

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Предраг М. Стојановић

ФЕНОМЕН ДЕФОРМАЦИОНОГ ОЈАЧАВАЊА МЕТАЛА –
ТАЧНОСТ ОДРЕЂИВАЊА КРИВИХ ТЕЧЕЊА БАКРА
ПОСТУПЦИМА САБИЈАЊА

Мастер рад

Крагујевац, 2020.

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Област: Производно машинство

Предмет: Савремени поступци пластичног обликовања

Број индекса: 451/2017

Предраг М. Стојановић

**Феномен деформационог ојачавања метала – тачност
одређивања кривих течења бакра поступцима сабијања**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Србислав Александровић, ред. проф – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

Факултет инжењерских наука

Катедра за производно машинство

Мастер рад

Предмет: **Савремени поступци пластичног обликовања**

Назив теме:

**ФЕНОМЕН ДЕФОРМАЦИОНОГ ОЈАЧАВАЊА МЕТАЛА – ТАЧНОСТ ОДРЕЂИВАЊА КРИВИХ ТЕЧЕЊА
БАКРА ПОСТУПЦИМА САБИЈАЊА**

1. Увод
2. Деформабилност
3. Деформационо ојачање
4. Експериментална испитивања
5. Закључак
6. Литература

У Крагујевцу, октобар 2020. године.

Кандидат:

Предраг Стојановић бр. инд.: 451/2017

Ментор:

Др Србислав Александровић ред. проф

Опис теме мастер рада:

У општем (уводном) делу рада кандидат треба да изложи теоријско разматрање карактеристика процеса пластичног обликовања и деформабилности (гранична деформабилност, хомогеност процеса пластичног обликовања, параметри деформабилности, деформационо ојачање итд.). Посебну пажњу треба посветити запреминским експерименталним методама испитивања феномена деформационог ојачавања.

Други део рада треба да обухвати експериментална испитивања узорак од чистог бакра. У првом делу експерименталног дела рада треба извести испитивања по методама Растегајева и Шофмана (класичан поступак и два модификована). У другом делу експеримента треба детаљно извести испитивање методом конкавних епрувета.

Коначно, треба критички упоредити добијене резултате и извести потребне закључке, посебно из аспекта шире примене методе конкавних епрувета.

Препоручена литература:

- [1] Александровић С.: Технологија пластичног обликовања метала, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, 2010.
- [2] Александровић С.: Савремени поступци пластичног обликовања, скрипта, Moodle портал Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2018. год.
- [3] Александровић С.: Деформабилност, циклус предавања за FIAT Automobili Srbija, Крагујевац, септембар 2014.

Ментор:

Крагујевац, септембар 2020. год

Др Србислав Александровић, ред. проф.

Резиме:

У општем делу рада изложено је теоријско разматрање карактеристика процеса пластичног обликовања и деформабилности (гранична деформабилност, хомогеност процеса пластичног обликовања, параметри деформабилности, деформационо ојачање, остали аспекти деформабилности). Посебна пажња посвећена је запреминским експерименталним методама испитивања феномена деформационог ојачавања.

Централни део рада обухвата експериментална испитивања узорка од чистог бакра. У првом делу експеримента изведено је испитивање кривих ојачања по методама Растегајева и Шофмана (класичан поступак и два модификована). У другом делу експеримента изведено је испитивање методом конкавних епрувета.

Коначно, дато је критичко поређење добијених резултата и изведени закључци. Сагласност резултата по методама Растегајева и Шофмана је задовољавајућа, а по методи конкавних епрувета очито је неслагање што захтева допунска испитивања.

Abstract:

In the first, general part of this work, presented is the consideration of plastic forming process characteristics and important aspects of formability: limit formability, forming process homogeneity, basic formability parameters, metal strain hardening and other formability aspects. Special attention was paid to bulk experimental methods of strain hardening investigation.

In the central part, experimental investigation of pure copper samples is given. First part of the experiment contains Rastegaev and Schofman upsetting methods for strain hardening curves determination. Second part contains upsetting method of concave samples.

Finally, comparison of obtained results was given. Compliance of Rastegaev and Schofman methods results was acceptable, but significant differences can be seen in the results of concave samples method which implies further investigation.

Keywords: *formability in bulk forming processes, strain hardening, strain hardening curves*

Предговор

Главни део овог рада представља релативно опсежан експеримент за који је требало обезбедити серије узорака (материјал, обрада до финалне геометрије итд.) и извести експериментална испитивања. На припреми и обради материјала захваљујем се колегама из компаније "Слобода" у Чачку. Већи део експеримента изведен је у Лабораторији за обраду деформисањем и машинске материјале и у том делу се на помоћи захваљујем проф. др Вукићу Лазићу и лаборанту Слободану Тимотијевићу.

Свом ментору, проф. др Србиславу Александрићу се захваљујем на предложеној веома интересантној теми овог мастер рада. Посебно му се захваљујем на великој сарадњи, помоћи, саветима и разумевању, које ми је пружио током израде овог рада, као и током мастер студија. Мањи део експеримента урађен је у Центру за инжењерски софтвер и динамичка испитивања Факултета инжењерских наука. На помоћи око реализације тог дела експеримента захваљујем се доц. др Владимиру П. Миловановићу и др Александру Дишићу, научном сараднику.

Захваљујем се свим својим пријатељима и колегама, који су ми на било који начин пружили помоћ и подршку током мог досадашњег студирања. Посебно се захваљујем својој породици на великој подршци и разумевању током школовања.

Крагујевац, новембар 2020. године

Предраг Стојановић

Садржај:

1. УВОД	1
2. КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРОЦЕСА ПЛАСТИЧНОГ ОБЛИКОВАЊА	3
2.1 Напони и деформације	3
2.1.1 Напони	3
2.1.2 Деформације и брзина деформације	4
2.2 Веза између напона и деформација	6
2.3 Услови пластичности	6
2.3.1 Енергетски услов пластичности	7
2.3.2 Услов највећег смичућег напона	8
3. ДЕФОРМАБИЛНОСТ	9
3.1 Дијаграм граничне деформабилности	9
3.2 Хомогеност деформисања	11
3.3 Одређивање основних параметара деформабилности тестом једноосног затезања	15
3.4 Деформационо ојачање	24
3.4.1 Одређивање кривих ојачања затезањем	25
3.4.2 Одређивање кривих ојачања притискивањем	27
3.4.2.1 Метод сабијања конусним притискивачима	28
3.4.2.2 Метод сабијања епрувета различитих димензија (поступак Шофмана)	29
3.4.2.3 Метод сабијања са подмазивањем (метода по Растегајеву)	31
3.4.2.4 Метода конкавних епрувета	34
3.5 Аналитичке апроксимације кривих ојачања	37
3.6 Утицај брзине деформације и температуре на деформациони отпор материјала	39
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА (РЕЗУЛТАТИ)	41
4.1 Тест по Растегајеву	43
4.2 Тест по Шофману	47
4.3 Тест са конкавним епруветама	53
5. ЗАКЉУЧАК	62
6. ЛИТЕРАТУРА	63

1. УВОД

У току последњих неколико деценија, технологија пластичног обликовања метала (ТПО) постала је практично незаобилазна при остваривању великог броја високо продуктивних индустријских 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 току процеса 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. Узрок томе је познати ефекат 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 тзв. неконвенцијални 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. Код делова од лима однос између површине и запремине има знатно већу вредност у поређењу са деловима који се обликују поступцима запреминског обликовања.

У поступке обликовања лима спадају: савијање, дубоко извлачење, извлачење са стањењем и др. При том, дубоко извлачење има 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 критеријумима: 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 обрађене 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 је нагласити о ком процесу се ради. Да би се такве и сличне недоумице и конфузије избегле, користи се само термин деформабилност.

У овом раду поред општег погледа на напонско-деформационе карактеристике процеса пластичног обликовања и уопштеног приказа деформабилности код лимова и при запреминском обликовању детаљније је изложена проблематика везана за феномен деформационог ојачавања при запреминском обликовању. Овај феномен и сам спада у веома битне области деформабилности материјала уопште. Деформационо ојачавање се најбоље одсликава и приказује преко тзв. кривих течења или кривих ојачавања. Преко њих се и визуелно приказује суштина ефекта ојачавања. Конкретно, у овом раду је примењено 5 експерименталних метода за одређивање кривих ојачања чистог бакра. Циљ је, да се с једне стране прикажу класичне методе, а с друге могућност унапређења тих метода, као и могућност примене нових или модификованих експерименталних поступака.

Актуелност проблематике коју обухвата тема овог мастер рада види се из наведене литературе [1 - 10] што је само мали део публикација свих врста и нивоа објављиваних раније и у данашње време. Сагледавајући несмањени развој металних материјала несумњиво ће тако бити и убудуће.

2. КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРОЦЕСА ПЛАСТИЧНОГ ОБЛИКОВАЊА

Да би се прецизније описало својство деформабилности, пре свега је потребно 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 које се јављају 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 поликристална, зрнаста),
- Хипотеза о природном напонском стању (претпоставка да пре почетка деформисања није било унутрашњих напона или су они 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 имају нпр. олово - Pb и калај - Sn, али у одговарајућим условима и челик),
- Непроменљивост запремине у процесима ТПО.

2.1 Напони и деформације

2.1.1 Напони

Напонско стање у свакој тачки напрегнутог тела може се одредити преко тензора напона. Тензор напона је приказан преко израза 2.1.

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

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 формуле 2.2:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.2)$$

Овај напон представља интензитет напона равномерног притиска или затезања у посматраној тачки и фигурише у тзв. *сферном тензору напона* (T_σ^s), који је представљен изразом 2.3.

$$T_\sigma^s = \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

док је укупна вредност танзора напона приказана преко израза 2.4:

$$T_\sigma = T_\sigma^s + D_\sigma \quad (2.4)$$

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 утицај.

Вредност *ефективног*, односно *еквивалентног напона* приказана је изразом 2.5:

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.5)$$

Представља веома важну вредност, зато што одређује интензитет замишљеног једноосног напона чије дејство замењује 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.

2.1.2 Деформације и брзина деформације

Појам деформације представља меру промене димензија или облика посматраног дела запремине тела, или тела као целине. Са појавом пластичних деформација трајно се мењају, како облик, тако и димензије тела. У реалним условима свака издвојена елементарна запремина деформише се са различитим износима насталих 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 важно, 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 погодно приказује деформационо стање у посматраном материјалу. Дата је изразом 2.6.

$$\varepsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (2.6)$$

У практичним условима, величина деформација израчунава се на основу одређених показатеља деформација који су дати преко следећих израза:

$$\Delta l = l_1 - l_0, \text{ mm} - \text{апсолутна деформација} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} - \text{релативна, односно јединична деформација (деформација I реда)} \quad (2.8)$$

$$\psi = \frac{\Delta A}{A_0} - \text{деформација површине (проширење или сужење) (II реда)} \quad (2.9)$$

$$\varphi = \ln \frac{l_1}{l_0} - \text{природна (логаритамска) деформација (III реда)} \quad (2.10)$$

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

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

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0. \text{ По сличном принципу, могу се наћи и везе између осталих показатеља деформација } (1 + \varepsilon = \frac{1}{1 - \psi} = e^\varphi).$$

Важно је назначити разлику између *брзине деформације* и *брзине деформисања*, јер се ове вредности суштински разликују. Брзина деформације такође представља тензорску величину (као напон и деформација), али се чешће користе осредњене вредности на макро нивоу.

Брзина деформисање је брзина кретања извршног елемента машине, односно брзина кретања алата који деформише предмет обраде. Ова вредност се означава са v , а њена јединица је $\frac{mm}{s}$ или $\frac{mm}{min}$. Насупрот томе, брзина деформације представља промену деформације у јединици времена. Означава се са $\dot{\varphi}$, а јединица јој је 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.

2.2 Веза између напона и деформација

У области еластичности, одређена је једнозначна веза између ових величина која се везује за познатог научника Роберта Хука (*Robert Hooke, 1635-1703*). Он је дошао до израза 2.11 за једноосно напонско стање, помоћу којег је доказао да је у области еластичности код метала зависност између напона и деформација линеарна и зависи од карактеристика материјала представљених преко модула еластичности E .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.11)$$

Међутим, у области пластичних деформација, ова зависност није једнозначна знатно је сложенија и нелинеарног је карактера. При веома малим деформацијама, може се доћи до аналогije са еластичним деформацијама. То је представљено преко *Levy-Mises*-ових једначина. Оне су значајне код теоријских разматрања, као и код нумеричких симулација принципа настанка и ширења деформација.

2.3 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 2.1. На њему је приказан ток деформисања идеално пластичног материјала, код кога не долази до феномена деформационог ојачања, као и ток деформисања у реалним условима када се прате вредности стварног и техничког напона, при испитивању једноосним затезањем. Вредности *техничког* и *стварног* напона, дати су респективно једначинама 2.12 и 2.13.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.12)$$

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = K = \sigma_e \quad (2.13)$$

2.3.2 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.”[1]

Ова вредност дата је следећим изразом:

$$\tau_{\max} = K_s = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_{13} = \text{const.} \quad (2.15)$$

При чему K_s представља *смицајни деформациони отпор*, који се може одредити испитивањем на чисто смицање.

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 (2.16).

$$\tau_{\max} = \frac{K}{2} = K_s \quad (2.16)$$

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

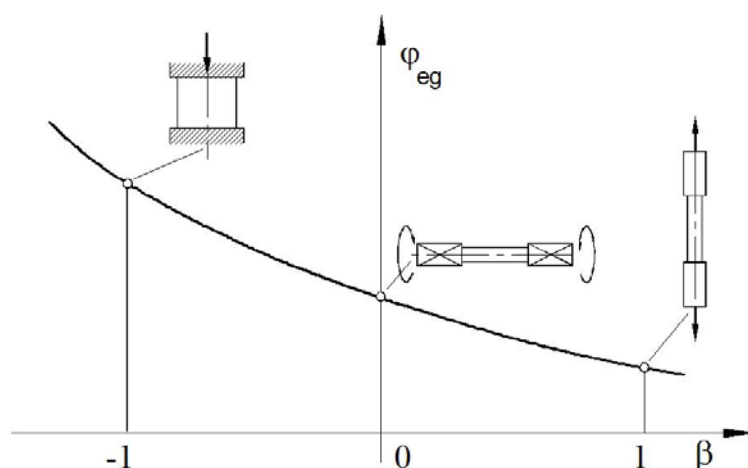
Према претходно изложеном може се закључити следеће: Да би пластично деформисање у општем случају напонско-деформационог стања отпочело, потребно је да максимална вредност смичућег напона достигне половину вредности деформационе чврстоће. Такође се може рећи да ће пластична деформација отпочети када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

3. ДЕФОРМАБИЛНОСТ

3.1 Дијаграм граничне деформабилности

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 и напонско стање.

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 *напонског фактора* β , добија се дијаграм граничне деформабилности за запреминско обликовање (сл. 3.1).



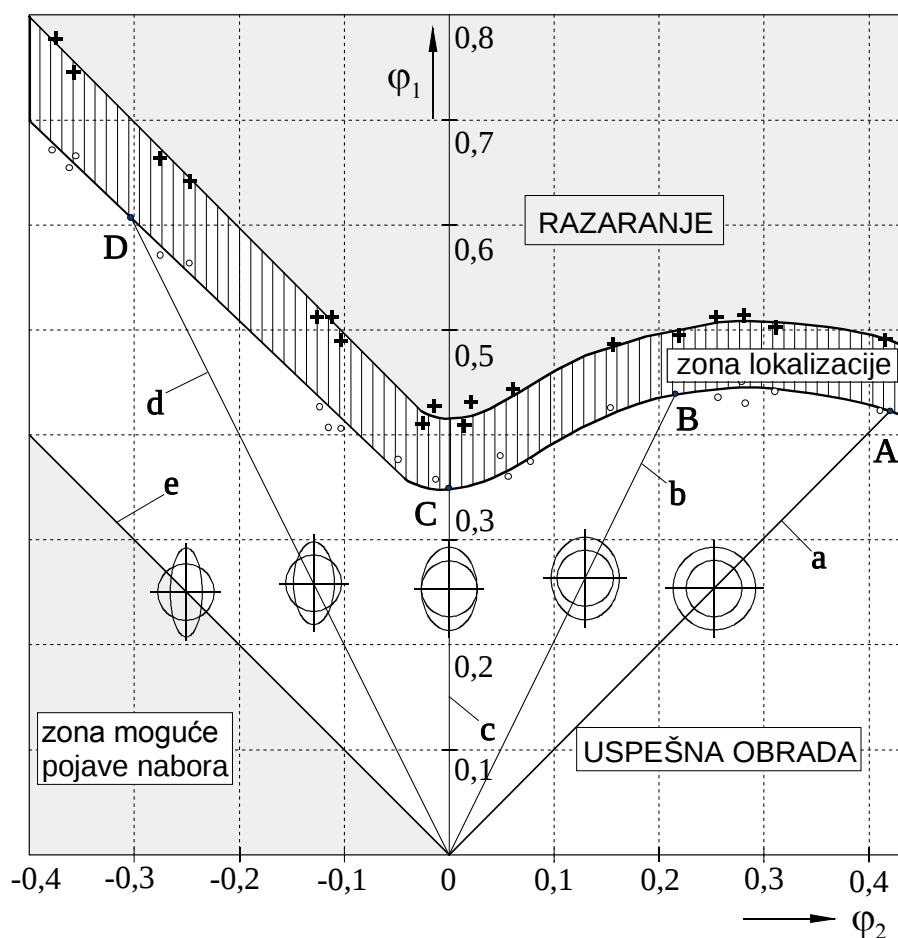
Слика 3.1 Дијаграм граничне деформабилности при запреминском обликовању[1]

$$\varphi_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{[(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2]} \quad (3.1)$$

$$\beta = \frac{I_1}{\sqrt{3}I_2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \quad (3.2)$$

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, дат на слици 3.2.

Дијаграм граничне деформабилности лимова 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*. Линија **(e)**, представља напонско-деформационо стање на ободу комада 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 (линија **c**), односи се на *раванско деформационо стање*, врло неповољно због изразитог стањења ($|\varphi_3| > 0$), при чему важи да је $\varphi_2 = 0$.



Слика 3.2 Дијаграм граничне деформабилности код лимова (Keeler-Goodwin-ов дијаграм)[2]

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, геометрије комада или алата и отклонити проблем.

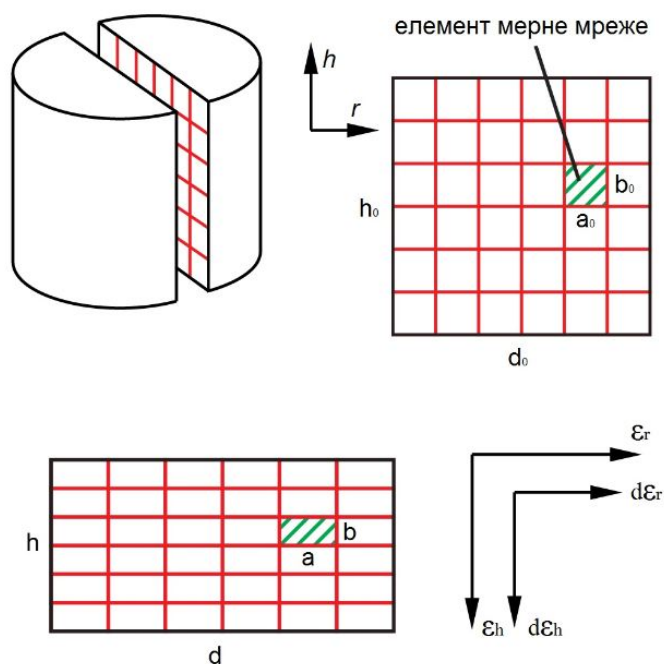
3.2 Хомогеност деформисања

У реалним условима пластичног обликовања метала, деформације по површини или запремини дела најчешће 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:

- контактнo 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), одређује 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 3.3.



Слика 3.3 Шема идеалног хомогеног деформисања при сабијању цилиндра[3]

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. Напонско стање током оваквог процеса остаје једноосно.

