

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 112/2012

Никола Р. Кочовић

Технолошки параметри процеса и алата код дубоког извлачења цилиндричних комада

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Србислав Александровић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА У КРАГУЈЕВЦУ

Катедра за: ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Предмет: Производне технологије

ЗАВРШНИ РАД

са темом:

ТЕХНОЛОШКИ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСА И АЛАТА КОД ДУБОКОГ ИЗВЛАЧЕЊА ЦИЛИНДРИЧНИХ КОМАДА

Кандидат: Никола Кочовић, број индекса 112/2012.

Задатак:

У првом делу рада кандидат треба да изложи разматрање тока процеса обликовања са детаљним објашњењима компонената напона, укупног напона, деформационе силе, деформационог рада, показатеља степена деформисања, одређивања броја операција, дефинисања развијеног стања итд. Као посебно поглавље потребно је дати поступак прорачуна технолошких операција потребних за реализацију целокупног процеса обликовања. Затим треба изложити сажети приказ разматрања обрадивости и деформабилности танких лимова дубоким извлачењем.

У другом делу рада треба приказати примере алата и најважнијих машина које се користе у овој области. Посебно изложити поступак димензионисања радних елемената алата и на конкретном примеру приказати димензионисање за случајеве прописаних толеранција спољашњег и унутрашњег пречника радног комада.

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

Препоручена литература:

- [1] Александровић С., Стефановић М.: Технологија пластичног обликовања метала, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2010.
- [2] John A. Waller: Press tools and presswork, Portcullis Press, Bristol, England, 1978.
- [3] Девецић Б.: Обрада метала деформисањем - други део, Машински факултет у Крагујевцу, 1985.
- [4] Девецић Б.: Пластичност и обрада метала деформисањем, Научна књига Београд, 1992.
- [5] K. Lange: Handbook of Metal Forming, SME, Dearborn, MI, USA, 1985.

Крагујевац, 2015.

Ментор:

Др Србислав Александровић, ред. проф.

Садржај

2. РЕЗИМЕ	2
ABSTRACT	2
3. ПРЕДГОВОР	3
4. УВОД	4
5. ОБЛИКОВАЊЕ ЛИМА ДУБОКИМ ИЗВЛАЧЕЊЕМ	5
5.1 ДУБОКО ИЗВЛАЧЕЊЕ ОСНОСИМЕТРИЧНИХ КОМАДА.....	6
5.1.1 Показатељи степена деформисања.....	7
5.1.2 Напони и деформациона сила извлачења	8
5.1.2.1 Дефинисање радијалног напона на ободу	9
5.1.2.2 Напон услед трења на равном делу обода.....	11
5.1.2.3 Напон услед трења на заобљењу ивице матрице	11
5.1.2.4 Напон услед савијања и исправљања	13
5.1.2.5 Укупни напон извлачења	14
5.1.3 Накнадне операције извлачења.....	14
5.2 ОДРЕЂИВАЊЕ ОБЛИКА И ДИМЕНЗИЈА РАЗВИЈЕНОГ СТАЊА	17
5.2.1 Аналитичка метода.....	18
5.2.2 Графо-аналитичка метода.....	19
5.3 ОСНОВНИ ЕЛЕМЕНТИ ПРОРАЧУНА ТЕХНОЛОШКИХ ОПЕРАЦИЈА ДУБОКОГ ИЗВЛАЧЕЊА ...	20
5.4. ДЕФОРМАБИЛНОСТ И ОБРАДИВОСТ ТАНКИХ ЛИМОВА ДУБОКИМ ИЗВЛАЧЕЊЕМ.....	22
5.4.1 Обрадивост лима дубоким извлачењем.....	22
5.4.2 Испитивања заснована на одређивању основних механичких својстава материјала, "n" и "r" фактор	22
5.4.3 Симулативне (технолошке) методе	25
6. МАШИНЕ И АЛАТИ ЗА ДУБОКО ИЗВЛАЧЕЊЕ	35
6.1 НАЈВАЖНИЈЕ МАШИНЕ ЗА ДУБОКО ИЗВЛАЧЕЊЕ.....	35
6.2 ПРИМЕРИ АЛАТА ЗА ДУБОКО ИЗВЛАЧЕЊЕ ЦИЛИНДРИЧНИХ ДЕЛОВА.....	39
7. ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ АЛАТА ЗА ДУБОКО ИЗВЛАЧЕЊЕ ЦИЛИНДРИЧНИХ ДЕЛОВА.....	42
7.1 ЗАЗОР ИЗМЕЂУ ИЗВЛАЧАЧА И ЗИДА МАТРИЦЕ	42
7.2 ПРЕЧНИЦИ ИЗВЛАЧАЧА И МАТРИЦЕ.....	43
7.2.1 Случај када је толерисан спољашњи пречник	43
7.2.2 Случај када је толерисан унутрашњи пречник.....	45
8. ЗАКЉУЧАК	49
9. ЛИТЕРАТУРА.....	50

2. РЕЗИМЕ

У првом делу рада изложен је ток процеса обликовања са детаљним објашњењима компонената напона, укупног напона, деформационе силе, деформационог рада, показатеља степена деформисања, одређивања броја операција, дефинисања развијеног стања итд. У посебном поглављу је представљен поступак прорачуна технолошких операција потребних за реализацију целокупног процеса обликовања.

У другом делу су приказани примери алата и најважније машине које се користе у овој области. Изложен је поступак димензионисања радних елемената алата и на конкретном примеру је приказано димензионисање за случајеве прописаних толеранција спољашњег и унутрашњег пречника радног комада.

Кључне речи: обликовање лима, дубоко извлачење, напони и деформациона сила, зазор

ABSTRACT

In the first part of the paper is exposed a course of the forming process with a detailed explanation of the total stress, components of stress, deformation force, deformation work, indicators of the strain degree, determining the number of operations, defining the blank, etc. In the separate chapter is presented calculation procedure of technological operations required for the realisation of the overall forming process.

Second part presents examples of tools and key machinery used in this field. The procedure of tools dimensioning and main working elements is presented. On the concrete example shown are the dimensioning of such elements for prescribed tolerances of the outer and inner diameter of the workpiece.

Key word: sheet metal forming, deep drawing, stresses and deformation force, clearance

3. ПРЕДГОВОР

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

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

Под дубоким извлачењем лима подразумева се вид машинског обликовања при коме се од почетног равног облика добија тело просторне конфигурације које најчешће има облик посуде отворене са једне стране, док са друге има затворено дно.

Извлачењем се израђују различити делови - од осносиметричних, па преко кутијастих до делова врло сложеног конструкционог облика.

Извлачење шупљег цилиндричног тела са равним дном је најтипичнији вид дубоког извлачења и понекад се назива "чисто" дубоко извлачење. Зато се често под термином дубоко извлачење подразумева искључиво овакво обликовање.

У општем делу овог рада су приказана теоријска разматрања из области технологије пластичног обликовања метала на тему технолошких параметара процеса и алата код дубоког извлачења цилиндричних комада. Приказан је ток процеса обликовања са детаљним објашњењима, као и примери алата и машина које се користе у овој области. Дато је и кратко разматрање обрадивости и деформабилности у процесима дубоког извлачења.

У посебном делу рада анализиран је зазор између радних елемената алата и приказан комплетан поступак димензионисања алата у условима прописаних толеранција спољашњих или унутрашњих пречника конкретног радног комада.

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

У Крагујевцу, 2015. године

Никола Кочовић

4. УВОД

Дубоко извлачење је поступак хладне обраде којим се из полазног комада од лима кружног, квадратног, правоугаоног или неког другог облика добијају просторне конфигурације типа посуда, кутија, делова ауто - каросерија и др.

У зависности од облика предмета процес се изводи у једној или више операција, при чему се прва и следећа операција значајно разликују.

Ова технологија примењује се за израду делова у различитим гранама индустрије: аутомобилској индустрији (делови каросерије итд.), авио-индустрији, индустрији шинских возила, бродоградњи, индустрији кућних апарата и посуђа, електро и електронској индустрији, пољопривредној и процесној техници и другим областима.

Дубоко извлачење успешно се комбинује са другим технологијама пластичног деформисања, пре свега са поступцима раздвајања.

У првом делу овог рада објашњени су технолошки параметри као што су напони и деформациона сила извлачења за наведене поступке обликовањем лима дубоким извлачењем, и представљен је поступак прорачуна технолошких операција потребних за реализацију целокупног процеса обликовања.

У другом делу су приказане најважније машине као и примери алата за дубоко извлачење цилиндричних делова.

У трећем делу рада, на практичном примеру приказано је димензионисање радних елемената алата у условима задатих толеранција радног предмета.

У излагању се подразумева дубоко извлачење без промене дебљине лима током процеса обликовања. Извлачење са стањењем ће се посебно наглашавати.

5. ОБЛИКОВАЊЕ ЛИМА ДУБОКИМ ИЗВЛАЧЕЊЕМ

Дубоко извлачење лима подразумева вид обликовања при коме се од почетног недеформисаног, равног облика (развијене плоче, развијеног стања) добија тело непрекидне просторне конфигурације. Најчешће је то облик посуде отворене са једне стране, док са друге има затворено дно.

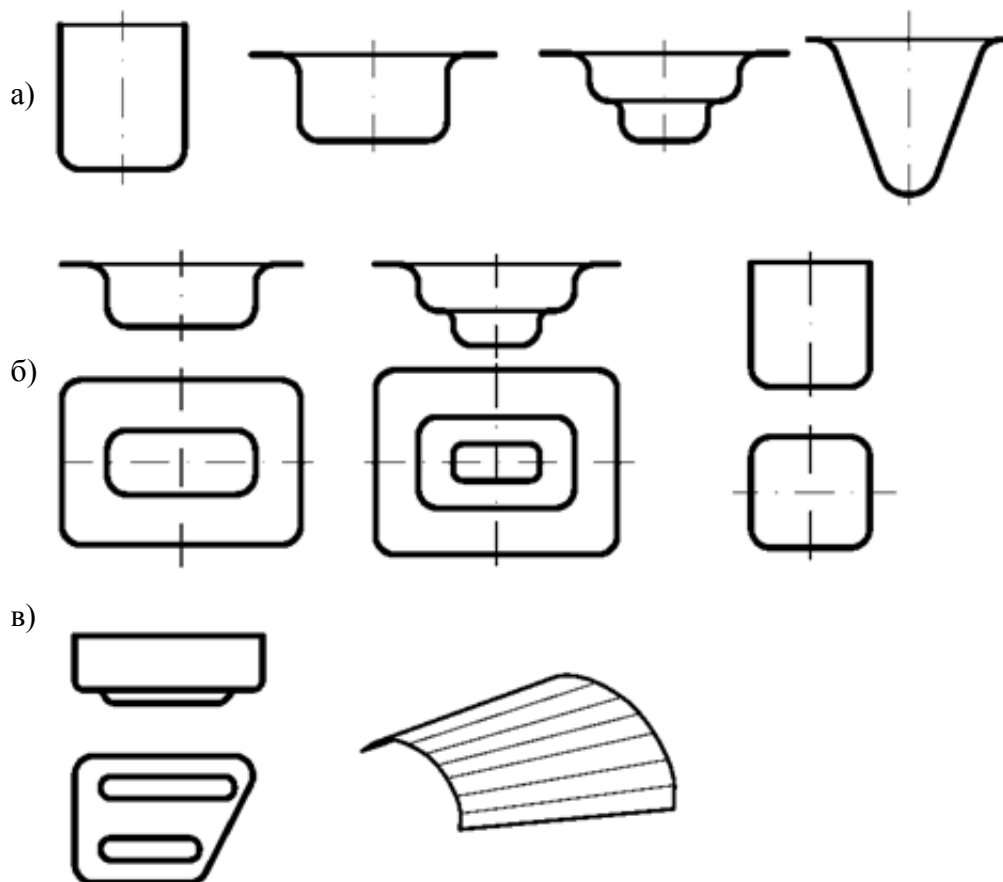
Најчешће се обрада извлачењем врши у хладном стању, изузев у посебним случајевима када се комад мора загревати (погоршани услови обраде-мала пластичност).

У зависности од дебљине лима током процеса обликовања разликујемо два поступка:

- 1) дубоко извлачење без промене дебљине лима (примењује се код танких лимова и има једно од доминантних места у индустрији прераде метала уопште),
- 2) дубоко извлачење са стањењем (примењује се код дебљих лимова, има карактеристике запреминске обраде и посебно се изучава).

Према геометрији готовог комада могућа је подела на (сл. 5.1):

- а) "чисто дубоко извлачење" (извлачење шупљег цилиндричног тела са равним дном) и дубоко извлачење комада ротационе форме,
- б) дубоко извлачење осталих делова правилног геометријског облика (тзв. кутијастих делова),
- в) извлачење делова сложеног или тзв "неправилног" облика (нпр. делови каросерије аутомобила).



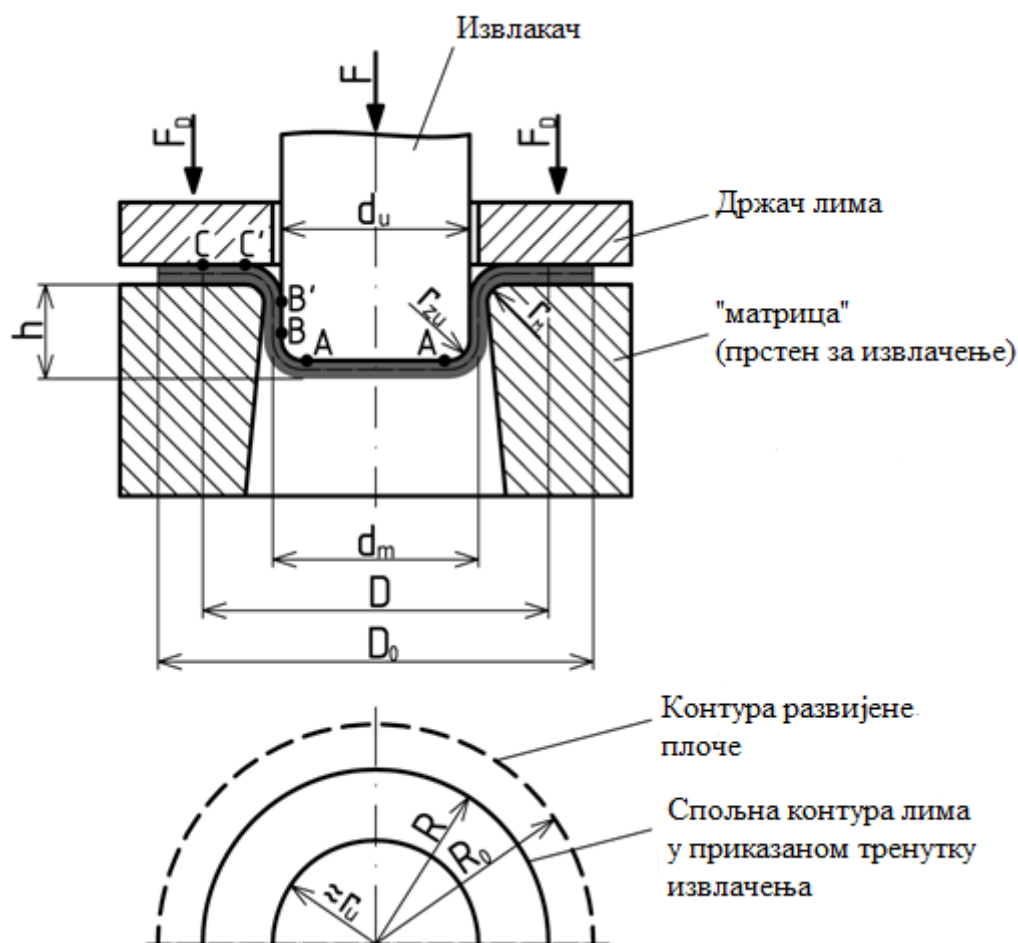
Сл. 5.1 Основни облици делова који се добијају дубоким извлачењем [1]

5.1 ДУБОКО ИЗВЛАЧЕЊЕ ОСНОСИМЕТРИЧНИХ КОМАДА

Карактеристичан геометријски облик у овом случају је цилиндрични комад са или без обода и са равним дном. Поступак обликовања је познат по термину "чисто дубоко извлачење".

У односу на остале поступке (просецање, савијање) у овом случају (сл. 5.2) постоје три главна (радна) елемента алата: извлакач (најчешће преноси деформациону силу), матрица (прстен за извлачење) и држач лима.

Полазни комад има кружну контуру пречника D_0 (сл. 5.2), и пре почетка процеса обликовања поставља се на горњу површину матрице. Тада се активира дејство држача који силом F_D притеже обод комада са циљем да спречи појаву набора, али омогући клизање обода. Након тога извлакач главним дејством отпочиње обликовање комада све до његовог потпуног пролаза кроз отвор матрице.



Сл. 5.2 Шема извлачења осносиметричног комада [1]

Деформациона сила се преноси преко чела - врха извлакача, при чему је главни отпор деформисању на ободу, с обзиром да прстенасту површину обода треба превести у цилиндричну. Уколико је сила држача сувише велика и постоје неповољни услови трења, доћи ће до отежаног клизања или заустављања лима на ободу и разарања у критичном пресеку. Критични (носећи) пресек је најчешће изнад радијуса дна комада:

$$A \approx d_n \pi s \quad (5.1)$$

Процес обликовања често није могуће завршити у само једној операцији дубоког извлачења, него је потребно две или више операција. Због тога у изразу 5.1 d_n означава номинални пречник комада за n-ту операцију. Са s је означена дебљина лима.

За номинални пречник и радијус заобљења дна комада (r_z) корисно је усвојити следећу препоруку (нпр. за прву операцију извлачења), сл. 5.2:

$$\begin{aligned} s \leq 1 \text{ mm} &\rightarrow d_1 = d_{1u} + 2s ; r_{z1} = r_{z1u} + s \\ \text{за } s > 1 \text{ mm} &\rightarrow d_1 = d_{1u} + s ; r_{z1} = r_{z1u} + \frac{s}{2} \end{aligned} \quad (5.2)$$

За обраду се углавном користе пресе двоструког дејства, које имају посебне погоне за дејство извлакача и дејство држача. Пресе једноструког дејства се могу користити доградњом пнеуматских, гасних или хидрауличних цилиндара за обезбеђивање дејства држача (F_D).

