

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Андријана Н. Јовановић

**Деформабилност танких лимова и дијаграми
граничне деформабилности**

Мастер рад

Крагујевац, 2017.

Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Обрадивост у процесима пластичног обликовања

Број индекса: 318/2015

Андријана Н. Јовановић

**Деформабилност танких лимова и дијаграми граничне
деформабилности**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Србислав Александровић, ред. проф.

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Задатак:

У првом делу рада кандидат треба да изложи теоријско разматрање појава и феномена у процесима пластичног обликовања металних материјала, и то: деформационог ојачавања, хомогености деформисања и анизотропије. Затим треба дати кратак преглед параметара обрадивости. У наставку дати детаљније разматрање граничне деформабилности код лимова и при запреминском обликовању.

У другом делу рада треба приказати изведени експеримент. Први део експеримента треба да обухвати одређивање дијаграма граничне деформабилности за три савремена лима: каросеријски челични лим, лим од алуминијумске легуре и лим од аустенитног нерђајућег челика. Други део експеримента треба да обухвати примену познавања граничне деформабилности и деформационе анализе на конкретном делу од лима, сложене геометрије. Дати план експеримента, опрему, резултате и тумачење резултата.

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

Препоручена литература:

1. Девеџић Б.: Основи теорије пластичног деформисања метала, Машински факултет у Крагујевцу, 1975.
2. Вујовић Б.: Деформабилност, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1992.
3. Александровић С.: Сила држања и управљање процесом дубоког извлачења, монографија, Машински факултет у Крагујевцу, 2006.
4. Александровић С.: Деформабилност, циклус предавања за ФИАТ Аутомобили Србија, 7. предавање, септембар 2014.
5. Александровић С.: Савремени поступци пластичног обликовања, скрипта, Moodle портал Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2014.
6. Александровић С., Стефановић М.: Технологија пластичног обликовања метала, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2010.
7. S.Dinda, K. James, S. Keeler, P. Stine: How to use circle gird analysis for die tryout, American Society for Metals, Metals park, Ohio, 1985.
8. S. Kalpakjian, S. Schmid: Manufacturing Processes for Engineering Materials, Pearson Education, New Jersey, USA, 2003.

Крагујевац,
07. 09. 2017.

Ментор:
Др Србислав Александровић, ред.проф.

САДРЖАЈ:

САДРЖАЈ	1
РЕЗИМЕ	3
ПРЕДГОВОР	4
1.УВОД	5
2.ДЕФОРМАБИЛНОСТ ТАНКИХ ЛИМОВА	6
2.1 Карактеристике понашања материјала при пластичном обликовању	8
2.1.1 Деформационо ојачавање и криве течења	8
2.1.1.1 Ефекат ојачања	9
2.1.1.2 Криве ојачања	10
2.1.1.2.1 Одређивање кривих ојачања затезањем	11
2.1.1.2.2 Одређивање кривих ојачања притискивањем	14
2.1.1.2.3 Аналитичке апроксимације кривих ојачања	19
2.1.1.3 Утицај брзине деформације и температуре на величину деформационог отпора	21
2.1.1.4 Експонент деформационог ојачања-"n" фактор	23
2.1.2 Хомогеност деформисања	26
2.1.3 Анизотропија код лимова	32
2.1.3.1 Раванска анизотропија	33
2.1.3.2 Нормална анизотропија	34
2.1.3.3 Експериментално одређивање коефицијента "r"	39
2.1.4 Парамети обрадивости	41
2.2 Гранична деформабилност	42
2.2.1 Гранична деформабилност у условима монотоног (пропорционалног) деформисања	43
2.2.2 Гранична деформабилност у условима немонотоног (непропорционалног) деформисања	49

3. ДЕФОРМАБИЛНОСТ ПРИ ЗАПРЕМИНСКОМ ОБЛИКОВАЊУ	55
3.1 Утицајни фактори на деформабилност материјала при запреминском обликовању	55
3.1.1 Фактори материјала	56
3.1.2 Фактори услова обраде	57
3.2 Гранична деформабилност при запреминском обликовању	59
4. ЕКСПЕРИМЕНТ	62
4.1 Одређивање ДГД за челични лим DC04	63
4.2 Одређивање ДГД за лим од алуминијумске легуре AlMg4,5Mn0,3	67
4.3 Одређивање ДГД за нерђајући лим X5CrNi18 9 и деформациона анализа конкретног комада	70
5. ЗАКЉУЧАК	77
6. ЛИТЕРАТУРА	79

РЕЗИМЕ

У првом делу рада изложено је теоријско разматрање појава и феномена у процесима пластичног обликовања металних материјала, и то: деформационог ојачавања, хомогености деформисања и анизотропије. Затим је дат кратак преглед параметара обрадивости и детаљније разматрање граничне деформабилности код лимова и при запреминском обликовању.

У другом делу рада је приказан изведени експеримент. Први део експеримента обухвата одређивање дијаграма граничне деформабилности за три савремена лима: каросеријски челични лим, лим од алуминијумске легуре и лим од аустенитног нерђајућег челика и то при монотоним и немонотоним условима одвијања процеса обликовања. Други део експеримента обухвата примену познавања граничне деформабилности и деформационе анализе на конкретном делу од лима са сложеном геометријом. Изложен је план експеримента, опрема, резултати и тумачење резултата. На крају су дата закључна разматрања о теми, и посебно о експерименталним резултатима.

Кључне речи: Пластично обликовање танких лимова, деформабилност танких лимова, гранична деформабилност, дијаграми граничне деформабилности.

ABSTRACT

In the first part of this master thesis, it is theoretically considered occurrence and phenomena in the plastic forming processes of metal materials, as follows: strain hardening, deformation homogeneity and anisotropy. Then it is given a brief overview of the parameters of formability and a more detailed consideration of the forming-limit in sheets and in sheet and in bulk forming.

In the second part of the master work, the experimental results are shown. The first part of the experiment involves determining the forming-limit diagrams for three modern sheet metal: low carbon cold rolled steel sheet, aluminum alloy sheet and austenitic stainless steel sheet metal. The second part of the experiment involves the application of knowledge of forming-limit and deformation analysis on a specific part of sheet metal with complex geometry. The experiment plan, equipment, results and interpretation of results are given. Finally, it is given conclusion about the topic, especially about the result of experiment.

Key words: Thin sheets plastic forming, thin sheets formability, forming-limit, forming-limit diagrams.

ПРЕДГОВОР

Овај рад представља мастер рад, мастер академских студија на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу. Обрађена тема је из области технологије пластичног обликовања метала и спада у ужу област обраде танких лимова. Овај феномен се изучава на више предмета како на основним, тако и на мастер студијама. Разлог за одабир ове области као теме мастер рада је то што је примена технологије пластичног обликовања у порасту и веома велики број металних материјала пре или касније буде подвргнуто неком процесу пластичног обликања.

Примена обраде метала пластичним деформисањем је значајна у савременој индустрији и добија све већи удео у технологији машинске обраде. Значај обраде метала деформисањем је посебно велики у индустријама као што су: аутомобилска, војна, индустрија уређаја за домаћинство, пољопривредних машина, апарата широке потрошње итд. Једна од карактеристика ове обраде је велика продуктивност у поређењу са обрадом резањем, међутим, цена алата и машина је најчешће висока, тако да је шира примена обраде деформисањем ограничена претежно на великосеријску и масовну производњу.

У оквиру технологије пластичног обликовања деформабилност је термин који се често користи и представља најопштију способност материјала да се деформише еластично или пластично. У научном и инжењерском систему изучавања пластичног обликовања метала једно од значајних места заузима гранична деформабилност, која уједно заузима и централно место при изучавању деформабилности.

У овом раду су приказана теоријска и експериментална разматрања на тему деформабилности танких лимова и дијаграма граничне деформабилности, као и њихова анализа за различите материјале при монотоним и немонотоним процесима.

Велику захвалност дугујем ментору, др Србиславу Александровићу, редовном професору Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, за стечено знање из ове области, као и за помоћ при писању мастер рада. Такође се захваљујем и својој породици на неизмерној подршци.

У Крагујевцу, 2017. године

Андријана Јовановић

1. УВОД

У индустрији и технологији пластичног обликовања лима у савременом свету, током задњих неколико деценија дошло је до значајнијих промена. Подигнут је ниво аутоматизације у фабрикама делова од лима. Традиционална слика човека поред пресе, који својим знањем и искуством решава текуће проблеме скоро да је потпуно нестала. Постале су неизводљиве мање корекције процеса потребне због промена у врсти и квалитету материјала или варијације неких других утицајних фактора. Такав технолошки ниво утицао је да се сузе захтевне толеранције квалитета материјала и посвети пажња елементима процеса који до сада нису уопште или су мало третирани. Произвођачи лимова успевају да вредности механичких карактеристика и број површинских дефеката држе у релативно уским границама. [3]

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

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

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

Деформабилност је термин који се често користи у оквиру технологије пластичног обликовања и представља најопштију способност материјала да се деформише еластично или пластично. Процеси пластичног обликовања метала су изузетно сложене природе. Циљ истраживача и инжењера практичара је што боље разумевање тих процеса, улазак у суштину њихових законитости, односно, овладавање знањима која би омогућила потпуну контролу оваквих процеса. То би резултирало сигурним постизањем свих пројектованих карактеристика жељеног производа. [1] У

научном и инжењерском систему изучавања пластичног обликовања метала једно од значајних места заузима гранична деформабилност. У области изучавања деформабилности то је, свакако, централно место. Појам гранична деформабилност подразумева остваривање максимално могуће деформације према одговарајућим критеријумима. Најчешће је то разарање или локализовано деформисање. Најзначајнији утицај на деформабилност имају: материјал (хемијски састав и структура), температура обраде, брзина деформације и напонско стање. [6]

Када је деформационо стање у неком тренутку процеса исто у свим тачкама тела, онда се деформисање сматра хомогеним. Претпоставка о хомогеном деформисању омогућује да се на основу промена димензија целог тела изведе општи закључак и његовој деформацији. Деформације на појединим критичним местима су веће него што то показују карактеристике деформације добијене на основу укупних спољашњих димензија, што указује на одговарајуће нетачности и поједностављења. Главни узроци настајања нехомогеног деформисања су утицаји: контактнoг трења, сложености облика (облик алата присиљава поједине делове материјала да пређу разичите путеве), као и својства микро-структурне и макро-структурне грађе металних материјала. [1]

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

У раду ће бити говора о деформабилности, са посебним освртом на деформабилност танких лимова, као и о дијаграмима граничне деформабилности, њиховом одређивању и примерима примене у пракси.

2. ДЕФОРМАБИЛНОСТ ТАНКИХ ЛИМОВА

У оквиру ТПО често се користе термини: деформабилност, пластичност и обрадивост. Сва три термина упућују на способност материјала да се трајно деформише, иако могу да се уоче разлике како у семантичком смислу тако и у стеченим навикама у примени.

Деформабилност представља способност материјала да се обликује до одговарајуће вредности деформације. Иако материјал може да се деформише и у еластичној области, најчешће се подразумева пластично обликовање. Код

деформабилности увек се дефинише критеријум, односно износ неког од показатеља деформације који ближе детерминише област деформисања. Најбољи пример је дефинисање граничне деформабилности, као способности материјала да се пластично деформише до одређених максималних, односно граничних вредности деформација. Критеријум за граничне деформације је најчешће појава разарања, локализованог деформисања или неког другог дефекта. [1]

Деформабилност у највећој мери зависи од: материјала (хемијски састав и структура), температуре обраде, брзине деформације и напонског стања.

Утицај врсте и хемијског састава материјала може се видети на примеру челика. Код угљеничних челика са повећањем садржаја угљеника опада деформабилност. Код легираних челика поједини легирајући елементи не умањују битно пластична својства зато што стварају чврсте растворе (Si, Ni, Co, Cu, Al и Zn). Група елемената који граде карбиде (Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Ta и W) утиче на смањивање деформабилности. Погодним термичким третманом могуће је извршити сфероидизацију карбида, чиме се побољшавају пластична својства. Тврди неметални укључци показују неповољан утицај на деформабилност. [6]

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

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

Напонско стање има веома велики утицај на деформабилност. Поједностављено, тај утицај се може објаснити деловањем напона на микро структурне грешке у материјалу које резултира макро ефектима. Ако у напонској шеми преовлађују затежући напони микро прслине или шупљине у структури расту. У критичном моменту интегритет структуре се разара. Достигнуте деформације су мале, односно деформабилност лоша. У супротном случају, када преовлађују притисни напони, јавља

се ефекат смањивања односно тзв. „залечивања“ микро дефеката структуре. Резултат је дуже трајање процеса обликовања и достизање често, вишеструко већих деформација у односу на претходно поменути случај када доминирају затежући напони. [6]

2.1. Карактеристике понашања материјала при пластичном обликовању

2.1.1 Деформационо ојачавање и криве течења

Током процеса хладног пластичног обликовања са повећањем остварене деформације расте напон течења потребан да се процес континуално одвија. Материјал се опире деформисању и у складу са његовим особинама треба деловати све већим и већим деформационим силама. Управо тај ефекат израженог пораста напона течења, са повећањем пластичне деформације, праћен смањењем пластичности материјала, представља деформационо ојачање.

Ефекат ојачања зависи од:

- материјала (хемијски састав, структура, стање, особине),
- степена деформације,
- температуре обраде,
- брзине деформације. [5]

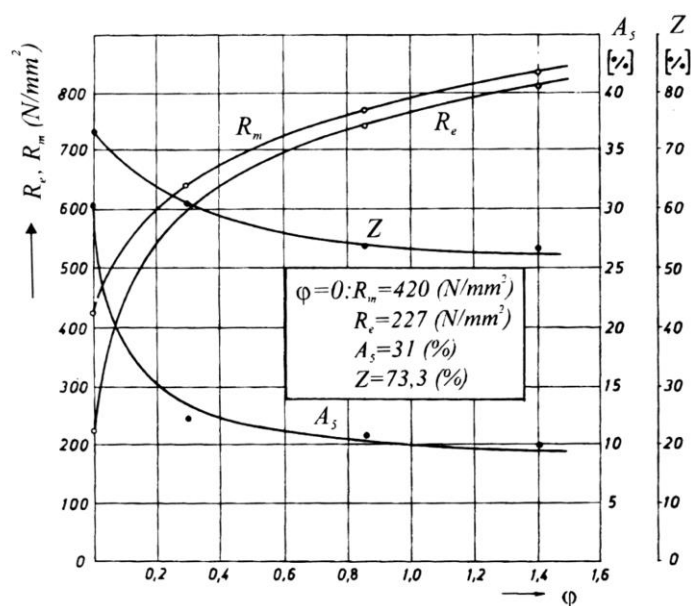
Најбољи начин за квантификовање деформационог ојачања је одређивање кривих течења или кривих ојачања. Оне представљају зависност напона течења, односно деформационог отпора (деформационе чврстоће) од остварене еквивалентне (ефективне) пластичне деформације. Док процес пластичног обликовања траје, деформациони отпор је једнак еквивалентном напону, према енергетском услову пластичности. Треба напоменути да у општем случају напрезања еквивалентни напон може да буде и мањи од деформационе чврстоће која представља критични напон потребан да се оствари трајно деформисање.

Поступак добијања кривих течења је експериментални и углавном се заснива на остваривању једноосних напонских стања затезања или притиска. Деформационо ојачавање и криве течења не зависе од напонског стања и представљају универзалну карактеристику материјала. При једноосним напонским стањима, релативно

једноставним експерименталним поступком могуће је прецизно дефинисати промену еквивалентног напона и еквивалентне деформације. [6]

2.1.1.1 Ефекат ојачања

При обликовању у хладном стању са порастом степена деформације расту и сви показатељи отпорности материјала – граница течења, затезна чврстоћа, тврдоћа итд., али истовремено долази до смањења пластичности материјала, односно до пада жилавости (слика 2.1). Интензитет ефекта ојачавања највише зависи од материјала. Сматра се да је ефекат ојачавања последица стварања дислокација и њиховог нагомилавања у материјалу иако он још није потпуно разјашњен на микро и субмикро нивоу. Дијаграм на слици 2.1 добијен је затезањем 4 кратке епрувете. Материјал прве епрувете није претходно пластично деформисан ($\varphi=0$) и виде се вредности поменуте 4 карактеристике. Материјал друге епрувете је претходно сабијен до деформације око 30%, а затим подвргнут затезању. Видљив је значајан пораст затезне чврстоће и границе течења и значајно смањење A_5 и Z . Тренд промене је настављен са порастом претходне деформације на ~85% и 140%. [5]

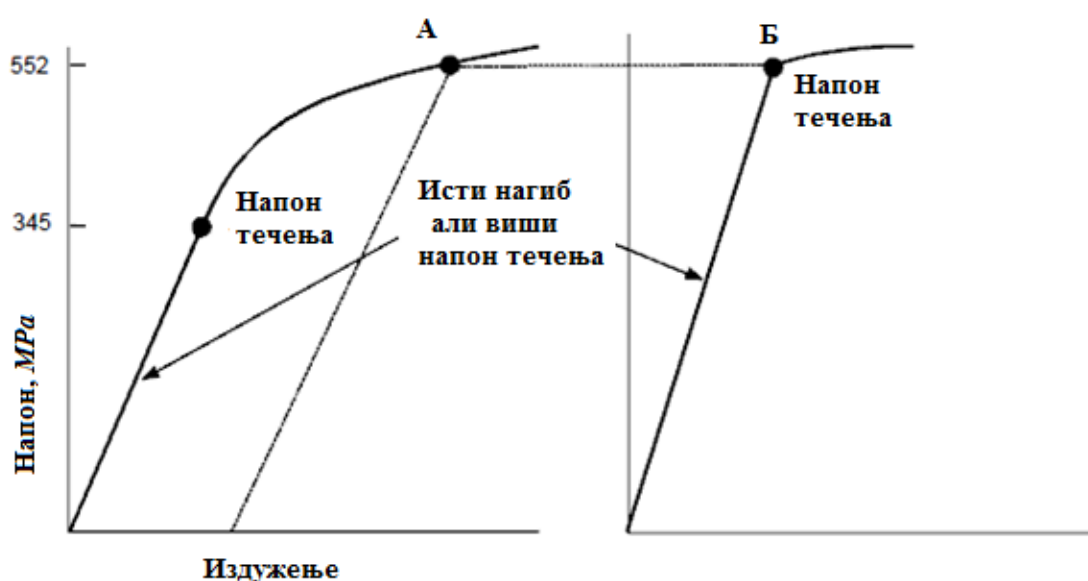


Слика 2.1 Ефекат ојачавања – пораст својстава отпорности материјала (напона течења и затезне чврстоће) и пад својстава пластичности (издужења (A) и сужења (Z))

Ефекат ојачавања је интензивнији са порастом степена пластичне деформације.

Деформационо ојачање се користи и у процесима претходне металуршке прераде металних материјала у хладном стању када се тражи да карактеристике

материјала, пре свих напон на граници течења и тврдоћа, буду високе на уштрб жилавости. Процес се састоји из оптерећивања материјала до напона који лежи изнад тренутне вредности напона на граници течења материјала, а истовремено испод напона максималне чврстоће материјала (зона равномерног деформисања). Услед пораста оптерећења материјал тежи да се одупре деформисању при чему расте напон течења, односно деформациони отпор. Уколико се материјал потпуно растерети, а затим поново оптерети, напон на граници течења ће представљати вредност напона у тренутку растерећења, наравно повећаног интензитета у односу на почетно стање (слика 2.2).



Слика 2.2 Илустрација деформационог ојачања

2.1.1.2 Криве ојачања

Криве ојачања представљају зависност напона течења (деформационог отпора) од остварене ефективне пластичне деформације за дате услове. Криве ојачања се најчешће одређују у условима једноосних напонских стања јер је тада остварени напон течења једнак еквивалентном напону односно специфичном деформационом отпору. Криве ојачања се могу изразити на три начина, зависно од показатеља деформације и то као:

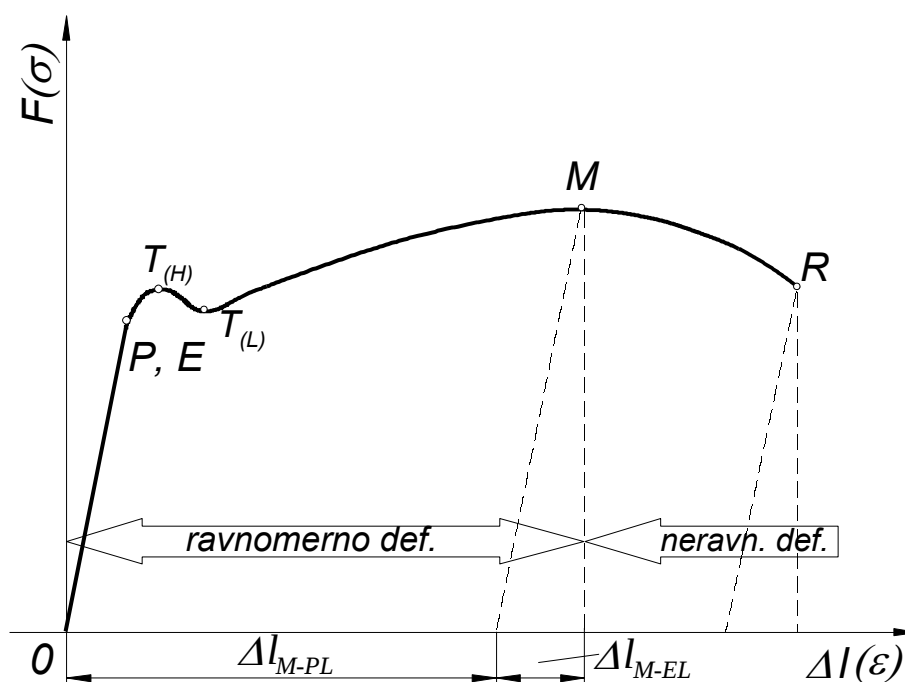
- криве ојачања I реда (K у зависности од ϵ),
- криве ојачања II реда (K у зависности од ψ),
- криве ојачања III реда (K у зависности од ϕ).

Где ε представља релативну деформацију, ψ сужење (контракцију) попречног пресека, а φ природну (логаритамску) деформацију.

С обзиром да је у сложеним процесима пластичног обликовања тешко одредити поједине напоне и деформације, за експерименталне услове одређивања кривих течења најчешће се користе једноставни процеси деформисања, тачније једноосна напонска стања затезања и притиска, јер се код њих зависност еквивалентног напона од еквивалентне деформације може релативно лако одредити.

