

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Обрадивост у процесима пластичног обликовања

Број индекса: 362/2012

Јован З. Петковић

ФЕНОМЕН ДЕФОРМАЦИОНОГ ОЈАЧАВАЊА МЕТАЛНИХ МАТЕРИЈАЛА

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Србислав Александровић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

Опише најважније особине везане за проблематику обликовања танких лимова и појаву деформационог ојачавања металних материјала. Пре свега, треба да образложи основне карактеристике напона и деформација, као и напонских и деформационих стања, која се у току процеса обликовања појављују у структури метала. Затим је потребно да објасни појам деформабилности металних материјала, како код танких лимова, тако и при запреминском обликовању. Потом, потребно је да детаљније опише феномен деформационог ојачавања метала, који је централна тема овог мастер рада. На крају, кандидат треба да изложи, објасни и међусобно упореди резултате експеримента чистог једноосног затезања више различитих епрувета, који је базиран на одређивању кривих ојачавања за различите металне материјале.

Препоручена литература:

1. Девеџић Б.: *Основи теорије пластичног деформисања метала*, Машински факултет у Крагујевцу, 1975.
2. Вујовућ, В.: *Деформабилност*, Универзитет у Новом Саду, Институт за производно машинство, 1992.
3. Маринковић В.: *Деформационо ојачавање материјала у процесима обраде деформисањем у хладном и топлом стању*, Машински факултет, Ниш, 1995.
4. Ромхањи Е.: *Механика и металургија деформације метала*, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 2001.

Крагујевац, 18.05.2017.

ментор:
Проф. др Србислав Александровић

Резиме

У овом раду описане су најважније особине везане за проблематику обликовања танких лимова и појаву деформационог ојачавања металних материјала. Пре свега, образложене су основне карактеристике напона и деформација, као и напонских и деформационих стања, која се у току процеса обликовања појављују у структури метала. Затим је објашњен појам деформабилности металних материјала, како код танких лимова, тако и при запреминском обликовању. Затим је детаљније описан феномен деформационог ојачавања метала, који је централна тема овог мастер рада. На крају су изложени, објашњени и међусобно упоређени резултати експеримента чистог једноосног затезања више различитих епрувета, који је базиран на одређивању кривих ојачавања за различите металне материјале.

Кључне речи: напони, деформације, деформабилност, деформационо ојачавање

Abstract

This paper contains descriptions of the most important characteristics of sheet metal forming, as well as the occurrence of strain hardening of metals. First of all, there are few chapters regarding some of the basic properties of these processes: mechanical stress and mechanical strain. As well as structural conditions of metal materials caused by the occurrences of these two, whilst forming process lasts and after it ends. Afterwards, this paper contains explanations of concepts of formability of sheet metals, as well as formability in bulk forming. Later on, there is the chapter that contains detailed explanations of phenomenon known as strain hardening of metals which is, in fact, the main theme of this master thesis. At the very end of this paper, there is a chapter with experimental results, explanations and comparisons of axial stress testing of different metals, furthermore followed by strain hardening curves that represent this significant phenomenon.

Key words: mechanical stress, mechanical strain, deformation, formability, strain hardening

Садржај

1. ПРЕДГОВОР	5
2. УВОД	6
3. НАПОНИ И НАПОНСКА СТАЊА	8
3.1 Појам напона и начини изражавања	8
3.2 Услови пластичности	11
3.2.1 Енергетски услов пластичности	12
3.2.2 Услов највећег смичућег напона	13
4. ДЕФОРМАЦИЈЕ И ДЕФОРМАЦИОНА СТАЊА	14
4.1 Појам деформације и начини њеног изражавања	14
4.2 Хомогено и нехомогено деформисање	15
4.3 Веза између напона и деформација	20
5. ДЕФОРМАБИЛНОСТ МЕТАЛНИХ МАТЕРИЈАЛА	21
5.1 Деформабилност лимова	21
5.1.1 Дијаграм граничне деформабилности	21
5.1.2 Основни параметри деформабилности при тесту једноосног затезања	22
5.1.3 Erichsen-ов тест	31
5.2 Деформабилност при запреминском обликовању	33
6. ФЕНОМЕН ДЕФОРМАЦИОНОГ ОЈАЧАВАЊА	36
6.1 Узроци и утицајни фактори деформационог ојачавања	36
6.2 Представљање и квантификовање деформационог ојачавања	37
6.2.1 Криве ојачавања и утицајни фактори	38
6.2.2 Експериментално одређивање кривих ојачавања	43
6.2.3 Аналитичке апроксимације кривих ојачавања	50
6.2.4 Експонент деформационог ојачавања (n – фактор)	51
7. ЕКСПЕРИМЕНТ	55
7.1 Резултати експеримента	57
8. ЗАКЉУЧАК	78
9. ЛИТЕРАТУРА	80

1. ПРЕДГОВОР

У раду ће у почетном делу бити речи о напону и напонским стањима која се у материјалу јављају у току процеса деформисања, као и последицама ових напонских стања, односно еластичним и пластичним деформацијама металних материјала. Биће објашњени појмови напона и деформација и начини њиховог одређивања. Поред тога, биће говора о условима пластичности, односно условима које је потребно обезбедити да би еластично деформисање прешло у пластично, а самим тим био омогућен процес пластичног обликовања, као и о појмовима хомогености и нехомогености деформисања.

Потом ће бити речи о својствима деформабилности металних материјала, њиховом представљању посредством дијаграма, као и значају пажљивог одређивања ових веома важних својства за целокупан процес деформисања. То се односи, како на процесе обликовања танких лимова, тако и запреминског обликовања.

Затим, биће образложен веома важан феномен који се појављује при пластичном деформисању метала, тј. деформационо ојачавање, што је и централна тема овог рада. Пре свега, биће објашњени узроци и фактори који утичу на појаву деформационог ојачавања, после чега ће уследити одељак о представљању и квантификовању деформационог ојачавања металних материјала. То се односи на криве ојачавања и њихове најважније утицајне факторе, експериментално одређивање, аналитичке апроксимације ових кривих, као и веома важан показатељ тзв. експонент деформационог ојачавања, односно n – фактор и др.

На крају, биће пажљиво образложене најважније карактеристике и резултати експеримента, који је заснован на испитивању пет различитих материјала једноосним затезањем. Најважније особине материјала биће дате табеларно, али и посредством одговарајућих дијаграма затезања, на основу којих су добијене и криве течења, односно криве ојачавања, као и већ споменуте аналитичке апроксимације ових кривих.

2. УВОД

У току последњих неколико деценија, технологија пластичног обликовања метала постала је практично незаобилазна при остваривању великог броја високо продуктивних производних процеса. Ова технологија обухвата скуп технолошких процеса код којих се под дејством сила статичког или динамичког карактера остварује пластична, односно трајна деформација предмета који се обликује. То практично значи да се облик почетног комада трајно мења.

У процесима ТПО, запремина почетног комада остаје иста. Поред тога, важно је споменути да се при овим процесима добијају делови приметно бољих механичких карактеристика од почетног комада. До тога долази због ефекта деформационог ојачања, који се остварује због саме природе ових процеса. Поред већ наведеног, важно је обратити пажњу и на сложена напонско-деформациона стања која се јављају у комадима, али евентуално и у алатима чијим дејством се обликовање остварује.

Процеси ТПО се деле на *примарне* и *секундарне* поступке обраде. Примарном обрадом се добијају полуфабрикати који се касније могу користити при секундарној обради, како би се од њих добили готови делови коначних димензија. Поступци *примарне обраде* се изводе одмах после добијања челика и односе се на: ваљање, вучење и ковање, док се *секундарна обрада* односи на накнадне процесе обликовања. Секундарни процеси обраде се групишу према сродности процеса: раздвајање (одсецање), обликовање лимова, запреминско обликовање и остали поступци.

Обрада раздвајањем, због своје природе, не спада у процесе ТПО. Међутим, због потребе за сродним машинама, алатима, као и врстама полуфабриката, може се придружити овим технологијама. Подела на поступке *обликовања танких лимова* и *запреминско обликовање*, извршена је због разлике у геометрији полуфабриката, као и касније добијеног готовог дела, али и због разлика у напонским стањима која се у њима појављују. До ових разлика долази због тога што су ширина и дужина лима знатно веће од његове дебљине. Напонско стање код лимова је, уз одређене апроксимације, двоосно, што се значајно разликује од троосног напонског стања код запреминских комада.

У поступке обликовања лима спадају: савијање, дубоко извлачење, извлачење са стањењем и др. При том, први и други имају веома важну улогу у савременој индустрији. Када су у питању процеси запреминског обликовања разликују се: сабијање, ковање, истискивање и др. Подела поступака се може извршити и према другим критеријума: температури обликовања (топло и хладно), брзини деформисања (суперпластично, квазистатичко, високобрзинско) итд.

Пре почетка сваког од ових видова обликовања потребан је пажљив одабир материјала, као и одређивање својстава *деформабилности* и *пластичности* за дате услове. Појам деформабилности се односи на способност материјала да се обликује под дејством спољашњег оптерећења, при одређеним условима деформисања. При чему је врло важан осврт на степен насталих еластичних и пластичних деформација. Особина пластичности се односи на способност материјала да се пластично деформише, док се обрадивост односи на конкретне технолошке поступке, као што је нпр. обрадивост дубоким извлачењем и сл.

Обрадивост се може одредити теоријским или експерименталним методама, али све оне имају за циљ да одреде способност материјала да поприми жељени облик, односно да се одреде границе до којих се комад може обликовати, а да не дође до његовог разарања или превеликих вредности напона на комаду, или евентуално алату. Ово, пре свега зависи од механичких карактеристика материјала, али и од услова обликовања. Ако је у раду са неким материјалом могуће постићи виши ниво технолошких захтева

(сложеност и тачност геометрије, квалитет обрађење површине, повољне механичке карактеристике и др.), за тај материјал се може рећи да има бољу обрадивост.

Важно је споменути да се често термин “обрадивост” односи на раздвајање или процесе са скидањем струготине. Из тог разлога, обавезно треба нагласити о ком процесу се ради. Да би се такве и сличне недоумице и конфузије избегле, користи се најчешће само термин деформабилност.

У овом раду биће више речи о већ споменутом својству деформабилности, његовој природи и начину одређивања, као и специјалном својствима везаним за феномен деформационог ојачавања металних материјала. Ова и остала својства биће експериментално приказана на одређеном броју узорка на крају рада.

3. НАПОНИ И НАПОНСКА СТАЊА

Да би се прецизније описало својство деформабилности, пре свега, потребно је објаснити појмове напона и деформација, чије познавање је од суштинског значаја за разумевање процеса пластичног обликовања метала.

Како би се преко релативно једноставних математичких израза објасниле веома сложене зависности у овим процесима, уводе се одређене претпоставке, које често нису потпуно реалне, али уз одређене апроксимације, могу дати прихватљива решења за важне параметре који се јављају у овим процесима. Ове апроксимације огледају се кроз следеће претпоставке:

- Хипотеза о хомогености еластично-пластичног тела (не узима у обзир стварну структуру метала која је најчешће нехомогена),
- Хипотеза о природном напонском стању (претпоставка да пре почетка деформисања није било унутрашњих напона или су били уравнотежени),
- Структура материјала је изотропна (што је ретко случај код реалних материјала),
- Еластична и пластична својства су идеализована (идеално еластично деформисање у области у којој важи Хуков закон; својство готово идеалног пластичног деформисања, као нпр. код олова - Pb и калаја - Sn),
- Непроменљивост запремине (најреалнија претпоставка јер су промене запремине веома мале).

3.1 Појам напона и начини изражавања

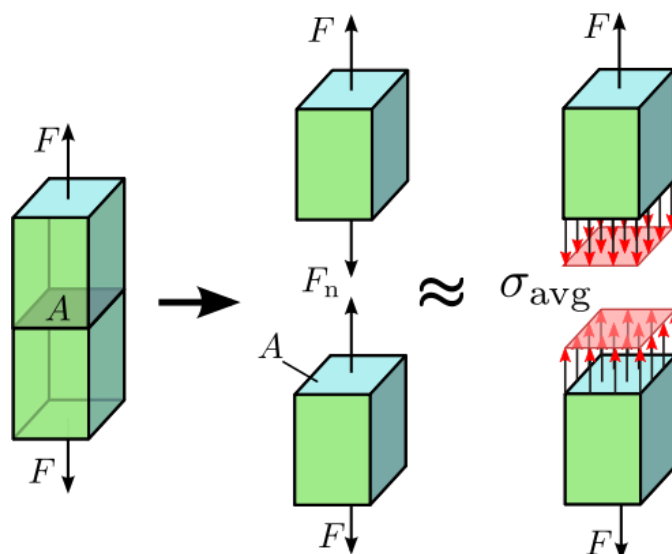
Када је неко тело изложено дејству силе F (може бити површинска и запреминска), која је довољно велика да изазове покретање масе споменутог тела, наступа убрзање дефинисано *Нјутновим законом*. Међутим, ако се примени дејство сила једнаких интензитета, а супротног смера, односно сила чији је алгебарски збир једнак нули, у телу ће се појавити унутрашњи отпор, односно напон. Према томе, напон представља стање тела када је дејство спољашње силе у равнотежи са унутрашњим отпором тела, односно дејством међуатомских сила.

Величина напона је дефинисана величином силе по јединици површине. Напон у равни која је нормална на правац дејства силе назива се нормалним напоном, обележава се са σ , а у зависности од смера деловања силе, може бити напон затезања, и напон притискивања.

Ако се посматра тело које је једном површином фиксирано за подлогу и изложено дејству силе која је паралелна тој површини, у телу ће се јавити тзв. тангенцијални, односно смицајни напон, који се обележава са τ .

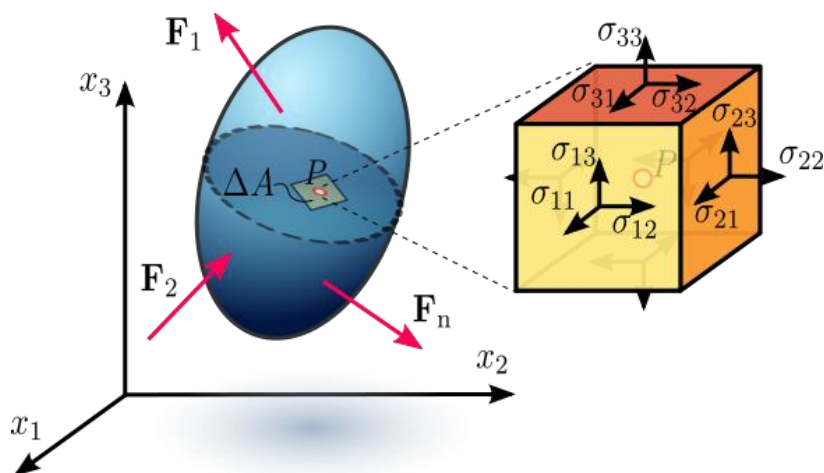
У једноставном случају аксијално посматраног тела (призматично тело изложено затезању или притиску, које остварује сила која пролази кроз његов центар), као што је приказано на слици 3.1, напон σ , односно интензитет расподеле унутрашњих сила може се одредити дељењем укупне зетежуће или притисне силе F са површином попречног пресека A . У овом случају, напон σ је представљен скаларом, па се још назива и инжењерски или номинални напон и представља просечну вредност напона (σ_{avg}) на посматраној површини. Из претходног следи да је напон равномерно распоређен по површини, па се добија израз 3.1:

$$\sigma_{avg} = \frac{F_n}{A} = \sigma \quad (3.1)$$



Слика 3.1 Приказ деловања аксијалног напона у призматичном делу

Генерално, напон није равномерно расподељен по површини тела, па је у одређеној тачки посматране површине напон различит од просечног напона на целој површини. Зато је неопходно дефинисати напон не само на одређеној површини, већ и у одређеној тачки тела, као што је приказано на слици 3.2.



Слика 3.2 Приказ напона у посматраном телу, као континууму

Према Кошију (Augustin Louis Cauchy 1789 - 1857), напон у било којој тачки тела које се сматра континуумом дефинисан је комплетно са девет компонената σ_{ij} тензора другог реда, који је познат као Кошијев тензор напона σ , приказан преко једначине 3.2:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Кошијев тензор напона подвргава се закону трансформације тензора приликом промена координатног система. Графички приказ овог закона трансформације јесте Морев круг за напон. Кошијев тензор напона се користи за анализе напона код тела код којих долази до малих деформација. Када су у питању велике деформације неопходно је користити друге мере за одређивање напона, као што су први и други Пиола-Кирхофови тензори напона, Биотов тензор напона или Кирхофов тензор напона.

Према принципу одржања линеарног момента, ако је тело у статичкој равнотежи, може се показати да компоненте Кошијевог тензора напона задовољавају једначине равнотеже за било који материјал. Притом, у складу са принципом одржања угаоног момента, да би тело било у равнотежи, збир свих момената у одређеној тачки мора бити једнак нули, па се може закључити да је тензор напона симетричан и да има само шест независних компоненти напона, а не девет као што је првобитно представљено.

Одређивање унутрашње расподеле напона, тј. анализа напона, примењује се у разним инжењерским дисциплинама. Да би се одредила расподела напона у некој структури, неопходно је одредити напон на граници са спољашњом средином, применом специфичних граничних услова. За описивање везе између напона и деформације користе се одређене једначине, као што је Хуков закон код линеарно еластичних материјала. Гранични проблем заснован је на теорији еластичности, а примењује се код структура за које се очекује да се деформишу еластично. Када су у питању пластичне деформације, проблем се решава применом теорије пластичности.

Приближна решења граничног проблема добијају се коришћењем нумеричких метода, као што су: метода коначних елемената, метода граничних елемената, помоћу специјалних рачунарских софтвера. Аналитичка решења могу се добити за једноставне геометријске услове, конститутивне везе и граничне услове. Анализе напонског стања могу бити поједностављене у случајевима где физичке димензије и расподела елемената дозвољавају да се структура сматра једнодимензионалном или дводимензионалном.

Чврста тела, течности и гасови имају променљива поља напона. Стационарни флуиди имају поље нормалног напона, али се приликом течења код њих јавља смичућа компонента напона. Кретање вискозних флуида може повећати смичућу компоненту напона, тј. динамички притисак. У чврстим телима се могу јавити и нормални напон, као и смичућа компонента напона. Гранични примери су лако обрадиви материјали, код којих се јављају само смичуће компоненте напона и крта тела, код којих се уочавају само главни елементи напона.

Напонско стање у свакој тачки напрегнутог тела може се одредити преко тензора напона. Тензор напона је приказан преко једначине 3.3.

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

при чему су: σ – нормални напони, τ – тангенцијални напони; $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ - главни нормални напони који делују у равнима у којима нема тангенцијалних напона.

Средњи, тј. *хидростатички напон* одређен је преко израза 3.4:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3.4)$$

Овај напон представља интензитет напона равномерног притиска или затезања у посматраној тачки и представља тзв. *сферни тензор напона* (T_σ^s), представљен изразом 3.5.

$$T_\sigma^s = \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

док је укупна вредност танзора напона приказана преко израза 3.6:

$$T_\sigma = T_\sigma^s + D_\sigma \quad (3.6)$$

при чему је D_σ - *девијатор тензора напона* (доводи до пластичног деформисања).

Процес пластичног деформисања настаје управо под дејством овога дела тензора напона, при чему сферни део тензора напона нема значајан утицај.

Вредност *ефективног*, односно *еквивалентног напона* приказана је преко израза 3.7:

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3.7)$$

Представља веома важну вредност, зато што одређује интензитет замишљеног једноосног напона чије дејство одређује одговарајуће троосно напонско стање. Овако одређен ефективни напон, код просторног напонског стања, увек је могуће упоређивати са вредношћу стварног напона код једноосног затезања или притискивања. Ово је од суштинског практичног значаја, јер се анализом једноосног напрезања могу добити својства која важе и за вишеосно напрезање, тј. за велики број различитих процеса пластичног обликовања метала.

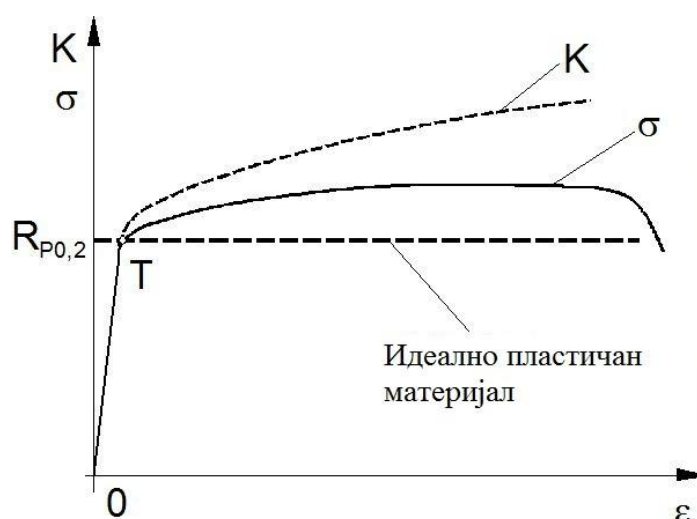
3.2 Услови пластичности

Када се изложи дејству спољашњег оптерећења, полазни материјал, односно полуфабрикат се у првој фази еластично деформише, али после тога у критичним условима, почиње пластично деформисање, тј. обликовање које се наставља док део не добије коначан облик. Како би еластичне деформације прешле у пластичне, потребно је да буду обезбеђени одређени услови по питању интензитета и међусобног односа напона који делују на посматран полуфабрикат.

Прелаз еластичног у пластично деформисање може се пратити преко дијаграма датог на слици 3.3. На њему је приказан ток деформисања идеално пластичног материјала, код кога не долази до феномена пластичног ојачавања, као и ток деформисања у реалним условима када се прате вредности стварног и техничког напона, при испитивању на једноосно затезање. Вредности *техничког* и *стварног* напона, дати су респективно једначинама 3.8 и 3.9.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.8)$$

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = K = \sigma_e \quad (3.9)$$



Слика 3.3 Стварни и технички напони про једноосном затезању

Прелаз еластичног у пластично деформисање дешава се у тачки T , односно у тренутку кад технички или главни нормални напон достигне вредности *напона течења* (R_e или $R_{p0.2}$) за изабрани материјал.

Вредност главног нормалног напона при једноосном затезању (σ_1), који представља једини стварни напон, може се уједно сматрати за вредност *ефективног напона* (σ_e), као и напона течења, који се назива *деформациона чврстоћа* (или *деформациони отпор*) у области пластичног деформисања (К). Пораст ове вредности у складу са порастом пластичне деформације назива се *ефекат деформационог ојачања* за дати материјал. При једноосном напонском стању, вредност овог напона једнака је стварном напону, тј. главном нормалном напону.

3.2.1 Энергетски услов пластичности

Енергетски услов пластичности је такође познат и као Мизесов (*Richard von Mises* (1883-1953)) критеријум пластичности и важи за опште случајеве просторних напонских стања. Заснива се на енергетској хипотези: “Да би отпочело пластично деформисање у напрегнутом телу, количина унутрашње енергије еластичне промене облика, по јединици запремине, треба да постигне један критичан износ у датим условима (температура, брзина, степен деформације).” Вредност ове енергије не зависи од напонско-деформационог стања, већ искључиво од својстава материјала.

После релативно сложених математичких трансформација овај услов се може изразити у следећој напонској форми:

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = K \quad (3.10)$$

Претходни израз нам показује да ће до пластичног деформисања доћи када ефективни напон достигне вредност деформационог отпора K . Ова вредност се најлакше одређује експерименталним путем, преко једноосног затезања или притискивања.

3.2.2 Услов највећег смичућег напона

Услов највећег смичућег напона развио је *Henri Tresca (1814-1885)*, па отуда и назив Треска критеријум, он гласи: “Да би отпочео процес пластичног деформисања максимални смичући напон у материјалу треба да достигне одговарајућу критичну вредност.”

Ова вредност дате је следећим изразом:

$$\tau_{\max} = K_s = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_{13} = \text{const.} \quad (3.11)$$

При чему K_s представља *смицајни деформациони отпор*, који се може одредити испитивањем на чисто смицање. То се у пракси ретко чини и тежи се преформулацији овог услова пластичности уз коришћење нормалних напона и деформационог отпора изједначеног са еквивалентним нормалним напоном. Чисто смицање примењује се у дефиницији овог услова због тога што представља најадекватнији приказ тангенцијалних напона у материјалу.

Када је у питању једноосно затезање важи: $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, а $\sigma_1 = K$, па је максимални смичајни напон добијен у складу са (3.12).

$$\tau_{\max} = \frac{K}{2} = K_s \quad (3.12)$$

На крају, ако се узме у обзир да је $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{K}{2}$, добиће се да је: $|\sigma_{\max} - \sigma_{\min}| = K$.

Према претходно изложеном може се закључити следеће: Да би пластично деформисање у општем случају напонско-деформационог стања отпочело, потребно је да максимална вредност смичућег напона достигне половину вредности деформационе чврстоће. Такође се може рећи да ће пластична деформација отпочети када разлика највећег и најмањег главног нормалног напона достигне вредност деформационе чврстоће, односно K .

Поређењем изложених услова пластичности закључује се да је енергетски свеобухватнији и универзалнији, а услов максималног смичајног напона једноставнији и погоднији за примену. Разлика између ова два услова пластичности долази до изражаја кад је у напонском стању присутан средњи напон σ_2 који се у другом услову уопште не узима у обзир.

4. ДЕФОРМАЦИЈЕ И ДЕФОРМАЦИОНА СТАЊА

4.1 Појам деформације и начини њеног изражавања

Деформација представља меру промене облика и димензија посматране запремине тела или тела у целини. Свака издвојена елементарна запремина, у општем случају, деформише се до различитих износа деформација. На сличан начин као код напона, деформационо стање у свакој тачки може се одредити преко *тензора деформација*. Како би се одредило потпуно деформационо стање, потребно је наћи тензор напона за велики број тачака, што је теоријски веома значајно, али практично тешко изводљиво. Због тога се у ТПО процес поједностављује тако што се посматра већа запремина и за њу се разматра настала деформација. Може се претпоставити да је по посматраној запремини деформација хомогена, односно равномерна, док њен износ представља средњу вредност свих реалних вредности.

Као што је већ споменуто, на сличан начин као код напона, могуће је дефинисати и *ефективну*, односно *еквивалентну* вредност деформације. Ова величина погодна приказује деформационо стање у посматраном материјалу. Дата је изразом 4.1:

$$\varepsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (4.1)$$

У практичним условима, при испитивању на једноосно затезање, величине деформација израчунавају се на основу одређених показатеља деформација који су дати преко следећих израза:

$$\Delta l = l_1 - l_0, \text{ mm} - \text{апсолутна деформација} \quad (4.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} - \text{релативна, односно јединична деформација (I реда)} \quad (4.3)$$

$$\psi = \frac{\Delta A}{A_0} - \text{деформација површине (проширење или сужење) (II реда)} \quad (4.4)$$

$$\varphi = \ln \frac{l_1}{l_0} - \text{природна (логаритамска) деформација (III реда)} \quad (4.5)$$

Преко услова о непроменљивости запремине у области пластичности, после кратког сређивања, добија се веза између деформација у сва три правца:

ако је $V = l_0 b_0 h_0 = l_1 b_1 h_1 = \text{const.} \Rightarrow \frac{l_1}{l_0} \frac{b_1}{b_0} \frac{h_1}{h_0} = 1$, после логаритмовања, коначно се

добија: $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$. По сличном принципу, могу се наћи и везе између осталих

показатеља деформација ($1 + \varepsilon = \frac{1}{1 - \psi} = e^\varphi$).

Важно је назначити разлику између *брзине деформације* и *брзине деформисања*, јер се ове вредности суштински разликују. Брзине такође представљају тензорске величине (као напони и деформације), међутим, овде ће бити дате вредности на макро нивоу.

Брзина деформисање јесте брзина кретања извршног елемента машине, односно брзина кретања алата који деформише предмет обраде. Ова вредност се означава са v , а њена јединица је нпр. $\frac{mm}{s}$. Насупрот претходној, брзина деформације представља промену деформације у јединици времена. Означава се са $\dot{\varphi}$, а јединица јој је најчешће s^{-1} . Њихова веза је дата преко $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dl}{dt \cdot l} = \frac{v}{l}$, при чему су: $d\varphi = \frac{dl}{l}$; $v = \frac{dl}{dt}$; а l , mm представља тренутну димензију која се узима у обзир као меродавна, са предмета који се деформише.