5.1.1 Показатељи степена деформисања

Примењују се различити показатељи који дефинишу степен деформисања извршеног дубоког извлачења. У случају једнооперационог процеса извлачења то су следеће карактеристике, при чему је због једноставнијих ознака усвојено

$$d_1 = d ; r_1 = r = \frac{d}{2} :$$

а) степен-однос извлачења:

$$\beta = \frac{D_0}{d} = \frac{R_0}{r} ; \beta > 1 \quad (5.3)$$

б) коефицијент извлачења:

$$m = \frac{d}{D_0} = \frac{r}{R_0} = \frac{1}{\beta} ; 0 < m < 1 \quad (5.4)$$

в) релативна деформација при извлачењу:

$$\varepsilon = \frac{D_0 - d}{D_0} = 1 - m \quad (5.5)$$

г) природна деформација

$$\varphi = \ln \frac{D_0}{d} \quad (5.6)$$

Везе између појединих показатеља су:

$$\begin{aligned} m &= \frac{d}{D_0} = 1 - \varepsilon = \frac{1}{e^\varphi} \\ \beta &= \frac{D_0}{d} = \frac{1}{m} = \frac{1}{1 - \varepsilon} = e^\varphi \\ \varepsilon &= 1 - m = \frac{\beta - 1}{\beta} = \frac{e^\varphi - 1}{e^\varphi} \end{aligned}$$

Уколико се при обради прекораче дозвољене вредности показатеља извлачења, нпр. гранични степен извлачења $\beta_{\max}$; $(\beta < \beta_{\max})$, долази до лома, односно разарања на критично месту комада.

Од величине наведених показатеља зависе:

- величина напона и силе извлачења,
- број потребних операција,
- сила држања F_D и сл.

Треба поменути и још један показатељ, тзв. релативну дебљину лима:

$$s_r = \frac{s}{D_0} 100, \% \quad (5.7)$$

Смањивањем вредности s_r расте склоност ка појави набора на ободу.

5.1.2 Напони и деформациона сила извлачења

Параметар потребан за избор машине је деформациона сила и од практичног је значаја познавање њеног максималног интензитета који се увек постиже у првој операцији извлачења. Да би се израчунала та вредност неопходно је познавати уздужни напон у цилиндричном омотачу комада, који представља и укупни напон извлачења (σ_u) .

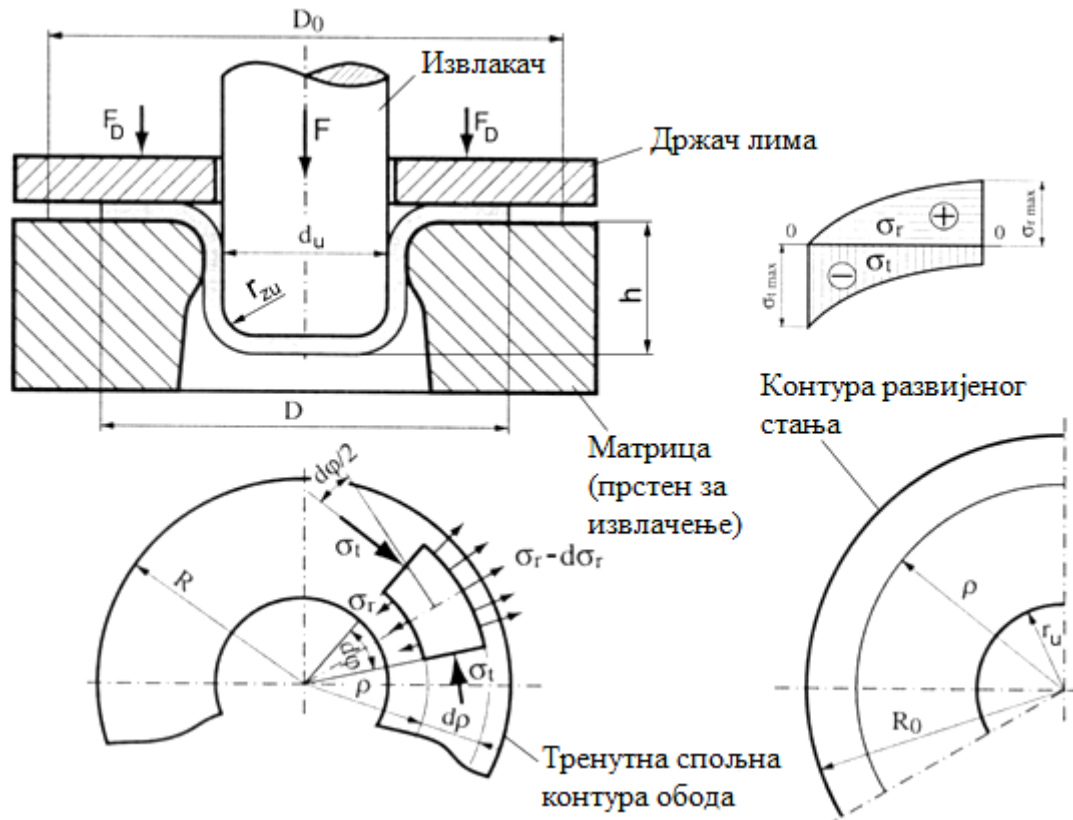
$$F = \sigma_u \cdot A = \sigma_u d_1 \pi s \quad (5.8)$$

$$\sigma_u = \sigma_r + \sigma_{trd} + \sigma_{trm} + \sigma_{sav} \quad (5.9)$$

Напон σ_u сачињавају 4 основне компоненте (израз 5.9):

- σ_r - радијални напон на ободу, који настаје при повлачењу обода ка централној зони комада. Директно је повезан са тангенцијалним напоном који изазива бочно сабијање лима. Има највећу вредност, изнад 70% од σ_u .
- σ_{trd} - део укупног напона који настаје услед трења на равном делу обода, између лима и матрице, односно држача. Износи око 10% од σ_u .
- σ_{trm} - напон који настаје услед трења на заобљењу ивице матрице. Има вредност око 15% од σ_u .
- σ_{sav} - напон који настаје услед савијања и исправљања лима при клизању преко заобљења ивице матрице и преласку у вертикални цилиндрични омотач комада. Вредност му је око 5% од σ_u .

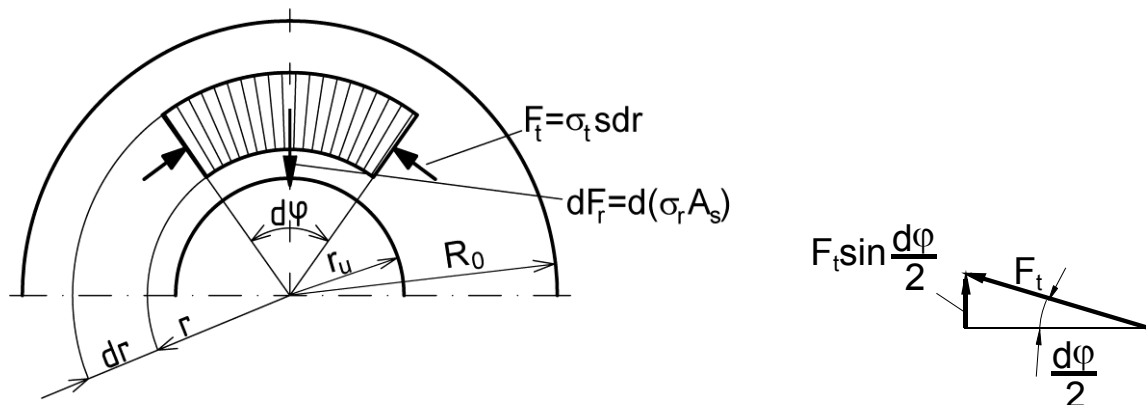
Централни део процеса обликовања изводи се на ободу комада и заобљењу матрице под дејством два напона: тангенцијалног притисног и радијалног затежућег (сл. 5.3). Поред сабијања лима, тангенцијални напон тежи да изазове наборе на ободу и то се спречава деловањем силе држања. Интезитет силе држања и уопште, услове трења на ободу треба пажљиво дефинисати. Превелика сила држања и отежани услови трења на ободу доводе до преоптерећења комада и разарања у критичном пресеку. Због тога се, поред правилног избора силе држања, трење на ободу максимално смањује (глатке површине, одговарајућа мазива).



Сл 5.3 Шема извлачења са деловањем напона на ободу [1]

5.1.2.1 Дефинисање радијалног напона на ободу

На слици 5.3 и слици 5.4 приказано је деловање сила на издвојени сегмент обода комада. Притискујуће дејство има сила F_t , коју узрокује тангенцијални напон. Сила dF_r има затежуће дејство и настаје дејством радијалног напона σ_r . Тангенцијални напон расте од ивице матрице ка спољашњој ивици обода где достиже максимум. Радијални напон има потпуно супротан тренд, расте према ивици матрице (сл. 5.3 десно).



Сл. 5.4 Шема деловања напона на ободу [1]

На шему деловања сила при раванском напонском стању (сл. 5.4) примењује се услов равнотеже свих сила у вертикалном правцу. Усваја се позитиван смер надоле.

Површина на коју делује σ_t има правоугаони облик ($s \cdot dr$). Површина на коју делује σ_r је лучног облика ($A_s = s r d\varphi$).

$$dF_r - 2F_t \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} = 0$$

$$d(\sigma_r \cdot r) s d\varphi = 2\sigma_t \cdot s \cdot dr \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} \quad (5.10)$$

$$r \cdot d\sigma_r \cdot s \cdot d\varphi + \sigma_r \cdot dr \cdot s \cdot d\varphi = 2\sigma_t \cdot s \cdot dr \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} / : s d\varphi$$

$$s \text{ и } d\varphi \text{ су константне величине, а за мале углове важи: } \sin \frac{d\varphi}{2} \approx \frac{d\varphi}{2}$$

$$r \cdot d\sigma_r + \sigma_r \cdot dr / : r$$

$$d\sigma_r = -(\sigma_r - \sigma_t) \frac{dr}{r} \quad (5.11)$$

Поред претходног израза користи се и модификовани услов пластичности према максималном смицајном напону:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \pm \beta K$$

$$\sigma_r - \sigma_t = \beta \cdot K \quad (5.12)$$

Ако се на израз 5.12 примени у 5.11 добија се:

$$d\sigma_r = -\beta \cdot K \frac{dr}{r}$$

$$\sigma_r = \int_{\sigma_r}^0 d\sigma_r = -\beta \int_{r_u}^{R_0} K \frac{dr}{r} ; \text{ најчешће се усваја } K = \bar{K} = \text{const.} ; \bar{K} = \frac{K_{R_0} + K_{r_u}}{2}$$

Уместо радијуса r_u може се користити номинални радијус комада $r_{k1} = \frac{d_1}{2}$ према изразу 5.2.

$$\sigma_r = \beta \bar{K} \ln \frac{R_0}{r_{k1}} = \beta \bar{K} \ln \frac{D_0}{d_1} \quad (5.13)$$

У изразу 5.13 r_{k1} је полупречник комада.

Према претходним изразима, требало би деформациону чврстоћу одредити узимајући у обзир чврстоће на спољашњем пречнику обода и унутрашњем, односно номиналном пречнику комада.

Међутим, најчешће се вредност деформационе чврстоће $\bar{K}$ одређује као аритметичка средина чврстоћа на почетку обраде ($K_0 = R_p$) и на крају извлачења (K_1) према одговарајућој деформацији.

$$\bar{K} \approx \frac{K_0 + K_1}{2} \quad (5.14)$$

Показатељи деформације на основу којих се са криве ојачања одређује вредност K_1 су, према изразима 5.5 и 5.6:

$$\varepsilon_1 = \frac{D_0 - d_1}{D_0} = 1 - \frac{d_1}{D_0} = 1 - m \quad (5.15)$$

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_0}{d_1} \quad (5.16)$$

5.1.2.2 Напон услед трења на равном делу обода

Овај напон је последица трења на контактним површинама обода комада, држача и равног дела матрице.

Сила трења на ободу:

$$F_T = \mu F_D \quad (5.17)$$

Напон услед сила трења којих има две, јер делују на поменуте две контактне површине:

$$\sigma_{td} = \frac{2\mu F_D}{d_1 \pi s} \quad (5.18)$$

μ - коефицијент трења, најчешће $\mu = 0.1-0.15$;

F_D - сила држача.

На овом месту биће дат само најједноставнији, али уобичајен начин одређивања F_D .

$$F_D = A_D \cdot q = \frac{D_0^2 - d_1^2}{4} \pi \cdot q \quad (5.19)$$

A_D - површина држања,

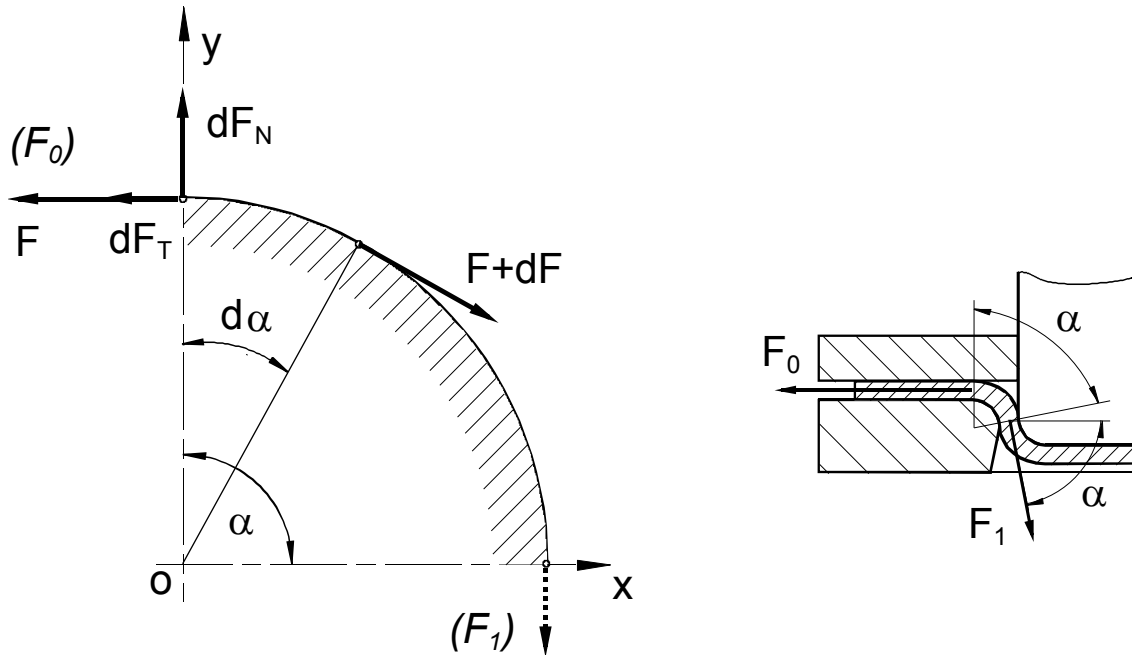
q - специфични притисак држања, најчешће $q = 2-3 \text{ MPa}$ [1]

5.1.2.3 Напон услед трења на заобљењу ивице матрице

Сила извлачења услед напона на ободу (σ_r и σ_{td}) која делује у радијалном правцу износи:

$$F_0 = A(\sigma_r + \sigma_{td}).$$

Ова сила се увећава због трења на ивици матрице на силу F_1 (сл. 5.5). До потребних односа се долази пројектовањем свих сила на вертикални и хоризонтални правац у зони угла $d\alpha$.



Слика 5.5 Силе у зони заобљења ивице матрице [1]

Примењују се услови равнотеже за правце x и y .

$$\sum F_i^x = 0 \quad (5.20)$$

$$-F - dF_T + (F + dF) \cos d\alpha = 0$$

$$\sum F_i^y = 0 \quad (5.21)$$

$$dF_N - (F + dF) \sin d\alpha = 0$$

$dF_T = \mu \cdot dF_N$ - елементарна сила трења.

Због мале вредности угла $d\alpha$ важи следеће:

$\sin d\alpha \approx d\alpha$; $\cos d\alpha \approx 1$; $dF \cdot d\alpha \approx 0$, па изрази 5.20 и 5.21 добијају облик:

$$-F - dF_T + F + dF = 0$$

$$dF_N - F \cdot d\alpha = 0$$

$$dF_T = dF \text{ или } \mu \cdot dF_N = dF$$

$$dF_N = F \cdot d\alpha$$

Међусобним дељењем претходних једначина добија се:

$$\mu = \frac{dF}{F \cdot d\alpha} \rightarrow \frac{dF}{F} = \mu \cdot d\alpha ; \int_{F_0}^{F_1} \frac{dF}{F} = \mu \int_0^\alpha d\alpha ; \ln \frac{F_1}{F_0} = \mu \cdot \alpha \quad (5.22)$$

$$F_1 = F_0 \cdot e^{\mu \cdot \alpha}$$

$$\text{За } \alpha = \frac{\pi}{2} ; e^{\frac{\pi}{2}} \approx 1 + \mu \frac{\pi}{2} = 1 + 1,6 \cdot \mu \quad (5.23)$$

$$F_1 = A(\sigma_r + \sigma_{trd}) e^{\pi \mu} \approx A(\sigma_r + \sigma_{trd})(1 + 1,6 \cdot \mu)$$

Напон који настаје у овом случају може да се напише као:

$$\begin{aligned}\sigma_{trm} &= (\sigma_r + \sigma_{trd}) e^{\mu\alpha} - (\sigma_r + \sigma_{trd}) \\ \sigma_{trm} &= (\sigma_r + \sigma_{trd}) (e^{\mu\alpha} - 1)\end{aligned}\quad (5.24)$$

5.1.2.4 Напон услед савијања и исправљања

При клизању лима преко заобљења ивице матрице, поред осталог, остварује се савијање, а затим и исправљање појединих зона комада. Деформациони рад савијања елемента ширине b и дебљине s , извршен при савијању над радијусом r_n , на посматраном углу α (сл. 5.6), може се изразити на следећи начин:

$$F_1 \cdot r_n \cdot \alpha = M \cdot \alpha \quad (5.25)$$

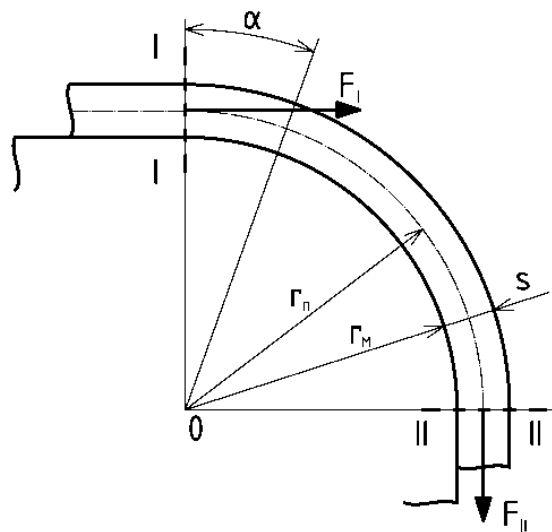
$$F_1 = \frac{M}{r_n} \quad (5.26)$$

M - момент унутрашњих сила

$$M = K_s \frac{b \cdot s^2}{4}$$

$K_s \approx R_M$ пошто је лим током деформисања обода већ знатно ојачао.

$$r_n \approx r_M + 0.5s$$



Сл. 5.6 Савијање преко заобљења матрице [1]

Ако се претходне зависности уврсте у израз 5.26 добија се:

$$F_I = R_M \frac{bs^2}{4(r_M + 0.5s)}$$

У пресеку II-II лим треба поново исправити, при чему се троши рад као и за савијање, па је укупна сила:

$$F_{II} = 2F_I = R_M \frac{bs^2}{2r_M + s} = F_s$$

Целокупна деформациона сила савијања односи се на савијање по обиму комада, па је ширина зоне савијања: $b = d_1 \cdot \pi$

$$F_s = R_M \frac{\pi \cdot d_1 \cdot s^2}{2r_M + s} \quad (5.27)$$

Имајући у виду критични пресек комада напон услед савијања и исправљања износи:

$$\sigma_{sav} = \frac{F_s}{\pi d_1 s} = \frac{R_M}{2 \frac{r_M}{s} + 1} \quad (5.28)$$

5.1.2.5 Укупни напон извлачења

Према изразу 5.9 укупни напон износи:

$$\sigma_u = \sigma_r + \sigma_{trd} + \sigma_{trm} + \sigma_{sav}$$

Имајући у виду изразе 5.13; 5.18; 5.24 и 5.28 коначно се добија израз за највећи укупни напон прве операције дубоког извлачења цилиндричног комада:

$$\sigma_u = \left(1,1K \ln \frac{D_0}{d_1} + \frac{2\mu F_D}{d_1 \pi s} \right) e^{\mu\alpha} + \frac{R_M}{2 \frac{r_M}{s} + 1} \quad (5.29)$$

С обзиром на критични попречни пресек комада, максимална сила прве операције извлачења износи:

$$F_M = d_1 \pi s \cdot \sigma_u \quad (5.30)$$

Меродавна сила за избор машине:

$$F_{MAS} = 1,3F_M$$

Деформациони рад:

$$W = F_M \cdot x \cdot h \quad (5.31)$$

$$x = \frac{F_{sr}}{F_M} \text{ - емпиријски фактор средње силе који се бира из одговарајућих препорука.}$$

h - укупна дубина комада, односно укупни ход извлакача.

