

Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 134/2012

Андријана Н. Јовановић

**Хомогеност деформисања при обликовању
танких лимова**

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Србислав Александровић, ред. проф.

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Задатак:

У првом делу рада кандидат треба да изложи теоријско разматрање деформација и деформационих поља у поступцима пластичног обликовања. Као посебно поглавље дати разматрање о хомогености деформисања и то: дефиниције, услове, узроке појаве, значај у реалним околностима процеса обликовања итд. Затим треба изложити сажети приказ разматрања о пластичности, обрадивости и деформабилности металних материјала.

У другом делу рада треба приказати изведени експеримент. Суштину експеримента треба да представља анализа хомогености деформисања преко дијаграма дистрибуције деформација за два процеса обликовања танког челичног лима. Први: вишефазно једноосно затезање и други: развлачење полусферним извлакачем. Дати план експеримента, опрему, резултате и тумачење резултата.

На крају дати закључна разматрања о теми, и посебно о експерименталним резултатима.

Препоручена литература:

- [1] Девеџић Б.: Основи теорије пластичног деформисања метала, Машински факултет у Крагујевцу, 1975.
- [2] Стефановић М.: Трибологија дубоког извлачења, Југословенско друштво за трибологију, монографија, Крагујевац, 1994.
- [3] Бабић Ж.: Деформабилност „Tailored Blanks” при дубоком извлачењу, Докторска дисертација, Машински факултет Бања Лука, 2004.
- [4] Александровић С.: Сила држања и управљање процесом дубоког извлачења, монографија, Машински факултет у Крагујевцу, 2006.г.
- [5] Александровић С., Стефановић М.: Технологија пластичног обликовања метала, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2010.
- [6] Александровић С.: Савремени поступци пластичног обликовања, скрипта, 2014.
- [7] Планчак М.: Појмовник из обраде деформисањем, ФТН Нови Сад, 2007.

Крагујевац,
10. 09. 2015.

Ментор:
Др Србислав Александровић, ред. проф.

САДРЖАЈ:

САДРЖАЈ.....	1
РЕЗИМЕ.....	2
ПРЕДГОВОР.....	3
1. УВОД.....	4
2. ДЕФОРМАЦИЈЕ И ДЕФОРМАЦИОНА СТАЊА.....	5
2.1. Претходне напомене.....	5
2.2. Појам деформације и начини њеног изражавања (показатељи деформације).....	6
2.3. Хомогено и нехомогено деформисање.....	12
3. ДЕФОРМАБИЛНОСТ ТАНКИХ ЛИМОВА.....	15
4. ЕКСПЕРИМЕНТ.....	25
4.1. Метода мерних мрежа (графометрија).....	26
4.2. Експериментална опрема.....	28
4.2.1. Лабораторијска машина за испитивање материјала ZWICK/ROELL Z 100.....	28
4.2.2. Софтвер TestXpert ver.10.....	35
4.2.3. Лабораторијска машина ERICHSEN 142/12.....	41
4.2.4. Алат за испитивање развлачењем.....	43
4.3. Резултати експеримента.....	44
4.3.1. Карактеристике материјала.....	44
4.3.2. Хомогеност деформисања при једноосном затезању.....	47
4.3.3. Хомогеност деформисања при развлачењу полусферним извлакачем.....	49
5. ЗАКЉУЧАК.....	54
6. ЛИТЕРАТУРА.....	55

РЕЗИМЕ

У првом делу рада изложено је теоријско разматрање деформација и деформационих поља у поступцима пластичног обликовања, као и разматрање о хомогености деформисања и то: дефиниције, услове, узроке појаве, значај у реалним околностима процеса обликовања итд. Приказана су и разматрања о пластичности, обрадивости и деформабилности металних материјала.

У другом делу рада приказан је изведени експеримент чију суштину представља анализа хомогености деформисања преко дијаграма дистрибуције деформација за два процеса обликовања танког челичног лима. Први процес је вишефазно једноосно затезање и други је развлачење полусферним извлакачем. Приказани су план експеримента, коришћена опрема, резултати и тумачења истих.

На крају су дата закључна разматрања о теми, и посебно о експерименталним резултатима.

Кључне речи:

Обликовање танких лимова, деформације, деформациона стања, хомогеност деформисања, деформабилност танких лимова.

ABSTRACT

In the first part of the paper we have exposed theoretical consideration of strains and states of strain in plastic forming processes, and consideration about homogeneity of deformation in views of: definitions, causes of appearance, conditions, importance in realistic circumstances of forming process etc. Displayed are also considerations about plasticity, workability and formability of metallic materials.

In the second part of the paper is presented obtained experiment whose essence is the analysis of strain homogeneity over strain distributions diagrams for the two processes of thin steel sheets forming. The first process is a multi-phase uniaxial tension and the second is stretching by hemi-spherical punch. Also are showed plan of experiment, equipment used, the results and their analysis and interpretation.

Key words:

Thin sheets forming, strains, states of strain, homogeneous deformation, thin sheets formability.

ПРЕДГОВОР

Овај рад представља завршни рад основних академских студија на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.

Тема завршног рада је из области технологије пластичног обликовања метала и спада у ужу област обраде танких лимова у оквиру предмета Производне технологије и Производне технологије 2.

Примена обраде метала пластичним деформисањем је значајна у савременој индустрији и добија све већи удео у технологији машинске обраде. Значај обраде метала деформисањем је посебно велики у индустријама као што су: аутомобилска, војна, индустрија уређаја за домаћинство, пољопривредних машина, апарата широке потрошње итд.

Једна од карактеристика ове обраде је велика продуктивност у поређењу са обрадом резањем, међутим, цена алата и машина је најчешће висока, тако да је шира примена обраде деформисањем ограничена претежно на великосеријску и масовну производњу.

У овом раду су приказана теоријска и експериментална разматрања на тему хомогености деформисања при обради танких лимова као и анализа хомогености деформисања преко дијаграма дистрибуције деформација за вишефазно једноосно затезање и развлачење полусферним извлакачем.

Велику захвалност дугујем ментору, др Србиславу Александровићу, редовном професору Факултета инжењерских наука у Крагујевцу. Такође се захваљујем и својој породици на неизмерној подршци.

У Крагујевцу, 2015. године

Андријана Јовановић

1. УВОД

Обрада метала деформисањем подразумева његово трајно обликовање под дејством довољно великог спољашњег оптерећења. У току овог процеса долази до значајних промена у материјалу. Мењају се његова механичка, технолошка и друга својства. Овом технологијом обраде се од полазних материјала (који су најчешће полуфабрикати у облику: лимова, плоча, цеви, пуних профила итд.) добијају готови делови различитих облика и димензија.

Обликовање метала се врши у хладном или у топлом стању. У првом случају се постижу најповољнија механичка својства, већа прецизност и чистије површине, док деформисање у топлом стању захтева мању силу, односно рад, а материјал показује већу пластичност.

У процесима пластичног обликовања не смеју се прекорачити вредности граничних износа напона и деформација, јер се у противном разара структура материјала или појављују други неприхватљиви дефекти. Не смеју се прекорачити ни интензитети контактних напона јер може доћи до преоптерећења комада и алата. [5]

Деформабилност је термин који се често користи у оквиру технологије пластичног обликовања и представља најопштију способност материјала да се деформише еластично или пластично. Гранична деформабилност означава остваривање максимално могуће деформације према одговарајућим критеријумима. Најчешће је то разарање или локализовано деформисање. Најзначајнији утицаји на деформабилност су: материјал (хемијски састав и структура), температуре обраде, брзина деформације и напонско стање.

Када је деформационо стање у неком тренутку процеса исто у свим тачкама тела, онда се деформисање сматра хомогеним. Претпоставка о хомогеном деформисању омогућује да се на основу промена димензија целог тела изведе општи закључак и његовој деформацији. Деформације на појединим критичним местима су често веће него што то показују карактеристике деформације добијене на основу укупних спољашњих димензија, што указује на одговарајуће нетачности и грешке. Главни узроци настајања нехомогеног деформисања су утицаји: контактнoг трења, облика (облик алата присиљава поједине делове материјала да пређу разичите путеве), као и својства микро-структурне и макро-структурне грађе металних материјала.

Да би деформисање било хомогено морају бити испуњени следећи услови:

- 1) Све праве линије и равни које су уочене на телу остају такве и после деформисања
- 2) Све међусобно паралелне линије и равни остају паралелне и после деформисања
- 3) Ма које две међусобно паралелне дужине у оквиру пасматране зоне тела мењају се у току деформисања у истом односу. [1]

Примена технологије пластичног обликовања је у порасту. Према релевантним подацима у савременој индустрији више од 80% свих металних материјала пре или касније бива обрађено неким од технолошких процеса пластичног обликовања.

У раду ће бити говора о хомогености деформисања при обради танких лимова као и о анализи хомогености деформисања преко дијаграма дистрибуције деформација за вишефазно једноосно затезање и развлачење полусферним извлакачем.

2. ДЕФОРМАЦИЈЕ И ДЕФОРМАЦИОНА СТАЊА

2.1. Претходне напомене

Под деформацијом се подразумева величина која карактерише степен деформисања тела које се обликује. Обично се деформације дефинишу у односу на почетно недеформисано стање. При решавању било ког проблема понашања тела при пластичном обликовању потребно је познавати расподелу деформација, односно деформационо поље. [5]

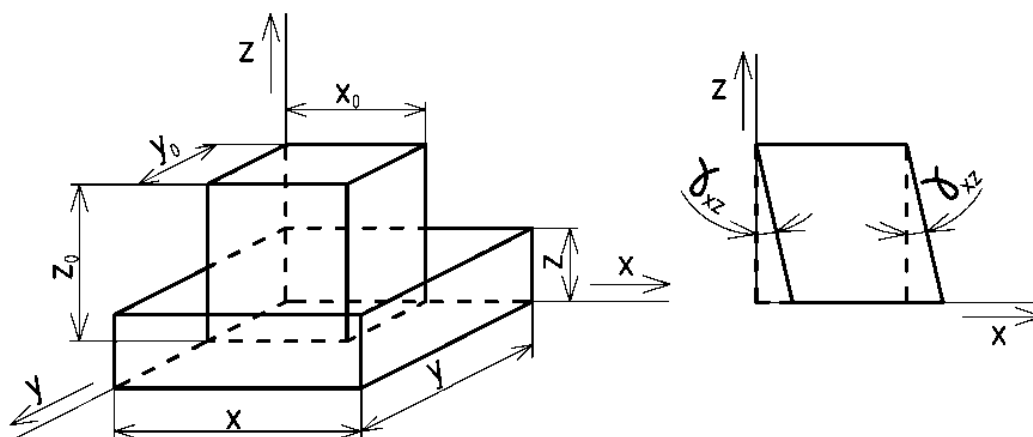
При пластичном деформисању неког тела мењају се његове димензије, а најчешће и основни облик. Поједине тачке таквог тела се релативно померају у односу на њихове раније положаје. При детаљној анализи суштине процеса деформисања најчешће се не полази од промене димензије читавог тела, већ од деформација које се односе на неку уско локализовану зону у њему. Ово је због тога што се деформације у појединим зонама, а најшире посматрано и у појединим тачкама, међусобно разликују у општем случају. При томе се претпоставља да је у оквиру тако издвојене мале запремине деформисање хомогено (деформационо стање је исто у свим тачкама). Осим тога неопходно је да се дефинишу тзв. "мале деформације" које одговарају појединим мањим етапама деформисања, да би се њиховим накнадним сабирањем дошло до великих, односно коначних деформација посматраног елемента запремине.

При практичном решавању задатака често се законитости и односи који важе за релативно мали део тела које се деформише преносе, односно примењују, на читаву његову запремину или њен релативно велики део. Тиме се у већини случајева добијају решења која само приближно одговарају реалности, али се методологија решавања знатно поједностављује. [1]

По својој природи деформације могу бити: еластичне, које настају са престанком дејства оптерећења и пластичне (трајне), које остају и после престанка дејства оптерећења. У погледу величине деформације могу бити: бесконачно или диференцијално мале, мале, коначне и велике (укупне, збирне), а по начину настанка: лонгитудиналне (линијске) и смицајне (угаоне). [5]

2.2. Појам деформације и начини њеног изражавања (показатељи деформације)

Посматра се мала запремина у облику паралелопипеда, издвојена у околини неке тачке тела које се деформише, према слици 2.1. Ако се процес деформисања изводи притискивањем (сабијањем), онда се лако може закључити да се у општем случају могу изменити дужине ивица овог елемента као и углови између његових страница. То значи да ће се у посматраном случају смањивати првобитна дужина z_0 , а x_0 и y_0 ће се повећавати. Истовремено се може променити угао од 90° између страница паралелопипеда за неки угао γ (заокретање, ротација клизање). [1] Деформације које се односе на промену дужине ивица су линијске (уздужне, лонгитудиналне), а деформације закосењна су угаоне (смицајне, тангенцијалне). Уобичајено је да се мале линијске деформације означавају са ε .



Слика 2.1 Шема линијских и угаоних деформација елементарног паралелопипеда

Линијске мале деформације, које се понекад називју и дилатације, могу се приближно изразити преко односа прираштаја дужине ивица и њиховог првобитног износа.

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_0}; \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y_0}; \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta z}{z_0}$$

Диференцијално мале линијске деформације дефинишу се изразима:

$$d\varepsilon_x = \frac{dx}{x}; \quad d\varepsilon_y = \frac{dy}{y}; \quad d\varepsilon_z = \frac{dz}{z}$$

Увођењем помераја у правцу координатних оса (u_x, u_y, u_z) могуће је дефинисати линијске мале деформације:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

Конечне деформације имају већи интензитет па се не могу занемарити квадрати и производи малих чланова. Израз представља коначну деформацију у правцу x осе.

$$e_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right]$$

Као и у случају напона, погодно је да се и деформације посматрају у три међусобно управна правца и да се ти правци тако одаберу да на површинама које леже управно на њих нема угаоних деформација, већ постоје само линијске-издужења или скраћења. Осе које стоје у тим правцима су, заправо, главне осе, док су деформације дуж њих главне деформације $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$.

Оне деформације које се односе на увећање претходних димензија сматрају се позитивним, а оне које се односе на њихово смањење негативним. Једна од главних деформација је увек максимална по апсолутниј вредности у односу на друге две главне деформације и она има супротан знак.

$$|\varepsilon_1| \geq |\varepsilon_2| \geq |\varepsilon_3|$$

Деформационо стање у околини једне тачке у потпуности се дефинише тензором деформације. Компоненте тензора деформације могу бити мале или коначне. Тензор мале деформације је:

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix}$$

Еквивалентна (ефективна) деформација дата је изразом:

$$\varepsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)}$$

То је инваријантна скаларна величина која илуструје деформационо стање.

У процесима пластичног обликовања велики практичан значај имају показатељи великих (укупних, збирних) деформација. Реч је о деформацијама читаве запремине, или већих делова тела које се обликује. На тај начин се израчунавање деформација знатно поједностављује. Ако је процес деформисања хомоген (једнаке деформације у

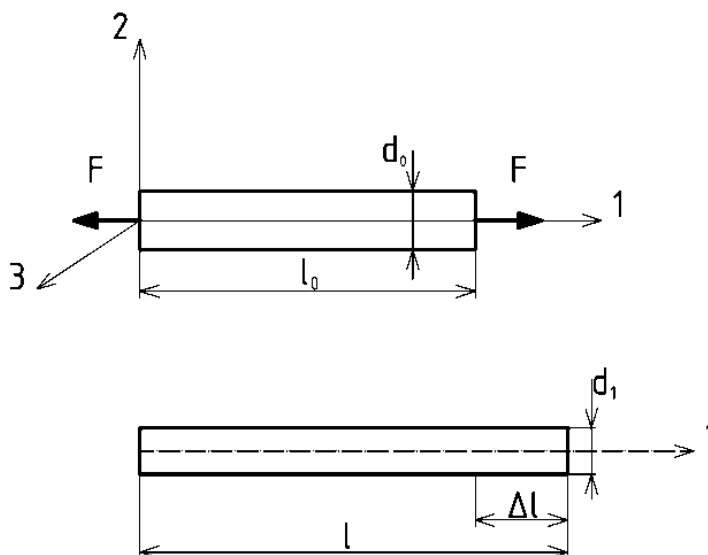
посматраној запремини) овакво упрошћење не умањује тачност. Ако процес није хомоген резултат је осредњавање променљивих вредности деформације. [5]

Показатељи великих деформација су:

а) апсолутна деформација, може се схватити као промена димензије посматраног елемента или читавог тела (уколико се оно хомогено деформише), у правцу једне од главних оса (повећање или смањење):

$$\Delta l = l - l_0, \text{ mm}$$

где су l и l_0 димензије тела (или његовог елемента) у посматраном правцу и то у неком тренутку деформисања (l) и на почетку (l_0). Међутим, овај вид изражавања деформација се избегава као непогодан, јер вредност деформације не зависи само од степена оствареног деформисања већ и од апсолутне вредности посматраних димензија (l и l_0), због чега се радије користе друге бездимензионалне карактеристике.



Слика 2.2 Издужење при једноосном затезању

б) релативна деформација (слика 2.2) или јединична деформација има конвенционалан карактер и она изражава однос апсолутне деформације према почетној димензији у истом правцу:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$$

Некада се ова деформација за инжењерско-техничке потребе изражава као процентуална:

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100, \%$$

в) логаритамска (природна) деформација добија се из односа бесконачно малог прираштаја дужине (dl) и њеног стварног тренутног износа (l). Произилази да је бесконачно мала деформација ове врсте (односно прираштај логаритамске деформације):

$$d\varphi = \frac{dl}{l}$$

Интегралењем се добија коначан облик:

$$\varphi = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon)$$

Овако дефинисана карактеристика односи се на случај хомогеног деформисања, док у случају нехомогеног деформисања она представља само условну техничку карактеристику, која даје податак о деформисаности читавог тела на основу промене његових укупних димезија (или једне карактеристичне зоне тела).

