

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Ђорђе Т. Милосављевић

***FE* АНАЛИЗА НАПОНА У АЛАТУ ПРИ ХЛАДНОЈ
ЗАПРЕМИНСКОЈ ОБРАДИ ДЕФОРМИСАЊЕМ УЗ ПРАЋЕЊЕ
ТЕМПЕРАТУРНИХ ЕФЕКТА**

Мастер рад

Крагујевац, 2020.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Виртуелни инжењеринг

Број индекса: 489/2019

Ђорђе Т. Милосављевић

***FE* АНАЛИЗА НАПОНА У АЛАТУ ПРИ ХЛАДНОЈ
ЗАПРЕМИНСКОЈ ОБРАДИ ДЕФОРМИСАЊЕМ УЗ ПРАЋЕЊЕ
ТЕМПЕРАТУРНИХ ЕФЕКТА**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Весна Мандић – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат теба да анализира сложенији вишеоперациони процес деформисања дебљег лима за изабрани индустријски пример, са аспекта деформационих, напонских и температурних поља у обратку, уз истовремено праћење напона у алату, како у поступку монтаже и неопходног преднапрезања, тако и током процеса обраде. Анализу је потребно спровести применом методе коначних елемената и специјализованог софтвера *Simufact.Forming*, уз прикупљање релевантних података о процесу и материјалу обратка из компаније чији се индустријски пример анализира (сагласност за презентацију резултата мастер рада добијена је од стране руководства Компаније Слобода А.Д. Чачак). Додатно је потребно извршити експериментално мерење температура у обратку и алату применом термовизијске камере и урадити упоредну анализу са проценама температурних поља у нумеричким експериментима. Детаљна анализа добијених резултата, препоруке и закључна разматрања потребно је да буду саставни део рада и изложени у закључку.

Препоручена литература:

- [1] **Владо Вујовић**, *Технологија пластичности у машинству I део*, Нови Сад, 1990. год.
- [2] **Бинко Мусафија**, *Обрада метала пластичним деформисањем*, Сарајево, 1979. год.
- [3] **Весна Мандић**, *Физичко и нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем* - Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2005. год.
- [4] **Fluke**, Ti200, Ti300, Ti400, Ti450, Ti450SF6, Ti480 Thermal Imagers, User Manual
- [5] **Fluke**, *SmartView 3.10*, Online Help, User Manual
- [6] **Владимир Павићевић**, **Марко Поповић**, *Моделирање процеса топлог ковања на чекићу са аспектима мерења температура применом термовизијске камере*, семинарски рад, Крагујевац, 2020. год.
- [7] **Simufact.Forming**, , User Manual
- [8] **Ненад Станојловић**, *Анализа димензионе тачности делова код комбинованог истискивања* , завршни рад, Крагујевац, 2018. год.

Крагујевац, 2020.

Ментор:

Проф. Др Весна Мандић

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
2. ТЕХНОЛОГИЈА ПЛАСТИЧНОГ ДЕФОРМИСАЊА МЕТАЛА	2
2.1 Обрада метала дубоким извлачењем	4
2.1.1 Дубоко извлачење са стањењем.....	5
2.1.2 Алати за обраду метала дубоким извлачењем.....	8
2.2 Прорачун и ојачавање матрица у процесима истискивања	10
3. ПРИНЦИПИ ИНФРАЦРВЕНЕ ТЕРМОГРАФИЈЕ	18
3.1 <i>Fluke Ti400</i> – Инфрацрвена камера.....	18
3.1.1 Основне карактеристике термовизијске камере Ti400.....	19
3.1.2 Основни елементи, додатна опрема и функције <i>Fluke Ti400</i>	20
3.2 Емисивност	24
3.3 <i>SmartView</i> софтвер	28
4. НУМЕРИЧКЕ МЕТОДЕ ЗА СИМУЛАЦИЈУ ПРОЦЕСА ДУБОКОГ ИЗВЛАЧЕЊА.....	35
4.1 Методе моделирања	35
4.1.1 Метода коначних елемената	36
4.2 Улазни подаци за нумеричко моделирање процеса	37
4.2.1 Особине и понашање материјала.....	37
4.2.2 Контактни услови трења и трансфера топлоте.....	37
4.3 Опис програмског пакета <i>Simufact.forming</i>	42
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА.....	44
5.1 Испитивање материјала	44
5.1.1 Тест једноосног затезања.....	45
5.1.2 Одређивање кривих ојачања затезањем.....	46
5.1.3 Резултати експерименталних испитивања	48
5.2 Алати за дубоко извлачење	51
5.3 Мерење температура у току процеса обраде.....	55
5.3.1 Мерење температура обратка	55
5.3.2 Мерење температура алата.....	58
6. <i>FE</i> АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ДУБОКОГ ИЗВЛАЧЕЊА.....	60
6.1 Увод	60
6.2 Улазни подаци за нумеричку симулацију	60
6.2.1 Улазни подаци за нумеричку симулацију монтаже и преднапрезања горње матрице	61

6.2.2 Улазни подаци за нумеричку симулацију монтаже и преднапрезања доње матрице	63
6.2.3 Улазни подаци за нумеричку симулацију процеса дубоког извлачења	64
6.3 Резултати <i>FE</i> анализе.....	66
6.3.1 Резултати нумеричке симулације монтаже и преднапрезања горње матрице	66
6.3.2 Резултати нумеричке симулације монтаже и преднапрезања доње матрице	67
6.3.3 Резултати нумеричке симулације процеса дубоког извлачења	68
6.4 Анализа резултата <i>FE</i> симулације	72
7. УПОРЕДНА АНАЛИЗА НУМЕРИЧКИХ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА.....	75
8. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА.....	77
ЛИТЕРАТУРА	79

Abstract

The technology of deep drawing of sheet metal with thinning of the wall thickness occupies a prominent place in the industry, especially for the needs of military-industrial engineering where it is used for the production of artillery and anti-aircraft shell casings, for the production of cumulative castings within the missile program, in which, in addition to the requirements regarding the dimensions and shape of the parts, it is insisted on the realization of the required mechanical characteristics of the elements that could not be realized by other processing procedures. As part of this master's thesis, an operation was performed to deeply drawing the phase of making a brass position of a thicker sheet. Emphasis is placed on monitoring the stress-strain state during the manufacturing process in the tool and the workpiece, as well as on measuring the developed temperature effects. As part of a special test, the prestressing was analyzed, that is, strengthening the matrices as a necessary operation when making positions where large deformation forces are required. The research was performed virtually, using the finite element method with the application of software for numerical analysis of the deformation process *Simufact.Forming*, as well as practically, by measuring the temperature of the tool and the workpiece using a thermal imaging camera.

Keywords: *deep drawing, numerical simulation, matrix prestressing, infrared thermography.*

Резиме

Технологија дубоког извлачења лимова са стањењем дебљине зида заузима истакнуто место у индустрији, посебно за потребе војно индустријског инжењерства где се примењује како за производњу чаура артиљеријског и противавионског програма, код производње кумулативних левака у оквиру ракетног програма при изради бојевих глава, тако и у другим артиклима код којих се инсистира поред захтева у погледу димензија и облика делова на остваривању тражених механичких карактеристика елемената који другим поступцима обраде не би могли бити реализовани. У оквиру овог мастер рада извршена је операција дубоког извлачења фазе израде месингане позиције дебљег лима. Акценат је стављен на праћење напонско деформационог стања током процеса израде у алату и обратку, као и на мерење развијених температурних ефеката. У оквиру посебног испитивања, анализирано је преднапрезање, односно ојачавање матрица као неопходна операција код израде позиција где се захевају велике деформационе силе. Истраживања су вршена виртуелно, помоћу методе коначних елемената уз примену софтвера за нумеричку анализу процеса деформисања *Simufact.Forming*, као и практично, мерењем температура алата и радног комада применом термовизијске камере.

Кључне речи: *дубоко извлачење, нумеричка симулација, преднапрезање матрица, инфрацрвена термографија.*

1.УВОД

Циљ мастер рада је да се изврши анализа процеса дубоког извлачења дебљег лима на индустријском примеру у погледу напонских, деформационих и температурних поља у обратку, затим праћење напона у алату током монтаже ојачавајућих прстенова на матрицу, праћење напона у алату током процеса израде позиције, као и мерење температурних фаза у алату и обратку применом термовизијске камере.

Концепт истраживања је такав да је у првом делу рада спроведена теоријска анализа основа обраде метала деформисањем, како дубоког извлачења са акцентом на извлачењу дебљих лимова са стањењем, тако и хладног истискивања. У другом делу рада извршена су *FE (Finite element)* нумеричка испитивања у предвиђеном софтверском пакету, мерење температура у процесу термовизијском камером и приказана је анализа добијених резултата уз извођење адекватних закључака.

У оквиру теоријског дела испитивања, у другом поглављу описане су основе технологије пластичног обликовања, приказана је основна подела поступака који припадају овој технологији, њене кључне предности али и недостаци у односу на остале технологије обраде метала. Такође, описана је обрада дубоког извлачења са стањењем дебљине зида, алати који се примењују код ове обраде, као и процес обраде хладним истискивањем са посебним освртом на прорачун и ојачавање матрица код процеса хладног истискивања.

У трећем поглављу објашњени су основни принципи инфрацрвене термографије, термовизијска камера *Fluke Ti400* уз приказ основних карактеристика и функција уређаја. Објашњене су теоретске основе инфрацрвеног зрачења и описан је појам емисивности, уз приказ табеле вредности коефицијента емисије најчешће коришћених материјала. На крају овог поглавља описан је софтверски алат *SmartView* помоћу којег се врши обрада ИЦ фотографија и видео снимака, уз практичне примере примене појединих функција.

Четврто поглавље описује нумеричке методе које су коришћене код симулације процеса дубоког извлачења, приказани су теоријски принципи методе коначних елемената, контактни услови трења у алату и радном комаду, као и трансфер топлоте у алату одређивањем НТС коефицијента. Поред наведеног, описан је и програмски пакет *Simufact.Forming*, помоћу којег су извршене све нумеричке анализе.

Пето поглавље је базирано на експерименталним истраживањима која су изведена са циљем добијања релевантних података који су даље имплементирани у оквиру нумеричке анализе при поставци проблема. Извршено је лабораторијско испитивање материјала који се обрађује тестом једноосног затезања помоћу којих се дошло до веома битних информација везаних за карактеристике материјала обратка. Приказан је поступак подешавања алата за извлачење, поступак израде и припреме радног комада и на крају је реализован процес извлачења уз снимање остварених температура на алату и обратку.

У шестом поглављу, извршена је *FE* анализа процеса, у којој су првенствено преднапрегнуте горња и доња матрица, а затим и симулација процеса извлачења применом напонски ојачаног алата. У наставку су дати резултати испитивања, како напонских тако и температурних, као и анализа добијених резултата.

Седмим поглављем дата је упоредна анализа нумеричких и резултата добијених експерименталним мерењем температура у процесу, док су у осмом и деветом представљена закључна разматрања и коришћена литература.

2. ТЕХНОЛОГИЈА ПЛАСТИЧНОГ ДЕФОРМИСАЊА МЕТАЛА

Технологија пластичног деформисања метала (ТПД) заузима веома битно место у оквиру свих технологија производног машинства. Овом технологијом добијају се полуфабрикати и готови делови различитих облика и димензија, од различитих металних материјала, различитих тачности и квалитета обраде. Захваљујући многим предностима, примена ове обраде је у константном порасту. Према релевантним подацима, више од 80% свих металних материјала у ранијој или каснијој фази обраде буде обрађено неком од технологија пластичног деформисања: ваљањем, ковањем, дубоким извлачењем и др.

Основно обележје свих технолошких метода које припадају ТПД јесте да је то обрада без скидања струготине. Готов производ се добија пластичним (трајним) деформисањем, тј. мењањем облика полазног материјала, при чему запремина у току обраде остаје константна.

Пластично деформисање метала одвија се под дејством одговарајућег спољашњег оптерећења које изазива унутрашње напоне и трајну промену облика полазног материјала [1].

У процесима пластичног обликовања не смеју се прекорачити вредности граничних износа деформације, јер се у противном разара структура материјала или појављују други неприхватљиви дефекти [1].

Обрада пластичним деформисањем метала врши се у хладном или топлом стању. При обради у хладном стању материјал ојачава, постижу се повољна механичка својства и чистије површине. При обради у топлом стању потребна је знатно мања сила, а пластичност метала се повећава. Фактори као што су облик, димензије и квалитет почетног материјала, конфигурација и степен сложености готовог комада, начин прераде, конструкција алата, врста и величина машине одређују да ли ће се процес вршити у хладном или топлом стању.

Обрада се врши довођењем материјала у стање пластичног течења, тј. оптерећивањем материјала изнад границе еластичности. Потребан рад и силу остварују машине за обраду деформисањем: пресе, ковачки чекићи, машине за савијање, маказе за одсецање лима. Обрада метала пластичним деформисањем је у већини случајева везана за великосеријску и масовну производњу из разлога високе цене машина и алата.

ТПД одликују техно-економске карактеристике које је чине конкурентнијом у односу на друге алтернативне технологије. Главне предности ТПД су:

- релативно једноставна и брза израда делова, без обзира на њихов облик и величину,
- висок степен искоришћења материјала,
- високе механичке карактеристике добијених делова,
- висока тачност и квалитет површина делова,
- ако је серија довољно велика, комадна цена је знатно нижа него код осталих технологија,
- велики број делова могуће је произвести искључиво технологијом пластичног обликовања.

Главни недостаци ТПД су:

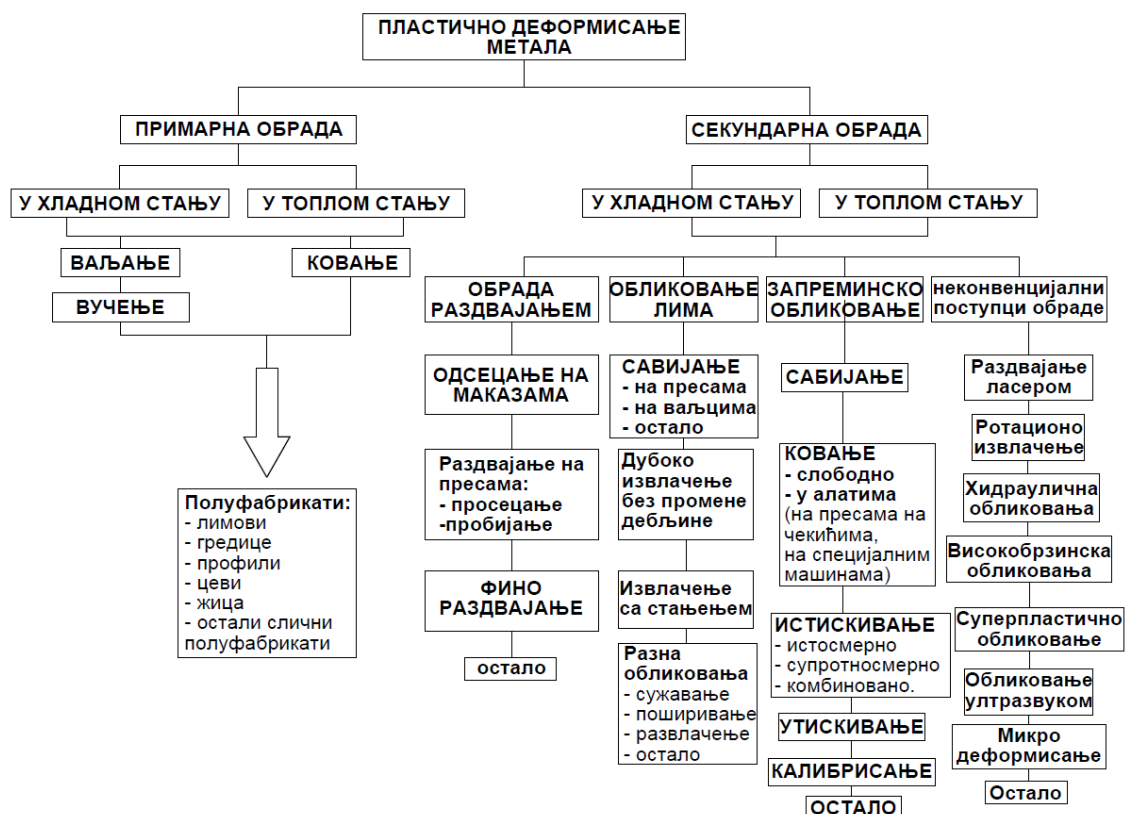
- ова технологија је економски оправдана само у случају серијске, великосеријске и масовне производње,
- не могу се сви материјали успешно обрађивати ТПД. То се, пре свега, односи на високолегиране челике и друге материјале са ниском полазном пластичношћу,
- примена процеса је ограничена с обзиром на максимално дозвољено оптерећење алата,
- у процесу се често јављају велике силе и притисци, што изискује потребу за робусним алатима и машинама велике снаге.

Пластично деформисање метала је обрада при којој се под дејством довољно високог оптерећења трајно мења облик полазног материјала. Ова општа дефиниција обухвата велики број различитих метода којима се могу добити производи од различитих металних материјала, различитих димензија, тачности и квалитета површина. На слици 2.1 дата је класификација ТПД по наведеном принципу, уз навођење конкретних метода које припадају појединим групама.

Подела ТПД може се извести и према геометрији полуфабриката, тј. радног комада. Према том критеријуму сви процеси ТПД деле се на:

- запреминско деформисање,
- деформисање лима,
- деформисање профила.

На следећој слици приказана је основна подела технологија пластичног деформисања.



Слика 2.1 Подела технологија пластичног обликовања [1]

При запреминском деформисању, у зони обраде најчешће влада троосно напонско-деформационо стање, а димензије те зоне у све три осе су истог реда величина. Типичне запреминске ТПД су сабијање, ковање, истискивање и др. При запреминском деформисању појављују се знатно веће силе деформисања него при обради лима.

Код лима су две димензије (дужина и ширина) знатно веће од треће димензије (дебљина), из чега проистичу одређене специфичности обраде лима деформисањем. Најчешће примењиване методе обраде лима су дубоко извлачење, савијање, раздвајање.

Поред ових основних операција, могуће је вршити и комбиновање операција, нпр. просецање и савијање, просецање и дубоко извлачење, као и комбинације других врста обликовања.

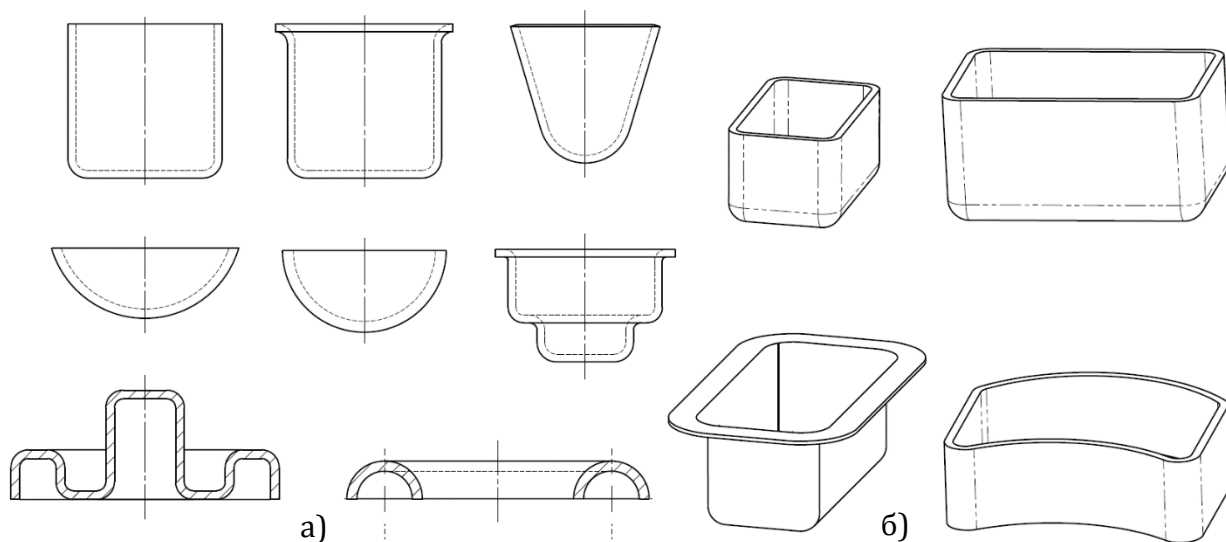
2.1 Обрада метала дубоким извлачењем

Дубоко извлачење се дефинише као процес обраде метала деформисањем код којег се из почетног недеформисаног стања, најчешће равне плоче или развијене платине, уз помоћ алата добијају делови разних облика и конфигурација. Делови добијени овим поступком имају веома широку примену: у аутоиндустрији (делови каросерије аутомобила, резервоари, блатобрани...), у индустрији производа за домаћинство (посуђа, електричних штедњака, грејних и расхладних уређаја...) итд.

Обрада дубоким извлачењем најчешће се врши у хладном стању, осим у неким ређим случајевима – ако лим има релативно велику дебљину или ако је материјал недовољно пластичан – извлачење се може вршити и у топлом стању.

Технологијом дубоког извлачења се обрађују материјали дебљине од 0,02мм до 50мм, са димензијама од неколико десетинки милиметара па до неколико метара и са тежинама које варирају од грама до тоне [2].

На слици 2.2 приказани су делови који се могу добити поступком дубоког извлачења.



Слика 2.2 Делови израђени дубоким извлачењем
(а-осносиметрични, б-„кутијасте“) [3]

Према геометрији готовог комада могуће је извршити следећу поделу:

- чисто дубоко извлачење ротационих делова (извлачење шупљег цилиндричног тела са равним дном),
- дубоко извлачење осталих делова правилног геометријског облика (кутијасти делови),
- извлачење делова „неправилног” геометријског облика (на пример благодан каросерије аутомобила).

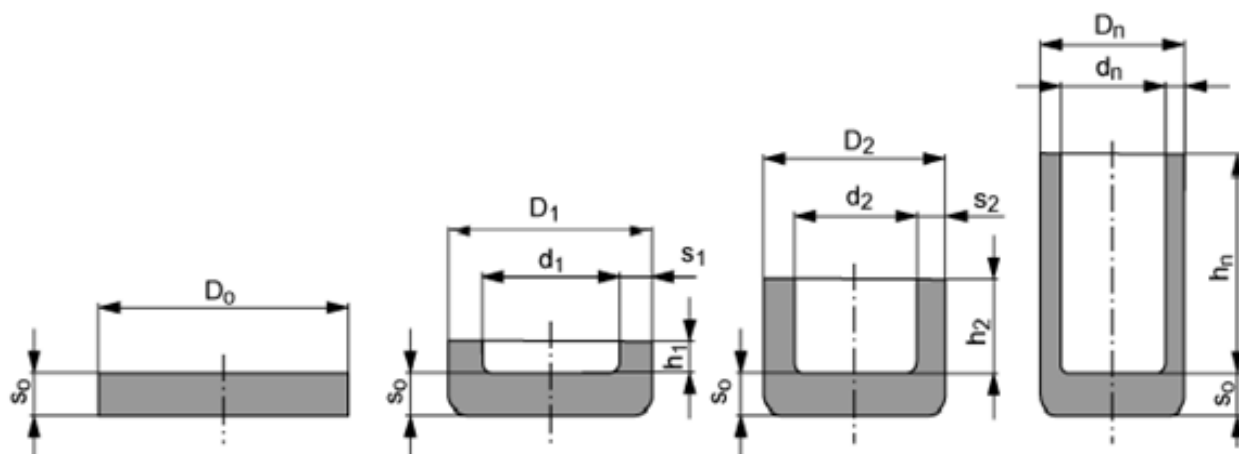
У односу на дебљину лима који се обрађује у току процеса обликовања разликујемо два поступка:

- дубоко извлачење без промене дебљине материјала
- дубоко извлачење са стањењем, односно редукцијом зида.

2.1.1 Дубоко извлачење са стањењем

Дубоко извлачење са стањењем, тј. редукцијом дебљине зида се примењује код израде комада код којих се захтева да дно буде дебље од зидова омотача.

За разлику од класичног дубоког извлачења у овом случају се врши циљано стањење лима, уз истовремену постепену редукцију пречника и повећање висине комада.

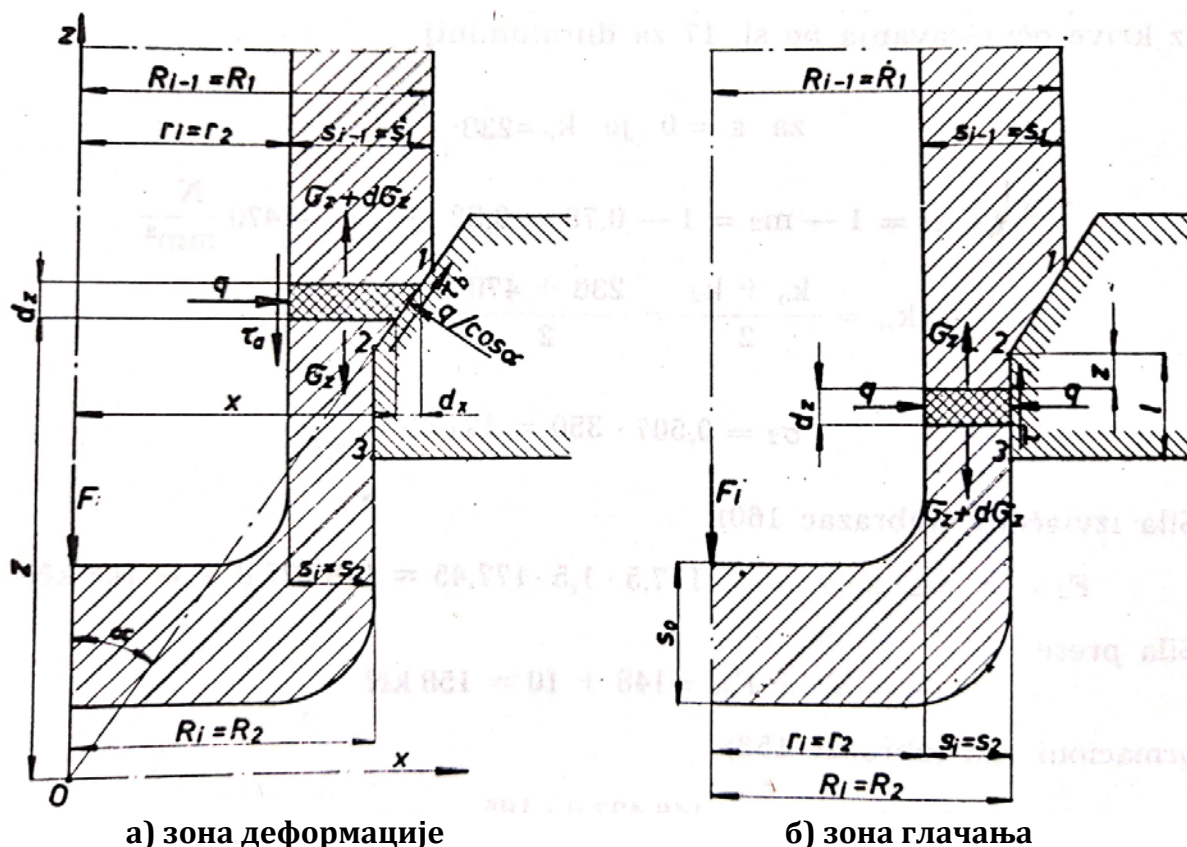


Слика 2.3 Фазе процеса извлачења са стањењем

У првој фази може да се ради извлачење без стањења или полазни комад може бити цилиндричан, добијен супротносмерним истискивањем. Због релативно велике дебљине лима не постоји опасност од појаве набора, па се држач лима најчешће не примењује. Профил прстена за извлачење код прве операције извлачења је у облику радијуса или у облику трактрикс криве.

У току следећих операција извлачења врши се редукција дебљине зида (слика 2.4), од вредности $S_{i-1}=S_1$ на вредност $S_i=S_2$, а при том се спољашњи полупречник чанчета смањује од вредности $R_{i-1}=R_1$ на $R_i=R_2$ [2].

Извлачење се врши помоћу конусног прстена за извлачење, са централним углом α и извлакачем полупречника $r_1=r_2$ (то је уједно и спољашњи пречник чанчета) [2].



Слика 2.4 Напони и силе код дубоког извлачења са редукцијом дебљине зида [2]

Почетни попречни пресек узимајући у обзир средњи пречник, износи:

$$A_0 = (d_0 + S_0) \cdot \pi S_0 \quad (2.1)$$

После првог извлачења:

$$A_1 = (d_1 + S_1) \cdot \pi S_1 \quad (2.2)$$

Остварена природна деформација:

$$\varphi_1 = l_n \frac{A_0}{A_1} = l_n \frac{(d_0 + S_0) \cdot S_0}{(d_1 + S_1) \cdot S_1} = l_n \frac{S_0}{S_1}; \quad d_0 \sim d_1 \quad (2.3)$$

Релативна деформација:

$$\varepsilon_1 = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \quad (2.4)$$

Ако је извлачење вишестепено:

$$\varphi_1 = l_n \frac{A_0}{A_1} \sim l_n \frac{S_0}{S_n}; \quad d_0 \sim d_1 \text{ односно, } \varepsilon_n = \frac{S_0 - S_n}{S_0} \quad (2.5)$$

Гранична вредност деформације у једној операцији за челичне лимове износи $\varphi_{gr} \sim 0,3$. За веће степене деформације обавезно је међуоперационо жарење. Број операција се израчунава према изразу:

$$n = \frac{\varphi_n}{\varphi_{gr}} \quad (2.6)$$

Тачно одређивање силе и деформационог рада је знатно сложеније у односу на случај класичног дубоког извлачења где се занемарује промена дебљине лима. Овај случај обликовања по својим карактеристикама више спада у групу запреминског обликовања, па се приближан израз за силу добија на основу енергетске методе. Изједначава се деформациони рад са радом средње силе на дужини активног хода [1].

$$W = \int_h^{h_0} F dh = \int_h^{h_0} p A dh = \int_h^{h_0} p \frac{V}{h} dh = V \int_h^{h_0} p \frac{dh}{h} \quad (2.7)$$

Уколико нема трења:

$$p = mK = K; K \rightarrow \bar{K}, (m = 1) \quad (2.8)$$

Идеални рад:

$$W_{id} = V \bar{K} \varphi; \quad (2.9)$$

Стварни рад:

$$W_d = \frac{W_{id}}{\eta_d}; \quad \eta_d = 0,6 - 0,9 \quad (2.10)$$

$$W_d = \frac{V \bar{K} \varphi}{\eta_d};$$

$$\bar{K} = \frac{K_0 + K_1}{2} \quad \text{за } \varphi \leq 0,2$$

$$\bar{K} = \frac{1}{\varphi} \int_0^\varphi K d\varphi \quad \text{за } \varphi \geq 0,2$$

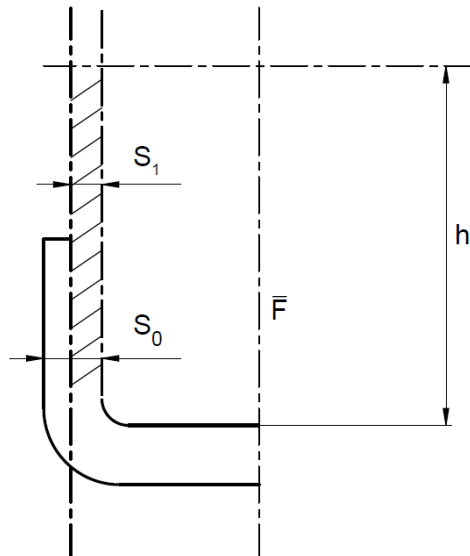
$\bar{K} = \frac{w}{\varphi}$, w -специфични идеални деформациони рад

Стварни рад деформационе силе се израчунава по обрасцу:

$$W_d = \bar{F} h = \frac{V \bar{K} \varphi}{\eta_d} = A_1 h \frac{\bar{K} \varphi}{\eta_d} \quad (2.11)$$

Средња сила извлачења са стањењем је:

$$\bar{F} = A_1 \frac{\bar{K} \varphi}{\eta_d} \quad \text{или} \quad \bar{F} = A_1 \frac{w}{\eta_d} \quad [1] \quad (2.12)$$



Слика 2.5 Средња сила и активна дужина хода при извлачењу са стањењем [1]

Пошто је извлачење са стањењем по напонско-деформационим особинама ближе процесима запреминског обликовања, пре свега истискивању, потребно је применити посебне поступке подмазивања [1].