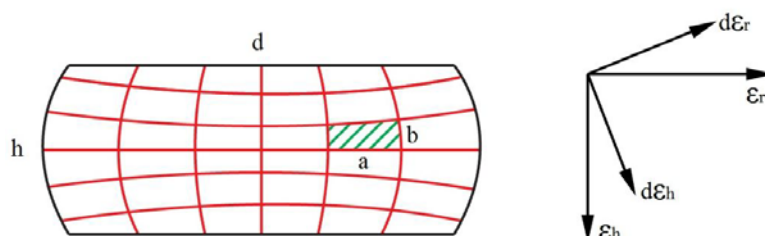
Услови хомогеног деформисања са претходне слике, изражени су преко следећих израза за релативне деформације:

$$\varepsilon_a = \ln \frac{a}{a_0} = \varepsilon_d = \ln \frac{d}{d_0} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_b = \ln \frac{b}{b_0} = \varepsilon_h = \ln \frac{h}{h_0} \quad (3.4)$$

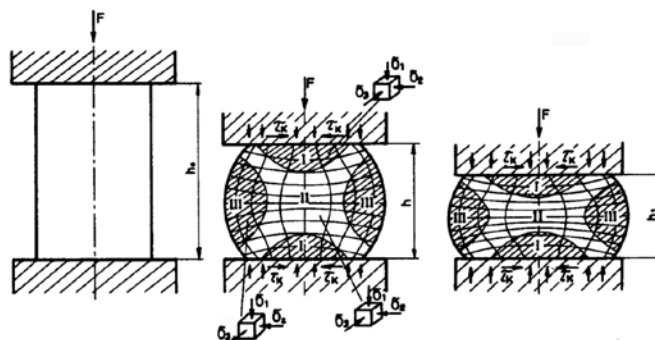
Ови изрази представљају везу између *елементарних деформација* (ε_a и ε_b) и *укупних деформација* целог тела (ε_d и ε_h), што практично представља математички услов који мора бити испуњен како би се оправдала тврдња да је деформисање цилиндра хомогено.

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 укупну деформацију целокупног тела. 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 шеме деформисања цилиндра са слике 3.4.



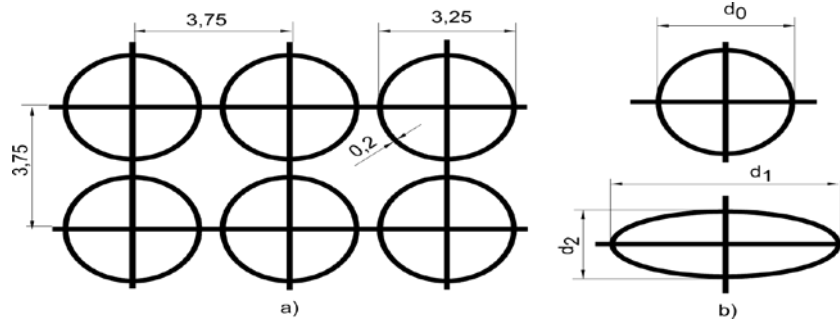
Слика 3.4 Шема нехомогеног деформисања при сабијању цилиндра [4]

На слици 3.5 приказано је реално нехомогено деформисање при сабијању цилиндра, уз изражен утицај трења на контактним површинама.



Слика 3.5 Сабијање цилиндра у реалним условима, уз приказ деловања напона [5]

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 је пре почетка експеримента погодено нанети кружну мерну мрежу пречника d_0 . На слици 3.6 приказан је изглед једне такве мерне мреже, као и њено деформисано стање у току процеса.



Слика 3.6 Изглед елемената мерне мреже у недеформисаном (а) и деформисаном стању (б) [1, 2]

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 3.6.

$$\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (3.5)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (3.6)$$

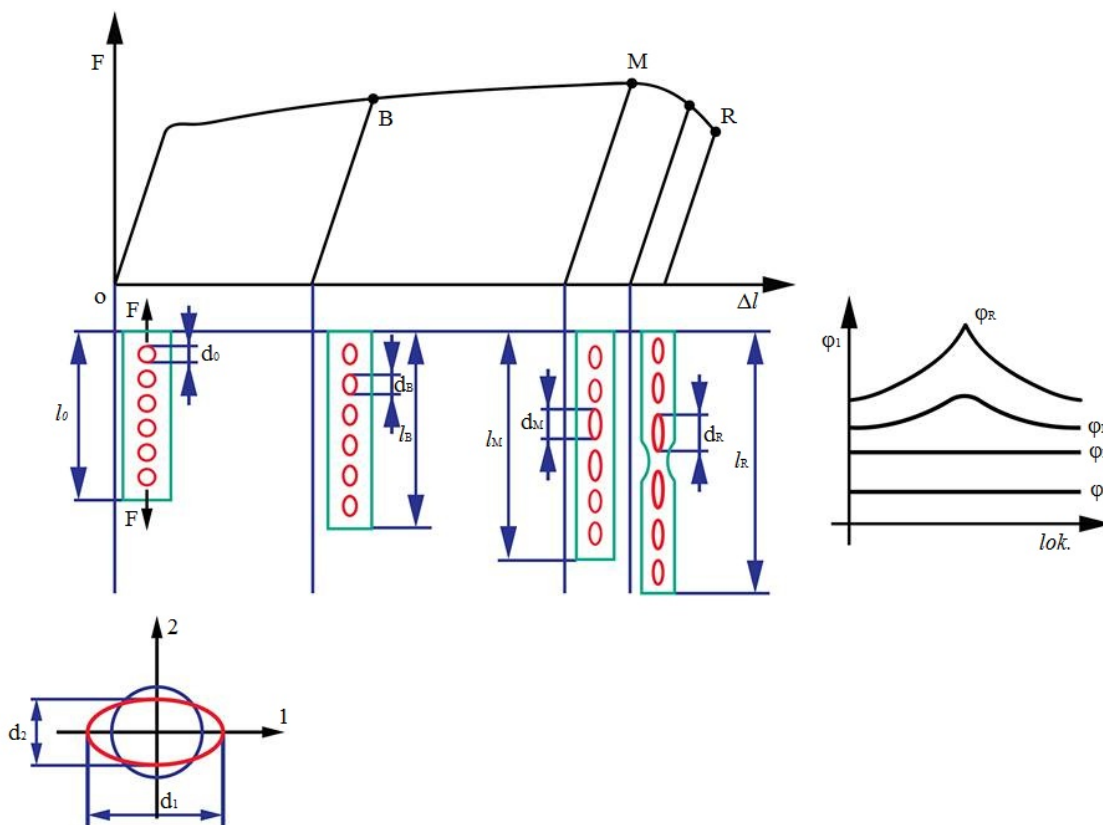
Изрази 3.5 и 3.6 представљају одговарајуће вредности прве и друге главне деформације у равни лима, односно деформације кружних елемената мерне мреже.

Вредности деформација елементарне мерне мреже и промене дужине епрувете у тачки В (слика 3.7) одређују се преко израза 3.7 и 3.8.

$$\varphi_B = \ln \frac{d_B}{d_0} \quad (3.7)$$

$$\varphi_{l_B} = \ln \frac{l_B}{l_0} \quad (3.8)$$

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 3.7 Приказ хомогеног и нехомогеног деформисања код једноосног затезања епрувете од нискоугљеничног челичног лима[2]

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 нешто више издужене од суседних. Може се закључити да је дошло до појаве почетка 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 на дијаграму зависности φ_1 од тренутног положаја, добиће се

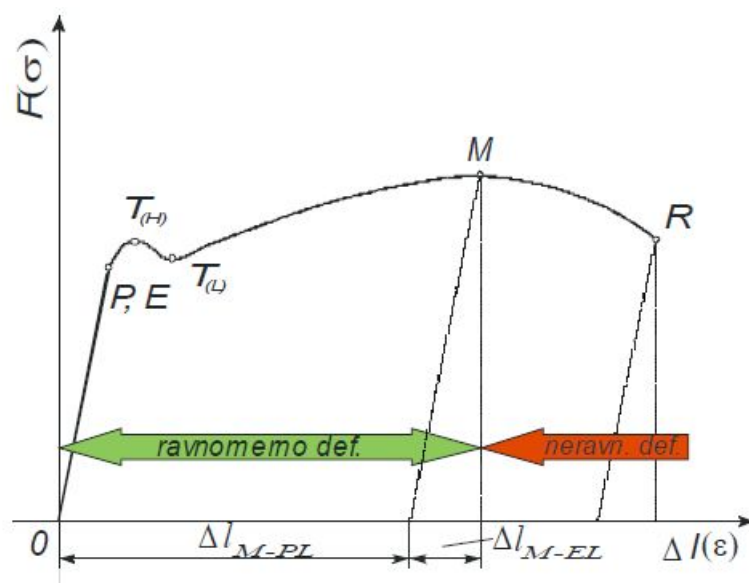
карактеристичан пик локалног максимума у тренутку разарања епрувете. У овом случају једноосног истезања се може закључити да је *вредност укупне деформације* φ_{l_R} мања од вредности локалне *деформације при лому* φ_R , из чега се, између осталог, може закључити да је дошло до локализације на месту лома.

На основу претходно изложеног, закључује се да је деформисање при једноосном затезању идеално хомогено само у делу пластичне области пре тачке M . 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 издужење при лому достиже и преко 30%, док је та вредност код кртих материјала знатно нижа.

3.3 Одређивање основних параметара деформабилности тестом једноосног затезања

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

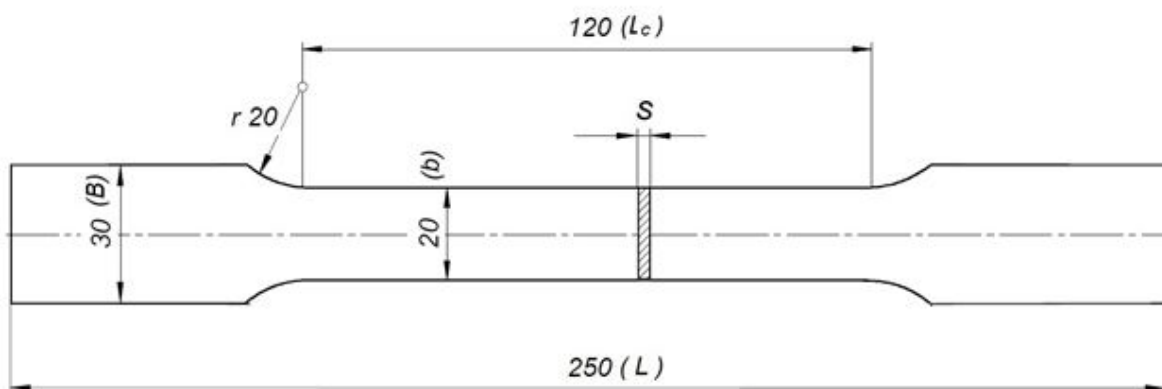
Напонски и деформациони показатељи о којима је претходно било речи одређују се на основу дијаграма који се експериментално добија овим поступком. Пример познатог дијаграма зависности напона од деформације, дат је на слици 3.8. Овај дијаграм се често приказује тако што се уместо напона на ординатној оси посматра сила затезања (F), а уместо других показатеља деформације, издужење епрувете (Δl). Разлог томе је непосредни резултат експерименталних испитивања.



Слика 3.8 Дијаграм зависности силе (напона σ) од издужења (деформације ϵ) [2]

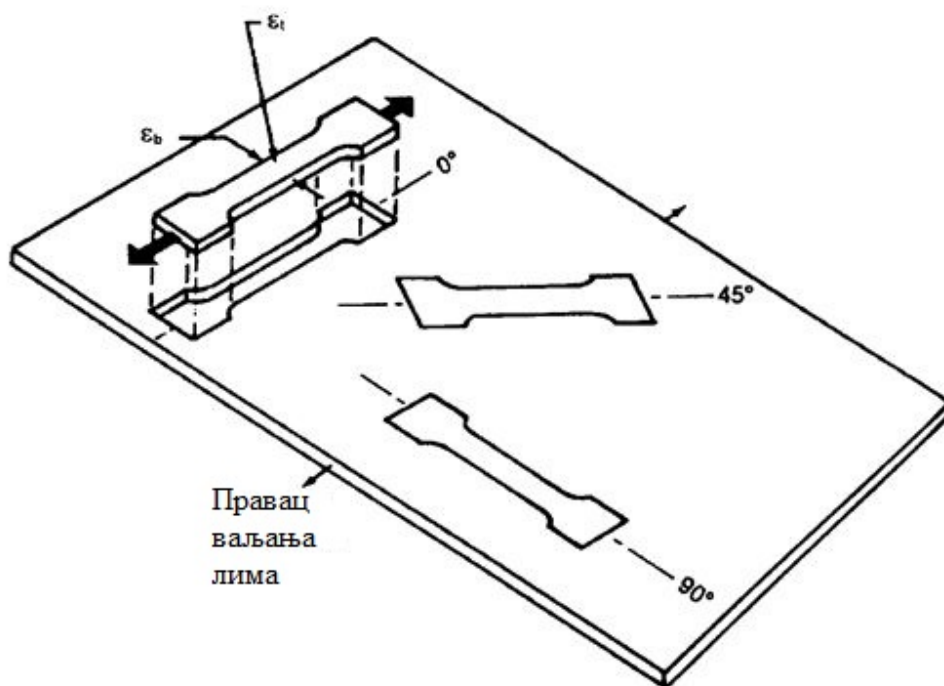
На овом дијаграму су означене главне тачке у којима долази до важних промена и у којима се могу очитати вредности важних параметара за процес. Такође су разграничени делови везани за настанак еластичних и пластичних деформација, као и делови дијаграма који се односе на појаву равномерних и неравномерних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

Пре почетка процеса испитивања, веома је важна правилна припрема епрувете. Овде ће се узети пример епрувете од лима. Потребно је обратити пажњу на: исецање из табле лима познавајући правац ваљања, прецизност димензија епрувете, припрему ивица, чишћење, правилно позиционирање епрувете како би се добило чисто једноосно затезање итд. Пример облика и димензија једне такве епрувете, дат је на слици 3.9.



Слика 3.9 Облик и димензије епрувете за испитивање чистим једноосним затезањем

Исецање епрувете из табле лима под одређеним угловима у односу на правац ваљања (претходне прераде, тј. добијања лима), приказано је на слици 3.10.



Слика 3.10 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 (на облик и распоред кристалних зрна) и још се назива и макро-анизотропија.

У зависности од правца исецања, добиће се приметно различита својства лима. Ова појава је везана за својство анизотропије лимова које се може изразити као *раванска* (пример са слике) или *нормална* 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 3.11 приказана је једна таква савремена машина.



Слика 3.11 Машина за извођење процеса једноосног затезања

Као што је већ споменуто, веома је важно обратити пажњу на правилно позиционирање и стезање 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 деформације

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.

На овом месту корисно је дати упоредне вредности брзине деформисања v и брзине деформације $\dot{\phi}$ према поглављу 2.1.2 (на пример за епрувету почетне дужине $l_0 = 80 \text{ mm}$):

- За вредности од $v = 20 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ следи $\dot{\phi} = \frac{20}{60 \cdot 80} = \frac{1}{240} = 0.00417 \text{ s}^{-1}$,
- За вредности од $v = 10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ следи $\dot{\phi} = \frac{10}{60 \cdot 80} = \frac{1}{480} = 0.00208 \text{ s}^{-1}$,
- За вредности од $v = 40 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ следи $\dot{\phi} = \frac{40}{60 \cdot 80} = \frac{1}{120} = 0.0083 \text{ s}^{-1}$,

Оријентационе вредности брзине деформације за различите процесе ТПО, дате су илустративно у табели 3.1.

Табела 3.1 Оријентационе вредности брзине деформације за различите процесе ТПО[1]

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), (Yield strenght, Flow Stress),

- Затезна чврстоћа (R_m , у MPa) (Tensile strenght),
- Однос $\left(\frac{R_p}{R_m}\right)$,
- Процентуално издужење при разарању (A , %), (Percentage Elongation After Fracture),
- Процентуално издужење при максималној сили (A_g , %), (Percentage Elongation After Maximum Force),
- Контракција попречног пресека (Z , %), (Percentage Reduction of Area).

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

Изрази од 3.9 до 3.14, служе за израчунавање претходно поменутих показатеља:

$$R_{eH}(R_{eL}) = K_0 = \frac{F_{T(H)}}{A_0}, MPa \quad (3.9)$$

$$R_{p0.2} = R_p = K_0 = \frac{F_{T0.2}}{A_0}, MPa \quad (3.10)$$

$$R_m = \frac{F_M}{A_0}, MPa \quad (3.11)$$

$$A = \frac{l_R - l_0}{l_0} \cdot 100, \% \quad (3.12)$$

$$A_g = \frac{l_M - l_0}{l_0} \cdot 100, \% \quad (3.13)$$

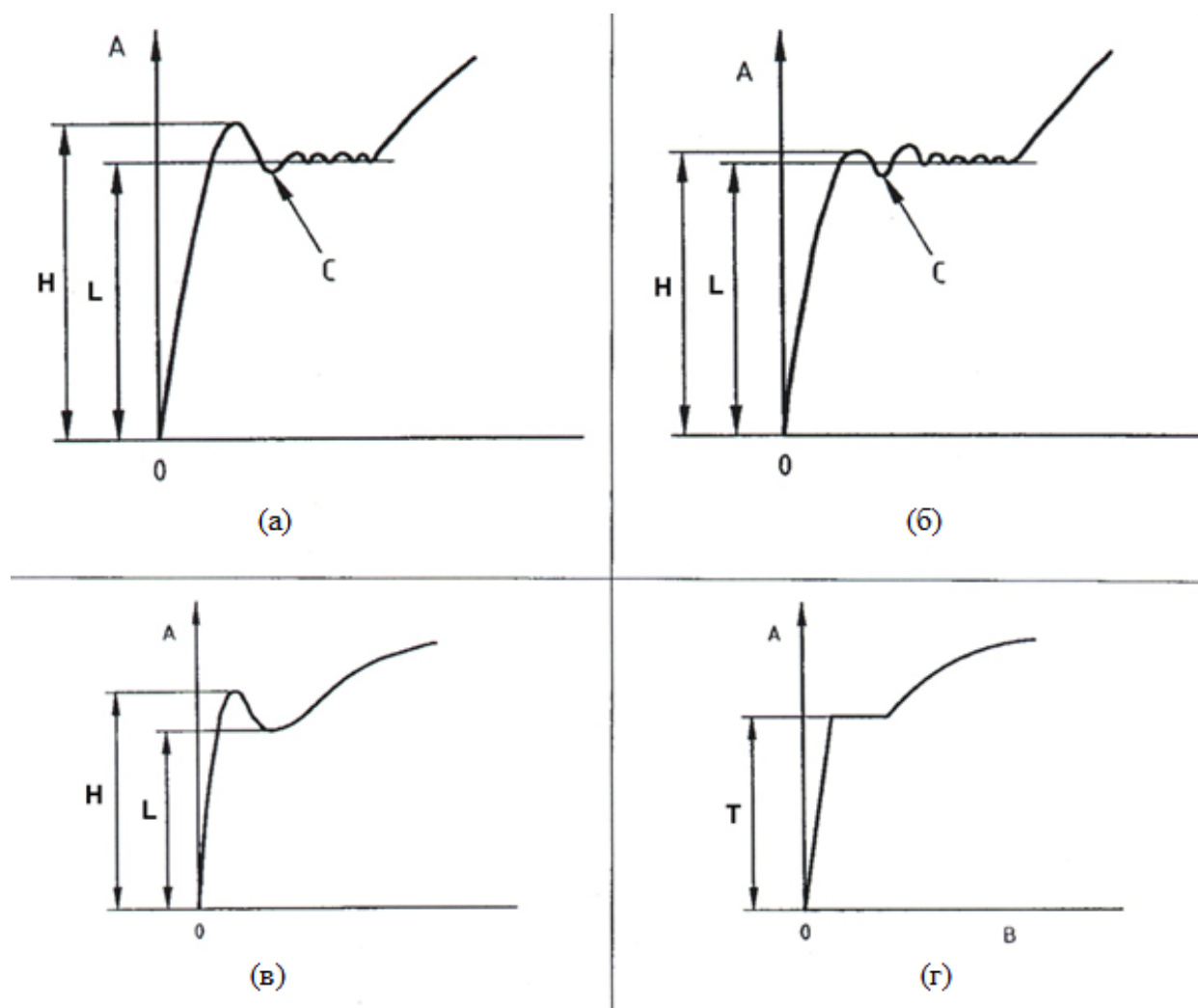
$$Z = \frac{A_0 - A}{A_0} \cdot 100, \% \quad (3.14)$$

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 положају епрувете, брзини кретања покретне чељуст, 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 оријентациони.

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.

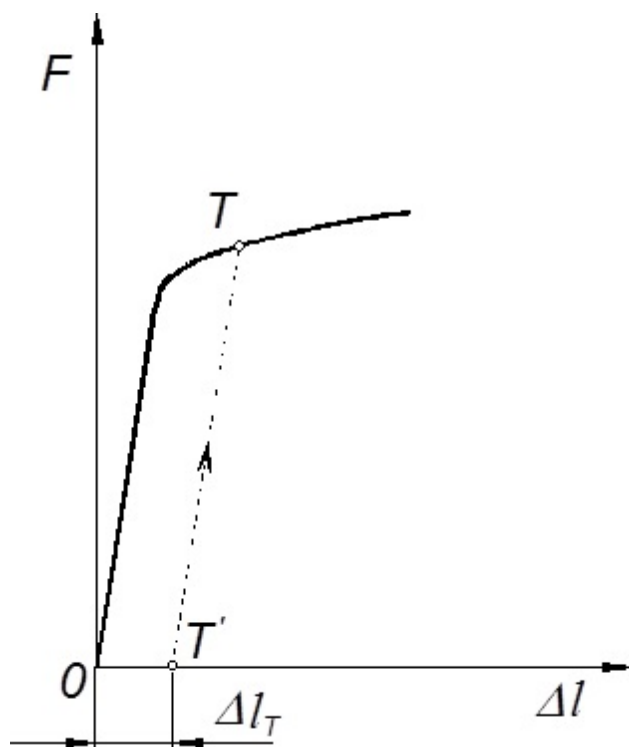
Примери кривих затезања добијених овим поступком (у случају када се јавља дисконтинуитет на кривој), дати су на слици 3.12.