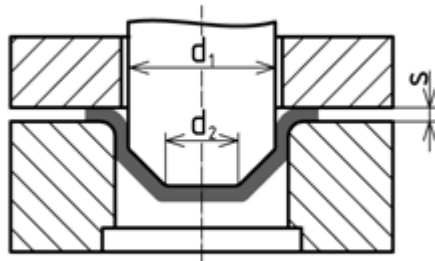
5.1.3 Накнадне операције извлачења

Ако је степен извлачења сувише велики, обликовање није могуће успешно извести у једној операцији. Такав случај је нпр. код комада малог пречника, а велике висине. Да би се процес обликовања успешно реализовао, извлачење се обавља у две или више операција. У свакој операцији (фази) извлачења смањује се пречник, а повећава дубина комада.

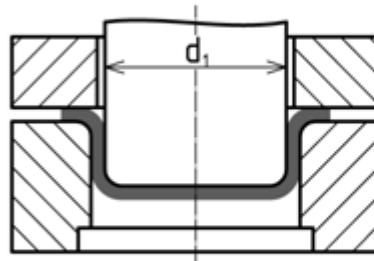
Користе се два основна начина накнадног извлачења, сл. 5.7:

- истосмерно (право) извлачења као најчешћи поступак,
- супротносмерно (обратно) извлачење

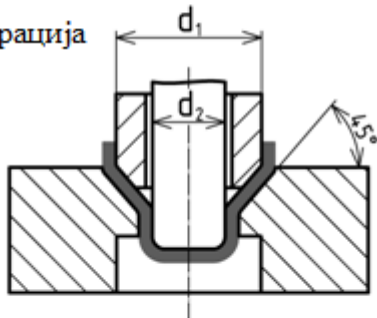
1. Операција



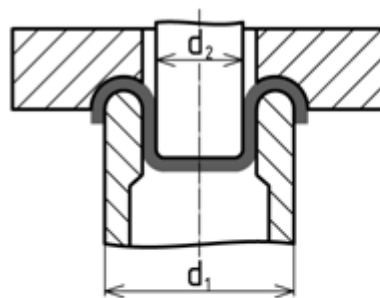
1. Операција



2. Операција



2. Операција

а) Право извлачење
(истосмерно)б) Обратно извлачење
(супротносмерно)

Сл. 5.7а Шема поступака извлачења у две или више фаза [1]

Према претходној слици, d_1 је пречник у првој, а d_2 у другој операцији. Ради једноставније скице овде су означени унутрашњи пречници уместо номиналних (израз 5.2).

Уопште: $D_0 > d_1 > d_2 > \dots > d_{n-1} > d_n$ где је d_n - завршни коначни пречник комада.

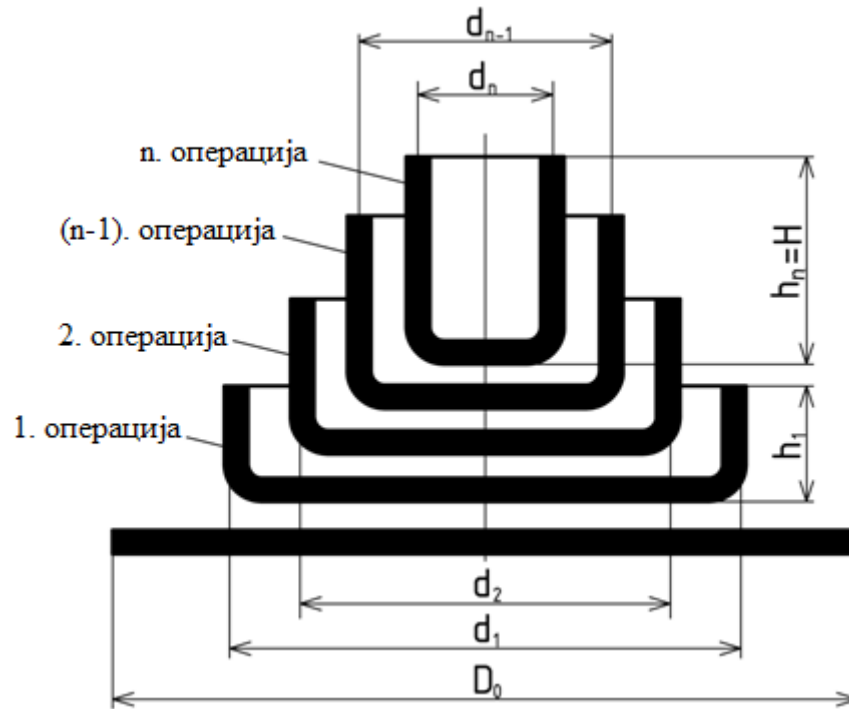
5.1.3.1 Одређивање броја потребних операција

Из развијеног стања пречника D_0 у више операција, према сл. 5.8, добија се завршни комад пречника d_n и висине h_n . Коефицијенти извлачења по операцијама су:

$$m_1 = \frac{d_1}{D_0} ; m_2 = \frac{d_2}{d_1} ; \dots ; m_i = \frac{d_i}{d_{i-1}} ; \dots ; m_n = \frac{d_n}{d_{n-1}} \quad (5.32)$$

С обзиром на зависности 5.32 може се писати:

$$d_n = m_n \cdot d_{n-1} = m_n \cdot m_{n-1} \cdot d_{n-2} = \dots = m_n \cdot m_{n-1} \dots m_2 \cdot m_1 \cdot D_0 \quad (5.33)$$



Сл. 5.8 Промена облика комада при извлачењу у више фаза [1]

Граничне вредности коефицијента извлачења омогућавају обликовање без разарања. Експериментално је доказано да се вредности коефицијента извлачења у другој и накнадним операцијама међусобно не разликују битно, па се може усвојити средња вредност:

$$\bar{m} = \frac{m_2 + m_3 + \dots + m_{n-1} + m_n}{n-1} \quad (5.34)$$

Израз 5.33 сада добија облик:

$$d_n = (\bar{m})^{n-1} \cdot m_1 \cdot D_0 \quad \text{Логаритмовањем се добија:}$$

$$\log d_n = (n-1) \log \bar{m} + \log(m_1 \cdot D_0)$$

$$n = \frac{\log d_n - \log(m_1 \cdot D_0)}{\log \bar{m}} + 1 \quad (5.35)$$

Пошто број операција n мора да буде цео број, на основу рачунске вредности према претходном изразу, број операција одговара првом већем целом броју.

Вредности коефицијента m за поједине операције усвајају се из одговарајућих табела (Таб. Р5 у прилогу), у функцији најчешће од релативне дебљине лима

$$s_r = \frac{s}{D_0} 100, \%$$

У реалним условима, граничне вредности коефицијента извлачења m_i зависе од врсте материјала, релативне дебљине лима и услова обраде (радијуса заобљења матрице и извлакача, брзине деформисања, услова трења). Тачне вредности одређују се

експериментално за сваки конкретан случај обраде. Препоручене табеларне вредности су приближне.

За приближне прорачуне могу се користити следеће препоручене вредности:

а) За челик: $m_1 \approx 0,60$

$$\bar{m} \approx 0,76 \text{ за } s = 0,2 - 1,5 \text{ mm}$$

$$\bar{m} \approx 0,82 \text{ за } s = 1,5 - 3 \text{ mm.}$$

б) за бакар и месинг: $m_1 \approx 0,5 - 0,6$

$$\bar{m} \approx 0,76 - 0,85$$

ц) за алуминијум: $m_1 \approx 0,55 - 0,6$

$$\bar{m} \approx 0,80 - 0,85$$

Пречници комада по појединим фазама као и број фаза, могу се одредити на следећи начин, при чему је d_n номинални пречник готовог комада:

$$d_1 = m_1 \cdot D_0 \rightarrow \text{за } d_1 \text{ се усваја први већи цео број,}$$

$$d_2 = m_2 \cdot D_1 \rightarrow \text{за } d_2 \text{ се усваја први већи цео број,}$$

$$d_3 = m_3 \cdot D_2 \rightarrow \text{за } d_3 \text{ се усваја први већи цео број,}$$

$$d_4 = m_4 \cdot D_3 < d_n \rightarrow \text{пошто је } d_4 < d_n \text{ усваја се } d_4 = d_n.$$

Као што се види, поступак одређивања пречника по операцијама се прекида кад рачунски пречник постане мањи од пречника готовог комада. Та фаза је уједно последња и уместо рачунског усваја се пречник готовог комада.

5.2 ОДРЕЂИВАЊЕ ОБЛИКА И ДИМЕНЗИЈА РАЗВИЈЕНОГ СТАЊА

Димензије развијеног стања се одређују из услова једнакости запремина полазног и готовог комада:

$$V_{PKOM} = V_{GKOM}$$

Иако при обликовању дубоким извлачењем долази до промене дебљине лима у појединим зонама комада, може се сматрати да је дебљина приближно константна. Због тога се може писати:

$$A_{PKOM} \cdot s_{PKOM} = A_{GKOM} \cdot A_{GKOM} ; s_{PKOM} \cong s_{GKOM}$$

$$A_{PKOM} = A_{GKOM}$$

На овај начин се услов једнакости запремина претвара у услов једнакости површина полазног и готовог комада.

При одређивању димензија развијеног стања делова ротационог облика (чему ће овде бити посвећена пажња) у основи постоје три методе:

- а) аналитичка метода,
- б) графо-аналитичка метода,
- в) графичка метода.

Овим методама може се придодати и дефинисање развијеног стања емпиријским путем или претходним експерименталним пробама.

5.2.1 Аналитичка метода

Развијено стање ротационих комада има кружни облик пречника D_0 због осне симетрије. Аналитичким путем развија се израз 5.42.

$$D_0^2 \cdot \frac{\pi}{4} = \sum_{i=1}^n A_i$$

$$D_0 \approx 1,13 \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i} = 1,13 \sqrt{A}$$

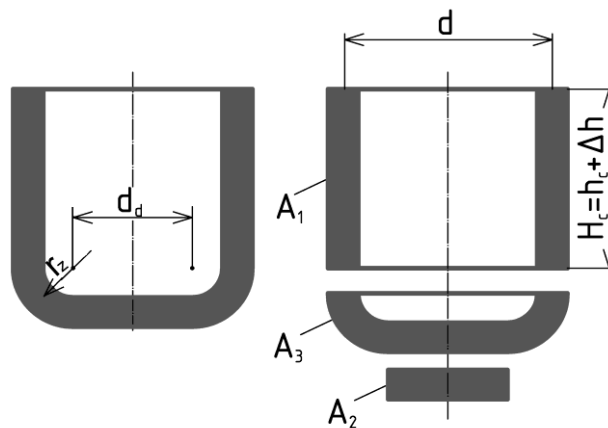
У претходном изразу је: A_i - површина i -ог елемента ротационог тела.

$$\text{Укупна површина комада: } A = \sum_{i=1}^n A_i = A_1 + A_2 + \dots + A_n$$

За цилиндрично тело номиналног пречника d (према изразу 5.2), висине h и равног дна са оштрим прелазом (радијус дна $r_z = 0$) биће:

$$\frac{D_0^2 \cdot \pi}{4} = \frac{d^2 \pi}{4} + d \pi h$$

$$D_0 = \sqrt{d^2 + 4dh}$$



Сл. 5.9 Шема поделе површине извученог комада на три дела [1]

Искључивањем дебљине лима из услова за одређивање димензија развијеног стања, део од лима се фиктивно преводи у тело без дебљине. Зато је важно користити израз 5.2 за дефинисање номиналног пречника и номиналног радијуса заобљења дна комада. Код комада са сл. 5.9 услов једнакости површина има облик:

$$A_0 = A_1 + A_2 + A_3$$

$$A_1 = d \pi (h_c + \Delta h) = d \pi H_c$$

Величина Δh је додатак за опсецање неравнина горње ивице које се јављају као последица анизотропије лимова. То је емпиријска вредност и бира се из одговарајућих препорука.

h_c је висина комада без додатка за опсецање.

Површина дна:

$$A_2 = \frac{d_d^2 \cdot \pi}{4}$$

Површина A_3 са сл. 5.13 добија се на основу Гулденовог правила о одређивању ротационих површина, према коме је површина једнака производу растојања тежишта криве која ротира од осе ротације (r_t) и дужине криве (L).

$$A = 2\pi \cdot r_t \cdot L$$

$$A_3 = \frac{r_z \cdot \pi}{2} (\pi d_d + 4r_z)$$

Укупна површина:

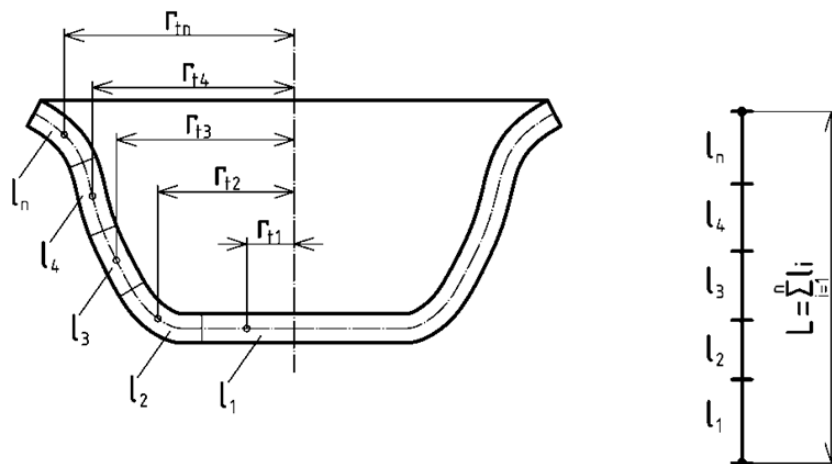
$$\frac{D_0^2 \pi}{4} = d\pi(h_c + \Delta h) + \frac{d_d^2 \cdot \pi}{4} + \frac{r_z \cdot \pi}{2} (\pi d_d + 4r_z)$$

$$D_0 = \sqrt{4dH_c + d_d^2 + 2r_z(4r_z + \pi d_d)}$$

После израчунавања пречника развијеног стања D_0 , као коначна вредност усваја се први већи цео број.

5.2.2 Графо-аналитичка метода

Ова метода се заснива на гравичком одређивању растојања тежишта појединих елемената ротационе криве од осе ротације (r_u), њене дужине (L) и примене Гулденовог правила.



Сл. 5.10 Шема разлагања сложене линије на мање делове [1]

Укупна ротациона површина:

$$A = 2\pi(r_{t1}l_1 + \dots + r_{tn}l_n) = 2\pi \sum_{i=1}^n r_{ti}l_i = D_0^2 \frac{\pi}{4}$$

На основу претходног израза коначно се добија вредност пречника развијеног стања.

$$D_0 = \sqrt{8 \sum_{i=1}^n r_{ti}l_i} = \sqrt{8Lr_{tsr}}$$

$$r_{tsr} = \frac{r_{t1} + r_{t2} + \dots + r_{tn}}{n} \text{ - растојање тежишта целе линије од осе ротације.}$$

Чисто графичка метода такође се заснива на коришћењу Гулденовог правила, уз примену верижног полигона ради одређивања положаја тежишта криве која ротира. Ова метода се ређе користи од претходно наведених.

5.3 ОСНОВНИ ЕЛЕМЕНТИ ПРОРАЧУНА ТЕХНОЛОШКИХ ОПЕРАЦИЈА ДУБОКОГ ИЗВЛАЧЕЊА

Провера да ли је потребан држач лима:

За прву операцију:

$s_r < 1,5$ - држач је неопходан

$$s_r = \frac{s}{D_0} 100, \%$$

$s_r > 2$ - држач није потребан

$s_r = 1,5 - 2$ - прелазна област, сваки случај разматра се посебно

За накнадне операције:

$s'_r < 1$ - држање је неопходно

$$s'_r = \frac{s}{d_{n-1}} 100, \%$$

$s'_r > 2$ - држање није потребно

Фазе прорачунавања параметара дубоког извлачења цилиндричног комада без венца:

- 1) Одређивање додатка за опсецање Δh
- 2) Дефинисање висине комада после задње операције, а пре опсецања ($H = h_n + \Delta h$).
- 3) Израчунавање пречника развијеног стања D_0 . Усваја се први већи цео број.
- 4) Израчунавање релативне дебљине лима: $s_r = \frac{s}{D_0} 100, \%$.
- 5) Избор коефицијената извлачења $m_1, m_2, \dots, m_n$ и $\bar{m}$.
- 6) Одређивање броја операција извлачења n . Усваја се цео број.

7) Одређивање пречника у појединим операцијама извлачења:

$$d_1 = m_1 D_0 ; d_2 = m_2 d_1 ; \dots ; d_{n-1} = m_{n-1} d_{n-2} .$$

8) Одређивање полупрачника заобљења ивице дна. Разликују се следећи случајеви:

а) ако је $r_z \approx s$ може се понекад усвојити $r_z = 0$;

б) ако је $r_z > s$

$$r_{z1} = \frac{d_1 - d_2}{2} ; r_{z2} = \frac{d_2 - d_3}{2} ; \dots ; r_{zn} = \frac{d_n - d_{n-1}}{2} .$$

ц) У току накнадних операција, нарочито ако је $d > 50 \text{ mm}$, прелаз на дну може бити коничног облика са углом $45^\circ - 50^\circ$. На овај начин побољшавају се услови држања.