Код обраде месинга то подразумева претходну хемијску припрему површине обратка бајцовањем, што подразумева држање комада у одговарајућој концентрацији сумпорне киселине, при захтеваној температури и времену, након чега се врши неутрализација, а затим осапуњавање које смањује коефицијент трења приликом процеса извлачења.

С обзиром да се обрада завршава у једном ходу извлакача који пролази кроз више матрица неопходан је већи ход машине, па се стога најчешће користе хидрауличне пресе. Мора се обезбедити центричност оса извлакача и свих матрица.

Извлачење са стањењем се највише користи у масовној производњи амбалажних конзерви, индустрији оружја и муниције итд. [1].

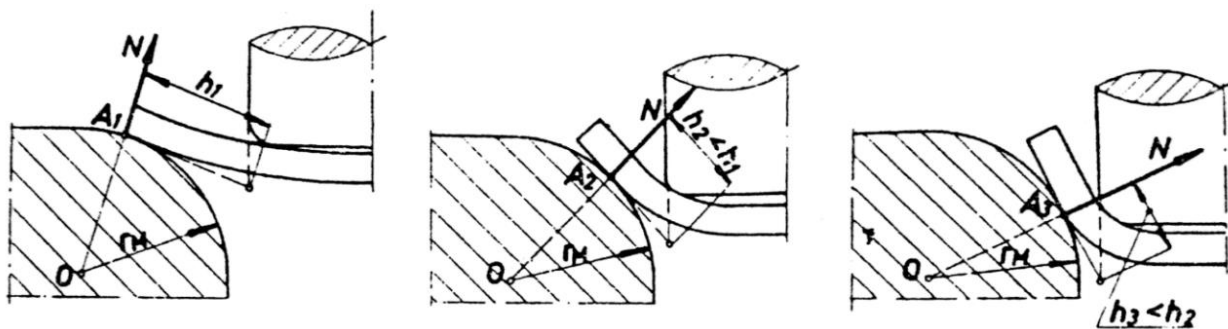
2.1.2 Алати за обраду метала дубоким извлачењем

Профил (траса) **прстена за извлачење** битно утиче на ток процеса извлачења, односно на промену силе у зависности од хода извлакача. Осим тога профил утиче и на степен деформације извлачења, квалитет извученог комада и остале параметре процеса извлачења.

Данас се употребљавају за различите процесе обраде извлачењем три врсте профила прстена за извлачење [2]:

- са радијусом,
- са конусом,
- са трактрикс кривом.

Прстен за извлачење изведен са профилем у **облику радијуса** (r_m), слика 2.6, најчешће се употребљава за прву операцију извлачења без промене дебљине материјала, у случајевима када се ради са или без држача лима. Долази у обзир и за следеће операције извлачења без промене дебљине материјала када се ради без држача лима, док за следеће операције извлачења са држачем лима боље услове пружа прстен са конусним профилем. Понекад се употребљава и за прву операцију извлачењем са редукцијом дебљине зида, иако далеко боље решење за ову врсту обраде представља прстен са трактрикс кривом. За следеће операције извлачења са редукцијом дебљине зида се не користи [2].



Слика 2.6 Профил матрице са радијусом [2]

Радијус прстена за извлачење утиче на рад и силу извлачења. Анализе показују да је тежња да радијус прстена за извлачење има што већу вредност. Међутим, повећањем радијуса прстена за извлачење смањује се активна површина за држање лима [2].

Радијус прстена за прву операцију се може израчунати према следећем обрасцу:

$$rm_1 = 0,8\sqrt{(D - d_1)s} \quad (2.13)$$

где је:

D [mm] – пречник платине

d_1 [mm] – унутрашњи пречник комада након прве операције извлачења, или пречник извлакача

s [mm] – дебљина лима

Радијус прстена за следеће операције извлачења се израчунава као:

$$rm_2 = 0,8\sqrt{(d_1 - d_2)s} \quad (2.13a)$$

где је:

d_2 [mm] – унутрашњи пречник комада након друге операције извлачења.

Прстен са **конусним профилем** (слика 2.7) се примењује врло ретко код прве операције извлачења без промене дебљине зида и то искључиво када се комад извлачи без држача лима. Врло често долази у обзир за следеће операције извлачења са редукцијом дебљине зида, а и за следеће операције извлачења у овој врсти обраде, ради повољних услова за држање лима.

Централни угао за извлачење без промене дебљине материјала је:

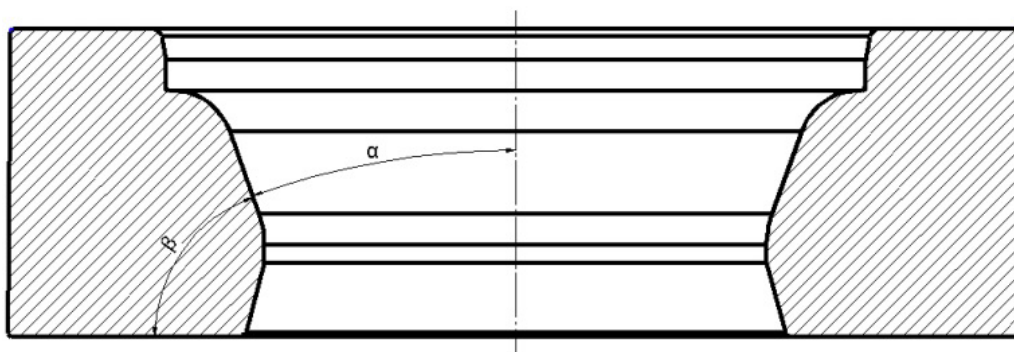
$$\alpha = 40^\circ - 45^\circ \text{ ређе до } 52^\circ$$

односно:

$$\beta = 90^\circ - \alpha = 50^\circ - 45^\circ, \text{ ређе до } 38^\circ$$

док је за операције са редукцијом дебљине зида:

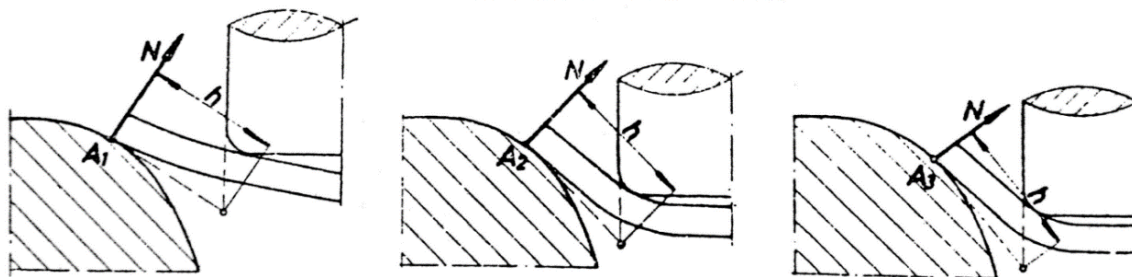
$$\alpha = 12^\circ - 18^\circ$$



Слика 2.7 Профил матрице са конусом

Прстен изведен са трасом која одговара **трактрикс кривој** даје најповољније услове извлачења нарочито дебљих лимова. Код већих деформација препоручује се његова примена и код чистог савијања нарочито дубљих профила. Посебно добар процес извлачења овим прстеном се постиже када се у првој операцији врши истовремено деформисање по пречнику (савијање) и по дебљини зида (извлачење) [2].

Уколико би се извршило поређење по фазама извлачења (слика 2.6), при примени прстена са радијусом и трактрикс кривом, може се приметити да се у току процеса извлачења применом прстена са радијусом, крак h компоненте нормалног отпора N непрекидно смањује са повећањем дубине извлачења ($h_3 < h_2 < h_1$).



Слика 2.8 Профил матрице у облику трактрикс криве [2]

Смањивање крака савијања на слици 2.8 (услед померања додирне тачке A_1 , преко A_2 и A_3 ка центру чанчета) условљава повећање потребне силе за извлачење. Максималне силе потребне за савијање и извлачење се могу поклопити или бити временски јако близу, тако да у зони преноса силе могу настати напони већи од стварне затезне чврстоће материјала, што може изазвати прекид комада.

Најнижа сила извлачења ће се постићи уколико је профил прстена изведен тако да је крак нормалног отпора што већи. На основу тога предложен је прстен у облику трактрикс криве, код којег је крак савијања у свакој фази извлачења константан и једнак почетној вредности ($h = \text{const}$). Нормалан отпор N делује увек на ивици чанчета (A_1, A_2, A_3), тако да сила извлачења напада чанче на највећем краку савијања.

Обзиром да крак h у сваком тренутку тангира профил прстена, решење проблема се своди на проналажење криве са константном дужином тангенте (образац 2.10).

$$x = h \cdot l_n \frac{h + \sqrt{h^2 - y^2}}{y} - \sqrt{h^2 - y^2} \quad (2.14)$$

Овим обрасцем је дефинисана једначина *Huygens*-ове трактриксе, што представља еволвенту ланчанице. Слабост трактрикс профила је у томе што теоретски има бесконачну висину.

$$\lim_{y \rightarrow 0} x \rightarrow \infty$$

2.2 Прорачун и ојачавање матрица у процесима истискивања

Код процеса дубоког извлачења са стањењем, код матрица које се користе на индустријском примеру који се обрађује у раду, на матрицама за прву и остале операције обавезна је примена ојачавајућих прстенова.

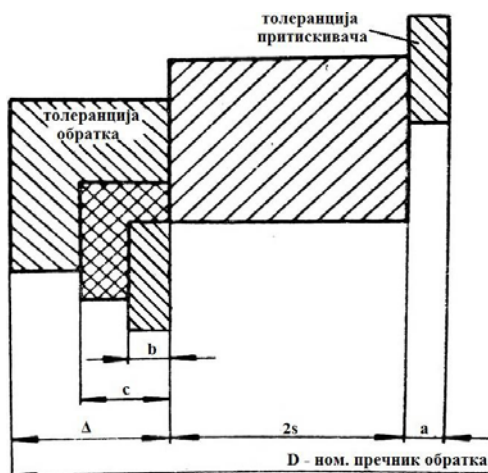
Обзиром да се као што је претходно наглашено операције дубоког извлачења дебљих лимова са стањењем могу посматрати као процеси запреминског обликовања, конкретно хладног истискивања, стога ће се у наставку рада описати прорачун и ојачавање матрица код процеса истискивања.

Током процеса обраде, у матрици се јављају, поред високих притисака, радијалне силе, које оптерећују матрицу на затезање, односно ширење матрице у радијалном правцу. Управо из тих разлога, потребно је урадити прорачуне и правилно димензионисати матрицу.

Димензије матрице и димензије притискивача, одговарају димензијама дела који треба добити. Унутрашње димензије шупљине матрице, одговарају спољашњим димензијама дела, а спољашње димензије притискивача одговарају унутрашњим димензија дела који се обрађује.

При конструисању матрице, с аспекта утицаја хабања на век алата за израду делова хладним истискивањем, потребно је правилно одредити толеранције израде, како матрице тако и притискивача. Толеранције треба поставити тако да током експлоатације, трошење алата не утиче на димензије обратка, односно да при хабању алата димензије обратка остану у прописаним границама. Према томе, постављање толеранција се може извршити на два начина:

- а) када је задат спољашњи пречник обратка D и толеранције дебљине зида (слика 2.9)
- б) када је задат унутрашњи пречник обратка d и толеранције дебљине зида (слика 2.10)



Слика 2.9 Толеранција израде алата у случају (а) [4]

У првом случају, унутрашњи пречник матрице се одређује на следећи начин:

$$d_m = (D - \Delta) + b \quad (2.15)$$

При чему је:

d_m – унутрашњи пречник матрице

D – спољашњи пречник обратка

Δ – толеранција обратка

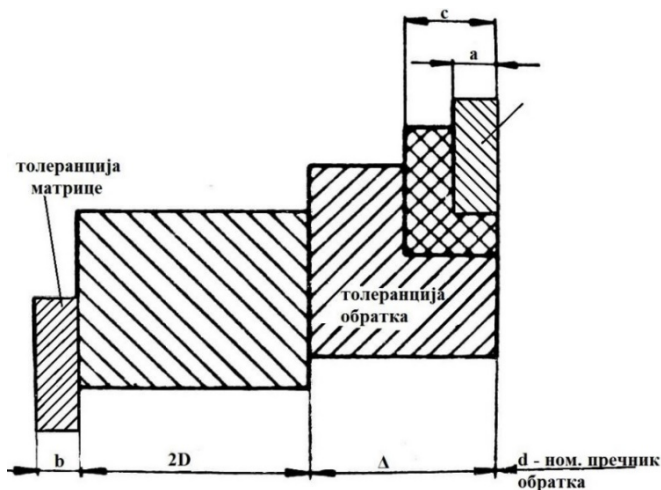
b – толеранција израде матрице

У овом случају, тежи се да се унутрашње димензије матрице израде што је могуће ближе доњој граници толерантног поља дела који се истискује, јер се хабањем унуташњи пречник матрице повећава. У току експлоатације, дозвољено хабање матрице представља вредност „ c “, при чему мора бити укључена и толеранција при изради. При томе, пречник притискивача „ d_t “ одговара разлици горње граничне вредности спољашње димензије обратка и две дебљине зида:

$$d_t = D - \Delta - 2s \quad (2.16)$$

Тиме се обезбеђује да толеранција притискивача иде у минус, јер се током хабања пречник притискивача смањује.

У случају под (б), врши се димензионисање притискивача, јер је толерисан унутрашњи пречник обратка.



Слика 2.10 Толеранције израде алата у случају (б) [4]

Пречник притискивача се може добити на следећи начин:

$$d_t = (d + \Delta) - a \quad (2.17)$$

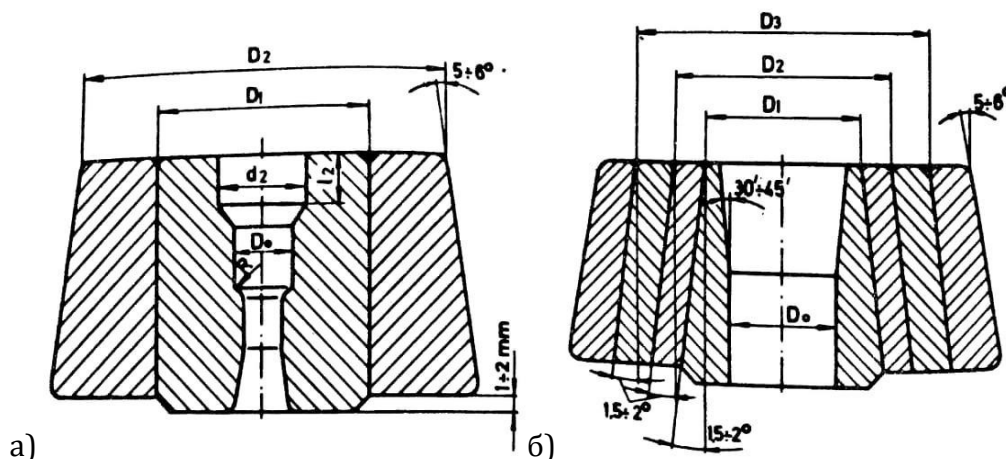
У овом случају, тежња је да се спољашњи пречник притискивача изради што је могуће ближе горњој граници толерантног поља унутрашње димензије обратка који се истискује, јер се хабањем пречник притискивача смањује. У току експлоатације, дозвољено хабање притискивача представља вредност „с“, при чему мора бити укључена и толеранција израде притискивача. Унутрашњи пречник матрице једнак је збиру доњој граничној мери спољашњег пречника обратка и две дебљине зида:

$$d_m = d + \Delta + 2s \quad (2.18)$$

На тај начин обезбеђује се да толеранција матрице иде у плус, јер се хабањем пречник матрице повећава [4].

Као што је већ наглашено, обзиром да се код процеса истискивања у току процеса јављају велике силе у радијалном правцу, у условима када те силе пређу дозвољене границе, може доћи до еластичног ширења матрица током рада што може утицати на промену димензија радног комада, а у неким случајевима и до појаве пукотина у алату. Суочавање са оваквим проблемима довело је до потребе за пројектовањем ојачавајућих прстенова на матрице.

Пример матрице за супротносмерно истискивање приказан је на слици 2.11 и то: а) матрица са једним ојачавајућим прстеном и унутрашњим вођењем тискача у матрици и б) матрица са три ојачавајућа прстена без вођења тискача [4].



Слика 2.11 Матрице за супротносмерно истискивање [4]

У првом случају, када је у матрици предвиђено вођење притискивача, конструкција матрице је нешто сложенија. Матрица се у том случају додатно продужује за величину димензија које су потребне за вођење притискивача, док те димензије (d_2 и l_2), зависе од димензија притискивача и потребно их је међусобно усагласити. Конструкција оваквог типа матрице (слика 2.11а) јесте сложенија али се тиме постиже прецизније вођење притискивача и прецизније дефинише његов положај у односу на матрицу и припремак, што позитивно утиче на финални квалитет готовог производа. У општем случају конструкције матрице (слика 2.11б), димензије шупљине матрице као и њена висина, се најчешће одређују на основу геометрије готовог дела. Део матрице котиран са D_0 представља део помоћу ког се остварује жељени облик и димензије дела (калибрирајући део матрице). Део шупљине матрице при врху који је израђен са конусом од 30' до 45', служи да олакша течење материјала у току обраде, јер се на тај начин избегава контакт између алата и материјала [4].

Одређивање напона у матрици врши се помоћу модела цеви, која је оптерећена унутрашњим притиском p . У зависности од расподеле напона у матрици, од унутрашњег према спољашњем пречнику, одређује се спољашњи пречник матрице D_1 . Највећи напони који се јављају у матрици су радијални и тангенцијални напони, а њима је највише изложен унутрашњи пречник, тј. калибрирајући део матрице D_0 и одређују се помоћу обрасца:

$$\sigma_r = -p \quad (2.19)$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1} p = c \cdot p \quad (2.20)$$

при чему је:

p – притисак на унутрашњој површини,

$a = \frac{D_1}{D_0}$ – однос спољашњег и унутрашњег пречника,

Укупан напон по хипотези пластичног течења се одређује по обрасцу:

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_t^2 - \sigma_r \sigma_t} = p \cdot \sqrt{1 + c + c^2} \quad (2.21)$$

На слици 2.12 приказана је промена напона у радијалном правцу матрице за:

а) матрицу без ојачавајућих прстенова, када је однос спољашњег и унутрашњег пречника $a = \frac{D_1}{D_0} = 4$;

б) матрицу са једним ојачавајућим прстеном;

в) матрицу са два ојачавајућа прстена.

На слици 2.12а се може уочити да повећање спољашњег пречника не утиче на смањење максималног напона. Из тог разлога, у пракси, однос унутрашњег и спољашњег пречника не прелази вредност 4, јер повећање односа преко ове вредности не доприноси повећању отпорности матрице, што је приказано у следећем примеру.

Са односом $a = 4$ или $D_1 = 4 \cdot D_0$ добија се:

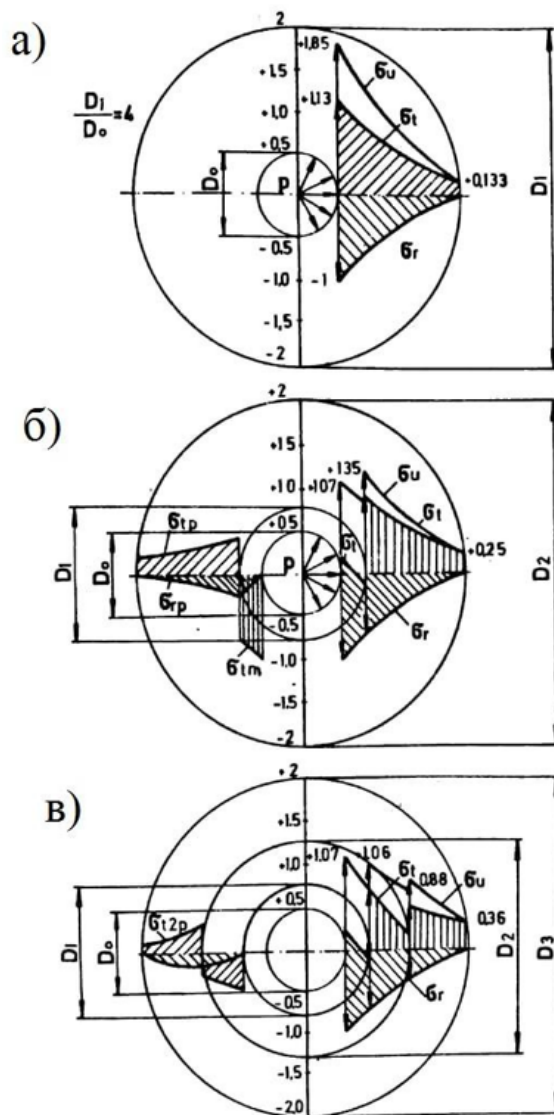
$$c = \frac{4^2 + 1}{4^2 - 1} = \frac{17}{15} = 1,13 \text{ и } \sigma_u = p \cdot \sqrt{1 + 1,13 + 1,28} = 1,85p$$

Међутим са односом $a = 10$ или $D_1 = 10 \cdot D_0$ добија се:

$$c = \frac{10^2 + 1}{10^2 - 1} = \frac{101}{99} = 1,02 \text{ и } \sigma_u = p \cdot \sqrt{1 + 1,02 + 1,04} = 1,75p$$

На примеру где је $a = 10$ може се видети да се у односу на пример са $a = 4$ напон смањило за само 9,5% иако су димензије повећане за 2,5 пута.

На основу наведеног примера може се закључити да повећање спољашњег пречника нема значајног утицаја на отпорност матрице.



Слика 2.12 Промена напона кроз дебљину матрице, у зависности од конструкције матрице [4]

На основу тога, може се одредити максимални дозвољени притисак на унутрашњем делу матрице, за матрицу без ојачавајућих прстенова. Ако је $a = 4$, онда укупан напон, према изразу 2.21 износи $\sigma_u = 1,85p$ и ако је вредност границе еластичности (за каљене алатне челике) $\sigma_E = 2000 \text{ N/mm}^2$, максимални дозвољени притисак на унутрашњој површини матрице биће:

$$\sigma_u \leq \sigma_E = 2000 \text{ MPa} \Rightarrow$$

$$1,85p \leq 2000 \text{ MPa} \Rightarrow$$

$$p \leq \frac{2000}{1,85} = 1100 \text{ MPa}$$

Највећи притисак на унутрашњој површини који матрица може да издржи, без ојачавајућих прстенова је 1100 МПа. [4]

Као што је већ и наглашено, како су процеси хладног истискивања челика јако сложени, поготову када је у питању супротносмерно и комбиновано истискивање, чест је случај појаве високих притисака, изнад 1100 МПа. У тим случајевима користи се ојачавање матрице ојачавајућим прстеновима [4].

Ојачавајући прстенови су израђени на тај начин да унутрашњи пречник има задор у односу на спољашњи пречник матрице, односно спољашњи пречник матрице и унутрашњи пречник прстена се преклапају за одређену вредност на собној температури. Препорука за задор између спољашњег пречника матрице и унутрашњег пречника прстена за монтирање прстенова загревањем је 0.1mm на сваких 25 mm пречника. Такође, задори се могу одредити и на следећи начин:

$$\Delta_1 = 0.025 \cdot D_1$$

$$\Delta_2 = 0.008 \cdot D_2$$

$$\Delta_3 = 0.004 \cdot D_3$$

$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – задори првог, другог и трећег прстена.

Препоруке за избор начина ојачања матрице на основу дозвољеног специфичног притиска су:

- $p \leq 1000$ МПа – није потребно ојачавање матрице
- $p \leq 1600$ МПа – потребан један ојачавајући прстен
- $p \leq 2200$ МПа – потребна два ојачавајућа прстена
- $p \geq 2200$ МПа – потребна три ојачавајућа прстена

Препорука за одређивање спољашњег пречника матрице и димензија ојачавајућих прстенова су:

- матрица без ојачавајућих прстенова
 $D_1 = (2 \div 3) \cdot D_0$
- матрица са једним ојачавајућим прстеном
 $D_1 = (1,8 \div 2) \cdot D_0; D_2 = (2 \div 2,5) \cdot D_1$
- матрица са два ојачавајућа прстена
 $D_1 = 1,2 \cdot D_0; D_2 = 1,6 \cdot D_0; D_3 = 2,2 \cdot D_0$

Препоручене вредности димензија матрице и ојачавајућих прстенова су приказане у табелама 2.1 и 2.2. Димензије матрице и ојачавајућих прстенова такође су стандардизовани и препоруке димензија се могу такође бирати према тим стандардима [4].

Табела 2.1: Димензије за једноструко ојачање [4]

D_0	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
D_1	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
D_2	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280

Табела 2.2: Димензије за двоструко ојачање [4]

D ₀	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
D ₁	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112
D ₂	44	55	66	77	88	100	110	121	132	143	154
D ₃	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210

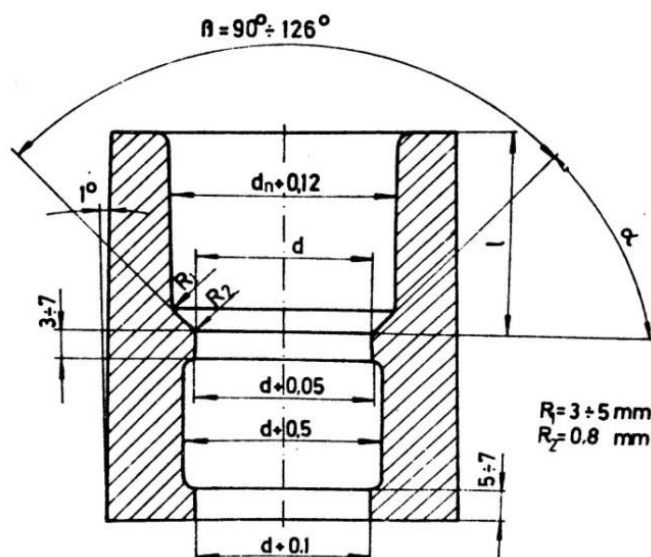
Постављање ојачавајућих прстенова на матрицу се изводи помоћу једног од три могућа начина:

- У хладном стању, навлачењем прстена на матрицу помоћу притиска. У овом случају, вредности преклапања су мање, а површине између којих се остварује преклоп су израђене под конусом ($1^{\circ} \div 2^{\circ}$), ради лакшег монтирања. Из истог разлога, површине се такође и подмазују.
- Загревањем прстена на температури од $400 \div 500^{\circ}\text{C}$. Овим поступком се остварује ширење прстена при загревању и на тај начин могуће је монтирање на матрицу без притиска, а такође није потребна израда површина под конусом. Овим поступком могуће је ојачавање матрице са већим вредностима преклапања између спољашњег пречника матрице и унутрашњег пречника прстена, чиме се постижу већи преднапони.
- Хлађењем матрице на -80°C . Овај поступак је сличан поступку загревањем, постижу се слични ефекти, с тим што се у овом случају при хлађењу матрице материјал скупља и на тај начин зазор између прстена и матрице прелази у зазор и могуће је лако монтирање прстена на матрицу.

Враћањем температуре материјала на собну (након загревања или хлађења) остварују се преднапони супротног смера од напона који се јављају приликом деформисања обратка унутар матрице и на тај начин смањује се дејство напона на материјал матрице. Препоручене вредности преднапона у матрици приликом деловања ојачавајућих прстенова, требало би да се налазе у границама од $600 \div 700$ МПа, како би се успешно савладали притисци у матрици приликом обраде [4].

При монтажи ојачавајућих прстенова на матрицу, постоји препорука за редослед којим се монтирају прстенови. Постављање прстенова се врши тако што се прво прстен највећег пречника поставља на следећи прстен мањег пречника, па се затим заједно постављају на матрицу.

Код истосмерног истискивања ојачавање матрице исто је као и код супротносмерног истискивања. Један од могућих конструкционих облика матрице за истосмерно истискивање приказан је на слици 2.13.



Слика 2.13 Матрица за истосмерно истискивање [4]

У општем случају, исти облик матрице се користи и за пуне и за шупље делове. Угао β (слика 2.13) се креће од $90^\circ \div 130^\circ$. Препорука, до које се дошло емпиријски, је да је оптимална вредност овог угла 126° , јер се тиме истовремено смањује деформациона сила и постиже већа трајност алата. Угао β , као и радијуси заобљења (R_1 и R_2) су веома важни за конструкцију матрице и потребно је изабрати њихове оптималне вредности, јер омогућавају лакше течење материјала, нарочито при већим степенима деформације. Са становишта калибрирајућег појаса, потребно је димензионо задовољити два супротна захтева. Да би се смањило трење, калибрирајући појас треба да буде што ужи, а да би се постигла већа трајност алата, калибрирајући појас треба да буде што шири. Треба изабрати оптималну вредност, која се креће од $3 \div 7 \text{ mm}$, како би оба захтева била у прописаним границама. Када се израђују делови веће дужине, у алату може бити предвиђено и неколико калибрирајућих прстенова чије се ширине крећу у границама од $4 \div 8 \text{ mm}$ [4].

