за лим 1,0 mm

На дијаграму су приказане и тачке нумеричких експеримената. Приметно је на Слици 6.1 да код HE-08-30-12 и HE-08-50-22 тачке се налазе изнад граничне криве у области неуспешног деформисања, односно појаве пукотина на ивици грла, што је и показано нумеричким вредностима коефицијената критеријума лома и вредности максималних главних напона. Са друге стране изабрани однос пречника иницијалног отвора и грла за HE-08-30-16 је повољан, и положај тачке је испод криве, тако да је обрада успешна, што је и доказано нумеричким резултатима и вредностима коефицијента критеријума лома и максималног главног напона.

Сличан дијаграм је приказан и на Слици 6.2, као и положај три нумеричка експеримента. Резултати HE-1-30-16 и HE-1-50-24 су показали добре вредности критеријума лома и максималних главних напона, а и положај тачака је испод граничне криве, тако да је обрада успешна и без појаве пукотина. Супротно томе, изабрани однос пречника отвора лима и провученог грла није повољан у HE-1-50-22, тако да се тачка налази на граничној кривој и долази до појаве пукотина.

Поред приказаних резултата за вредности коефицијената критеријума лома за све наведене нумеричке експерименте, праћењем износа ефективних деформација у обратку може се проценивати успешност обраде, односно појава дефеката напрслина на ивици грла као критичној зони у овом процесу.

На слици 6.3. дате су дистрибуција ефективне пластичне деформације за изабране нумеричке експерименте HE-1-50-22, HE-1-50-24 и HE-08-50-22. У експериментима где ефективна деформација прелази вредност 0,8 долази до појаве пукотина, тако да је успешан са овог аспекта само HE-1-50-24, што је и претходно показано и анализирано.



Сл. 6.3 Ефективна пластична деформација

На крају, у Табели 7. дато је табеларно упоређивање добијених резултата за релевантне параметре коефицијента критеријума лома, главног максималног напона и деформационе силе за све нумеричке експерименте који су урађени у овом раду.

Табела 7. Сумарни приказ релевантних резултата за нумеричке експерименте

Нумерички експеримент	d_{gr}	d_0	s	Коефицијент критеријума лома	Максимални главни напон [MPa]	Максимална деформациона сила [kN]	Појава дефеката пукотина
HE-08-30-12	30	12	0,8	0,998	422,848	9,55	Да
HE-08-30-16	30	16	0,8	0,803	390,812	8,25	Не
HE-1-30-16	30	16	1	0,817	397,812	10,21	Не
HE-08-50-22	50	22	0,8	0,850	411,829	17,07	Да
HE-1-50-22	50	22	1	0,842	448,013	21,82	Да
HE-1-50-24	50	24	1	0,763	399,450	19,96	Не

На основу свега приказаног и сумарно представљеног у Табели 7. за нумеричке експерименте, може се закључити следеће:

- Код нумеричких експеримената чија је вредност коефицијента критеријума лома прелазила вредност од 0,815, обрада је неуспешна јер је дошло до појаве пукотина,
- У нумеричким експериментима где је вредност максималног главног напона била већа од затезне чврстоће материјала $R_m = 400 \text{ Мпа}$, дошло је до појаве пукотине,
- Код припремака са мањим почетним пречником отвора од утврђене граничне вредности дате граничним кривим долази до појаве пукотина .
- Код нумеричких експеримената код којих је дошло до појаве дефеката пукотина, максимална деформациона сила је већа у односу на нумеричке експерименте код којих није дошло до појаве пукотина. Деформациону силу је могуће смањити повећањем радијуса матрице и радијуса притискивача.

7. Закључак

Моделирање и симулација процеса провлачење отвора је спроведено са циљем анализе утицаја односа између почетног пречника отвора (отвор пре провлачења) и пречника отвора после процеса провлачења отвора на појаву прекомерних напона и напрслина на ивици лима у зони провученог отвора, односно формираног грла. У ту сврху је направљен план нумеричких експеримената на основу резултата физичких експеримената реализованих у раду [4] за пречнике отвора 30 mm и 50 mm и две дебљине лима (0,8 mm 1,0 mm), са варираним иницијалним пречником отвора на припремку од лима.

CAD модели алата и припремка, су моделирани у програмском пакету CATIA за све нумеричке експерименте. Улазни подаци за симулације су дефинисани слично оним који су коришћени у физичким експериментима. За сваки модел алата и склоп алата, дат је пресек у виду техничке документације ради лакшег прегледа димензија које су или усвојене на основу рада [4] или прорачунате из препоручене литературе.

Након дефинисања улазних података потребних за нумеричку симулацију процеса применом методе коначних елемената и апликативног софтвера *Simufact.forming* добијени су упоредиви и релевантни резултати на основу којих је могуће утврдити граничне вредности деформисања за ову врсту обраде лима. У овом раду су представљени резултати вредности коефицијената критеријума лома (нумерички резултат '*Damage*'), дијаграм деформационе силе, као и дистрибуције максималног главног напона и ефективне деформације у обратку и то на крају процеса провлачења.

На основу експерименталних резултата реализованих у раду [4] и резултата нумеричких експеримената спроведених у овом раду, формиран су дијаграми границе деформисања зависно од пречника почетног отвора и пречника грла на крају процеса обликовања, за утврђивање успешности саме обраде, односно превенције појаве дефеката пукотина на ивици лима у зони формираног грла провлачењем отвора.

На основу дијаграма је могуће закључити да, пукотина на грлу ће се појавити при мањем пречнику почетног отвора од утврђених граничних вредности за одређену комбинацију дебљине лима и пречника грла, односно притискивача.

Релевантни резултати нумеричких експеримената су такође и дистрибуције вредности коефицијената критеријума лома, максималног главног напона и ефективне деформације које се упоређују са граничним и максимално дозвољеним вредностима деформације и затезне чврстоће за одређени лим. У примерима који су дати у овом раду поменуте граничне вредности за коефицијент критеријума лома је 0,815 за максимални главни напон вредност $R_m = 400 \text{ Мпа}$.

8. Литература

- [1] **Бинко Мусафија**, *Обрада метала пластичним деформисањем*, Сарајево, 1979. год.
- [2] **Весна Мандић**, *Физичко и нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем*, 2012, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
- [3] **Србислав Александровић, Милентије Стефановић**, *Технологија пластичног обликовања метала*, Крагујевац, 2010. год.
- [4] **Ранко Радоњић**, *Одређивање граничне деформабилности у процесу извлачења отвора у лиму*, магистарски рад, Бања Лука, 2010.
- [5] **Academia**; Интернет страница:
https://www.academia.edu/897754/MODELIRANJE_I_SIMULACIJE_KAO_SISTEMI_PODR%25A0KE_U_ODLU%24%8CIVANJU, приступљено 9.10.2018 год.
- [6] **Весна Мандић**, Материјал са предавања, *Машине и алати у обради метала деформисањем*: <http://moodle.mfkg.rs/mod/resource/view.php?id=2155>, приступљено 9.10.2018 год.
- [7] **User Manual**, *Simufact.forming*