9) Одређивање полупречника заобљења ивице матрице:

а) за прву операцију:

-за $s_r = 2 - 1\% \rightarrow r_M = (6 - 8)s$ Веће вредности r_M смањују силу извлачења, али повећавају склоност ка појави набора на ободу

-за $s_r = 1 - 0,3\% \rightarrow r_m = (8 - 10)s$

-за $s_r = 0,3 - 0,1\% \rightarrow r_M = (10 - 15)s$

б) за накнадне операције:

$$r_{Mn0} = (0,6 - 0,8)r_{Mn-1}$$

10) Висина тела после појединих операција

а) за случај оштрог прелаза ($r_z \approx 0$)

$$A_0 = \frac{D_0^2}{4} ; \quad \text{после } k\text{-те операције } (k = 1, 2, \dots, n)$$

$$A_0 = A_k ; \quad h_k = \frac{D_0^2 - d_k^2}{4d_k}$$

б) за случај заобљеног прелаза ($r_z > 0$)

$$h_k = 0,25 \left(\frac{D_0^2}{d_k} - d_k \right) + 0,43 \frac{r_{zk}}{d_k} (d_k + 0,32r_{zk})$$

11) Одређивање зазора између извлакача и матрице (са једне стране):

- може се вршити према обрасцу: $z = (1,1 - 1,3)s_0$ где је s_0 почетна дебљина лима, или према универзалнијој формули:

$$z = s + c\sqrt{10 \cdot s}$$

c је коефицијент који зависи од врсте материјала, а s од дебљине лима.

$c \approx 0,07$ за челик,

$c = 0,02$ за алуминијум,

$c = 0,04$ за остале обојене метале.

Извођење зазора у алату завис од намене комада, односно да ли је потребна тачна мера унутрашњег или спољног пречника.

Ако се жели тачан спољашњи пречник (d_s) тада је:

$d_M = d_s$; $d_{izv} = d_M - 2z$; d_M је пречник матрице, а d_{izv} пречник извлакача.

Ако се жели тачан унутрашњи пречник (d_u):

$d_{izv} = d_u$; $d_m = d_{izv} + 2z$

5.4. ДЕФОРМАБИЛНОСТ И ОБРАДИВОСТ ТАНКИХ ЛИМОВА ДУБОКИМ ИЗВЛАЧЕЊЕМ

5.4.1 Обрадивост лима дубоким извлачењем

Главни проблем при индустријском серијском обликовању лима извлачењем је остварење услова да се оно обави успешно (што, пре свега, значи без појаве разарања на критичним местима, мада се у ширем смислу може говорити и о другим видовима неисправности), уз истовремено задовољење основних захтева економичности и уопште рационалности производње. Несумњиво је да могућности успешног решавања овог проблема зависи у највећој мери од способности материјала да се деформише у довољном износу на одговарајући начин, тј. од његове деформабилности. Међутим, познато је да максимални (гранични) износ ове деформабилности није функција само својстава материјала, већ на њега такође битно утиче напонско - деформационо стање на критичном месту дела који се обликује. Са друге стране, оно је условљено низом чинилаца као што су: услови трења (обим и начин подмазивања, врста мазива, стање контактних површина и сл.), геометријске карактеристике алата, брзина деформисања, величина и распоред силе на држачу лима, величина и облик дела који се извлачи и развијене плоче, дебљина лима и њена постојаност, итд. Ово истовремено значи да на могућност успешне индустријске обраде лима (обрадивост - у ширем смислу) знатно утичу специфични и често веома колебљиви производни услови, тако да се појам обрадивости материјала и њени квантитативни показатељи морају обазриво тумачити.

Посебно је у том смислу проблематична обрадивост лимова од којих се извлаче сложени и геометријски неправилни делови.

Све методе испитивања обрадивости лимова могле би се најопштије поделити на следећи начин:

- методе засноване на испитивању основних механичких својстава материјала;
- симулативне (технолошке) методе;
- корелационе методе;
- испитивања заснована на коришћењу дијаграма граничне деформабилности.

5.4.2 Испитивања заснована на одређивању основних механичких својстава материјала, "n" и "r" фактор

У ову групу се сврставају, пре свега стандардизована испитивања следећих карактеристика: границе течења (или развлачења) - (R_p), затезне чврстоће (R_m) и процентуалног издужења после прекида (A). Овоме такође треба додати испитивање тзв. n- и r- фактора.

На основу добијених резултата за прве три карактеристике изводе се врло груби и недовољно поуздани индиректни закључци о општим својствима пластичности метала. Сматра се да су у том смислу боља својства оних материјала који показују веће вредности за A и мањи однос R_p/R_m . Могу се за одређене намене прописати одговарајуће граничне вредности ових карактеристика које се не би смеле прекорачити. Међутим, не треба испустити из вида чињеницу да потребни износи појединих механичких карактеристика не произилазе само из захтева за успешном обрадом, већ и из других конструкцијско - експлоатационих услова. На пример, доња вредност границе течења код каросеријских лимова најчешће се ограничава на око 180 N/mm^2 , јер би при евентуално нижим износима механичка крутост каросерије била доведена у питање, без обзира на то што би обрадивост лима пластичним деформисањем могла порасти (наравно, уколико би затезна чврстоћа задржала своју високу вредност).

Поред поменутих механичких карактеристика, у новије време све више се практикује и одређивање показатеља деформационог ојачавања, као и тзв. коефицијента нормалне анизотропије лима.

У првом случају реч је о познатом експоненту деформационог ојачавања (n), који фигурише у аналитичкој вези између стварних напона (σ) и стварних деформација (φ) у области пластичног обликовања :

$$\sigma = C\varphi^n$$

Овај израз уједно представља функцију одговарајуће криве ојачавања, па степен n (познат под популарним називом n -фактор) на одређен начин илуструје облик те криве, односно њен већи или мањи успон до којег долази услед деформационог ојачавања.

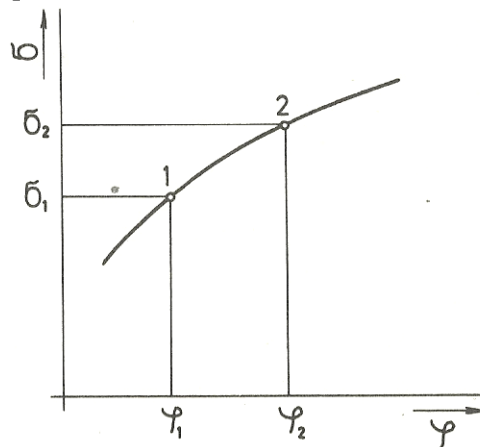
Са становишта обрадивости лима, а поготово у случајевима израженог двоосног развлачења материјала, треба тежити што већем ојачавању, односно што већем износу n -фактора. Ово стога што би у таквим случајевима у процес обликовања била укључена шира зона лима него у случајевима када је n -фактор мали, па би жељени укупни облик дела настао као последица збира релативног малог деформисања већег броја појединачних елемената материјала. Осим тога, ако би се у току извлачења појавила извесна ослабљена места која би у неком тренутку почела јако да се деформишу, при већем ојачавању та ситуација би била брзо превазиђена и на тај начин спречено локализовано деформисање и евентуално разарање материјала на том месту.

Погодно је да се за практично одређивање износа овог степена користи једноосно затезање епрувете на машини за испитивање материјала. Ако се при томе предња функција изрази за две различите тачке на кривој ојачавања (сл. 5.11.) и затим реше две симултане једначине, добија се:

$$\sigma_1 = C\varphi_1^n ; \sigma_2 = C\varphi_2^n$$

$$n = \frac{\log \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}{\log \frac{\varphi_2}{\varphi_1}} = \frac{\log \frac{\sigma_{t2}(1+\varepsilon_2)}{\sigma_{t1}(1+\varepsilon_1)}}{\log \frac{\ln(1+\varepsilon_2)}{\ln(1+\varepsilon_1)}} = \frac{\log \frac{F_2 \ell_2}{F_1 \ell_1}}{\log \frac{\ell_2}{\ell_1}} = \frac{\log \frac{\ell_2}{\ell_o}}{\log \frac{\ell_1}{\ell_o}}$$

где су: σ_1 и σ_2 - стварни, а σ_{t1} и σ_{t2} технички напони у тачкама 1 и 2; ℓ_1 и ℓ_2 - мерне дужине епрувете које одговарају тим тачкама; F_1 и F_2 - силе затезања; ℓ_o - почетна мерна дужина епрувете. [3]



Сл. 5.11 Две произвољне тачке на кривој ојачавања и одговарајући напони, односно деформације [3]

На тај начин, омогућено је одређивање експонента n у зависности од величина које се могу лако измерити или регистровати на машини за уобичајено испитивање материјала затезањем.

Постоје и неки други практични поступци за одређивање n -фактора, али се сви они у суштини заснивају на предњој дефиницији.

Најчешће се добијене вредности за различите материјале крећу у оријентационим границама 0,2 - 0,3.

Као непосредни показатељ обрадивости дубоким извлачењем " n " фактор није погодан. То је зато што при дубоком извлачењу механизам разарања подразумева интензивно стањење лима. Показатељ који директно указује на стањење је коефицијент нормалне анизотропије или популарно " r " фактор.

Коефицијент нормалне анизотропије представља однос стварне деформације епрувете (за испитивање лима затезањем) по ширини (φ_b) и дебљини (φ_s) :

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{b}{b_o}}{\ln \frac{s}{s_o}} = \frac{\log \frac{b}{b_o}}{\log \frac{s}{s_o}}$$

где се ознаке b_o и s_o односе на ширину и дебљину лима пре затезања, а b и s у одговарајућем тренутку кад је остварена пластична деформација.

Јасно је да ће у случају изотропног материјала износ овог коефицијента бити 1. Веће вредности он ће имати онда када се епрувета више деформише по ширини него по дебљини, што би практично значило да материјал има повећану отпорност према стањењу. Већ и ова описна констатација указује на погодност лимова са већим r - фактором. При томе би, услед отежаног стањења на критичним местима дела који се извлачи материјал дуже могао преносити релативно велике силе, па би се у доста случајева избегло разарање материјала. Важи, наравно, и обрнуто.

Из овог разлога је уопште пожељан што већи износ r - фактора, а нарочито када је у процесу обликовања претежно заступљен модел деформисања карактеристичан за чисто дубоко извлачење. Да би то било јасније, треба се подсетити да је при овом

извлачењу критична зона лоцирана у области заобљења ивице дна извученог тела, и да она, као и читав цилиндрични омотач, треба да пренесе укупну силу извлачења. Са друге стране, способност овог преношења биће већа уколико је стањење лима мање. На деформисање развлачењем r - фактор нема тако изражен утицај (ту је, према предњем закључку, од већег значаја износ n - фактора).

Понекад лимови имају вредност овог коефицијента и испод 1, што је са становишта обрадивости неповољно. Иначе, код већине нелегираних челичних лимова та вредност се креће обично у опсегу 1,2 - 1,8. [3]

Како су обе поменуте деформације (φ_b и φ_s) негативне, њихов збир са супротним знаком мора одговарати деформацији издужења (φ_ℓ), па се та околност користи за једноставну трансформацију предњег израза, тј. елиминисање из њега деформације у правцу дебљине материјала. Ово стога што се она практично тешко може одредити са довољном тачношћу - због релативно мале дебљине:

$$r = \frac{\log \frac{b}{b_o}}{\log \frac{\ell_o b_o}{\ell b}}$$

јер је запремина $V = \ell_o b_o s_o = \ell s b = \text{const.}$, па следи да је $\frac{s}{s_o} = \frac{\ell_o b_o}{\ell b}$.

С обзиром да се често код лимова може говорити и о анизотропији у равни лима, тј. зависности различитих својстава од правца у односу на правац ваљања, уобичајено је да се врши погодно осредњавање, како ове, тако и других карактеристика, и то на следећи начин:

$$\bar{r} = \frac{1}{4}(r_o + 2r_{45} + r_{90})$$

$$\bar{n} = \frac{1}{4}(r_o + 2n_{45} + r_{90})$$

или уопштено:

$$\bar{X} = \frac{1}{4}(X_o + 2X_{45} + X_{90})$$

При томе се индекси односе на углове исецања епрувете у односу на правац ваљања лима. [3]

5.4.3 Симулативне (технолошке) методе

Према самом називу може се закључити да се ове методе односе на испитивања при којима се деформациони процеси у материјалу одвијају на сличан начин као и при стварној индустријској обради. Међутим, потпуна истоветност тих процеса скоро се никада не постиже, већ се може рачунати само са мањом или већом сличношћу, односно аналогијом. То је и главни недостатак и разлог што је већина симулативних поступака у пракси напуштена.

Испитивани материјал се, у току индустријске обраде извлачи под околностима које су ипак измењене у односу на оне у лабораторији. Ту се, пре свега, мисли на облик и димензије алата, брзину деформисања, однос полупречника заобљења и дебљине лима, услове трења и др. Уколико су разлике у овом смислу мање, остварује се већа

симулативност, а тиме и већа поузданост критеријума обрадивости. То истовремено значи да је избор адекватне методе испитивања, између више расположивих, исто толико значајан као и коректно извођење опита и интерпретација резултата.

Симулативне методе обухватају релативно велики број поступака испитивања, па је погодно да се оне поделе на следеће подгрупе:

- поступци који одговарају чистом дубоком извлачењу;
- поступци који се заснивају на развлачењу;
- комбиновани и специјални симулативни поступци.

У даљем се даје скраћен опис по једног најтипичнијег опита за сваку од прве две подгрупе. Остали поступци који припадају овим групама (Schmidt-ов, K. W. I., ...), као и комбиновани, односно специјални (Swift-ов, Fukui-ов, Engelhardt-ов, ...), овде се неће описивати.

5.4.3.1 Испитивање извлачењем цилиндричног опитног дела

Принцип на коме се заснивају поступци који одговарају чистом дубоком извлачењу састоји се, у основи, у одређивању граничног степена извлачења лима у опитном алату:

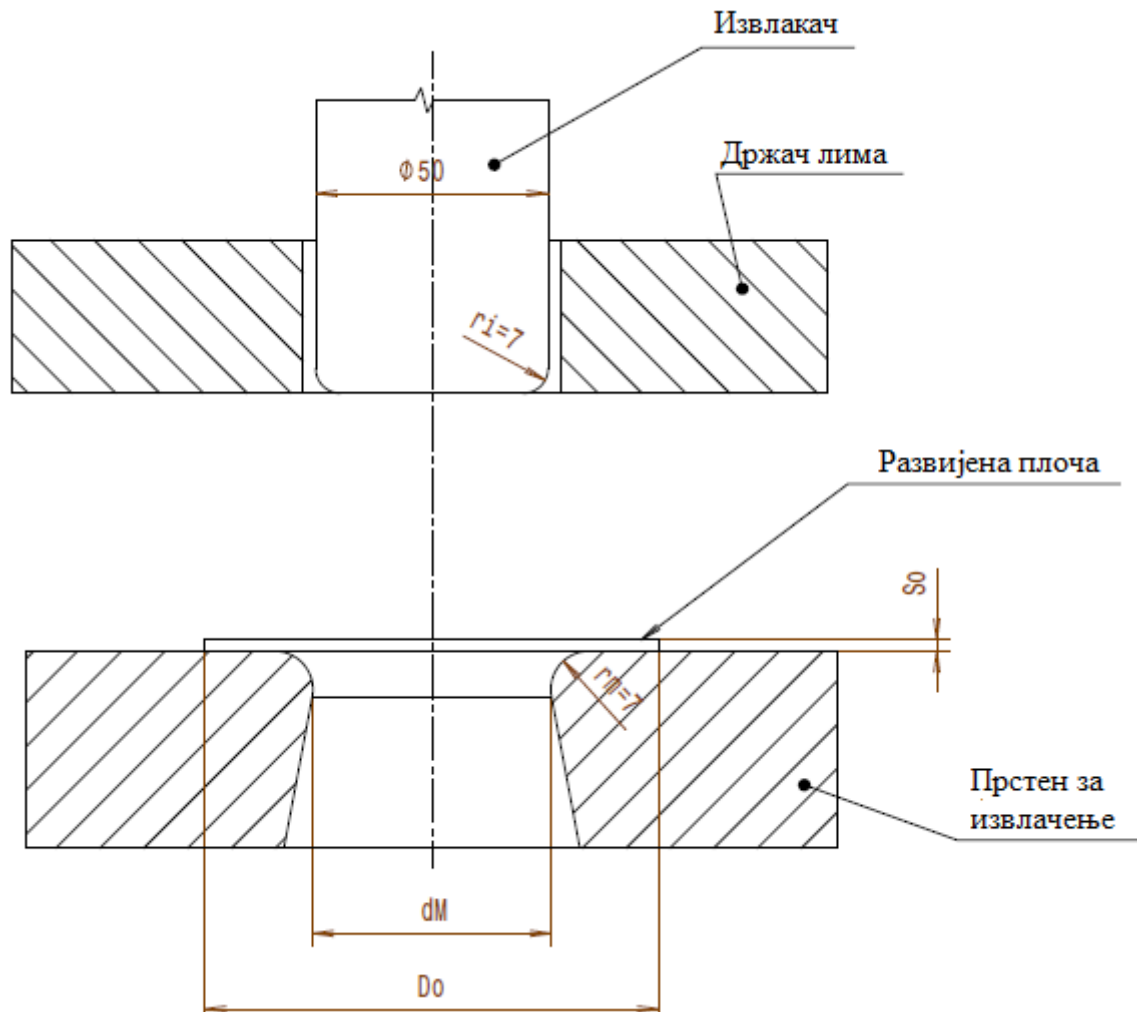
$$\beta_{\max} = \frac{D_{o\max}}{d_o}$$

где је d_o - пречник извлакача, а $D_{o\max}$ - највећи пречник развијене плоче са којим се још може извршити успешно извлачење.

Другим речима, помоћу опитног алата одређених димензија и под прописаним условима извлачи се опитно тело - на исти начин као и код раније описаног чистог дубоког извлачења. Поступним повећавањем пречника развијене плоче D_o долази се до максималне могуће вредности $D_{o\max}$. Лимови погоднији за дубоко извлачење показују веће граничне вредности $\beta_{\max}$ и обратно.

Својевремено је овај поступак био познат под називом А. Е. Г. (јер га је најпре увела фирма "Algemeine Elektrizitäts - Gesellschaft"). Међутим, касније је, с обзиром на пречник извлакача, заобљење његових чеоних ивица и др., дошло до увођења низа других сличних варијанти опита (данас се у немачком језику користи шири назив: *Narphenziehverfahren*, а у енглеском: *Cup Drawing Test*), па се и изворни назив углавном изгубио. Треба напоменути да се овај поступак не мора увек користити само за изналажење граничне вредности $\beta_{\max}$, већ се такође може применити и као контролни опит којим се само проверава да ли материјал задовољава неки унапред захтеван (прописан) однос β . Наиме, извлачећи лим при испитивању управо са тим односом, проверава се да ли на њему није евентуално дошло до разарања материјала.