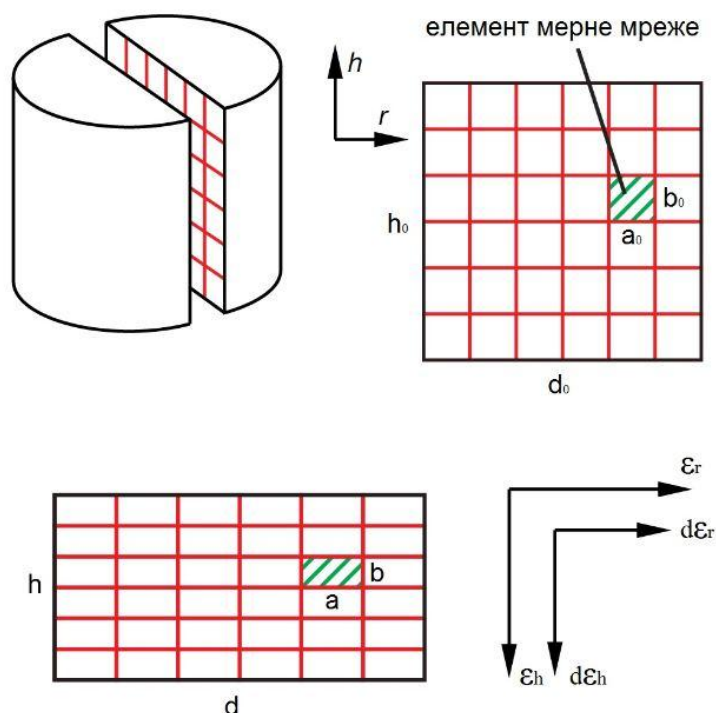
4.2 Хомогено и нехомогено деформисање

При општем случају пластичног обликовања метала, деформације по површини или запремини дела нису равномерне, односно уједначене. Шта више, деформације су најчешће изразито нехомогене. То значи да у неким локалним зонама деформације могу бити знатно веће од осталих, тј. могу достићи критично високе вредности. На основу тога, може се закључити да нехомогено деформисање може довести до појаве дефеката типа набора лима, пукотина или чак превременог лома делова. Најчешћи узроци појаве нехомогености деформисања могу бити:

- Контактна трење,
- Нехомогеност структуре материјала,
- Сложеност геометрије комада и тсл.

При *нехомогеном деформисању*, могућа је појава промене својстава, као и линијских и угаоних деформација између тачака у телу. Према томе, може се закључити да ће одређивање деформација аналитичким методама математичке теорије пластичности, бити отежано. Због тога се готово увек расподела деформације у телу (деформациона поља), одређују експерименталним методама посредством примене мерних мрежа.

Код *хомогеног деформисања* правци оса елементарних деформација ($d\varepsilon_r$ и $d\varepsilon_h$), поклапају се са правцима оса великих деформација (ε_r и ε_h). Поред тога, како би се деформисање сматрало за хомогено, потребно је да постоји међусобна једнакост локалних деформација у свим тачкама, као и једнакост са укупном деформацијом целог тела. Када су у питању експериментална испитивања, тачке су замењене довољно малим елементима мерне мреже. Код идеалног сабијања цилиндра, елементи мерне мреже су квадратног облика. Такав вид експерименталног испитивања деформисања приказан је на слици 4.1.



Слика 4.1 Схема идеалног хомогеног деформисања при сабијању цилиндра

Код идеалног хомогеног деформисања, све праве линије и равни на комаду такве остају, у току и после процеса обликовања. Такође, све међусобно паралелне линије и равни остају паралелне, током и после завршетка процеса деформисања, док су промене њихових мера сразмерне.

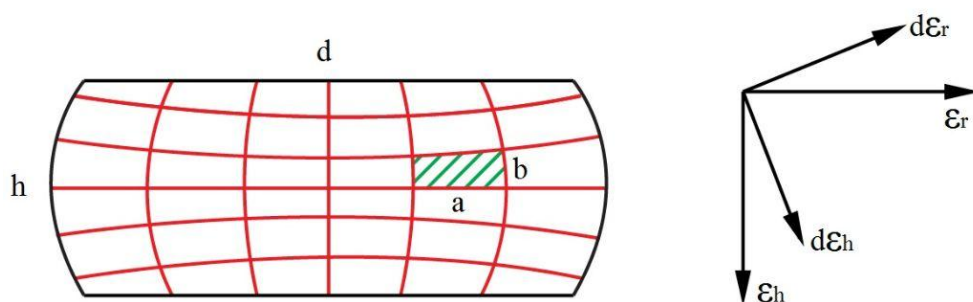
Услови хомогеног деформисања са претходне слике, изражени су преко следећих израза за релативне деформације:

$$\varepsilon_a = \ln \frac{a}{a_0} = \varepsilon_d = \ln \frac{d}{d_0} \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_b = \ln \frac{b}{b_0} = \varepsilon_h = \ln \frac{h}{h_0} \quad (4.7)$$

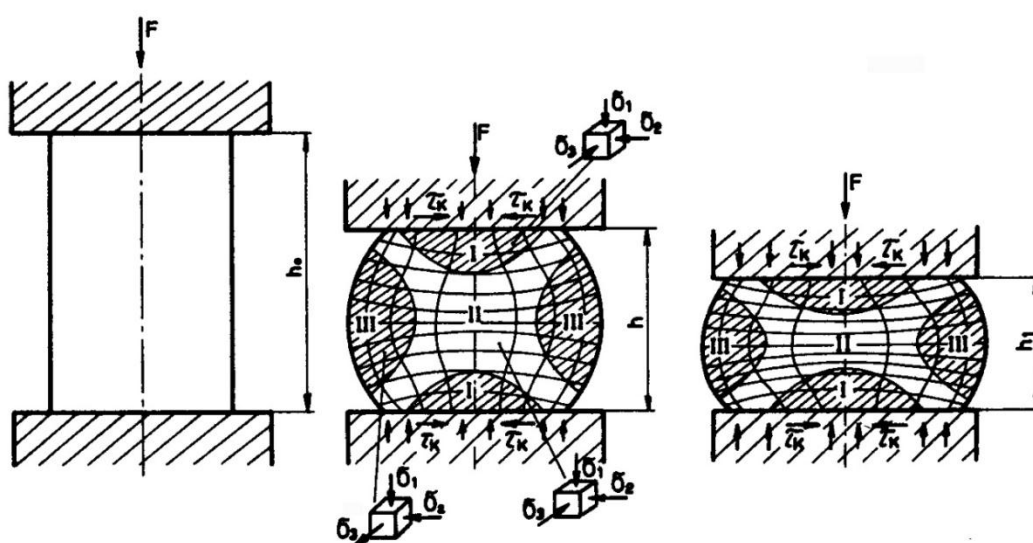
Ови изрази представљају везу између елементарних деформација (ε_a и ε_b) и укупних деформација целог тела (ε_d и ε_h), што практично представља математички услов који мора бити испуњен како би се оправдала тврдња да је деформисање цилиндра хомогено.

При нехомогеном деформисању, идеална расподела деформација може бити у мањој или већој мери нарушена. То значи да поједине локалне деформације могу бити мање или веће. Најчешће је присутна изразито велика разлика између локалних деформација, као и разлика у односу на целокупну деформацију која је у телу настала. Правци координатних система локалних елементарних деформација, могу се разликовати од праваца укупних деформација. У највећем броју случаја нехомогеног деформисања, налазе се средње вредности насталих деформација. Ова тврдња је приказана преко схеме деформисања цилиндра са слике 4.2.



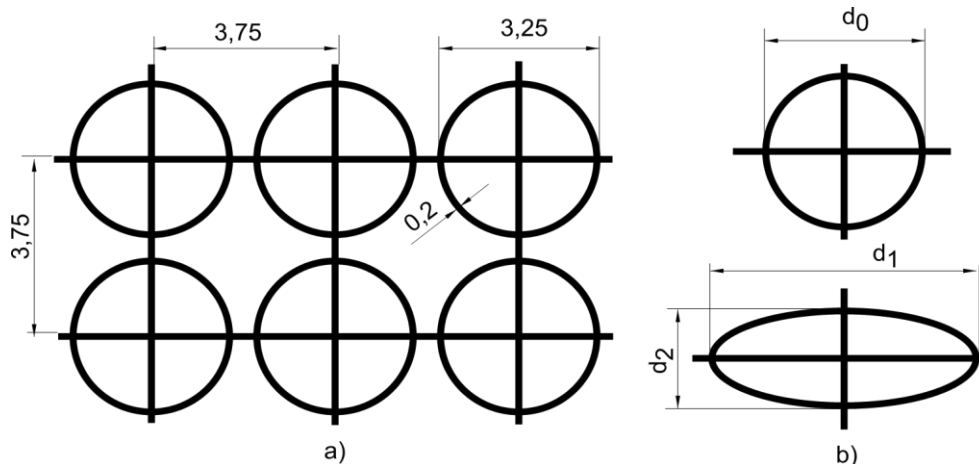
Слика 4.2 Схема нехомогеног деформисања при сабијања цилиндра

На слици 4.3, приказано је реално нехомогено деформисање при сабијању цилиндра, уз изражен утицај трења на контактним површинама.



Слика 4.3 Сабијање цилиндра у реалним условима, уз приказ деловања напона

Треба споменути да је могуће да се појави хомогено и нехомогено деформисање у току истог процеса. До ове појаве долази нпр. код једноосног затезања епрувете од нискоугљеничног челичног лима. На ову епрувету се пре почетка експеримента наноси кружна мерна мрежа пречника d_0 . На слици 4.4 приказан је изглед једне такве мерне мреже, као и њено деформисано стање у току процеса.



Слика 4.4 Изглед елемената мерне мреже у недеформисаном (а) и деформисаном стању (б)

У току процеса деформисања, кружни елементи мреже ће добити облик елипси димензија d_1 и d_2 . Поступак израчунавања износа деформације на сваком месту приказан је преко следећих израза, у складу са сликом 4.5.

$$\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (4.8)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (4.9)$$

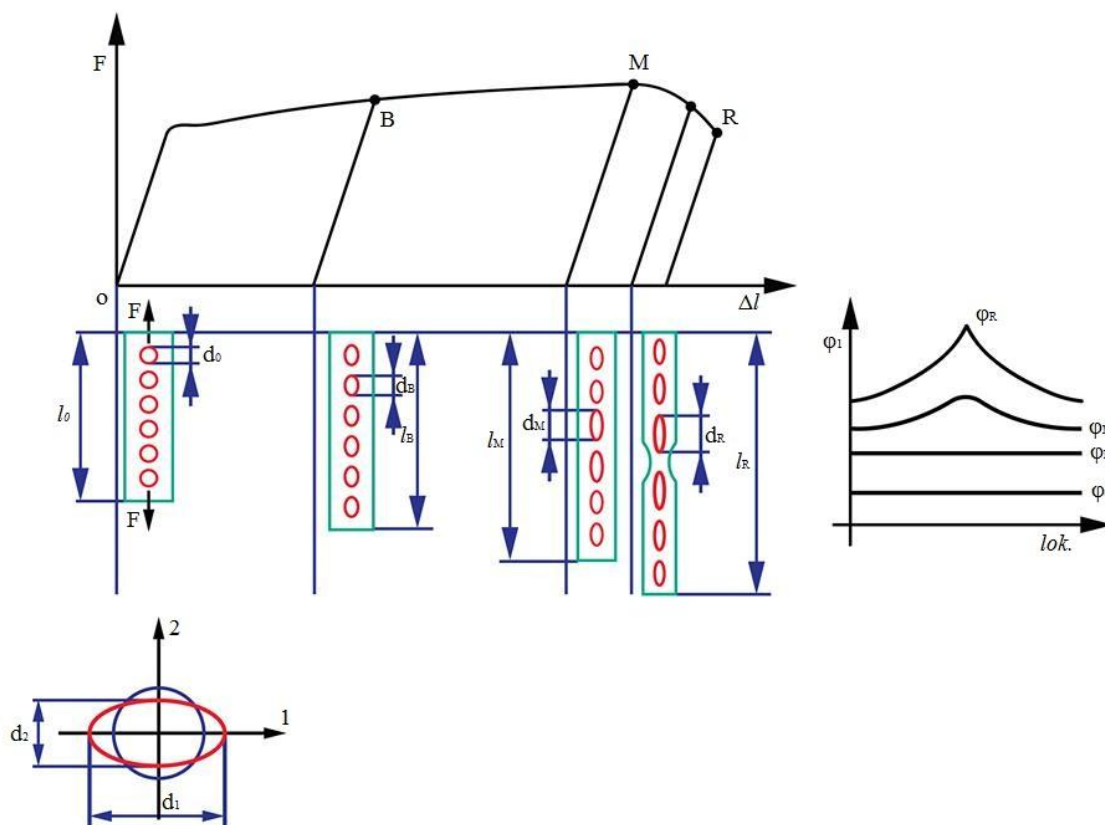
Изрази 4.8 и 4.9 представљају респективно вредности I и II главне деформације у равни лима, односно деформације кружних елемената мерне мреже.

Вредности деформација елементарне мерне мреже и промене дужине епрувете у тачки В одређују се преко израза 4.10 и 4.11, респективно.

$$\varphi_B = \ln \frac{d_B}{d_0} \quad (4.10)$$

$$\varphi_{l_B} = \ln \frac{l_B}{l_0} \quad (4.11)$$

Важно је закључити да у случају хомогеног деформисања важи једнакост $\varphi_B = \varphi_{l_B}$. Насупрот томе код нехомогеног деформисања које се увелико појавило у тачки R, важи неједнакост $\varphi_R \neq \varphi_{l_R}$.



Слика 4.5 Приказ хомогеног и нехомогеног деформисања код једноосног затезања епрувете од челика нискоугљеничног састава

На почетку процеса деформисања, вредности деформација су једнаке нули, односно $\varphi_0 = 0$. То је представљено на *дијаграму дистрибуције уздужне деформације* најнижом правом линијом. Овај дијаграм даје зависност деформације φ_1 од локализације, односно положаја елемената мерне мреже.

После преласка у област пластичности, врши се провера у тачки *B* са дијаграма. У овој тачки настала деформација је вредности испод 10%. Кружни елементи мерне мреже добили су елипсаст облик, а ако се измере деформације у било којој тачки на лиму, уочиће се исте вредности локалних деформација, као и једнакост ових деформација са укупном вредношћу деформације епрувете (карактеристично за хомогено деформисање). Ови услови су представљени на дијаграму дистрибуције преко друге праве линије означене са φ_B . Ако се разматра тренутак коме одговара тачка *M* са дијаграма затезања (тачка у којој се остварује максимална вредност силе затезања), на епрувети се могу уочити две елипсе које су више издужене од суседних. Може се закључити да је дошло до појаве локализованог деформисања, односно до нарушавања хомогености. Линија φ_M са дијаграма дистрибуције није права, што нам управо показује да је дошло до локализације. У области десно од тачке *M* присутно је изразито нехомогено, односно локализовано деформисање. Долази до опадања вредности силе деформисања и до наглог слабљења попречног пресека (контракција пресека). Такође долази до убрзаног раста локалних деформација, после чега следи разарање епрувете при граничним условима деформисања. Ако се израчунају локалне деформације и прикажу се на дијаграму зависности φ_1 од тренутног положаја, добиће се карактеристичан пик локалног максимума у тренутку разарања епрувете. У овом

случају једноосног истезања се може закључити да је вредност укупне деформације φ_{l_R} мања од вредности деформације при лому φ_R , из чега се, између осталог, може закључити да је дошло до локализације на месту лома.

На основу претходно изложеног, закључује се да је деформисање при једноосном затезању идеално хомогено само у првом делу пластичне области. У практичним условима, уз извесну грешку, може се сматрати да су услови хомогености испуњени све до непосредно пред остваривање максималне силе, односно до тачке M . Код овог нискоугљеничног челика равномерно издужење епрувете је и преко 20%, док је та вредност код кртих материјала знатно нижа.

4.3 Веза између напона и деформација

Када је у питању засебна анализа напона и деформација, није потребно узимати у обзир својства материјала, што значи да изведени закључци имају универзалан карактер, односно важе за све испитиване материјале.

Проблем испитивања насталих деформација у основи се своди на разматрање само геометријских карактеристика при промени међусобног положаја појединих тачака у телу. Споменути односи важе, како за област еластичних, тако и за област пластичних деформација. Међутим, при успостављању везе између напона и деформација, својства материјала се обавезно морају узети у обзир.

У области еластичних деформација, одређена је једнозначна веза између напона и деформација коју је дефинисао познати научник *Robert Hooke*(1635-1703). Он је дошао до једнакости представљене изразом 4.12, за једноосно напонско стање, помоћу којег је доказао да је у области еластичности однос између напона и деформација линеаран и зависи од карактеристика материјала приказаних преко модула еластичности E .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4.12)$$

Међутим, у области пластичних деформација, ова зависност је нелинеарног карактера и знатно је сложенија. При веома малим деформацијама, може се доћи до аналогије са еластичним деформацијама. Ова аналогија представљена је преко *Levy-Mises*-ових једначина. Оне су значајне, како код теоријских разматрања, тако и код нумеричких симулација принципа настанка и ширења деформација.

5. ДЕФОРМАБИЛНОСТ МЕТАЛНИХ МАТЕРИЈАЛА

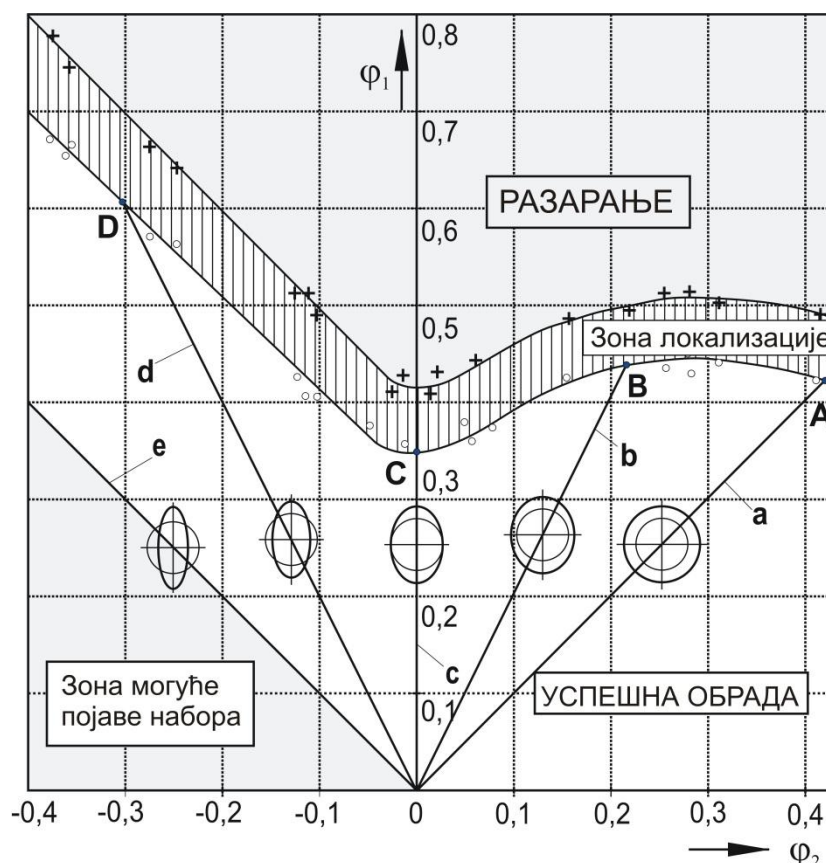
Претходно је већ објашњена разлика између термина деформабилности и обрадивости. У складу са тим, ако је реч о пластичном, односно трајном деформисању, деформабилност и пластичност се односе на општу способност материјала да трајно промени облик, тј. да се деформише без појаве разарања или неког другог оштећења структуре. Утицајни фактори који највише утичу на деформабилности су: хемијски састав материјала, његова структура, температура обраде, брзина деформације, напонско стање (везано за претходну термичку и и механичку обраду).

5.1 Деформабилност лимова

Када је у питању деформисање лимова, деформабилност се најчешће изражава преко интензитета главних деформација које се јављају у равни лима, и то у тренутку локализоване деформације и појаве разарања. Преко одређивања зависности *прве* (φ_1) и *друге* (φ_2) *главне деформације* при граничним условима, добија се дијаграм граничне деформабилности који важи за лимове. Овај дијаграм је од великог практичног значаја и још носи назив *Keeler-Goodwin*-ов дијаграм.

5.1.1 Дијаграм граничне деформабилности

Дијаграм граничне деформабилности код лимова (слика 5.1.), дели се на две главне зоне. То се односи на зону изнад појаса локализације и зону испод овог појаса. Део дијаграма испод овог појаса представља *зону успешне обраде*, а део изнад зону *разарања*. Линија *e*, представља напонско-деформационо стање на ободу при обликовању *чистим дубоким извлачењем*. У том случају важи веза $\varphi_1 = -\varphi_2$. Линија *d* на дијаграму представља однос главних деформација у равни лима при *једноосном затезању*, при чему важи однос $\varphi_1 = -2\varphi_2$. Генерално се може закључити да се десни део дијаграма, односно део десно од линије *c*, односи на процесе двоосног затезања, тј. развлачења лима. За напонско стање представљено линијом *b*, важи однос $\varphi_1 = 2\varphi_2$, док се линија *a* односи на *равномерно двоосно затезање* и важи $\varphi_1 = \varphi_2$. Део дијаграма око ординатне осе (око линије *c*), односи се на *раванско деформационо стање*, при чему важи да је $\varphi_2 = 0$.



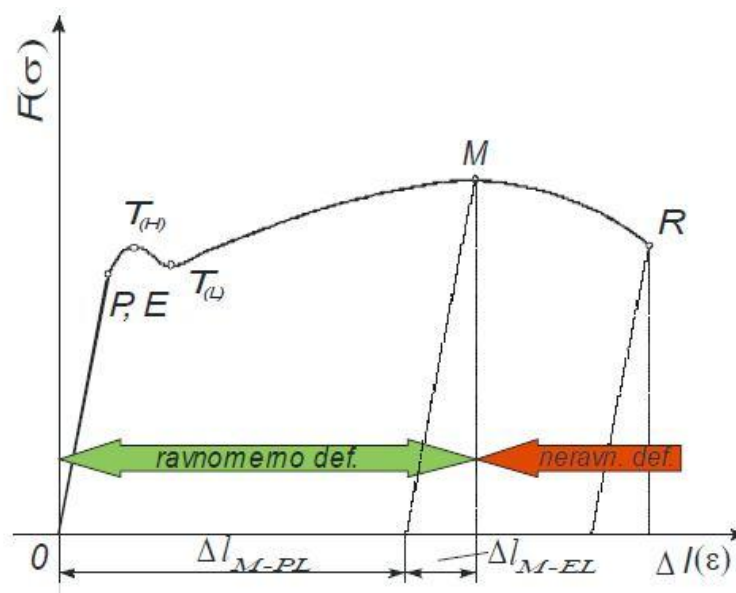
Слика 5.1 Дијаграм граничне деформабилности код лимова (Keeler-Goodwin-ов дијаграм)

Практична примена дијаграма граничне деформабилности огледа се кроз два различита приступа. Први приступ се односи на то да се на основу дијаграма граничне деформабилности за изабрани материјал, одреди адекватно напонско-деформационо стање при одређеним процесима обликовања, док се други приступ односи на експериментална испитивања конкретних отпресака са дефектима у појединим зонама. Пажљивом анализом дистрибуције деформација на ДГД, може се извршити корекција процеса или геометрије комада, отклонити проблем и даље спречити његова појава.

5.1.2 Основни параметри деформабилности при тесту једноосног затезања

Тест једноосног затезања се заснива на излагању специјалне епрувете од танког 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 великог броја процеса пластичног обликовања.

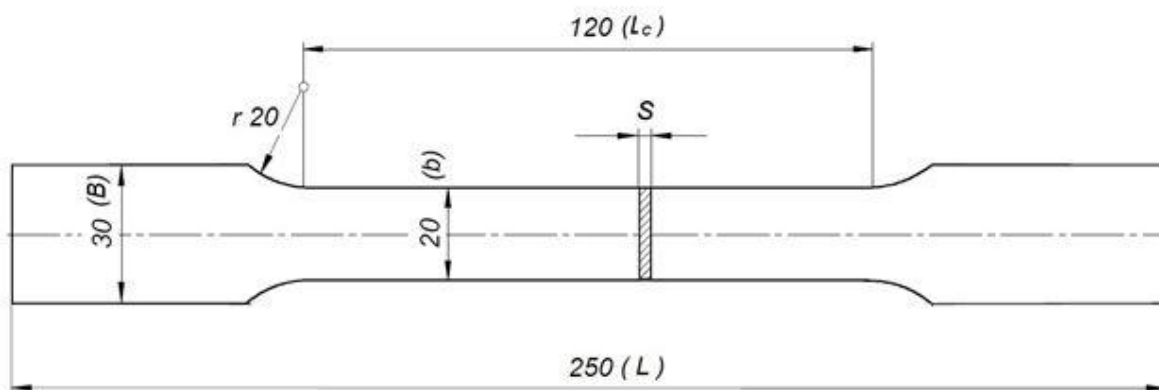
Напонски и деформациони показатељи о којима је претходно било речи одређују се на основу дијаграма који се експериментално добија овим поступком. Пример познатог дијаграма зависности напона од деформације, дат је на слици 5.2. Овај дијаграм се често приказује тако што се уместо напона на ординатној оси посматра сила затезања (F), а уместо неког прецизнијег показатеља деформације, промена дужине епрувете (Δl). Разлог томе је непосредни резултат експерименталних испитивања.



Слика 5.2 Дијаграм зависности напона (σ) од деформације (ϵ)

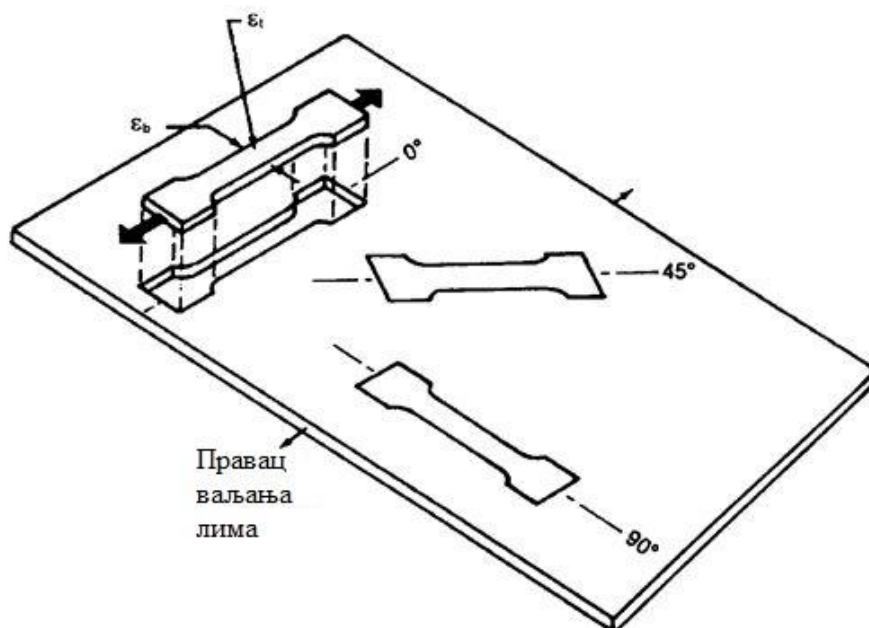
На овом дијаграму су означене главне тачке у којима долази до важних промена и у којима се могу очитати вредности важних параметара процеса. Такође су разграничени делови везани за настанак еластичних и пластичних деформација, као и делови дијаграма који се односе на појаву равномерних и неравномерних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

Пре почетка процеса испитивања, веома је важна правилна припрема епрувете, што се односи на: исецање из табле лима у складу са правцима ваљања, прецизне димензије епрувете и њених ивица, чишћење, остављање простора за прихватне делове за машину, правилно позиционирање епрувете како би се добило чисто једноосно затезање итд. Пример облика и димензија једне такве епрувете, дат је на слици 5.3.



Слика 5.3 Облик и димензије епрувете за испитивање на чисто једноосно затезање

Исецање епрувете из табле лима под одређеним угловима у односу на правац ваљања (претходне прераде, тј. добијања лима), приказано је на слици 5.4.