2.1.1.2.1 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 2.3) дефинисати криву ојачања. [5]



Слика 2.3 Дијаграм затезања

Процес затезања се може поделити у две фазе. Граница је тренутак постизања максималне силе, тачка М на слици 2.3. У првој фази може се сматрати да се одвија

хомогено деформисање и влада једноосно напонско стање. Постоји један главни напон σ_1 уједно једнак еквивалентном напону σ_e према изразу $\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$. Док траје пластично деформисање еквивалентни напон је једнак деформационом отпору K . Дакле, од тренутка достизања границе течења (тачке $T_{(H)}$ или $T_{(L)}$ на слици 2.3) па до тренутка постизања максималне силе (тачка M) треба успоставити везу између силе затезања и стварног напона σ_1 који је једнак σ_e односно K . [6]

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{A_0}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{l}{l_0} = \frac{F}{A_0} (1 + \varepsilon) = \frac{F}{A_0} e^{\varphi} = \sigma_e = K \quad (2.1)$$

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

$$V_0 = V = const. \quad (2.2)$$

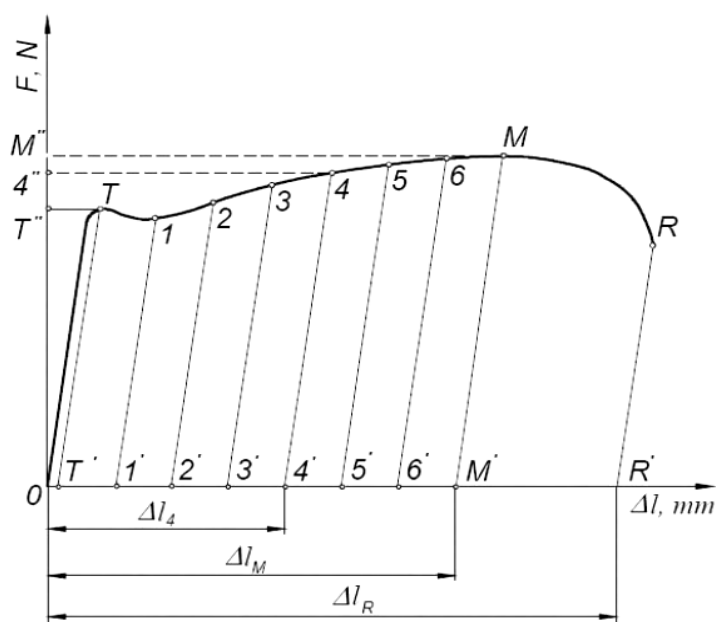
$$V_0 = A_0 l_0 = V = A l \quad (2.3)$$

$$\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon = e^{\varphi} = \frac{A}{A_0}; \quad \psi = 1 - \frac{A}{A_0} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon} = 1 - \frac{1}{e^{\varphi}} \quad (2.4)$$

Еквивалентна деформација једнака је природној деформацији дужине епрувете.

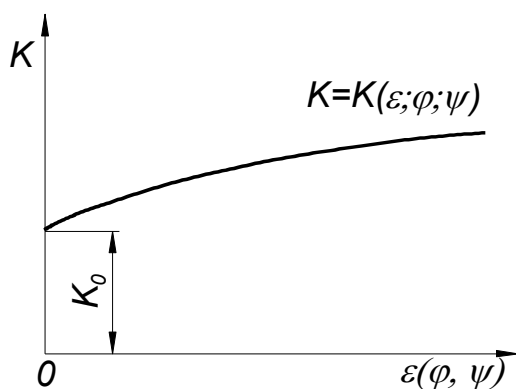
$$\varphi_e = \varphi_1 = \ln \frac{l}{l_0} \quad (2.5)$$

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, а φ природна, логаритамска деформација.



Слика 2.4 Поступак одређивања напона и деформација за криву ојачања

На слици 2.4 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. Тачке се такође, пројектују и на ординатну осу. Затим се читавају се њихове вредности напона и деформације или у овом случају силе и издужења. Када се на вредности са дијаграма затезања у области пластичног и равномерног деформисања примене изрази 2.1, 2.4 и 2.5 добије се крива ојачања, односно зависност деформационог отпора од еквивалентне деформације.



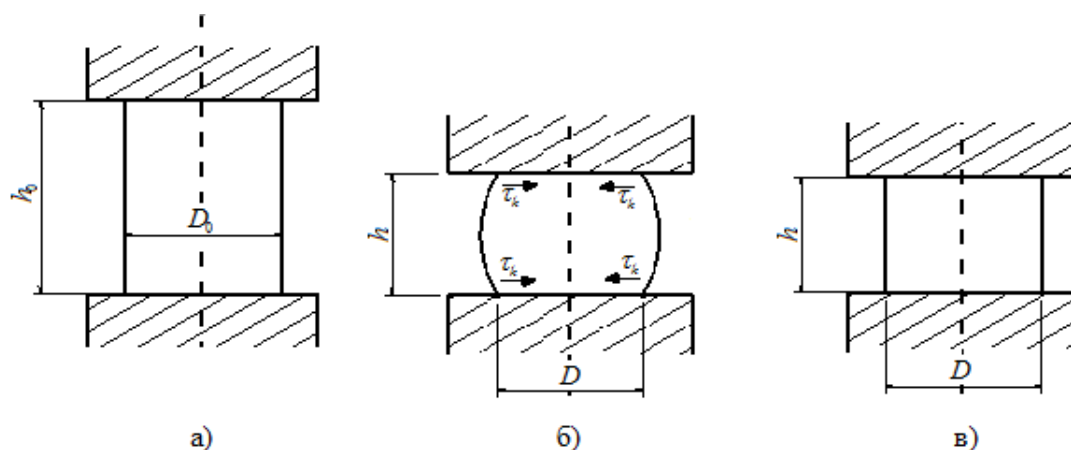
Слика 2.5 Крива ојачања

Недостатак једноосног затезања је релативно мали износ максималне деформације хомогеног деформисања (тачка М). За већи број челика је то око 30%

што може бити недовољно. Постоје два могућа решења: коришћење другог експерименталног поступка или дефинисање аналитичких апроксимација. Алтернатива је поступак притискивања, односно сабијања, 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. [6]

2.1.1.2.2 Одређивање кривих ојачања притискивањем

Поступак једноосног сабијања представља данас један од најзаступљенијих 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 једнофазно сабијање и до $\varphi = 2$ при сабијању у више фаза због чега овај метод и има предност у односу на тест затезања. 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 машине су једноставније. 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 2.6), односно напонско стање није једноосно, а деформисање није хомогено.



Слика 2.6 Сабијање цилиндра: а) епрувета, б) сабијање уз присуство трења и в) сабијање без трења

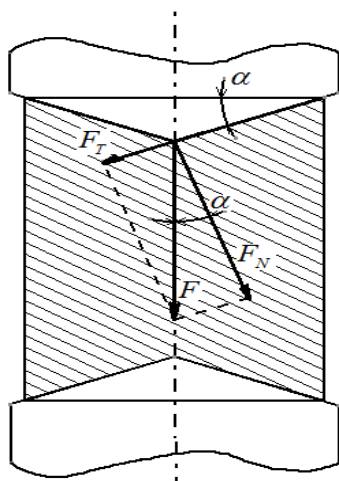
Како би се у идеалним условима (без трења) процес одвијао хомогено и једноосно, сав деформациони рад би се трошио на пластично обликовање епрувете и радни притисак би у сваком моменту био једнак деформационом отпору K , то се у

реалним условима јавља нехомогено деформисање, односно присутно је троосно напонско стање. То значи да остварена деформација није иста у свим деловима материјала већ се разликује у зависности од положаја посматране тачке на епрувети. Постоји више начина да се процес приближи идеалним условима а неки од њих су:

- 1) метод сабијања конусним притискивачима,
- 2) метод графо-аналитичке елиминације трења (метода по Шофману),
- 3) метод сабијања са подмазивањем (метода по Растегајеву), итд.

1) Метод сабијања конусним притискивачима

Сабијање конусним притискивачима се састоји из притискивања епрувета са коничним главама алата при чему су и епрувете са коничним удубљењима на својим чеоним странама. Угао нагиба конуса зависи од подмазивања, али уколико је оно квалитетно угао је обично мањи од 5° и бира се тако да хоризонталне компоненте нормалне силе и силе трења буду у равнотежи.



Слика 2.7 Сабијање цилиндра конусним притискивачима

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

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

$$F_T \cos \alpha = F_N \sin \alpha$$

одакле следи,

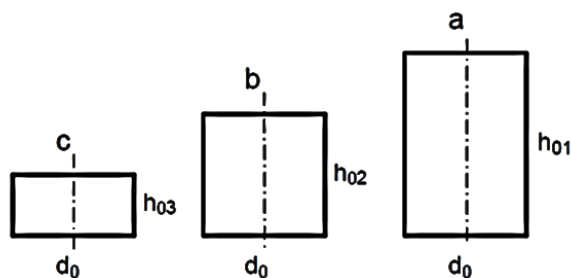
$$\frac{F_T}{F_N} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha = \mu \quad (2.6)$$

Када је испуњен услов 2.6 током сабијања епрувета остаје приближно цилиндричног облика, у супротном долази до одступања у хомогености и појаве просторног напонског стања. Епрувета задржава цилиндрични облик до око $\varphi = 0,45$.

2) Метод графо-аналитичке елиминације трења (метода по Шофману)

Метода по Шофману се заснива на сабијању више епрувета различитих почетних висина (слика 2.8). 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 грешке при прорачуну напона течења.



Слика 2.7 Серија епрувета за притискивање

Епрувете су најчешће цилиндричне, 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 изузетно 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 [5]:

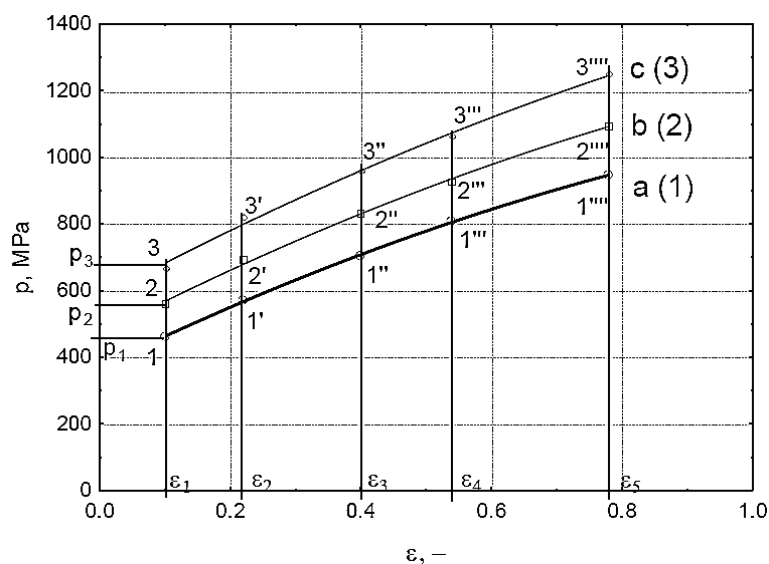
$$A \cdot h = A_0 \cdot h_0 = \text{const.}; A = A_0 \cdot \frac{h_0}{h} \Rightarrow p = \frac{F \cdot h}{A_0 \cdot h_0}; \varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h}{h_0} \quad (2.7)$$

Суштина поступка је да се изради већи број епрувета, најмање 3. Изводи се не мање од 3 серије сабијања на свакој епрувети.

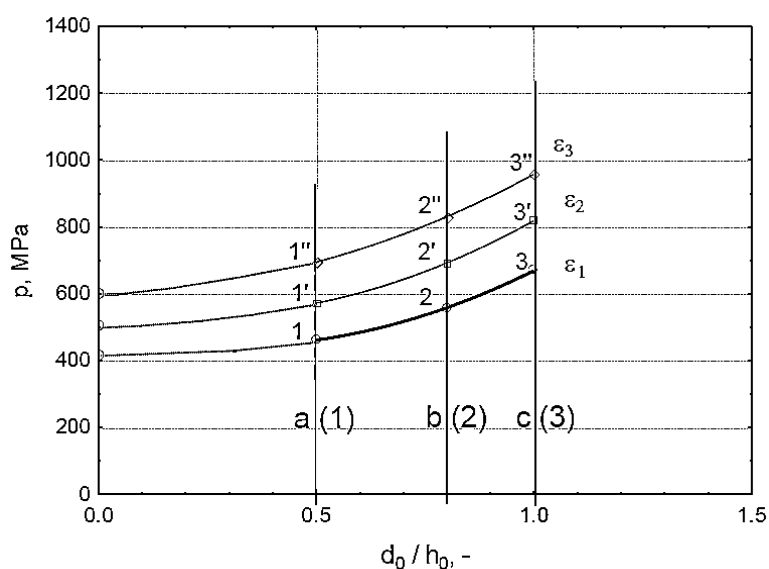
Поступак Шофмана заснива се на оригиналној идеји екстраполационе елиминације трења, која отклања потребу за физичким напорима подмазивања и смањења трења. Недостатак поступка је ипак, релативно сложен експеримент који захтева пажљив рад и прецизно мерење. Може се јавити приметно расипање резултата и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

Током експеримента свака епрувета сабија се у неколико фаза. За пример са слике 2.9 то је 5 фаза са деформацијама од ε_1 до ε_5 . Сабијају се три епрувете означене са а, б и ц, односно 1, 2 и 3 на слици 2.7. После добијања дијаграма зависности $p - \varepsilon$ (слика 2.8), на основу њега формира се дијаграм зависности $p - d / h$ (слика 2.10). Суштина овог поступка лежи у екстраполирању кривих са дијаграма 2.10 у лево до пресека са ординатном осом. Екстраполација може да се ради правом линијом (мања тачност) или кривом линијом (већа тачност). На ординатној оси однос d_0 / h_0 тежи 0, што значи да вредност пречника фиктивно тежи 0, а са њим и трење на контактної

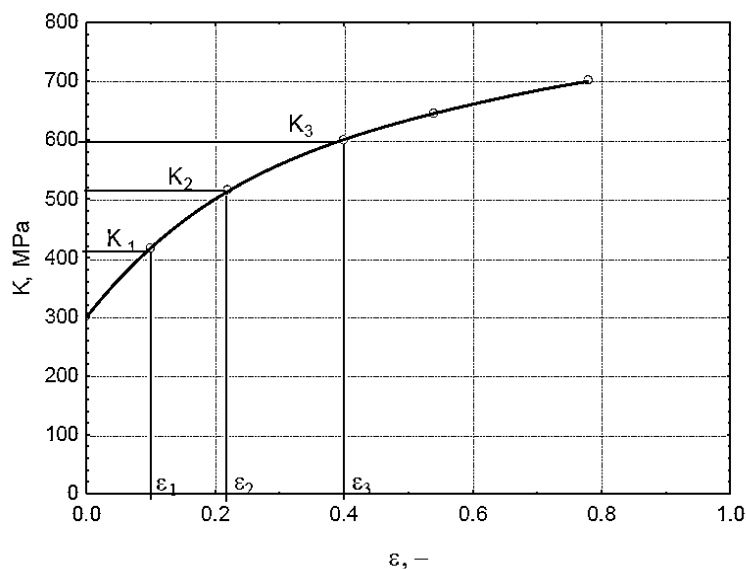
површини. Ако трења нема, притисак p заправо представља еквивалентни напон, односно деформациони отпор, а деформација ε еквивалентну деформацију. У конкретном примеру добијене су 3 тачке, односно парови вредности притиска p и деформације ε . Сада је могуће формирати координатни систем деформациони отпор K - деформација ε , унети одговарајуће вредности и формирати криву ојачања, слика 2.11. [5]



Слика 2.9 Дијаграм зависности притиска од деформације



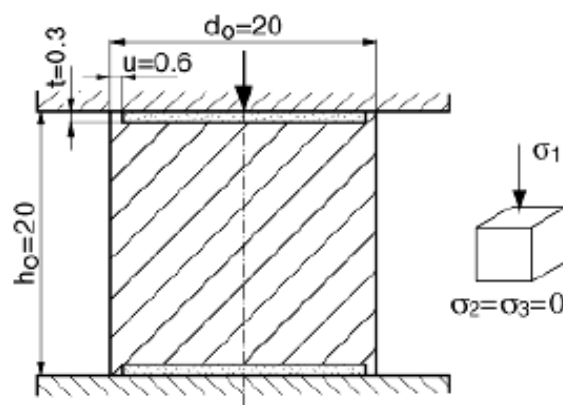
Слика 2.10 Зависност притиска од односа пречника и висине епрувете



Слика 2.11 Крива течења формирана на основу поступка Шофмана

3) Метод сабијања са подмазивањем (метода по Растегајеву)

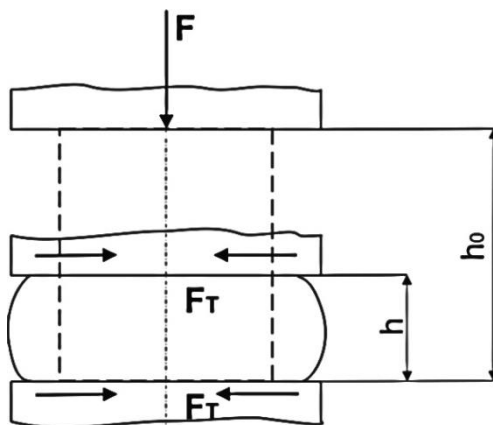
Поступак по Растегајеву се не разликује много од класичног једноосног сабијања осим по изгледу епрувета које на својим чеоним површинама имају мала удубљења одређених димензија која су предвиђена за смештање мазива у чврстом стању (најчешће стеарина). На почетку процеса контакт се остварује само по узвишеном прстену све док се услед оптерећења не истисне довољна количина мазива да се оствари тзв. хидродинамичко подмазивање између епрувете и алата. После тога се целокупно оптерећење преноси преко мазивог слоја. [5] Процес сабијања на овај начин може се извести до деформације $\epsilon \approx 1,0$. Постоје различите препоруке у литератури али се за геометрију удубљења може усвојити следеће: $u = 0.5 \div 0.8 \text{ mm}$ и $t = 0.2 \div 0.3 \text{ mm}$ (сл. 2.12).



Слика 2.12 Епрувета за поступак Растегајева

Применом удубљења је избегнуто истискивање мазива које је у случају класичног сабијања неизбежно јер у условима великих притисака мазиво тежи да изађе из зоне контакта. Треба рећи и то да се као мазиво користе чврста мазива као што су стеарин или графит као и да се препоручује мерење пречника епрувете уместо висине.

На слици 2.13 приказана је шема притискивања.



Слика 2.13 Шема притискивања

Показатељи деформације:

$$\Delta h = h_0 - h, \text{ mm} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h}{h_0}, \quad \psi = \frac{A - A_0}{A_0}; \quad \varphi = \ln \frac{h_0}{h} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_e; \quad \psi = \psi_1 = \psi_e; \quad \varphi = \varphi_1 = \varphi_e \quad (2.10)$$

Деформациони отпор (напон течења):

$$K = \frac{F}{A_0}(1 - \varepsilon); \quad K = \frac{F}{A_0(1 + \psi)}; \quad K = \frac{F}{A_0 \cdot e^\varphi} \quad (2.11)$$

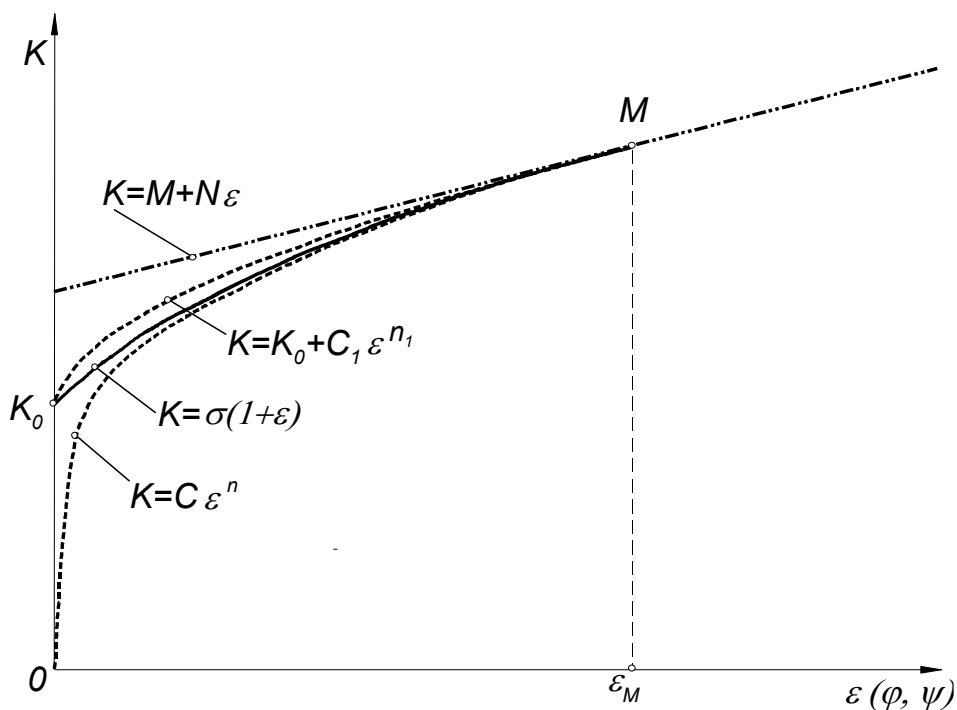
2.1.1.2.3 Аналитичке апроксимације кривих ојачања

Аналитичке апроксимације су одговарајуће математичке функције које могу да замене експериментално одређену криву ојачања. Углавном су то две експоненцијалне (изрази 2.12 и 2.13) и једна линеарна функција (2.14). Показатељи деформације могу да буду различити, али се најчешће користи логаритамска деформација φ . [6]

$$K = C \cdot \varphi^n \quad (2.12)$$

$$K = C + C \cdot \varphi^m \quad (2.13)$$

$$K = M + N \cdot \varphi \quad (2.14)$$



Слика 2.14 Апроксимације кривих ојачања

Облик све три апроксимационе функције види се на слици 2.14 упоредо са експерименталном кривом. Највећу примену има апроксимација 2.12 иако при малим деформацијама (до око 5%) највише одступа од експерименталне криве. Међутим, то одступање није од већег практичног значаја јер кад је пластична деформација једнака 0 деформациони отпор има увек познату вредност једнаку граници течења. Такође, мале вредности пластичних деформација најчешће немају већи практични значај.

Константе у апроксимацијама при затезању могу да се одреде на основу услова [6]:

$$\text{За } \varphi = 0 \rightarrow K = K_0 = R_p$$

$$\text{За } \varphi = \varphi_M \rightarrow \frac{dF}{d\varphi} = 0; K = K_M \quad (2.15)$$

2.1.1.3 Утицај брзине деформације и температуре на величину деформационог отпора

Уопштено гледано, напон течења (деформациони отпор), односно деформациона чврстоћа зависи од:

- својстава материјала (хемијски састав, структура, стање),
- степена и брзине деформације,
- температуре.

Са повећањем брзине деформације ($\dot{\phi}$) расте и деформациони отпор (K). На вишим температурама, утицај брзине деформације на K је већи него на нижим температурама, пре свега због структурних појава везаних за процес рекристализације. При повећању $\dot{\phi}$ преостаје мање времена за рекристализацију, па ће K расти, према слици 2.14. [6]

Експерименталним испитивањима је утврђено да се на $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при повећању $\dot{\phi}$ за 10 пута у односу на брзине лабораторијских машина ($0,004 - 0,008\text{ s}^{-1}$), K повећава за 5 - 10%. При повећању $\dot{\phi}$ за 1000 пута, K се повећава за 16-34%. Међутим, при топлој обради и повећању $\dot{\phi}$ за 1000 пута, K се повећава 200-300% (2–3 пута).

