

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије (ТПО)

Број индекса: 236/2012

Татјана П. Гребовић

ТЕХНОЛОГИЈА РОТАЦИОНОГ ИЗВЛАЧЕЊА

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Србислав Александровић, ред. проф.

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Факултет инжењерских наука
Универзитет у Крагујевцу
Модул за производне технологије

Предмет: Производне технологије (ТПО)

Завршни рад

Кандидат: **Гребовић Татјана 236/2012**

Тема: **Технологија ротационог извлачења**

Оквирни садржај завршног рада:

- Увод
- Врсте ротационог извлачења
- Анализа процеса ротационог извлачења
- Пројектовање процеса ротационог извлачења
- Закључак
-

Препоручена основна литература:

1. Александровић С., Стефановић М. : **Технологија пластичног обликовања метала**, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2010. година
2. М. Планчак, Д. Вилотић, В. Вујовић: **Технологија пластичности у машинству 2**, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1992. година
3. Александровић С.: **Производне технологије (Технологија пластичног обликовања метала)**, скрипта, Факултет инжењерских наука, 2011. година
4. *Metal Forming Handbook, Schuler, Springer – Verlag, Berlin – Heidelberg, 1998.*
5. *S. Kalpakjian, S. Schmid: Manufacturing Processes for Engineering Materials, Pearson Education, New Jersey, USA, 2003.*

Крагујевац, 26.09..2017.

ментор:

Септембар, 2017

Др. Србислав Александровић, ред. проф.

Садржај

РЕЗИМЕ	2
1. УВОД	3
1.1. ЗНАЧАЈ И СПЕЦИФИЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЈЕ ПЛАСТИЧНОГ ОБЛИКОВАЊА МЕТАЛА	3
1.2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ПЛАСТИЧНОГ ОБЛИКОВАЊА	3
1.3. РОТАЦИОНО ИЗВЛАЧЕЊЕ	4
2. ВРСТЕ РОТАЦИОНОГ ИЗВЛАЧЕЊА	6
2.1. РОТАЦИОНО ИЗВЛАЧЕЊЕ БЕЗ ПРОМЕНЕ ДЕБЉИНЕ ЗИДА	6
2.2. РОТАЦИОНО ИЗВЛАЧЕЊЕ СА ПРОМЕНОМ ДЕБЉИНЕ ЗИДА	12
3. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА РОТАЦИОНОГ ИЗВЛАЧЕЊА	14
3.1. НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИОНО СТАЊЕ РАДНОГ КОМАДА	14
3.1.1. НАПОНСКО – ДЕФОРМАЦИОНО СТАЊЕ ПРИ РОТАЦИОНОМ ИЗВЛАЧЕЊУ БЕЗ СТАЊЕЊА	14
3.1.2. НАПОНСКО – ДЕФОРМАЦИОНО СТАЊЕ СТАЊЕ ПРИ РОТАЦИОНОМ ИЗВЛАЧЕЊУ СА СТАЊЕЊЕМ	16
3.2. ДЕФОРМАЦИОНА СИЛА	16
3.3. ОДРЕЂИВАЊЕ СИЛА КОД РОТАЦИОНОГ ИЗВЛАЧЕЊА ЦИЛИНДРИЧНИХ ДЕЛОВА БЕЗ СТАЊЕЊА	17
3.4. ОДРЕЂИВАЊЕ СИЛА КОД ИСТОСМЕРНОГ РОТАЦИОНОГ ИЗВЛАЧЕЊА СА СТАЊЕЊЕМ	19
4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПРОЦЕСА РОТАЦИОНОГ ИЗВЛАЧЕЊА	20
4.1. ОБЛИК, ДИМЕНЗИЈЕ И НАЧИН ДОБИЈАЊА ПОЛАЗНОГ КОМАДА	20
4.2. МАТЕРИЈАЛИ	23
4.3. ОБЛИК ГОТОВОГ КОМАДА, ДИМЕНЗИЈЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕ	24
4.4. ТАЧНОСТ И КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ	24
4.5. МЕХАНИЧКЕ ОСОБИНЕ РАДНОГ КОМАДА	25
4.6. БРЗИНА КРЕТАЊА	26
4.7. БРОЈ ФАЗА (ПРОЛАЗА)	27
4.8. ТЕМПЕРАТУРА ОБРАДЕ И ПОДМАЗИВАЊЕ	30
4.9. АЛАТИ И МАШИНЕ	30
5. ПРИМЕРИ МАШИНА (<i>SPINNING MACHINES</i>)	33
6. ОДРЕЂИВАЊЕ ТЕХНОЛОШКИХ ПАРАМЕТАРА ЗА КОНКРЕТАН ПРИМЕР	34
7. ЗАКЉУЧАК	38
8. ЛИТЕРАТУРА	39

Резиме

У првом делу рада изложено је детаљно разматрање о поступцима ротационог извлачења са и без стањења лима. Дате су следеће целине: увод, карактеристике и врсте поступака, анализа процеса обликовања и пројектовање технологије ротационог извлачења са дефинисањем најважнијих технолошких параметара.

У другом делу рада за практичан пример ротационог извлачења без стањења, комада цилиндричне геометрије, извршена је анализа процеса обликовања и дефинисани су технолошки параметри.

На крају су изложена закључна разматрања о теми, и посебно о анализи конкретног примера.

Кључне речи: Формирање лимова, процеси металног предења, технолошки параметри

Summary:

The work consists of two parts. The aim of the first part of the paper is to give a detailed consideration of the metal spinning processes with and without thickness reduction. Presented are the following chapters: introduction, processes methods and characteristics, forming process analysis, spinning technology design and determination of the most significant parameters.

A special practical example is given in the second part of the paper: spinning without reduction of the cylindrical part. It was accomplished analysis of forming process and technological parameters determination.

Conclusion considerations are given at the end, especially about practical example.

Keywords: Sheet metal forming, metal spinning processes, technological parameters

1. Увод

1.1.Значај и специфичности технологије пластичног обликовања метала

Технологија пластичног обликовања метала (ТПО) обухвата технолошке процесе код којих се под дејством довољно великог спољашњег оптерећења остварује пластична деформација, односно трајно мења облик полазног материјала. У самом процесу пластичног обликовања долази до значајних промена, тако да се његова механичка, технолошка и друга својства најчешће разликују од својства које он има пре процеса. Полазни материјал је најчешће полуфабрикат у облику: лимова, плоча, цеви, пуних профила, итд., који се такође добијају примарним процесима пластичног обликовања [1]. Основне особине ТПО су:

- Очување непрекиданости структуре,
- Непроменљивост запремине и побољшање карактеристика чврстоће обликованог материјала.

ТПО се изводи у хладном или топлом стању. При обради у хладном стању материјал ојачава – постижу се повољније механичке особине, као и већа прецизност и квалитетније површине. При обликовању у топлом стању повећана је деформабилност материјала, потребна је мања сила и утрошак енергије за процес деформисања.

Главне предности ТПО су:

- Веома добре механичке карактеристике добијених делова које је могуће користити код најтежих оптерећења и на најодговорнијим местима,
- Релативно једноставна, брза и ефикасна израда делова чак и сложених геометрија и великих димензија,
- Висок степен искоришћења материјала,
- Релативно низак утрошак енергије по јединици масе комада,
- Нижа цена израде по јединици производа,
- Велики број делова могуће је произвести искључиво поступцима ТПО.

Према релевантним подацима око 80% свих металних материјала пре или касније бива обрађено неким од поступака технологије пластичног обликовања. Они налазе готово доминантну примену у металуршким процесима примарне прераде, а такође и веома значајно место у оквиру секундарне обраде металним полуфабрикатима [1, 4].

1.2.Теоријске основе технологије пластичног обликовања

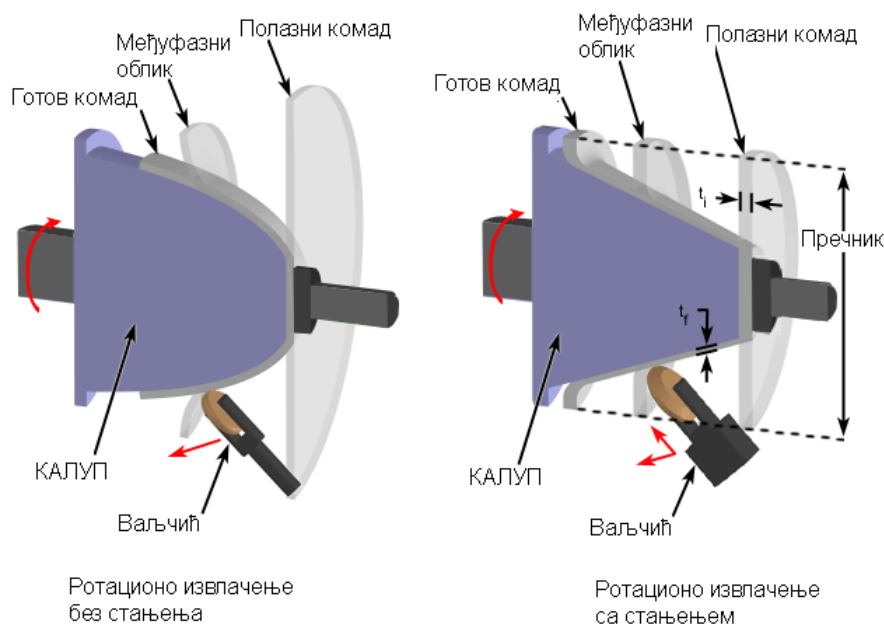
Пластично деформисање метала одвија се под дејством одговарајућег спољашњег оптерећења које изазива унутрашње напоне и трајну помену облика полазног материјала. Укупна деформација је резултат пластичне деформације сваког појединачног кристалног зрна материјала. Те деформације најчешће нису међусобно једнаке, односно њихова расподела по запремини може бити веома различита, што зависи од типа и услова

обликовања. У процесу пластичног обликовања не смеју се прекорачити вредности граничних износа деформација, јер се у противном разара структура материјала или појављују други неприхватљиви дефекти. Такође, не смеју се прекорачити интензитети контактних напона јер може доћи до преоптерећења комада и алата. Због тога се за сваки поступак у оквиру ТПО изводи прорачун компоненти напона и деформације, а затим прорачун деформационих сила и радова. Током пластичног деформисања материјал мења своју структуру, што за последицу има промену својства материјала [1, 4].

1.3. Ротационо извлачење

Ротационо извлачење је обрада пластичним обликовањем којом се добијају шупљи ротационо симетрични делови различитих облика и димензија. Ротационо извлачење представља завршну обраду. Технологија ротационог извлачења спада у ред технологија са парцијалним захватом. Течење материјала ограничено је на врло уску област тренутног деловања алата на материјал. У процесу се јављају релативно мале силе због парцијалног захвата алата. Значајна предност овог поступка је и то што облик алата није директно условљен обликом готовог дела. Сама обрада реализује се сложеним релативним кретањима елемента алата и радног комада, што је чини веома флексибилном [1, 4].