Слика 3.12 Примери експериментално добијених кривих затезања са појавом дисконтинуитета [3]

После краја процеса испитивања, на машини се читава 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 3.13.



Слика 3.13 Дијаграм затезања челика када није изражена граница течења материјала [3]

Посредством изабраних размера за силу и дужину $\left(U_F = \frac{F_m}{0M''}, \frac{N}{mm} \text{ и } U_{\Delta l} = \frac{\Delta l_R}{0R'}, \frac{mm}{mm} \right)$, и мерења вредности са дијаграма, после краћег прорачуна, добиће се положај границе течења (тачка T) и вредност напона на граници течења ($R_{p0.2}$).

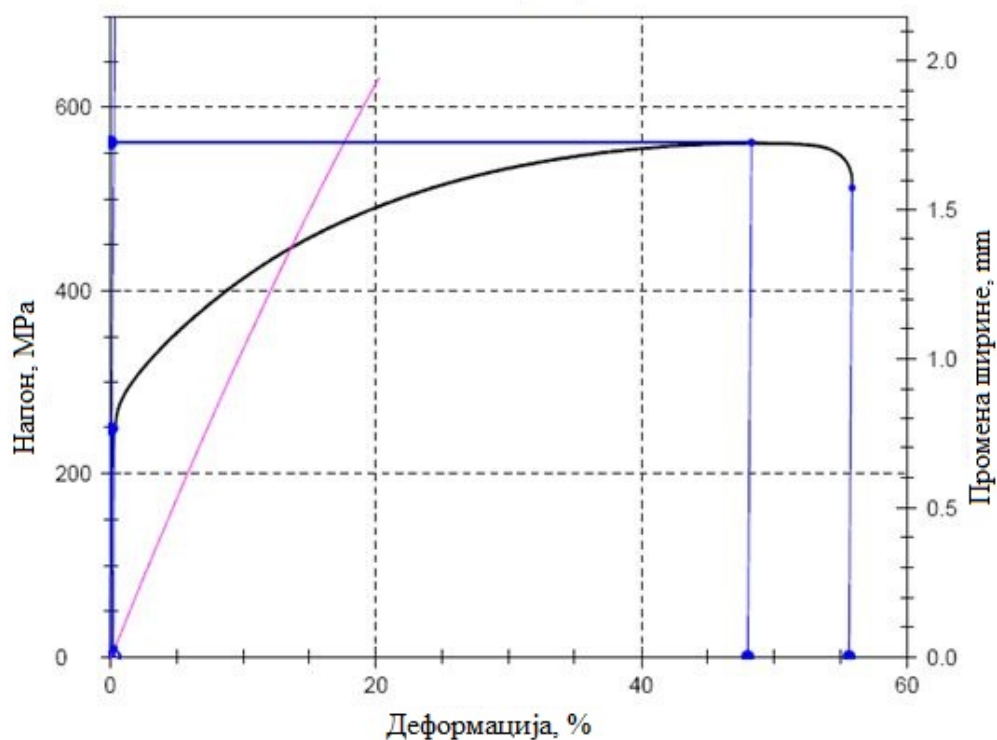
Ако се сматра да је прва настала пластична деформација дата изразом 3.15:

$$\varepsilon = \varepsilon_T = \frac{\Delta l_T}{l_0} = 0.002 \quad (3.15)$$

може се закључити да ће издужење 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 изабраним 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 еластичности, добиће се тачан положај тачке T , после чега ће бити могуће наћи вредност силе на граници течења преко израза 3.16, а потом и напон на граници течења преко већ споменутог израза 3.10.

$$F_T = F_{p0.2} = \overline{0T''} \cdot U_F \quad (3.16)$$

На слици 3.14, као илустрација 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 правац ваљања (при чему је правом љубичастом линијом која полази из координатног почетка приказана промена дебљине). После тога, као пример корисних резултата, дате су главне карактеристике овог челика у зависности од угла према правцу ваљања лима (табела 3.2).



Слика 3.14 Дијаграм напон-деформација код аустенитног нерђајућег челика X5CrNi18-9 [3]

Табела 3.2 Карактеристике аустенитног нерђајућег лима од X5CrNi18-9 [3]

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 деформабилност од напона на граници течења. Један од разлога мањег значаја јесте чињеница да R_m представља 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 запремине материјала, што смањује могућност појаве веома штетног локализованог деформисања, које може довести до убрзаног стањења и лома, односно разарања 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 , практично приказује интензитет могућег деформационог ојачања испитиваног материјала. Такође, говори до које мере и са колико потешкоћа је могуће обликовати део, а да не дође до локализованог деформисања, слично као и коефицијент деформационог ојачања n . Препоручује се да вредност односа R_p / R_m буде у границама од 0.5 до 0.6. Међутим, претходно не значи да треба изводити коначне закључке о својству деформабилности, само на основу овог параметра.

Вредност A представља процентуално издужење епрувете при лому. Односи се не само на издужење у хомогеном подручју, него и на део процеса са локализованим деформисањем, које може бити веома непредвидиво. Због тога је овај параметар у конкретним случајевима у извесној мери непоуздан. Он се у практичним условима може користити за поређење са вредностима за друге материјале, али није погодан као самосталан показатељ.

Процентуално издужење при максималној сили A_g , односно равномерно издужење, насупрот параметру 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, иако није могуће прописати генералне критеријуме који би материјале требало разврстати у различите групе. Параметар типа односа A_g / A би могао да се сматра као илустративан показатељ.

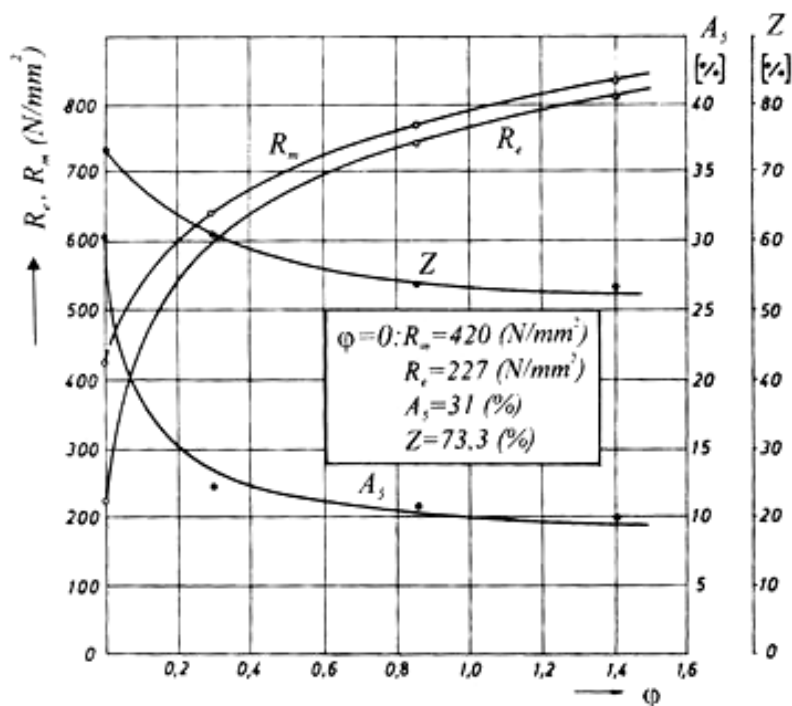
У случају нестандартних димензија епрувета, у индексу поред ознаке A ставља се бројна вредност (A_{40} , A_{80} итд.). Цео поступак испитивања изводи се на основу стандардизованих процедура, у складу са стандардом EN10002-1.

Треба напоменути да су поменута одређивања параметара током испитивања на савременим компјутерски управљаним машинама за испитивање материјала аутоматизована.

3.4 Деформационо ојачање

У току процеса пластичног обликовања метала, нарочито у хладном стању, долази до раста напона течења (овде схваћеног у најопштијем смислу) потребног за континуално одвијање процеса, сразмерно са повећањем пластичне деформације. Узрок ове појаве лежи у микроструктурним променама које резултирају у опирању материјала деформисању, па у складу са тим треба деловати све већим деформационим силама. Ефекат израженог пораста напона течења са растом пластичне деформације, који је пропраћен падом пластичности материјала, представља феномен деформационог ојачања.

Са дијаграма на слици 3.15, може се уочити управо претходна тврдња да долази до раста карактеристика чврстоће (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 поменутих карактеристика. За другу епрувету материјал је претходно сабијен до деформације од 30%, после чега је израђена епрувета и изложена 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 3.15 Промена својстава чврстоће и пластичности са степеном претходне деформације

Ефекат деформационог ојачања зависи од више фактора:

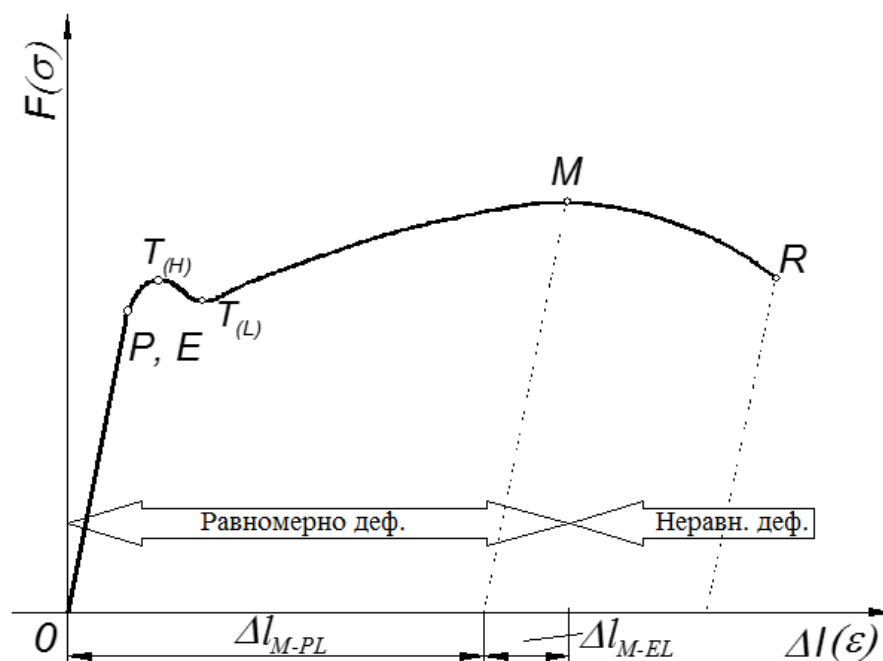
- материјал (хемијски састав, структура, особине, стање...),
- степен деформације,
- температура обраде и
- брзина деформације.

Деформационо ојачање се најефикасније одређује преко кривих течења или кривих ојачања. Ове криве практично представљају зависност еквивалентног напона течења, од еквивалентне пластичне деформације за време процеса пластичног обликовања. У току пластичног деформисања, та критична (гранична) вредност еквивалентног напона потребна за трајање процеса пластичног деформисања обично се назива деформациони отпор или деформациона чврстоћа. На то указује енергетски услов пластичности, о коме је било речи у поглављу 2.3. Треба нагласити да у општем случају напрезања, еквивалентни напон може бити и мањи од деформационе чврстоће, која представља критични, гранични напон који је потребан да би се материјал пластично деформисао.

Одређивање кривих течења заснива се најчешће на експерименталном поступку једноосног затезања или притискивања, и дефинисању зависности еквивалентног напона од еквивалентне деформације у току праћења процеса пластичног деформисања. Примена једноосних напонских стања мотивисана је великим поједностављењем напонског стања и чињеницом да деформационо ојачање не зависи од напонског стања. Због тога криве течења добијене оваквим експерименталним поступцима представљају универзалну карактеристику материјала. Дакле, једна сложена карактеристика као што је еквивалентни напон свесно се одређује у ситуацији када се по природи ствари упрошћава, а слично важи и за другу карактеристику (еквивалентну деформацију) која је у вези са првом.

3.4.1 Одређивање кривих ојачања затезањем

Испитивање једноосним затезањем се стандардно користи за одређивање основних механичких карактеристика материјала: затезне чврстоће, границе течења, модула еластичности, издужења при разарању, контракције (сужења), попречног пресека итд. Паралелно са тим могуће је на основу криве затезања (слика 3.16) дефинисати криву ојачања.



Слика 3.16 Дијаграм затезања [1, 2]

Процес затезања се може поделити у две фазе. Граница је тренутак постизања максималне силе, тачка М на слици 3.16. У првој фази одвија се хомогено деформисање и влада једноосно напонско стање. Постоји један главни напон σ_1 уједно једнак еквивалентном напону σ_e према изразу $\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$. Док траје пластично деформисање еквивалентни напон је једнак деформационом отпору К. Дакле, од тренутка достизања границе течења (тачке Т_(H) или Т_(L) на слици 3.16) па до тренутка постизања максималне силе (тачка М) треба успоставити везу између силе затезања и стварног напона σ_1 који је једнак σ_e односно К.

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = \frac{F}{A_0} (1 + \varepsilon) = \frac{F}{A_0} e^\varphi = \sigma_e = K \quad (3.17)$$

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

$$V_0 = V = \text{const.} \quad (3.18)$$

$$V_0 = A_0 l_0 = V = A l \quad (3.19)$$

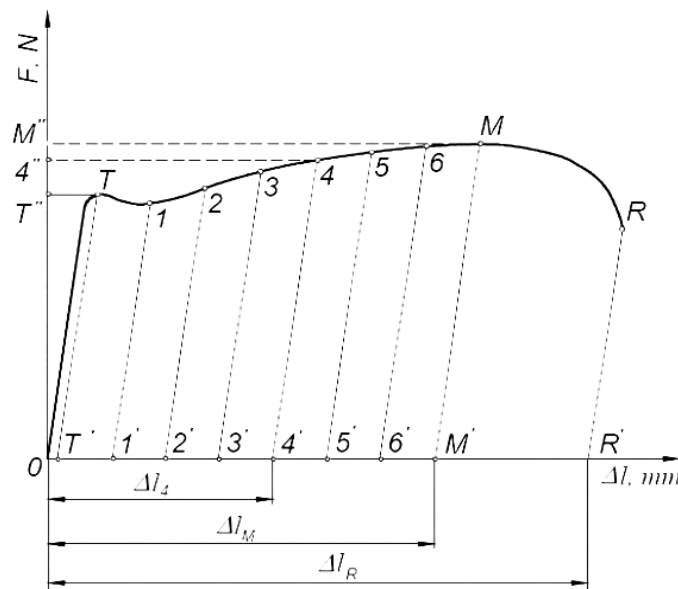
$$\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon = e^\varphi = \frac{A_0}{A}; \quad \psi = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon} = 1 - \frac{1}{e^\varphi} \quad (3.20)$$

Еквивалентна деформација једнака је природној деформацији дужине епрувете.

$$\varphi_e = \varphi_1 = \ln \frac{l}{l_0}; \quad \varphi_2 = -\frac{1}{2} \varphi_1; \quad \varphi_3 = \varphi_2 = -\frac{1}{2} \varphi_1; \quad (3.21)$$

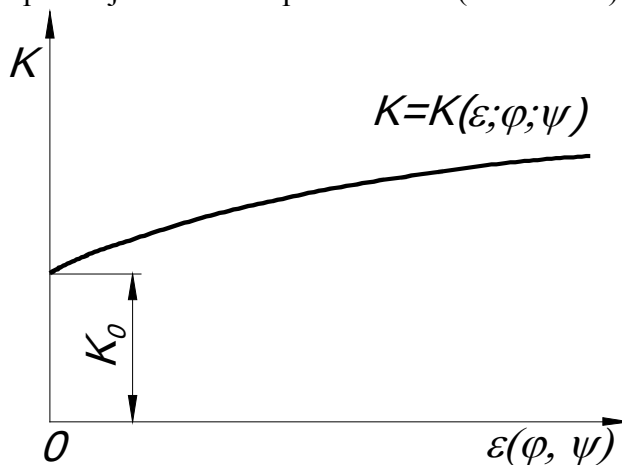
$$\varphi_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2} \quad (3.22)$$

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



Слика 3.17 Одређивање кривих ојачања затезањем

На слици 3.17 је приказан поступак одређивања криве течења који се састоји у одабиру одређеног броја тачака из области равномерног деформисања. Затим се изабране тачке пројектују на апсцису (у циљу одређивања вредности пластичне деформације) под идентичним углом као и линеарни (почетни) део криве такође. Тачке се пројектују и на ординатну осу и одређују одговарајуће вредности силе F . Када се на вредности са дијаграма затезања у области пластичног и равномерног деформисања примени израз за стварни, тј. еквивалентни напон, добија се зависност деформационог отпора од еквивалентне деформације, односно крива ојачања или крива течења (слика 3.18).

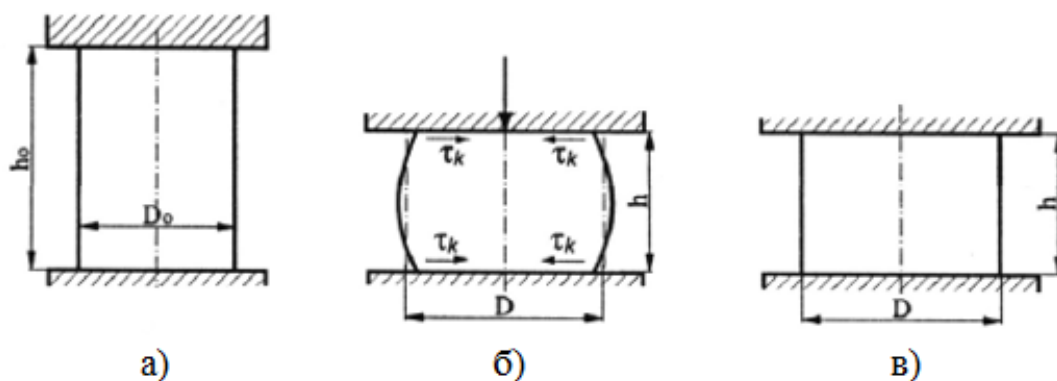


Слика 3.18 Крива ојачања

Недостатак једноосног затезања је релативно мали износ максималне деформације хомогеног деформисања (тачка М). За нискоугљеничне челике је то око 30% што може бити недовољно. Постоје два могућа решења: коришћење другог експерименталног поступка или дефинисање аналитичких апроксимација. Алтернативни поступак је сабијање цилиндра, али ту се јавља проблем контактнoг трења, које битно ремети хомогеност деформисања, односно једноосно напонско стање. Различитим мерама утицај трења се може смањити на прихватљиву меру. Код лимова, међутим, сабијање није могуће применити, али се примењују поступци засновани на развлачењу.

3.4.2 Одређивање кривих ојачања притискивањем

Метод једноосног сабијања данас представља један од највише прихваћених метода одређивања кривих ојачања за поступке запреминског обликовања. При сабијању на хладно могу се остварити велики степени деформације реда величине $\varphi = 1 \div 1.2$ за једноетапно сабијање и до $\varphi = 2$ при сабијању у више етапа због чега овај метод и има предност у односу на тест затезања. Ова могућност постизања већих степена деформација се објашњава повољним напонским стањем које се јавља у материјалу (опште је познато да метални материјали боље подносе притисно од затезућег оптерећења). Поред тога, епрувете имају једноставнији облик, а и сам тест је у извесном смислу једноставнији. Међутим, код сабијања се јавља ограничавајући фактор који код затезања није присутан, а то је контактнo трење између алата и епрувете. То трење узрокује отежано течење материјала у зони контакта што доводи до појаве буричастог облика епрувете (слика 3.19), односно напонско стање није једноосно, а деформисање није хомогено.



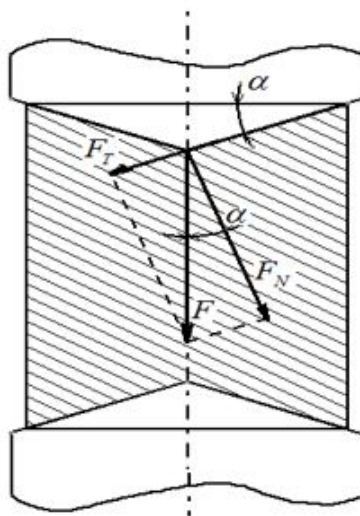
Слика 3.19 Сабијање цилиндра: а) епрувета, б) сабијањесатрењем в) сабијањебезтрења

Како би се у идеалним условима (без трења) процес одвијао хомогено и једноосно, сав деформациони рад би се трошио на пластично обликовање епрувете и радни притисак (стварни напон) би у сваком моменту био једнак деформационом отпору K . У реалним условима јавља се нехомогено деформисање, односно присутно је троосно напонско стање. То значи да остварена деформација није иста у свим деловима комада већ се разликује у зависности од положаја посматране тачке. Постоји више начина да се смањи трење и процес приближи идеалним условима, а неки од њих су:

- метод сабијања конусним притискивачима,
- метод сабијања епрувета различитих димензија (метода по Шофману),
- метод сабијања са подмазивањем (метода по Растегајеву), итд.

