

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Филип З. Вучићевић

Хидростатичко пластично обликовање метала

завршни рад

Крагујевац, 2017.

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: 102/2012

Филип З. Вучићевић

Хидростатичко пластично обликовање метала
завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др Србислав Александровић, ред. проф -
ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У раду кандидат треба да изложи детаљно прегледно разматрање о хидростатичкој обради са следећим целинама: увод, механичке особине и понашање материјала у хидростатичким условима, основни поступци хидростатичке обраде, технолошке методе хидростатичког обликовања, технологија хидростатичког обликовања, машине и алати за хидростатичко обликовање итд.

Посебно је потребно изложити поступке прорачуна параметара процеса обликовања, топлотних ефеката процеса и избора радног флуида.

На крају дати закључна разматрања о примени поступака хидростатичког обликовања.

Препоручена литература:

1. Александровић С., Стефановић М.: Технологија пластичног обликовања метала, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2010.
2. М. Планчак, Д. Вилотић, В. Вујовић: Технологија пластичности у машинству 2, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1992.
3. Александровић С.: Технологија пластичног обликовања метала, скрипта, Факултет инжењерских наука, 2011.
4. Metal Forming Handbook, Schuler, Springer – Verlag, Berlin- Heidelberg. 1998.

Крагујевац, датум

ментор:

др Србислав Александровић, ред. проф.

I. РЕЗИМЕ

У завршном раду је описан процес хидростатичког пластичног обликовања метала, основне шеме хидростатичке обраде и технолошке методе пластичног обликовања. Такође, дати су елементи технологије који укључују механичка својства, избор технолошке шеме обликовања, избор радног флуида и средства за подмазивање; избор машина и алата за хидростатичко обликовање. Дат је осврт на теоријске основе хидростатичке обраде.

I. SUMMARY

This work describes the process of hydrostatic forming of metals, the basic scheme of hydrostatic processing and technological methods of plastic forming and technology. Also, included are mechanical characteristics, choice of technological forming scheme, the choice of working fluids and lubricants; choice of machines and tools for hydrostatic forming. Given are emphasis on theoretical grounds of hydrostatic processing.

САДРЖАЈ

	Страница
РЕЗИМЕ	I
САДРЖАЈ	II
1. УВОД	1
2. МЕХАНИЧКЕ ОСОБИНЕ И ПОНАШАЊЕ МАТЕРИЈАЛА У	
ХИДРОСТАТИЧКИМ УСЛОВИМА	1
2.1. Испитивање затезањем	1
2.2. Испитивање увијањем и смицањем	5
2.3. Деформабилност материјала	7
2.4. Основни принципи хидростатичке обраде	9
3. ОСНОВНЕ ШЕМЕ ХИДРОСТАТИЧКЕ ОБРАДЕ	10
4. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ХИДРОСТАТИЧКЕ ОБРАДЕ	13
4.1. Анализа сила и улога трења	14
4.2. Притисак радног флуида	16
4.3. Стабилизација притиска	19
4.4. Улога противпритиска код хидростатичког утискивања	21
5. ТЕХНОЛОШКЕ МЕТОДЕ ХИДРОСТАТИЧКОГ ОБЛИКОВАЊА	23
5.1. Хидростатичко истискивање вучењем	25
5.2. Хидростатичко обликовање делова неограничене дужине и	
континуални поступци	27
5.3. Поступци обликовања са повећаним хидростатичким притиском	
оствареним механичким путем	29
5.3.1. Супротносмерно истискивање	29

5.3.2. Радијално истискивање	30
5.3.3. Ковање у отвореном калупу	30
5.3.4. Фино раздвајање	31
5.3.5. Дубоко извлачење	32
5.3.6. Обликовање цеви	34
6. ТЕХНОЛОГИЈА ХИДРОСТАТИЧКОГ ОБЛИКОВАЊА	36
6.1. Механичка својства и деформабилност полазног материјала	36
6.2. Избор технолошке шеме обликовања	37
6.3. Прорачун оптималних технолошких параметара хидростатичког истискивања	39
6.4. Избор радног флуида и средства за подмазивање	42
7. МАШИНЕ И АЛАТИ ЗА ХИДРОСТАТИЧКО ОБЛИКОВАЊЕ	46
7.1. Уређаји директног дејства	46
7.2. Уређаји са посебним извором притиска	50
7.3. Уређаји са диференцијалним притиском	51
7.4. Уређаји за хидростатичко обликовање	53
7.5. Специјалне хидростатичке пресе	55
7.6. Елементи алата за хидростатичку обраду	56
7.6.1. Контејнер-радни цилиндар	57
7.6.2. Клип и заптивни елементи	60
7.6.3. Матрица	62
8. ЗАКЉУЧАК	65
9. ЛИТЕРАТУРА	66

1. УВОД

Хидростатичка обрада представља процес обликовања са повећаним притиском у зони деформације. Хидростатичко обликовање изводи се са притисцима од 20.000 до 30.000 бара док се лабораторијска испитивања врше и са притисцима од неколико стотина хиљада бара. Повећан хидростатички притисак у зони деформације омогућује повећање деформабилности материјала и израду делова од материјала који се конвенцијалним поступцима не могу обликовати. Посебан проблем код хидростатичке обраде је мерење високог притиска што се решава применом електронских давача.

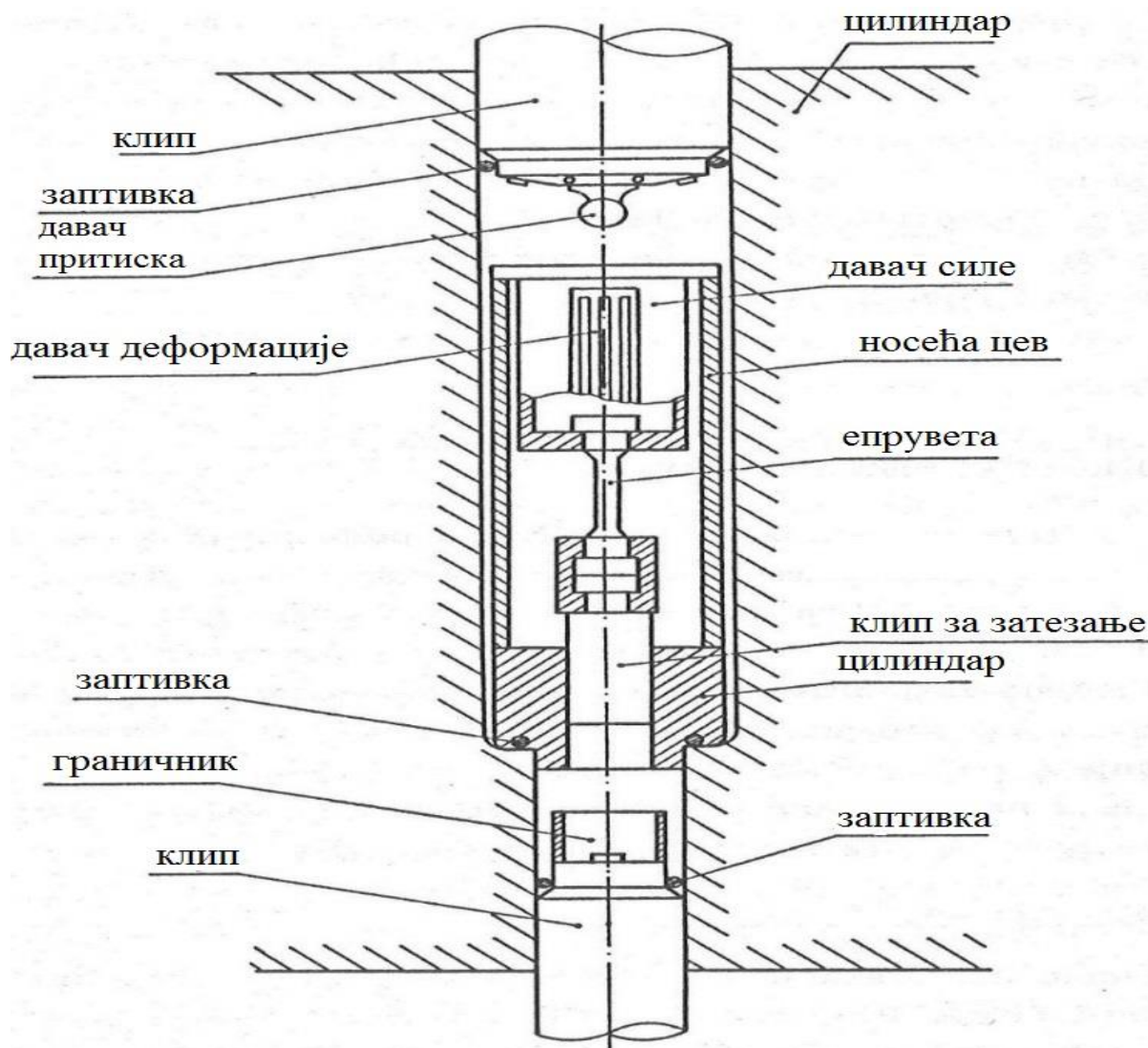
Технолошке методе хидростатичког обликовања су практично исте оне које се изводе конвенционалним путем: истискивање, вучење, сабијање, дубоко извлачење, савијање, обликовање цеви итд. Потребно је још нагласити да хидростатичко обликовање не условљава искључиву примену течности за стварање високог притиска у зони деформације.

2. МЕХАНИЧКЕ ОСОБИНЕ И ПОНАШАЊЕ МАТЕРИЈАЛА У ХИДРОСТАТИЧКИМ УСЛОВИМА

Прва испитивања понашања материјала у пољу високог притиска извео је Карман на узорцима од мермера. Његови експерименти су показали да се у хидростатичким условима и овако крт материјал може пластично деформисати.

2.1. Испитивање затезањем

На сл. 1.1. шематски је приказан Пухов (H.L.Pugh) уређај за испитивање затезањем у пољу високог притиска (до 15.000 бара). Епрувета пречника 4 мм се поставља горњим крајем у непокретни држач. Доњи крај епрувете постављен је у покретни држач са клипом. Затезна сила на епрувети остварује се на основу разлике притисака у горњем и доњем цилиндру. Помоћу горњег клипа ствара се висок притисак у горњем цилиндру, а доњим клипом регулише се ход доњег држача епрувете односно ход истезања епрувете. Затезна сила на епрувети мери се помоћу електронског динамометра који је постављен са горње стране епрувете. Хидростатички притисак мери се помоћу електронског манометра који је постављен на чело клипа. Резултати експеримената дата су на сл. 1.3, 1.4, 1.5.

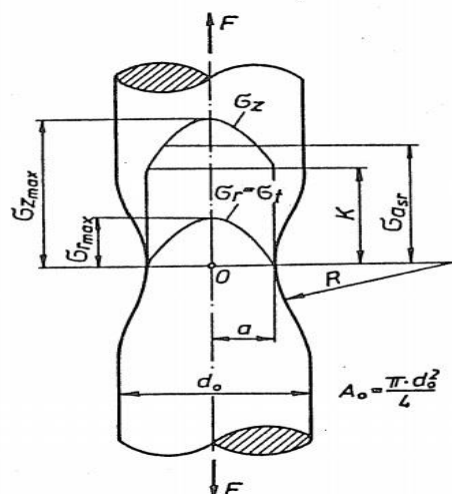


Сл. 1.1. Уређај за испитивање затезањем у хидростатским условима

2.1.1. Распоред напона у зони деформације при затезању

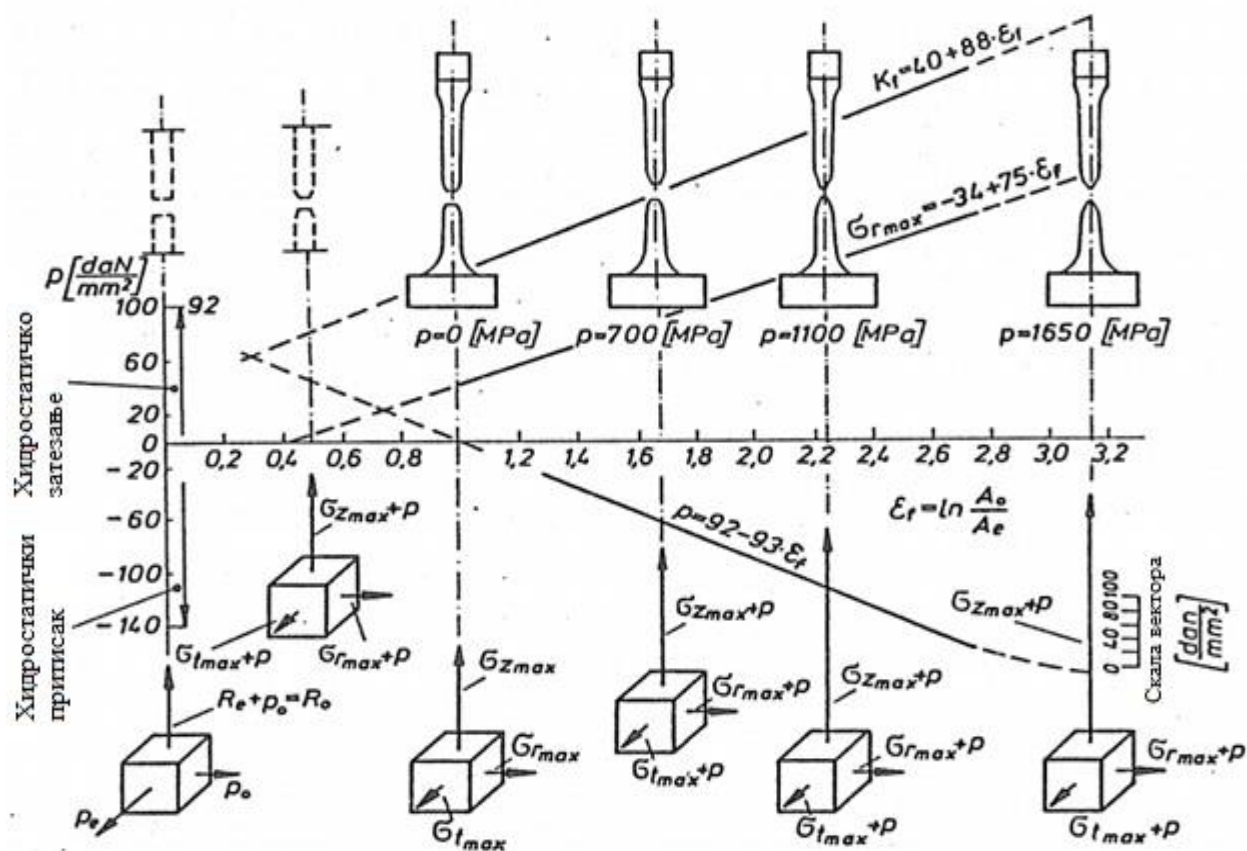
Распоред напона у зони врата епрувете оптерећене на затезање истраживали су Хил (R.Hill), Бридман (P.W.Bridgman), Давиденков, Спиридонова и др.

На основу распореда напона са сл. 1.2. може се констатовати да је најнеповољније напонско стање у центру радног комада где све компоненте имају максималну вредност. Ради тога се почетак настанка пукотине јавља у средини радног комада што је експериментално и потврђено.



Сл. 1.2. Дистрибуција напона у зони сужења епрувете

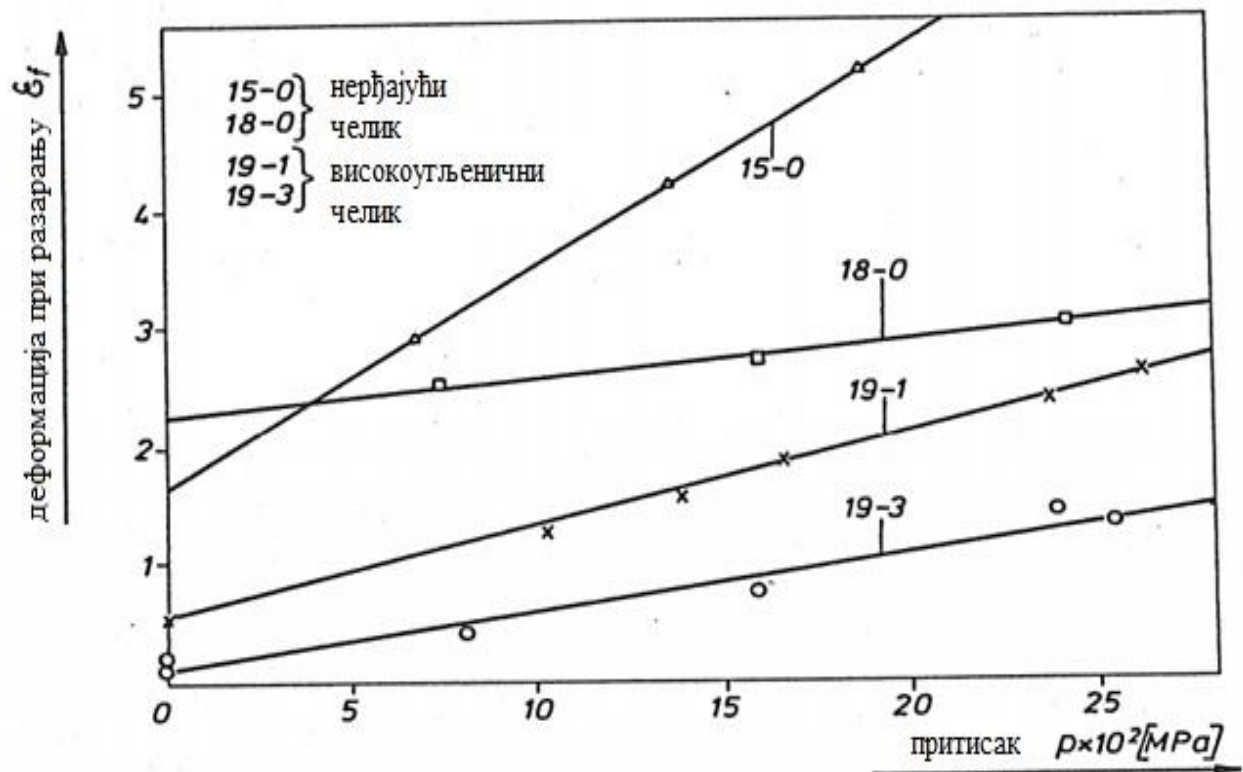
На сл. 1.3. је приказан однос напонских компоненти за случај испитивања епрувета од челика за лежајеве при различитим вредностима притиска (од $p=0$ до $p=16.500$ бара).



Сл. 1.3. Напонско стање у центру локализације деформација

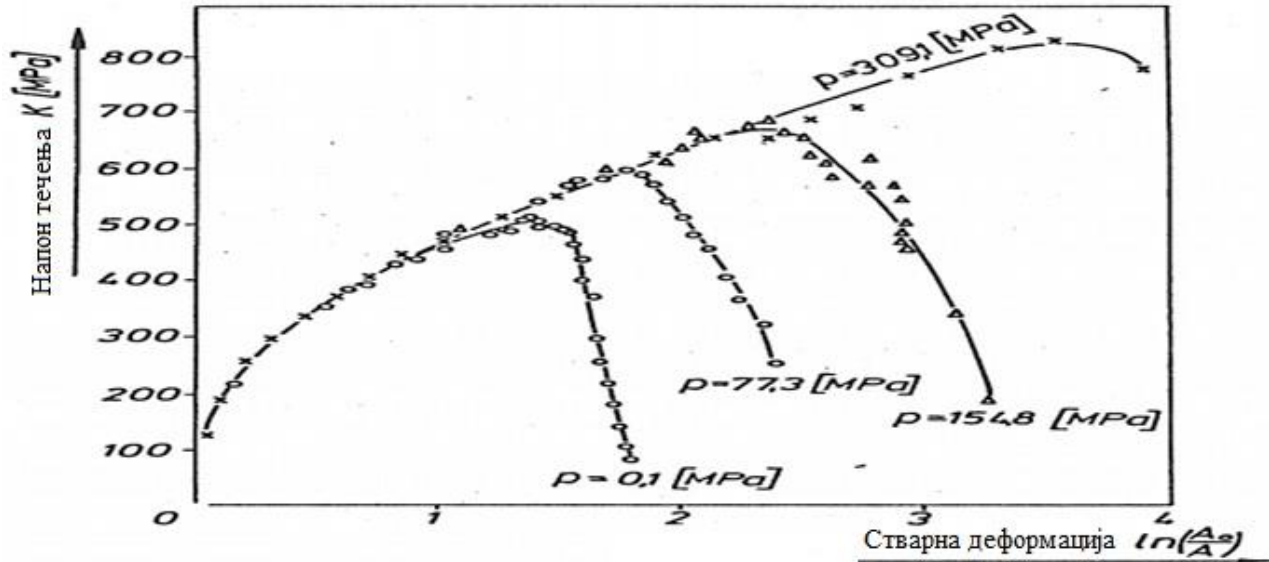
Напонске шеме показују да се са порастом притисака смањује утицај радијалне компоненте напона (σ_r) те због тога расте гранична деформација. На истој слици приказана је и промена специфичног деформационог отпора у функцији деформације. Резултат повећања хидростатичког притиска манифестује се кроз значајно повећање граничне деформације, која достиже скоро 320%.

До сличних резултата дошао је и Брицман (сл. 1.4.) испитујући различите врсте челика. Ове резултате потврдио је у својим радовима Пух уз корекцију да веза није линеарна код свих материјала.



Сл. 1.4. Промена деформације при прекиду епрувете у зависности од хидростатичког притиска

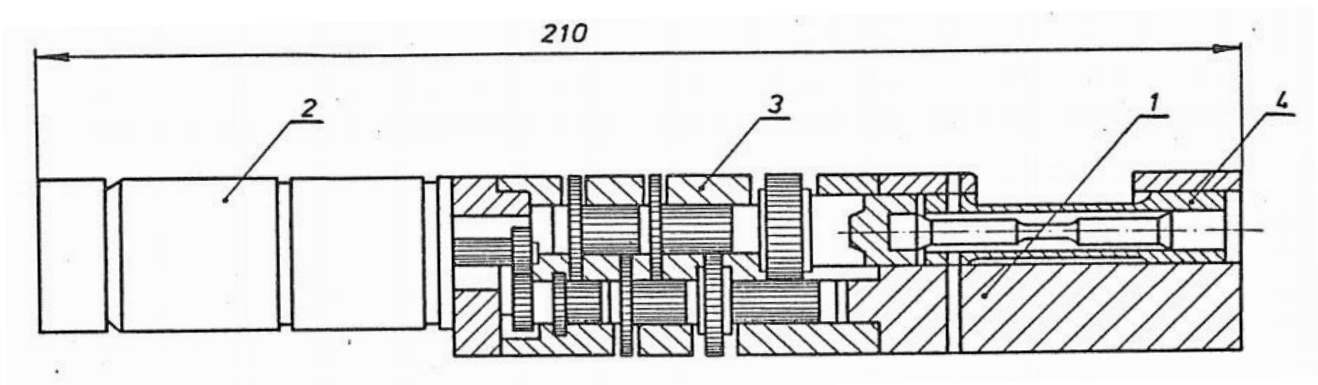
Испитивања утицаја хидростатичког притиска на криву течења вршена су на различитим материјалима и различитим вредностима притиска. Почетна испитивања наводила су на генерални закључак да хидростатички притисак не утиче значајније на вредност деформационог отпора. Прецизнија испитивања Брицмана показала су да са порастом хидростатичког притиска расте и деформациони отпор (сл.1.5.).