Процес се изводи на специјалним машинама које су по врстама кретања врло сличне струговима. Ротационо извлачење може се изводити у комбинацији са другим поступцима пластичног обликовања метала, врло успешно се комбинује са дубоким извлачењем. Област примене ове технологије са аспекта величине серије су малосеријска и средње серијска производња, па у оваквим условима ротационо извлачење даје најбоље ефекте.

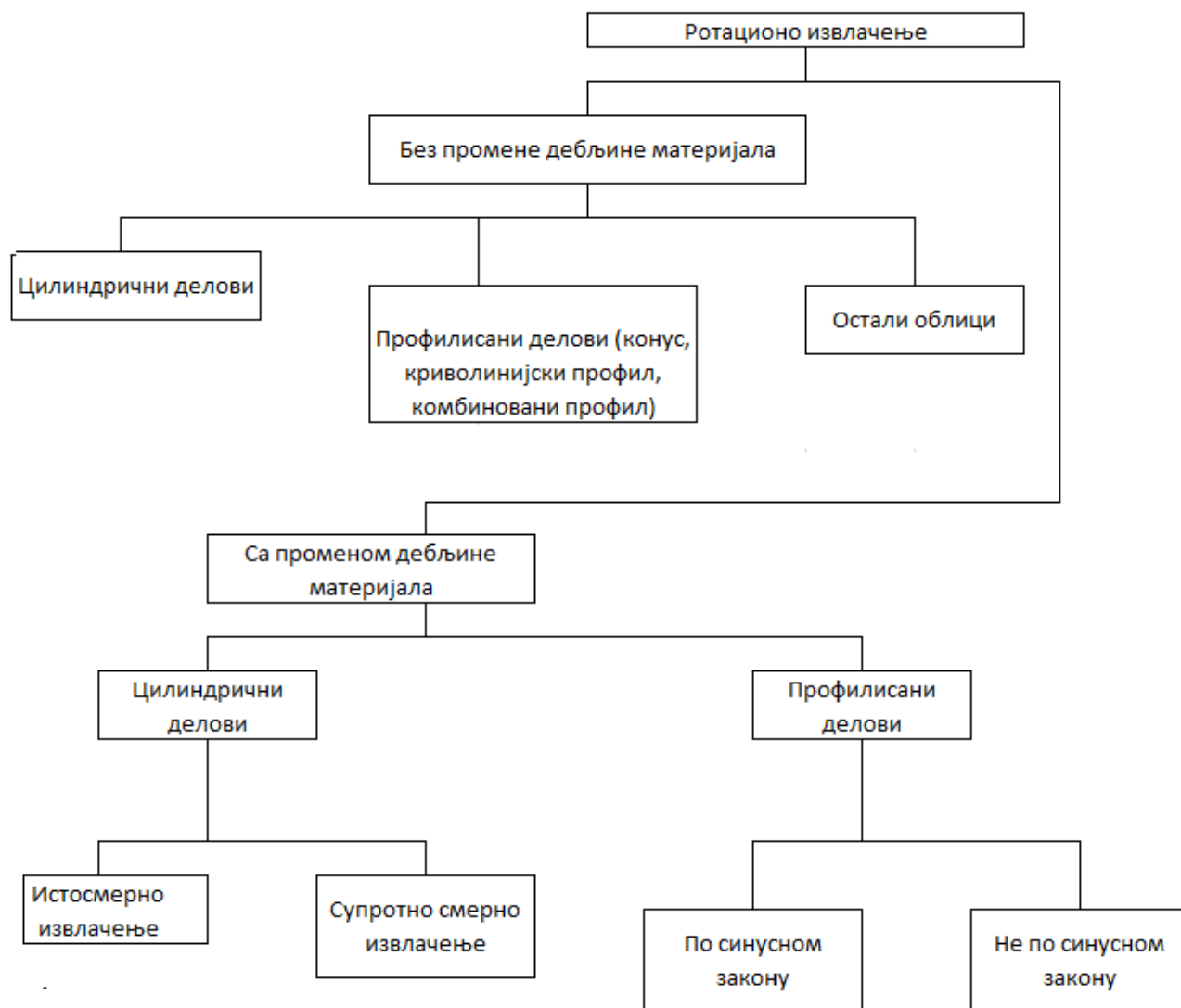


Слика 1. Примери ротационог извлачења [3]

Технологија ротационог извлачења

Ротационо извлачење се најчешће изводи хладно. Само у неким изузетним случајевима може се полазни комад пре обраде довести на повишену температуру. Ова обрада примењивана је још код страих Египћана, па се слободно може рећи да поред ковања представља једну од најстаријих обрада пластичним обликовањем. Али, све до педесетих година овог века ротационо извлачење је било на нивоу занатске производње. Након одређеног времена почиње бржи развој и све шира примена ове технологије у индустријској производњи.

Значајан корак у развоју и примени ове технологије дали су *NC* и *CNC* управљачки концепти који су на машинама за ротационо извлачење веома успешно примењени. Технологија ротационог извлачења компатибилна је и са најновијим трендовима развоја у оквиру производних технологија – роботиком и флексибилним обрадним системима.



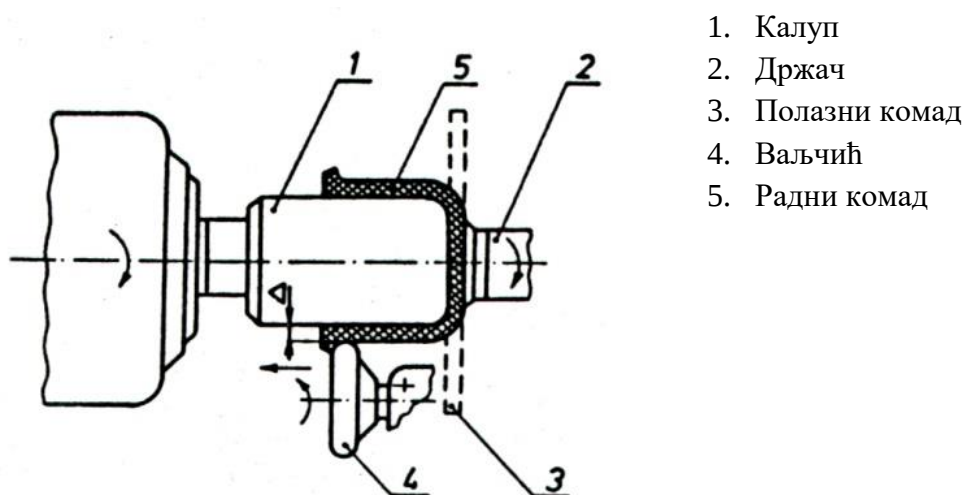
Слика 2. Подела ротационог извлачења [4]

2. Врсте ротационог извлачења

Поделу ротационог извлачења могуће је извести на различите начине, већ у зависности од усвојеног критеријума поделе. Најчешће се подела врши према геометријском облику радног комада и начина његовог добијања. Подела према том критеријуму дата је на сл. 2.

2.1. Ротационо извлачење без промене дебљине зида

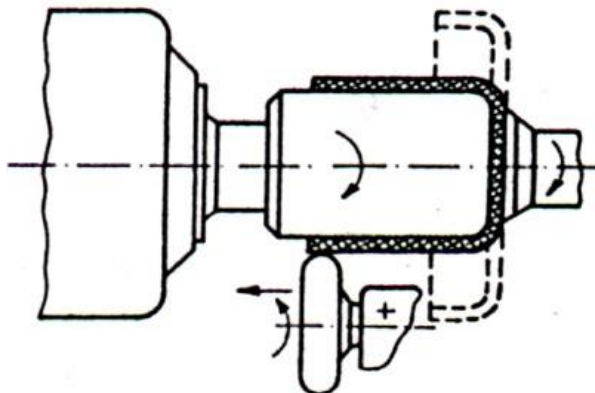
Основна карактеристика ове врсте извлачења је да се дебљина лима у току процеса не мења. Полазни комад је раван лим, најчешће кружног облика која се поставља на чело калупа, слика 3.



Слика 3. Ротационо извлачење цилиндричних облика без промене дебљине зида [4]

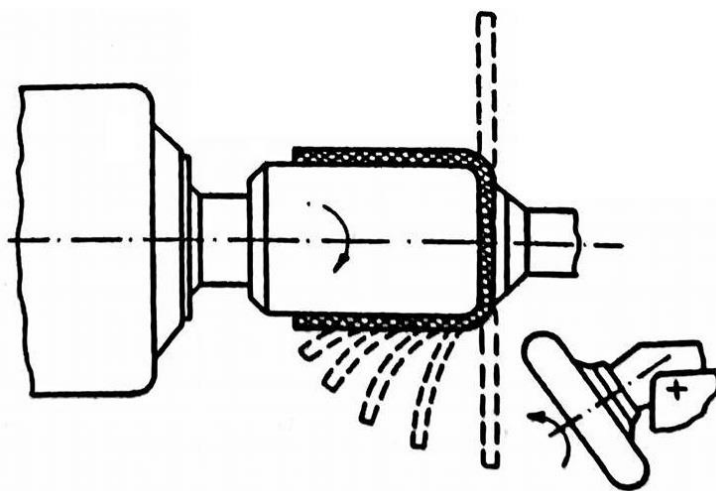
Полазни комад се преко држача (2) притиска на калуп. Главно кретање (обртање) врши полазни комад који се обрће заједно са калупом и држачем. Помоћно кретање врши алат у виду ваљчића (4) који је улежиштен у носач и може да изводи кретање у Х и У правцу истовремено се окрећући око своје осе. Ваљчић притискује лим који се обрће око главне осе машине, доводећи га при томе на облик калупа [4].

Ако није могуће добити крајњи цилиндрични облик из једне операције, то се врши у више операција. Полазни комад за наредну операцију је радни комад из претходне операције, слика 4.



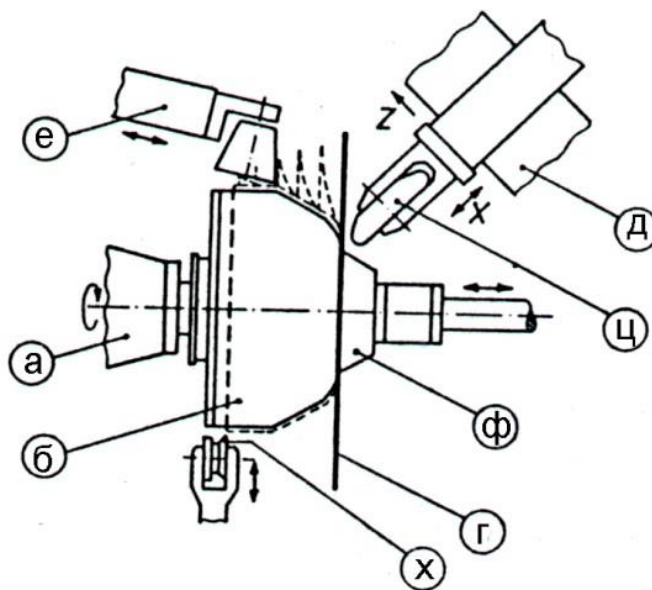
Слика 4. *Добијање кајњег цилиндричног облика из више операција*

Код већих степена деформације ротационо извлачење се изводи у неколико фаза. Алат у свакој фази деформише лимени полазни комад за одређену величину, како је то приказано на слици 5. Број потребних фаза зависи од геометрије процеса и врсте материјала.