Стварно издужење се може добити и преко пречника. То је потребно показати јер се лабораторијско одређивање ових карактеристика издужења често врши преко експеримента затезањем цилиндричних епрувета. Погодније је у неким случајевима да се у току испитивања мери пречник епрувете, него њене дужине.

$$\varepsilon_d = \frac{d - d_0}{d_0}$$

$$\varphi_d = \ln(1 + \varepsilon_d) = \ln \frac{d}{d_0}$$

$$\text{а из услова: } \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi = \varphi_1 = -2\varphi_d = 2 \ln \frac{d_0}{d} = \ln \frac{d_0^2}{d^2}$$

$$\text{или } \varphi = \ln \frac{A_0}{A}$$

Очигледно је да се вредности релативне и стварне деформације међусобно разликују при истим почетним и коначним димензијама тела. Ипак, у области релативно малих деформација ($\varepsilon < 0.1$) те разлике су незнатне, па се за тај случај може сматрати да је

$$\varphi \approx \varepsilon$$

Закључујемо да се мале деформације, какве се јављају у области еластичности, могу без веће грешке изражавати тако што ће се величине прираштаја димензија доводити у однос са почетним димензијама (релативна деформација). Међутим, код великих деформација, које су еластично-пластичне и које су типичне за обраду метала деформисањем, врши се занемаривање еластичних, а као показатељ пластичних употребљава се логаритамски показатељ φ . Најчешће се узима у обзир само максимална деформација ($\varphi = \varphi_1$). [1]

г) деформација попречног пресека (релативно скраћење или контракција), према слици 2.2

$$\Psi = \frac{A_0 - A}{A_0}$$

где је A_0 -почетни, а A -тренутни попречни пресек.

Веза између наведених показатеља деформације (у области хомогеног деформисања до почетка локализације) изводи се на основу става о непроменљивости запремине у области пластичног деформисања:

$$V_0 = A_0 l_0 = V = A l$$

$$\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon = e^\varphi = \frac{A_0}{A}; \quad \Psi = 1 - \frac{A}{A_0} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon} = 1 - \frac{1}{e^\varphi} \quad [5]$$

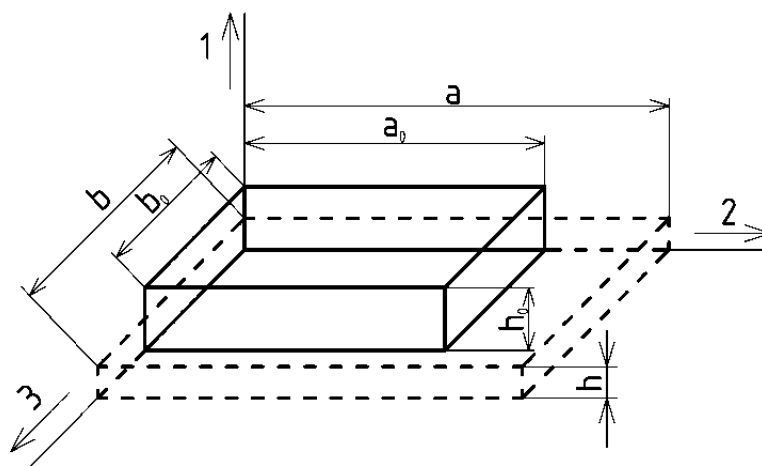
Деформацију треба схватити као математички израз (показатељ, карактеристику) који омогућава да се квантитативно оцени степен извршеног деформисања. Да би ови показатељи били упоредиви и независни од апсолутних димензија и облика тела, они морају бити тако формиран да представљају бездимензионе карактеристике. Гранична вредност деформације после које наступа разарање тела представља карактеристику пластичности материјала.

Својства која карактеришу логаритамску деформацију, а која не поседује релативна деформација су:

- 1) Исти бројчани износи се добијају за различите процесе деформисања који се обављају са истим утрошком енергије
- 2) При издужењу или скраћењу за исти степен, добијају се исте бројчане апсолутне вредности ове карактеристике (стварне вредности се разликују само у знаку)
- 3) Збир појединих деформација (изражених само у појединим фазама деформисања) једнак је укупној (израженој на основу почетних и коначних димензија тела)- својство адитивности.

Строго посматрано, логаритамска деформација изражена јединствено за читаво тело има смисла само ако је процес деформисања хомоген тј. ако су локалне деформације приближно једнаке укупној деформацији тела. Код нехомогеног процеса овај показатељ представља само геометријско-димензијски однос, али се ипак и као такав често користи као глобални показатељ извршеног деформисања тела (уколико се тиме не чини сувише велика грешка).

На основу става о непроменљивости запремине једноставним поступком могуће је доћи до везе главних деформација. Посматра се хомогено деформисање правоугаоног паралелопипеда (слика 2.3).



Слика 2.3 Деформисање паралелопипеда

$$V = h_0 a_0 b_0 = hab$$

$$\frac{h}{h_0} \frac{a}{a_0} \frac{b}{b_0} = 1$$

$$\ln \frac{h}{h_0} + \ln \frac{a}{a_0} + \ln \frac{b}{b_0} = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$$

$$\varphi_1 = -(\varphi_2 + \varphi_3)$$

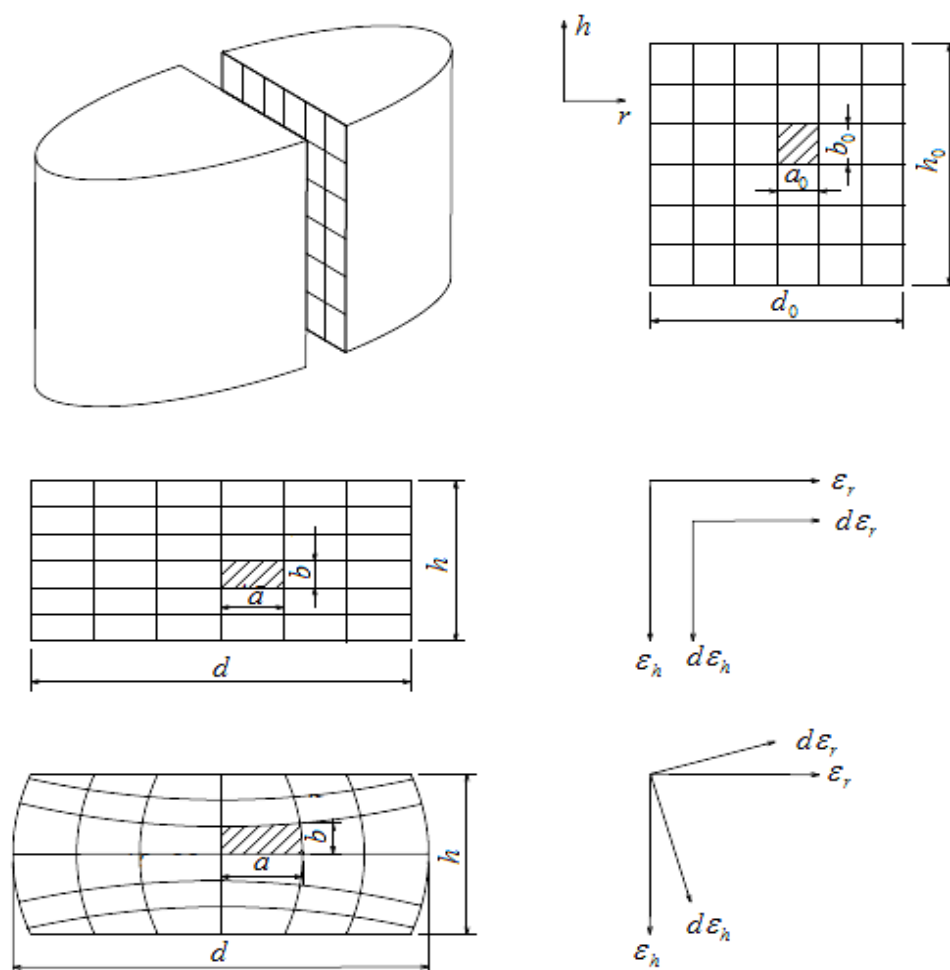
$$|\varphi_1| = |\varphi_2 + \varphi_3|$$

где су: $h_0; a_0; b_0$ почетне дужине ивица паралелопипеда, а: $h; a; b$ дужине истих ивица после извршеног деформисања.

2.3. Хомогено и нехомогено деформисање

Када је деформационо стање у неком тренутку процеса исто у свим тачкама тела, онда се деформисање сматра хомогеним. Пример за то је равномерно истезање епрувете у току стандардног лабораторијског испитивања до момента настајања нехомогеног деформисања.

Пример хомогеног и нехомогеног деформисања јесте случај сабијања цилиндричног тела. Ако је деформисање нехомогено онда се линијске и угаоне деформације појединих елемената могу одредити само експериментално, а деформација читавог тела би се могла добити сабирањем свих елементарних. То значи да строго аналитичко изражавање оваквог деформисања није могуће и зато се при решавању оваквих проблема полази од претпоставке о хомогеном деформисању.



Слика 2.4 Шема хомогеног и нехомогеног деформисања при сабијању

При томе се сматра да су главни правци деформација за читаво тело исти као и за било који елемент, а да се равни и праве линије задржавају као такве у току читавог процеса. Ова претпоставка води ка сличности између промене облика целог тела и ма ког његовог елемента. То значи да паралелопипед остаје паралелопипед у току читавог процеса, мада при томе може евентуално прећи у косоугли паралелопипед, уколико се доформација не посматра у главним правцима. Такође, може се и замислити и сфера у посматраној зони тела која ће при хомогеном деформисању прећи у елипсоид. [1]

Претпоставка о хомогеном деформисању омогућује да се на основу промена димензија целог тела изведе општи закључак и његовој деформацији. Деформације на појединим критичним местима су веће него што то показују карактеристике деформације добијене на основу укупних спољашњих димензија, што указује на одговарајуће нетачности и грешке. То значи да се на основу промена спољашњих димензија може донети само индиректан и квалитативан, а не и квантитативан закључак о величини деформација у појединим зонама. Претпоставка такође омогућује да се избегну математичке тешкоће при решавању практичних проблема.

Главни узроци настајања нехомогеног деформисања су утицаји: контактнoг трења, облика (облик алата присиљава поједине делове материјала да пређу разичите путеве, као и својства микро-структурне и макро-структурне грађе маталних материјала).

Ако би претпоставка о хомогеном деформисању целог тела представљала велико одсупање од реалног стања, онда би се тело могло поделити на већи број мањих елемената чије се деформисање без веће грешке могло сматрати хомогеним. Тако се проучавање нехомогеног деформисања тела своди на проучавање хомогеног деформисања његових мањих елемената. Величине ових елемената зависе првенствено од степена нехомогености деформисања тела у целини. У екстремном случају они се могу замислити толико малим да представљају, на пример, елементарне паралелопипеде око појединих материјалних тачака тела, са ивицама дужина dx , dy , dz . На овако замишљене елементе, у оквиру којих је деформисање хомогено, може се поделити свако тело, без обзира на степен нехомогености деформисања по читавој његовој запремини.

Да би деформисање било хомогено морају бити испуњени следећи услови:

1) Све праве линије и равни које су уочене на телу остају такве и после деформисања

2) Све међусобно паралелне линије и равни остају паралелне и после деформисања

3) Ма које две међусобно паралелне дужине у оквиру посматране зоне тела мењају се у току деформисања у истом односу.

Математички услов хомогеног деформисања (слика 2.4):

$$\varepsilon_a = \ln \frac{a}{a_0} = \varepsilon_d = \ln \frac{d}{d_0};$$

$$\varepsilon_b = \ln \frac{b}{b_0} = \varepsilon_h = \ln \frac{h}{h_0}$$

Хомогено деформисање обавља се онда када се две паралелне равни, замишљене у телу, међусобно приближавају или удаљавају, а у општем случају и заједнички заокрећу. Промена координата ма које тачке је линеарна функција њених координата пре деформисања:

$$x' = a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z$$

$$y' = a_{21}x + a_{22}y + a_{32}z$$

$$z' = a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z$$

где су: x, y, z – координате тачке пре деформисања

x', y', z' – координате тачке после деформисања

a_{ij} – константни коефицијенти.

Технологија пластичног обликовања метала се бави проучавањем како хомогеног тако и нехомогеног деформисања. При хомогеном деформисању у одговарајуће показатеље се укључују димензије целог тела, а при нехомогеном је потребно да се деформисана запремина подели на мање елементарне запремине у оквиру којих се деформисање може сматрати хомогеним. Из тога произилази да је основни проблем при анализи нехомогеног деформисања одеђивање промена деформација од једне до друге зоне. [1]

3. ДЕФОРМАБИЛНОСТ ТАНКИХ ЛИМОВА

Деформабилност представља способност материјала да се обликује до одговарајуће вредности деформације. Иако материјал може да се деформише и у еластичној области, најчешће се подразумева пластично обликовање. Код деформабилности се увек дефинише критеријум, односно износ неког показатеља деформације који ближе детерминише област деформисања. Најбољи пример је дефинисање граничне деформабилности, као способности материјала да се пластично деформише до одређених максималних, односно граничних вредности деформација. Критеријум за граничне деформације је најчешће појава разарања, локализованог деформисања или неког другог дефекта. [4]

Најзначајнији утицаји на деформабилност су: материјал (хемијски састав и структура), температура обраде, брзина деформације и напонско стање.

Утицај врсте и хемијског састава материјала може се видети на примеру челика. Код угљеничних челика са повећањем садржаја угљеника опада деформабилност. Код легираних челика поједини легирајући елементи не умањују битно пластична својства зато што стварају чврсте растворе (Si, Ni, Co, Cu, Al и Zn). Група елемената која гради карбиде (Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Ta и W) утиче на смањивање деформабилности. Погодним термичким третманом могуће је извршити сфероидизацију карбида, чиме се побољшавају пластична својства. Тврди неметални укључци показују неповољан утицај на деформабилност.

Температура обраде има утицај на деформабилност потпуно аналоган, али супротан утицају на деформационо ојачање. При температурама вишим од температуре рекристализације ефекат ојачања је отклоњен а интензитет деформационог отпора знатно смањен. Истовремено, деформабилност је веома побољшана.

Брзина деформације показује значајан утицај на ојачање, а самим тим и на деформабилност. Посебно је то видљиво при топлој обради и великим брзинама, када ефекат брзинског ојачања може да умањи деформабилност. У већини класичних процеса обликовања у хладном стању брзине су мале тако да нема битније промене деформабилности.

Напонско стање има веома велики утицај на деформабилност. Поједностављено, тај утицај се може објаснити деловањем напона на микро структурне грешке у материјалу које резултира макро ефектима. Ако у напонској шеми преовлађују затежући напони микро прслине или шупљине у структури расту. У критичном моменту интегритет структуре се разара. Достигнуте деформације су мале, односно деформабилност лоша. У супротном сличају, када преовлађују притисни напони, јавља се ефекат смањивања односно тзв. „залечивања“ микро дефеката структуре. Резултат је дуже трајање процеса

обликовања и достизање често, вишеструко већих деформација у односу на претходно поменути случај када доминирају затежући напони. [5]

Гранична деформабилост ограничава област успешне обраде у деформационом простору. Било која тачка у тој области означава деформационо стање остварено без дефеката. С друге стране границе те области су зоне неуспешне обраде. У којој ће се области наћи деформационо стање неке критичне тачке конкретног отпреска зависи од низа фактора. На већину тих фактора могуће је утицати. Некима (као што је сила држања и трење на ободу) је могуће потпуно управљати и усмеравати процес обраде ка сигурном и поузданом завршетку.

Пропорционално напрезање остварује се онда кад спољашње силе, које оптерећују посматрани елемент, од почетка деформисања расту пропорционално једном општем, константном параметру. То узрокује да је однос дијагоналних компонената девијатора тензора напона константна вредност. Потребно је и да током процеса постоји поклапање главних оса напона и деформација.

Монотонно деформисање постоји кад су испуњена следећа два услова:

- 1) Главне осе брзина деформација треба да се поклапају са истим влакнима материјала,
- 2) Однос између главних компонената брзине деформације мора се држати сталним.

Наведени услови су потпуно еквивалентни, тако да испуњење услова за пропорционално напрезање директно води ка монотонном деформисању. У сложеним случајевима деформисања најчешће нису испуњени услови пропорционалног деформисања, али скоро увек је могуће читав процес поделити на више фаза, у оквиру којих ће то бити сличај. За овај тип напрезања и раванско напонско стање следи:

$$m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \text{const.}; \quad t = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \text{const.}$$

Везе између напонског (m) и деформационог (t) параметра, за изотропан материјал, су:

$$m = \frac{2t+1}{2+t} = \frac{2\varphi_2 + \varphi_1}{2\varphi_1 + \varphi_2}; \quad t = \frac{2m-1}{2-m}$$

За анизотропан материјал:

$$m = \frac{\left(\frac{1}{r_0} + 1\right)t + 1}{\frac{1}{r_{90}} + t + 1} = \frac{\left(\frac{1}{r_0} + 1\right)\varphi_2 + \varphi_1}{\left(\frac{1}{r_{90}} + 1\right)\varphi_1 + \varphi_2}; \quad t = \frac{\left(\frac{1}{r_{90}} + 1\right)m - 1}{\frac{1}{r_0} - m + 1}$$

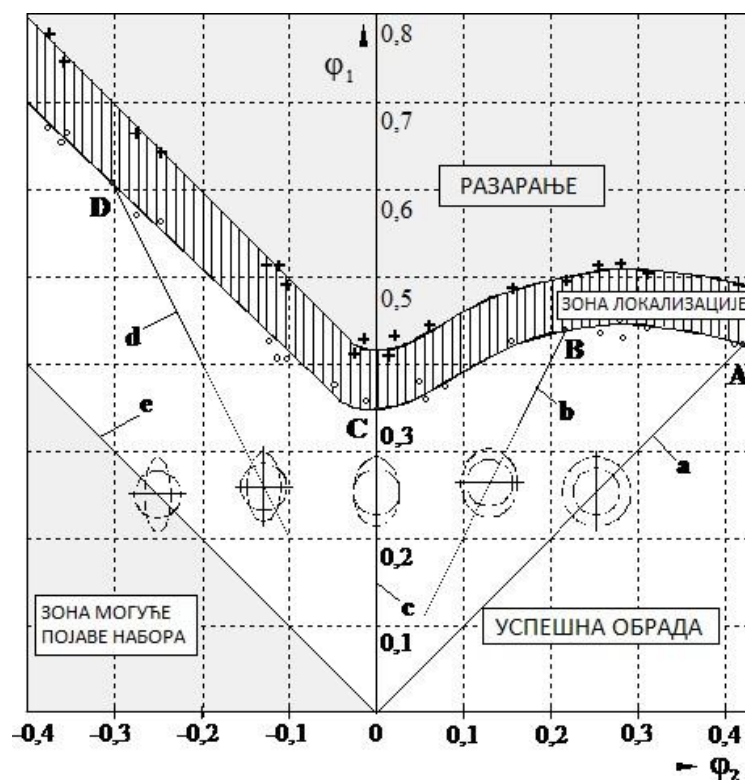
Ознака да су m и t константне не значи њихову апсолутну непроменљивост, него само у конкретној фази монотоног деформисања.