Сл. 1.5. Утицај хидростатичког притиска на криву течења

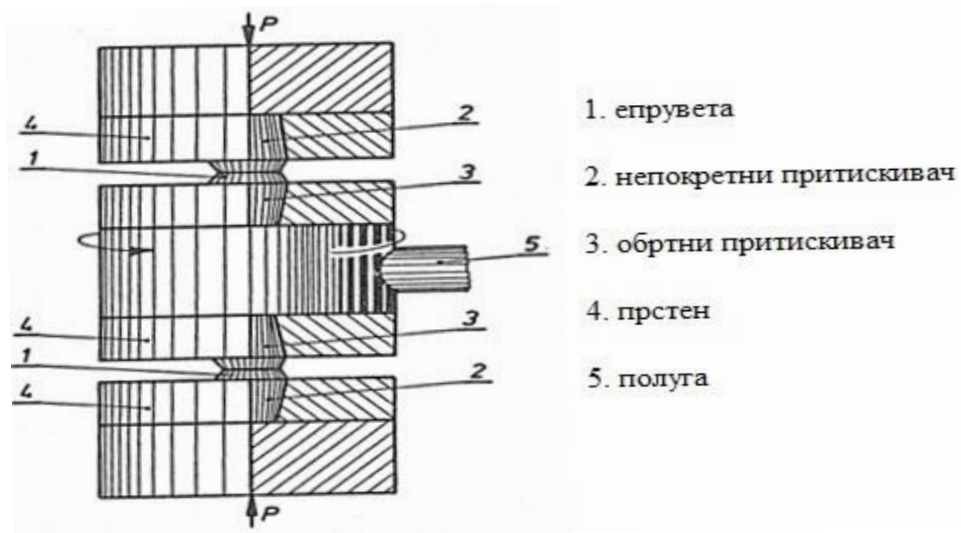
2.2. Испитивање увијањем и смицањем

На сл. 1.6. је приказан Пухов уређај за испитивање увијањем у пољу хидростатичког притиска (до 10.000 бара). Уређај се састоји од кућишта (1), погонског уређаја са сервометром (2) и зупчастим преносником (3) и динамометра за мерење обртног момента (4). Погонски уређај са зупчастим редуктором омогућује да се главно вретено обрће са малом угаonom брзином при испитивању (0,06 рад/мин). Комплетан уређај се након постављања узорка ставља у комору са високим притиском у којој се обавља процес испитивања.



Сл. 1.6. Уређај за испитивање увијањем

Конкретни подаци о понашању материјала при тангенцијалном оптерећењу у пољу високог притиска могу се пронаћи у литератури а базирани су на испитивању смицањем у квазихидростатичким условима (сл.1.7.).



Сл. 1.7. Испитивање увијањем у квазихидростатичким условима

Испитивање се изводе на узорцима мале дебљине (0,03-0,3 мм) пречника 3 до 5 мм. Повећање притисака у узорку остварује се снажним аксијалним оптерећењем. Мерењем обртног момента долази се до података о смицајној чврстоћи при различитим вредностима притиска. На сл. 1.8. је дата таква једна зависност на бази испитивања нискоугљеничног челика и ниобијума.

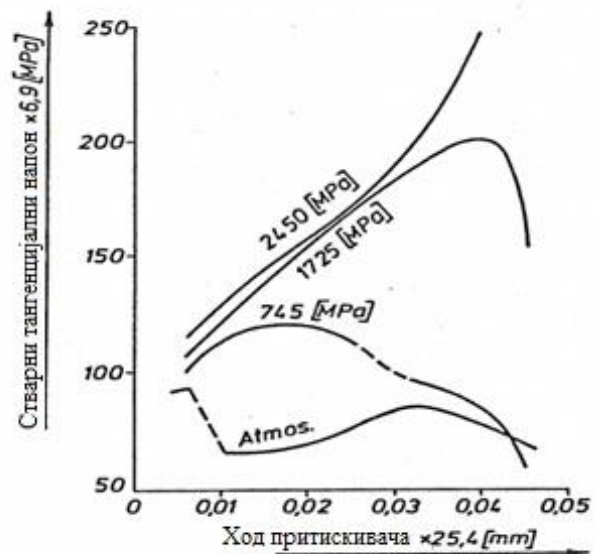


Сл. 1.8. Промена смицајне чврстоће од притиска

Прва испитивања смицањем у хидростатичким условима извео је Брицман помоћу уређаја (сл.1.9.), који се убацује у контејнер са високим притиском. За време испитивања мерена је сила на притискивачу као и ход притискивача. На основу резултата мерења одређивана је промена стварног тангенцијалног напона у зависности од хода пробојца. На сл. 1.10. дати су резултати испитивања за челик са 0,4% С а из којих произилази да хидростатички притисак значајно утиче на повећање стварног тангенцијалног отпора..



Сл. 1.9. Уређај за хидростатичко испитивање смицањем

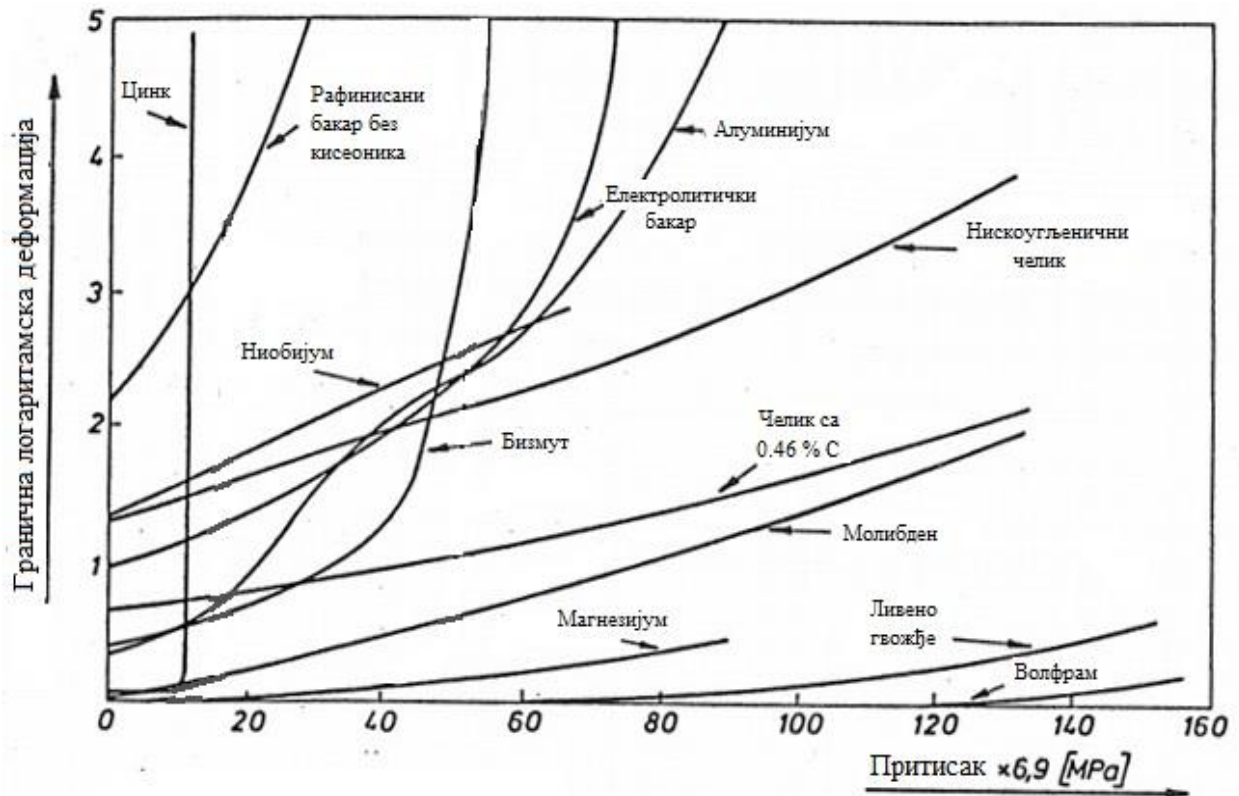


Сл. 1.10. Промена стварног смичућег напона у функцији хода алата и притиска

2.3. Деформабилност материјала

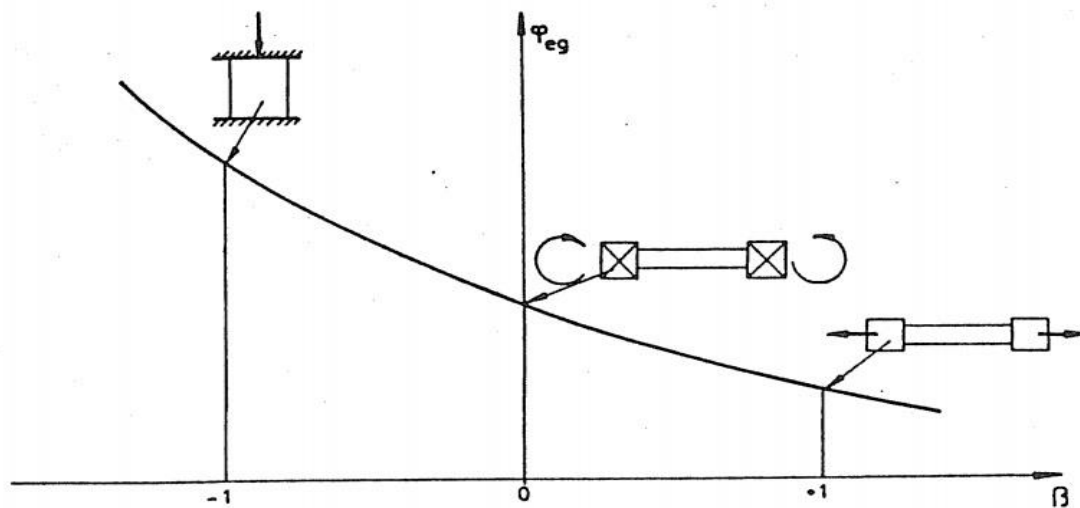
На сл. 1.11. су дати резултати испитивања пластичних својстава различитих материјала које су постигли Пух и др. У свим случајевима исказан је пораст граничних деформација са порастом хидростатичког притиска. Испитивања у овом случају вршена су на узорцима од бакра, цинка, бизмута, алуминијума чистог гвожђа, челика и др., са притисцима до 18.000 бара.

Наведени резултати указују да материјал има веће могућности обликовања у условима повећаног хидростатичког притиска. Високи притисак се може остварити хидрауличким путем, помоћу квази течности или механичким путем.



Сл. 1.11. Зависност граничне деформације од хидростатичког притиска

Повећање деформабилности материјала код хидрауличке обраде у потпуности је у складу са концепцијом дијаграма граничне деформабилности (сл. 1.12.) који повезује величину граничне деформације (Φ_{eg}) са показатељем напонског стања.



Сл.1.12. Дијаграм граничне деформабилности

Граничну деформацију представља укупна ефективна деформација остварена до тренутка појаве локализације деформације или видљивих пукотина. Граничне деформације расту са порастом хидростатичког притиска што је потврђено и многобројним примерима хидростатичке обраде.

Показатељ напонског стања дефинисан је односом инваријанти тензора напона и његовог девијатора:

$$\beta = \frac{J_1}{\sqrt{3|J_{D2}|}} = \frac{3\sigma}{\sigma_e} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e}$$

где је:

J_1 - прва инваријанта тензора напона

J_{D2} - друга инваријанта девијатора напона

σ - хидростатички напон

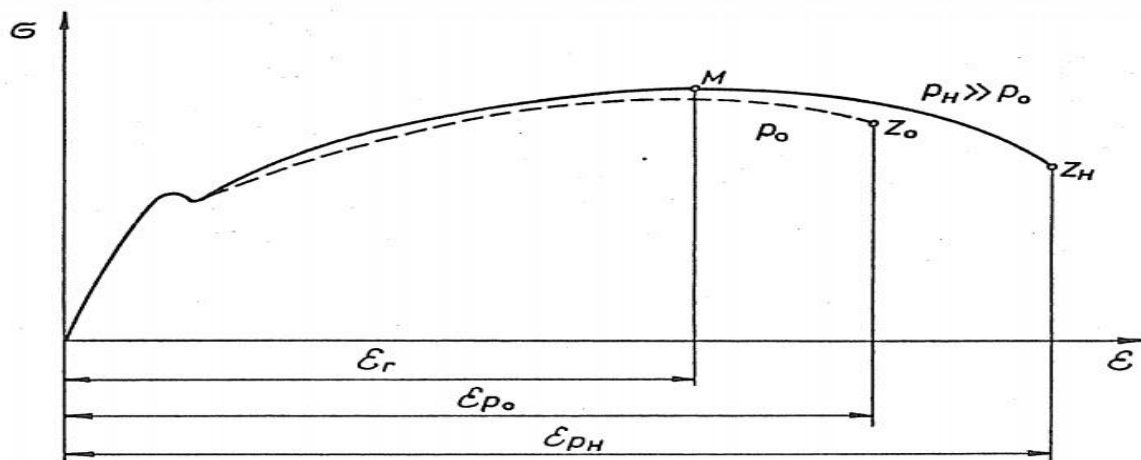
σ_e - еквивалентни напон

2.4. Основни принципи хидростатичке обраде

1. Принцип – односи се на утицај хидростатичког притиска на грешке у структури материјала. Познато је да затезни напони у материјалу условљавају настанак и раст микропукотина чијим повећањем до критичне вредности долази до разарања материјала. Притисни напони спречавају ширење постојећих микропукотина чиме се продужава период трајања деформације те се на тај начин могу остварити знатно више вредности степена деформације. На основу овога постаје јасно зашто се у процесима са израженим хидростатичким притиском (сабијање, истискивање и ковање) могу остварити знатно више вредности степена деформације у односу на процесе у којима доминирају затезни напони (вучење, дубоко извлачење...).

2. Принцип – базиран је на утицају хидростатичког притиска на локализацију деформације. Детаљнија испитивања Брицмана (сл. 1.13.) показала су да хидростатички

притисак нема утицаја на локализацију деформације, тј. да величина равномерне деформације не зависи од хидростатичког притиска. На основу овог принципа произилази да код процеса код којих доминирају затезни напони не могу се очекивати позитивни ефекти деловања хидростатичког притиска, тј. код процеса који су лимитирани локализацијом деформације (нпр. вучење и дубоко извлачење) хидростатички притисак нема утицаја.



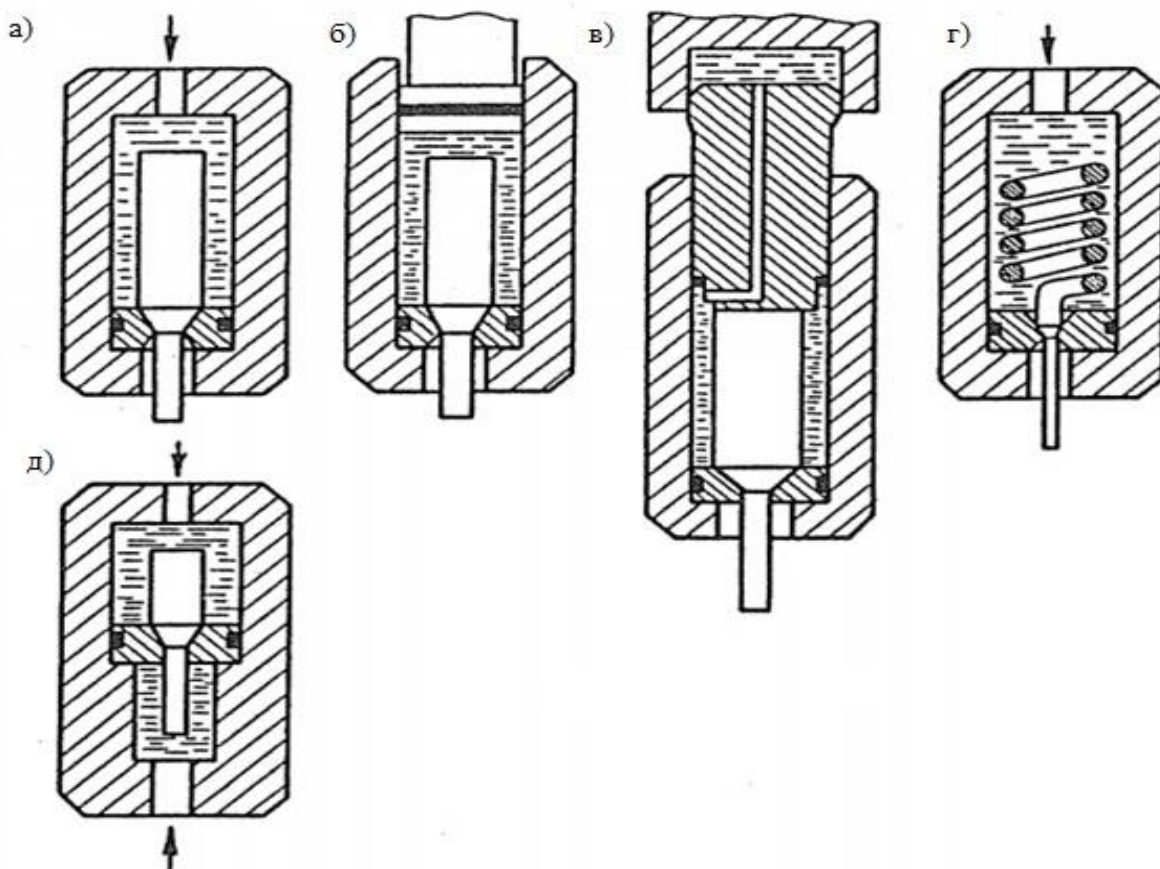
Сл. 1.13. Утицај хидростатичког притиска на локализацију деформација

3. Принцип – односи се на особине радног комада добијеног деформисањем у пољу хидростатичког притиска. Овај принцип је у вези са првим принципом хидростатичке обраде.

3. ОСНОВНЕ ШЕМЕ ХИДРОСТАТИЧКЕ ОБРАДЕ

Према начину стварања високог притиска у контејнеру разликују се:

1. Уређаји директног дејства код којих се притисак остварује деловањем клипа, односно пресе.
2. Уређаји са посебним извором притиска који се напајају са течношћу из одговарајућег агрегата.
3. Уређаји са хидромеханичким погоном код којих се оптерећење радног комада остварује комбинацијом хидростатичког притиска и механичким путем.



Сл. 1.14. Хидростатичко обликовање пуних комада:

- а) Истискивање са посебним извором притиска;
- б) уређај директног дејства;
- в) хидромеханичко истискивање;
- г) истискивање жице;
- д) истискивање са противпритиском.

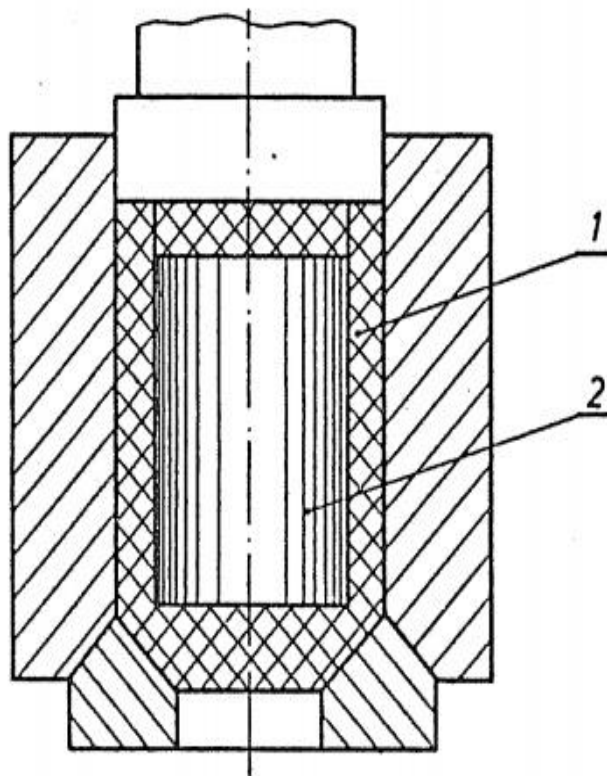
С обзиром на режим рада хидростатичко обликовање се дели на:

1. Континуално обликовање – обликовање жице где се потребна аксијална сила остварује активирањем силе трења и њеним усмеравањем у правцу течења метала.

2. Обликовање појединачних комада (сл. 1.14).

Осим хидростатичког обликовања у хладном стању обликовање се врши и на повишеним температурама. Хладно хидростатичко истискивање, па и друге методе обликовања, уводе се у индустријску примену на постојећој опреми (машинама) и на тај начин се значајно побољшава квалитет производа, кроз побољшање механичких особина и тачност израде делова, а такође се продужава трајност алата због побољшаних услова подмазивања на контактним површинама.

Постоје и поступци код којих се повећање притисака постиже помоћу чврстих елемената алата (нпр. фино раздвајање) или помоћу квази течности као у случају истискивања на сл. 1.15. У овом случају полазни комад се пре обраде поставља у облогу-кошуљицу од материјала са високим пластичним својствима (нпр. олово). На тај начин обезбеђује се деловање високог притиска по запремини радног комада, а такође се раздвајају контактне површине радног комада и матрице и смањује трење.

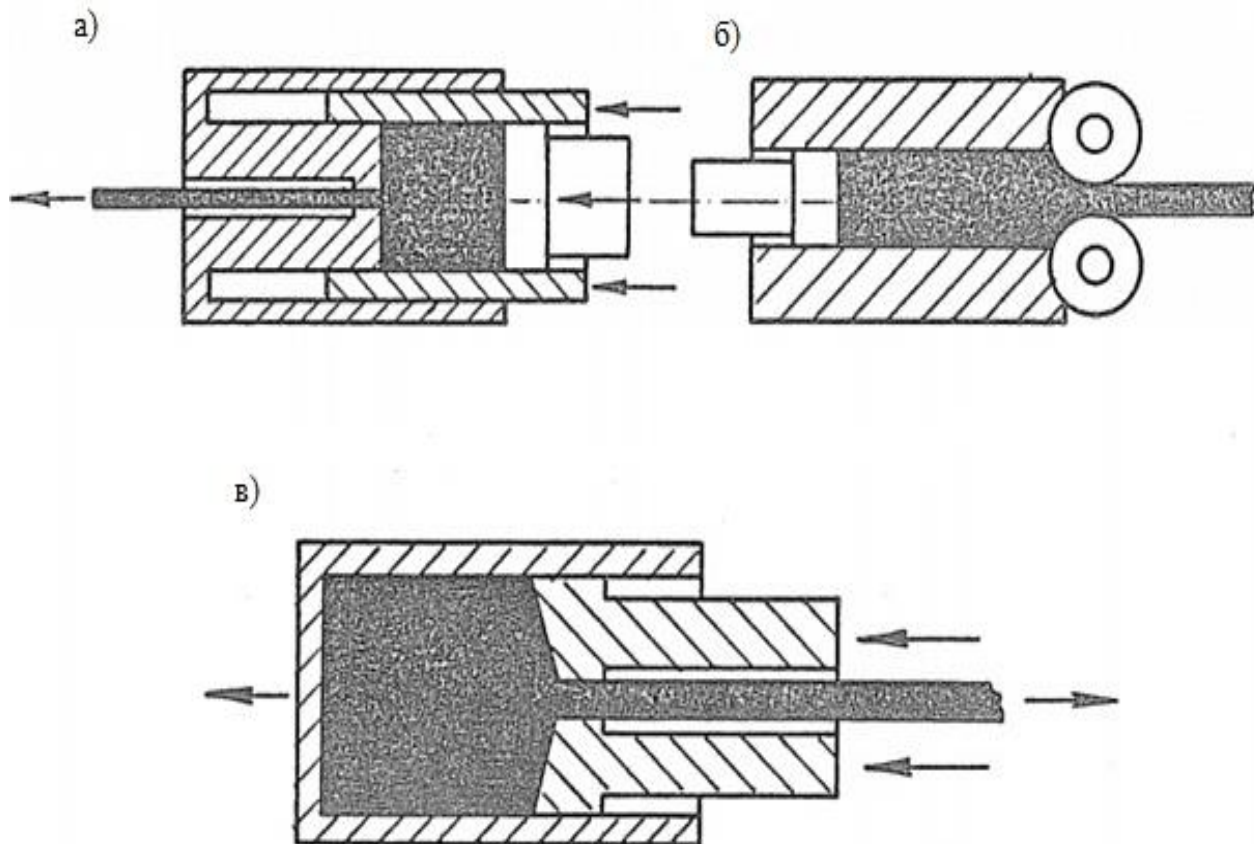


Сл. 1.15. Истискивање са облогом

1 - кошуљица од меког материјала

2 – полазни комад

У шеме хидростатичке обраде могу се укључити и поступци код којих је на неки начин обезбеђено смањење трења на контактним површинама алата и радног комада, као што је то случај са поступцима истискивања сл. 1.16. У првом случају (сл. 1.16. а) смањење трења на површини радног комада је постигнуто убацивањем покретног прстена. У другом случају (сл. 1.16. б) смањење трења у зони деформације остварено је помоћу ваљака који се обрћу па се трење клизања замењује трењем котрљања, а у трећем случају (сл. 1.16. в) трење је смањено тако што је кретање радног комада замењено кретањем матрице.