Слика 5. *Ротационо извлачење цилиндричних облика по фазама*

Делови чија контура није цилиндрична него неког другог облика (конус, криволинијски облик, комбинован облик) добијају се на сличан начин као и цилиндрични делови. Полазни комад је и у овом случају сличан, и он се преко држача притискује на калуп. Калуп има облик који одговара завршном облику комада са слике 6. Деловањем алата на полазни комад врши се обликовање лима [4].



Слика 6. Ротационо извлачење профилисаних делова

Објашњење слике:

а - главно вретено

б - калуп

ц - ваљак

д - носач ваљка

е - држач комада

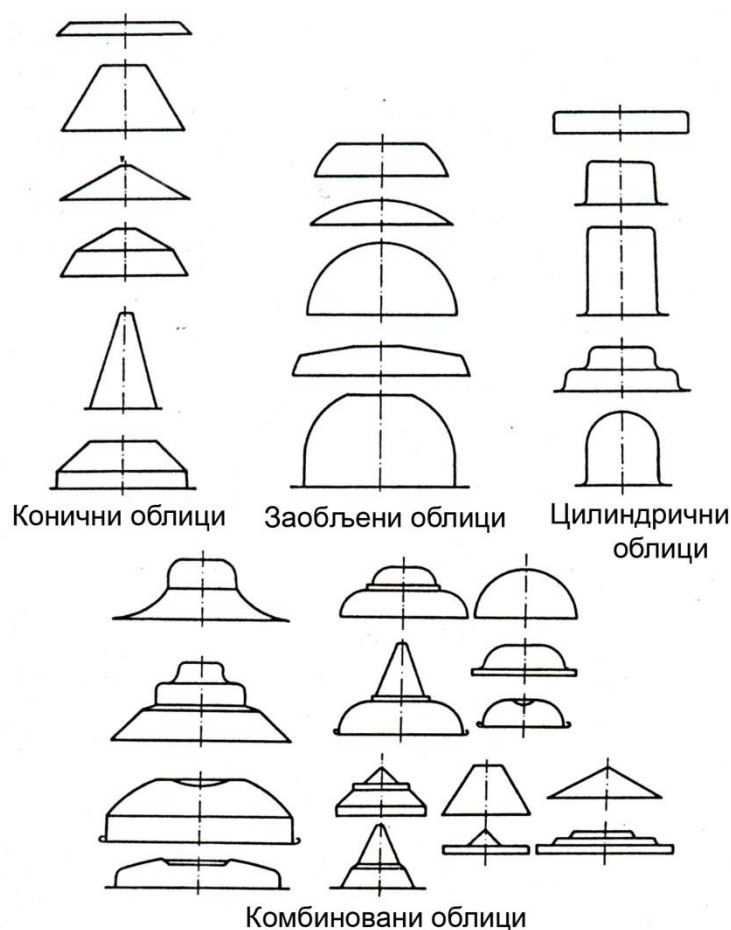
ф - држач

г - полазни комад

х - нож за одсецање ивице

Код нецилиндричних облика деформисање се врши најчешће у неколико фаза. Након процеса извлачења, као завршна фаза комплетне операције може се извршити одсецање ивица (врхова) радног комада, и то док се он налази још на калупу. То се врши посебним алатом – ножем (слика 6.х.). Комбинацијом параметара појединих фаза, затим бројем обрта главног кретања као и величине помака алата, могуће је на овај начин добити различите облике радних комада. На сл. 7 приказане су различите геометрије радних комада.

На слици 8. приказана је израда једног конкавног елемента који се добија из равне полазног комада. У овом случају конфигурација калупа, држача и алата је нешто другачија него што је то случај код претходно описаних примера, али је суштина процеса иста: деловањем алата на полазни комад који се обрће, добија се део чији је облик идентичан облику калупа. Овим начином добијају се дна резервоара и слични елементи.

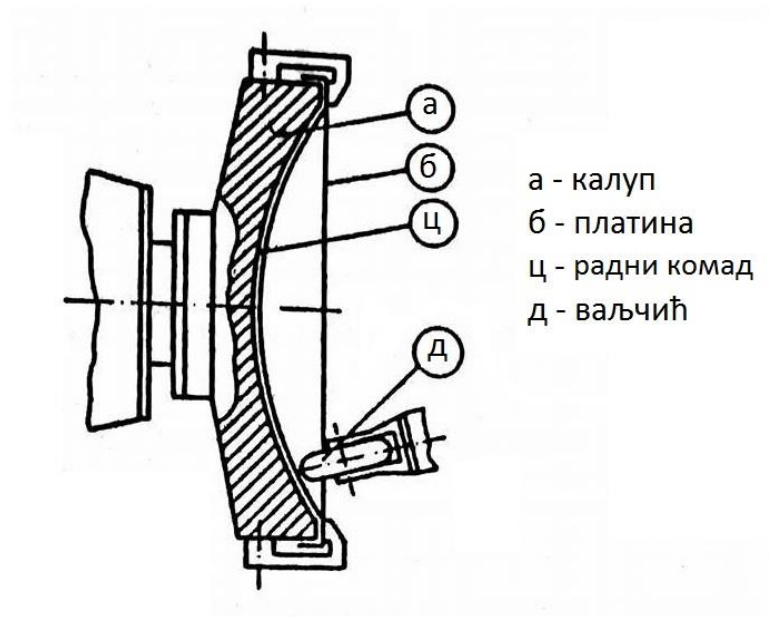


Слика 7. *Различити облици радних комада добијени извлачењем без промене дебљине зида*

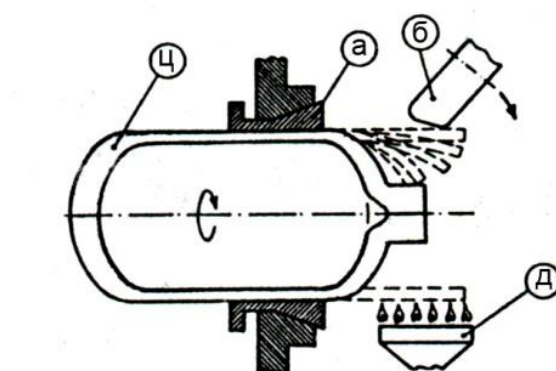
Ротационим извлачењем без промене дебљине зида могу да се врше и операције сужавања (слика 9.), при чему се полазни пречник једног дела цилиндричног радног комада редукује. На слици је приказано сужавање једне посуде од високолегираног челика, при чему се пре и за време обраде врши локално загревање.

На слици 10. приказан је пример унутрашње обраде проширивањем. Израда сложених ребрастих облика дата је на слици 11. То је поступак формирања навоја на танкозидним цевима, као што су сијалична грла итд.

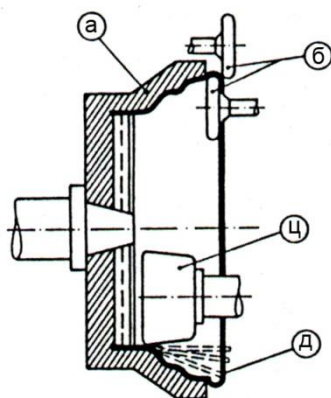
На слици 12. приказан је поступак спајања (тзв. пертловања) дна или поклопца судова типа бурета. Овакав тип процеса налази велику примену.



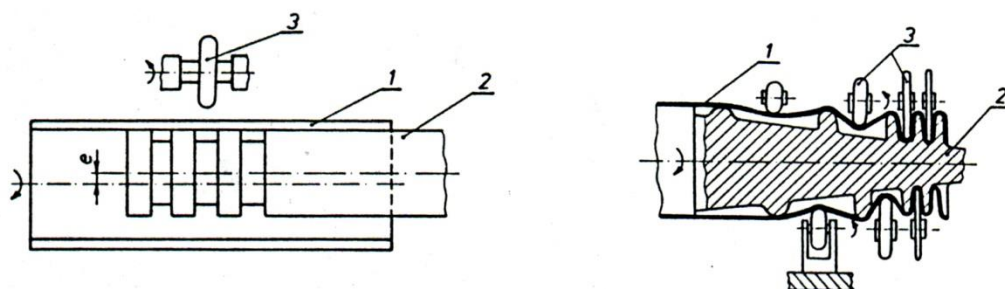
Слика 8. Израда дна резервоара извлачењем



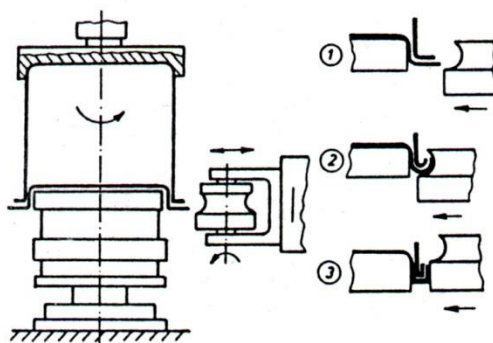
Слика 9. Процес сужавања ротационим извлачењем (а – држач, б – ваљчић, ц – посуда, д – грејач)



Слика 10. Проширивање извлачењем (а – калуп, б – ваљчићи, ц – ваљак, д – радни комад)



Слика 11. Различите могућности израде цеви са ребрима



Слика 12. Спајање

2.2.Ротационо извлачење са променом дебљине зида

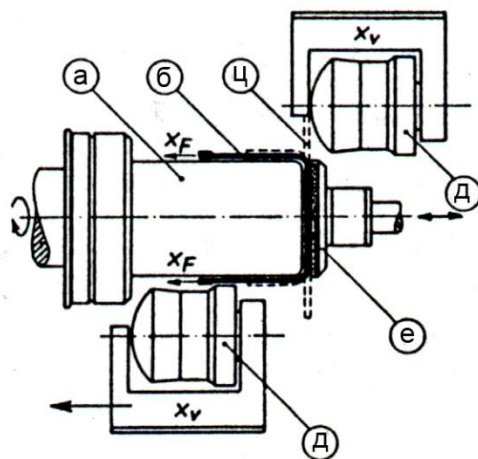
Овај вид ротационог извлачења разликује се од претходно описаног по томе што се за време процеса поред обликовања дела према калупу врши и смањење дебљине зида. Ова обрада се сврстава у групу поступка запреминског обликовања. И овде се подела врши према геометрији радног комада и начина извођења процеса (Слика 2.). Ротационо извлачење са променом дебљине зида цилиндричних делова могуће је извести на два начина:

- истосмерно ротационо извлачење,
- супротносмерно ротационо извлачење.

Код истосмерног извлачења смер помоћног кретања (кретање алата у уздужном правцу) индентичан је смеру кретања материјала који се деформише. Полуфабрикат за овај случај обраде може бити:

- полазни комад од равног лима,
- полазни комад у виду чанчета добијен дубоким извлачењем или ротационим извлачењем,
- полазни комад добијен хладним истискивањем, ковањем или стругањем,
- цев.