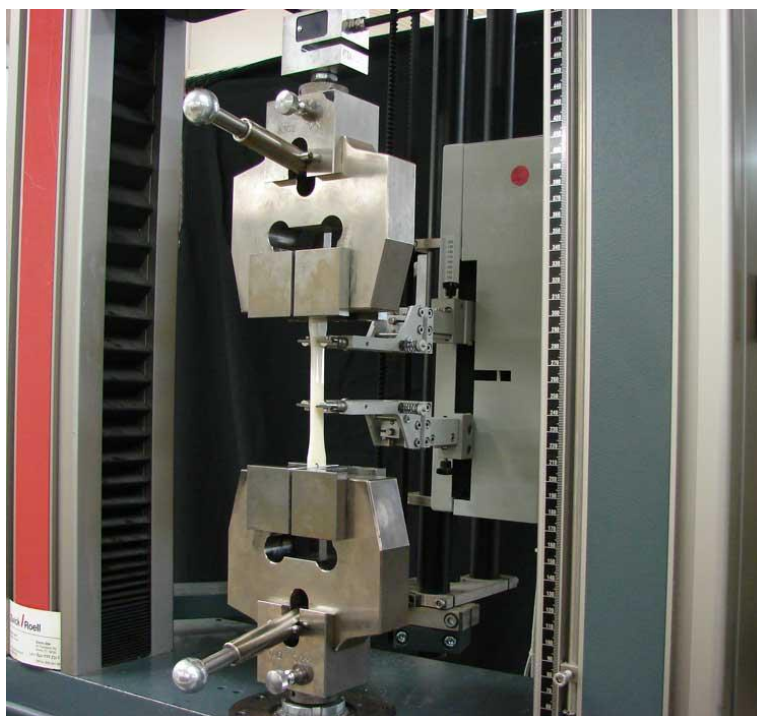


Слика 5.4 Правци исецања епрувете у зависности од правца ваљања лима

Примена претпоставке о изотропности својстава материјала при деформисању, понекад може одвести до значајних грешака, јер су реални материјали често анизотропни. Важно је разликовати појмове тзв. *структурне анизотропије*, која се односи на неуједначеност својстава елементарне кристалне решетке, у различитим правцима (микро и нано анизотропија), као и појам *механичке*, односно *геометријске анизотропије*, која се односи на поликристалну структуру и на макро нивоу узима у обзир варијацију појединих својстава у различитим правцима по запремини.

У зависности од правца исецања, добиће се приметно различита својства лима. Појава анизотропија је готово увек присутна код хладно ваљаних танких лимова и може се изразити као *раванска* (пример са слике 5.4) или *нормална* (у правцу нормалном на раван лима, по дебљини) преко *коэффициента нормалне анизотропије*, односно “*r*” фактора.

Апаратура за извођење испитивања подразумева машину на којој се затезање изводи, као и друга помоћна средства. На слици 5.5 приказана је једна таква савремена машина.



Слика 5.5 Машина за извођење процеса једноосног затезања

Као што је већ споменуто, веома је важно обратити пажњу на правилно позиционирање и стежање епрувете, односно остваривање што тачнијег аксијалног деловања силе затезања. Због својстава деформационог ојачања лима, важно је правилно одредити брзину кретања покретног дела алата, јер се на основу тога остварују правилни износи брзине деформисања, а са тим и брзине простирања деформације кроз епрувету.

Када је у питању део везан за еластично деформисање (до достизања напона на граници течења - R_{eH}), прираст напона треба да буде у складу са врстом материјала, односно својством модула еластичности. На основу тога, када је $E > 1.5 \cdot 10^5$, прираст напона треба да буде у границама од 6 до 60 $MPa s^{-1}$, док код $E < 1.5 \cdot 10^5$, прираст се креће у распону од 2 до 20 $MPa s^{-1}$. Ако се одређује само R_{eL} , пожељно је да брзина буде у границама од 0.00025 до 0.0025 s^{-1} . При даљем току теста, брзина не би требало да прелази вредност од 0.008 s^{-1} . Испуњавање ових услова теже је на старијим машинама, па се остварује само на савременим компјутеризованим машинама.

Вредности већ споменутих својстава брзине деформисања и брзине деформације, у зависности од димензија епрувете су од великог значаја за овај процес. Даље су дате препоруке ових вредности за почетну дужину епрувете $l_0 = 80 \text{ mm}$:

- За вредности од $v = 20 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ пожељно је да буде $\dot{\varphi} = \frac{1}{240} = 0.00417 \text{ s}^{-1}$,
- За вредности од $v = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ пожељно је да буде $\dot{\varphi} = \frac{1}{480} = 0.0021 \text{ s}^{-1}$,
- За вредности од $v = 40 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ пожељно је да буде $\dot{\varphi} = \frac{1}{120} = 0.0083 \text{ s}^{-1}$.

Оријентационе вредности брзине деформације за различите процесе ТПО, дате су илустративно у табели 5.1.

Табела 5.1 Орјентационе вредности брзине деформације за различите процесе ТПО

Поступак	Брзина деформације												
Супер пластично обликовање													
Испитивање затезањем													
Обрада на хидрауличким пресама													
Обрада на кривајним и фрикционим пресам													
Ковање на чекићу													
Дубоко извачење													
Топло ваљање													
Хладно ваљање													
Вучење шипке и цеви													
Високобрзинско обликовање													
Вучење жице													
Обликовање експлозијом													
Брзина обликовања s^{-1}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	

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

- Граница течења или напон на граници течења (R_{eH} , R_{eL} , $R_{p0.2}$, R_p , у MPa),
- Затезна чврстоћа (R_m , у MPa),
- Однос $\left(\frac{R_p}{R_m}\right)$,
- Процентуално издужење при разарању (A , %),
- Процентуално издужење при максималној сили (A_g , %),
- Контракција попречног пресека (Z , %).

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

Изрази од 5.1 до 5.6, служе за израчунавање претходно споменутих показатеља:

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

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

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

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

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

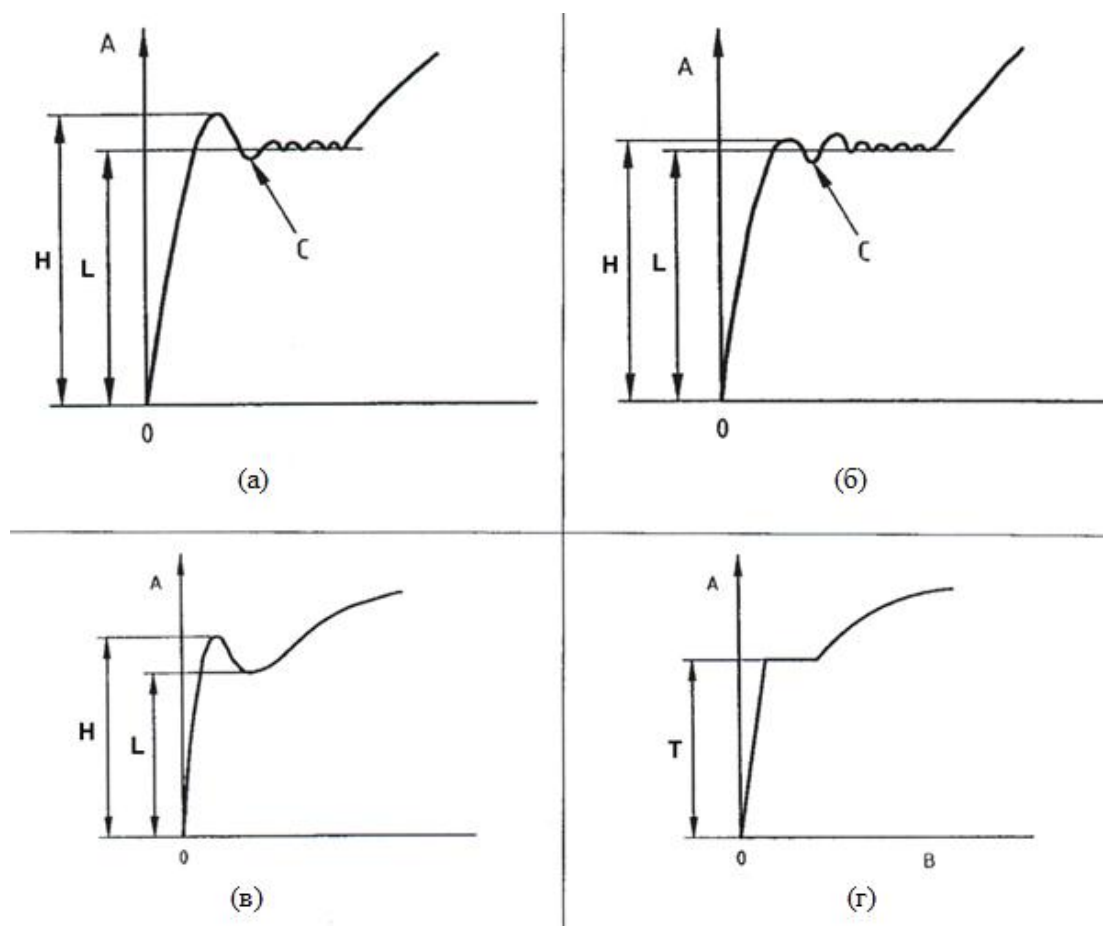
$$Z = \frac{A_0 - A}{A_0} \cdot 100, \% \quad (5.6)$$

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), почетну ширину (b_0), дебљину (s_0) и израчунавање почетне вредности попречног пресека (A_0). У току процеса, потребно је водити рачуна о пажљивом регулисању, положају епрувете, брзини кретања покретне чељусти, затим о дијаграму затезања, локализацији деформисања и лому епрувете.

Треба споменути да ако до прелома дође у трећини мерне дужине до проширења епрувете, добијени резултати се могу узети само као орјентациони.

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

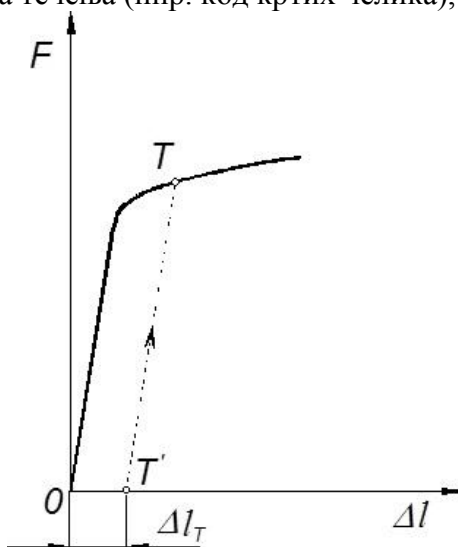
Примери кривих затезања добијених овим поступцима (у случају када се јавља дисконтинуитет на кривој), дати су на слици 5.6.



Слика 5.6 Примери експериментално добијених кривих затезања са појавом дисконтинуитета

После краја процеса испитивања, на машини се очитава вредност максималне силе (F_m) и израчунава се промена дужине после разарања (Δl_R).

Са машине се добија и облик криве дијаграма затезања. Пример таквог дијаграма када није изражена граница течења (нпр. код кртих челика), дат је на слици 5.7.



Слика 5.7 Дијаграм затезања челика када није изражена граница течења материјала

Посредством изабраних размера за силу и дужину и мерења вредности са дијаграма, после краћег прорачуна, добиће се положај границе течења (тачка T) и вредност напона на граници течења ($R_{p0.2}$).

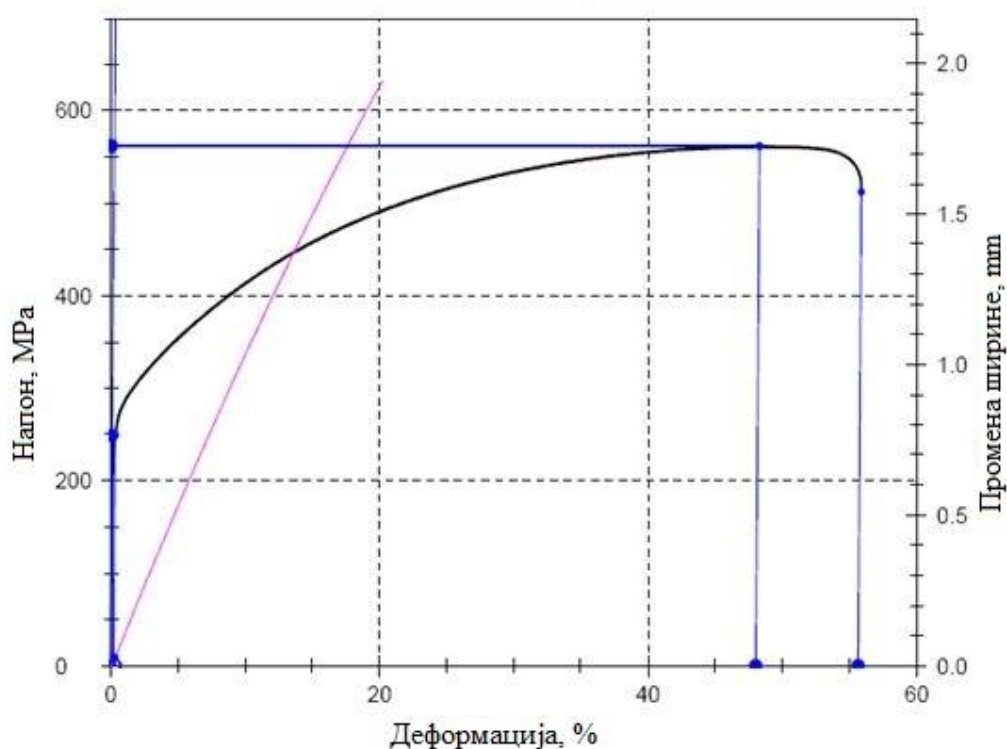
Ако се сматра да је деформација при прелазу у област пластичности дата изразом 5.7:

$$\varepsilon = \varepsilon_T = \frac{\Delta l_T}{l_0} = 0.002 \quad (5.7)$$

Може се закључити да ће промена дужине у тачки T бити: $\Delta l_T = 0.002 \cdot l_0$. Даље, на основу ове вредности, добија се стварна вредност на дијаграму у складу са изабраном размером за дужину и тако се добија тачка T' . Ако се из ове тачке повуче линија паралелна са почетком дијаграма који се односи на период сразмерности силе и издужења, добиће се тачан положај тачке T , после чега ће бити могуће наћи вредност силе на граници течења преко израза 5.8, а затим и напон на граници течења преко већ споменутог израза 5.2.

$$F_T = F_{p0.2} = \overline{0T'} \cdot U_F \quad (5.8)$$

На слици 5.8, дат је дијаграм напон-деформација за лим дебљине $s_0 = 0.7 \text{ mm}$ израђеног од аустенитног нерђајућег челика EN –X5CrNi18-9, односно Č4580, исеченог из табле лима под углом од 45° у односу на раван ваљања (при чему је правом љубичастом линијом која полази из координатног почетка приказана промена ширине). После тога, као пример корисних резултата, дате су главне карактеристике овог челика у зависности од угла ваљања лима у табели 5.2.



Слика 5.8 Дијаграм напон-деформација код аустенитног нерђајућег челика EN-X5CrNi18-9

Табела 5.2 Карактеристике аустенитног нерђајућег лима од EN-X5CrNi18-9

Карактеристике аустенитног нерђајућег лима од EN - X5CrNi18-9 (Č4580) дебљине $s_0=0,7$ mm						
Угао према правцу ваљања лима, °	R_p MPa	R_m MPa	R_p/R_m -	A_{80} %	n -	r -
0	296,4	669,5	0,44	44,2	0,42	0,853
45	280,3	615,4	0,455	51,2	0,421	1,29
90	292,1	622,6	0,47	45,1	0,405	0,814
Средња вредност	287,3	630,7	0,455	47,9	0,417	1,06

Затезна чврстоћа (R_m), посматрано самостално у апсолутном износу има знатно мањи значај за деформибилност од напона на граници течења. Један од разлога мањег значаја јесте чињеница да R_m преставља технички напон, тј. своди се на почетни попречни пресек комада. Важно је споменути да ова вредност практично не зависи од брзине деформације, структурних промена итд.

Пожељно је да вредност R_p буде нижа, јер она условљава већи степен деформационог ојачања и смањење отпора пластичном деформисању, за време процеса обликовања. Захваљујући смањеном деформационом отпору и повећаном интензитету ојачавања, нарочито у почетном периоду деформисања, у процес пластичног обликовања се укључује већи део материјала, што смањује могућност појаве веома штетног локализованог деформисања, које може довести до убрзаног стањења и лома, односно појава напрелина лима.

Апсолутне вредности параметра нису универзалног значаја и углавном се могу применити код конкретних случајева. Међутим, формирањем бездимензионих параметара као што је однос R_p / R_m , тај недостатак се може отклонити. Однос R_p / R_m , нам посредно приказује интензитет могућег деформационог ојачања испитиваног материјала. Такође нам говори до које мере и са колико потешкоћа је могуће обликовати део, а да не дође до локализованог деформисања, слично као и експонент деформационог ојачања n . Препоручује се да вредност односа R_p / R_m буде у границама од 0.5 до 0.6. Међутим, не треба изводити коначне закључке о својству деформибилности, само на основу овог параметра.

Вредност A представља процентуално издужење епрувете при кидању, у односу на њену почетни дужину. Односи се на издужење у хомогеном подручју, али и на део који се односи на локализовано деформисање, а као такав, овај показатељ може бити

релативно непоуздан. Он се у практичним условима може користити за поређење са вредностима за друге материјале, али ређе као самосталан показатељ.

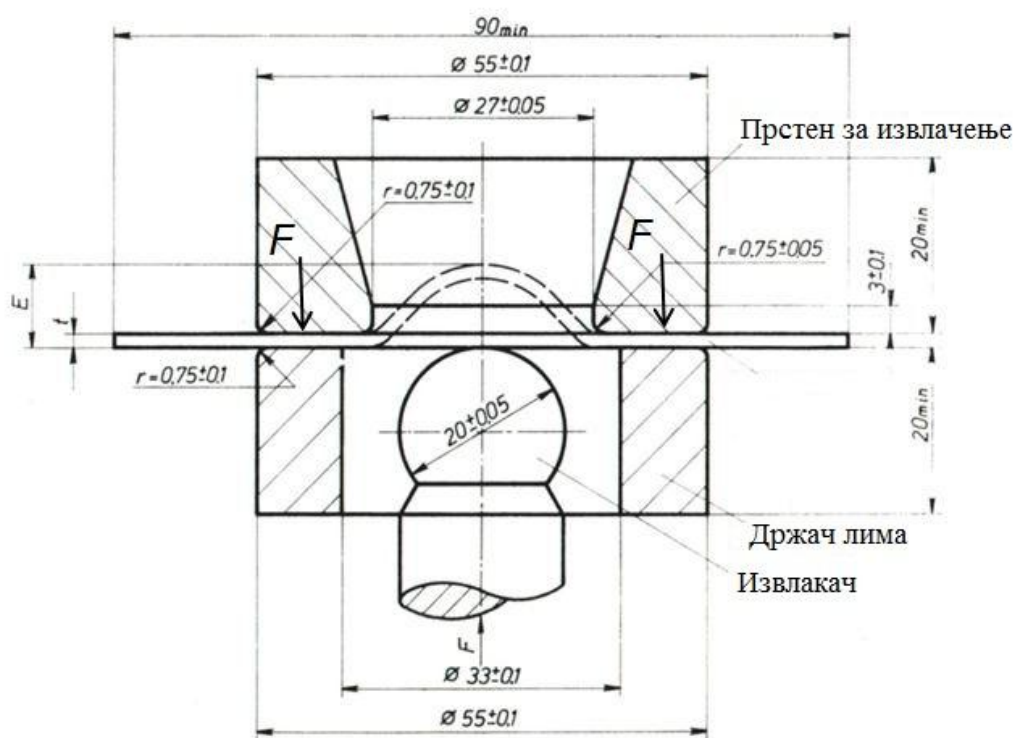
Процентуално издужење при максималној сили A_g , односно равномерно издужење, насупротив параметра A , има већи практичан значај. У техничком смислу, постоје потешкоће при одређивању вредности A_g . Прихваћено је да се ова вредност читава у тренутку достизања максималне силе F_m , односно у тренутку почетка опадања њеног интензитета, што представља границу између области равномерног и локализованог деформисања. Већа вредност A_g указује на способност материјала да се поуздано пластично деформише, и ако није могуће прописати генералне критеријуме који би материјале разврстали у различите групе, параметар A_g / A би могао да се сматра као илустративан показатељ.

У случају нестандардних вредности епрувета, у индексу поред ознаке ставља се бројна вредност (A_{40} , A_{80} итд.). Ова вредност нам практично представља још један важан показатељ деформабилности лимова.

Цео поступак испитивања затезањем на овом и наредним примерима изведен је преко познатих стандардизованих метода, у складу са стандардом EN10002-1.

5.1.3 Erichsen-ов тест

Овај тест се заснива на извлачењу лима посредством извлакача лоптастог врха приказаног на слици 5.9.

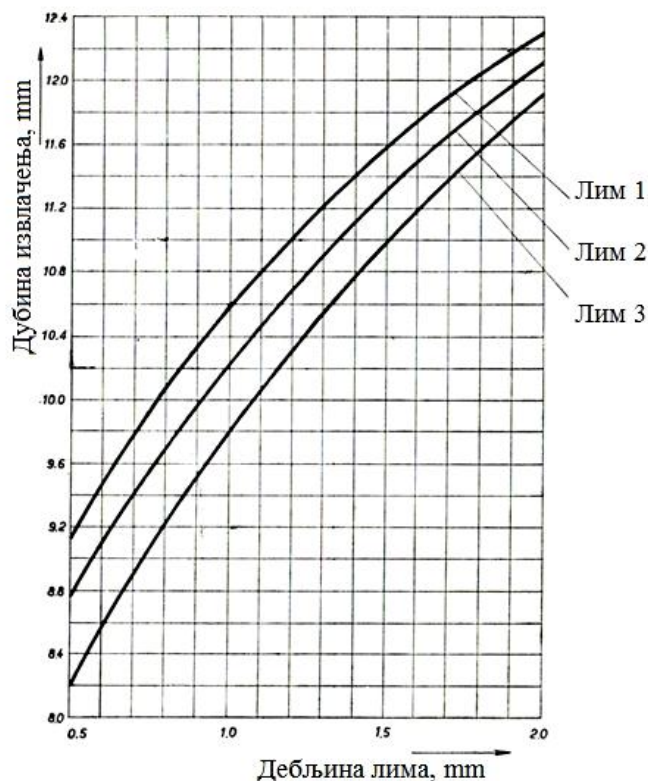


Слика 5.9 Erichsen-ов тест

Епрувета је облика квадратне плоче почетних димензија $90 \times 90 \text{ mm}$. Сила држања је око 10 kN , док је брзина утискивања $5 - 20 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$.

Важно је разграничити овај експериментални процес од процеса дубоког извлачења, јер у првом случају нема клизања лима, већ је он чврсто фиксиран силом држача (понекад и посредством утискујућег ребра), док је код дубоког извлачења клизање лима неопходно у циљу правилног извођења процеса и добијања жељених облика делова.

На слици 5.10 приказана је зависност дубине извлачења лима (Ерикшеновог броја), од његове дебљине, за три различита лима.

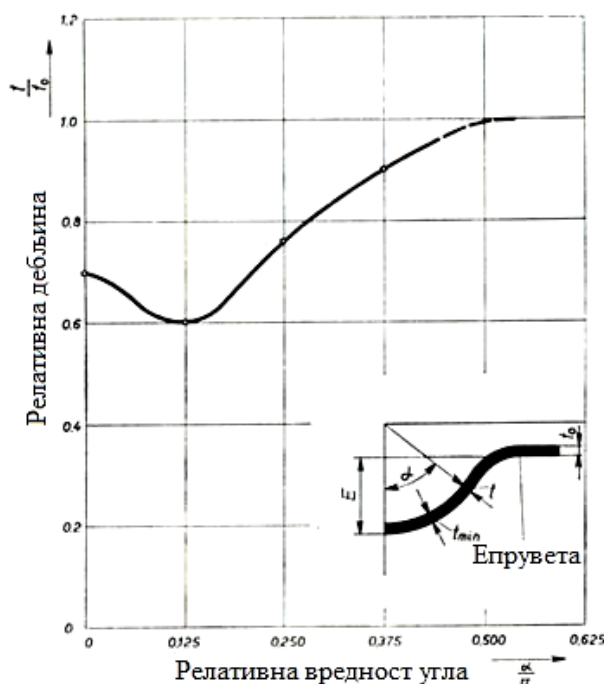


Слика 5.10 Зависност дубине извлачења (Ерикшеновог броја) од дебљине лима

Криве са дијаграма на претходној слици, односе се на *минималне вредности дубина извлачења* (односно тзв. развлачења), које се постижу за одговарајуће номиналне квалитете лима. Практично нам представљају деформабилност лима одређену преко *Erichsen*-овог теста. Са слике се може закључити да са падом дебљине лима, односно његовим стањењем, долази до смањења могућности извлачења лима, односно до смањења деформабилности. Дубина комада при разарању се као тачка уноси у еталон дијаграм за испитивани лим. Ако она лежи на кривој или изнад ње, карактеристике лима су задовољавајуће. Међутим, ако то није случај и тачка је испод криве, сматра се да је лим лошијег квалитета, са аспекта овог теста.

Процена деформабилности танких лимова посредством *Erichsen*-овог теста има ограничен значај. Сматра се да је поуздан само за случајеве деформисања у којима преовлађују затежући напони у равни лима, уз потпуно блокиран обод комада, што у практичним условима често није случај.

На слици 5.11, приказана је зависност промене дебљине комада од локације при извођењу овог теста.



Слика 5.11 Зависност промене дебљине комада од локације

Дијаграм са слике 5.11 показује да зона најинтензивнијег стањења комада код Ериксоновог теста није на самом полу, него поред пола калоте, при углу $\alpha = \frac{\pi}{8}$.

5.2 Деформабилност при запреминском обликовању

Када је у питању процес пластичног обликовања лимова, може се сматрати да се јављају раванска напонска стања. Ово упрошћење је могуће остварити због тога што је трећа димензија (дебљина) знатно мања од преостале две. Насупрот томе, код запреминског обликовања, долази до појаве просторних напонских стања.

Важности утицаја напонског стања на процес деформисања, може се видети на бројним примерима. Уочено је да при условима свестраног притиска долази до раста деформабилности материјала. Сиви лив се при чистом једноосном сабијању скраћује свега 10% пре настанка прве локализоване деформације. Међутим, уколико се при сабијању изложи и попречном притиску, скраћење се може повећати и до 60%.

Деформабилност при запреминском обликовању се квантитативно одређује преко граничне еквивалентне деформације (φ_{eg}) која се одређује у тренутку појаве оштећења структуре, односно у тренутку локализације или разарања. Преко зависности φ_{eg} од коефицијента везаног за напонско стање при деформисању (β), добија се дијаграм граничне деформабилности за запреминско обликовање, при чему се сматра да се врста материјала и остали фактори везани за услове обраде одржавају константним.

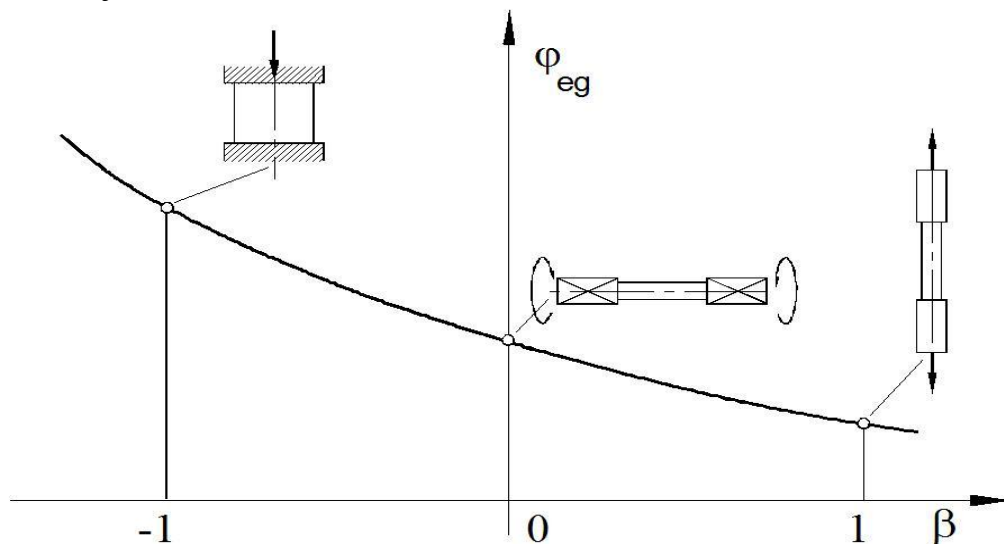
Зависност граничне деформабилности од напонског стања може се приказати изразом 5.9:

$$\varphi_{eg} = f(T_{\sigma}) = f(\beta) \quad (5.9)$$

Напонски показатељ (β) је бездимензиона величина и представља однос збира главних нормалних напона и еквивалентног напона, приказан је изразом 5.10:

$$\beta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} \quad (5.10)$$

Одређивањем φ_{eg} за различите вредности β , може се формирати дијаграм граничне деформабилности за поступке запреминског обликовања. Изглед овог дијаграма дат је на слици 5.12.