3.4.2.1 Метод сабијања конусним притискивачима

Сабијање конусним притискивачима се састоји из притискивања епрувета алатом са коничним испупчењима, при чему су и епрувете са одговарајућим коничним удубљењима на својим чеоним странама. Угао нагиба конуса зависи од услова трења. Ако је подмазивање квалитетно он је обично мањи од 5° . Бира се тако да хоризонталне компоненте нормалне силе и силе трења буду у равнотежи.



Слика 3.20 Сабијање цилиндра конусним притискивачем

$$\sum F_{ix} = 0$$

Пројектовањем компоненти F_N и F_T на хоризонталну осу добијамо услов (Кулонов закон трења):

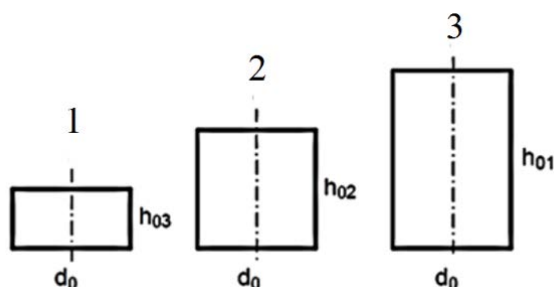
$$F_T \cos \alpha = F_N \sin \alpha \rightarrow \frac{F_T}{F_N} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha = \mu \quad (3.23)$$

$$\alpha = \arctg \mu$$

Када је испуњен претходни услов током сабијања епрувета остаје цилиндричног облика, у супротном долази до одступања у хомогености и појаве просторног напонског стања. Епрувета задржава цилиндрични облик приближно до око $\varphi = 0,45$. Да би се одредио угао α потребно је познавати вредност коефицијента трења μ .

3.4.2.2 Метод сабијања епрувета различитих димензија (поступак Шофмана)

Метода по Шофману се заснива на сабијању више епрувета различитих почетних висина (слика 3.21). Наиме, ова метода је графо-аналитичког типа и њен циљ није смањење коефицијента трења и одржавање једноосног напонског стања у физичком смислу, већ графо-аналитичко елиминисање трења као узрока појаве нехомогеног процеса пластичног деформисања.



Слика 3.21 Серија епрувета за притискивање по Шофману [2]

Епрувете су најчешће цилиндричне и морају бити једнаког пречника. Препоруке за однос висине и пречника исте су као за поступак класичног сабијања. Однос h_0/d_0 не би требало да пређе 2. Само у изузетним случајевима може да иде до 2.5. За сваку епрувету и сваку фазу потребно је одредити вредност силе сабијања и тренутне висине епрувете и на основу тога израчунати вредности стварног притиска p и деформације ε , према следећим формулама:

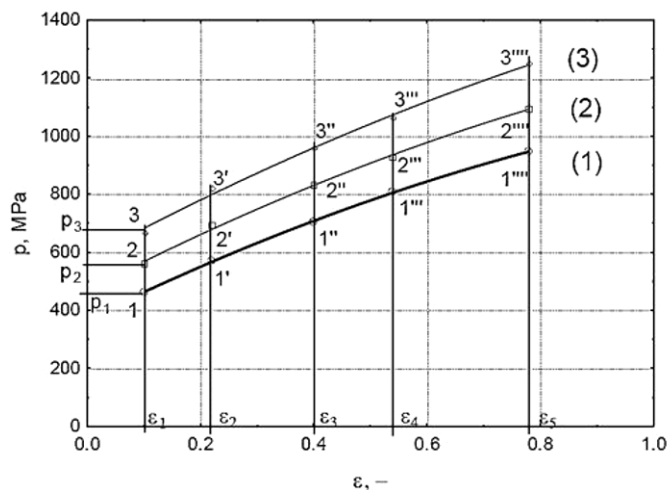
$$A \cdot h = A_0 \cdot h_0 = \text{const.}; A = A_0 \cdot \frac{h_0}{h} \rightarrow p = \frac{F}{A} = \frac{F \cdot h}{A_0 \cdot h_0}; \varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h}{h_0} \quad (3.24)$$

$$p = \sigma_1 = \sigma_e = K; \varepsilon = \varepsilon_e$$

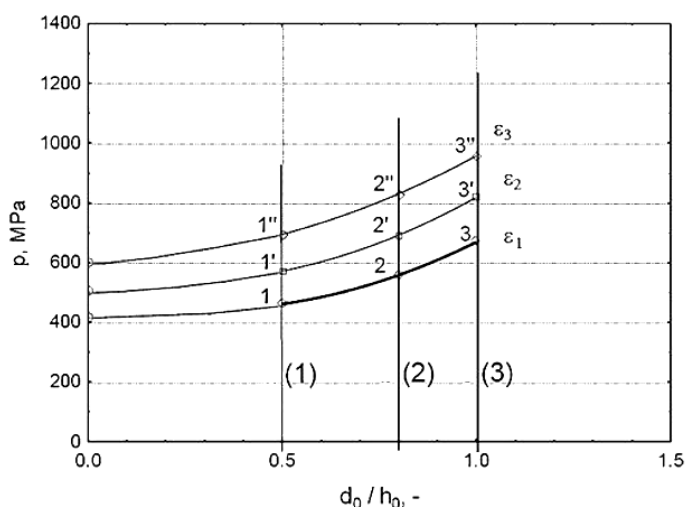
Карактеристика поступка је примена што већег броја епрувета (не мање од 3), са различитим односом почетних димензија.

Поступак Шофмана заснива се на оригиналној идеји екстраполационе елиминације трења, која отклања потребу за физичким напорима подмазивања и смањења трења. Недостатак поступка је ипак, релативно сложен експеримент који захтева пажљив рад и прецизно мерење. Може се јавити приметно расипање резултата и у том случају треба поновити одговарајући део експеримента.

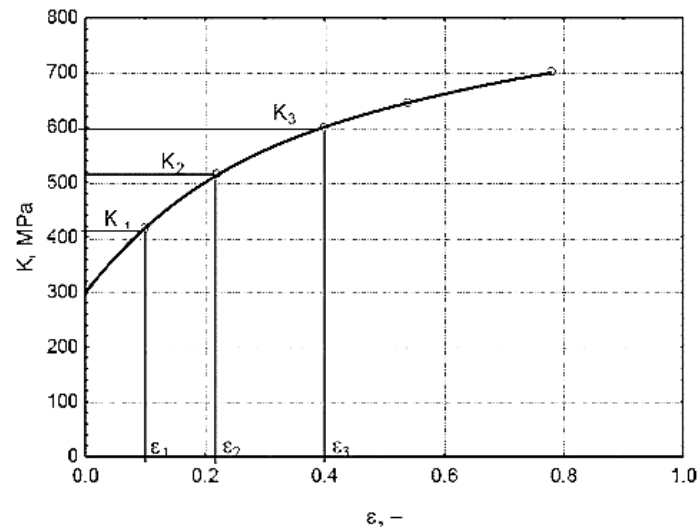
Током експеримента свака епрувета сабија се у неколико фаза. За пример са слике 3.22 то је 5 фаза са деформацијама од ε_1 до ε_5 . Сабијају се три епрувете означене са 1, 2 и 3 на слици 3.21. После добијања дијаграма зависности p - ε (слика 3.22), на основу њега формира се дијаграм зависности p од $\frac{d_0}{h_0}$ (слика 3.23). Приказане су криве за три прве вредности деформације ε . Суштина овог поступка лежи у екстраполирању(продужењу) кривих у лево до пресека са ординатном осом на слици 3.23. Екстраполација може да се ради правом линијом (мања тачност) или кривом линијом (већа тачност) строго поштујући тренд простирања криве. На ординатној оси однос $\frac{d_0}{h_0}$ тежи 0, што значи да вредност пречника фиктивно тежи 0, а са њим и трење на контактної површини. Ако трења нема, притисак p заправо представља стварни, односно еквивалентни напон (деформациони отпор), а деформација ε еквивалентну деформацију. У конкретном примеру добијене су 3 тачке, односно парови вредности притиска p и деформације ε . Сада је могуће формирати координатни систем - деформациони отпор K , деформација ε , унети одговарајуће вредности и формирати криву ојачања, слика 3.24. Почетни део криве од K_0 до K_1 се формира познавањем вредности границе течења или екстраполацијом десног дела формиране криве течења.



Слика 3.22 Дијаграм зависности притиска од деформације



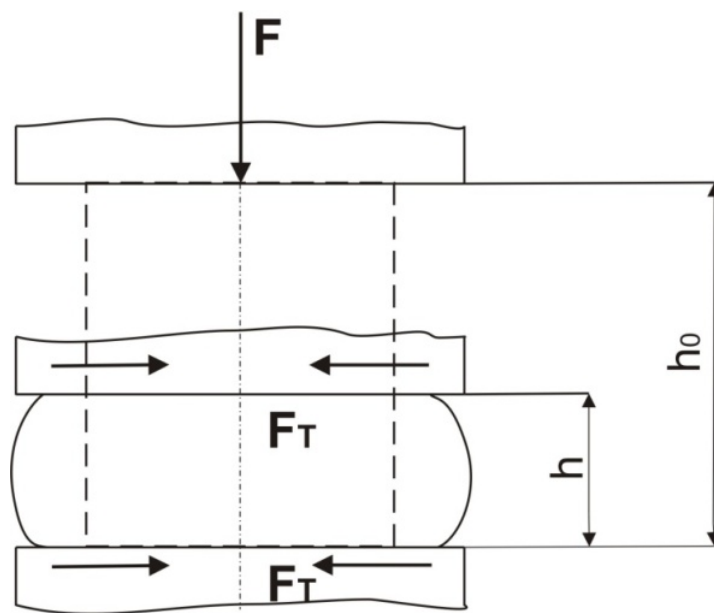
Слика 3.23 Зависност притиска од односа почетног пречника и висине



Слика 3.24 Крива течења формирана на основу поступака Шофмана

3.4.2.3 Метод сабијања са подмазивањем (метода по Растегајеву)

Овај поступак подразумева притискивање цилиндричне епрувете при чему се тежи смањивању контактнoг трења у физичком смислу, односно приближном остварењу процеса хомогеног деформисања.



Слика 3.25. Шема притискивања

$$\text{За } \mu = 0 \rightarrow p = \frac{F}{A} = \sigma_1 = \sigma_e = K \quad (3.25)$$

При израженом трењу деформисање је нехомогено. Добија се просторно напонско стање и буричаст облик комада. Са знатно смањеним трењем деформисање је приближно хомогено, а напонско стање једноосно. Важе следећи изрази:

$$\Delta h = h_0 - h, \text{ mm}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h}{h_0}, \psi = \frac{A - A_0}{A_0} = \frac{h_0 - h}{h}; \varphi = \ln \frac{h_0}{h} \quad (3.26)$$

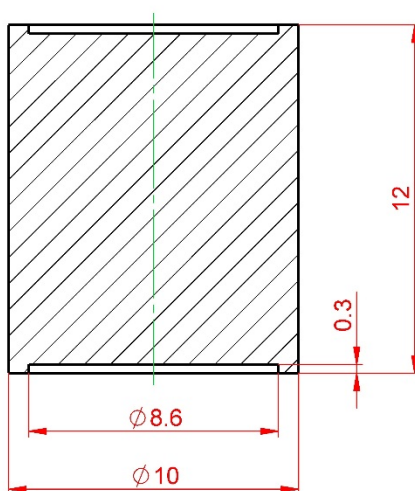
$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_e; \psi = \psi_1 = \psi_e; \varphi = \varphi_1 = \varphi_e$$

$$A_0 \cdot h_0 = A \cdot h = \text{const.}$$

На основу претходних израза добија се коначно:

$$K = \frac{F}{A_0} \cdot (1 - \varepsilon); K = \frac{F}{A_0 \cdot (1 + \psi)}; K = \frac{F}{A_0 \cdot e^\varphi} \quad (3.27)$$

По методи Растегајева на чеоним површинама епрувете потребно је урадити мала удубљења (сл. 3.26) у које се смешта одговарајуће мазиво, најбоље у чврстом стању. Препоручује се удубљење дубине 0,2 до 0,3 mm и ширина руба до ивице (са једне стране) од 0,5 до 0,8 mm [4]. Пример конкретно усвојених мера види се на следећој слици.



Слика 3.26. Пример димензија полазног недеформисаног комада (епрувете) за поступак по Растегајеву [2, 4, 5]

Препоруке за полазне димензије епрувете: $d_0 \geq 10 \text{ mm}$

За веће пречнике:

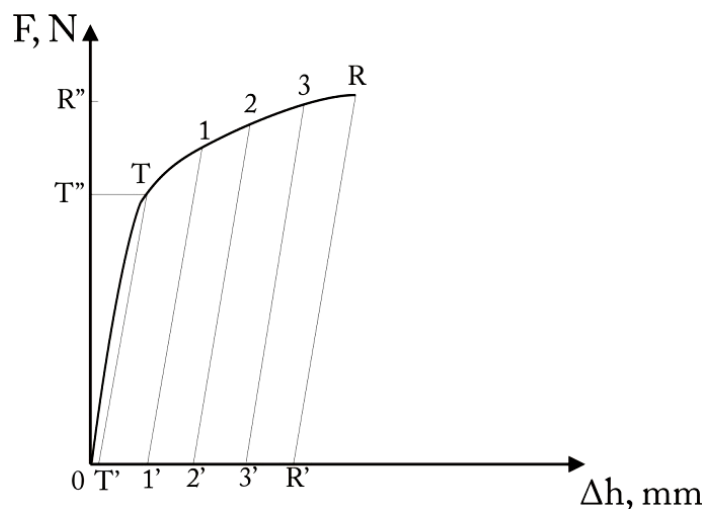
$$h_0 = \left(\frac{1}{4} \div \frac{2}{3} \right) \cdot d_0$$

За мање пречнике: $h_0 \approx d_0$ или највише $h_0 = (1.5 \div 2) \cdot d_0$

Удубљење у челу епрувете се испуњава мазивом (стеарин, графит, маст на бази MoS_2 итд.).

Пре притискивања мере се следеће димензије: $\varnothing d_0$, h_0 [mm], а после реализованог притискивања $F_{\max}$ [daN], Δh_r [mm], током експеримента региструје се дијаграм $F - \Delta h$.

Обрада дијаграма:



Слика 3.27. Пример снимљеног дијаграма $F - \Delta h$

1) Размере:

$$U_F = \frac{F_M}{\overline{OR''}}, \quad \dots, \frac{N}{1mm}; \quad (3.28)$$

$$U_{\Delta h} = \frac{h_0 - h_R}{\overline{OR'}}, \quad \dots, \frac{mm}{1mm}. \quad (3.29)$$

2) Техничка граница течења:

$$\varepsilon_{\%} = 0.2\%$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 = 0.2; \quad \Delta h = 0.002 \cdot h_0; \quad \overline{OT'} = \frac{0.002 \cdot h_0}{U_{\Delta h}} \quad (3.30)$$

$$R_{CP} = \frac{\overline{OT''} \cdot U_F}{A_0}, \quad MPa \quad (3.31)$$

3) Притисна чврстоћа:

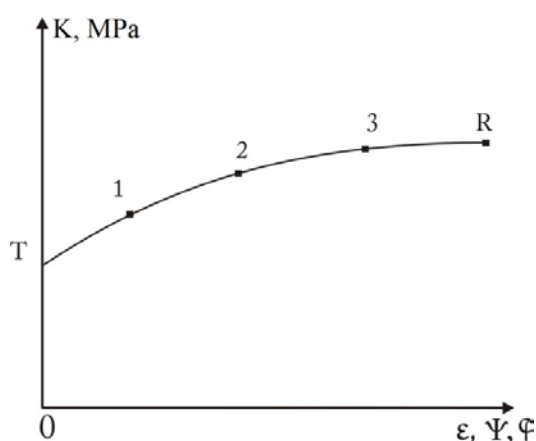
$$R_{CM} = \frac{F_M}{A_0}, \quad MPa \quad (3.32)$$

4) За све тачке треба формирати табелу:

Тачка	T	1	2	3	R
$\Delta h, mm$	≈ 0				
ε	≈ 0				
F, N					
$p' = \frac{F}{A_0}, MPa$					
K, MPa					

У овом приказу, због једноставности одабране су само 3 тачке, поред тачака T и R. Подразумева се да тај број тачака може бити и знатно већи, нарочито ако се прорачун врши софтверски. На основу података из табеле формира се крива ојачања као на сл. 3.28. Уместо ознаке R за крајњу тачку често се користи K (крај или кидање).

5) Крива ојачања

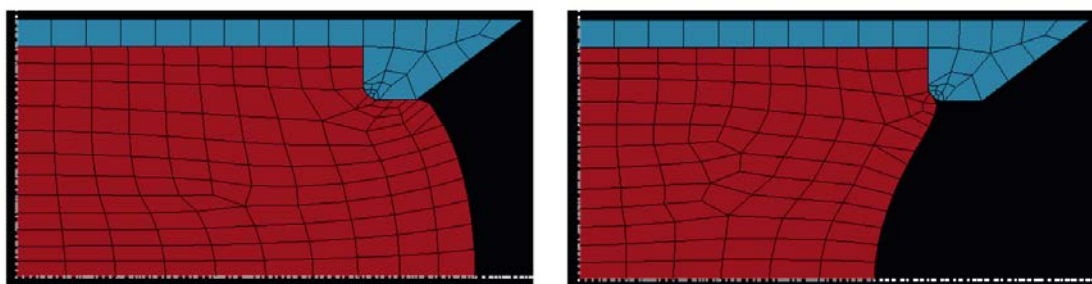


Слика 3.28. Изглед криве ојачања

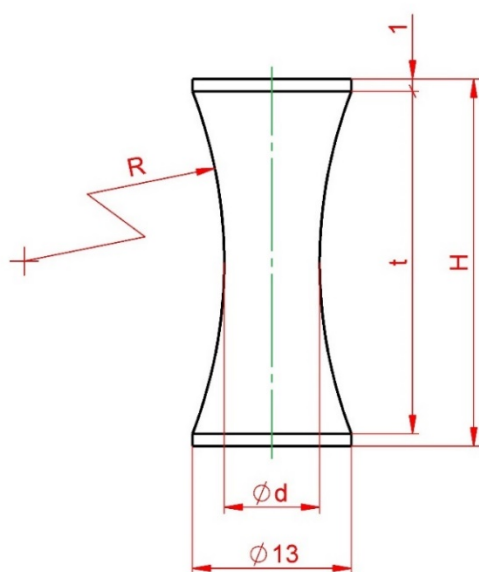
3.4.2.4 Метода конкавних епрувета

И ово је експериментална метода одређивања кривих ојачања сабијањем са покушајем елиминације, боље рећи компензације утицаја трења. Идеја је изложена у раду [7] и реализована на примеру епрувета од меко жареног челика C15E по EN стандарду, или 1016 по стандарду AISI (Џ1220 по старом ЈУС-у). На алату се израђује удубљење (сл. 3.29) које тачно одговара епрувети и на тај начин се спречава клизање у хоризонталној равни, а тиме и трење. У колико би епрувета била класична (цилиндрична) без обзира што се горњи део не шири добио би се буричасти облик односно немохогено напонско поље. Као компензација тога предложена је конкавна епрувета, [7]. Геометрија је осносиметрична са удубљењима на бочним странама. Удубљења су са одговарајућим радијусом према сл. 3.30

и 3.31. Усвојене су предложене димензије у раду [7]: пречник у контактної зони је 13mm, а висина H у распону од 13 до 30 mm. У овом раду усвојен је сличан поступак израчунавања стварног притиска и деформације, као и код претходних метода (по Растегајеву и по Шофману) што је прво приближење јер је геометрија полазног комада сложена и напонско стање засигурно неће бити исто као код чисто цилиндричне епрувете са смањеним трењем. Сасвим је јасно да је ово покушај примене најједноставнијег начина дефинисања еквивалентног стварног напона, односно провере да ли се он може примењивати или је потребно истражити друге методе. Експериментални поступак и обрада резултата су слични као код методе Растегајева (видети претходно поглавље) уз наведене разлике у геометрији алата и епрувете.