3. ПРИНЦИПИ ИНФРАЦРВЕНЕ ТЕРМОГРАФИЈЕ

Температура је једна од седам основних физичких величина и представља степен загрејаности неког тела. Постоје бројне методе и различити уређаји за мерење температуре, а у суштини основна подела је на контактне и бесконтактне. Контактном мерењу температуре врши се разним термометрима и сондама, код којих долази до узајамног деловања тела различитих температура што доводи до њиховог изједначавања. На основу промена на термометру које се упоређују са калибрационим величинама долази се до читавања вредности мерења.

До бесконтактних метода мерење температуре дошло се због немогућности мерења температура у одређеним случајевима класичним контактним методама. Суштина ових метода базира се на чињеници да сва тела у простору зраче на температури изнад апсолутне нуле. Мерењем њиховог зрачења омогућује се бесконтактно мерење температуре. Величина зрачења зависи од карактеристика материјала који га емитује, као и од утицаја околине у којој се посматрано тело налази.

Инфрацрвена термографија је бесконтактна метода мерења температуре која открива интензитет инфрацрвеног зрачења који емитује посматрани објекат. Примена инфрацрвене термографије започела је као и многе друге технолошке иновације првенствено у војне сврхе (један од примера је за потребе снимање терена из авиона током другог светског рата). Даљим развојем технологије омогућило се да инфрацрвене камере почну да се користе и у комерцијалне сврхе. У наставку мастер рада биће описане методе практичне примене термовизијске камере на примеру процеса обраде метала деформисањем.

3.1 *Fluke Ti400* – Инфрацрвена камера

Fluke Ti400 Thermal Imager је ручна инфрацрвена (термовизијска) камера високих перформанси, која има веома широку практичну примену, како у индустрији (кроз превентивно и друге видове одржавање), тако и у другим гранама привреде као што је грађевинарство (дијагностика зграда, праћење загрејаности струјних инсталација, откривање цурења гаса...). У основи представља уређај за бесконтактно мерење температурног зрачења, који поседује високо квалитетни *LCD* екран осетљив на додир.



Слика 3.1 *Fluke Ti400* термовизијска камера [5]

Камера снимљене фотографије и видео записе може да сачува у своју меморију, одговарајућег капацитета, на меморијску картицу, *USB* уређај или директно пренесе на *PC* рачунар или мобилни уређај. Како би се фотографије и видео записи прегледали и обрађивали, потребно је инсталирати специјализовани *SmartView* софтвер. На уређају је инсталирана и *FlukeConnect* апликација, коју је могуће поставити и на мобилном телефону (слика 3.2).



Слика 3.2 Повезивање са мобилним телефоном

3.1.1 Основне карактеристике термовизијске камере *Ti400*

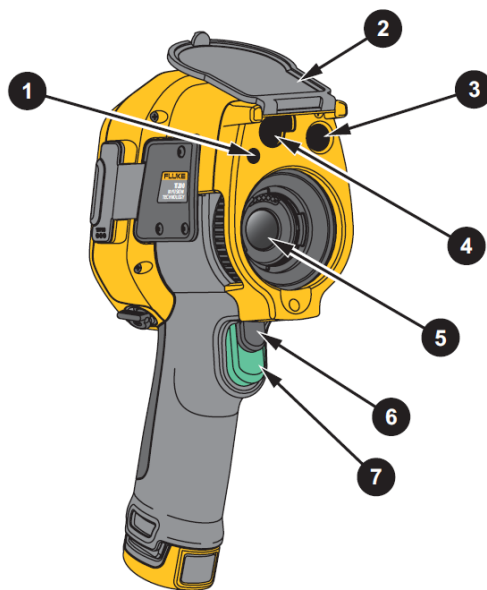
У основне карактеристике термовизијске камере *Ti400* спадају [5]:

1. Напредни ручни (мануелни) фокус;
2. *LaserSharp* – систем аутоматског фокуса;
3. *IR-Fusion Technology* (приказивање слика): *Visible, Picture in Picture* (слика у слици), *Full Screen IR Autoblend* (унапред постављен проценат);
4. Могућност коментарисања слика (*IR-PhotoNotes*), звук (глас), текст;
5. Бежично повезивање (*WiFi, Bluetooth, FlukeConnect, CNX*), *HDMI* повезивање;
6. *SmartView* софтвер, који може да приказује видео записе, да врши даљинско управљање операцијама;
7. Инфрацрвени спектрални опсег од $7,5 \mu m$ до $14 \mu m$;
8. Снимање ИЦ видео записа брзином од 20 fps (9 fps за слике у *refresh* режиму);
9. Ласер таласне дужине 650 nm и максималне излазне снаге мање од 1 mW ;
10. Литијум-јонска батерија са могућношћу 3 до 4 сата непрекидног рада.
Потпуно пуњење батерије траје око 2,5h на температури од 0°C до $+40^{\circ}\text{C}$;
11. Камера индустријских перформанси од $5,0 \text{ MP}$; *LCD* Екран осетљив на додир, резолуције 320×240 ($76\,800$ пиксела);
12. Режим за уштеду енергије;

13. Отпорност на падове са висине до 2 m;
14. Могућност мерења температуре од -20°C до +1200°C, са тачношћу од $\pm 2^\circ\text{C}$;
15. Поседује сопствену меморију од 4 GB, као и слот за Micro SD меморијску картицу од ≥ 4 GB на коју се може сачувати велики број слика, различитих формата;
16. Предвиђена температура за складиштење уређаја је од -20 до +50°C, чак и до 12 000 m надморске висине;
17. Уређај је способан да обавља своју функцију на температурама од -10°C до +50°C, на надморској виси до 2000 m, и у условима где се вредност релативне влажности ваздуха креће у распону од 10% до 90%.
18. Радиометријске ИЦ слике се могу експортивати у следећим форматима: .bmp, .gif, .jpg, .png и .tiff;
19. Креирање видео записа који се могу прегледати путем *SmartView-a*, *Windows Media Player-a*, *Quicktime-a*, и преко уређаја, као и снимање звука поред видео записа.

3.1.2 Основни елементи, додатна опрема и функције Fluke Ti400

На слици 3.3. приказани су основни елементи са предње стране уређаја:



Слика 3.3 Предња страна уређаја

На предњој страни уређаја налазе се [5]:

1. LED батеријска лампа;
2. Поклопац објектива;
3. Објектив визуелног светла камере;
4. Ласерски показивач/мерач растојања;
5. Објектив инфрацрвене камере;
6. Секундарни окидач;
7. Примарни окидач.

На слици 3.4. приказани су основни елементи са задње стране уређаја:



Слика 3.4 Задња страна уређаја

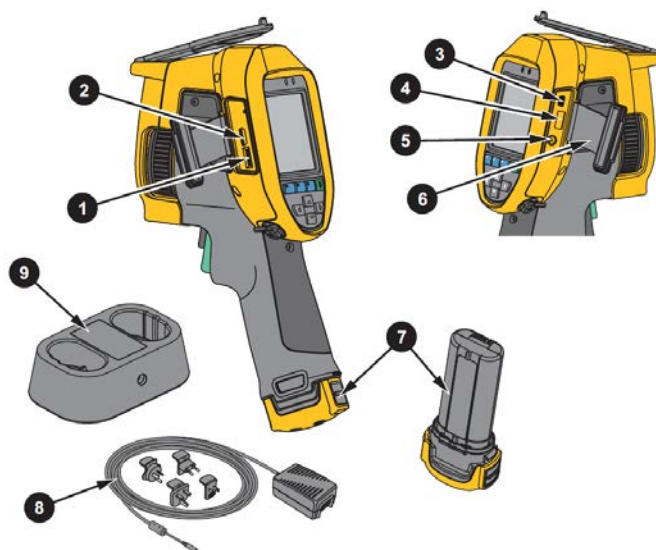
На задњој страни уређаја налазе се [5]:

1. Микрофон;
2. Звучник;
3. LCD екран осетљив на додир;
4. Командна табла;
5. Трака за руку;
6. Мануелни фокус.

Помоћу LCD екрана осетљивог на додир најлакше се долази до најчешће коришћених подешавања уређаја. Екран има позадинско осветљење за рад у слабо осветљеним просторијама. На екрану се такође могу видети разне информације, као што су: приказ пуњења, датум, време, циљана температура (у Фаренхајтима, Целзијусима и Келвинима).

Командна табла се користи за промену параметара или одабир функција и опција.

На слици 3.5 су приказани основни конектори инфрацрвене камере *Fluke Ti400*.



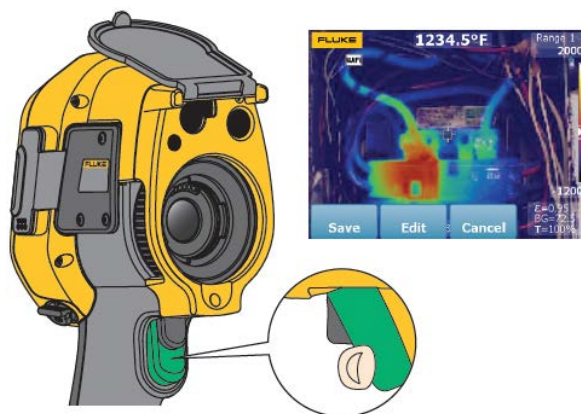
Слика 3.5 Повезивање уређаја *Ti400* [5]

Уређај садржи следеће конекторе [5]:

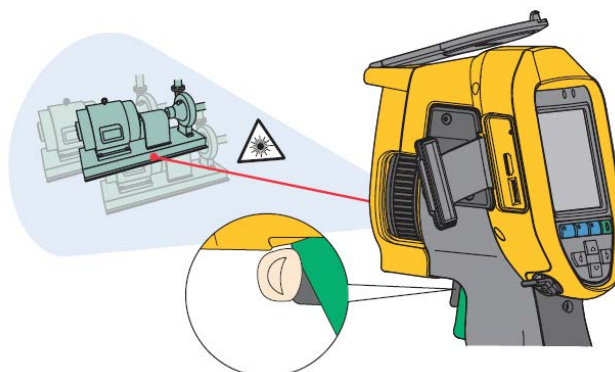
1. Слот за MicroSD меморијску картицу;
2. HDMI конектор;
3. USB конектор за кабл;
4. USB конектор за меморијску картицу;
5. Прикључак за АС пуњач;
6. Поклопац конектора;
7. Литијум-јонска SMART батерија;
8. Напајање наизменичном струјом са универзалним адаптером;
9. Двострука база за пуњење батерија [5].

Уређај поседује дводелни окидач, зелени примарни и мањи црни секундарни. У стандардном режиму рада (када је видео искључен), користи се примарни окидач да би се слике снимиле, а затим сачувале и уредиле (слика 3.6). У режиму снимања видео записа, помоћу примарног окидача врши се покретање и заустављање видео записа.

Секундарни окидач управља системом аутоматског фокусирања (*LaserSharp*-системом), као и ласерским системом за мерење удаљености до посматраног објекта (слика 3.7).



Слика 3.6 Сликање (снимање) притиском примарног окидача



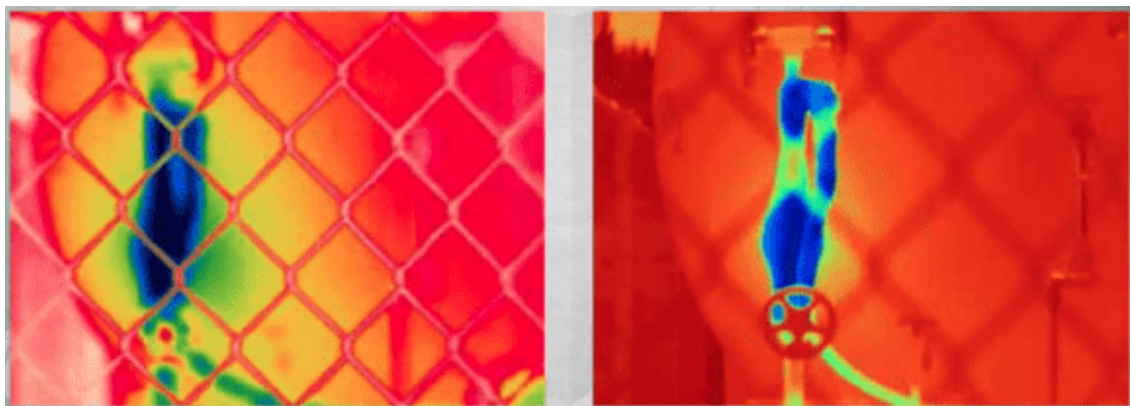
Слика 3.7 *LaserSharp* систем аутоматског фокусирања и ласерски систем мерења растојања до објекта [5]

Минимално растојање термалне камере за адекватно фокусирање неког објекта је око 15cm. Приликом аутофокусирања неког објекта на доњем делу дисплеја уређаја приказује се растојање до посматраног предмета (слика 3.8).



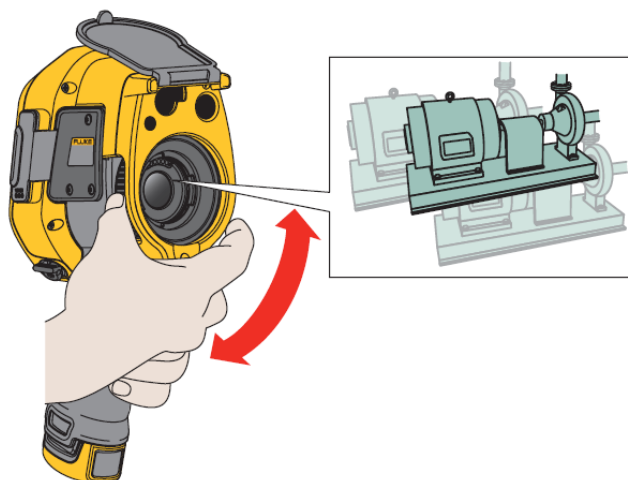
Слика 3.8 Пример аутофокусирања

Ласерски показивач налази се паралелно са инфрацрвеном сочивом. У аутоматском режиму тачка ласерског показивача налази се непосредно изнад ознаке средишње тачке на екрану. У неким случајевима лакше је визуелно погледати поред екрана како би се ласером детектовао објекат који се посматра. На десној страни слике 3.9 уочава се значајна предност примене аутофокусирања.



Слика 3.9 Приказ без фокуса (лево) и са аутофокусирањем (десно)

Поред аутоматског начина фокусирања, могуће је и ручно подешавати фокус што се може постићи изоштравањем фотографија и видео снимака чиме се остварује значајно бољи квалитет. На слици 3.10 приказан је поступак ручног фокусирања.

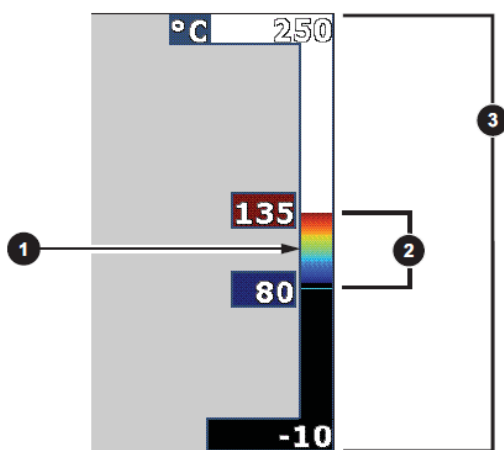


Слика 3.10 Начин ручног фокусирања

Свим термовизијским камерама је потребно одређено време за загревање уређаја како би се остварила тачност мерења температуре и најбољи квалитет слике. Време загревања може се разликовати у зависности од модела и услова околине. Иако је у већини случајева довољно време загревања уређаја од 3 до 5 минута, препорука је да се сачека период од 10 минута како би се остварили што прецизнији резултати мерења.

Уколико се термална камера у току рада премести у друго окружење у којем је различита температура околине, пре настављања процеса потребно је сачекати одређени период за прилагођавање уређаја на промењену температуру.

Уређај користи различите боје или сиве нијансе за приказ нивоа температуре унутар видног поља термалне камере. Постоје две опције помоћу којих уређај врши приказ слике, нивоа и ширине (*Level/Span*), а њихово подешавање се врши помоћу опције *Range*. *Level* приказује ниво температуре унутар укупног температурног опсега (*Total imager range*). *Span* представља распон температура на неком нивоу, које се могу приказивати у оквиру укупног опсега температура (*Total imager range*), а који је директно повезан са нивоом. Померањем нивоа помера се и распон [5].



Слика 3.11 Подешавање нивоа и ширине температуре [5]

1. *Level* (ниво);
2. *Span* (ширина или распон температура);
3. *Range* (укупни опсег уређаја).

Опција *Level/Span* (ниво/ширина) је аутоматски подешена у односу на дефинисане температуре у опцији *Range*. У случају када се уређај налази у оквиру унапред подешених вредности, а ниво/ширина су постављене на *Manual*, онда ниво помера распон температура према горе или доле унутар укупног опсега температуре.

3.2 Емисивност

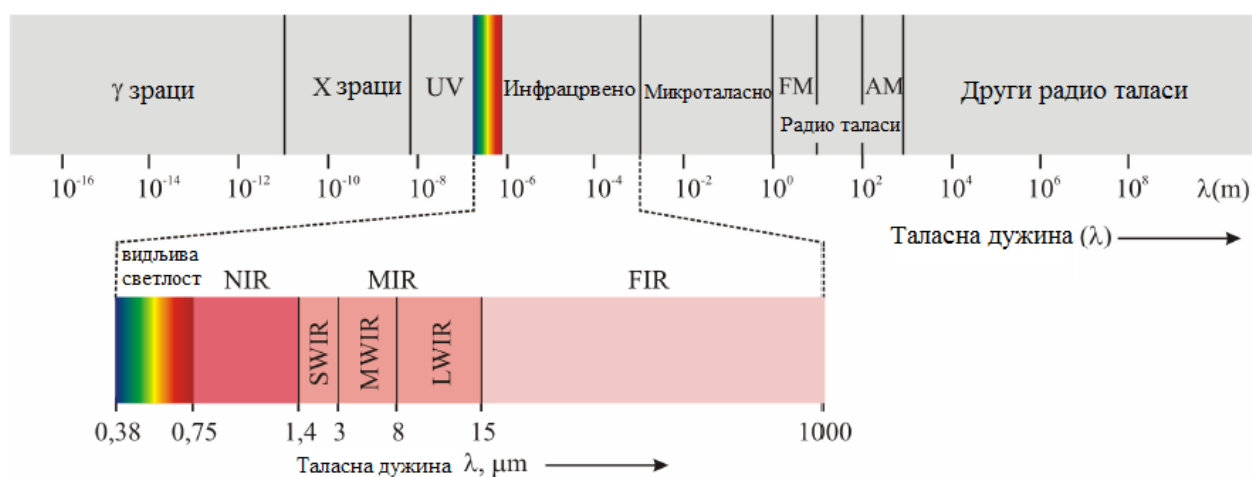
Сви објекти зраче инфрацрвеном енергијом. Количина енергије коју зраче заснива се на два основна фактора: температури површине предмета и емисивности површине предмета који се посматра. Уређај детектује инфрацрвену енергију са предмета и користи ове информације за процену његове температуре. Већина предмета попут обојеног метала, дрвета, воде, коже и тканине ефикасно зрачи енергију и лако је добити врло тачна мерења. За површине које ефикасно зраче енергију процењује се да је фактор емисивности 95% или 0,95. Ова процена је релевантна у највећем броју случајева. Међутим, овај принцип не делује на сјајним

површинама и необојеним металима. Такви материјали нису ефикасни у зрачењу енергије и класификовани су у материјале који имају малу емисију. За тачно мерење материјала код којих је мала емисија зрачења, неопходна је корекција емисије. Најлакша метода за корекцију емисивности је постављање уређаја на одговарајућу вредност емисивности, тако да он аутоматски израчунава тачну површинску температуру.

Електромагнетно зрачење се дефинише као енергија која се кроз празан простор или материјалну средину шири у облику електромагнетних таласа. То зрачење има својства таласа као што су рефлексија, рефракција, дифракција и интерференција.

Укупан опсег фреквенција или таласних дужина електромагнетног зрачења представља електромагнетни спектар. За спектар електромагнетних таласа се може рећи да је непрекидан и неограничен (унутар њега нема празнина), а таласна дужина зрачења може бити произвољно велика. Што је таласна дужина краћа, то је фреквенција зрачења виша, а његова енергија већа [7].

На слици 3.12 приказан је електромагнетни спектар.



Слика 3.12 Спектар електромагнетног зрачења [8]

Електромагнетни спектар се протеже од таласа велике таласне дужине (ниске фреквенције) до оних са кратком таласном дужином (високом фреквенцијом), а чине га, поређани по расту фреквенције, односно паду таласне дужине [7]:

1. Радио-таласи;
2. Микроталаси;
3. Ифрацрвено зрачење;
4. Видљива светлост;
5. Ултраљубичасто зрачење;
6. Икс зраци или рендгенски зраци;
7. Гама зраци.

Инфрацрвено зрачење (IC) се у спектру електромагнетног зрачења налази између микроталасног зрачења и видљиве светлости, где покрива спектар таласних дужина од 0,75 μm до 1 mm. Овај опсег је могуће поделити у више региона, који су приказани у табели 3.1

Табела 3.1 Региони инфрацрвеног опсега електромагнетног зрачења [6]

Основни регион	Подрегион	Таласна дужина
БЛИСКО IC зрачење (<i>NIR – Near infrared</i>)		$0,75 \div 1,4 \mu m$
СРЕДЊЕ IC зрачење (<i>MIR – Mid infrared</i>)	Краткоталасно IC зрачење (<i>SWIR – Shortwave IR</i>)	$1,4 \div 3 \mu m$
	Средњеталасно IC зрачење (<i>MWIR – Midware IR</i>)	$3 \div 8 \mu m$
	Дуготаласно IC зрачење (<i>LWIR – Longwave IR</i>)	$8 \div 15 \mu m$
ДАЛЕКО IC зрачење (<i>FIR – Far infrared</i>)		$15 \mu m \div 1 mm$

Инфрацрвено зрачење или инфрацрвена светлост обухвата електромагнетно зрачење чије су таласне дужине веће од таласних дужина црвене светлости, а мање од таласних дужина електричних таласа.

Сва тела и објекти у зависности од температуре зраче инфрацрвени електромагнетни спектар, што је искоришћено за развој техника мерења температуре тела, посматрањем интензитета инфрацрвеног зрачења. Тако на пример, људско тело на нормалној температури зрачи на таласној дужини од $10 \mu m$. Инфрацрвено зрачење за људско око је невидљиво, док га је на кожи могуће осетити као топлоту, па се може назвати и топлотним зрачењем. Ово зрачење се просторе кроз вакуум или чист ваздух без икаквих губитака. Када зрачење погоди неки предмет или објекат, енергија зрачења буде апсорбована и при томе претворена у топлоту. Инфрацрвено зрачење има највеће топлотно дејство и из тих разлога се примењује код термичких извора.

Топлотна енергија коју емитује неко тело и пада на неко друго тело које се налази у пољу електромагнетних (топлотних) таласа првог тела, према закону о одржању енергије, биће једнака збиру апсорбоване (E_a), рефлектоване (E_r) и трансмитоване (E_t) тј. пропуштене енергије од стране другог тела.

$$E = E_a + E_r + E_t \quad (3.1)$$

Вредности енергија зависе од одговарајућих коефицијената чији је збир једнак јединици: коефицијента апсорбције (a), коефицијента рефлексије (r) и коефицијента трансмисије (t).

$$a + r + t = 1 \quad (3.2)$$

Ако је коефицијент апсорпције једнак јединици, тело има особину да апсорбује сву топлотну енергију која на њега падне. Такво тело се назива апсолутно црно тело. Ако је коефицијент рефлексије једнак јединици, тело има особину да одбије сву топлотну енергију која на њега падне. Такво тело се назива апсолутно бело тело. Ако је коефицијент пропуштања или трансмисије једнак јединици, тело има особину да пропусти сву топлотну енергију која на њега падне. Такво тело се назива апсолутно термопропустљиво тело.

У природи тела имају вредности коефицијената мање од јединице и називају се сива тела, тако да апсорбују мање енергије него што на њих падне. Карактеристика

којом се зрачење било ког тела упоређује са зрачењем црног тела назива се емисивност или коефицијент емисије " ε ".

Емисивност се дефинише као способност неког тела да емитује топлотну енергију и њена вредност се креће у опсегу од 0 до 1. Емисивност представља однос емисионе моћи неког тела и емисионе моћи црног тела на истој температури.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} \quad (3.3)$$

Коефицијент емисије неког тела првенствено зависи од врсте материјала и стања површине тела, а вредности коефицијената за најчешће примењиване материјале у пракси дате су у табели 3.2.

Табела 3.2 Вредности коефицијента емисије " ε " [9]

Материјал	Температура, °C	Коефицијент емисије ε , -
Алуминијум: полиран, ваљан елоксиран	20	0,04
	20	0,83 – 0,94
Азбест	0	0,78
Бакар: полиран оксидиран	100	0,05
	130	0,76
Бронза: полирана	80	0,1
Гвожђе: ливено јакo кородиранo	100	0,64
	20	0,69 – 0,96
Сребро: полиранo полиранo	230	0,02
	630	0,032
Гума	0	0,93
Бакелит	0	0,93
Никл (полиран)	230	0,07
Челик: сјајно углачан ваљан кородиран	150	0,128
	20	0,77
	20	0,85
Нерђајући челик: полиран оксидиран	100	0,07
	200	0,79
Волфрам	100	0,05
Боја: уљана боја нитроемајл	20	0,94
	20	0,85 – 0,95
Порцелан	80	0,1
Графит	80	0,1
Жива	80	0,1
Кварц	20	0,93
Дрво	20	0,8 – 0,9
Угаљ	80	0,1
Малтер и бетон	20	0,93
Опека	20	0,93
Снег	20	0,8
Лед	0	0,96
Папир и картон	20	0,8 – 0,9
Стакло	20	0,94

3.3 SmartView софтвер

SmartView представља моћни модуларни пакет софтверских алата за преглед, додавање белешки, уређивање и анализу инфрацрвених слика и видео снимака. Веома је једноставан за употребу и пружа врхунске перформансе анализе.

Приликом отварања програма појављује се основни прозор на којем се налази:

- *Title Bar* (насловна трака)
- *Menu Bar* (командна трака)
- *Tool Bar* (трака са алатима)

Title Bar се налази на врху прозора *SmartView* софтвера и садржи команде које омогућавају смањење, увећање или затварање основног прозора. *Menu Bar* се налази испод *Title Bar*-а и садржи низ падајућих менија који се користе за покретање многобројних функција софтвера. *Tool Bar* је лоциран одмах испод *Menu Bar*-а и на њему се налазе бројне контролне функције [9]:



- команда за отварање документа,



- команда за снимање активне слике,



- команда за снимање свих отворених слика,



- команда за уређење активне слике,

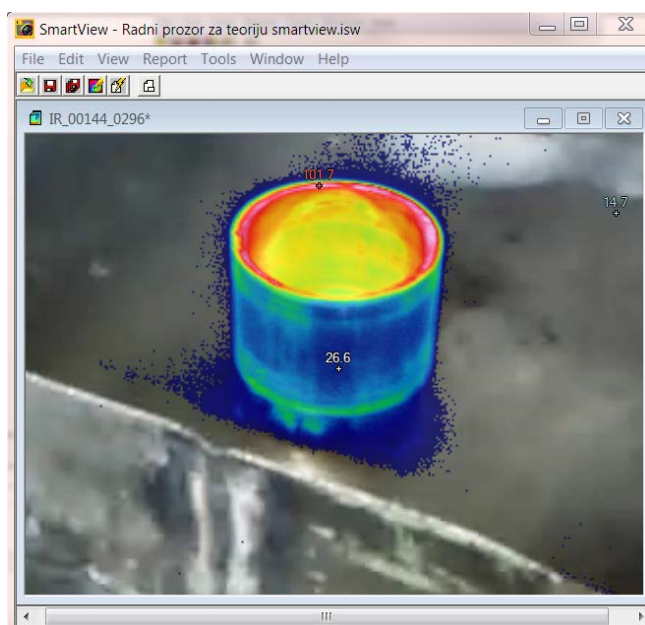


- команда за брзи извештај свих слика,



- команда за креирање белешки и њихово уређивање.

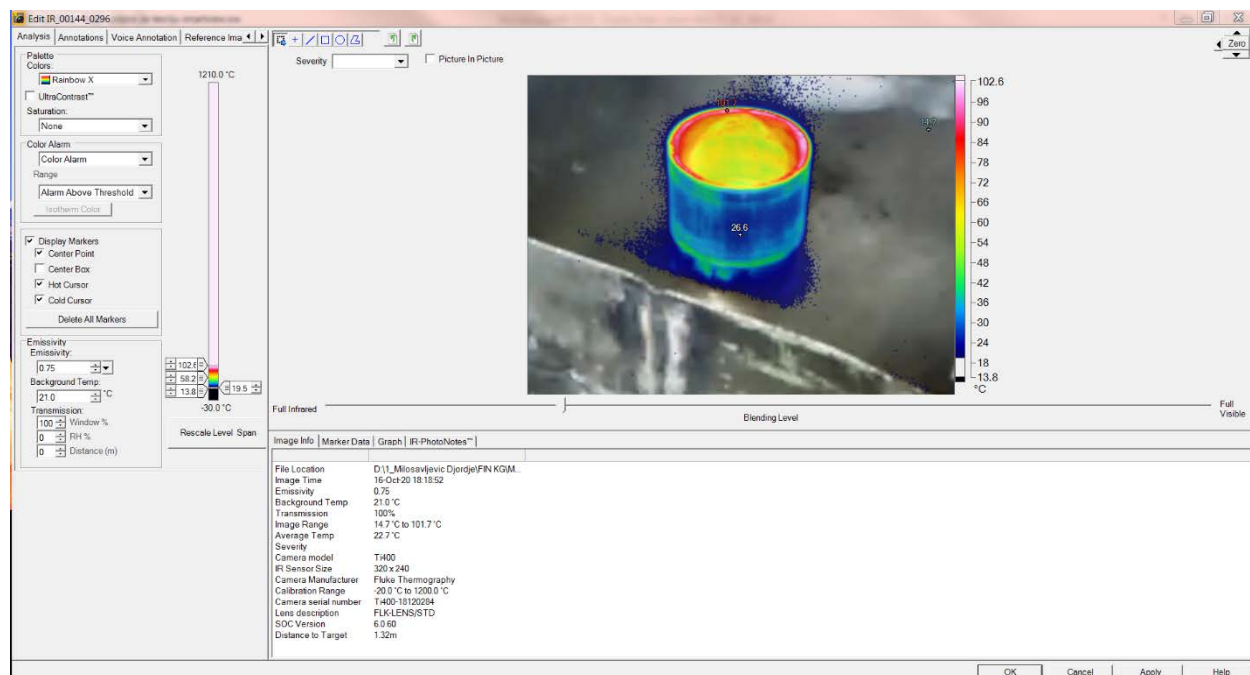
Одабиром инфрацрвене слике са локације на диску на којој је снимљена, иста се отвара у новом прозору, где је могуће истовремено отворити већи број фотографија, али само једна може бити активна. Када у току рада дође до било које промене на фотографији, у наслову слике се појављује звездица (*) која означава да је изворна слика претрпела одређену измену и да мора бити сачувана како се извршене промене не би изгубиле. Приликом отварања прве фотографије, на њој се могу видети само вредности минималне и максималне температуре објекта који се снима, као и температура околине (слика 3.13).