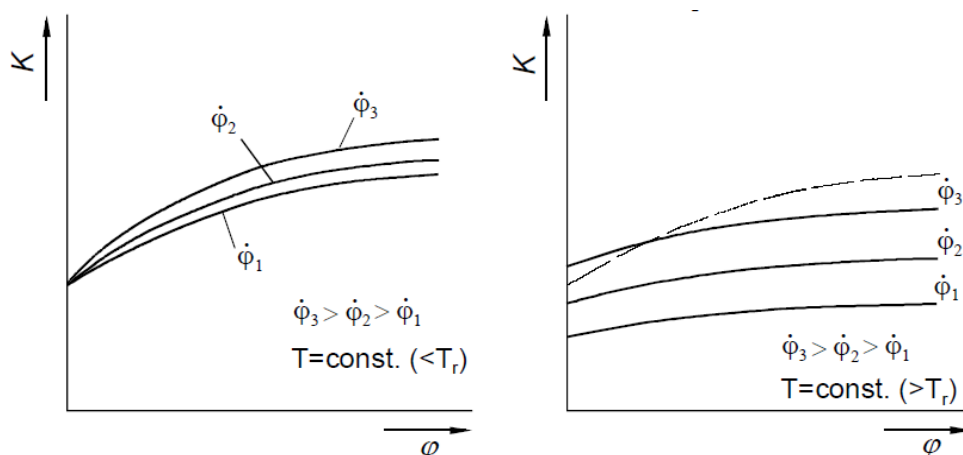
Испитивања су показала да важи однос:

$$\frac{K}{K_0} = \left(\frac{\dot{\phi}}{\dot{\phi}_0} \right)^m \quad (2.16)$$

где су: K и K_0 деформациони отпори при брзинама $\dot{\phi}$ и $\dot{\phi}_0$,

m —брзински коефицијент који зависи од врсте материјала и температуре процеса деформисања (за топлу обраду износи приближно 0.1 – 0.22).

При хладној обради (температура процеса обликовања T мања од температуре почетка рекристализације T_r) доминира утицај степена деформисања (слика 2.15, лево). При топлој обради утицај брзине деформације је израженији (слика 2.15, десно).



Слика 2.15 Утицај степена деформације, брзине и температуре на деформациони отпор (хладна обрада – лево, топла обрада - десно)

Већи нагиб кривих на слици 2.15 лево показује велики утицај степена деформације φ , а мали размак између кривих мали утицај $\dot{\varphi}$. На слици 2.15 десно, већи размак између кривих илуструје утицај $\dot{\varphi}$.

Уочавамо да су криве течења за топлу обраду спуштене у односу на хладну, а разлог за то је присутност процеса рекристализације на температурама топле обраде.

У пракси се често користе поједностављени изрази:

$$K = a \cdot K_0 \text{ (за деформисање у хладном стању, при чему је } K_0 = R_p \text{)}$$

$$K = a \cdot R_M \text{ (за деформисање у топлом стању)}$$

Емпиријски коефицијент $a \approx 1,05 - 4$ и зависи од односа $\dot{\varphi} / \dot{\varphi}_0$ и T / T_r . Даје се у одговарајућим препорукама.

Генерално посматрано, може се закључити да важе следеће зависности [6]:

$$K_{HL} = K(\varphi, \text{materijal}),$$

$$K_{TOPL} = K(\dot{\varphi}, T, \text{materijal})$$

У табели 1. је дат упоредни приказ брзина деформације за различите поступке пластичне обраде.

Табела 1. Упоредни приказ брзина деформације за различите врсте обраде

Поступак обликовања	Брзина $\dot{\varphi}$												
Супер пластично обликовање													
Испитивање затезањем													
Обрада на хидрауличним пресама													
Обрада на кривајним и фрикционим пресама													
Ковање на чекићу													
Дубоко извлачење													
Топло ваљање													
Хладно ваљање													
Вучење шипки и цеви													
Високобрзинско обликовање													
Вучење жице													
Обликовање експлозијом													
Брзина деформације $\dot{\varphi}, s^{-1}$	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	

2.1.1.4 Експонент деформационог ојачања - "n" фактор

На основу услова 2.15 у поглављу 2.1.1.2.3 може се доћи до израза $n = \varphi_M$ који одређује експонент деформационог ојачања (n-фактор).

$$n = \varphi_M = \ln \frac{l_M}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.17)$$

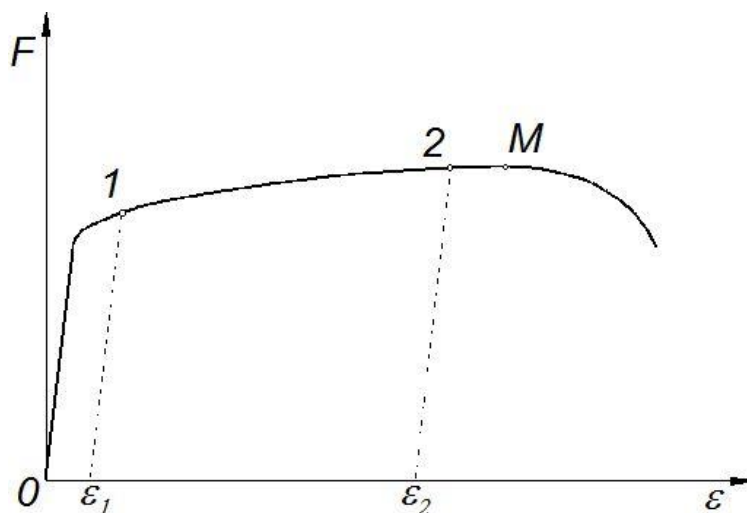
Изразом 2.17 показана је бројна једнакост експонента n и природне логаритамске деформације у тачки М. Важи и:

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

n-фактор се може одредити експериментално према слици 2.16.

Погодно је да се у складу са дијаграмом са слике 2.16 изаберу вредности деформационих чврстоћа у тачкама 1 и 2, односно:

$$K_1 = C \cdot \varphi_1^n \text{ и } K_2 = C \cdot \varphi_2^n \quad (2.18)$$



Слика 2.16 Одабир тачака при одређивању n-фактора

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

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

После краћег сређивања доћи ће се до: $\log \frac{K_2}{K_1} = \log \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right)^n$, из чега следи да се експонент деформационог ојачања може наћи преко израза 2.19:

$$n = \frac{\log \frac{K_2}{K_1}}{\log \frac{\varphi_2}{\varphi_1}} \quad (2.19)$$

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

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

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

Ефекат ојачавања је посебно значајан у случају када преовлађују затежући напони у равни лима, нарочито у условима када је блокиран обод комада. Из тог разлога, постоји евидентна веза између експонента деформационог ојачања и показатеља испитивања добијених Ериксеновим тестом. Уочен је висок степен корелације између n фактора и односа напона на граници течења и при затезне чврстоће $\left(\frac{R_p}{R_M} \right)$.

Вредност n – фактора код челичних лимова креће се између 0.2 и 0.3, код месинга његова вредност је око 0.4, а код аустенитних челика 0.3 до 0.4. Са порастом

вредности n – фактора примећено је побољшање обрадивости. Као пример, оквирно је дата промена својства обрадивости код нискоугљеничних челика у зависности од вредности овог фактора:

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

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

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

2.1.2 Хомогеност деформисања

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

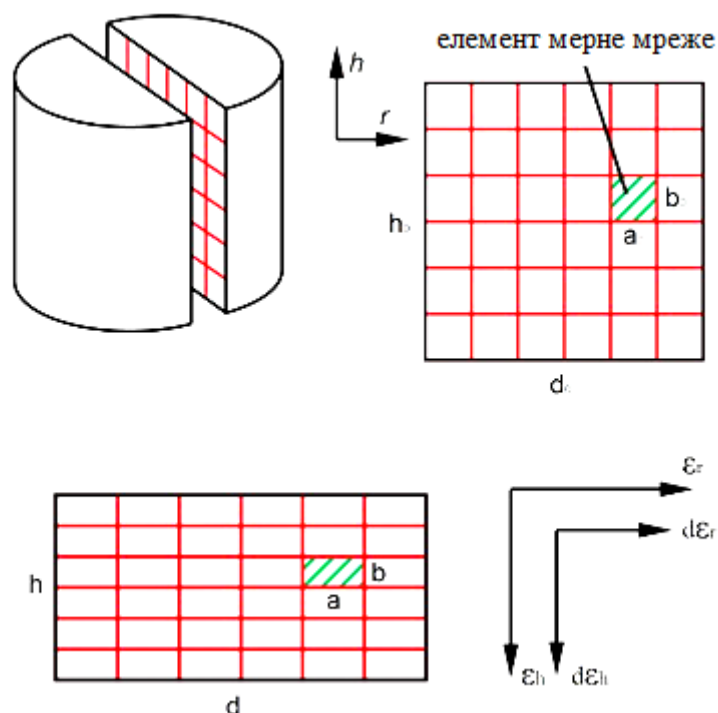
У општем случају пластичног обликовања расподела деформација по површини или запремини комада није уједначена, равномерна (хомогена), него често изразито нехомогена. То значи да у неким локалним зонама деформације могу имати критично високе вредности у односу на остале зоне. На основу тога, може се закључити да нехомогено деформисање може довести до појаве локалних дефеката типа набора код лимова, локланих напрелина или чак превременог лома комада и тако процес обликовања учини неуспешним.

Најчешћи узроци појаве нехомогености деформисања су:

- контактено трење,
- нехомогеност структуре материјала,
- сложеност геометрије комада и тсл. [1]

Пример нехомогеног деформисања јесте случај сабијања цилиндричног тела. Ако је деформисање нехомогено онда се линијске и угаоне деформације појединих елемената могу одредити само експериментално, а деформација читавог тела би се могла добити сабирањем свих елементарних. То значи да строго аналитичко изражавање оваквог деформисања није могуће и зато се при решавању оваквих проблема често полази од претпоставке о хомогеном деформисању. [1]

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). Услов за хомогено деформисање подразумева међусобну једнакост вредности локалних деформација у свим тачкама тела, 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 2.16 [5]



Слика 2.17 Шема хомогеног деформисања при сабијању

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

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

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

Да би деформисање било хомогено морају бити испуњени следећи услови:

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

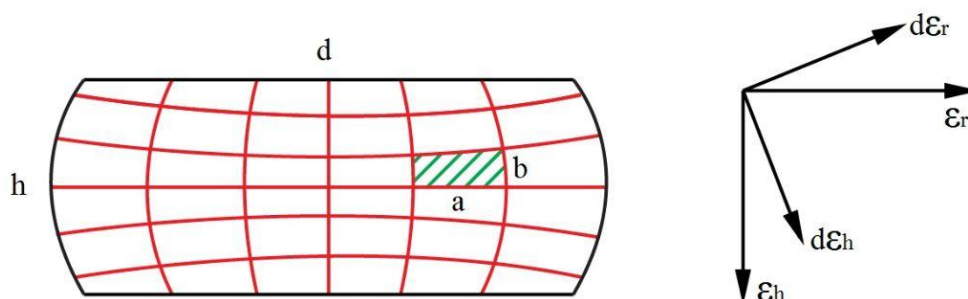
2. Све међусобно паралелне линије и равни остају паралелне и после деформисања
3. Ма које две међусобно паралелне дужине у оквиру пасматране зоне тела мењају се пропорционално у току деформисања. [5]

Математички услов хомогеног деформисања (слика 2.17):

$$\varepsilon_a = \ln \frac{a}{a_0} = \varepsilon_d = \ln \frac{d}{d_0} \quad (2.20)$$

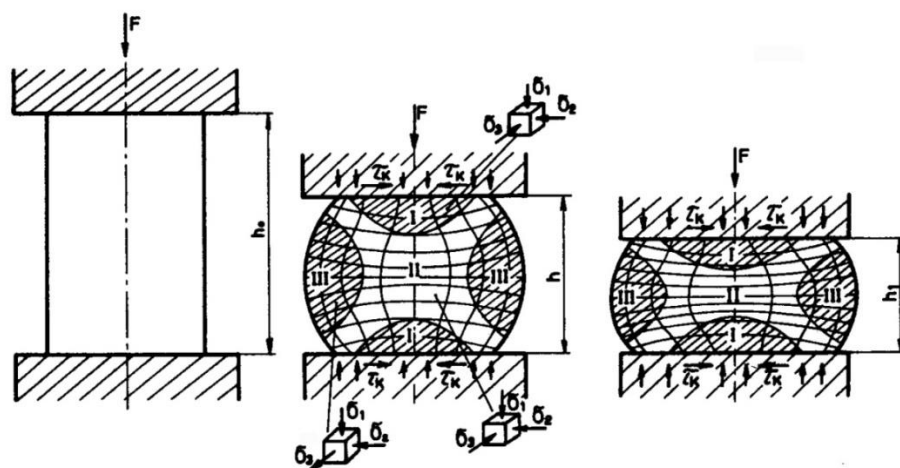
$$\varepsilon_b = \ln \frac{b}{b_0} = \varepsilon_h = \ln \frac{h}{h_0}$$

Код нехомогеног деформисања идеална расподела деформација може бити у мањој или већој мери нарушена. Поједине локалне деформације могу бити мање или веће. Најчешће је присутна изразито велика разлика између локалних деформација, као и разлика у односу на целокупну деформацију читавог тела. Правци координатних система локалних елементарних деформација разликују се у односу на правце укупних деформација. У највећем броју случаја нехомогеног деформисања, налазе се средње вредности насталих деформација.



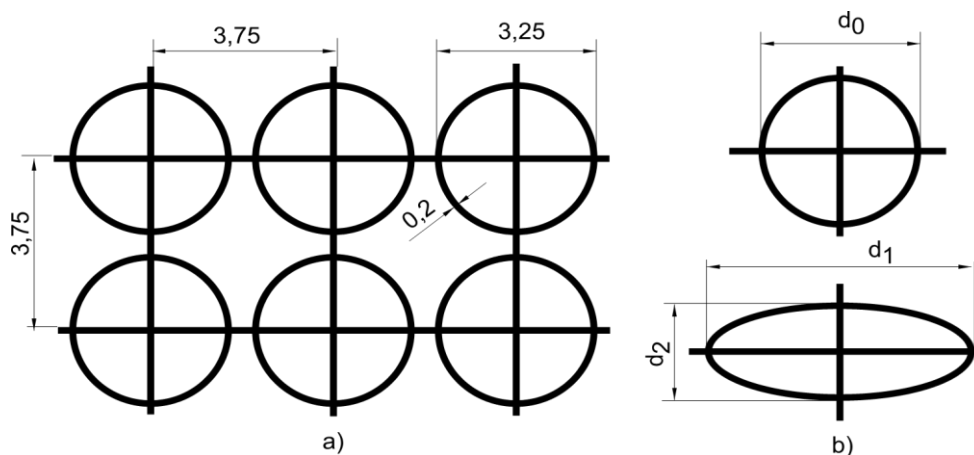
Слика 2.18 Шема нехомогеног деформисања при сабијању цилиндра

На сликама 2.18 и 2.19 приказано је нехомогено деформисање при сабијању цилиндра у реалним условима са израженим утицајем трења на контактним површинама



Слика 2.19 Реално сабијање цилиндра са приказаним деловањем напона

Треба споменути да је могуће да се појави хомогено и нехомогено деформисање у току истог процеса. До ове појаве долази нпр. код једноосног затезања епрувете од танког нискоугљеничног челичног лима (слика 2.21). На ову епрувету се пре почетка експеримента наноси кружна мерна мрежа пречника d_0 . На слици 2.20 приказан је изглед једне такве мерне мреже, као и њено деформисано стање у току процеса.



Слика 2.20 Изглед елемената мерне мреже у недеформисаном (а) и деформисаном стању (б)

У току процеса деформисања, кружни елементи мреже ће добити облик елипси са осама дужине d_1 и d_2 . Поступак израчунавања износа деформације на сваком месту приказан је преко следећих израза, у складу са сликом 2.20:

$$\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (2.21)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (2.22)$$

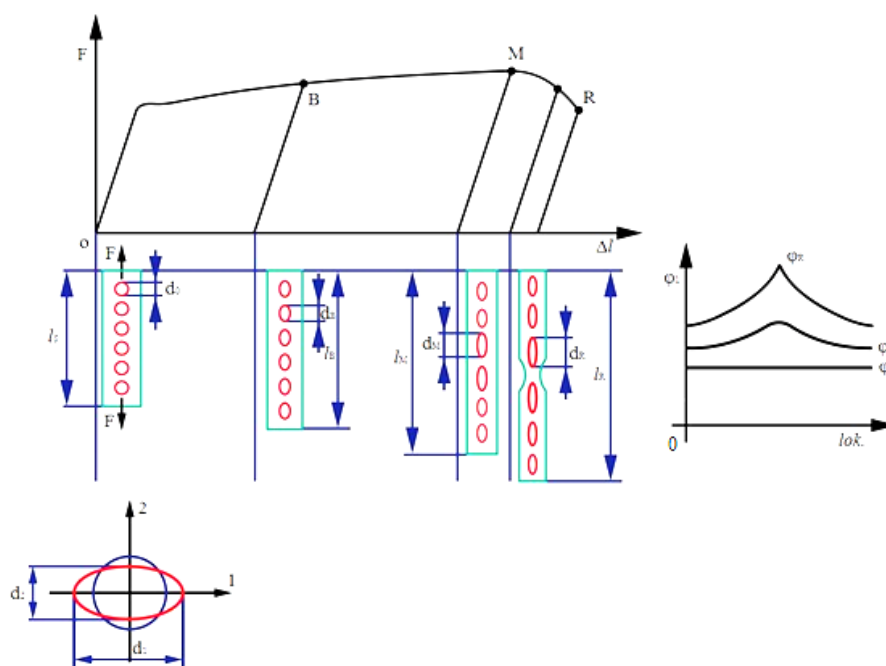
Изрази 2.21 и 2.22 представљају вредности прве и друге главне деформације у равни лима, односно деформације кружних елемента мерне мреже.

Вредности деформација елементарне мерне мреже и промене дужине епрувете у тачки В одређују се преко израза 2.23 и 2.24.

$$\varphi_B = \ln \frac{d_B}{d_0} \quad (2.23)$$

$$\varphi_{l_B} = \ln \frac{l_B}{l_0} \quad (2.24)$$

У случају хомогеног деформисања (тачка В) 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 2.21 Приказ хомогеног и нехомогеног деформисања при једноосном затезању

На почетку процеса деформисања, вредности деформација су једнаке нули. Дијаграм на слици 2.21 (десно) даје зависност деформације од локације, односно

положаја елемената мерне мреже. Преласком у област пластичности, остварују се трајне деформације и врши се провера у тачки В са дијаграма затезања. У овој тачки настала деформација је вредности нешто испод 10%. Кружни елементи мерне мреже добили су облик елипсе, 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 правом линијом означеном са φ_B . У тренутку који одговара тачки М са дијаграма (тачка у којој се остварује максимална вредност силе затезања), на епрувети се могу уочити две елипсе које су више издужене од суседних. Дошло је до појаве локализованог деформисања, односно до нарушавања услова хомогености. У области десно од тачке М присутно је изразито нехомогено, локализовано деформисање. Долази до пада 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 израчунамо локалне деформације и оне се прикажу на дијаграму зависности φ од положаја (локације), добићемо карактеристичан пик локалног максимума у тренутку разарања епрувете. У овом случају једноосног истезања се може закључити да је вредност укупне деформације мања од локалне вредности деформације при лому, из чега се, између осталог, може закључити да је дошло до локализације на месту лома. [5]

У овом случају сматра се да је деформисање идеално хомогено само у првом делу пластичне области. У практичним условима, уз извесну грешку која се може занемарити, може се сматрати да су услови хомогености приближно испуњени све до непосредно пред остваривање максималне силе (тачка М). У примеру нискоугљеничних челика то је при издужењу око 20%. Код аустенитних нерђајућих челичних лимова то издужење достиже и до 40%, док је та вредност код кртих материјала знатно мања.[5]

2.1.3 Анизотропија код лимова

Анизотропија (од грчких речи: $\acute{\alpha}\nu\iota\sigma\omicron\varsigma$ (ánisos) — неравномерно, неуједначено, $\tau\rho\acute{o}\lambda\omicron\varsigma$ (trópos) — начин и $\alpha\nu\iota\sigma\omicron\rho\rho\omicron\tau\acute{\iota}\alpha$ (anizotropia) — неуједначеност), подразумева својство материјала да у различитим правцима показује другачија физичка својства, тј.

представља неуједначеност (неравномерност, променљивост) одговарајућих особина и карактеристика материјала зависно од правца по његовој запремини.

До анизотропије долази под утицајем начина производње лима (ваљање и др.). Анизотропија се може посматрати као:

- анизотропија у равни лима (планарна, раванска) и
- нормална анизотропија (управно на раван лима, у правцу дебљине).

Примена претпоставке о изотропности својства материјала при пластичном обликовању (деформисању) у већини случајева може довести до грешака, јер се реални материјали понашају мање или више анизотропно. Метали који су пре пластичног обликовања били приближно изотропни често показују појаву и развој анизотропије у току самог процеса.

Потребно је правити разлику између тзв. структурне анизотропије, која се односи на неуједначеност својства елементарне кристалне решетке у различитим правцима (микро и нано анизотропија) и механичке или геометријске анизотропије (макро-анизотропије), која се односи на поликристалну структуру. Овај други вид по природи свог настанка представља текстурну анизотропију односно анизотропију на макро нивоу. [1]

Текстура представља оријентисаност кристалне структуре у правцу најизразитијег течења метала. Визуелно се понекад може запазити у виду тзв. металних влакана.

2.1.3.1 Раванска анизотропија

Анизотропија у равни узима се у обзир на тај начин што се по одређивању одговарајућих лабораторијских карактеристика у правцу ваљања лима (слика 2.21), попречно на њега и под углом од 45° у односу на тај правац, формира општа карактеристика $\bar{X}$ према следећем изразу [3]:

$$\bar{X} = \frac{1}{4} (X_{0^\circ} + 2X_{45^\circ} + X_{90^\circ}) \quad (2.25)$$

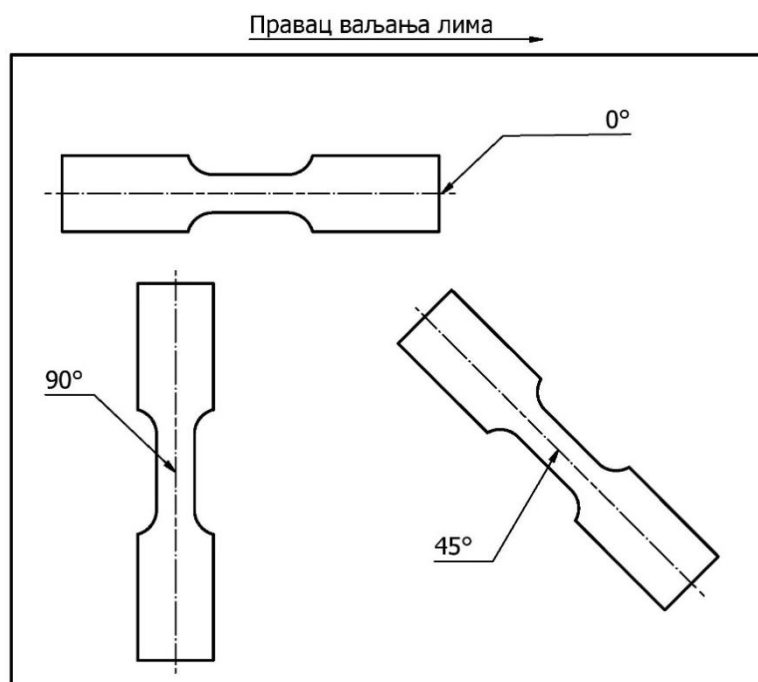
Индекси у изразу 2.25 означавају правце на које се испитана карактеристика односи.