Због непроменљивости запремине у области пластичности, тродимензиони деформациони простор се може редуковати у дводимензиони и у њему дефинисати гранична деформабилност. Другим речима, координатни систем главних природних деформација у равни лима (φ_1 и φ_2) је домен графичког изражавања граничних деформација, односно визуелизације граничне деформабилности преко дијаграма граничне деформабилности (ДГД), слика 3.1.

Основу за одређивање ДГД чини графометријска техника мерних мрежа и деформациона анализа која из ње произилази, и омогућава добијање потпуног деформационог поља у свим значајним зонама комада.

ДГД има неколико поља. Зона локализације простире се од линије почетка локализованог деформисања до линије разарања, изнад које је област разарања. Испод доње линије је област успешне обраде. Експерименталне тачке које дефинишу граничне криве су, мање или више, расуте. Свака права повучена из координатног почетка до граничних кривих представља једну напонско-деформациону шему монотоног деформисања, односно једну путању. Означено је 5 карактеристичних путања које су објашњене на слици 3.1. На путањама су симболично означени кружићи мерне мреже пре и после деформисања. Запажа се да је најнеповољније раванско деформационо стање ($\varphi_1 = \varphi_3$ при $\varphi_2 = 0$) при коме се лим најбрже тањи и разара. Уколико је φ_2 негативније (нарочито ако интензитет притисног напона σ_2 расте) гранична деформација φ_1 нагло расте, што је у складу са постулатом теорије пластичности о порасту деформабилности у условима већих притискујућих напона.

Код једноосног затезања нема притискујућих напона, а вредност граничне деформације φ_1 је велика. То донекле важи и за случајеве двоосног затезања (област десно од ординате). Објашњење лежи у геометријским особинама лима (једна димензија је скоро занемарљиво мала у односу на друге две).



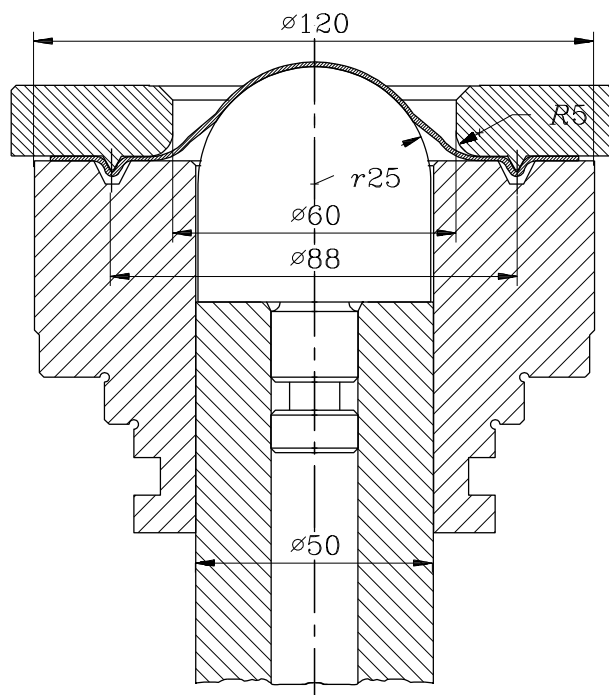
Слика 3.1 Дијаграм граничне деформабилности (ДГД)

- a) $m = 1$; $t_{iz} = 1^*$ равномерно двоосно затезање
- b) $0,5 < m < 1$; $0 < t_{iz} < 1$ неравномерно двоосно затезање
- c) $t = 0$; $m_{iz} = 0,5^*$ раванско деформационо стање (савијање, затезање)
- d) $m = 0$; $t_{iz} = 0,5$ равномерно једноосно затезање
- e) $m < 0$; $t_{iz} < -0,5$ раванско напонско стање (обод при чистом дубоком извлачењу)

*-важи за изотропан материјал

Леви део дијаграма карактерише односе који постоје код делова који се добијају дубоким извлачењем. Покушај дефинисања поља набора није дао задовољавајуће резултате, зато што на појаву набора суштински утиче геометрија комада коју дијаграм не може да узме у обзир. Десни део карактеристичан је за разне типове двоосног затезања (развлачења).

Дијаграм граничне деформабилности се одређује експериментално. Један од често коришћених поступака је развлачење полусферичним извлакачем серије епрувета различите ширине (слика 3.2). За приказан алат епрувете имају дужину 120 mm. Ширина је у распону од 30 до 120 mm са порастом од по 10 mm.



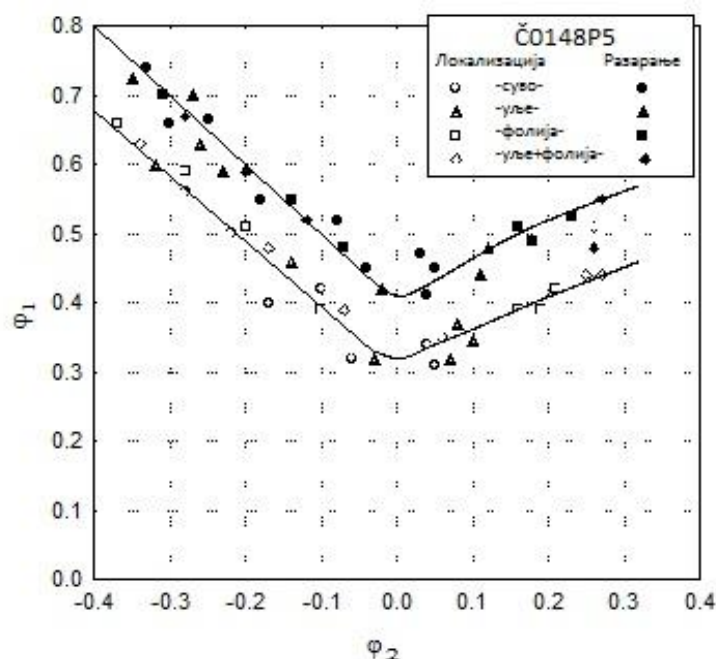
Слика 3.2 Шема алата за одређивање дијаграма граничне деформабилности

Најзначајнији утицај на положај граничних кривих имају следећи фактори:

- 1) Материјал (врста и дебљина)
- 2) Експериментална методологија одређивања
- 3) Крупноћа мерне мреже
- 4) Историја деформисања.

Утицај под 2) и 3) су обично искључени јер се за једно истраживање најчешће користи један тип мерне мреже и један поступак добијања дијаграма. Међутим, код упоређивања резултата различитих истраживања треба водити рачуна о методологији и критеријумима одређивања, условима испитивања, мерној мрежи.

Утицај трећа на положај граничних кривих ДГД дат је на слици 3.3. Експерименталне тачке су добијене варирањем контактних услова, од екстремних (потпуно суве површине, квази-хидростатичко подмазивање применом фолије и уља за дубоко извлачење) до мешовитог подмазивања (уље) и коришћења фолије.



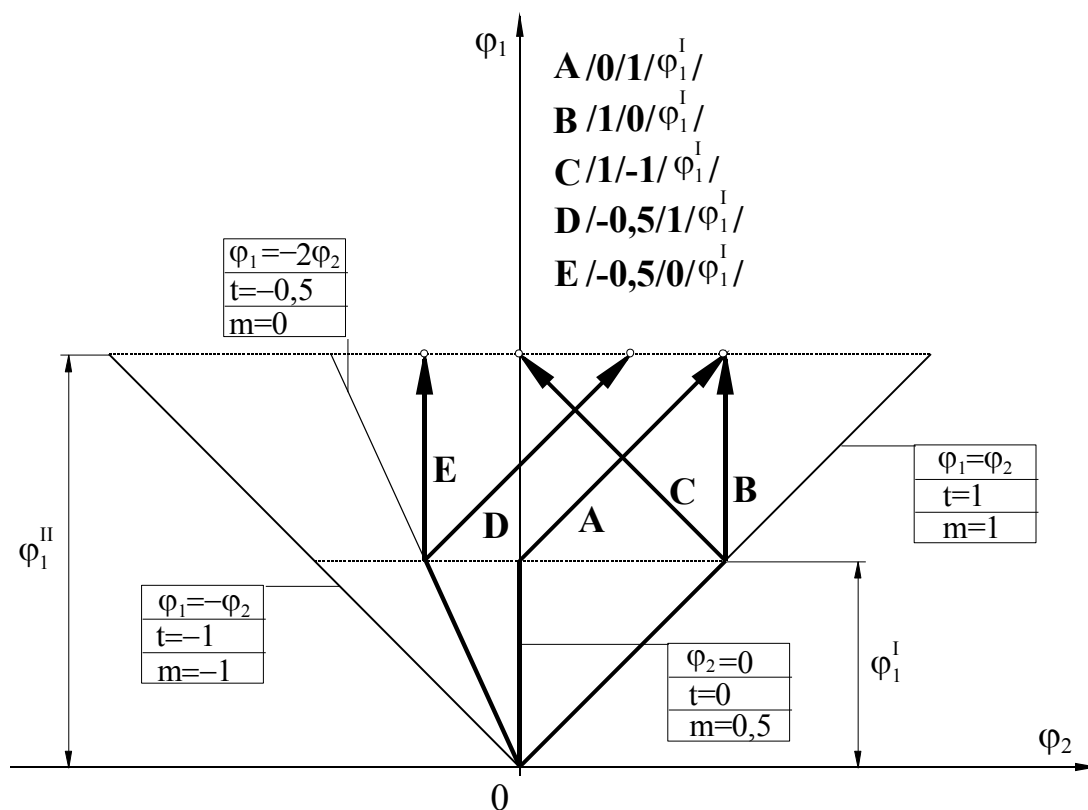
Слика 3.3 ДГД добијен при различитим условима трења

Јасно је видљиво да услови трења не утичу на било какво значајније померање граничних кривих. Илустративан је положај тачака у десном делу ДГД. Што је трење веће, теже је течење метала у тангенцијалном правцу (мање ϕ_2 , све до $\phi_2 = 0$ за раванско деформационо стање). Услови деформисања су лошији па је и ϕ_1 мање. Мањем трењу одговара равномерније деформисање. ϕ_2 је знатно веће, али и ϕ_1 расте, па се добија ефекат кретања тачака по граничној кривој. Померање граничних кривих у правцу ординатне осе захтевало би прираштај $\Delta\phi_1$ при $\phi_2 = const.$, што је могуће само у појасу локализације. Померање кривих у правцу апсцисне осе значило би да при константној већој главној деформацији ($\phi_1 = const.$) постоји прираштај $\Delta\phi_2$. Са великом сигурношћу се може рећи да променом само услова трења монотоним деформисању такве ефекте није могуће добити. Физичко разумевање деформационих збивања налаже да променом услова трења није могуће мењати интензитете деформисања у појединим правцима одвојено.

Аналитичко описивање и разумевање процеса деформисања релативно су једноставни за монотоним деформисање. Реални процеси се изводе у условима који најчешће одступају од пропорционалног деформисања, што је нарочито изражено у вишеоперационим поступцима обликовања лима. Уместо термина немонотоним или непропорционално деформисање врло често се користи термин $\square$ променљива (сложена) историја деформисања $\square$.

Историја процеса пластичног деформисања се најсликовитије изражава преко тзв. путања или трајекторија деформисања. То су линије које графички представљају

начин промене односа главних деформација φ_1 и φ_2 , све до разарања. На слици 3.4 су приказане, појединачно најчешће коришћене линеарне путање деформисања за двофазни процес.



Слика 3.4 Приказ најчешће реализованих путања при двофазном деформисању

Аналитичко изражавање путања је најједноставније преко деформационог фактора t , који је у директној вези са напонским коефицијентом m и који одређује правац путање. Свака сложена двофазна линеарна путања може се описати на следећи начин:

$$\varphi_2 = \begin{cases} t^I \cdot \varphi_1 & ; \varphi_1 \leq \varphi_1^I \\ t^I \cdot \varphi_1^I + t^{II} \cdot (\varphi_1 - \varphi_1^I) & ; \varphi_1 > \varphi_1^I \end{cases}$$

где су:

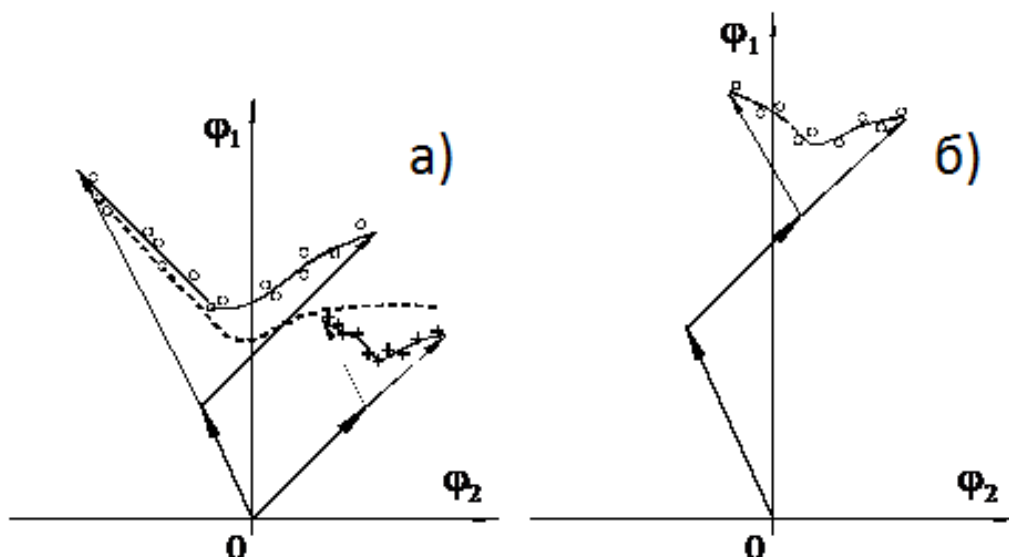
t^I и t^{II} -деформациони коефицијенти за прву и другу фазу,

φ_1^I -деформација на крају прве фазе,

φ_1 -тренутна деформација у другој фази (независно променљива).

До граничне деформације могуће је стићи различитим комбинацијама правца путања и износа деформација. На слици 3.5 под а), приказане су две двофазне шеме. У првој фази деформисање се изводи са једним напонско-деформационим стањем до

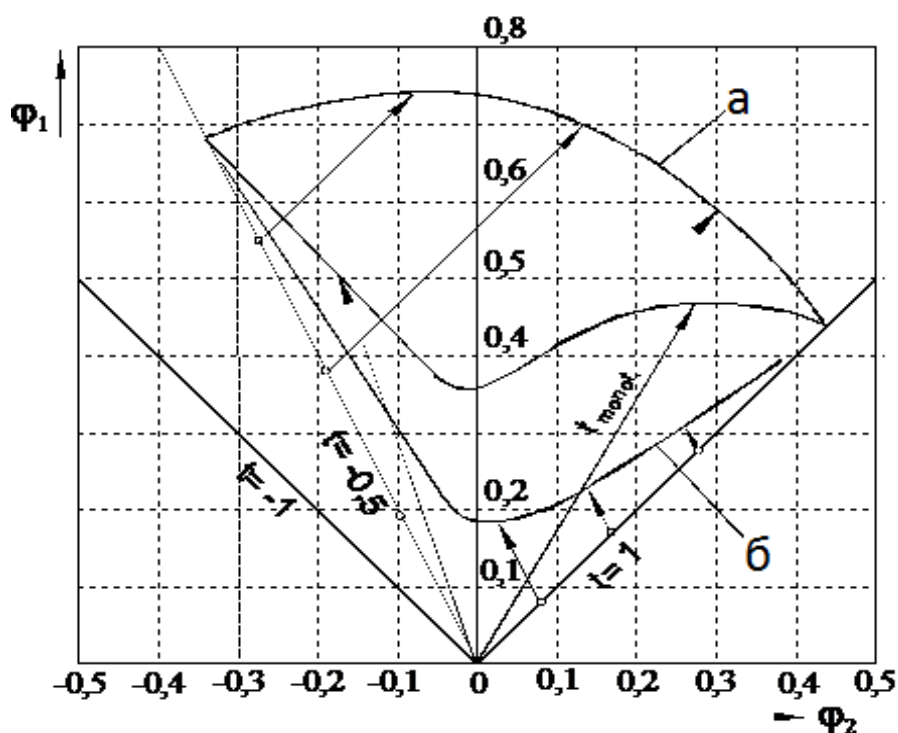
одговарајуће деформације на крају те фазе. У другој фази остварије се лепеза путања, односно напонско деформационих шема до постизања граничних деформација. Треба имати у виду да се у другој фази обликује серија епрувета и свака појединачна путања захтева једну епрувету. Због тога је потребно у првој фази деформисати довољно материјала.



Слика 3.5 Сложене историје деформисања са константним деформацијама на крају претходних фаза

Под б) је приказан трофазни процес. Испрекиданом линијом, у делу слике под а), дата је крива дијаграма граничне деформабилности при монотонном деформисању.

Другачији приступ је приказан на слици 3.6. У првој фази правац путање је константан, али крај те фазе изводи се при различитим деформацијама. У другој фази нема промене правца путања, него се распон по оси φ_2 остварује само различитим вредностима деформација на крају прве фазе (односно претходних фаза, ако је процес вишефазан). Најповољнији облик историје деформисања (приказан линијом а, на слици 3.6), с обзиром на вредност граничних деформација, описан је ознаком $(/-0,5/1/\varphi_1^I)$, а најнеповољнији (линија б) ознаком $(/1/-0,5/\varphi_1^I)$. Очигледно, деформација на крају прве фазе φ_1^I је променљива величина за ове случајеве, док су правци путања константни.