Сл. 1.16 . Конструкциона решења за смањење трења у процесу истискивања

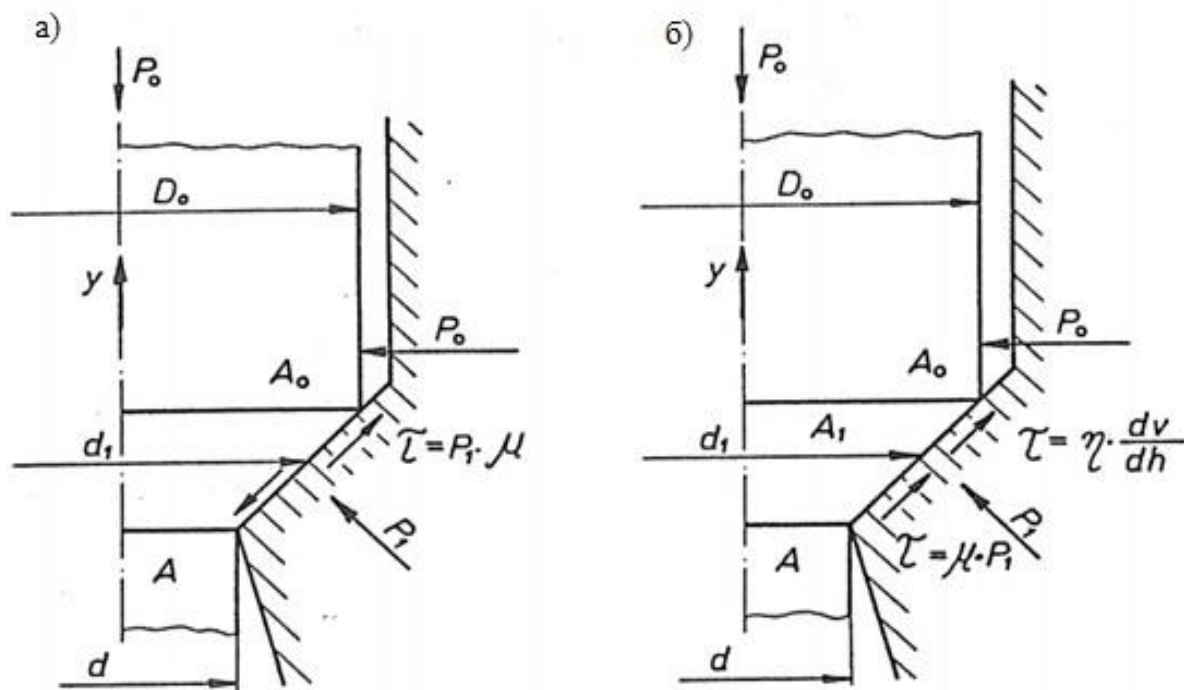
4. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ХИДРОСТАТИЧКЕ ОБРАДЕ

У овом поглављу размотрени су неки теоретски аспекти везани за хидростатичко обликовање. У првом реду размотрене су основне карактеристике радног флуида, затим улога трења са анализом оптерећења, радни притисак и динамика процеса.

4.1. Анализа сила и улога трења

У процесу хидростатичког истискивања постоје две хипотезе о улози трења у зони деформације:

1. Хипотеза активног трења
2. Хипотеза пасивног трења



Сл. 1.17. Шема оптерећења код хидростатичког истискивања

а) Суво трење; б) мокро трење

Услови за појаву сувог односно мокрог трења могу се дефинисати из услова равнотеже сила које делују у аксијалном правцу ($\sum F_{iy} = 0$).

Активна спољашња сила произведена хидростатичким притиском износи:

$$F = p_0 \cdot A_0 = p_0 \cdot \frac{D_0^2 \pi}{4}$$

Реакција конусног дела матрице за оба случаја (сл. 1.17. а и б), пројектована у правцу у–осе износи:

$$F_{ny} = p_1 (A_0 - A)$$

Према хипотези мокрог трења течност под притиском продире у зазор између радног комада и матрице и ствара силу трења чија пројекција у правцу осе у делује у правцу течења метала и износи:

$$F_{ty} = -\eta \cdot \frac{dv}{dh} (A_0 - A) \cdot \cotg \alpha$$

η – коефицијент вискозности течности

v – брзина течности

h - дебљина слоја течности

У случају сувог трења компонента силе трења делује у супротном правцу и износи:

$$F_{ty} = \mu \cdot p_1 (A_0 - A) \cdot \cotg \alpha$$

Једначина равнотеже свих сила у случају мокрог трења гласи:

$$p_0 \cdot A_0 = p_1 (A_0 - A) - \eta \cdot \frac{dv}{dh} (A_0 - A) \cotg \alpha$$

чијим сређивањем се добија:

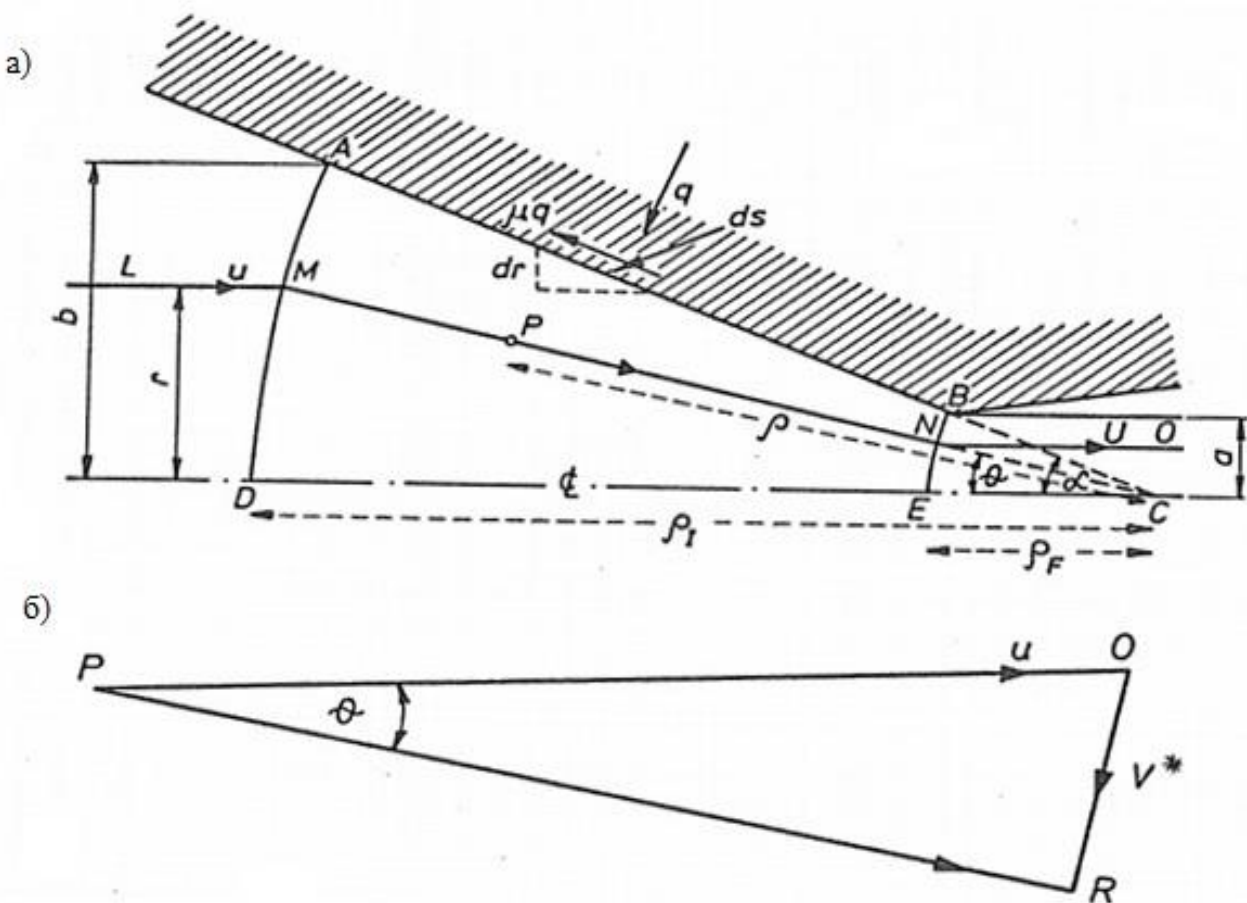
$$p_0 = \psi \left(p_1 - \eta \cdot \frac{dv}{dh} \cdot \cotg \alpha \right)$$

Из последње једначине произилази да је p_1 увек веће од p_0 што онемогућава стварање услова за мокро трење и у супротности је са хипотезом активног трења. Међутим, експерименти показују да је код хидростатичког истискивања ипак присутно мокро трење, а величина зоне мокрог трења зависи од фактора обухваћених горњом анализом.

4.2. Притисак радног флуида

Притисак течности у контејнеру код хидростатичког истискивања мора бити довољан да савлада отпор чисте деформације и отпоре унутрашњег и спољашњег трења. Спољашњи прираштај рада при истискивању који износи $p \cdot A_0 \cdot \Delta z$ (где је p – притисак течности, A_0 – површина полазног комада, Δz – померање радног комада) троши се на:

- 1 – савлађивање отпора хомогене деформације,
- 2 - савлађивање унутрашњег трења,
- 3 – савлађивање трења између полазног комада и контејнера,
- 4 – савлађивање трења између радног комада и матрице.



Сл. 1.18. Течење кроз конусни алат

Рад утрошен на чисту деформацију не зависи од угла конуса матрице, док рад унутрашњег трења – редувантни рад, који настаје због промене правца тока влакана зависи од угла конуса матрице (сл. 1.18.). До промене правца влакана долази на улазу у зону деформације (линија AD) као и на излазу из зоне деформације (лук BE). Према Пуху притисак за савлађивање редувантног рада за облик улазне границе према сл. 1.18. износи:

$$P_{R1} = \frac{K}{2} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right]$$

Укупни притисак истискивања за случај идеалнопластичног материјала према Пуху износи:

$$\frac{p}{K_0} = 0,924 \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cos \alpha \right] + \ln R \left[1 + \frac{\mu R \ln R}{\sin \alpha (R-1)} \right]$$

где је:

K_0 – специфични деформациони отпор

α - угао матрице

$R = \frac{A_0}{A}$ – редукција пресека

μ – коефицијент трења

Пух је такође применом претходног модела методом горње границе одредио проширени израз за укупни притисак истискивања:

$$\frac{p}{K_0} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right] + f(\alpha) \cdot \ln R + \mu \cot g \alpha \cdot \ln R \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \ln R \right)$$

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left\{ 1 - \cos \alpha \cdot \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \frac{1}{\sqrt{11.12}} \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12}} \cdot \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}} \right\}$$

Вредност функције $f(\alpha)$ у уобичајеним условима хидростатичког истискивања приближно износи $f(\alpha) \cong 1$ и расте значајније са повећањем угла α преко 90° . Међутим, хидростатичко истискивање изводи се са мањим углом матрице који се одређује оптимирањем, тј. налажењем минималне вредности притиска:

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{3} \mu \cdot \left(1 + \ln \frac{D_0}{d}\right) \cdot \ln \frac{D_0}{d}$$

где је:

D_0 - пречник полазног комада

d - пречник радног комада

Решење Пуха за притисак течности може се поједностављено приказати у облику:

$$p = a \cdot \ln R + b$$

при чему је $b \cong 0$, односно:

$$p = a \cdot \ln R$$

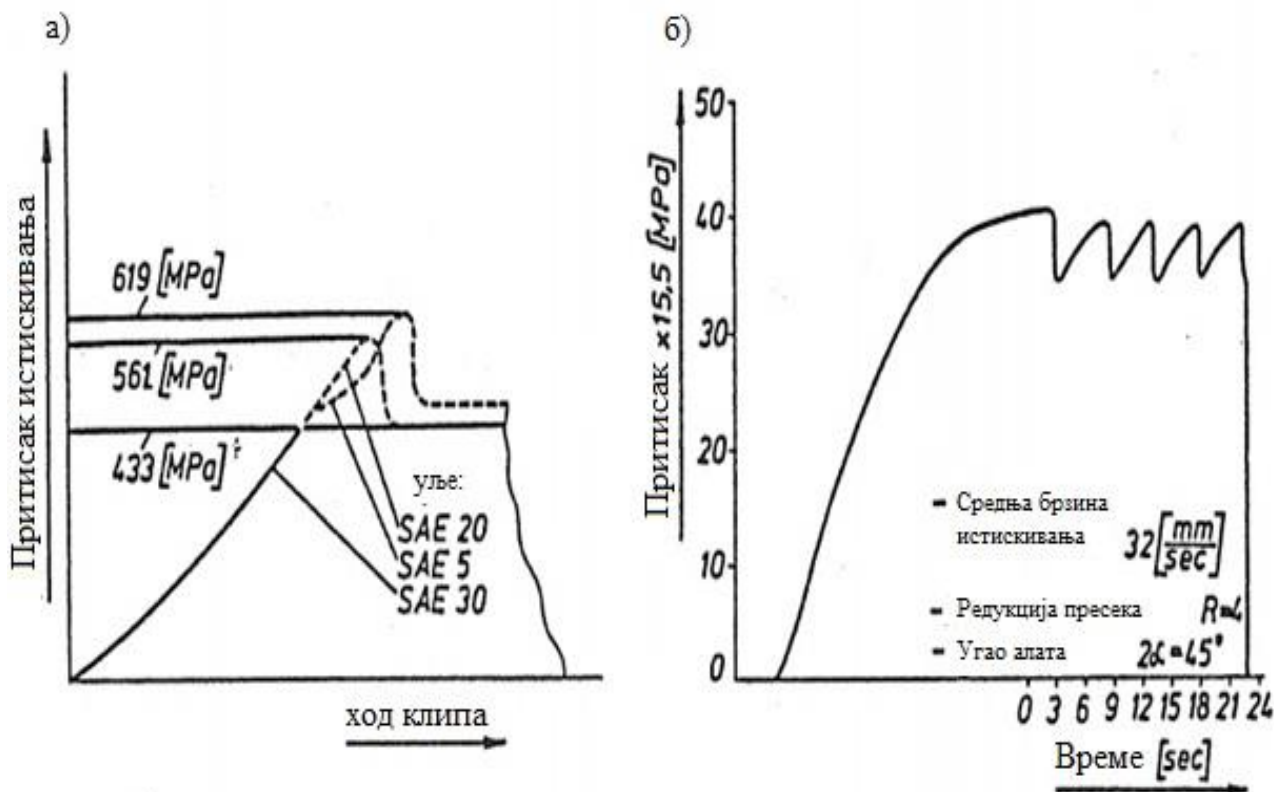
где a – представља фактор завистан од механичких особина материјала – специфичног деформационог отпора, односно тврдоће материјала. Ова зависност има следећи облик:

$$p = 157,5 \ln R (0,375 \text{ HV} + 4) \quad (\text{daN/cm}^2)$$

HV – тврдоћа материјала

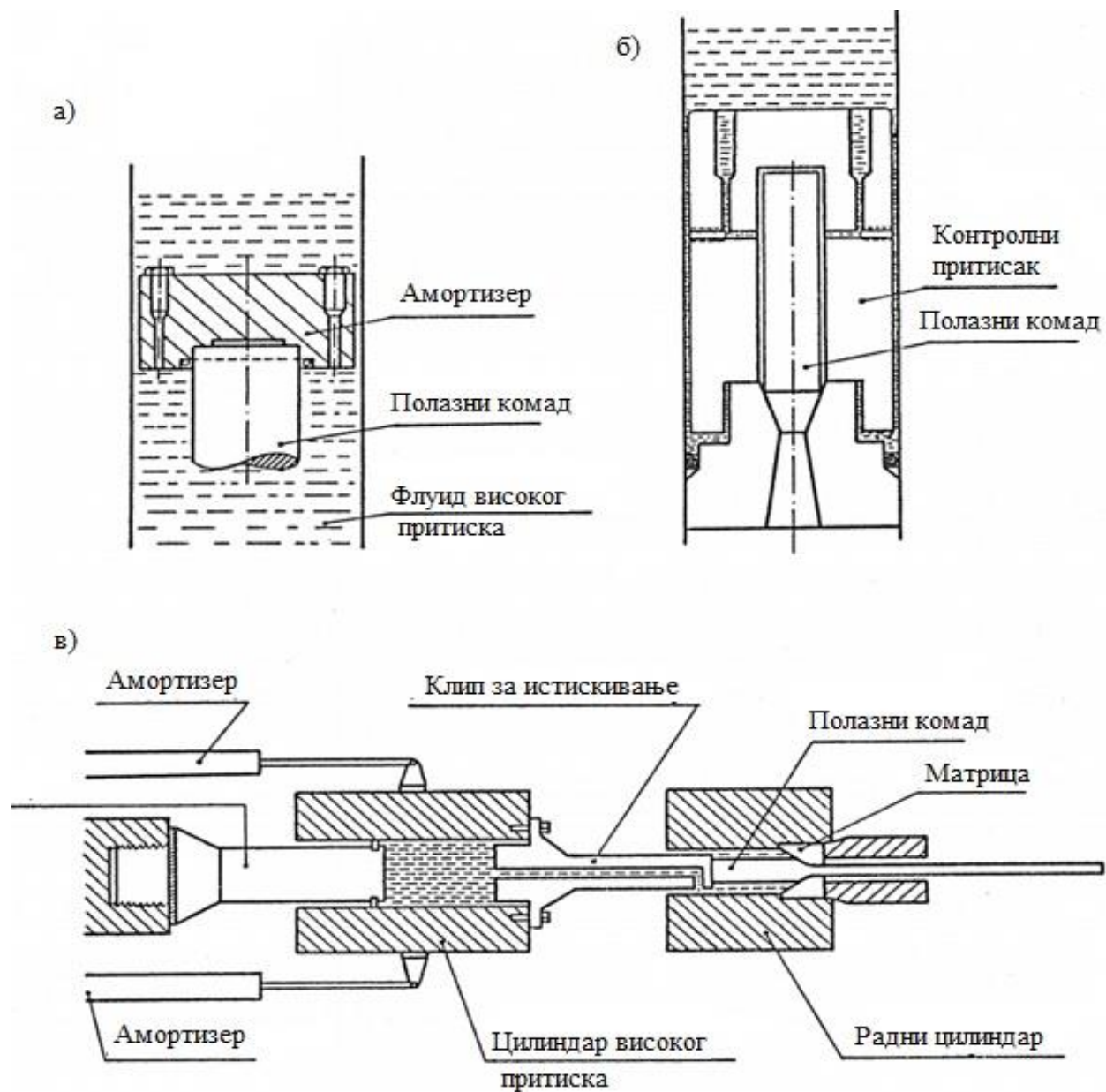
4.3. Стабилизација притисака

У почетној фази истискивања притисак течности знатно је већи од притиска у стабилној фази хидростатичког истискивања (сл. 1.19. а). Карактер ове промене зависи првенствено од квалитета употребљене течности и средстава за подмазивање. Уколико течност не садржи адекватно средство за подмазивање притисак истискивања неће се стабилизовати, биће присутна појава "stick-slip" ефекта (сл. 1.19. б), што може довести до оштећења на спољашњој површини радног комада.



Сл. 1.19. Промена притиска при хидростатичком истискивању

Стабилизација процеса хидростатичког истискивања постиже се и применом одговарајућих конструкционих мера (сл. 1.20.). У првом случају (сл. 1.20. а) стабилизација процеса се постиже помоћу силе трења која се ствара између диска и контејнера. Амортизациони диск је причвршћен за горњи крај радног комада, а течност у доњи део контејнера пролази кроз зазор између диска и контејнера. И у другом решењу (сл. 1. 20. б) користи се сила трења за стабилизацију процеса.



Сл. 1.20. Конструкциона решења за стабилизацију процеса

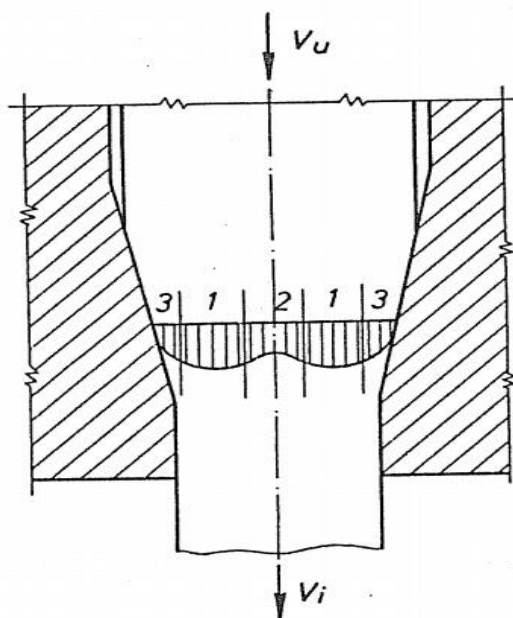
Стабилизација процеса истискивања код решења приказаног на сл. 1.20. в, остварена је специјалном конструкцијом целог система за хидростатичко истискивање. У овом случају полазни комад је учвршћен на крај радног клипа, а радни клип је везан за цилиндар високог притиска. Амортизери који су везани за цилиндар високог притиска спречавају повећање његове брзине, односно брзине клипа и радног комада. На тај начин се остварује стабилизација брзине а тиме и стабилизација притиска истискивања.

4.4. Улога противпритиска код хидростатичког истискивања

Израчунавање утицаја хидростатичког притиска на пластична својства материјала су показала да пластичност није особина већ стање у којем се материјал налази. Порастом притиска у зони деформације повећавају се могућности обликовања. Истискивање са противпритиском примењује се код тешко деформабилних материјала када обично хидростатичко истискивање не даје задовољавајући резултат.

Повећање притиска у зони деформације има двојаку улогу: спречавање настајања микрупукотина услед присуства затезних напона и стварање услова за елиминацију већ насталих пукотина. Противпритисак код хидростатичког истискивања има првенствено улогу да елиминише утицај затезних компоненти напона.

