

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Филип Б. Павловић

**САЕ анализа процеса топлог ковања
применом методе коначних запремина**

завршни рад

Крагујевац, 2020.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: CAD/CAM/CAE 1

Број индекса: 9/2017

Филип Б. Павловић

**CAE анализа процеса топлог ковања применом методе
коначних запремина**

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

применом софтвера за САЕ анализу изврши анализу утицаја машине за обраду деформисањем на перформансе отковка и процес ковања. Потребно је да се на индустријском примеру ковања изабраног отковка изврше потребне нумеричке симулације поступка ковања применом софтвера *Simufact.forming* и на основу добијених резултата дају препоруке за избор машине.

Препоручена литература:

1. **Бинко Мусафија**, *Обрада метала пластичном деформацијом (четврто издање)*, Сарајево, 1979.
2. **Србислав Александровић, Милентије Стефановић**, *Технологија пластичног обликовања метала*, Крагујевац, 2010.
3. **Весна Мандић**, *Моделирање и симулација у обради деформисањем*, Крагујевац, 2005.
4. **Весна Мандић**, *Физичко и нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем*, Крагујевац, 2012.

Крагујевац, 2020.

Ментор:

Проф. Др Весна Мандић

Резиме

Резиме: Циљ овог рада је САЕ анализа процеса топлог ковања применом методе коначних запремина. Овај завршни рад се поред теоријског дела састоји и од практичног дела. У теоријском делу описано је ковање на ковачком чекићу и кривајној преси, технолошки процес ковања, пројектовање алата, подела ковачких гравура. Практични део рада обухвата основе нумеричких метода за моделирање и симулацију процеса обраде деформисањем, затим улазне податке и резултате симулација процеса топлог ковања отковка клипњаче на три изабране машине (ковачком чекићу, кривајној и фриксионој преси), применом софтвера *Simufact.forming*. На крају су дати анализа добијених резултата и препоруке.

Кључне речи: ковање, ковачки чекић, кривајна преса, фриксиона преса, нумеричка симулација, метода коначних запремина.

Abstract

Abstract: The aim of this paper is CAE analysis of hot forging process using finite volume method. This final work, in addition to the theoretical part, also consists of a practical part. The theoretical part describes the forging on a forging (drop) hammer and crank press, the technological process of forging, the design of tools, the classification of forging engravings. The practical part of the paper includes the basics of numerical methods for modelling and simulation of forming processes, as well as input data and simulation results of hot forging of connecting rod forging on three selected machines (forging hammer, crank and screw press), using *Simufact.forming* software. Finally, an analysis of the obtained results and recommendations are given.

Key words: Forging, Forging (drop) hammer, crank press, screw press, numerical simulation, finite volume method.

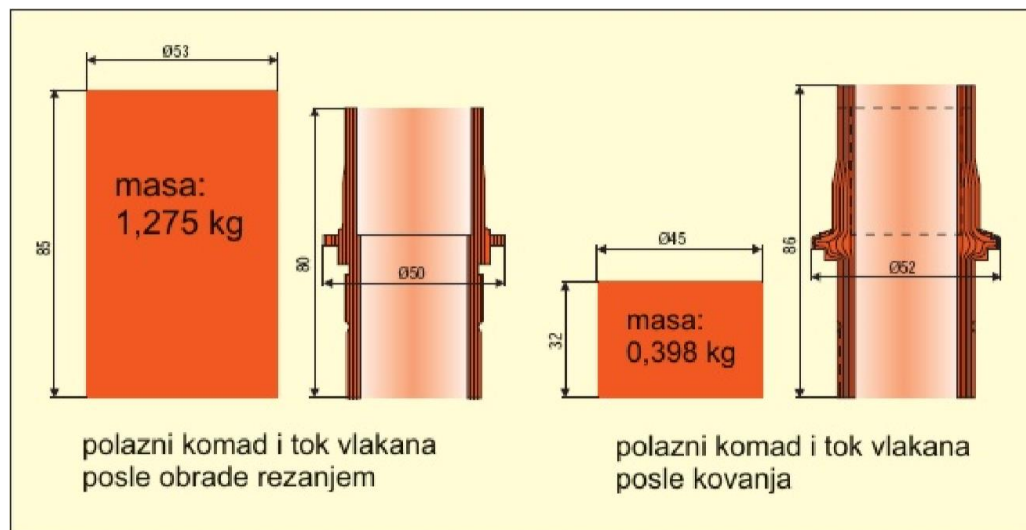
Садржај

1. Увод	6
2. Технолошки процес ковања	8
2.1 Конструисање отковка.....	8
3. Ковање на ковачким чекићима	12
3.1. Пројектовање алата за ковање на чекићу.....	12
3.2. Ковачке гравуре.....	13
3.3. Пројектовање технологије за ковање отковака прве групе.....	18
4. Ковање на кривајним ковачким пресама.....	22
4.1. Карактеристике ковања на кривајним ковачким пресама	22
4.2. Пројектовање алата за ковање на кривајним ковачким пресама.....	23
4.3. Ковачке гравуре.....	24
4.4. Пројектовање технологије за ковање отковака друге групе на кривајним ковачким пресама.....	26
5. Нумеричко моделирање и симулација процеса ковања.....	28
5.1. Значај моделирања и симулације код пројектовања процеса и алата у обради деформисањем.....	28
5.2. Нумеричке методе за моделирање процеса ОМД	29
5.2.1 Методе коначних елемената (МКЕ).....	29
5.2.2 Методе коначних запремина (МКЗ)	30
5.3. Алати за нумеричку симулацију процеса.....	31
6. САЕ моделирање процеса ковања	34
6.1. САЕ моделирање процеса ковања на ковачком чекићу.....	38
6.2. САЕ моделирање процеса ковања на кривајној преси	43
6.3. САЕ моделирање процеса ковања на фрикционој преси.....	47
7. Упоредна анализа нумеричких резултата.....	51
8. Закључак	61
9. Литература.....	62

1. Увод

Ковање, историјски посматрано, представља најстарији начин обликовања метала које своју праву индустријску примену добија тек у последња два века. Углавном се изводи као топло ковање (900-1200 °C)[1], које има масовну примену, а у примени су и процеси полутопле и хладне запреминске обраде материјала. Код топлог ковања загревање полазног комада се врши изнад температуре рекристализације, чиме се постиже повећање пластичности материјала, односно смањење деформационог отпора материјала који се кује. Може се реализовати на различитим машинама, али најзначајнија је примена на ковачким чекићима и ковачким пресама [2].

Добијање радног комада ковањем има одређене предности у односу на друге начине добијања радног комада, као што је обрада резањем. Ковањем се постиже очување влакнасте структуре која у великој мери утиче на механичке и структурне особине радног комада (Слика 1.1). Поред тога, делови су издржљивији према механичким оптерећењима, а потребна је мања маса материјала за израду радног комада, што утиче на економичност искоришћавања материјала [2].



Слика 1.1 Приказ полазног материјала и изглед влакнасте структуре при обради резањем и ковањем [2]

У техничком смислу разликујемо два начина ковања [2]:

- Слободно ковање
- Ковање у алатима (калупима)

Слободно ковање представља процес код кога је ширење метала, у правцима нормалним на правац кретања машине, слободно (неометано). Овај начин ковања се врши на одговарајућим машинама са једноставним универзалним алатом (Слика 1.2). Углавном имају примену у појединачној и малосеријској производњи, а и када је потребно као припремна операција за ковање у калупима [3].



Слика 1.2 Слободно ковање [4]

Ковање у калупима представља процес где метал под дејством удара маља ковачког чекића или под притиском притискивача пресе испуњава профилисани простор (гравуру) израђен у ковачком алату [3]. Може се вршити у :

- Отвореним алатима
- Затвореним алатима

Код ковања у отвореним алатима на саставу између горњег и доњег алата се формира вишак материјала у виду венца који се накнадно уклања. (Слика 1.3)



Слика 1.3 Ковање у отвореним алатима [5]

При ковању у затвореним алатима запремина припремка је једнака (или скоро једнака) запремини готовог отковка. (Слика 1.4)



Слика 1.4 Ковање у затвореним алатима [6]

Циљ овог рада је анализа добијених резултата након симулације ковања у програму Simufact.forming. Рад је подељен на теоријски и практични део, односно на осам целина. Почев од увода, преко теоријских подела и карактеристика ковачких чекића и преса, преко практичног дела и приказивања резултата до саме анализе резултата и закључка.

2. Технолошки процес ковања

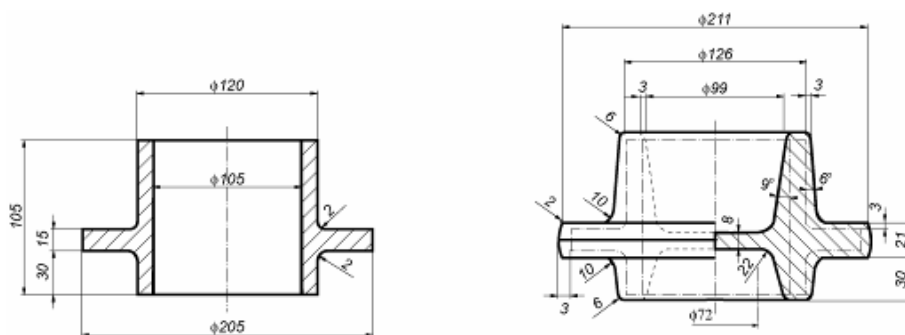
Развој технологије ковања се обавља у више фаза. Увек се полази од конструкције радног комада на основу које се обавља прва фаза пројектовања технолошког процеса, односно конструисање отковка. Пројектовање технолошког процеса ковања се састоји из следећих фаза [1]:

1. Конструисање отковка
2. Дефинисање врсте и редоследа ковачких операција
3. Одређивање димензија уложеног материјала (припремка)
4. Дефинисање режима загревања и хлађења, избор машине за загревање
5. Избор машине за ковање
6. Дефинисање броја радника, нормирање времена израде
7. Врста завршне контроле

2.1 Конструисање отковка

Основа при конструисању алата је модел отковка (Слика 2.1 десно) коме претходи модел готовог комада (Слика 2.1 лево). Да би се формирао модел отковка треба дефинисати [1]:

- Положај и облик подеоне равни
- Величину додатка за обраду и ковачке толеранције
- Ковачке нагибе и радијусе заобљења
- Површине за ослањање – базне површине
- Димензије и облик плочице
- Технолоичност отковка (дебљина танких зидова)

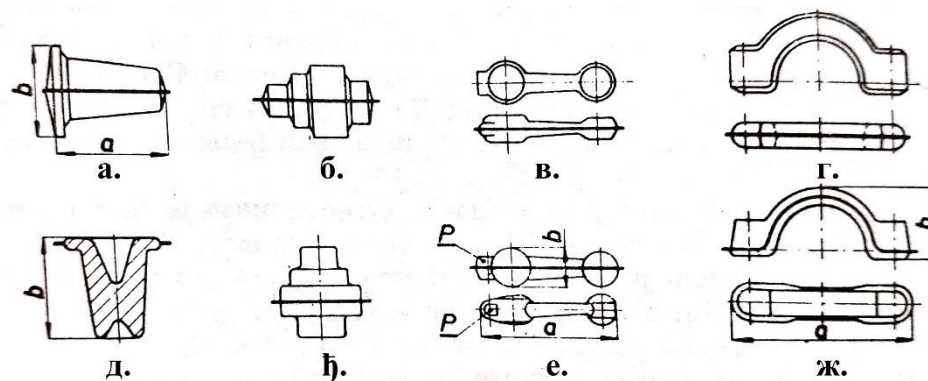


Слика 2.1 Цртеж готовог комада (лево) и цртеж отковка (десно) [1]

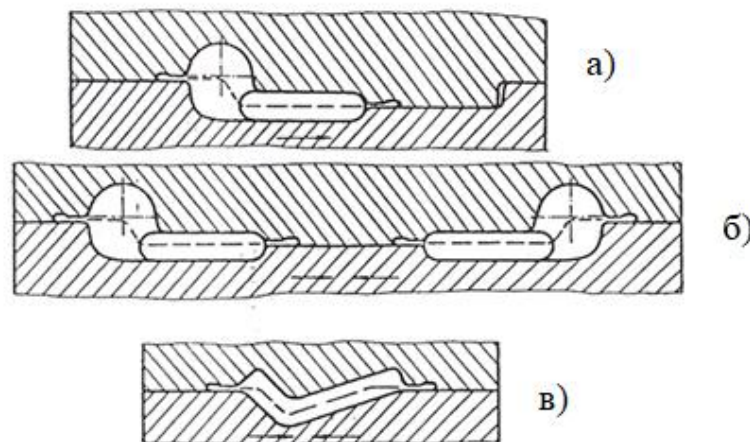
Калупи се израђују из два дела (горњег и доњег) због вађења отковка из калупа након процеса ковања, што значи да подеона раван дели отковак на два дела. Иако избор подеоне равни зависи од случаја до случаја, морају се задовољити одређени захтеви (Слика 2.2) [1]:

- Несметано састављање и раздвајање горњег и доњег калупа као и вађење отковка

- Због једноставнијег алата за крзање пожељно је да подеона раван буде равна
- Подеона раван дели отковак на половине једнаких висина
- Сложенији део отковка се поставља у горњи део калупа због постојања инерцијалних сила
- Површине које се обрађују резањем не би требало да имају шав од венца и нагибе
- Завршна гравура се лакше попуњава сабијањем него истискивањем
- Код изломљене подеоне линије водити рачуна о равнотежи хоризонталних сила (ковање два отковка истовремено, закошење отковка, конструкција алата са наслонима, Слика 2.3)



Слика 2.2 Примери избора положаја подеоне равни [3]

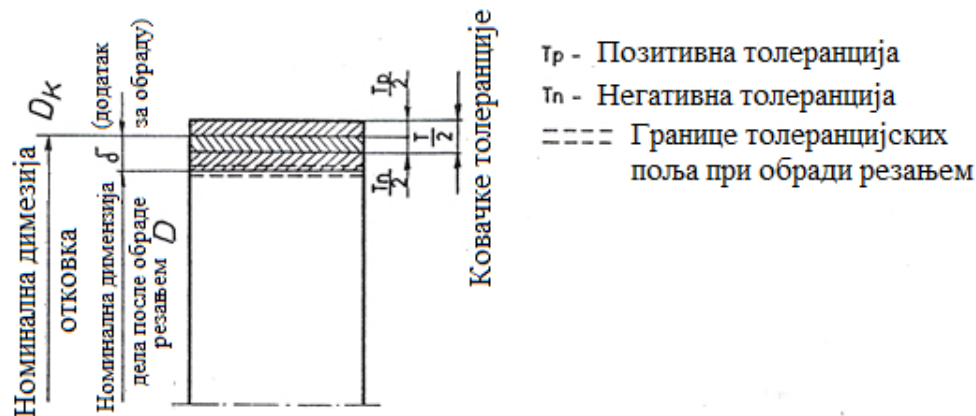


Слика 2.3 Изломљена подеона раван [1]

Конструкција самог отковка се изводи на основу конструктивног цртежа готовог комада и превиђених додатака за обраду који представљају повећање номиналних мера комада. Dodatak за обраду представља дебљину слоја материјала који се скида накнадном механичком обрадом, с тим што се додатак за обраду додаје само површинама комада које се накнадно обрађују скидањем струготине. Dodatak за обраду у себи садржи слој материјала са грешкама насталим при ковању. Грешке могу настати при непотпуном исуњавању гравуре, односно недовољно откованог комада, услед чега долази до појаве испупчења и удубљења. На појаву грешака такође може утицати и истрошеност алата, димензијска одступања итд. Додаци за обраду резањем највише зависе од: димензија

дела, врсте материјала, масе отковка, технологије накнадне обраде резањем, ковачке машине и класе тачности. Бирају се на основу литературних препорука и крећу се од 1-5 mm. На слици 2.4 је ознаком „ δ “ означен додатак за обраду [1] [3].

Ковачке толеранције номиналних мера представљају толерантно поље које обухвата одступања која настају из следећих разлога: нетачност ковања по висини, кривљење осе, непотпуност завршне гравуре, површински дефекти, ексцентричност при пробијању отвора. На слици 2.4 су приказане: номинална димензија отковка „ D_k “, номинална димензија дела после обраде резањем „ D “, додатак за обраду „ δ “, позитивна ковачка толеранција „ T_p “, негативна ковачка толеранција „ T_n “ и границе толеранцијских поља при обради резањем (приказане испрекиданим линијама) [3].



Слика 2.4. Додатак за обраду и ковачка толеранција [3]

Код гравуре ковачких калупа се све површине које се налазе у равнима паралелним са правцем кретања горњег дела алата израђују под одређеним нагибом у односу на те равни. Ковачким нагибима се постиже олакшано вађење отковака из гравуре без посебних уређаја за избацивање и олакшано течење материјала при ковању. Када се ковање врши са великим ковачким нагибима, такође се повећавају и додаци за обраду услед чега долази и до велике количине материјала који се одбацује накнадном обрадом резањем. Применом малих нагиба се отежава вађење отковка из гравуре. Ковачки нагиби могу бити спољашњи нагиби (α) и унутрашњи нагиби (α_1). Величина угла нагиба пре свега зависи од врсте ковачке машине, односа димензија одређених делова отковка, облика контуре, подмазивања, температуре ковања итд. Код различитих машина се примењују различите величине ковачких нагиба, као на пример [3]:

- Ковачки чекић (без избацивача) $\alpha=3-9^\circ$, $\alpha_1=9-10^\circ$
- Кривајна преса са избацивачем $\alpha=3-6^\circ$, $\alpha_1=6^\circ$
- Кривајна преса без избацивача $\alpha=7^\circ$, $\alpha_1=10^\circ$

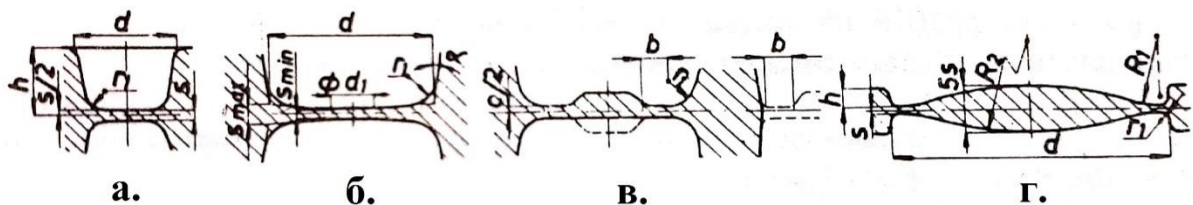
Ковачка заобљења можемо размотрити преко спољашњих и унутрашњих радијуса заобљења. Представљају важне величине са чијим се повећањем олакшава течење метала у угловима гравуре, постиже се боље попуњавање гравуре и продужава се век трајања ковачког алата. Применом малих радијуса заобљења долази до убрзаног трошења алата, а услед прекомерне концентрације напрезања може доћи до лома алата. Спољашњи радијуси заобљења „ R “ (радијуси заобљења удубљења гравуре) се бирају табеларно у

зависности од тежине и квалитета отковка, док се унутрашњи радијуси заобљења отковка „г“ (радијуси испупчења гравуре) израчунавају по обрасцу [3]:

$$r = (2,5-3,5) R + 0,5 \text{ mm} \quad (1)$$

Отковци који након механичке обраде морају да имају отворе чије су осе паралелне са правцем кретања горњег дела алата се израђују уз помоћ одређених испупчења у гравурама која одговарају профилу утиснутог отвора, чиме се постиже смањење „отпадног“ материјала при обради резањем. Испупчења у горњем и доњем калупу утискују следе отворе у отковку између којих се налази материјал у виду плочице и оне се пробијају накнадно уз помоћ посебног алата [3].

Дебљина и облик плочице у великој мери зависе од пречника и дубине отвора, осталих геометријских мера отковка, утицаја на потрошњу материјала, испуњења гравуре, хабања алата, погодности пробијања плочице итд. Типови плочица приказани су на слици 2.5.



Слика 2.5. Типови плочица [3]

У отковку се као базне површине одређују оне површине које своју позицију не мењају услед хабања алата. При одабиру базних површина треба бирати површине са што мањим нагибима и да те површине буду у зонама малих напрезања где није присутно хабање алата.

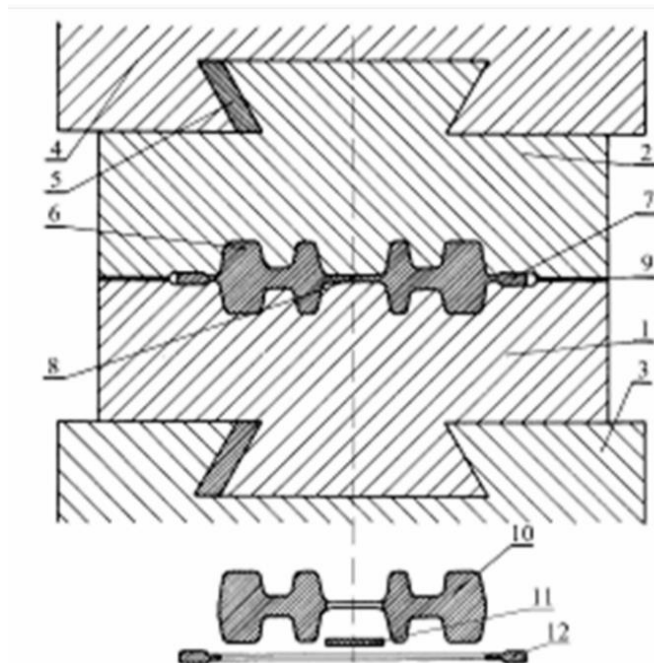
Специјални додаци се конструишу уколико отковак нема погодну површину за ослањање и они се накнадно могу уклонити. Базне површине се означавају на цртежу отковка и у већини случајева се након ковања калибришу па могу служити и као базе при обради резањем.

3. Ковање на ковачким чекићима

3.1 Пројектовање алата за ковање на чекићу

Алат за ковање на чекићу се састоји од горњег и доњег дела алата (Слика 3.1). Горњи део алата чине горњи калуп (2) који има завршетак у облику ластиног репа уз помоћ кога се горњи калуп клином (5) везује са маљем чекића (4). Подеона раван је замишљена раван дуж које се сустичу горњи и доњи део алата (9). У доњем делу алата се налази доњи калуп (1) који се такође уз помоћ клина и ластиног репа везује за наковањ (3). У горњем и доњем калупу су израђене гравуре према облику отковка. Припремак се смешта у доњи део калупа, након чега посредством удараца маља чекића долази до разливања метала и попуњавања гравуре и формирања отковка (6). Код ковачких чекића се потпуно попуњавање гравуре постиже након неколико удараца маља чекића. Због чињенице да се одређена количина материјала утроши на формирање венца (7) и плочице (8) може се закључити да је запремина припремка већа од запремине готовог отковка (10) [3].