Слика 3.13 Основни прозор

Уколико се истовремено отвори већи број слика, могуће их је сортирати према њиховом називу или према времену када је слика креирана. У оквиру опције *Edit Preferences* могуће је вршити основна подешавања, као што су: одабир језика уноса, мерна јединица за растојање до посматраног објекта (метар или стопа), мерна јединица у којој ће се приказивати температура (степен Целзијус, Келвин или Фаренхајт) итд.

Одабиром опције *Edit image* или двокликом на активну слику улази се у нови прозор у којем се врши њена обрада (слика 3.14).



Слика 3.14 Радни прозор за обраду слике

Померањем курсора миша преко фотографије, може се видети температура у сваком пикселу на слици. Непосредно испод слике која се обрађује, налазе се картице: *Image info*, *Marker data*, *Graph*, *IR-PhotoNotes* (слика 3.15).

Image Info	Marker Data	Graph	IR-PhotoNotes™
File Location	D:\1_Milosavljevic Djordje...		
Image Time	16-Oct-20 18:15:52		
Emissivity	0.75		
Background Temp	21.0 °C		
Transmission	100%		
Image Range	14.7 °C to 101.7 °C		
Average Temp	22.7 °C		
Severity			
Camera model	Ti400		
IR Sensor Size	320 x 240		
Camera Manufacturer	Fluke Thermography		
Calibration Range	-20.0 °C to 1200.0 °C		
Camera serial number	Ti400-18120284		
Lens description	FLK-LENS/STD		
SOC Version	6.0.60		
Distance to Target	1.32m		

Слика 3.15 Детаљи активне слике

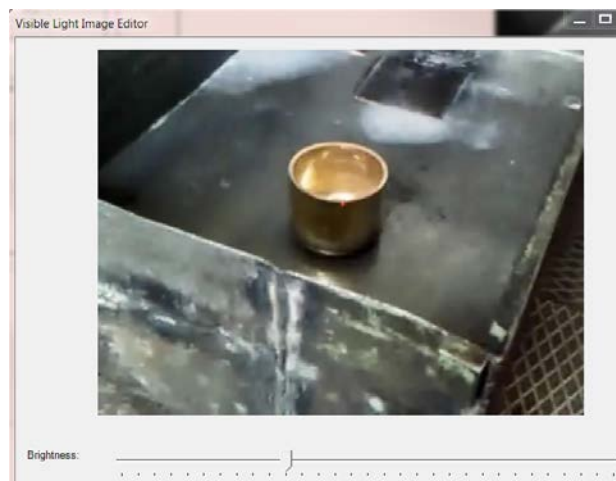
У оквиру картице *Image info*, могу се видети подаци о активној слици, као што су локација, време, температура окружења, врста и модел уређаја којом је слика снимљена, емисивност, опсег температурног интервала на слици, удаљеност камере до посматраног објекта као и многи други.

У картици *Marker data*, приказују се подаци са позицијом означене зоне

(централне, топле и хладне), као и појединачни подаци емисивности, максималне, минималне и просечне температуре као и њене јединице мере.

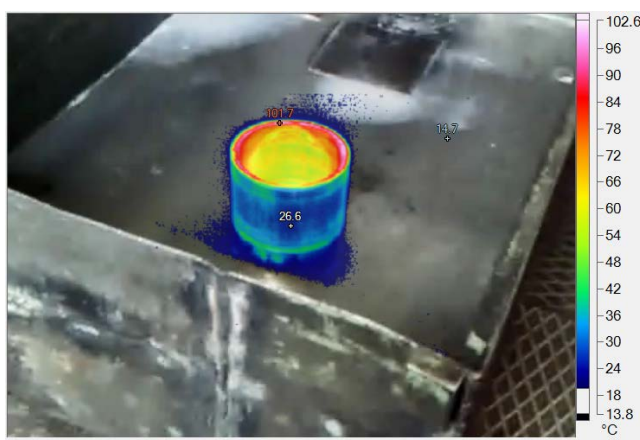
У картици *Graph* могу се приказати разни облици дијаграма и графикана (линијски, по „x“ и по „y“ - оси, у облику хистограма и 3D приказа), док се у картици *IR-PhotoNotes* може видети како изгледа изворна фотографија.

Десним кликом на активну слику, отвара се нови прозор са сликом у стандардном приказу где је могуће вршити подешавање осветљености (слика 3.16).



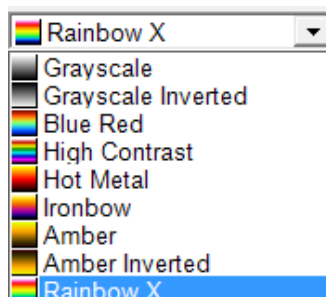
Слика 3.16 Стандардни приказ слике и подешавање осветљења

У оквиру активног прозора маркирањем опције *picture in picture* (слика 3.17), може се видети приказ инфрацрвене фотографије у реалном окружењу.



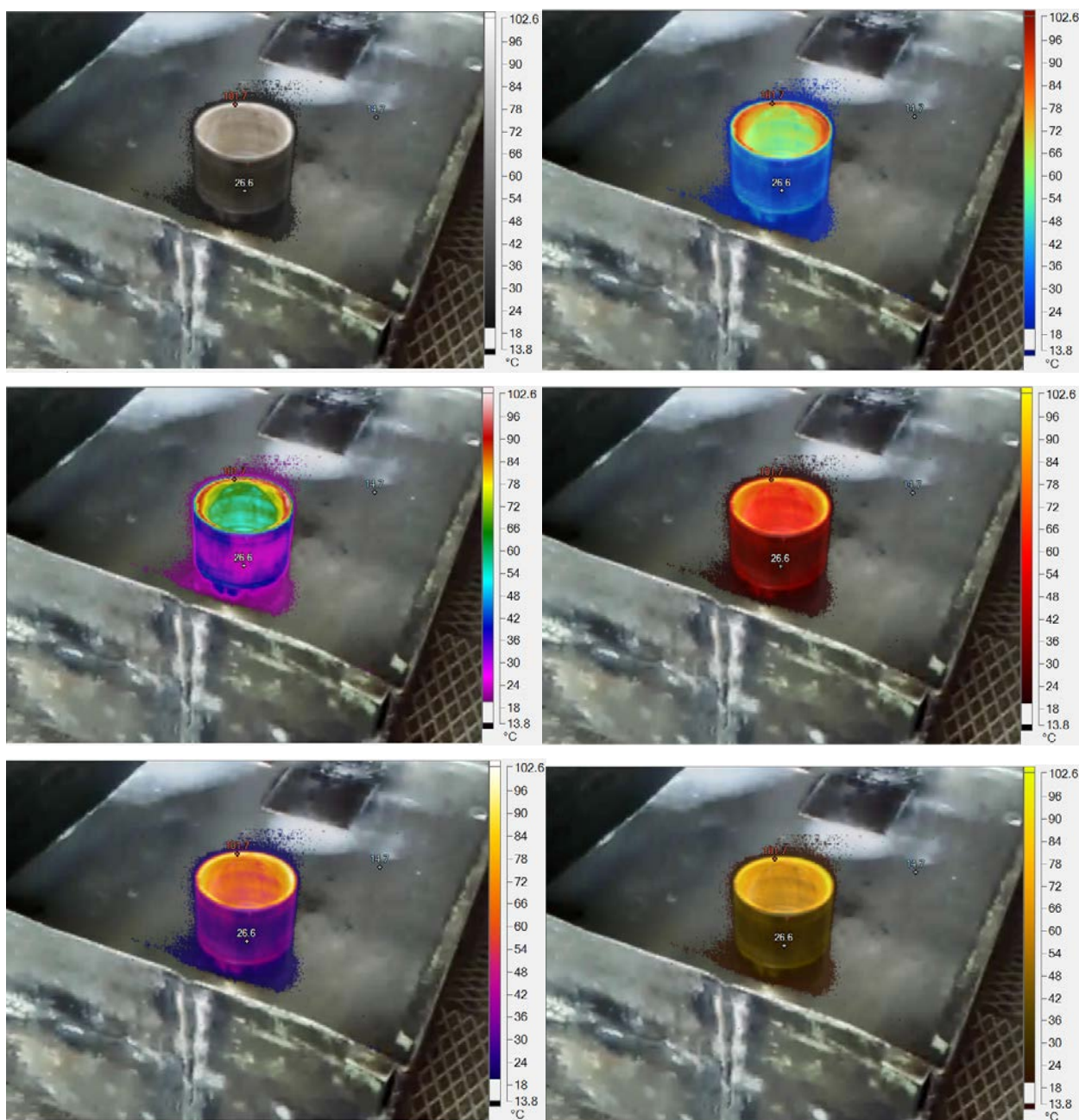
Слика 3.17 Опција *picture in picture*

На левој страни радног прозора, унутар опције *Analysis*, налазе се основне опције које се користе за графичко уређивање активних фотографија. Прва од њих је опција *Palette*, у оквиру које се могу одабрати разне палете боја за приказ сваке слике.



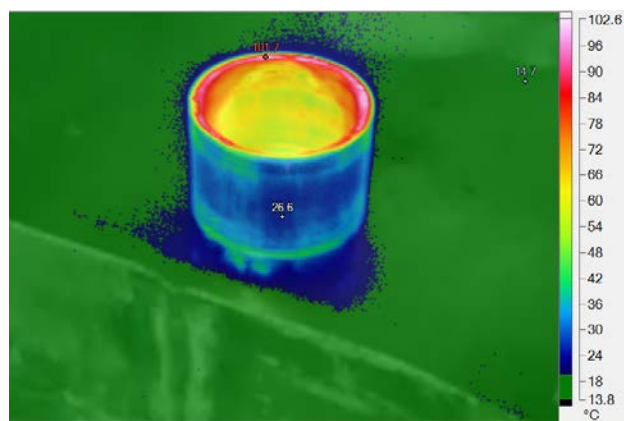
Слика 3.18 Прозор за одабир палете боја

Избором жељених опција са палете боја могу се видети различити прикази, што је илустровано на слици 3.19.



Слика 3.19 Примена различитих палета боја на посматраном обратку који је снимљен у компанији Слобода

У општој научној терминологији, изотерме представљају криве линије које повезују тачке које имају исту температуру на термографској слици. У софтверу *SmartView*, опција *Isotherm* омогућава приказ слике која истиче све пикселе који имају температуру у одређеном температурном опсегу. Ови пиксели се приказују у једној боји тако да се истичу од остатка слике [7]. Опција *Isotherm* се налази у подменију функције *Color Alarm* и њеним одабиром отвара се могућност изоловања пиксела који се налазе изван подешеног температурног опсега, и на тај начин остатак слике мења боју. Конкретна боја се може изборно мењати. На слици 3.20 приказана је примена опције *Isotherm*.



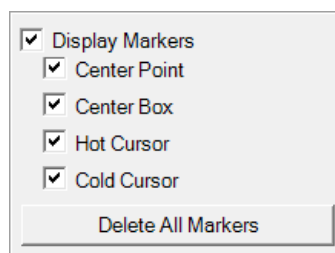
Слика 3.20 Приказ снимљеног објекта са опцијом *Isotherm*

Функција *Color Alarm* је напредни облик опције *Isotherm* која омогућава одабир циљног температурног подручја на којем ће се истаћи боје које настају селективним мешањем видљиве светлости и инфрацрвених слика (слика 3.21). *Color Alarm* је могуће поставити на одређени температурни опсег који желимо да истакнемо у односу на остатак температурног подручја. Температурни опсег се може подешавати избором температура које се налазе изнад или испод подешеног лимита, као и температурама које се налазе у одређеном опсегу или ван њега. Избор температура се поставља ручно - померањем стрелице курсора или уписивањем тачне температуре.

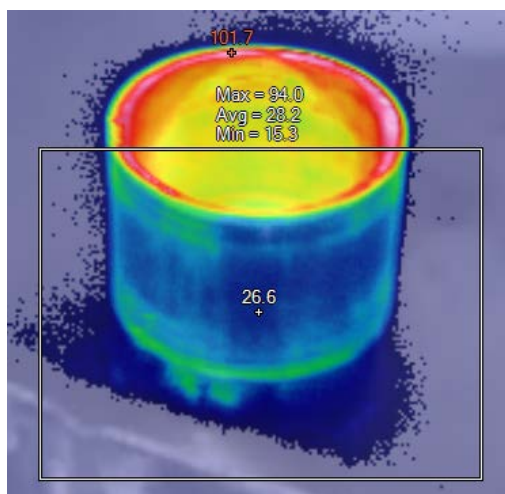


Слика 3.21 Приказ снимљеног објекта коришћењем функције *Color Alarm*

На активној инфрацрвеној слици могуће је примењивати одређене маркере помоћу којих је могуће приказивати одређена температурна подручја тачним одабиром зоне коју је потребно посматрати. Селектовањем опције *Display Markers* појавиће се сви чекирани маркери који могу приказати температуру у центру слике (*Center Point*), средини посматраног објекта (*Center Box*), потом место највише (*Hot Cursor*) и најниже (*Cold Cursor*) температуре (слика 3.22). На слици 3.23 приказана је слика објекта са основним маркерима.



Слика 3.22 Приказ маркера



Слика 3.23 Инфрацрвена слика са основним маркерима

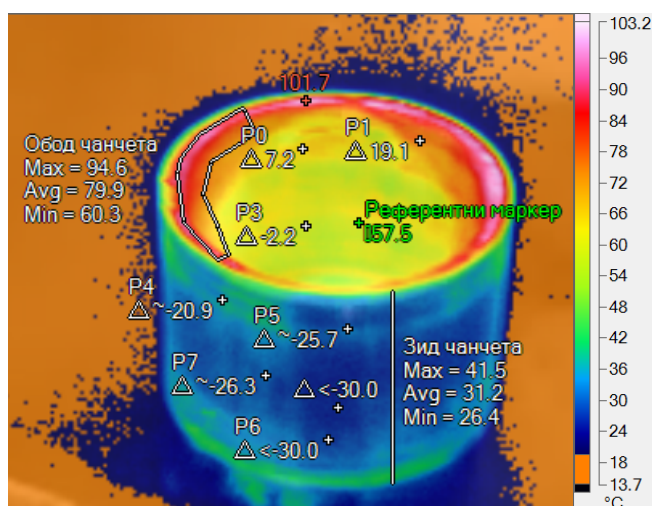
Маркери се могу користити у подручјима где је потребно приказати места на објектима чија је температура минимална, максимална или ако треба бити приказана у одређеном опсегу. Употребом маркера значајно се олакшава праћење критичних температура на објекту. Маркери се могу и мануелно уцртавати на инфрацрвену фотографију коришћењем неких од понуђених функција (слица 3.24) као што су:

- маркирање централне тачке,
- линијски,
- четвороугаони,
- елипсasti,
- многоугаони маркер.



Слика 3.24 Функције за цртање маркера

На слици 3.25 приказане су многобројне функције маркирања објекта.

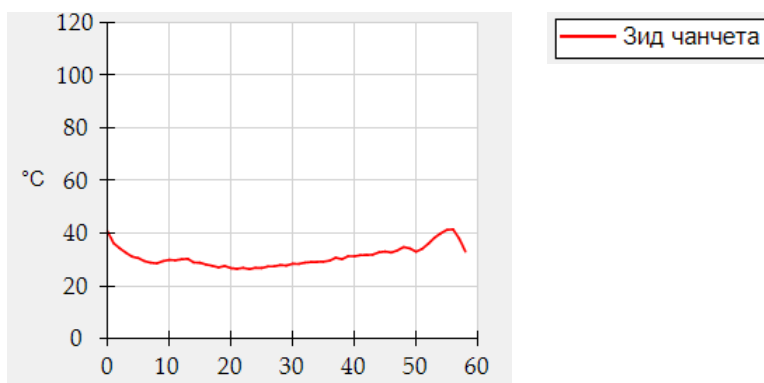


Слика 3.25 Опције маркирања објекта

У софтверу *SmartView* могуће је користити и функцију *Reference marker* помоћу које се означава референтна температура, а на осталим дефинисаним тачкама биће приказана одступања у односу на задату температуру. Тако се на пример на позицији

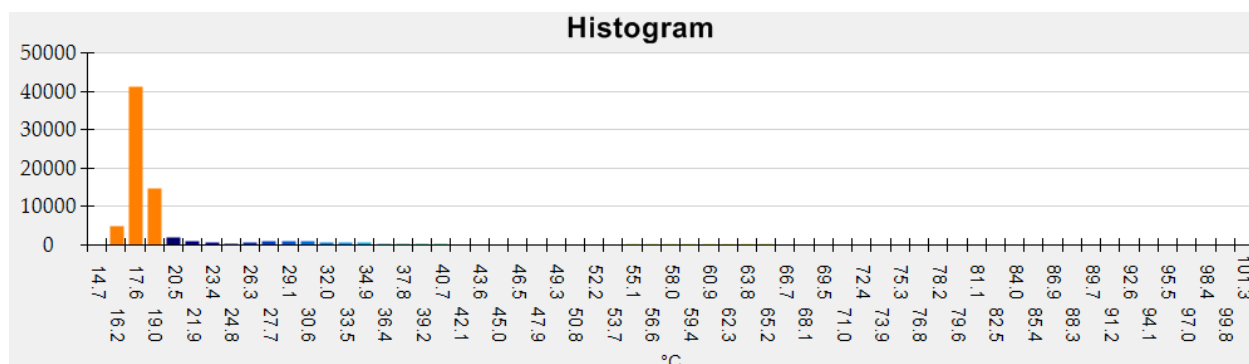
маркера *P1* (слика 3.25) може уочити да је његова температура $19,1^{\circ}\text{C}$ виша од референтне температуре.

Температуру је могуће приказати и помоћу дијаграма, дуж повучене линије одређене деонице на инфрацрвеној фотографији, која је приказана на слици 3.25, у спољашњем делу зида чанчета (снимљеног објекта). Дијаграм промене температуре у овој зони, оивиченој линијама, приказан је на слици 3.26.



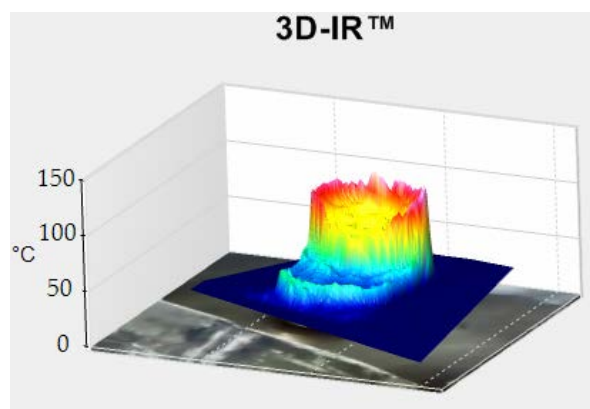
Слика 3.26 Дијаграм температуре у околини зида чанчета (снимљеног објекта)

У софтверу *SmartView* добијени резултати се могу приказати и графички. *Histogram* је графикон помоћу којег се графички интерпретирају резултати измерене температуре у односу на број пиксела на посматраној слици. На слици 3.27 приказан је Хистограм којим су представљене температуре на зиду чанчета.



Слика 3.27 Хистограм

3D-IR™ графикон приказује тродимензионалну слику расподеле температура на посматраном објекту. На *X* и *Y* оси садржана су места пиксела са дводимензионалне слике, док *Z* оса приказује температурне вредности које одговарају локацији пиксела са *X* и *Y* осе, као што је то приказано на слици 3.28 за мерени објекат.



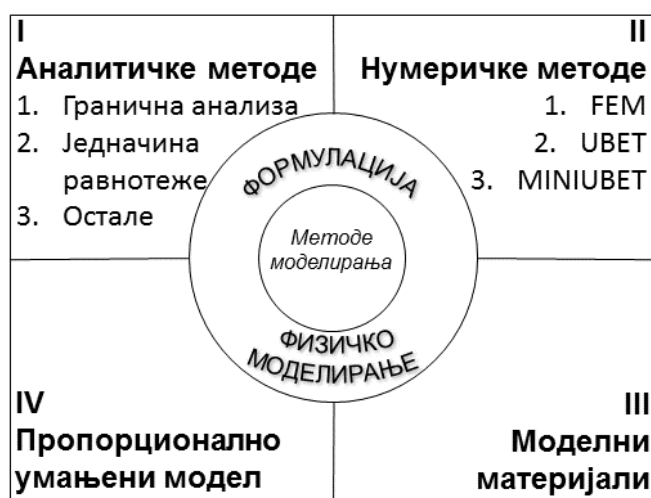
Слика 3.28 3D графички приказ температурног распона

4. НУМЕРИЧКЕ МЕТОДЕ ЗА СИМУЛАЦИЈУ ПРОЦЕСА ДУБОКОГ ИЗВЛАЧЕЊА

Нумеричке методе моделирања, у времену када је брзина пласирања крајњег производа купцу веома битна, представљају кључан фактор приликом развоја производа или његове компоненте, независно од тога да ли се он израђује неким од многобројних поступака пластичног деформисања или неком другом технологијом.

4.1 Методе моделирања

Све досадашње активности у области моделирања у процесима обраде метала деформисањем могу се сврстати у групе, целине или подврсте. Круг активности је подељен на математичку формулацију у моделирању проблема, која укључује аналитичке и нумеричке методе, и физичко моделирање посредством пропорционално смањеног модела и применом моделних материјала.



Слика 4.1 Класификација активности моделирања у ОМД [10]

Аналитичке методе су засноване на основним претпоставкама пластичности, помоћу којих се процеси поједностављују, како би се на лакши начин дошло до решења проблема, међутим иако та решења нису у потпуности поуздана, могу се примењивати у инжењерском пројектовању. У та решења спадају: метода клизања, метода једначина равнотеже и методе доње и горње процене.

Основна подела нумеричких метода се може сврстати у три групе [10]:

- Техника горње процене (*Upper Bound Elemental Technique, UBET*);
- Метода елементарних просторних кривих зона (*Spatial Elementary Rigid Region Method, SERR*);
- Метода коначних елемената (*Finite Elemental Method, FEM*).

Технику горње процене је увео Kudo 1960. тиме што је проширио аналитичку методу на општи елементарни облик запремине која се деформише. Основни приступ *UBET*-а је подела посматраног пресека на правоугаонике или троуглове на које се примењују методе горње процене. На овој методи је базирана већина софтвера који се баве анализом процеса обраде метала деформисањем.

Моделирање процеса у физичком смислу се изводи помоћу моделних материјала који се примењују да симулирају понашање реалних материјала, а у

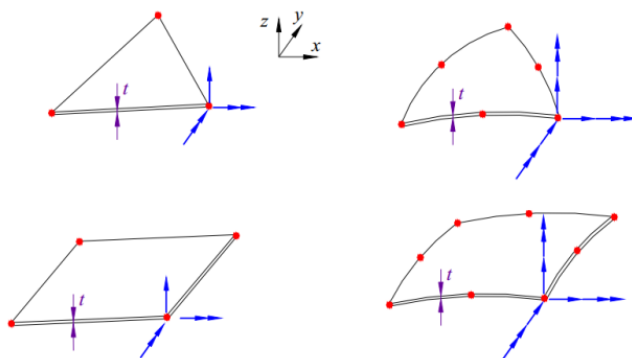
другом случају преко пропорционално умањених модела који се испитују у лабораторијским условима, применом знатно једноставније опреме и мањих алата при чему се користе адекватне размере како би се извршило поређење са основним процесом.

4.1.1 Метода коначних елемената

Метода коначних елемената (*Finite Elemental Method, FEM*) припада једној од најчешће коришћених метода нумеричке анализе у инжењерској пракси. Основна идеја методе коначних елемената представља физичку дискретизацију разматраног домена. Уместо посматрања бесконачних елемената диференцијално малих димензија врши се анализирање мањих подручја коначних димензија и коначни елемент.

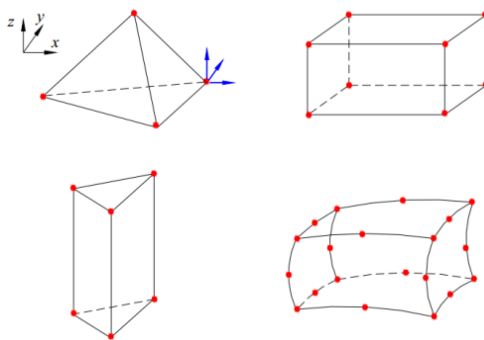
Из угла физичке интерпретације то значи да се посматрано подручје, као континуум са бесконачно много степени слободе, мења дискретним моделом мреже коначних елемената који имају коначан број степени слободе. Посматрано подручје се дели на коначан број мањих делова (коначних елемената) који су међусобно повезани у одређеном броју тачака које се називају чворови. Уколико се пође од претпоставке да се померања у било којој тачки коначног елемента могу приказати у зависности од померања у чворовима, у том случају се проблем своди на одређивање померања у чворовима чији је број коначан.

Коначни елементи се могу поделити на линијске, раванске и просторне (1Д, 2Д и 3Д). Основни дводимензионални или равански елементи имају оптерећење које делује у равни елемента. У такве елементе спадају троугаони и четвороугаони елементи (слика 4.2). Најједноставнији 2Д елементи имају чворове само у теменима елемента, док постоје и елементи са чворовима на средини страница елемента. Странице елемента могу бити праве и криве линије (изопараметарски елемент).



Слика 4.2 Равански 2Д елементи

Просторни коначни елементи се примењују за анализу тродимензионалних проблема где је потребно анализирати просторно напонско стање, а најчешће су у облику тетраедра и хексаедра. Основни тродимензионални елементи имају чворове у теменима, а могу имати праве и криве ивице, као у претходном случају (изопараметарски елемент). Остали елементи могу имати и унутрашње чворове, на срединама страница или у унутрашњости елемента. На слици 4.3 дат је приказ просторних 3Д коначних елемената.



Слика 4.3 Просторни 3Д коначни елементи

4.2 Улазни подаци за нумеричко моделирање процеса

За ефикасно моделирање (симулацију) процеса обраде метала деформисањем применом методе коначних елемената, неопходна је адекватна употреба улазних података за анализу. У најважније улазне податке спадају:

- Карактеристике и понашање материјал;
- Описивање контактних услова трења;
- Описивање топлотних процеса (нпр. генерисања и трансфера топлоте).

4.2.1 Особине и понашање материјала

Како би се добио модел који верно осликава реалне услове процеса производње, приликом нумеричког моделирања методом коначних елемената од изузетног значаја је тачност уноса података у софтвер везаних за материјал који се обрађује. У те податке спадају врста материјала, хемијски састав, као и механичке карактеристике. У већини најчешће примењиваних софтвера углавном постоје већ креиране базе података са основним карактеристикама материјала, које је потребно изабрати. Међутим у случајевима када у бази материјала у софтверу није описан материјал који се користи у процесу, потребно је тестирати материјал и унети податке о њему у базу података. Да би се нови материјал креирао у бази, потребно је првенствено одредити његове криве деформационог течења. Ови тестови се изводе експериментално у лабораторијама, а углавном применом метода једноосног затезања, притискивања или увијања.

Код напреднијих софтвера, поред моделирања понашања материјала обратка могуће је анализирати напонска и деформациона поља у алату током процеса обраде. Да би се то извело потребно је алате посматрати као деформабилне, а не као круте. Током процеса обраде може доћи до еластичног ширења алата, што може довести до промена жељене геометрије обратка, као и до промена у геометрији алата. Из тог разлога је неопходно правилно дефинисање свих неопходних параметара понашања материјала обратка и алата.

4.2.2 Контактни услови трења и трансфера топлоте

У процесима обраде метала деформисањем трење има веома битну улогу у пластичном течењу материјала и одражава се на вредности деформација, напона, температура, али и деформационе силе процеса. Због тога је од изузетног значаја за моделирани процес, успоставити адекватан математички модел контактнoг трења и топлотних процеса.