Постоје и други предлози за израчунавање $\bar{X}$ и ти изрази су следећи:

$$\bar{X} = \frac{1}{3} (X_{0^\circ} + X_{45^\circ} + X_{90^\circ}) \quad (2.26)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{6} (X_{0^\circ} + 2X_{30^\circ} + 2X_{60^\circ} + X_{90^\circ}) \quad (2.27)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{12} (X_{0^\circ} + 2X_{15^\circ} + 2X_{30^\circ} + 2X_{45^\circ} + 2X_{60^\circ} + 2X_{75^\circ} + X_{90^\circ}) \quad (2.28)$$



Слика 2.22 Раванска анизотропија

Порастом броја правца испитивања, $\bar{X}$ се теоријски приближава граничној средњој вредности, али то приближење је задовољавајуће и при примени израза 2.25, тако да није неопходно ићи на већи број правца.

2.1.3.2 Нормална анизотропија

Неуједначеност својстава у правцу дебљине лима (нормално, тј. управно на његову раван) у односу на својства у његовој равни представља нормалну анизотропију. Својства материјала у правцу нормалном на раван лима треба посебно узимати у обзир, јер је чешћи случај да се она разликује од својстава у самој равни.

До увођења појма нормалне анизотропије постојало је веровање да је за добру обрадивост материјала погодно да он буде изотропан, али се касније увидело да то није тако. [3]

Основна дефиниција коефицијента нормалне анизотропије (r – фактора) за његово практично одређивање једноосним затезањем дата је следећим изразом:

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\int_{b_0}^b \frac{db}{b}}{\int_{s_0}^s \frac{ds}{s}} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{s}{s_0}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{s_0}{s}} = \frac{\log \frac{b_0}{b}}{\log \frac{s_0}{s}}; \quad \varphi_b = \frac{b_0}{b}; \quad \varphi_s = \frac{s_0}{s}; \quad (2.29)$$

Где су:

φ_b – природна (стварна или логаритамска) пластична деформација ширине (b) епрувете

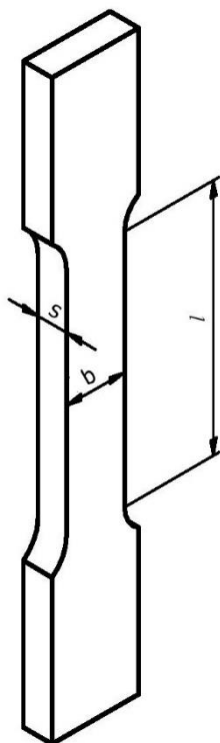
φ_s – природна пластична деформација по (s) дебљини епрувете

b_0 и s_0 – почетне вредности ширине и дебљине епрувете

b и s – вредности ширине и дебљине епрувете у одговарајућем тренутку теста

$$l_0 \cdot b_0 \cdot s_0 = l \cdot b \cdot s = \text{const.}$$

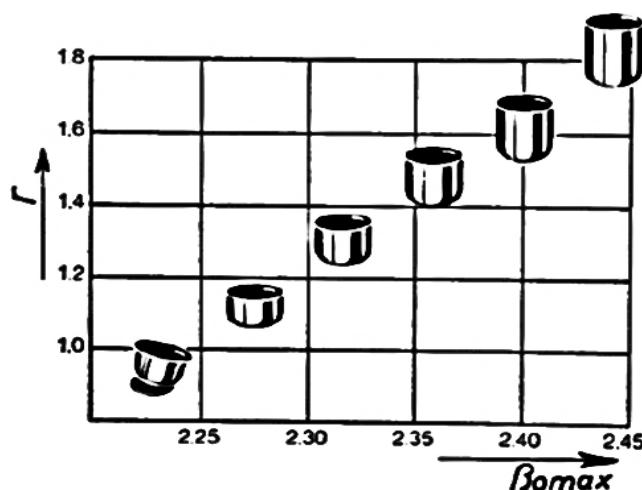
$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l_0 b_0}{lb}} = \frac{\log \frac{b}{b_0}}{\log \frac{l_0 b_0}{lb}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{lb}{l_0 b_0}} \quad (2.30)$$



Слика 2.23 Карактеристичне димензије епрувете

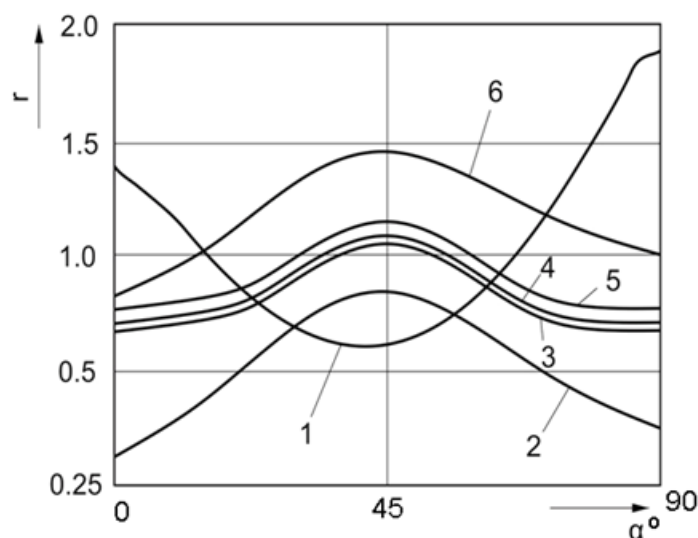
За изотропан материјал коефицијент r имаће вредност 1. Вредности $r > 1$ односе се на лим код којег је деформација по дебљини лима мања него по ширини, што значи да он поседује значајну отпорност према стањењу и да зато постоји мања могућност настајања отањених, ослабљених места на лиму, која воде ка локализацији и разарању у процесу обликовања. Лим са већим коефицијентом r поседује већи отпор деформисању у правцу дебљине него у равни, што је са гледишта обрадивости при дубоком извлачењу повољно. [1]

На слици 2.24 приказана је зависност граничног степена извлачења од коефицијента нормалне анизотропије. Са слике 2.24 може се закључити да са повећањем вредности r фактора расте степен извлачења и добија се већа дубина извлачења. То потврђује да већа вредност r фактора подразумева бољу обрадивост дубоким извлачењем.



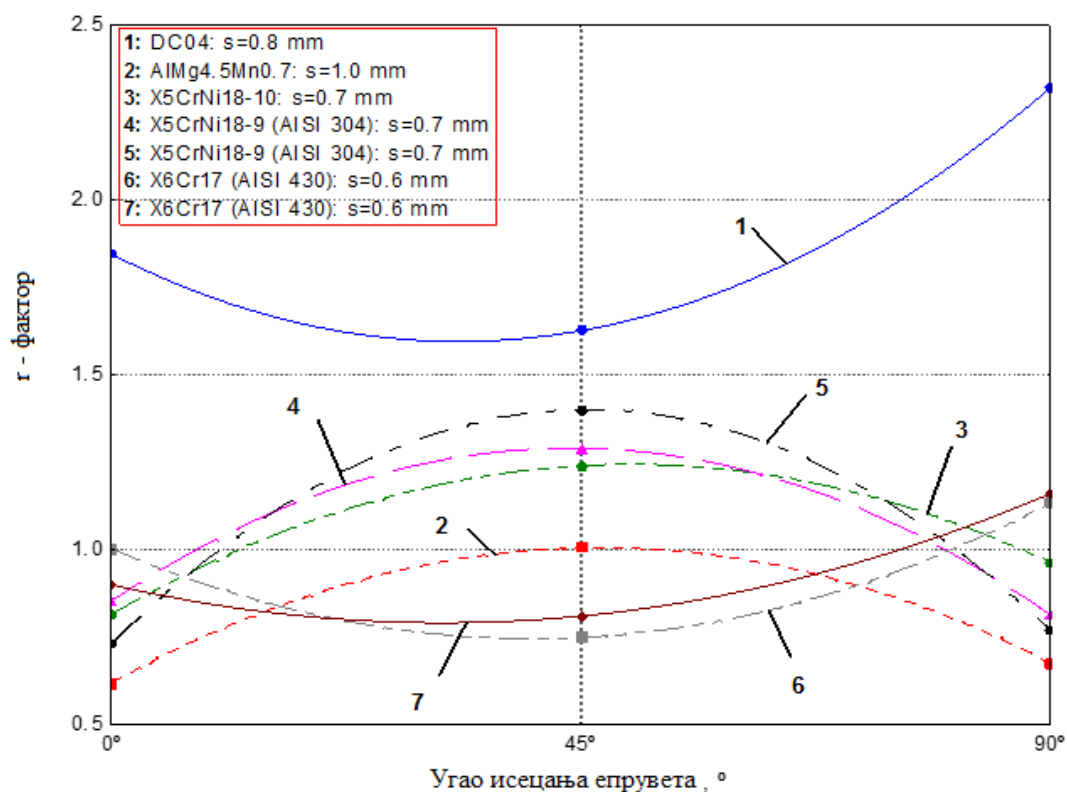
Слика 2.24 Зависност " r " фактора и максималног (граничног) степена извлачења

На слици 2.25 приказан је општи дијаграм утицаја раванске анизотропије на вредност r фактора. Код неумиреног нискоугљеничног челика за углове исецања 0° и 90° је већа вредност r фактора, а при углу од 45° добија се мања вредност r фактора, па се може закључити да има релативно добру обрадивост за углове 0° и 90° . Код Al легура за углове 0° и 90° веома је мала вредност r фактора, а при углу од 45° добија се нешто већа вредност r фактора, па се може закључити да је обрадивост Al легура лоша. Код месинга CuZn62 за углове 0° и 90° је мања вредност r фактора, а при углу од 45° добија се мало већа вредност r фактора, слично је и код месинга хладно ваљаног са 20% и 40% редукције. Код месинга хладно ваљаног са 60% редукције при углу од 45° добија се већа вредност r фактора. [1]

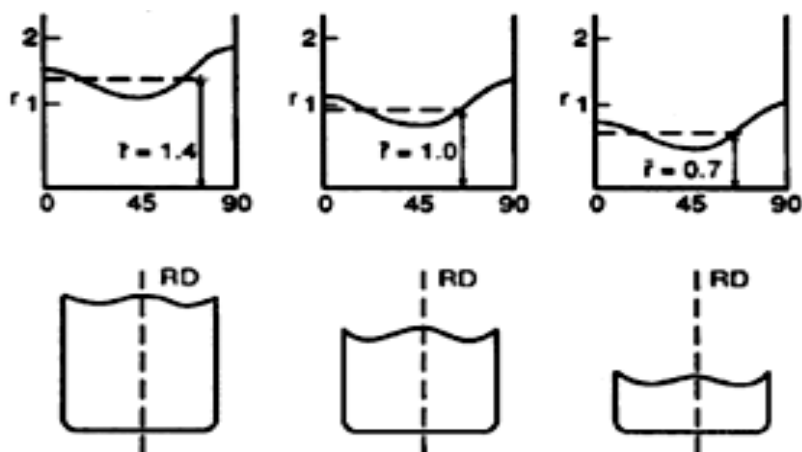


Слика 2.25 Општи приказ утицаја раванске анизотропије на вредност "r" фактора: 1 – неумирен челик са око 0.08% C; 2 – Al легура; 3 – месинг CuZn62 – жарен; 4,5,6 – месинг хладно ваљан (са 20 %, 40 % и 60 % редукције);

На слици 2.26 приказан је дијаграм који представља резултате конкретног експерименталног испитивања утицаја раванске анизотропије на r фактор. Материјал под 1, нискоугљенични челични лим DC04, има велику вредност r фактора при угловима исецања 0° и 90° у односу на правац ваљања, а при углу од 45° вредност је мања и може се закључити да материјал има изузетно добру обрадивост при угловима исецања 0° и 90° , а генерално веома повољну обрадивост. Материјал означен бројем 2, лим од алуминијумске легуре, има лошију обрадивост јер има малу вредност r фактора при свим угловима исецања. Лимови означени цифрама од 3 до 5 су од аустенитних нерђајућих челика. Материјал под 3 има већу вредност r фактора при углу од 45° , а при остала два угла исецања је мала вредност. Сличан је случај за материјале под 4 и 5. Ознаке 6 и 7 односе се на феритне нерђајуће челичне лимове. Они имају мању вредност r фактора при углу исецања 45° , а при остала два угла исецања вредност је нешто већа. Може се закључити да материјали под 6 и 7 имају најлошију обрадивост под углом од 45 степени у односу на остале материјале са ове слике, јер r фактор има најмању вредност.



Слика 2.26 Резултати конкретног експерименталног испитивања утицаја раванске анизотропије на "r" фактор



Слика 2.27 Утицај "r" фактора на дубину извлачења

Коефицијент нормалне анизотропије не мора увек бити у сагласности са осталим важним карактеристикама материјала. Може се појавити велика вредност коефицијента нормалне анизотропије и релативно мало релативно издужење, при затезању.

Веће вредности r фактора увек значе бољу обрадивост у процесу дубоког извлачења, али то не морају значити у другим процесима (двоосна затезања уз

блокиран обод комада итд.). Корелација са карактеристикама везаним за процес дубоког извлачења (степен извлачења, гранични степен извлачења, показатељи деформације, дубина извлачења итд.) је веома добра (слика 2.27). Корелација са другим параметрима и показатељима, као што су параметри везани за ефекат ојачавања (п фактор) не мора увек бити повољна и директна, али најчешће то јесте. [1]

2.1.3.3 Експериментално одређивање коефицијента "r"

Да би се одредила вредност коефицијента "r" једноосним затезањем потребно је да израда епрувете буде изузетно пажљива, како у погледу квалитета обрађених површина, тако и с обзиром на строгу паралелност ивица на мереној дужини.

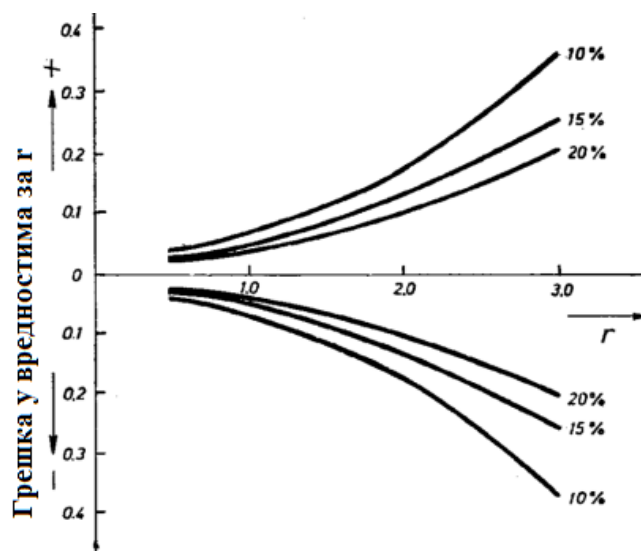
Ширина епрувете је устаљена и обично износи стандардних 20 mm, јер вредност коефицијента "r" опада са порастом ширине.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}; \quad \frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon; \quad \varphi_l = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon)$$

Коефицијент анизотропије "r" се израчунава према изразу 2.30 који се може трансформисати у следећи израз:

$$r = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \left[\frac{b}{b_0} (1 + \varepsilon) \right]} \quad (2.31)$$

На слици 2.28 приказан је дијаграм утицаја издужења епрувете на грешку при одређивњу "r" фактора. Са слике се може закључити да се приликом мањег процента издужења добија већа грешка, а приликом већег процента издужења грешка је мања, али треба водити рачуна да проценат издужења не буде превелики, јер при одређивању "r" фактора процес мора остати у области хомогеног деформисања. Обично се затезање прекида нешто пре тачке М (тачка максимума силе затезања), која код каросеријских нискоугљеничних челичних лимова за дубоко извлачење класе DC04 лежи нешто изнад 20% издужења. Код неких материјала, као што су то лимови од аустенитних нерђајућих челика, тај проценат може бити и знатно већи. Уопште, ако детаљно нису познате карактеристике лима, претходно треба извести испитивање затезањем и дефинисати прецизно област хомогеног деформисања.



Слика 2.28 Утицај издужења на грешку при одређивању "г" фактора

Као што је поменуто вредност $г$ фактора индиректно показује отпорност материјала према стањењу.

Ако је $г=1$ деформација ширине (деформација у равни лима) и деформација дебљине су једнаке и практично нема нормалне анизотропије.

Ако је $г>1$ деформација дебљине (стањење) је мања од деформације у равни што је са аспекта деформабилности веома повољно. Отежаним стањивањем лима омогућава се лакше деформисање у равни, одлагање уласка у критичну зону локализованог деформисања и разарања.

Ако је $г<1$ деформација у равни је мања од стањења, дакле лим показује тежњу ка стањењу и брзом разарању.

Према томе, вредност $г$ фактора веома добро исказује отпор лима ка стањењу и стога је, генерално, повољнија што већа вредност.

Повећањем коефицијента $г$, због повећаног отпора према смањењу дебљине, долази до пораста отпорности пластичном деформисању на критичном месту и материјал ће моћи да пренесе већа оптерећења (носећи попречни пресек ће се мало смањити), независно од степена ојачања материјала. Истовремено, са порастом $г$ неће се мењати отпор деформацији на ободу који се радијално извлачи, тако да ће сила потребна за извлачење, под истим осталим условима практично остати непромењена.

На основу претходног, јасно је да $г$ фактор представља одличан показатељ деформабилности за обликовање лимова дубоким извлачењем.

Вредности r фактора у највећој мери зависе од врсте материјала и изражености усмерене структуре (текстуре).

Ако је потребно направити селекцију нивоа деформабилности, тј. обрадивости лимова, зависно од вредности r фактора, корисне су следеће препоруке:

- $r = 0,5 - 1$ (и уопште $r < 1$) веома лоша обрадивост,
- $r = 1 - 1,2$ слаба обрадивост,
- $r = 1,2 - 1,5$ добра (средња) обрадивост,
- $r = 1,5 - 1,8$ врло добра обрадивост,
- $r > 1,8$ изузетно добра (одлична) обрадивост.

Табела.2 Типичне оријентационе вредности r фактора за различите лимове [1]

Врста материјала	Вредност r фактора
Легуре цинка	0.4 – 0.6
Топло ваљани челици	0.8 – 1.0
Хладно ваљани челици	1.0 – 1.4
Хладно ваљани нискоугљенични челик	1.4 – 1.8
Легуре алуминијума	0.6 – 0.8
Бакар и месинг	0.6 – 0.9
Легуре титана (α)	3.0 – 5.0
Нерђајући челици	0.9 – 1.2
Ниско легирани челици повишене чврстоће	0.9 – 1.2

2.1.4 Параметри обрадивости

Параметри обрадивости су карактеристике које имају константну вредност за дати материјал и одређују се путем експеримента брзо и лако. Представљају основне величине у свеукупном испитивању обрадивости. Једноосним затезањем, при хомогеном деформисању, добијамо следеће параметре [3]:

- граница течења (R_p , МПа),
- затезна чврстоћа (R_M , МПа),
- процентуално издужење при разарању (A , %),
- контракција попречног пресека (Z , %) ,

Овим тестом, могу се одредити и:

- експонент деформационог ојачања (" n ") и

- својства анизотропије (раванска и нормална).

Погодно је да граница течења буде нижа, уз однос $R_p / R_m = 0,55 - 0,6$. Овај однос илуструје ојачање и има висок степен корелације са експонентом деформационог ојачања.

Област примене претходних параметара је ограничена напонско-деформационом шемом конкретног теста који за две различите врсте обраде може давати различите резултате.

Опис деформационог ојачања је најбољи преко кривих ојачања (зависност еквивалентног напона-деформационог отпора, од еквивалентне пластичне деформације). Користи се и експонент "n" који произилази из аналитичке апроксимације криве ојачања ($K = C \cdot \varphi^n$). Иако ова апроксимација није погодна за мање деформације, у области већих деформација врло успешно апроксимира стварну криву течења за лимове (изнад 5%, а нарочито изнад 10%). Како експонент "n" директно дефинише нагиб криве ојачања (интензитет ојачавања), то је он узет као један од битнијих показатеља обрадивости. Једнак је максималној хомогеној природној (логаритамској) деформацији при једноосном затезању [3]:

$$n = \varphi_m = \frac{l_m}{l_0}, \text{ где су } l_0 \text{ и } l_m \text{ почетна и максимална дужина епрувете.}$$

О ојачању и "n"-фактору детаљније разматрање дато је у предходним поглављима.

2.2 Гранична деформабилност

Гранична деформабилност се може дефинисати као способност материјала за достизање максимално могућих деформација при одговарајућим условима обликовања. Критеријум за дефинисање граничне деформабилности може да буде разарање или локализација (појава великих локалних деформација које претходе разарању) [6]. Као критеријум деформабилности се може узети и појава разних дефеката као што су набори, оштећења површине, девијације облика и тсл. када се сматра да је процес неуспешан. Гранична деформабилност ограничава област успешне обраде у деформационом простору. Било која тачка у тој области означава деформационо стање остварено без дефеката. С друге стране границе те области су зоне неуспешне обраде. У којој ће се области наћи деформационо стање неке критичне тачке конкретног

отпреска зависи од низа фактора. На већину тих фактора могуће је утицати. Некима (као што је сила држања и трење на ободу) је могуће потпуно управљати и усмеравати процес обраде ка сигурном и поузданом завршетку [3].

2.2.1 Гранична деформабилност у условима монотоног (пропорционалног) деформисања

Пропорционално напрезање остварује се онда кад спољашње силе, које оптерећују посматрани елемент, од почетка деформисања расту пропорционално једном општем, константном параметру.