Слика 3.6 Сложене историје са променљивим деформацијама
на крају претходних фаза

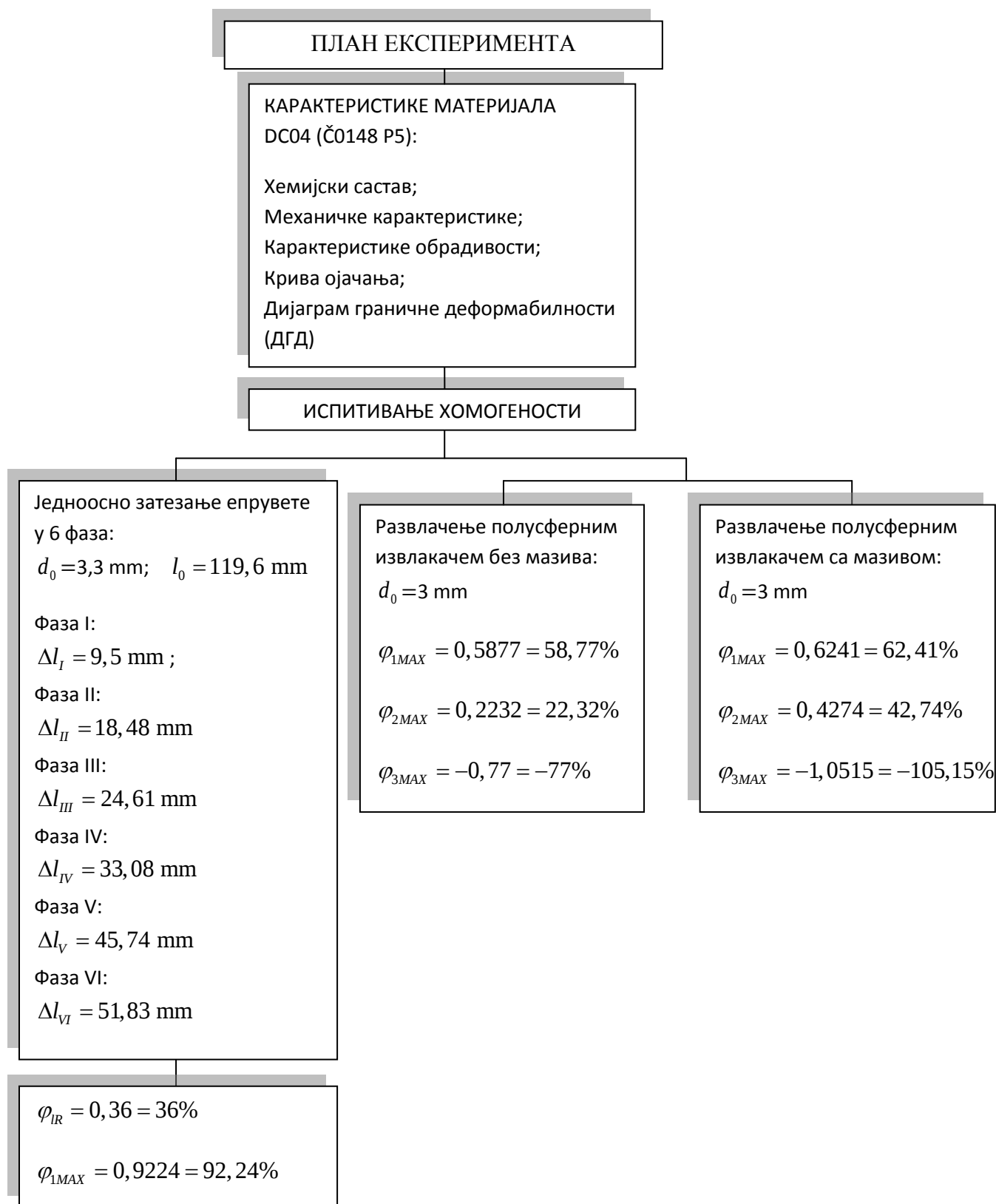
На слици 3.7 приказан је утицај сложене историје деформације дате ознакама $(/-0,5/t''/0,17$

Прва фаза је са константним правцем путање и завршава се константном вредношћу деформације. У другој фази је остварен распон праваца путања које воде до граничних вредности деформација. Дијаграм граничне деформабилности је приказан преко криве локализације и криве разарања уз означавање поља између њих. Са α је означен дијаграм граничне деформабилности добијен у условима једнофазног монотоног деформисања. Претходно једноосно затезање (у првој фази) повољно утиче на дијаграм, нарочито на десну грану (подиже се ка већим вредностима φ_1 -поље в). Карактеристично је да зона минимума кривих дијаграма граничне деформабилности приближно прати вредности деформације φ_2 на крају прве фазе. Ефекти променљиве историје зависе од врсте материјала. Криве са слике се односе на челични лив.

За коришћење дијаграма граничне деформабилности добијених у условима немонотоног деформисања битно је нагласити потребу да процеси њиховог експерименталног одређивања у потпуности одговарају посматраним реалним процесима.

Најчешће се немонотоно деформисање (сложена историја деформисања) изучава на примерима вишефазних поступака при праволинијским путањама у свакој фази, тј. са очуваним монотоним деформисањем током сваке фазе. Ако путање у реалним условима и нису праволинијске увек је могуће целокупну трајекторију деформисања погодно поделити на етапе, при чему је у свакој етапи процес пропорционалан.

4. ЕКСПЕРИМЕНТ



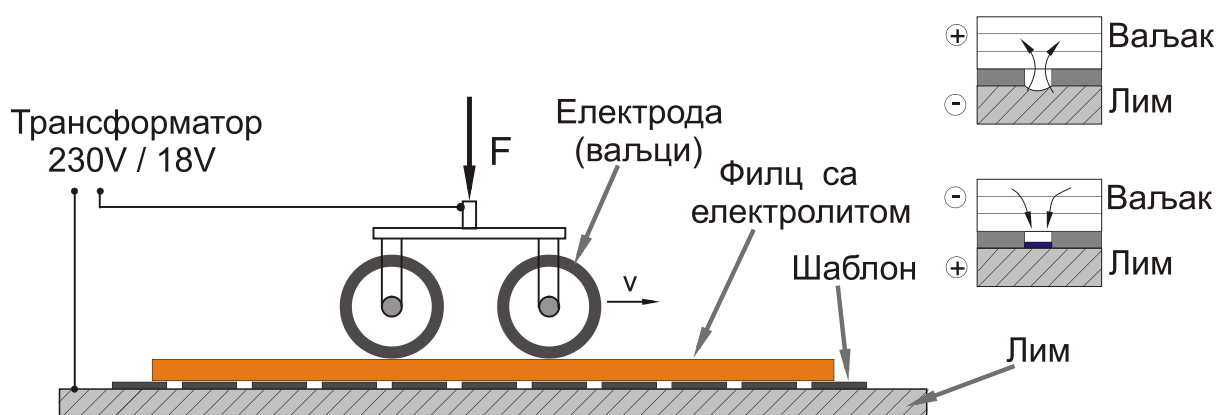
Слика 4.1 Шема плана експеримента

4.1. Метода мерних мрежа (графометрија)

За одређивање величине и распореда локалних деформација испитиваних комада коришћена је графометријска метода.

На површину лима наношена је електрохемијским поступком мрежа пре сечења табли у траке. Код електрохемијског поступка дубина нагризања је $1-20 \mu m$, дебелина линије је $0,10-0,20 mm$, а елементи мреже су величине $2 mm$ и више.

За наношење мреже за испитивање лима коришћен је електрохемијски поступак уз примену уређаја немачке фирме ERICHSEN. Принцип рада уређаја дат је на слици 4.2.



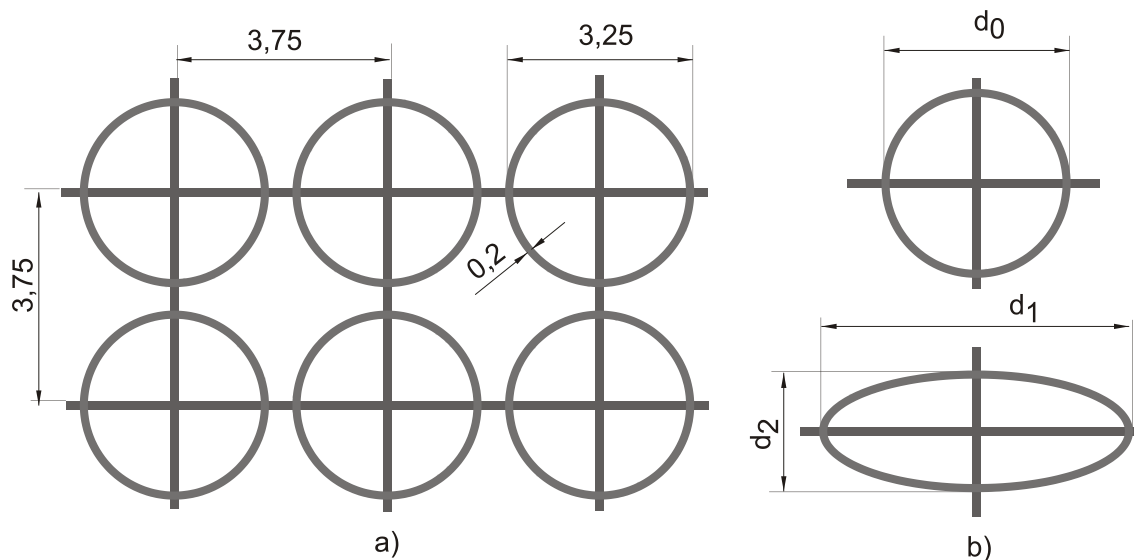
Слика 4.2 Принципијски дијаграм наношења мреже електрохемијским путем

Поступак наношења мреже је следећи:

- чишћење и одмашћивање површине лима уз помоћ ацетона,
- постављање шаблона са мрежом на површину лима,
- натапање филца одговарајућим електролитом и постављање преко шаблона,
- прелазак електродом у облику ваљака преко филца одговарајућом силом притиска и брзином,
- неутрализација даљег нагризања неутралитом и испирање у води,
- евентуално наношење мазива за спречавање корозије.

Раствор електролита и неутралита се састоји од низа хемијских једињења (киселине и соли) одговарајуће концентрације. Зависи од врсте метала на који се мрежа наноси и може се набавити од специјализованог произвођача опреме за наношење мреже. Од тих раствора значајно зависи оштрина линија мерне мреже. Раствори за потребе експеримента направљени су на ПМФ-у Крагујевцу према одређеној рецептури добијеној из лабораторије за ОМД на ФИН-у у Крагујевцу.

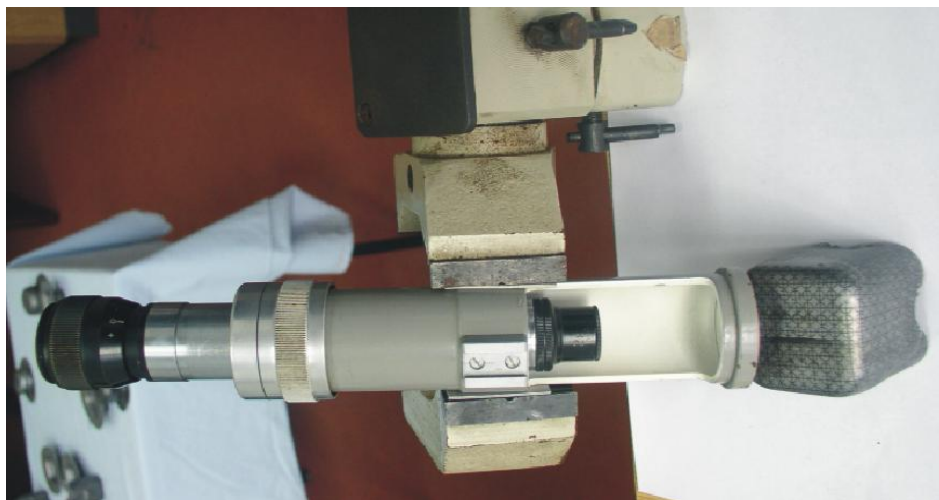
Због величине епрувета и комада, за наношење мреже коришћен је шаблон формата А4 који даје мрежу према слици 4.3. Предност оваквог наношења мреже је што не настају напони у лиму, нема оштећења и деформације лима за испитивање.



Слика 4.3 Мрежа коришћена у експерименту

а) облик и мере мреже, б) деформисани елемент мреже

Мерење димензија елемената мреже вршено је ручно помоћу мерне лупе (слика 4.4). Лупа поседује мерну скалу у опсегу 0-7 mm и обезбеђује тачност мерења од 0,05mm.



Слика 4.4 Лупа са мерном скалом за мерење елемената мреже

Главне логаритамске деформације на основу мера мреже пре и после деформације су:

$$\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \qquad \varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \qquad \varphi_3 = -\varphi_1 - \varphi_2$$

На основу деформација у равни лима може се добити деформација дебљине φ_3 .
[3]

4.2. Експериментална опрема

4.2.1. Лабораторијска машина за испитивање материјала ZWICK/ROELL Z 100

Мерни систем за механичка испитивања материјала Zwick/Roell Z100 тип TC-FR100TL.A80-003 (у даљем тексту – систем Zwick) спада у најсавременије лабораторијске уређаје за испитивање материјала. Налази се у Лабораторији за обраду деформисањем и машинске материјале на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу (слика 4.5).

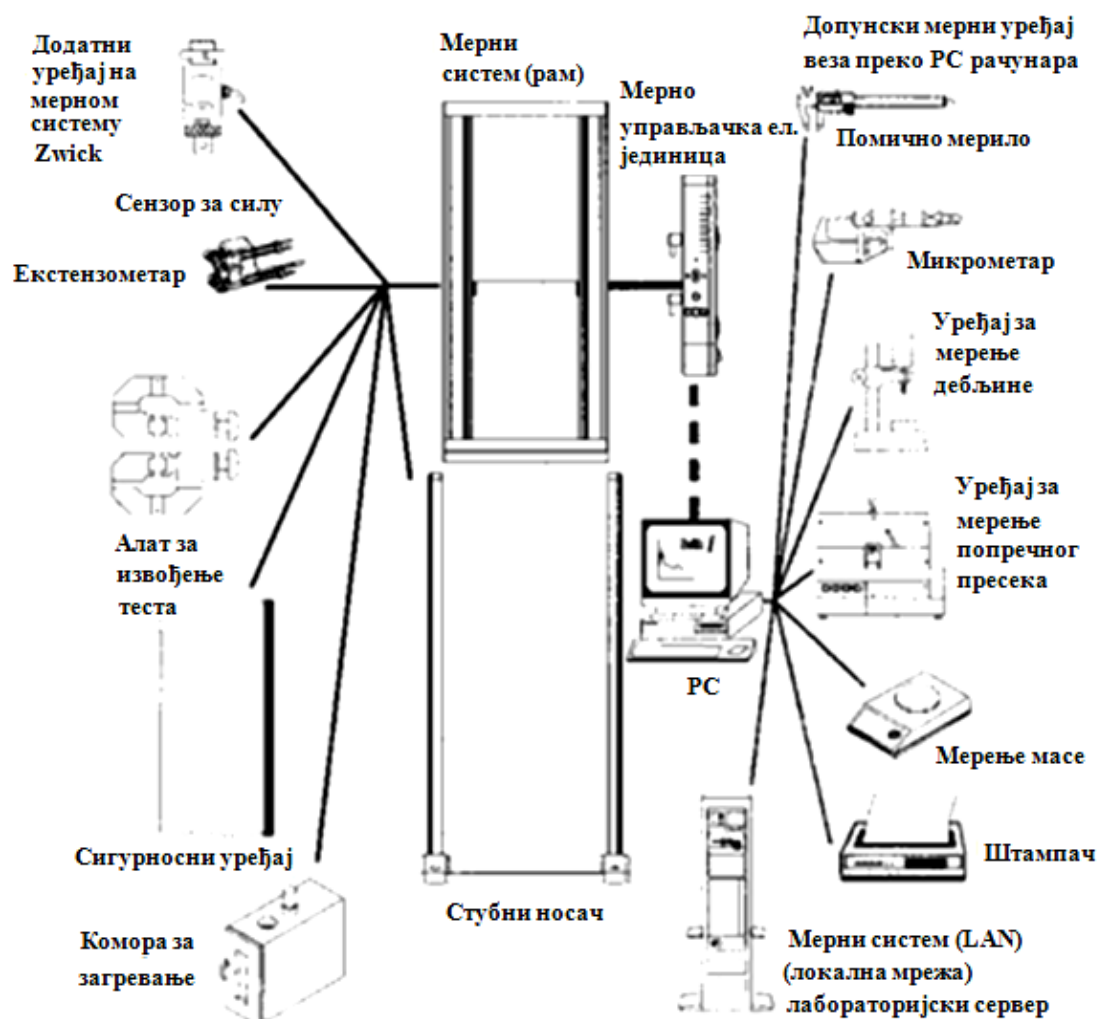


Слика 4.5 Мерни систем Zwick/Roell Z100

Основна особина овог система је потпуно компјутеризован рад, што подразумева постојање свих потребних мерних ланаца за аквизицију података (сензори – давачи, AD – DA конвертори, уређаји за обраду сигнала, одговарајући контролери итд.). Њихов рад обједињује наменски креиран професионални софтвер TestXpert ver.10. Комплетан мерни систем са свим својим деловима произведен је по највишим захтевима са аспекта производности, тачности, квалитета и безбедности. Има универзалну намену и зависно од допунских уређаја може да покрива статичка механичка испитивања материјала: затезањем, притискивањем, савијањем и то на собној и повишеним температурама до 1000°C. У тим испитивањима могуће је задовољити све захтеве према одговарајућим стандардима. Могуће је креирати и потпуно оригиналне методе испитивања и користити их у истраживачком раду. Тада је обично потребно уградити разне помоћне уређаје којих нема у основној опреми. Основна концепцијска блок шема система Zwick дата је на слици 4.6. А детаљни приказ дат је на слици 4.7.