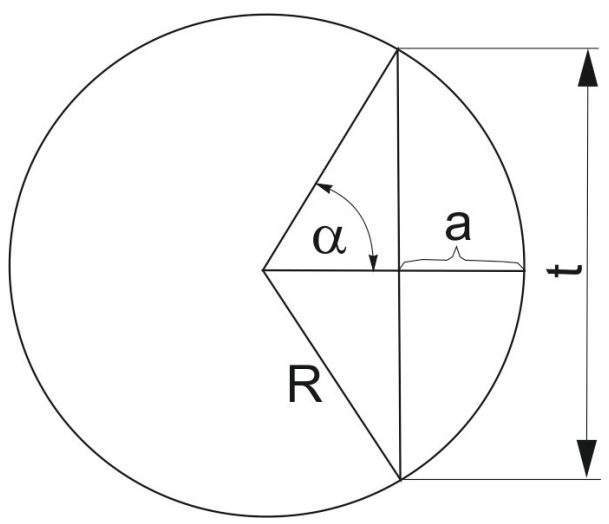
Слика 3.29. Зона контакта код конкавне епрувете



	1	2	3	4
H , mm	30	26	22	20
d , mm	7,8	6,5	5,2	5
R , mm	39	23,8	14,8	12,7
a , mm	2,6	3,25	3,9	3,75
t , mm	28	24	20	18

Слика 3.30 Облик и димензије конкавне епрувете

На сл. 3.31 приказана је скица на основу које је могуће одредити радијус бочне стране у функцији тетиве t и мере a . Тетива је директно везана за познату висину H и висину руба од 1 mm. Величина a је полуразлика познатог пречника од 13 mm и најмањег пречника d . Све усвојене и израчунате димензије за потребну серију епрувета дате су на слици 3.30.



$$R \sin \alpha = \frac{t}{2} ; \quad R \cos \alpha = R - a \quad (3.33)$$

$$R(1 - \cos \alpha) = a$$

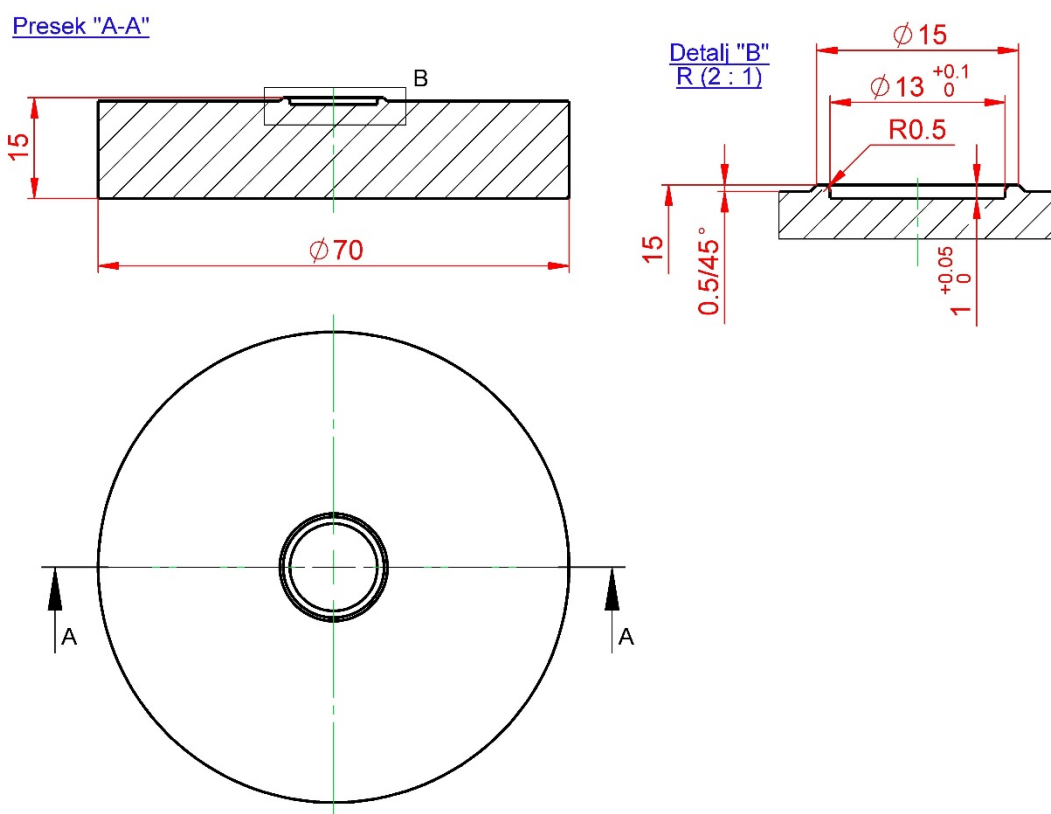
$$R \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{t}{2R} \right)^2} \right) = a$$

Сређивањем претходног израза коначно се добија:

$$R = \frac{a^2 + \frac{t^2}{4}}{2a} \quad (3.34)$$

Слика 3.31 Одређивање бочног радијуса конкавне епрувете

Алат је израђен у виду два уметка који се стављају између равних површина на машини. Геометрија је дата на следећој скици, а изглед на сл. 3.33. Материјал који је коришћен за израду алата је челик С60 према стандарду EN 10083-2.



Слика 3.32 Облик и димензије уметака алата



Слика 3.33 Изглед уметака алата

3.5 Аналитичке апроксимације кривих ојачања

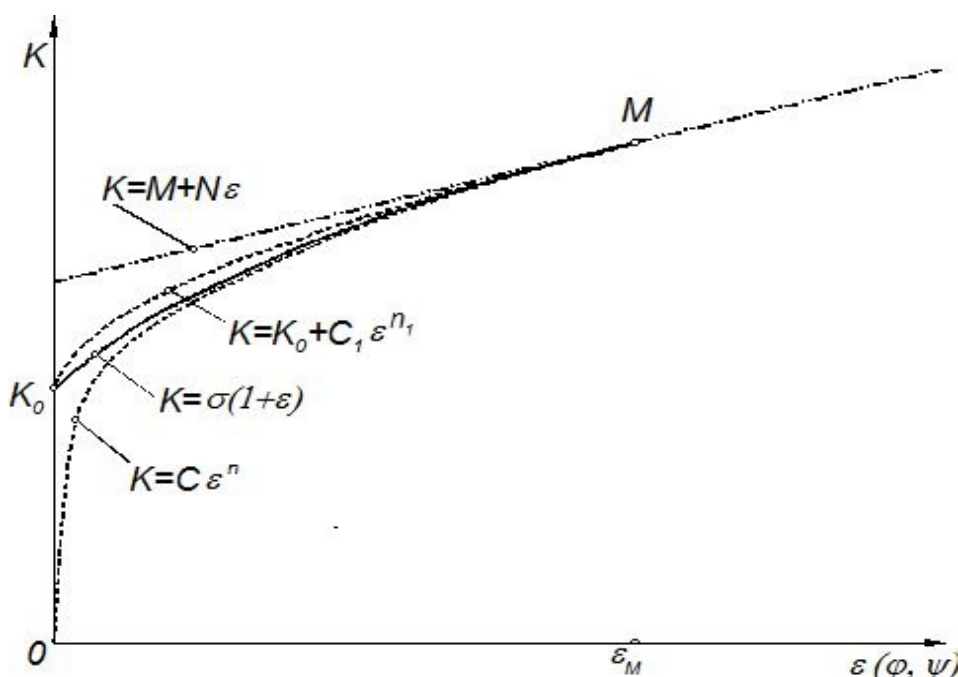
Аналитичке апроксимације кривих ојачања представљају одговарајуће математичке функције које могу да замене експериментално одређивање потпуних кривих ојачања (али не и део експеримента). Углавном су у питању две експоненцијалне и једна линеарна функција. Показатељи деформација могу бити различити, али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

$$K = C \cdot \varphi^n \quad (3.35)$$

$$K = C_1 + C_2 \cdot \varphi^m \quad (3.36)$$

$$K = M + N \cdot \varphi \quad (3.37)$$

На слици 3.34, дати су прикази ових функција у односу на криву ојачања добијену експерименталним поступком.



Слика 3.34 Аналитичке апроксимације криве ојачања[1, 2, 3]

У складу са претходном сликом, коначни изрази ових функција су:

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

$$K = K_M \left(\frac{\varphi}{\varphi_M} \right)^{\varphi_M} ; K = \frac{F_M}{A_0} \cdot e^{\varphi_M} ; \varphi_M = \left(1 + \frac{A_9}{100} \right) \quad (3.38)$$

$$K = K_M \left(\frac{\varphi}{\varphi_M} \right)^{\varphi_M} = \frac{K_M}{\varphi_M^{\varphi_M}} \cdot \varphi^{\varphi_M} \quad (3.39)$$

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

$$K = K_0 + (K_M - K_0) \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_M} \right)^{\frac{K_M}{K_M - K_0} \cdot \varphi_M} \quad (3.40)$$

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

$$K = K_M (1 - \varphi_M + \varphi) \quad (3.41)$$

Непознате константе **C** и **n**, како се из претходних израза види, могу се одредити експериментално (на пр. једноосним затезањем) и одговарају стварном напону и природној деформацији при максималној сили. Константа **C** и експонент **n** могу се усвојити и из одговарајућих препорука (табела 3.3), само ако експеримент није могућ.

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.

Табела 3. 3 Емпиријске вредности константе **C** и експонента **n**[1]

	<i>C</i> [MPa]	<i>n</i>
Легуре алуминијума		
1100-О	180	0.20
2024-T4	690	0.16
6061-0	205	0.20
6061-T6	410	0.05
7075-О	400	0.17
Месинг		
70-30, жарен	900	0.49
85-15, хладно ваљан	580	0.34
Лег. Кобалта жарена	2070	0.50
Бакар жарен	315	0.54
Челик, ниско угљенични		
жарен	530	0.26
Ћ4731 жарен	530	0.26
Ћ4731 хладно ваљан	1015	0.17
Ћ5430 жарен	640	0.15
Ћ4580 нерђајући жарен	1275	0.45
Ћ4170 нерђајући жарен	960	0.10

3.6 Утицај брзине деформације и температуре на деформациони отпор материјала

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

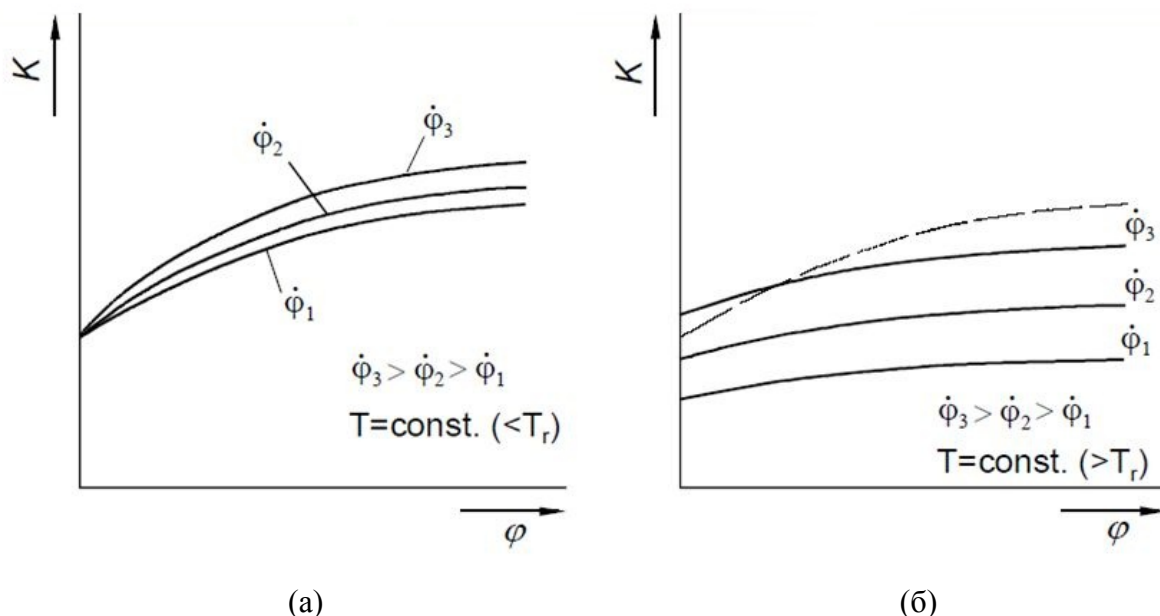
Лабораторијска испитивања су показала да важи однос приказан изразом:

$$\frac{K}{K_0} = \left(\frac{\dot{\phi}}{\dot{\phi}_0} \right)^m \quad (3.42)$$

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 хладној обради ($T < T_r$), доминира утицај степена деформисања, у односу на обраду у топлом стању ($T > T_r$) код које је утицај брзине деформације израженији.

На слици 3.28 приказани су облици кривих ојачања при обради на хладно и на топло и то при три различите брзине деформације.



Слика 3.35 Криве ојачања при различитим брзинама деформације на собној (а) и на повишеној температури (б) [1, 2]

Посматрајући понашање ових функција, може се закључити да у хладном стању важе зависности: $K_{HL} = K(\varphi, \text{материјал})$, а у топлом стању: $K_{TL} = K(T, \varphi, \text{материјал})$

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА (РЕЗУЛТАТИ)

Материјал коришћен у експримуенту је чист бакар ($\text{Cu} \geq 99,95\%$ i $P \approx 0,003$) (Cu-PHC, тј. CW020A према европском стандарду EN 13601:2013). То је дезоксидисани бакар који је намењен за електроиндустрију, за процесну индустрију, процесну опрему и друге намене. Има добру деформабилност, добру електричну проводљивост итд. Главне механичке карактеристике су дате у следећој табели. Важно је напоменути да се ови подаци односе на затезање, а да је одређивање карактеристика при притискивању дато у овом раду. Такође, треба нагласити значај стања материјала. У конкретном случају је средње ојачано стање R 240.

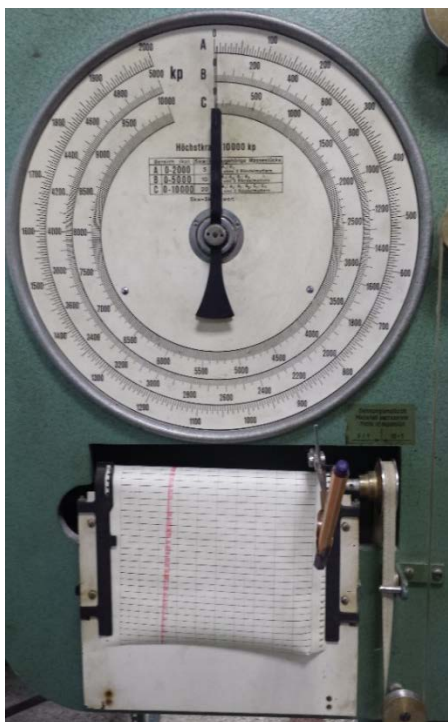
Табела 4.1 Механичке карактеристике материјала

Ознака бакра	Стање мат.	Механичке особине				
		R_m N/mm ² (MPa)	$R_{p0.2}$ N/mm ² (MPa)	A		HB
				A ₅ % најмања	A ₁₀ % најмања	оријентационо
Cu-PHC	R240	240÷300	>180	>14	≥8	65-90

Машина на којој је вршен највећи део испитивања је класична механичка машина за испитивање материјала WPM ZDM 10/91 са мерним опсегом силе од 0 - 10 000 daN, односно приближно 0 - 100 kN, при брзини деформисања 5 mm/min.



Слика 4.1 Механичка кидалица у лабораторији за ОМД и машинске материјале



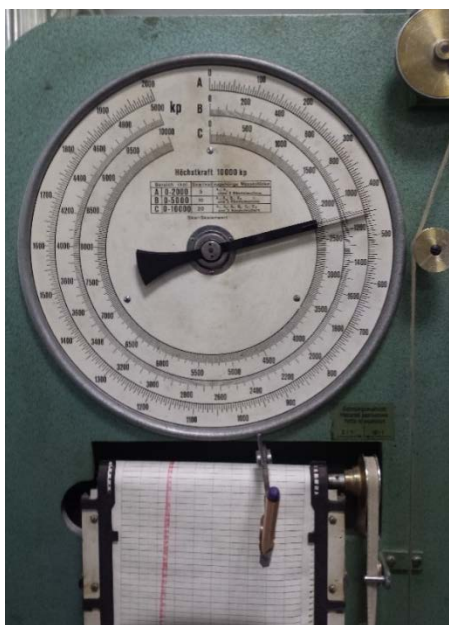
Слика 4.2 Скала динамометра са писачем



Слика 4.3 Алат са комадом пре сабијања

Комад се поставља на доњи део алата који је везан за покретни део машине, односно на кружну плочу са полусферичним ослоном са доње стране. Оваквим полусферичним лежајем могуће је компензовати евентуалне грешке у геометрији комада у току процеса испитивања. Горњи део алата је непокретан и везан за мерни систем машине (сл. 4.3).

На слици 4.4 приказана је скала динамометра која приказује тренутно оптерећење машине током процеса испитивања. Види се и писач који исписује дијаграм силе.



Слика 4.4 Скала динамометра за време теста



Слика 4.5 Алат са комадом после сабијања

Машина на којој је рађен мањи део испитивања тестом сабијања је серво-хидраулични уређај типа SHIMADZU (тип EHF-EV101K3-070-0A), који је намењен за

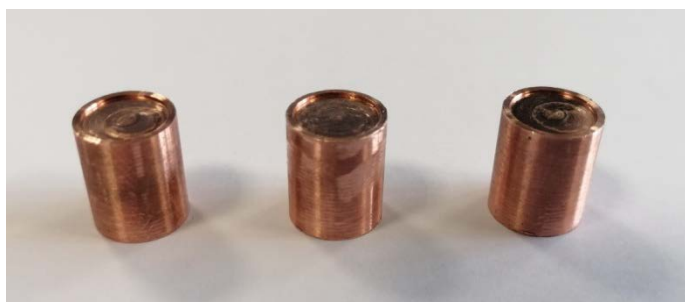
статичка и динамичка испитивања материјала на мерном опсегу силе 0-100 kN, на собној и повишеним температурама до 1000°C. То је савремени компјутеризовани систем и налази се у Центру за инжењерски софтвер и динамичка испитивања Факултета инжењерских наука (сл. 4.6).



Слика 4.6 Серво пулзатор SHIMADZU

4.1 Тест по Растегајеву

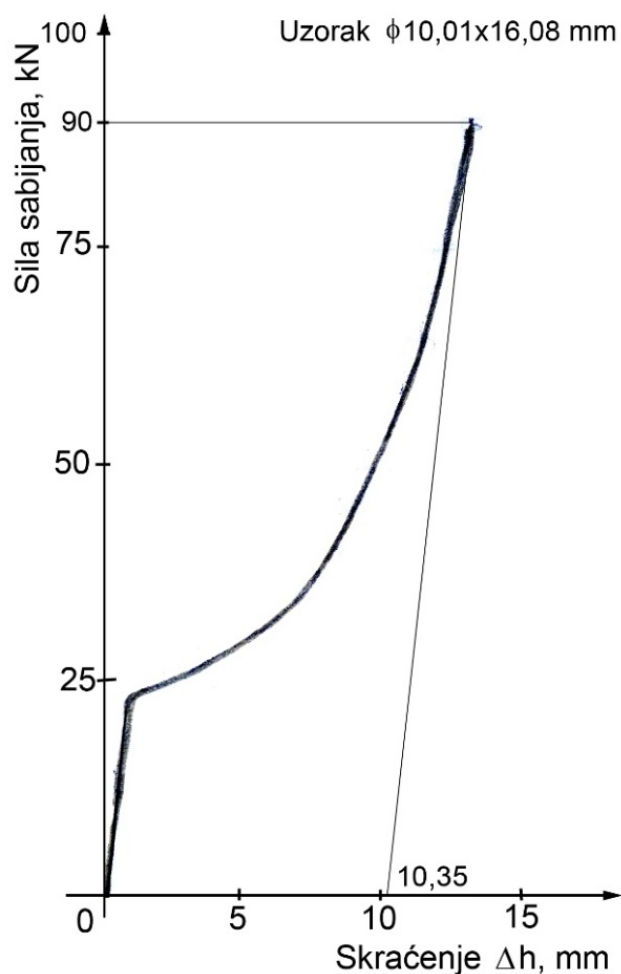
Пре реализације теста по Растегајеву (методика дата у поглавља 3.4.2.3) урађено је испитивање слободним сабијањем без елиминације трења (сл. 4.9) са циљем процене разлике, односно процене ефекта методе Растегајева у смањивању трења.