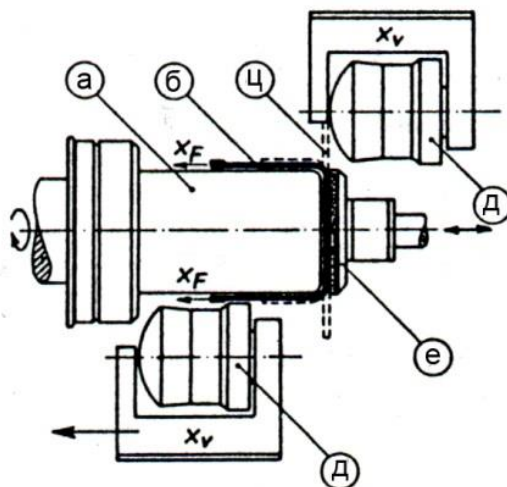
На слици 12. приказан је процес истосмерног ротационог извлачења са променом дебљине зида и то за случај да је полуфабрикат претходно извучено чанче (Слика 13.) [4].



Слика 12. Истовремено ротационо извлачење са променом дебљине зида[4]

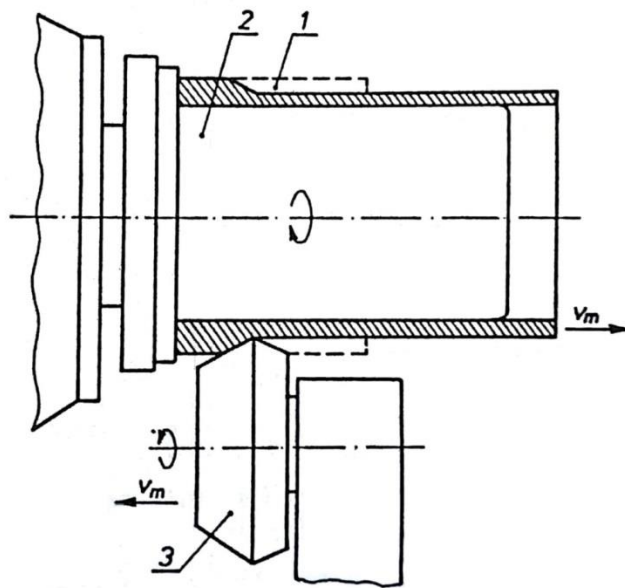
Извучено чанче се стеже помоћу држача (е) на калуп (а). Главно кретање је обртно кретање калупа заједно са чанчетом и држачем. Алат (д) врши транслаторно кретање обрћући се при томе око своје осе. Својим предњим делом алат прво деформише полазни комад у цилиндричном чанчету и већ у тој фази настаје редукција дебљине зида чанчета за 30-40%. Крајња редукција дебљине постиже се деловањем задњег дела ваљка на материјал. Аксијалне брзине кретања алата и материјала који се деформише нису исте. Алат се брже креће у аксијалном правцу од материјала, а релативна брзина зависи од степена деформације [4].

Ротационо извлачење са променом дебљине зида у случају да је примерак у облику чанчета приказано је на сл. 13. Чанче (б) се навлачи на калуп (а) и притискује држачем (е). Сва ова три елемента (б, а, е) врше главно обртно кретање док се редукција дебљине зида врши помоћу ваљчића који се креће у аксијалном правцу.



Слика 13. Истовремено ротационо извлачење са променом дебљине зида

Код супротно смерног ротационог извлачења са променом дебљине зида материјал тече у смеру супротном од смера кретања алата. Полазни комад се поставља на калуп и то тако да се својом чеоном страном ослања на чеони граничник на глави машине. Ваљци се крећу у назначеном смеру (слика 14.) а материјал тече у смеру супротном од кретања ваљака.



Слика 14. *Супротно – смерно ротационо извлачење са стањењем*

Код ове врсте извлачења готов комад може бити знатно дужи од самог калупа на који се поставља полуфабрикат. Та дужина може бити и до 6 метара. Поред цилиндричних геометријских облика овим видом могуће је обрађивати и коничне делове.

3. Анализа процеса ротационог извлачења

3.1.Напонско-деформационо стање радног комада

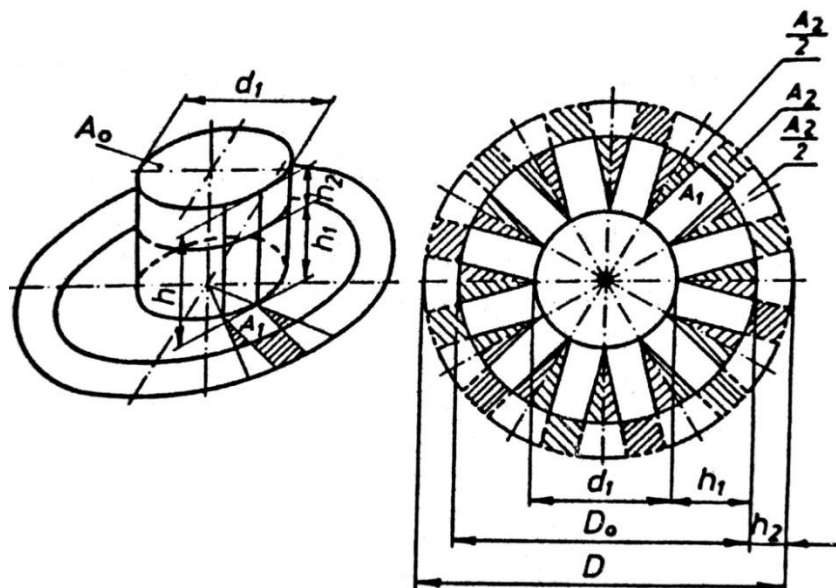
Постоје различите врсте процеса ротационог извлачења са становишта врсте полуфабриката, геометрије радног комада као и самог извођења процеса. Деформационо и напонско стање за сваки од наведених видова извлачења у већој или мањој мери је различито. Ипак, са становишта проучавања напонско – деформационог стања може се условно направити подела на:

- ротационо извлачење без смањења дебљине зида и
- са смањењем дебљине зида.

3.1.1.Напонско – деформационо стање при ротационом извлачењу без стањења

Као пример за ротационо извлачење без редукције дебљине зида посматраће се добијање цилиндричног радног комада са дном из равног полуфабриката. При анализи деформација које се одвијају за време превођења плочастог полуфабриката у цилиндрични радни комад са дном, може се уочити аналогија између ротационог извлачења и класичног дубоког извлачења без промене дебљине зида [4, 5].

Посматрајући плочасти полуфабрикат пречника D_0 (слика 15.) и узимајући у обзир чињеницу да се површина дна цилиндра (A_0) не деформише, закључује се да се равни прстен $D_0 - d_1$ преводи у цилиндричну површину радног комада висине „ h “. Са слике је уочљиво да се при томе троугласте површине $2 \times \frac{A_2}{2}$ премештају и постају правоугаоници висине „ h_2 “.



Слика 15. Превођење равног полазног комада у цилиндрични радни комад са дном[4, 5]

Укупна крајња висина цилиндричног радног комада састоји се два дела:

$$h = h_1 + h_2 \quad (1)$$

При томе је висина „ h_1 “ формирана од површина A_{1i} , а висина „ h_2 “ од површине.

У току обраде неопходно је обезбедити такво напонско стање које доводи до описаног механизма деформисања тј. премештања честица материјала.

Аналитички израз за величину логаритамске деформације за овај случај извлачења гласи:

$$\varphi = \ln \frac{d_{i-1}}{d_i} \quad (2)$$

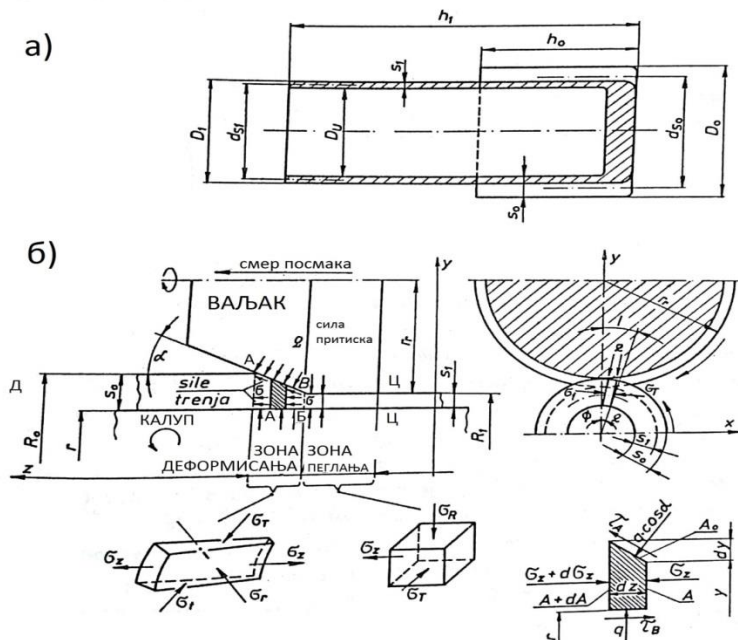
d_{i-1} – пречник у претходној операцији

d_i – пречник у наредној операцији

Ако се готов комад добија у само једној операцији ротационог извлачења онда је $d_{i-1} = D_0$, а „ d_i “ је пречник готовог комада.

3.1.2. Напонско – деформационо стање стање при ротационом извлачењу са стањењем

Анализа напонско – деформационог стања при ротационом извлачењу са редукцијом дебљине зида спровешће се на примеру истосмерног ротационог извлачења. Код овог вида обраде почетна дебљина зида (s_0) редује се у току извођења процеса на вредност s_1 . Због ове редукције смањује се и спољашњи пречник са D_0 на D_1 , а истовремено се повећава висина радног комада са h_0 на h_1 (слика 16.а.).



Слика 16. Зона деформисања и напонско деформациони односи код ротационог извлачења са редукцијом дебљине зида[4, 5]

Приказ напонског стања изведен је помоћу методе пресека.

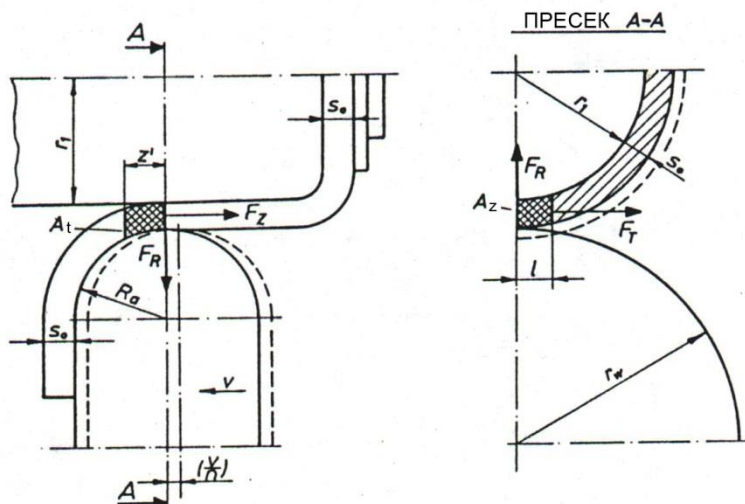
На слици 16.б. приказана је конфигурација елемената процеса: радног ваљка, калупа и радног комада коме се редукује дебљина зида. Уочава се да ваљак делује на материјал са две различите површине: нагнутом (А-Б) и површином паралелном изводници радног комада (Б-Ц). Први ваљак врши деформисање, а други пеглање (глачање) претходно деформисане зоне.