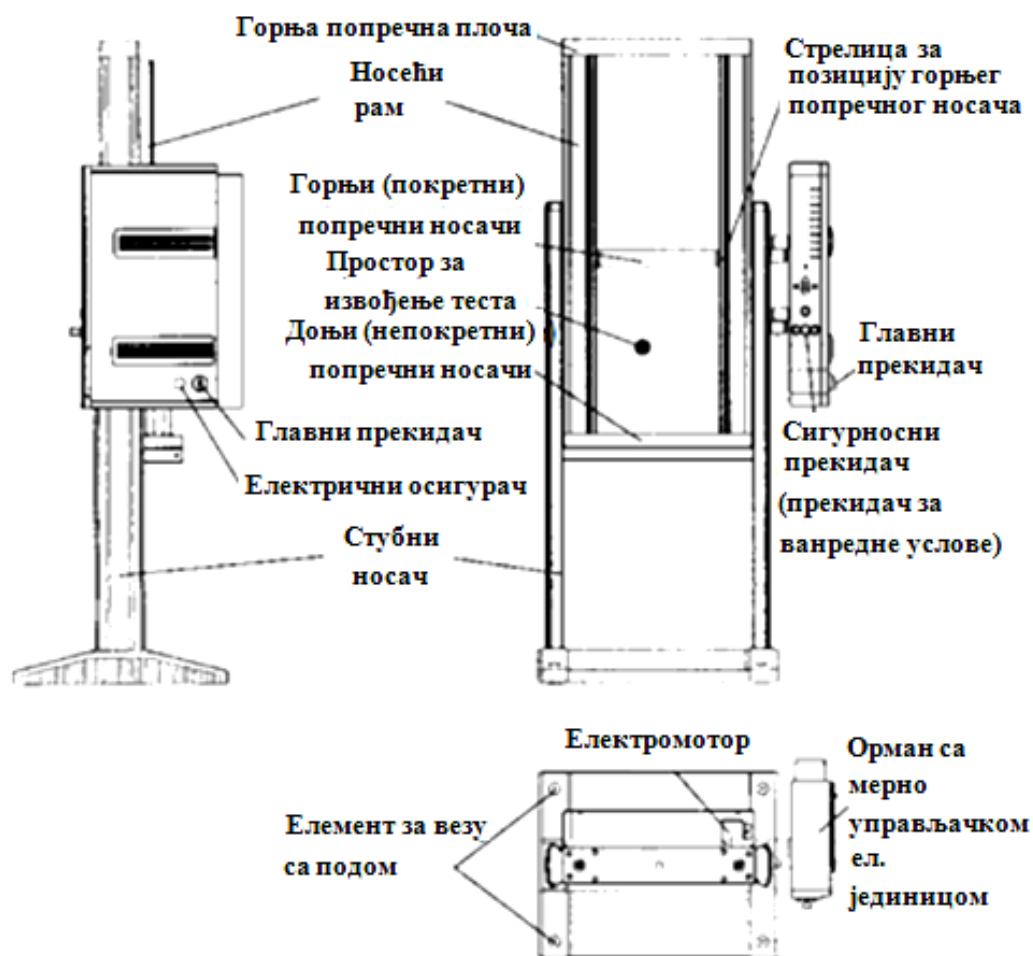


Слика 4.6 Општа шема модула на мерном систему Zwick/Roell



Слика 4.7 Шема везе периферних уређаја система Zwick/Roell

Централни део представља двоструки рам (слика 4.8) од специјалних Al профила који на себи носи погонску групу чији је главни део електромотор једносмерне струје (слика 4.9) снаге 4.41 KW и максималним бројем обртаја од 3000 o/min са припадајућим мерно управљачким уређајима (ризолверима). Од мотора се кретање на покретни попречни носач – траверзу (која носи горњу стезну чељуст) преноси преко два завојна вретена са рециркулационим кугличним наврткама високе класе тачности (слика 4.10).



Слика 4.8 Општи приказ основних елемената мерног система Zwick/Roell Z100 tip TC-FR100TLA80

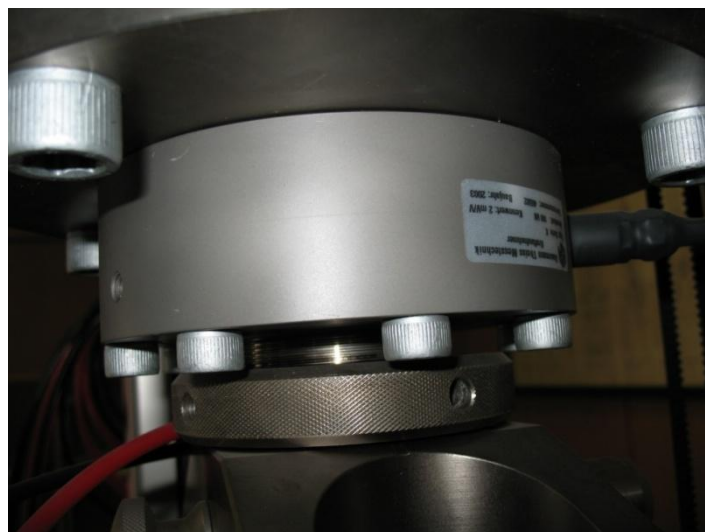


Слика 4.9 Електромотор



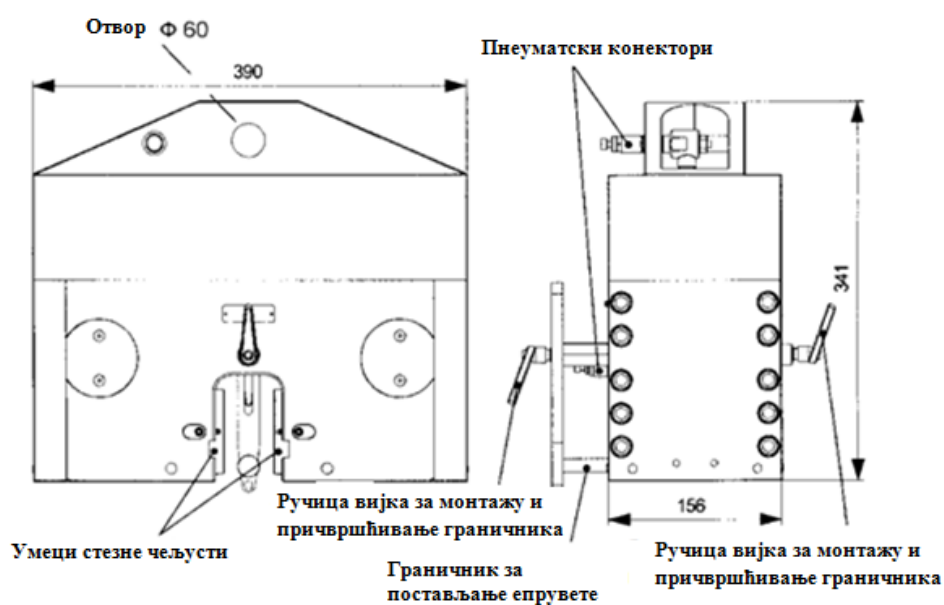
Слика 4.10 Завојно вретено

Покретна траверза на себи носи сензор – давач за мерење силе (слика 4.11) испод њега монтирана је горња стезна чељусти.



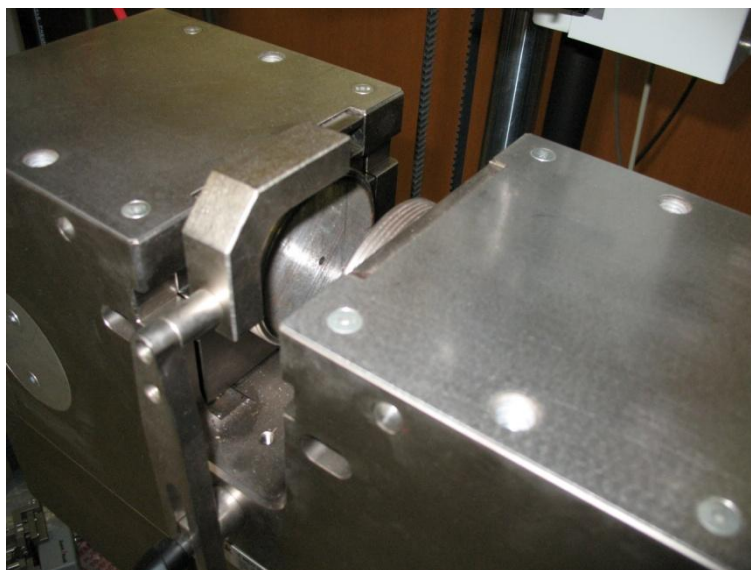
Слика 4.11 Давач за мерење силе

У конкретној конфигурацији систем Zwick има пнеуматске стезне чељусти које захтевају напајање припремљеним компримованим ваздухом (чистоћа, влажност, подмазивање), притиска максимално 10 бара. Ако не постоји централно индустријско снабдевање ваздухом (као што је овде случај) користи се засебан компресор и специјалан уређај за припрему ваздуха. Шема комплетне горње чељусти дата је на слици (слика 4.12).



Слика 4.12 Шема пнеуматских стезних чељусти

Уз стезне чељусти користи се помоћни уређај за подешавање вертикалности и саосности епрувете (слика 4.13).



Слика 4.13 Доње стезне чељусти са граничником за постављање епрувете

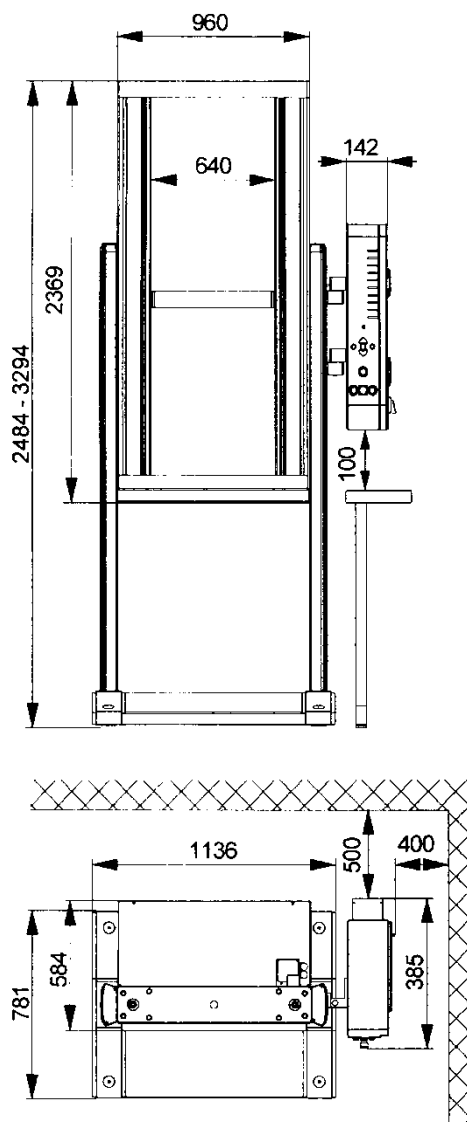
Дуж целог десног стуба главног рама постављен је контролни милиметарски лењир а поред њега су граничници – микро прекидачи, који представљају хардверско осигурање од прекорачења хода (слика 4.14).



Слика 4.14 Контролни милиметарски лењир

Командни блок за активирање чељусти садржи поред контролног манометра два вентила за активирање горње и доње стезне чељусти.

Комплетан електрично електронски блок као засебна јединица смештен је са десне стране рама. Поред безбедносног тастера, прекидача за активирање, налазе се и тастери за позиционирање покретне чељусти. Ови тастери дају и једину могућност ограничене ручне манипулације системом Zwick. Све остало ради се искључиво преко команди софтвера. Основне димензије рама система Zwick дате су на слици 4.15.



Слика 4.15 Основне димензије рама система Zwick

Основне карактеристике обухватају следеће податке:

- Брзина кретања покретне чељусти 0,0005 до 200 mm/min са тачношћу од 0,003% V_{nom} .
- Тачност подешавања хода покретне траверзе 0,02 mm.
- Тачност позиционирања испод 1 mm.
- Максимална сила 100 kN; тачност силе 0,16% до 0,4% F_{nom} , према DIN EN ISO 7500 – 1; тачност читавања силе 1N.
- Фреквенција AD конверзије при аквизицији података 500Hz.

Пнеуматске чељусти за стезање равних епрувета (правоугаоног пресека) при притиску од 10bar-а омогућавају стезну силу од 180 kN (при пречнику чељусти од 78 mm), а при притиску ваздуха од 6 bar-а стезну силу од 110 kN.

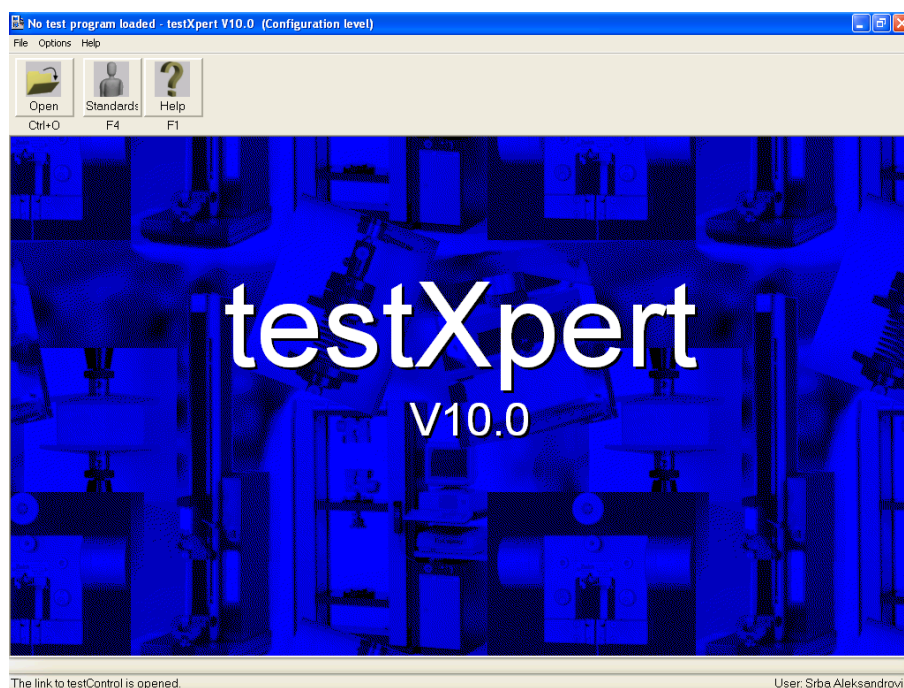
4.2.2. Софтвер TestXpert ver.10

Основна карактеристика софтвера TestXpert ver.10 је да ради у Windows окружењу, што је нетипично за овакву врсту програмских решења. Пошто Windows платформа подразумева истовремени рад више апликација, постоји реална опасност од временског кашњења при аквизицији параметара, односно променљивих, које се прате током реалних процеса. На овом мерном систему то је решено помоћу посебног контролера уграђеног у електронски систем.

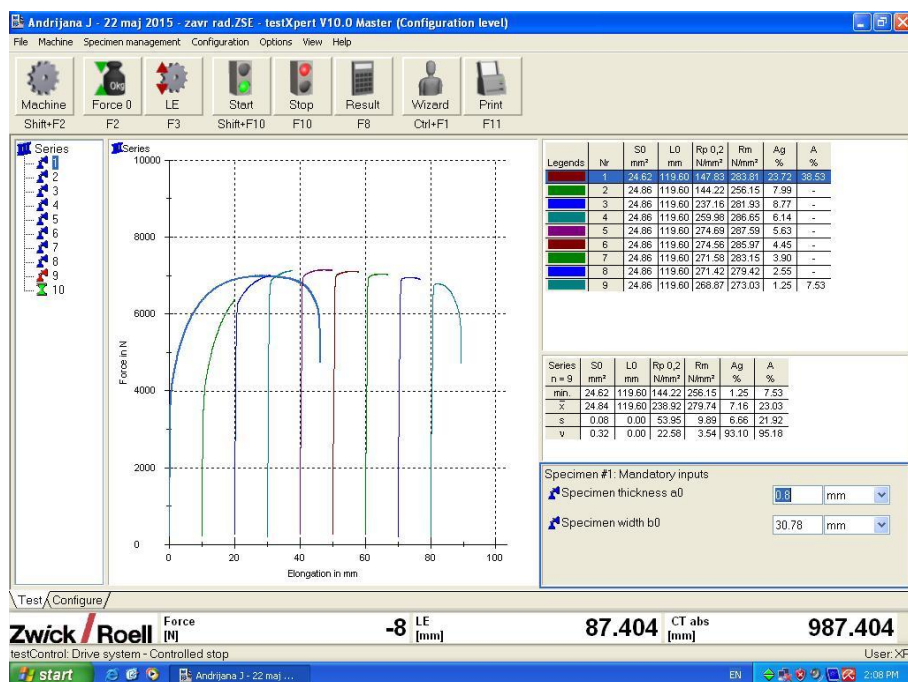
Софтвер TestXpert може да се посматра на три нивоа:

1. Праћење експеримента (test level)
2. Избор и подешавање свих системских параметара (configuration level)
3. Напредни ниво коришћења софтвера, где је могуће коришћењем ZIMT (Zwick Interpreter for Materials Testing) програмског језика креирати комплетне оригиналне процедуре испитивања материјала.

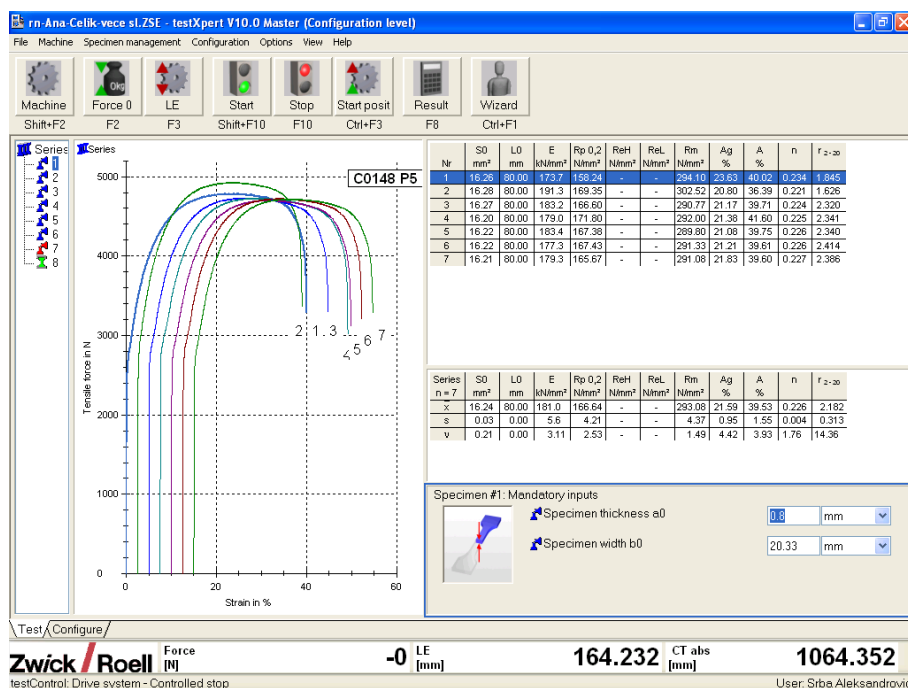
Рад на првом нивоу подразумева да су сва неопходна подешавања софтвера урађена и да се користе само основне команде са user friendly екранског interface-а (слика 4.16, слика 4.17, слика 4.18, слика 4.19). Сlike 4.16, 4.17 и 4.18 показују приказе на екрану где се виде основни прозори, toolbar-ови и статусна линија после седам урађених серија испитивања затезањем. Наравно, могуће су све манипулације прозорима као у било ком Windows програму. На слици 4.19 је приказано проширење левог простора са дијаграмима затезања на целу ширину екрана.