На сл. 1.21. је приказана дистрибуција брзине деформације у попречном пресеку радног комада из које се јасно запажа неравномерност проузрокована деловањем трења на контактної површини. Зона 1 има највећу брзину и повлачи са собом честице из зоне 2 и 3 услед чега долази до стварања затезних напона у радијалном правцу што доводи до појаве пукотина. Зависно од услова деформисања, могу у унутрашњости радног комада настати пукотине које ће се ширити ка периферији и изазвати потпуно разарање комада.



Сл. 1.21. Промена брзине деформације

Величина противпритиска која омогућује успешно истискивање зависи од врсте материјала, коефицијента трења, редукције пресека радног комада, угла матрице и др. Колмогоров даје израз за одређивање величине противпритиска (P_b):

$$P_b = 0,58 \sigma_t \left[\frac{1}{\sqrt{3}} + \left(\frac{\sigma}{\tau_e} \right) kr \right] - p$$

где је:

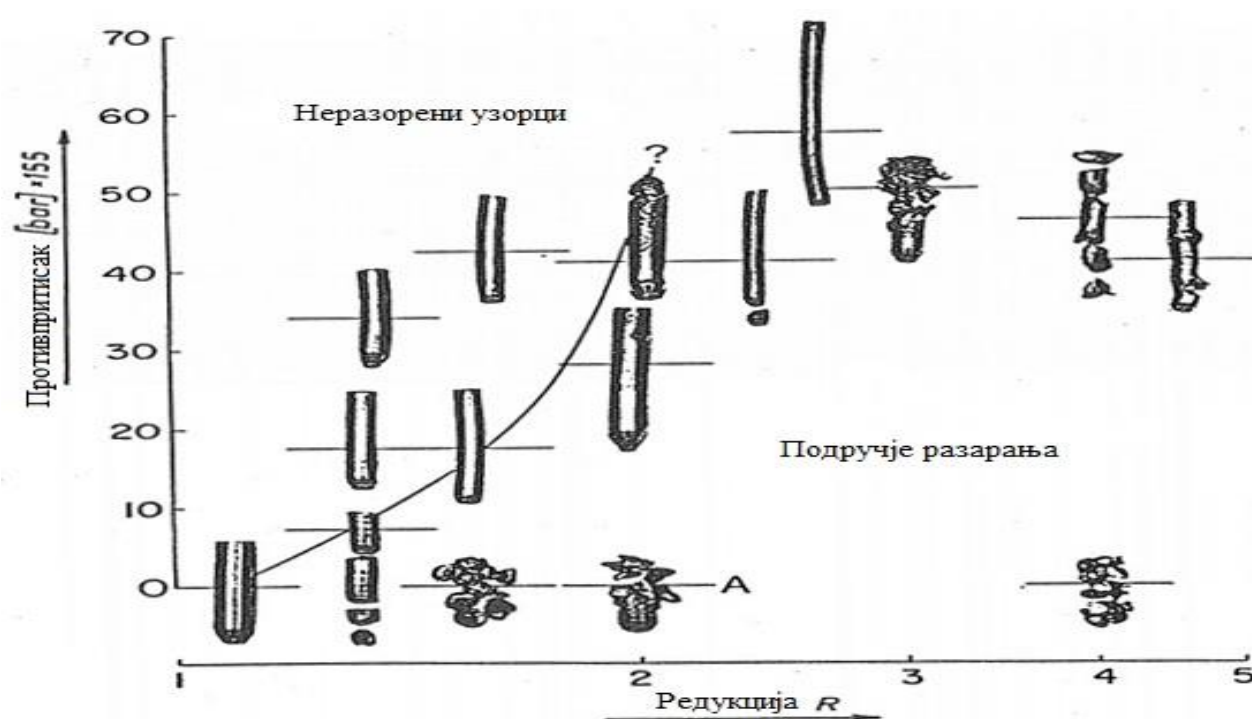
σ_t — напон течења

$\left(\frac{\sigma}{\tau_e} \right) kr$ - показатељ напона на критичном месту радног комада

σ — хидростатички напон

τ_e — тангенцијални ефективни напон

p — притисак у горњем цилиндру



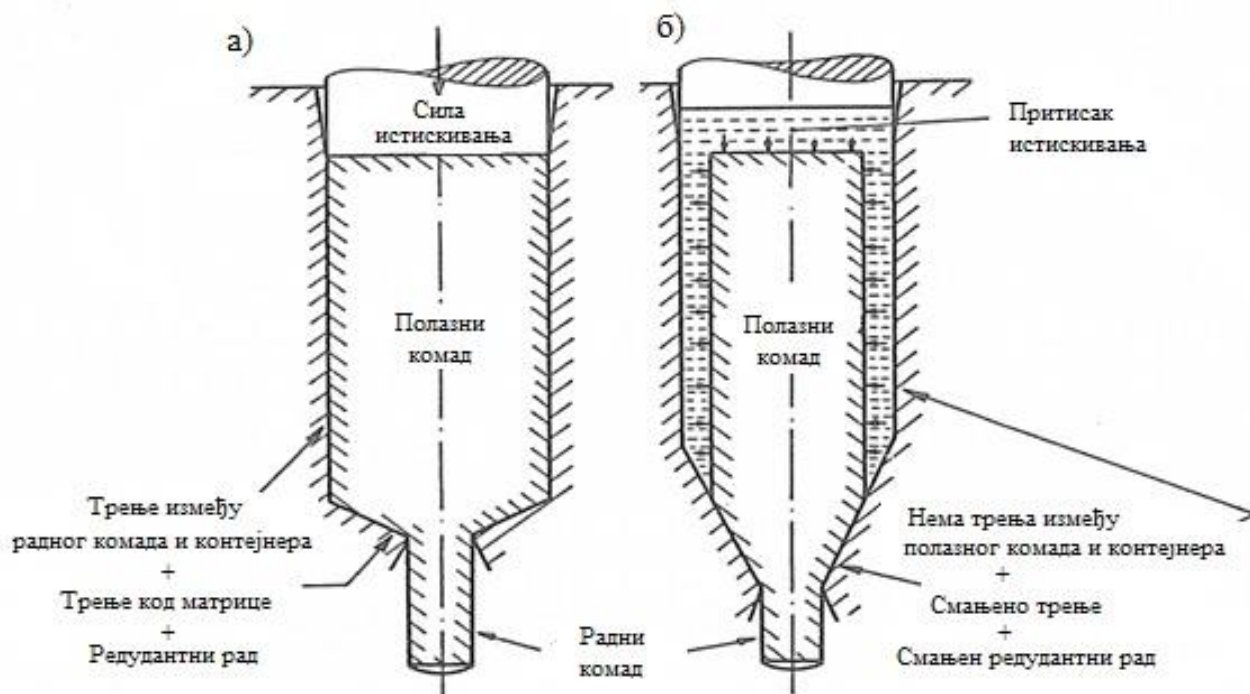
Сл. 1.22. Утицај противпритиска на редукцију

Пух је експериментално одређивао зависност противпритиска од различитих фактора. На сл. 1.22. је дата промена противпритиска у функцији редукције пресека при истискивању делова од легуре магнезијума са 9,5% Al, 0,5% Zn и 0,3%Mg са углом матрице од 45°.

5. ТЕХНОЛОШКЕ МЕТОДЕ ХИДРОСТАТИЧКОГ ОБЛИКОВАЊА

Већину технолошких метода хидростатичке обраде представљају поступци који постоје и у класичним верзијама:

- Хидростатичко истискивање;
- Хидростатичко вучење;
- Хидростатичко ковање (сабијање);
- Хидростатичко савијање;
- Хидростатичко дубоко извлачење;
- Хидростатичко обликовање цеви итд.



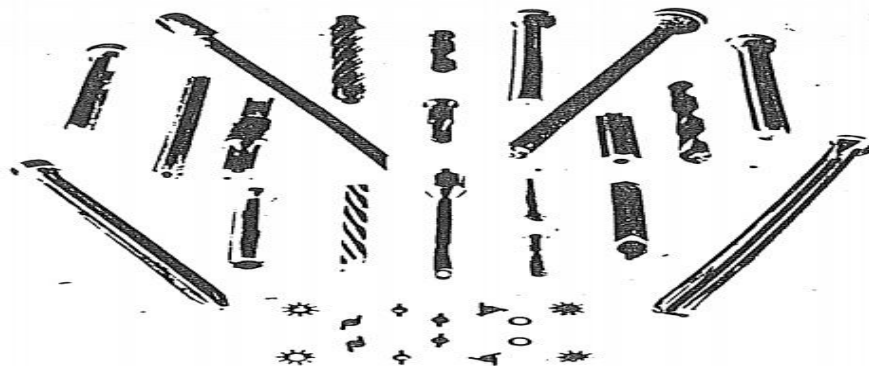
Сл. 1.23. Хидростатичко истискивање

Хидростатичко истискивање (сл. 1.23. б) представља процес хладног обликовања пуних и шупљих комада у алату са течношћу под високим притиском (преко 30.000 бара). Потребно оптерећење радног комада добија се помоћу течности под притиском а не директно преко чврстих елемената алата као што је то случај код класичног истискивања (сл. 1.23. а). присуство течности под високим притиском изазива одређене чисто практичне проблеме као што су конструкција одговарајућег контејнера - посуде, затим заптивање спојева, подмазивање, контрола стабилности процеса итд.

Повећање редуције пресека код хидростатичког истискивања произилази из два разлога: због позитивног утицаја хидростатичког притиска на грешке у структури материјала и због смањења утицаја трења односно повећања равномерности напонско-деформационог стања у зони деформације. Редуција код хидростатичког истискивања је за 50% и више већа у односу на класично истискивање.

Конструкција матрице за хидростатичко истискивање се разликује од матрице класичног процеса. Наиме, због окружења матрице високим притиском могуће је код хидростатичког истискивања користити танкозидну матрицу без бојазни од појаве лома.

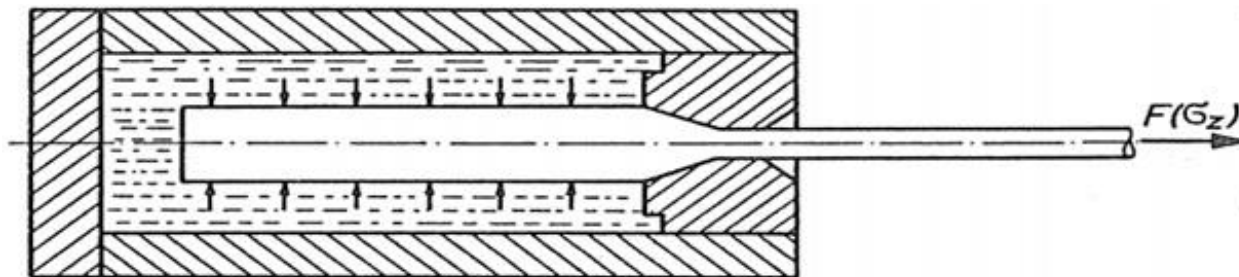
Облик попречног пресека радног комада не зависи од облика контејнера већ само од матрице те је на једном уређају могуће обликовати већи асортиман производа. Због смањеног утицаја трења могуће је обликовати делове веће дужине, са веома високом тачношћу димензија попречног пресека. На сл. 1.24. приказани су неки од производа хидростатичког истискивања.



Сл. 1.24. Производи хидростатичког истискивања

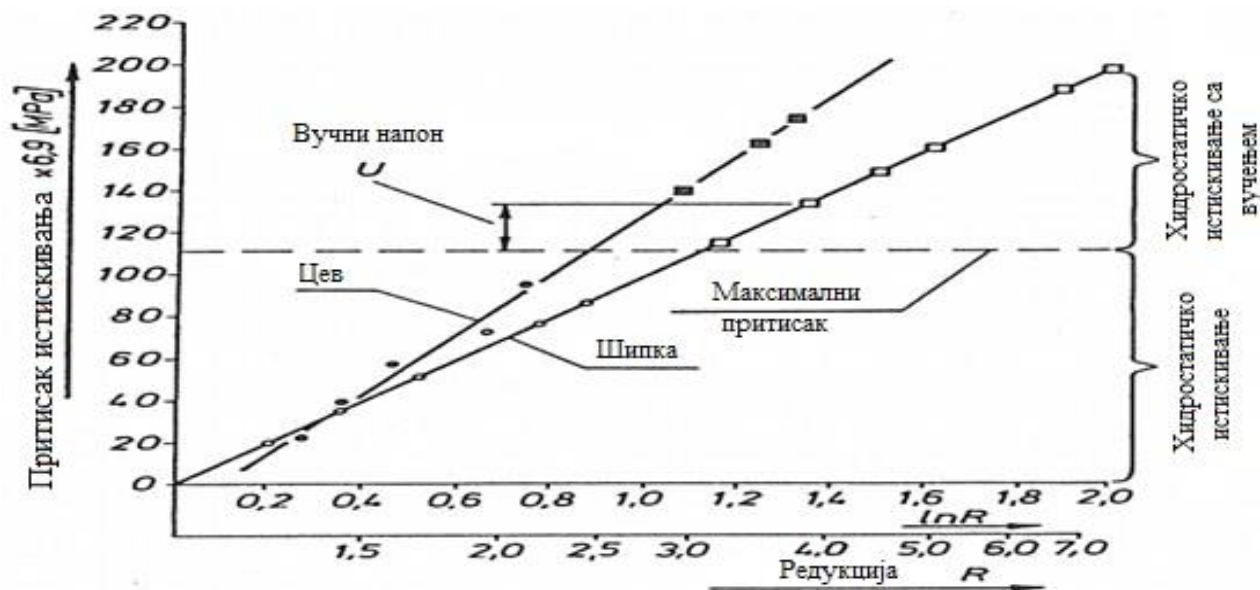
5.1. Хидростатичко истискивање вучењем

У овом случају поред хидростатичког притиска појављује се и додатна сила затезања која поред осталог утиче и на стабилизацију процеса обликовања умањујући појаву “stick-slip” ефекта и нестационарности притиска. Присуство затезне силе утиче и на смањење хидростатичког притиска, а такође се добија и бољи квалитет површине радног комада. Недостатак овог процеса је што се мора обезбедити посебан уређај који ствара вучну силу.



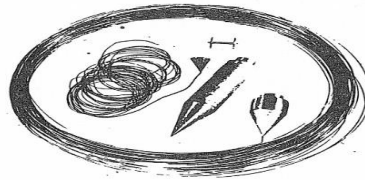
Сл. 1.25. Шема хидростатичког истискивања са вучењем

На сл. 1.26. је дат дијаграм који илуструје утицај затезног напона на редукацију пресека при истискивању са вучењем пуних комада и комада из цеви од меког челика. У случају пуних комада хидростатичким истискивањем са притиском од 7.700 бара остварује се редукација $R=3$, а повећањем затезног напона редукација се повећава и до 7.



Сл. 1.26. Утицај затезног напона на редукацију

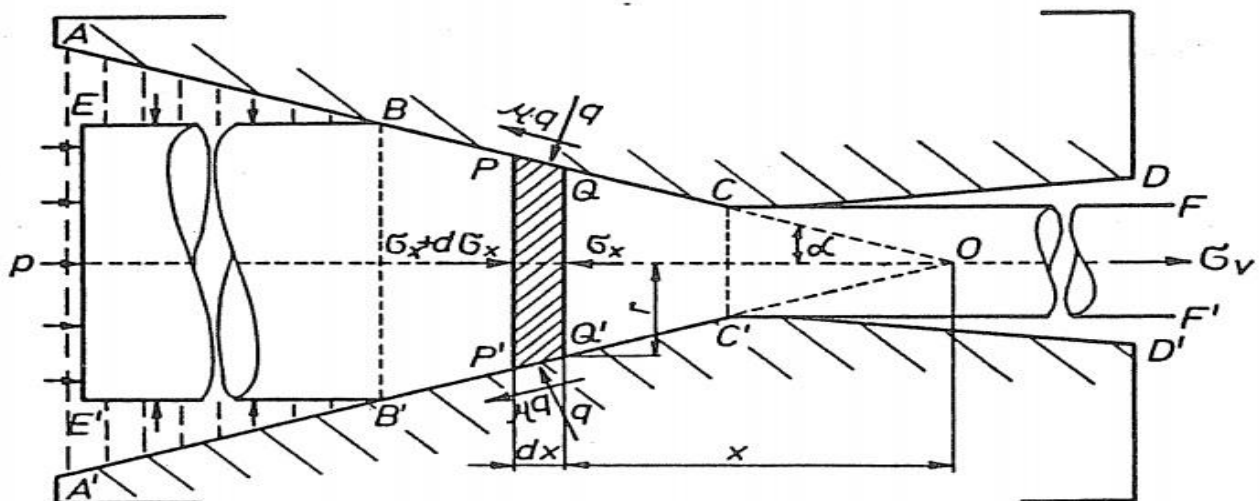
Поступак хидростатичког истискивања са вучењем је због својих техничких могућности веома атрактиван за индустријску примену у изради делова од челика и других материјала, кружног и другог облика попречног пресека. Због изузетно високих редукција пресека које се постижу у једној операцији овај поступак замењује од 10 до 20 операција класичног вучења код израде жица. На сл. 1.27. је приказана жица пречника 1 мм која је добијена у једној операцији од алуминијумског припремка (99,5%Al) пречника 38 мм.



Сл. 1.27. Жица добијена истискивањем са вучењем

5.1.1. Теорија процеса

Анализа напона код хидростатичког истискивања са затезањем извршена је према Заксовом моделу за случај хомогеног деформационог стања идеално пластичног радног комада (без укључивања ојачавања током деформисања) и са занемарљивањем рада који се троши на савлађивање унутрашњег трења.



Сл. 1.28. Шема оптерећења

На основу шеме оптерећења (сл. 1.28.) може се написати једначина равнотеже свих сила у аксијалном правцу:

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \cdot (r + dr)^2 - \sigma_x \cdot r^2 - 2\pi r \cdot dl \cdot q(\sin \alpha + \mu \cos \alpha) = 0$$

чијим сређивањем се добија:

$$r \cdot d\sigma_x = 2 \cdot dr [q(1 + \mu \cotg \alpha) - \sigma_x]$$

где је $dl = dr / \sin \alpha$, q – нормални контактни притисак у посматраној зони

Ако се у горњем изразу ради лакше анализе занемари треће чији је утицај код хидростатичког обликовања незнатан, добија се следећа једначина:

$$r \cdot d\sigma_x = 2 \cdot dr (q - \sigma_x)$$

Једначина услова пластичности за постојећу шему напона гласи:

$$\sigma_x - q = K$$

добија се:

$$\sigma_v + p = K \cdot \varphi = \text{const}$$

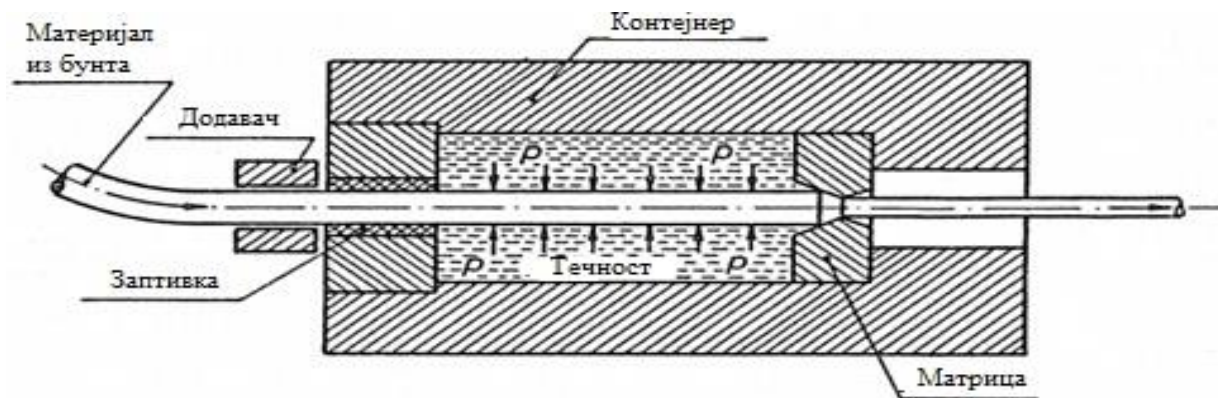
$$\varphi = \ln R \quad R = \frac{A_0}{A_1}$$

Из горње једначине произилази да је код хидростатичког истискивања са вучењем збир хидростатичког притиска (p) и затезног напона (σ_v) константан, при чему је K – деформациони отпор.

5.2. Хидростатичко обликовање делова неограничене дужине и континуални поступци

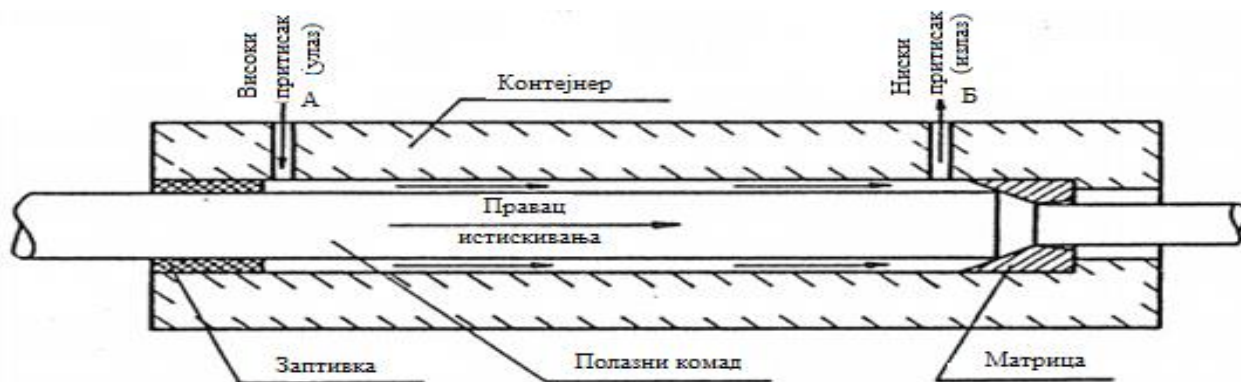
Код континуалног процеса, чија је генерална шема дата на сл. 1.29. мора се помоћу специјалног уређаја – додавача обезбедити минимална аксијална сила која ће омогућити доток материјала у цилиндар високог притиска. У одсуству додавача материјала деловање

хидростатичког притиска у радијалном правцу на полазни комад довело би до његовог стањења па чак и до разарања и избацивања полазног комада назад из цилиндра. Због тога се мора обезбедити аксијална сила која ће то спречити и омогућити истискивање материјала кроз матрицу.



Сл. 1.29. Истискивање радних комада неограничене дужине

Боље техничко решење истискивања радног комада неограничене дужине приказано је на сл. 1.30. и представља такозвани континуални поступак хидростатичког обликовања. Аксијална сила у овом случају остварује се активним деловањем силе трења која се ствара између течности и радног комада. Течност се у цилиндар убацује кроз отвор А а излази кроз отвор Б. Недостатак ове конструкције је значајан пад притиска течности од улаза до излаза што условљава релативно низак притисак у зони деформације и умањује основно својство хидростатичке обраде.