Венац је неизбежан при ковању у отвореним алатима и уз помоћ њега се постиже боље попуњавање гравуре и боља експлоатација алата. При прорачуну се увек узима изванштан вишак материјала, чиме се постиже сигурно попуњавање гравуре, с обзиром да је одређивање тачне количине материјала некада веома тешко. Материјал који се уклања опсецањем венца и пробијањем плочице представља отпадак (11,12). На слици 3.1 су приказани основни елементи алата за ковање на чекићу [3].

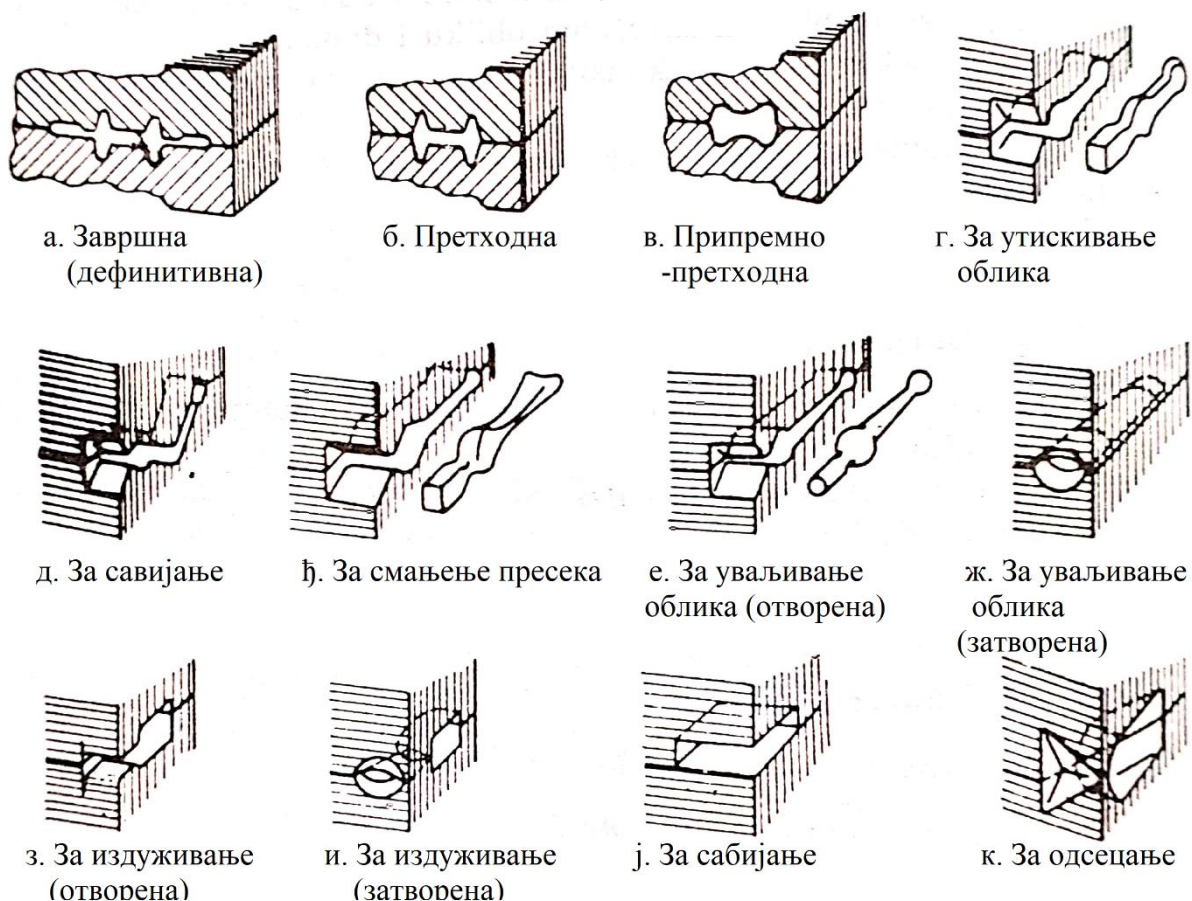


Слика 3.1 Основни елементи алата за ковање на чекићу [1]

3.2 Ковачке гравуре

Ковачке гравуре можемо поделити у три основне категорије [3]:

- а) Припремно - ковачке гравуре
- б) Завршно - ковачке гравуре
- с) Гравуре за одсецање



Слика 3.2 Врсте ковачких гравура [3]

а) **Припремно-ковачке гравуре** - могу се поделити на три подгрупе на основу операција које се њиховим коришћењем изводе [3]:

1. *Операције којима се изводи прерасподела метала по пресеку:*

- **Гравуре за издуживање** – служе за повећање дужине почетног облика материјала, при чему долази да смањења попречног пресека. Већу примену имају отворене гравуре (слика 3.2з), док се за већа издужења примењују затворене (слика 3.2и).
- **Гравуре за смањење пресека** (слика 3.2ђ) – служе за сужавање материјала на одређеним местима (смањује се попречни пресек) уз незнатно уздужно померање. У овој гравури се најчешће кује почетни облик материјала. Након ковања се комад

из ове гравуре, без заокретања, премешта у неку од завршно–ковачких гравура. Ковање се врши из 1 – 3 удара, без заокретања.

- **Гравуре за уваљивање облика** – користе се за повећање једних, што проузрокује смањење других попречних пресека, при чему долази до прерасподеле запремине материјала уздуж осе. Отворене гравуре се примењују код мање интезивног уваљивања облика (слика 3.2е), док се затворене гравуре примењују када је потребно знатно повећање попречног пресека на одређеним местима, уз незнатно издужење (слика 3.2ж). Ковање се у овој гравури врши са почетним обликом материјала или са комадом који је претходно откован у гравури за издуживање. Најмањи број удараца је 3, док је максималан број удараца од 8 до 10. Након сваког ударца комад се закреће око осе за 90° .

2. *Операције којима се припремку даје облик приближан облику отковка у подеonoј равни:*

- **Гравуре за утискивање облика** (слика 3.2г) – служе да материјалу дају облик, који одговара отковку у подеonoј равни, уколико се не захтевају знатна померања метала дуж осе комада и веће промене попречног пресека. Најчешће ковање почиње из почетног облика, а ређе се комад претходно кује у гравури за издуживање. У овој гравури се ковање најчешће врши једним ударцем (ређе 2-3 удараца) без заокретања. Комад се закреће за 90° око уздужне осе при пребацивању у следећу гравуру.
- **Гравуре за савијање** (слика 3.2д) – користе се за савијање комада са циљем добијања облика који одговара облику отковка у подеonoј равни. При ковању у овим калупима долази до незнатног померања метала дуж осе комада и незнатног смањења попречног пресека. У гравуру се може сместити почетни материјал или комад који је претходно откован у гравури за уваљивање или издуживање. Ковање се врши једним ударцем (ређе 2-3 удараца) без заокретања.

3. *Операције којима се повећавају димензије припремка у попречном правцу:*

- **Гравуре за сабијање** (слика 3.2ј) – служе за сабијање почетног облика материјала пре ковања у завршној гравури. Да би се смањило загревање, лепљење и прекомерно трошење завршне гравуре, сабијање отковака округлог и квадратног пресека у подеonoј равни се врши пре ковања у завршној гравури.

б) **Завршно – ковачке гравуре**

- **Завршне гравуре** (слика 3.2а) – служе за добијање готовог отковка са венцем и представљају тачан отисак отковка у врућем стању. Број удараца зависи од сложености отковка, правилности обраде у припремној и претходној гравури, као и тежине падајућих делова чекића.
- **Претходне гравуре** (слика 3.2б) – користи се за ковање отковака који су обликовани у некој од припремних гравура и њен облик је веома близак облику завршног отковка. Користе се првенствено за смањење степена деформације отковка у завршној гравури чиме се постиже продужавање века трајања исте. За

разлику од завршне, претходна гравура нема канал за венац и израђује се са већим ковачким нагибима и заобљењима. Број удараца у претходној гравури је од 1.5 до 2 пута већи него у завршној.

- **Припремно–претходна гравуре** (слика 3.2в) –примењују се уместо претходне гравуре при ковању комада сложенијих облика. Разликују се од претходне гравуре на местима где отковак има ребра, високе избочине, односно елементе који се тешко попуњавају у завршној гравури.

в) Гравуре за одсецање (нож за одсецање) се примењују када се отковак кује из шипкастог материјала па се по завршетку ковања раздваја одсецањем од шипке. (слика 3.2к)

Венац отковка се образује око контуре завршне ковачке гравуре од истиснутог материјала обратка. У зависности од сложености конфигурације отковка и расподеле материјала зависи и величина венца који ублажава удар маља чекића. Венац се формира од истиснутог материјала који попуњава канал за венац који је израђен око контуре завршне гравуре. Венац се састоји се од два дела: моста и магацина.

Канали за венац за ковање на чекићу се могу поделити на пет основних типова (Слика 3.3) [3]:

1. Тип I – уобичајено извођење канала за венац који има највећу примену (висина моста c , ширина моста b , висина магацина $0,5c+c_1$, ширина магацина b_1)
2. Тип II –примењује се код отковака који се након ковања заокрећу за 180° , након чега следи крзање
3. Тип III –примењује се на деловима гравуре где се код канала типа I и II јавља повећан одлив материјала
4. Тип IV – омугућава повећање постојаности доњег дела алата
5. Тип V – отежава истицање материјала у магацин, чиме се постиже попуњавање сложених и дубоких гравура.

Оптимална вредност висине моста се израчунава према обрасцу:

$$c = 0,015\sqrt{A} \text{ [mm]} \quad (2)$$

$A \text{ [mm}^2\text{]}$ – површина отковка у хоризонталној равни

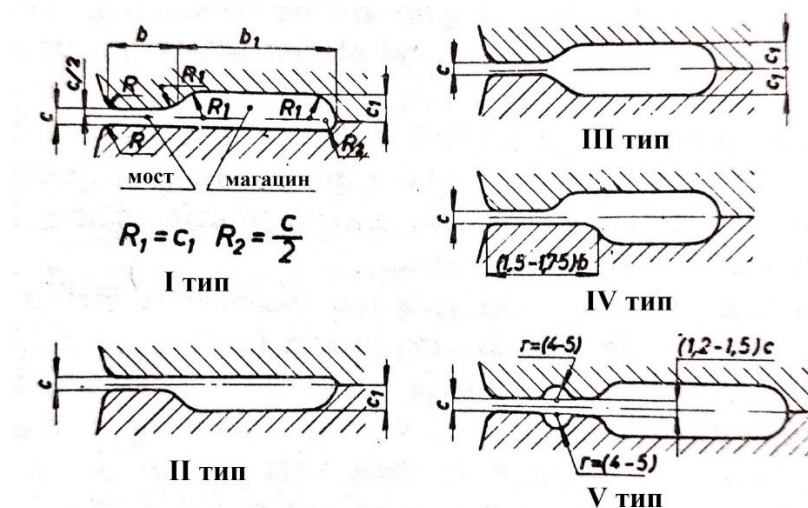
Коефицијент за одређивање броја ширине канала се израчунава према обрасцу:

$$K = 1,5 + 0,3 \left(\frac{H}{B_{sr}} \right) \quad (3)$$

где је:

$H \text{ [mm]}$ – дубина гравуре

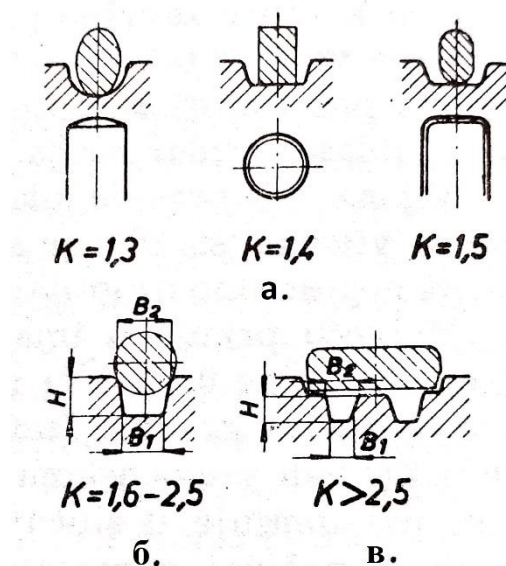
$B_{sr} \text{ [mm]}$ – средња ширина гравуре на дотичном месту



Слика 3.3 Типови канала за венац [3]

У зависности од вредности K постоје три ширине канала (слика 3.4) [3]:

- а. Када је $K \leq 1,6$, примењује се канал №1. Уложени материјал је мањи од профила гравуре, услед чега се ковање врши углавном сабијањем.
- б. Када је $K = 1,6 \div 2,5$ примењује се канал №2. Ковање се врши комбинацијом сабијања и утискивања.
- в. Када је $K > 2,5$ примењује се канал №3. Ова врста канала се користи код сложених отковака код којих се попуњавање гравуре врши утискивањем.



Слика 3.4 Попуњавање гравуре [3]

У табели 1 су дате вредности ширина (b, b_1), средње висине ($c_{sr} = \frac{A_v}{b} + b_1$) и попречног пресека канала (A_v).

Табела 1. Димензије канала за венац [3]

Ред бр.	с mm	с ₁ mm	R mm	№1 (слика 3.4 а)				№2 (слика 3.4 б)				№3(слика 3.4 с)			
				b mm	b ₁ mm	c _{sr} mm	A _v mm	b mm	b ₁ mm	c _{sr} mm	A _v mm	b mm	b ₁ mm	c _{sr} mm	A _v mm
1	0,6	3	1	6	18	2,1	52	6	20	2,5	61	8	22	2,5	74
2	0,8	3	1	6	20	2,6	69	7	22	2,6	77	9	25	2,6	88
3	1,0	3	1	7	22	2,7	80	8	25	2,7	91	10	28	2,64	104
4	1,6	3,5	1	8	22	3,4	102	9	25	3,3	113	11	30	3,8	155
5	2	4	1,5	9	25	4,0	136	10	28	4,0	153	12	32	4,0	177
6	3	5	1,5	10	28	5,3	201	12	32	5,3	201	14	38	5,3	278
7	4	6	2	11	30	6,5	268	14	38	6,6	344	14	42	6,8	385
8	5	7	2	12	32	7,8	343	15	40	7,9	434	18	46	7,9	506
9	6	8	2,5	13	35	9,7	435	16	42	9,14	530	20	50	9,2	642
10	8	10	3	14	38	11,6	601	18	46	11,6	745	22	55	11,7	903
11	10	12	3	15	40	14,0	768	20	50	14,1	988	25	60	14,2	1208

Запремина венца се израчунава:

$$V_v = \xi A_v [P + \varphi(b + b_1)] \text{ mm}^3 \quad (4)$$

где је:

ξ – коефицијент уз помоћ кога се узима у обзир степен попуњавања канала за венац

$A_v [\text{mm}^2]$ – површина попречног пресека канала (из табеле 2 се користе вредности за канал И типа, док се за остале типове врши прорачун)

$P [\text{mm}]$ – дужина подеоне линије

$b [\text{mm}]$ – ширина моста канала

$b_1 [\text{mm}]$ – ширина магацина канала

φ – коефицијент који зависи од облика отковка (Табела 2)

Табела 2. Вредности коефицијента ϕ [3]

Група	I						II			III
Под-група	1	2			3	4	1	2	3	1,2,3,
Тип	A,B,C	A	B	C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C
ϕ	4	4	4-5	4-6	5-6	4-6	2	4	6-8	4-9
Примедба	—	—	Зависно од степена приближавања подгрупи I	Зависно од степена приближавања подгрупи и типу 2A	Зависно од односа дужине изданка и	Зависно од степена приближавања подгрупама 2 и 3	—	—	Зависно од односа дужине изданка (крста) и отковка	Зависно од степена приближавања претходним груп.

3.3 Пројектовање технологије за ковање отковака прве групе

Отковци прве групе се у већини случајева кују у калупима са више гравуре. У зависности од врсте гравуре за ковање отковака прве групе, могу се поставити одређени принципи [3]:

- Завршно-ковачке гравуре – код ковања отковака прве групе у завршно-ковачкој гравури, метал се знатно помера дуж осе. При ковању било ког отковка алат за ковање мора поседовати завршну гравуру док је претходна гравура пожељна, али није обавезна. Код сложенијих отковака код којих се јавља отежано попуњавање гравуре потребна је припремно-претходна гравура.
- Припремне гравуре – димензија и сложеност отковка највише утичу на то да ли ће се ковање вршити са или без припремне гравуре. У овом одељку ће детаљније бити објашњене методе одређивање врсте припремне гравуре.
- Гравура за одсецање – Примена гравуре за одсецање зависи од начина ковања који се изводи. Гравура за одсецање се примењује када се врши ковање комада из шипкастог материјала.

Да би се одредила врста припремно-ковачке гравуре за ковање отковака прве групе, са издуженом осом, потребно је конструисати редуковани отковак. Конструисање редукованог отковка се врши на основу димензија и облика отковка. Редуковани отковак, односно рачунски отковак представља комад округлог пресека који је исте дужине као и задати отковак (l_0), при чему је површина попречног пресека једнака збиру површине попречног пресека отковка и венца на одређеном месту. Одатле следи:

$$A_r = A_o + A_{v0} = A_o + 2\xi A_v \quad (5)$$

где је:

A_r – површина попречног пресека редукованог отковка на произвољном месту

A_{v0} – површина попречног пресека венца са обе стране на истом месту

A_v – површина попречног пресека канала за венац (Табела 1.)

Редукована површина отковка (када је степен попуњавања канала $\xi = 0,7$) се рачуна према изразу:

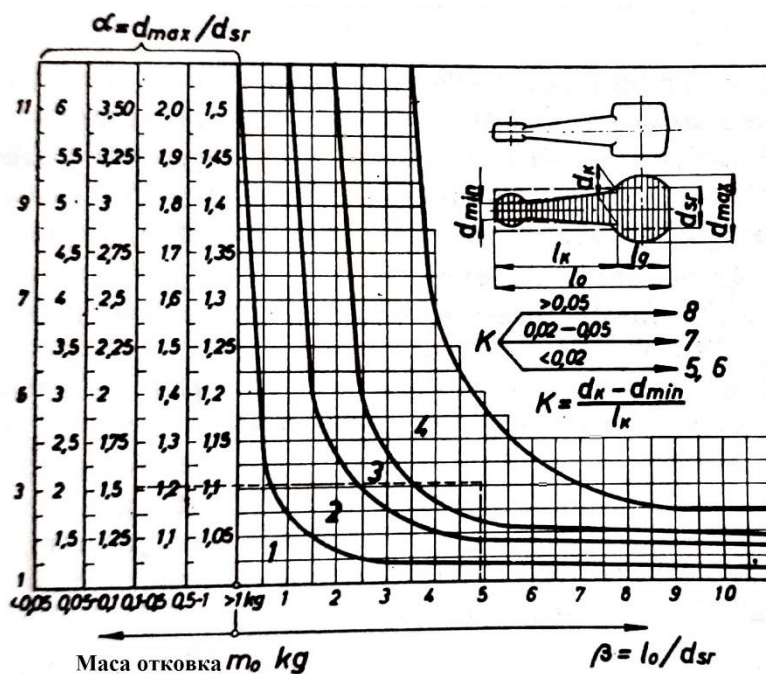
$$A_r = A_o + 1,4 \cdot A_v \quad (6)$$

Редукована површина отковка једнака је површини круга $A_r = \pi d_r^2/4$, услед чега се пречник редукованог отковка на произвољном месту израчунава преко обрасца

$$d_r = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_r} = 1,13 \sqrt{A_r} \quad (7)$$

На основу димензија (α, β, K), преко којих је изражен однос одређених димензија, врши се одабир врсте припремне гравуре (Слика 3.5).

$$\alpha = \frac{d_{\max}}{d_{sr}}; \beta = \frac{l_o}{d_{sr}}; K = \frac{d_k - d_{\min}}{l_k} \quad (8)$$



Гравуре у подручјима:

1. Ковање без припремне гравуре
2. Гравура за смањење пресека
3. Гравура за уваљивање облика (отворена)
4. Гравура за уваљивање облика (затворена)
5. Гравура за издуживање
6. Гравуре за издуживање и смањење пресека
7. Гравуре за издуживање и уваљивање облика (отворена)
8. Гравуре за издуживање и уваљивање облика (затворена)

Слика 3.5 Дијаграм за одређивање врста припремне гравуре на основу редукованог отковка [3]

Запремина отковка са венцем се означава са V_{O+V} , одатле следи да је површина средњег пресека редукованог отковка:

$$A_{sr} = \frac{V_{O+V}}{l_o} = \frac{V_o + V_v}{l_o} \quad (9)$$

где је:

V_o – запремина отковка без венца

V_v – запремина венца

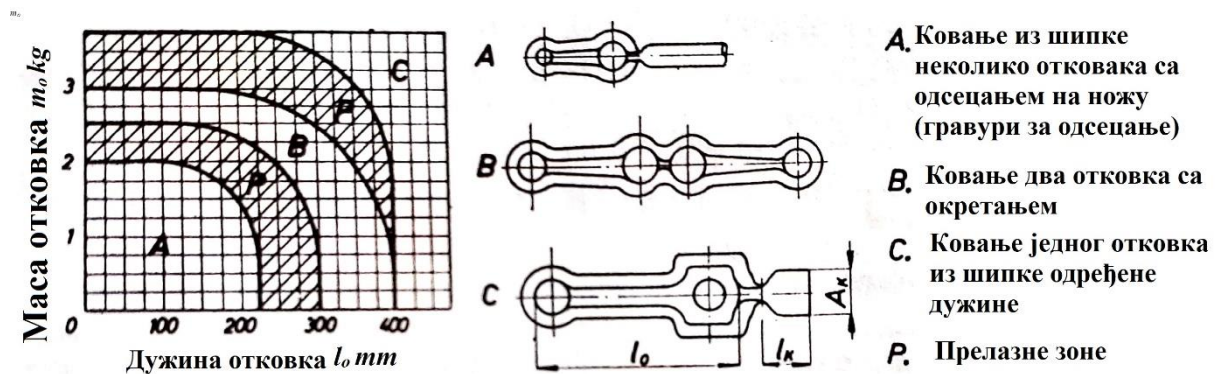
l_o – дужина отковка

Средњи пречник се израчунава посредством обрасца:

$$d_{sr} = 1,13\sqrt{A_r} \quad (10)$$

Са дијаграма приказаног на слици 3.6 се може очитати у ком се подручју врши припремно ковање на основу тежине отковка и прорачунатих вредности (α, β, K).

- Отковци мање тежине и мање дужине се кују из шипке (зона А).
- Отковци средњих димензија – из почетног комада материјала се кују два отковка при једном загревању (зона В)
- Ковање већих и тежих отковака се врши из појединачних комада (зона В).
- У прелазним подручјима се могу применити начини ковања два суседна подручја (зона Р).