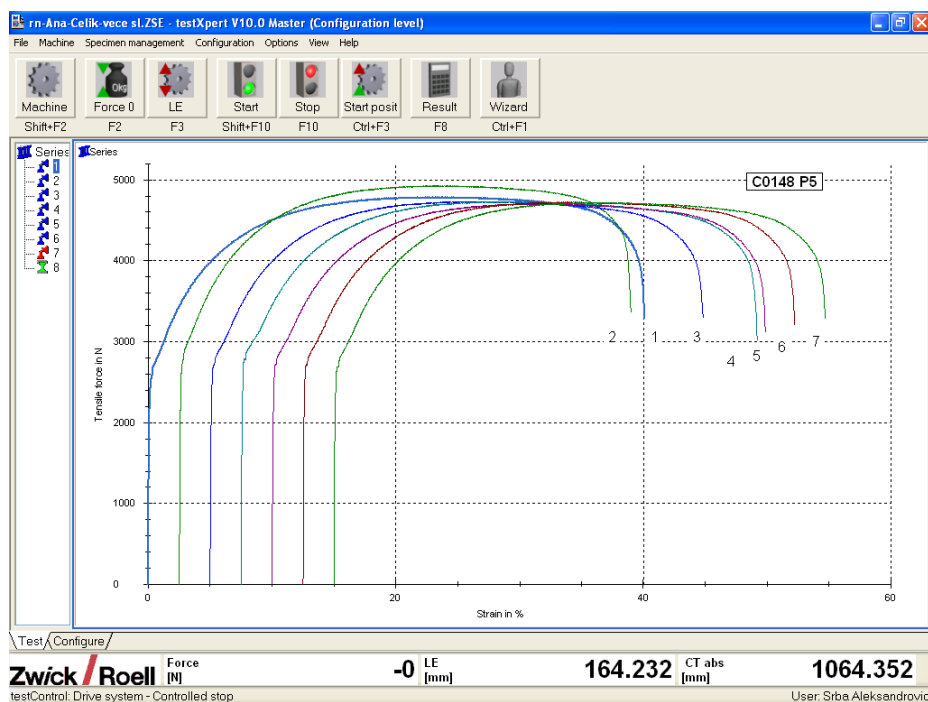
Слика 4.16 Основни прозор софтвера



Слика 4.17 Основни прозори, toolbar-ови и статусна линија после седам урађених серија испитивања затезањем

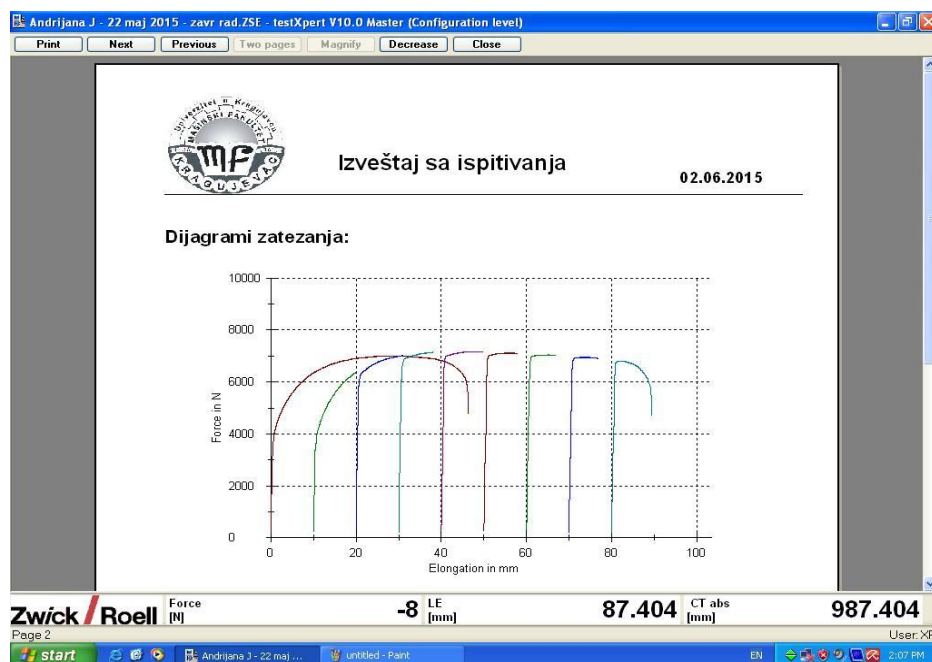


Слика 4.18 Основни прозори, toolbar-ови и статусна линија после седам урађених серија испитивања затезањем

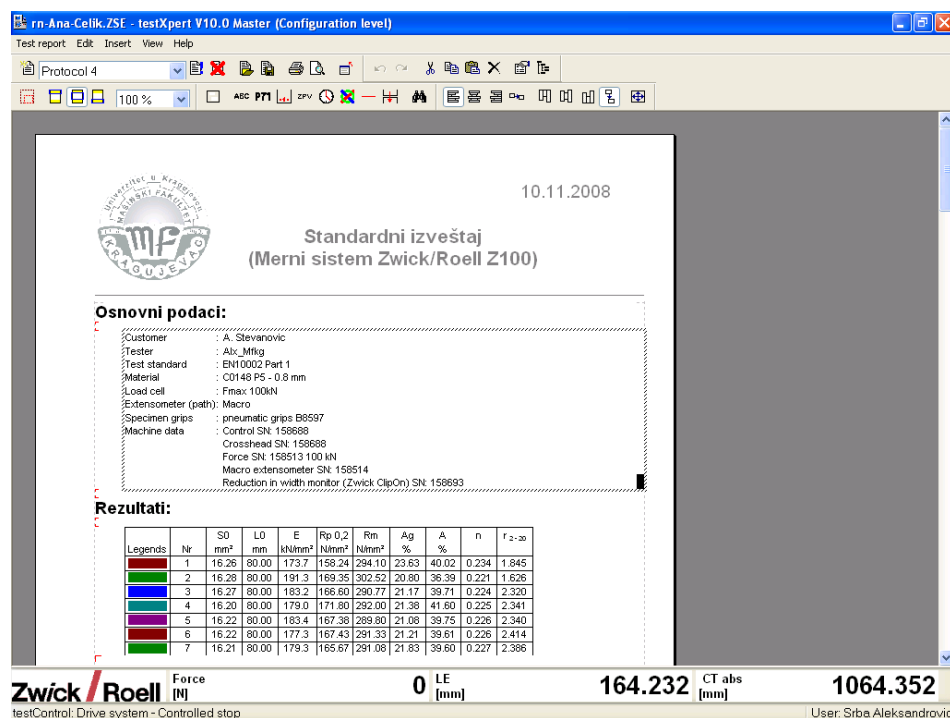


Слика 4.19 Проширење простора са дијаграмима затезања на целу ширину екрана

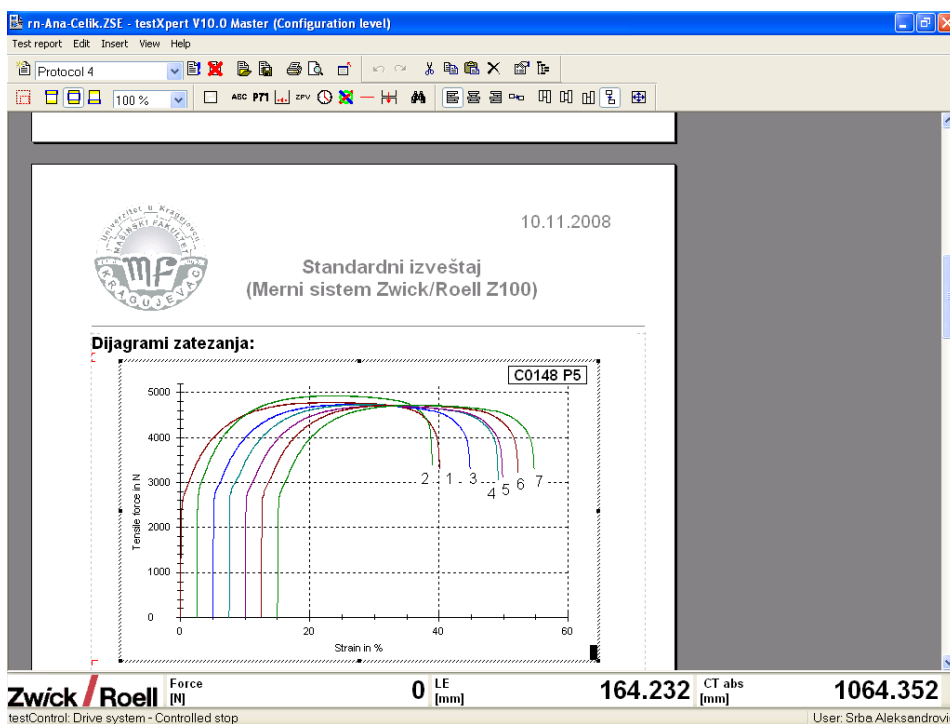
За основни коришћени ниво важно је креирање извештаја са испитивања (test report-a). У протокол едитору могуће је потпуно конфигурисати све текстуалне делове, табеле и графичке приказе везане за опис и резултате експеримента (слике 4.20, 4.21 и 4.22). Потпуно припремљен извештај могуће је штампати или експортирати у електронском облику. Поред тога могуће је експортирати и бројне низове свих мерених променљивих, за детаљније анализе у другим софтверима (текстуални ASCII фајлови формата TRA).



Слика 4.20 Извештај са испитивања



Слика 4.21 Извештај са испитивања-основни подаци и резултати

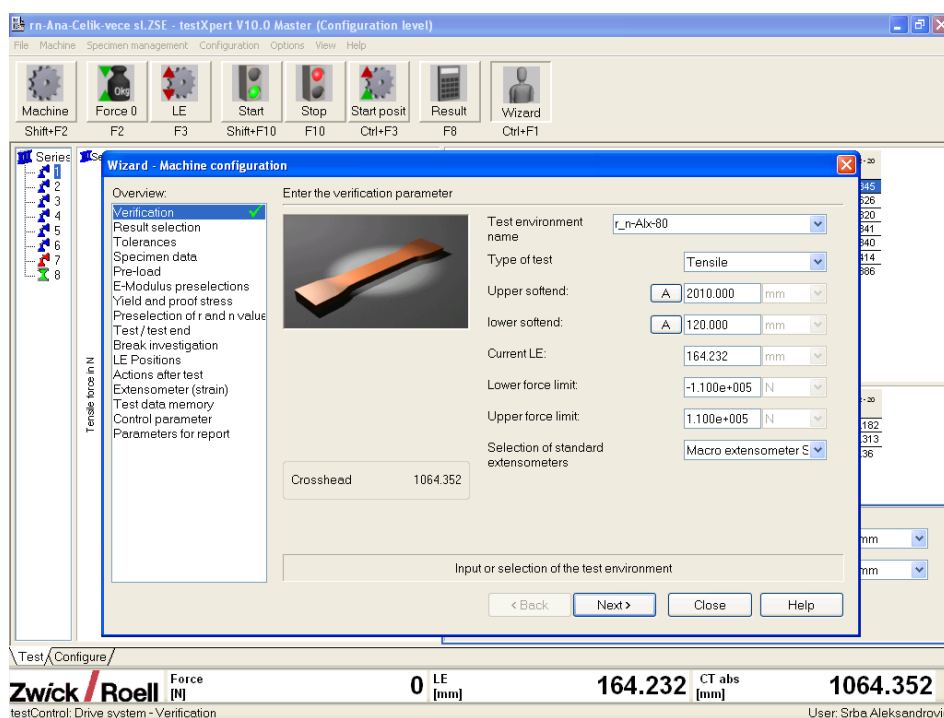


Слика 4.22 Извештај са испитивања-дијаграм затезања

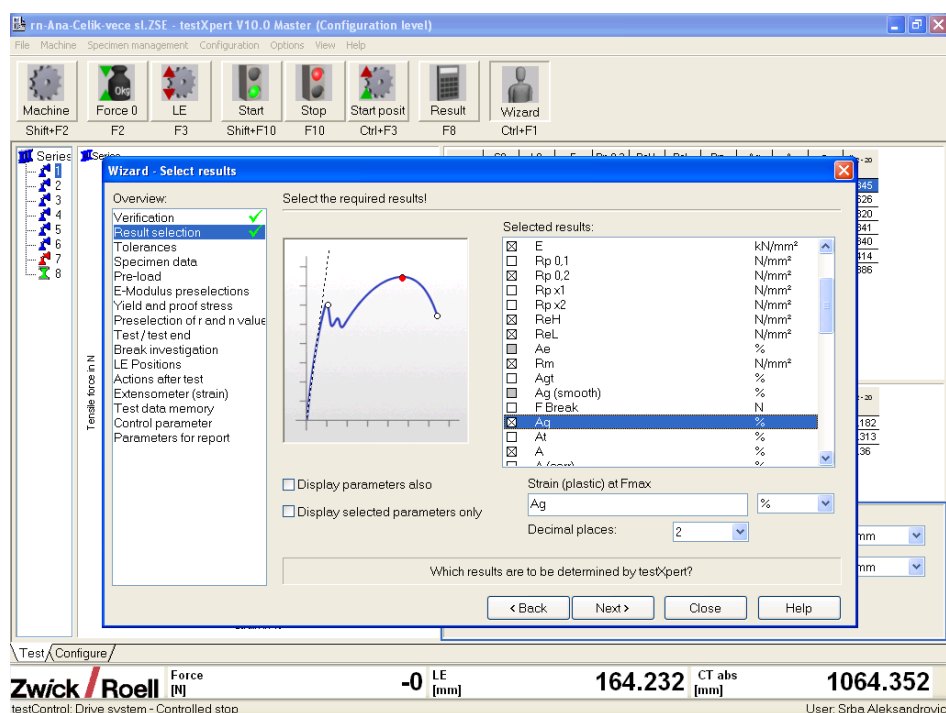
Ниво избора и подешавања системских параметара (configuration level) је значајан подједнако као и основни ниво за мерење (test level). Зависно од конфигурације целокупног мерног система произвођач обезбеђује системску подршку сагласно одговарајућим стандардима (одговарајући фајлови екстензије ZPV). Интегрисана системска подршка даје само општу основу за поједина испитивања материјала

(експерименте), па је потребно за сваки конкретан експеримент обавити детаљну конфигурацију у хардверском и софтверском смислу. Ту се пре свега мисли на регистровање свих елемената мерног система Zwick и њихову међусобну везу, с једне стране (хардвер), и избор свих потребних параметара, процедура, приказа итд. С друге стране (софтверски део.)

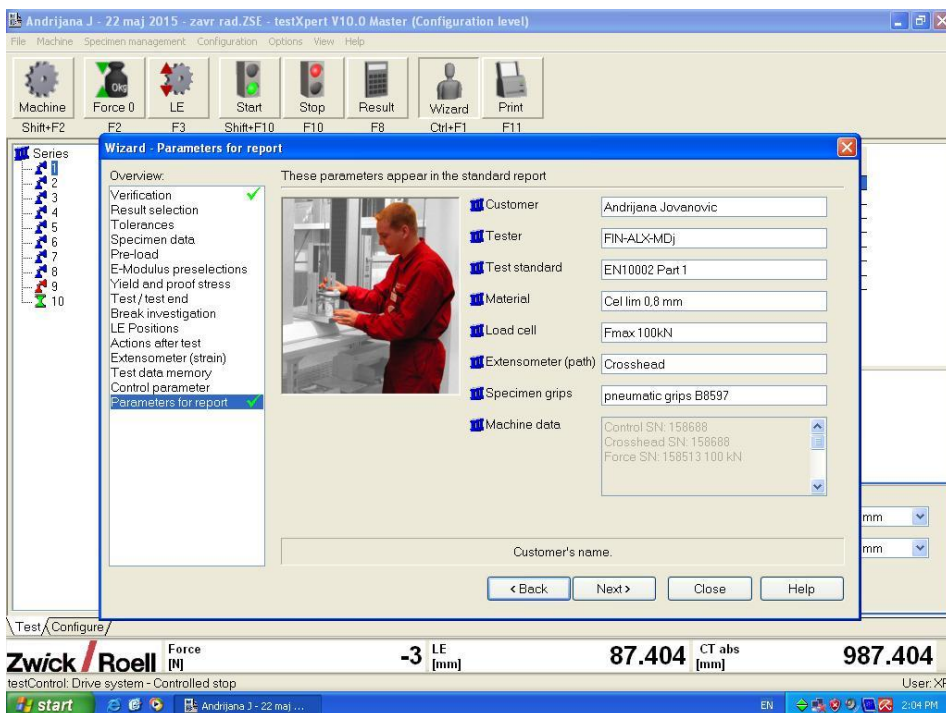
За једноставно конфигурисање теста најбоље је користити Wizard који корисника води кроз шеснаест области. На слици 4.23 види се прва област Machine configuration. Слика 4.24 показује прозор за област Result selection. Бирају се потребни параметри од преко 50 расположивих (зависно од типа теста). Овде ће се показати још само изглед прозора за последњу шеснаесту област Parameters for report. Ту су обухваћене све најзначајније основне информације о тесту: корисник, испитивач (лице које је радило експеримент), стандард, материјал, сензор за мерење силе, начин за мерење издужења, тип стезних чељусту и основни подаци о елементима мерног система (слика 4.25).