3.2. Деформациона сила

Просторни вектор силе, која се појављује код ротационог извлачења, могуће је разложити на три компоненте (слика 17.):

- аксијалну F_z
- радијалну F_R

- обимну или тангенцијалну F_T



Слика 17. Компоненталне силе

Компоненте сила одређују се на основу напонског стања које влада у зони деформисања.

3.3. Одређивање сила код ротационог извлачења цилиндричних делова без стањења

Компоненте деформационе силе одређују се као производ између одговарајуће компоненте напона и пројекције површине деловања алата на материјал у посматраном правцу.

Аксијална компонента укупне силе износи:

$$F_{z_{max}} = A_z \cdot \sigma_{z_{max}} \quad (3)$$

Површина „ A_z “ се може дефинисати као:

$$A_z = 2 \cdot l \cdot s_0 = 2 \cdot s_0 \cdot \sqrt{d_w \cdot \left(\frac{V}{n}\right)} \quad (4)$$

Коначни израз за аксијалну силу је:

$$F_z = 2 \cdot s_0 \cdot k_{sr} \cdot \left(1,1 \cdot \ln \frac{R_0}{r_1} + \frac{s_0}{2 \cdot r_w + s_0}\right) \cdot (1 + \mu \cdot \alpha) \cdot \sqrt{d_w \cdot \left(\frac{V}{n}\right)} \quad (5)$$

Деформациони отпор (ефективни напон):

$$K_{sr} = \sigma_{esr} = \frac{K_0 + K_1}{2} \quad (6)$$

Где је:

$$K_1 = f(\varphi_1)$$

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_0}{d_1}$$

$$K_0 = R_p$$

На исти начин одређују се и остале две компоненте силе:

$$F_R = A_R \cdot \sigma_R \quad (7)$$

$$A_R = 2 \cdot \left(\frac{V}{n}\right) \cdot \sqrt{d_w \cdot \left(\frac{V}{n}\right)} \quad (8)$$

Коначни израз за радијалну силу је:

$$F_R = 2,3 \cdot K_{sr} \cdot \left(\frac{V}{n}\right) \cdot \sqrt{d_w \cdot \left(\frac{V}{n}\right)}, [N] \quad (9)$$

Тангенцијална компонента силе добија се као:

$$F_T = A_T \cdot \sigma_T \quad (10)$$

$$A_T = \frac{1}{2} \cdot s_0 \cdot \sqrt{2 \cdot r_w \cdot \left(\frac{V}{n}\right)}, (mm^2) \quad (11)$$

Коначни израз за обимну силу је:

$$F_T = 0.29 \cdot K_{sr} \cdot s_0 \cdot \sqrt{2 \cdot r_w \cdot \left(\frac{V}{n}\right)}, [N] \quad (12)$$

При томе су:

$d_w (mm)$ – пречник алата (ваљчића)

$\frac{V}{n} (mm)$ – помак по обрту

$s_0 (mm)$ – дебљина материјала

R_0 (mm) – полупречник полазног комада

R_0 – полупречник полазног комада (развијено стање)

r_1 – полупречник комада

α – угао извлачења

3.4. Одређивање сила код истосмерног ротационог извлачења са стањењем

Као и код извлачења без промене дебљине зида и за овај вид извлачења компоненталне силе одређују се као производ компоненте напона и пројекције површине контакта алата и материјала за дати правац.

Пројекција површине у z-правцу је:

$$A_z = \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_w}{d_1 + d_w}} \cdot \left(\frac{V}{n}\right) \cdot s_1 \quad (13)$$

(ознаке видети на сл. 16.)

$$A_T = \frac{1}{2} \cdot (s_0 + s_1) \cdot r_w \cdot \sin \alpha_R \quad (14)$$

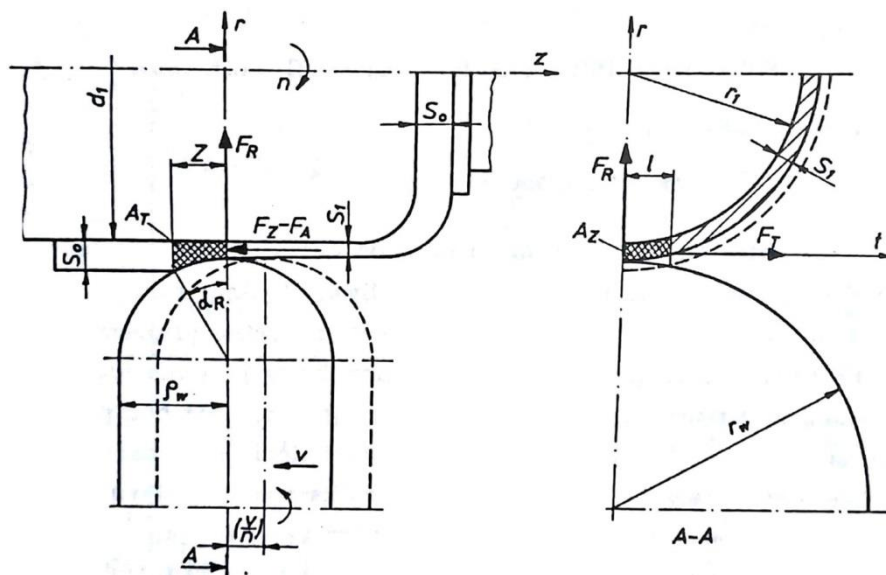
$$F_z = 2 \cdot s_0 \cdot k_{sr} \cdot \left(1,1 \cdot \ln \frac{R_0}{r_1} + \frac{s_0}{2 \cdot r_w + s_0}\right) \cdot (1 + \mu \cdot \alpha) \cdot \sqrt{d_w \cdot \left(\frac{V}{n}\right)} \quad (15)$$

Остале две површине су дате изразима:

$$A_R = r_w \cdot \sin \alpha_r \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_w}{d_1 + d_w}} \cdot \left(\frac{V}{n}\right) \cdot \tan \frac{\alpha_R}{2} \quad (16)$$

Где је:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \text{угао извлачења}$$



Слика 18. Компоненте деформационесиле

Компонента силе у аксијалном правцу износи:

$$F_z = 2 \cdot s_0 \cdot K_{sr} \cdot \left(1,1 \cdot \ln \frac{R_0}{r_1} + \frac{s_0}{2 \cdot r_w + s_0} \right) \cdot (1 + \mu \cdot \alpha) \cdot \sqrt{d_w \cdot \left(\frac{v}{n} \right)}, [N] \quad (17)$$

Компонента силе у радијалном правцу износи:

$$F_R = 2,3 \cdot K_{sr} \cdot \left(\frac{v}{n} \right) \cdot \sqrt{d_w \cdot \left(\frac{v}{n} \right)}, [N] \quad (18)$$

Компонента силе у тангенцијалном правцу износи:

$$F_T = 0,29 \cdot K_{sr} \cdot S_0 \cdot \sqrt{2 \cdot r_w \cdot \left(\frac{v}{n} \right)}, [N] \quad (19)$$

4. Пројектовање процеса ротационог извлачења

4.1. Облик, димензије и начин добијања полазног комада

За ротационо извлачење без редукције дебљине зида као полазни комад се најчешће примењује раван комад од лима кружног облика. Пречник полазног комад зависи од облика готовог комада, а одређује се из једнакости површине полазног комада и радног комада. Поступак одређивања пречника полазног комада је потпуно идентичан са оним који се примењује у класичном поступку дубоког извлачења цилиндричних комада без промене дебљине зида.

Технологија ротационог извлачења

У табели 1. дати су карактеристични облици радних комада као и одговарајући изрази за израчунавање пречника полазног комада. Равни полазни комад добија се из табле или траке лима операцијом раздвајања.

Као полазни комад за ротационо извлачење са и без редукције дебљине зида може се користити и облик добијен у претходној операцији дубоког извлачења.

Табела 1. Карактеристични облици радних комада и изрази за пречник полазног комада

Облик	Пречник разв. ст.	Облик	Пречник разв. стања
	$\sqrt{d^2 + 4dh}$		$\sqrt{d^2 + 4h^2}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4d_1h}$		$\sqrt{d_2^2 + 4h^2}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4(d_1h_1 + d_2h_2)}$		$\sqrt{d_2^2 + 4(h_1^2 + d_1h_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4d_1h + 2f(d_1 + d_2)}$		$\sqrt{d_1^2 + 4[h_1^2 + d_1h_2 + 0.5f(d_1 + d_2)]}$
	$1.41d$		$\sqrt{d_1^2 + 2l(d_1 + d_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$		$\sqrt{d_1^2 + 2l(d_1 + d_2) + d_3^2 - d_2^2}$
	$1.41\sqrt{d_1^2 + f(d_1 + d_2)}$		$\sqrt{d_1^2 + 2\pi d_1 + 8r^2}$
	$1.41\sqrt{d^2 + 2dh}$		$\sqrt{d_1^2 + 2\pi d_1 + 8r^2 + d_3^2 - d_2^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4d_1h}$		$\sqrt{d_1^2 + 2\pi d_1 + 8r^2 + 4d_2h + d_3^2 - d_2^2}$
	$1.41\sqrt{d_1^2 + 2d_1h + f(d_1 + d_2)}$		$\sqrt{d_1^2 + 2\pi d_1 + 8r^2 + 4d_2h + 2f(d_1 + d_2)}$

Технологија ротационог извлачења

Максимална дебљина лима који се може обрађивати ротационим извлачењем различита је за различите материјале. Постоје случајеви ротационог извлачења лима дебљине и до 150 *mm*, али то су само екстремни случајеви. Најчешће дебљине лимова су дате у табели 2.

Табела 2. Дебљине лимова за извлачење[4]

Материјал	Максимална дебљина
Алуминијум	до 10 <i>mm</i>
Цинк и бакар	до 8 <i>mm</i>
Челични лим	до 6 <i>mm</i>
Лим од нерђајућег челика	до 4 <i>mm</i>

Полазни комад за ротационо извлачење са редукцијом дебљине зида такође је најчешће равни лимени полазни комад.

Поред тога, за ову врсту извлачења полазни комад може бити добијен и хладним извлачењем или ковањем. У оваквим случајевима, пре саме обраде извлачењем, врши се обрада резањем при чему се унутрашњи пречник полуфабриката доводи на димензију калупа на који се поставља пре операције извлачења.

У неким случајевима полуфабрикат се може добити чак и стругањем или бушењем из пуног материјала. Због великог отпада материјала овај вид добијања полуфабриката се користи само у појединачној или малосеријској производњи, и то изузетно.