Слика 5.12 Дијаграм граничне деформабилности код запреминског обликовања

На основу великог броја теоријско-експерименталних испитивања, уочено је да процеси обраде деформисањем код којих доминирају притисни напони, односно $\beta < 0$ обезбеђују већу могућност обликовања у односу на процесе у којима доминирају затежући напони, при $\beta > 0$. Уочено је да затежући напони доводе до изразитог пада вредности граничне деформације, што се може видети и са дијаграма на претходној слици.

Дијаграм граничне деформабилности се одређује експерименталним путем, применом одговарајућих напонских стања, при чему важе следеће једнакости:

- једноосно затезање: $\beta = +1$,
- једноосно сабијање: $\beta = -1$,
- чисто увијање (торзија): $\beta = 0$.

У циљу добијања већег броја тачака, па самим тим и дијаграма веће тачности и могућности примене, потребно је изводити сложеније експерименте. Овако добијен дијаграм има универзално значење за све врсте запреминског обликовања материјала који се испитује.

Применљивост дијаграма граничне деформабилности, поред кривих ојачавања материјала, огледа се кроз остваривање одређених појашњења понашања материјала при различитим напонским стањима. Због тога је веома корисно имати их приложене уз материјал, јер пројектовање било ког процеса обликовања не може бити правилно изведено без њихове употребе. ДГД се не могу сматрати универзалним јер зависе од материјала, напонског стања, претходног деформисања, као и других фактора.

Постоји одређена корелација између ДГД за запреминско обликовање и обликовање лимова. Обе врсте дијаграма разматрају сличну проблематику, при чему постоји разлика између начина изражавања својства деформабилности. Код запреминског обликовања, ово својство је представљено преко односа напонског индекса деформабилности (β) и показатеља граничне деформабилности (φ_{eg}), док је код лимова реч о деформацијама у равни лима, о чему је претходно било речи. Тежи се процени обрадивости материјала на граници њихових могућности, при чему добијени параметри помажу при пројектовању технолошког процеса. У неким случајевима, као граница деформабилности, узима се појава првог локализованог деформисања или критичног стањења лима, док је у осталим случајевима као меродаван параметар узето разарање.

Научници теже томе да се конструише један дијаграм који би био универзалан, како за поступке запреминског обликовања, тако и за обликовање танких лимова, међутим, то је веома тешко остварљиво због разлике у трећој димензији испитиваних узорака. Према томе, сматра се да је, у области притисних напона, практично немогуће применити исти дијаграм и при обликовању лимова. Из тог разлога се при обради лимова, готово увек примењује *Keeler-Goodwin*-ов дијаграм, о коме је претходно било више речи.

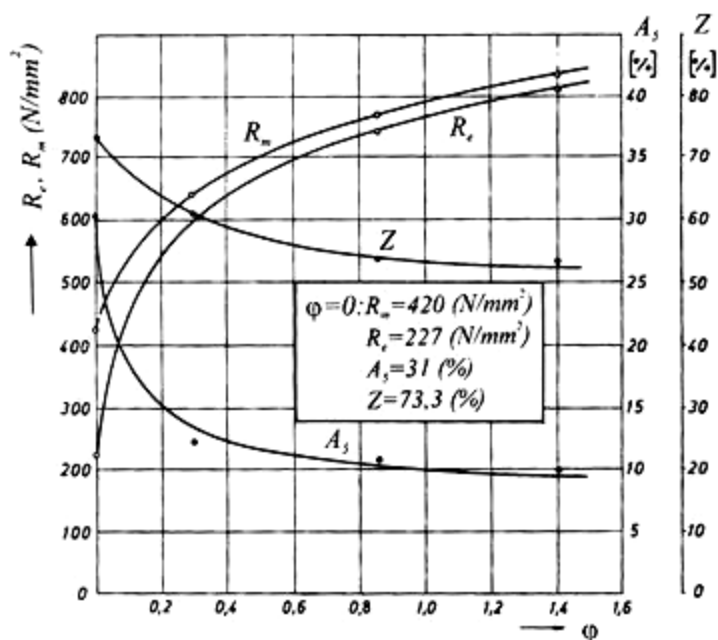
6. ФЕНОМЕН ДЕФОРМАЦИОНОГ ОЈАЧАВАЊА

6.1 Узроци и утицајни фактори деформационог ојачавања

Код процеса деформисања у хладном стању, при порасту степена деформације, долази и до повећања свих показатеља отпорности материјала (граница еластичности, граница течења (развлачења), затезна чврстоћа, тврдоћа), при чему долази до истовременог снижавања свих показатеља пластичности (релативно издужење, релативно сужење, жилавост и др.). Поред механичких, долази и до промене физичко-хемијских карактеристика метала, као што су: топлотна и електрична проводљивост, корозиона отпорност и сл.

У току процеса пластичног обликовања метала, нарочито у хладном стању, доћи ће до раста напона течења потребног за континуално одвијање процеса, сразмерно са повећањем пластичне деформације. До ове појаве долази зато што се материјал опире деформисању, па у складу са тим треба деловати све већим деформационим силама. Ефекат израженог пораста напона течења са растом пластичног деформисања, који је пропраћен падом пластичности, представља феномен деформационог ојачавања.

Са дијаграма на слици 6.1, могу се уочити показатељи тачности претходне тврдње да долази до раста карактеристика тврдоће (R_m и R_e) и пада својстава пластичности (A и Z). Дијаграм са слике је добијен затезањем четири кратке епрувете. Материјал прве епрувет није претходно пластично деформисан, односно $\varphi = 0$ и дате су вредности претходно споменутих карактеристика. Друга епрувета је претходно сабијена до настанка деформације од 30%, после чега је изложен затезању. Може се уочити значајан пораст својстава чврстоће и значајан пад пластичности. Начин промене се наставља уз даљи пораст претходне деформације на приближно 85%, као и на приближно 140%.



Слика 6.1 Промена својстава чврстоће и пластичности са степеном настале деформације

Феномен деформационог ојачавања поликристалних материјала и даље није детаљно објашњен. Сматра се да је деформационо ојачавање последица повећаног отпора кретању дислокација, који расте у складу са порастом деформације. Значајну препреку кретању дислокација код челика представља цементит, чији садржај расте са порастом процентуалног удела угљеника. Међутим, потребно је узети у обзир и друге појаве, као што су: дисторзија (пресавијање) кристалних решетки, дробљење металних зрна, полигонизација, дифузионе промене, фазне трансформације итд.

Ефекат деформационог ојачавања зависи од више фактора. При практичном извођењу било ког процеса пластичног обликовања метала, пре свега треба узети у обзир својства материјала (хемијски састав, структура, физичке и механичке особине, стање итд.). Поред тога, потребно је обратити пажњу на степен претходне деформације, температуру обраде, као и правилно изабрати брзину деформисања, па са тим и брзину деформације.

На ефекте деформационог ојачавања појединих метала, знатно се може утицати посредством појединих видова термичке обраде. На овај начин долази до промене структуре поликристала, па ће ток процеса деформисања бити измењен.

Карактер и интензитет деформационог ојачавања монокристалних и поликристалних материјала може се представити преко зависности промене напона течења у односу на пластичну деформацију. Овакве зависности могу се приказати аналитичким и графичким путем и називају се криве ојачавања.

6.2 Представљање и квантификовање деформационог ојачавања

Деформационо ојачавање се најефикасније одређује преко кривих течења или кривих ојачања. Ове криве практично представљају зависност еквивалентног напона течења који је једнак деформационом отпору, односно деформационој чврстоћи (K), од еквивалентне пластичне деформације (показатеља деформације првог, другог или трећег реда). У току пластичног деформисања, деформациони отпор је једнак еквивалентном напону, према већ споменутом енергетском услову пластичности. Треба споменути да у општем случају напрезања, еквивалентни напон може бити мањи од деформационе чврстоће, која представља критичан напон који је потребан да би се материјал пластично деформисао.

Одређивање кривих течења заснива се на експерименталном поступку најчешће једноосног затезања или притискивања, и дефинисању зависности еквивалентног напона од еквивалентне деформације у току праћења процеса пластичног деформисања. Својство деформационог ојачања материјала, као и криве течења које се овим поступцима добијају, не зависе од напонског стања и представљају универзалну карактеристику материјала.

6.2.1 Криве ојачавања и утицајни фактори

Криве ојачавања (криве течења) представљају зависности напона течења од степена настале деформације за дате температурско-брзинске услове процеса. Графички приказ ове зависности, у највећем броју случајева, представља криву линију у координатном систему напон течења – степен деформације, па је крива тако и добила свој назив.

Пошто се у реалним процесима деформисања метала развијају сложена напонско-деформациона стања, крива ојачавања се може посматрати и као зависност еквивалентног, односно уопштеног напона, од еквивалентне деформације. С обзиром да је одређивање појединих компонентних напона и деформација у реалним процесима обликовања отежано, потребно је при експерименталном одређивању кривих ојачавања изабрати једноставне процесе деформисања, код којих се вредности еквивалентног напона и деформације могу изразити директно преко главних напона и деформација који се лако могу измерити. За изабране процесе деформисања, постављен је услов да се контактнo треће максимално смањи, како би његов утицај било могуће занемарити, како би се поступак знатно поједноставио, а при том не нарушила тачност резултата експеримента. Међу овакве поступке спадају: једноосно затезање и сабијање, увијање и сл.

У случају једноосног, односно линеарног напонског стања, еквивалентни напон, тј. напон течења, у сваком тренутку деформисања једнак је стварном напону у попречном пресеку узорка (спрувете).

Пластично деформисање поликристалних материјала представља веома сложен процес физичко-хемијских и структурних трансформација, чија природа и даље није потпуна разјашњена. На ток процеса пластичног деформисања, као и после тога добијене карактеристике материјала, утиче велики број фактора и њихових међусобних утицаја, као што су: степен деформације, температура, брзина деформације, врста материјала, његово структурно стање, историја деформисања и др. Посматрајући, пре свега, практичан аспект процеса пластичног деформисања, у даљем тексту ће бити анализирани најважнији фактори који утичу на напон течења у материјалу.

Утицај хемијског састава

Пошто је реч о металним материјалима намењеним пластичном обликовању, са једне стране стоје челици, а са друге обојени метали и њихове легуре. Углавном се подразумева разматрање деформабилности при обликовању у хладном стању, с обзиром да је у топлотном стању ефекат ојачавања умањен, а пластичност знатно побољшана.

Обојени метали и легуре углавном имају повољнију деформабилност, односно пластичност у односу на челике. То се нарочито види код поступака запреминског обликовања. На пример, хладно истискивање челика је веома тешко, а обојених метала знатно лакше. Међутим, и овакву тврдњу треба прихватити условно. На пример, месингу нагло опада пластичност са порастом процента цинка изнад 30%.

Код челика, уопштено се може рећи да пластичност опада, а ојачање појачава са повећаним садржајем легирајућих елемената. На пример, нискоугљенични челични

лимови имају веома мало угљеника (0,05% - 0,1%) и феритну структуру. Познати су по веома доброј деформабилности.

Легирани челици имају готово увек мању пластичност и израженије ојачање, са повећаним садржајем легирајућих елемената. Ако их је потребно пластично обликовати, такви челици се загревају на температуру изнад температуре рекристализације и обликују у топлом стању.

Код челика са већим садржајем угљеника и легирајућих елемената значајан утицај имају карбиди. Као веома тврде и крпе фазе веома неповољно утичу на пластичност, а повећавају тврдоћу, кртост, отпорност на хабање итд. Углавном, такви материјали се ређе пластично обликују, а ако је то нужно, изводи се у топлом стању.

Највећу склоност ка формирању карбида има Ti, па следе V, Cr, Mn и тек онда Fe. То значи да челик легиран, на пример, са Cr и V уопште неће садржати карбиде гвожђа него хрома и ванадијума.

Експерименталним путем утврђено је да напон течења угљеничних челика у највећој мери зависи од процентуалног удела угљеника. Ово важи, како за претходно деформисане, тако и за термички обрађене челике. Ова зависност у највећем броју случајева је линеарног карактера. Може се закључити да се са порастом угљеника за 0.1% напон течења повећава за око $75 \frac{N}{mm^2}$. Када су у питању конструктивни угљенични челици, утицај угљеника на напон течења постепено опада са порастом процентуалног удела угљеника у челику.

Повећани садржај појединих легирајућих елемената у челику такође повећава напон течења. Si, Mn, Mo, V, а у малој мери и Cr и Ni. Укупни утицај садржаја легирајућих елемената опада са порастом степена настале деформације. Такође, при деформисању на повишеној температури, због погоднијих услова за одвијање сложених дифузионих процеса, атоми појединих хемијских елемената напуштају свој првобитни положај и формирају друга хемијска једињења у виду оксида, карбида и других. Такође, долази до интензивних фазних и структурних промена како због повишене температуре, тако и због процеса деформисања.

Утицај термичке обраде

На величину напона течења, односно специфичног деформационог отпора, при хладном деформисању битно утичу вид (нормализација, жарење, побољшање) и режим (температура и брзина загревања, време прогревања, брзина хлађења) претходне термичке обраде.

Експериментално је утврђено да на положај кривих ојачавања угљеничних и легираних челика за обраду у хладном стању у највећој мери утиче вид претходне термичке обраде. Када се исти челик изложи различитим видовима термичке обраде, а добијене криве ојачавања упореде, преко дијаграма напон течења – степен деформације може се уочити да најбоље карактеристике остварује крива добијена после термичке обраде побољшања. Испод ње се налази крива ојачавања добијена после нормализација, док је испод ње крива добијена после термичке обраде меког

жарења. При чему се уочава занимљива појава да практично не долази до промене облика криве, већ само до њеног положаја.

Утицај режима термичке обраде је сложеног карактера, па се избором најповољнијих параметара може знатно побољшати структура, а са тим и механичке карактеристике материјала, у циљу олакшавања даљег процеса деформисања.

Ради повећања пластичности понекад се изводи тзв. сфероидизација, односно меко жарење, с циљем да се ламеле цементита (карбида гвожђа или другог елемента) преведу у ситније зрнасте, сфероидне форме. Таква структура има бољу пластичност.

Генерално, жарење је термичка обрада код челика којом се побољшавају пластична својства. Већина челика се испоручује од стране произвођача у жареном стању, али је често потребно током даље пластичне прераде изводити међуоперационо жарење.

За експлоатацију најповољније карактеристике готових делова остварују се када је структура челика ситнозрнаста са равномерно распоређеним кугличастим перлитом. Ово је посебно важно за феритно-перлитне челике, са повећаним садржајем угљеника. За већину метала и легура, уочен је релативно узак интервал оптималних температура загревања, док време држања на тим температура није строго дефинисано.

Експериментална испитивања такође показују да долази до подизања кривих ојачавања ка вишим вредностима напона течења са повећањем тврдоће и затезне чврстоће (јачине) термички обрађених челика.

Такође је утврђено да значајан утицај на напон течења и положај криве ојачавања има и крупноћа кристалних зрна, на коју се такође може утицати претходно споменутим видовима термичке обраде.

Утицај претходног деформисања

Израда делова сложене геометрије или оних који захтевају значајну промену габаритних димензија почетног комада је ретко могуће извести у једној обрадној операцији, ово нарочито важи за обраду у хладном стању. Из тог разлога, технолошки поступак обраде се дели на више операција. С обзиром да се при свакој следећој операцији укупни степен деформације повећава, долази до ојачавања материјала обратка, у мањој или већој мери. Ова појава се, у циљу правилног пројектовања процеса, мора узети у обзир на правиан начин.

Ако се у току процеса деформисања праве паузе у одређеним тренутцима обраде, може се закључити да се напон течења материјала у тренутку растерећења и тренутку наставка процеса, не разликују. Међутим, ако се процес не настави одмах и направе се дуже паузе, може доћи до промене појединих механичких карактеристика, због појаве природног старења материјала.

Када се ради о претходном и накнадном деформисању, мора се водити рачуна и о историји деформисања дела, зато што се накнадно приложено оптерећење не мора поклапати са претходним, ни по правцу, ни по смеру деловања сила, што може довести до превременог разарања комада. Многобројни експерименти показали су да промена правца и смера деформисања изазива приметну промену напона течења, најчешће његово увећавање. Ова појава названа је анизотропно ојачавања материјала, и најчешће

се објашњава променом равни клизања поликристалних материјала при пластичном деформисању.

На основу претходно изложеног, може се закључити да ће криве ојачавања претходно деформисаних материјала бити позициониране изнад кривих ојачавања недеформисаних материјала. У процесима обраде метала деформисањем, свака честица материјала има различиту историју деформисања из разлога што је процес деформисања нехомоген, а путање кретања честица при деформисању су различите. Из тог разлога, деформисање материјала је сложеније са већим бројем операција деформисања.

Криве ојачавања добијене проучавањем оваквих поступака обраде, могу довести до приметно различитих закључака о понашању материјала, па њихова самостална употреба није увек оправдана, међутим, оне могу послужити за појашњавање целокупног процеса деформисања.

Криве ојачавања материјала који се претходно обрађују деформисањем на високим температурама, не разликују се драстично од оних које су добијене после појединих видова термичке обраде тих истих материјала.

Утицај хидростатичког притиска

Увелико је позната чињеница да се у процесима обраде метала деформисањем са додатним дејством свестраног хидростатичког притиска високог интензитета, постижу знатно већи степени деформације него у класичним условима деформисања. Изразито крти материјали се у условима високог притиска понашају као пластични, па је могућност њиховог обликовања, без настанка превремених ломова, знатно већа. Према томе, може се закључити да додатни притисак утиче повољно на промену напонске схеме, чиме се повећава деформабилност материјала.

У процесима обраде метала деформисањем, хидростатички притисак се остварије најчешће дејством флуида (течности или гасова), при том се практично исти ефекат може постићи и коришћењем других медијума, као што су: олово, графит (при високим температурама), Вудов метал и др.

Треба напоменути да поред повећане деформабилности материјала под дејством високог притиска, долази и до утицаја на показатеље отпорности и напон течења. Мада постоје одређени експериментални резултати који показују да напон течења расте са порастом хидростатичког притиска, сматра се да дејство високог притиска на ове величине, код већине метала и легура, може практично занемарити уз одређене апроксимације.

Посматрано са теоријског аспекта, хидростатички притисак утиче само на радни напон, односно истезање и сабијање, али не и на напон течења, односно еквивалентни напон. На основу тога, закључено је да при равномерном истезању цилиндричне епрувете под додатним дејством хидростатичког притиска, важе следеће једнакости за

главне напоне: $\sigma_1 = -p + \frac{F}{A}$; $\sigma_2 = \sigma_3 = -p$, па следи да је вредност еквивалентног напона у условима хидростатичког притиска: $\sigma_e \equiv \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{F}{A}$.

На крају, треба закључити да хидростатички притисак смањује радни напон истезања, притом не мењајући вредност еквивалентног напона. Међутим, треба напоменути да претходни израз за еквивалентни напона важи за хомоген и изотропан материјал, што је у практичним условима врло тешко, готово немогуће. Поред тога, долази и до измене механизма пластичног деформисања, фазних трансформација, промене структуре и других ефеката које треба узети у обзир при пројектовању конкретних процеса деформисања.

Утицај термомеханичких фактора

Интензитет деформационог ојачавања, као што је претходно напоменуто, зависи од: својстава материјала, брзине и степена деформације, као и температуре и стања структуре. Са повећањем брзине деформације расте и деформациони отпор. Такође, на вишим температурама утицај брзине деформације на деформациону чврстоћу је већи. Тако је пре свега због структурних појава везаних за процес рекристализације. При расту брзине деформације остаје мање времена за рекристализацију, па ће деформациона чврстоћа расти.

Експериментима је доказано да ће при собној температури, при повећању брзине деформације 10 пута у односу на брзине лабораторијских машина, K повећати за 5 до 10%. При повећању 1000 пута, K ће се повећати 16 до 34%. Међутим, при повећању за 1000 пута при обради на повишеним температурама, K се повећава чак 2 до 3 пута.

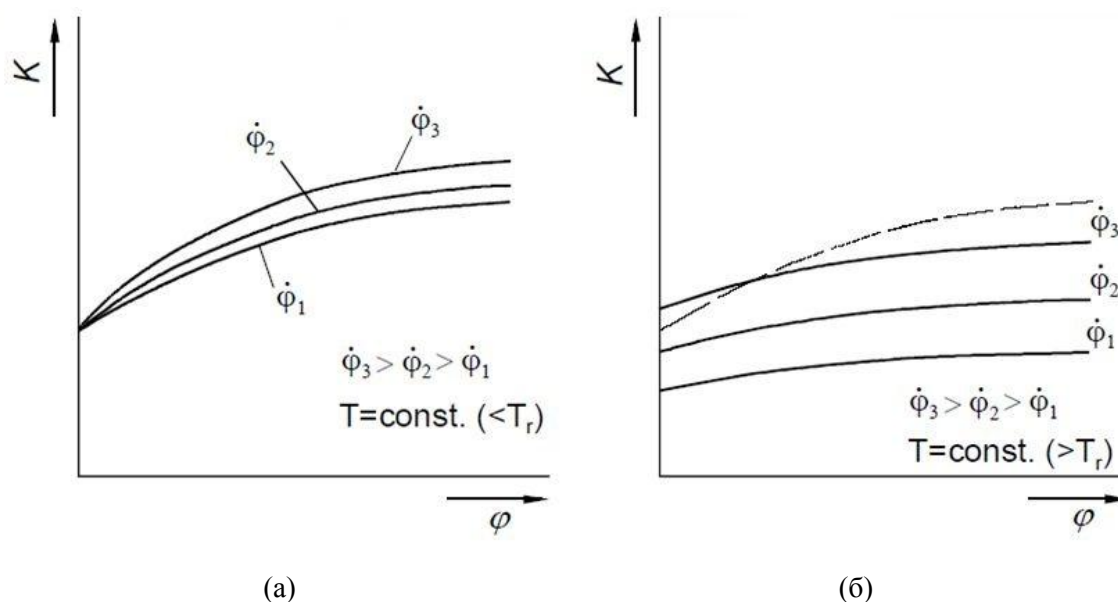
Лабораторијска испитивања су показала да важи однос приказан изразом 6.1:

$$\frac{K}{K_0} = \left(\frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0} \right)^m \quad (6.1)$$

при чему је m - *брзински коефицијент* који зависи од врсте материјала и температуре на којој се одвија процес деформисања ($m \approx 0.1 - 0.22$ за обраду у топлом стању).

При ниским температурама, односно хладној обради, доминира утицај степена деформисања, у односу на обраду у топлом стању код које је утицај брзине деформације израженији.

На слици 6.2 приказани су облици кривих ојачања при обради на хладно и на топло и то при три различите брзине деформације.



Слика 6.2 Криве ојачања при различитим брзинама деформације на собној (а) и на повишеној температури (б)

Посматрајући понашање ових функција, може се закључити да је у хладном стању $K_{HL} = K(\varphi, \text{материјал})$, а на повишеним температурама $K_{TOPL} = K(T, \dot{\varphi}, \text{материјал})$. При обликовању у хладном стању, односно температурама нижим од температуре рекристализације челика (слика 6.2а), на процес знатно утиче степен настале деформације, док је утицај брзине деформације приметно мањи. Међутим, када је у питању обликовање на повишеним температурама, односно температурама вишим од температуре рекристализације за испитивани челик (слика 6.2б), знатно је израженији утицај брзине деформације, док је степен настале деформације мање утицајан. Такође је уочено да на повишеним температурама вредности напона на граници течења варирају у зависности од брзине деформације, тј. при већој вредности $\dot{\varphi}$, у материјалу се јавља већи отпор према даљем ширењу деформације, па с тим и веће вредности овог напона. Међутим, на повишеним температурама долази до свеукупног пада вредности деформационог отпора, па је овај вид обликовања знатно повољнији са аспекта деформационе силе.

6.2.2 Експериментално одређивање кривих ојачавања

Експериментално одређивање кривих ојачања може се изводити посредством већег броја различитих поступака међу које спадају: метод једноосног затезања, метод једноосног сабијања, метод увијања, метод раванског сабијања, метод хидрауличког развлачења итд. Поједини од ових метода изводе се различитим поступцима, који се могу сматрати за посебне методе, па нпр. када је у питању метод једноосног истезања, може се изводити као процес: континуалног истезања, етапног истезања, истезања претходно деформисаних узорака и сл. Када је у питању једноосно сабијање, може се поделити на: сабијање цилиндричних епрувета, сабијање са равним или конусним

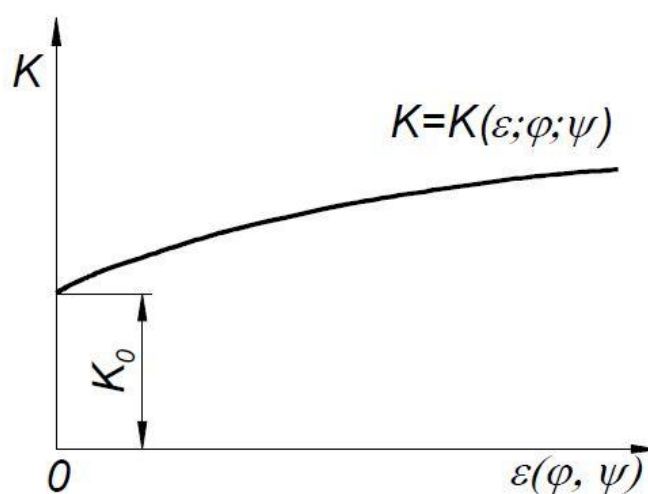
притискивачима, сабијање епрувета различитих димензија, хидростатичким трењем, сабијање у више ступњева, сабијање прстена итд.

У овом раду биће више речи о поступку експерименталног одређивања кривих ојачавања једноосним затезањем узорка, као и о његовом практичном извођењу.

Одређивање криве ојачања једноосним затезањем узорка

При затезању епрувете, постоји само један главни напон σ_1 који је уједно једнак σ_e , који је, док траје пластично деформисање, једнак K . Од тренутка достизања границе течења, па до постизања максималне силе у тачки М, потребно је успоставити везу између силе затезања и стварног напона, који је једнак деформационој чврстоћи. Ту везу омогућава услов о непроменљивости запремине у току процеса. Поред запремине, током хомогеног деформисања нема ни промене геометријских односа епрувете.

Крива ојачавања, односно крива течења се може дефинисати као графички приказ функционалне зависности деформационог отпора од одговарајуће пластичне деформације. На слици 6.3, дат је изглед криве ојачања добијене испитивањем на затезање.



Слика 6.3 Изглед криве ојачања

У зависности од примењеног показатеља деформације, разликују се криве ојачања:

- Првог реда $K = K(\varepsilon)$,
- Другог реда $K = K(\psi)$,
- Трећег реда $K = K(\varphi)$,

Веза између техничког напона и деформационог отпора приказује се преко једначине 6.2:

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = \frac{F}{A} \cdot \frac{l}{l_0} = \frac{F}{A_0} (1 + \varepsilon) = \frac{F}{A_0} \cdot e^{\varphi} = \sigma \cdot e^{\varphi} = \sigma_e = K \quad (6.2)$$

при чему је: $A_0 \cdot l_0 = A \cdot l$.