На сл. 5.12 шематски су приказани основни елементи првобитне варијанте овог опита.



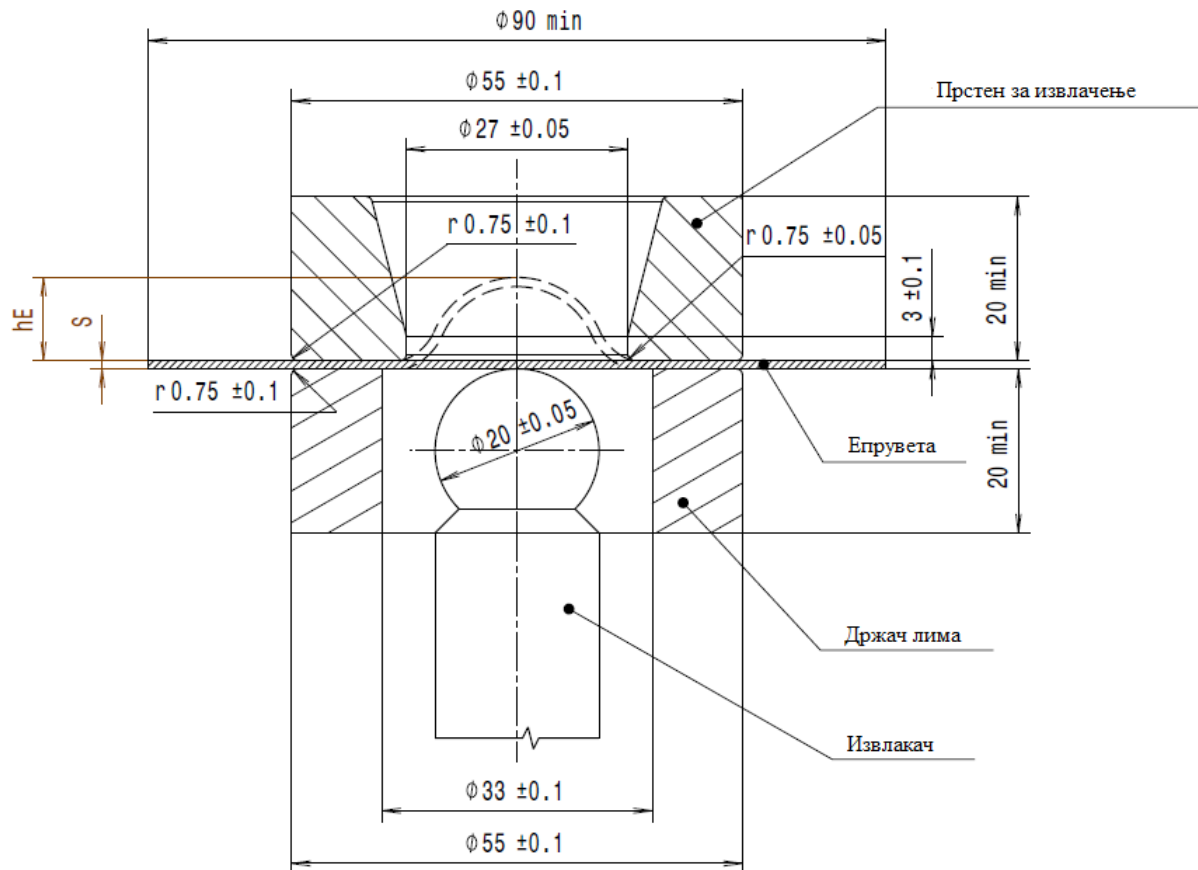
Сл. 5.12 Основне димензије алата за испитивање класичним А. Е. Г - поступком

5.4.3.2 Erichsen-ов опит

Најширу примену од више различитих поступака испитивања који се заснивају на развлачењу материјала нашао је тзв. Erichsen-ов опит. Назив потиче од имена аутора поступка (А.М. Erichsen).

Ово испитивање се врши још од 1912. године и до данас је остало најраспрострањеније технолошко рутинско испитивање лима у индустрији. Наравно, с обзиром на модел деформисања који је у њега укључен, поузданост оцене која се може извршити на основу добијених резултата зависиће у великој мери од тога да ли се испитује лим који ће се обрађивати претежно развлачењем или не. На пример, уколико се он обрађује на начин који више одговара чистом дубоком извлачењу, онда ће свакако бити поузданије процену обрадивости извести на неки други начин (нпр. преко "r" фактора). Ипак, у пракси се често не располаже другим могућностима, па се, и поред ове околности, примењује Erichsen-ов опит за најразличитије случајеве (уређај за ово испитивање релативно је једноставан и јевтин, па га зато поседује већина лабораторија за испитивање материјала).

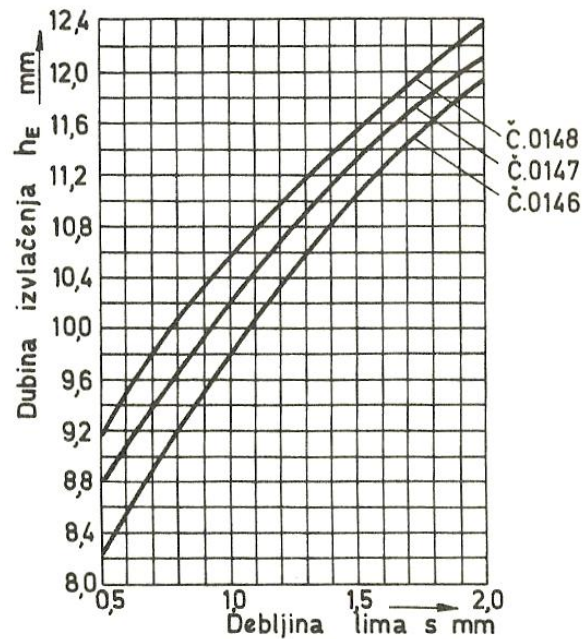
Сам поступак састоји се у следећем. Најпре се квадратна плоча израђена од испитиваног лима, димензија 90 x 90 mm поставља у Erichsen-ov уређај - сл. 5.13 и по ободу чврсто притеже држачем лима. Сила овог држања је око 10 kN, односно мора бити довољна да спречи померање ове периферне зоне у току деформисања и тиме омогући остварење чистог развлачења. Затим се извлакачем сферног облика, са пречником сфере 20 mm, врши извлачење, тј. формирање одговарајућег просторног облика на лиму (полусферно удубљење, одн. испупчење - зависно од стране са које се посматра).



Сл. 5.13 Шема испитивања лима по Erichsen-у и основне димензије уређаја

Извлачење се врши равномерно и лагано са брзином која је порписана одговарајућим стандардом (обично 5 - 20 mm/min) све до појаве првог знака разарања материјала, тј. пукотине на извученом делу. У том тренутку кретање извлакача се зауставља и на скали апарата читава остварена дубина извлачења. Ова дубина, изражена у милиметрима, уједно је и резултат испитивања (h_E). Очитавање дубине врши се са тачношћу која омогућује скала апарата и она обично износи 0,1 mm.

За правилну интерпретацију добијених резултата, односно њихово коришћење, неопходно је нагласити да постигнуте дубине извлачења нису зависне само од опште способности материјала да се деформише на овај начин, већ и од дебљине лима. За лим истог квалитета, ове дубине (тј. резултати испитивања по Erichsen-у) расту са порастом његове дебљине. Законитост те промене за неке врсте челичних лимова види се на сл. 5.14. Свака крива представља еталон и одговара једном дефинисаном номиналном квалитету материјала.



Сл. 5.14 Зависност дубине извлачења (Erichsen-овог броја) h_E од дебљине лима [3]

Уобичајено је да произвођачи лима презентирају потрошачу криве минималних - гарантованих дубина за одговарајуће квалитете материјала, или их упућују на такве криве у стандардима и другим изворима.

5.4.3.3 Корелационе методе

Због бројности поменутих, као и ненаведених механичко-технолошких поступака испитивања лимова, односно карактеристика (показатеља) који се у оквиру њих одређују, природно се наметнула потреба за упознавањем њихове међусобне зависности (корелативности), а тиме и за утврђивањем карактера утицаја сваке од њих. Различити истраживачи вршили су бројна испитивања у том смислу и добијене резултате презентирали у многим стручним публикацијама - преко одговарајућих регресионих линија, односно коефицијената корелације.

Ти резултати су несумњиво потврдили да постоји упадљиво висока корелација између n -фактора и Erichsen-овог броја, као и поменутог односа R_p/R_M . Такође је висока корелација и између r -фактора и граничног степена извлачења шупљег цилиндричног тела, итд.

Овде ће се, само ради илустрације, навести неколико коефицијената корелације које је аутор добио приликом једног ранијег истраживања (* у ознаци служи да се истакне разлика од "r" фактора):

- између R_p/R_M и n : $r^* = 0.806$
- између R_p/R_M и n и r : $r^* = 0.363$
- између R_p/R_M и n и h_E (дуб. по Erichsen-у): $r^* = 0,658$

- између $\frac{R_p}{R_m}$ и h_E : $r^* = 0,381$

Без обзира на несумњив значај оваквих резултата за сагледавање степена и природе значаја појединих карактеристика, као и њихових међусобних односа, проблем оцењивања обрадивости тиме није решен, већ је само унето нешто више светла у стварну потребу испитивања појединих карактеристика, односно одабирање оних које ће се испитивати. На пример, због изразито високе корелације између односа $\frac{\sigma_T}{\sigma_M}$ и n-фактора, постаје очигледно да нема оправдања при нормалним испитивањима одређивати оба показатеља, идт.

5.4.3.4 Гранична деформабилност при извлачењу лима и њен значај

У новије време научна методологија све више продире у читаву ову област, смањујући удео класичних емпиријских решења. Поред осталог, почиње да се користи смишљен експериментални поступак индентификовања деформационих поља у деловима који се извлаче (првенствено геометријски неправилним). Он се састоји у претходном електролитичком наношењу на лим јасно видљиве мреже (линија), састављене од мноштва малих кружића (пречника 2 - 10 mm) - тзв. мерне мреже. У току извлачења ови се кружићи деформишу у елипсе чије осе својом дужином одређују величине остварених главних деформација на тим местима. Тако се може добити квантитативно изражена слика распореда и величине деформација у појединим зонама дела, као и положаји критичних зона (у којима се може очекивати разарање материјала при прекорачењу његове граничне деформабилности). То истовремено значи да се евентуално могу предузимати расположиве мере за побољшање распореда и величине деформација (промена силе држања, распореда и величине затезних ребара, подмазивања, зазора, итд.), а затим проверити ефекти тих мера.

Са становишта граничне деформабилности лима, односно опасности од његовог разарања, од посебног је значаја да се за овај начин испита критична зона дела, тј. она у којој се разарање материјала може најпре очекивати. Ова зона је најчешће искуствено позната, или се може установити такође помоћу мерне мреже - њеним наношењем на већу површину и визуелном оценом положаја и праваца највећих деформација. Идентификацију критичних зона могуће је извести и преко нумеричких симулација на одговарајућим софтверима који су све доступнији због ниже цене.

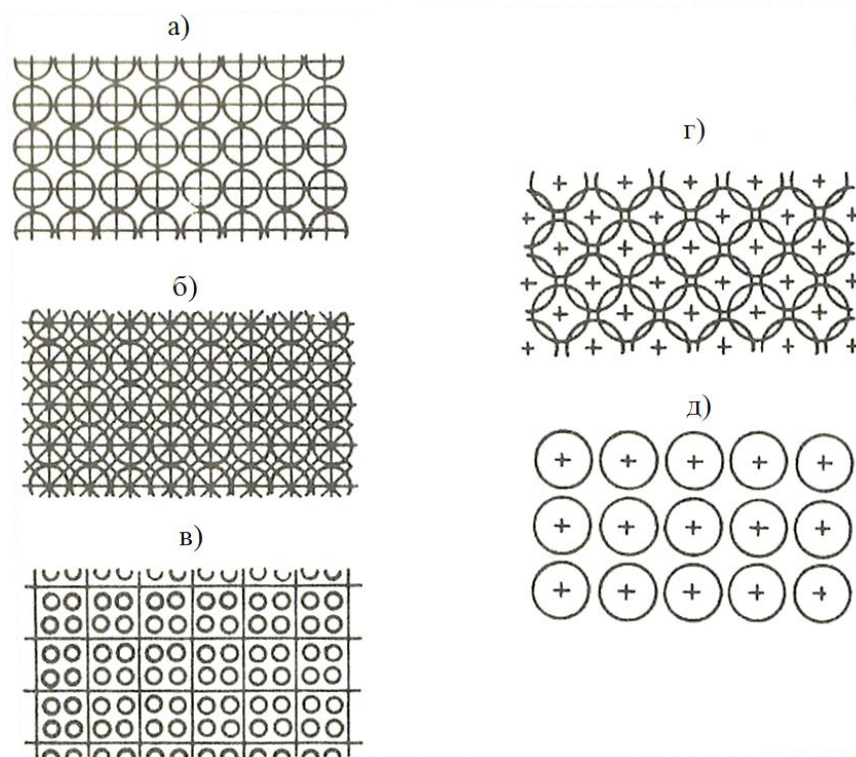
Ако су највећи и најмањи пречник (оса) елипсе d_1 и d_2 , а почетни пречник кружића - елемената мерне мреже d_o , биће логаритамске деформације на тим местима:

$$\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d_o} ; \varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d_o}$$

Понекад се уместо логаритамских деформација користе релативне техничке, или, пак, процентуалне деформације:

$$\delta_1 = \frac{d_1 - d_o}{d_o} \cdot 100\% ; \delta_2 = \frac{d_2 - d_o}{d_o} \cdot 100\%$$

На сл. 5.15 приказани су само неки од више примењиваних облика мерне мреже која се наноси на лим (техника наношења је данас сасвим усавршена и, захваљујући коришћењу специјалних уређаја, релативно је једноставна; међутим, она се овде неће описивати).

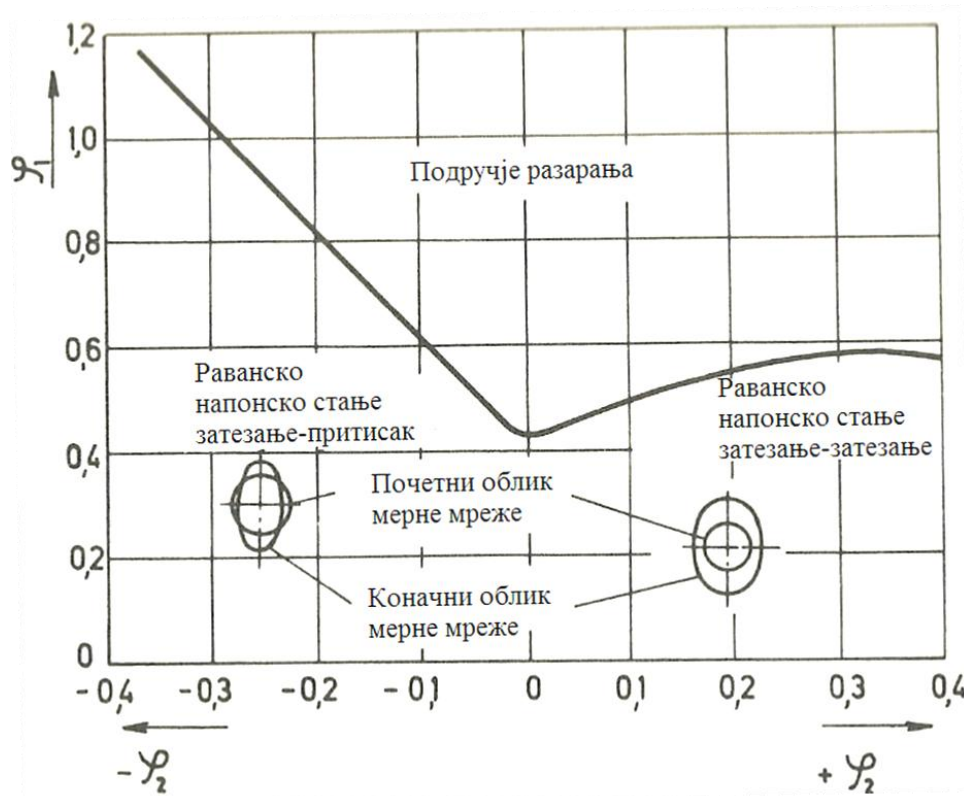


Сл. 5.15 Различити облици мерне мреже која се наноси на лим [3]

Користећи могућности које пружа оваква експериментална техника, Keeler и Goodwin су предложили формирање дијаграма граничне деформабилности (у литератури познат као FLD дијаграм - тј. Flow Limit Diagram) према сл. 156. На ординату овог дијаграма наноси се већа главна деформација у равни лима (δ_1 или φ_1), а на апцису мања (δ_2 или φ_2).

Сам поступак његовог добијања састоји се у томе што се испитивање обавља на више различитих узорака од једног истог материјала, али се при томе подешава да се за сваки од њих на критичном месту оствари друкчије напонско - деформационо стање (то се може постићи променом геометрије алата, подешавањем облика и димензија развијене плоче, подмазивањем и др.). Осим тога, они се у току опита доводе до разарања (сл. 5.16). Одређујући деформације φ_1 и φ_2 мерењем оса елипси на месту разарања, за сваки узорак се добија по једна тачка у дијаграму. Апроксимацијом распореда ових тачака континуалном линијом добија се тражени дијаграм граничне деформабилности. Он заправо представља граничну зону између два различита подручја.

Наиме изнад добијене граничне линије налази се подручје разарања, јер материјал неће моћи да се успешно деформише до износа који би укључивали веће деформације φ_1 него што гранична линија показује (без обзира на напонско - деформационо стање). Испод ове линије налази се подручје успешне обраде. Често се дефинише и линија почетка нестабилног, локализованог деформисања која је увек испод криве разарања. Тиме се добија карактеристичан појас и још прецизније дефинише област сигурне обраде.



Сл. 5.16 Keeler-Goodwin-ов дијаграм граничне деформабилности [3]

Другим речима, ако се на неком конкретном делу који се извлачи (на пример делу каросерије аутомобила) коришћењем мерне мреже установи величина главних деформација φ_1 и φ_2 на критичном месту и одговарајућа тачка унесе у дијаграм граничне деформабилности, она ће, на основу удаљења те тачке од граничне линије у дијаграму, моћи да се оцени степен технолошке критичности дела. Већа удаљења (наниже) указују на постојање знатније сигурности ("резерве пластичности"), док релативно мала удаљења подразумевају постојање већег ризика да се услед практично могућих и уобичајених поремећаја у току обликовања лако прекорачи критична граница. Свакако да се велика резерва у овом смислу не може сматрати пожељном, јер би била неекономична (материјал непотребног високог квалитета, што значи и скупљи него што је неопходно).