Слика 4.7 Изглед епрувета за тест Растегајева пре сабијања



Слика 4.8 Изглед епрувета за тест Растегајева после сабијања

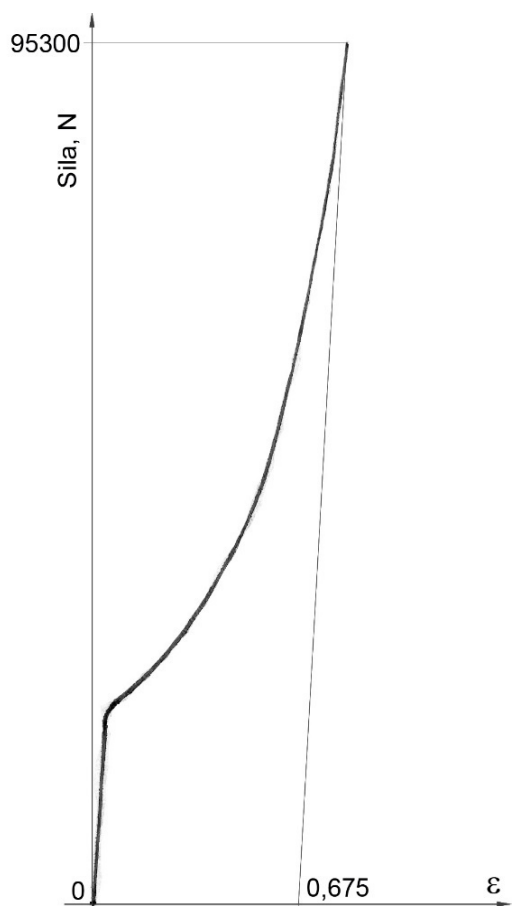


Слика 4.9 Дијаграм сила – скраћење (сабијање са трењем)

На сликама 4.10 и 4.11 дати су дијаграми притискивања у тесту Растегајева за две епрувете (1 и 2). Као илустрација поступка дат је прорачун најважнијих величина и комплетна табела за епрувету 2. Крива чији су подаци у табели 4.1 приказана је на слици 4.13.

На сл. 4.12 дате су криве ојачања за поступак са трењем (горња крива) и по Растегајеву за епрувету 1 (доња крива). На дијаграму су дате и две апроксимационе функције (полиноми трећег степена) за обе криве ојачања.

На слици 4.13 упоредно су приказане криве ојачања по Растегајеву за обе епрувете (1 и 2). Криве су сличне, али је евидентна велика осетљивост процеса на мале промене утицајних фактора.



Слика 4.10 Дијаграм сила – деформација по Растегајеву - епр. 1



Слика 4.11 Дијаграм сила – скраћење по Растегајеву - епр. 2

Прорачун важнијих величина за поступак по Растегајеву (епрувета 2) детаљно објашњен у поглављу 3.4.2.3:

$$h_0 = 12,0 \quad h_k = 3,8 \text{ mm}$$

$$d_0 = 10,0 \quad F_k = 9530 \text{ daN}$$

$$\Delta h_k = 8,2 \text{ mm} ; \quad A_0 = 78,54 \text{ mm}^2$$

$$U_{\Delta h} = \frac{8,2}{61,8} = 0,133 \frac{\text{mm}}{1\text{mm}} ; \quad U_F = \frac{95300}{250,5} = 380,44 \frac{\text{N}}{1\text{mm}} ;$$

$$K = \frac{F}{A_0} \cdot (1 - \varepsilon) ; \quad K = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{1}{e^\varphi} ; \quad \frac{F}{A_0} = p'$$

$$\varepsilon_T = 0,2\%$$

$$\frac{\Delta h_T}{h_0} \cdot 100 = 0,2$$

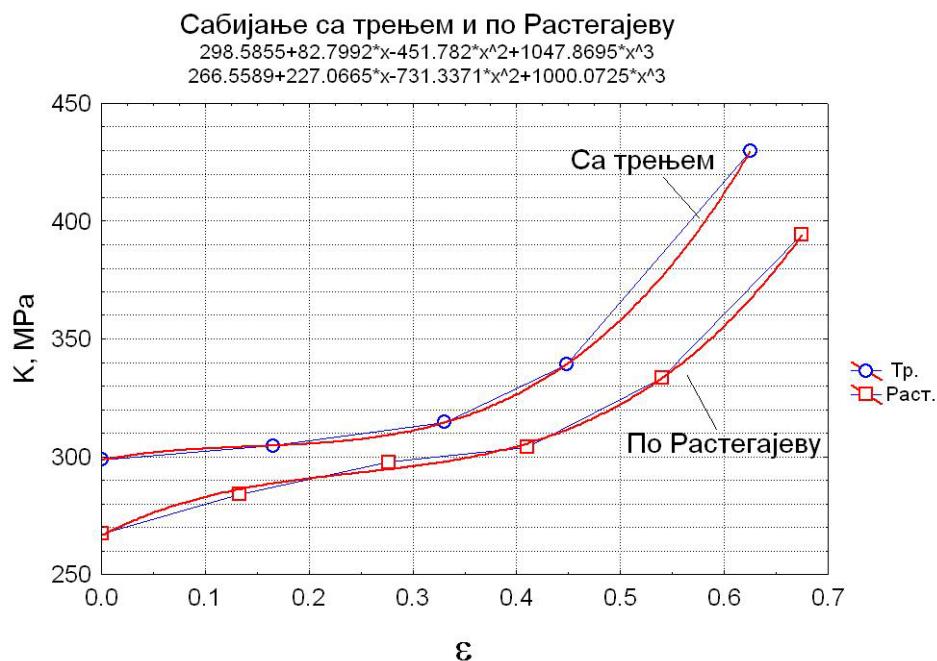
$$\Delta h_T = 0,002 \cdot h_0$$

$$\Delta h_T = 0,002 \cdot 12 = 0,024$$

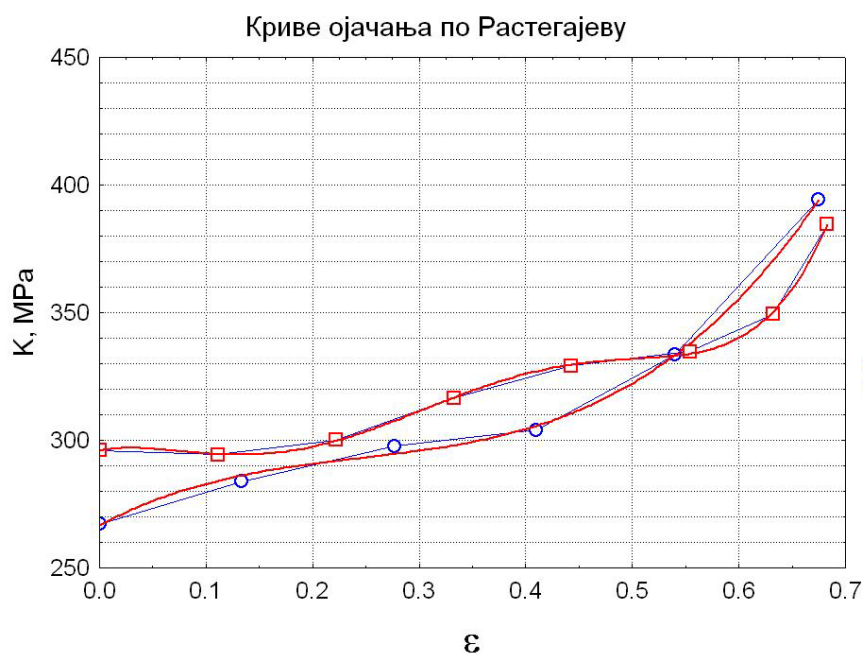
$$\overline{OT} = \frac{0,024}{0,133} = 0,18 \text{ mm}$$

Таб. 4.1 Резултати обраде дијаграма са слике 4.11 - епрувете 2

Тачка	T	1	2	3	4	5	6	K
Δh , mm	≈ 0	1,33	2,67	4	5,32	6,65	7,58	8,2
ε , -	$\approx 0(0,002)$	0,1108	0,222	0,333	0,443	0,554	0,632	0,683
F, N	23321	25984	30519	37283	46413	58968	74566,2	95300
$p'=F/A_0$, MPa	297	331	388,5	474	591	750,8	949,4	1213,4
K, MPa	296	294,3	300,2	316,6	329,2	334,8	349,4	384,6



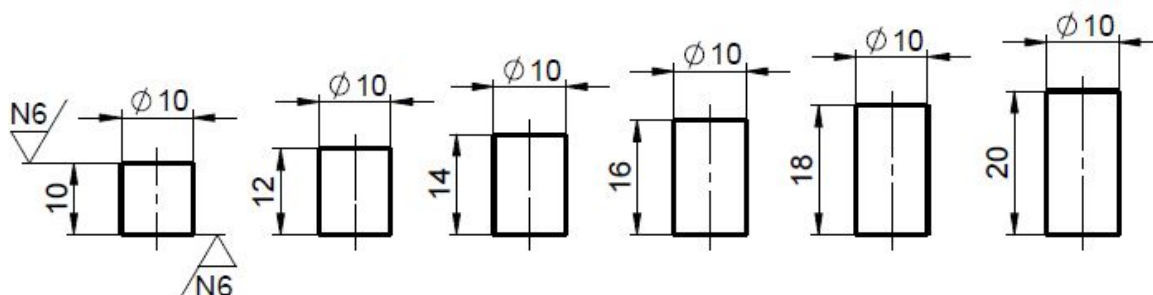
Слика 4.12 Криве ојачања (са трењем и по Растегајеву - епрувета 1)



Слика 4.13 Криве ојачања (по Растегајеву - епрувете 1 и 2)

4.2 Тест по Шофману

Методика теста по Шофману детаљно је објашњена у поглављу 3.4.2.2. У конкретном испитивању предвиђено је 6 епрувета (сл. 4.14 и сл. 4.15). Нумерисане су од 1 до 6 при чему је епрувета са највећом висином од номиналних 20 mm, означена са 1. Прва фаза сабијања показала је да код епрувета веће висине долази до мањег или већег кривљења за које није лако утврдити узрок (геометрија епрувете, нехомогеност материјала, тачност вођења на машини итд.). Из тог разлога је епрувета 1 одбачена и експеримент је настављен са преосталих пет.



Слика 4.14 Геометрија серије епрувета за тест по Шофману



Слика 4.15 Изглед серије епрувета за тест по Шофману пре и после сабијања [6]

У табелама 4.2. до 4.8 дати су резултати потребни за формирање прве зависности (p од ϵ). Вредности стварног притиска p и деформације ϵ се одређују на основу израза 3.24. У табелама су дате тачне димензије епрувета и подаци по фазама сабијања. Извођено је сабијање у 4 фазе уз прецизно мерење силе сабијања и деформације скраћења. Због девијације епрувете 1 у табели су подаци за само две фазе после којих је испитивање те епрувете прекинуто.

Таб. 4.2 Резултати за епрувету 1

ИСПИТИВАЊЕ ПО ШОФМАНУ			
Епрувета бр. 1: $d_0 \times h_0 = 10,01 \times 20,03 \text{ mm}$; $A_0 = 78,7 \text{ mm}^2$			
F, daN	h, mm	p, МПа	ϵ , -
2275	19,95	288	0,004
4500	9,94	284	0,504

Таб. 4.3 Резултати за епрувету 2

ИСПИТИВАЊЕ ПО ШОФМАНУ			
Епрувета бр. 2: $d_0 \times h_0 = 9,99 \times 17,99 \text{ mm}$; $A_0 = 78,34 \text{ mm}^2$			
F, daN	h, mm	p, МПа	ϵ , -
2250	17,91	286	0,004
4500	9,86	314,8	0,45
6760	7,29	349,6	0,59
9010	6,06	387,4	0,66

Таб. 4.4 Резултати за епрувету 3

ИСПИТИВАЊЕ ПО ШОФМАНУ			
Епрувета бр. 3: $d_0 \times h_0 = 10 \times 15,95 \text{ mm}$; $A_0 = 78,54 \text{ mm}^2$			
F, daN	h, mm	p, МПа	ϵ , -
2260	15,88	286,5	0,004
4490	9,48	339,8	0,4
6760	6,88	371,3	0,57
9005	5,55	399	0,65

Таб. 4.5 Резултати за епрувету 4

ИСПИТИВАЊЕ ПО ШОФМАНУ			
Епрувета бр. 4: $d_0 \times h_0 = 10,02 \times 14,05 \text{ mm}$; $A_0 = 78,85 \text{ mm}^2$			
F, daN	h, mm	p, МПа	ϵ , -
2290	13,97	289	0,005
4490	8,34	338	0,36
6750	6,17	376	0,49
9000	5,04	409,4	0,56

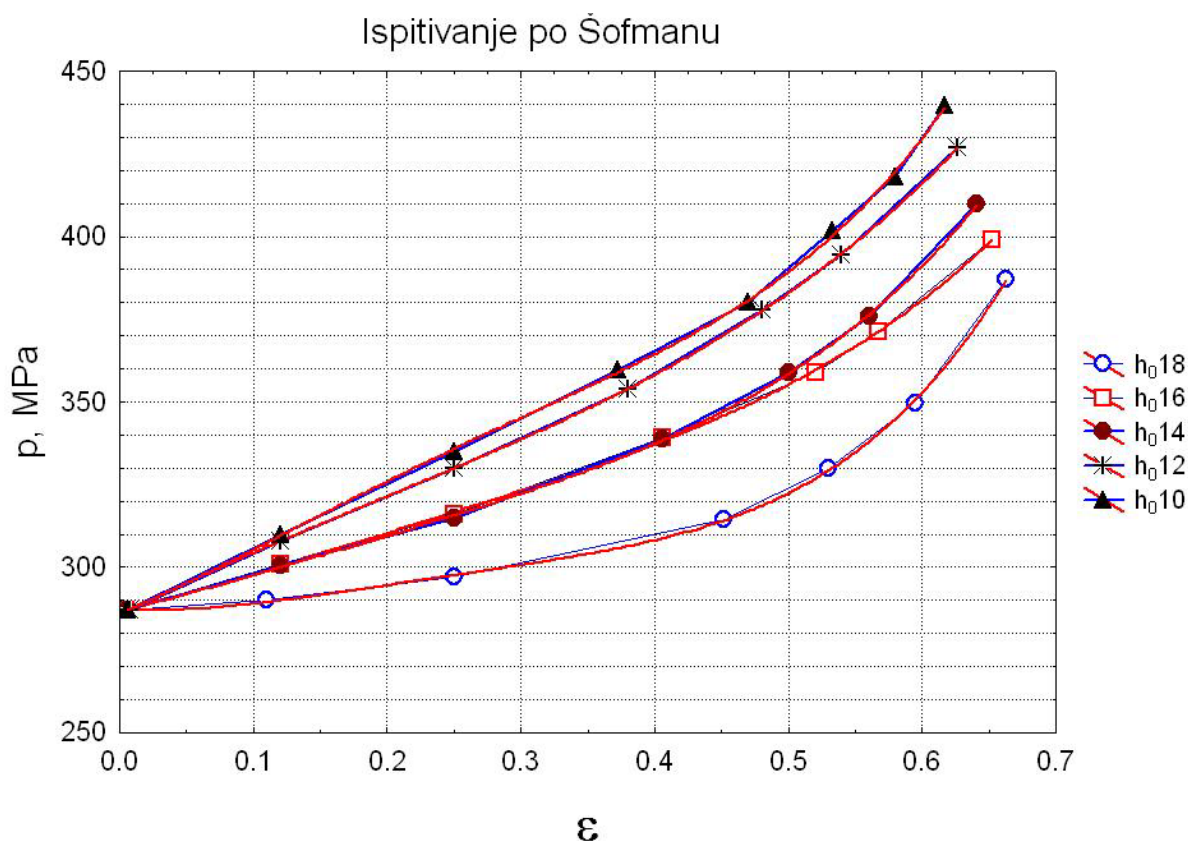
Таб. 4.6 Резултати за епрувету 5

ИСПИТИВАЊЕ ПО ШОФМАНУ			
Епрувета бр. 5: $d_0 \times h_0 = 10,01 \times 11,98 \text{ mm}$; $A_0 = 78,69 \text{ mm}^2$			
F, daN	h, mm	p, МПа	ϵ , -
2260	11,89	285	0,005
4495	7,42	353,8	0,28
6750	5,51	394,5	0,4
9005	4,47	427	0,47

Таб. 4.7 Резултати за епрувету 6

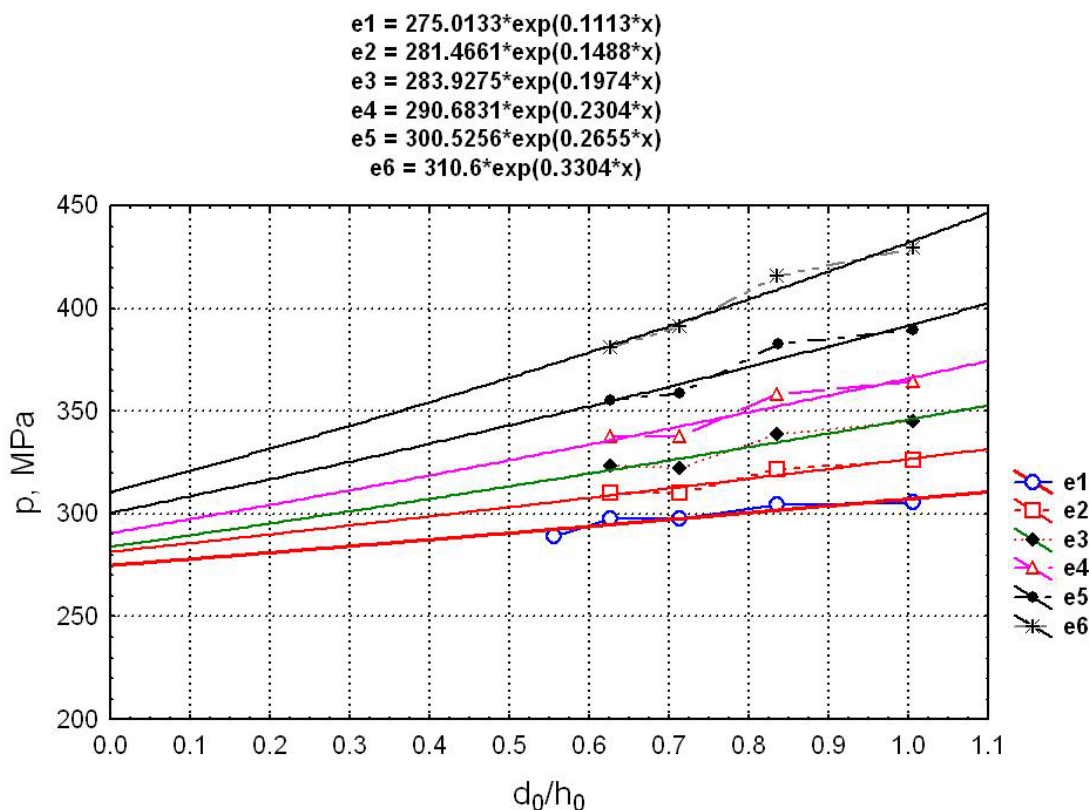
ИСПИТИВАЊЕ ПО ШОФМАНУ			
Епрувета бр. 6:		$d_0 \times h_0 = 10 \times 9,94 \text{ mm}; A_0 = 78,54 \text{ mm}^2$	
F, daN	h, mm	p, MPa	ε , -
2290	9,88	289,8	0,004
4500	6,24	359,7	0,23
6760	4,64	401,8	0,33
9010	3,81	439,7	0,38

На основу табела од 4.3 до 4.7 формиран је дијаграм на сл. 4.16. Треба обратити пажњу да се свака крива односи на једну епрувету и да она има виши положај што је висина епрувете мања. Према томе, најнижа епрувета висине номинално 10 mm одговара кривој са највишим положајем.



Слика 4.16 Дијаграм зависности стварног притиска од релативне деформације скраћења (први експериментални дијаграм)

На основу вредности са претходног дијаграма формира се дијаграм на сл. 4.17. У извесном смислу може се сматрати да се вредности са кривих у вертикалном правцу пребацују на апсцисну осу дијаграма на сл. 4.17. Извесну тешкоћу представља немогућност коришћења епрувета веће висине (мања вредност односа d_0/h_0) што је резултирало релативним удаљењем тачака од ординатне осе. То умањује тачност екстраполације која се изводи. Сваки новодобијени низ тачака односи се на једну деформацију што је и логично.