Слика 3.6 Дијаграм за одређивање начина ковања (А.Ребељски) [3]

Запремина почетног материјала се одређује на основу следећег обрасца:

$$V_p = (V_o + V_v) (1 + \Delta) = V_{o+v} (1 + \Delta) \quad (11)$$

где је:

V_{o+v} - запремина отковка са венцем

Δ - додатак материјала који је предвиђен за изгарање. Допатак материјала предвиђен за изгарање се креће у одређеним границама:

$\Delta = 0,02 \div 0,03$ – при загревању у пламеним пећима

$\Delta = 0,005 \div 0,01$ - при загревању у пећима са заштитном атмосфером

Површина попречног пресека почетног материјала се израчунава према следећем обрасцу:

$$A_p = C \cdot A_{sr} \quad (12)$$

где је "C" коефицијент који зависи од врсте припремне гравуре.

У зависности од врсте припремне гравуре, коефицијент „С„ се креће у одређеним границама:

- Када се ковање врши без припремне гравуре или се врши само у гравури за савијање $C = 1,02 \div 1,05$
- Када се ковање врши у гравури за смањење пресека или у гравури за утискивање облика $C = 1,05 \div 1,3$
- Када се ковање врши у гравури за уваљивање облика $C = 1,02 \div 1,2$

Када се припремно ковање врши у гравури за издуживање облика, пресек почетног материјала се рачуна према следећем орбасцу:

$$A_p = \frac{V_g(1+\Delta)}{l_g} \quad (13)$$

где је:

V_g - запремина главе редукованог отковка

l_g – дужина главе редукованог отковка

Дужина почетног материјала се одређује као однос запремине и пресека почетног материјала:

$$l_p = \frac{V_p}{A_p} \quad (14)$$

4. Ковање на кривајним ковачким пресима

4.1 Карактеристике ковања на кривајним ковачким пресима

Кривајне ковачке пресе представљају машине које имају све већу примену у односу на ковачке чекиће. Савремене ковачке пресе се израђују са силом на притискивачу до 100 MN, што представља границу до које је исплативо примењивати кривајне ковачке пресе. Оне се могу користити и за ковање отковака који захтевају већу силу на притискивачу (140÷160 MN) с тим што то проузрокује одређене конструктивне потешкоће (велика димензија кућишта, главног вратила и осталих димензија). За ковање отковака који захтевају већу силу на притискивачу, пожељније су брзоходне хидрауличне пресе [3].

Карактеристике ковања на кривајним пресима у поређењу са ковањем на чекићима су [1]:

- Горњи и доњи део алата се не додирују при обради да не би дошло до преоптерећења машине.
- Због крутог кинематског механизма и прецизнијег вођења повећана је прецизност израде отковака
- За разлику од ковачких чекића, код кривајних преса се у свакој фази попуњавање гравуре врши у једном ходу.
- Уколико је то лакше решење, припремне операције се могу вршити на ковачким чекићима или на ковачким ваљцима.
- Загревање припремка се врши у гасним или електричним пећима јер на отковку не смеју бити веће количине оксидне коре. Припремак се у овим пећима загрева због чињенице да се попуњавање гравуре врши у једном ходу, при мањим брзинама.
- Брзина кретања притискивача кривајне пресе у тренутку контакта горњег дела алата и отковка износи 0,5-0,8 m/s, док код ковачких чекића износи 10 m/s.
- Код кривајних ковачких преса нема потребе за великим темељима који се користе код ковачких чекића јер кривајне пресе одликује мирнији рад па је везивање могуће као код машина за хладну обраду.
- Применом избацивача у горњем и доњем делу алата спољашњи ковачки нагиби могу бити $\leq 3^\circ$.
- Загрејани материјал је мање у контакту са алатом чиме се постиже дужи век алата.
- За разлику од ковачких чекића, сложенији делови отковка се смештају у доњи део алата.
- На кривајним ковачким пресима ковање може бити у алатима са отвореним или затвореним гравурама. Ковање у алатима са отвореним гравурама (гравуре око којих је израђен канал за венац) је знатно теже него на ковачким чекићима, док се

ковање у алатима са затвореним гравурама много лакше и квалитетније обавља него на ковачким чекићима.

- Код ковања на кривајним ковачким пресама не постоји инерцијална сила што отежава попуњавање гравуре и олакшава истицање материјала у венац (долази до бржег хабања моста венца).
- При вишеоперационом ковању потребно је више гравура да би се дошло до коначног облика отковка. Свака операција на преси се изводи у једном ходу па је због тога пожељније припремне операције уваљивања пресека и операције издуживања ивршити на некој другој ковачкој машини.
- Код кривајних ковачких преса су повољнији услови за механизацију и аутоматизацију рада (довод материјала, премештање припремка у следећу гравуру).

4.2 Пројектовање алата за ковање на кривајним ковачким пресама

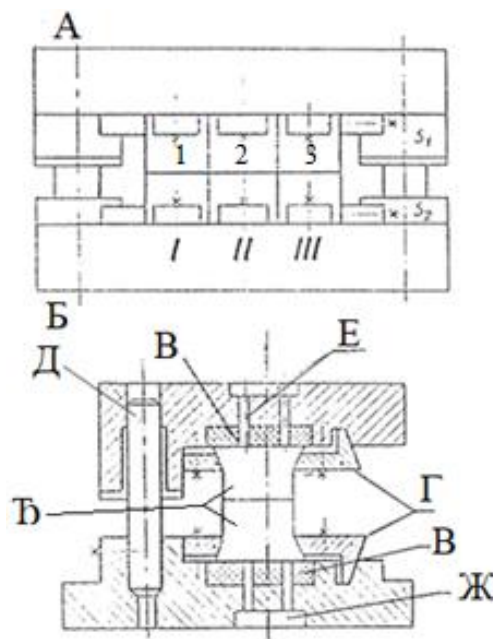
Код кривајних ковачких преса примењују се конструкције блок алата код којих се уметци (позиције 1,2 и 3 на слици 4.1) монтирају у заједнички блок. Применом конструкције блок алата постиже се лака монтажа, демонтажа и замена уметака са истрошеним гравурама [3].

Елементи алата за ковање на кривајним ковачким пресама, приказани на слици 4.1, могу се поделити на [1]:

- Елементе конструкцијског типа:
 - Носачи алата (горњи носач алата А, доњи носач алата Б) – везују се за сто и притискивач пресе и служе за прихватање уметака. При ковању примају сва оптерећења, зато морају бити довољно крути да њихове еластичне деформације не би утицале на одступање мера отковка. Примењују се носачи за призматичне и цилиндричне уметке.
 - Међуплоче В – користе се да ублаже притисак који делује на горњи и доњи носач алата.
 - Елементи за причвршћивање уметка Г – могу бити израђени са косим површинама (користе се за причвршћивање призматичних уметака) или са наслонима (користе се за причвршћивање цилиндричних уметака).
 - Стубне вођице Д – се причвршћују у доњи део алата, док се чауре за вођење смештају у горњи део алата. Користе се за вођење горњег дела алата ка доњем.

- Радне елементе:

- Уметци Ђ – су типизирани према облику и димензијама. По облику се деле на цилиндричне и призматичне. Сваки уметак засебно има само једну гравуру.
- Избацивачи (горњи избацивач Е, доњи избацивач Ж) имају примену код алата који се користе за ковање на пресама, осим у случајевима када је дубина гравуре мала па се вађење отковка може извршити без примене избацивача.



Слика 4.1 Алат за ковање на кривајним ковачким пресама [1]

4.3 Ковачке гравуре

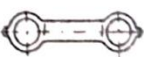
Отковци који се кују на кривајним ковачким пресама могу се поделити на основу конфигурације на пет основних група. У овом раду ће највише пажње бити посвећено ковању отковака друге групе на кривајним ковачким пресама, који имају издужену осу (одговарају првој групи за ковање на чекићу). Врсте ковачких гравура која се примењују при ковању зависе од групе отковака који се кују. Гравуре за ковање на ковачким пресама можемо поделити на [3] :

1. Припремне гравуре :

- **Гравуре за смањење пресека** – примењују се да би се постигла прерасподела материјала уздуж осе комада. Највећу примену има при ковању отковака са издуженом главном осом (отковци 2,3,4, групе, приказано у табели 3).

- **Гравуре за сабијање** – примењују се код припремног ковања разгранатијих отковака у хоризонталној равни. Углавном су то отковци квадратног или округлог пресека (отковци 1. групе, Табела 3).
- **Гравуре за истискивање** –користе се за припрему сложених отковака који припадају 5. групи (Табела 3).
- **Гравуре за савијање** – користе се да би се постигло савијање отковка уз незнатно померање материјала дуж његове осе. Овом гравуром се врши припремно ковање отковака 4. групе. (Табела 3)

Табела 3. Класификација отковака који се кују на кривајним ковачким пресема [3]

Група	Карактеристика	Подгрупа		
		1	2	3
I	Ови отковци се раде сабијањем, или комбинацијом сабијања и истискивања. Подгрупе 1,2 и 3 представљају типове отковака, који се кују у једној, две или три радне операције.			
II	Отковци имају издужен облик са незнатним променама попречног пресека. Подгрупе 1,2 и 3 кују се у једној, две или три радне операције.			
III	Отковци са издуженим обликом и знатним променама попречног пресека, раде се у комбинацији са хоризонталним ковачким машинама (1), са ковачким ваљцима (2) и сл.			
IV	Отковци са укривљеном главном осом. Алати за ковање, имају поред осталих и гравуре за савијање отковака ове групе.			
V	Ови отковци се раде поступком истискивања у врућем стању. Истискивање метала се врши или у правцу осе отковка (1), или управно на исту (2). Отковци подгрупе (3) се кују по методама убадања и супротносмерног истискивања.			

2. Завршно – ковачке гравуре :

- Гравуре за претходно ковање
- Гравуре за претходно истискивање
- Гравуре за завршно ковање
- Гравуре за завршно истискивање.

Код претходних гравура растојање између горњег и доњег алата је веће него код гравура за завршно ковање и то 50-70% [1].

Гравуре за завршно ковање на кривајним ковачким пресема се добијају по сличном принципу као и код ковања на ковачким чекићима, односно представљају тачан отисак отковка са топлим kotaма [1].

Ход притискивача пресе је константан, због чега се при ковању горњи и доњи део алата не додирују да не би дошло до преоптерећења пресе. Због оваквог начина рада пресе, за разлику од ковања на чекићу, канал за венац је отворен. Мост канала је сличан као и код ковања на чекићу, док је магацин отворен [3].

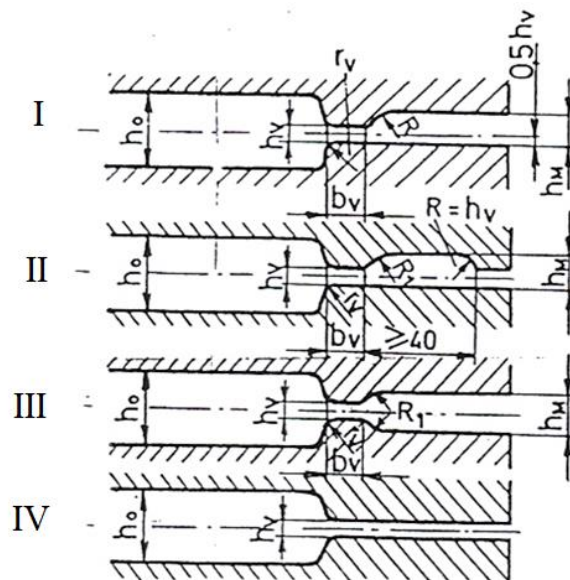
Типови канала за венац приказани су на слици 4.2, а то су [1]:

Тип I – представља уобичајено извођење и овакви типови канала за венац имају најширу примену. Магацин је са једне стране отворен и може се налазити на страни горњег или доњег алата, зависно од начина крзања венца отковка [3].

Тип II – Магацин је полузатворен чиме се постиже уштеда у механичкој обради алата.

Тип III – Магацин је отворен са обе стране. Овај тип канала за венац се примењује када се очекује истицање веће количине материјала у венац.

Тип IV – се примењује при ковању отковака компликованијих облика, када је запремина венца мала и истицање у канал отежано.



Слика 4.2 Типови канала за венац код ковања на кривајним ковачким пресима [3]

4.4 Пројектовање технологије за ковање отковака друге групе на кривајним ковачким пресима

Отковци који припадају другој групи отковака (по Табели 3) односно отковци са издуженом главном осом се могу ковати у једној, две или три операције. Ситни отковци са незнатном разликом у попречним пресецима се кују у једној или две операције. Код отковака који се кују у три операције, припремно ковање се врши у гравури за обликовање, док се операције завршног ковања изводе у претходној и завршној гравури. У завршној гравури је могуће ковати више отковака истовремено [3].

Да би се добио образац према коме се рачуна сила кривајне ковачке пресе за ковање неокруглих отковака потребно је кориговати образац за силу ковања округлих отковака (образац 15), фактором који у обзир узима то да отковци нису оркуглог облика (образац 16). Такође је потребно уместо пречника округлог уврстити сведени пречник неокруглог облика (образац 17), након чега се добија образац за израчунавање силе кривајне ковачке пресе за ковање отковака неокруглог отковака (образац 19) [3].

Образац за силу ковања оркуглих отковака:

$$F = 8(1 - 0,001D)(1,1 + \frac{20}{D})^2 R_m A \quad (15)$$

Образац којим се узима у обзир то да отковци нису округлог облика:

$$G_n = G(1 + 0,1 \sqrt{\frac{L}{B_{sr}}}) \quad (16)$$

Сведени пречник неокруглог облика:

$$D_n = 1,13\sqrt{A} \quad (17)$$

Образац за израчунавање средње ширине:

$$B_{sr} = \frac{A}{L} \quad (18)$$

Образац за одређивање силе кривајне ковачке пресе за ковање отковака неокруглих облика:

$$F = 8(1 - 0,001 D_n) (1,1 + \frac{20}{D_n})^2 (1 + 0,1 \sqrt{\frac{L}{B_{sr}}}) R_m A \quad (19)$$

где је :

F [kg] - сила кривајне ковачке пресе за ковање отковака неокруглих облика

A [mm²] - површина отковка у хоризонталној равни

D_n [mm] - сведени пречник неокруглог отковка у хоризонталној равни

L [mm] - дужина отковка

B_{sr} [mm] - средња ширина неокруглог отковка у хоризонталној равни

R_m [MPa] – затезна чврстоћа

5. Нумеричко моделирање и симулација процеса ковања

5.1 Значај моделирања и симулације код пројектовања процеса и алата у обради деформисањем

Пројектовање нових или модификовање постојећих производа и процеса се годинама врше на основу искуства технолога и експериментисањем. Овакав начин пројектовања доводи до тога да инжењери долазе до решења које је у већини случајева далеко од идеалног решења. Често се при оваквом пројектовању у пракси добијају производи са унутрашњим и спољашњим дефектима, где услед неправилног течења материјала може доћи до стварања великих радних притисака који доводе до лома алата [7].

Трошкови поновног пројектовања и израде алата су веома велики услед чега се јавља практична потреба да се развојне и истраживачке активности одвијају ван текуће производње, у лабораторијама (при фабрикама, универзитетима и институтима). Развојне и истраживачке активности које се изводе у лабораторијама се могу поделити на моделирање и симулацију [7].

Моделирањем и симулацијом производног процеса се могу постићи бројни циљеви [7]:

- Повећање продуктивности и оптимизација постојећег процеса
- Побољшање квалитета производа
- Мањи број покушаја при модификовању постојећег производа или процеса, односно у фази пројектовања новог производа или процеса
- Побољшање система контроле процеса
- Пројектовање нове опреме и алата
- Едукација и стицање знања (проучавање параметара процеса, визуелизација процеса, ...)

Нумеричке методе које се користе за моделирање процеса се могу поделити у четири групе [7]:

- Техника елемената горње процене (*Upper Bound Elemental Technique, UBET*)
- Метода елементарних просторних крутих зона (*Spatial Elementary Rigid Region Method, SERR*)
- Метода коначних елемената (*Finite Elemental Method, FEM*)
- Метода коначних запремина (*Finite Volume Method, FVM*)

5.2 Нумеричке методе за моделирање процеса ОМД

5.2.1 Метода коначних елемената (МКЕ)

Метода коначних елемената припада методама дискретне анализе и заснива се на физичкој дискретизацији посматраног домена. „Посматрани континуум са бесконачним бројем степени слободе се апроксимира дискретним моделом међусобно повезаних коначних елемената са коначним бројем степени слободе“ [7]

Сама суштина апроксимације континуума по МКЕ се огледа у следећем:

- Посматрани домен континуума се дели на поддомене коначних димензија који се називају коначним елементима. Запремина обратка који посматрамо дели се на велики број коначних елемената који заједно чине мрежу коначних елемената.
- Сви коначни елементи су међусобно повезани у коначном броју тачака које се називају чворовима. Тачке (чворови) у којима су повезани коначни елементи се налазе на контурама коначних елемената.
- Стање променљиве поља у сваком коначном елементу се описује помоћу интерполационих функција.
- Интерполационе функције су унапред задате функције за један тип КЕ и представљају везу између вредности променљиве поља у било којој тачки КЕ и вредности променљиве поља у чворовима.

Метода коначних елемената се дели на четири основна вида:

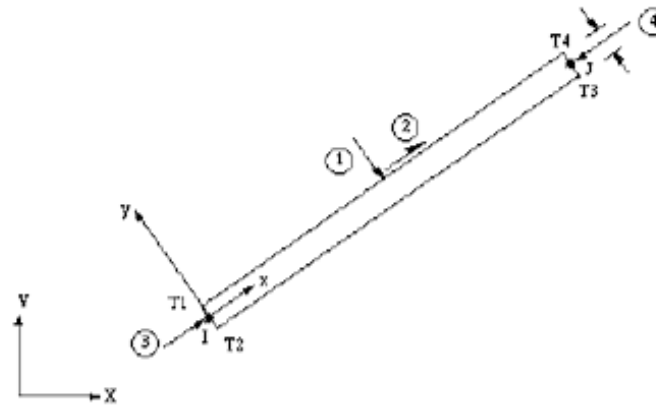
- 1) Директна метода
- 2) Варијациона метода
- 3) Метода резидуума
- 4) Метода баланса енергије

Један од најважнијих корака у примени методе коначних елемената је избор типа коначног елемента. Избор коначног елемента изузетно утиче на добијање тачних резултата. У основне особине коначних елемената спадају: облик, број и врста чворова, број и врста степени слободе у одређеним чворовима, врста интерполационих функција.

Коначни елементи се према облику деле на: линијске, раванске и просторне. Елементи могу бити са праволинијским и криволинијским контурама.

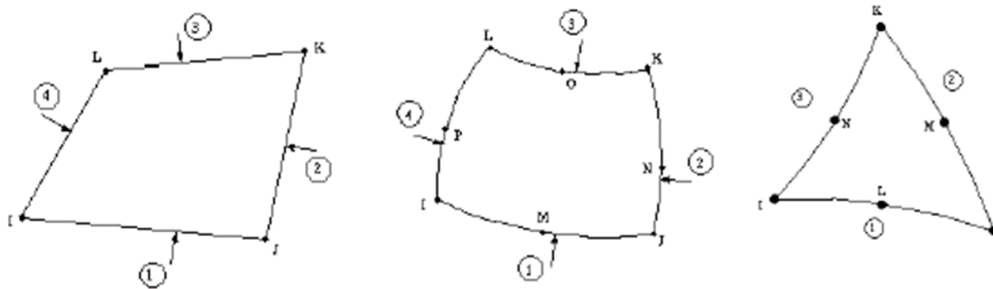
Код линијских коначних елемената једина димензија која се разматра је дужина и овакав тип коначног елемента је уствари део праве или криве линије. Примери [7]:

- Штапови (SPARS)
- Греде (BEAMS, Слика 5.2)



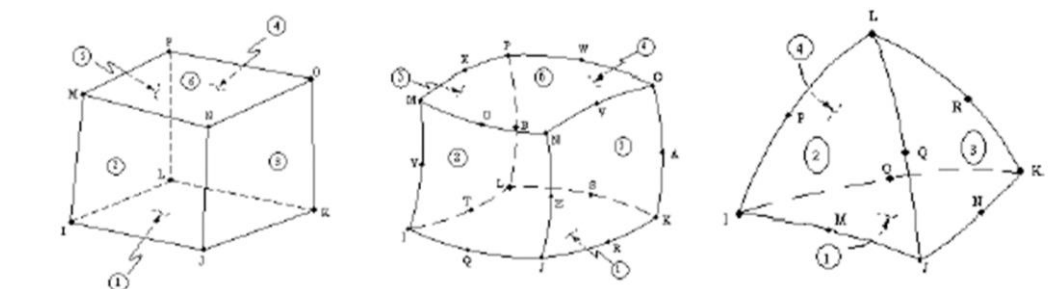
Слика 5.2 BEAM [8]

Равански коначни елементи се користе за анализу проблема који се могу посматрати као дводимензионални (осносиметрично стање деформације, равно стање напона и деформације). Примењују се равански коначни елементи троугаоног и четвороугаоног облика. (слика 5.3)



Слика 5.3 Равански 2D коначни елементи [8]

Просторни коначни елементи се користе за анализу тродимензионалних проблема и углавном су облика призме или тетраедра. Могу бити праволинијски и криволинијски. (Слика 5.4)



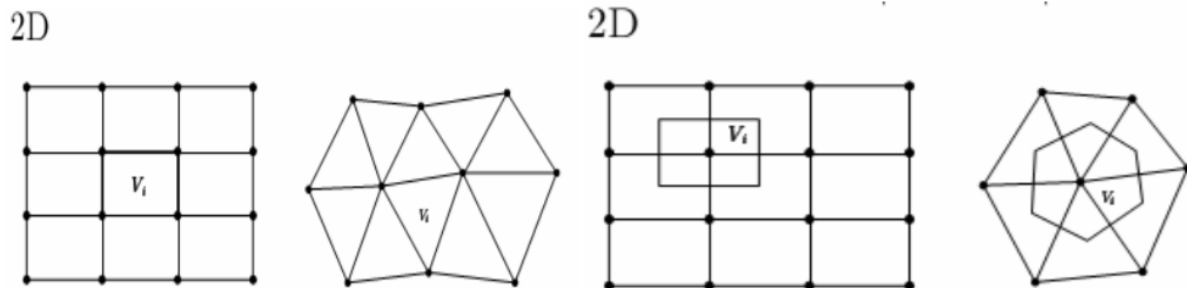
Слика 5.4 Просторни коначни елементи [8]

5.2.2 Метода коначних запремина (МКЗ)

Метода коначних запремина најчешће креће од интегралног облика закона одржања (маса, енергије, количине кретања, момента количине кретања). Домен решавања се дели на коначан број контролних запремина (ћелија) које су међусобно повезане, па се једначине одржања примењују на сваки од њих. У тежишту сваке контролне запремине се налази нумерички чвор у коме се прорачунавају вредности

променљивих. Вредности променљивих на површинама контролних запремина се добијају помоћу интерполације преко вредности променљивих у чворовима. Преко одговарајућих квадратних формула се апроксимирају површински и запремински интеграл, а на крају се за сваки чвор добија алгебарска једначина [9].