Слика 4.23 Област Machine configuration



Слика 4.24 Област Result selection



Слика 4.25 Област Parameters for report

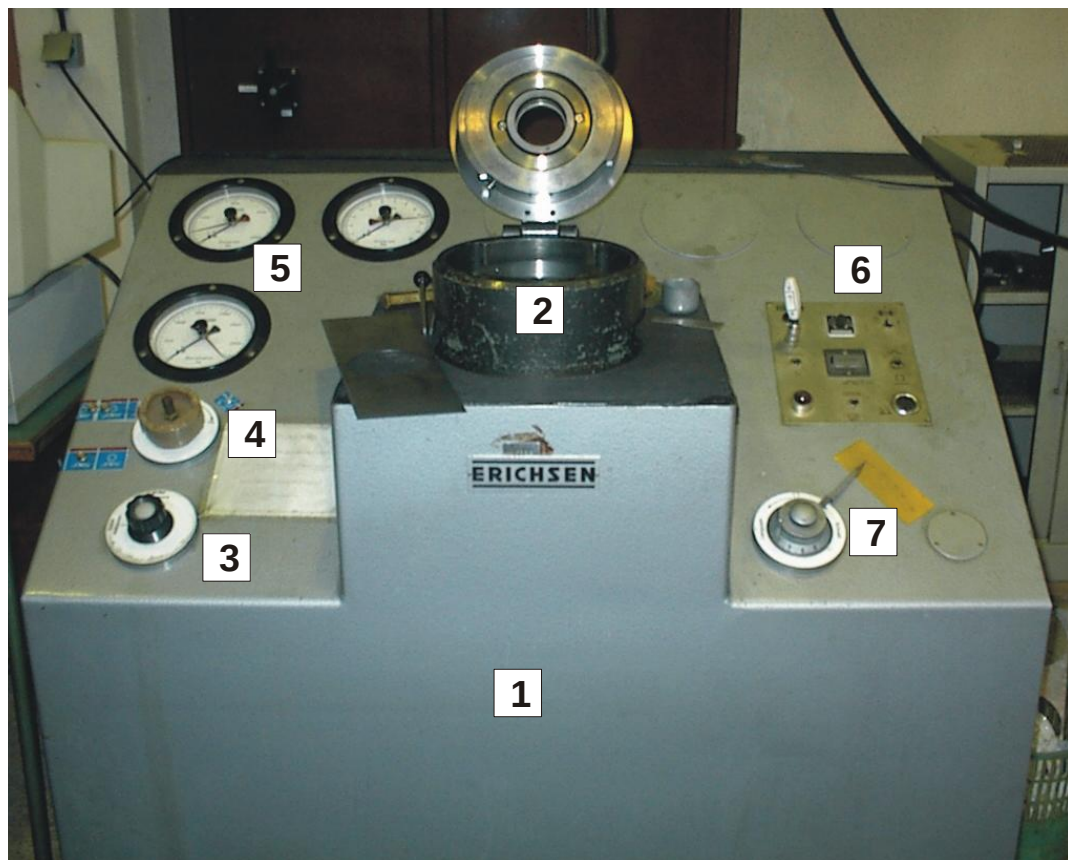
Софтвер је прилагођен раду са више серија мерења које се прате резултатима датим табеларно и графички. Промена параметара, табела и дијаграма могућа је поред протокол едитора и на нивоу основног екранског приказа (test односно configuration level). Сваки експеримент са свим подацима и резултатима могуће је сачувати као одговарајући фајл са екстензијом ZSE (приступачан само у TestXpert-у). За спољашње коришћење података, како је већ напоменуто, користе се могућности експортовања фајлова универзалних формата (RTF, PDF, TRA, BMP, WMF итд.).

4.2.3. Лабораторијска машина ERICHSEN 142/12

Универзална машина за испитивање лимова фирме ERICHSEN, тип 142/12 је лабораторијска хидраулична преса троструког дејства са могућношћу уградње различитих специјалних алата. Брзина деформисања се може регулисати у опсегу 0-250 mm/min, при чему се сила главног цилиндра може задати у два мерна опсега, 0-20 kN и 0-130 kN. У тим опсезима је могућа деформациона сила за једноосно затезање, развлачење, дубоко извлачење и нека друга специјална испитивања

Друго дејство пресе омогућава силу за просецање припремка и остварење силе држања код развлачења и дубоког извлачења. Сила држања се може подесити на константну вредност из опсега 0-34 kN.

Избацивање комада из алата након испитивања дубоким извлачењем остварује се помоћу дејства трећег хидроцилиндра машине. Није предвиђено да се мери и регулише вредност силе избацивања. Приказ машине дат је на слици 4.26 са означеним деловима машине.



Слика 4.26 Лабораторијска машина за испитивање лимова

1-кућиште машине; 2- глава за прихватање променљивих делова алата; 3- избор опсега силе главног дејства; 4- избор силе држача; 5- манометри за читавање силе; 6- управљачка плоча; 7- подешавање брзине деформисања.

4.2.4. Алат за испитивање развлачењем

Алат за развлачење је тако конципиран да не дозвољава померање обода припремка, док се деформисање обавља само унутар отвора матрице под деловањем извлакача (слика 3.2). Елементи алата за испитивање развлачењем и дубоким извлачењем дати су на слици 4.27. [3]



Слика 4.27 Неки елементи алата за развлачење и дубоко извлачење

1-полусферни извлакач за развлачење; 2- држач лима алата за развлачење;
3- матрица алата за развлачење, просекач и помоћни прстен; 4, 5, 6 и 7-
елементи алата за дубоко извлачење (нису коришћени у овом експерименту)

4.3. Резултати експеримента

4.3.1. Карактеристике материјала

Хемијски састав, основне механичке карактеристике и карактеристике обрадивости челика DC04 дате су у табели 4.1 и 4.2, а дијаграм граничне деформабилности на сл. 4.28. Лим је домаће производње и спада у групу квалитетних лимова предвиђених за дубоко извлачење делова сложене геометрије.

У табели 4.2 дате су механичке карактеристике (R_p -напон на граници течења, R_m -затезна чврстоћа, A_{80} -процентуално издужење при разарању, n -експонент деформационог ојачавања (n фактор) и r -коэффициент нормалне анизотропије (r фактор). Вредности су одређене с обзиром на раванску анизотропију у три правца у равни лима. Референтни је правац ваљања (0°). Затим су вредности осредњене.

Изрази за криве ојачања срачунате за правац ваљања дате су у табели 4.2, а њихов дијаграмски приказ на сл. 4.29.

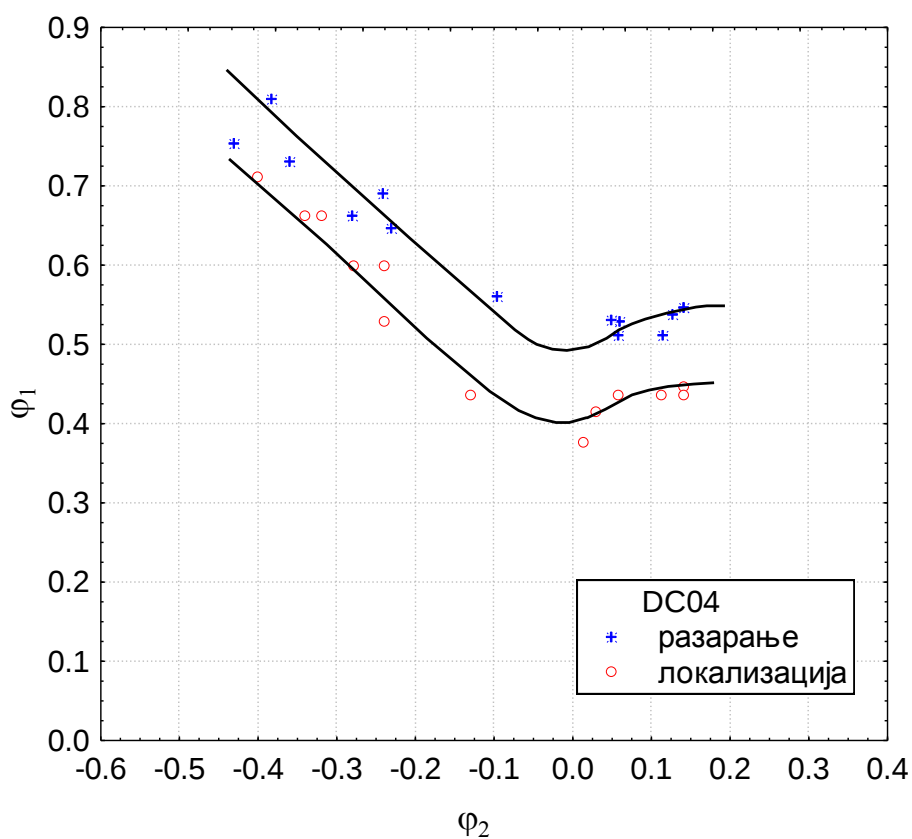
Изглед микроструктуре испитиваних лимова, при увећању од $100\times$ дат је на слици 4.30. Структура челичног лима састоји се од светлих жилавих зрна ферита између којих су смештена кртија острвца перлита.

Табела 4.1 Хемијски састав челика Č0148P5 (DC04)

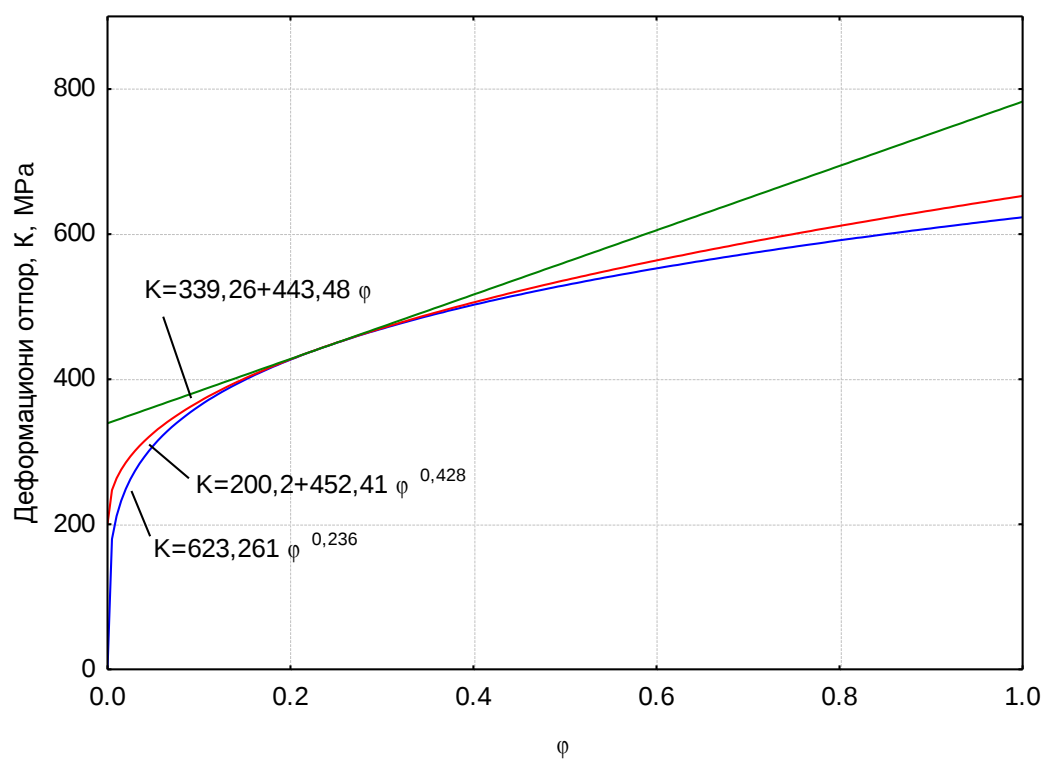
	Садржај елемената у %					Опис микроструктуре
	C	Si	Mn	P	S	
Прописан	до 0,10	до 0,20	0,20 до 0,45	max 0,030	max 0,035	Феритна структура
Одређен	0,06	у траговима	0,28	0,014	0,021	

Табела 4.2 Карактеристике материјала DC04 (Č0148P5)

Механичке карактеристике					
Угао	R_p , МПа	R_m , МПа	A_{80} , %	n	r
0°	194.4	352.5	32.4	0.236	1.463
45°	204.1	350.8	36.2	0.227	1.397
90°	198.2	348.3	39.6	0.250	1.656
$\bar{X}$	200,2	350,6	36,1	0,235	1,505
Криве ојачања (0°): $K=675.546 \cdot \phi^{0.236}$, МПа					
$K=200.2+452.41 \cdot \phi^{0.428}$, МПа					
$K=339.26+443.48 \cdot \phi$, МПа					



Слика 4.28 Дијаграм граничне деформабилности за челик DC04 (Č0148P5)



Слика 4.29 Крива ојачања



Слика 4.30 Изглед микроструктуре за челични лим (увећање $100\times$)

4.3.2. Испитивање хомогености деформисања при једноосном затезању

Први део експеримента се односи на једноосно затезање. За потребе деформационе анализе, пре свега се на површину лима електрохемијским путем наноси мерна мрежа састављена од кругова номиналног пречника $d_0 = 3,3 \text{ mm}$. Почетна дужина епрувете износи $l_0 = 119,6 \text{ mm}$, а дебљина је $s_0 = 0,8 \text{ mm}$. Испитивање хомогености врши се затезањем епрувете у 6 фаза до лома, на лабораторијској машини Zwick/Roell Z100. Мерење деформисане мерне мреже изводи се ручно помоћу мерне лупе са тачношћу читавања $0,05 \text{ mm}$.

Укупно издужење у свакој од фаза износи:

Фаза I:

$$\Delta l_I = 9,5 \text{ mm} ; \varphi_{II} = 0,0764 = 7,64\%$$

Фаза II:

$$\Delta l_{II} = 18,48 \text{ mm} ; \varphi_{III} = 0,1436 = 14,36\%$$

Фаза III:

$$\Delta l_{III} = 24,61 \text{ mm} ; \varphi_{III} = 0,1871 = 18,71\%$$

Фаза IV:

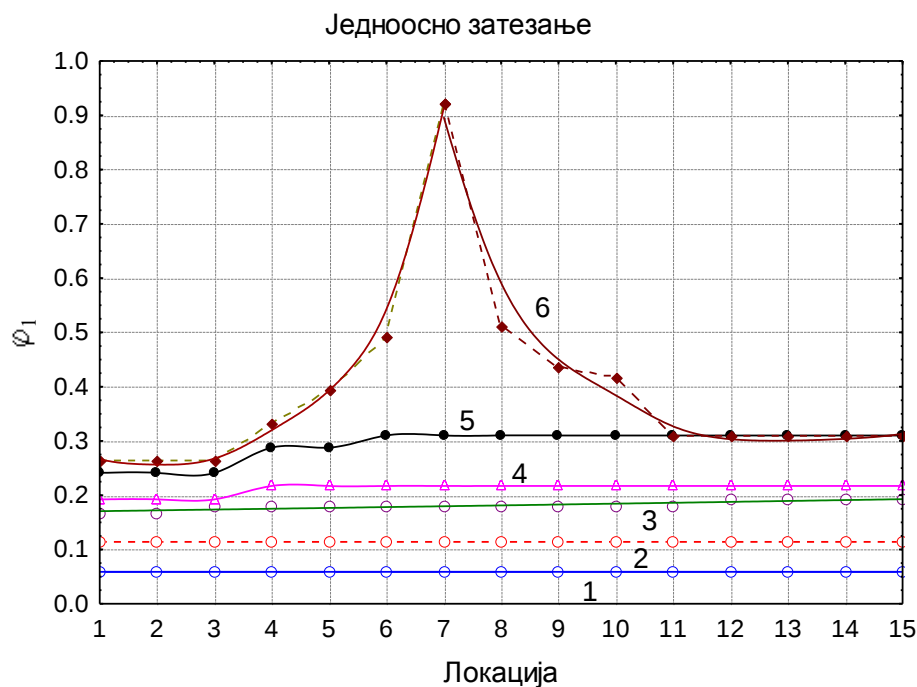
$$\Delta l_{IV} = 33,08 \text{ mm} ; \varphi_{IV} = 0,2441 = 24,41\%$$

Фаза V:

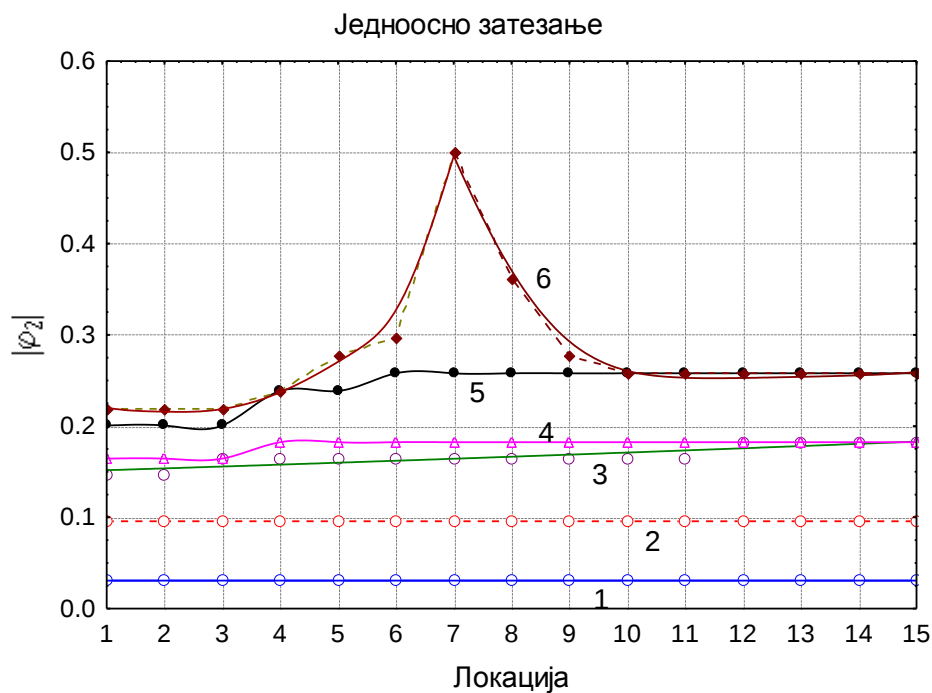
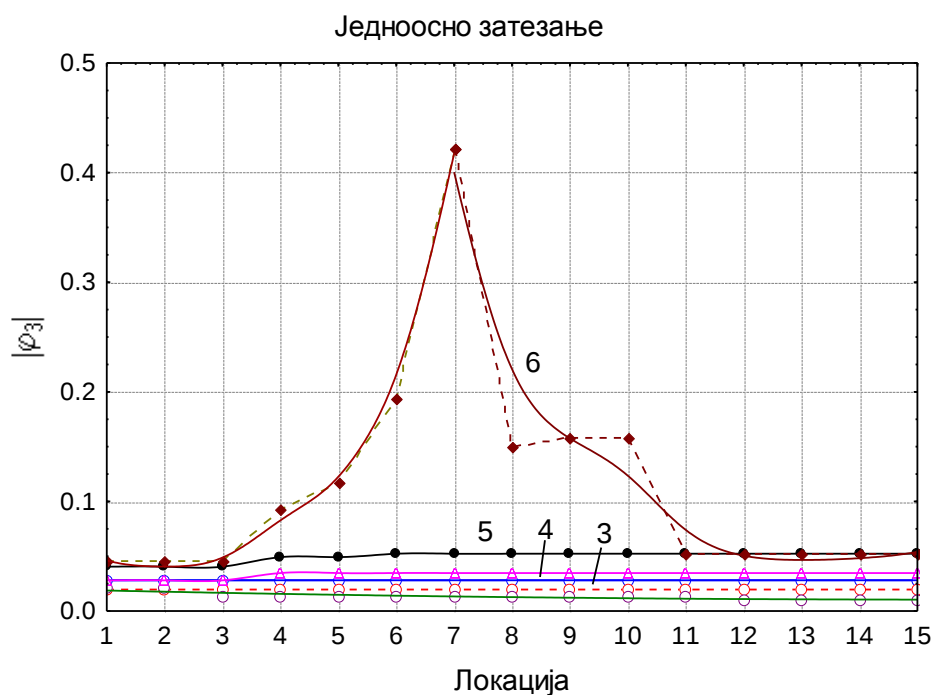
$$\Delta l_V = 45,74 \text{ mm} ; \varphi_{IV} = 0,3238 = 32,38\%$$

Фаза VI:

$$\Delta l_{VI} = 51,83 \text{ mm} ; \varphi_{VI} = 0,36 = 36\%$$



Слика 4.31 Дијаграм дистрибуције деформација φ_I при једноосном затезању

Слика 4.32 Дијаграм дистрибуције деформација φ_2 при једноосном затезањуСлика 4.33 Дијаграм дистрибуције деформација φ_3 при једноосном затезању

На основу добијених дијаграма се може видети да је у прве 3 фазе процес готово хомоген. У 4. фази долази до малог поремећаја, али се хомогеност процеса не ремети битно. У 5. фази интензитет деформација расте и запажа се поремећај хомогености у распону локација од 1 до 6. Тек у завршној 6. фази долази до изражене нехомогености.