Монотоно деформисање постоји кад су испуњена следећа два услова:

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

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

$$m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \text{const.} ; \quad t = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \text{const.} \quad (2.32 \text{ и } 2.33)$$

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

$$m = \frac{2t+1}{2+t} = \frac{2\varphi_2 + \varphi_1}{2\varphi_1 + \varphi_2} ; \quad t = \frac{2m-1}{2-m} \quad (2.34 \text{ и } 2.35)$$

За анизотропан материјал:

$$m = \frac{\left(\frac{1}{r_0} + 1\right)t + 1}{\frac{1}{r_0} + t + 1} = \frac{\left(\frac{1}{r_0} + 1\right)\varphi_2 + \varphi_1}{\left(\frac{1}{r_0} + 1\right)\varphi_1 + \varphi_2} ; \quad t = \frac{\left(\frac{1}{r_{90}} + 1\right)m - 1}{\frac{1}{r_0} - m + 1} \quad (2.36 \text{ и } 2.37)$$

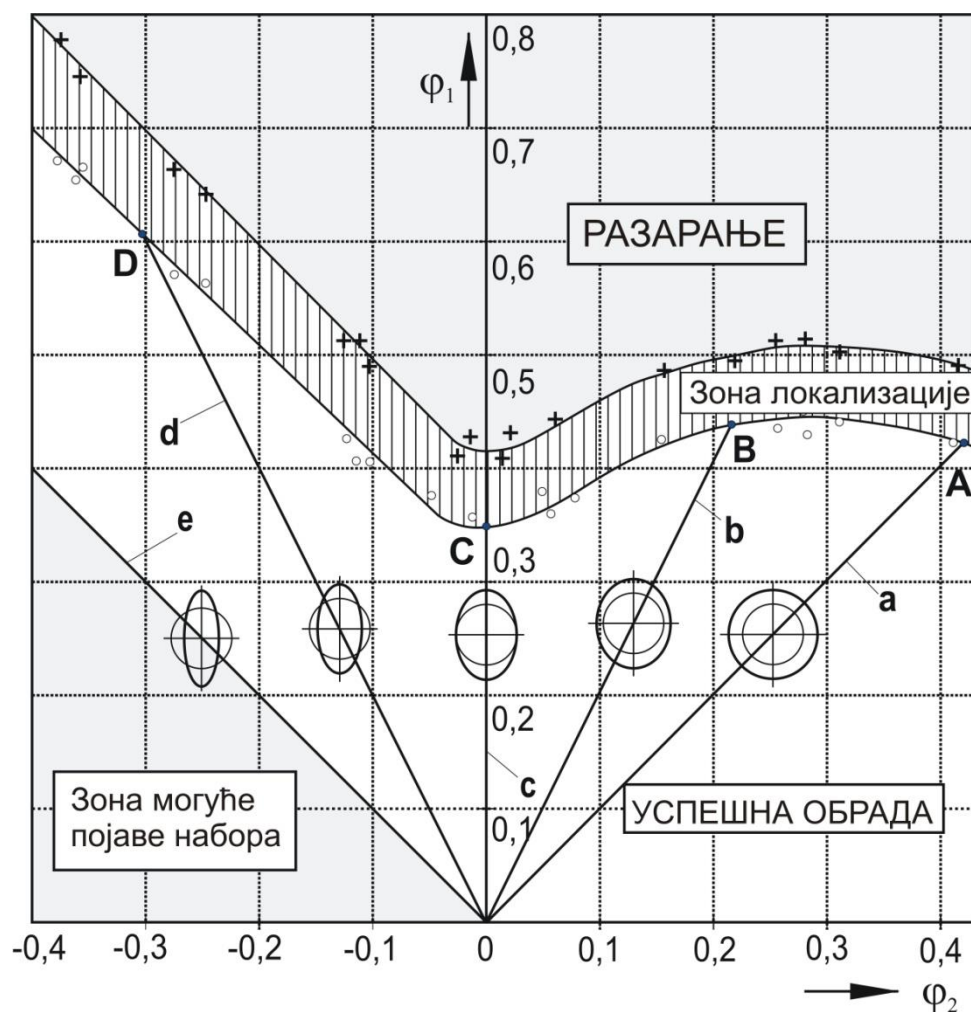
Ознака да су m и t константне не значи њихову апсолутну непроменљивост, него само у конкретној фази монотоног деформисања. [3]

Због непроменљивости запремине у области пластичности, тродимензиони деформациони простор се може редукovati у дводимензиони и у њему дефинисати гранична деформабилност. Другим речима, координатни систем главних природних деформација у равни лима (φ_1 и φ_2) је домен графичког изражавања граничних деформација, односно визуелизације граничне деформабилности преко дијаграма граничне деформабилности (ДГД), слика 2.29.

Основу за одређивање ДГД чини геометријска техника мерних мрежа и деформациона анализа која из ње произилази, и омогућава добијање потпуног деформационог поља у свим значајним зонама комада. [3]

ДГД има неколико поља (слика 2.29). Зона локализације простире се од линије почетка локализованог деформисања до линије разарања, изнад које је област разарања. Испод доње линије је област успешне обраде. Експерименталне тачке које дефинишу граничне криве су, мање или више, расуте. Свака права повучена из координатног почетка до граничних кривих представља једну напонско-деформациону шему монотоног деформисања, односно једну путању. Означено је 5 карактеристичних путања које су објашњене испод слике 2.29. На путањама су симболично означени кружићи мерне мреже пре и после деформисања. Запажа се да је најнеповољније раванско деформационо стање ($\varphi_1 = \varphi_3$ при $\varphi_2 = 0$) при коме се лим најбрже тањи и разара. Уколико је φ_2 негативније (нарочито ако интензитет притисног напона σ_2 расте) гранична деформација φ_1 нагло расте, што је у складу са постулатом теорије пластичности о порасту деформабилности у условима већих притискујућих напона. [3]

Код једноосног затезања нема притискујућих напона, а вредност граничне деформације φ_1 је велика. То у мањој мери важи и за случајеве двоосног затезања (област десно од ординате). Овакве вредности деформације φ_1 привидно представљају парадокс јер теорија пластичности говори о паду деформабилности у условима затежућих напона. Објашњење лежи, с једне стране, у геометријским особинама лима (једна димензија је скоро занемарљиво мала у односу на друге две), а с друге, у томе да на ДГД најважнију улогу за положај кривих има само деформација φ_1 која самостално не може представљати све аспекте деформабилности.



Слика 2.29 Дијаграм граничне деформабилности (ДГД)

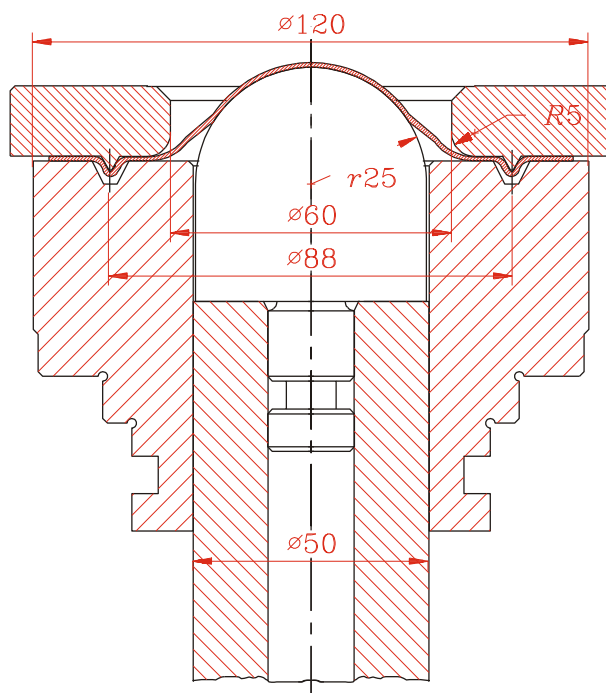
- a) $m = 1$; $t_{iz} = 1$ равномерно двоосно затезање
- b) $0,5 < m < 1$; $0 < t_{iz} < 1$ неравномерно двоосно затезање
- c) $t = 0$; $m_{iz} = 0,5$ раванско деформационо стање (савијање, затезање)
- d) $m = 0$; $t_{iz} = 0,5$ равномерно једноосно затезање
- e) $m < 0$; $t_{iz} < -0,5$ раванско напонско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

Индекс iz у предходним изразима подразумева вредности за изотропан материјал.

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

типове двоосног затезања (развлачења), нарочито у условима фиксiranог обода комада.

Дијаграм граничне деформабилности се одређује експериментално. Један од често коришћених поступака је развлачење полусферичним извлакачем серије епрувета различите ширине (слика 2.30). За приказан алат епрувете имају дужину 120 mm. Ширина је у распону од 30 до 120 mm са порастом од по 10 mm. [3]



Слика 2.30 Шема алата за одређивање дијаграма граничне деформабилности

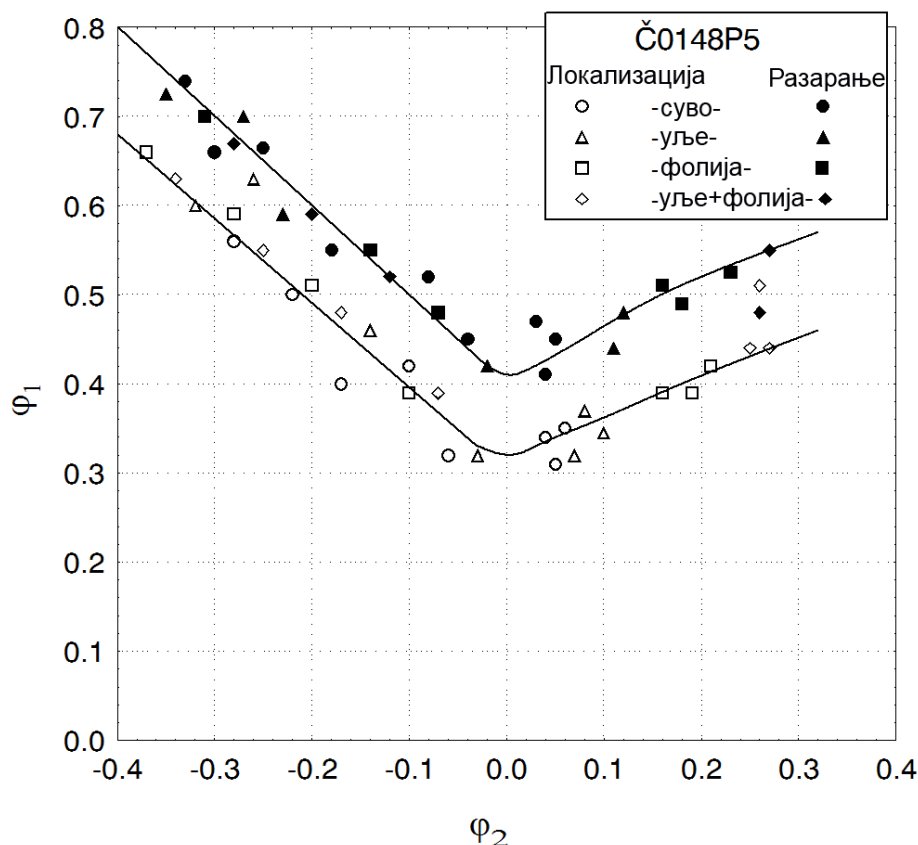
Најзначајнији утицај на положај граничних кривих имају следећи фактори:

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

Утицај под 2) и 3) су обично искључени јер се за једно истраживање најчешће користи један тип мерне мреже и један поступак добијања дијаграма. Међутим, код упоређивања резултата различитих истраживања треба водити рачуна о методологији и критеријумима одређивања, условима испитивања, мерној мрежи. [5]

Утицај трећа на положај граничних кривих ДГД дат је на слици 2.31. Експерименталне тачке су добијене варирањем контактних услова, од екстремних

(потпуно суве површине, потпуно подмазивање применом фолије и уља за дубоко извлачење) до мешовитог подмазивања (уље) и коришћења фолије.

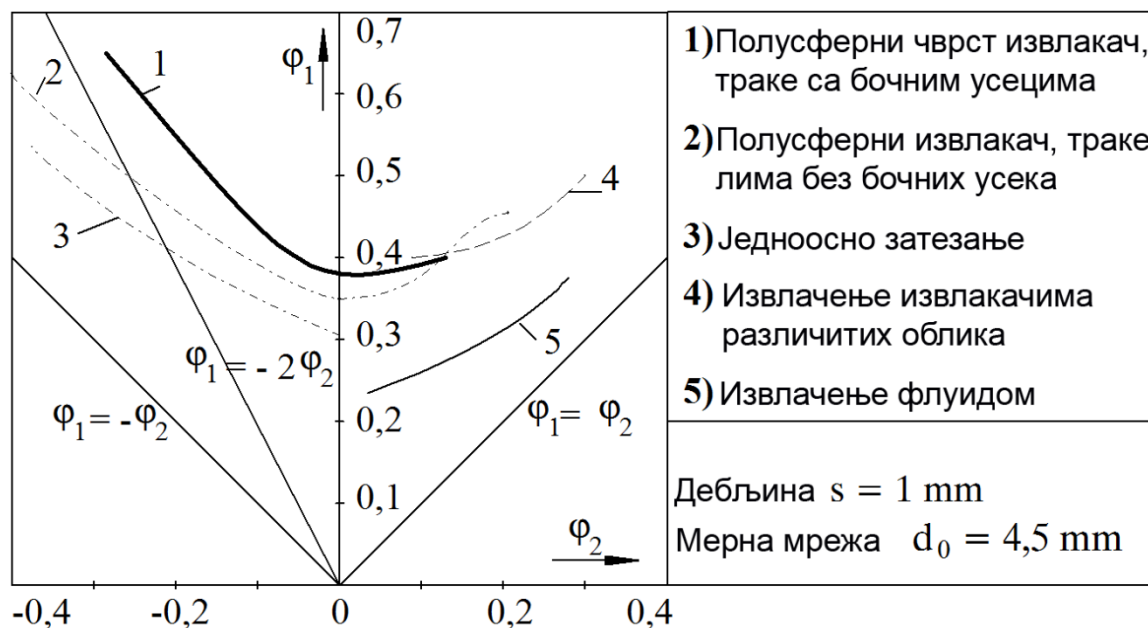


Слика 2.31 ДГД добијен при различитим условима трења

Јасно је видљиво да услови трења не утичу на било какво значајније померање граничних кривих. Илустративан је положај тачака у десном делу ДГД. Што је трење веће, теже је течење метала у тангенцијалном правцу (мање φ_2 , све до $\varphi_2 = 0$ за раванско деформационо стање). Услови деформисања су лошији па је и φ_1 мање. Мањем трењу одговара равномерније деформисање. φ_2 је знатно веће, али и φ_1 расте, па се добија ефекат кретања тачака по граничној кривој. Померање граничних кривих у правцу ординатне осе захтевало би прираштај $\Delta\varphi_1$ при $\varphi_2 = const.$, што је могуће само у појасу локализације. Померање кривих у правцу апсцисне осе значило би да при константној већој главној деформацији ($\varphi_1 = const.$) постоји прираштај $\Delta\varphi_2$. Са великом сигурношћу се може рећи да променом само услова трења при монотонном деформисању такве ефекте није могуће добити. Физичко разумевање деформационих

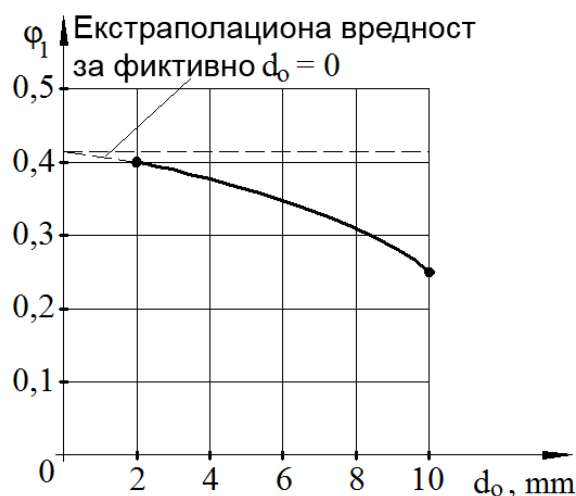
збивања налаже да променом услова трења није могуће мењати интензитете деформисања у појединим правцима одвојено. [3]

Експериментални поступци за одређивања ДГД могу бити различити. На слици 2.32 дато је поређење резултата за 5 поступака. Видљиве су разлике између кривих као последица једино другачијег поступка одређивања. [5]

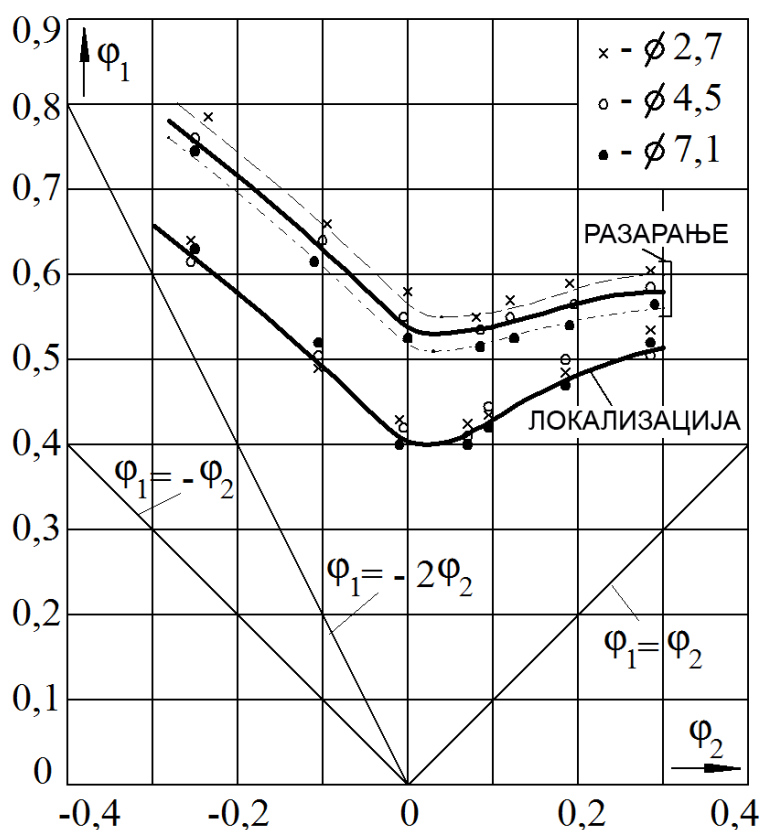


Слика 2.32 Утицај врсте експерименталног поступка на положај ДГД

Иако се за величину мерне мреже не би рекло да може значајно да утиче на положај кривих управо тај фактор има знатан утицај. И то је илустровано на сликама 2.33 и 2.34. Већи елементи мерне мреже значе нижи положај кривих ДГД. [5]



Слика 2.33 Утицај крупноће мерне мреже на вредност деформације



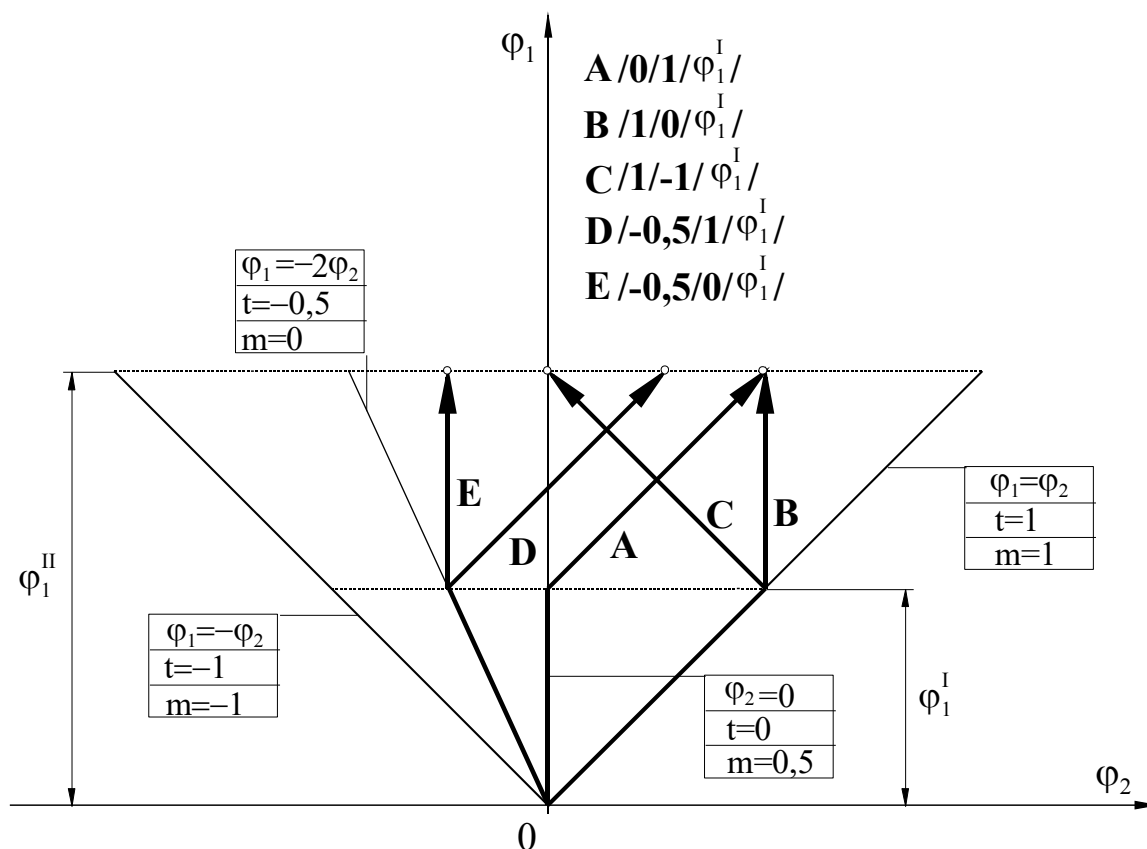
Слика 2.34 Утицај крупноће мерне мреже на положај ДГД

2.2.2 Гранична деформабилност у условима немонотоног (непропорционалног) деформисања

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

Историја процеса пластичног деформисања се најсликовитије изражава преко тзв. путања или трајекторија деформисања. То су линије које графички представљају начин промене односа главних деформација φ_1 и φ_2 , све до разарања. На слици 2.35 су приказане, појединачно најчешће коришћене линеарне путање деформисања за двофазни процес. [3]

Великим словима дате су путање чија се ознака састоји од три бројне вредности. Прво је коефицијент t за прву фазу, затим коефицијент t за другу фазу и на крају вредност деформације φ_1 на крају прве фазе.