Оснивачем науке о трењу сматра се *Charles Coulomb*. Трење представља отпор релативном кретању елемената у контакту и захтева утрошак одређене количине енергије за његово савладавање. Сила трења је основни параметар којим се квантифицира и мери процес трења. Поред ове величине за одређивање величине трења користе се, коефицијент трења и коефицијент утрошеног рада [11].

$$\mu = \frac{F_T}{F_N}; F_T = \mu \cdot F_N \quad (4.1)$$

где су:

μ - коефицијент трења

F_T - сила трења

F_N - спољашње оптерећење

$$\mu = \frac{W_T}{W_U}; \quad (4.2)$$

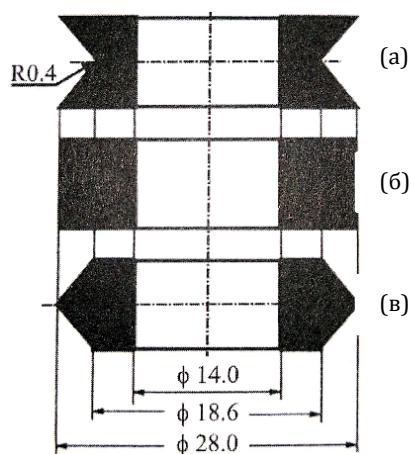
где је:

W_T – рад утрошен на трење

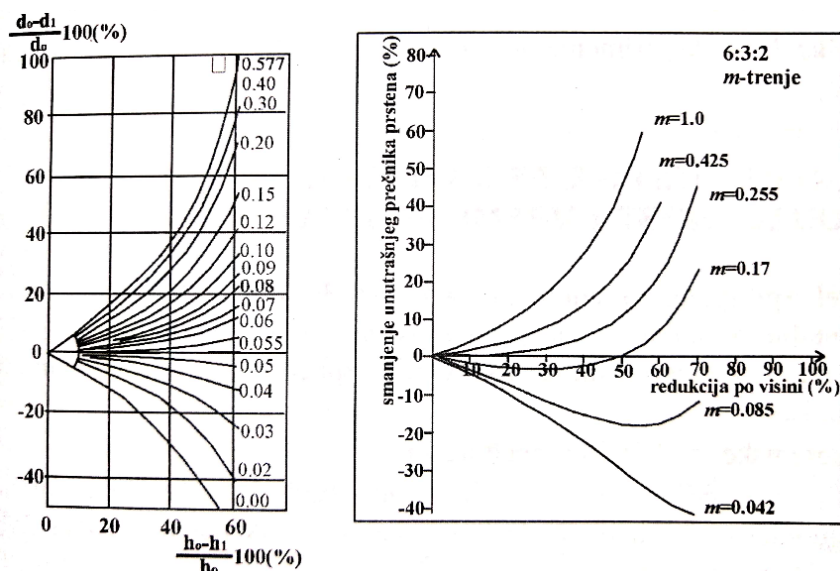
W_U – укупан рад

Како би се вредност коефицијента/фактора трења што прецизније дефинисала, неопходно је извршити неки од најчешће примењиваних тестова. Један од њих представља метода слободног сабијања прстена или такозвани *ring test*.

Наведена метода обухвата праћење промена које се јављају у оквиру унутрашњег пречника прстена који се сабија, а за које се сматра да представљају меру осетљивости на делујуће контактнo трење. Димензије прстена морају бити у односу $D:d:H = 6:3:2$, за стандардни тест (слика 4.4б). На слици су приказани облици прстена за алтернативне *ring-test* методе, које се примењују за одређивање фактора/коефицијента трења у условима малих (сл. 4.4а) и великих нормалних притисака (сл. 4.4в). Графичка зависност између деформације висине и деформације унутрашњег пречника, при различитим вредностима коефицијента/фактора трења, представљају калибрационе криве, на основу којих се може једноставно очитати вредност коефицијента/фактора трења. На слици 4.5 приказане су калибрационе криве аутора *Male Cocroft*, за одређивање коефицијента трења μ , и *Wanheim-Dancert* калибрационе криве за одређивање фактора трења m [10].



Слика 4.4 Геометрија 6:(4:)3:2 прстена за *ring-test* методу [10]



Слика 4.5 Калибрационе μ и m криве [10]

Након експерименталног одређивања коефицијента/фактора трења, потребно је добијене резултате имплементирати у математичком моделирању услова контактнoг трења у примењиваном софтверу. У софтверима се модел контактнoг трења може дефинисати аутоматски - преузимањем из библиотеке или задати ручно, уношењем фактора који је добијен експерименталним путем.

У оквиру софтвера *Simufact.forming* у ручном - мануелном дефинисању коефицијента могуће је одабрати један од четири основна закона трења [12]:

- *Coulomb* – ов (Кулонов) закон;
- *Shear friction law* - закон константног трења;
- Комбиновани закон трења;
- *IFUM*.

Кулонов закон трења описује линеарну зависност између тангенцијалног напона τ_R и нормалног напона σ_N , на основу чије пропорционалности се добија коефицијент трења μ , који се математички може описати као:

$$\tau_R = \mu \cdot \sigma_N \quad (4.3)$$

На слици 4.6 може се видети шематски приказ Кулоновог закона трења.



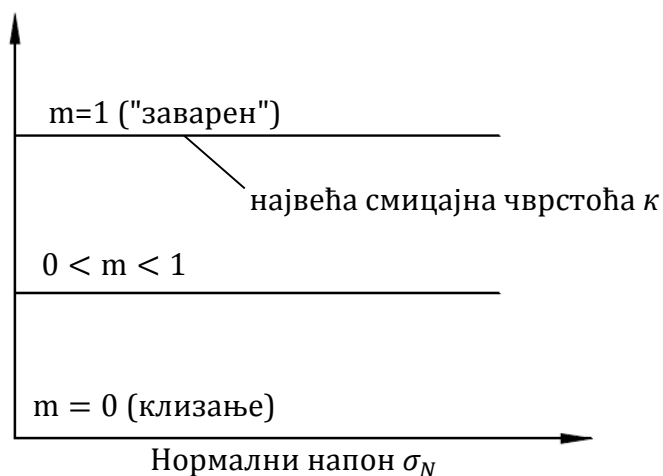
Слика 4.6 Шематски приказ Кулоновог закона трења [12]

Вредност коефицијента трења се може унети у опсегу од $0 \div 1$, док је препорука вредности коефицијента трења за процесе обликовања у интервалу од $0 \div 0.5$. Кулонов закон трења се најчешће примењује код услова сувог трења (код директног контакта међуслојева површина у додиру). У случајевима мешовитог трења се примењује веома ретко, док за трење код којег се у међуконтакту налази флуид није погодан.

Закон константног трења (*Shear friction law*) је развијен, како би се елиминисали недостаци Кулоновог закона трења. Овај закон описује смицајни напон као производ највеће смицајне чврстоће k деформисаног материјала и константног контактеног фактора трења m , где вредност $m=0$ описује стање без трења, а $m=1$ описује "заварен" контакт. Математичка формулација овог закона трења се може представити као [12]:

$$\tau_R = m \cdot k, \text{ где је } k = \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}} \quad (4.4)$$

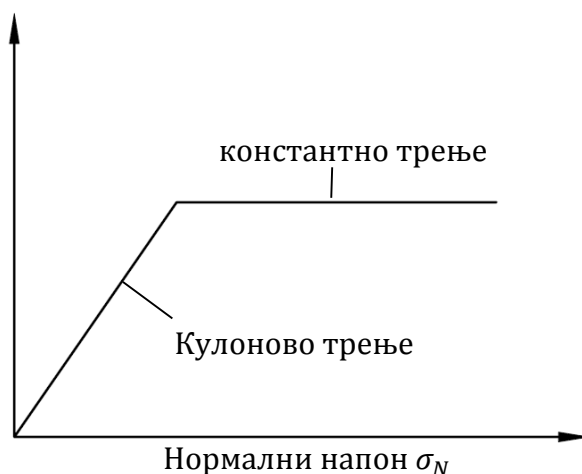
На слици 4.7 може се видети шематски приказ закон константног трења.



Слика 4.7 Шематски приказ смицајног закона трења [12]

Као и у случају Кулоновог закона, опсег фактора трења је у границама од $0 \div 1$. Овај вид трења се примењује у случајевима где материјал трпи високе нормалне напоне. Уколико су нормална напрезања мала, има лошу прецизност у прорачуну трења. Углавном се примењује у случајевима где се у међуконтактима налази флуид.

Комбиновани закон трења (*Combined friction law*), слика 4.8, представља комбинацију Кулоновог и смицајног закона трења. Код ниских нормалних напрезања прорачун трења се врши према Кулоновом закону.



Слика 4.8 Шематски приказ комбинованог трења [12]

Употреба комбинованог закона трења препоручује се за већину процеса обликовања и његова примена је пожељнија од *Кулоновог* или *смицајног* закона трења јер надокнађује њихове одређене недостатке.

IFUM закон трења посебно је развијен за поступке ковања у загрејаним калупима са добрим подмазивањем и стога се не користи за процесе хладног обликовања. Употреба *IFUM* закона трења је ограничена за остале поступке топлог обликовања где су услови подмазивања нестабилни. За разлику од других доступних закона трења, *ИФУМ* закон трења узима у обзир релативну брзину кретања између алата и обратка.

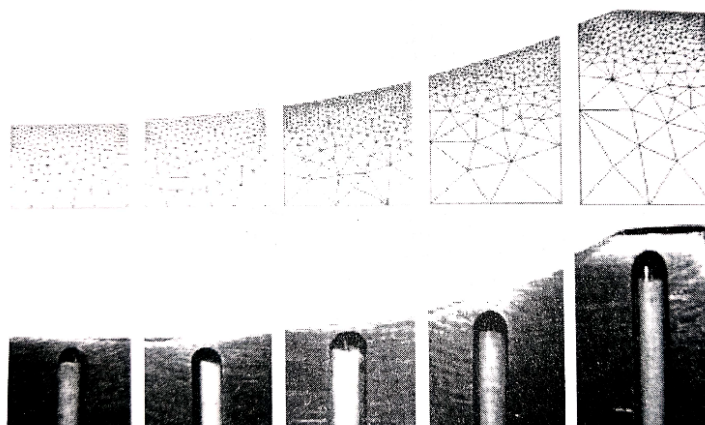
Поред ручног одабира неког од описаних закона, могуће је изабрати функцију аутоматског одабира закона трења у софтверу *Simufact.forming*. У овом случају трење се не дефинише уписивањем коефицијента, већ уношењем неког од понуђених фактора размере [12]:

- Лоше подмазивање (вредност фактор размере је 0,8);
- Средње (вредност фактор размере је 0,4);
- Добро подмазивање (вредност фактор размере је 0,1).

Који закон трења ће бити изабран у аутоматском режиму одређује врста процеса у којем се симулација одвија, као и врста материјала који се користи у процесу. У већини случајева примениће се комбиновани закон трења, јер је он уједно и најфлексибилнији.

Поред трења, температура метала и његова топлотна проводљивост у процесима обраде имају веома велики утицај на понашање материјала у току процеса. Због тога је веома битно, за материјал алата који се примењује у процесу симулације, познавати његов коефицијент топлотне проводљивости или другачије назван HTC^2 (*Heat Transfer Coefficient*).

Постоје бројне методе за одређивање коефицијента топлотне проводљивости, од којих је у процесима обраде метала најзаступљенији експеримент са постављањем термопарова унутар алата [10]. У алату се израђују отвори у које се постављају сензори термопарова који читавају вредност температуре у зони која је близу контакта са загрејаним алатом. Након добијања вредности температура, врши се њихово поређење са температурама добијеним нумеричком симулацијом са различитим дефинисаним вредностима HTC^2 коефицијента. Вредност коефицијента која је најприближнија температурама у експерименту узима се као релевантна за тестирани алатни челик и као таква се уноси у симулациони софтвер.



Слика 4.9 Експериментално-нумеричко одређивање HTC^2 коефицијента [10]

4.3 Опис програмског пакета *Simufact.forming*

Simufact.forming представља софтверски пакет развијен на бази методе коначних елемената и методе коначних запремина, који је намењен за симулацију и оптимизацију процеса обраде деформисањем. Као конзистентно унапређење дуго развијаних софтверских решења за симулације процеса *MSC.SuperForm* и *MSC.SuperForge* од *MSC.Software*-а, обе комплементарне технологије и софтверски приступи (*MSC.Dytran* и *MSC.Marc* солвер) су обједињени у један, моћан софтверски производ за симулацију производње [12].

Simufact.Forming софтвер је развијен за анализу и симулацију готово свих процеса пластичног обликовања материјала, независно од [12]:

- температуре процеса (хладна, топла или полу-топла обрада),
- коришћене машине (механичке пресе, чекићи или ексцентар пресе, машине за ваљање, машине за орбитално ковање, или ротационо извлачење),
- материјала обратка (нискоугљенични и легирани челици, алуминијум и други обојени метали, титанијум и легуре на бази никла),
- врсте процеса (ковање у затвореним алатима или истискивање, дубоко извлачење, слободно ковање, савијање или слободно обликовање, ваљање и профилно ваљање, чак и у обједињеним процесима и примени алата са еластичним ослањањем),
- типа анализе (запреминско обликовање или обликовање лима, процена пластичног течења материјала обратка и/или анализа оптерећења алата итд.) .

На слици 4.10 приказани су неки од примера примене софтвера *Simufact.Forming*.



Слика 4.10 Примери примене софтвера *Simufact.Forming* [12]

Иако је процена течења материјала у процесима обраде битна са аспекта раног откривања могућих дефеката, типа преклопа, набора или непопуњавања алата, додатна напонска анализа алата омогућава побољшање већ претходно оптимизованих технолошких процеса. Анализа алата увек води повећању његовог века, а тиме и смањењу трошкова производње.

Применом овог софтвера доприноси се [12]:

- значајном смањењу трошкова кроз бржи и ефикаснији развој процеса и производа,
- побољшаном концепту пројектовања алата кроз “виртуелно тестирање”,
- повећаном веку алата,
- повећаном искоришћењу машина,
- проширеном асортиману производа – делови сложеније конфигурације.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру експерименталних истраживања у овом раду су реализована експериментална испитивања материјала обратка за одређивање кривих ојачања, као и мерења температура алата и обратка у индустријским експериментима процеса дубоког извлачење дебљег лима са стањењем, у компанији Слобода А.Д. Чачак. Материјал припремка је $CuZn_{24}Si_{.45}$ (месинг са силицијумом) чији је хемијски састав приказан у табели 5.1.

Табела 5.1 Хемијски састав месинга са силицијумом

Хем.елемент	Cu	Pb	Fe	Sn	Al	Ni	P	Si
%	75,9	0,004	0,002	0,007	0,003	0,003	0,006	0,940

Месинг који се најчешће користи у процесима обраде деформисањем садржи веће количине цинка јер се његовим додатком до одређених граница способност пластичног деформисања повећава (максимална пластичност се постиже после легирања са 30% цинка) [13].

Присуство силицијума има за последицу повећање отпорности на општу и напонску корозију, а поред тога утиче веома повољно на механичке особине месинга, како на собној, тако и на повишеним температурама.

Испитивања на месингу са силицијумом показала су да се најбоље технолошке особине месинга добијају ако се силицијум додаје у месинг стехиометријског састава $CuZn$, односно у месинг са 75% Cu, као и да додатком силицијума преко 0,5% пластичност месинга опада, иако не постоји тумачење или експериментални доказ о поменутом негативном утицају силицијума [13].

5.1 Испитивање материјала

Тестирање материјала је реализовано на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу у Лабораторији за обраду метала деформисањем, на машини-кидалици *Zwick/Roell Z100* (слика 5.1) [14], намењеној за испитивање материјала једноосним затезањем.

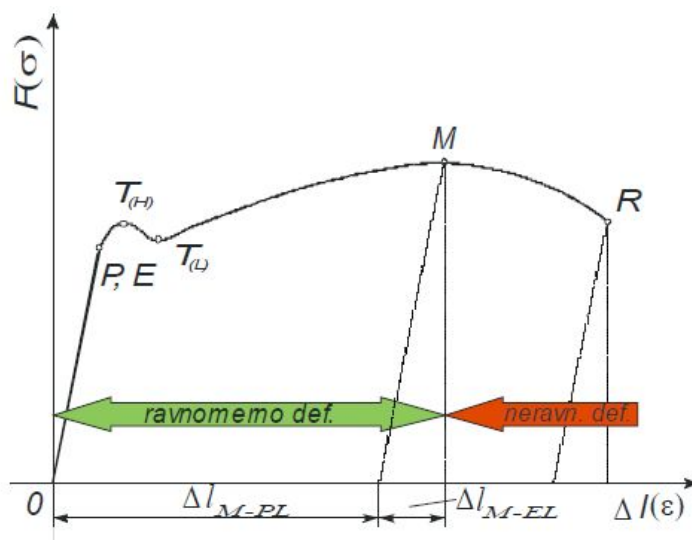


Слика 5.1 *Zwick/Roell Z100* машина за испитивање материјала тестом једноосног затезања [14]

5.1.1 Тест једноосног затезања

Тест једноосног затезања се заснива на излагању специјалне епрувете од лима, чистом једноосном затезању. Због тога, у епрувети долази до промене напонског стања, као и до појаве деформација структуре. Праћењем међусобне зависности промене одговарајућих карактеристика, могу се одредити параметри чије познавање је од суштинског значаја за извођење процеса пластичног обликовања [14].

Напони и деформације добијени овим испитивањем одређују се на основу дијаграма затезања који је приказан на слици 5.2, код којег се уместо напона на ординатној оси могу очитати вредности силе затезања, а уместо деформације на апсциси може пратити промена дужине епрувете (Δl).



Слика 5.2 Дијаграм зависности силе (напона σ) од издужења (деформације ε) [14]

На овом дијаграму су означене главне тачке у којима долази до важних промена и у којима се могу очитати вредности параметара за процес. Такође су разграничени делови везани за настанак еластичних и пластичних деформација, као и делови дијаграма који се односе на појаву равномерних и неравномерних деформација.

Пре почетка процеса испитивања, веома је важна правилна припрема епрувете, што се односи на: исецање из табле лима познавајући правац ваљања, примена стандардних димензија епрувете, припрема њених ивица, чишћење, остављање простора за прихватне делове за машину, правилно позиционирање епрувете како би се добило чисто једноосно затезање итд. Приликом одвијања процеса веома је важно правилно позиционирати и стегнути епрувете како би се обезбедило што тачније аксијално деловање силе затезања.

У зависности од правца исецања, добиће се приметно различита својства лима. Ова појава је везана за својство анизотропије лимова које се може изразити као раванска или нормална преко коефицијента нормалне анизотропије, односно " r " фактора.

При једноосном затезању епрувете у делу хомогеног напрезања, добијају се следећи показатељи [12]:

- Граница течења или напон на граници течења ($R_{eH}, R_{eL}, R_{p02}, R_p$ у MPa), (*YieldStrenght, FlowStress*);
- Затезна чврстоћа (R_m , у MPa) (*TensileStrenght*);

- Однос $\frac{R_p}{R_m}$;
- Процентуално издужење при разарању (A , %), (*Percentage Elongation After Fracture*);
- Процентуално издужење при максималној сили (A_g , %), (*Percentage Elongation After Maximum Force*);
- Контракција попречног пресека (Z , %), (*Percentage Reduction of Area*).

$$R_{eH}(R_{eL}) = K_0 = \frac{F_{T(H)}}{A_0}, \text{MPa} \quad (5.1)$$

$$R_{p0,2} = R_p = K_0 = \frac{F_{T0,2}}{A_0}, \text{MPa} \quad (5.2)$$

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}, \text{MPa} \quad (5.3)$$

$$A = \frac{l_R - l_0}{l_0} \cdot 100, \% \quad (5.4)$$

$$A_g = \frac{l_M - l_0}{l_0} \cdot 100, \% \quad (5.5)$$

$$Z = \frac{A_0 - A}{A_0} \cdot 100, \% \quad (5.6)$$

Тестом једноосног затезања такође се могу одредити: криве ојачања, експонент деформационог ојачања (n) и својства анизотропије.

После обављене припреме епрувете, машине, прибора итд. и пре извођења теста, треба измерити и забележити почетне вредности димензија епрувете. То се односи на: почетну мерну дужину (l_0), почетни пречник (d_0), или у случају лимова ширина епрувете и израчунавање почетне вредности попречног пресека (A_0). У току процеса, потребно је водити рачуна о положају епрувете, брзини деформисања, затим о дијаграму затезања, локализацији деформисања и лому епрувете [14]. Треба споменути да ако до прелома дође у трећини мерне дужине епрувете, добијени резултати се могу узети само као оријентациони.

После кидања епрувете, треба пажљиво саставити оба дела на месту лома и измерити дужину после разарања, односно израчунати промену дужине, као и измерити попречни пресек на месту локализације, односно разарања.

5.1.2 Одређивање кривих ојачања затезањем

Испитивање једноосним затезањем се стандардно користи за одређивање основних механичких карактеристика материјала: затезне чврстоће, границе течења, модула еластичности, издужења при разарању, контракције (сужења), попречног пресека итд. Паралелно са тим могуће је на основу криве затезања (слика 5.2) дефинисати криву ојачања [14].

Процес затезања се може поделити у две фазе. Граница је тренутак постизања максималне силе, тачка M на слици 5.2. У првој фази одвија се хомогено деформисање и влада једноосно напонско стање. Постоји један главни напон σ_1 уједно једнак еквивалентном напону σ_e према изразу: $\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$.

Док траје пластично деформисање еквивалентни напон је једнак деформационом отпору K . Дакле, од тренутка достизања границе течења (тачке $T_{(H)}$ или $T_{(L)}$) па до тренутка постизања максималне силе (тачка M) треба успоставити везу између силе затезања и стварног напона σ_1 који је једнак σ_e односно K [14].

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = \frac{F}{A_0} (1 + \varepsilon) = \frac{F}{A_0} e^\varphi = \sigma_e = K \quad (5.7)$$

Једноставност те везе омогућава услов о непроменљивости запремине током пластичног обликовања.

$$V_0 = V = \text{const.} \quad (5.8)$$

$$V_0 = A_0 l_0 = V = Al \quad (5.9)$$

$$\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon = e^\varphi = \frac{A_0}{A}; \quad \psi = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon} = 1 - \frac{1}{e^\varphi} \quad (5.10)$$

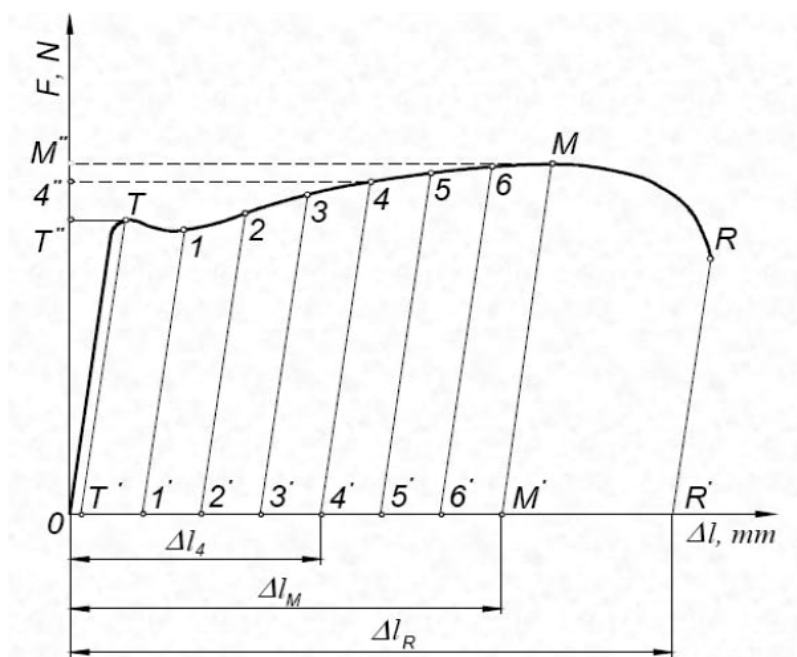
Еквивалентна деформација једнака је природној деформацији дужине епрувете.

$$\varphi_e = \varphi_1 = \ln \frac{l}{l_0}; \quad \varphi_2 = -\frac{1}{2} \varphi_1; \quad \varphi_3 = \varphi_2 = -\frac{1}{2} \varphi_1; \quad (5.11)$$

$$\varphi_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2} \quad (5.12)$$

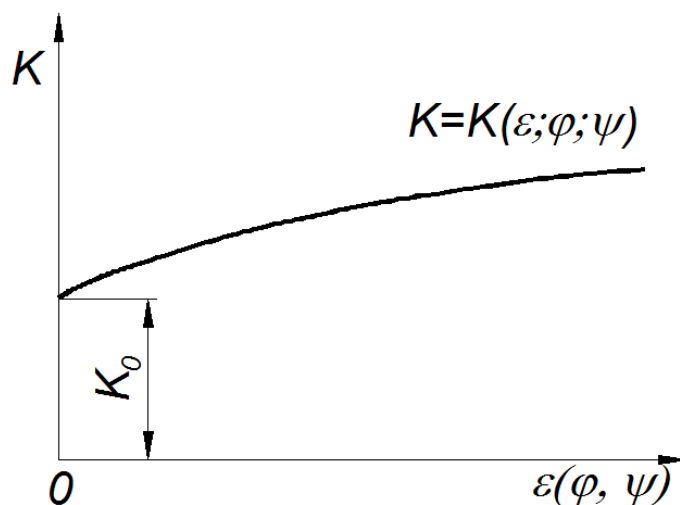
У изразима F је сила затезања, A површина попречног пресека, l дужина испитиване епрувете. То су величине које се мењају током деформисања. A_0 је почетна површина попречног пресека, l_0 почетна дужина епрувете и то су константне вредности. ε је релативна, φ природна, логаритамска деформација, а ψ контракција (сужење) попречног пресека [14].

На слици 5.3 је приказан поступак одређивања криве течења који се састоји у одабиру одређеног броја тачака из области равномерног деформисања. Затим се изабране тачке пројектују на апсцису (у циљу одређивања вредности пластичне деформације) под идентичним углом као и линеарни (почетни) део криве. Такође тачке се пројектују и на ординатну осу и одређују одговарајуће вредности силе F .



Слика 5.3 Одређивање кривих ојачања затезањем [14]

Када се на вредности са дијаграма затезања у области пластичног и равномерног деформисања примени израз за стварни т.ј. еквивалентни напон, добија се зависност деформационог отпора од еквивалентне деформације, односно крива ојачања или крива течења (слика 5.4).



Слика 5.4 Крива ојачања [14]

5.1.3 Резултати експерименталних испитивања

Испитивање једноосним затезањем је реализовано са три епрувете (слика 5.5) које су под одређеним угловима у односу на правац ваљања материјала и то:

- епрувета 1, 0^0 у односу на правац ваљања,
- епрувета 2, 45^0 у односу на правац ваљања,
- епрувета 3, 90^0 у односу на правац ваљања материјала.

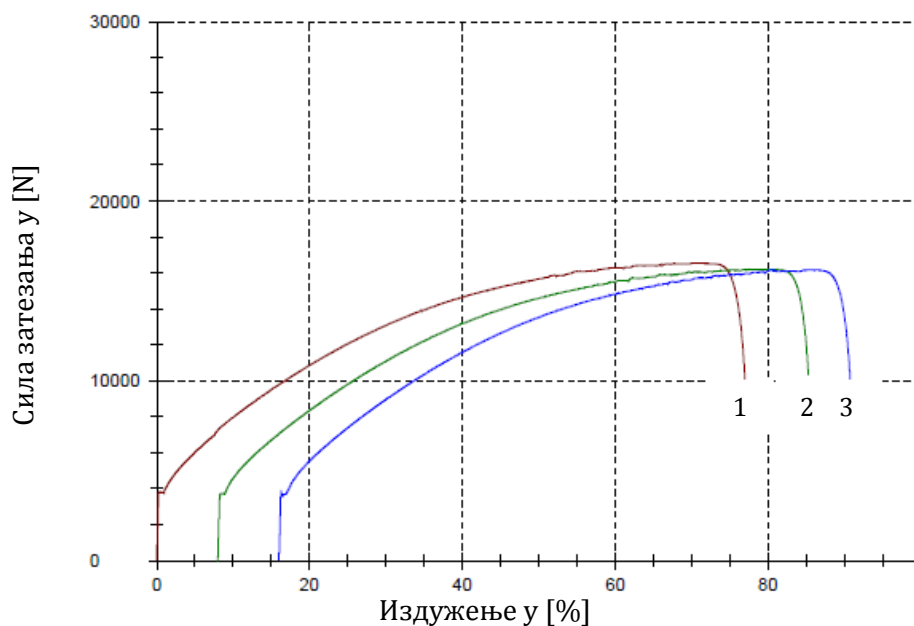


Слика 5.5 Епрувете након процеса једноосног затезања

По завршетку процеса испитивања, на машини се очитава вредност максималне силе (F_m) и израчунава се промена дужине после разарања (Δl_R). У табели 5.2 приказани су резултати мерења и прорачуна након теста затезања. Дијаграми затезања су приказани на слици 5.6.

Табела 5.2 Резултати теста затезања

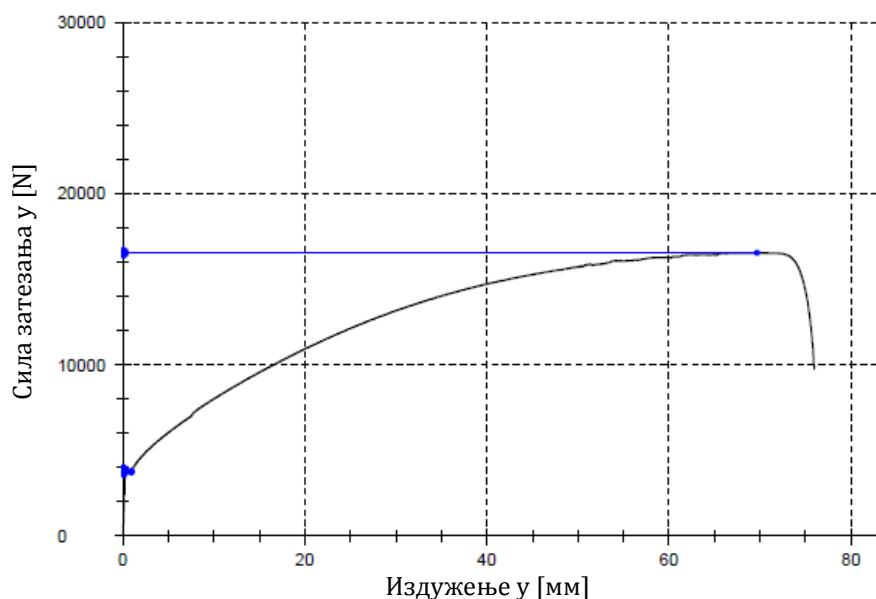
		l_0	A_0	$R_{p0,2}$	R_m	A_g	A
Позиција	Бр.	mm	mm ²	Мра	МПа	%	%
0°	1	98,70	50,43	74,63	328,04	69,7	75,9
45°	2	103,34	50,14	74,10	322,96	69,90	76,53
90°	3	100,10	49,89	72,11	324,01	69,20	74,03



Слика 5.6 Дијаграми затезања за све три епрувете

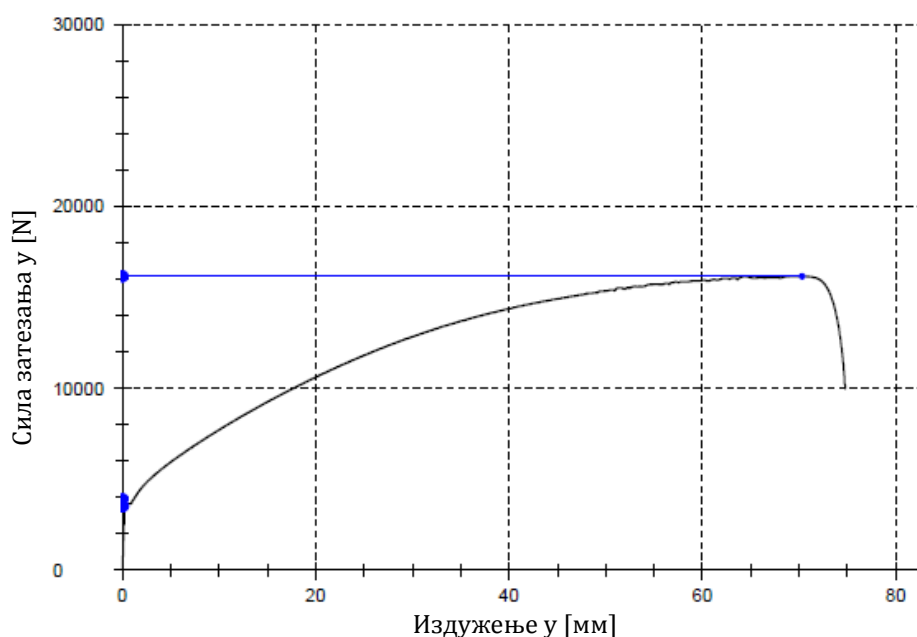
На слици 5.7 приказан је дијаграм затезања епрувете која је сечена у правцу ваљања. Применом једначина (5.1÷5.6) прорачунати су коефицијенти за математички (експоненцијални) облик криве течења и на основу којих су формиране криве. Једначина криве течења за епрувету 1 (0°) у односу на правац ваљања је:

$$K = 779,69\varphi^{0,52886}, MPa$$



Слика 5.7 Дијаграм затезања за епрувету 1 (0° према правцу ваљања)

На слици 5.8 приказан је дијаграм затезања епрувете која је сечена на 45^0 у односу на правац ваљања.