Еквивалентна деформација је једнака природној деформацији дужине епрувете, односно првој главној деформацији, при чему важи да је $\varphi_2 = \varphi_3 = -0.5 \cdot \varphi_1$. При том је

$$\varphi_e = \varphi_1 = \ln \frac{l}{l_0}.$$

Деформациона чврстоћа се налази преко израза 6.3:

$$K = \sigma \cdot e^{\varphi} = \sigma(1 + \varepsilon) = \frac{\sigma}{1 - \psi} \quad (6.3)$$

Деформациони отпор у тачки М биће у складу са изразом 6.4:

$$K_M = \sigma_M \cdot e^{\varphi_m} = \sigma_M (1 + \varepsilon_M) = \frac{\sigma_M}{1 - \psi_M} \quad (6.4)$$

На сличан начин као и претходни, добијају се и изрази за показатеље деформација у тачкама M и R .

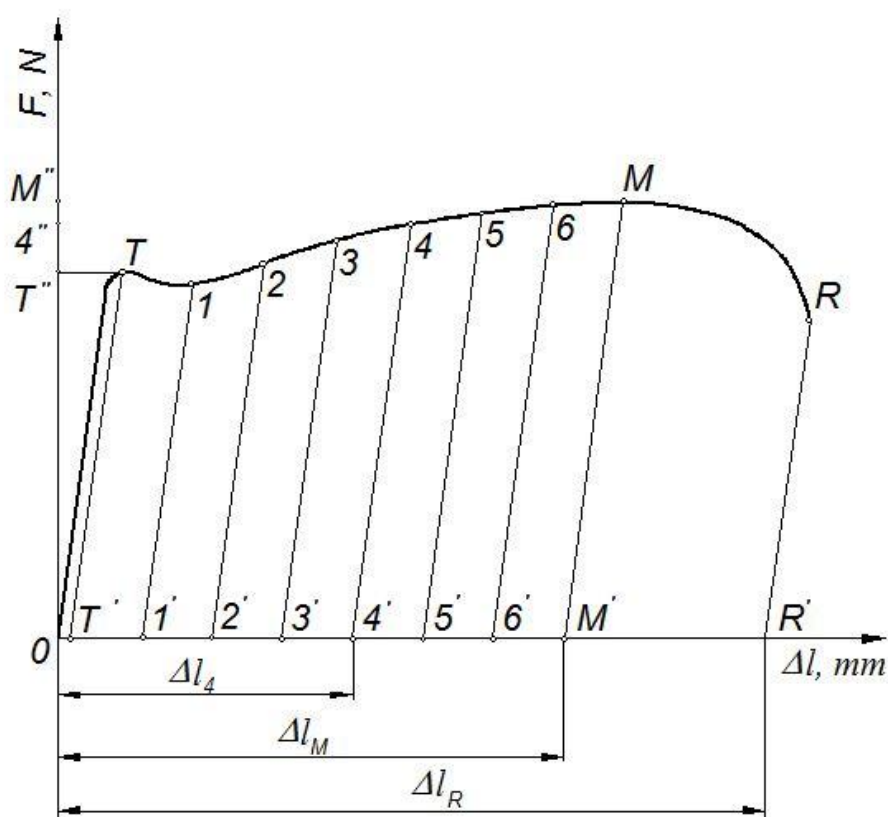
Недостатак једноосног затезања је релативно мали износ максималне деформације хомогеног деформисања, приказане тачком M . Код нискоугљеничних челика, то је свега око 30%, што понекад може бити довољно. Међутим, када то није случај, користи се други експеримент (нпр. притискивање, када услови дозвољавају, уз проблем са контактним трењем) или се користе *аналитичке апроксимације кривих ојачања*. У даљем тексту биће објашњен поступак одређивања кривих ојачања затезањем.

Када је одабран материјал који ће бити испитиван на чисто једноосно затезање, приступа се извођењу експеримента. Испитивање се изводи помоћу специјализоване машине, тзв. кидалице. Ова машина поседује чељусти за прихватање епрувете, односно узорка, који је претходно правилно припремљен за процес испитивања.

Пре него што се епрувета изложи затезању, потребно је одредити њене почетне геометријске карактеристике. То се односи на њену почетну дужину (l_0 , mm), ширину (b_0 , mm) и дебљину (S_0 , mm). После тога, изводи се испитивање на затезање до кидања епрувета. Резултати експеримента добијени су у облику дијаграма затезања, односно зависности силе (F) од промене дужине епрувете (Δl), као и основних параметара експеримента, тј. вредности максималне силе (F_M), дужине епрувете при максималној сили (l_M) и у тренутку разарања (l_R), које се могу измерити са добијеног дијаграма, помоћу одговарајућих размера за силу и промену дужине, док се остали важнији параметри налазе прорачунским путем. У новије време, ове машине могу бити

опремљене софтвером који аутоматски израчунава остале параметре, што значајно олакшава целокупан поступак.

У циљу добијања криве течења (криве ојачања), добијени дијаграми затезања дели се на одређени број тачака (слика 6.4) у којима се одређују вредности показатеља деформација (Δl , ε) и напонских показатеља (σ_T , K).



Слика 6.4 Обрада снимљеног дијаграма затезања

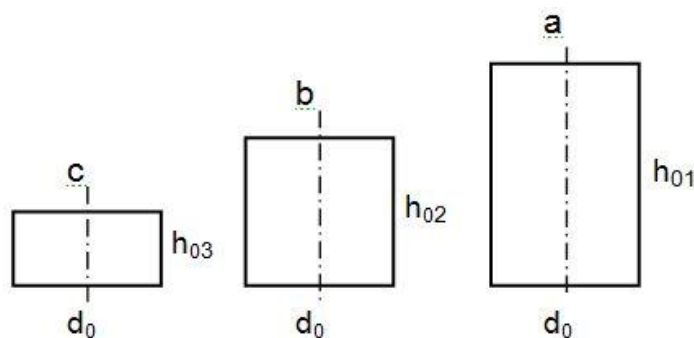
Размере за силу и дужину $\left(U_F = \frac{F_M}{0M''}, \frac{N}{mm} \text{ и } U_{\Delta l} = \frac{\Delta l_R}{0R'}, \frac{mm}{mm} \right)$ добијене су на основу обрађеног дијаграма са претходне слике. Помоћу ових размера, израза за технички и стварни напон (3.8 и 3.9), као и израза за показатеље деформација (4.2 до 4.5), добијене су вредности напонских и деформационих карактеристика у тачкама од 1 до 6 са слике.

Помоћу добијених вредности K и ε у изабраним тачкама, црта се крива која нам показује на који начин и у којој мери је дошло до ојачања материјала. Ова крива представља својство материјала и помаже при одабиру параметара процеса пластичног обликовања испитиваног металног материјала.

Одређивање криве ојачања притискивањем (Метода Шофмана)

Метода Шофмана представља оригиналну експериментално-аналитичку методу одређивања кривих ојачавања запреминских комада. Ова метода није применљива за делове од лима.

Поступак се састоји из притискивања серије епрувета (слика 6.5). Поступку се излаже најмање три епрувете, у неколико фаза. Основна идеја заснована је фиктивној, графо-аналитичкој екстраполационој елиминацији трења. Према томе, не тежи се смањивању трења у физичком смислу.



Слика 6.5 Изглед епрувета за методу Шофмана

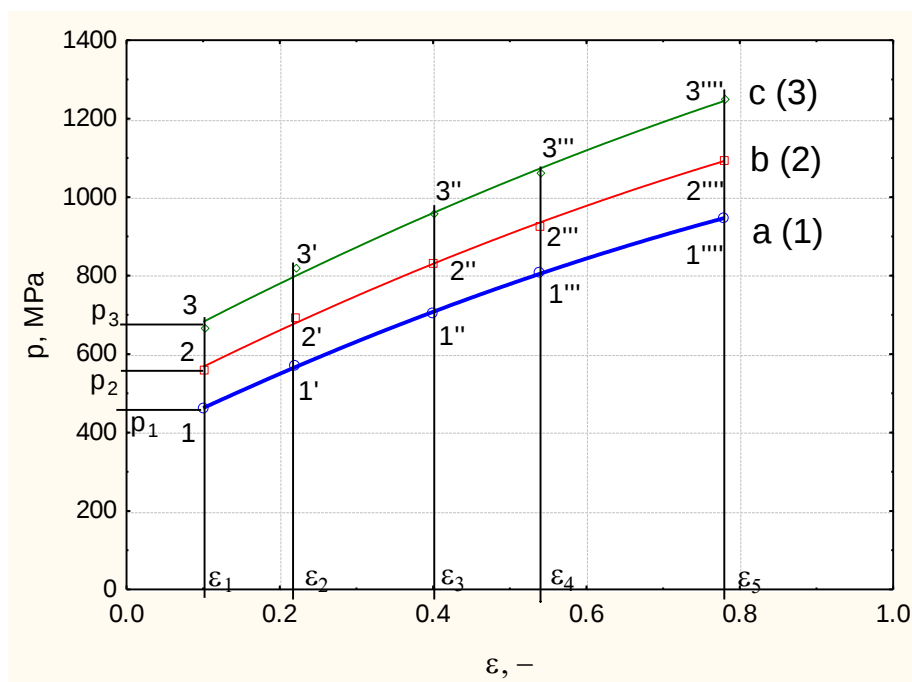
Епрувете су најчешће цилиндричне, једнаког пречника. Препоруке за однос висине и пречника ($h_0 : d_0$), исте су као при поступку класичног сабијања. То значи да споменути однос не би требало да прелази 2:1, мада понекад достиже и до 2.5:1.

Током експеримента свака епрувета се сабија у неколико фаза. За конкретан поступак приказан на слици 6.6, у питању је 5 фаза са деформацијама од ε_1 до ε_5 . Сабијању подлежу три епрувете означене са а, b и c, односно 1, 2 и 3 у складу са ознакама са слике 6.6.

За сваку епрувету и сваку фазу, потребно је одредити вредности силе сабијања и тренутне висине епрувете, а затим на тога израчунати вредности притиска p и деформације ε . Одређивање ових вредности заснива се на познатом изразу за једнакост запремине и изразу за одређивање вредности деформације при сабијању.

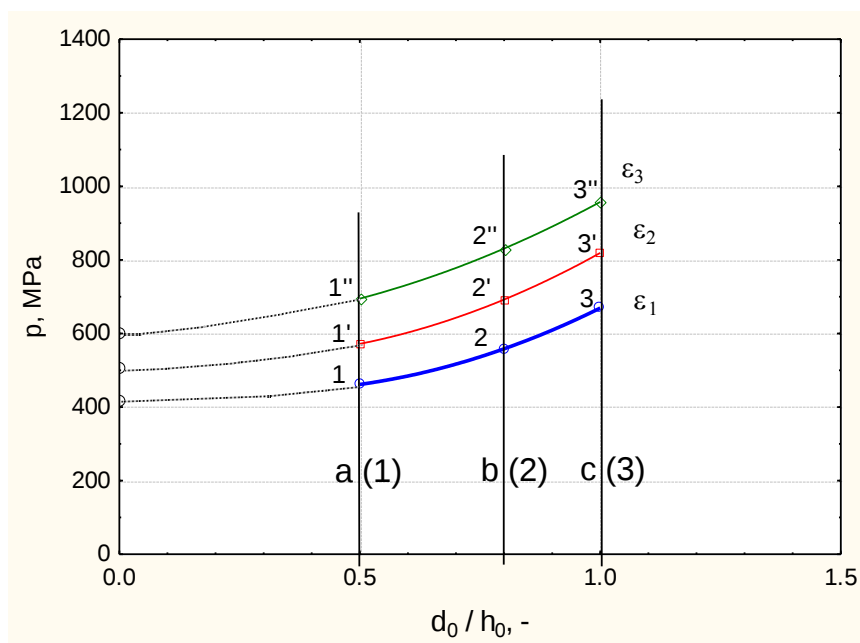
$$A \cdot h = A_0 \cdot h_0 = \text{const.} \Rightarrow p = \frac{F}{A_0} \frac{h}{h_0} \quad (6.5)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h}{h_0} \quad (6.6)$$



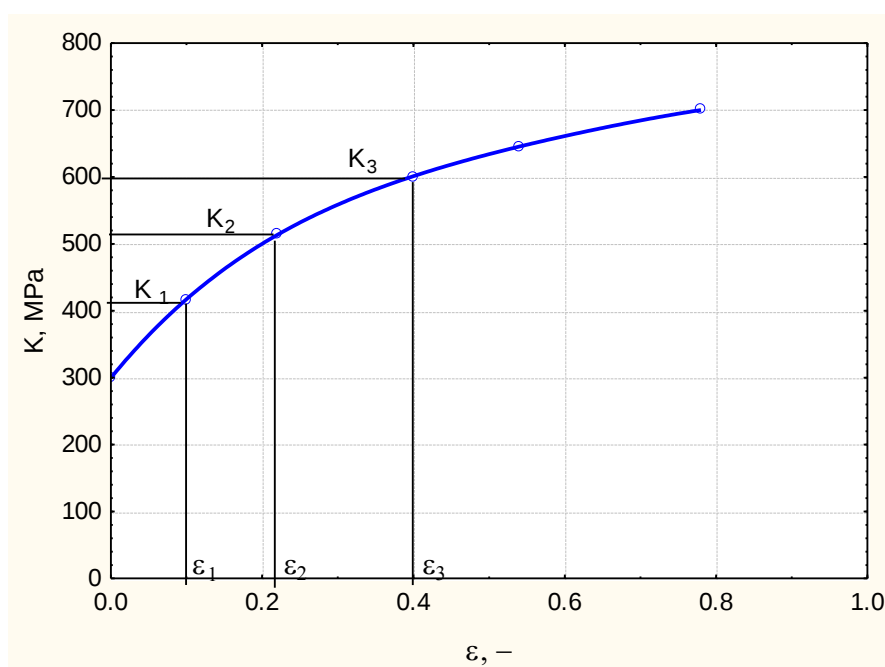
Слика 6.6 Дијаграм зависности притиска од деформације

На овај начин, добијају се серије тачака. Односно, у сваком случају три серије по пет тачака, па је помоћу њих могуће конструисати дијаграм као на слици 6.6. Даље се конструише нови дијаграм, при чему на ординатној оси остаје притисак p , а за апсцису се узима геометрија епрувете која је бројно изражена преко односа попречног пресека и висине, који је карактеристичан за ову епрувету. За сваку вредност деформације, вредности притиска које су претходно биле поређане у вертикалном правцу, сада се ређају у правцу апсцисне осе, као што је приказно на слици 6.7. На овај начин добијају се нове криве.



Слика 6.7 Зависност притиска од почетног притиска и висине

Суштина овог поступка лежи у екстраполирању кривих улево од пресека са ординатном осом, као што се види са претходне слике. Екстраполација може да се ради правом (мања тачност) или кривом (већа тачност) линијом. На ординатној оси, однос $\frac{d_0}{h_0}$ тежи нули, што значи да вредност пречника такође фиктивно тежи нули, а са њим и треће на контактної површини. Ако трећа нема, притисак p заправо представља еквивалентни напон, односно деформациони отпор, а деформација ε еквивалентну деформацију. Код конкретног примера, добијене су три тачке, односно парови вредности притиска и деформације. У складу са тим, могуће је формирати координатни систем $K - \varepsilon$, унети одговарајуће вредности и формирати криву ојачавања приказану на слици 6.8. Почетни део криве (од K_0 до K_1) такође се формира екстраполацијом десног дела криве течења.



Слика 6.8 Крива течења добијена поступком Шофмана

У циљу формирања претходна три дијаграма, потребно је одабрати погодне размере и пажљиво унети координате за сваку тачку.

Поступак шофмана заснован је на луцидној идеји екстраполационе елиминације трења, која отклања потребе за физичким напорима подмазивања и смањења трења.

Као недостатак поступка истиче се релативно сложен експеримент који захтева прецизно мерење и пажљив рад. У супротном, може се јавити приметно расипање тачака, па је у том случају неопходно преконтролисати поступак и резултате експеримента.

6.2.3 Аналитичке апроксимације кривих ојачавања

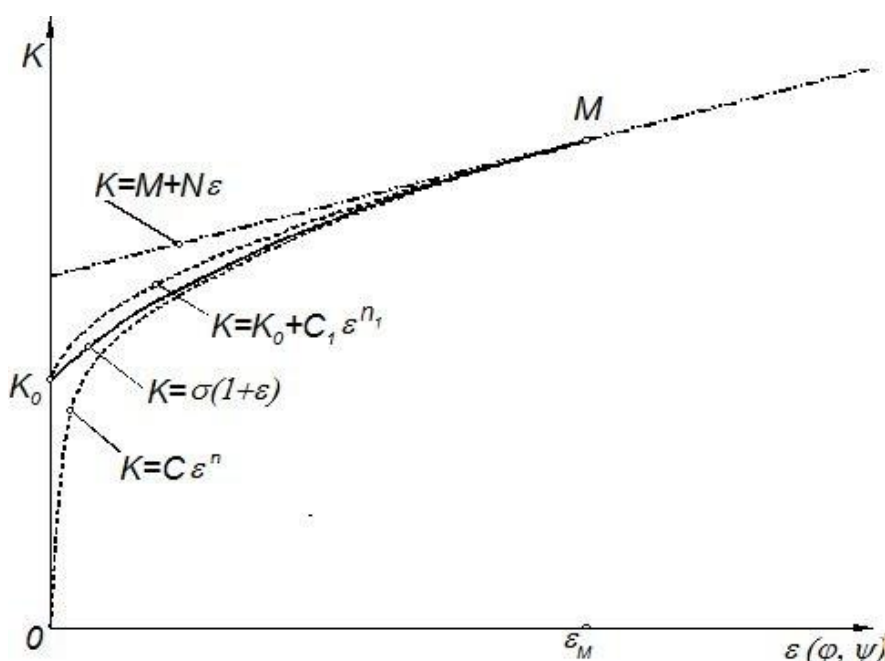
Аналитичке апроксимације кривих ојачања представљају одговарајуће математичке функције које могу да замене експериментално одређивање кривих ојачања. Углавном су у питању две експоненцијалне и једна линеарна функција. Показатељи деформација могу бити различити, али се најчешће користи логаритамска деформација φ . Аналитичке апроксимације на основу овог показатеља дате су изразима 6.7, 6.8, 6.9:

$$K = C \cdot \varphi^n \quad (6.7)$$

$$K = C_1 + C_2 \cdot \varphi^m \quad (6.8)$$

$$K = M + N \cdot \varphi \quad (6.9)$$

На слици 6.9, дати су прикази ових функција у односу на криву ојачања добијену експерименталним поступком.



Слика 6.9 Аналитичке апроксимације криве ојачања

У складу са претходном сликом, вредности ових функција биће:

- Експоненцијална функција типа $K = C(\text{деформација})^n$:

$$K = K_M \left(\frac{\varphi}{\varphi_M} \right)^{\varphi_M} ; K = \frac{F_M}{A_0} \cdot e^{\varphi_M} ; \varphi_M = \left(1 + \frac{A_g}{100} \right)$$

$$K = K_M \left(\frac{\varphi}{\varphi_M} \right)^{\varphi_M} = \frac{K_M}{\varphi_M^{\varphi_M}} \cdot \varphi^{\varphi_M}.$$

- Експоненцијална функција типа $K = K_0 + C_1(\text{деформација})^n$:

$$K = K_0 + (K_M - K_0) \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_M} \right)^{\frac{K_M}{K_M - K_0} \cdot \varphi_M}.$$

- Линеарна функција типа $K = M + N(\text{деформација})$:

$$K = K_M (1 - \varphi_M + \varphi).$$

У односу на експерименталне поступке, коришћењем аналитичких апроксимација нема ограничења по питању максималне деформације. Такође њихова примена је релативно лака, и могућа је директна примена у софтверима за нумеричку симулацију процеса пластичног обликовања.

6.2.4 Експонент деформационог ојачавања (n – фактор)

Одређивање експонента деформационог ојачавања

Ако се пође од формуле за деформациону чврстоћу, уз услов максимума силе $\varphi = \varphi_M \Rightarrow K = K_M$ и услов непроменљивости запремине $V_0 = V = A_0 \cdot l_0 = A \cdot l = \text{const.}$ За максималну силу (у тачки М), важи: $K = K_M = \sigma_M \cdot e^{\varphi_M} = \frac{F_M}{A_0} \cdot e^{\varphi_M}$, па ће се добити израз 6.10 који представља деформациону чврстоћу у тачки М.

$$K_M = C \cdot \varphi_M^n \quad (6.10)$$

Познато је да су: $F = K \cdot A$; $K = C \cdot \varphi^n$ и $A = \frac{A_0}{e^{\varphi_M}}$. На основу ових израза добиће се израз за силу 6.11.

$$F = C \cdot A_0 \cdot \frac{\varphi^n}{e^{\varphi_M}} \quad (6.11)$$

Применом услова о максимуму силе у тачки М, добиће се:

$$\frac{dF}{d\varphi} = C \cdot A_0 \cdot \left(\frac{e^{\varphi} \cdot n \cdot \varphi^{n-1} - e^{\varphi} \cdot \varphi^n}{e^{2\varphi}} \right) = 0, \text{ сређивањем овог израза, добија се } n \frac{\varphi_M^n}{\varphi_M} - \varphi_M^n = 0,$$

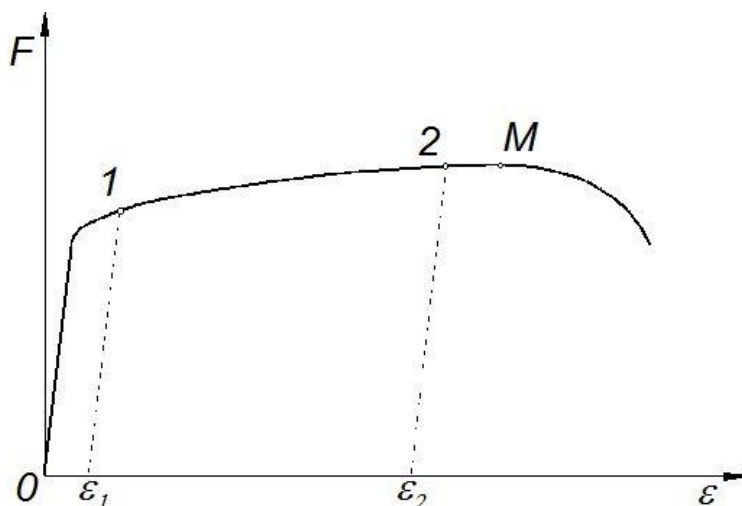
односно:

$$n = \varphi_M = \ln \frac{l_M}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (6.12)$$

Изразом 6.12 показана је бројна једнакост експонента n и природне деформације у тачки M .

$$\text{Важи и } K = K_M \left(\frac{\varphi}{\varphi_M} \right)^{\varphi_M} = \frac{K_M}{\varphi_M^{\varphi_M}} \cdot \varphi^{\varphi_M}, \quad K_M = \frac{F_M}{A_0} \cdot e^{\varphi_M} = R_M \cdot e^{\varphi_M}, \text{ као и } \varphi_M = \ln \left(1 + \frac{A_g}{100} \right)$$

Погодно је да се у складу са дијаграмом са слике 6.10 изаберу вредности деформационих чврстоћа у тачкама 1 и 2, односно: $K_1 = C \cdot \varphi_1^n$ и $K_2 = C \cdot \varphi_2^n$.



Слика 6.10 Одабир тачака за различите вредности деформационог ојачања

Препоручљиво је да разлика између деформација у тачкама 1 и 2 буде што већа, али наравно у области хомогеног деформисања. Тачка 1 треба да буде довољно удаљена од границе течења. Тачка се бира на овај начин како би се избегла могућност појаве нетачности у вези са евентуалним дисконтинуитетом криве затазања у области преласка из еластичне у пластичну област. Такође, положај тачака је изабран на овај начин и због разлике која постоји између експерименталне криве и апроксимационих једначина у области мањих деформација. Прва тачка не би требало да буде превише удаљена од границе течења, како се не би превише приближила другој тачки, јер би то довело до недовољне тачности фактора n . Друга тачка мора бити у зони хомогеног деформисања, односно испред тачке M , али при том не сме бити превише далеко од M , да се не би претерано приближила првој тачки. Закључује се да тачке треба да буду на што већој удаљености једна од друге, како би тачност читавања промене силе и напона била што већа, а да при том буду у дозвољеним границама.

Када су у питању челични лимови, положај прве тачке бира се око издужења од 5%, а друга тачка треба да буде на издужењу око 5% мањем од издужења у тачки М. Понекад су ова одступања већа, а у случају испитивања дефлексионих појава, може се захтевати одређивање n – фактора у области мањих деформација, односно 2 до 4% или 2 до 5%.

После краћег сређивања доћи ће се до: $\log \frac{K_2}{K_1} = \log \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right)^n$, из чега следи да се експонент деформационог ојачања може прорачунати преко израза 6.13:

$$n = \frac{\log \frac{K_2}{K_1}}{\log \frac{\varphi_2}{\varphi_1}} \quad (6.13)$$

Претходни поступак показује једноставан начин за експериментално одређивање n – фактора, преко само две тачке на кривој затезања.

Пошто n – фактор показује интензитет деформационог ојачања, може се закључити да на њега, поред врсте материјала, велики утицај има брзина деформације и температура, што се индиректно односи и на димензионе карактеристике епрувете која се испитује. Такође, приметан утицај на n – фактор има хемијски састав и степен претходне деформације, односно историја деформисања.

Механизам утицаја n – фактора на деформабилност

Утицај овог фактора на деформабилност, приметно је већа у условима нехомогеног деформационог поља. Пример ове тврдње огледа се у случају када су деформације јако сконцентрисане око критичног места отпреска. Већа вредност овог фактора нам показује да долази до интензивнијег ојачања на месту највећих деформација, што за последицу има отежавање даљег раста деформације у тој зони. У складу са тим, суседне зоне се више деформишу, даље се деформације шире у суседне зоне све док се не прекине раст деформације на тим местима због успорења ојачања и деформације пређу на остале зоне из околине. На овај начин, добија се знатно равномерније деформационо поље, односно долази до уклањања или ублажавања локализација.

Ефекат ојачавања је посебно значајан у случају када преовлађују затежући напони у равни лима, нарочито у условима када је блокиран обод комада. Из тог разлога, постоји евидентна веза између фактора деформационог ојачања и показатеља испитивања добијених Ериксеновим тестом. Уочен је висок степен корелације између овог фактора и односа напона на граници течења и при максималној сили.

Вредност n – фактора код челичних лимова креће се између 0.2 и 0.3, код месинга његова вредност је око 0.4, а код аустенитних челика 0.3 до 0.4. Са порастом вредности n – фактора примећено је побољшање обрадивости. Као пример, оквирно је дата

промена својства обрадивости код нискоугљеничних челика у зависности од вредности овог фактора:

- $n = 0.16 - 0.19$ - веома лоша обрадивост
- $n = 0.19 - 0.21$ - лоша обрадивост
- $n = 0.21 - 0.23$ - задовољавајућа (средња) обрадивост
- $n = 0.23 - 0.25$ - врло успешна обрадивост
- $n > 0.25$ - изузетно добра (одлична) обрадивост

Треба споменути да се овај фактор ретко узима самостално као показатељ деформабилности. Наиме, деформабилност се често одређује посредством n – фактора уз друге показатеље, као што је коефицијент нормалне анизотропије (r – фактор) и др.

Такође треба истаћи да су вредности експонента деформационог ојачања код легираних челика понекад знатно ниже, односно њихова обрадивост је лоша или веома лоша. Пример ове тврдње јесте лим израђен од феритног нерђајућег челик AISI 430 (X6Cr17). Наиме, вредности n – фактора код овог челика једва прелазе 0.19 или су чак и мање од ове вредности. Значајно високе вредности овог фактора примећене су код аустенитног нерђајућег челика X5CrNi18-9 ($n \approx 0.4$), као и код неких легура кобалта где вредности n – фактора достижу и до 0.5.

7. ЕКСПЕРИМЕНТ

Тема овог експеримента заснована је на испитивању понашања металних материјала при тесту једноосног затезања. Затезању су изложени лимови различитих особина, при чему је пропраћена промена њихових механичких и осталих карактеристика у току развоја процеса еластичног, затим пластичног деформисања, а на крају и појаве локализованог деформисања чему следи разарање, односно лом епрувете.

Експеримент се састојао из пет целина, односно испитивано је пет различитих материјала, о којима ће бити речи у даљем тексту. Испитивање је остварено на машини ZWICK/ROELL Z 100 са уграђеним одговарајућим специјалним рачунарским софтвером под називом TestXpert. Основне особине ове машине изложене су у наредном тексту.