Слика 2.35 Приказ најчешће реализованих путања при двофазном деформисању

Аналитичко изражавање путања је најједноставније преко деформационог фактора t , који је у директној вези са напонским коефицијентом m и који одређује правац путање (изрази 2.32 и 2.33). Свака сложена двофазна линеарна путања може се описати и на следећи начин:

$$\varphi_2 = \begin{cases} t^I \cdot \varphi_1 & ; \varphi_1 \leq \varphi_1^I \\ t^I \cdot \varphi_1^I + t^{II} (\varphi_1 - \varphi_1^I) & ; \varphi_1 > \varphi_1^I \end{cases} \quad (2.38)$$

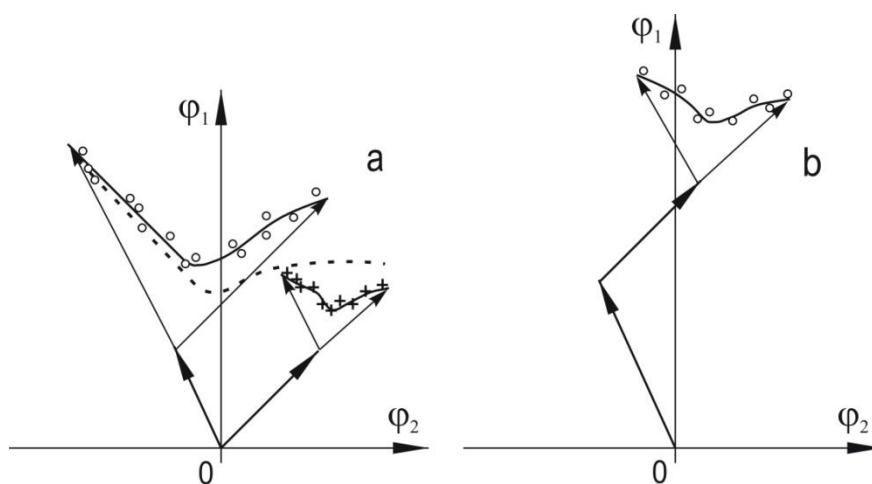
где су:

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

φ_1^I -деформација на крају прве фазе,

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

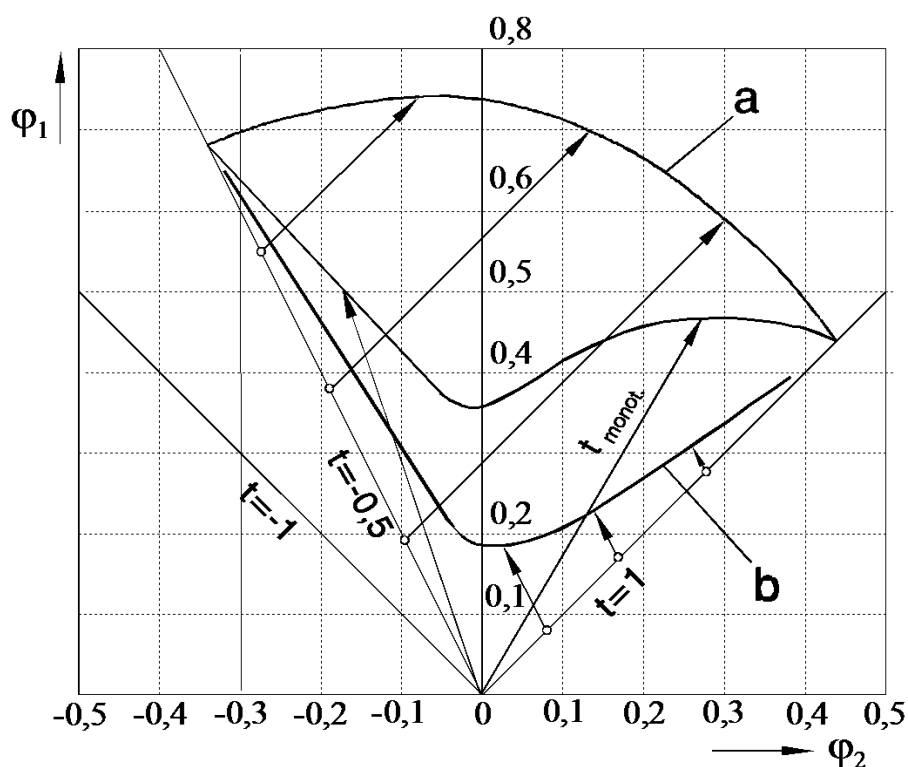
До граничне деформације могуће је стићи различитим комбинацијама праваца путања и износа деформација. На слици 2.36 под а), приказане су две двофазне шеме. У првој фази деформисање се изводи са једним напонско-деформационим стањем до одговарајуће деформације на крају те фазе. У другој фази остварује се лепеза путања, односно напонско деформационих шема до постизања граничних деформација. Треба имати у виду да се у другој фази обликује серија епрувета и свака појединачна путања захтева једну епрувету. Због тога је потребно у првој фази деформисати довољно материјала. [3]



Слика 2.36 Сложене историје деформисања са константним деформацијама на краји претходних фаза

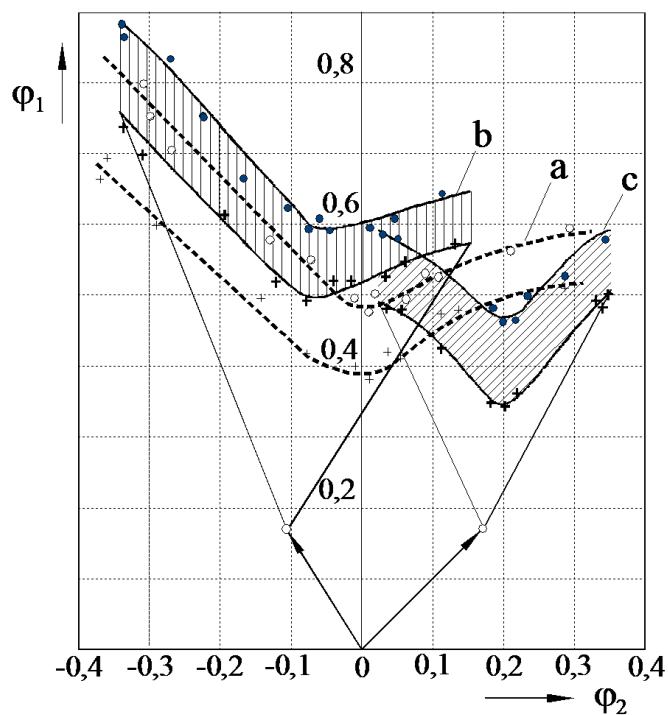
Под б) је приказан трофазни процес. Испрекиданом линијом, у делу слике под а), дата је крива дијаграма граничне деформације при монотонном деформисању.

Другачији приступ је приказан на слици 2.37. У првој фази правац путање је константан, али крај те фазе изводи се при различитим деформацијама. У другој фази нема промене правца путања, него се распон по оси φ_2 остварује само различитим вредностима деформација на крају прве фазе (односно претходних фаза, ако је процес вишефазан). Најповољнији облик историје деформисања (приказан линијом а, на слици 2.37), с обзиром на вредност граничних деформација, описан је ознаком $(/-0,5/1/\varphi_1^I)$, а најнеповољнији (линија б) ознаком $(/1/-0,5/\varphi_1^I)$. Очигледно, деформација на крају прве фазе φ_1^I је променљива величина за ове случајеве, док су правци путања константни. [3]



Слика 2.37 Сложене историје са променљивим деформацијама на крају претходних фаза

На слици 2.38 приказан је утицај сложене историје деформисања дате ознакама $(/-0,5/t''/0,172/)$ и $(/1/t''/0,172/)$ изведене у конкретном експерименту. [3]



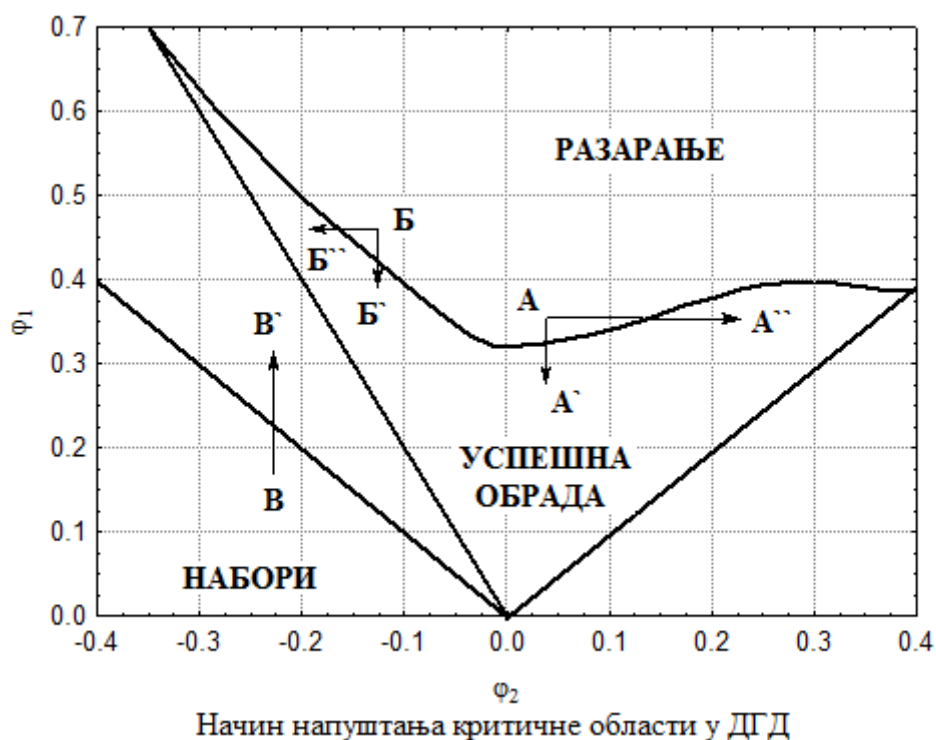
Слика 2.38 Пример утицаја двофазних процеса на положај ДГД

Прва фаза је са константним правцем путање (једноосно затезање) и завршава се константном вредношћу деформације $\varphi_1 = 0,172$. У другој фази је остварен распон праваца путања које воде до граничних вредности деформација. Дијаграм граничне деформабилности је приказан преко криве локализације и криве разарања уз означавање поља између њих. Са „а“ је означен дијаграм граничне деформабилности добијен у условима једнофазног монотоног деформисања. Претходно једноосно затезање (у првој фази) повољно утиче на дијаграм, нарочито на десну грану (подиже се ка већим вредностима φ_1 - поље б). Претходно двоосно затезање знатно трансформише ДГД и спушта га ка нижим вредностима φ_1 (поље в). Карактеристично је да зона минимума кривих дијаграма граничне деформабилности приближно прати вредности деформације φ_2 на крају прве фазе. Ефекти променљиве историје зависе од врсте материјала. Криве са слике се односе на нискоугљенични челични лим.

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

Најчешће се немонотонно деформисање (сложена историја деформисања) изучава на примерима вишефазних поступака при праволинијским путањама у свакој фази, тј. са очуваним монотоним деформисањем током сваке фазе. Ако путање у реалним условима и нису праволинијске увек је могуће целокупну трајекторију деформисања погодно поделити на етапе, при чему је у свакој етапи процес пропорционалан. [3]

Практична примена ДГД за лимове се може изводити на два начина. Први начин подразумева директно поређење дијаграма одређених за различите материјале или одређених за исти материјал под различитим условима. Други начин обухвата претходно експериментално дефинисање деформационих поља у критичним зонама отпресака са дефектима чији узрок треба установити. Затим се дистрибуције деформација уносе у ДГД и процењују у односу на граничне криве.



Слика 2.39 Смернице за решавање критичних деформација

На слици 2.39 приказан је положај три тачке (А, Б и В) које представљају зависност деформација на три критична места. Сва три места подразумевају дефект, односно проблем на конкретном комаду. На местима А и Б дошло је до појаве пукотина на лиму (разарања), док је у тачки В дошло до појаве набора. Јасно се види потребан начин промене деформација да би се решио постојећи проблем. Он је означен стрелицама. То значи да конкретним изменама у процесу обликовања треба постићи ефекат померања критичних тачака у безбедну зону ДГД. [5]

3. ДЕФОРМАБИЛНОСТ ПРИ ЗАПРЕМИНСКОМ ОБЛИКОВАЊУ

Разлог за кратак преглед приказа деформабилности при запреминском обликовању, иако се тема рада односи на деформабилност код лимова, је указивање на сложеност и разумевање феномена деформабилности металних материјала уопште. Разумевање овог феномена код запреминског обликовања баца ново светло и на граничну деформабилност лимова.

3.1 Утицајни фактори на деформабилност материјала при запреминском обликовању

Као што је већ речено, на деформабилност утичу бројни фактори и њихов утицај је могуће приказати преко функције деформабилности.

$$f_D = f_D(H_M, S_M, \varphi, \dot{\varphi}, T_o, T_\sigma, G_u)$$

где је:

f_D - функција деформабилности која се квантитативно изражава величином деформације,

H_M - хемијски састав материјала,

S_M - структурно стање материјала,

φ - степен деформације,

$\dot{\varphi}$ - брзина деформације,

T_o - температура обраде,

T_σ - напонско стање,

G_u - гранични услови.

Фактори H_M и S_M су фактори који зависе од материјала па се могу назвати факторима материјала. Остали фактори су најчешће условљени процесом обликовања, па се називају фактори услова обраде. [5]

3.1.1 Фактори материјала

Већ је поменуто да утицај материјала обухвата хемијски састав и структурно стање материјала. Њихов утицај на деформабилност, односно пластичност је веома сложен. Због тога се тачна процена о сваком материјалу може дати тек после детаљног испитивања. Обично се подразумева разматрање деформабилности при обликовању у хладном стању, с обзиром да је у топлом стању пластичност знатно побољшана.

Обојени метали и легуре углавном имају повољнију деформабилност, односно пластичност у односу на челике. То се нарочито види код поступака запреминског обликовања. На пример, код обојених метала је знатно лакше извршити хладно истискивање него код челика. Међутим, и овакву тврдњу треба прихватити условно.

Код челика пластичност опада са повећаним садржајем легирајућих елемената. На пример, нискоугљенични челични лим Š0148 (DC04 по Европском стандарду) има веома мало угљеника (0,05% - 0,1%) и феритну структуру. Познат је по веома доброј деформабилности и погодан за дубоко извлачење делова сложене геометрије.

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

Структура највеће пластичности код челика је аустенит. Легирајући елементи који утичу на проширење аустенитне области на дијаграмима стања називају се аустенитотворни или аустенитизатори. Са повећањем њиховог процента опада и температура рекристализације. У одговарајућим случајевима и у хладном стању остаје аустенитна структура. Главни аустенитотворни елементи су: Ni, Mn, C и Cu. Насупрот њима стоје елементи који затварају област аустенита, тзв. феритотворни или феритизатори. То су: Cr, Mo, Si, Nb, V, W, Ti итд. При довољном садржају одговарајућег елемента овог типа, структура ће бити феритна на свим температурама по завршеном очвршћавању. Утицај феритотворних елемената на пластичност је неповољан. [5]

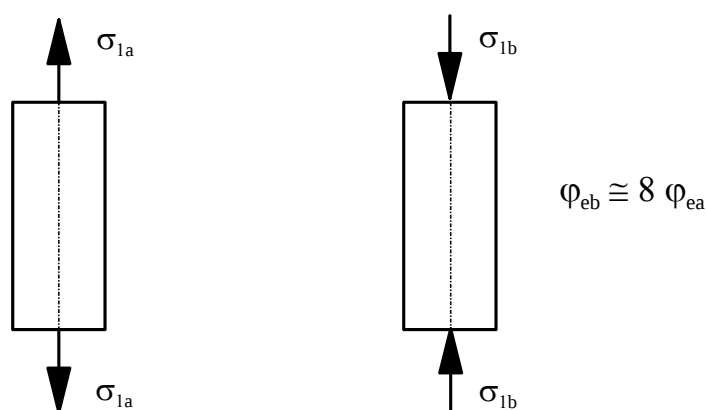
Код челика са већим садржајем угљеника и легирајућих елемената значајан утицај имају карбиди. То су веома тврде и крте фазе које имају веома неповољан утицај на пластичност. Повећавају тврдоћу, кртост, отпорност на хабање итд. Такви материјали се ретко пластично обликују, а када је то потребно обликовање се изводи у топлом стању. Највећу склоност ка фомирању карбида има Ti, следе и V, Cr, Mn и тек онда Fe.

Ради повећања пластичности понекад се изводи тзв. сфероидизација, односно меко жарење, с циљем да се ламеле цементита (карбида гвожђа или другог елемента) преведу у ситније зрнасте, сфероидне форме. Таква структура има бољу пластичност. Жарење је термичка обрада код челика којом се побољшавају пластична својства. Већина челика се испоручује од стране произвођача у жареном стању, али је често потребно током операција пластичног обликовања изводити међуоперационо жарење.

3.1.2 Фактори услова обраде

1. **Температура обраде** има утицај на деформабилност потпуно аналоган, али супротан утицају на деформационо ојачање. На температурама вишим од температуре рекристализације ефекат ојачања је отклоњен, интензитет деформационог отпора знатно смањен, а деформабилност је веома побољшана. [5]
2. **Брзина деформисања** показује значајан утицај на ојачање, а самим тим и на деформабилност. Посебно је то изражено при топлој обради и великим брзинама, када ефекат брзинског ојачања може да умањи деформабилност. Пошто су брзине код класичних процеса обликовања у хладном стању мале деформабилност се не мења битније. [5] О утицају температуре и брзине деформисања већ је било говора у поглављу 2.1.
3. **Напонско стање** има веома велики утицај на деформабилност. Тај утицај се објашњава деловањем напона на микроструктурне грешке у материјалу које резултира макро ефектима. Затежући напони повећавају шупљине и напрслине у структури, тако да се у критичном моменту структура разара, што резултира малим деформацијама тј. остварује се ниска деформабилност. Када преовладавају притисни напони долази до супротног ефекта односно до тзв. "залечивања" микро дефеката структуре. Резултат је дужи трајање процеса обликовања и достизање, често и вишеструко већих деформација у односу на случај доминације затежућих напона. [5]

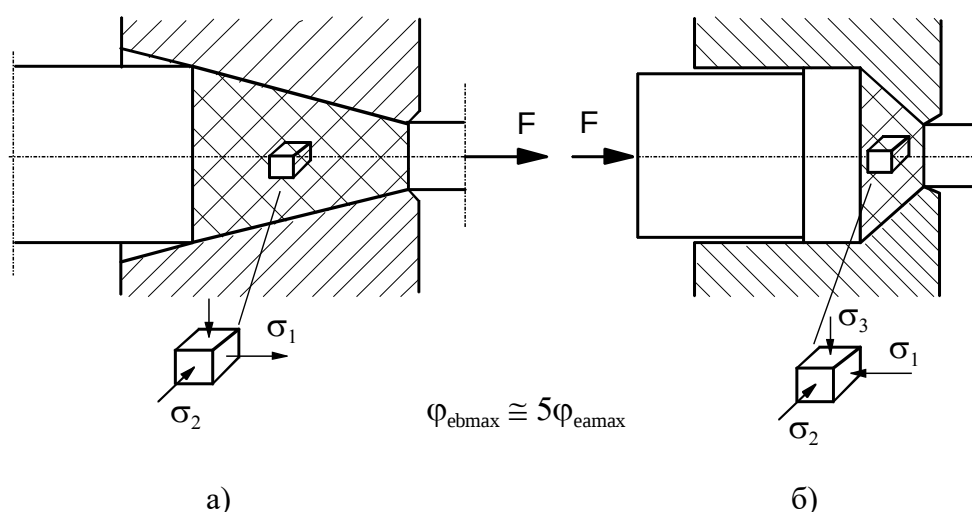
На слици 3.1 приказано је поређење процеса аксијалног затезања и сабијања, који може послужити за приказ утицаја напонског стања на деформабилност.



Слика 3.1 Поређење процеса аксијалног затезања и сабијања

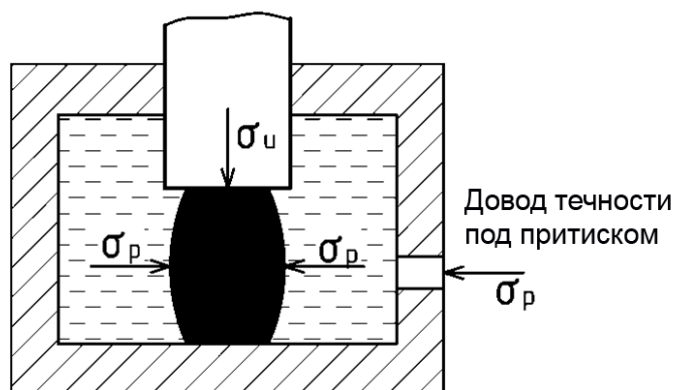
Ова два процеса се разликују само по томе што је у првом случају у питању једноосно затежуће оптерећење, услед чега настају затежући напони у материјалу, а у другом случају је у питању једноосно притискујуће оптерећење, због чега у материјалу настају притискујући напони. Због различитог смера оптерећења настају и различити смерови напона. Код нискоугљеничних челика се код сабијања, остварује око осам пута већа ефективна деформација него у случају затезања. Упрошћено се може рећи да исти материјал у условима аксијалног затезања испољава осам пута мању деформабилност него у условима аксијалног притиска. [5]

Још један пример јесте поређење вучења и истискивања. Код вучења је присутно троосно разнородно напонско стање, један напон је затежући (слика 3.2, а), а два су притискујућа. Код истискивања, је присутно истородно троосно притискујуће напонско стање (слика 3.2, б).



Слика 3.2 Поређење процеса вучења (а) и истискивања (б)

Ако посматрамо механички и геометријски ова два процеса су веома слична, али ако посматрамо са аспекта дејства деформационе силе онда постоји разлика само у положају нападне тачке оптерећења. Код вучења она је са излазне стране алата, тако да се у зони деформисања јављају затежући напони. Код истискивања се налази са улазне стране алата и тако се реализује притисно напонско стање у зони деформисања. Експериментално је утврђено да се за исти материјал при истискивању остварује приближно пет пута већа гранична деформација, него при вучењу. [5]



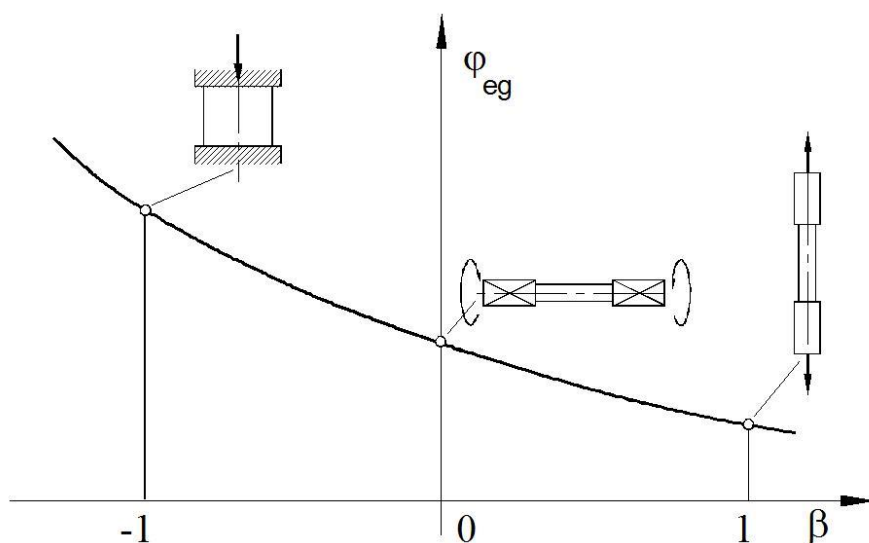
Слика 3.3 Деловање свестраног притиска

У хидростатичким условима деловања напонског стања свестраног притиска високог интензитета, приказаног на слици 3. 3 деформабилност расте, тако да постаје могуће пластично обликовање и веома кртих материјала као што је на пример сиви лив.