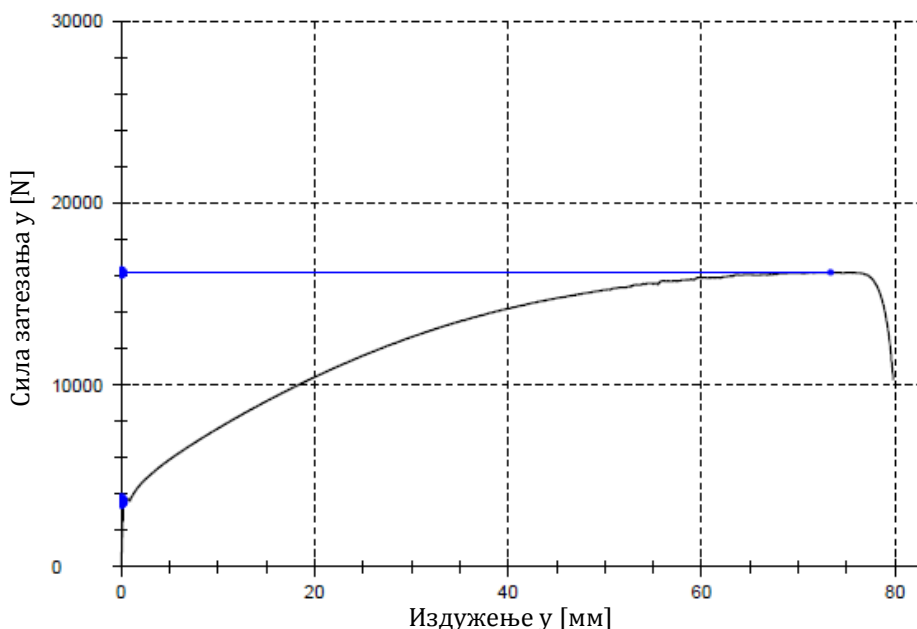


Слика 5.8 Дијаграм затезања за епрувету 2 (45^0 према правцу ваљања)

Једначина криве течења за епрувету 2 (45^0) у односу на правац ваљања је:

$$K = 768,63\varphi^{0,52591}, MPa$$

На слици 5.9 приказан је дијаграм затезања епрувете која је сечена на 90^0 у односу на правац ваљања.



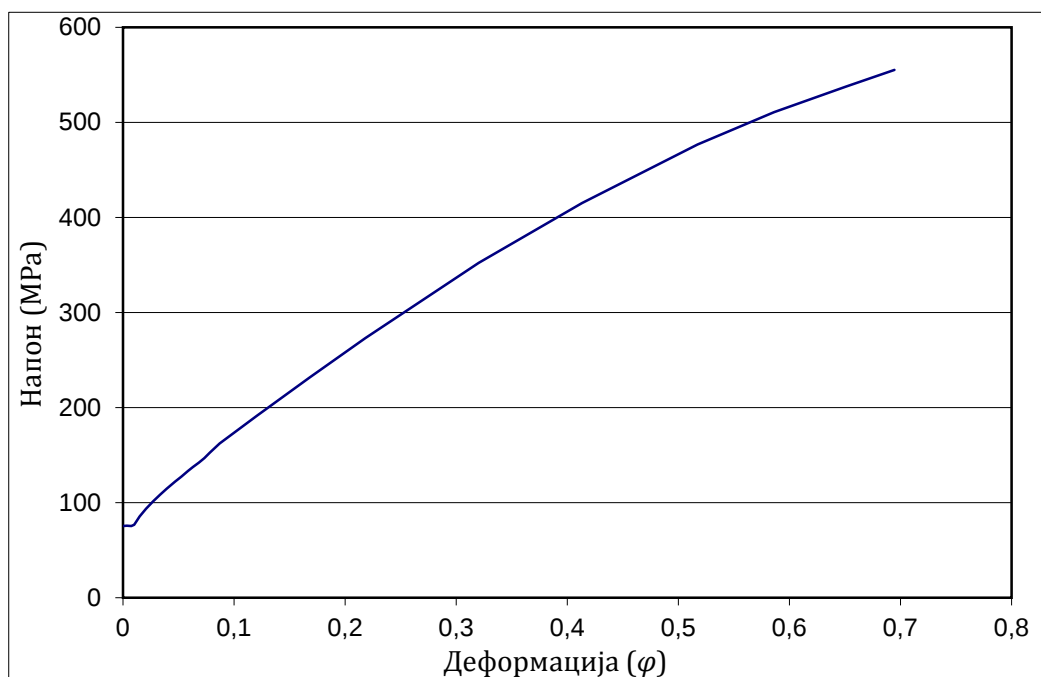
Слика 5.9 Дијаграм затезања за епрувету 3 (90^0 према правцу ваљања)

Једначина криве течења за епрувету 3 (90^0) у односу на правац ваљања је:

$$K = 768,29\varphi^{0,53004}, MPa.$$

На основу експерименталних података добијених тестом затезања, за епрувету 1 са 0^0 у односу на правац ваљања, у *Excel* документ се уносе добијене вредности, на основу којих се добија графички приказ криве ојачања. На слици 5.10 приказана је

крива деформационог ојачања испитиваног материјала (месинга), за епрувету сечену у правцу ваљања, која је коришћена као референтна за нумеричку *FE* анализу.



Слика 5.10 Крива ојачања за епрувету 1 (0° у односу на правац ваљања)

5.2 Алати за дубоко извлачење

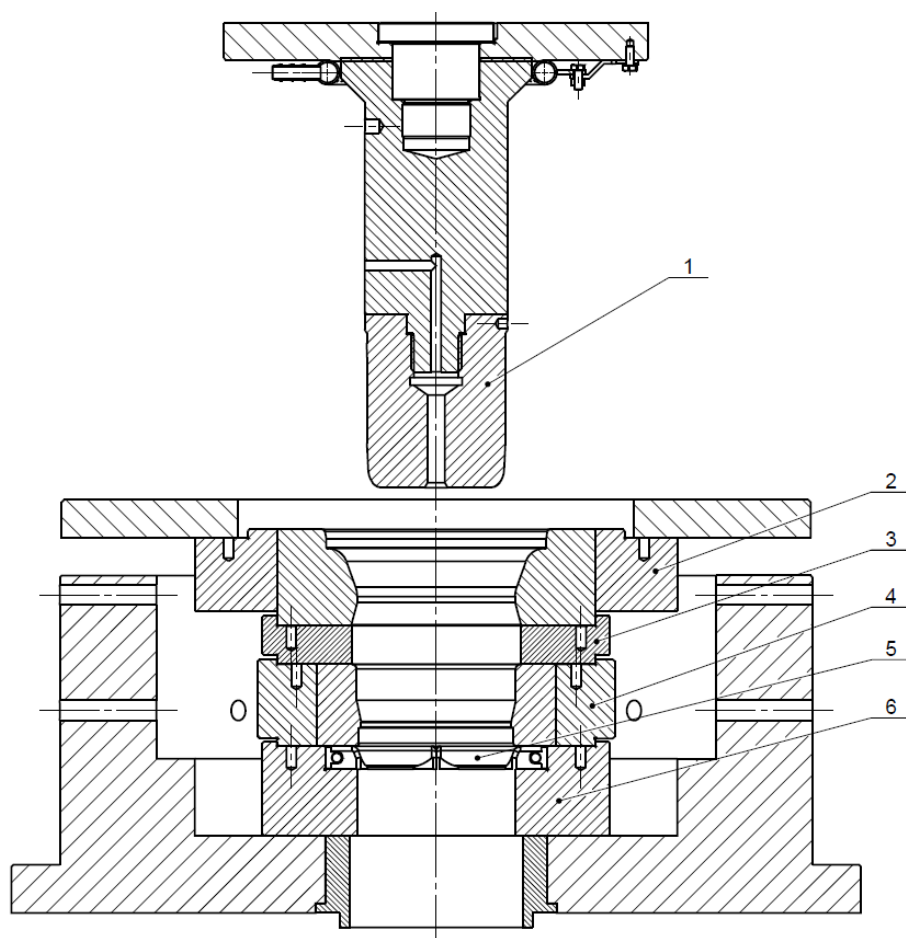
У индустријским експериментима, процес дубоког извлачења је реализован у алату који се користи у производном процесу. На слици 5.11 представљен је склопни цртеж алата за извлачење.

Алат се састоји из следећих позиција:

1. Извлакач;
2. Матрица горња;
3. Међуплоча;
4. Матрица доња;
5. Скидач;
6. Основна плоча.

У радне делове алата, тј. елементе који долазе у контакт са обратком током извлачења и формирају радни комад спадају: извлакач, горња матрица и доња матрица. Извлакач (1) представља обликач унутрашњег дела чанчета. Кроз средину извлакача избушен је отвор који омогућава излазак вишка ваздуха и радног флуида током извлачења. Израђује се од високо квалитетног алатног челика $\check{S}4850$, који поседује изузетно добар однос високе тврдоће спољашње површине и велике жилавости језгра, термички обрађеног на тврдоћу од $60HRC$ (*Rokvela*). Површина радног дела алата мора бити исполирана на квалитет површинске обраде N4. У горњој матрици (2), врши се преобликовање радног комада из ронделе тј. припремка у формирано чанче, уз мању редукацију дебљине зида. Матрица се састоји из уметка тј. унутрашњег дела и ојачавајућег прстена. Материјал за горњу матрицу (уметак) је исти као и за извлакач и доњу матрицу, док се прстен израђује од челика за побољшање $\check{S}4732$. Профил горње матрице пројектован је апроксимирањем трактрикс криве у радијус са конусом, како би се поједноставила његова израда. У доњој матрици се

одвија завршно стањење дебљине зида чанчета и остварује се коначна мера његовог спољашњег пречника.



Слика 5.11 Алат за извлачење

Обзиром да се ради о алатима веома велике масе, монтажа радних делова алата у "стега" није могућа ручно, већ је неопходна употреба дизалице (слика 5.12).



Слика 5.12 Алат за извлачење (стега), уз приказ дизалице за подизање

Начин постаљања алата је веома битан. Приликом монтаже неопходно је да алати буду чисти и зауљени од претходне употребе. Уколико је током претходног коришћења дошло до одређених дефеката (појаве рисева, остатака налепљеног средства за подмазивање или других укључака, пукотина и слично), исти се морају очистити полирањем, а затим наставити са монтажом (уколико није дошло до трајних оштећења). Обавезно је водити рачуна да алати равно належу један на други. На слици 5.13 приказан је поступак монтаже доње и горње матрице за извлачење.



Слика 5.13 Монтажа доње и горње матрице за извлачење

Позиционирање алата се врши помоћу дубиномера са нонијусом, којим се алати постављају приближно у центар "стега", дотезањем бочних завртњева (слика 5.14).



Слика 5.14 Центрирање алата

Постављање алата на пресу за извлачење врши се помоћу виљушкара што је приказано на слици 5.15.



Слика 5.15 Монтажа алата на пресу

Након постављања алата на пресу, врши се његово финално увођење у центар, након чега се горњи и доњи алат постављају у крајњи положај. Повезивање горњег и доњег алата за притискивач и сто пресе врши се помоћу специјалних "Т" завртњева, "Т" навртки и стезних "шапа". Завршним позиционирањем алата могуће је вршити искључиво фино подешавање међусобног положаја матрица и притискивача помоћу поменутих бочних завртњева. Подешен алат за извлачење у производном процесу приказан је на слици 5.16.



Слика 5.16 Подешен алат за извлачење

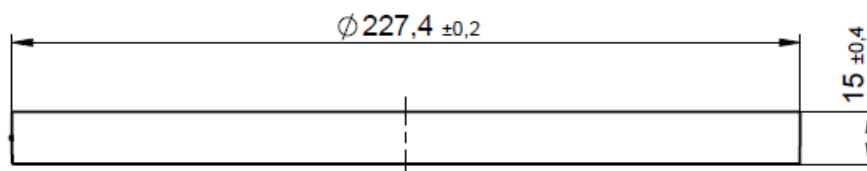
5.3 Мерење температура у току процеса обраде

Мерење температура у алату и обратку извршено је коришћењем термовизијске камере *Fluke Ti400* и уз помоћ сарадника Центра за виртуелну производњу Факултета инжењерских наука у Крагујевцу. Добијени резултати обрађени су у софтверском пакету за обраду инфрацрвених слика и видео записа *SmartView*.

Током процеса извлачења предвиђено је да се алат и радни комад континуално хладе коришћењем специјалне сапунске емулзије, која уједно служи и као мазиво за смањење контактнoг трења између алата и радног комада. Међутим, обзиром да је у оквиру овог рада предвиђено да се врши мерење температурних ефеката у процесу, конкретно у алату и радном комаду, индустријски експерименти су реализовани без коришћења емулзије, како би се избегао ефекат хлађења и измериле вредности температура у самом процесу.

5.3.1 Мерење температура обратка

На слици 5.17 приказан је технички цртеж припремка за извлачење са дефинисаним изградним толеранцијама.



Слика 5.17 Цртеж припремка за процес дубоког извлачења

Процес добијања припремка може се изводити на два начина: механичким просецањем у алату (овај процес изводи добављач материјала) или сечењем помоћу воденог млаза високог притиска (*Water-Jet* метода). Припремак за овај процес припремљен је на *Water-Jet* машини у Компанији Слобода Чачак. Поступак исецања припремка приказан је на слици 5.18.

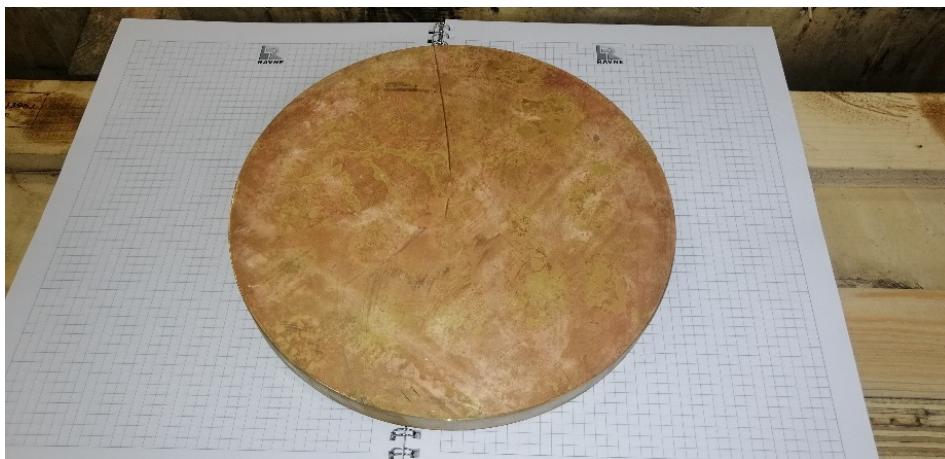


Слика 5.18 Исецање припремка *Water-Jet* поступком

Припремак се након сечења подвргава строгој димензионој и визуелној контроли, као и металографском испитивању микро и макроструктуре. Уколико задовољи захтеве одобрава се израда позиција од испитиваног материјала.

После контроле припремка врши се хемијска припрема површине за извлачење (слика 5.19). Припрема подразумева потапање припремка у 10%-тни раствор сумпорне киселине (H_2SO_4), при температури раствора од 60 до 70°C. Време држања у

раствору је пет минута, након чега се врши испирање припремка, а затим поновно потапање у 5%-тни раствор сапунске емулзије који је загрејан на температуру од 60°C.



Слика 5.19 Хемијски припремљена површина припремка

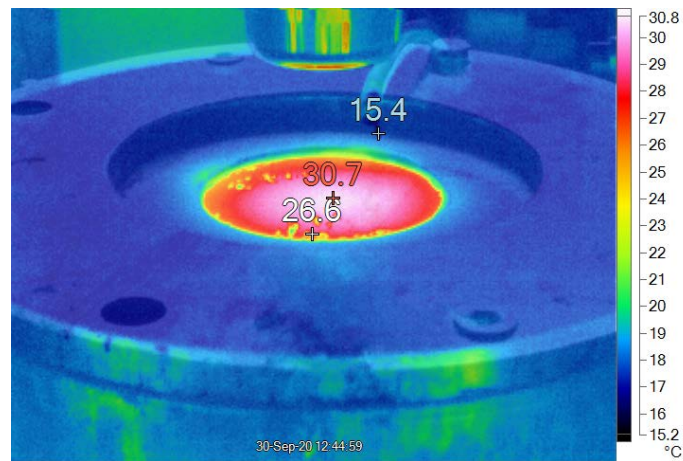
По завршетку хемијске припреме непосредно пред процес припремке треба држати минимум десет минута у загрејаној 5%-тној сапунској емулзији, како би дошло до "нагризања" њене спољашњости. Овим се постиже боље пластично течење материјала, смањење коефицијента трења, а самим тим се и алат мање загрева.

Приликом постављања припремка у алат за извлачење, извршено је почетно мерење температуре површине алата и радног комада. На слици 5.20 приказан је снимак припремака пре процеса обраде добијен термовизијском камером, на којој су очитане почетне температуре припремка и температура околине, као и датум и време снимања.



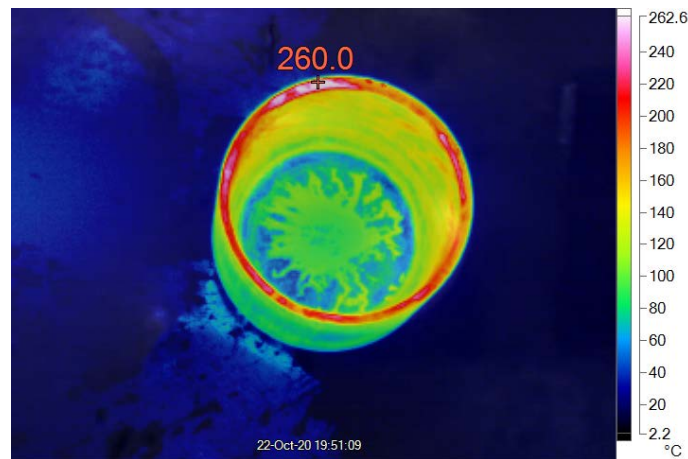
Слика 5.20 Вредности температуре припремка и околине пре дубоког извлачења

Посматрањем слика 5.20 и 5.21 може се уочити разлика између температуре припремка пре и после држања у загрејаној сапунској емулзији, а непосредно пре процеса дубоког извлачења (пораст са 22,8°C на 30,7°C). На слици 5.21 приказан је снимак припремка постављен у алат и обрађена у софтверу *Smart View* коришћењем палете боја *Rainbow X*.



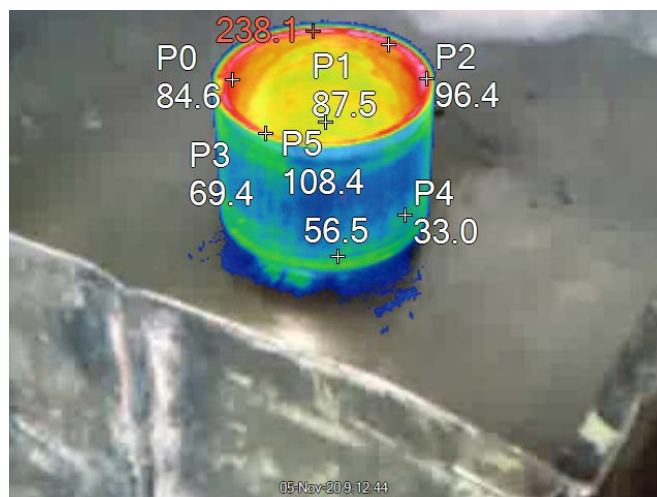
Слика 5.21 Температура загрејаног припремка постављеног у алат

На слици 5.22 приказан је снимак извученог чанчета, са приказом максималне температуре на ободу комада. Температура на ободу је највиша јер је у тој зони материјал радног комада претрпео највећи степен деформације. На десној страни слике налази се легенда са распоном температурног опсега у боји.



Слика 5.22 Снимак температурних поља у обратку непосредно након процеса дубоког извлачења

На слици 5.23 могу се видети вредности температура у одређеним зонама обратка, уз приказ одређених издвојених тачака ($P0 \div P5$), као и приказ максималне температуре на унутрашњој страни обода.



Слика 5.23 Вредности измерених температура у обратку

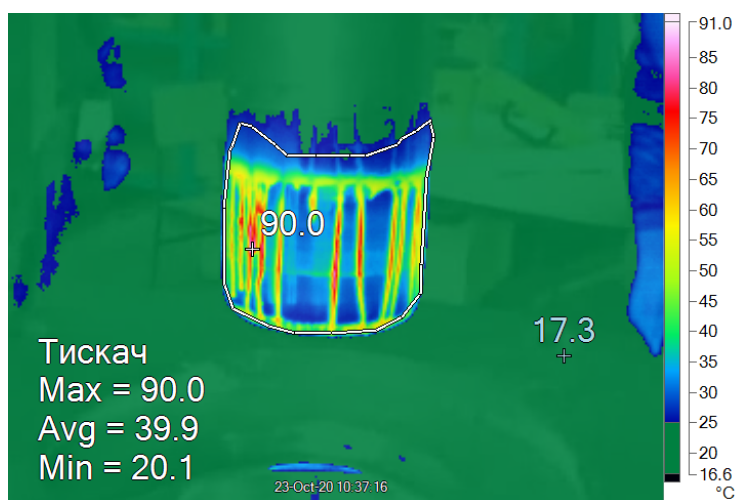
5.3.2 Мерење температура алата

Као последица трења између радног комада и алата током процеса дубоког извлачења, као и због пластичног деформисања материјала обратка долази до повећања температуре, како у комаду тако и на алату. На слици 5.24 приказана су измерене температуре алата и околине пре процеса дубоког извлачења.



Слика 5.24 Температуре алата и околине пре процеса обраде

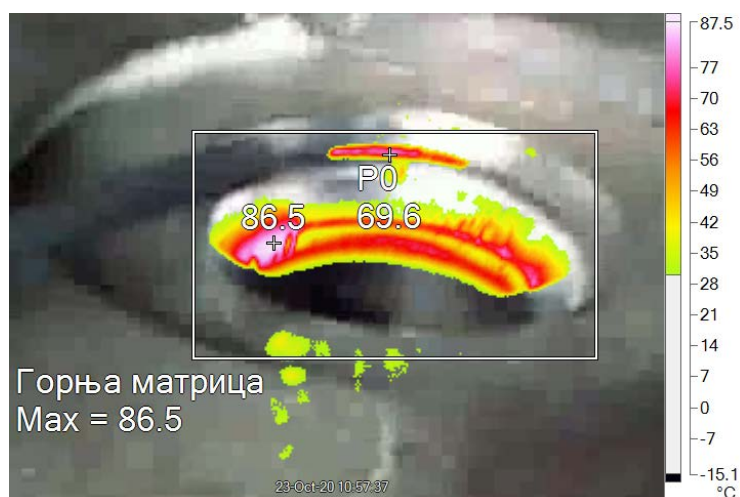
На слици 5.25 приказана је инфрацрвена фотографија расподеле температура на извлакачу непосредно након процеса извлачења, припремљена употребом функције *Isotherm*. На фотографији се уочавају максимална, просечна и минимална температура извлакача. На основу слике може се закључити да је најнижа температура на месту где је био врх радног комада из разлога јер је комад у тој зони провео најмање времена на извлакачу.



Слика 5.25 Температурна поља на извлакачу

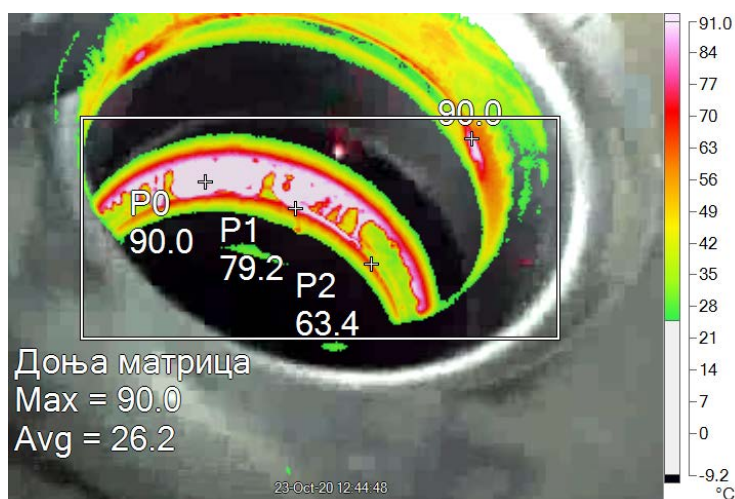
Слика 5.26 приказује измерене температуре на горњој матрици за извлачење, а приказ је добијен коришћењем опције *Color Alarm*, где је приказан температурни распон на профилу матрице од 30°C до максималних 86,5°C. У горњој уоквиреној зони уочава се пораст температуре до 69,6°C на почетном радијусу матрице где долази до "увлачења" припремка у матрицу, затим до нижих температура на конусу због мале деформације дебљине зида комада у тој зони и на крају до развоја највиших

температура у зони цилиндра, тј. калибрирајућег пречника горње матрице.



Слика 5.26 Температурна поља на горњој матрици

На слици 5.27 може се видети температурни приказ доње матрице за извлачење где је максимум достигнуте температуре 90°C и у односу на горњу матрицу може се приметити да је температурни појас шири, тј. температуре су порасле по целом профилу алата. Разлог ширег појаса повишених температура је контакт радног комада са алатом дуж целе висине профила матрице, посебно у зони прелаза из конуса преко радијуса у калибрирајућу зону матрице. При изласку комада из контакта са доњом матрицом извлакач наставља да се креће све док не прође скидач (позиција бр.5 на слици 5.11). Скидач се састоји из три сегмента која су исечена под углом од 120° на чијим крајевима је постављена спирална опруга. Проласком комада кроз скидач, долази до ширења његових сегмената све док врх комада не прође доњу ивицу скидача, након чега се сегменти дејством силе опруга враћају у првобитан положај. Доласком притискивача пресе у доњу мртву тачку активира се повратни ход пресе, у којем долази до скидања радног комада.



Слика 5.27 Температурна поља на доњој матрици

6. FE АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ДУБОКОГ ИЗВЛАЧЕЊА

6.1 Увод

За потребе анализе индустријског процеса дубоког извлачења, посебно температурних ефеката у обратку и алату извршена је нумеричка симулација дубоког извлачења дебљег лима који је саставни део производног програма Компаније Слобода А.Д., Чачак и на коме су извршена претходна експериментална мерења температура термовизијском камером. Обрадак који се добија овим поступком приказан је на слици 6.1. За нумеричку симулацију су добијени улазни параметри процеса од компаније, како би резултати нумеричке анализе били упоредиви за индустријским експериментима. Симулације су реализоване у софтверу *Simufact.forming*.



Слика 6.1 Обрадак након операције дубоког извлачења

Поред нумеричке симулације самог процеса дубоког извлачења, узети су у обзир и напони у алату, почев од фазе монтаже алата и преднапрезања матрице ојачавајућим прстеновима, а такође и праћење напонских и температурних поља у алату и обратку током процеса дубоког извлачења. Тиме је у потпуности остварена сличност индустријског и нумеричког експеримента, па је могуће направити упоредну анализу мерења температура термовизијском камером и њихове процене нумеричком *FE* симулацијом.

6.2 Улазни подаци за нумеричку симулацију

Улазни подаци за нумеричку симулацију процеса имају кључну улогу у осликавању и добијању што квалитетнијих резултата. Добијањем поузданих и тачних резултата симулације могуће је вршити одређене корекције у индустријском процесу чиме се избегавају скупе и дуготрајне пробе у производњи.

Нумеричке симулације су реализоване у три фазе:

- Нумеричка симулација монтаже и преднапрезања горње матрице;
- Нумеричка симулација монтаже и преднапрезања доње матрице;
- Нумеричка симулација процеса дубоког извлачења у условима када су алати деформабилни.

6.2.1 Улазни подаци за нумеричку симулацију монтаже и преднапрезања горње матрице

Simufact.Forming нуди три начина помоћу којих је могуће испитивати алате:

- Термалну (топлотну) анализу;
- Механичку анализу;
- Анализу ојачања.

Обзиром да је потребно извршити симулацију монтаже и преднапрезања алата, врши се одабир процеса хладног обликовања (*Cold forming*), а затим функција оптерећења алата *Die Load* у оквиру које се налази подопција *Reinforcement* (ојачање алата). Из разлога што је комад осно симетричан може се одабрати 2D анализа, чиме се знатно убрзава процес прорачуна и добијања резултата.