Димензије носећег рама:

- висина: 2369 mm,
- ширина: 960 mm,
- свеукупна висина: 2484 до 3294 mm.

Карактеристике погонског система:

- номинална брзина: 0.0005 до 200 mm/min,
- тачност задате брзине: 0.003 % од номиналне брзине,
- резолуција кретања: 0.0206 μ m,
- прецизност позиционирања: < 1.0 μ m.

Мерно-управљачка електроника:

- распон мерења: 0.2 до 165% од номиналне вредности мерења,
- брзина снимања података: 500 Hz,
- резолуција при 100% номиналне вредности мерења: 162000 тачака при 500 Hz,
- поседује могућност диференцијалног уноса мерних података.

Мерење силе:

- номинална сила: 100 kN,
- распон мерења:
DIN EN ISO 7500-1 степен 1: 400.00 N до 100.00 kN,
DIN EN ISO 7500-1 степен 0.5: 2.00 kN до 100.00 kN.
- резолуција машине: 0.16 до 0.4 % од вредности номиналне силе,
- резолуција силе: 1 N

Екстензометар (сензор за мерење издужења):

- мерна дужина уређаја: 10 до 100 mm,
- степен прецизности: DIN EN 10002 T4 степен 1.

Сензор за мерење деформације ширине:

- степен прецизности: EN 10002-4 степен 0.5,
- распон мерења:
ширина узорка 10 mm: 1.5 mm,
ширина узорка 20 mm: 11.5 mm.

Пнеуматске стезне чељусти са ручним активирањем:

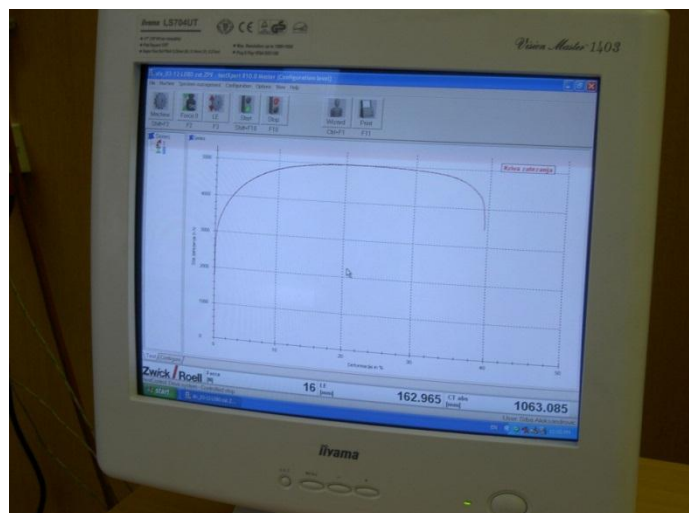
- сила стезања:
180 *kN* (при операционом притиску од 10 bar),
110 *kN* (при операционом притиску од 6 bar)
- максимална ширина чељусти: 30 *mm*,
- спољашњи пречник чељусти: 78 *mm*.

На слици 7.1 дат је реалан изглед ове машине која се налази на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу, у лабораторији за обраду деформисањем и машинске материјале.



Слика 7.1 Машина за испитивање епрувета на једноосно затезање типа ZWICK/ROELL Z 100

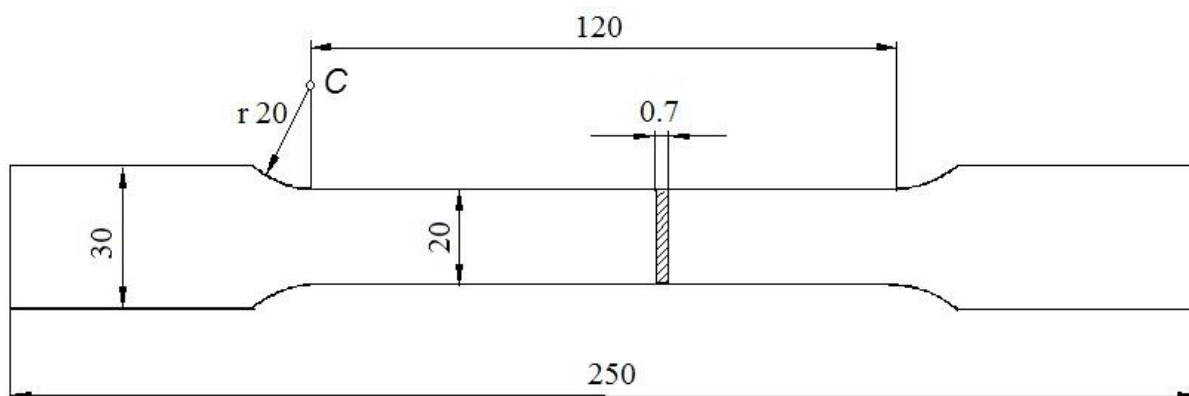
Као што је претходно споменуто, радом машине управља специјални софтвер за тестирање узорака при лабораторијским процесима у овој области. Софтвер је креиран у компанији ZWICK/ROELL под називом TestXpert вер. 10.0/e. На слици 7.2 дат је приказ радног окружења овог софтвера.



Слика 7.2 Радно окружење софтвера TestXpert

7.1 Резултати експеримента

У првом делу експеримента испитиван је челични лим материјала EN-X5CrNi18 9(10). У питању је аустенитни нерђајући челик. Изглед и димензије епрувете дати су на слици 7.3.



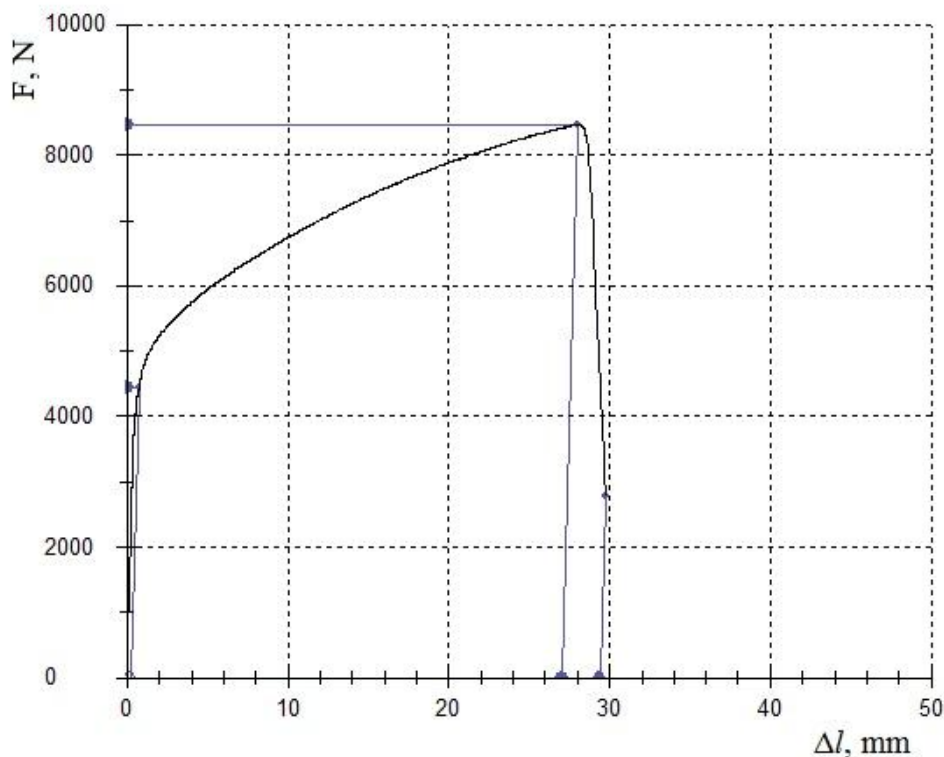
Слика 7.3 Схема епрувете од челика ознаке X5CrNi18 9(10)

На крају процеса затезања, дошло је до разарања епрувете. Изглед епрувете после лома дат је сликом 7.4. Са слике се може уочити да је до лома дошло близу средине епрувете, па се добијени резултати могу узети као меродавни. Такође је уочено да је до лома дошло под углом приближно 90° у односу на правац затезања. Ово је повезано са карактеристикама материјала, односно равнима клизања на нивоу кристалне решетке металних материјала. У току процеса је дошло до промене почетне дужине епрувете, што ће бити приказано на дијаграму затезања.



Слика 7.4 Реалан изглед епрувете од X5CrNi18 9(10) после разарања

Као што је претходно споменуто, експериментом управља одговарајући софтвер. Овај софтвер нам, између осталог, аутоматски црта дијаграм затезања за остварени процес затезања. Изглед овог дијаграма за први испитивани материјал дат је на слици 7.5. Са дијаграма се може уочити вредности напона на граници течења, који у овом случају није директно видљив, односно његова вредност представља технички напона на граници течења и налази се преко једноставног поступка који је објашњен у претходном тексту. Поред вредности овог напона, видљива је и вредност затезне чврстоће (јачине), као и напон у тренутку лома епрувете, при максималном издужењу епрувете и сужењу односно контракцији попречног пресека.



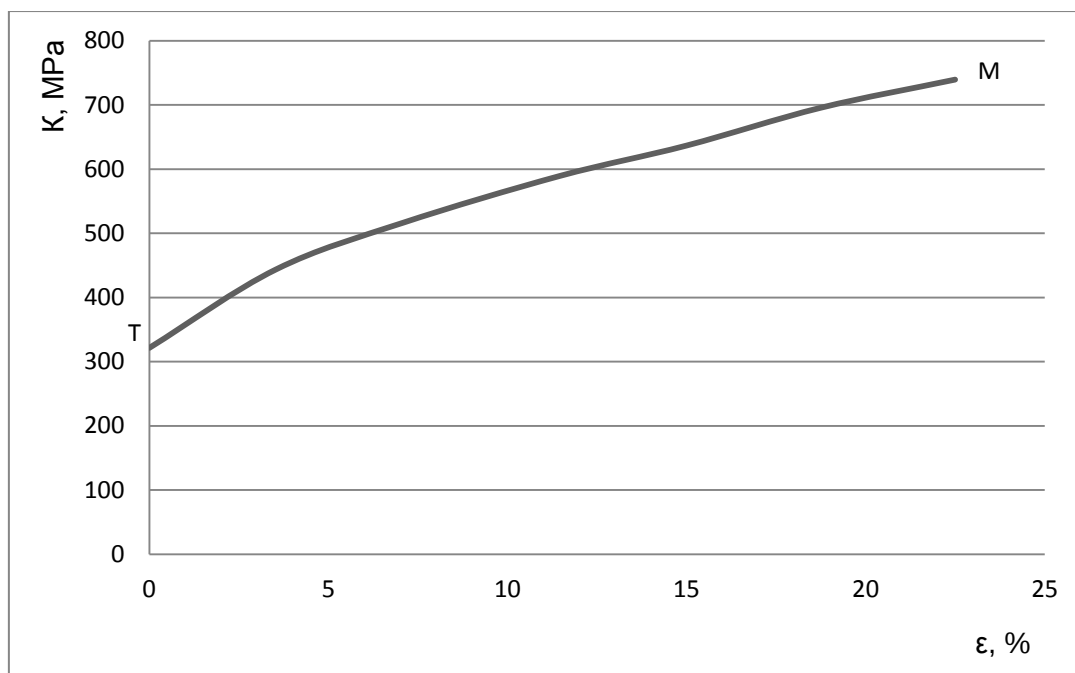
Слика 7.5 Изглед дијаграма затезања за аустенитни нерђајући челик X5CrNi18 9(10)

Уз претходно приказан дијаграм затезања, добијене су и вредности напонских карактеристика, као и карактеристике деформација. $R_{p0.2}$ и R_m које представљају вредности напона на граници течења и затезне чврстоће, респективно. A_g и A се односе на процентуална издужења епрувете у тренутку достизања максималне силе и у тренутку кидања, односно разарања епрувете. Ове вредности дате су табелом 7.1. У табели су такође изложене и неке од почетних димензија епрувете, односно димензија пре појаве било каквог вида деформација. S_0 представља вредност површине попречног пресека епрувете, док се L_0 односи на почетну дужину епрувете, односно њену дужину пре извођења деформационог процеса. Ове вредности су од значаја за даљи прорачун који је остварен експериментом, у циљу добијања криве течења за испитивани материјал.

Табела 7.1 Основне карактеристике аустенитног нерђајућег челика X5CrNi18 9(10)

Ознаке величина	S_0, mm^2	L_0, mm	$R_{p0.2}, \frac{N}{mm^2}$	$R_m, \frac{N}{mm^2}$	$A_g, \%$	$A, \%$
Вредности	14.00	120.00	317.03	604.53	22.56	24.56

После извршеног прорачуна главних показатеља деформација, као и вредности напона течења, на основу претходног дијаграма, посредством поступка изложеног у поглављу 6.2.2, добијен је изглед криве течења, односно криве ојачања за челик X5CrNi18 9(10). Изглед ове криве приказан је на слици 7.6.



Слика 7.6 Изглед експерименталне криве течења (ојачања) за челик X5CrNi18 9(10)

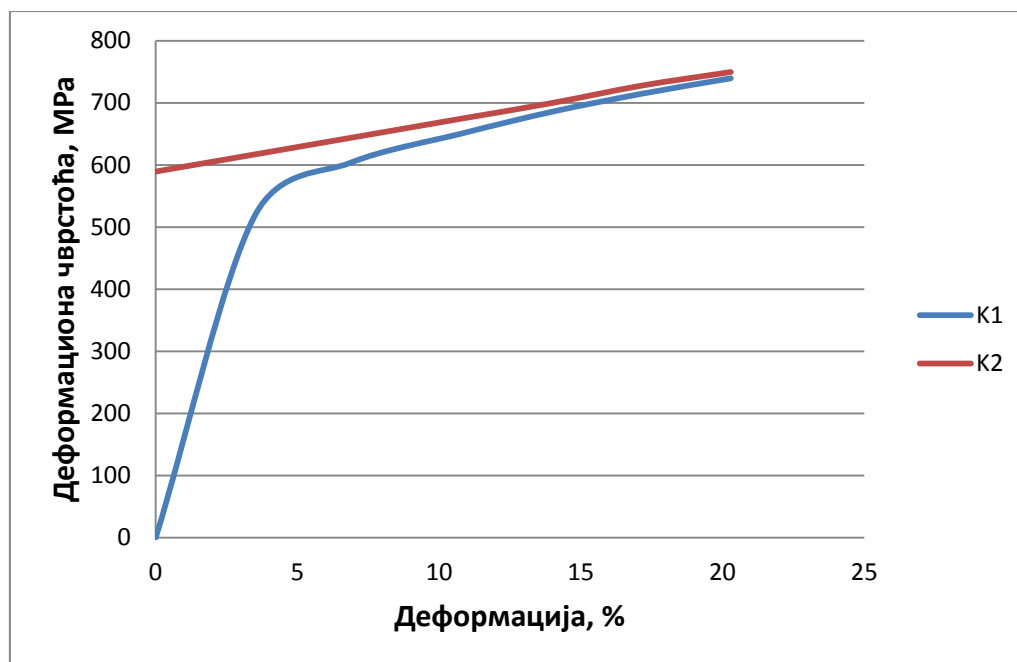
Са криве течења може се уочити карактер и интензитет ојачања, односно промена напона течења, од почетка до краја процеса деформисања. Укупна промена интензитета деформационог отпора је око 400 МПа, што значи да је сразмерно са растом овог напона морала расти и деформацион сила, односно сила истезања.

На основу добијених вредности, преко израза 6.7 и 6.9, помоћу израза за природну, односно логаритамску деформацију, добијене су аналитичке апроксимација ове криве. Добијене вредности за једну експоненцијалну и једну линеарну функцију, дате су респективно изразима 7.1 и 7.2.

$$K_1 = 1021.94 \cdot \varphi^{0.2029} \quad (7.1)$$

$$K_2 = 589.355 + 739.374 \cdot \varphi \quad (7.2)$$

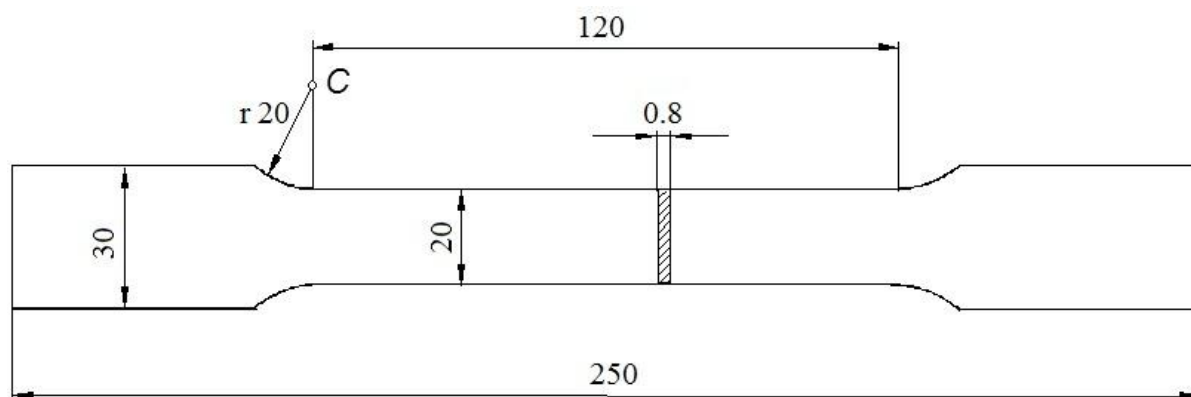
На слици 7.7 дат је графички приказ аналитичких апроксимација криве ојачавања, представљених преко функција 7.1 и 7.2.



Слика 7.7 Графички приказ аналитичких апроксимација (7.1 и 7.2) криве ојачавања

На претходној слици, могу се видети функције 7.1 и 7.2, представљене кривама K_1 и K_2 . Раније је већ споменуто да се помоћу ових функција може приближно одредити реалан изглед кривих ојачавања. Поред тога, предност аналитичких апроксимација кривих, огледа се кроз непостојање ограничења по питању величине деформације. Међутим, лоша особина оваквих кривих увиђа се у незнатном одступању од реалног изгледа криве ојачавања, што у неким случајевима може представљати проблем.

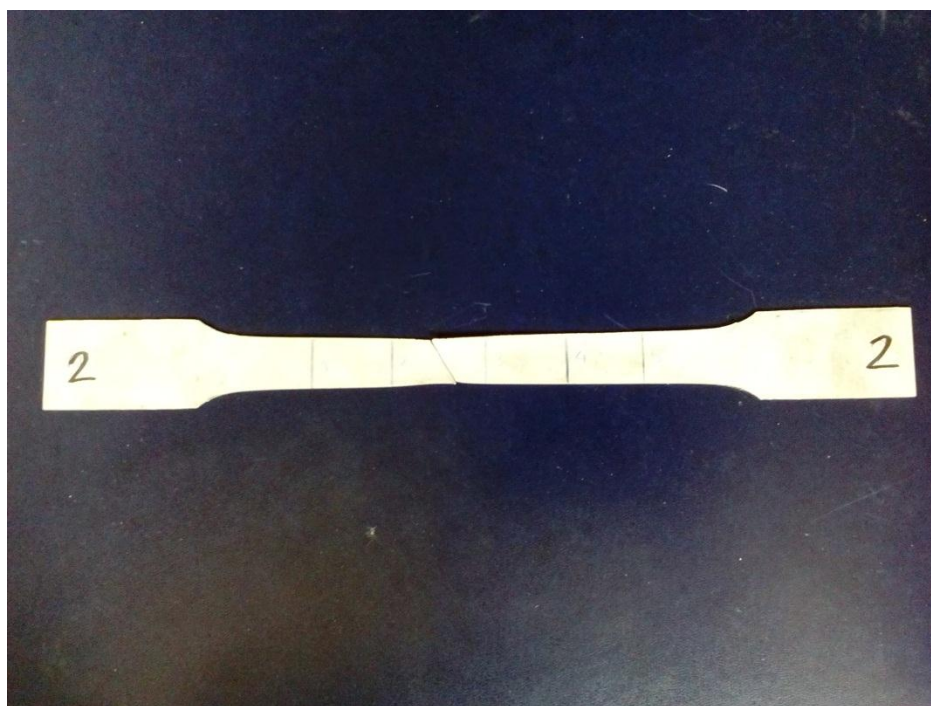
Други део експеримента обухвата испитивање другог материјала, челичног лима ознаке Č0148 (DC 04 ZE). У питању је једнострано електрохемијски поцинкован нискоугљенични челични хладно ваљани лим намењен процесима дубоког извлачења. Одликује га веома повољна деформабилност и корозиона отпорност са поцинковане стране. Изглед и димензије епрувета дате су схемом са слике 7.8.



Слика 7.8 Изглед и димензије епрувете од челика Č0148 (DC 04 ZE)

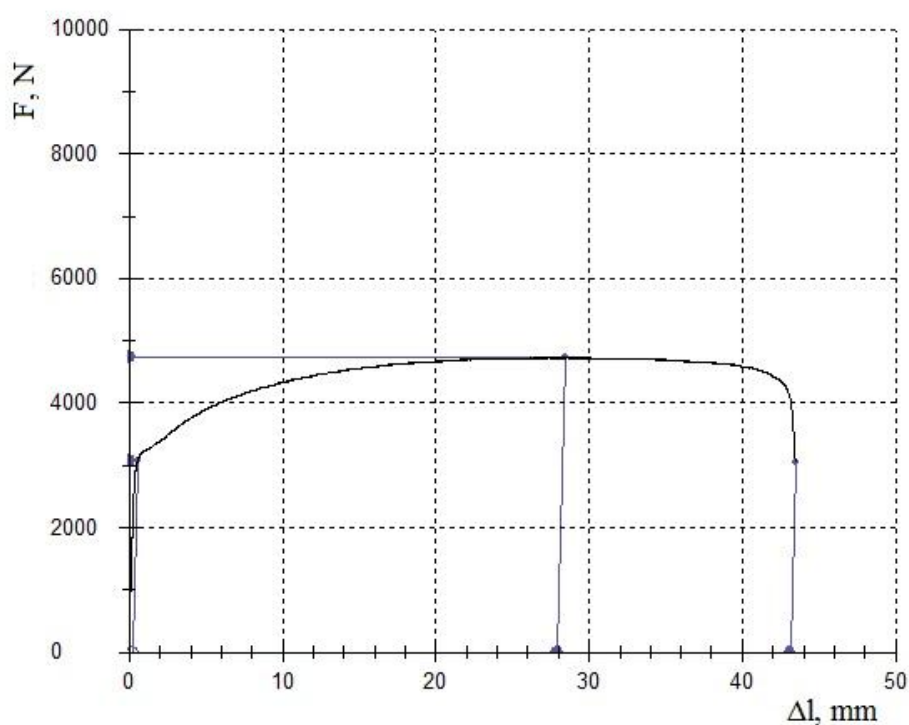
Реалан изглед епрувете после разарања дат је на слици 7.9. Са слике се може уочити да је до кидања лима дошло приближно на средини епрувете, па се резултати експеримента без грешке могу узети као меродавни. Угао лома зависи од равни

клизања метала, при чему се може видети да је дошло до видљивог сужења попречног пресека. Поред тога, примећено је и издужење епрувете видљиво на дијаграмима затезања.



Слика 7.9 Реалан изглед епрувете од челика ознаке Č0148 (DC 04 ZE) после лома

Дијаграм затезања за челик Č0148 (DC 04 ZE), дат је сликом 7.10, док је крива течења добијена после прорачуна заснованом на истом принципу као и при првом делу експеримента, представљена сликом 7.11.

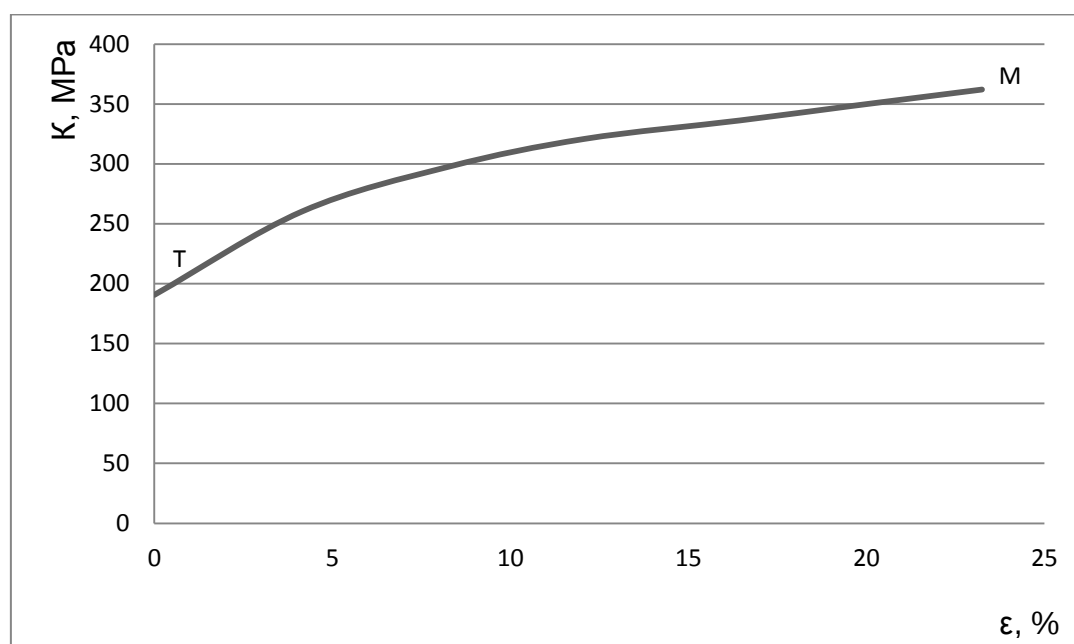


Слика 7.10 Дијаграм затезања за челик Č0148 (DC 04 ZE)

Поред дијаграма, као и код претходног случаја, добијене су вредности напонских карактеристика, као и карактеристике деформација. Ове вредности су дате табелом 7.2.

Табела 7.2 Основне карактеристике челика ознаке Č0148 (DC 04 ZE)

Ознаке величина	S_0, mm^2	L_0, mm	$R_{p0.2}, \frac{N}{mm^2}$	$R_m, \frac{N}{mm^2}$	$A_g, \%$	$A, \%$
Вредности	16.00	120.00	192.32	295.58	23.29	35.97



Слика 7.11 Експериментална крива ојачања за челик DC 04 ZE

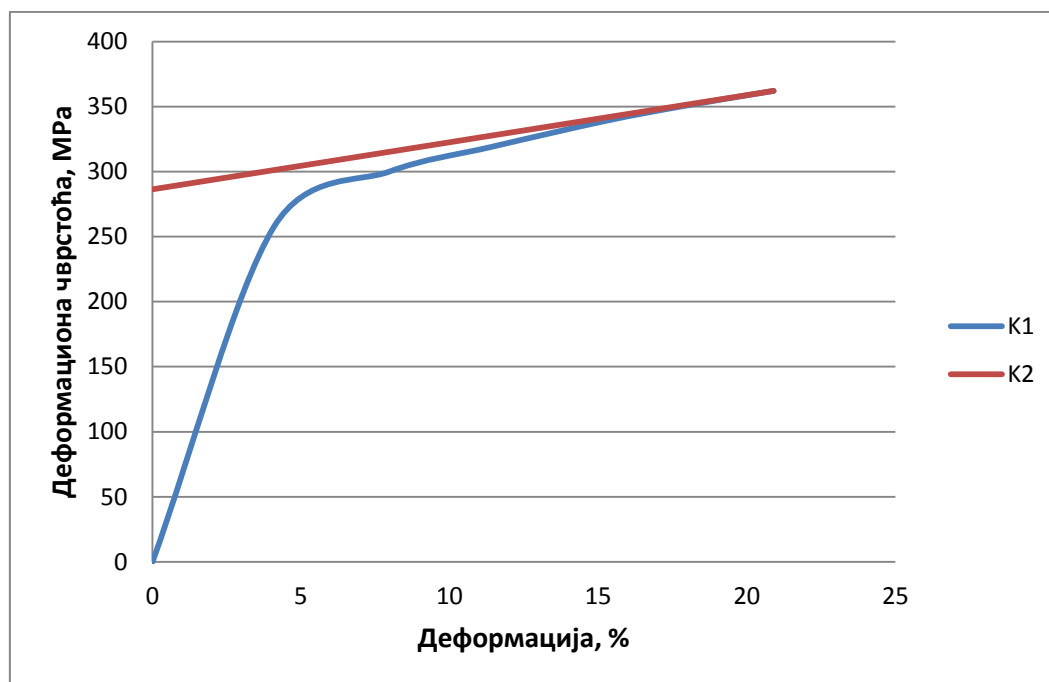
Поређењем кривих 7.6 и 7.11, може се уочити већи нагиб криве 7.6, што нам говори да је код нерђајућег челика ознаке X5CrNi18 9(10) наступило по интензитету веће ојачање материјала него код нискоугљеничног челичног лима са превлаком Č0148 (DC 04 ZE). Интензивније ојачавање свакако доприноси отпорности материјала према локализованом деформисању што је врло повољно са аспекта деформабилности. Међутим, дупло већи интензитет затезне чврстоће (као и деформационог отпора) упућује на тешкоће због потребе деловања знатно већим деформационим силама при конкретном обликовању.