Најчешће се код методе коначних запремина дефинишу ћелије одговарајућом мрежом у посматраном домену и одређују се чворови који се налазе у центру ћелија (Слика 5.5 десно). Такође је могуће прво поставити чворове па дефинисати ћелије (слика 5.5 лево). Прва варијанта се чешће примењује у пракси [10].



Слика 5.5 Различити приступи код поделе домена на контролне запремине - ћелије [10]

5.3 Алати за нумеричку симулацију процеса

Нумеричка, односно комјутерска симулација процеса запреминске обраде представља технику која омогућава одређивање:

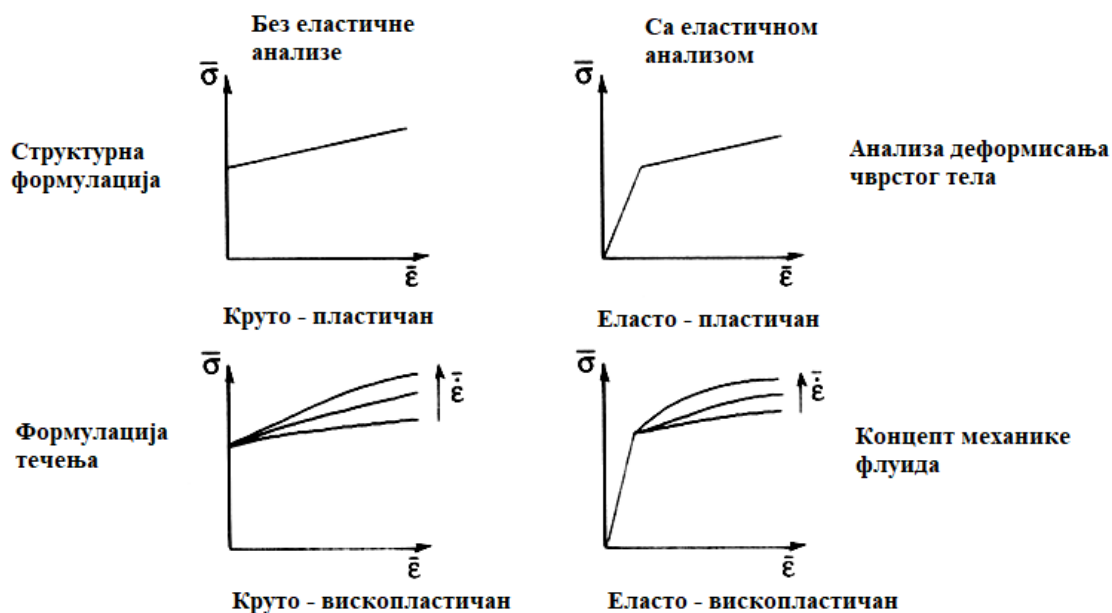
- Деформационих, напонских, брзинских и температурних поља
- Генерисање и трансфера топлоте у међуконтакту алата и дела
- Течења материјала при пластичном деформисању
- Еластичних деформација и хабања алата
- Микроструктурних промена и процене особина готовог дела
- Потребне енергије и деформационе силе процеса
- Показатеља критеријума пластичног лома
- Дефеката у течењу материјала и њихову превенцију

Метода коначних елемената (МКЕ) и Метода коначних запремина (МКЗ) представљају најшире примењиване и најмоћније „алате“ за нумеричку симулацију процеса обраде. У разматрање се при избору и апликацији алата за нумеричку симулацију процеса обраде узима:

- Концепт пластичног течења
- Дефинисање геометрије
- Дефинисање контактних услова
- Компјутерско време

- Аутоматско генерисање и регенерисање мреже

Концепт пластичног течења – Постоје две формулације које се користе у анализи процеса обраде методом коначних елемената за описивање понашања материјала при деформисању. Први модел је структурна формулација, преко анализе деформисања чврстог тела, док је други модел формулација течења, који је сличан концепту механике флуида. Формулација течења има примену у МКЕ анализи процеса топле запреминске обраде, док се структурна формулација користи за симулацију процеса хладне обраде. Тачно одређивање карактеристика течења материјала, односно криве течења веома је важно за прецизно нумеричко одређивање течења материјала при пластичном деформисању и одређивање деформационе силе и енергије процеса. На слици 5.6 приказани су модели понашања материјала при деформисању.



Слика 5.6 Типови понашања материјала при деформисању [8]

Одређивање карактеристика течења материјала, односно криве течења се врши експериментално, на више начина [8]:

- Тест на затезање представља најједноставније експериментално одређивање криве течења у погледу одсуства трења, али има ограничења која се односе на рани почетак локализовања деформације и настанка просторног напонског стања. При једноосном затезању максимална деформација износи $\epsilon_m = 0,2 \div 0,3$.
- Тест на увијање захтева специјалну опрему и омогућава одређивање напона течења до великих износа деформација, $\epsilon_m = 2 \div 4$.
- Тест на притискивање цилиндричног припремака, због једноставности опреме и могућности одређивања напона течења у ширем опсегу деформација до $\epsilon_m = 2$, представља најшире примењивани тест.

Дефинисање геометрије - Симулација процеса се, у зависности од сложености дела који се добија, може изводити као 2D и 3D проблем. Осносиметрично, раванско или приближно раванско деформисање представљају 2D проблем. Код 2D проблема се у едитору за цртање комбинацијом лукова и линија дефинише геометрија радног комада,

док се код 3D проблема геомтерија радног комада дефинише преко површина. У зависности од тога да ли се изводи деформационо – температурна анализа алата, геомтерија алата може бити дефинисана са отвореном или затвореном контуром [7].

Постизање ефикасније симулације и смањење компјутерског времена постиже се тако што се при дефинисању геометрије уклоне, занемаре сви мали геометријски детаљи (нпр. мали радијуси у алату). Мали геометријски детаљи немају значајнији утицај на резултате нумеричке симулације процеса, а могу веома успорити регенерисање мреже (*remeshing*). Када је у питању симулација процеса микрообrade не могу се применити оваква упрошћења геометрије [7].

Дефинисање контактних услова – Значајан утицај на пластично течење метала и износ деформационе силе процеса имају услови контактеног трења и трансфера топлоте у међуконтакту између алата и комада. У процесима запреминске обраде се услови трења углавном дефинишу одређивањем вредности коефицијента трења. Најпримењиванији метод за одређивање вредности коефицијента трења је тест сабијања прстена (*ring test*). Услови трансфера топлоте у међуконтакту између алата и комада се дефинишу одређивањем коефицијента трансфера топлоте (НТС) [7].

Генерисање и регенерисање мреже - Програми који се користе за МКЕ нумеричку симулацију и анализу процеса запреминске обраде, у већини случајева имају модуле за аутоматско генерисање мреже коначних елемената. Аутоматско генерисање мреже се изводи у два корака:

1. Одређивање оптималне густине мреже
2. На основу задате густине се врши генерисање FE мреже.

Корисник, интерактивним уносом максималног броја елемената мреже припремка или оријентационом величином елемента мреже, дефинише оптималну густину мреже. Што је број елемената већи, анализа је прецизнија и спорија, и обрнуто.

Када се елементи мреже деформишу и при анализи долази до појаве грешака, потребно је регенерисати мрежу (*remeshing*) [7].

6. CAE моделирање процеса ковања

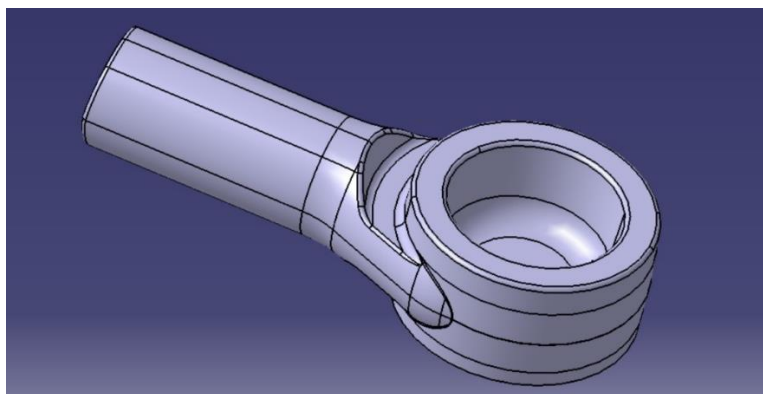
Будући да је тема рада анализа утицаја машине на перформансе процеса ковања, изабран је произвољан пример отковка (отковак клипњаче (слика 6.1)) који се израђује у компанији Застава Ковачница.



Слика 6.1 Изглед готовог отковка клипњаче

За потребе моделирања процеса било је неопходно прикупити податке о индустријском процесу. Из компаније Застава Ковачница добијени су CAD модели алата за ковање на чекићу, модел готовог отковка (слика 6.2) и индустријски параметри ковања, као сет улазних података за успешну реализацију симулације процеса ковања. Улазни подаци за симулацију су:

- Материјал отковка: 42CrMo4
- Димензије припремка: $\varnothing 65 \times 111$ mm
- Температура ковања: T (1200÷1250) °C
- Маса производа: 2.340 kg

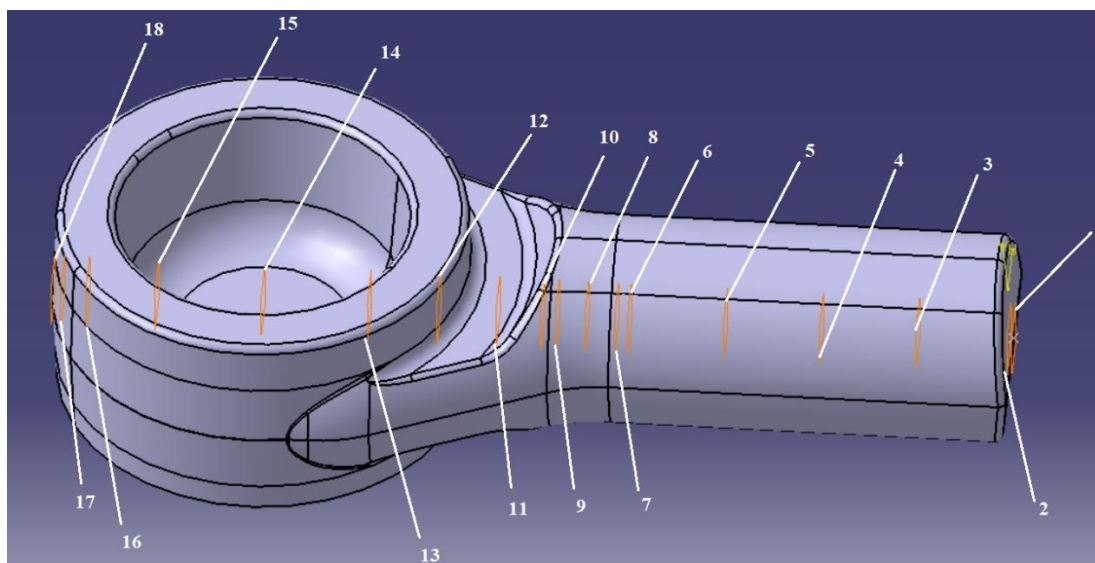


Слика 6.2 CAD модел отковка клипњаче

У компанији Застава Ковачница се ковање овог отковка врши само на ковачким чекићима. Ковање се изводи из више ударца, при чему се такође врши и заокретање цилиндричног припремка (одсечен из шипке) чиме се постиже преобликовање у гравури за претходно ковање.

Да би се извела успешна упоредна анализа процеса ковања на три различите машине, припремни облик за ковање је заправо редуковани отковак, добијен по методологији ковања отковака прве групе на чекићима, односно друге групе на пресама, описан у претходном поглављу. Конструисање редукованог отковка се врши на основу облика и димензија готовог отковка. Редуковани отковак представља комад правилног кружног попречног пресека који је исте дужине као и задати отковак, при чему је површина попречног пресека једнака збиру површине попречног пресека отковка и венца на одређеном месту.

У програму *CATIA V5* извршена је подела готовог отковка на осамнаест пресека (Слика 6.3). На основу површина попречног пресека у овим пресецима и коришћењем образаца 5,6, и 7 извршен је прорачун и добијени су пречници редукованог отковка на идентичним позицијама пресека.



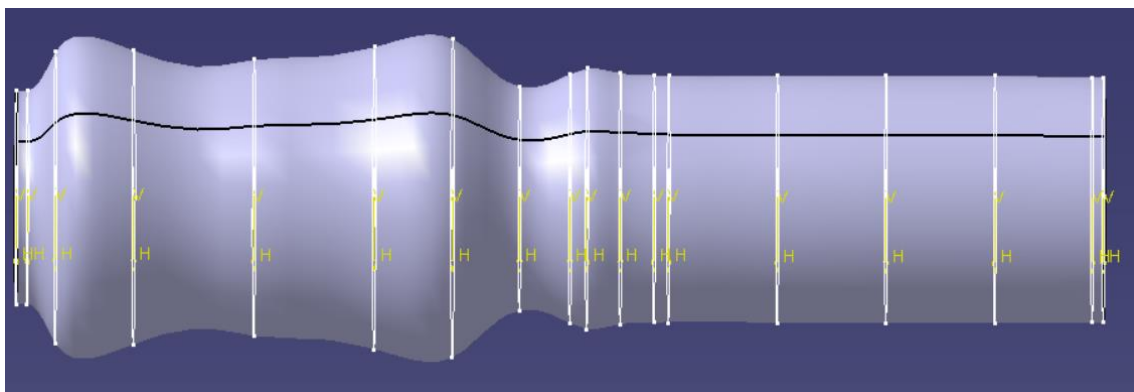
Слика 6.3 Подела готовог отковка на осамнаест пресека

Као резултат овог прорачуна добијени су пречници који су приказани у табели 4.

Табела 4. Величина пречника редукованог отковка

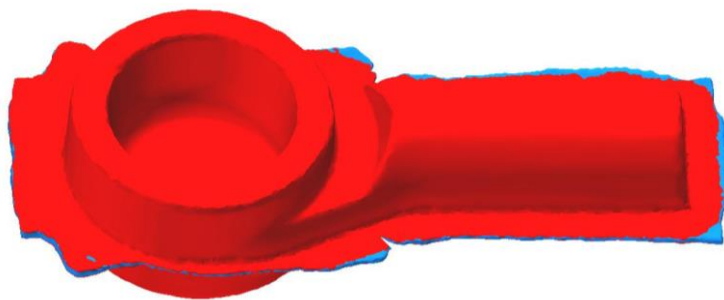
Пресек	Пречник D [mm]	Пресек	Пречник D [mm]
1	43,72	10	44,513
2	43,72	11	40,023
3	44,175	12	56,91
4	44,175	13	53,925
5	44,175	14	49,375
6	44,175	15	52,566
7	44,175	16	52,037
8	44,768	17	38,048
9	46,525	18	38,048

На основу ових резултата измоделиран је редуковани отковак, приказан на слици 6.4.

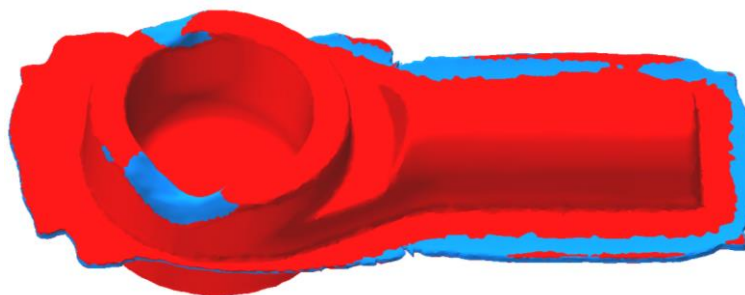


Слика 6.4 Редуковани отковак

Након симулације ковања на ковачком чекићу (слика 6.5) и кривајној преси (слика 6.6) добијени су задовољавајући резултати за ковање на чекићу, док је код ковања на преси дошло до непопуњавања гравуре, како је то приказано на слици 6.6 (плава зона отковка која није у конткату са алатом). Због недостатка материјала у тој зони отковка, извршен је редизајн редукованог отковка, уз повећање пречника у карактеристичним пресецима који припадају плавој зони, односно од дванаесте до осамнаесте равни пресека.

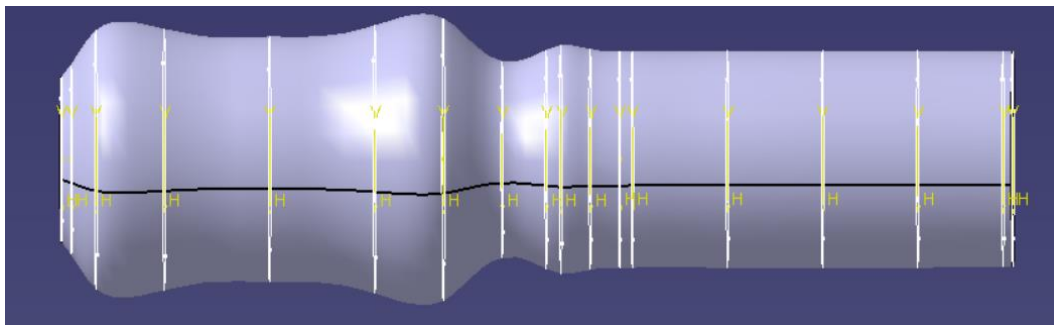


Слика 6.5 Виртуелни отковак добијен из првог редукованог отковка ковањем на ковачком чекићу



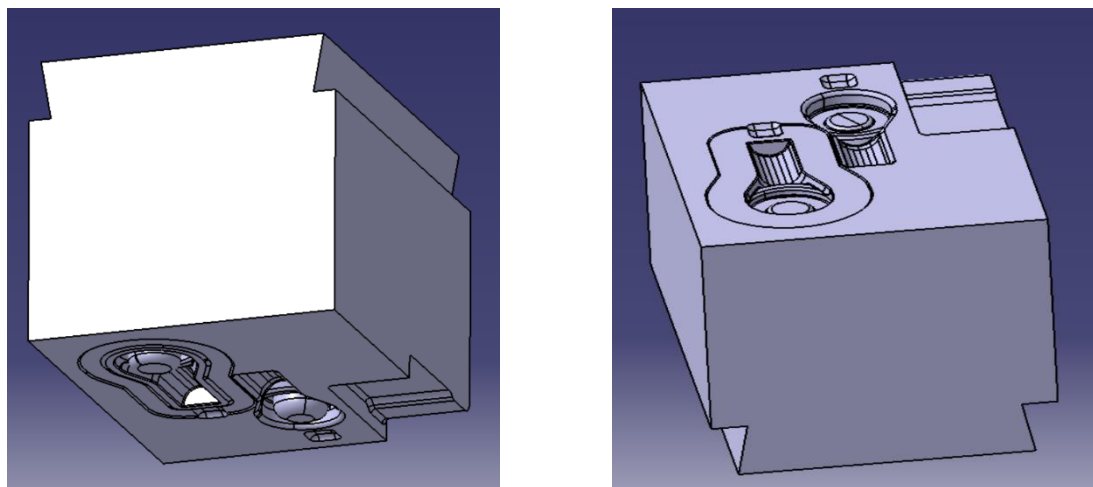
Слика 6.6 Виртуелни отковак добијен из првог редукованог отковка ковањем на кривајној преси

Редизајнирани редуковани отковак (припремак) , приказан на слици 6.7 је коришћен у све три симулације ковања да би резултати били упоредиви. Овакав припремак (редуковани отковак) се може израдити на ковачким ваљцима, као припремна операција ковања.



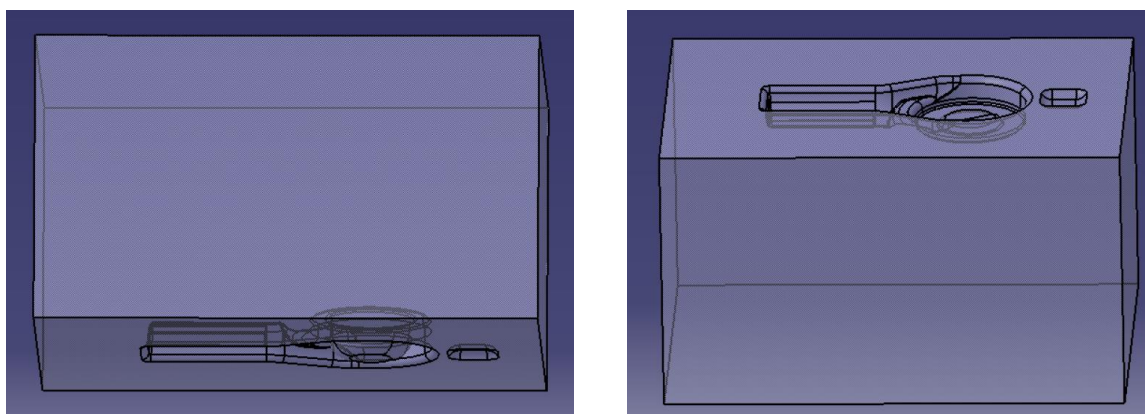
Слика 6.7 Изглед редижајнираног редукованог отковка

Поред CAD модела отковка, из компаније Застава Ковачница добијени су CAD модели алата за ковање на чекићу, приказани на слици 6.8.

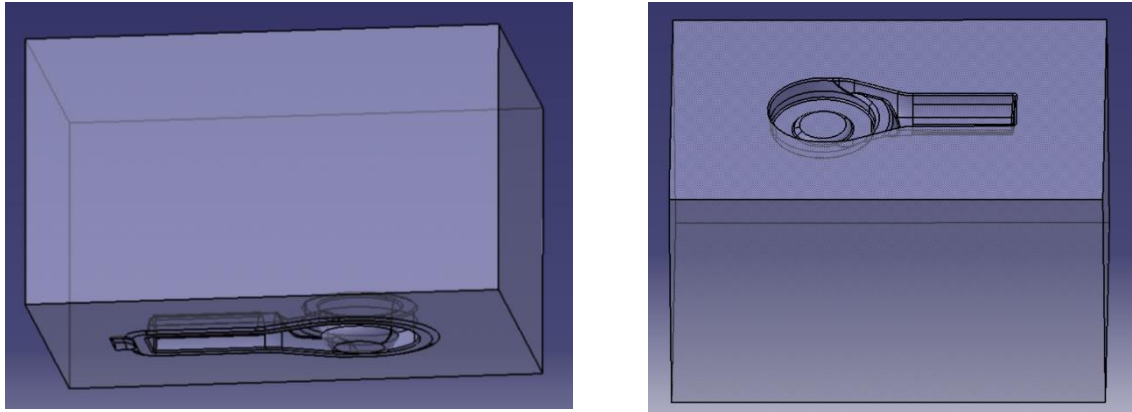


Слика 6.8 Горњи део алата (лево) и доњи део алата (десно) за ковање на чекићу

Будући да се гравуре код ковања на преси налазе у одвојеним уметцима за сваку операцију и да се везивање алата врши без ластиног репа, измоделирани су посебни алати за ковање на преси, као што је приказано на сликама 6.9 и 6.10.