3.2 Гранична деформабилности при запреминском обликовању

При запреминском обликовању квантитативна мера деформабилности је еквивалентна гранична деформација. Ако се та вредност прекорачи долази до разарања. За практичан приказ деформабилности користи се зависност граничне деформације од напонског стања, чији утицај је изузетно важан. На тај начин добија се дијаграм граничне деформабилности при запреминском обликовању, сл. 3.4. [6]

$$\varphi_{eg} = f(T_{\sigma}) = f(\beta) \quad (3.1)$$



Слика 3.4 Дијаграм граничне деформабилности при запреминском обликовању

Еквивалентни напон:

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

Еквивалентна деформација:

$$\varphi_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{[(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2]} \quad (3.3)$$

Напонски фактор (фактор напонског стања):

$$\beta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \quad (3.4)$$

Дијаграм граничне деформабилности (слика 3.4) добија се експериментално. Свака тачка одговара једном специфичном типу напонског стања. Минимални број тачака је 3 (једноосно затезање, једноосно притискивање и чисто увијање). За допунске тачке може се користити двоосно затезање, оптерећење цеви унутрашњим притиском, двоосно притискивање и различите друге сложеније шеме.

За једноосно затезање:

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \sigma_1 ; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \\ \beta &= 1 \end{aligned}$$

За једноосно притискивање:

$$\begin{aligned} \sigma_e &= -\sigma_1 ; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \\ \beta &= -1 \end{aligned}$$

За чисто увијање:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= -\sigma_2 ; \quad \sigma_3 = 0 \\ \beta &= 0 \\ \sigma_e &= \sqrt{3}\sigma_1 \end{aligned}$$

За равномерно двоосно затезање:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_2 ; \quad \sigma_3 = 0 \\ \beta &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2)^2 + (\sigma_1)^2]}} = 2 \end{aligned}$$

За деловање флуида (притисак p) унутар цилиндричне цеви полупречника r и дебљине зида t :

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot r}{t} ; \sigma_2 = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t} ; \sigma_3 = 0$$

$$\beta = \sqrt{3} \approx 1,73$$

За равномерно двоосно притискивање:

$$-\sigma_1 = -\sigma_2 ; \sigma_3 = 0$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = -\sigma$$

$$\beta = -2$$

Облик криве дијаграма граничне деформабилности (ДГД) у области позитивних вредности напонског фактора β (десни део дијаграма) показује пад деформабилности са повећањем учешћа затежућих напона у напонском стању. Потпуно супротно, са порастом учешћа притисних напона (леви део дијаграма) у области негативног напонског фактора β деформабилност расте. Главни недостатак у примени ДГД за запреминско обликовање је сложени експериментални поступак добијања.[5]

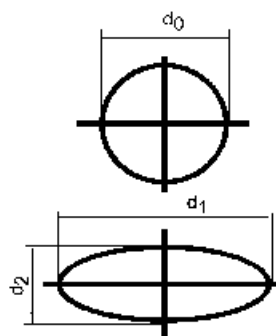
Систематски посматрано ДГД при запреминском обликовању у односу на ДГД код лимова прати промену једне универзалне и опште вредности (φ_{eg}) у односу на показатељ напонског стања β који је веома погодан (бездимензиона величина). Ово показује потпунији приступ изражавања деформабилности али који, нажалост, није применљив код лимова, пре свега због њихових геометријских карактеристика (мала дебљина у односу на димензије у равни). Из тог разлога код лимова није могуће изводити притисна оптерећења (разне врсте сабијања), као што је то веома лако изводљиво при запреминском обликовању.

4. ЕКСПЕРИМЕНТ

Овај део рада односи се на експериментално одређивање дијаграма граничне деформабилности за лимове од различитих материјала. За њихово добијање коришћена је графометријска метода мерних мрежа.

Пре самог процеса развлачења, на лим, односно епрувете, се електрохемијским поступком наноси мерна мрежа са елементима кружног облика, пречника $d_0 = 3 \text{ mm}$. Да би се на епрувете нанела мерна мрежа потребно је очистити и одмастити њихове

површине уз помоћ ацетона. Након тога приступа се развлачењу епрувета на лабораторијској машини ERICHSEN 142/12 чија се брзина деформисања може регулисати у опсегу 0-250 mm/min, при чему се сила главног цилиндра може задати у два мерна опсега, 0-20 kN и 0-130 kN. Развлачење серије епрувета се изводи полусферичним извлакачем (слика 2.30) под дејством оптерећења које ће узроковати разарање епрувете и тада се на њој може приметити да је мерна мрежа тј. да су њени елементи деформисани (слика 4.1).



Слика 4.1 Деформисан елемент мерне мреже

Мерењем њихових нових димензија, на месту разарања епрувете и на истом одстојању са друге стране у односу на пол калоте, и њиховим прерачунавањем помоћу израза (2.21) и (2.22) добијамо вредности деформација φ_1 и φ_2 за оба елемента мерне мреже. Сваки пар ових деформација на дијаграму граничне деформабилности одређује положај једне тачке. Када се унесу вредности деформација свих епрувета из серије, њиховим спајањем образују се граничне криве (крива разарања и крива локализације). На слици 4.2 приказане су спаковане серије епрувета коришћене при добијању дијаграма граничне деформабилности.



Слика 4.2 Спаковане 4 серије епрувета за одређивање ДГД

У поглављима која следе приказани су добијени дијаграми за лимове од три различита материјала: челични лим DC04, алуминијумска легура Al Mg4,5Mn0,3 и нерђајући челични лим X5CrNi18 9, као и њихова анализа.

4.1 Одређивање ДГД за челични лим DC04 (Č0148P5)

DC04 (Č0148P5) је нискоугљенични каросеријски лим и има максимално 0,08% угљеника и умирен је са 0,02% алуминијума. Намењен је за дубоко извлачење са највишим захтевима, као што је добијање делова каросерије аутомобила.

У табели 4.1 дате су механичке карактеристике поменутог лима (затезна чврстоћа R_m , граница течења R_p , однос ове две величине R_p/R_m , процентуално издужење при разарању A_{80}), као и карактеристике обрадивости (r и n фактор). Све величине одређене су с обзиром на раванску анизотропију, три правца у односу на правац ваљања. У задњој врсти су средње вредности.

Табела 4.1 Карактеристике нискоугљеничног челичног лима DC04

Карактеристике лима DC04, дебљине $s_0=0,8$ mm						
Угао према правцу ваљања лима, °	R_p , MPa	R_m , MPa	A_{80} , %	r	n	R_p/R_m
0	200,3	299,0	36,4	1,403	0,23	0,67
45	207,5	300,1	32,7	1,147	0,21	0,69
90	210,0	292,3	33,46	1,616	0,20	0,72
Средња вредност	206,3	297,9	33,8	1,33	0,212	0,69

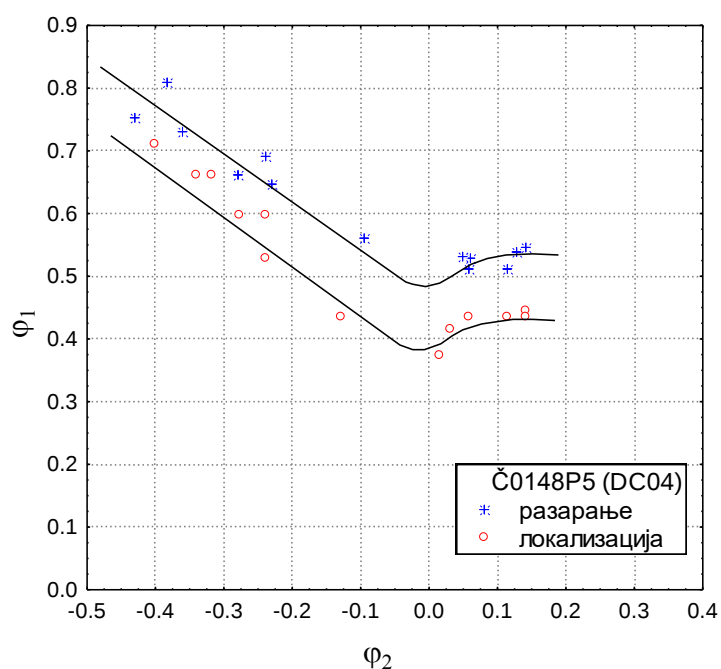
Сагледавањем табеле запажа се нешто нижа вредност r фактора за правац од 45° у односу на правац ваљања, што има посебан значај при извлачењу делова квадратног, правоугаоног и других сложених облика.

Сликом 4.3 приказана је серија епрувета након разарања, која је коришћена за одређивање ДГД по претходно описаном поступку.



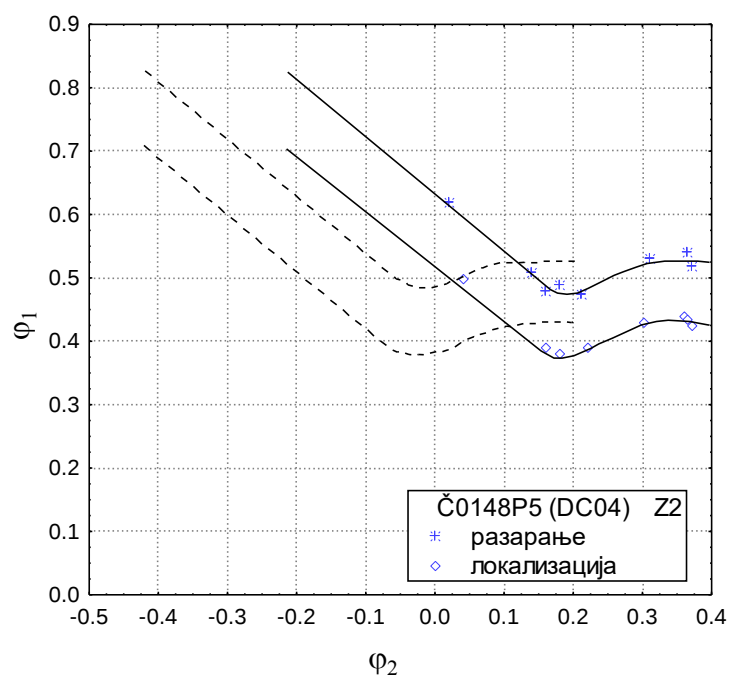
Слика 4.3 Серија епрувета нискоугљеничног челичног лима DC04

На слици 4.4 је приказан дијаграм граничне деформабилности одређен при монотоним (пропорционалним) процесу деформисања.

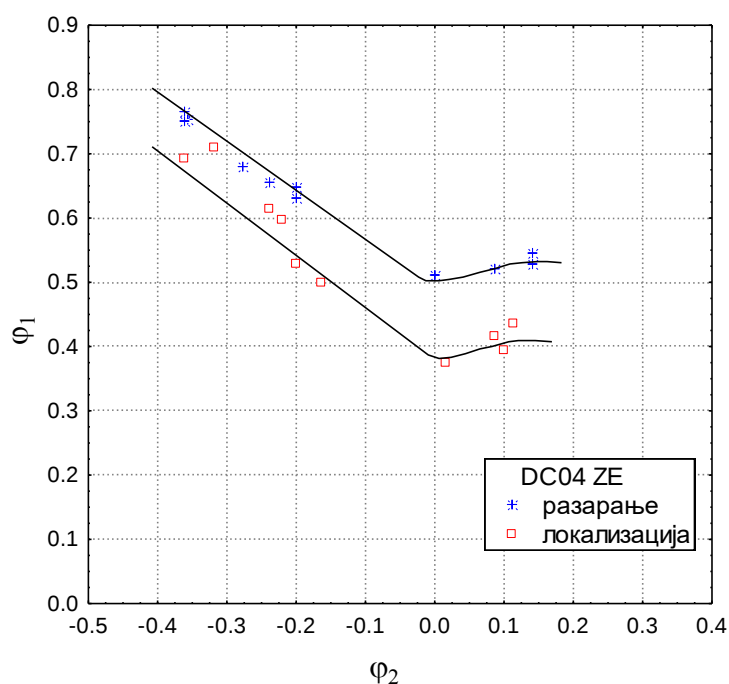


Слика 4.4 ДГД при монотоним деформисању

Слика 4.5 илуструје ДГД који се добија при двофазном немонотоним процесу обликовања. Испрекидана линија на дијаграму представља ДГД за монотони поступак. Ознака Z2 показује да је реч о немонотоним процесу са развлачењем, т.ј. двоосним затезањем при фиксираним ободу у првој фази. На крају прве фазе достигнута је деформација од 17% (видети слику 2.38).



Слика 4.5 ДГД при немонотонном деформисању

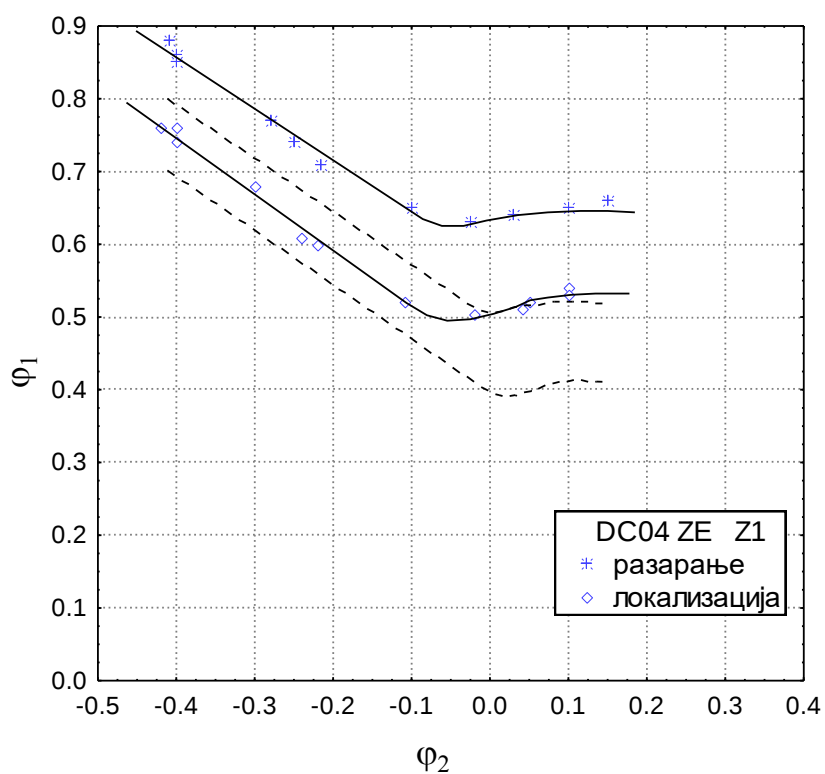


Слика 4.6 ДГД при монотонном деформисању за лим са превлаком

На сл. 4.6 дат је ДГД за лим DC04 са једностраном антикорозионом превлаком од цинка нанетом електрохемијским путем. Превлака је веома танка (10-15 μm дебљине) и не утиче на положај кривих ДГД, што се види поређењем слика 4.4 и 4.6. Превлака неповољно утиче на понашање лима у триболошком смислу. Веома је мека и током процеса обликовања лако се скида и лепи за контактне површине алата. Епрувете коришћене за одређивање ДГД са слике 4.6 приказане су испод.



Слика 4.7 Серија епрувета за ДГД лима са превлаком DC04 ZE



Слика 4.8 ДГД при немонотонном деформисању за лим са превлаком

На сл. 4.8 дат је ДГД за немонотони процес у коме је прва фаза једноосно затезање са максималном деформацијом од 17%. У односу на криве за монотони једнофазни поступак (испрекидане линије) приметно је извесно подизање кривих, чиме је потврђено разматрање дато у поглављу 2.

4.2 Одређивање ДГД за лим од алуминијумске легуре AlMg4,5Mn0,3

Алуминијумска легура AlMg4,5Mn0,3 која је коришћена у овом раду може да се сврста у Al-Mg легуре серије 5000, чија је основна карактеристика да не захтева било какав термички третман пре, током и након обликовања, али је и теже обрадива дубоким извучењем.

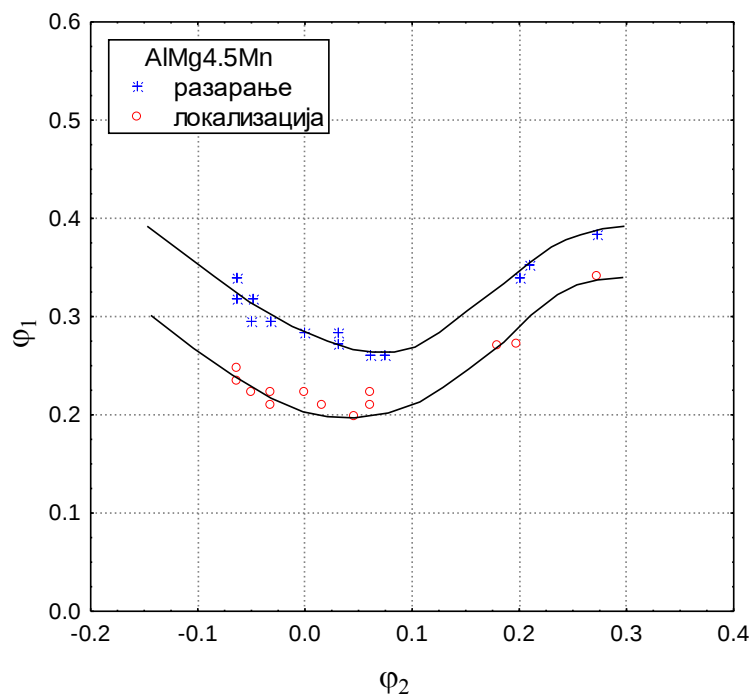
Као и за претходно испитивани лим, тако је и за овај у наставку дата табела (табела 4.2) са механичким карактеристикама (R_m , R_p , R_p/R_m , A_{80}) и карактеристикама обрадивости (r и n фактор).

Табела 4.2 Карактеристике лима од алуминијумске легуре AlMg4,5Mn0,3

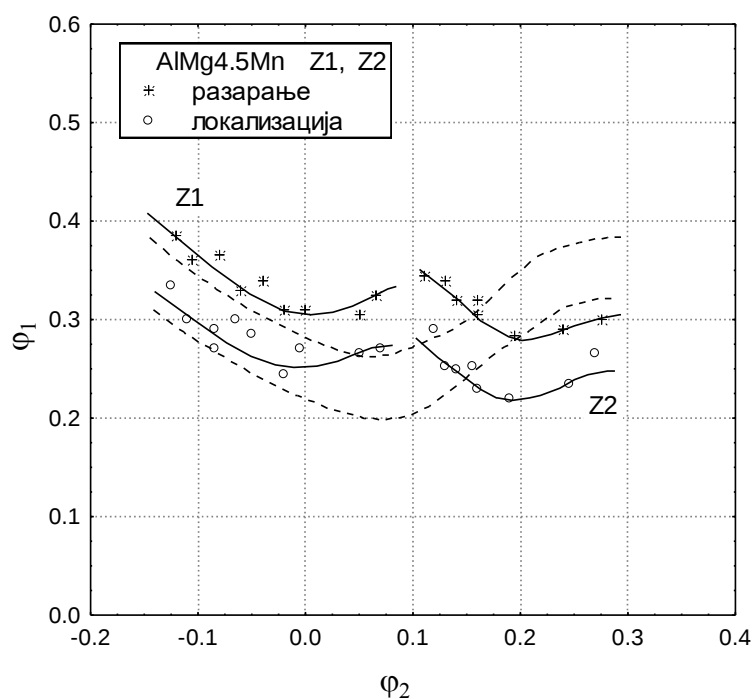
Карактеристике лима AlMg4,5Mn0,3, дебљине $s_0=0,8$ mm						
Угао према правцу ваљања лима, °	R_p , MPa	R_m , MPa	A_{80} , %	r	n	R_p/R_m
0	152,9	278,5	19,25	0,55	0,252	0,55
45	144,7	267,2	20,7	0,859	0,266	0,54
90	150,5	271,7	23,1	0,592	0,258	0,55
Средња вредност	148,2	271,7	20,9	0,715	0,26	0,545

Анализом вредности из табеле запажа се ниска вредност границе течења и r -фактора ($r < 1$) у свим правцима ваљања, што доводи до закључка да ова легура има лошу обрадивост.

Дијаграм на слици 4.9 представља ДГД при пропорционалном поступку деформисања док је на слици 4.10 приказан ДГД за два поступка немоного деформисања, који су потпуно одговарајући поступцима на челичним лимовима. Поступак означен са Z1 обухвата две фазе деформисања. У првој је једноосно затезање са оствареним издужењем од номинално 5%, а у другој се подразумева процес одређивања ДГД. Поступак Z2 у првој фази има развлачење са оствареним деформацијама (средње вредности) $\varphi_1 = \varphi_2 = 0,1625$.



Слика 4.9 ДГД за монотono деформисање

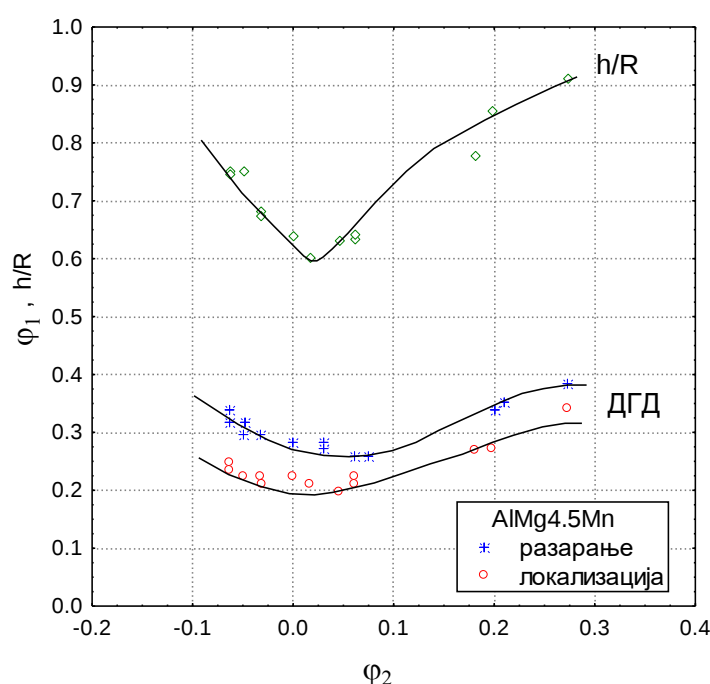


Слика 4.10 ДГД за немонотono деформисање

На дијаграму са слике 4.10 су испрекиданим линијама представљене граничне криве у условима једнофазног монотонoг деформисања, које су претходно добијене и приказане на слици 4.9. Једноосно затезање у првој фази поступка означеног са Z1

повољно утиче на ДГД, јер га подиже ка већим вредностима деформације φ_1 . Насупрот овом поступку, поступак развлачења (на дијаграму означен са Z2) спушта ДГД ка нижим вредностима деформације φ_1 , што представља његов негативан утицај.