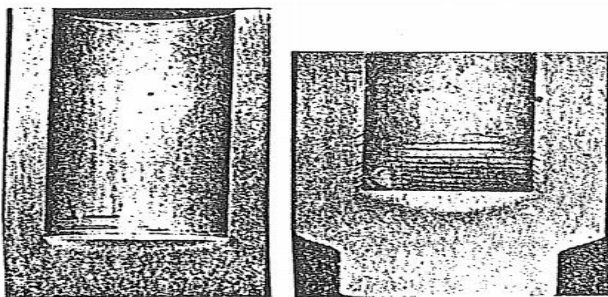


Сл. 1.30. Континуално истискивање

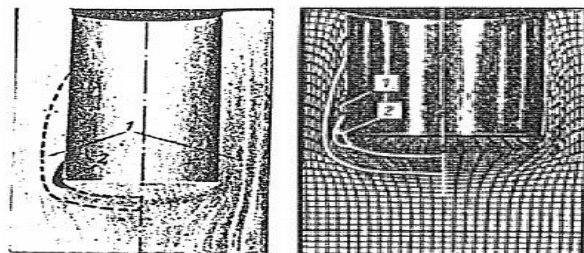
5.3. Поступци обликовања са повећаним хидростатичким притиском оствареним механичким путем

5.3.1. Супротносмерно истискивање

Рене и Подливајев указују на могућност појаве пукотина при хладном истискивању радног комада од дуралуминијума (сл. 1.31.). Етапним посматрањем радног комада са претходно нанетом координантном мрежом, установљено је да је у процесу истискивања веома изражена неравномерност деформације која расте са порастом хода алата. Зоне са најинтензивнијим течењем метала (ефективна деформација је највећа) налазе се на унутрашњој површини зида – зона 1 и на ивици притискивача – зона 2 (сл. 1.32.).

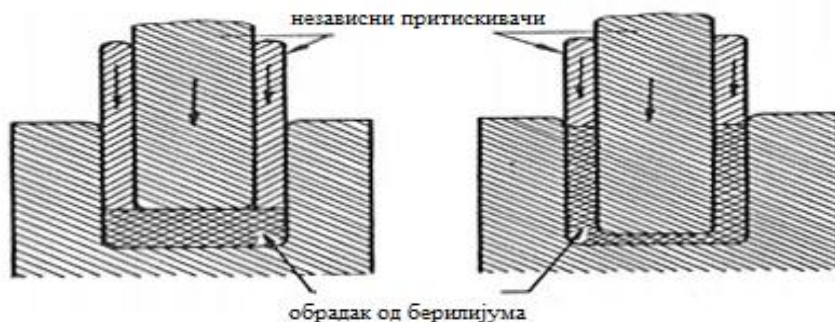


Сл. 1.31. Узорци од дуралуминијума



Сл. 1.32. Зоне интензивног течења метала

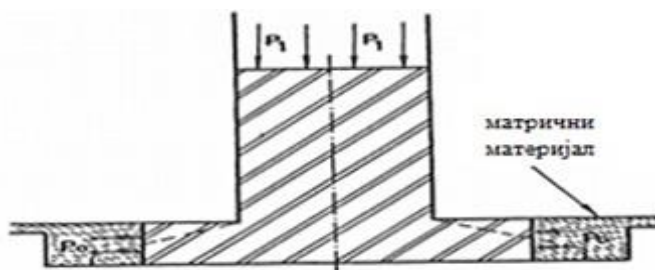
Ради побољшања напонског стања при супротносмерном истискивању радног комада од берилијума, примењена је конструкција (сл. 1.33.) која додатним притискивачем са погоном независним од кретања притискивача, повећава хидростатички напон у зони деформисања, што је повећало деформабилност материјала.



Сл. 1.33. Супротносмерно истискивање с механичким повећањем хидростатичког напона

5.3.2. Радијално истискивање

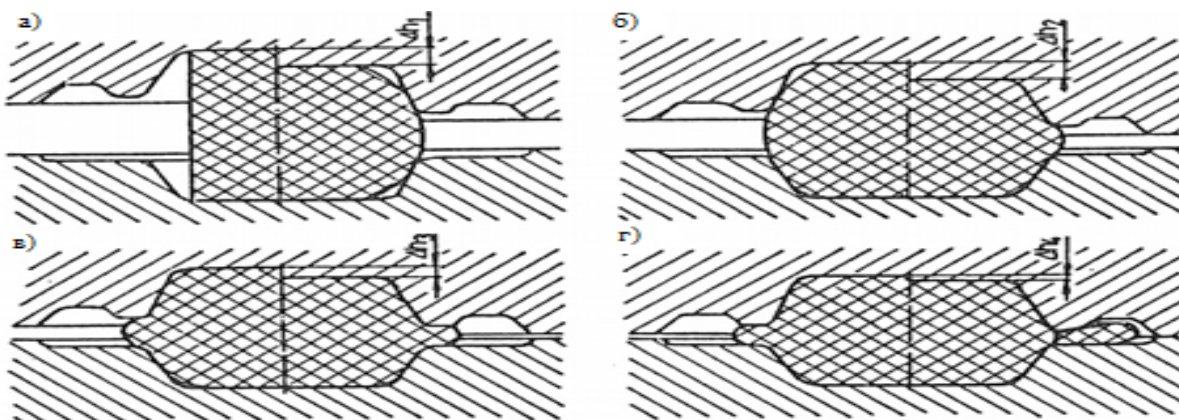
На сл. 1.34. шематски је приказано обликовање прирубнице поступком радијалног истискивања. Процес се одвија у условима повећаног хидростатичког притиска, што је остварено пригушивањем течења материјала кроз спољни канал. За ову сврху препоручује се олово, затим легуре на бази олова, бизмута и други материјали.



Сл. 1.34. Обликовање прирубнице

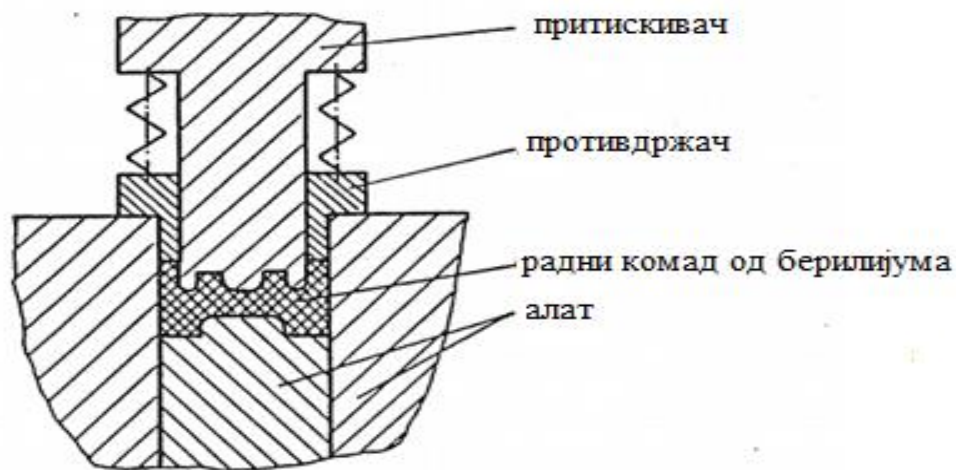
5.3.3. Ковање у отвореном калупу

За процес ковања у отвореном калупу такође се може рећи да се одвија у хидростатичким условима (сл. 1.35.). У завршној фази израде отковка долази до истицања метала кроз канал венца, односно кочења течења метала, што изазива снажно повећање хидростатичког притиска у зони деформисања и ствара услове за добро попуњавање шупљине калупа и спречавање појава пукотина.



Сл. 1.35. Фазе ковања у отвореном калупу

На сл. 1.36. дат је пример ковања у затвореном калупу при којем се повећање хидростатичког притиска у зони деформисања остварује механичким путем, уз помоћ додатног притискивача са опругама. Уређај је био коришћен за ковање берилијума на температурама од око 1000°C.

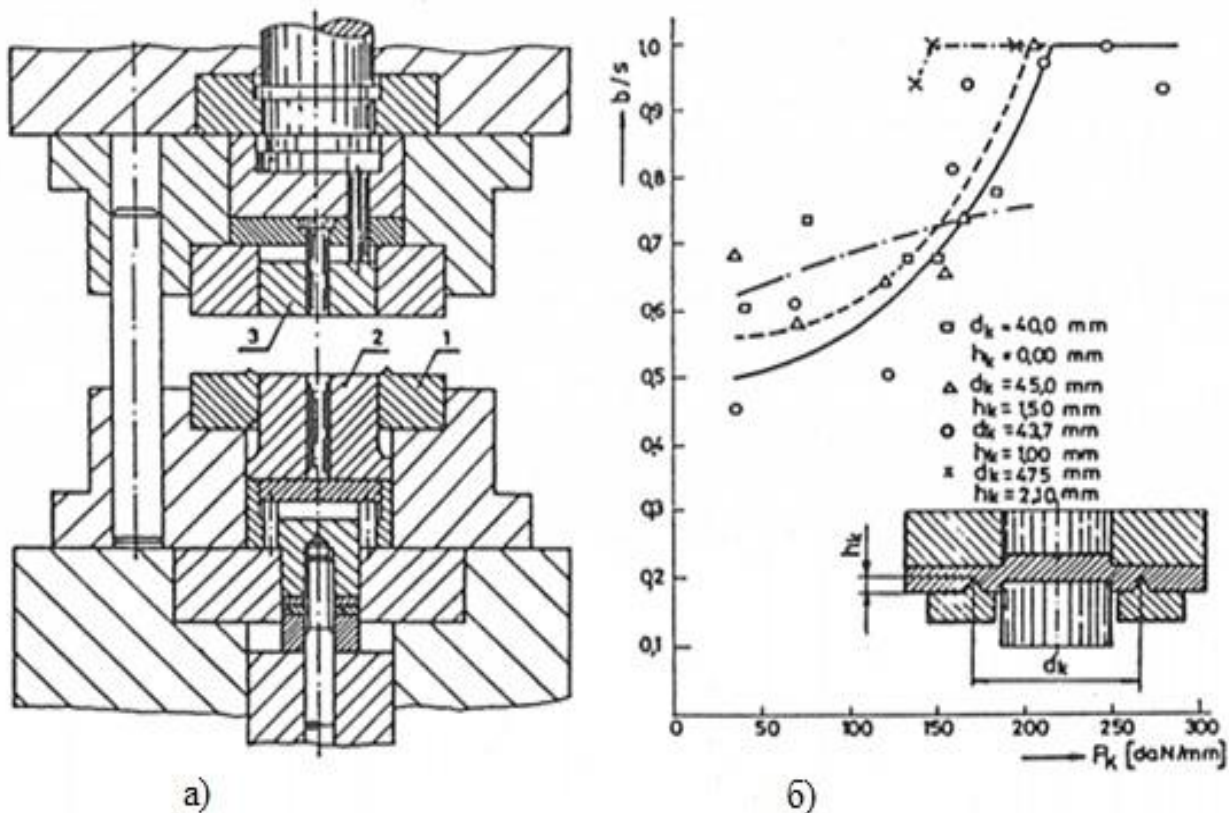


Сл. 1.36. Хидростатичко ковање у затвореном калупу

5.3.4. Фино раздвајање

На сл. 1.37. дат је приказ алата за фино раздвајање код којег се повећање хидростатичког притиска у зони раздвајања реализује деловањем следећих елемената: утискујућег ребра (1), притискивача (2) и противдржача (избацивача) (3). Машина за фино раздвајање пресовањем је троструког дејства. Редослед деловања појединих елемената алата је следећи: најпре се утискујуће ребро утискује у материјал и на тај начин се ствара додатни бочни притисак у зони деформисања. Затим делује притискивач (2) а његовом кретању супроставља се избацивач (3).

На сл. 1.37 б. дат је однос висине глатког дела и дебљине материјала у зависности од специфичне силе на утискујућем ребру. Из дијаграма се може закључити да порастом специфичног притиска расте висина глатког дела радног комада, односно да порастом контурног притиска расте квалитет радног комада.



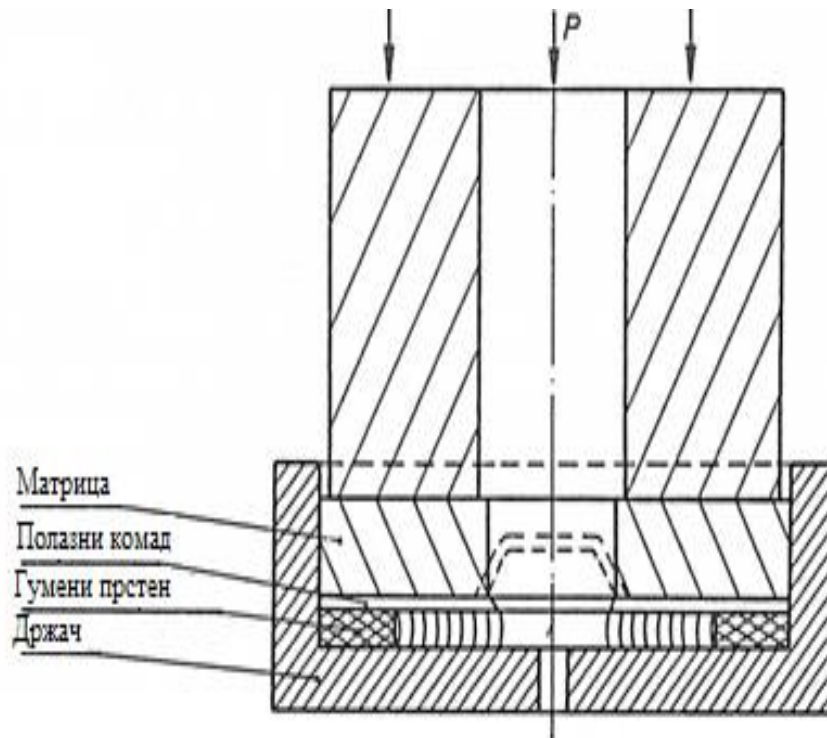
Сл. 1.37. Fino раздвајање: а) конструкција алата, б) зависност квалитета површина од оптерећења утискујућег ребра

5.3.5. Дубоко извлачење

Степен деформације, тј. однос извлачења код класичног дубоког извлачења лимитиран је напоном извлачења који у омотачу радног комада не сме прекорачити затезну чврстоћу, тј. мора бити задовољен услов $\sigma_i < \sigma_m$.

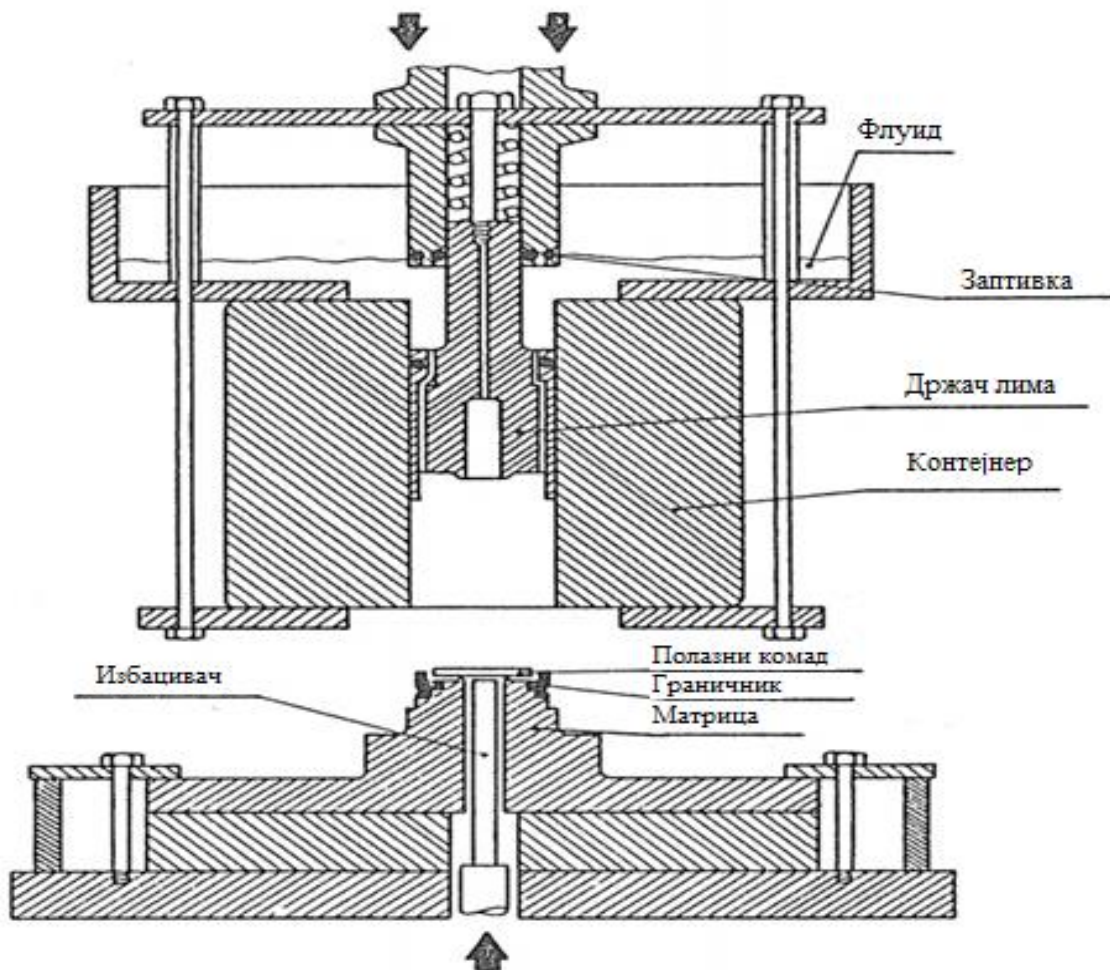
Формирање цилиндричног омотача код конвенцијалног извлачења остварује се деловањем притискивача на дно радног комада услед чега се у омотачу ствара затезни напон који се преко радијуса матрице преноси на равни део радног комада. У тренутку када напон извлачења достигне вредност чврстоће материјала долази до локализације деформације, а затим и до разарања. Да би се ово избегло потребно је изменити напонску шему и затезне напоне заменити притисним.

На сл. 1.38., дато је једно решење дубоког извлачења где се као активна сила користи сила трења која настаје на доњој површини радног комада на контакту са гумом. Услед притиска горњег прстена и држача гуме долази до течења гуме у радијалном правцу и стварања активне силе трења која помера честице материјала ка отвору матрице, омогућавајући на тај начин формирање цилиндричног радног комада без присуства активне силе затезања.



Сл. 1.38. Дубоко напонско извлачење са промењеном напонском шемом

На сл. 1.39. је приказано решење уређаја за хидростатичко дубоко извлачење код којег се активна сила ствара деловањем течности високог притиска у радијалном правцу по прстенастој површини по дебљини полазног комада. Радни комад је осно симетричан, са оштрим степенастим прелазима. Течност под притиском продире између радног комада и држача лима и матрице смањујући трење на минимум. За иницирање процеса извлачења потребно је деловати притискивачем са веома малом силом, тј. дубоко извлачење се обавља са незнатним затезним напоном.



Сл. 1.39. Хидростатичко дубоко извлачење

Помоћу овог уређаја са притиском од око 7.000 бара Фукс је на узорцима од бакра остварио однос извлачења $D_0/d_1 = 4$.

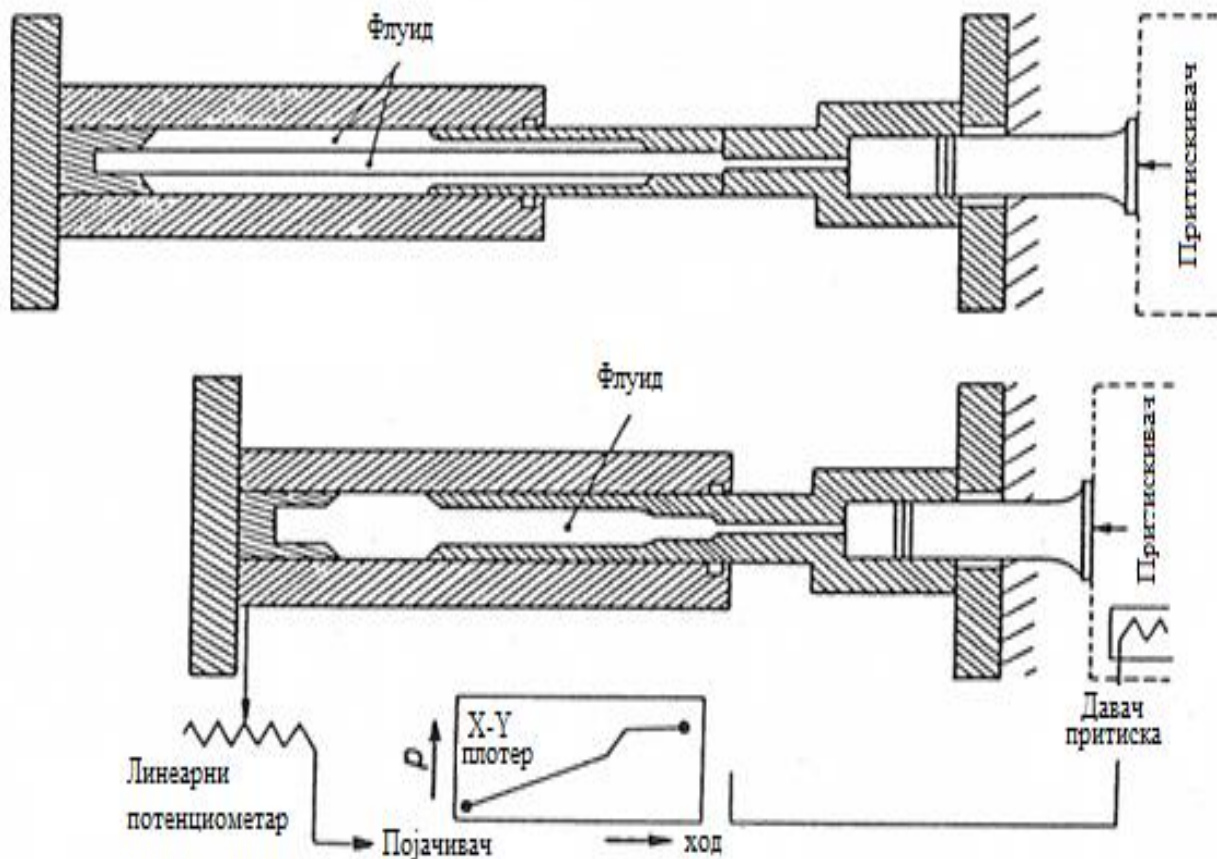
5.3.6. Обликовање цеви

Две операције обликовања цеви у хидростатичким условима укратко су изложене у наставку:

- експандирање цеви
- формирање прирубнице.

Класични поступак експандирања цеви изводи се на тај начин што се у унутрашњост затворене цеви убацује флуид под притиском чијим деловањем се стварају затезни напони те се формирање новог облика изводи искључиво затезањем.

На сл. 1.40. је приказан уређај за хидростатичко експандирање цеви. Цев (полазни комад) је испуњена и окружена радном течношћу. Померањем покретног блока алата на десну страну повећава се унутрашњи притисак у цеви а такође се ствара и аксијално притисно оптерећење у полазном комаду на основу чега се изводи проширивање цеви. Комбинацијом унутрашњег и спољашњег притиска и аксијалне силе на полазном комаду може се постићи да се проширивање цеви оствари без смањења дебљине материјала. Однос пречника према подацима са слике је 2.0, тј., укупна деформација је 100%, што је у односу на класично експандирање 4-5 пута више.