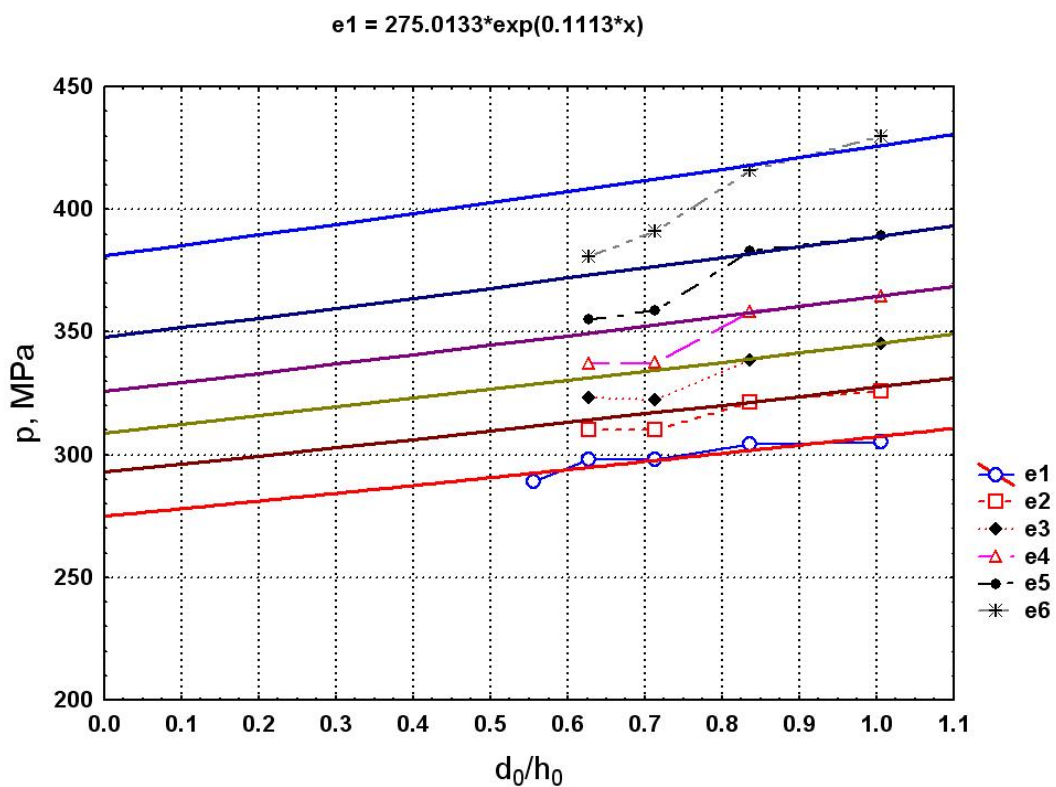
Слика 4.17 Зависност притиска од односа почетног пречника и висине

На сл. 4.17 крива са ознаком e1 односи се на релативну деформацију од 0,1 са дијаграма на сл. 4.16, а крива e6 на деформацију 0,6. Екстраполација је изведена према аутоматизованом поступку софтвера STATISTICA функцијом $p = Ce^{ax}$ [6]. Апроксимационе функције за свих 6 кривих виде се на самом дијаграму.

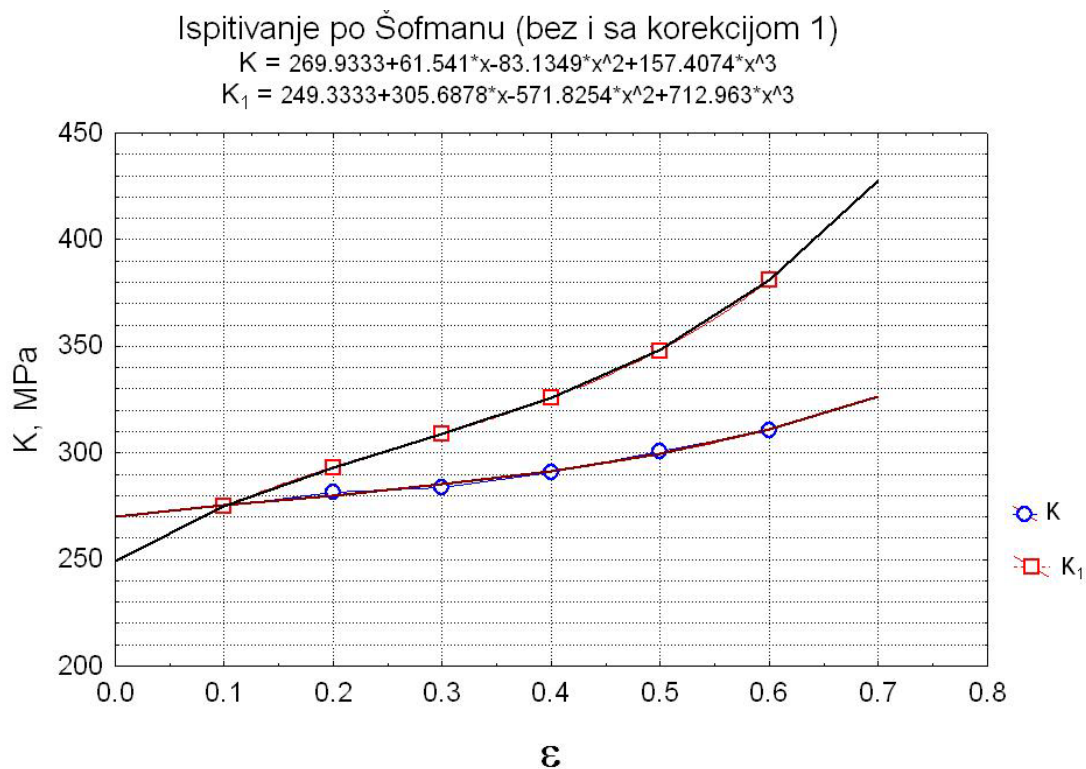
На овај начин добијена је доња крива на сл. 4.19 са релативно ниским вредностима деформационог отпора у односу на резултате по тесту Растегајева. Тешко је открити прави узрок, али се претпоставило да при већим деформацијама и са повећањем висине епрувете утицај има приметна девијација при сабијању. Зато је логично претпоставити да је при најмањој деформацији девијација епрувете најмања, а резултати најтачнији. Због тога је примењена корекција начина екстраполације тако што је усвојен нагиб криве за e1 као константан и повучене еквидистантне криве кроз серије тачака за деформације од e2 до e6. Тако је добијен дијаграм на сл. 4.18 и горња крива на сл. 4.19 означена са K_1 . Поступак је означен као корекција 1 или Шофман 1.

Примењена је и трећа варијација поступка по Шофману - кориговање односа d/h с обзиром на остварену деформацију при сабијању. Овакав поступак се у литератури често препоручује [5]. Кориговање се врши датом формулом на основу почетног односа пречника и висине (d_0/h_0) и релативне деформације скраћења. Добијен је распоред тачака на сл. 4.20 и извршена екстраполација по принципу константног нагиба екстраполационих кривих. Крива течења за овај поступак дата је на сл. 4.21 (K_1). Поступак је означен као корекција 2 или Шофман 2.

$$\frac{d}{h} = \frac{d_0}{h_0} \frac{1}{(1 - \varepsilon)\sqrt{1 - \varepsilon}}$$

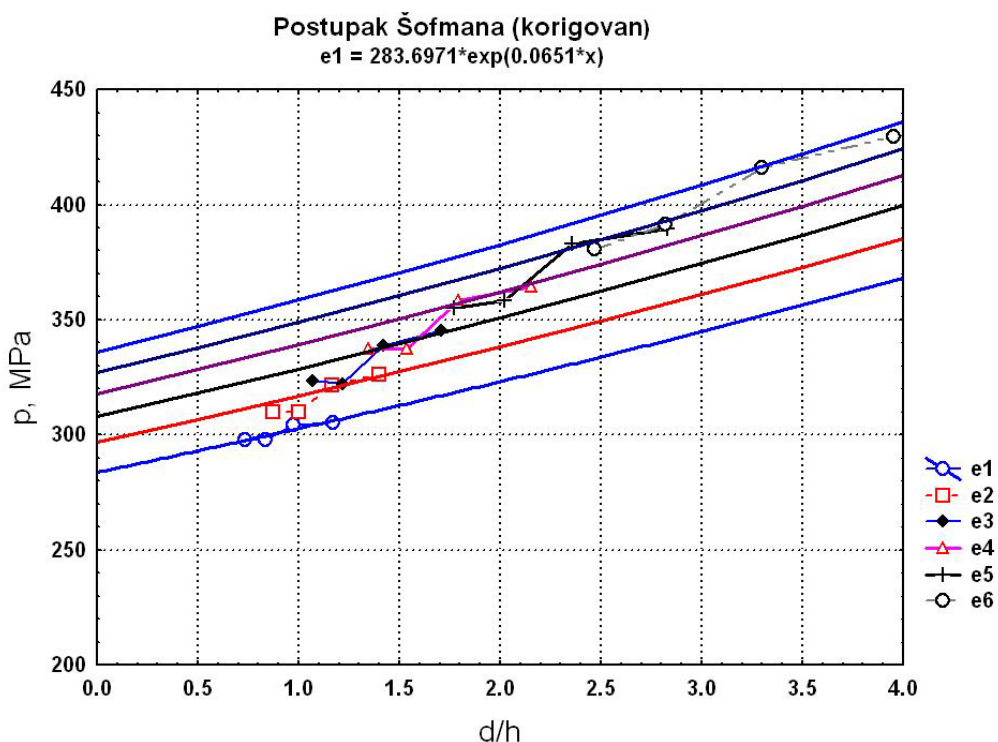


Слика 4.18 Зависност притиска од односа почетног пречника и висине
(коригована екстраполација – корекција 1)

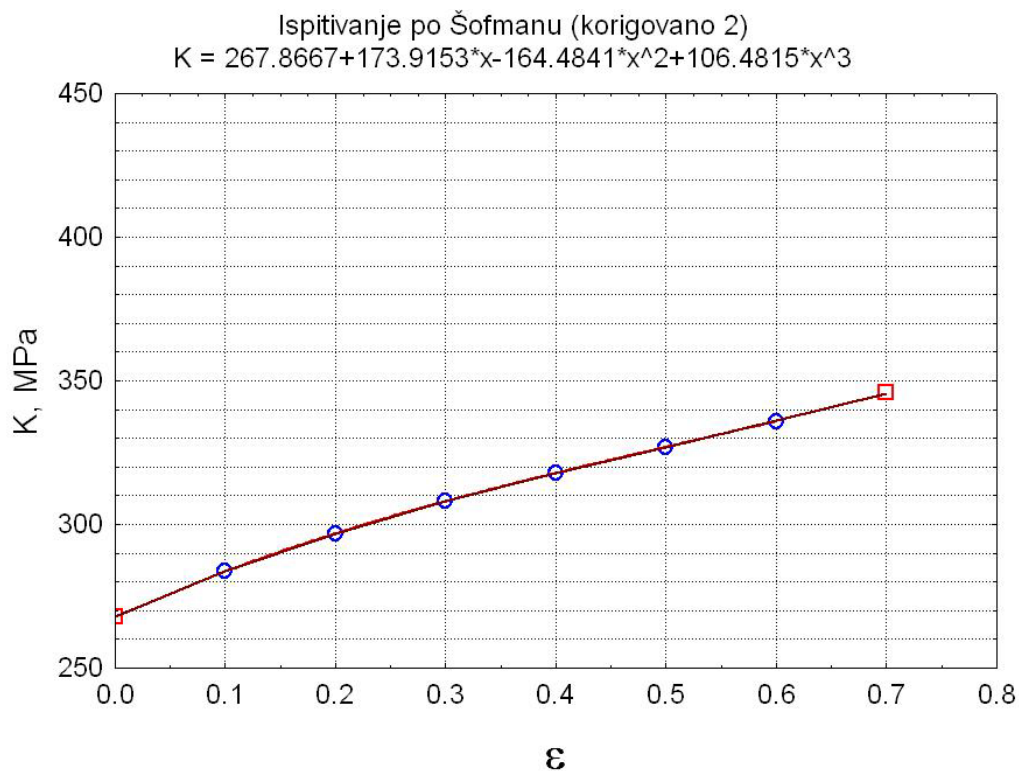


Слика 4.19 Криве ојачања (основни поступак - K и корекција 1 - K₁)
(упоредни приказ кривих ојачања према слици 4.17 и 4.18)

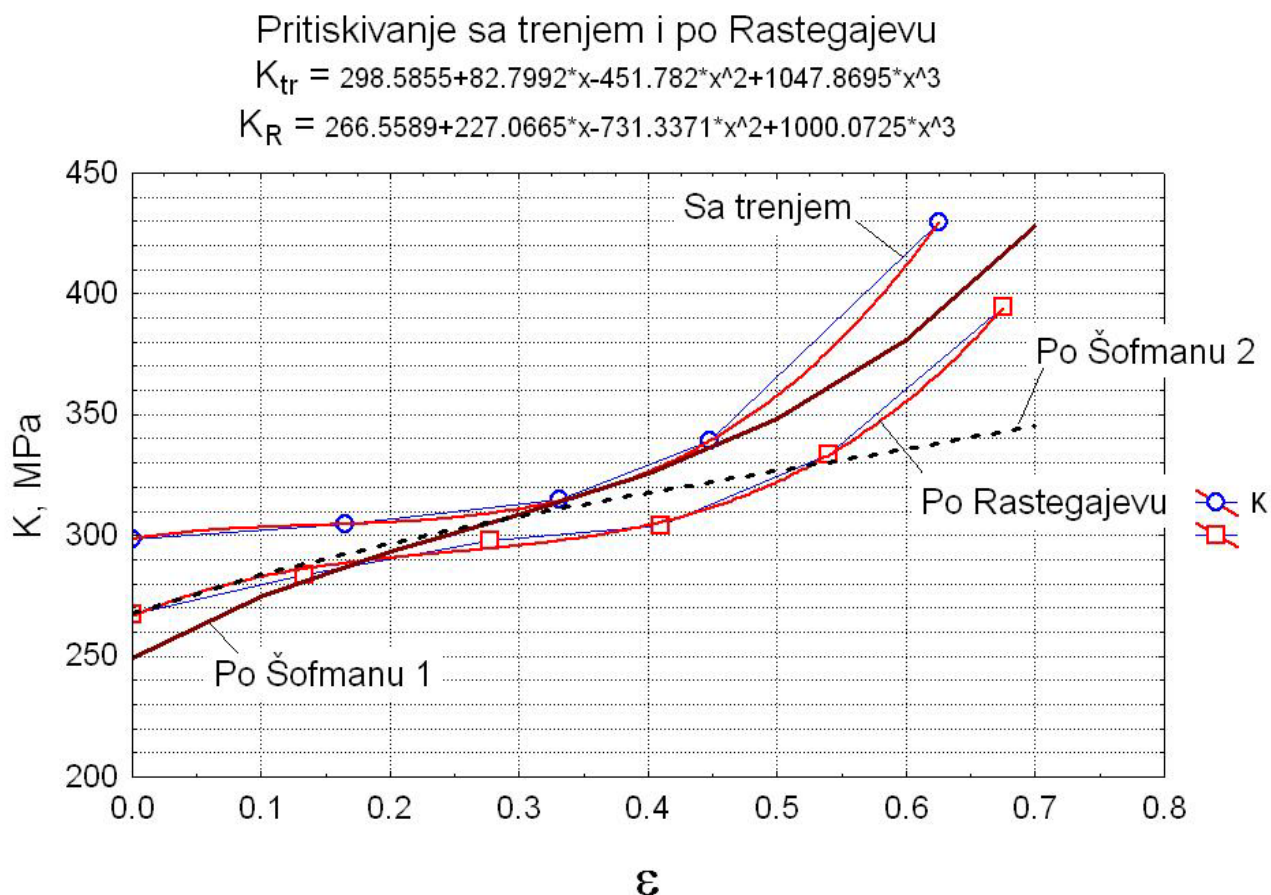
Упоредни дијаграм кривих по Растегајеву и два поступка по Шофману дат је на сл. 4.22. Основна варијанта по Шофману није приказана због изразито ниских вредности деформационог отпора. Ако се крива течења добијена по Растегајеву прихвати као референтна оба коригована поступка по Шофману дају релативно прихватљиве резултате.



Слика 4.20 Зависност притиска од односа пречника и висине (дијаграм са применом односа d/h уместо d_0/h_0 - корекција 2)



Слика 4.21 Крива ојачања (према сл.4.20) [5]



Слика 4.22 Упоредни приказ кривих ојачања (по Растегајеву и обе корекције по Шофману)

4.3 Тест са конкавним епруветама

У поглављу 3.4.2.4 детаљно је изложена ова метода и поменуте су неке њене особине. Припрема епрувета је релативно захтевна јер је потребно постићи релативно сложену геометрију са врло тачном управношћу вертикалне осе и чеоних површина. Такође, показало се да је потребна машина за испитивање са веома тачним вођењем, како би се остварио довољно велики степен деформисања без девијација и код епрувета са великом висином.



Слика 4.23 Изглед епрувета пре сабијања



Слика 4.24 Изглед епрувета после сабијања

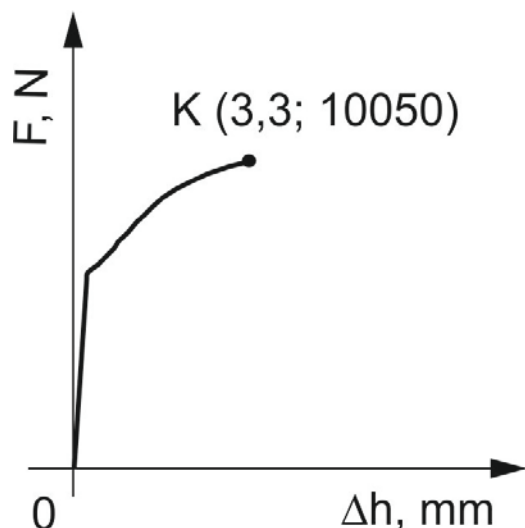
Због осетљивости поступка припремљене су 4 серије по 3 једнаке епрувете са идејом да се одбаце оне које буду неуспешно испитане из било ког разлога. У табели 4.8 дат је преглед података за свих 12 сабијених епрувета. Значење свих ознака дато је у поглављу 3.4.2.4.

Таб. 4.8 Резултати сабијања конкавних епрувета

Сабијање конкавних епрувета												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
h_0 , mm	20	20,1	20	22	22	22	26	25	25	30	30	30
d , mm	5	5	5	5,1	5,2	5,2	6,5	6,55	6,5	7,8	7,9	7,9
R , mm	12,7			14,8			23,8			39		
Δh_k , mm	6,3	3,3	2	5,5	5,9	3,7	4,75	3	3,2	4,1	4,3	3,62
ϵ_k -	0,315	0,164	0,1	0,25	0,27	0,168	0,183	0,12	0,12	0,137	0,143	0,12
F_k , daN	1280	1005	1100	1330	1640	1500	1810	1560	1800	2190	2400	2300

Испитивано је осам епрувета на класичној механичкој машини (бр. 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10 и 11), а четири су остављене као резерва за проверу на другој новијој савременој машини високе тачности са прецизнијим вођењем (епрувете бр. 3, 6, 9 и 12). Код класичне машине тешкоћу је представљало закошавање епрувете (девијација) због зазора у горњој непокретној чељусти (боље рећи ослоњу при сабијању). Код нове машине тешкоћу је представљала немогућност сабијања са силом већом од 25 KN због неодговарајућих чељусти. Све то је резултирало релативно малим степеном деформације. Било, како било, од 12 испитаних епрувета одбачене су 4 (превелика девијација, лоше снимљен дијаграм итд.) и то 1, 5, 8 и 10. На следећим сликама и табелама дати су дијаграми сабијања и табеле

са подацима за криве ојачања добијене на основу обраде тих дијаграма. Само за епрувету бр. 2 биће наведени пратећи подаци као илустрација, док је за остале урађено потпуно аналогно и овде није дато. Већ је поменуто да је за израчунавање стварног напона узет најједноставнији начин који је практично исти као код поступка Растегајева и Шофмана иако је попречни пресек епрувете променљив. Претпостављено је да је најмањи пресек критичан, да се он заправо деформише па је коришћен за израчунавање напона.