Посредством истих израза као и при првом делу експеримента, добијене су две апроксимације криве ојачања. Једна експоненцијална и једна линеарни функција, дате су респективно изразима 7.3 и 7.4.

$$K_1 = 502.185 \cdot \varphi^{0.209} \quad (7.3)$$

$$K_2 = 286.378 + 362.046 \cdot \varphi \quad (7.4)$$

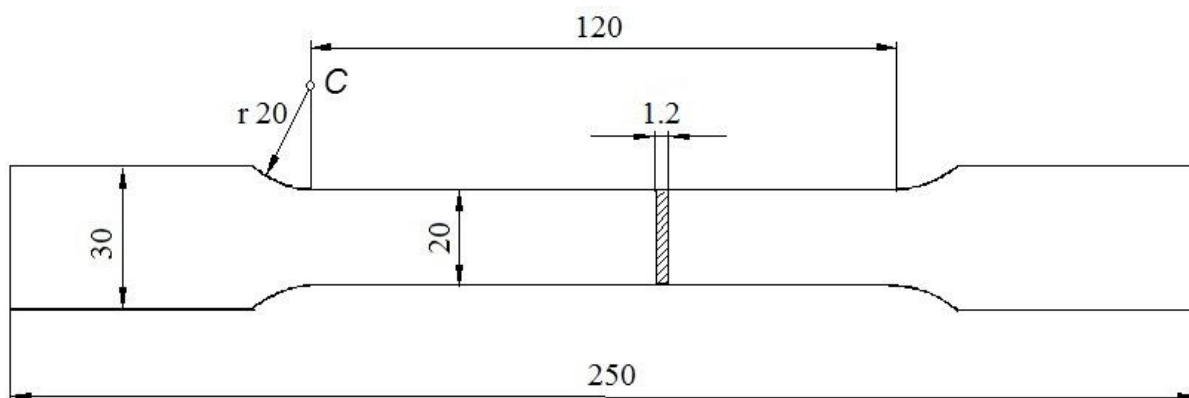
Графички приказ ових функција дат је на слици 7.12. Функције 7.3 и 7.4, представљене су кривама K_1 и K_2 , респективно.



Слика 7.12 Графички приказ аналитичких апроксимација (7.3 и 7.4) криве ојачавања

Ток кривих 7.3 и 7.4 сличан је као код кривих 7.1 и 7.2, али у складу са стварним изгледном криве ојачавања за овај материјал. Као и у првом случају уочене су предности и проблеми исте врсте, када је у питању поређење са стварним изгледом кривих.

Трећи део експеримента састојао се из испитивања челика Č0148 (DC 04), који у овом случају није био једнострано поцинкован, што се може видети из његове ознаке. Друга разлика је била у томе што су неке од димензија епрувете биле различите него код претходног случаја. Изглед и димензије епрувете у почетном (недеформисаном) стању, дате су схематским приказом на слици 7.13.



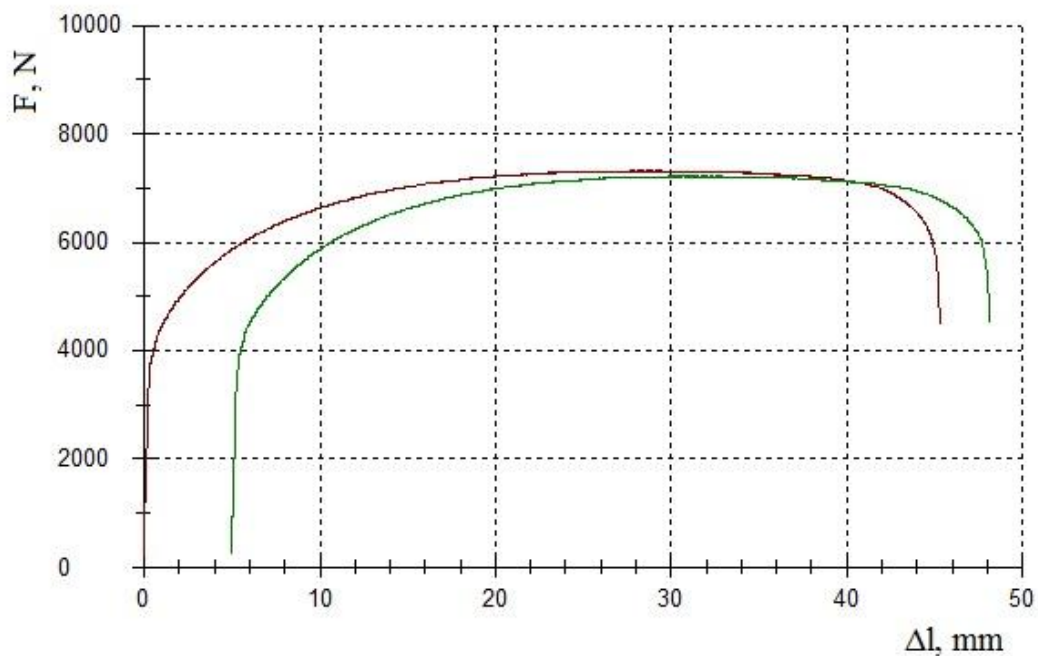
Слика 7.13 Изглед и димензије епрувете од челика Č0148 (DC 04)

У овом случају, испитивању су изложена два узорка готово истих геометријских, механичких, хемијских и осталих карактеристика. На слици 7.14 дат је реалан изглед ових узорака после изведеног испитивања.

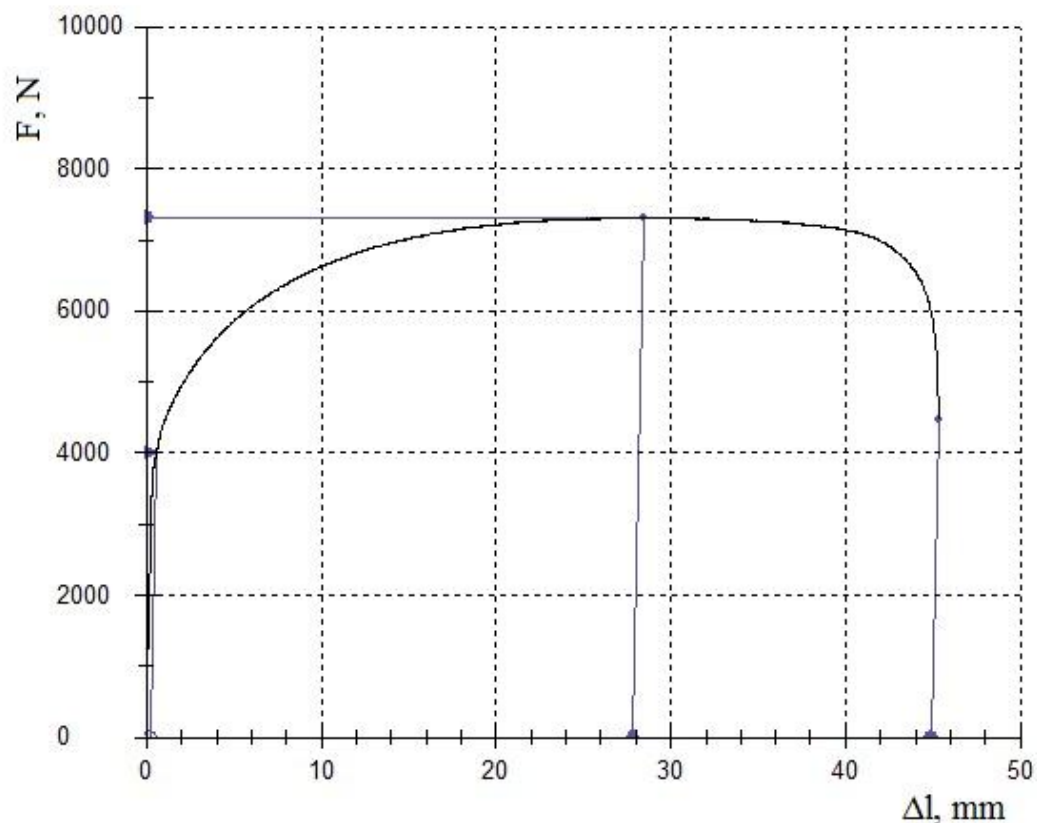


Слика 7.14 Реалан изглед епрувета од челика ознаке Č0148 (DC 04)

После изведеног испитивања добијен је дијаграм затезања, као и код претходних случајева. Дијаграми који су добијени за обе епрувете, приказани су на слици 7.15, после чега је сликом 7.16 посебно приказан дијаграм за прву епрувету, односно дијаграм који је коришћен за даљи прорачун, одређивање криве ојачавања, као и апроксимација кривих.



Слика 7.15 Дијаграми затезања за оба узорка од челика ознаке Č0148 (DC 04)



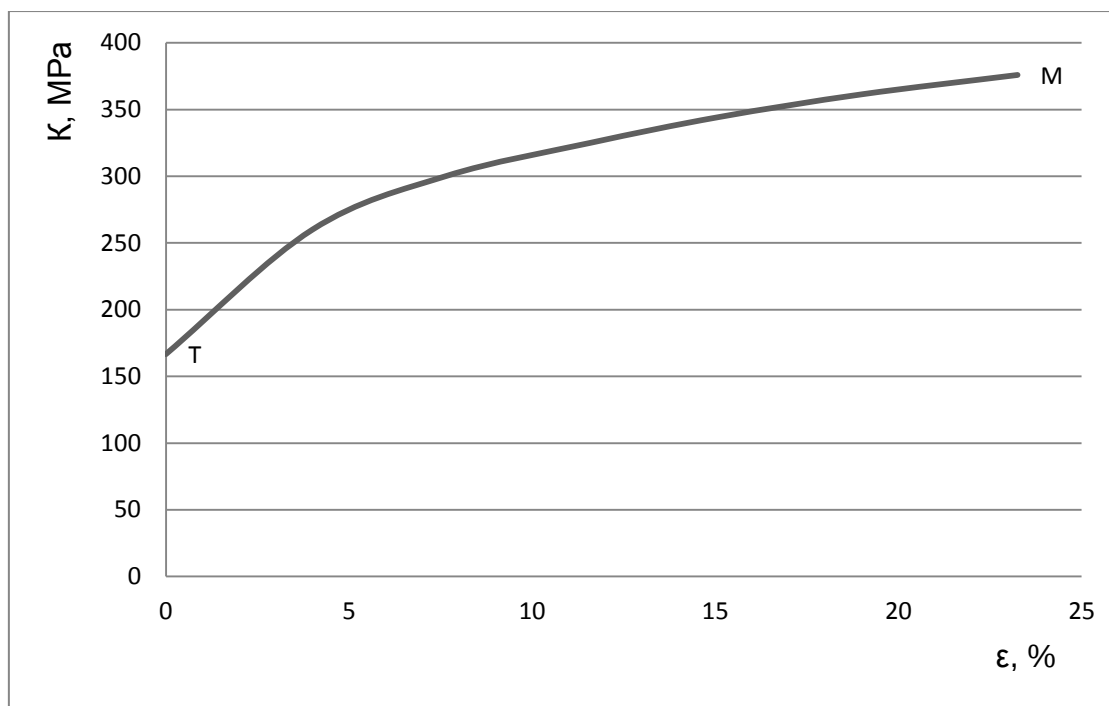
Слика 7.16 Дијаграм затезања за први узорак од челика Č0148 (DC 04)

Поред дијаграма, као и код претходних случајева, добијене су вредности напонских карактеристика, као и карактеристике деформација, које су изложене у табели 7.3 за оба испитана узорка.

Табела 7.3 Основне величине испитиваних узорака од челика Č0148 (DC 04)

Ознаке величина	бр. еп.	S_0, mm^2	L_0, mm	$R_{p0.2}, \frac{N}{\text{mm}^2}$	$R_m, \frac{N}{\text{mm}^2}$	$A_g, \%$	$A, \%$
Вредности	1	24.00	120.00	166.71	304.85	23.23	37.49
	2	24.00	120.00	168.75	300.73	21.53	35.70

После изведеног прорачуна добијен је изглед криве ојачавања која је дијаграмски приказана сликом 7.17.



Слика 7.17 Експериментална крива ојачавања челика Č0148 (DC 04)

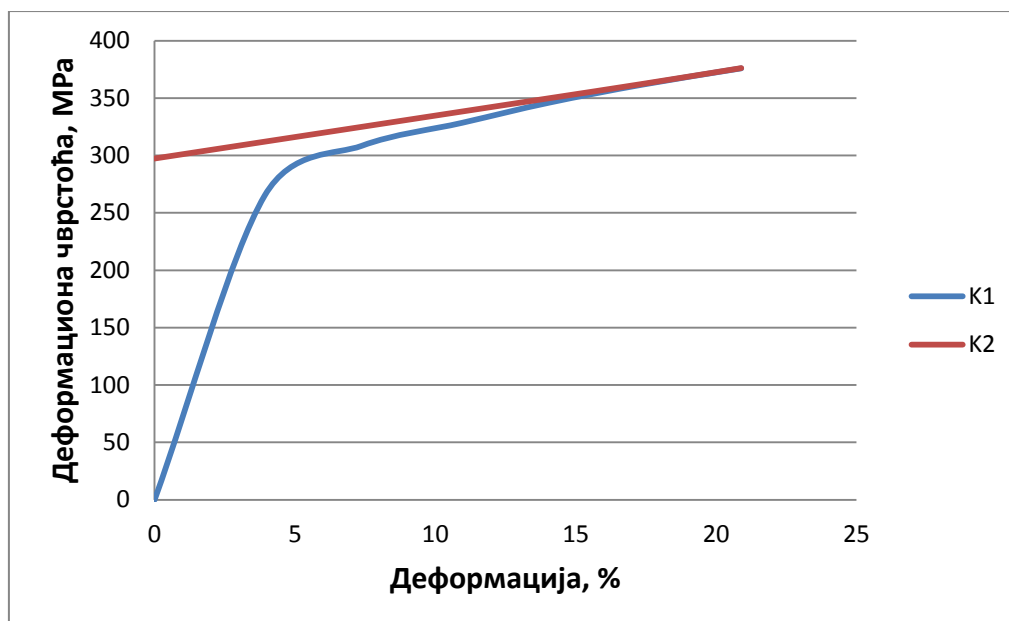
Код ове криве уочено је ојачавање материјала слично лиму са превлаком. То нам, као и у претходним случајевима говори о деформабилности челика са аспекта феномена ојачавања. Може се закључити да превлака од електролитичког цинка нимало не утиче на карактеристике ојачања материјала.

Преко истих израза као и код претходних делова експеримента, добијене су две апроксимације криве ојачања. Једна експоненцијална и једна линеарни функција, дате су респективно изразима 7.5 и 7.6.

$$K_1 = 521.409 \cdot \varphi^{0.209} \quad (7.5)$$

$$K_2 = 297.345 + 375.91 \cdot \varphi \quad (7.6)$$

На слици 7.18 дат је графички приказа аналитичких апроксимација 7.5 и 7.6, као и у претходним случајевима. Оне су респективно приказане кривама K_1 и K_2 .



Слика 7.17 Графички приказ аналитичких апроксимација (7.5 и 7.6) криве ојачавања

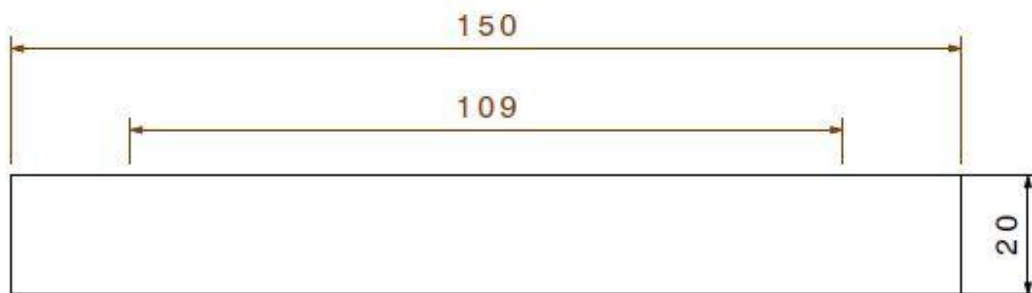
Као и у претходним случајевима, криве прате реалан изглед криве ојачавања за овај материјал.

Четврти део експеримента заснован је на испитивању узорака од алуминијумске легуре ознаке AlMg4.5Mn0.7. У питању је лака легура повољне корозионе отпорности. Поред тога, може бити значајно ојачана обликовањем на хладно, па се као таква често користи у индустрији. Легура је густине $2.66 \frac{g}{cm^3}$, температуре топљења $574 \text{ }^{\circ}C$, модула еластичности $71 \cdot 10^3 \text{ MPa}$, док је њен хемијски састав процентуално дат табелом 7.4.

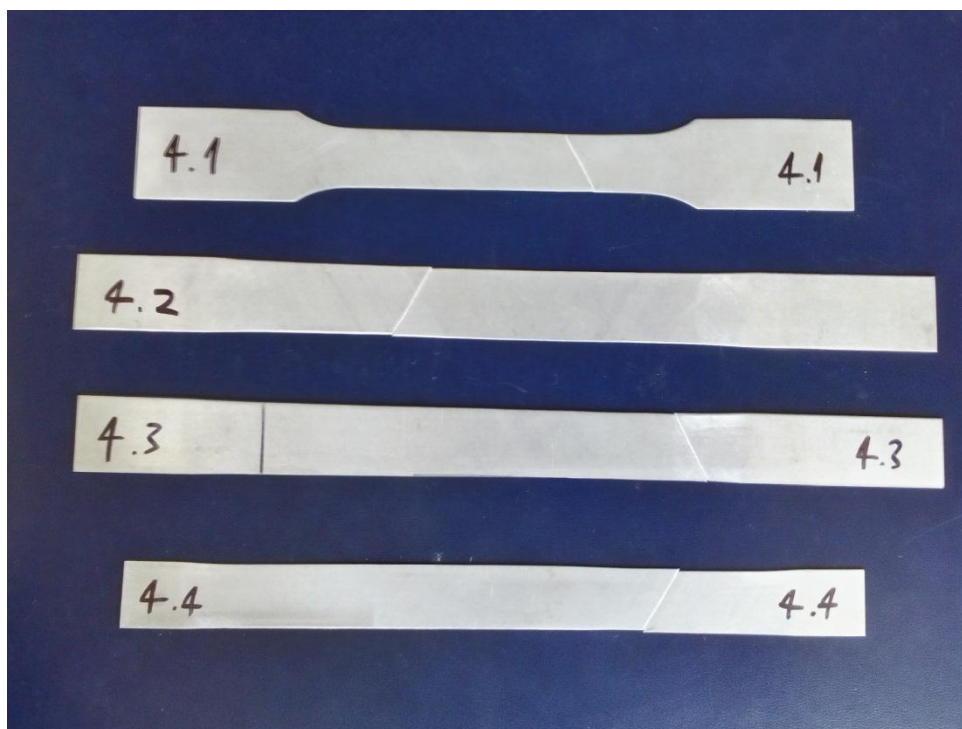
Табела 7.4 Хемијски састав алуминијумске легуре AlMg4.5Mn0.7

Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Be	Mg	Zn	Остали	Al
0.4	0.4	0.5-1	0.05-0.25	0.15	0.1	0.0005	4.3-5.2	0.25	0.15 (до 0.5 сваки)	Остало

Испитиване су четири епрувете различитих дебљина. Као и код претходних случајева, крива затезања и основне особине узорака, добијени су рачунарским путем. За даљи прорачун узета је четврта епрувета, дебљине 0.8 mm. Димензије и изглед епрувете дати су сликом 7.18, док је реалан изглед ове четири епрувете, после разарања, приказан на слици 7.19.

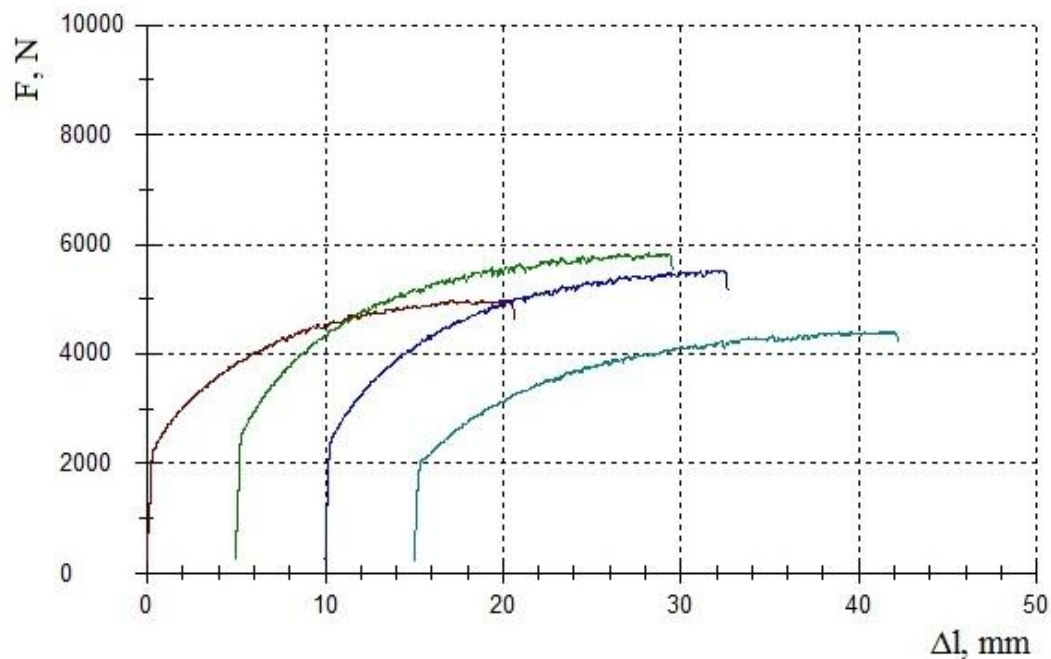


Слика 7.18 Изглед и димензије епрувете од алуминијумске легуре $AlMg4.5Mn0.7$

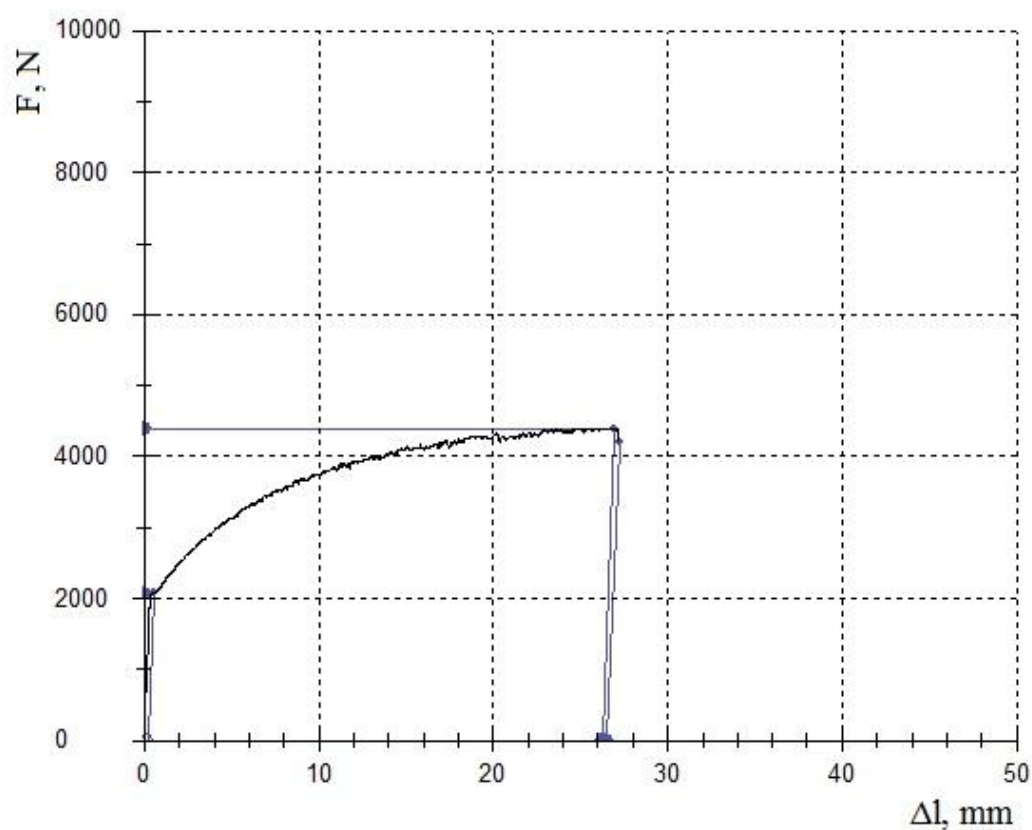


Слика 7.19 Реалан изглед алуминијумских епрувета после разарања

Дијаграми затезања за сва четири узорка, добијени софтверским путем, приказани су на слици 7.20. На овим дијаграмима, могу се уочити локални дисконтинуитети кривих, што је евидентна разлика у односу на дијаграме добијене после испитивања челика. До дисконтинуитета долази због својстава материјала (локалног попуштања структуре). Такође је уочен и другачији звук који се манифестује при затезању узорака. На слици 7.21 дат је дијаграм затезања за узорак број четири, који је коришћен за даљи прорачун и налажење криве ојачавања, као и апроксимационих функција.



Слика 7.20 Дијаграми затезања за четири алуминијумска узорка



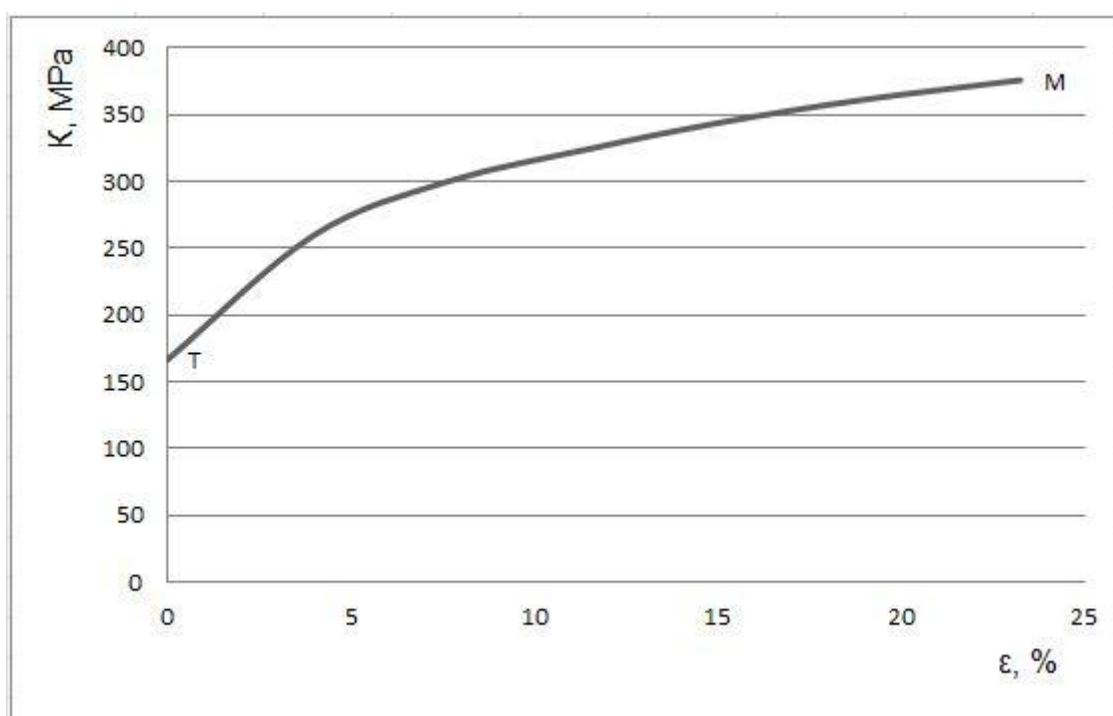
Слика 7.21 Крива затезања алуминијумске легуре AlMg4.5Mn0.7

Поред претходно наведених дијаграма, софтверским путем су добијене и основне вредности напонских карактеристика, као и карактеристике деформација. Ове вредности дате су табелом 7.5.