Степен деформације је велики што за последицу има разарање епрувете у зони локације 7.

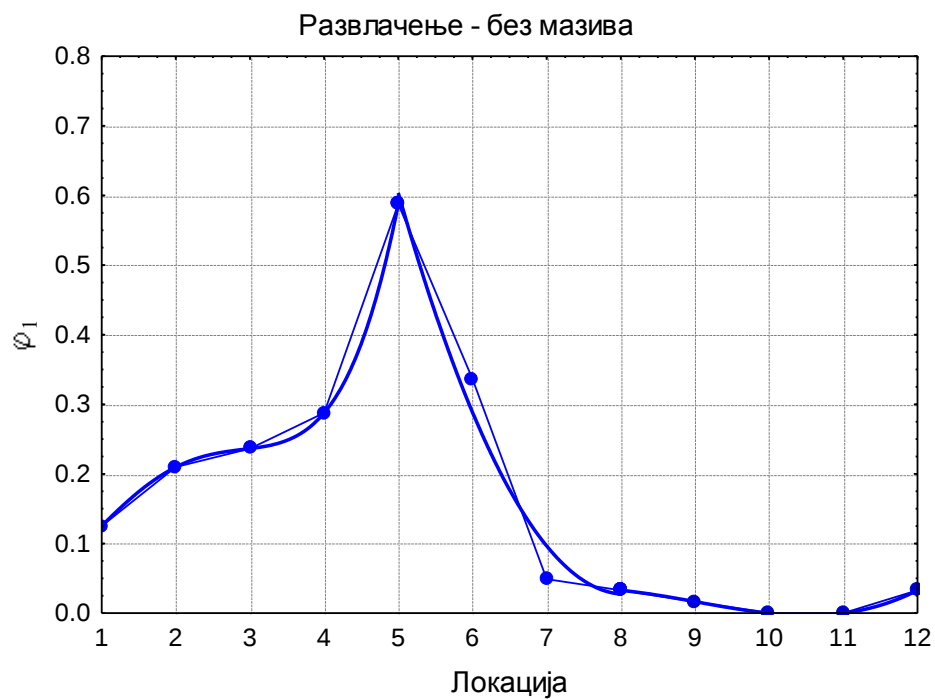
Изглед епрувете након разарања приказан је на слици 4.34.



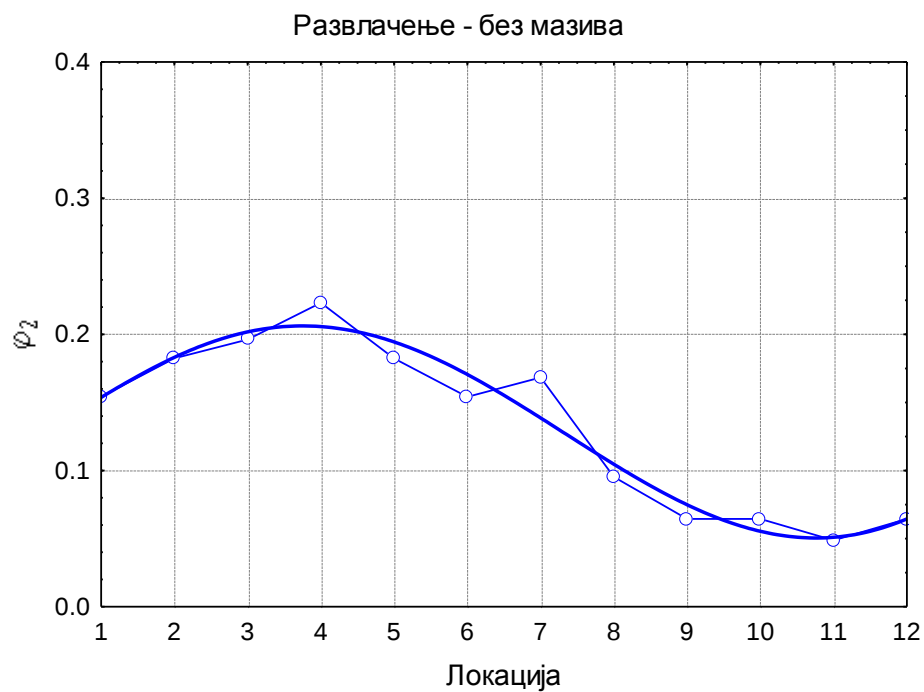
Слика 4.34 Епрувета након разарања при једноосном затезању

4.3.3. Испитивање хомогености деформисања при развлачењу полусферним извлакачем

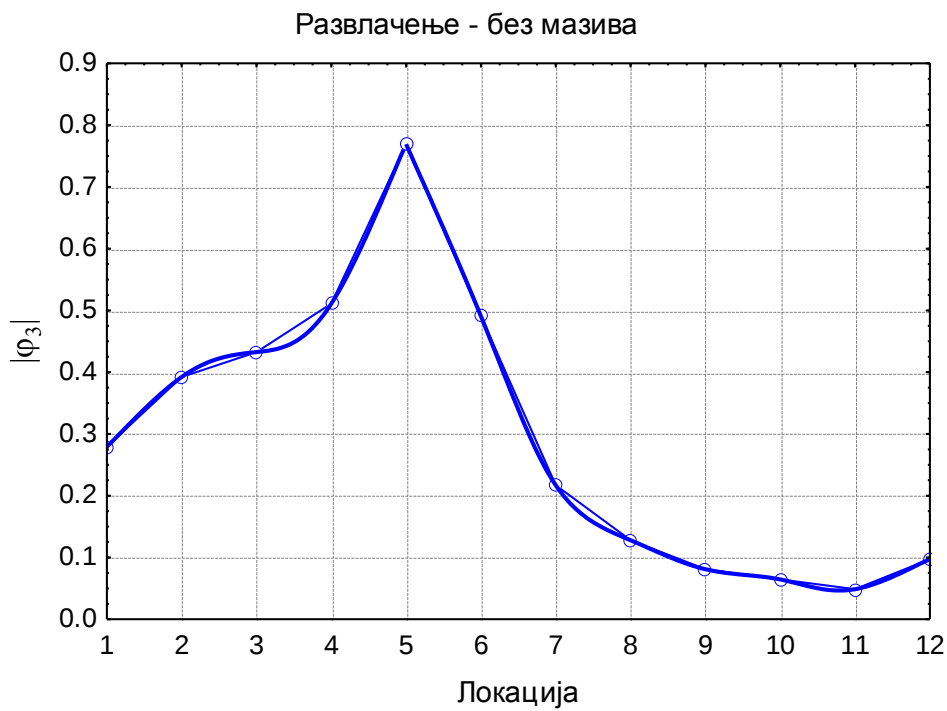
Као и у предходном случају, најпре се на лим наноси мерна мрежа електрохемијским путем. Номинални пречник кругова мреже је $d_0 = 3 \text{ mm}$, а дебљина лима $s_0 = 0,8 \text{ mm}$. Развлачење се изводи полусферним извлакачем на лабораторијској машини ERICHSEN 142/12 у једној фази до лома. Скица алата дата је на слици 3.2, а физички изглед елемената алата на слици 4.27. Спољашњи пречник комада је 120 mm . Утискивање ребра држача је по кругу пречника 88 mm . Ребро и држач омогућавају потпуно блокирање обода комада. Овај део експеримента рађен је у две варијанте: развлачење полусферним извлакачем без мазива и развлачење полусферним извлакачем са мазивом. Као мазиво коришћено је уље за дубоко извлачење. Мерење деформисане мреже се, као и при једноосном затезању, изводи помоћу мерне лупе чија је тачност читавања $0,05 \text{ mm}$. Сврха коришћења мазива је да се размотри утицај смањеног трења на хомогеност и расподелу деформација.



Слика 4.35 Дијаграм дистрибуције деформација φ_1 при развлачењу полусферним извлакачем без мазива



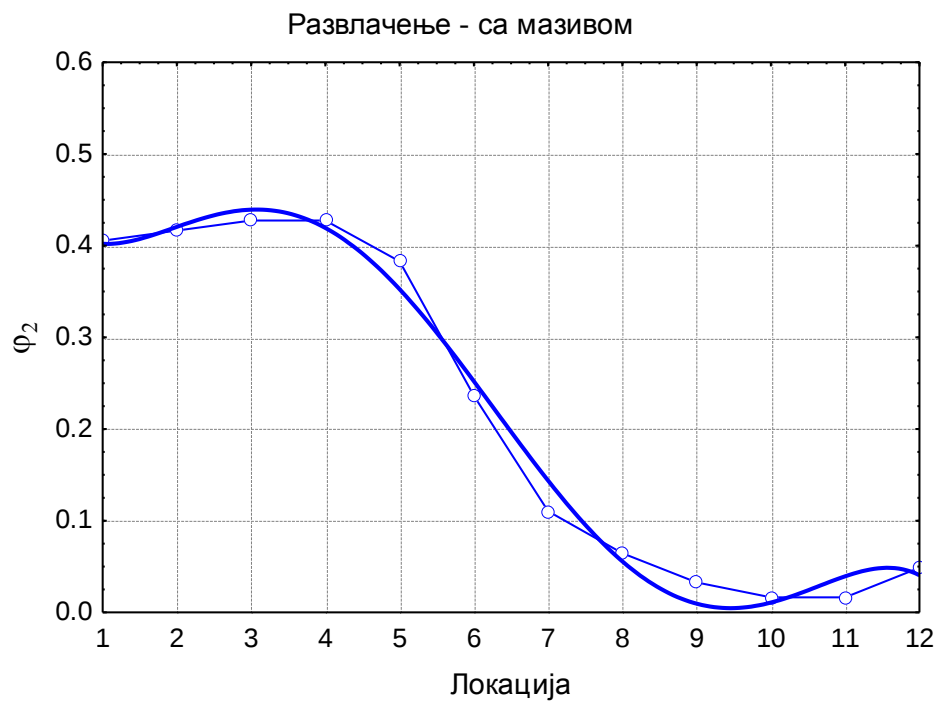
Слика 4.36 Дијаграм дистрибуције деформација φ_2 при развлачењу полусферним извлакачем без мазива



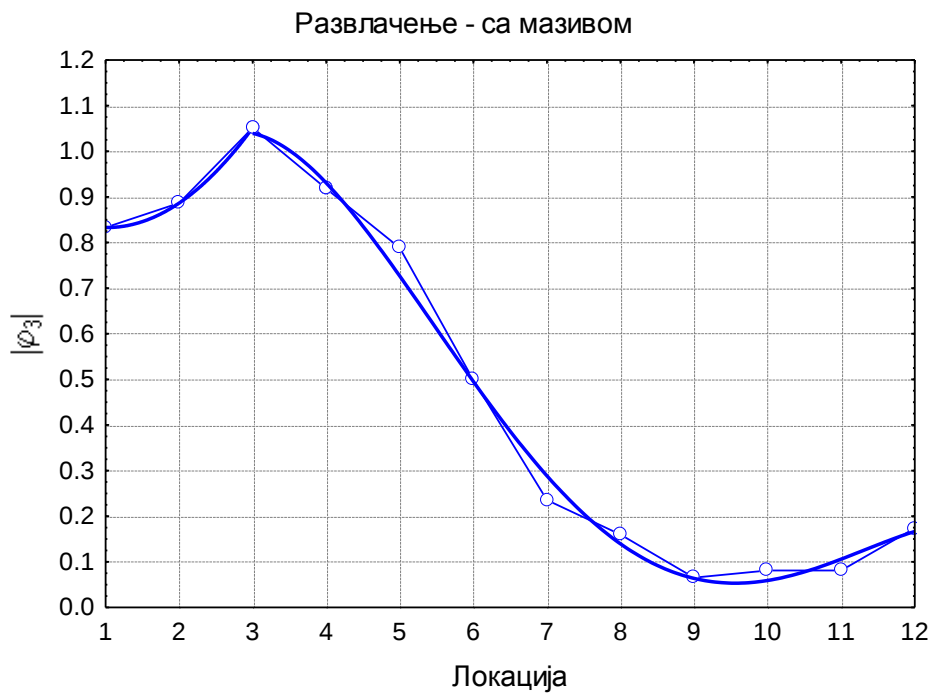
Слика 4.37 Дијаграм дистрибуције деформација φ_3 при развлачењу полусферним извлакачем без мазива



Слика 4.38 Дијаграм дистрибуције деформација φ_1 при развлачењу полусферним извлакачем са мазивом



Слика 4.39 Дијаграм дистрибуције деформација ϕ_1 при развлачењу полусферним извлакачем са мазивом



Слика 4.40 Дијаграм дистрибуције деформација ϕ_3 при развлачењу полусферним извлакачем са мазивом

Упоређивањем дијаграма деформације φ_1 при развлачењу без мазива (слика 4.35) и при развлачењу са мазивом (слика 4.38) најбоље се могу видети разлике тих процеса. Максималне деформације φ_1 се релативно мало разликују. Код развлачења без мазива $\varphi_1 = 0,5877$, док је при развлачењу уз коришћење мазива $\varphi_1 = 0,6241$. Међутим, може се приметити да је пик у првом случају знатно оштрији у односу на други, што значи да је процес деформисања у коме се користи мазиво хомогенији у поређењу са процесом деформисања без коришћења мазива. Пораст интензитета деформација φ_2 и φ_3 је знатнији што указује на већи укупни степен деформисања.

Изглед епрувета након разарања приказан је на слици 4.41.



Слика 4.41 Епрувете након разарања при развлачењу полусферним извлакачем без (десно) и са коришћењем мазива (лево)

Треба напоменути да се при разматрању дијаграма дистрибуција деформација могу користити и директни нумерички показатељи за процену. То се обично ради при одређивању деформабилности материјала или оцени мазива у конкретним испитивањима.

Неки од тих показатеља су:

- 1) Градијент деформације
- 2) Коефицијент повољности деформације
- 3) Резерва пластичности итд. [2]

5. ЗАКЉУЧАК

Испитивање хомогености има значајно место у оквиру испитивања деформабилности и обрадивости материјала, као и за оцену квалитета мазива у процесима обликовања лима. Изводи се углавном експериментално, мада се може радити и нумеричким симулацијама, нарочито у фазама пројектовања технолошких процеса.

Деформисање се сматра хомогеним када је деформационо стање у неком тренутку процеса исто у свим тачкама тела. Главни узроци настајања нехомогеног деформисања су утицаји: контактнoг трења, облика (облик алата присиљава поједине делове материјала да пређу разичите путеве), као и својства микро-структурне и макро-структурне грађе маталних материјала.

Експеримент изведен у овом раду се заснива на примени методе мерних мрежа и формирању дијаграма расподеле све три главне деформације. Циљ је био да се открије и процени склоност материјала ка локлизovanом деформисању у датим условима. То се може радити описно, анализом добијених дијаграма или коришћењем нумеричких показатеља. У овом раду испитивање је обављено применом два процеса обликовања лима: једноосног затезања и равлачења полусферним извлакачем танког каросеријског лима DC04 дебљине $s = 0,8 \text{ mm}$.

Једноосно затезање рађено је у 6 фаза. У прве 3 фазе процес је готово идеално хомоген. У 4. фази долази до малог поремећаја, али се хомогеност процеса не ремети битно. Изразита нехомогеност се јавља тек у последњој 6. фази при великом степену деформисања који претходи разарању. Закључује се да испитивани материјал има веома повољна својства и малу склоност ка локализованом деформисању. Добијени резултати показују да је на овај начин могуће проценити склоност материјала ка штетном локализованом деформисању за она напонска стања у којима преовладава једноосно затезање.

Развлачење полусферним извлакачем је изведено у једнофазном поступку, али у две варијанте: без мазива и са мазивом (уље за дубоко извлачење). Анализом дијаграма се може закључити да у условима смањеног трења интензитет максималне деформације φ_1 расте релативно мало, уз нешто већи пораст деформације φ_2 и φ_3 , али је расподела деформација знатно равномернија. Овај експериментални поступак је могуће са успехом користити за оцену склоности материјала ка локализованом деформисању за напонска стања са преовлађујућим двоосним затезањем. Предност у односу на једноосно затезање је могућност сагледавања утицаја трења, што је веома значајно за процену квалитета мазива.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Девеџић Б.: Основи теорије пластичног деформисања метала, Машински факултет у Крагујевцу, 1975.
- [2] Стефановић М.: Трибологија дубоког извлачења, Југословенско друштво за трибологију, монографија, Крагујевац, 1994.
- [3] Бабић Ж.: Деформабилност „Tailored Blanks”при дубоком извлачењу, Докторска дисертација, Машински факултет Бања Лука, 2004.
- [4] Александровић С.: Сила држања и управљање процесом дубоког извлачења, монографија, Машински факултет у Крагујевцу, 2006.г.
- [5] Александровић С., Стефановић М.: Технологија пластичног обликовања метала, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2010.
- [6] Александровић С.: Савремени поступци пластичног обликовања, скрипта, 2014.
- [7] Планчак М.: Појмовник из обраде деформисањем, ФТН Нови Сад, 2007.