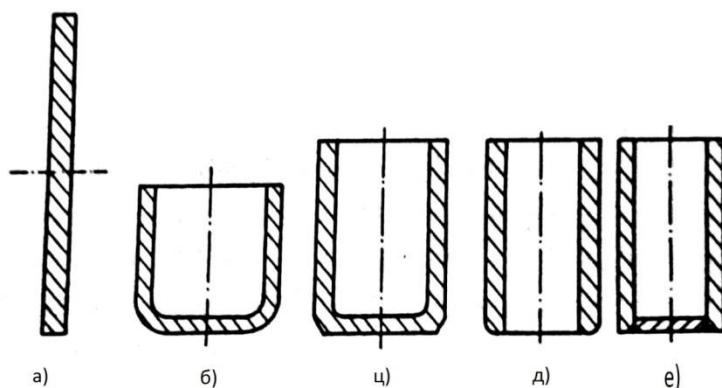
Ако се као полуфабрикат користи цев онда се код истосмерног извлачења, због начина извођења самог процеса, мора на цев заварити пуно или прстенасто дно. У пракси се примењује полазни комад и до пречника 7000 *mm*.

Код супротно смерног извлачења са променом дебљине зида као полазни комад се најчешће користи цев.

На слици 19. приказани су неки облици полазних комада за ротационо извлачење са променом дебљине зида:

- а) раван полазни комад (лим),
- б) чанче добијено дубоким извлачењем или ротационим извлачењем без промене дебљине зида,
- ц) полазни комад добијен ковањем или истискивањем са накнадном обрадом стругањем,
- д) цев без дна за супротносмерно ротационо извлачење,

е) цев са завареним дном која служи за ослањање на калуп код истосмерног извлачења.



Слика 19. Облици полазних комада за ротационо извлачење са променом дебљине зида

4.2. Материјали

Све врсте металних материјала које је могуће обрађивати ротационим извлачењем деле се у неколико група:

- лаки метали и легуре,
- челици са негарантованим саставом,
- угљенични челици,
- легирани челици,
- племенити метали.

Од лаких метала највише се примењују *Al*, *Cu* и њихове легуре. Материјали из ове групе су веома погодни за обраду извлачењем.

Веома широк спектар производа израђује се од челика са негарантованим саставом [Č0147(DC03), Č0148 (DC04), Č0361 (S235), Č0645 (E335)]. Да би се угљенични челици за побољшање [Č1130 (C22), Č1530 (C45)] могли успешно обрађивати ротационим извлачењем, неопходно је да се пре обраде изврши њихова нормализација.

Из широке групе легираних челика за ову врсту обраде посебно су погодни челици из групе *Cr*, *Mo* за побољшавање [Č4730 (25CrMo4) до Č4739 (34CrAlMo6)] и челици из групе *Cr*, *Ni*, *Mo* [Č5430 (36CrNiMo4), Č5432 (30CrNiMo8)]. Ови материјали користе се за израду одговарајућих делова у машинским склоповима, наоружању и слично. За делове летелица (авиона, ракета и сл.) као и за веома одговорне делове у процесној индустрији користе се титанове, волфрамове и цирконијумове легуре. Због мање деформабилности ових материјала, њихова обрада се врши на повишеној температури.

Племенити метали (сребро, злато, платина) користе се у изради накита, делова намештаја и за израду медицинских инструмената.

4.3. Облик готовог комада, димензије и области примене

Ротационим извлачењем могуће је добити радне комаде веома различитих геометријских облика и величине. Код ових радних комада изводнице могу бити праве или криве линије, а делови са константном или променљивом дебљином зида. Максималне габаритне димензије радног комада (пречник, дужина) крећу се око $D_{max} = 6m$, дужине $L = 2m$, и оне су условљене расположивим простором машине, а не лимитирајућим технолошким параметрима процеса извлачења.

Обзиром на парцијални захват, ова технологија није погодна за израду ситних делова, тј. делова чији је пречник мањи од 20 mm и дужине 30 mm. Ово не значи да се такви делови не могу уопште израђивати ротационим извлачењем.

Ова технологија је заступљена у изради делова из домена „беле технике“ (све врсте посуђа, делови кућних апарата), затим у изради лампи, рефлектора, металних буради и разних врста резервоара, итд. Посебан сегмент примене ове технологије представља авио и војна индустрија (делови летелица, авиона, ракета, делови за атомске реакторе, итд.). Овде се претежно ради о деловима великих габарита и од високо квалитетних материјала. Код израде таквих делова ротационо извлачење најчешће нема алтернативе.

4.4. Тачност и квалитет обраде

На тачност радног комада утиче низ фактора од који су најважнији: врста материјала, апсолутне димензије радног комада, облик алата, врста извлачења (са или без стањења), режим обраде, крутост машине итд.

Код извлачења без промене дебљине зида одређена нетачност димензија радног комада јавља се пре свега као резултат еластичног враћања материјала. Ово враћање веће је код материјала са вишим механичким особинама (легирани челици) него код мекших материјала.

Други узрок одступања димензија радног комада од задатих може бити еластично деформисање калупа на који се поставља радни предмет, посебно у оним случајевима где се у процесу јављају велике радијалне силе.

У табели 3. могу се видети вредности величине толеранције пречника радног комада које је могуће постићи код ротационог извлачења без редукције дебљине зида.

Табела 3. Вредности величине толеранција пречника радног комада[4]

Пречник радног комада	Толеранције
до 500 mm	$\pm 0,2mm$
до 500 mm	$\pm 0,4mm$

Код ротационог извлачења са редукцијом дебљине зида, поред толеранције пречника радног комада, од великог значаја је и толеранција дебљине зида обрзиром да се тако добијени радни комад не обрађују накнадно обрадом скидањем струготине. У табели 4. дате су оријентационе вредности одступања димензија радног комада од задатих.

Према квалитету обрађене површине ротационо извлачење спада у ред завршних обрада. Квалитет површина радног комада зависи од квалитета површине полазног комада као и од величине помака и пречника алата којим се врши извлачење. За постизање високог квалитета површине потребно је извлачење изводити са малим помаком уз коришћење алата што већег пречника.

$$R_a = 0,4 - 1,6 \mu m \quad (20)$$

Табела 4. Одступање димензија радног комада код ротационог извлачења са променом дебљине зида у зависности од димензија[4, 5]

Унутрашњи пречник (mm)	до 150			до 250			до 400			до 600		
Дебљина зида (mm)	1.0	до 2.0	>2.0	<1.0	<2.0	>2.0	<1.0	<2.0	>2.0	<1.0	<2.0	>2.0
Унутрашњи пречник $\pm$	0,10	0,10	0,15	0,10	0,15	0,15	0,20	0,25	0,25	0,25	0,30	0,35
Овалност	0,05	0,05	0,10	0,10	0,12	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50
Дебљина зида $\pm$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04

4.5. Механичке особине радног комада

За време обраде ротационим извлачењем мењају се и механичке особине радног комада. Долази до усмеравања тока влакна материјала као и до повећања тврдоће и чврстоће материјала уз истовремено опадање пластичности. Ово се посебно односи на ротационо извлачење са променом дебљине зида.

У табели 5. дати су подаци о механичким особинама: граници течења, затезној чврстоћи као и издужењу пре и после извођења операције ротационог извлачења.

Табела 5. Механичке особине лима пре и после ротационог извлачења

Дебљина зида [mm]	Укупна редукција (%)	Затезна чврстоћа [MPa]	Граница течења [MPa]	Издужење A_5 (%)
12, 70	0	386	229	34
10,40	17,5	541	478	13
8,33	35	572	525	12
4,9	61	592	541	11
4,39	66	600	554	11

Може се приметити значајан пораст границе течења и затезне чврстоће као и опадање издужења са редукцијом дебљине зида од 12,70 mm на 4,39 mm.

На слици 20. приказана је промена тврдоће (у Rockwell-F јединицама) у материјалу за време ротационог извлачења коничних делова са редукцијом дебљине зида. Уочава се са слике да недеформисани делови материјала имају тврдоћу око $R_F = 55$ док је тврдоћа дела материјала који је деформисан $R_F = 86 - 88$. Такође се уочава да је са стране ваљчића повећање тврдоће нешто веће него што је то са стране калупа.



Слика 20. Промена тврдоће у материјалу за време ротационог извлачења са променом дебљине зида[4]

4.6. Брзина кретања

Код ротационог извлачења се у току обраде креће и радни комад и алат. Радни комад врши главно обртно кретање око главне осе машине, а алат врши помоћно кретање (помак) обликујући изводницу радног комада.

Вредност обимне брзине радног комада зависи од врсте материјала и геометрије радног комада. Препоручене вредности обимне брзине крећу се у граница од 0,2 до 5 m/s. Мање вредности односе се на материјале веће чврстоће, док се за извлачење мекших материјала могу користити веће вредности обимне брзине. За обраду челичних материјала обимна брзина не сме прелазити 2 m/s.

Број обраћа главног вретена одређује се према:

$$n = \frac{60.000 \cdot V}{d} \text{ o/min} \quad (21)$$

$V(m/s)$ – обимна брзина

$d (mm)$ – пречник радног комада (или калупа)

Брзина помоћног кретања зависна је од врсте материјала и геометријског облика радног предмета, као и од траженог квалитета површине радног комада (храпавости).

Помак се може изразити на два начина и то као:

- референти помак $s (mm/o)$,
- минутна брзина помака $S_V(mm/min)$.

Веза између ова два начина изражавања помака је:

$$s = \frac{S_V}{n} \quad (22)$$

Препоручене вредности референтног помака су:

$$s = 0.2 - 5 (mm/o) \quad (23)$$

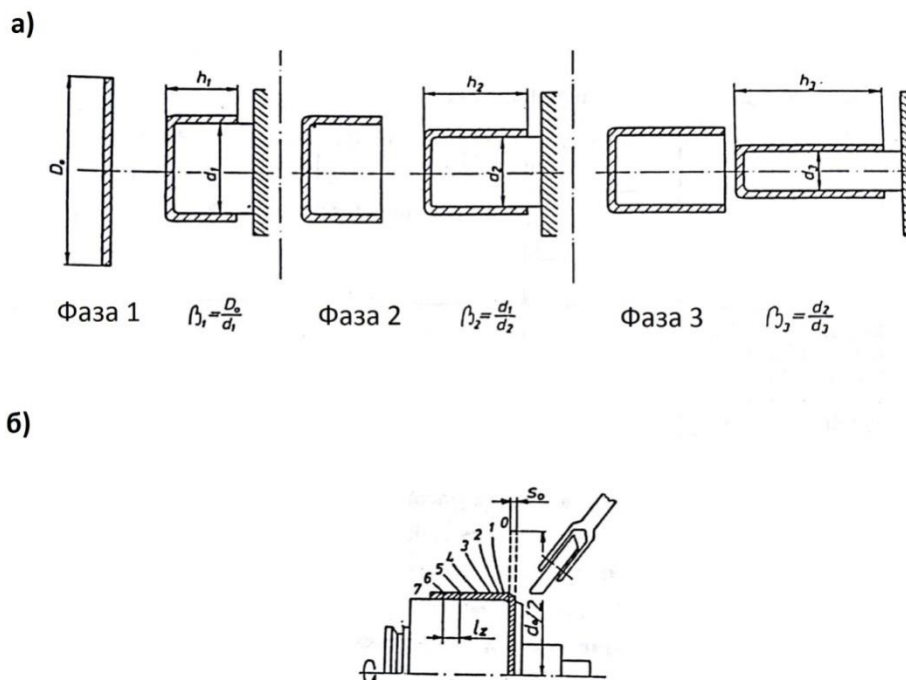
За постизање вишег квалитета радног комада потребно је користити ниже вредности брзине помака. Код ротационог извлачења без редукције дебљине зида брзина помака има утицај и на тачност унутрашњег пречника радног комада, који је једнак спољњем пречнику калупа. Ако се користе ниже вредности брзине помака, може доћи због еластичног деформисања до одступања унутрашњег пречника радног комада од пречника калупа.