Слика 6.9 Горњи део алата (лево) и доњи део алата (десно) са претходном гравуром



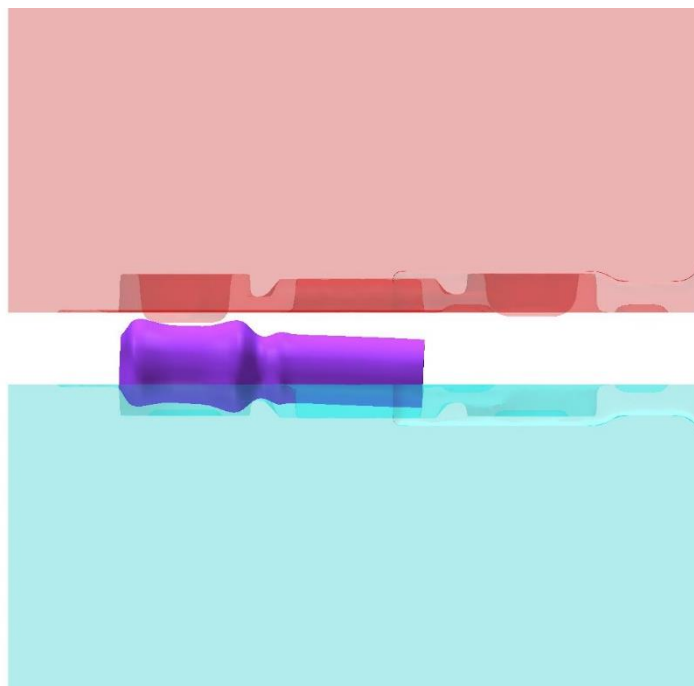
Слика 6.10 Горњи део алата (лево) и доњи део алата (десно) са завршном гравуром

6.1 CAE моделирање процеса ковања на ковачком чекићу

Добијање поузданих резултата у великој мери зависи од улазних параметара које уноси сам корисник програмског пакета *Simufact.forming*, који је коришћен за нумеричку симулацију процеса ковања. Веома је важно да улазни параметри буду што приближнији параметрима у индустријском процесу ковања, како би и резултати симулације били што ближи реалном процесу. На самом почетку рада у овом програму су дефинисани следећи улазни подаци за симулацију ковања:

- Процес: топло ковање
- Нумеричка метода: Метода коначних запремина
- Густина мреже (величина ћелије): 4 мм
- Температура алата : 150 °C
- Температура припремка (редукованог отковка): 1225 °C
- Материјал припремка: 42CrMo4
- Машина : ковачки чекић (максимална енергија: 68646 J, маса: 2.48 t, ефикасност 0,85)
- Фактор трења: 0,7 (дефинисан преко модела константног трења).

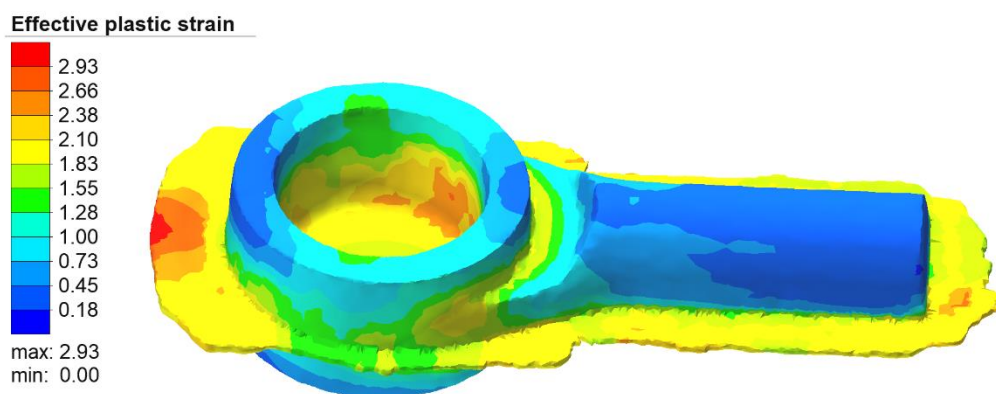
Након уношења улазних података, извршен је увоз геометрије горњег и доњег дела алата као и редукованог отковка. Алат за ковање на чекићу и редуковани отковак су увезени у програм као STL фајлови. Након увоза, врши се смештање редукованог отковка у завршну гравуру доњег дела алата и позиционирање горњег дела алата у односу на доњи део алата (Слика 6.11).



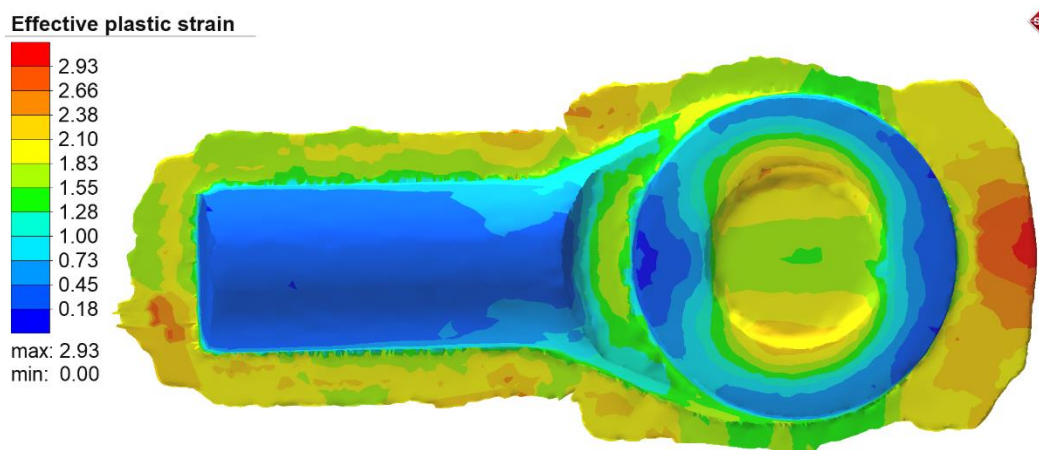
Слика 6.11 Приказ алата за ковање на чекићу и редукованог отковка у ZX равни

Програмски пакет Simufact.forming у постпроцесирању нуди преглед великог броја резултата симулације:

- **Расподела ефективне пластичне деформације** приказана је на сликама 6.12 и 6.13.

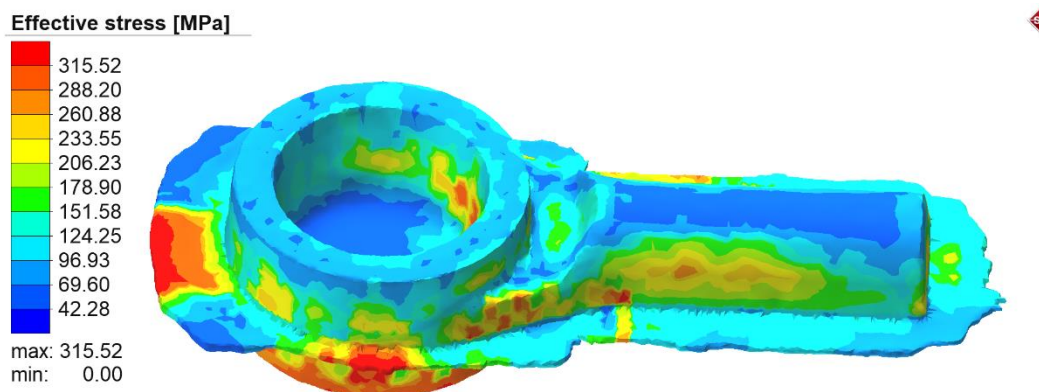


Слика 6.12 Расподела ефективне пластичне деформације (поглед 1)

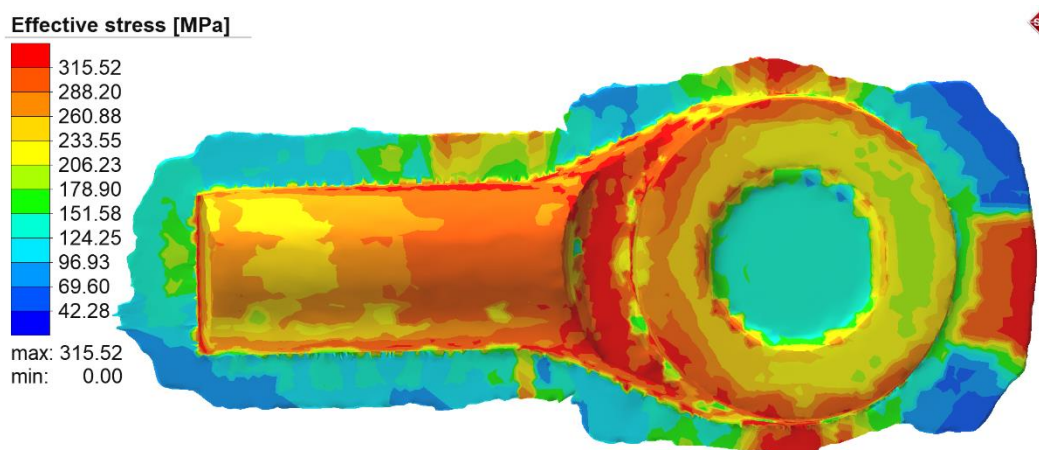


Слика 6.13 Расподела ефективне пластичне деформације (поглед 2)

- Расподела ефективног напона приказана је на сликама 6.14 и 6.15.



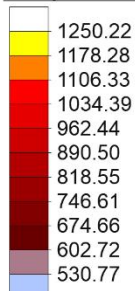
Слика 6.14 Расподела ефективног напона (поглед 1)



Слика 6.15 Расподела ефективног напона (поглед 2)

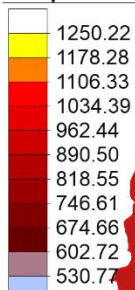
- Температура готовог отковка након ковања приказана је на сликама 6.16 и 6.17, док је контакт алата и готовог отковка приказан на сликама 6.18 и 6.19.

Temperature [°C]



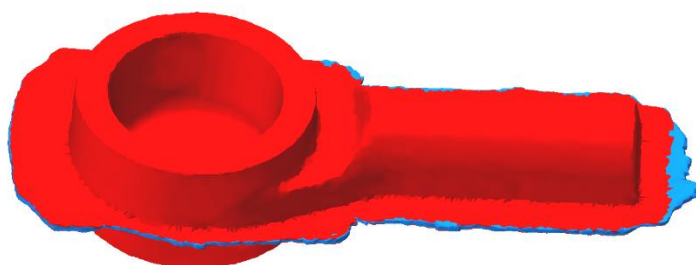
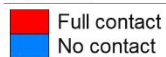
Слика 6.16 Температура готовог отковка (поглед 1)

Temperature [°C]

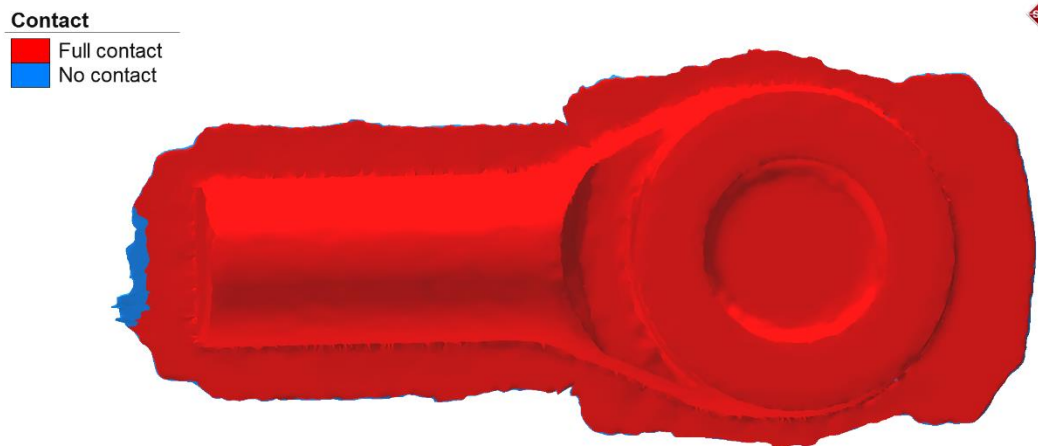


Слика 6.17 Температура готовог отковка (поглед 2)

Contact

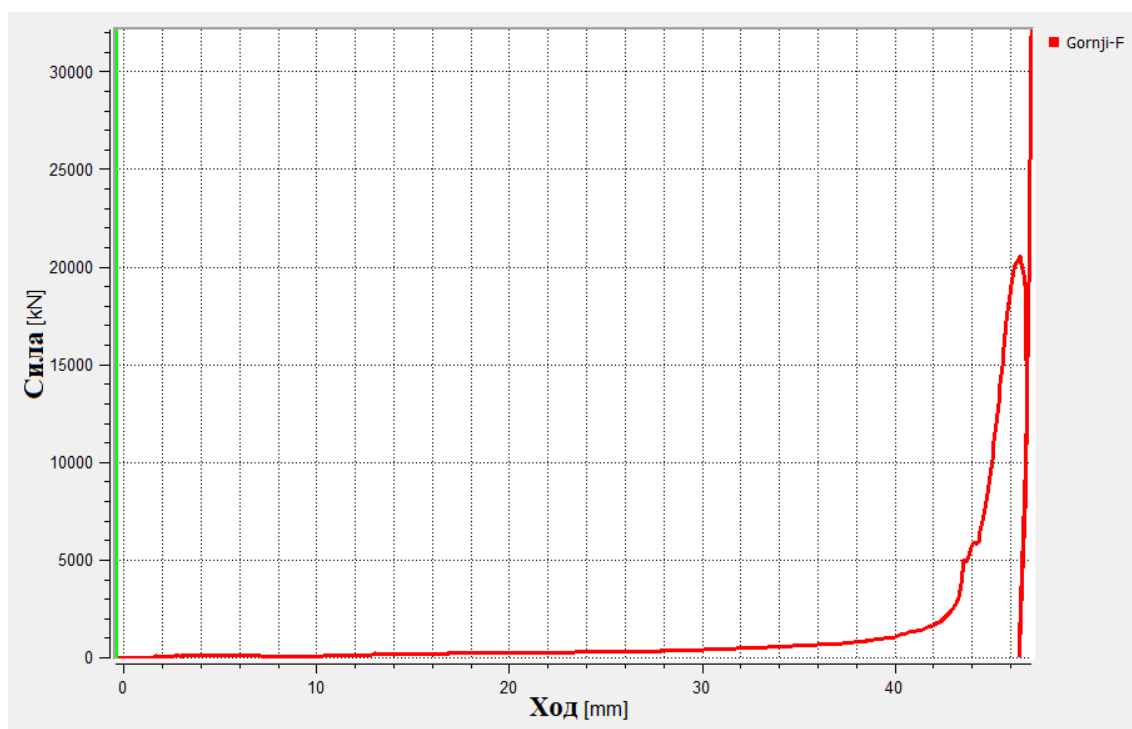


Слика 6.18 Контакт алата и готовог отковка (поглед 1)



Слика 6.19 Контакт алата и готовог отковка (поглед 2)

Поред приказа распореда напона, деформација и температура у отковку, као и међусобног контакта алата и готовог комада за проверу попуњености гравуре и тачности отковка, овај програм у постпроцесирању нуди и приказ дијаграма деформационе силе. На слици 6.20 приказан је дијаграм деформационе силе код ковања на чекићу.



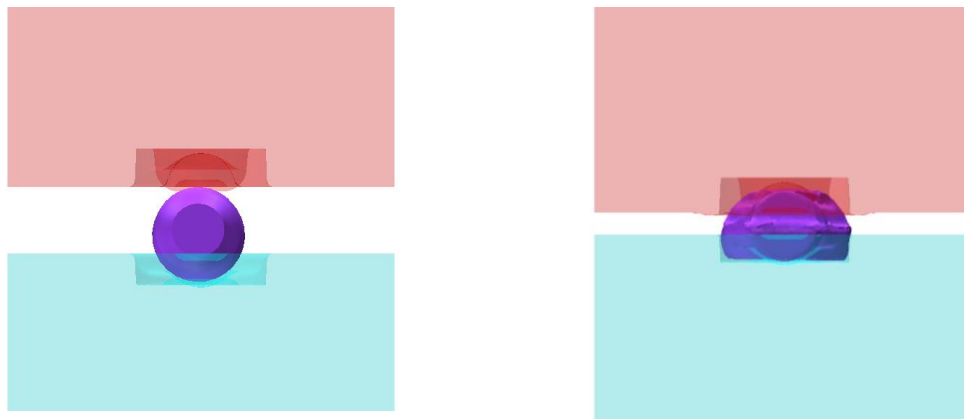
Слика 6.20 Дијаграм деформационе силе код ковања на чекићу

6.2 CAE моделирање процеса ковања на кривајној преси

Код симулације ковања на кривајној ковачкој преси се користе исти улазни параметри за симулацију процеса као и код ковања на ковачком чекићу осим параметара машине. Ковање се у овом примеру изводи на кривајној ковачкој преси, код које је:

- Радијус криваје – $R=300\text{ mm}$
- Дужина кривајне полуге – $L=1200\text{ mm}$
- Број обртаја у минути – 30 o/m

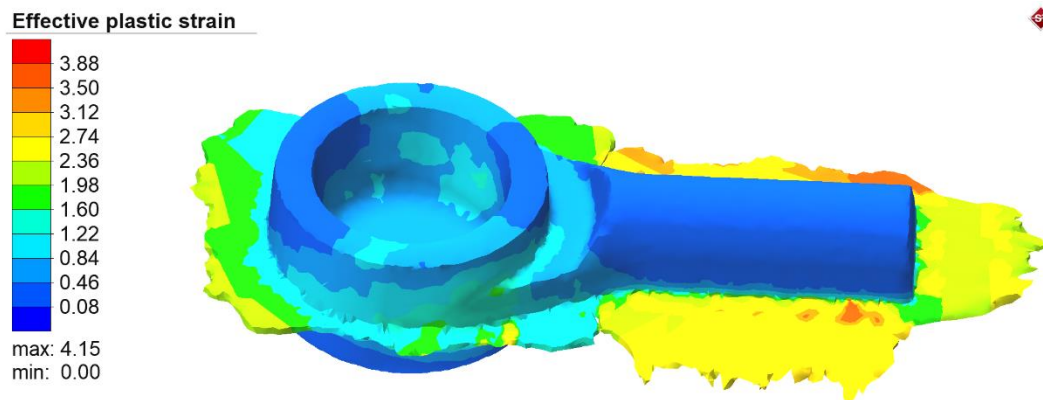
За разлику од симулације ковања на ковачком чекићу код кога се ковање вршило само у завршној гравури, с обзиром да је припремак био редуковани отковак, код симулације ковања на кривајној ковачкој преси због поступности обликовања редуковани отковак је обликован у гравури за претходно па затим у гравури за завршно ковање. Такође је веома битно напоменути да се претходна гравура (слика 6.21 лево) и завршна гравура (слика 6.21 десно) налазе у одвојеним блоковима.



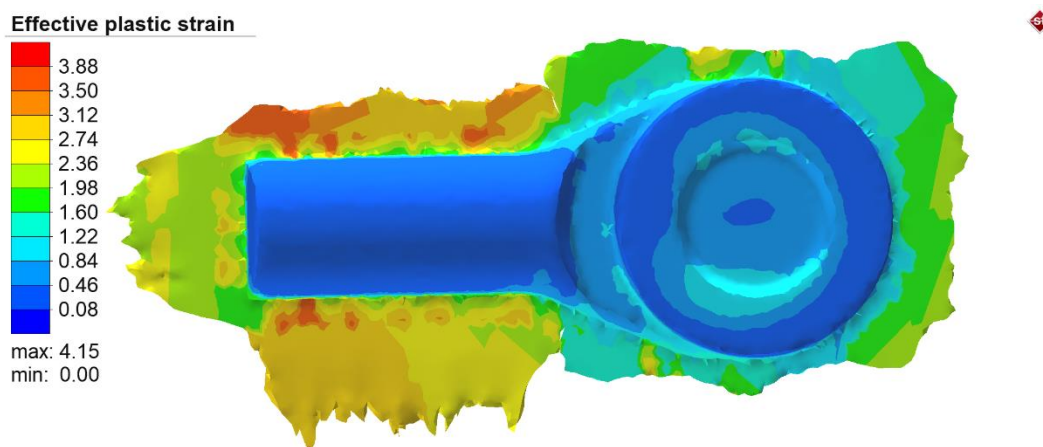
Слика 6.21 Алат са претходном гравуром (лево) и алат са завршном гравуром (десно) за ковање на кривајној преси

Након ковања у претходној и завршној гравури могу се погледати резултати као што су: расподела ефективног напона, расподела пластичне деформације, температура готовог отковка и контакт готовог отковка са алатом.

- **Расподела ефективне пластичне деформације** приказана је на сликама 6.22 и 6.23.

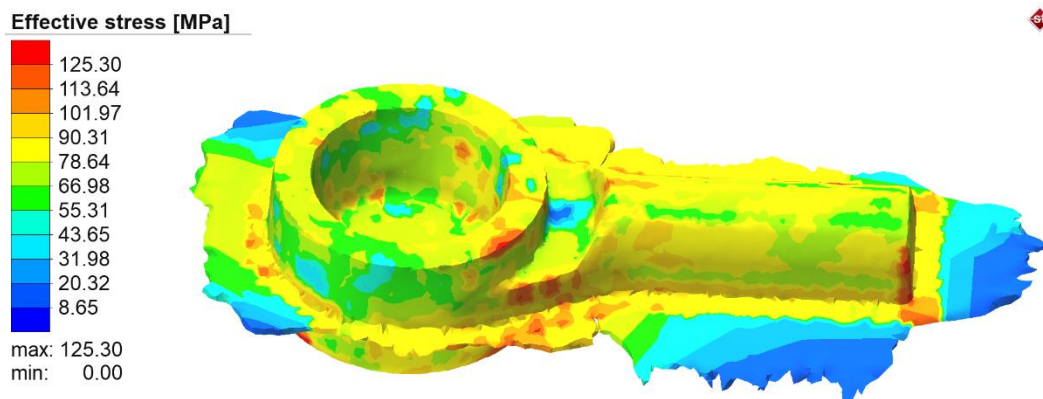


Слика 6.22 Расподела ефективне пластичне деформације (поглед 1)

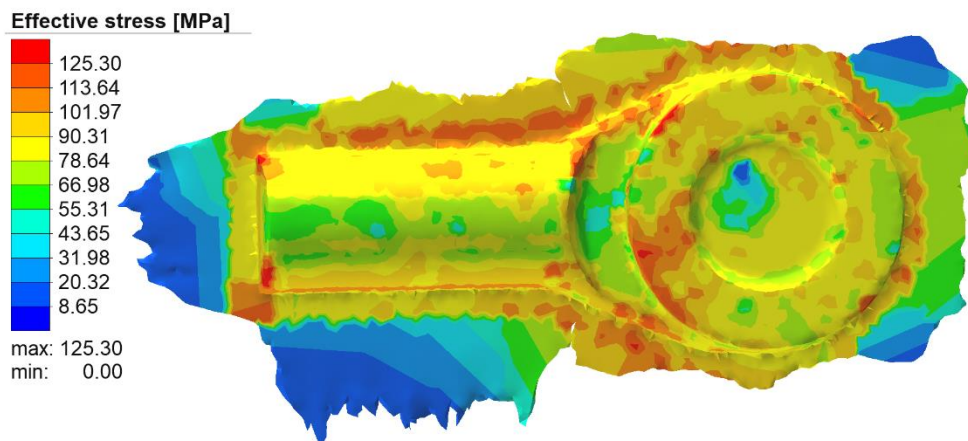


Слика 6.23 Расподела ефективне пластичне деформације (поглед 2)

- Расподела ефективног напона приказана је на сликама 6.24 и 6.25.