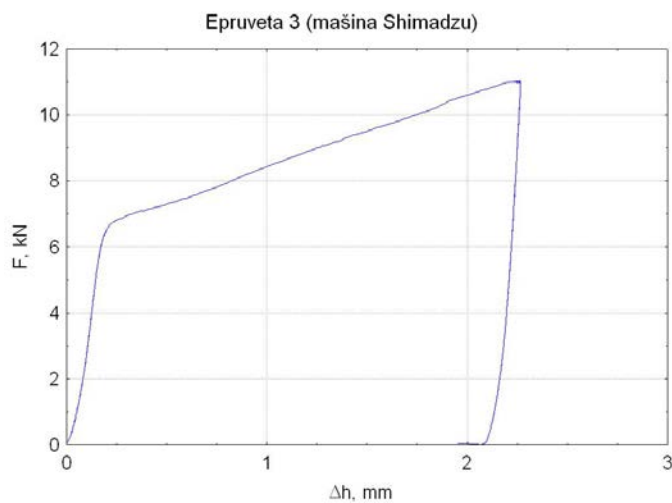
$$\begin{aligned}
 h_0 &= 20,1 \text{ mm} ; h_k = 16,8 \text{ mm} \\
 d_0 &= 5,0 \text{ mm} \quad F_k = 10050 \text{ N} \\
 \Delta h_k &= 3,3 \text{ mm}^2 ; A_0 = 19,63 \text{ mm}^2 \\
 U_{\Delta h} &= \frac{3,3}{22} = 0,15 \frac{\text{mm}}{1 \text{ mm}} ; U_F = \frac{10050}{45} \\
 &= 223,333 \frac{\text{N}}{1 \text{ mm}} ;
 \end{aligned}$$

Слика 4.25 Дијаграм сабијања за епр. 2

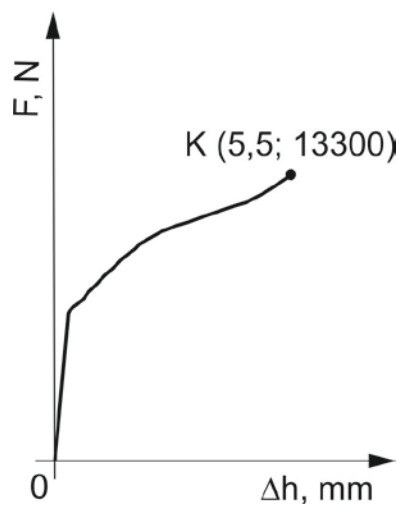
Таб. 4.9 Резултати сабијања конкавне епрувете бр. 2

Тачка	Т	1	2	3	4	5	К
$\Delta h, \text{mm}$	≈ 0	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,3
ε	≈ 0	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,164
F, N	6365	7370	8375	9089,7	9491,7	9826,7	10050
$p = \frac{F}{A_0}, \text{MPa}$	324,2	375,4	426,6	463	483,5	500,6	512
K, MPa	323,6	364,2	401	421,4	425,5	425,5	428

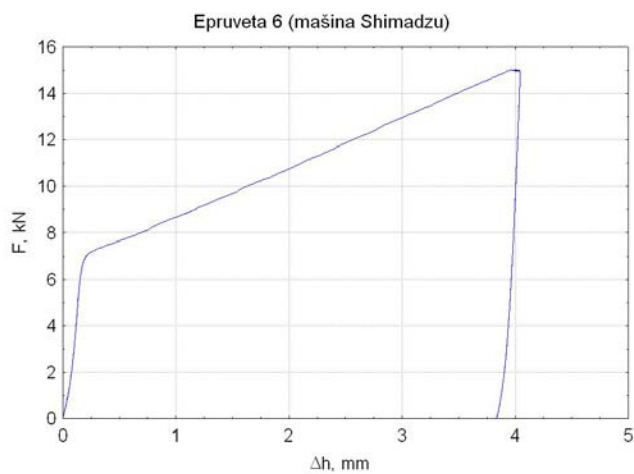
За наредне епрувете, због погоднијег искоришћавања простора, биће дати прво дијаграми, а затим табеле са резултатима обраде дијаграма, односно подацима за формирање кривих ојачања.



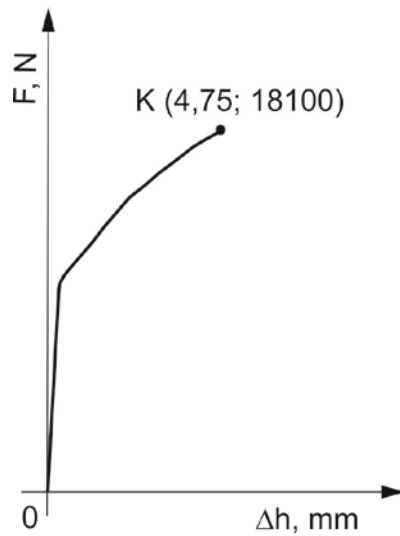
Слика 4.26 Дијаграм сабијања за епр. 3



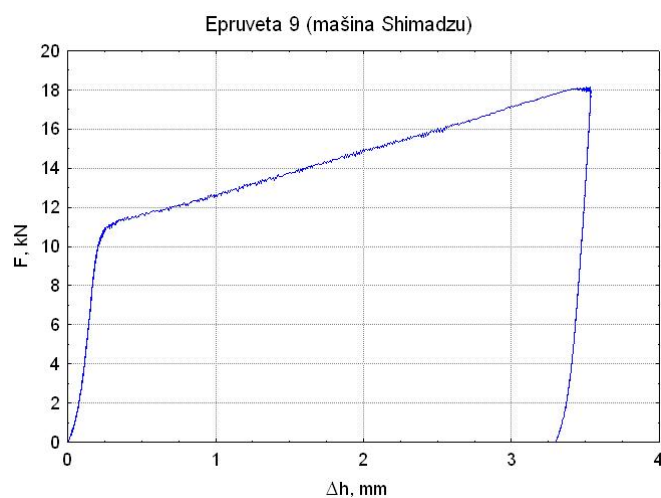
Слика 4.27 Дијаграм сабијања за епр. 4



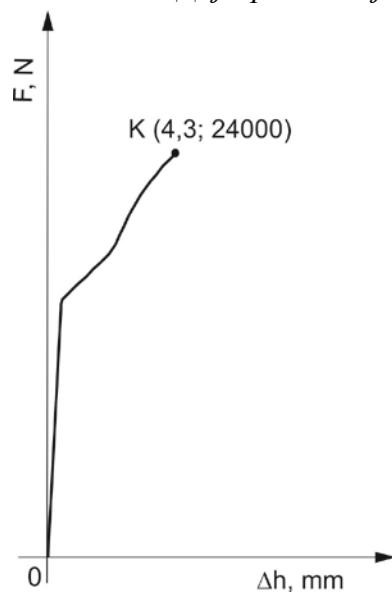
Слика 4.28 Дијаграм сабијања за епр. 6



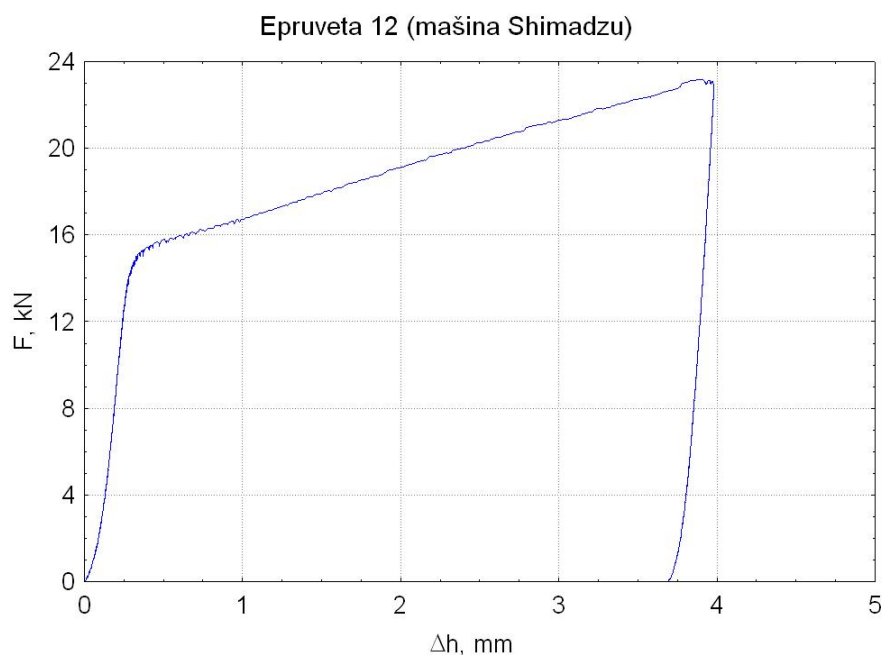
Слика 4.29 Дијаграм сабијања за епр. 7



Слика 4.30 Дијаграм сабијања за епр. 9



Слика 4.31 Дијаграм сабијања за епр. 11



Слика 4.32 Дијаграм сабијања за епр. 12

На наредним страницама биће приказане табеле са резултатима обраде претходних дијаграма, односно са подацима потребним за формирање кривих ојачања. Обрада дијаграма рађена је потпуно аналогно поступку код методе Растегајева. Дефинисана је граница течења и још неколико тачака до крајње тачке К. За сваку тачку одређене су величине дате у табели.

Таб. 4.10 Резултати сабијања конкавне епрувете бр. 3

Тачка	Т	1	2	3	К
$\Delta h, mm$	$\approx 0,04$	0,49	0,98	1,47	≈ 2
ϵ	$\approx 0,002$	0,024	0,049	0,073	0,1
F, N	6612	7752	8968	10030	11000
$p = \frac{F}{A_0}, MPa$	336,8	394,9	456,8	511	560,4
K, MPa	336,1	385,4	434,4	473,7	504,4

Таб. 4.11 Резултати сабијања конкавне епрувете бр. 4

Тачка	Т	1	2	3	4	5	К
$\Delta h, mm$	≈ 0 0,044	0,882	1,764	2,646	3,528	4,41	5,5
ε	≈ 0 (0,002)	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,25
F, N	6916	8592	10108	10906	11438	12103	13300
$p = \frac{F}{A_0}, MPa$	338,5	420,5	494,8	533,8	559,9	592,4	651
K, MPa	337,8	403,7	455,2	459,1	470,3	473,9	488,25

Таб. 4.12 Резултати сабијања конкавне епрувете бр. 6

Тачка	Т	1	2	3	К
$\Delta h, mm$	$\approx 0,04$	0,924	1,848	2,77	$\approx 3,7$
ε	$\approx 0,002$	0,042	0,084	0,126	0,168
F, N	7084	9007	11081,4	13054,8	15000
$p = \frac{F}{A_0}, MPa$	333,5	424	521,7	614,6	706,2
K, MPa	332,8	406,2	477,9	537,2	587,6

Таб. 4.13 Резултати сабијања конкавне епрувете бр. 7

Тачка	Т	1	2	3	4	5	К
$\Delta h, mm$	≈ 0	0,78	1,56	2,34	3,12	3,9	4,75
ε	0,002	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,183
F, N	10485,7	12008,6	13606,5	15104,4	16153	17226,5	18100
$p = \frac{F}{A_0}, MPa$	316,0	361,9	410,1	455,2	486,8	519,2	545,5
K, MPa	315,3	351	385,5	414,2	428,4	441,3	445,7

Таб. 4.14 Резултати сабијања конкавне епрувете бр. 9

Тачка	Т	1	2	3	К
$\Delta h, mm$	$\approx 0,05$	0,785	1,57	2,36	3,2
ε	$\approx 0,002$	0,03	0,06	0,09	0,12
F, N	10951	12787	14559	16331	18000
$p = \frac{F}{A_0}, MPa$	330	385,4	438,8	492,2	542,5
K, MPa	329,3	373,8	412,5	447,9	477,4

Таб. 4.15 Резултати сабијања конкавне епрувете бр. 11

Тачка	Т	1	2	3	4	5	К
$\Delta h, mm$	≈ 0	0,732	1,464	2,2	2,93	3,66	4,3
ε	0,002	0,024	0,049	0,073	0,098	0,122	0,143
F, N	15315,8	16370,1	17563,2	18923	21364,4	22890,4	24000
$p = \frac{F}{A_0}, MPa$	312,6	334,1	358,4	386,2	436	467,1	489,8
K, MPa	312	326,1	341	358	393,3	410,1	419,8

Таб. 4.16 Резултати сабијања конкавне епрувете бр. 12

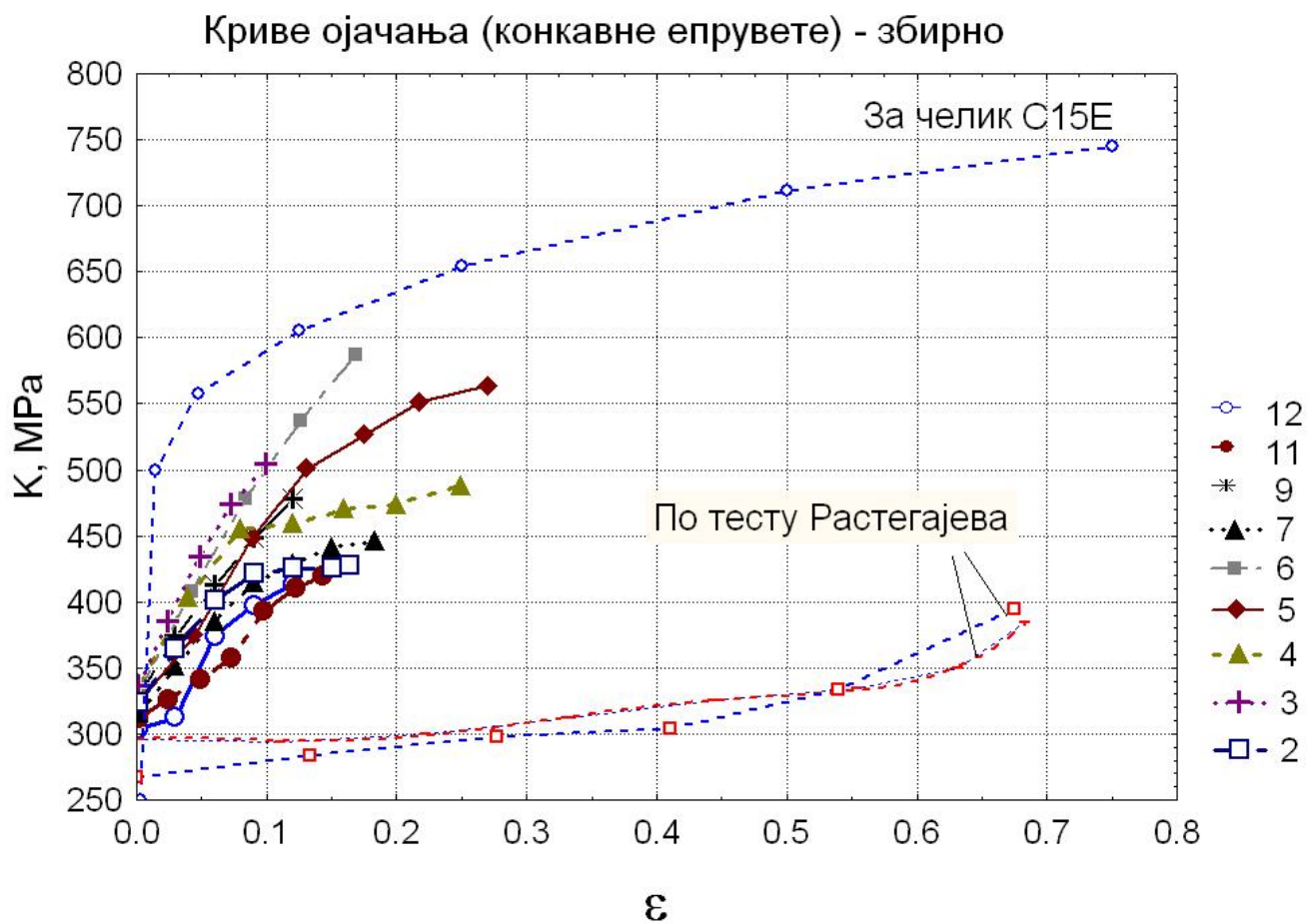
Тачка	Т	1	2	3	К
$\Delta h, mm$					
ε	$\approx 0,002$	0,03	0,06	0,09	0,12
F, N	14,9	15,8	19,5	21,4	23,0
$p = \frac{F}{A_0}, MPa$	304,1	322,4	398	436,7	469,4
K, MPa	303,5	312,7	374,1	397,4	413,1

Сагледавајући резултате из претходних табела запажају се две особености: релативно мали степен деформисања за поступак сабијања и релативно високе вредности деформационог отпора. Треба одмах рећи да је поступак по Растегајеву познат као веома поуздан на основу вишедеценијске употребе. За потребе обог рада поновљен је два пута, уз један тест без смањивања трења, и резултати имају солидно слагање. Утицаји који могу да доведу у питање тачност тог теста сведени су на најмању меру. Због свега тога тест Растегајева се може сматрати референтним за све поступке одређивања кривих ојачања сабијањем.

На сл. 4.33 дат је укупан збирни дијаграм сабијања на коме су приказане криве ојачања за свих девет (укључујући и епр. 5) конкавних епрувета (ознаке броја епрувете су дате са стране). Поред тога, приказане су две криве добијене тестом по Растегајеву и крива добијена у раду [7]. Треба имати у виду да се крива у раду [7] односи на челик С15Е (по ЕН стандардима), односно $\check{C}1220$ по старом ЈУС стандарду, који је испитиван у меко жареном стању. Прво што се запажа јесте да криве за конкавне епрувете леже знатно изнад кривих по Растегајеву. Чини се да разлог првенствено треба тражити у начину израчунавања еквивалентног напона т.ј. деформационог отпора код конкавних епрувета. Такође, запажа се релативно добро међусобно слагање кривих за конкавне епрувете, без обзира на димензије епрувете, врсту машине итд. Код Растегајева се засигурно постиже напонско стање веома блиско чисто једноосном притискивању, док код конкавних епрувета то није тако. Очигледно, поједностављење да се одређивање напона везује само за критични (најмањи) пресек даје велике (нереалне) вредности. Истовремено током самог експеримента, као што је поменуто, постојале су тешкоће око закошавања (девијације) на класичној машини и остваривање релативно малих сила на савременој машини.

До извесне недоумице доводи положај криве ојачања из рада [7]. Иако је реч о челику С15Е у меко жареном стању чини се да је положај криве нешто виши од очекиваног што сугерише да поступак конкавних епрувета даје више вредности и у условима тачнијег израчунавања деформационог отпора.

Међутим, чињеница је да постоји велика разлика у резултатима испитивања бакра између теста по Растегајеву (па и Шофману са корекцијама) и теста са конкавним епруветама у његовој поједностављеној варијанти. Поступак израчунавања еквивалентног напона према критичном пресеку није погодан и потребно је остваривати знатно веће степене деформације. Јасно је да би у наредним испитивањима применљивости методе конкавних епрувета то требало имати у виду.



Слика 4.33 Укупни упоредни дијаграм сабијања

5. ЗАКЉУЧАК

Централни део теме овог мастер рада односио се на феномен деформационог ојачавања металних материјала, односно обојених метала. Одабран је пример чистог бакра, за кога је ову врсту података релативно тешко наћи у расположивој литератури, нарочито за процесе запреминског обликовања сабијањем. Планиран је и изведен опсежан експеримент који је обухватио три значајне експерименталне методе за одређивање кривих ојачања поступцима сабијања.

На првом месту је класична проверена метода сабијања цилиндричних епрувета по Растегајеву. Поновљена је два пута и резултати су постављени као референтни за даља поређења.

На другом месту је метода Шофмана, позната по томе што испуњава давнашњи сан истраживача о откривању методе без примене подмазивања, односно физичке елиминације трења. Примењене су три варијанте ове методе (основна, и две кориговане, 1 и 2).

На трећем месту је новија метода конкавних епрувета која је испитивана у свом поједностављеном виду. Мисли се на упрошћен начин одређивања еквивалентног напона.

После детаљног разматрања ефекта ојачања при запреминском обликовању и детаљног разматрања резултата изведених експерименталних испитивања могу се извести следећи закључци:

- ефекат деформационог ојачања при запреминским поступцима суштински смањује деформабилност материјала, нарочито у процесима хладне обраде и потребно га је детаљно познавати,
- најбољи начин за сагледавања овог ефекта јесте тачно експериментално одређивање кривих ојачања,
- тест одређивања кривих ојачања сабијањем по Растегајеву потврдио је своју поузданост, тачност и применљивост,
- основни тест по Шофману даје нижи положај криве ојачања,
- кориговани тест по Шофману, овде означен као корекција-1, даје веома погодне резултате блиске резултатима по Растегајеву,
- тест конкавних епрувета је најсложенији за примену и у својој поједностављеној варијанти даје знатно виши положај кривих ојачања,
- за сигурнију примену теста конкавних епрувета треба обезбедити машину са поузданим вођењем при већим ходовима и већим силама сабијања (до 100 KN), као и проналажење начина за тачније одређивање притисног еквивалентног напона,
- коначна препорука је, на првом месту, поуздана примена теста по Растегајеву, а затим примена теста по Шофману у варијанти корекције-1.

На крају треба рећи да експериментална испитивања деформационог ојачавања при запреминским процесима пластичног обликовања метала, као и испитивања других сродних феномена, немају алтернативу. И поред великих тешкоћа, трагања за једноставнијим и оптималним варијантама итд., експерименти представљају најбољи начин за коначну процену теоријских и других поставки и поступака.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александровић С.: Технологија пластичног обликовања метала, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, 2010.
- [2] Александровић С.: Савремени поступци пластичног обликовања, скрипта, Moodle портал Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2018. год.
- [3] Александровић С.: Деформабилност, циклус предавања за FIAT Automobili Srbija, Крагујевац, септембар 2014.
- [4] Вујовић, В.: Деформабилност, Универзитет у Новом Саду, Институт за производно машинство, 1992.
- [5] Маринковић, В.: Деформационо ојчавање, Машински факултет, Ниш, 1995.
- [6] Aleksandrovic S, Milosavljevic Dj.: Accuracy of pure copper flow curves determination in compression tests, DEMI 2019, Banja Luka, RS B&H, may 2019., Proc. p. 119-124.
- [7] Usami, M., Oya: Estimation of work-hardening curve for large strain using friction free compression test, Proceedia Engineering, no. 81, p.371-376., 2014.
- [8] Zhuang X., et. al.: Determination of flow curve and plastic anisotropy of medium/thick metal plate, Journal of Iron and Steel Research International, vol. 22, no. 6, p. 506-512, 2015.
- [9] Zhu R., et al.: Flow curve correction and processing map of 2050 Al-Li alloy, Transactions of Nonferrous Materials Society of China, no. 28, p. 404-414, 2018.
- [10] Web site AZoM – Publications in Metal Science, www.azom.com (sept. 2020.)