Сл. 1.40. Уређај за хидростатичко експандирање цеви

6. ТЕХНОЛОГИЈА ХИДРОСТАТИЧКОГ ОБЛИКОВАЊА

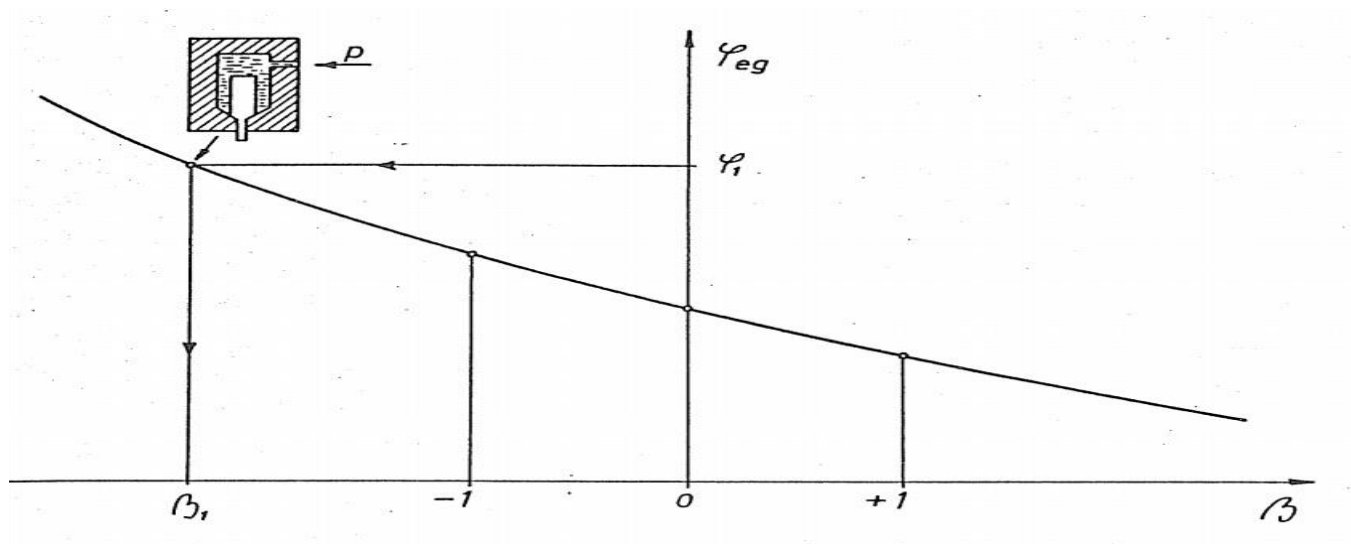
Пројектовање технолошког процеса хидростатичког истискивања обухвата низ активности потребних да се од полазног материјала добије жељени производ. Те активности су следеће:

1. Испитивање механичких својстава и деформабилности материјала радног комада;
2. Избор технолошке шеме обликовања;
3. Прорачун технолошких параметара процеса;
4. Избор радне течности;
5. Пројектовање и конструкција уређаја и алата за хидростатичко обликовање;
6. Машине за хидростатичко обликовање.

6.1. Механичка својства и деформабилност полазног материјала

Пре избора оптималне варијанте, односно у фази тражења могућег решења за постављање технолошког процеса неопходно је познавати механичка својства материјала од којег се израђује дати део као и карактеристике пластичности, односно, деформабилност материјала. С обзиром да се хидростатичким обликовањем добијају делови и из тешко обрадивих материјала то би за пројектовање технолошког процеса било од велике користи познавати дијаграм граничне деформабилности (сл. 1.41.), који директно повезује могућу величину деформације у зависности од услова обраде дефинисаних компонената напонског стања.

Примена дијаграма граничне деформабилности у пројектовању технологије хидростатичке обраде омогућује да се на основу потребне ефективне деформације дефинишу напонски услови обликовања (β – фактор, сл.1.41.) односно величина потребног хидростатичког напона у зони деформације.



Сл. 1.41. Дијаграм граничне деформабилности

Према томе, проблематика деформабилности материјала код хидростатичког обликовања обухвата два врло важна задатка:

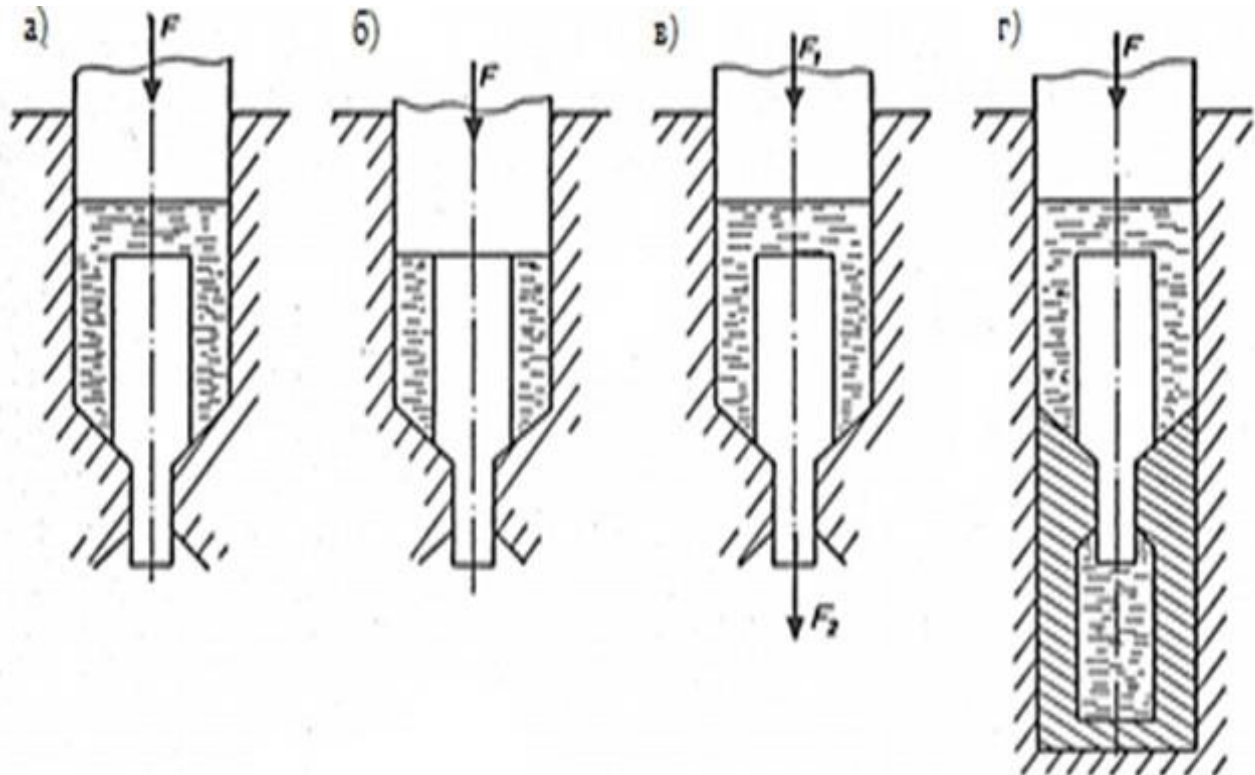
1. Дефинисање дијаграма граничне деформабилности за задати материјал и
2. Примену дијаграма граничне деформабилности за дефинисање напонских услова хидростатичке обраде.

6.2. Избор технолошке шеме обликовања

Основне технолошке шеме хидростатичког истискивања обрађене су у поглављу 1.3 и међу њима треба тражити идеје за реализацију конкретног решења. У суштини постоје следећи видови хидростатичког истискивања:

1. Чисто хидростатичко истискивање;
2. Хидромеханичко истискивање;
3. Истискивање затезањем и
4. Истискивање противпритиском.

Чисто хидростатичко истискивање (сл. 1.42. а) по својим могућностима задовољава код великог броја материјала. Захваљујући повољном напонском стању и елиминацији утицаја трења остварују се велике деформације без разарања. Међутим, овај поступак има и одређених недостатака. Непостојање механичке везе клипа и радног комада отежава регулацију брзине истискивања и притиска, што може имати за последицу погоршање квалитета радног комада.



Сл. 1.42. Шеме хидростатичког обликовања

Код хидромеханичког истискивања (сл. 1.42. б и в) поред високог притиска делује и механичка сила са горње или са доње стране радног комада (вучење). У овом случају процес задржава све погодности хидростатичке обраде уз смањење притиска због дејства допунске силе. Такође су елиминисани проблеми регулације притиска и брзине обликовања.

Хидростатичко обликовање са противпритиском (сл. 1. 42. г) примењује се за обраду тешко деформабилних материјала. Притисак у доњем цилиндру који је нижи од притиска у радном цилиндру, елиминише затезне напоне и на тај начин ствара погодније напонско стање у зони деформације.

6.3. Прорачун оптималних технолошких параметара хидростатичког истискивања

При прорачуну технолошких параметара хидростатичког истискивања морају се имати у виду параметри радног комада, тј.

- а) врста материјала, односно, хемијски састав;
- б) облик и димензије радног комада,
- в) механичка својства радног комада.

Прорачун оптималних технолошких параметара врши се на бази анализе процеса из претходних поглавља:

6.3.1. Димензије полазног комада

а) Пречник полазног комада – одређује се на основу дозвољеног степена деформације (препоручених вредности или података из дијаграма обрадивости) и димензије радног комада:

$$D_0 = \sqrt{R \cdot d^2}$$

D_0 – пречник полазног комада

d – пречник радног комада

R – редукција пресека

$$R = \frac{A_0}{A} = \frac{D_0^2}{d^2}$$

б) Дужина полазног комада – одређује се из услова једнакости запремине полазног комада и запремине радног комада.

6.3.2. Оптимална величина угла матрице одређује се:

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{3}{2} \sqrt{3} \cdot \mu \cdot \left(1 + \ln \frac{D_0}{d}\right) \cdot \ln \frac{D_0}{d}}$$

μ – коефицијент трења, обично се узима $\mu = 0,05$

D_0 – пречник полазног комада

d – пречник радног комада

6.3.3. Прорачун топлотних ефеката

При хидростатичком обликовању долази до повећања температуре радног комада, као и код других технолошких метода, јер се деформациона енергија претвара у топлоту. Ослобођену енергију апсорбује радна течност те због тога долази до повећања њене температуре што се може негативно одразити на квалитет радног комада у погледу механичких карактеристика (пад тврдоће и чврстоће и елиминација утицаја ојачавања). Осим тога, прорачун прираштаја температуре је важан за избор радне течности и средстава за подмазивање.

Прираштај температуре радног комада и радне течности може се извести на основу енергетског биланса уз претпоставку да се ослобођена деформациона енергија претвара у топлоту.

6.3.4. Притисак радне течности одређује се:

$$p = \sigma_T \left\{ 2 \cdot f(\alpha) \ln \frac{D_0}{d} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right) + 2\mu \cotg \alpha \cdot \left[\left(1 + \ln \frac{D_0}{d} \right) \cdot \ln \frac{D_0}{d} + \frac{2h_k}{d} \right] \right\}$$

σ_T – граница течења полазног комада

h_k – висина калибрирајућег дела матрице

$f(\alpha) \cong 1$ – функција угла матрице

α – угао матрице

D_0 – пречник полазног комада

d - пречник радног комада

μ – коефицијент трења, обично се узима $\mu = 0,05$

6.3.5. Величина противпритиска:

$$p_d = 0,58 \sigma_T \left[\frac{l}{\sqrt{3}} - \left(\frac{\sigma}{\tau_e} \right)_{kr} \right] - p$$

где је:

$\left(\frac{\sigma}{\tau_e} \right)_{kr}$ – показатељ напонског стања на критичном месту радног комада

σ – хидростатички напон

τ_e – ефективни тангенцијални напон

σ_T – граница течења полазног комада

p - притисак радне течности

6.3.6. Прорачун потребне количине течности

- Висина стуба течности над горњом ивицом радног комада износи:

$$l_1 = \frac{\left(1 - \frac{D_0^2}{d} \right) \cdot 1 \cdot \beta \cdot p}{1 - \beta \cdot p}$$

где је:

l - висина радног комада

β – коефицијент стишљивости радне течности

p - притисак радне течности

6.4. Избор радног флуида и средстава за подмазивање

Од радне течности веома зависи квалитет делова добијених хидростатичким обликовањем као и притисак који је потребно створити да би се иницирао процес хидростатичке обраде.

За хидростатичко обликовање примењују се три основне врсте радне материје:

1. Чврста радна материја (олово и његове легуре, затим синтетички материјали);
2. Пасте и прашкасти материјали (графит, раствори са MoS_2 и др.);
3. Течности (уља и раствори).

Чврсте и прашкасте материје примењују се у случају хидростатичког обликовања на повишеним температурама. Основна предност ових материјала је једноставно заптивање радног цилиндра, а користе се за притисак од 40.000 бара до 100.000 бара.

Знатно више у примени су течне радне материје, а оне морају задовољавати следеће захтеве:

- а) Треба да имају малу стишљивост при високим притисцима;
- б) Вискозитет треба да се што мање мења са порастом притиска и да имају “чврст” подмазни филм на контактної површини радног комада и алата;
- в) Треба да имају висока антификциона својства и не смеју изазивати корозију

Еластична својства радних течности су такође веома важна и утичу на апсорпцију енергије а такође и на стабилност брзине истискивања

Промена вискозности радне течности у зависности од температуре и притиска може се исказати релацијом:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\alpha \cdot m \cdot p}$$

η_0 – вискозност при $p = 1$ бар и $t = 20^\circ C$

α – коефицијент притиска

m – коефицијент температуре

p - притисак радне течности

У табели 1.1. су дате вредности вискозности η_0 и коефицијента α на собној температури за разне врсте течности.

Врста течности	$\eta_0 \cdot 10^{-1}$ (PaS)	$\alpha \cdot 10^3$
Трансформаторско уље	0,171	2,01
Вазелинско уље	0,733	2,35
Рицинусово уље	4,79	1,31
Турбинско уље	0,462	2,36
Вретенско уље	0,249	2,14
Глицерин	2,39	0,324

Вискозност радне течности значајно утиче на квалитет радног комада. При недовољно високој вискозности немогуће је формирати и одржавати подмазни слој између контактних површина алата и радног комада. Порастом притиска расте и вискозност течности, а тиме и дебљина подмазног филма на контактним површинама.

Зависност дебљине филма (h) од вискозности и притиска има следећи облик:

$$h = \frac{\sqrt{\eta \cdot v \cdot l}}{p_{sr}}$$

v – брзина истискивања

l – дужина конуса матрице

p_{sr} – средњи притисак

Избор радне течности зависи од врсте материјала који се обрађује, степена деформације и притиска у радном цилиндру. У случају истискивања са притиском до 5.000 бара успешно се примењује трансформаторско, машинско и рицинусово уље. При раду са притисцима од 10.000 до 15.000 бара овим уљима се додаје и одређени проценат бензина, керозина или шпиритуса. При раду са притисцима преко 15.000 бара добре резултате дају смеше глицерина са етиленгликолом као и раствори керозина, бензина и минералног уља.

Од врсте радне течности зависи у значајној мери и карактер трења (од граничног до хидродинамичког). Побољшање антифрикционих особина радне течности постиже се додавањем одређених материја које су по квалитету поређане у табели 1.2.

Веома добри резултати код хидростатичког истискивања постигнути су применом MoS_2 као подмазујућег средства у комбинацији са различитим врстама радне течности. Ова материја примењује се и код конвенционалних поступака обраде, стабилна је и не оксидише на температурама до 400°C.

Табела 1.2. Коефицијент трења

МАТЕРИЈА	коеф. трења
Стеаринска киселина	0,022
Молибдендисулфид (MoS_2)	0,032
Графит	0,036
Турбинско уље	0,060
Палмино уље	0,063
Рицинусово уље	0,064
Цинкоксид	0,071
Сапунски прашак	0,076
Турбинско уље са 1% графита	0,081
Машинско уље	0,099
Лискунов прашак	0,26

За постизање бољих ефеката подмазивања потребно је извршити припрему површина полазног комада чији је циљ да се постигне боља адхезија средстава за подмазивање и његова боља равномерност. Припрема обухвата:

а) Чишћење површина полазног комада (стругање, пескарење и нагризање хемијским средствима);

б) Наношење металног пластичног слоја превлаке (бакар, кадмијум, олово и др.);

в) Наношење средства за подмазивање на површину радног комада.

Правилна припрема површине радног комада смањује контактено трење, побољшава квалитет површине, смањује укупни радни притисак и повећава стабилност процеса.

7. МАШИНЕ И АЛАТИ ЗА ХИДРОСТАТИЧКО ОБЛИКОВАЊЕ

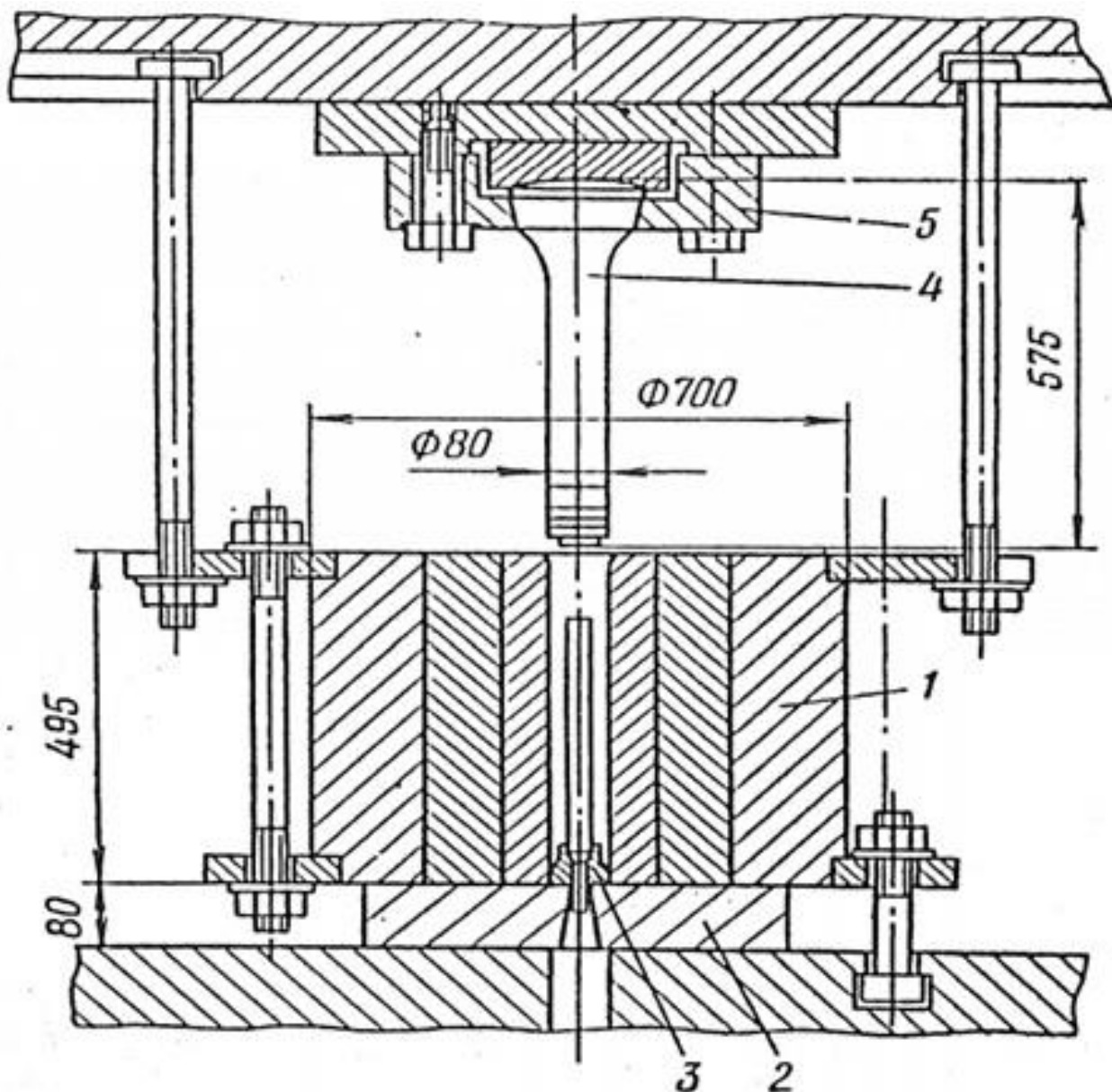
Једна од озбиљнијих препрека широј примени хидростатичког обликовања јесте потреба за специјалним уређајима и алатима конструисаним тако да са сигурношћу могу издржати високе притиске који омогућавају стварање потребних услова за течење метала уз претпоставку довољне продуктивности.

Почетни развој уређаја за хидростатичко обликовање био је усмерен на коришћење стандардних хидрауличних преса уз изградњу одговарајућих уређаја и алата. Касније се у индустријској примени јавиле и специјалне машине чија је основна карактеристика повећање производности.

7.1. Уређаји директног дејства

Ова врста уређаја за хидростатичко обликовање може се користити на вертикалним и хоризонталним хидрауличним пресама.

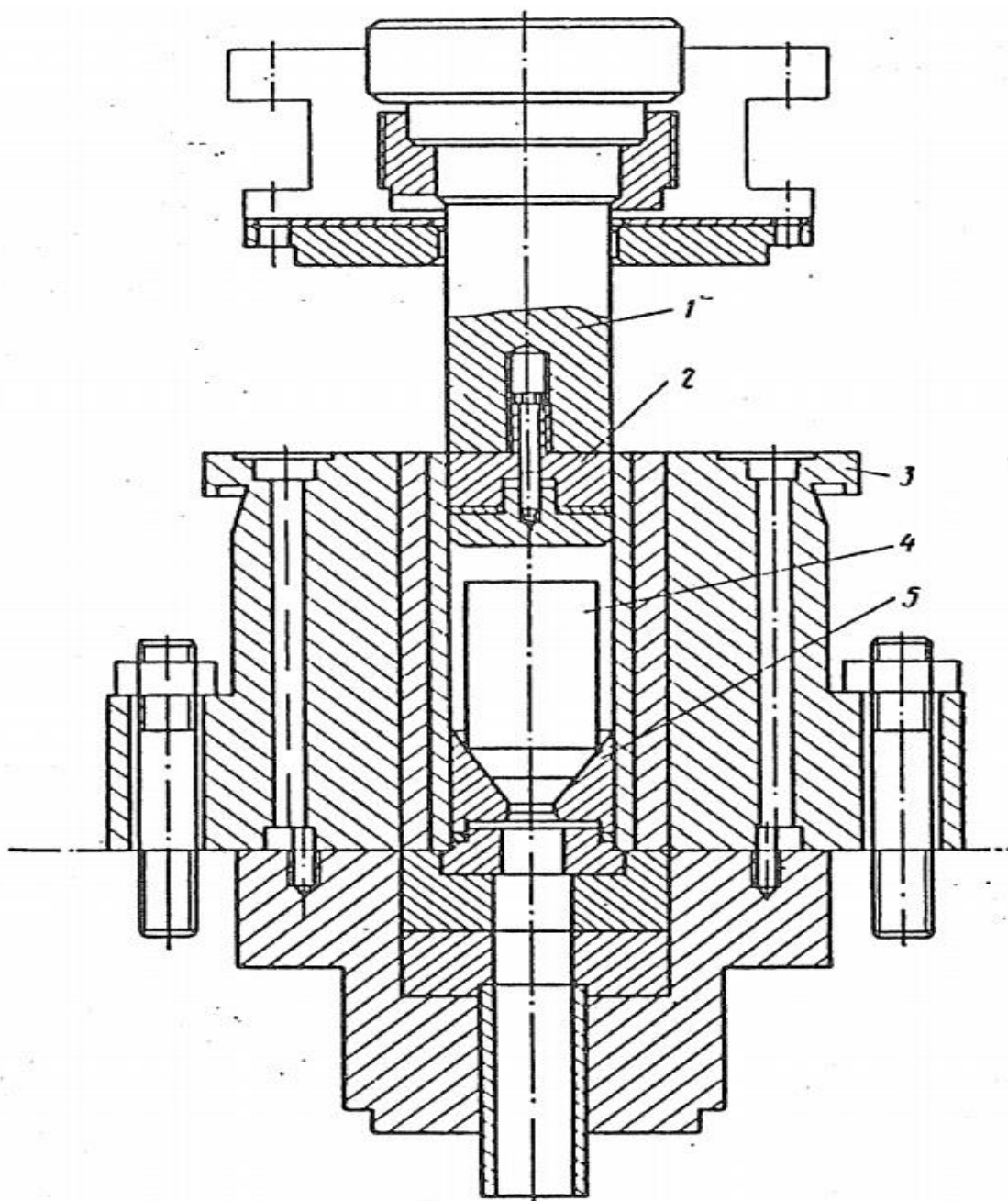
На сл. 1.43. је приказан уређај директног дејства за истосмерно истискивање који се поставља на вертикалну хидрауличну пресу. Основни елементи уређаја су: 1 - контејнер, 2 - доња плоча, 3 – матрица, 4 – притискивач, 5 – држач притискивача. Уређај је намењен за рад на хидрауличној преси од 10 MN (1000 t). Унутрашњи пречник радног цилиндра је 80 мм, а контејнер је намењен за рад са притисцима од 20.000 до 25.000 бара.