Табела 7.5 Основне карактеристике алуминијумских узорака

Ознаке величина	бр. еп.	S_0, mm^2	L_0, mm	$R_{p0.2}, \frac{N}{mm^2}$	$R_m, \frac{N}{mm^2}$	$A_g, \%$	$A, \%$
Вредности	1	18.00	85.00	130.84	276.71	18.82	23.53
	2	21.60	109.00	122.68	273.148	20.71	22.01
	3	20.34	109.00	123.51	272.09	19.53	20.22
	4	16	109.00	129.86	274.08	24.37	24.37

После прорачуна се добија крива течења (ојачања) приказана сликом 7.22. Са криве се може уочити да је дошло до знатног ојачавања материјала, са приближно 160 МПа, на преко 300 МПа. Ово је веома важна карактеристика алуминијумских легура, јер представља један од мањег броја начина на који се карактеристике легуре директно могу побољшати током поступака примарне прераде. Са аспекта деформабилности одређивање кривих течења није довољно за потпуну процену. Треба одредити и друге карактеристике, пре свега коефицијент нормалне анизотропије.



Слика 7.22 Крива ојачавања алуминијумске легуре AlMg4.5Mn0.7

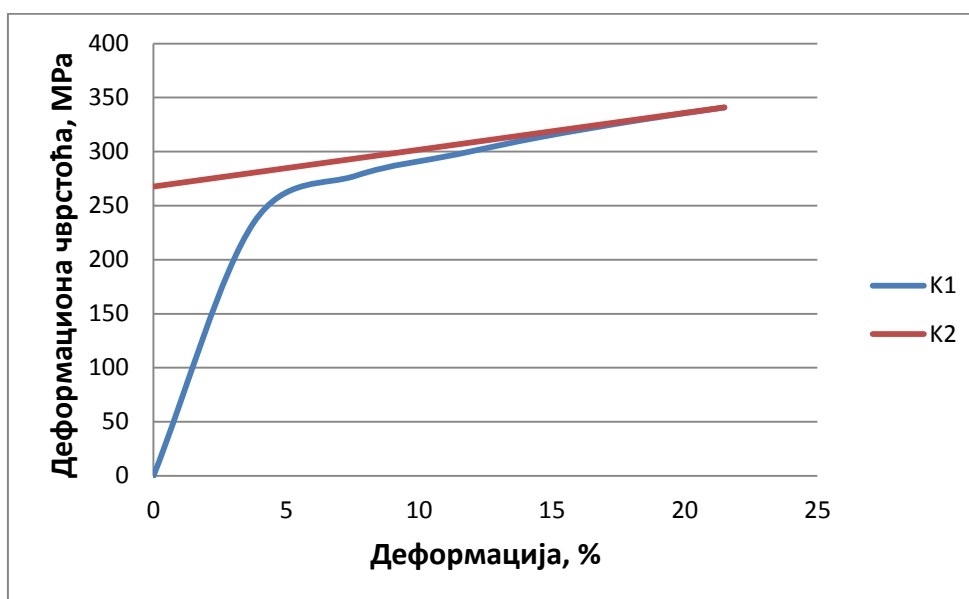
Интензитет ојачавања алуминијумске легуре AlMg4.5Mn0.7, приказан је, као и у претходним случајевима, нагибом криве ојачавања са претходне слике. При деформисању ове легуре, примећен је интересантан звучни феномен, као и локални дисконтинуитети криве затезања, који су присутни управо код алуминијума и његових легура.

Посредством истих израза као и код претходних делова експеримента, добијене су две апроксимације криве ојачања. Једна експоненцијална и једна линеарна функција, дате су респективно изразима 7.7 и 7.8.

$$K_1 = 474.238 \cdot \varphi^{0.215} \quad (7.7)$$

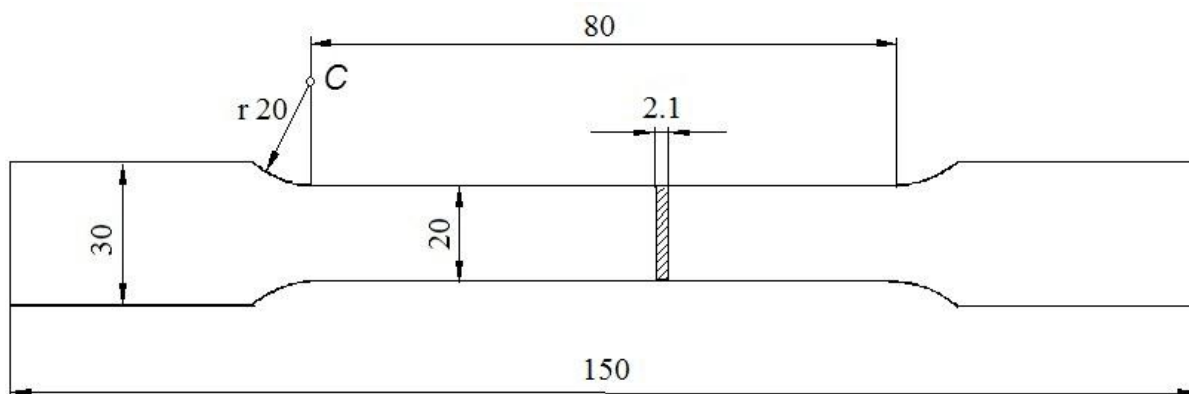
$$K_2 = 267.667 + 340.835 \cdot \varphi \quad (7.8)$$

На слици 7.23 дат је графички приказ израза 7.7 и 7.8, које аналитичким путем приказују ток криве ојачавања ове алуминијумске легуре.



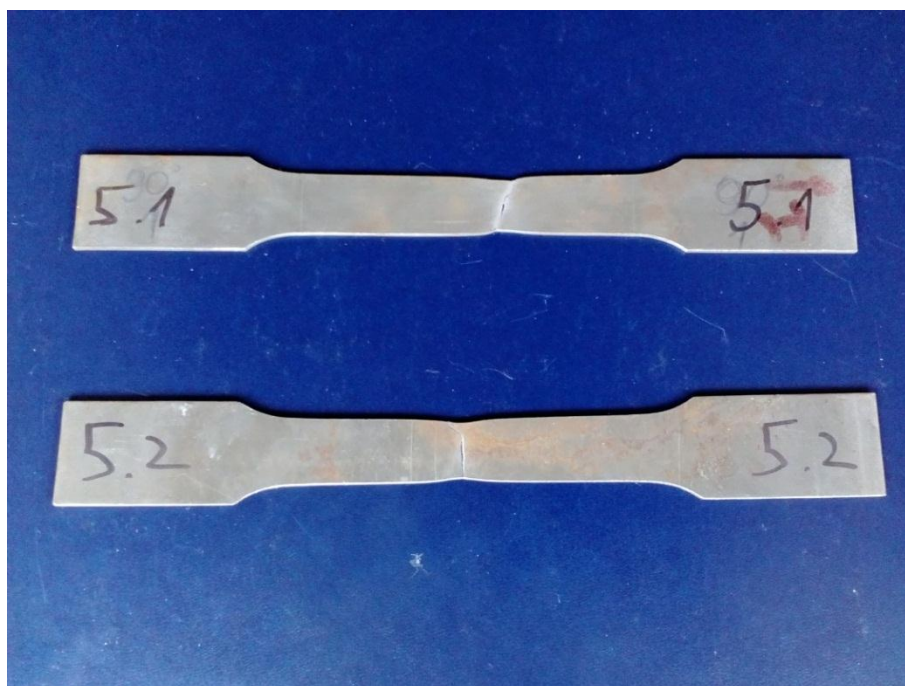
Слика 7.23 Графички приказ аналитичких апроксимација (7.7 и 7.8) криве ојачавања

Пети и последњи део експеримента састојао се из испитивања два узорка неумишеног челика непознатог хемијског састава, који је изложен природном старењу. Димензије и облик епрувете, приказани су схематски сликом 7.24. Реч је о лиму дебљине 2.1 mm.



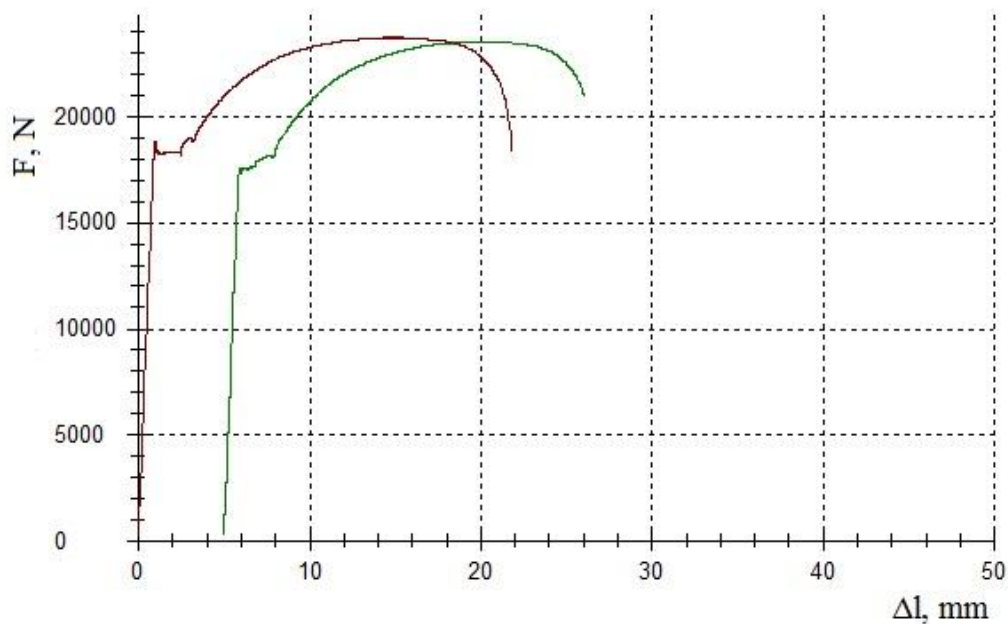
Слика 7.24 Облик и димензије челичне епрувете

Реалан изглед испитиваних узорака после разарања приказан је сликом 7.25. Са слике је уочљиво да је дошло до приметног сужења попречног пресека у околини лома епрувете, што нам говори да овај челик поседује солидне особине жилавости.



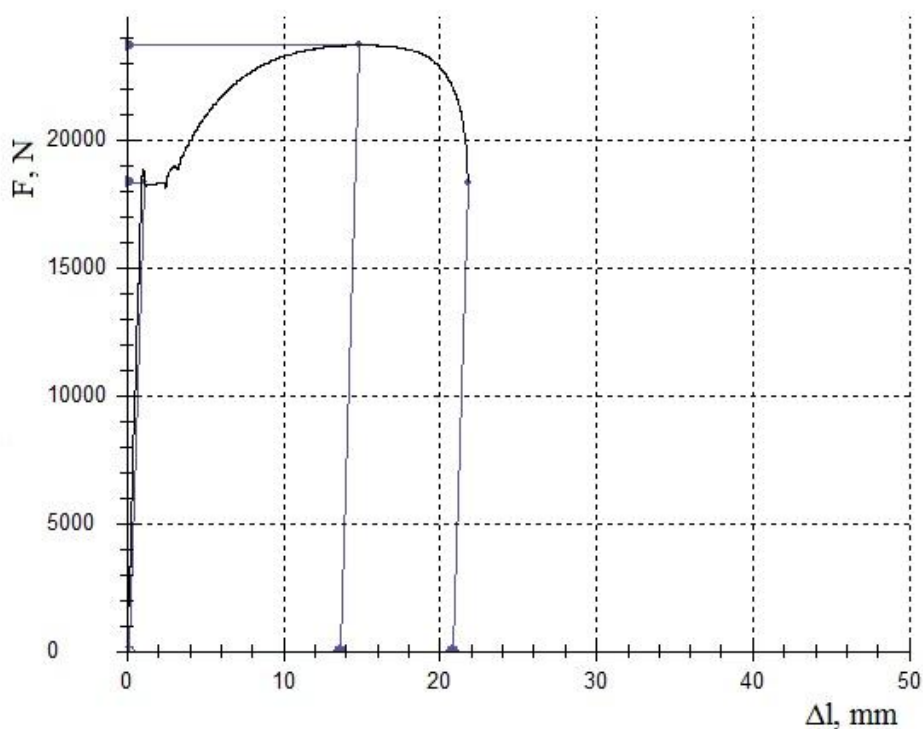
Слика 7.25 Реалан изглед челичних епрувета после лома

Софтверским путем добијени су дијаграми затезања за оба узорка, ови дијаграми приказани су на слици 7.26. На дијаграмима се може приметити изразита зона дисконтинуитета криве затезања при преласку из подручија еластичних, у подручије пластичних деформација, што управо представља један од показатеља да је дошло до процеса старења материјала.



Слика 7.26 Дијаграми затезања за оба челична узорка

На слици 7.27, приказан је дијаграм затезања првог узорка, који је коришћен за прорачун у даљем току експеримента.



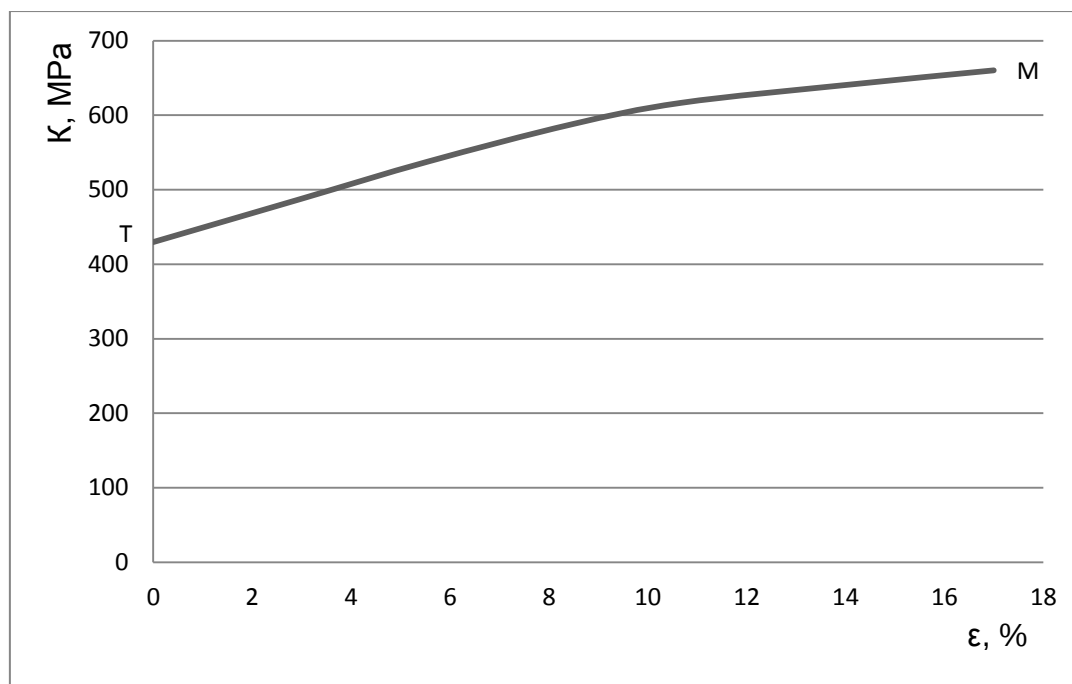
Слика 7.27 Дијаграм затезања првог челичног узорка

Као и до сада, софтверски су добијене основне напонске карактеристике, као и карактеристике деформација. Ове вредности су дате у табели 7.6.

Табела 7.6 Основне величине испитиваних челичних узорка од неумиреног челика

Ознаке величина	бр. еп.	S_0, mm^2	L_0, mm	$R_{p0.2}, \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$R_m, \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$A_g, \%$	$A, \%$
Вредности	1	42.00	80.00	437.08	564.70	17.02	26.05
	2	42.00	80.00	417.30	560.70	17.43	24.99

После прорачуна, добијена је крива ојачања за овај челик. Ова крива је приказана на слици 7.28.



Слика 7.28 Експериментална крива ојачавања неумиреног челика

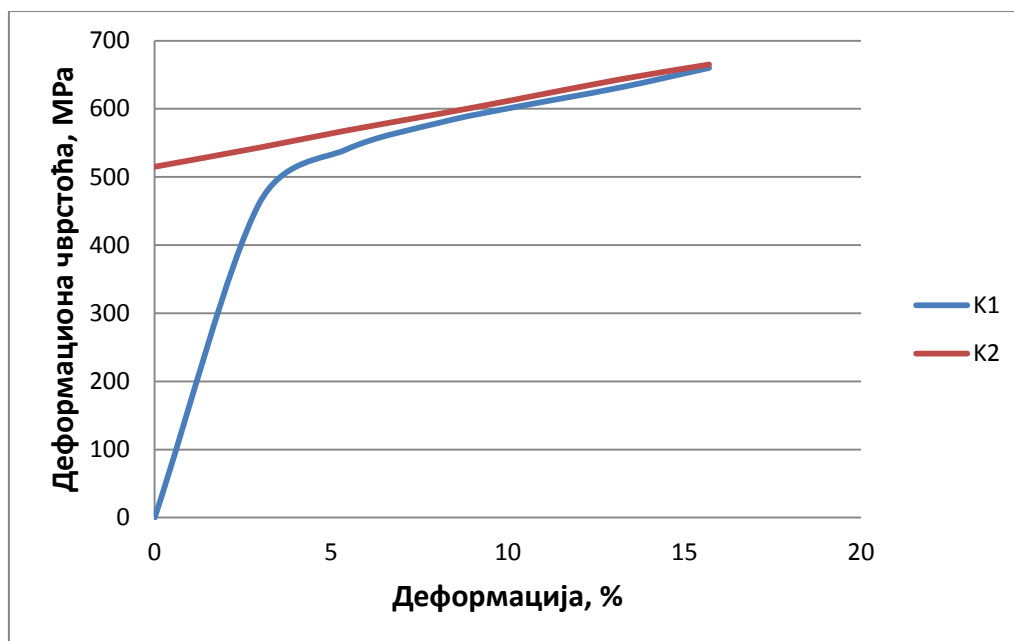
Са слике 7.28 види се да је интензитет ојачавања неумиреног челика знатно мањи него код претходних материјала. На основу интензитета границе течења, затезне чврстоће, као и деформационог отпора, може се закључити да је реч о материјалу повишене чврстоће. Показатељи деформација у таб. 7.6 показују нешто слабије особине пластичности.

На основу истих израза као и код претходних делова експеримента, добијене су две апроксимације криве ојачања. Једна експоненцијална и једна линеарна функција, дате су респективно изразима 7.9 и 7.10.

$$K_1 = 885.316 \cdot \varphi^{0.1602} \quad (7.9)$$

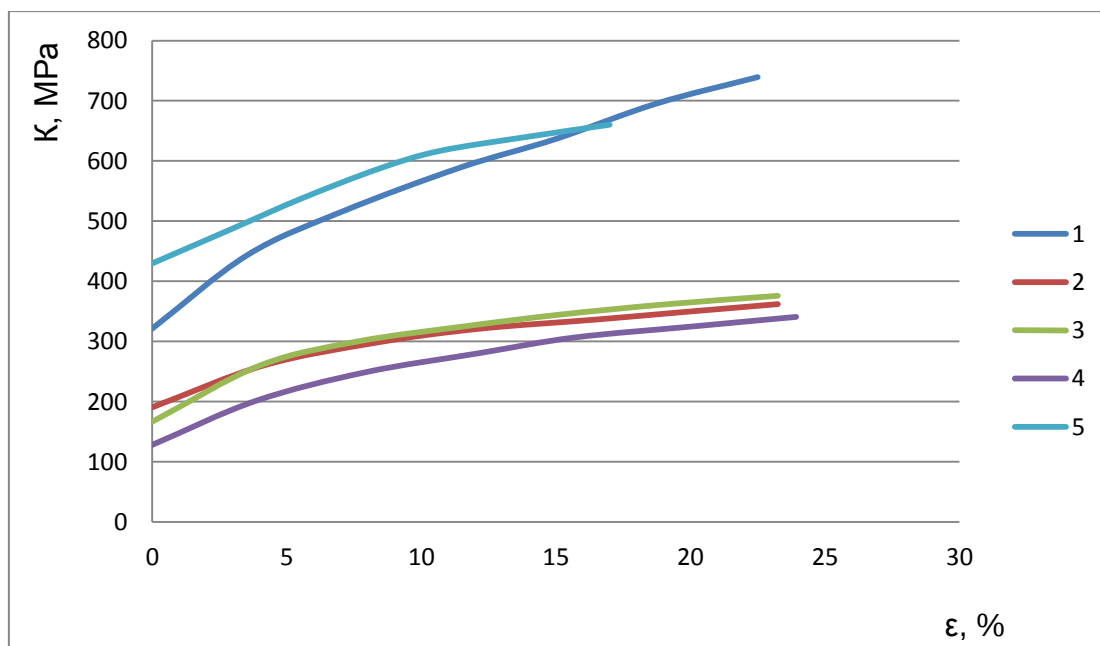
$$K_2 = 554.447 + 660.213 \cdot \varphi \quad (7.10)$$

На слици 7.29 дат је графички приказ претходних израза који представљају, као и у претходним случајевима, аналитичке апроксимације криве ојачања за испитивани материјал. У овом случају односе се на неумируени челик и његово ојачавање у току деформационог процеса.



Слика 7.29 Графички приказ аналитичких апроксимација (7.9 и 7.10) криве ојачавања

У циљу лакшег упоређивања кривих ојачавања добијених у претходни пет целина овог експеримента, дат је дијаграм (слика 7.30) са свим претходно добијеним кривама, које су обележене различитим бојама због лакшег препознавања.



Слика 7.30 Упоредне вредности и изглед свих пет кривих ојачавања добијених у току целокупног експеримента

Изглед кривих ојачавања зависи, пре свега од врсте и својстава материјала, али и од брзине деформисања, односно брзине простирања деформације, као и од других фактора (анизотропија материјала, стања материјала, и др.) Код поступка добијања кривих ојачавања једноосним затезањем, остали утицајни фактори су пажљиво контролисани, па се може сматрати да добијене криве ојачавања представљају искључиво својство материјала.

Са дијаграма се може уочити да различити положаји и облици крвих ојачавања зависе од материјала епрувете, што нам показује који материјал се до које мере може деформисати у одговарајућим деформационим условима. Поред тога, види се да криве 1 и 5, које се односе на нерђајући челик X5CrNi18 9(10) и неумирени челик, имају приметно веће вредности K_T и K_M , док криве 2, 3 и 4 које се односе на материјале из одговарајућих делова експеримента поседују знатно мање вредности деформационих чврстоћа у овим тачкама. Такође, примећено је да код споменутог нерђајућег челика долази до највећег процентуалног ојачавања, пре локализације, односно лома епрувете. То значи да овај материјал поседује веома повољна својства деформационог ојачања.

8. ЗАКЉУЧАК

Технологија пластичног обликовања метала незаобилазна је при остваривању великог броја високо-продуктивних индустријских процеса. Ову врсту обраде карактерише то да се мења облик почетног комада, али да при том нема промене запремине, као ни нарушавања структуре, уз побољшавање механичких карактеристика материјала. Како би се целокупан процес пластичног обликовања прецизно одредио и разумео, потребно је добро познавати напонско и деформационо стање дела који се обликује, како претходно тако и оно које настаје у току обликовања конкретног комада.

Појам деформабилност, који се односи само на област пластичних деформација, представља се преко показатеља, као што су: дијаграми, показатељи хомогености деформисања, анизотропије материјала, параметри деформабилности, тестови деформабилности, деформационо ојачавање и др. Деформабилност зависи, пре свега, од материјала (хемијски састав, микроструктура, облик и распоред кристалних зрна, оријентација кристалне решетке и тсл.), али и других утицаја, као што су: претходна механичка и термичка обрада, брзина деформисања и брзина деформације, температура на којој се процес обликовања изводи итд. Својство деформабилности металних материјала је значајно, јер игра веома важну улогу при правилном пројектовању и остваривању поступака пластичног обликовања метала.

Феномен деформационог ојачавања је веома битан у свеукупном систему дефинисања деформабилности метала. Наиме, при обликовању металних материјала, долази до промене напонског стања у материјалу, па са тим и пораста потребне силе деформисања, што са собом повлачи и веће оптерећење алата и машине. Из тог разлога, веома је битно правилно одредити и узети у обзир утицај овог феномена на својства деформабилности, као и процес деформисања уопште.

У првом, општем, делу рада показано је да феномен ојачавања код металних материјала зависи, пре свега, од врсте материјала, његове структуре и стања. Знатан утицај показује температура, брзина и степен деформације. Најбољи начин непосредног изражавања деформационог ојачавања је преко експериментално одређених кривих ојачања (течења). Посебан значај имају аналитичке апроксимације кривих течења, нарочито у компјутерским софтверима за симулацију процеса пластичног деформисања.

У експерименталном делу рада за испитивање карактеристика ојачавања одабран је поступак једноосног затезања због своје једноставности, тачности и широке примене. Испитана је серија узорака лимова од пет различитих материјала: нерђајућег аустенитног челика, нискоугљеничног челика са и без превлаке, алуминијумске легуре и лима од челика повишене чврстоће. Одабрани експериментални метод је показао све предности: једноставност, тачност и ефикасност. На основу добијених резултата, одређене су криве ојачавања, као и њихове апроксимације, за по један узорак од сваке врсте материјала.

Дошло се до закључка да сваки од материјала има своје позитивне и негативне карактеристике, а њихова употреба у практичним условима зависи од конкретних производних захтева. По интензитету ефекта ојачавања издвојила су се два материјала:

аустенитни нерђајући челик и челик повишене чврстоће, при чему нерђајући челик има знатно бољу укупну деформабилност. Ниво интензитета деформационог отпора као и ефекта ојачања уопште код остала три лима је нижи. Нискоугљенични челични лим показује добру деформабилност без обзира на превлаку, док лим од алуминијумске легуре има релативно слабу деформабилност без обзира на показан ефекат ојачавања.

На основу методике изложених поступка и резултата експеримента, могуће је са успехом сагледати карактеристике деформационог ојачавања код металних материјала, као једног од најважнијих феномена у понашању материјала при процесима пластичног обликовања. На крају, може се закључити да, ипак, све карактеристике деформационог ојачавања нису довољне за целокупну процену деформабилности материјала. То је могуће тек испитивањем граничне деформабилности, анизотропије материјала и специфичних параметара.

9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александровић С.: *Технологија пластичног обликовања - скрипта*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, 2011.
- [2] Јовановић, М., Лазић, В., Адамовић, Д., Ратковић, Н.: *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, 2003.
- [3] Александровић С.: *Савремени поступци пластичног обликовања, скрипта*, Moodle портал Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2014. год.
- [4] Александровић С.: *Деформабилност, циклус предавања за FIAT Automobili Srbija, 7. предавање*, септембар 2014.
- [5] Александровић С.: *Деформабилност, циклус предавања за FIAT Automobili Srbija, 8. предавање*, септембар 2014.
- [6] Александровић С.: *Деформабилност, циклус предавања за FIAT Automobili Srbija, 9. предавање*, септембар 2014.
- [7] Александровић С.: *Деформабилност, циклус предавања за FIAT Automobili Srbija, 12. предавање*, септембар 2014.
- [8] Девеџић Б.: *Основи теорије пластичног деформисања метала*, Машински факултет у Крагујевцу, 1975.
- [9] Маринковић В.: *Деформационо ојачавање материјала у процесима обраде деформисањем у хладном и топлом стању*, Машински факултет, Ниш, 1995.
- [10] Ромхањи Е.: *Механика и металургија деформације метала*, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 2001.
- [11] *Handbook of Metal Forming*, editor Kurt Lange, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, USA, 1994.
- [12] Вујовућ, В.: *Деформабилност*, Универзитет у Новом Саду, Институт за производно машинство, 1992.