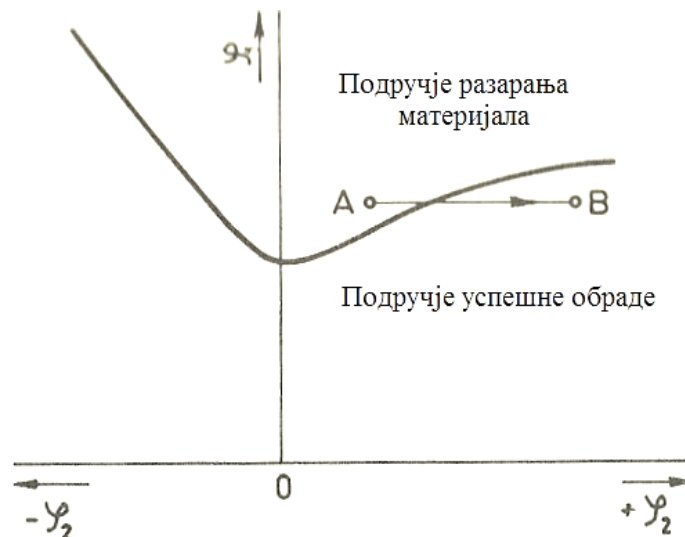
Анализирајући дијаграм граничне деформабилности може се приметити да због успона криве у једном делу не мора до разарања увек доћи на месту највеће деформације φ_1 . Уколико је она комбинована са релативно великом деформацијом φ_2 , онда то може бити повољније него што би било при истој, или чак мањој, деформацији φ_1 комбинованој са мањом деформацијом φ_2 . Ако деформација φ_1 на критичном месту одговара тачки А, доћи ће до разарања материјала.

Али ако се, на пример, подешавањем држања лима на ободу, променом подмазивања, или на неки други начин, она помери у положај Б максимална деформација φ_1 ће се наћи испод критичне границе и део ће бити успешно обликован.

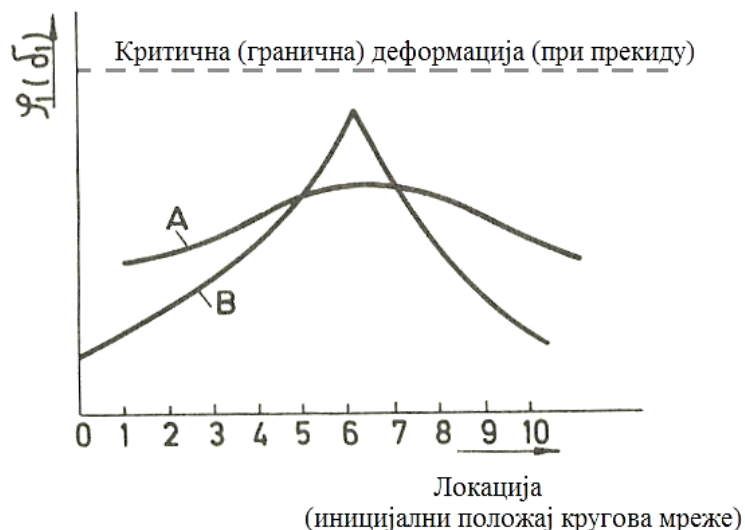
Даља анализа и проучавање ове проблематике показали су да није само износ максималне деформације φ_1 на критичном месту од пресудног значаја за понашање материјала у току обраде у индустријским условима, већ је то такође и дистрибуција деформација у широј околини овог места. Начелно посматрано, уколико је њихов

распоред равномернији, утолико се ситуација може сматрати повољнијом и обрнуто. Јако концентрисање деформација око критичног места практично ће пре довести до прекорачења критичне границе и разарања материјала при уобичајеним поремећајима и колебањима производних услова.

Да би се добила слика распореда деформација потребно је да се изврши мерење деформисаних елемената мреже у околини критичног места и да се одговарајући подаци унесу у прикладан дијаграм. Шематски приказ оваквих распореда дат је на сл. 5.18 види се да је у хипотетичком случају Б ситуација неповољнија, јер је деформациони градијент већи него у случају А.



Сл. 5.17. Шематски приказ могућности да се померањем положаја тачке у дијаграму пређе из критичне области у подручје успешне обраде [3]



Сл. 5.18 Дијаграм дистрибуције деформација у критичној зони. Криве се односе на два различита материјала односно два различита деформациона градијента (при извлачењу до исте дубине) [3]

Без уласка у детаљну анализу проблема равномерног распореда деформација у критичној зони (односно њихове концентрације), указује се само на изузетан значај који у том смислу имају својства хладног деформационог ојачавања материјала. Уколико је материјал способнији за ојачавање (већи експонент ојачавања n), утолико

ће, под истим осталим условима, бити постигнут равномернији распоред деформација. При овоме такође треба уочити да ће, на пример, при извлачењу једног одређеног дела, у случају већег ојачања, тј. мање сконцентрисаности деформација, највећа главна деформација имати мањи износ него када је то ојачање мање. Када је распоред деформација равномернији, могуће је остварити веће дубине извлачења - максимална могућа дубина приближно је сразмерна површини испод криве дистрибуције.

Користећи дијаграм граничне деформабилности може се, за поједине делове (отпреске) анализом распореда и величине деформација у критичној зони установити, па и квантитативно изразити на погодан начин, степен технолошке критичности (с обзиром на удаљење одговарајуће тачке од граничне линије). То отвара могућности за систематизовану спецификацију, како отпресака, тако и материјала. У критичним случајевима овим се такође омогућује смишљено решавање, односно ублажавање, насталог проблема (на пример, промена величине полупречника заобљења ивица алата, побољшаним подмазивањем, променом начина држања лима на ободу ради остварења повољнијег односа φ_2/φ_1 , итд.). То истовремено значи да се у многим критичним случајевима може избећи замена материјала квалитетнијим тиме што ће се остварењем погодније напонско - деформационе шеме (в. сл. 5.17) и погоднијег распореда деформација истовремено смањити и њихови екстремни износи.

У овом смислу се читава ова методологија показала као веома погодна при почетном подешавању алата у производњи, јер се ефекти свих модификација и коректура могу квантификирати и проверавати непосредно. То такође важи и за праћење степена похабаности алата, утицаја квалитета мазива и др.

Ова комплексна проблематика укључује још низ других фактора који превазилазе темс овог рада а који су предмет интензивног изучавања у новије време. Ради илустрације, могу се поменути само неки од њих: утицај "историје" деформисања на граничну деформабилност (у наведеним приказима полазило се од претпоставке да се деформисање одвија монотono, што у доста случајева не одговара реалности), утицај анизотропије материјала, брзине деформисања, крупноћа мерне мреже, итд.).

6. МАШИНЕ И АЛАТИ ЗА ДУБОКО ИЗВЛАЧЕЊЕ

6.1 НАЈВАЖНИЈЕ МАШИНЕ ЗА ДУБОКО ИЗВЛАЧЕЊЕ

Код дубоког извлачења, више него код других поступака обраде лима, врста изабране машине утиче на концепцију алата и ток процеса обликовања. За извођење операција дубоког извлачења користе се пресе са механичким и хидрауличним погоном. Са аспекта тока процеса обликовања повољније су хидрауличне пресе јер имају константну брзину кретања притискивача, могућност подешавања брзине, повољну зависност деформационе силе од хода итд. Ипак, у индустрији се знатно више користе механичке пресе због већих брзина кретања извршних органа, односно веће производности.

Према броју активних дејстава пресе за извлачење се могу поделити на:

- а) пресе једноструког дејства без јастука за силу држања,
- б) пресе једноструког дејства са јастуком за остваривање силе држања,
- ц) пресе двоструког дејства,
- д) пресе троструког дејства.

Зависно од броја радних позиција пресе могу бити:

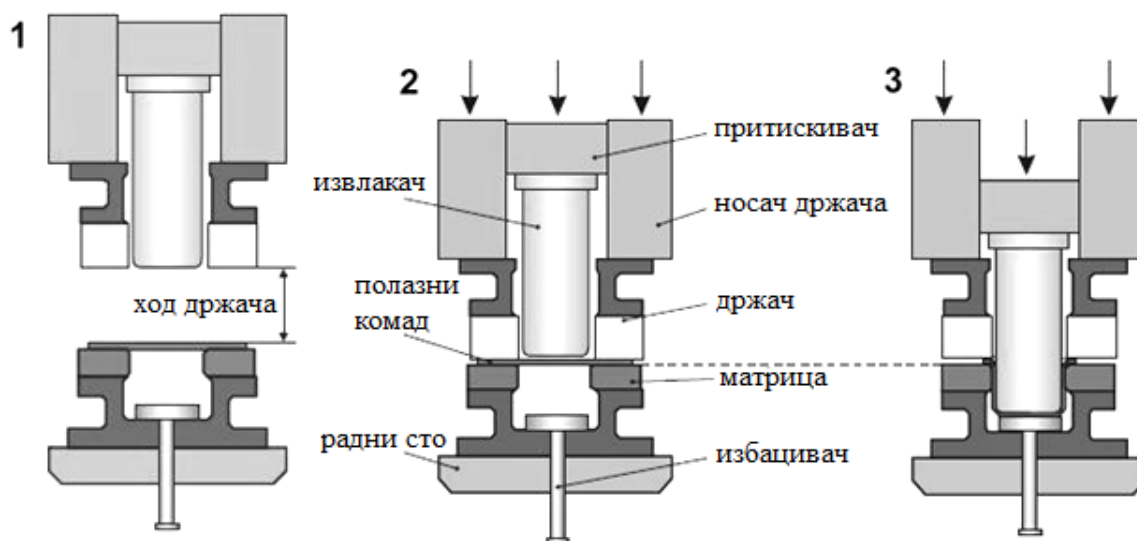
- а) једнопозиционе и
- б) вишепозиционе.

Избор пресе за дубоко извлачење врши се на основу технолошких карактеристика процеса од којих су најбитније:

- 1) параметри процеса - деформациона сила и рад, сила држања,
- 2) брзина деформисања,
- 3) димензије алата,
- 4) радни ход алата,
- 5) величина серије комада.

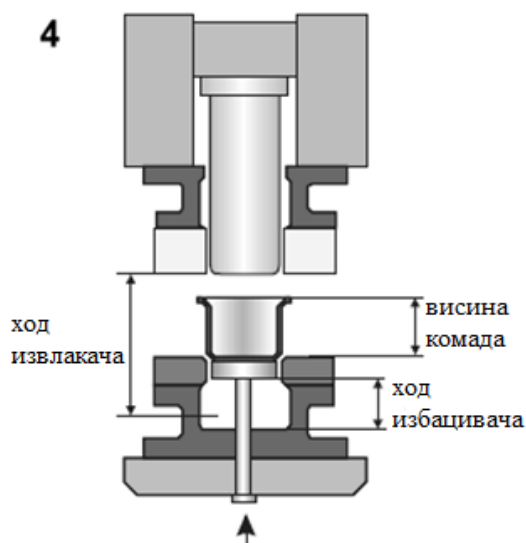
Са аспекта утицаја на конструктивно решење алата и ток процеса, најзначајнија одлика пресе је број активних дејстава. На сл. 6.1 и 6.2 приказане су фазе у раду пресе двоструког дејства.

На сл. 6.1 под 1 је приказано почетно стање. Почетак рада пресе подразумева истовремено покретања држача и извлакача (2) све до успостављања силе држања, када се завршава ход држача. Онда почиње ход извлакача (3), односно процес обликовања.



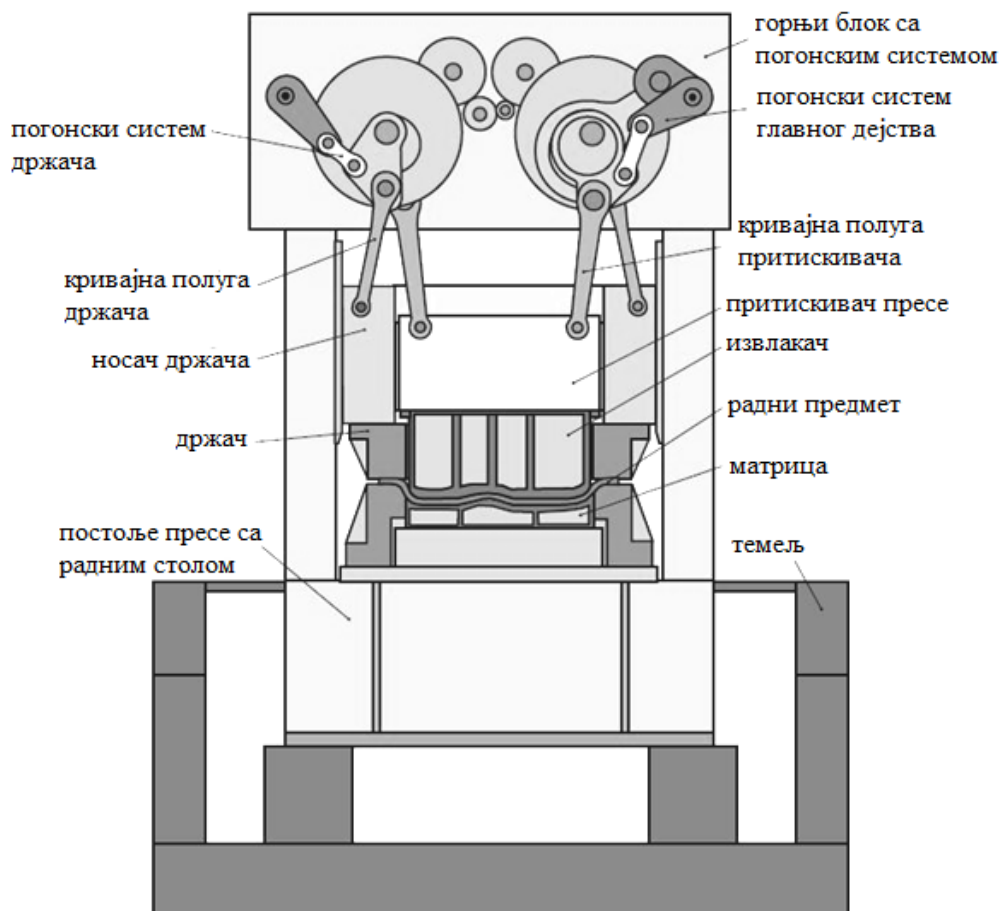
Сл. 6.1 Фазе радног хода пресе двоструког дејства [1]

Сл. 6.2 показује стање на крају хода избацивача који делује са доње стране.



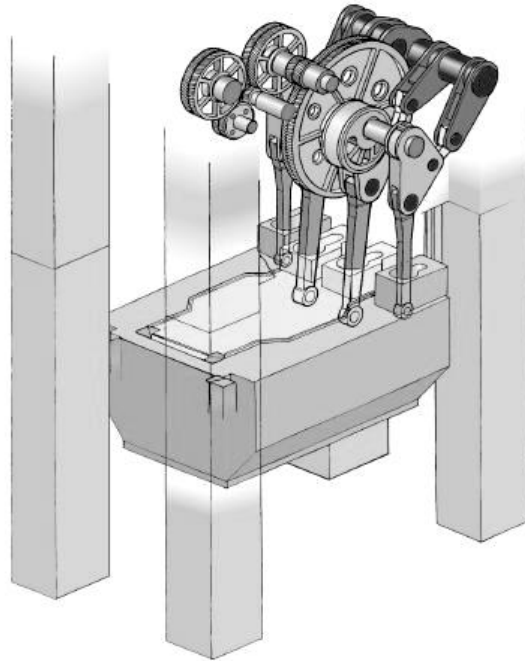
Сл. 6.2 Фаза избацивања на преси двоструког дејства [1]

На сл. 6.3 приказана је шема механичке пресе двоструког дејства, са карактеристичним положајем алата. Извлакач и држач су увек са горње стране, а матрица на радном столу машине.



Сл. 6.3 Шема механичке пресе двоструког дејства [1]

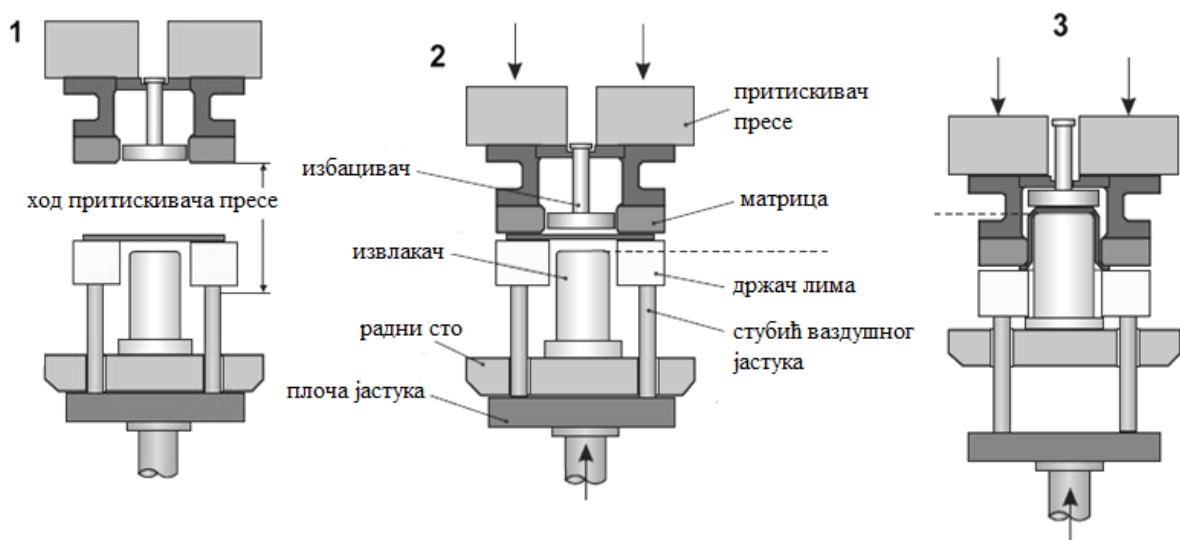
Слика 6.4 показује шему ексцентарског кривајног погона машине на сл. 6.3



Сл. 6.4 Шема кривајног погона пресе са сл. 6.3 [1]

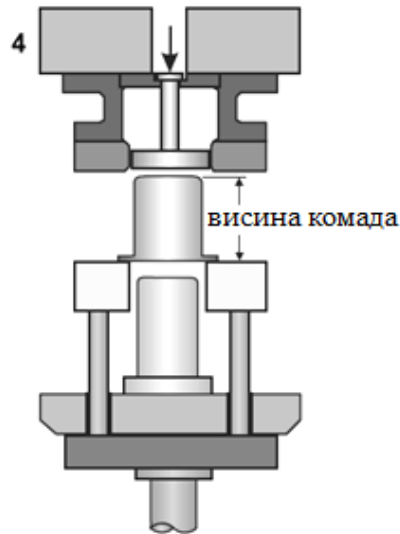
Пресе једноструког дејства имају једно главно дејство и због тога су једноставније конструкције, што доприноси нижој цени машине. Неопходно дејство држача остварује се деловањем тзв. јастука (најчешће са пнеуматским погоном) који је смештен испод радног стола. Концепција алата је другачија у односу на алат за пресу двоструког дејства. Извлакач и држач су смештени на радном столу, а матрица је везана за притискивач пресе.