Сл. 1.43. Уређај директног дејства за истосмерно истискивање на вертикалној хидрауличној преси

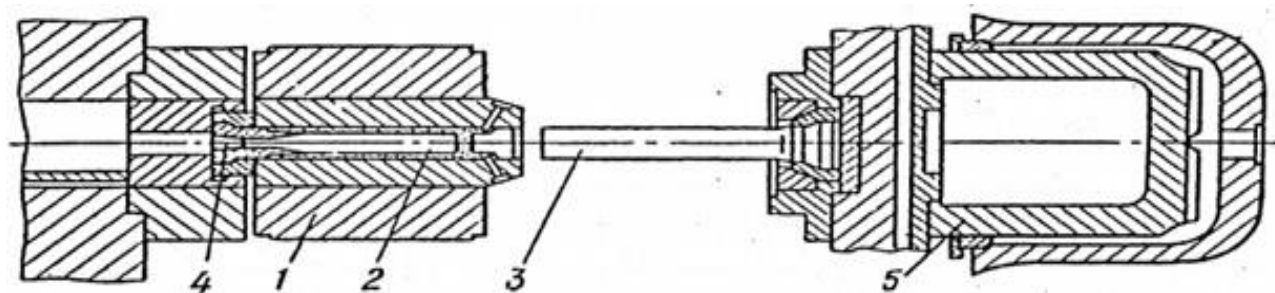
Процес истискивања на овом уређају одвија се према следећем редоследу. У матрицу се поставља полазни комад и убацује контејнер који је претходно одвојен од доње плоче и подигнут у горњи положај. Потом се спушта контејнер са матрицом и везује за доњу плочу. У контејнер се налива радна течност, а затим покреће притискивач и изводи истискивање. На крају истискивања радни комад и радна течност падају у посебну посуду са доње стране. Потом се поступак понавља на исти начин.

На сл. 1.44. је приказан уређај директног дејства за истискивање у топлом стању. Конструкција овог уређаја је слична претходном. Пре истискивања полазни комад (4) се загрева на потребну температуру и убацује са горње стране у матрицу (5) која је смештена у контејнер (3). Затим се у контејнер налива радни флуид и деловањем притискивача (1) преко елемената (2) се остварује процес истискивања.

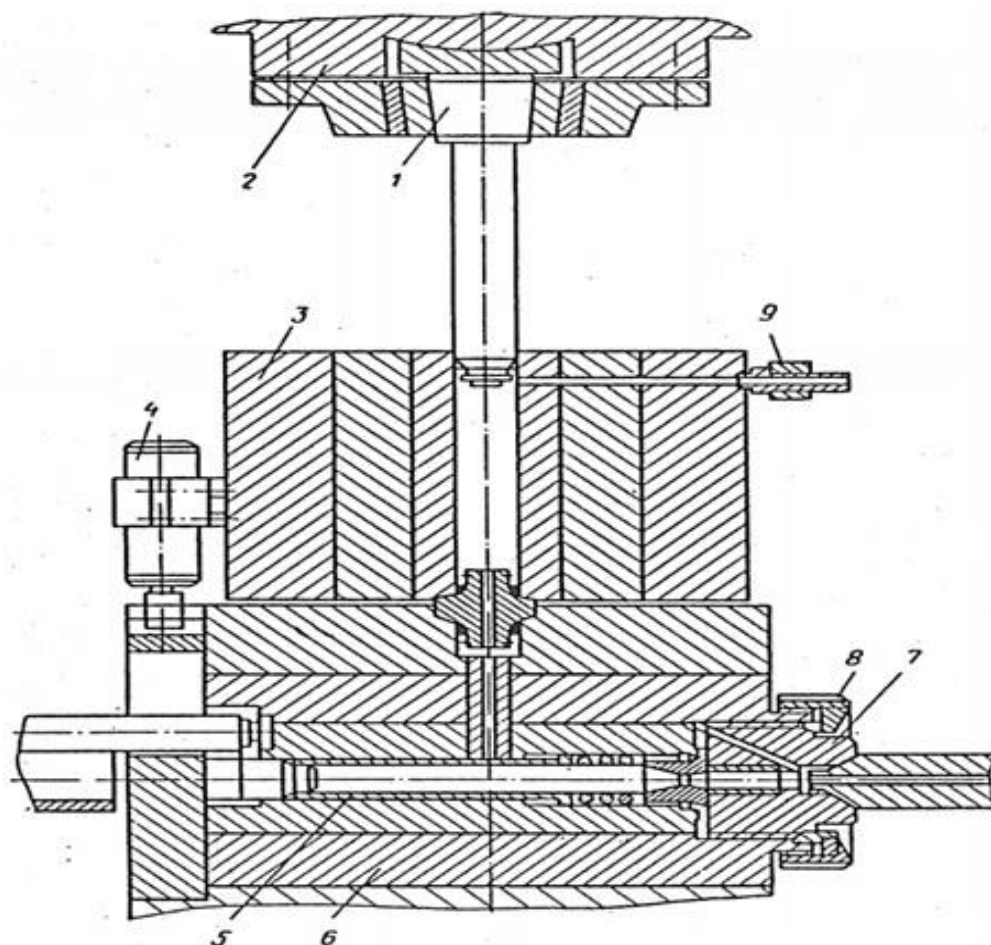


Сл. 1.44. Уређај директног дејства за истискивање у топлом стању

Хоризонтални уређаји директног дејства (сл. 1.45.) се не разликују принципијелно од претходних, а конструкција им је прилагођена хоризонталној хидрауличној машини. Основни елементи уређаја на сл. 1.45. су: 1 – контејнер, 2 – полазни комад, 3 – притискивач (клип), 4 – матрица, 5 – радни цилиндар пресе.



Сл. 1.45. Хоризонтални уређај директног дејства

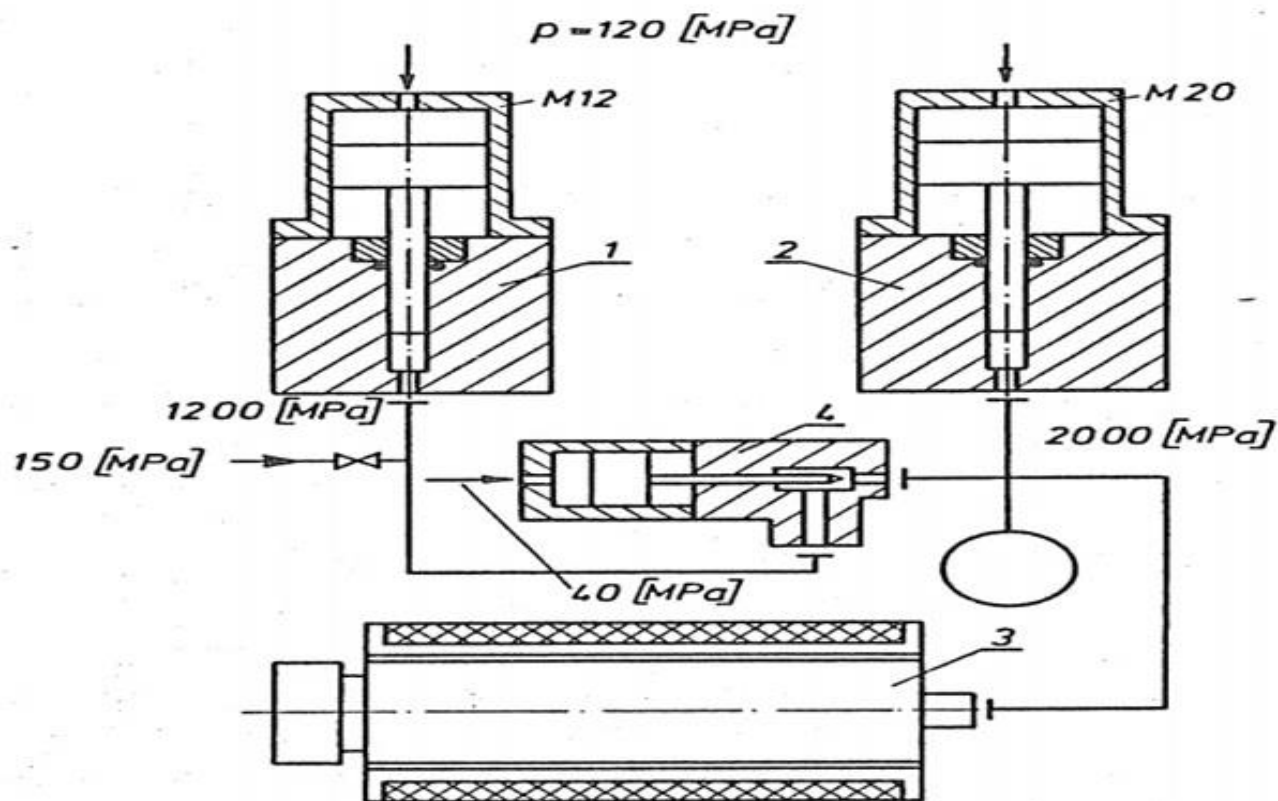


Сл. 1.46. Уређај са независним цилиндрима

Уређаји директног дејства граде се и са независним цилиндрима (сл. 1.46.). У вертикалном цилиндру (3) ствара се високи притисак док се у хоризонталном (6) обавља процес истискивања. Овакви уређаји омогућују израду дужих комада и већу продуктивност. Основни елементи овог уређаја према слици 1.46. су: 1 – клип, 2 – лежиште клипа, 3 – вертикални контејнер, 4 – затварач, 5 – полазни комад, 6 – хоризонтални (радни) цилиндар, 7 – калибрирајући прстен, 8 – ослонац матрице, 9 – довод течности.

7.2. Уређај са посебним извором притиска

Код ове врсте уређаја за хидростатичку обраду високи притисак се ствара помоћу специјалних уређаја – мултипликатора који су смештени ван машина за обликовање. Помоћу једног мултипликатора може се послуживати једна или више машина зависно од капацитета и потрошње течности под притиском.



Сл. 1.47. Шема уређаја са мултипликатором

Принципијелна шема уређаја за хидростатичко обликовање са мултипликатором као извором радне течности дата је на сл. 1.47, где је: 1,2 – мултипликатори, 3 – радни цилиндар, 4 – регулациони вентил. Течност ниског притиска (1.200 бара) долази у цилиндри мултипликатора који на својим излазима стварају притисак потребан за хидростатичко обликовање (12.000 бара, односно, 20.000 бара). Регулација притиска и протока течности остварује се помоћу вентила 4.

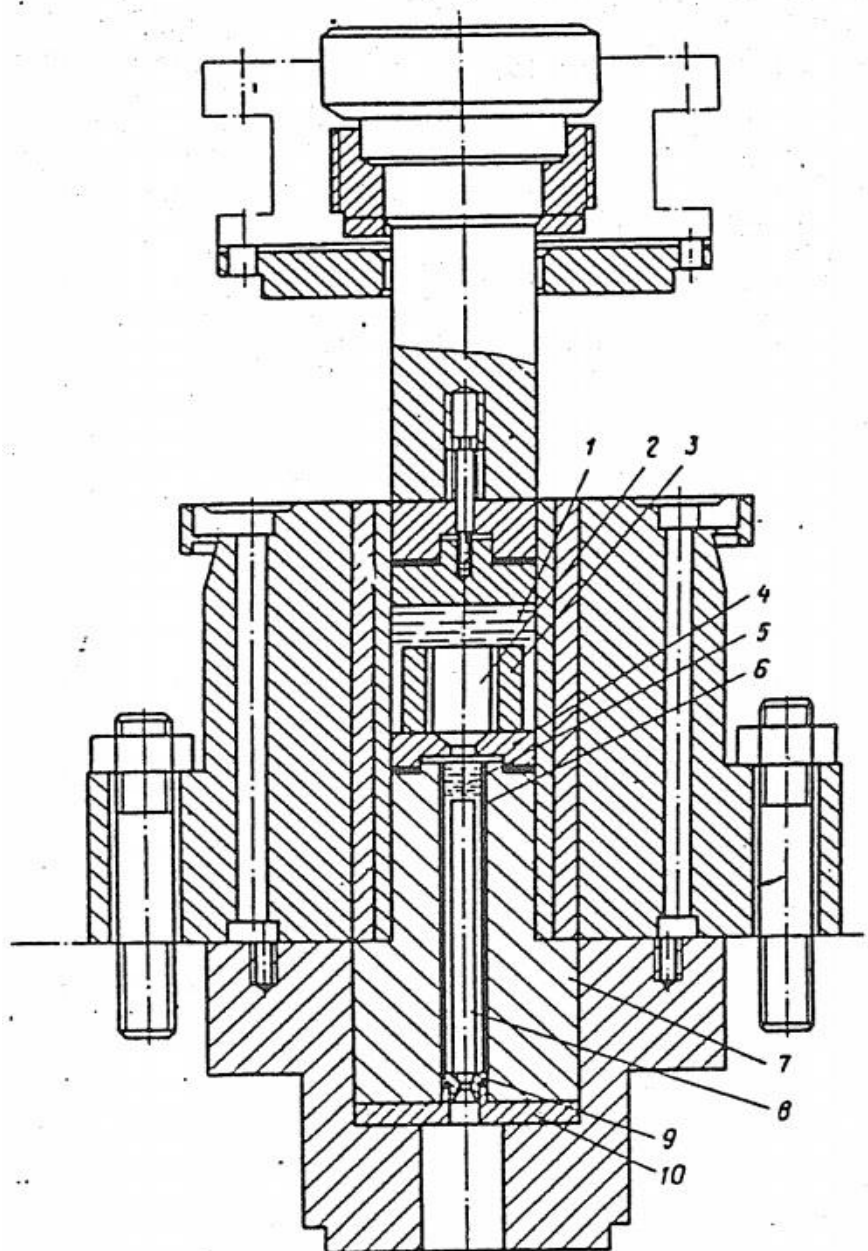
Основни недостатак ове врсте уређаја је потреба за транспортом (на веће удаљености) течности високог притиска.

7.3. Уређај са диференцијалним притиском

Стварање притиска у зони изласка радног комада може се конструкционо реализовати на разне начине : хидрауличним путем, механичким путем и комбиновано.

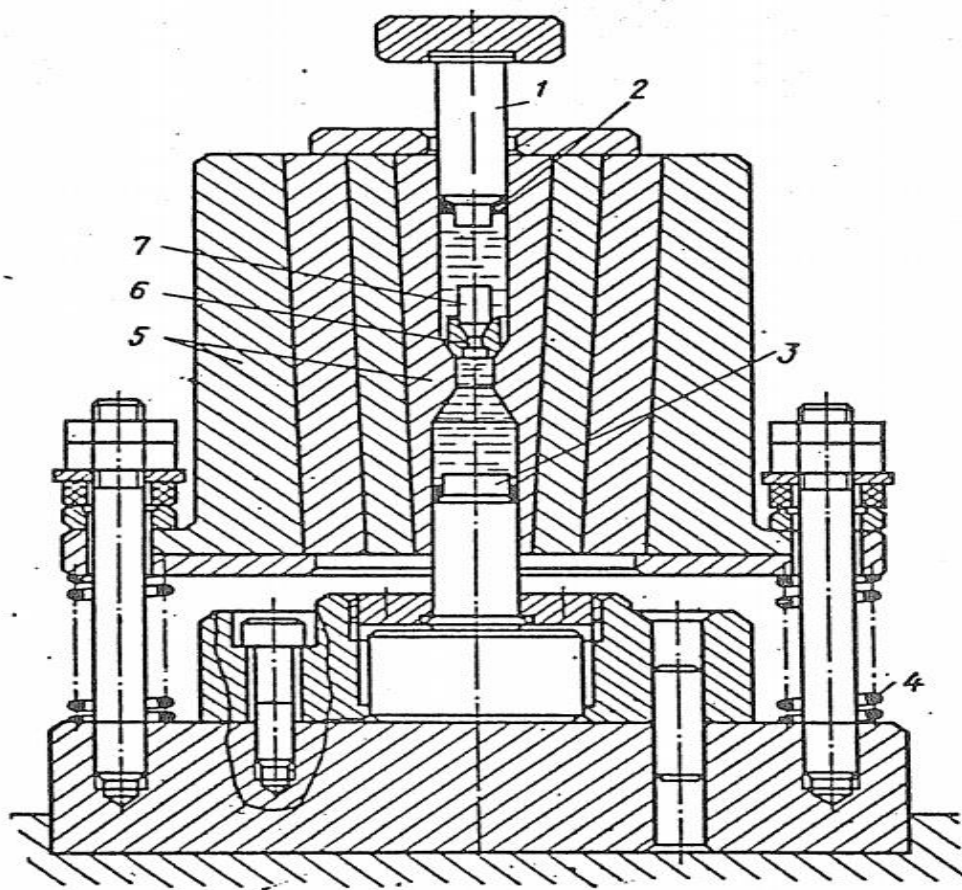
На сл. 1.48. приказана је конструкција уређаја за хидростатичко истискивање код којег се диференцијални притисак остварује помоћу “паразитног радног комада”. Уређај се монтира на пресу од 6 MN (600 t), а на њему се обрађују делови димензија 40x60 мм. Основни елементи уређаја су: 1 – радна течност (притисак p_1), 2 – полазни комад, 3 – чаура за вођење полазног комада, 4 – матрица, 5 – течност (притисак p_2), 6 – доњи цилиндар, 7 – доњи контејнер, 8 – паразитни радни комад, 9 – доња матрица, 10 – ослонац доње матрице.

У горњем цилиндру помоћу клипа ствара се радни притисак p_1 који омогућује истискивање радног комада 2, чијим уласком у доњи цилиндар се повећава притисак p_2 . Величина притиска p_2 зависи од пластичних својстава “паразитног радног комада” који се истискује кроз доњу матрицу те се на тај начин одржава одређена вредност притиска у доњем цилиндру који је довољан да се спречи појава пукотина на радном комаду 2.



Сл. 1.48. Алат за истискивање са противпритиском оствареним помоћу “паразитног” радног комада

Боља варијанта уређаја са диференцијалним притиском је конструкција са хидроцилиндром са доње стране који регулише притисак у доњем делу радног комада (сл. 1.49.).

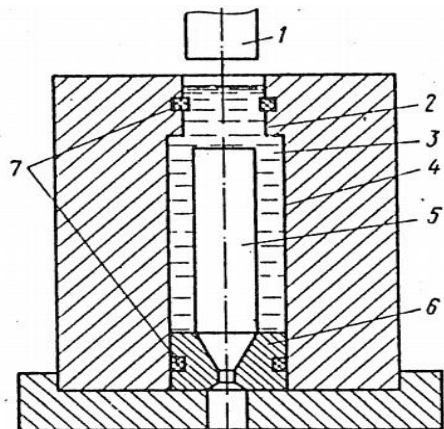


Сл. 1.49. Алат за истискивање са противпритиском оствареним хидрауличним начином

7.4. Уређаји за хидромеханичко обликовање

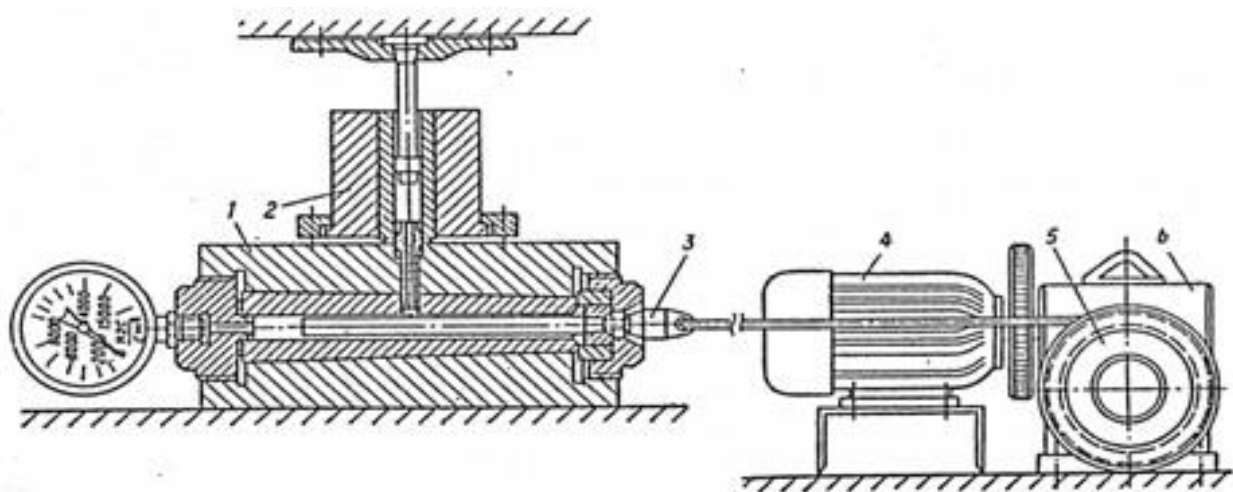
На сл. 1.50. је приказано хидромеханичко истискивање пуних комада у двостепеном контејнеру. Основни елементи уређаја су: 1 – притискивач, 2 – део цилиндра мањег пречника (d_1), 3 – радни флуид, 4 – део цилиндра већег пречника (d_2), 5 – полазни комад, 6 – матрица, 7 – заптивка. Уређај функционише на следећи начин. У матрицу се најпре поставља полазни комад са конусним почетком, а потом се цилиндар пуни радном течношћу до висине која се експериментално одређује. После тога покреће се клип, чији је пречник једнак пречнику радног комада, услед чега долази до сабијања течности и повећања притиска у цилиндру. Овај притисак нижи је од притиска потребног за чисто хидростатичко истискивање и он од тренутка додире притискивача и радног комада па до

краја истискивања остаје константан захваљујући једнакости пречника клипа и пречника радног комада. Додатно оптерећење потребно за истискивање остварује се механичким деловањем клипа на полазни комад.