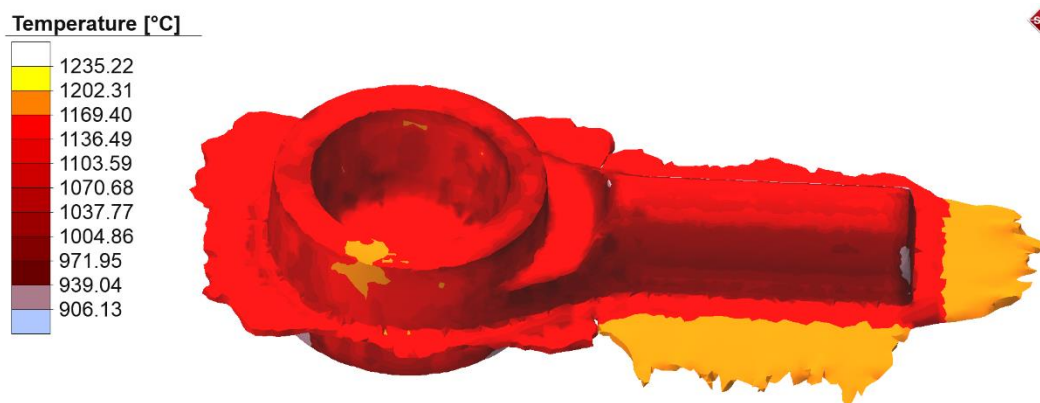


Слика 6.24 Расподела ефективног напона (поглед 1)

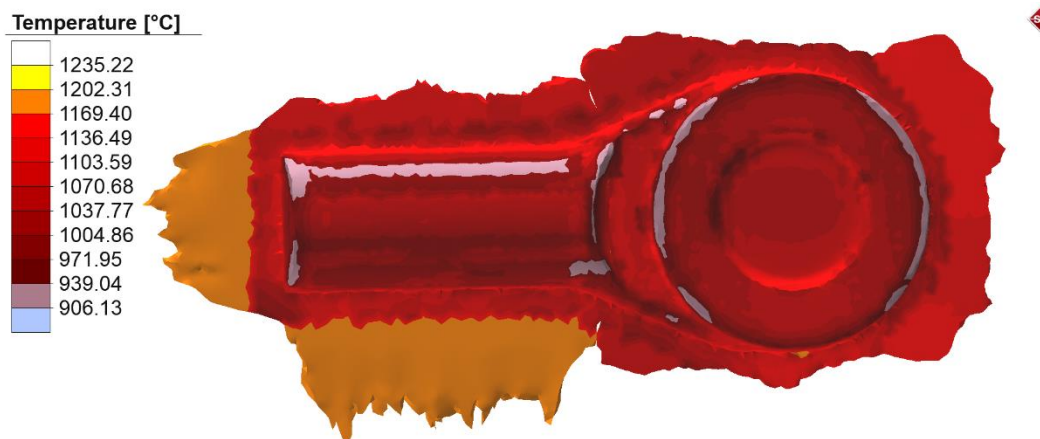


Слика 6.25 Расподела ефективног напона (поглед 2)

- Температура готовог отковка приказана је на сликама 6.26 и 6.27.

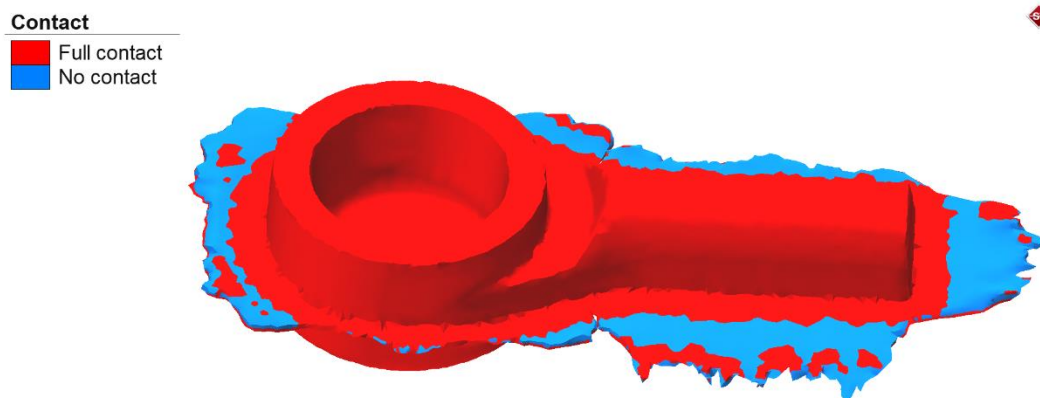


Слика 6.26 Температура готовог отковка (поглед 1)

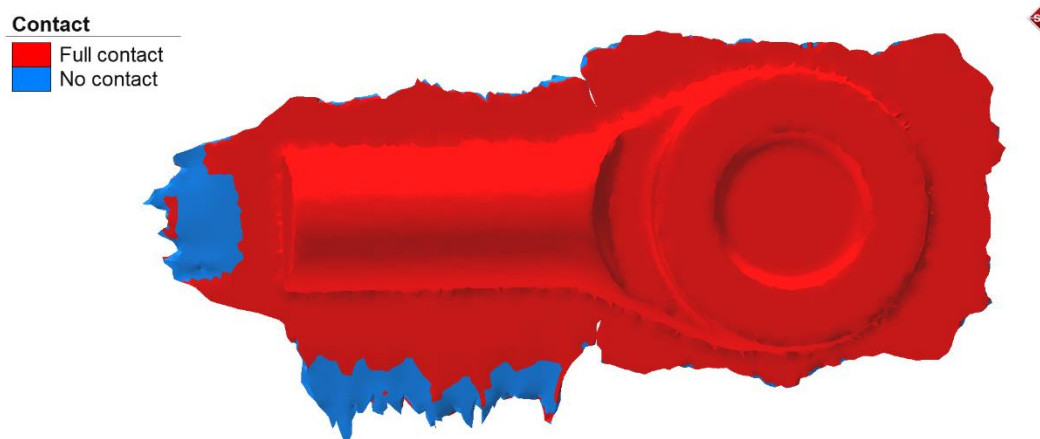


Слика 6.27 Температура готовог отковка (поглед 2)

- Контакт готовог отковка и алата приказан је на сликама 6.28 и 6.29.

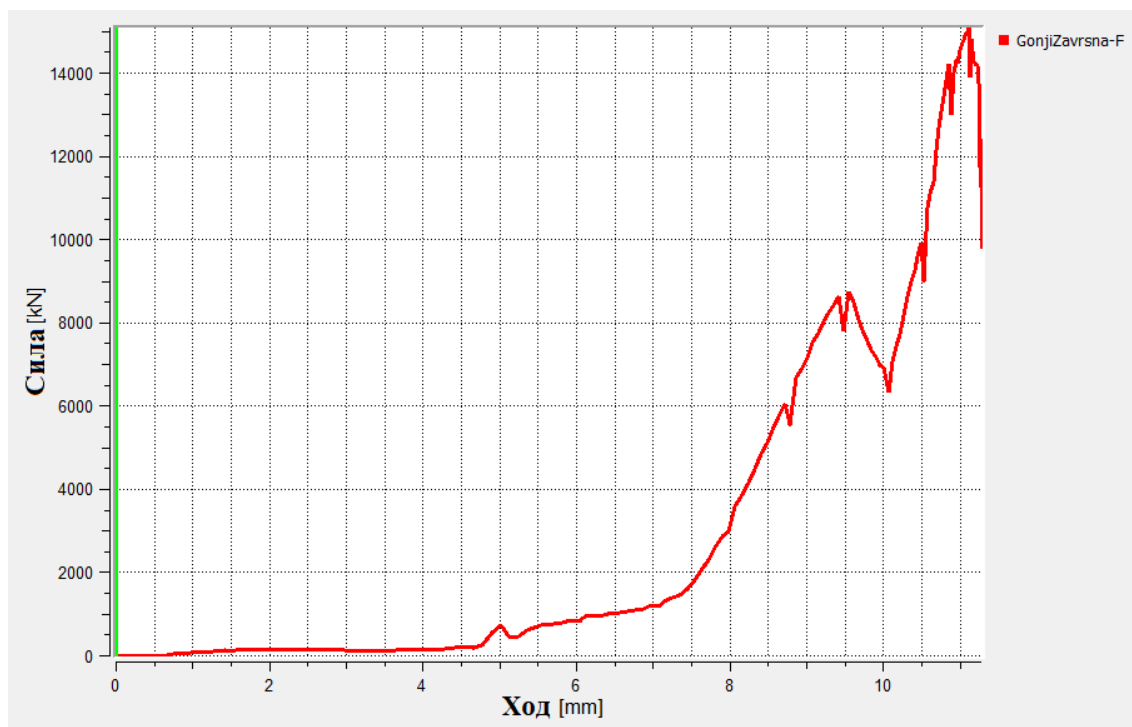


Слика 6.28 Контакт готовог отковка и алата (поглед 1)



Слика 6.29 Контакт готовог отковка и алата (поглед 2)

На слици 6.30 приказан је дијаграм деформационе силе код ковања на кривајној преси.



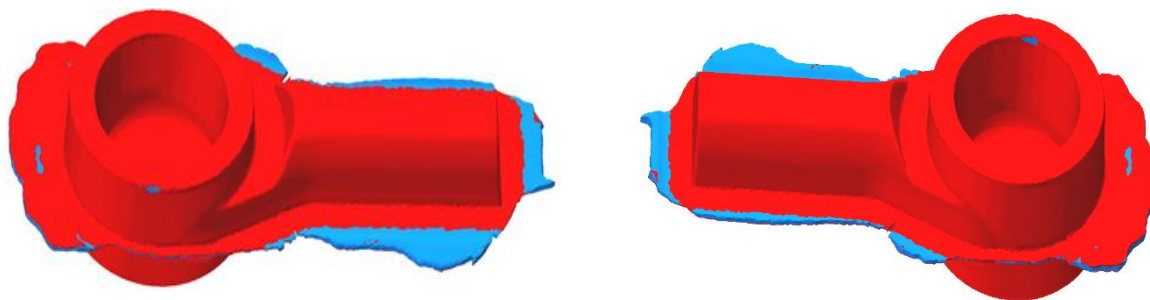
Слика 6.30 Дијаграм деформационе силе код ковања на кривајној преси

6.3 CAE моделирање процеса ковања на фрикционој преси

Код симулације ковања на фрикционој преси се примењују исти улазни параметри и алати као и код симулације ковања на кривајној преси. За потребе ове симулације, примењује се фрикциона преса „Screw Press 500t“ из библиотеке програма *Simufact.forming*. Карактеристике фрикционе пресе су:

- Енергија: 40000 [J]
- Максимална сила деформисања: 340 mm/s
- Ефикасност у току хода [0-1]: 0,9

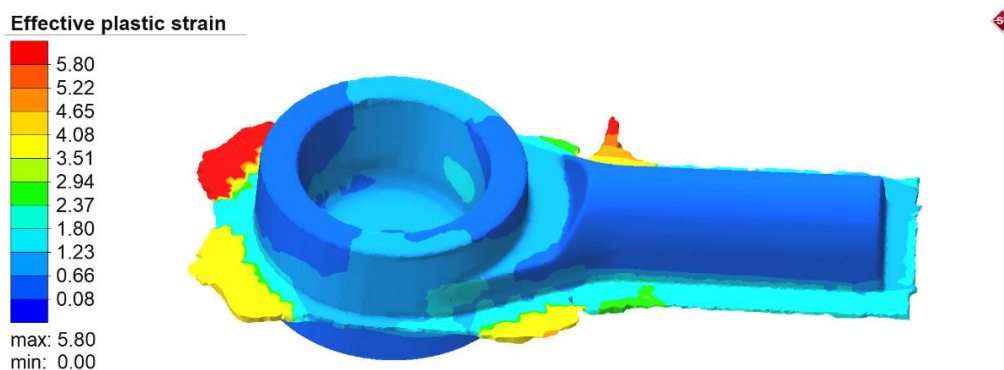
Фрикционе пресе су осетљиве на ексцентрична оптерећења у случају да постоји више гравура у алату. Углавном се користе за једнооперацијско ковање (завршно ковање), док се припрема врши на некој другој машини. Резултат ковања редукованог отковка само у завршној гравури приказан је на слици 6.31. Из ове симулације смо закључили да није могуће извршити ковање само у завршној гравури, због непопуњавања гравуре горњег дела алата (плаве зоне).



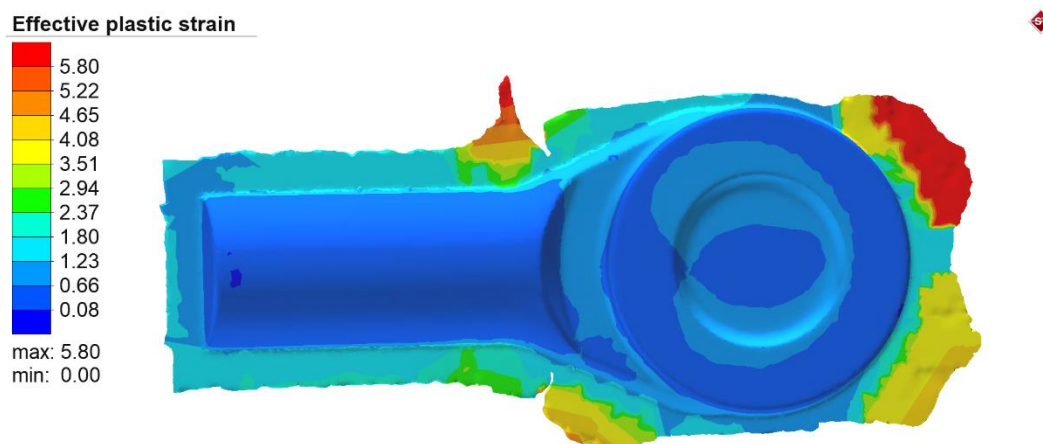
Слика 6.31 Ковање редукованог отковка у завршној гравури на фрикционој преси

Из тог разлога је примењена симулација процеса ковања у две операције: претходно и завршно ковање. Битно је напоменути да се ковање у претходној и завршној гравури на фрикционој преси мора радити на две одвојене машине, односно у овом случају на две фрикционе пресе, што није толико практично. Због упоредивости резултата са ковањем на осталим машинама, ковање је извршено у претходној, па затим у завршној гравури. Резултати симулације су приказани на сликама које следе.

- **Расподела ефективне пластичне деформације** приказана је на сликама 6.32 и 6.33.

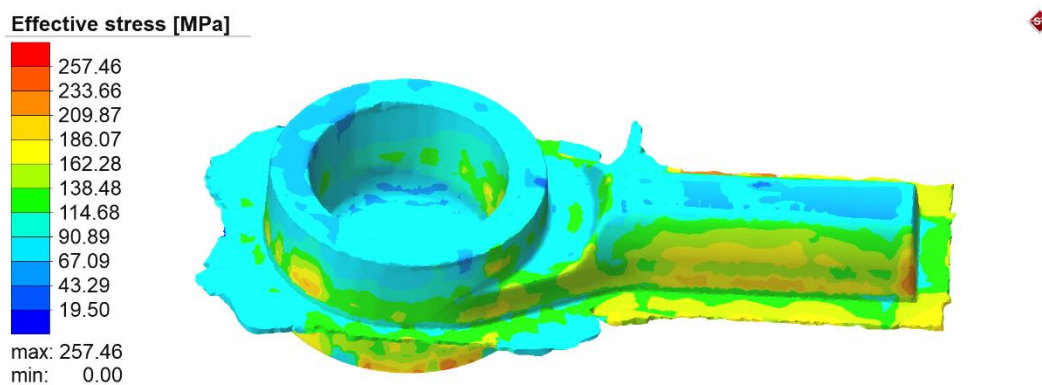


Слика 6.32 Расподела ефективне пластичне деформације (поглед 1)

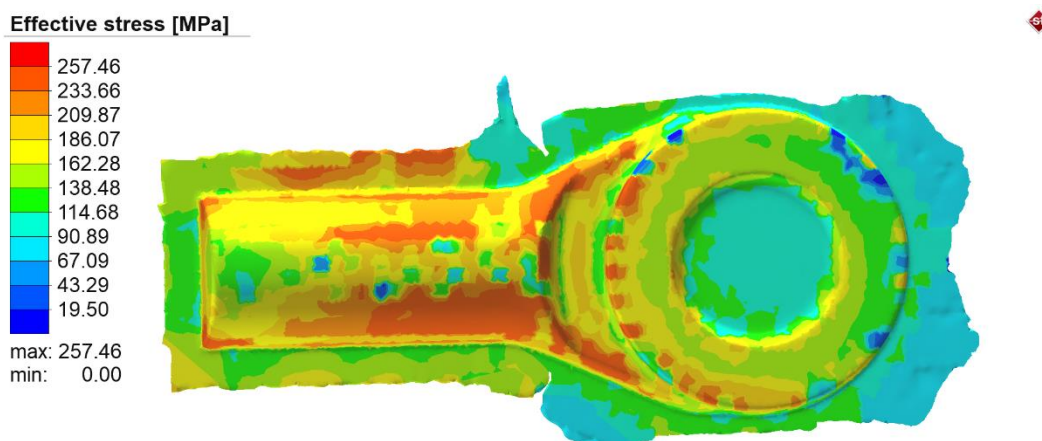


Слика 6.33 Расподела ефективне пластичне деформације (поглед 2)

- Расподела ефективног напона приказана је на сликама 6.34 и 6.35.

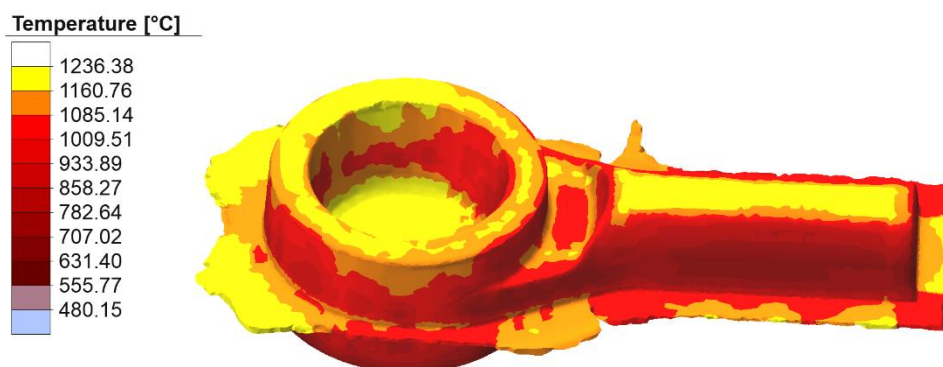


Слика 6.34 Расподела ефективног напона (поглед 1)



Слика 6.35 Расподела ефективног напона (поглед 2)

- Температура готовог отковка је приказана на сликама 6.36 и 6.37

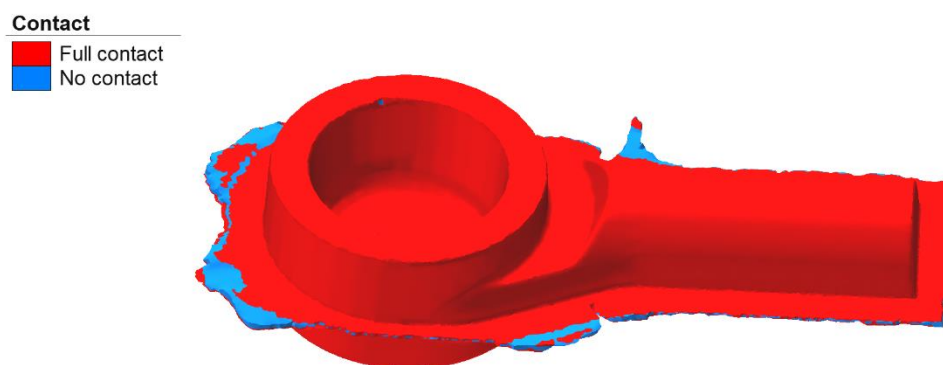


Слика 6.36 Температура готовог отковка (поглед 1)



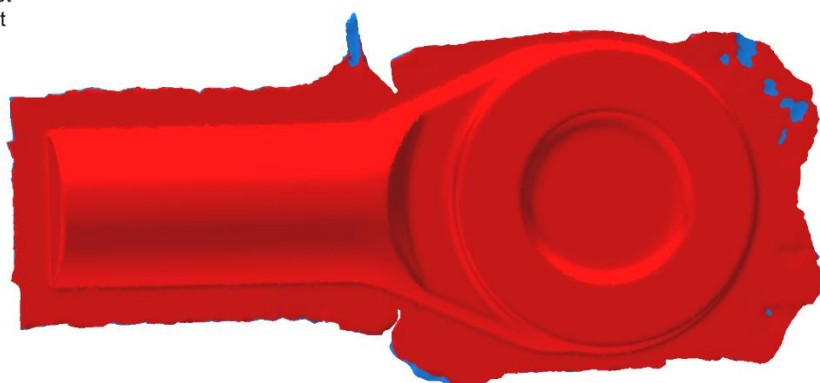
Слика 6.37 Температура готовог отковка (поглед 2)

- Контакт готовог отковка и алата приказан је на сликама 6.38 и 6.39



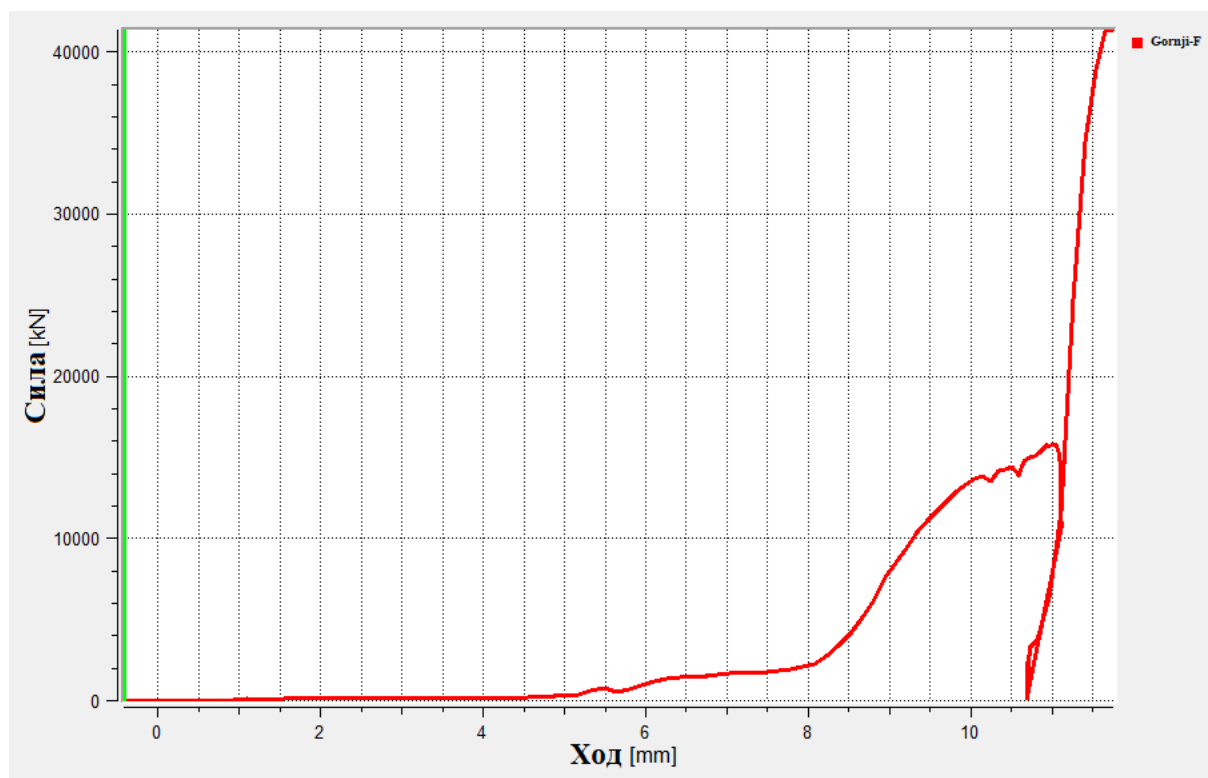
Слика 6.38 Контакт готовог отковка и алата (поглед 1)

Contact
Full contact
No contact



Слика 6.39 Контакт готовог отковка и алата (поглед 2)

На слици 6.40 приказан је дијаграм деформационе силе код ковања на фриксионој преси.