4.7. Број фаза (пролаза)

У неким случајевима ротационог извлачења радног комада није могуће добити у само једном пролазу (фази) обраде. Разлог за то је ограниченост ресурса деформабилности материјала у датом обрадном систему. Због тога се крајњи облик радног предмета у таквим случајевима добија у неколико фаза које следе сукцесивно једна иза друге.

Технологија ротационог извлачења

Код ротационог извлачења без редукције дебљине зида постоје две могућности извођења вишефазног процеса. Обе могућности илустроване су на слици 21. која показује добијање радног комада димензија $d_3 \times h_3$ из полазног комада пречника D_0 .



Слика 21. Две варијанте вишефазног ротационог извлачења

У првој варијанти радни комад се деформише на три различита калупа при чему се на сваком одвија смањење пречника: $D_0 \rightarrow d_1, d_1 \rightarrow d_2, d_2 \rightarrow d_3$. Подела на фазе врши се према дозвољеној редукцији пречника:

$$\beta_i = \frac{d_i}{d_{i+1}}, \quad (24)$$

у једној фази. Вредности ове гранично дозвољене редукције зависе од врсте материјала. За неке од карактеристичних материјала дате су у табели 6. вредности „ β “ за прву фазу и следеће фазе.

Друга могућност извођења вишефазног ротационог извлачења без промене дебљине зида показане су на слици 21.б. Полазни комад се након стезања постепено у фазама доводи на облик радног комада. Путања врха алата у свакој фази приказане су кривим линијама (1-7). Број фаза код ове варијанте вишефазног извлачења могуће је одредити на више начина.

Технологија ротационог извлачења

Табела 6. Степен редукције у једној фази

Материјал	Дозвољен степен редукције у једној фази		Потребно међужарење после укупног степена редукције $\beta_{uk} = d_0/d_i$
	1. Фаза $\beta = d_0/d_1$	2. Остале фазе $\beta = \frac{d_i}{d_i} + 1$	
Al 99,5	1,55	1,33	Није потребно
Месинг и челични лим за дубоко извлачење	1,55	1,33	2
Нерђајући челик	1,27	1,10	1,27

Код ротационог извлачења са променом дебљине зида број фаза одређује се на бази укупне редукције дебљине зида коју је потребно извршити.

Укупна редукција дебљине зида износи:

$$\varepsilon_{uk} = \frac{s_0 - s_n}{s_0} \quad (25)$$

s_0 - почетна дебљина материјала

s_n - крајна дебљина материјала

Укупна редукција остварује се најчешће у неколико пролаза. За већину челичних материјала редукција у првој фази не би требало да пређе 20 %, док за мекше материјале као што су алуминијум, бакар и сл. може износити до 30 %. У другим и следећим пролазима могуће су веће вредности редукције дебљине зида него у првом пролазу (30 до 40%).

Подаци за један конкретан пример ротационог извлачења челичног материјала са редукцијом дебљине зида приказани су у табели 7. Пример се односи на редукцију зида цевастог полазног комада код кога се почетна дебљина зида смањује у 5 пролаза на крајњу дебљину приказану у табели. Унутрашњи пречник полазног комада цеви је 490 mm.

Табела 7. Дебљине лима по пролазима[4, 5]

		$s_i - s_{i+1}$	ε_i
Први пролаз	$(s_0 - s_1)(mm)$	19 - 15,6	17%
Други пролаз	$(s_1 - s_2)(mm)$	15,6 - 10,6	32%
Трећи пролаз	$(s_2 - s_3)(mm)$	10,6 - 5,6	47%
Четврти пролаз	$(s_3 - s_4)(mm)$	5,6 - 3,4	39%
Пети пролаз	$(s_4 - s_5)(mm)$	3,4 - 1,7	50%

Пре коначног дефинисања технолошког процеса, броја фаза потребно је експериментално верификовати у конкретним условима.

4.8. Температура обраде и подмазивање

Извлачење тешко обрадивих материјала и дебелих лимова успешније се изводи на повишеним температурама.

Загревање полазног комада се врши или у пећима или локално, ако се обрада врши само на једном делу радног комада. Топло ротационо извлачење примењује се најчешће код израде дна резервоара и сличних производа од дебелих, тешко обрадивих материјала. У том случају врши се комплетно загревање полазног комада у пећи.

Препоручене температуре на које се загревају поједини материјали дати су у табели 8.

Табела 8. Температуре топлототротног ротационог извлачења[4, 5]

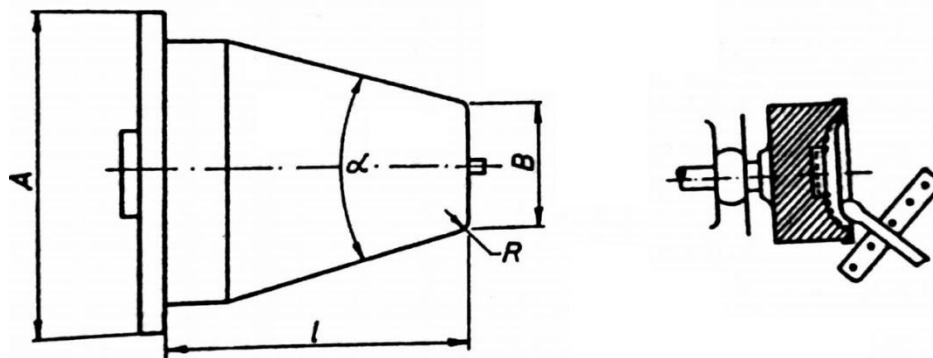
Материјал	Температура топлототротног ротационог извлачења °C
Челик	900 – 1000
Нерђајући челик	850 – 1000
Никл	870 – 1260
Бакар	600 – 800
Алуминијум и његове легуре	350 – 450

Да би се смањило трење између алата и материјала у току процеса врши се подмазивање. Као мазивно средство служи машинско уље или уљна емулзија. У тежим условима користи се фосфатирање радног комада, а током процеса обраде подмазивање чврстим мазивима, као што је молибден дисулфид (MoS_2).

4.9. Алати и машине

Основни елементи алата за ротационо извлачење су: калуп, ваљак (ваљчић) и притискивач.

Калуп одређује облик и димензије радног комада. Он се налази на главној оси машине и врши главно обртно кретање. Калупи могу бити врло различитих облика и димензија (слика 22), на слици су приказани један спољашњи и један унутрашњи калуп.

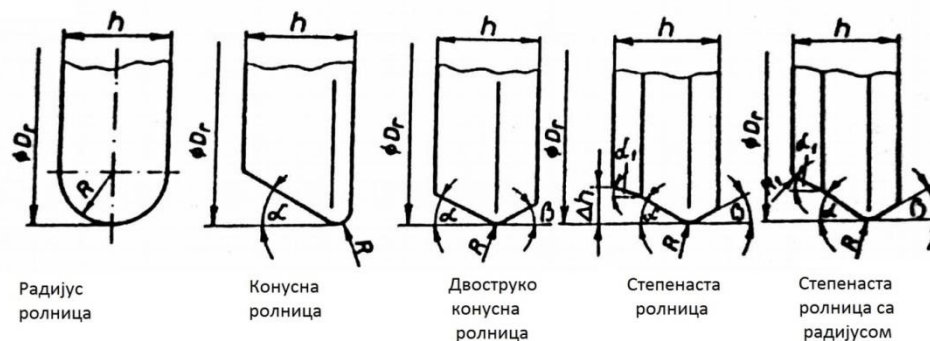


Слика 22. Спољашњи и унутрашњи калуп[4]

Калуп може у свом средишњем делу имати отвор у коме је смештен елемент за избацивање (скидање) радног комада са калупа. Захтев који се поставља када је калуп у питању јесте постојаност облика и димензија, отпорност на хабање, центричност као и што мање еластично деформисање.

Материјал од којег се израђује калуп зависи од материјала који се обрађује извлачењем као и од величине серије. Сиво ливено гвожђе се употребљава за израду калупа када се извлаче мекани материјали у малим серијама (10 – 200 комада). За веће серије и одговорне делове калупи се израђују из алатних челика који се термичком обрадом доводе на тврдоћу од око 50 HRC.

Ваљак за извлачење представља активни део алата. Његовим дејством на материјал врши се деформисање. Поред транслаторног кретања, праволинијског или криволинијског, ваљак се okreће и око своје осе. Основни захтеви од ваљака за ротационо извлачење су висок ниво тачности и квалитет радне површине, висока тврдоћа, што мање еластично деформисање као и висока отпорност на хабање. Геометријски облици и димензије ваљака орeдеђени су емпиријски и то у зависности од радног задатка. Радни део ваљка је најчешће кружног или конусног облика. На слици 23. приказан је један број различитих облика ваљака за ротационо извлачење.



Слика 23. Различити облици ваљака за ротационо извлачење[4, 5]

Основни параметри ваљка су спољни пречник и радијус заобљења ваљка. Ови параметри директно утичу на технолошке параметре обраде ротационим извлачењем као и на квалитет обрађене површине.

Материјали од којих се израђују ваљци су легирани алатни челици [Ћ 4750 (*X165CrMoV12*), Ћ 4660 (*X210CrW12*), Ћ 4850 (*X156CrVMo12-4*)] који се термичком обрадом доводе на тврдоћу од 63 – 65 *HRC*. Спољна површина ваљка се обрађује брушењем и полирањем.

Обрада ротационим извлачењем обавља се на специјалним машинама које су по својој конструкцији и кинематици појединих својих елемената сличне струговима.

Квалитативан скок у даљем развоју ових машина представљало је увођење нумеричког управљања, које омогућава програмирање и остваривање практично неограниченог броја разних облика путања ваљчића. На тај начин омогућена је израда и најкомпликованијих конфигурација уз максимално искоришћење деформабилности материјала. Примери неколико таквих машина приказани су на сл..

Један од најчешћих начина генерисања програма за нумеричко управљање кретањем алата је тзв. *Teach-in-Play-back* поступак.

Поступак се састоји у томе да искусан радник преко одговарајућих управљачких елемената ручно управља израдом првог комада у серији. Сви елементи таквог, ручно управљаног процеса меморишу се. Након провере овако израђеног радног комада и установљавања да на њему нема грешака (пукотина, одступања облика и димензија) меморисани програм служи за аутоматску израду целе серије. Постоје и други начини за генерисање програма за нумеричко управљање машина за ротационо извлачење.