На слици 4.11 је поред ДГД приказана још једна гранична крива. Она даје однос дубине комада при разарању и радијуса дна у тесту развачења (извлакач са полусферним челом и фиксираним ободом комада). У овом сличају ДГД је одређен поступком развлачења серије епрувета различите ширине, при чему је радијус чела дна извакача 25 mm. Мерењем остварених дубина и њиховим дељењем са 25 дефинише се положај тачака граничне криве.



Слика 4.11 ДГД и гранични дијаграм релативне дубине

Недостатак овог граничног дијаграма су тешкоће око дефинисања стварних радијуса на комаду, посебно ако је део неправилне тј. сложене геометрије. Његова предност је узимање у обзир укупне деформације комада, што је код алуминијума битно.

4.3 Одређивање ДГД за нерђајући лим X5CrNi18 9 (Ћ4580) и деформациона анализа конкретног комада

Нерђајући лим X5CrNi18 9 је врло значајан материјал за савремену индустрију јер се својим антикорозионим својствима уклапа у важне тенденције развоја све више усмерене ка продужењу века производа и заштите природне средине.

Први корак при прикупљању потребних података о конкретном комаду јесте детаљно испитивање материјала. Поменути материјал је хладно ваљани лим са мање или више израженом раванском анизотропијом. Зато је битно све карактеристике одредити у правцу ваљања, 45° и 90° у односу на тај правац. У табели 4.3 приказане су основне маханичке карактеристике обрадивости.

Tabela 4.3 Карактеристике лима

Карактеристике лима X5CrNi18 9, дебљине $s_0=0,7$ mm						
Угао према правцу ваљања лима, $^\circ$	R_p , MPa	R_m , MPa	A_{80} , %	r	n	R_p/R_m
0	303,2	660,2	30,6	0,824	0,361	0,46
45	308,1	666,4	37,15	1,147	0,35	0,462
90	317,3	630,1	29,5	0,949	0,343	0,5
Средња вредност	309,2	655,8	33,6	1,017	0,351	0,471

Челик спада у аустенитне високо легиране челике намењене дубоком извлачењу и при металографском испитивању са повећањем микроскопа од 200 пута запајају се равноосна зрна аустенита уједначене величине.

Јасно се уочавају изразито велике вредности затезне чврстоће и границе течења као и задовољавајуће вредности издужења. За ове карактеристике не запажа се битан утицај раванске анизотропије. Вредности n -фактора су високе што је повољно с обзиром на обрадивост развлачењем. r -фактор има ниске вредности уз јако изражен утицај анизотропије у равни. Вредности упозоравају на склоност лима ка стањењу што може да умањи обрадивост дубоким извлачењем, нарочито са степенима извлачења блиским критичним. Повољна околност је да r фактор у правцу од 45° има релативно повољну вредност, већу од 1. То отвара могућност побољшања обрадивости призматичних комада поклапањем тог правца са правцем дијагонале комада.

Серија епрувета за одређивање ДГД од од нерђајућег челичног лима X5CrNi18 9 је приказан на слици 4.12.



Слика 4.12 Серија епрувета за ДГД од нерђајућег челичног лима Х5CrNi18 9

За пример конкретне примене дијаграма граничне деформабилности и деформационе анализе одабран је предмет сложене призматичне геометрије (сл. 4.13 и 4.14), већих димензија, добијен дубоким извлачењем нерђајућег челичног лима Х5CrNi18 9. Поступак обликовања изводи се у два алата. У првом алату изводи се само прва операција дубоког извлачења (сл. 4.13), а у другом алату друга операција извлачења и операције пробијања отвора и опсецања обода. При изради је дошло до појаве дефеката на комаду и овде ће се показати како је могуће деформационом анализом (уз испитивање карактеристика материјала) идентификовати критичне зоне и утврдити узроке проблема у процесу обликовања. Кључни делови те анализе су одређивање дистрибуција деформације дебљине и дистрибуција деформација у равни лима непосредно на дијаграму граничне деформабилности. На површину радног комада нанета је мерна мрежа састављена од кружића номиналног пречника 5 mm. Пажљивом проценом може се прецизно закључити степен критичности сваке зоне на комаду.

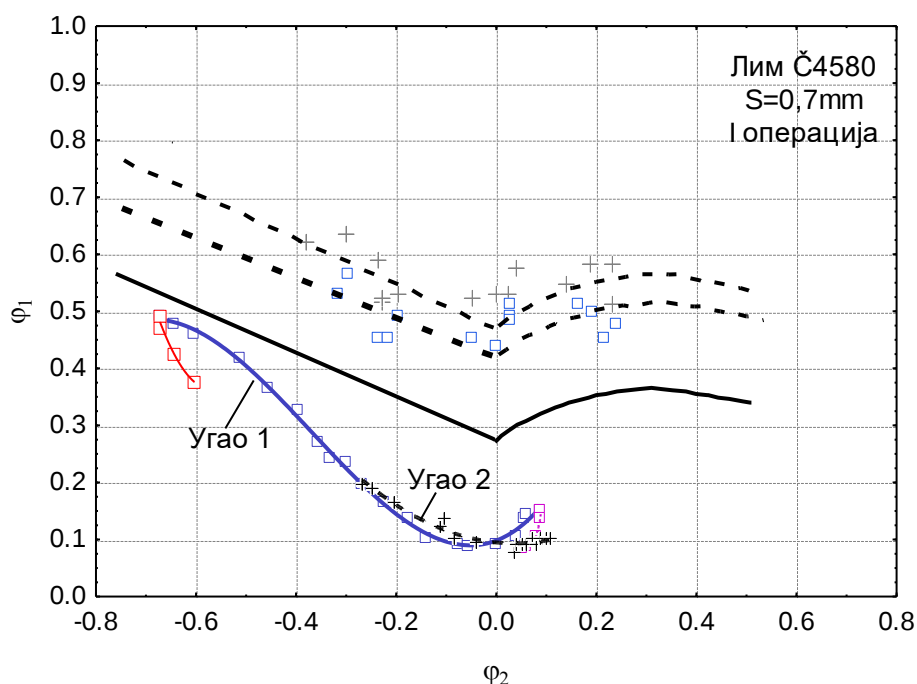


Слика 4.13 Изглед испитиваног отпреска након прве операције



Слика 4.14 Изглед испитиваног отпреска након друге операције

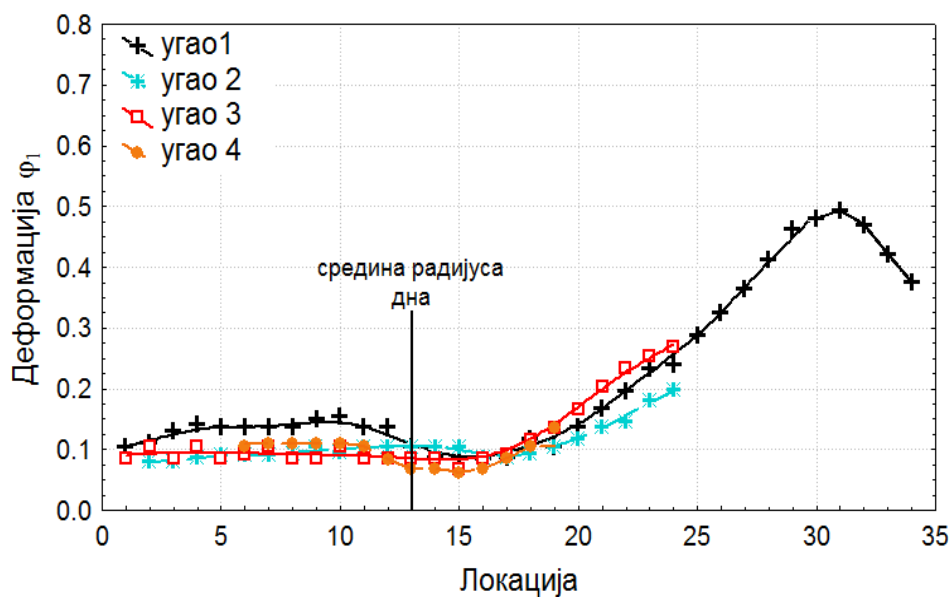
Дијаграм граничне деформабилности (ДГД) показан на слици 4.15 одређен је класичним поступком развлачења серије епрувета променљиве ширине полусферним извлакачем пречника 50 mm. Испрекиданим линијама означене су криве локализације (доња крива) и разарања (горња крива) за мерну мрежу пречника 3 mm. На комаду са слике 4.13 и 4.14 примењена је мрежа од 5 mm, па је извршена корекција положаја криве локализације (пуна линија на ДГД).



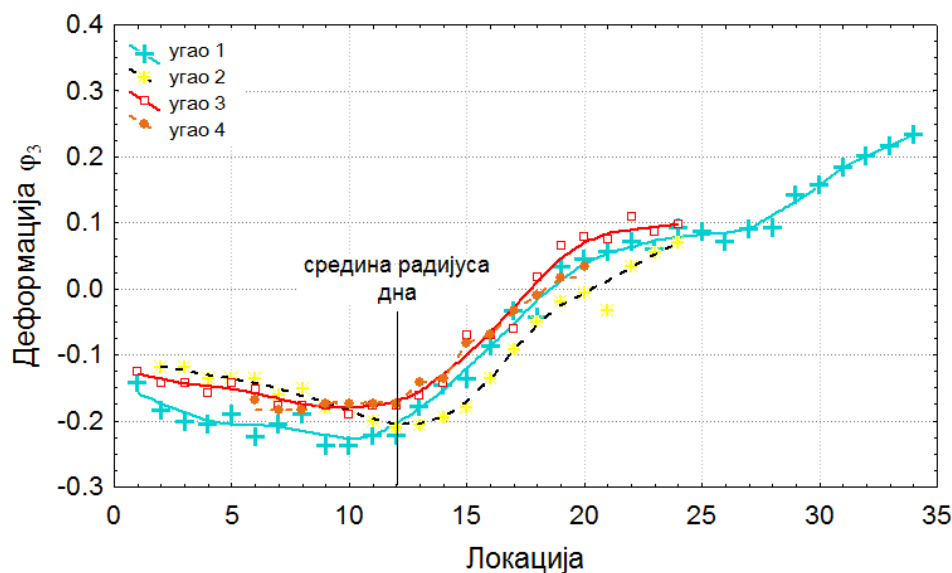
Слика 4.15 Дијаграм граничне деформабилности са дистрибуцијама деформација у првој операцији

Идентификација типова дефеката је први корак при анализи неисправног отпреска. У конкретном случају дефекти су: напрслине на равном делу у зони радијуса на једном углу, напрслине у зони пробијеног отвора и појава набора на вертикалном зиду комада у зони угаоног радијуса. Узроке дефеката могуће је испитати одређивањем дистрибуција деформација у уоченим критичним зонама и њиховим уношењем у ДГД, а затим проценом односа са граничним кривама.

Када је реч о дистрибуцијама, прво се одређују дистрибуције деформација у равни лима, затим израчунава дистрибуција деформације по дебљини, а онда се деформације у равни уносе у ДГД. Овде је због уштеде простора одмах на ДГД приказана и дистрибуција, иако би она требало да следи иза кривих на сл. 4.16 и 4.17.



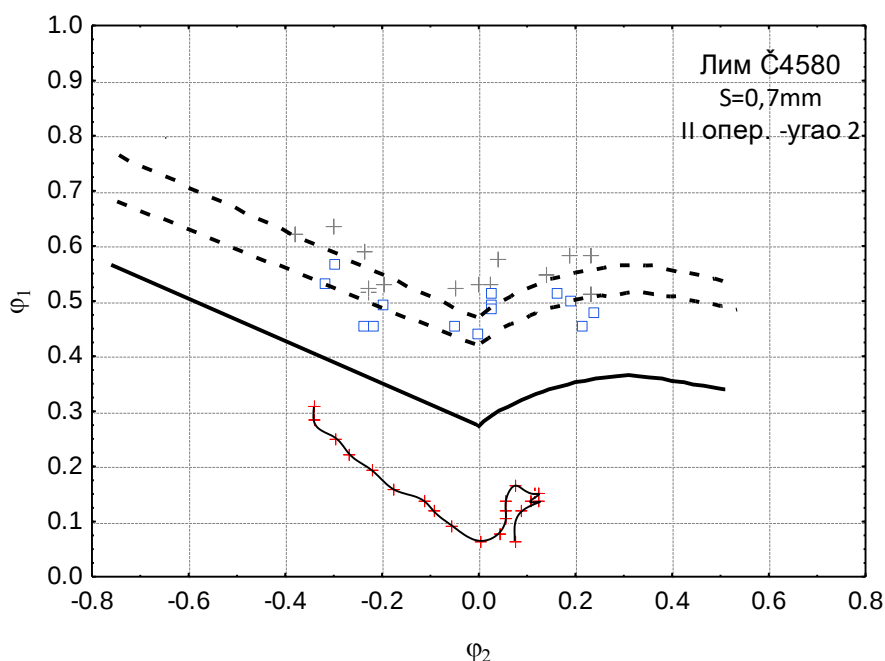
Слика 4.16 Дистрибуција веће деформације у равни у првој операцији



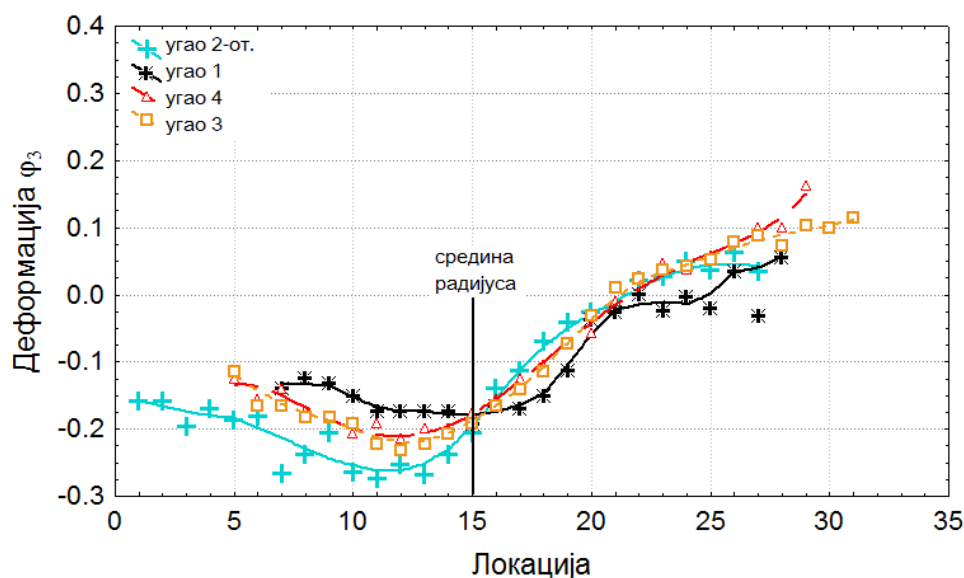
Слика 4.17 Дистрибуција деформације дебљине у првој операцији

Слика 4.16 представља дистрибуцију прве главне деформације (већа деформација у равни) за прву операцију. Локација 1 лежи на равном делу, а последња на вертикалном зиду комада. Види се да су деформације у дијагоналном правцу преко угла 1 мање што говори о неуједначеном држању обода, односно о неравномерној сили држања. Слика 4.17 показује значајно стањење у технолошки критичној зони на углу 1 око локације 10 (минимум криве дистрибуције). То је потенцијално место лома, т.ј. појаве напрсине на лиму. Разлике између расподела од угла до угла потврђују запажање да се лим увлачи у матрицу неравномерно уз неуједначену силу држања.

Дистрибуције деформација за угао 1 и 2 у првој операцији унете су на ДГД (сл. 4.15). Читаве криве леже испод граничне криве локализације, дакле у сигурној зони, али је ипак леви део криве дистрибуције за угао 1, који је и најкритичнији због отвора, врло близак граничној кривој. Значи, са аспекта опасности од локализованог деформисања, односно разарања у критичној зони (око ординатне осе) обрада је релативно сигурна. Међутим леви део дистрибуције близак граничној кривој локализације упозорава на опрез и вероватноћу повећаног ризика од критичног стањења и напрслина.



Слика 4.18 Расподела деформација у ДГД за угао 2 у другој операцији



Слика 4.19 Дистрибуција деформације дебљине у другој операцији

За другу операцију слика 4.19 показује још изразитију неуједначеност дистрибуција од угла до угла у односу на стање са слике 4.17. Критична зона је и ивица отвора која се повија ка спољашњој страни комада, уз проширење отвора при крају хода. На овом месту треба истаћи потребу стриктно дефинисаних зона подмазивања (зона држача лима и радијуса матрице) и зоне сувих површина (извлакач). Разлог је одвијање процеса у високом режиму (велике вредности силе извлачења и силе држања уз склоност ка појави набора и нестабилности процеса дубоког извлачења). Сагледавањем положаја криве дистрибуције на ДГД (сл. 4.18) закључује се да је резерва пластичности задовољавајућа, јер је крива дистрибуције деформација испод граничне криве у сигурној зони. Ситуација је, чак, нешто повољнија него у првој операцији, сл. 4.15.

На основу показаног испитивања закључује се да овај лим представља материјал слабије обрадивости дубоким извлачењем у односу на нискоугљеничне каросеријске лимове. Има велику чврстоћу и велику деформацију при разарању уз високу вредност n -фактора, али и изражену склоност ка стањењу и појави набора (у правцу ваљања и управно на тај правац r фактор је мањи од 1). При извлачењу процес тежи нестабилности уколико се поремети неки од битних фактора (сила држања, триболошки услови итд.), што захтева квалитетан алат са прецизним и уједначеним зазором, као и машину која обезбеђује довољну и врло уједначену силу држања по ободу. Такође, собзиром на варијацију r фактора у равни лима потребно је правилно поставити комад у односу на таблу лима, т.ј. у односу на правац ваљања. Познавањем изложене методологије, у многим случајевима, превентивно је могуће избећи тешкоће у производњи праћене знатним трошковима.

5. ЗАКЉУЧАК

У свеукупном систему овладавања процесом пластичног обликовања метала уопште, а нарочито танких лимова као веома значајних савремених материјала, познавање деформабилности заузима значајно место. Одређивање деформабилности подразумева низ експерименталних поступака који претходе пројектовању технолошког процеса са свим детаљима (број и редослед операција, параметри по операцијама, алати, машине, итд.). Оног тренутка када се дефинише геометрија и изврши избор материјала радног комада започиње се са испитивањем деформабилности, како би на време било могуће извести евентуалне измене и корекције. С друге стране, потребно је вршити текуће провере деформабилности сваке нове испоруке материјала у већ ухотану производњи како би се избегли могући проблеми у процесу обликовања.

Тема овог рада односи се, с једне стране, на шире аспекте деформабилности танких лимова као способности ових материјала да се обликују у процесима пластичног обликовања. С друге стране, било је потребно дати посебан акценат на врло значајну проблематику граничне деформабилности која чини можда најзначајнији аспект у оквиру свих поступака испитивања деформабилности. Такође, у том делу било је потребно извести експеримент, одредити и практично применити дијаграме граничне деформабилности, спровођењем деформационе анализе.

У првом делу рада изложени су најважнији аспекти деформабилности танких лимова (глава 2). Може се закључити да познавањем деформационог ојачања, хомогености деформисања, анизотропије и параметара обрадивости, ма колико све то било важно, није могуће дати комплетну и валидну процену деформабилности. То је могуће тек дефинисањем граничне деформабилности. Поставља се питање да ли је могуће само на основу граничне деформабилности донети меродавну процену деформабилности, без узимања у обзир поменутог комплекса питања ојачања, хомогености, анизотропије и параметара деформабилности? Одговор је врло близак потврдном, иако се у пракси тежи одређивању свих аспеката деформабилности.

У глави 3 је дат кратак преглед о деформабилности и граничној деформабилности при запреминском обликовању. Приступ је другачији у односу на лимове и у том контрасту види се сва сложеност и тешкоће око покушаја стварања јединственог, универзалног, изражавања деформабилности металних материјала без

обзира на врсту материјала, тип полуфабриката и процес обликовања. За сада, обједињен приступ није дао резултате ни као теорија ни у експериментима.

У глави 4 изложени су резултати експеримента. Одређени су дијаграми граничне деформабилности за три материјала. Лако је закључити да коришћена експериментална метода развлачења серије трака променљиве ширине омогућава успешно дефинисање граничних кривих у широком распону мање деформације у равни лима. Поред тога, метода је успешно примењена и на одређивању дијаграма граничне деформабилности за два немонотона двофазна поступка деформисања. Све то је потврдило ефикасност методе и њен практичан значај.

У наставку главе 4 дати су резултати анализе узрока дефеката на конкретном радном комаду већих димензија. Успешно је примењен графометријски поступак и дефинисане дистрибуције главних деформација у равни лима на местима појаве дефеката, а затим дефинисана и расподела деформација дебљине лима, коју је иначе непосредно готово немогуће мерити. Пажљивом проценом расподеле деформације дебљине, идентификоване су критичне зоне највећег стањења, а проценом положаја кривих дистрибуција главних деформација у равни лима унетих у дијаграм граничне деформабилности процењена резерва пластичности, односно степен критичности за појаву локализације или напрелина на лиму. Такође утврђено је и при којим износима деформације у равни се то дешава. Може се закључити да је на тај начин показано да је примењена методика снажно средство за решавање практичним проблема деформабилности танких лимова.

На крају, треба нагласити општи значај изложеног разматрања деформабилности танких лимова, а нарочито демонстрираних експерименталних процедура на решавању практичних проблема. Изложене методе примењене заједно са нумеричким компјутерским симулацијама процеса пластичног обликовања постају моћно средство како за решавање проблема, тако и за превентивно деловање. Све то је веома значајно данас када велике индустрије (нарочито аутомобилска) захтевају танке лимове све више и више чврстоће. Од око 300 МПа затезне чврстоће код класичних нискоугљеничних каросеријских лимова данас се увелико прелази граница од 1000 МПа код лимова од различитих врста челика повишене чврстоће. Изразито повећање чврстоће увек значи и знатно смањење деформабилности коју треба пажљиво пратити и процењивати. Управо ту је будући значај метода и поступака изложених у овом раду.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Девеџић Б.: Основи теорије пластичног деформисања метала, Машински факултет у Крагујевцу, 1975.
- [2] Вујовић Б.: Деформабилност, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1992.
- [3] Александровић С.: Сила држања и управљање процесом дубоког извлачења, монографија, Машински факултет у Крагујевцу, 2006.
- [4] Александровић С.: Деформабилност, циклус предавања за ФИАТ Аутомобили Србија, 7. предавање, септембар 2014.
- [5] Александровић С.: Савремени поступци пластичног обликовања, скрипта, Moodle портал Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2014.
- [6] Александровић С., Стефановић М.: Технологија пластичног обликовања метала, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2010.
- [7] S.Dinda, K. James, S. Keeler, P. Stine: How to use circle gird analysis for die tryout, American Society for Metals, Metals park, Ohio, 1985.
- [8] S. Kalpakjian, S. Schmid: Manufacturing Processes for Engineering Materials, Pearson Education, New Jersey, USA, 2003.