На сл. 6.5 под 1 дат је положај радних елемената алата на извршним деловима машине при почетку рада. Притискивач пресе креће се на доле, остварује држање обода (2), савладава силу држања и наставља континуални радни ход до краја обликовања (3)



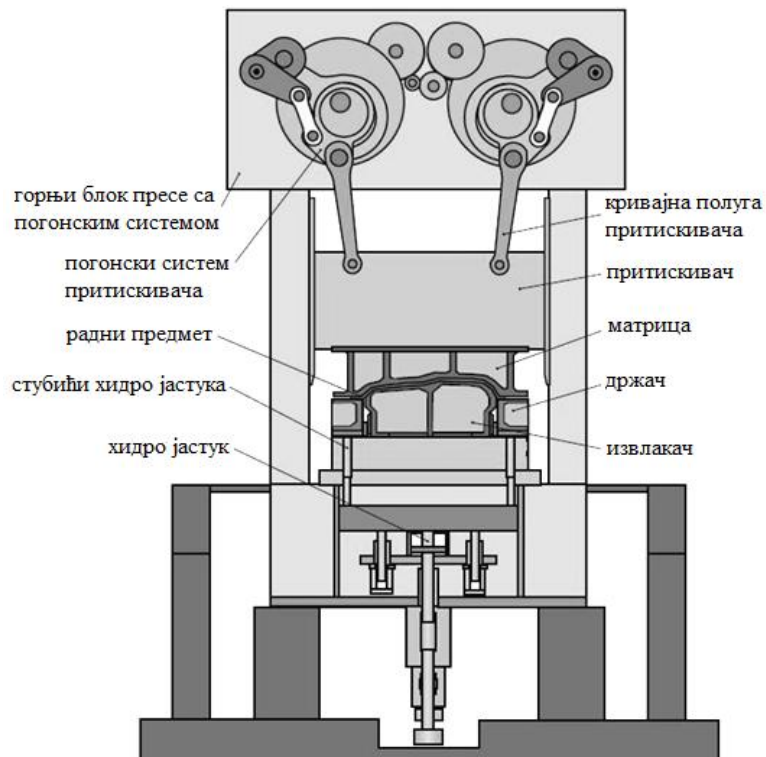
Сл. 6.5 Фазе рада на преси једноструког дејства [1]

Сл. 6.6 приказује стање после фазе избацивања. Ако комад остане на извлакачу скида га држач у свом повратном ходу. Ако остане у матрици, избацује га избацивач, који се погони током повратног хода притискивача пресе.



Сл. 6.6 Фаза избацивања на преси једноструког дејства [1]

На сл. 6.7 приказана је шема механичке пресе једноструког дејства. Испод радног стола види се јастук са хидрауличним погоном и веза са држачем лима. Извлакач је везан за радни сто пресе и непокретан је током процеса обликовања. Матрица је везана за притискивач пресе и креће се заједно са њим. Погонски систем притискивача је кривајни, али знатно једноставнији од преса двоструког дејства.

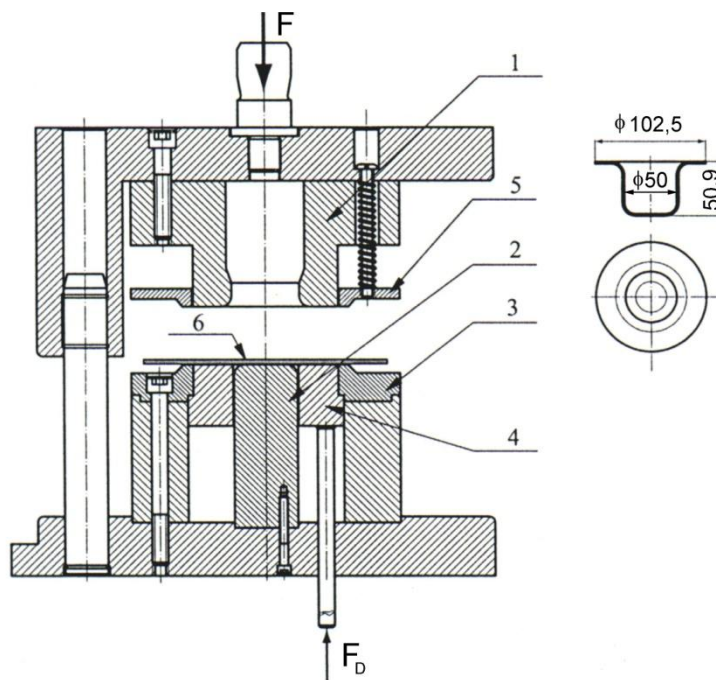


Сл. 6.7 Шема механичке пресе једноструког дејства са помоћним дејством хидрауличног јастука

6.2 ПРИМЕРИ АЛАТА ЗА ДУБОКО ИЗВЛАЧЕЊЕ ЦИЛИНДРИЧНИХ ДЕЛОВА

Основна концепција алата за дубоко извлачење углавном је слична алатима за просецање и савијање и прилагођена је машинама (пресама) на којима се користе. Суштинска је разлика у отме што се за извлачење мора обезбедити и дејство држача, поред главног и помоћних дејстава. Врста пресе значајно утиче на конструктивно извођење алата. Најчешће су у употреби пресе једноструког дејства са помоћним дејством тзв. ваздушног (или хидро) јасутка и пресе двоструког дејства.

На сл. 6.8 приказан је алат за извођење две обједињене операције: просецање кружног развијеног стања и извлачење цилиндричног комада са венцем (сл. 6.8 десно). Матрица за извлачесе (позиција 1) уједно је и нож за просецање развијеног стања. Извлакач (2) је непокретан, чврсто везан за доњу плочу алата. Позиција 3 представља матрицу за просецање. Држач лима означен је позицијом 4 и добија погон од ваздушног јастука. Позиција 5 представља скидач остатка лима 6. Током радног хода горње половине алата прво се врши просецање, затим успоставља сила држања и врши извлачење. Током повратног хода, држач 4 игра улогу избацивача готовог комада.



Сл.6.8 Алат са обједињеним операцијама просецања и извлачења [1]

При поступном вишеоперационом извлачењу из траке, користи се један комбинован алат за усапопне операције који такође има више позиција (за сваку операцију по једну) и кроз који се трака помера за по један корак после сваког хода пресе, док се коначно обрађен део од траке одваја тек у задњој операцији. Тиме се постиже знатно повећање продуктивности и низ других предности за извлачење помоћу више посебних алата. С обзиром на облик траке у тренутку извлачења разликују се:

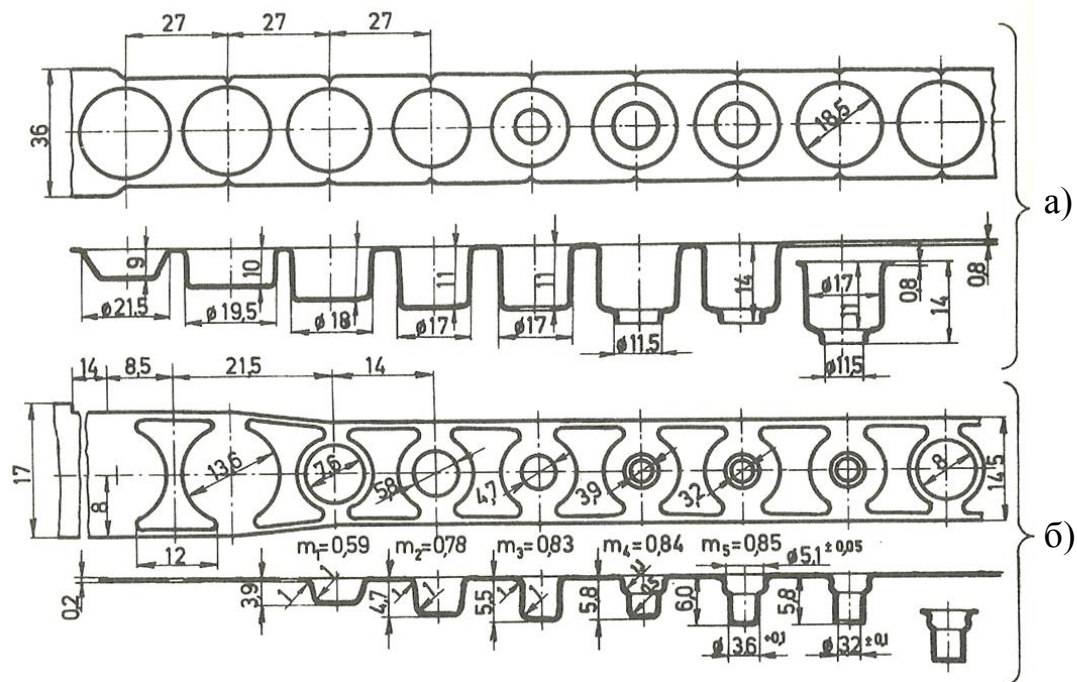
- извлачење из целе (пуне) траке;
- извлачење из траке са прорезима.

Први случај се примењује најчешће при извлачењу мањих цилиндричних тела са релативно малим ободом (у односу на пречник цилиндричног дела) и од нешто дебљег лима. Може се оријентационо сматрати да треба да буде задовољено

$$D < 1,2d ; \quad h < d ; \quad s > 0,5d$$

где је: D - пречник обода; d - пречник цилиндричног дела; h - висина извученог тела; s - дебљина лима.

Очигледно је да су услови при оваквом извлачењу неповољни, јер се јавља врло неравномеран отпор деформисању по обиму тела, чак и онда када се извлаче цилиндрични облици. То директно смањује степен могућег деформисања, а такође доводи и до појаве таласастог облика рубова траке, односно њеног неравномерног сужавања (сл. 6.8а).



Сл. 6.8 Шематски приказ извлачења из траке: а) из пуне траке; б) из траке са прорезима [4]

Извлачење из траке са прорезима примењује се када је ширина обода релативно велика, а дебљина лима мала (тј. када успешно извлачење из пуне траке не би било могуће):

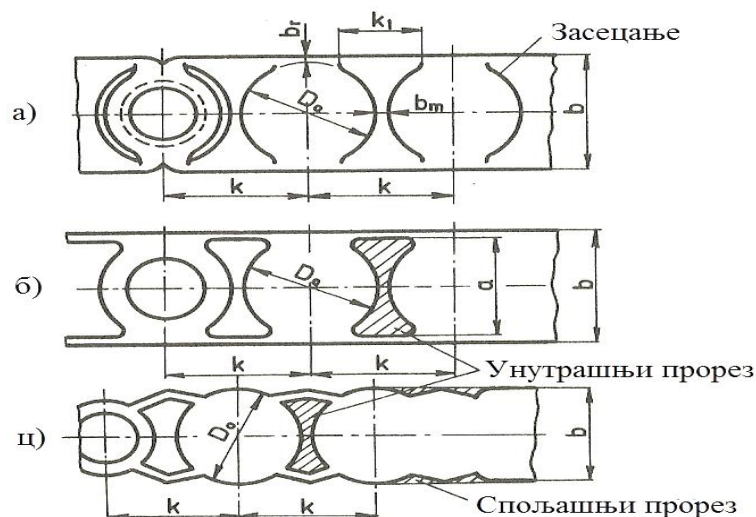
$$D > 1,2d ; \quad s < 0,05d.$$

Са сл. 6.8б се види да се пре извлачења на траци просецају прорези погодног облика, који представљају својеврсно олакшање, односно смањење поменутих неповољних отпора при провлачењу обода у току извлачења. На тај начин је обрадак повезан са траком само преко уских рубова и мостова.

Могуће неисправности на извученим деловима могу наступити углавном услед:

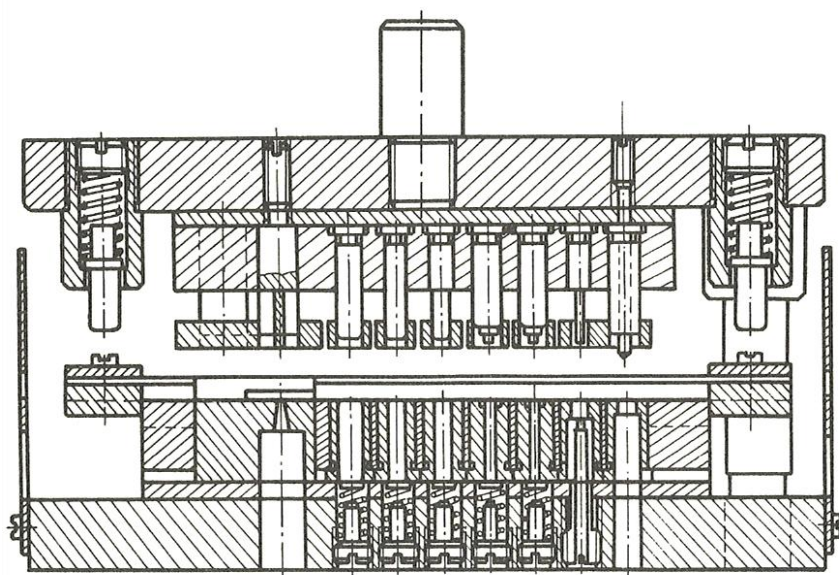
- неквалитетног материјала;
- алата (неоптимално димензионисање, похабаност, оштећења, затезна ребра,...);
- погрешног подешавања и неправилности у раду (подмазивање, нечистоће, граничење,...);
- концепцијских грешака при пројектовању технолошког процеса.

Облици прореза могу бити различити, а најчешћи су приказани на сл. 6.9.



Сл. 6.9 Најчешћи облици прореза на траци: а) унутрашње засецање; б) унутрашњи прорези; ц) унутрашњи и спољашњи прорези [4]

На сл. 6.10 дат је пресек вишеступног алата за извлачење дела према сл. 6.8б.



Сл. 6.10. Вишеступни алат за извлачење дела према сл. 6.8б [4]

Мере за отклањање неисправности предузимају се тек после утврђивања њихових правих узрока. С обзиром на могућу колебљивост различитих утицајних чинилаца у индустријским околностима, као и њихову међусобну зависност, једноремено деловање и сл., изналагање правих узрока насталих тешкоћа, као и степена утицаја појединих чинилаца, често представља врло комплексан и деликатан проблем за чије исправно решавање није довољно само искуство и паушално оцењивање, већ је неопходан високостручни аналитички приступ.

Када је у питању извлачење малог броја делова (мала серија) онда се ради смањења броја операција евентуално може користити и скупљи, односно квалитетнији лим, док у случају обимније производње то најчешће није економски оправдано, па се задржава већи број операција - на рачун квалитета лима.

7. ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ АЛАТА ЗА ДУБОКО ИЗВЛАЧЕЊЕ ЦИЛИНДРИЧНИХ ДЕЛОВА

7.1 ЗАЗОР ИЗМЕЂУ ИЗВЛАКАЧА И ЗИДА МАТРИЦЕ

Потреба за зазором већим од дебљине лима произилази из чињенице да је цилиндрични зид извученог тела најтањи при дну, а најдебљи при врху, достижући често и износ до око $1,25\ s$.

Зазор се може израчунати из:

$$z = s + c - 10\sqrt{s}$$

Коефицијент c се може одредити на основу табеле 7.1.

Табела 7.1 Коефицијент (c) који зависи од врсте материјала

Материјал	c
Челични лим	0,07
Алуминијум	0,02
Остали метали	0,04
Ватросталне легуре	0,2

Другим речима, зазор би требало да буде прилагођен очекиваном задебљању лима.

Да ли ће се зазор остварити на рачун повећања пречника матрице или смањења пречника извлакача, зависи од тога да ли се захтева већа тачност спољне или унутрашње димензије извученог тела.

Ако треба да се добије тачан спољни пречник d_s биће:

$$d_M = d_s ; d_i = d_M - 2z$$

где је: d_M - пречник отвора матрице; d_s - спољни пречник извученог тела; d_i - пречник извлакача.

Ако је значајно да унутрашњи пречник извученог тела (d_u) буде што тачнији, онда је:

$$d_i = d_u ; d_M = d_i + 2z$$

Напомена: при извлачењу геометријски неправилних облика често је потребно да се напред наведене величине зазора коригују на основу резултата практичних проба. Те корекције су најчешће локалне.

Код извлачења кутијастих делова требало би да зазори, у зонама које одговарају правим ивицама, буду различити у односу на оне у угловима. Међутим, обично се за све зоне усвајају јединствени зазори који одговарају угловима (табела 7.1).

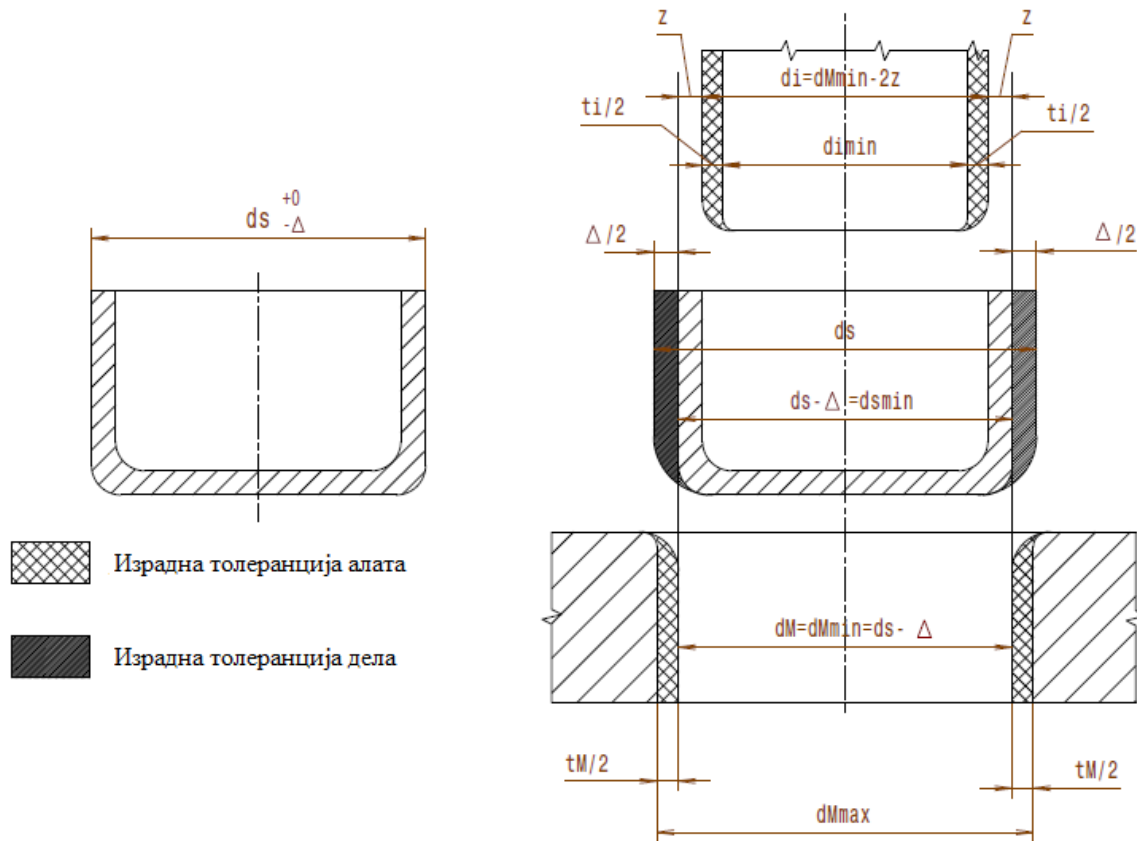
Табела 7.2 - Зазори при извлачењу делова кутијастог облика [4]

Врста извлачења	Зазор (са једне стране)
Прво извлачење	(1,1-1,35) s
Накнадна извлачења	(1,2-1,4) s
Завршно извлачење	(0,9-1,1) s

7.2 ПРЕЧНИЦИ ИЗВЛАКАЧА И МАТРИЦЕ

Потребно је водити рачуна о томе да ли је од примарног значаја унутрашњи или спољашњи пречник извученог тела (тј. да ли је на конструкционом цртежу дела толерисан унутрашњи или спољашњи пречник).