У податке који су потребни за симулацију монтаже и преднапрезања горње матрице спадају:

- Геометрија алата (преузета из CAD софтвера);
- Материјал матрице: алатни челик Č4850;
- Материјал прстена: челик намењен за побољшање Č4732;
- Контактнo трење: аутоматско са фактором размере 0,4;
- Температура у процесу: 20°C;
- Преклоп: виртуелни (*Virtual overlap*), укупан 1 mm.

Што се врсте материјала за израду алата тиче, материјал који се користи у реалном процесу израде није релевантан за анализу јер криве течења које се углавном уносе у едитор материјала добијене су пре термичке обраде алата, па стога нису довољне да га у потпуности дефинишу. Из тог разлога реални материјали се мењају адекватним заменама који су преузети из *Simufact.Forming* базе материјала, у којим су њихова еластична својства математички у потпуности дефинисана.

Реални материјали из процеса замењени су следећим материјалима из *Simufact.Forming* базе, који се иначе користе у напонској анализи термички обрађених алатних челика [10]:

- Материјал матрице: HM560;
- Материјал прстена: ASP.

Геометрија алата, врста материјала и величина преклопа преузети су од технолога из Компаније Слобода, који су пројектовали алате и дефинисали технологију израде. Алат је моделиран у софтверу за 3D моделирање *SolidWorks*, након чега је геометрија алата сачувана у *IGES* формату како би се импортовала у софтвер *Simufact.Forming*. У оквиру геометрије алата постављена је и доња плоча за процес монтаже, која онемогућава померање прстена и матрице у току процеса ојачавања. Матрица и прстен су посматрани као деформабилни, док је доња плоча посматрана као круто (*Rigid*) тело. Склоп горње матрице и прстена приказан је на слици 6.2.



Слика 6.2 CAD модел склопа горње матрице са ојачавајућим прстеном

Преклоп се задаје у софтверу у оквиру функције *Boundary Condition*, где се бира опција преклоп (*Overlap*) и он може бити физички или виртуелни. Преклоп је дефинисан као виртуелни, што значи да су спољашњи пречник матрице и унутрашњи пречник прстена димензионисани као једнаки. Величина преклопа од једног милиметра се дели на позитивну и негативну вредност, где се у оквиру матрице уноси +0,5 mm, док се прстену задаје вредност од -0,5 mm. Извођење операције преднапрезања не би било могуће без дефинисања контактне табеле, која дефинише контактне услове између елемената у процесу и величину преклопа. Приказ контактне табеле за горњу матрицу дат је на слици 6.3.

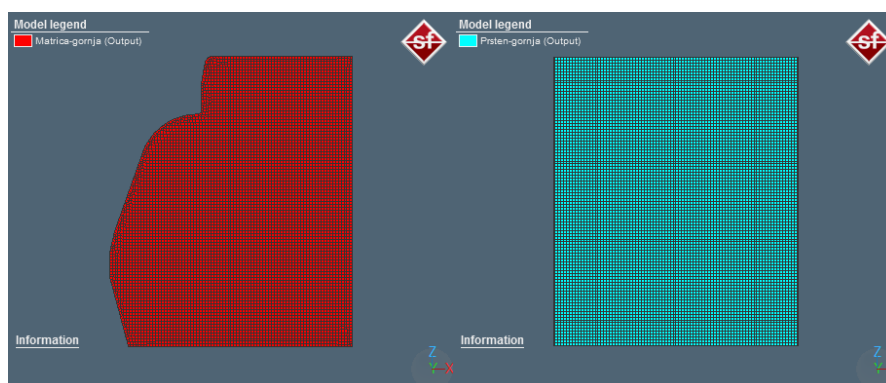
Contact table						
Overview						
Body	Contact	Direction	Type	Tolerance [mm]	Bias factor	Near contact
1-Prsten-gornja-M	Dno-M	1st to 2nd	Touching	0	0	0
1-Prsten-gornja-M	AxialSymmetry	1st to 2nd	Touching	0	0	0
1-Matrica-gornja-M	1-Prsten-gornja-M	1st to 2nd	Touching	1	0	0
1-Matrica-gornja-M	Dno-M	1st to 2nd	Touching	0	0	0
1-Matrica-gornja-M	AxialSymmetry	1st to 2nd	Touching	0	0	0
1-Prsten-gornja-M	1-Matrica-gornja-M	1st to 2nd	Touching	1	0	0

Brief description
This list shows all contacts for this process. [More... \(F1\)](#)

OK Cancel Apply Help

Слика 6.3 Контактна табела за склоп горње матрице

Симулацију није могуће започети док се не уради мрежа коначних елемената делова алата који се посматрају као деформабилни. Мрежа коначних елемената за горњу матрицу и прстен приказана је на слици 6.4. За мрежу коначних елемената горње матрице и прстена одабрана је *Quadtree* мрежа, са величином коначног елемента од 1 mm.



Слика 6.4 Почетна мрежа коначних елемената горње матрице и прстена

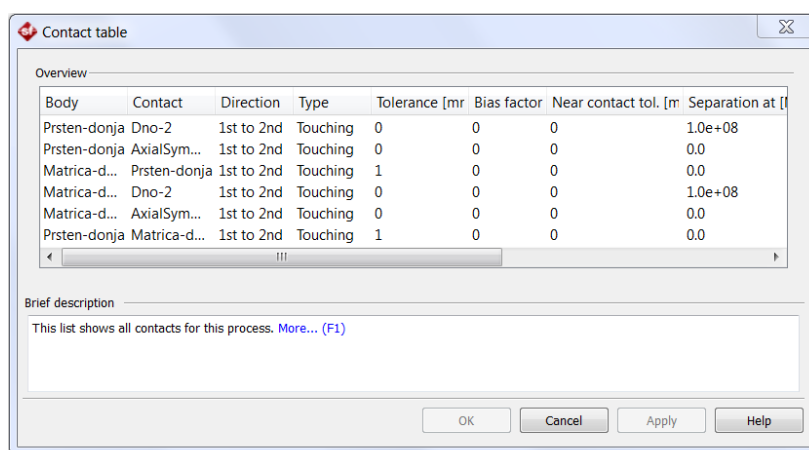
6.2.2 Улазни подаци за нумеричку симулацију монтаже и преднапрезања доње матрице

Улазни подаци примењени у претходном случају, за горњу матрицу, примењени су и за доњу матрицу, осим геометрије која је приказана на слици 6.5.



Слика 6.5 CAD модел склопа доње матрице са ојачавајућим прстеном

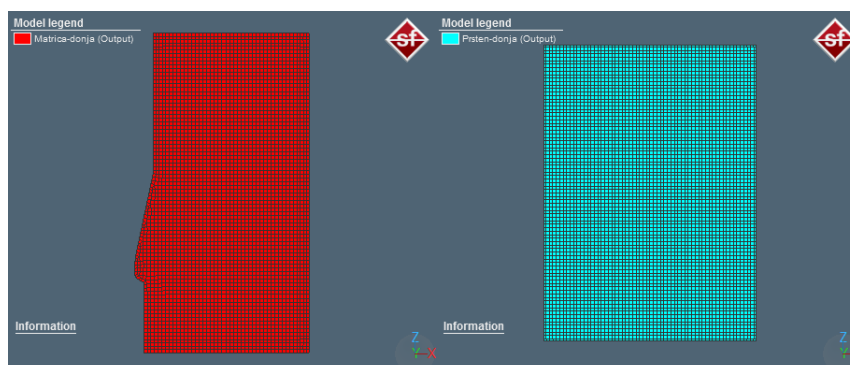
Испод доње матрице такође је неопходно поставити доњу плочу. Контакт табела доње матрице приказана је на слици 6.6. Доња плоча је посматрана као круто тело, док су остали алати посматрани као деформабилни.



Слика 6.6 Контактна табела за склоп доње матрице

Као што је био случај за горњу матрицу, такође и за доњу је потребно дефинисати мрежу коначних елемената која је приказана на слици 6.7. За мрежу коначних елемената доње матрице и прстена одабрана је као и за горњу *Quadtree* мрежа, са величином коначног елемента од 1 mm.

По завршетку дефинисања улазних података врши се провера унетих информација опцијом *Model check* и уколико је процес коректно дефинисан започиње се процес симулације.



Слика 6.7 Почетна мрежа коначних елемената доње матрице и прстена

6.2.3 Улазни подаци за нумеричку симулацију процеса дубоког извлачења

По завршетку дефинисања улазних података за нумеричку симулацију процеса монтаже и преднапрезања горње и доње матрице врши се унос података за процес у оквиру којег се изводи операција дубоког извлачења. Бира се процес хладног обликовања (*Cold forming*), након чега се из падајућег менија бира тип процеса – дубоко извлачење (*Deep drawing*).

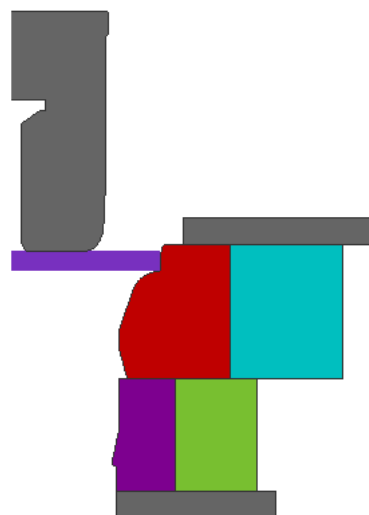
Подаци који су потребни за реализацију процеса дубоког извлачења су следећи:

- Геометрија алата;
- Геометрија радног комада;
- Материјал радног комада: Месинг (крива ојачања добијена тестом затезања)
- Материјал алата; за матрицу *HM560*, а за прстен *ASP*;
- Контактнo трење: мануелно по Кулоновом закону, са коефицијентом трења $\mu = 0,12$;
- Температура у процесу: температура алата, као и радног комада је 20°C;
- Машина: Хидраулична преса са релативном брзином кретања притискивача од 50 mm/c

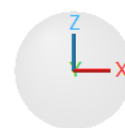
Геометрије алата се увозе по истом принципу као и у већ описаном процесу преднапрезања, док се монтирани и преднапрегнути склопови горње и доње матрице, за које је извршен прорачун напонских поља у софтверу увозе из претходних процеса (*Reinforcement*) функцијом *Insert-Geometry-From result*. Склопни приказ алата у пресеку увезен у софтвер *Simufact.Forming* приказан је на слици 6.8.

Model legend

	Prsten-donja
	GornjaPloca
	Matrica-donja
	Prsten-gornja
	Matrica-gornja
	DonjaPloca
	Rondela-M
	Tiskac-M



ExtrusionFe2D-2 - Model view

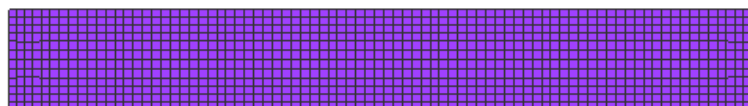


Слика 6.8 Склоп алата за дубоко извлачење и припремак у едитору софтвера

Алати који нису деформабилни приказани су сивом бојом, ради лакшег распознавања од елемената који се деформишу, а то су: доња плоча, горња плоча и притискивач за извлачење. У процес је постављен и припремак, и за њега је неопходно

дефинисати мрежу коначних елемената, која је приказана на слици 6.9.

Model legend
 Rondela-M (Output)



Information



Слика 6.9 Мрежа коначних елемената припремка

Мрежа је дефинисана помоћу *Quadtree* модула за генерисање мреже, са аутоматском вредношћу одабира величине коначног елемента од 1,39 mm и са укупним бројем од 984 елемената. Мрежа за деформабилне алате који су преузети са резултатима из процеса преднапрезања се не формира јер су задржане вредности из претходног процеса.

На слици 6.10 приказана је контактна табела са међусобном интеракцијом између свих елемената у симулацији процеса дубоког извлачења.

Contact table													
Overview													
Body	Contact	Direction	Type	Tol	Bias	Nea	Sep	Friction st	Inter	Init	Glui	Fric	
Matrica-donja	DonjaPloca	Default	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Matrica-donja	Matrica-gornja	Default	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Matrica-donja	Prsten-donja	Default	Touching	1	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Matrica-donja	AxialSymmetry	Automatic	Touching	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Matrica-gornja	Rondela-M	Default	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Matrica-gornja	GornjaPloca	Default	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Matrica-gornja	Matrica-donja	Default	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Matrica-gornja	Prsten-gornja	Default	Touching	1	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Matrica-gornja	AxialSymmetry	Automatic	Touching	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Prsten-donja	DonjaPloca	Default	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Prsten-donja	Matrica-donja	Default	Touching	1	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Prsten-donja	Matrica-gornja	Default	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Prsten-donja	Prsten-gornja	Default	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Prsten-donja	AxialSymmetry	Automatic	Touching	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Prsten-gornja	GornjaPloca	Default	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Prsten-gornja	Matrica-gornja	Default	Touching	1	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Prsten-gornja	Prsten-donja	Default	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Prsten-gornja	AxialSymmetry	Automatic	Touching	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Rondela-M	Tiskac-M	Default	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Rondela-M	Matrica-gornja	1st to 2nd	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Rondela-M	Matrica-donja	Default	Touching	0	0	-	0.0	1.0e+14	-	No	-	-	
Rondela-M	AxialSymmetry	Automatic	Touching	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Слика 6.10 Контакт табела за симулацију процеса дубоког извлачења

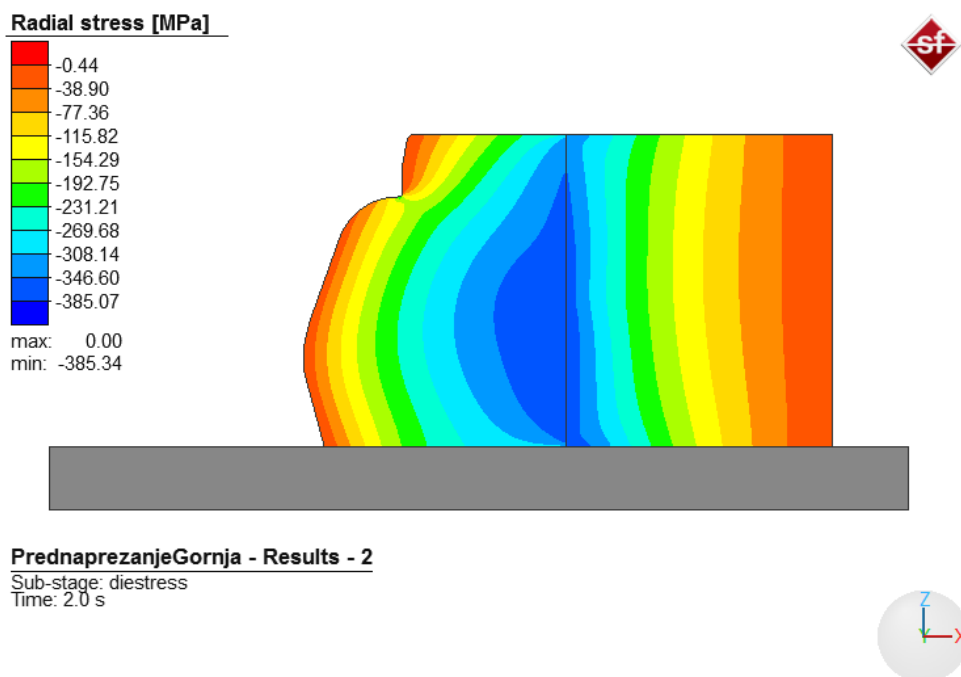
Након дефинисања контакт табеле, приступа се уношењу параметара симулације (*Forming Control (FE)*). У оквиру овог менија може се извршити дефинисање величине хода притискивача пресе која је у овом случају 300 mm, могуће је изабрати број снимљених приказа излазних резултата симулације на жељени број секвенци током трајања процеса, могуће је опционо поставити праћење температурних ефеката који се манифестују на алату и радном комаду током процеса, што је уједно испитивано у оквиру овог пројекта, као и многа друга подешавања.

6.3 Резултати *FE* анализе

По завршетку уноса улазних података за све три фазе симулације процеса, активiranог прорачуна у софтверу, приступило се анализи и обради добијених резултата. У оквиру овог одељка биће приказани резултати све три нумеричке анализе, како монтаже и преднапрезања горње и доње матрице, тако и процеса дубоког извлачења. Поред ових резултата биће приказана и напонско-температурна стања у обратку, као и температурни ефекти који се одвијају у алату услед процеса деформисања.

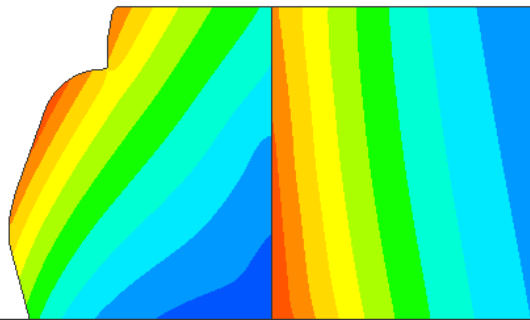
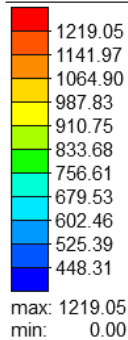
6.3.1 Резултати нумеричке симулације монтаже и преднапрезања горње матрице

У оквиру првог дела испитивања извршено је преднапрезање горње матрице и прстена са применом укупног преклопа од 1 mm, +0,5 mm на матрици и -0,5 mm на прстену. Резултати који су анализирани су расподела радијалног напона у матрици и прстену (слика 6.11), као и расподела ефективног напона по завршетку процеса монтаже и ојачања (слика 6.12).



Слика 6.11 Расподела радијалног напона преднапрегнуте горње матрице

Effective stress [MPa]



PrednaprezanjeGornja - Results - 2

Sub-stage: diestress
Time: 2.0 s



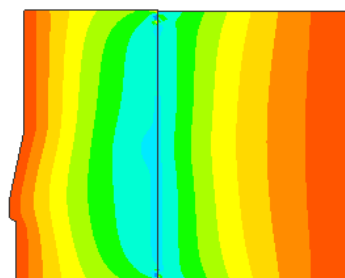
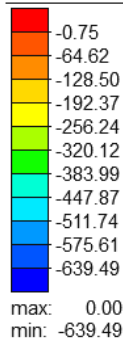
Слика 6.12 Расподела ефективног напона преднапрегнуте горње матрице

На горњој матрици се може уочити правилна расподела напона у радијалном правцу, као и то да вредности напона преднапрезања нису изразито високи, што је изазвано релативно малом величином преклопа у односу на спољашњи пречник матрице и унутрашњи пречник прстена.

6.3.2 Резултати нумеричке симулације монтаже и преднапрезања доње матрице

У другом делу испитивања извршено је преднапрезање доње матрице и прстена уз укупан преклоп од 1 mm, као што је то био случај и за горњу матрицу. На сликама 6.13 и 6.14 приказане су расподеле радијалног и ефективног напона у доњој матрици, респективно.

Radial stress [MPa]



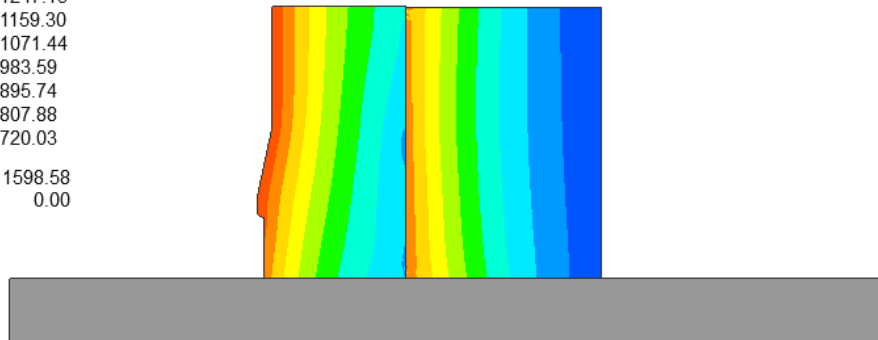
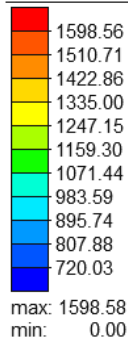
PrednaprezanjeDonja - Results - 2

Sub-stage: diestress
Time: 2.0 s



Слика 6.13 Расподела радијалног напона преднапрегнуте доње матрице

Effective stress [MPa]



PrednaprezanjeDonja - Results - 2

Sub-stage: diestress
Time: 2.0 s

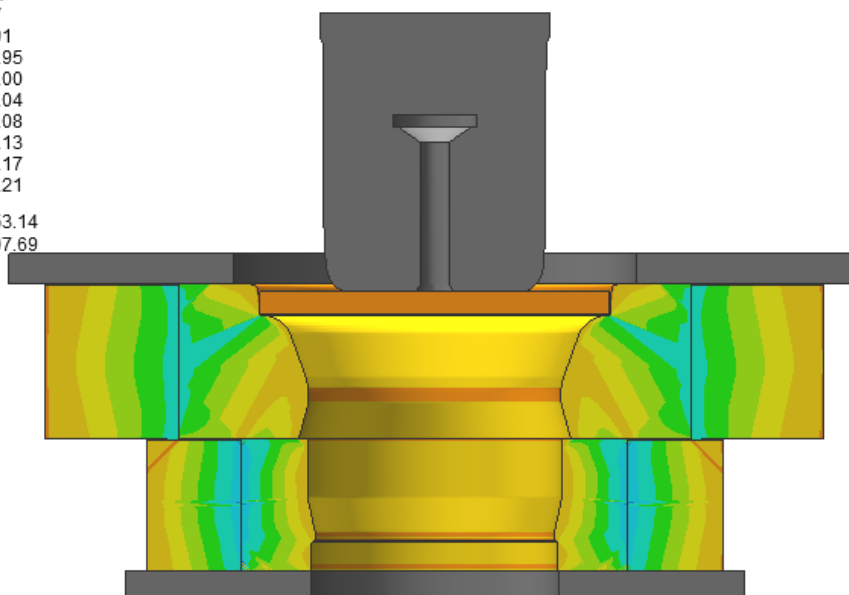
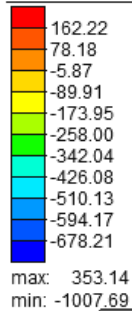


Слика 6.14 Расподела ефективног напона преднапрегнуте доње матрице

6.3.3 Резултати нумеричке симулације процеса дубоког извлачења

На слици 6.15 дат је склопни приказ позиционирања алата и припремка са приказом радијалног напона у преднапрегнутим алатима пре процеса дубоког извлачења. На сликама 6.16 до 6.18 приказане су расподеле радијалних напона у алату и обратку током процеса дубоког извлачења, док су на сликама 6.19 до 6.21 приказане расподеле ефективних напона у алату и обратку током процеса.

Radial stress [MPa]

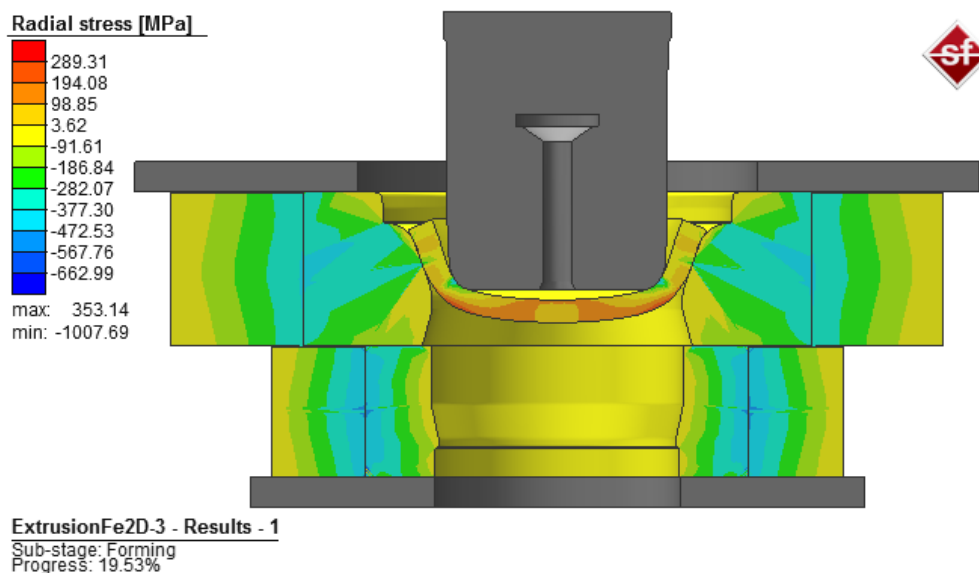


ExtrusionFe2D-3 - Results - 1

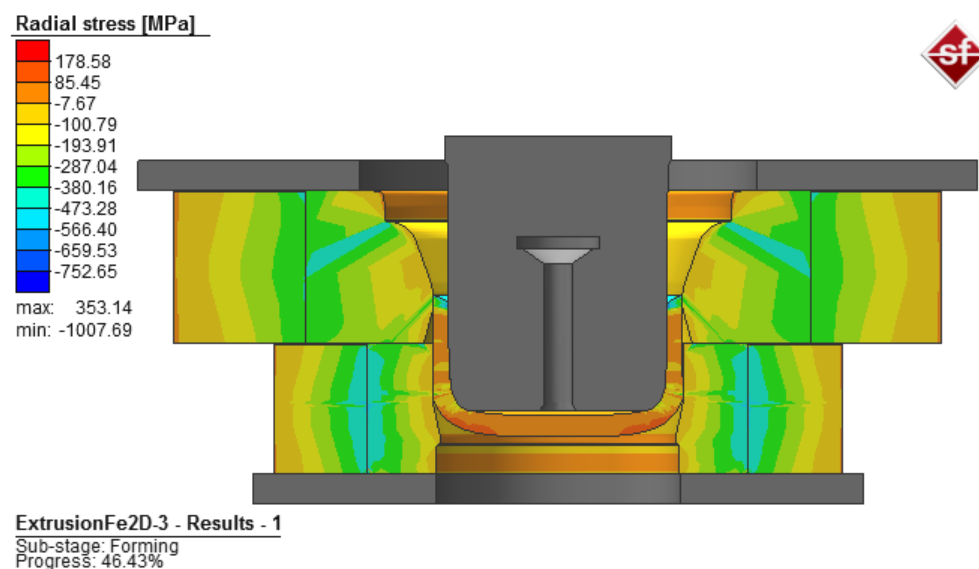
Sub-stage: positioning_tool
Progress: 100.00%



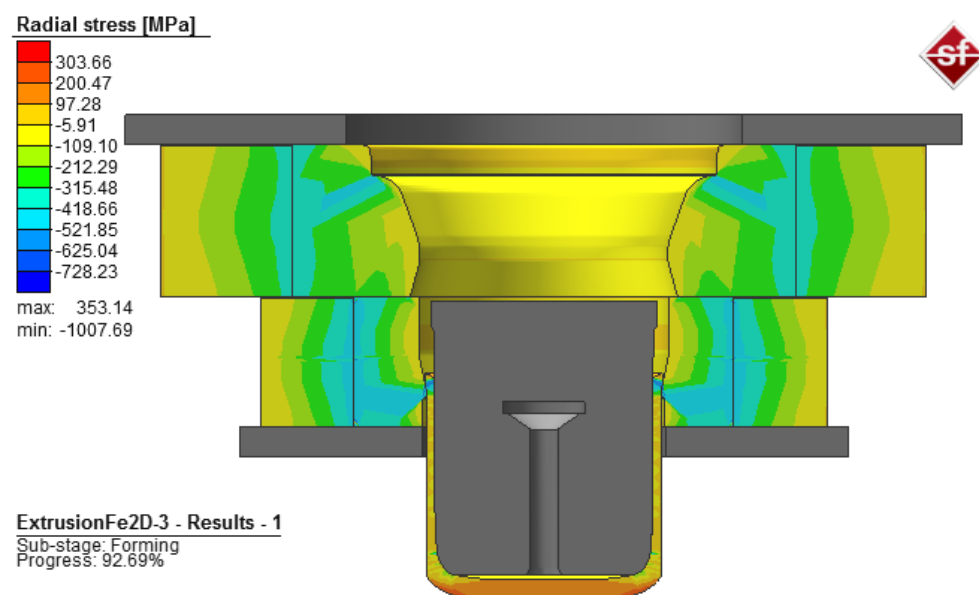
Слика 6.15 Расподела радијалног напона у алатима пре почетка процеса дубоког извлачења



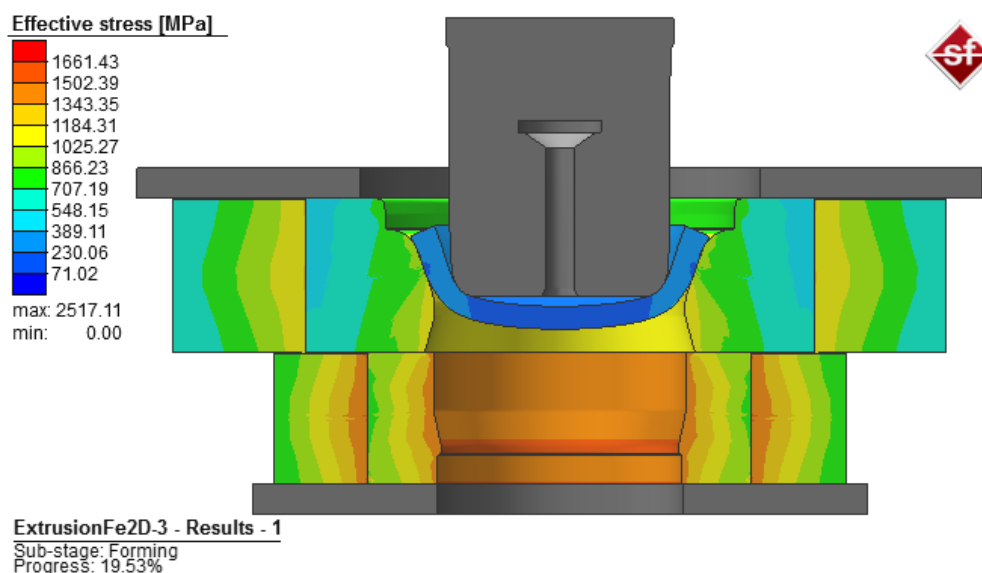
Слика 6.16 Расподела радијалног напона при 19,53% деформисања