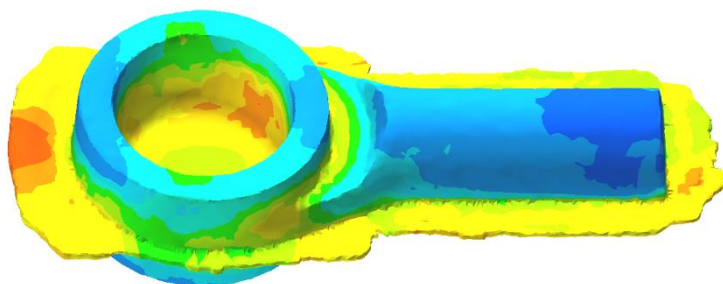
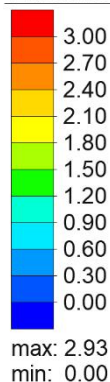
Слика 6.40 Дијаграм деформационе силе код ковања на фриксионој преси

7. Упоредна анализа нумеричких резултата

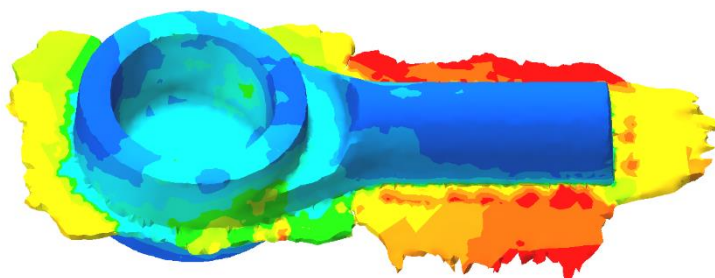
Утицај избора машине за ковање на перформансе отковка је могуће анализирати на основу резултата нумеричких симулација приказаних у претходном поглављу. Због експлоатационих карактеристика отковка, његове микроструктуре, важно је да поље деформација у отковку буде што хомогеније, и да износи максималних деформација буду у границама прихватљивих за одређени материјал.

Може се приметити да код ковања на чекићу (Слика 6.12) највећа вредност ефективне пластичне деформације износи 2.93, код ковања на кривајној преси (Слика 6.22) износи 4.15, а код ковања на фриксионој преси (Слика 6.32) износи 5.80. Међутим, те максималне вредности деформација су у сва три случаја у области венца, који се свакако након ковања опсеца. Значајно је упоредити деформациона поља у самом отковку. За ту сврху су припремљени прикази поља деформација са ревидираном легендом вредности од 0 до 3,00, као што је то приказано на сликама 7.1, 7.2 и 7.3. На свакој од слика, први виртуелни отковак је за ковање на чекићу, други за ковање на кривајној преси, и трећи за ковање на фриксионој преси.

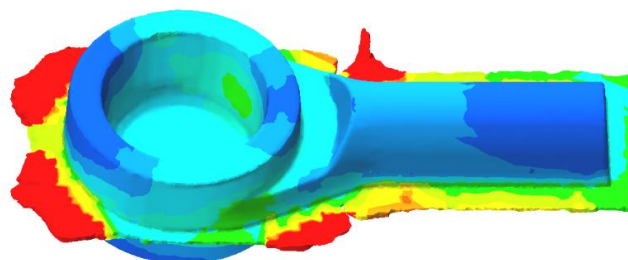
Effective plastic strain



1)



2)

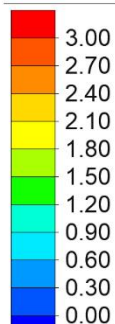


3)

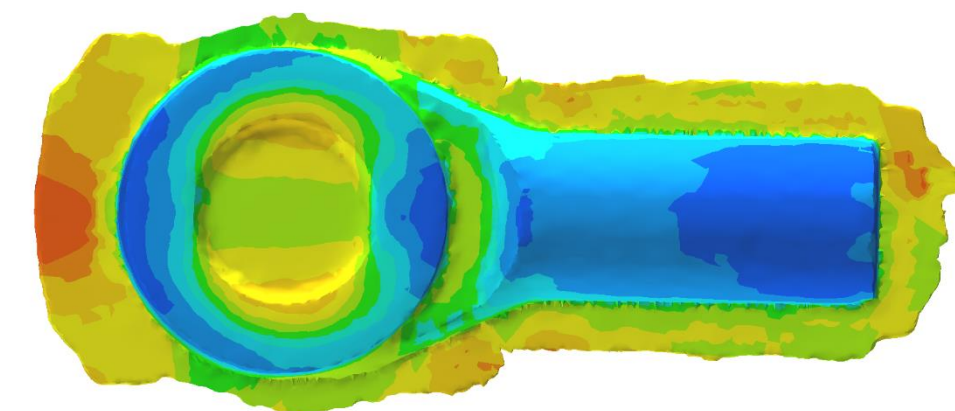
Слика 7.1 Расподела ефективне пластичне деформације (поглед 1) код ковања на ковачком чекићу (1), кривајној преси (2) и фриксионој преси (3)

Поглед 2 приказан је на слици 7.2 где се на основу легенде може уочити да је ефективна пластична деформација највећа код ковања на чекићу и да је код ковања на чекићу најнехомогенија ефективна пластична деформација.

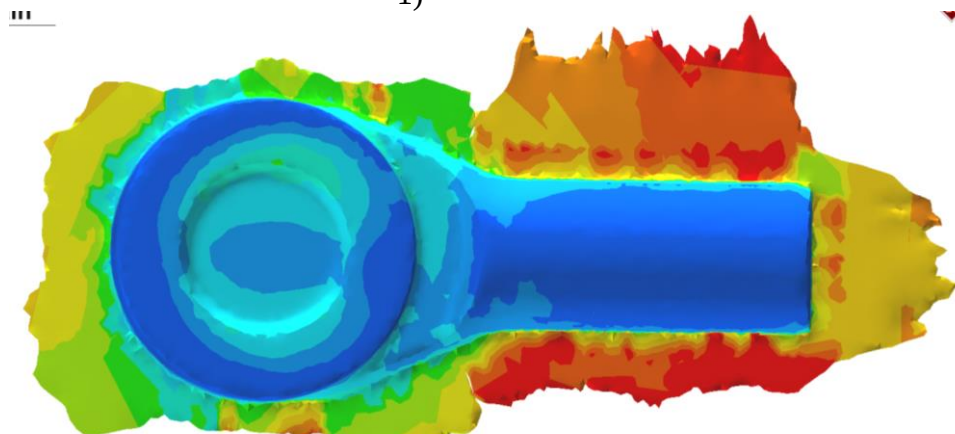
Effective plastic strain



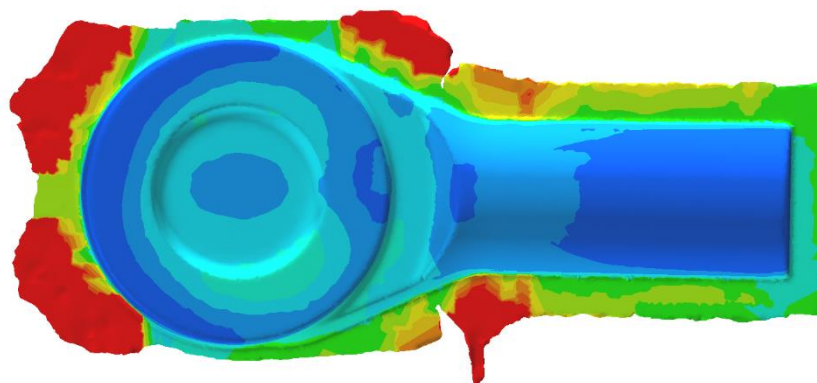
max: 2.93
min: 0.00



1)



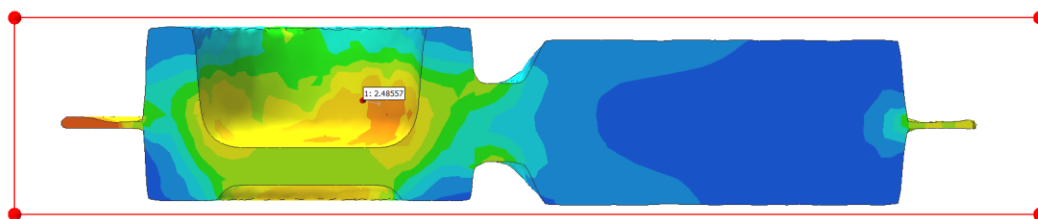
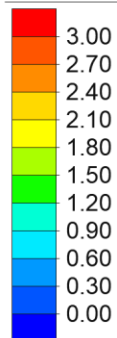
2)



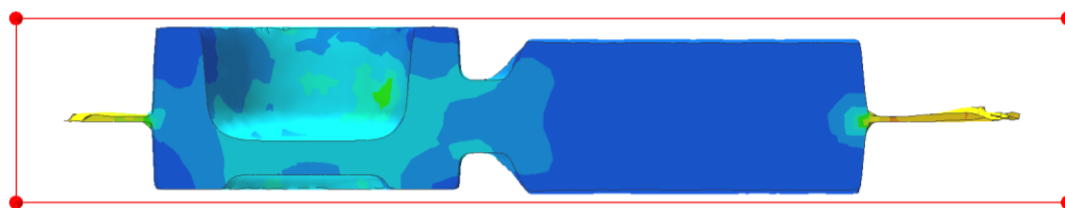
3)

Слика 7.2 Расподела ефективне пластичне деформације (поглед 2) код ковања на ковачком чекићу (1), кривајној преси (2) и фриксионој преси (3)

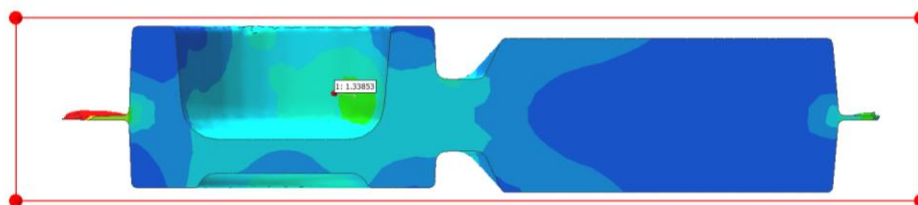
Effective plastic strain



1)



2)

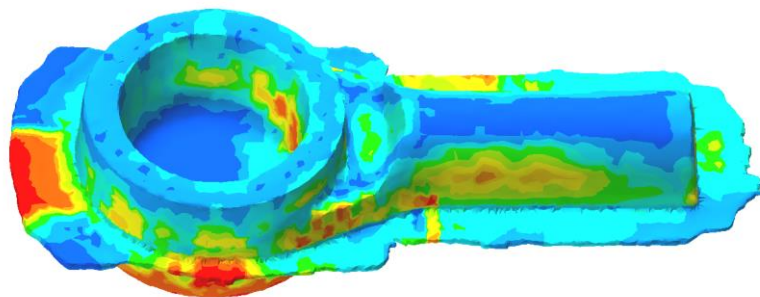
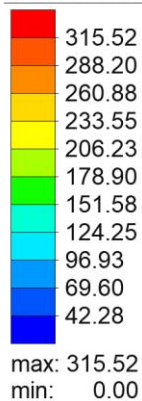


3)

Слика 7.3 Расподела ефективне пластичне деформације (пресек ZX) код ковања на ковачком чекићу (1), кривајној преси (2) и фрикционој преси (3).

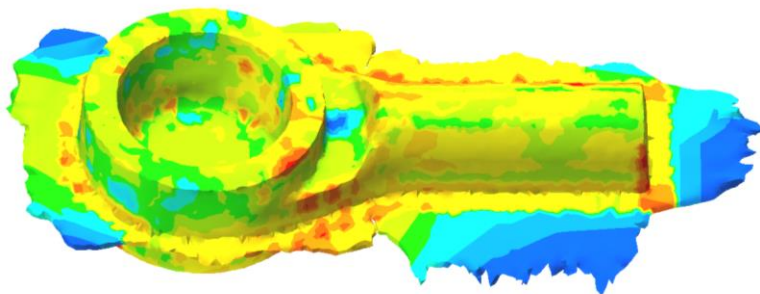
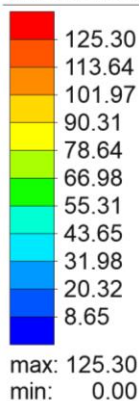
На сликама 7.4, 7.5 и 7.6 приказана је расподела ефективног напона код ковања на ковачком чекићу, кривајној преси и фриксионој преси.

Effective stress [MPa]



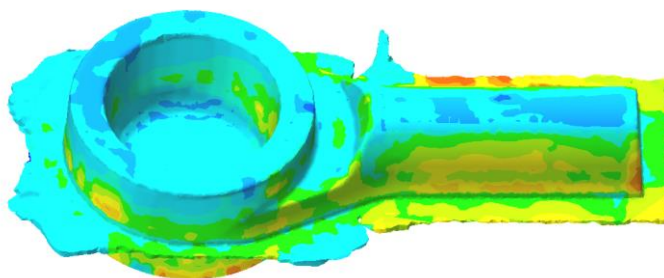
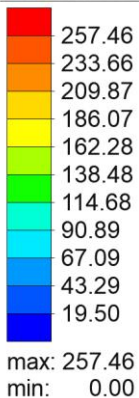
1)

Effective stress [MPa]



2)

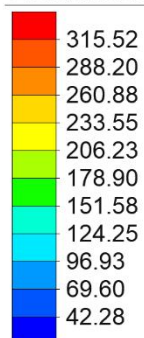
Effective stress [MPa]



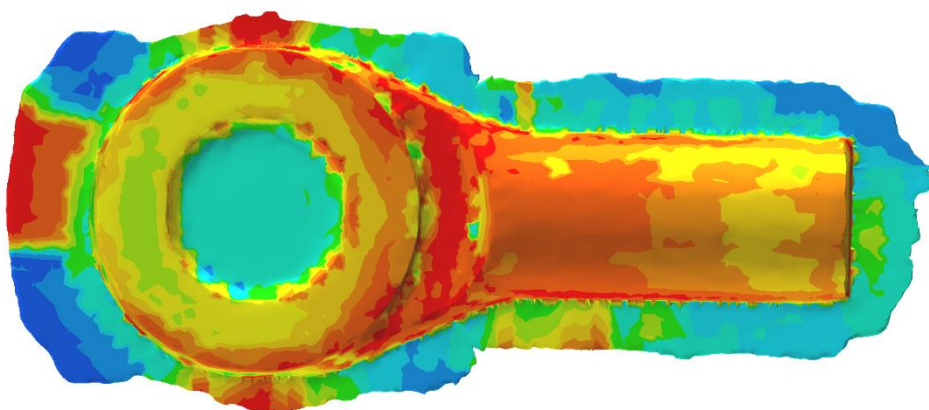
3)

Слика 7.4 Расподела ефективног напона (поглед 1) код ковања на ковачком чекићу (1), кривајној преси (2) и фриксионој преси (3)

Effective stress [MPa]

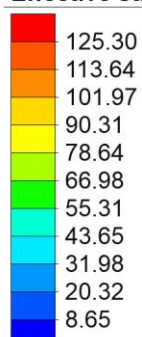


max: 315.52
min: 0.00

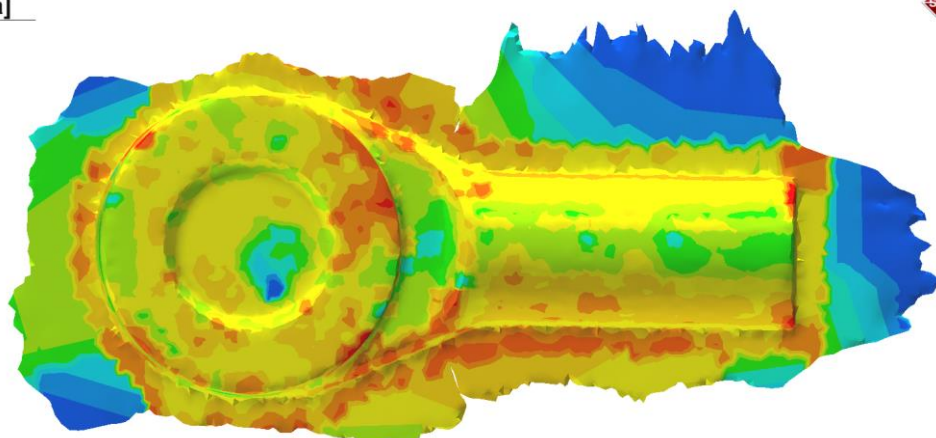


1)

Effective stress [MPa]

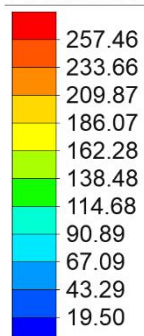


max: 125.30
min: 0.00

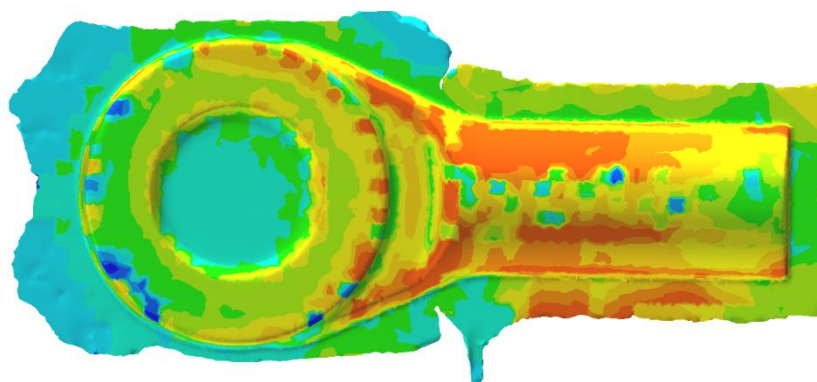


2)

Effective stress [MPa]



max: 257.46
min: 0.00

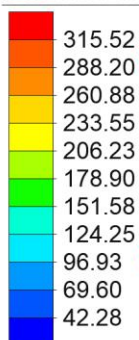


3)

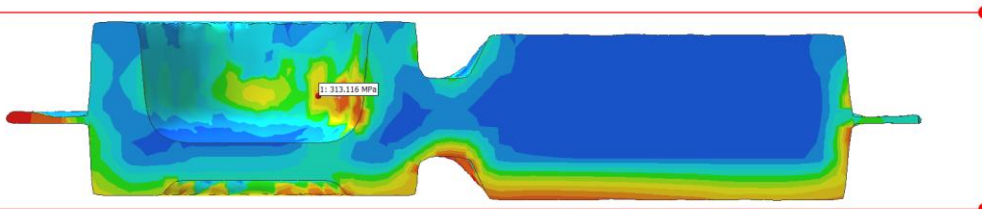
Слика 7.5 Расподела ефективног напона (поглед 2) код ковања на ковачком чекићу (1), кривајној преси (2) и фриксионој преси (3)

На слици 7.6 приказана је расподела ефективног напона у ZX пресеку. На основу ових резултата можемо уочити да је највећи ефективни напон у унутрашњем делу отковка и он износи: код чекића (313,116 МПа), код кривајне пресе (115,01 МПа) и код фрикционе пресе (165,227 МПа). Овакве упоредне вредности напона у отковку су и очекиване, јер су брзине деформисања највеће код чекића, затим код фрикционе пресе, а најмање код кривајне пресе. Напон у материјалу отковка зависи од брзине деформисања јер је изражено вископластично понашање материјала.