Машине су по правилу хоризонталне изведбе, а само у изузетним случајевима (израда веома дугачких делова) могу се израђивати у вертикалној изведби.

5. Примери машина (*spinning machines*)



Слика 24. Машина (*spinning machines*)
[6]



Слика 25. Машина (*spinning machines*)
[7]



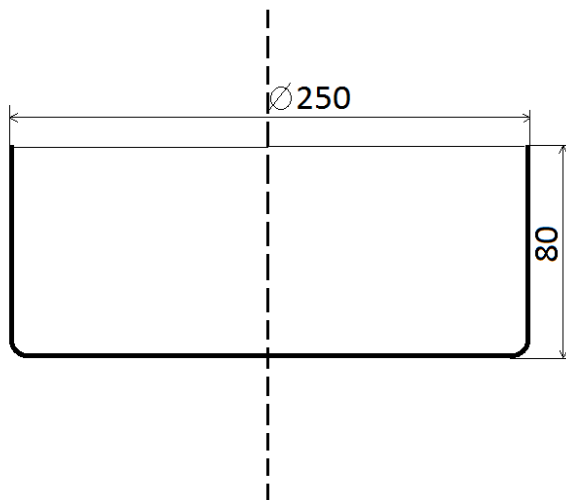
Слика 26. Машина (*spinning machines*) [8]

6. Одређивање технолошких параметара за конкретан пример

За радни предмет цилиндричне геометрије према скици, који се добија поступком ротационог извлачења без стањења, потребно је одредити:

- а) облик и димензије развијеног стања,
- б) степен извлачења и број фаза обликовања,
- в) кинематске параметре: обимну брзину, број обртаја радног предмета, померање алата (корак) по минути и корак по обртају,
- г) облик и димензије алата,
- д) деформационе силе обликовања: обимну, радијалну и аксијалну.

Материјал радног комада је нискоугљенични челични лим *DC04* (Č0148), дебљине 0,7 mm. За материјал је познато: граница течења $R_p=192,3 \text{ MPa}$, аналитичка апроксимација криве течења $K=502,2\varphi^{0,209} \text{ MPa}$. Коефицијент трења при обликовању $\mu=0,2$.



Решење:

- а) Облик и димензије развијеног стања

Коришћена табела 1 (страна 21)[2]

$$D_0 = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} = \sqrt{250^2 + 4 \cdot 250 \cdot 80} = 377,5 \text{ mm}$$

Усваја се кружни комад $\varnothing 378 \times 0,7 \text{ mm}$.

- б) Степен извлачења и број фаза обликовања

$$\beta_1 = \frac{D_0}{d_1} = \frac{378}{250} = 1,512$$

Из табеле 6 (страна 29) [2] усваја се $\beta_{max} = 1,55$. Пошто је $\beta_1 < \beta_{max}$ **обликовање се изводи у једној фази.**

в) Кинематски параметри: обимна брзина, број обртаја радног предмета, померање алата (корак) по минути и корак по обртају

Према препоруци, обимна брзина $v = 0,2 \div 0,5 \frac{m}{s}$, за челик $v_{max} = 2 \frac{m}{s}$. Усваја се $v = 1,5 \frac{m}{s}$.

Број обртаја:

$$n = \frac{60000 \cdot v}{d} = \frac{60000 \cdot 1,5}{250} = 360 \text{ o/min}$$

Корак по обртају $s = 0,2 \div 5 \text{ mm/o}$

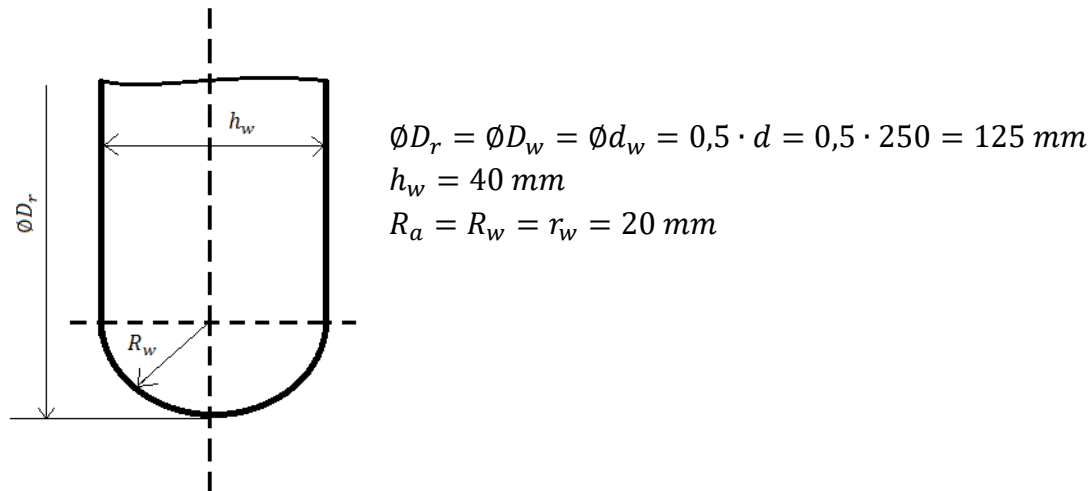
Усваја се $0,5 \text{ mm/o}$

Корак по минути:

$$S_v = s \cdot v = 0,5 \cdot 360 = 180 \text{ mm/min}$$

г) Облик и димензија алата

Према препоруци усваја се облик алата као на скици.



д) Деформационе силе обликовања: обимна, радијална и аксијална

Обимна тангенцијална сила:

$$F_T = 0.29 \cdot K_{sr} \cdot S_0 \cdot \sqrt{2 \cdot r_w \cdot \left(\frac{V}{n}\right)}, N$$

Радијална сила:

$$F_R = 2,3 \cdot K_{sr} \cdot \left(\frac{V}{n}\right) \cdot \sqrt{d_w \cdot \left(\frac{V}{n}\right)}, N$$

Аксијална сила:

$$F_z = 2 \cdot s_0 \cdot K_{sr} \cdot \left(1,1 \cdot \ln \frac{R_0}{r_1} + \frac{s_0}{2 \cdot r_w + s_0}\right) \cdot (1 + \mu \cdot \alpha) \cdot \sqrt{d_w \cdot \left(\frac{V}{n}\right)}$$

Деформациони отпор (ефективни напон):

$$K_{sr} = \sigma_{esr} = \frac{K_0 + K_1}{2}$$

$$K_1 = f(\varphi_1)$$

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_0}{d_1} = \ln \frac{378}{250} = 0,413$$

$$K_0 = R_p = 192,3 \text{ MPa}$$

$$K_1 = 502,2 \cdot (0,413)^{0,209} = 417,5 \text{ MPa}$$

$$K_{sr} = \sigma_{esr} = \frac{K_0 + K_1}{2} = \frac{192,3 + 417,5}{2} = 304,9 \approx 305 \text{ MPa}$$

Обимна тангенцијална сила:

$s_0 = 0,7 \text{ mm}$ – дебљина зида

$r_w = 20 \text{ mm}$ – полупречник заобљења алата (ваљчића)

$s \rightarrow \left(\frac{V}{n}\right) = 0,5 \text{ mm}$ – померање алата по обрту

Технологија ротационог извлачења

Обимна (тангенцијална) сила:

$$F_T = 0.29 \cdot 305 \cdot 0.7 \cdot \sqrt{2 \cdot 20 \cdot 0.5} = 276.9 \text{ N}$$

Радијална сила:

$$F_R = 2.3 \cdot 305 \cdot 0.5 \cdot \sqrt{125 \cdot 0.5} = 2772.9 \text{ N} \approx 2.8 \text{ kN}$$

d_w – 125 пречник алата (ваљчића)

Аксијална сила:

$$R_0 = \frac{D_0}{2} = 189 \text{ mm} - \text{полупречник полазног комада (развијено стање)}$$

$$r_1 = \frac{d}{2} = 125 \text{ mm} - \text{полупречник комада}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \text{угао извлачења}$$

$$d_w = 125 - \text{пречник алата}$$

$$F_z = 2 \cdot 0.7 \cdot 305 \cdot \left(1.1 \cdot \ln \frac{189}{125} + \frac{0.7}{2 \cdot 20 + 0.7} \right) \cdot \left(1 + 0.2 \cdot \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sqrt{125 \cdot 0.5} = 2094.8 \text{ N} \\ \approx 2.1 \text{ kN}$$

Ниски интензитети сила указују де се поједине операције ротационог извлачења без стањења могу радити (у већем броју случајева) на универзалним струговима са једноставним алатом.

7. Закључак

Технологија пластичног обликовања метала обухвата велику групу поступака и представља једну од најзначајнијих технологија у свеукупној индустријској преради метала. Релевантни подаци указују да се преко 80% свих металних материјала у некој фази преради подвргава поступцима ове технологије. Реч је о гигантским количинама, с обзиром да је светска производња само челика 2016. године премашила 1,63 милијарди тона [9]. Од тога готово половина производње потиче из Кине.

Ротационо извлачење обухвата специфичне поступке пластичног обликовања лима при чему се добијају оносиметрични ротациони облици у хладном и топлом стању. Поступци су погодни за појединачну и малосеријску производњу. Код делова великих габарита готово да немају алтернативу. Развој компјутерског управљања омогућио је добијање комада сложених криволинијских облика.

У раду је показана анализа процеса ротационог извлачења без стањења и, у извесној мери, процеса ротационог извлачења са стањењем лима. Изложени су поступци одређивања димензија полазног комада (развијеног стања), свих компоненти деформационе силе, броја операција, геометрије алата и избора материјала комада и алата. Приказана методика у потпуности омогућава дефинисање најважнијих технолошких параметара ротационог извлачења лима.

У конкретном примеру дата је примена претходно поменутих метода чиме је потврђена њихова практична вредност. Из добијених резултата лако се закључује да компоненте деформационе силе имају релативно ниске интензитете, због парцијалног захвата алата и материјала. То омогућава примену оваквих поступака и у условима појединачне производње на универзалним машинама, са веома једноставним алатима.

8. Литература

1. Александровић С., Стефановић М.: **Технологија пластичног обликовања метала**, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2010. година
2. Александровић С.: **Производне технологије (Технологија пластичног обликовања метала)**, скрипта, Факултет инжењерских наука, 2011. година
3. *S. Kalpakjian, S. Schmid: Manufacturing Processes for Engineering Materials, Pearson Education, New Jersey, USA, 2003.*
4. М. Планчак, Д. Вилотић, В. Вујовић: **Технологија пластичности у машинству 2**, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1992. година
5. *Metal Forming Handbook, Schuler, Springer – Verlag, Berlin – Heidelberg, 1998.*
6. <http://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/11786/The-Facts-Behind-Metal-Spinning-and-Hydroforming.aspx> Приступила 21.06.2017. године
7. <http://www.wenzelmetalspinning.com/faq.html> Приступила 26.06.2017. године
8. <http://www.fdp.nu/mikelldevice/spinning.pdf> Приступила 28.06.2017. године
9. <http://www.worldsteel.org> Приступила 14.10.2017. године