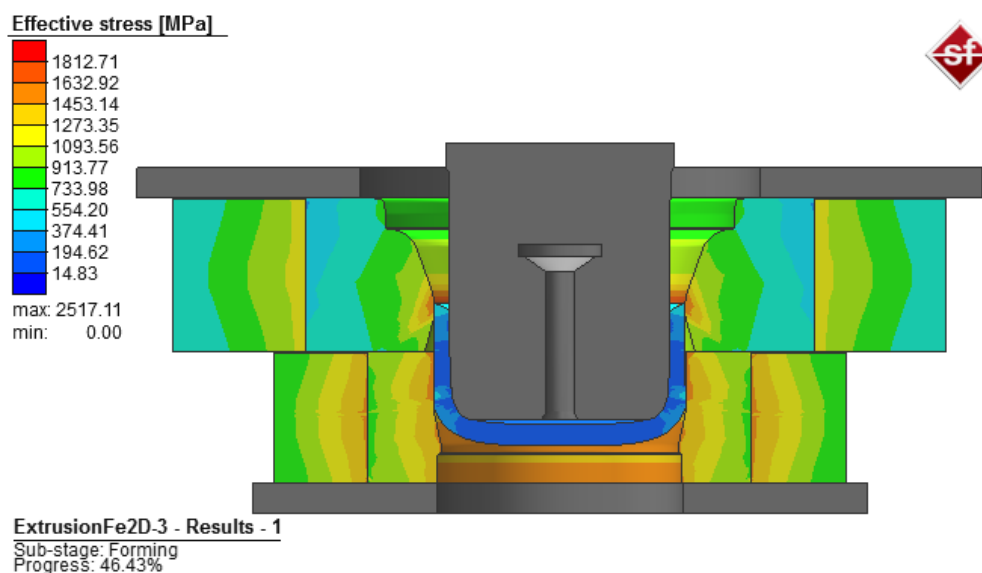
Слика 6.17 Расподела радијалног напона при излазу из горње матрице



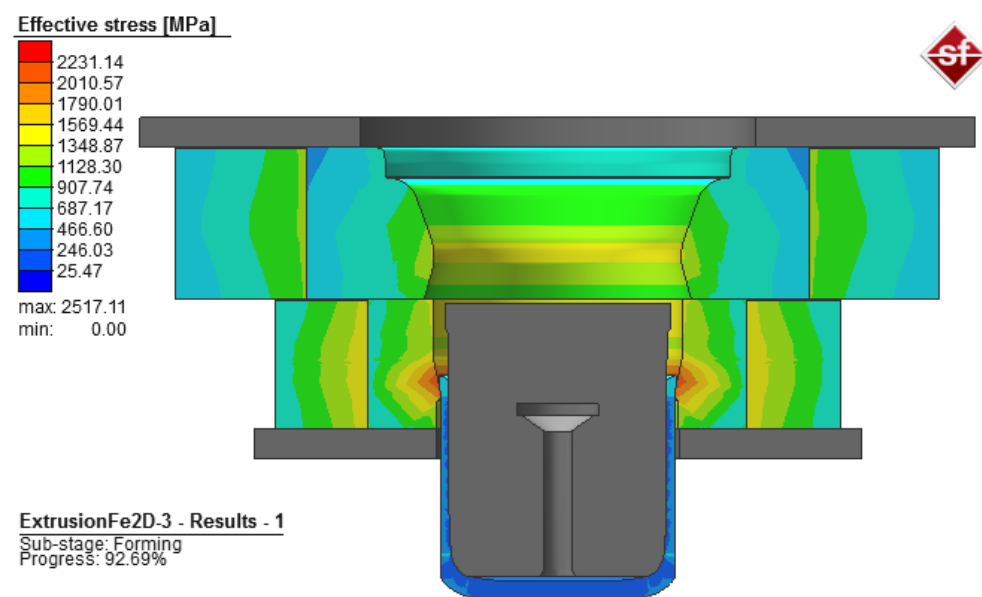
Слика 6.18 Расподела радијалног напона при излазу из доње матрице



Слика 6.19 Расподела ефективног напона при 19,53% деформисања

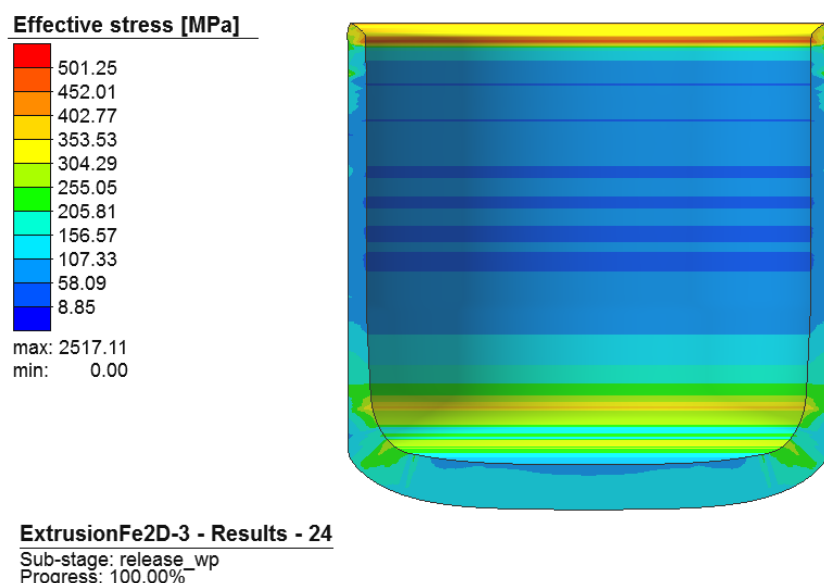


Слика 6.20 Расподела ефективног напона при излазу из горње матрице



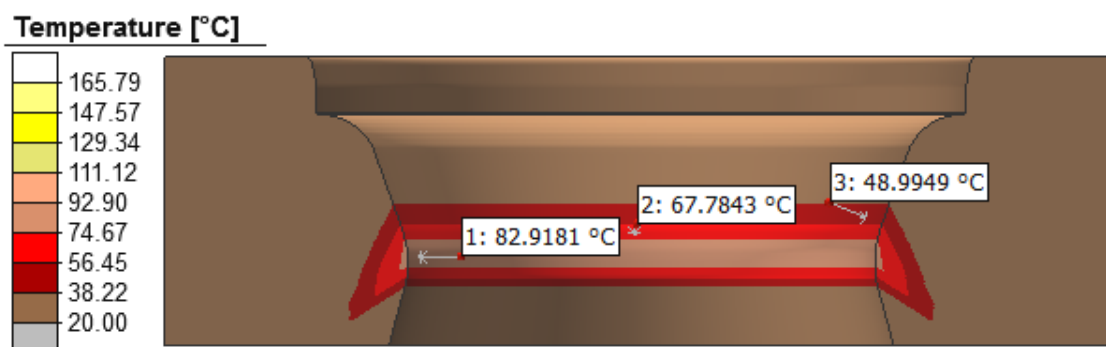
Слика 6.21 Расподела ефективног напона при излазу из доње матрице

На слици 6.22 приказани су ефективни напони на радном комаду након процеса извлачења.



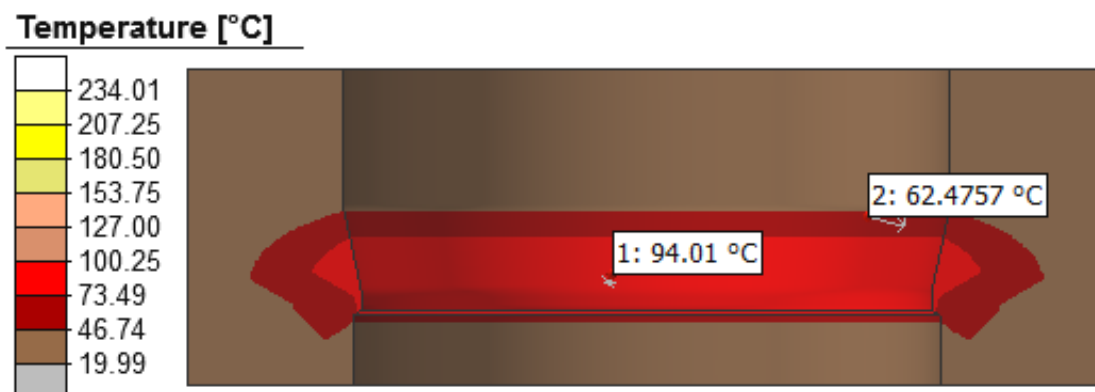
Слика 6.22 Расподела ефективног напона обратка

На слици 6.23 приказана је дистрибуција температуре након проласка радног комада кроз горњу матрицу.



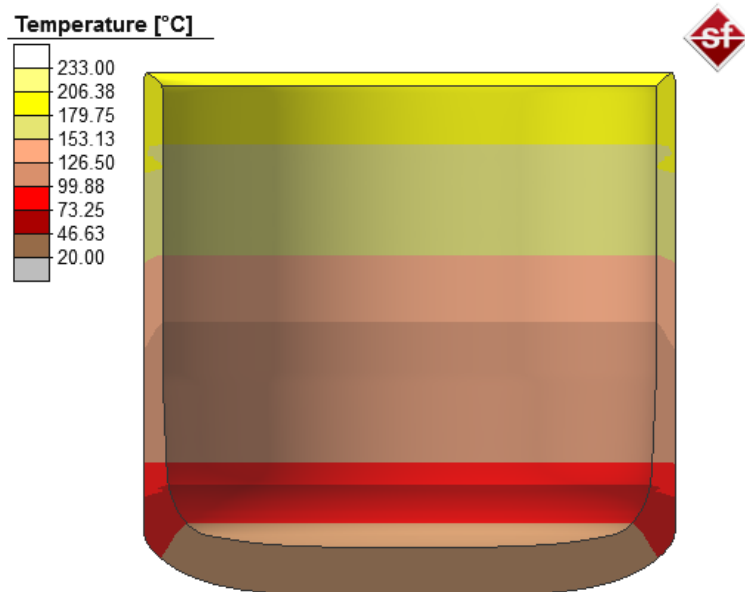
Слика 6.23 Температуре горње матрице

На слици 6.24 приказана је дистрибуција температуре при проласку радног комада кроз доњу матрицу.



Слика 6.24 Температуре доње матрице

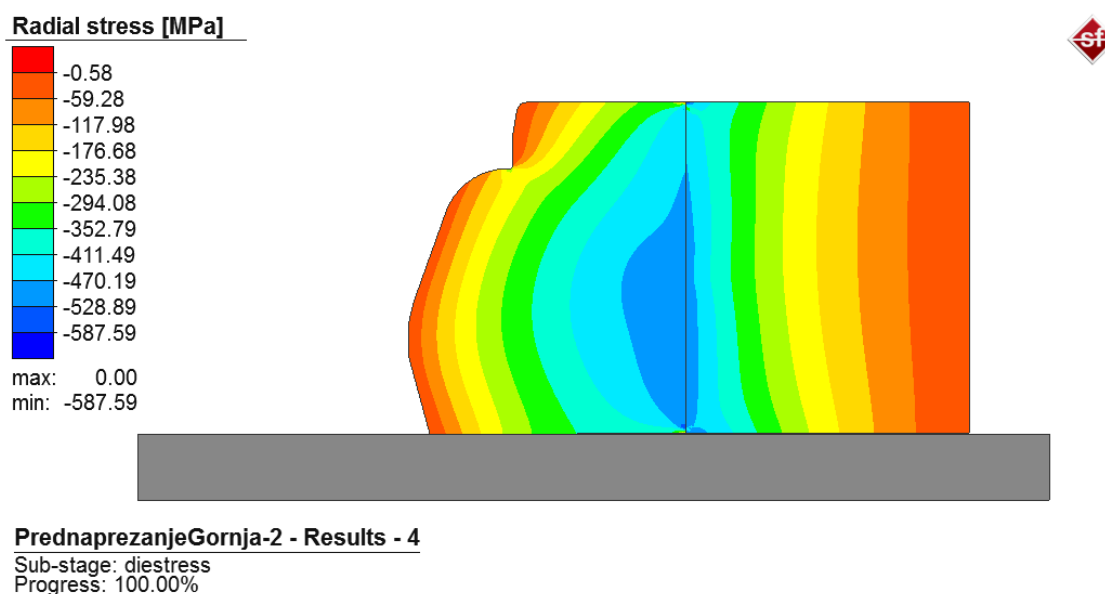
На слици 6.25 приказана су температурна поља у обратку на крају процеса дубоког извлачења.



Слика 6.25 Расподела температуре у обратку на крају процеса дубоког извлачења

6.4 Анализа резултата *FE* симулације

Анализом расподеле радијалних напона по завршетку преднапрезања у горњој матрици (слика 6.11), може се приметити да максимални напони имају вредност од -385 MPa. Напони су притискујући због тога што силе које се простиру од прстена ка матрици имају супротан смер. На основу величине напона може се рећи да су добијене вредности преднапрезања релативно мале у односу на препоручене вредности од 600÷700 MPa, што је проузроковано малом вредношћу укупног преклопа од 1 mm у односу на називни пречник од Ø330 mm. Обзиром да је препорука да величина преклопа код монтаже прстенова загревањем буде 0,1 mm на сваких 25 mm пречника, добијеном вредношћу напона се може закључити да је могуће применити веће вредности преклопа, како би се остварили већи напони преднапрезања, а самим тим би се продужио век трајања матрице. Због тога је приступљено проби варијанте са преклопом од 1,32 mm (слика 6.26).



Слика 6.26 Расподела радијалног напона горње матрице са преклопом од 1,32 mm

Са преклопом од $+0,66\text{ mm}$ на матрици и $-0,66\text{ mm}$ на прстену, добили су се напони од -587 Мра , што је близу препоручених вредности, тако да се на основу свега може дати препорука да се убудуће током израде горње матрице примени већа вредност преклопа. Ефективни (стварни) напон код преднапрезања горње матрице је у дозвољеним границама и креће се у вредностима од $448\div 1219\text{ Мра}$.

Код испитивања преднапрезања доње матрице (слика 6.13 и 6.14), остварене су вредности радијалног напона од -639 Мра , на основу чега се може рећи да величине напона улазе у опсег препоручених. Највеће вредности напона налазе се у граничним зонама преклопа, док су у осталим деловима алата напони знатно мањи. Вредности ефективног напона су у прописаним границама и крећу се од $720\div 1598\text{ Мра}$, чиме је оправдана чињеница коришћења једног ојачавајућег прстена. Неодговарајуће вредности примењених напона преднапрезања могу имати негативне последице на дужину експлоатације алата, као и на димензиону тачност радног комада. Применом адекватних вредности преднапрезања, знатно се побољшава процес деформисања.

На сликама 6.15÷6.22 приказани су радијални и ефективни напони при анализирању процеса дубоког извлачења са стањењем дебљине зида. Напони су анализирани у карактеристичним фазама производног процеса. Сlike 6.16 и 6.19 приказују радијалне и ефективне напоне у пуном контакту радног комада са профилем горње матрице при $19,53\%$ деформисања, што уједно представља прву карактеристичну фазу. Максимални радијални напони имају вредност од -662 Мра и њихове вредности нису критичне, док су ефективни напони у алату порасли до вредности од 1661 Мра . Друга карактеристична фаза процеса је праћење напона при излазу радног комада из горње матрице (слике 6.17 и 6.20), где је дошло до раста радијалних напона до вредности од -752 Мра , услед пуног контакта извлакача са обратком, деформације радног комада по пречнику и мање деформације по дебљини зида. Код ефективних напона је дошло до њиховог не тако великог раста до вредности од 1812 Мра . У последњој трећој карактеристичној фази процеса (слике 6.18 и 6.21) приказани су напони при контакту врха радног комада са калибрирајућим прстеном профила доње матрице. У овој фази може се приметити мањи пад радијалних напона на вредност од -728 Мра и пораст ефективних напона до максималног износа од 2231 Мра . Анализом ефективних напона у радном комаду по завршетку процеса (слика 6.22) може се уочити да су максимални напони на самом врху радног комада, где је и степен преобликовања највећи и да у тој зони достижу вредности од 501 Мра . У осталим зонама напони су знатно мањи, тако да се на основу свега наведеног може закључити да је процес извршен успешно, тј. без дефеката у виду развлачења материјала на радном комаду.

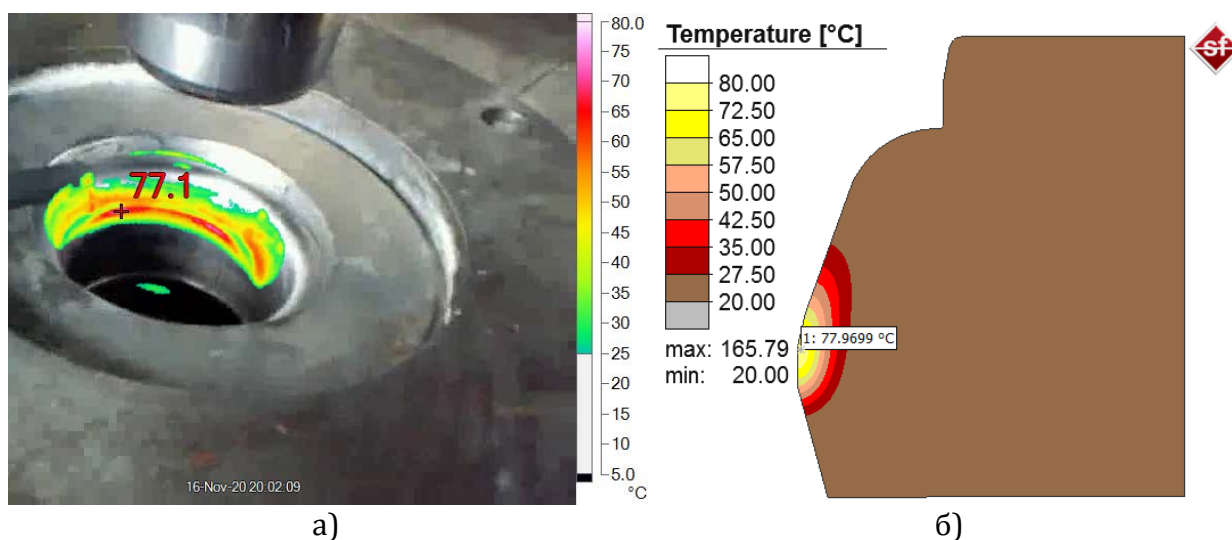
Контактно трење између алата и обратка, као и степен пластичног обликовања радног комада утицали су на пораст температура у алату и радном комаду. Посматрањем слике 6.23 може се приметити температурни распон од $\sim 49\div 83^{\circ}\text{C}$ на профилу горње матрице, у зони највећег контакта између алата и обратка. Анализом температура на доњој матрици (слика 6.24), примећује се да је дошло до развијања температура виших у односу на горњу матрицу и њихов температурни распон је у интервалу од $\sim 62\div 94^{\circ}\text{C}$. На основу приказаних температурних опсега закључује се да су вредности температура алата релативно мале. Међутим, мора се нагласити да је симулацијом посматран процес извлачења једног комада, што значи да је евидентно да ће током дуже експлоатације алата долазити до његовог већег загревања, па је због те чињенице у процесу неопходно примењивати средство за хлађење, као и повремено зауставити процес како би се алат адекватно охладио, како не би дошло до његовог прегревања, а самим тим и трајног оштећења. Што се тиче развијања температура у радном комаду, на слици 6.25 може се приметити да температурни

максимум износи 230°C и то при врху радног комада, док су у осталим зонама температуре ниже. Најниже вредности температуре уочене су на дну извученог чанчета, јер су те зоне претрпеле најмањи степен обликовања. На основу анализираних температура у радном комаду долази се до закључка да вредности температура нису критичне, што значи да не могу имати негативан утицај на његову структуру.

7. УПОРЕДНА АНАЛИЗА НУМЕРИЧКИХ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА

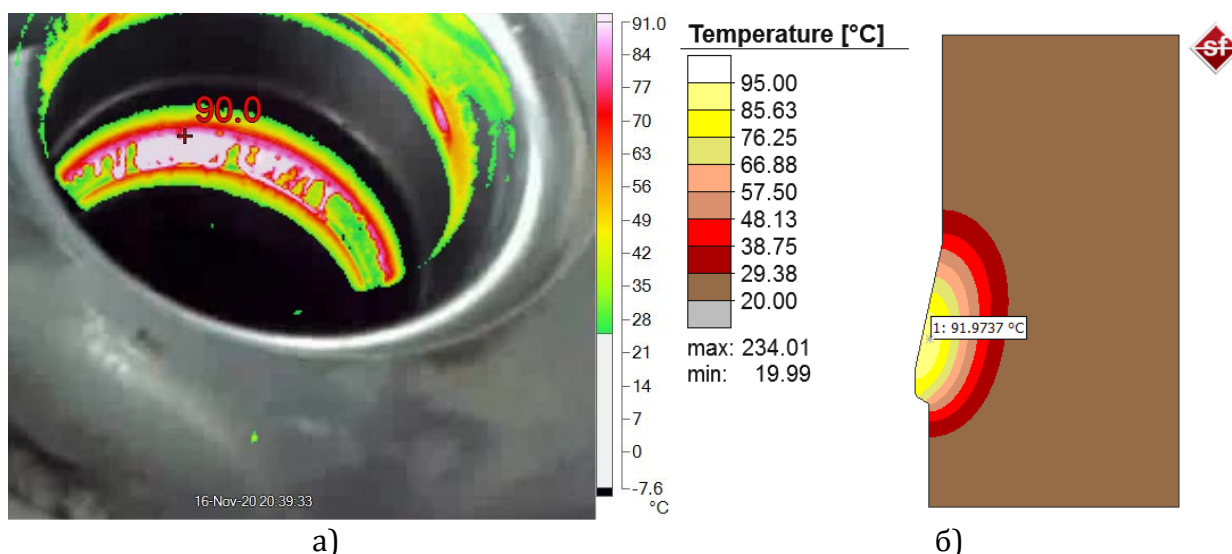
Да би се дошло до шире слике анализираног процеса и ефекта примене до сада коришћених алата и технологија, неопходно је упоредити добијене резултате и извршити њихову анализу. Акценат при поређењу остварених резултата стављен је на мерење и процену температурних ефеката у алату и радном комаду. Поређена су температурна поља добијена симулацијом процеса у софтверу *Simufact.forming* са измереним вредностима у производном процесу коришћењем инфрацрвене термографије и формирањем инфрацрвених слика помоћу термовизијске камере *Fluke Ti400*.

На слици 7.1 приказане су вредности расподеле температура у горњој матрици. На слици 7.1.а, приказане су температуре снимљене термовизијском камером у процесу, док су на слици 7.1.б, приказане температуре које су добијене *FE* анализом у софтверу *Simufact.Forming*.



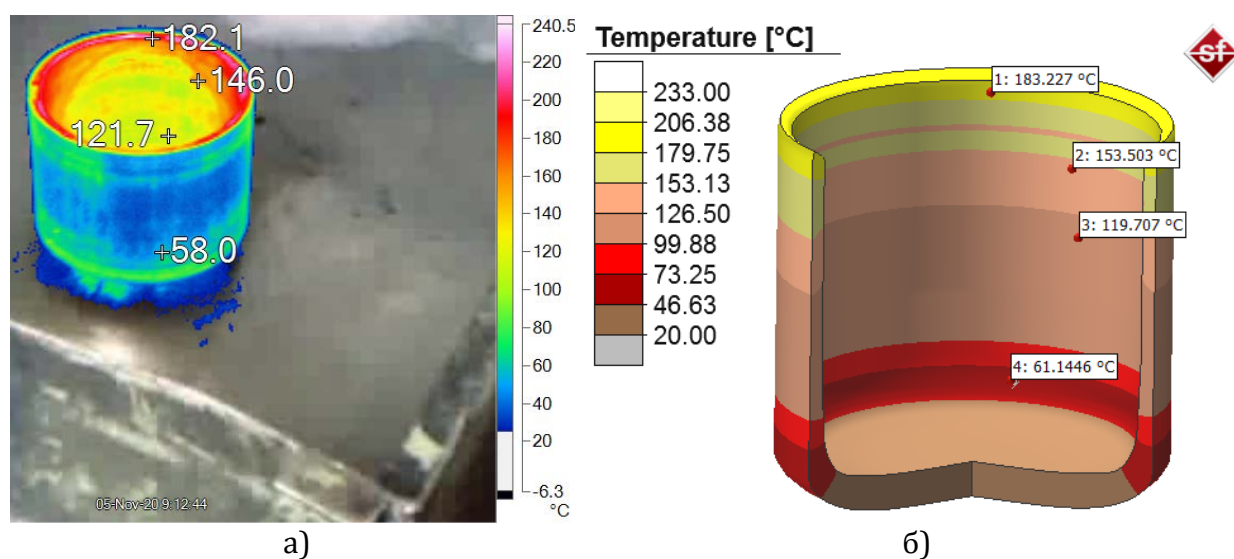
Слика 7.1 Упоредње расподеле температура у горњој матрици

На слици 7.2 дат је приказ температурних поља у доњој матрици. Као и на претходној слици, у примеру под а), температуре су измерене термовизијском камером, док је у случају б) слика добијена нумеричком симулацијом.



Слика 7.2 Упоредње расподеле температура у доњој матрици

Слика 7.3.а и 7.3.б, приказује упоредне вредности температура измерених у обратку у карактеристичним зонама.



Слика 7.3 Расподела температура у обратку: а) мерених термовизијском камером, б) добијених нумеричком симулацијом

Анализирањем слика 7.1, 7.2 и 7.3 уочава се задовољавајућа подударност измерених вредности температура добијених помоћу термовизијске камере са температурама које су добијене нумеричком симулацијом. Обзиром да се на сликама може уочити релативно мало расипање остварених резултата, на основу свега изложеног се може закључити да је процес мерења температура и њихове нумеричке процене успешно реализован.

8. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Дубоко извлачење дебљих лимова представља веома битну област у оквиру технологије запреминског обликовања. Примена ове технологије представља једини могући начин израде у случајевима где се захтевају позиције са великом разликом дебљине дна у односу на зидове омотача и код делова са специјалним захтевима механичких карактеристика по површинском пресеку радног комада. Поред бројних предности у односу на друге технологије израде делова, мора се напоменути да је употреба ове технологије економски оправдана само у случају високосеријске и масовне производње, посебно јер захтева израду специјалних алата као и примену великих деформационих сила како би се процес реализовао, што изискује употребу скупих машина и опреме. Познавање напонско деформационог стања у алату и обратку током одвијања процеса има веома велики значај на превенцију појаве дефеката и отказа у производњи. Применом савремених виртуелних технологија могуће је вршити праћење свих параметара у производном процесу чиме је могуће значајно унапредити функционисање тока процеса дубоког извлачења и елиминисати потенцијалне грешке које би могле негативно да утичу на процес пластичног обликовања.

Основни задатак мастер рада био је разматрање напона и деформација, као и праћење температура у радном комаду и алату током процеса обраде. Поред овог испитивања, упоредо је анализиран ефекат напонског стања алата у току процеса монтаже и преднапрезања матрице коришћењем ојачавајућих прстенова. У процесу су нумерички праћени и температурни ефекти у алату и вршено је експериментално мерење температура алата и обратка применом термовизијске камере.

Експерименталним испитивањем материјала припремка који је обрађиван дошло се до веома битних карактеристика материјала које су касније примењене у нумеричкој симулацији процеса. Испитивањем тестом једноосног затезања епрувета, добили су се резултати који су помогли формирању дијаграма напона и деформација, на основу чијих експерименталних података је формирана крива ојачања којом је исказано напонско-деформационо понашање материјала у области пластичности. Тестом су обухваћене три епрувете од месинга са силицијумом ($CuZn24.Si$), које су исецане у зависности од правца ваљања под угловима 0° , 45° и 90° , а добијене вредности су искоришћене у креирању новог материјала у бази у софтверу *Simufact.forming*.

Нумеричким симулацијама прво су добијене расподеле напона у току монтаже и преднапрезања горње и доње матрице, а на основу добијених резултата је закључено да су вредности преднапрезања горње матрице релативно мале, што је узроковано малом вредности преклопа. У додатном тесту, са повећањем преклопа добијени су повољнији резултати које је потребно узети у обзир приликом следеће израде матрица у производњи. У случају монтаже и преднапрезања доње матрице, резултати су били задовољавајући, тако да треба задржати вредности примењеног преклопа матрице и ојачавајућег прстена. Вредности напона добијених преднапрезањем оправдавају примену једног ојачавајућег прстена. У трећој фази нумеричких симулација, у оквиру којег је анализиран процес дубоког извлачења уз примену преднапрегнутих матрица, дошло се до резултата вредности напона у алату и радном комаду, на основу којих се може закључити да је процес успешно реализован и да су напони у дозвољеним границама.

Анализом резултата температурних ефеката добијених симулацијом и њиховим поређењем са вредностима добијених експерименталним мерењем

термовизијском камером, евидентно је задовољавајуће поклапање вредности температурних поља у алатима и обратку, што намеће закључак да је примена симулација и термовизијске камере у потпуности оправдана на основу чега се може препоручити њихова примена за потребе даљих истраживања.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Србислав Александровић, Милентије Стефановић**, *Технологија пластичног обликовања метала*, Крагујевац, 2011. год.
- [2] **Бинко Мусафија**, *Обрада метала пластичним деформисањем*, Сарајево, 1979. год.
- [3] **Интернет страница**: <http://automatizacija1.etf.rs/Poglavlja/Rezanje%202.htm>, приступљено 25.09.2020. год.
- [4] **Владо Вујовић**, *Технологија пластичности у машинству I део*, Нови Сад, 1990. год.
- [5] **Fluke**, Ti200, Ti300, Ti400, Ti450, Ti450SF6, Ti480 Thermal Imagers, User Manual
- [6] **Петар Тодоровић, Бранислав Јеремић, Иван Мачужић**, *Техничка дијагностика*, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2009., ISBN: 978-86-86663-44-3
- [7] **Интернет страница**: <https://www.opsteobrazovanje.in.rs/fizika/elektromagnetno-zracenje/>, приступљено 10.10.2020. год.
- [8] **Владимир Павићевић, Марко Поповић**, *Моделирање процеса топлог ковања на чекићу са аспектима мерења температура применом термовизијске камере*, семинарски рад, Крагујевац, 2020. год.
- [9] **Fluke**, SmartView 3.10, Online Help, User Manual
- [10] **Весна Мандић**, *Физичко и нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем* - Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2005. год.
- [11] **Слободан Митровић**, *Трибомеханички системи*, наставни материјал, Крагујевац, 2005. год.
- [12] **Simufact.Forming**, User Manual
- [13] **Ендре Ромхањи, Војин Миленковић, Ђорђе Дробњак**, *Утицај силицијума на чврстоћу и пластичност месинга*, Београд, 1990.год.
- [14] **Ђорђе Милосављевић**, *Значај деформационог ојачавања у оквиру процене деформабилности металних материјала*, семинарски рад, Крагујевац, 2019. год.