7.2.1 Случај када је толерисан спољашњи пречник



Сл. 7.1 Односи основних димензија алата и толеранцијских поља при извлачењу тела код којег је толерисан спољашњи пречник

Ознаке на сл. 7.1 имају следећа значења:

d_s - називни спољашњи пречник дела који се извлачи;

d_i - називни унутрашњи пречник дела који се извлачи;

d_M - називни пречник матрице;

t_i - изградна толеранција извлакача;

t_M - изградна толеранција матрице;

Δ - изградна толеранција дела који се извлачи;

z - зазор (са једне стране).

Како је толеранција дела $-\Delta$, биће спољашњи пречник: $d_s^{+0/-\Delta}$

Даље ће бити:

$$d_M = d_{min} = d_s - \Delta$$

$$d_i = d_M - 2z = d_s - \Delta - 2z$$

$$d_{M \max} = d_M + t_M = d_s - \Delta + t_M \quad (\text{непосредно после израде, тј. пре хабања})$$

$$d_{i \min} = d_i - t_i = d_s - \Delta - 2z - t_i$$

Табела 7.3 - Израдне толеранције t_M и t_i могу се узети из табеле 44. у зависности од пречника дела и дебљине лима [4]

Називни пречник d	Толеранције t	Дебљина лима, s									
		0,25	0,35	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5
10-50	$+t_M$	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,09	0,11	0,13	0,15
	$-t_i$	0,01	0,02	0,03	0,035	0,04	0,05	0,06	0,07	0,085	0,10
50-200	$+t_M$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	0,12	0,15	0,18
	$-t_i$	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,12
200-500	$+t_M$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17	0,20
	$-t_i$	0,015	0,025	0,035	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,12	0,14

7.2.1.1 Пример случаја када је толерисан спољашњи пречник дела

Одредити димензије извлакача и отвора матрице за извлачење шупљег цилиндричног тела од лима. Спољашњи пречник тела је $d_s = 40 \text{ mm}$, а дебљина лима $s = 2 \text{ mm}$. Израдна толеранција дела износи $\Delta = 0,4 \text{ mm}$.

Називни спољашњи пречник дела је:

$$d_s^{+0}_{-0,4} = 40$$

тј. највећи спољашњи пречник дела износи

$$d_{s \max} = 40 \text{ mm};$$

а најмањи спољашњи пречник дела износи

$$d_{s \min} = 40 - 0,4 = 39,6 \text{ mm}.$$

НАЗИВНИ ПРЕЧНИК МАТРИЦЕ (d_M) добијамо када од називног спољашњег пречника дела (d_s) одузмемо израдну толеранцију дела који се извлачи (Δ):

$$d_M = d_s - \Delta = 40 - 0,4 = 39,6 \text{ mm}.$$

НАЗИВНИ УНУТРАШЊИ ПРЕЧНИК ДЕЛА који се извлачи (d_i) добијамо када од називног пречника матрице (d_M) одузмемо двоструку вредност зазора (z):

$$d_i = d_M - 2z = 39,6 - 2 \cdot 2,31 = 34,98 \text{ mm}.$$

Затим се рачуна зазор за челични лим према табели 7.1.

Зазор је једнак:

$$z = s + c\sqrt{10s} = 2 + 0,07\sqrt{10 \cdot 2} = 2,31 \text{ mm}.$$

Израдне толеранције према табели 7.3 су:

$$t_M = +0,13 ; t_i = -0,085 \text{ па је}$$

Највећа димензија отвора матрице:

$$d_{M \max} = d_M + t_M = 39,6 + 0,13 = 39,73 \text{ mm.}$$

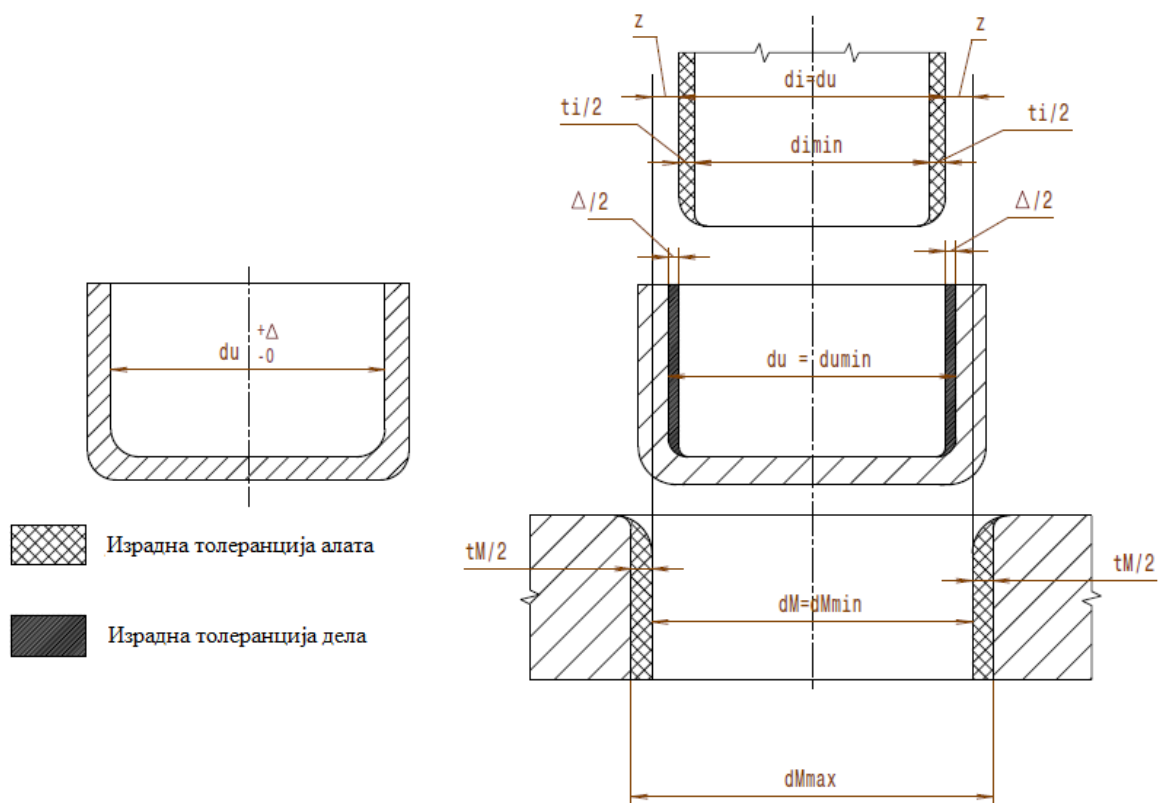
Најмања димензија извлакача

$$d_{i \min} = d_i - t_i = 34,98 - 0,085 = 34,895 \text{ mm.}$$

односно толерисане димензије извлакача и отвора матрице биће:

$$d_i = 34,98^{+0}_{-0,085} \text{ за извлакач ; } d_M = 39,6^{+0,13}_{-0} \text{ за отвор матрице}$$

7.2.2 Случај када је толерисан унутрашњи пречник



Сл. 7.2. Однос основних димензија алата и толеранцијских поља при извлачењу тела код којег је толерисан унутрашњи пречник

Изградна толеранција дела који се извлачи у овом случају је $+Δ$, а његов унутрашњи пречник $d_u^{+Δ}_{-0}$.

Даље је:

$$d_i = d_u$$

$$d_M = d_i + 2z = d_u + 2z$$

$$d_{i \min} = d_i - t_i = d_u - t_i$$

$$d_{M \max} = d_M + t_M$$

7.2.2.1 Пример случаја када је толерисан унутрашњи пречник

Одредити димензије извлакача и отвора матрице за извлачење шупљег цилиндричног тела од лима. Спољашњи пречник тела је $d_s = 40 \text{ mm}$, а дебљина лима $s = 2 \text{ mm}$. Израдна толеранција дела износи $\Delta = 0,4 \text{ mm}$.

НАЗИВНИ УНУТРАШЊИ ПРЕЧНИК ДЕЛА ЈЕ:

$$d_u = d_s - 2s = 40 - 2 \cdot 2 = 36 \text{ mm}$$

тј. највећи унутрашњи пречник дела износи

$$d_{u \max} = 36 + \Delta = 36 + 0,4 = 36,4 \text{ mm}$$

а најмањи унутрашњи пречник дела износи

$$d_{u \min} = 36 \text{ mm}$$

$$d_i = d_u = 36 \text{ mm}.$$

Зазор је једнак:

$$z = s + c\sqrt{10s} = 2 + 0,07\sqrt{10 \cdot 2} = 2,31 \text{ mm. (према табели 7.1)}$$

НАЗИВНИ ПРЕЧНИК МАТРИЦЕ:

$$d_M = d_i + 2z = 36 + 4,62 = 40,62 \text{ mm}.$$

Израдне толеранције према табели 7.3 су:

$$t_M = +0,13 ; t_i = -0,085 \text{ па је}$$

Најмања димензија извлакача

$$d_{i \min} = d_i - t_i = 36 - 0,085 = 35,915 \text{ mm}.$$

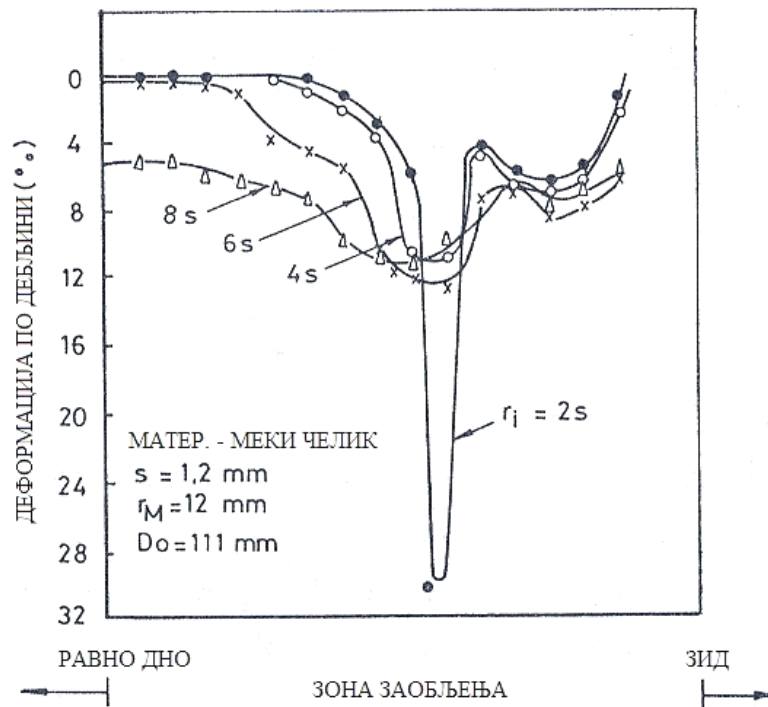
Највећа димензија отвора матрице:

$$d_{M \max} = d_M + t_M = 40,62 + 0,13 = 40,75 \text{ mm}.$$

односно толерисане димензије извлакача и отвора матрице биће:

$$d_i = 36^{+0}_{-0,085} \text{ за извлакач } d_M = 40,62^{+0,13}_{-0} \text{ за отвор матрице}$$

7.3 ПОЛУПРЕЧНИК ЗАОБЉЕЊА ИВИЦЕ ЧЕЛА ИЗВЛАКАЧА r_i КОД ПРВЕ И НАКНАДНИХ ОПЕРАЦИЈА



Сл. 7.3 Утицај r_i на стањење лима [4]

Полупречник r_i може имати изузетно велики утицај на гранични степен извлачења β_g .

Оптималне вредности налазе се у опсегу $4s \leq r_i \leq 10s$. Наиме, при $r_i < 4s$ долази до наглог стањења лима у критичној зони, а при $r_i > 10s$ долази до изражаја јако развлачење у зони заобљења (сл. 163).

Код вишеоперационог извлачења се, међутим, не могу избећи одступања ван ових оквира па се наводи следеће:

за $r_i > s$ практично се може узети:

$$r_{i1} = \frac{d_1 - d_2}{2} ; r_{i2} = \frac{d_2 - d_3}{2} ; \dots$$

Често се код накнадних операција, а нарочито када је пречник извлакача $d > 50 \text{ mm}$, уместо заобљења r_i , користи конусни прелаз ($\text{угао} \approx 45^\circ$) од цилиндричног зида ка дну.

7.4 ПОЛУПРЕЧНИК ЗАОБЉЕЊА ИВИЦЕ МАТРИЦЕ

Велики утицај на процес обликовања има и радијус заобљења ивице матрице. Могу се усвојити следеће препоруке:

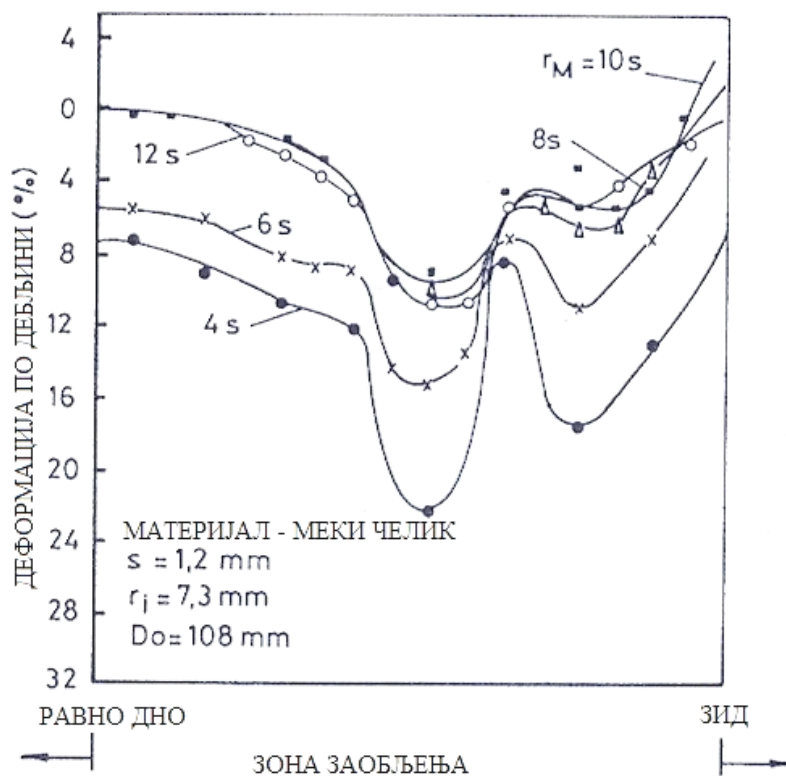
а) За прву операцију [4]:

$$r_M = (6 \div 8)s \text{ при рел. дебљ. } s_r = 2 \div 1\%$$

$$r_M = (8 \div 10)s \text{ при рел. дебљ. } s_r = 1 \div 0,3\%$$

$$r_M = (10 \div 15)s \text{ при рел. дебљ. } s_r = 0,3 \div 0,1\%$$

Практично се често ови износи прилагођавају вредностима за r_i из претходног поглавља.



Сл. 7.4 Утицај r_M на стањење лима [4]

Треба, међутим, овде имати у виду да се већ после смањења r_M испод $4s$ догађа нагло стањење лима (сл. 7.4).

б) За накнадне операције:

Полупречник r_M се постепено смањује од операције до операције и може се узети као

$$r_{Mk} \approx (0.6 \div 0.8) r_{M(k-1)}$$

(овде је k - број посматране накнадне операције).

8. ЗАКЉУЧАК

Дубоко извлачење је доминантан поступак у оквиру обраде танких лимова. Његовом значају посебно доприноси широка примена у неким од најважнијих индустрија као што су: аутомобилска индустрија, авио-индустрија, војна индустрија, индустрија шинских возила, бродоградња, електро и електронска индустрија итд.

Велика примена танких лимова директно утиче и на њихов интензиван развој што изнова актуелизује процену обрадивости и деформабилности. С друге стране, остаје актуелно познавање процеса обликовања, машина и, посебно, алата.

У првом, општем делу овог рада пажња је посвећена технолошким параметрима као што су напони и деформациона сила извлачења за поступке обликовања лима дубоким извлачењем, и детаљно приказан поступак прорачуна технолошких операција неопходних за спровођење целокупног процеса обликовања. На основу добијених резултата може се закључити да дефинисање свих значајних параметара има превасходни значај за односиметричне геометрије, али је значајно и за сложене геометрије код којих се појављује напонско деформационо стање чистог дубоког извлачења које захтева веома повољну деформабилност.

У другом делу рада приказане су најважније машине као и примери алата за дубоко извлачење цилиндричних делова и конкретно су размотрени технолошки параметри алата. Изложен је поступак димензионисања радних елемената алата и на конкретном примеру је приказано димензионисање за случајеве прописаних толеранција спољашњег и унутрашњег пречника радног комада.

Код димензионисања радних елемената алата веома је значајан зазор. На основу одређених вредности зазора извршено је димензионисање алата и то у зависности од тога да ли је потребно извући комад са тачним спољашњим димензијама, односно са тачним унутрашњим димензијама.

Закључује се да сувише мале вредности зазора доводе до кидања комада при дубоком извлачењу, као и повећање потребне силе извлачења док са друге стране већи зазор узрокује тежњу ка набирању лима. Зато би требало да зазор има оптималну величину, према постављеном материјалу, зависно од захтева у односу на радни комад.

Зазор, геометријски параметри алата и правилно димензионисање с обзиром на прописане толеранције директно утичу на завршни квалитет комада.

9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александровић С., Стефановић М.: Технологија пластичног обликовања метала, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2010.
- [2] John A. Waller: Press tools and presswork, Portcullis Press, Bristol, England, 1978.
- [3] Девеџић Б.: Обрада метала деформисањем - други део, Машински факултет у Крагујевцу, 1985.
- [4] Девеџић Б.: Пластичност и обрада метала деформисањем, Научна књига Београд, 1992.
- [5] K. Lange: Handbook of Metal Forming, SME, Dearborn, MI, USA, 1985.