Effective stress [MPa]

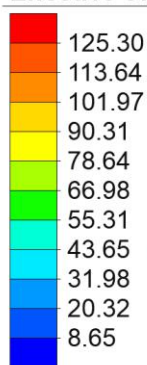


max: 315.52
min: 0.00

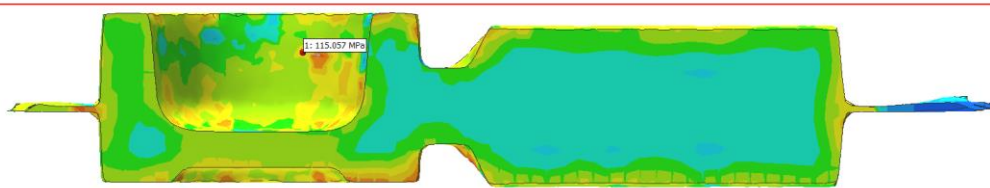


1)

Effective stress [MPa]

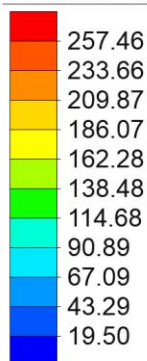


max: 125.30
min: 0.00

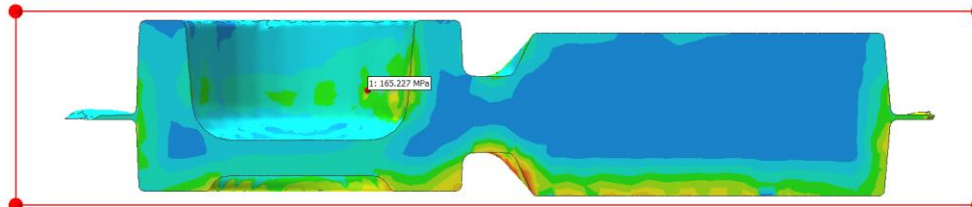


2)

Effective stress [MPa]



max: 257.46
min: 0.00

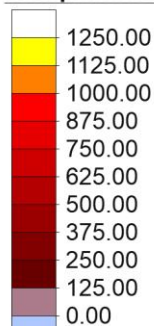


3)

Слика 7.6 Расподела ефективног напона (пресек ZX) код ковања на ковачком чекићу (1), кривајној преси (2) и фрикционој преси (3)

На сликама 7.7, и 7.8 приказане су температуре у отковку на крају процеса ковања на ковачком чекићу, кривајној преси и фрикционој преси. Евидентан је поново утицај брзине деформисања за расподелу температура у отковку, па су највеће температуре остварене код ковања на чекићу, јер процес најкраће траје а и ударна оптерећења су највећа, па долази до стварања додатне топлоте због деформисања. На кривајној преси су брзине ковања знатно мање па долази до захлађивања материјала у конткату са алатом и околином због већег времена за процес ковања. За ковање на фрикционој преси дистрибуција температура је слична као код ковања на чекићу.

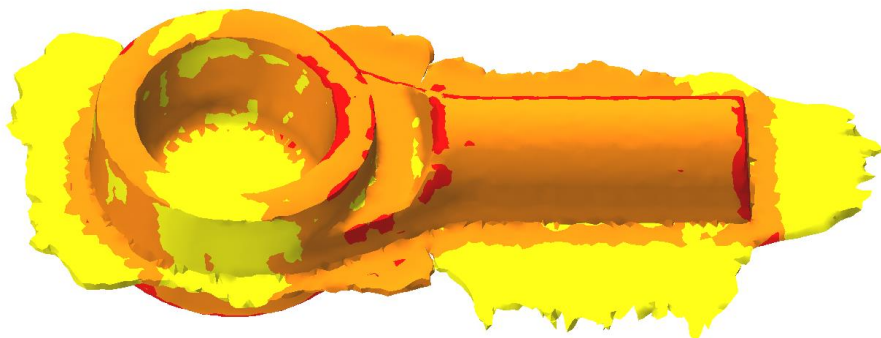
Temperature [°C]



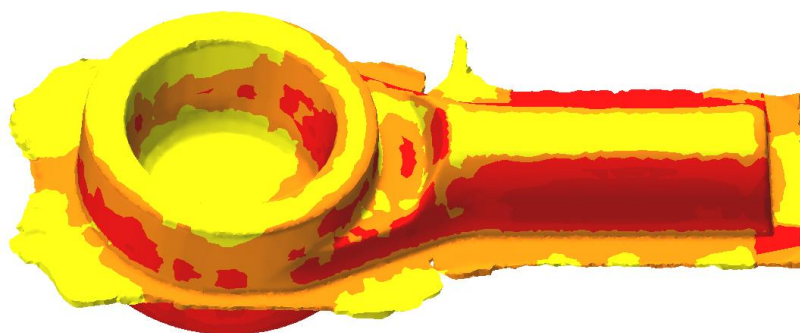
max: 1250.22
min: 530.77



1)

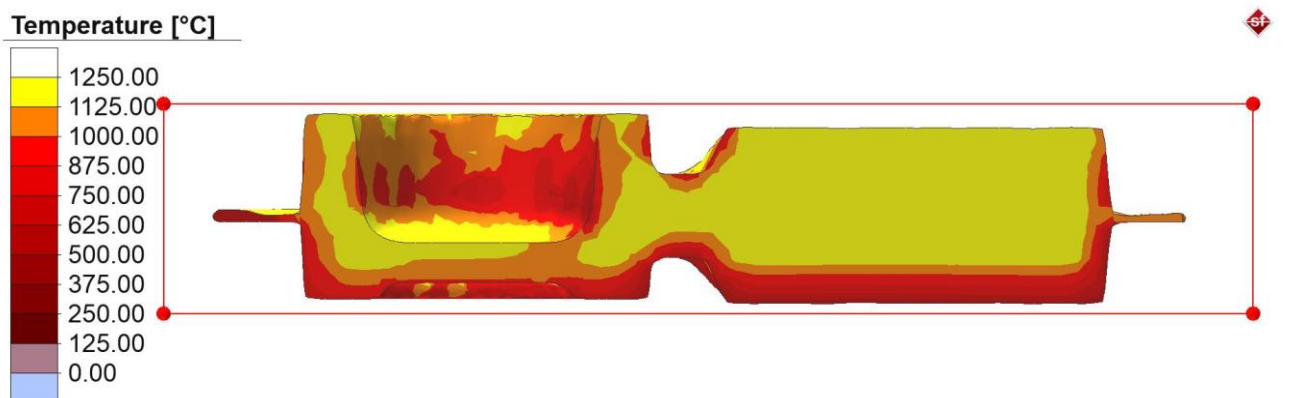


2)

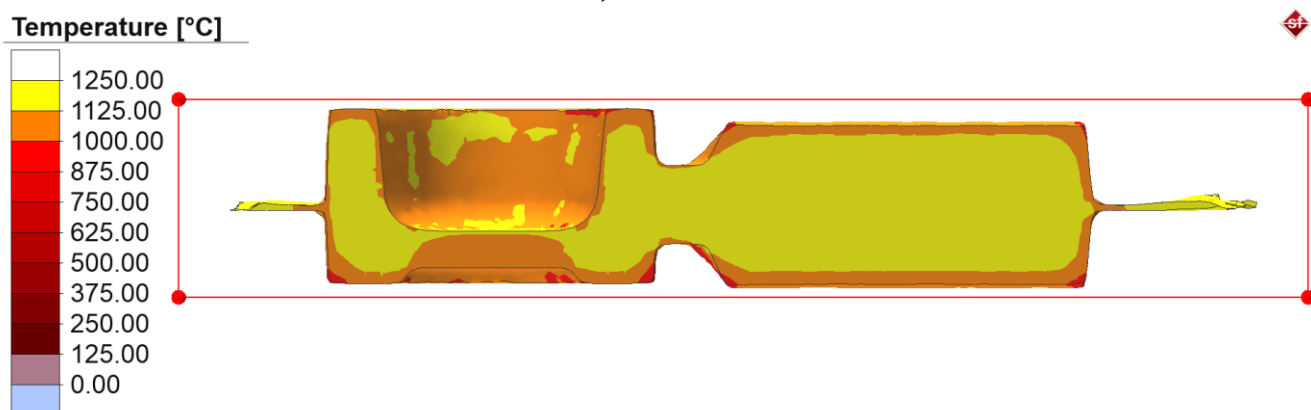


3)

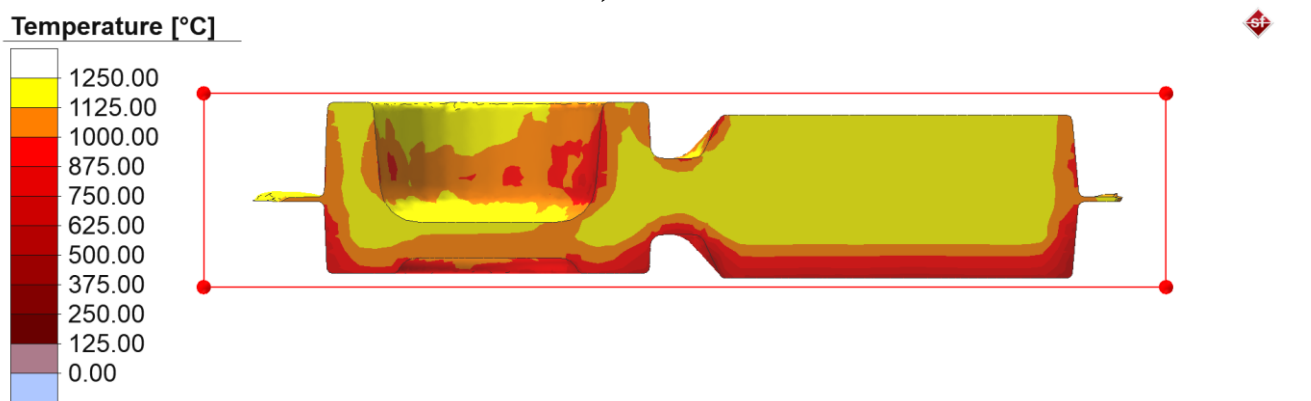
Слика 7.7 Температура готовог отковка (поглед 1) код ковања на ковачком чекићу (1), кривајној преси (2) и фрикционој преси (3)



1)



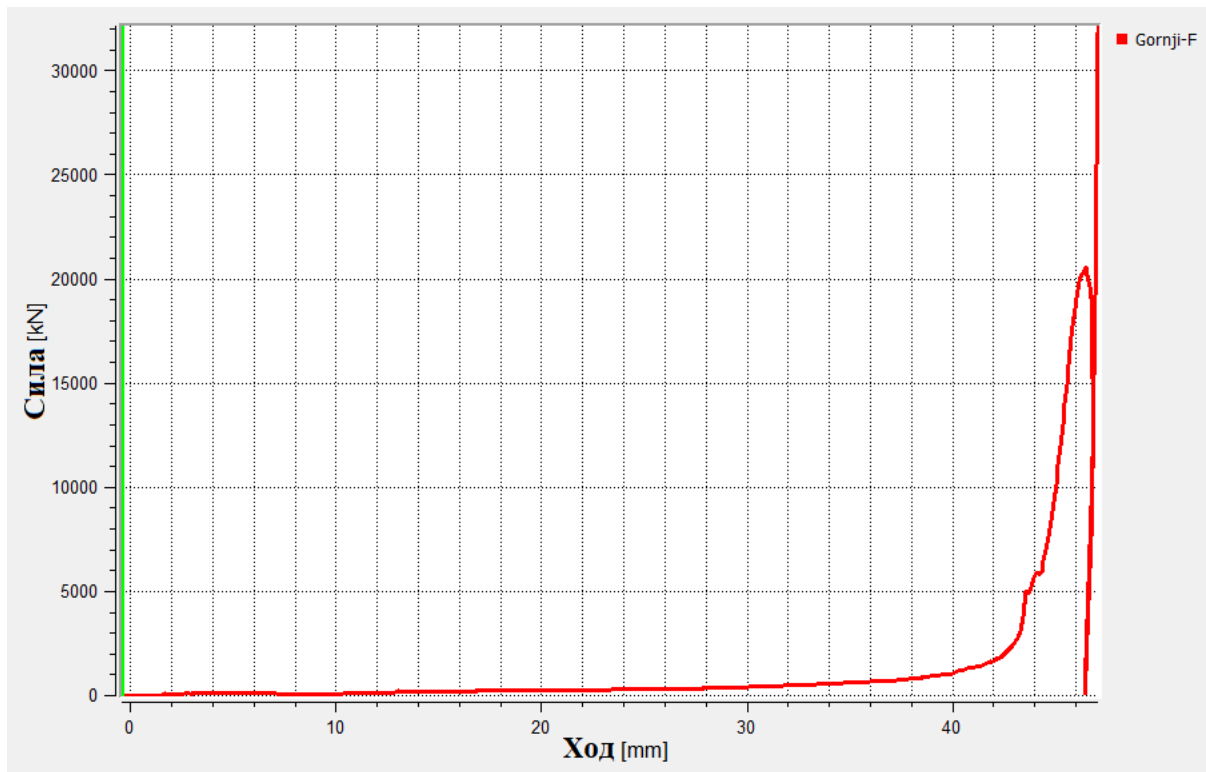
2)



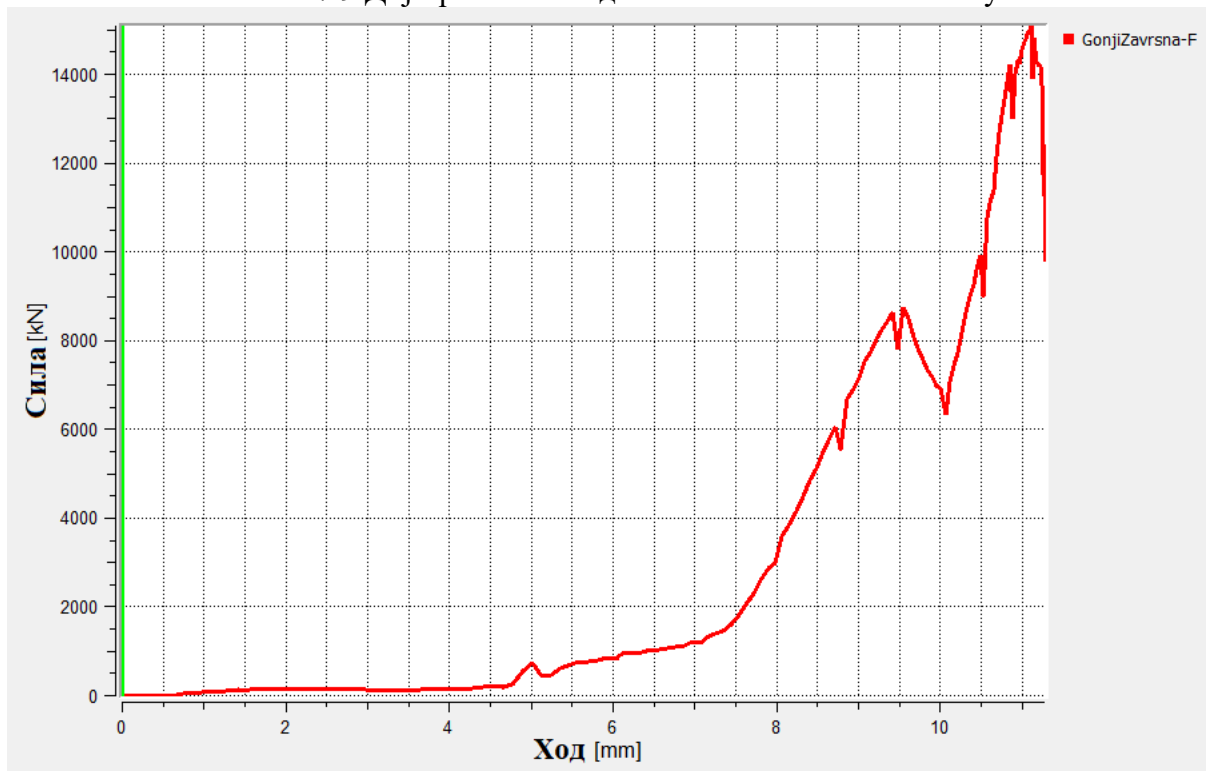
3)

Слика 7.8 Температура готовог отковка (пресек ZX) код ковања на ковачком чекићу (1), кривајној преси (2) и фриксионој преси (3)

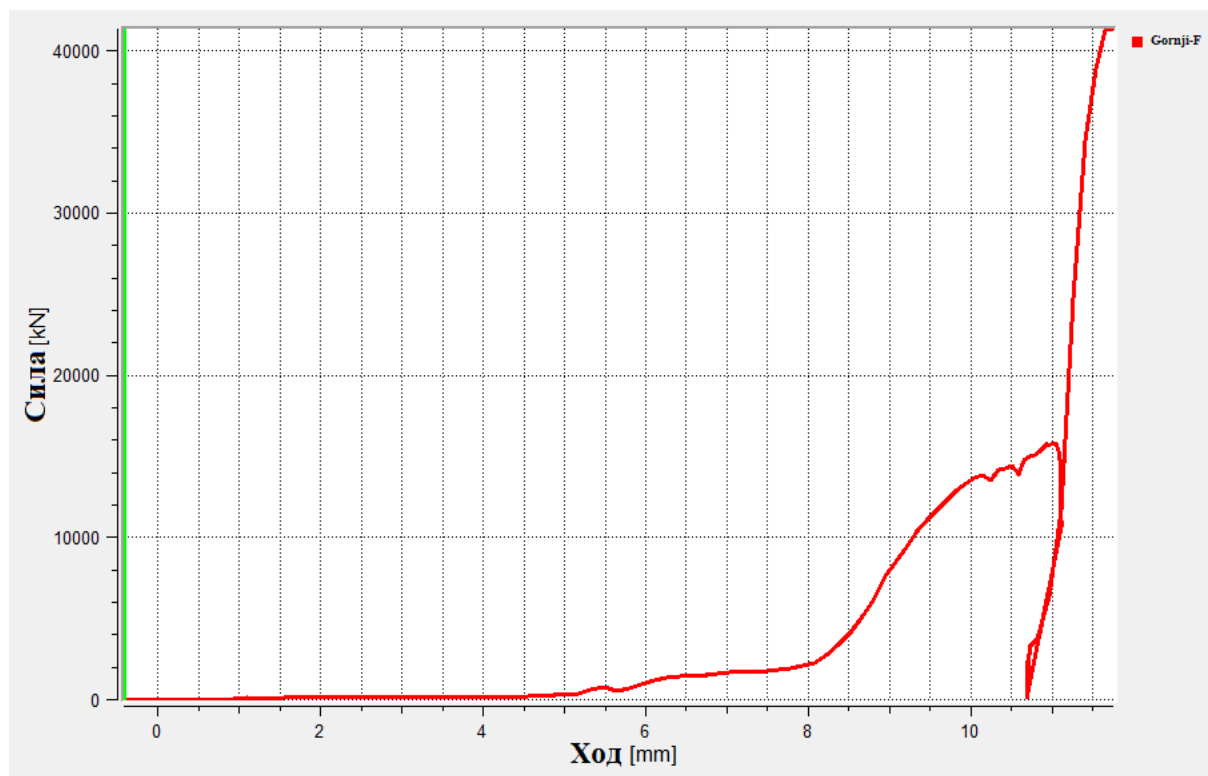
На сликама 7.9, 7.10 и 7.11 приказани су дијаграми сила код ковања на ковачком чекићу, кривајној преси и фрикционој преси. На основу ова три дијаграма можемо закључити да је највећа сила потребна код ковања на фрикционој преси ($\approx 42\,000\text{ kN}$), затим код ковања на ковачком чекићу ($\approx 32\,000\text{ kN}$), док нам је најмања сила потребна код ковања на кривајној преси ($\approx 15\,000\text{ kN}$).



Слика 7.9 Дијаграм силе код ковања на ковачком чекићу



Слика 7.10 Дијаграм силе код ковања на кривајној преси



Слика 7.11 Дијаграм силе код ковања на фрикционој преси

8. Закључак

Циљ рада је да се уз помоћ софтвера *Simufact.forming* изврши анализа утицаја машине за обраду деформисањем на перформансе отковка и процес ковања. Рад је подељен на теоријски и практични део. У теоријском делу су приказане спецификације машина, подела гравура, како се врши прорачун редукованог отковка. Практични део рада се састоји из прорачуна и моделирања редукованог отковка, моделирања алата за ковање на преси, нумеричке симулације процеса ковања отковка клипњаче на три изабране ковачке машине (чекић, кривајна преса, фриксиона преса), као и анализе добијених резултата.

Резултати нумеричких симулација указују на значајан утицај избора машине на процес ковања, износ деформационе силе, али и на перформансе отковка. Највеће деформације у отковку су остварене при ковању на чекићу, због великих брзина деформације и ударних оптерећења. Хомогенија дистрибуција деформација је добијена при ковању на кривајној преси, али је био и евидентан проблем попуњавања гравуре алата за прву варијанту редукованог отковка. Што се тиче напонских поља у отковку, највећи ефективни напони су остварени на машинама које раде са већим брзинама деформисања, и то на чекићу, па на фриксионој преси, а најмањи на кривајној преси. Расподеле температура у отковку су у сличним односима за ове три машине, највеће су температуре при ковању на чекићу, а најмање при ковању на кривајној преси.

Оваква разматрања су битна при избору машине за ковање, а анализа процеса ковања применом нумеричких симулација и методе коначних запремина пружа могућност инжењерима да имају увид у комплетан процес ковања и особине отковка.

Применом рачунарских алата као што је и приказано у раду, можемо доћи до одређених резултата пре него што дође до саме производње. Постиге се смањење неуспелих покушаја, уштеда времена и финансијских средстава. Применом програмске платформе *Simufact.forming* омогућава се провера алата и провера изводљивости идејног решења пре него што дође до саме производње.

Овом симулацијом смо потврдили поузданост моделирања реалног процеса. Као што је и већ познато техника и технологија напредују из дана у дан, из чега можемо закључити да се у будућности применом рачунарских алата могу очекивати још бољи резултати, већа производност, већа тачност и свакако много већа економичност.

9. Литература

[1] Весна Мандић, „Moodle portal“ , наставни материјали за предмет „Машине и алати у обради деформисањем“

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

[3] Бинко Мусафија, *Обрада метала пластичном деформацијом (четврто издање)*, Сарајево, 1979.

[4] Интернет страница:

<https://www.canforge.com/shared/media/editor/image/OpenDieProcess3.jpg> приступљено 04.07.2020.

[5] Интернет страница:

<http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/predmeti/Osnovi%20masinskih%20tehnologija%202/Kovanje.pdf> приступљено 05.07.2020.

[6] Интернет страница:

<https://www.forge-et-fonderie.com/en/ressources/upload/images/PhotoISEF.png>, приступљено 05.07.2020.

[7] Весна Мандић, *Моделирање и симулација у обради деформисањем*, Машински факултет, Крагујевац 2005.

[8] Весна Мандић, „Moodle portal“ наставни материјал за предмет „CAD/CAM/CAE I“, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2020.

[9] Александар Карач, *Нумеричке методе у инжењерству*, Зеница, 2009.

[10] Дипломски рад бр. 1623, *Визуализација симулације динамике пливовитих флуида* Кристина Штаргел, Загреб, октобар 2006.