Сл. 1.50. Уређај за хидромеханичко истискивање

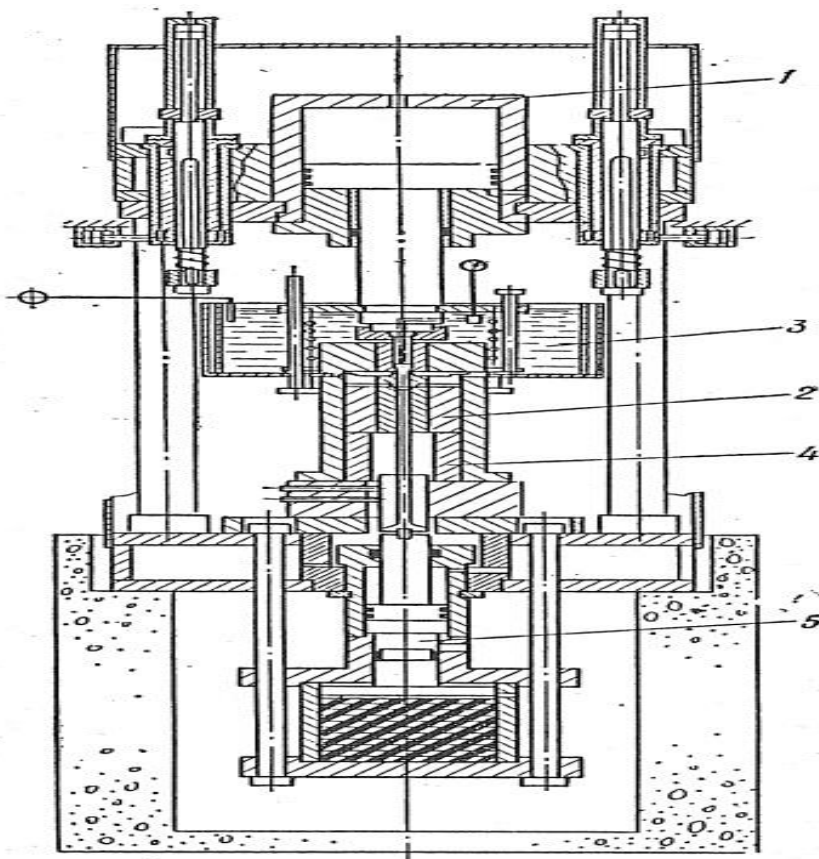
Механичко дејство код хидростатичке обраде може се остварити затезном силом као што је то случај код обликовања истискивањем са вучењем (сл. 1.51.). У контејнеру 2 ствара се високи притисак који се у хоризонталном радном цилиндру (1) користи за хидростатичко обликовање. На врх радног комада поставља се специјални држач (3) преко којег се помоћу електромотора (4) редуктора (6) и котура са спојницом (5) остварује потребна сила затезања. Регулација затезне силе остварује се помоћу спојнице на катуру.



Сл. 1.51. Хидромеханичко истискивање са вучењем

7.5. Специјалне хидростатичке пресе

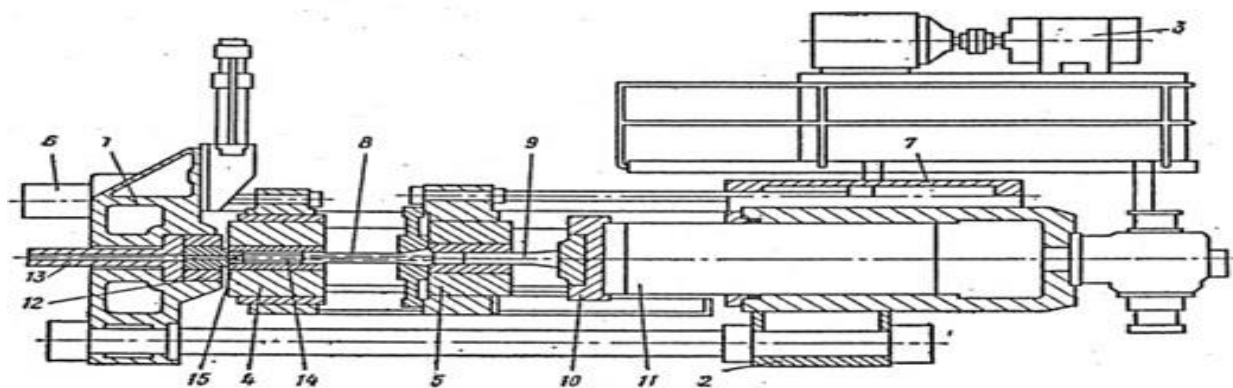
На сл. 1.52. је приказана једна од првих хидрауличних преса која је намењена за хидростатичко истискивање.



Сл. 1.52. Специјална преса за хидростатичко истискивање

Номинална сила ове машине износи 2,5 MN (250 t), максималан радни притисак је 30.000 бара а противпритисак се креће до 15.000 бара. Унутрашње димензије радног цилиндра (простор за полазни комад) су 30x100 мм. Основни елементи машине према слици су: 1 – погонски цилиндар, 2 – алат за хидростатичко истискивање са противпритиском, 3 – резервоар радне течности, 4 – клип за противпритисак, 5 – амортизер. Ова машина намењена је за обично хидростатичко истискивање, истискивање противпритиском као и за класичне операције обраде деформисањем. Преса је четворостубна, погон се остварује преко главног цилиндра (1) а повратни ход преко четири мања цилиндра који се налазе са горње стране машине. Противпритисак се остварује помоћу посебног уређаја у којем је

уграђен амортизер који спречава неконтролисано повећање брзине радног комада. Радни циклус пресе износи 125 секунди.



Сл. 1.53. Хоризонтална преса за хидростатичко истискивање

На сл. 1.53. приказана је хоризонтална хидраулична преса од 16 MN (1600 t) намењена за хидростатичко истискивање профила из полазног комада 120x500 мм. Дужина радног комада није ограничена. Основни елементи машине су: 1,2 – попречне траверзе, 3 – пумпа, 4 – главни цилиндар, 5 –цилиндар високог притиска, 6,7 – помоћни цилиндри, 8 – клип (притискивач), 9 – клип, 10 – покретна траверза, 11 – клип главног цилиндра, 12 – држач матрице, 13 – комора за противпритисак, 14 – полазни комад, 15 – матрица. Машина је намењена за обично хидростатичко истискивање и истискивање противпритиском.

7.6. Елементи алата за хидростатичку обраду

Елементи алата за хидростатичку обраду изложени су дејству екстремних оптерећења те се њиховој конструкцији, избору материјала, механичкој и термичкој обради мора посветити посебна пажња. Делови ових алата морају бити једноставних облика, без наглих прелаза (ради смањења концентрације напона) и са фино обрађеним површинама. Као материјал за израду алата користе се посебне врсте алатних челика који су добијени у електропећима у вакууму.

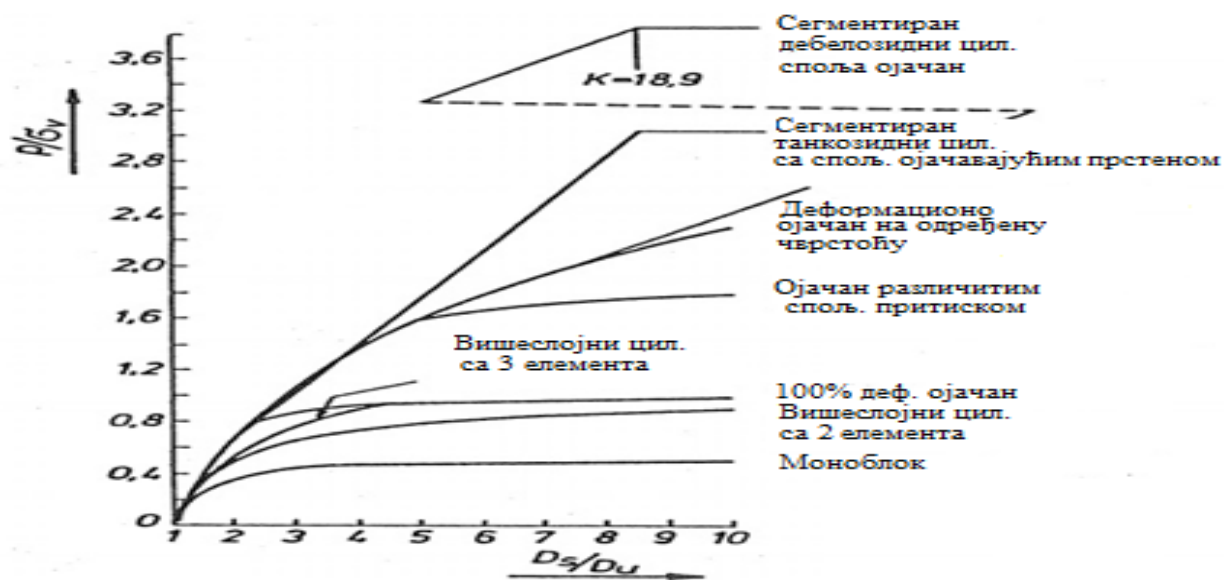
Основни елементи алата за хидростатичку обраду су контејнер, клип и матрица, а у наставку су презентиране препоруке за њихову конструкцију.

7.6.1. Контејнер (радни цилиндар)

Контејнер је најоптерећенији елемент алата за хидростатичку обраду, а његов квалитет одређује ниво притиска течности са којим се изводи процес обликовања. Основни типови конструкције контејнера су:

1. Једнослојни (моноблок),
2. Вишеслојни – армирани: (контејнер ојачан прстеновима, контејнер ојачан плочастим прстеновима, контејнер ојачан плочастим прстеновима, контејнер ојачан жицом или траком, контејнер ојачан хидрауличним путем, итд).

На сл. 1.54. је дата теоријска зависност промене фактора K ($K = P/\sigma_v$) од односа пречника цилиндра a ($a = D_s / D_u$) за поједине начине ојачавања контејнера. (P – притисак радног флуида, D_s – спољашњи пречник цилиндра, σ_v – напон на затезање, D_u – унутрашњи пречник цилиндра).



Сл. 1.54. Зависност оптерећења контејнера од односа пречника

7.6.1.1. Једнослојни контејнер

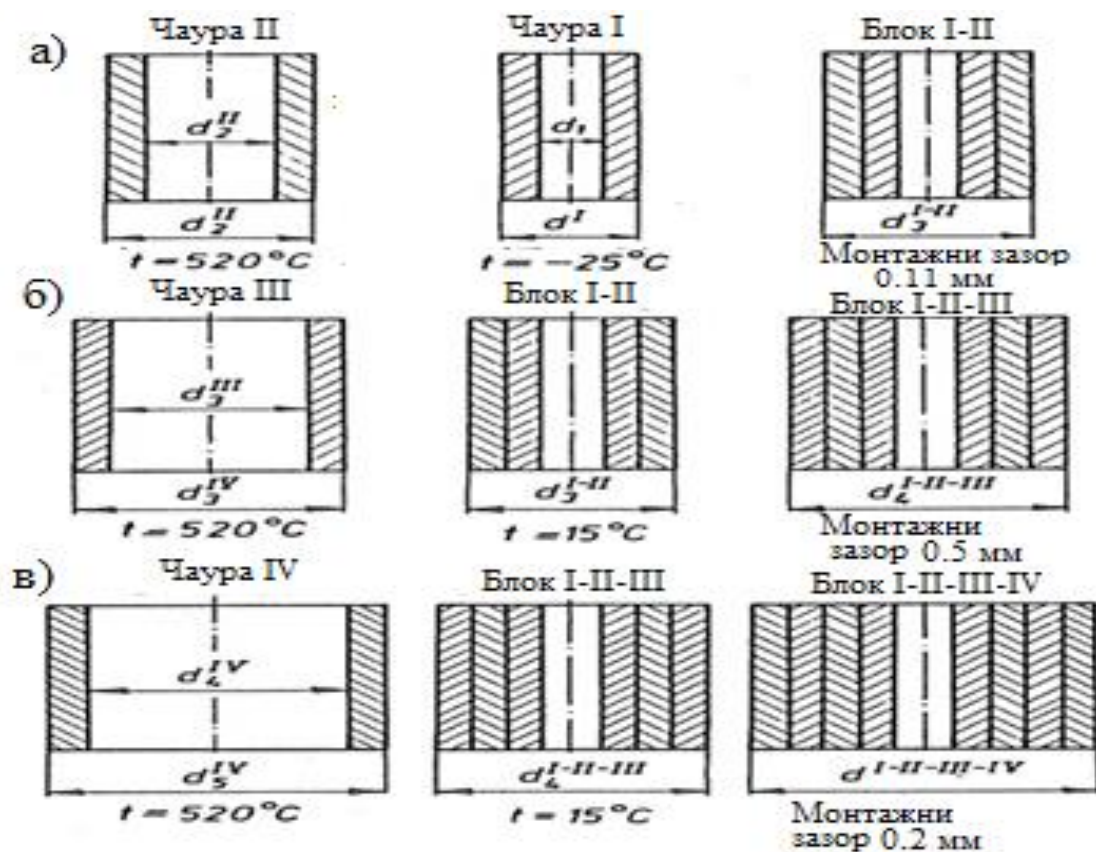
Једнослојни контејнери примењују се за хидростатичку обраду са нижим притисцима. Притисак течности не сме прелазити половину границе развлачења материјала

цилиндра, а чак и значајно повећање D_s / D_u не доводи до битнијег повећања дозвољеног притиска радног флуида (сл. 1.54.). Повећање носивости моноцилиндра може се постићи његовим ојачавањем пластичном деформацијом. Сврсисходна је примена ове конструкције у случају мањег пречника радног комада (унутрашњи пречник цилиндра до 40 мм).

7.6.1.2. Вишеслојни цилиндар

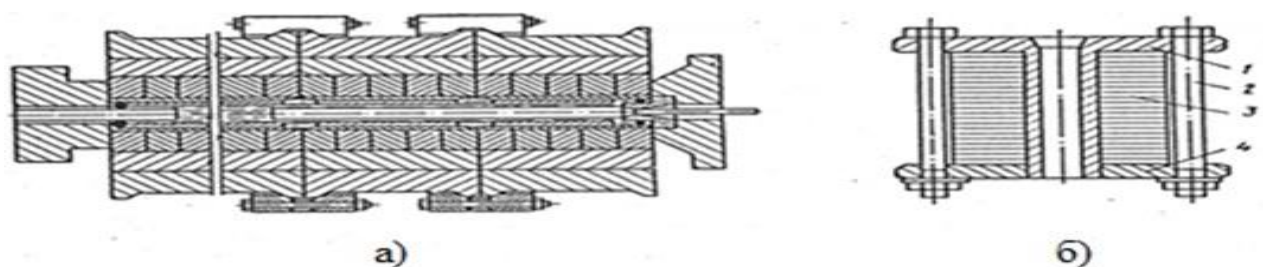
Армирани цилиндри омогућују рад са знатно вишим притисцима (до 30.000 бара) а унутрашњи пречник се креће и до 100 мм. Број ојачавајућих слојева се креће до четири а даље повећање не доприноси значајнијем ефекту ојачавања конструкције цилиндра. Ојачавање радног цилиндра изводи се на разне начине и они су у наставку укратко описани.

На сл. 1.55. је приказано класично ојачавање радног цилиндра са ојачавајућим прстеновима који се навлаче на тај начин што се спољашњи прстен загреје на одређену температуру, а унутрашњи охлади у течном азоту.



Сл. 1.55. Радни цилиндар са ојачавајућим прстеновима

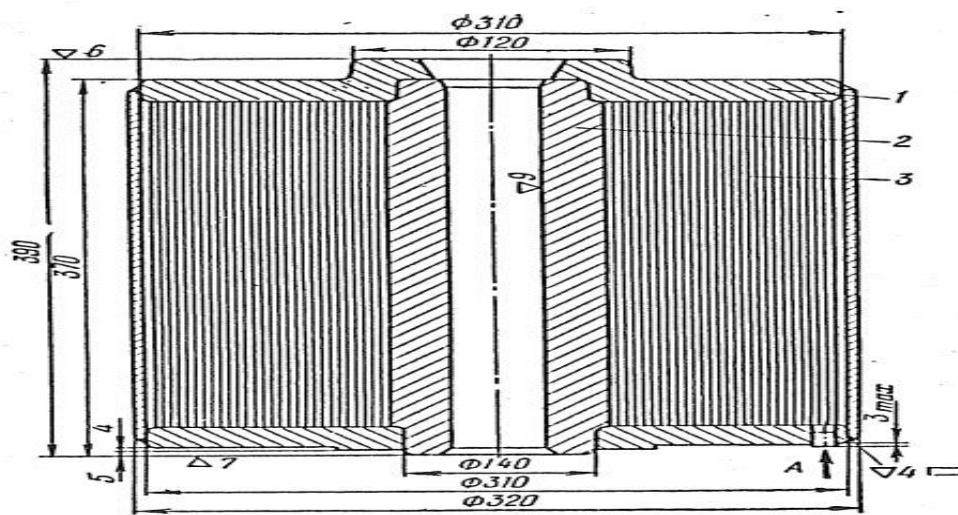
На сл. 1.56. је приказана конструкција цилиндра (1) ојачаног кружним прстеновима (2). Прва конструкција (а) има прстенове израђене ковањем. Због веће дужине радног комада цилиндар је израђен из три међусобно спојена блока. У другом случају (сл. 1.56. б) ојачавање је извршено прстеновима од квалитетног лима, притегнутим вијцима (2) и прсетном (4)



Сл. 1.56. Радни цилиндар ојачан прстеновима

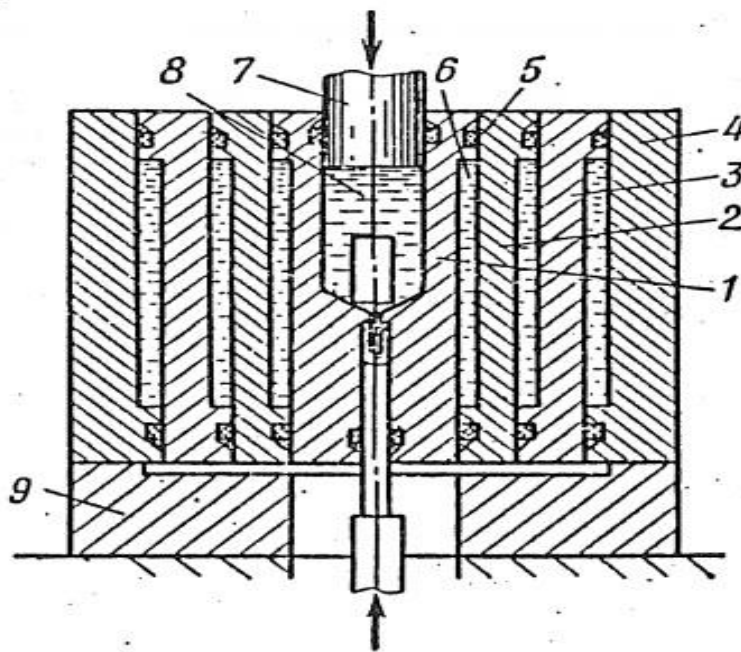
а) кованим, б) од лима

На сл. 1.57. је приказана конструкција радног цилиндра (2) ојачаног намотавањем широке челичне траке (3). Са (1) је означен чеони елемент. Овај радни цилиндар намењен је за експлоатацију при притиску од 20.000 бара. Слично овој конструкцији у примени су цилиндри ојачани намотавањем уске челичне траке (димензија 2,5x0,8 мм) чија је јачина 16.000 бара.



Сл. 1.57. Контејнер ојачан челичном траком

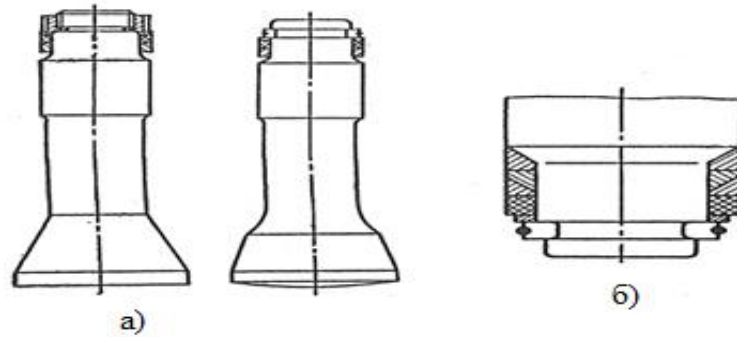
Осим наведених конструкција контејнера са механичким ојачавањем у примени су и радни цилиндри ојачани хидрауличним путем. Једно решење овог типа дато је на сл. 1.58. Радни цилиндар 1 ојачан је са три прстена (2, 3 и 4) између којих се налази течност високе вискозности (ради лакшег заптивања). Цилиндар 1 и чауре 2, 3 и 4 се могу аксијално померати за малу величину хода. Оптерећење са клипа 7 се преноси на радну течност стварајући услове за хидростатичку обраду. Аксијална сила са цилиндра 1 се преко прстенасте површине преноси на течност у комори 6 услед чега долази до пораста притиска и ојачавања средишњег елемента контејнера (цилиндар 1). На сличан начин долази до пораста притиска у осталим коморама. Прстен 4 се ослања на крути ослонац 9 који прима укупно аксијално оптерећење.



Сл. 1.58. Контејнер са хидрауличним ојачањем

7.6.2. Клип и заптивни елементи

Код уређаја за хидростатичко обликовање директног дејства, високи притисак радне течности добија се преношењем механичког оптерећења преко клипа на радну материју. Општи изглед клипа са покретним заптивком дат је на сл. 1.59. а., а на сл. 1.59. б. приказан је детаљ врха клипа са прстеновима за заптивање.

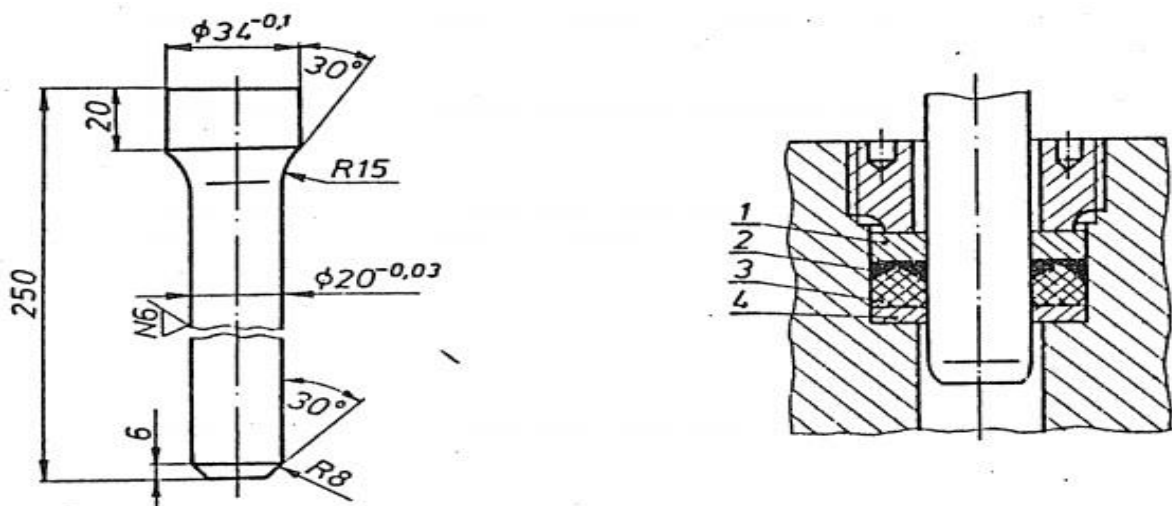


Сл. 1.59. Клип са покретним заптивком

Клип је степенастог облика са главом за учвршћивање чија чеона површина може бити равна или сферична ради самоподешавања. Заптивање споја клип – цилиндар се остварује помоћу металних и гумених прстенова. Недостаци ове конструкције су:

1. Потреба за високом тачношћу и квалитетом површине цилиндра по којој клизи заптивка;
2. Заптивање је осетљиво на евентуално закошење или извијање клипа.

Конструкција клипа са непокретном заптивком као и решење заптивања дати су на сл. 1.60. Сам клип је једноставне конструкције са фино обрађеном спољном површином преко које клизи заптивка. Заптивни чвор састоји се од челичног прстена (1), заптивке високог притиска (2), заптивке ниског притиска (3) и прстена за ослањање (4).



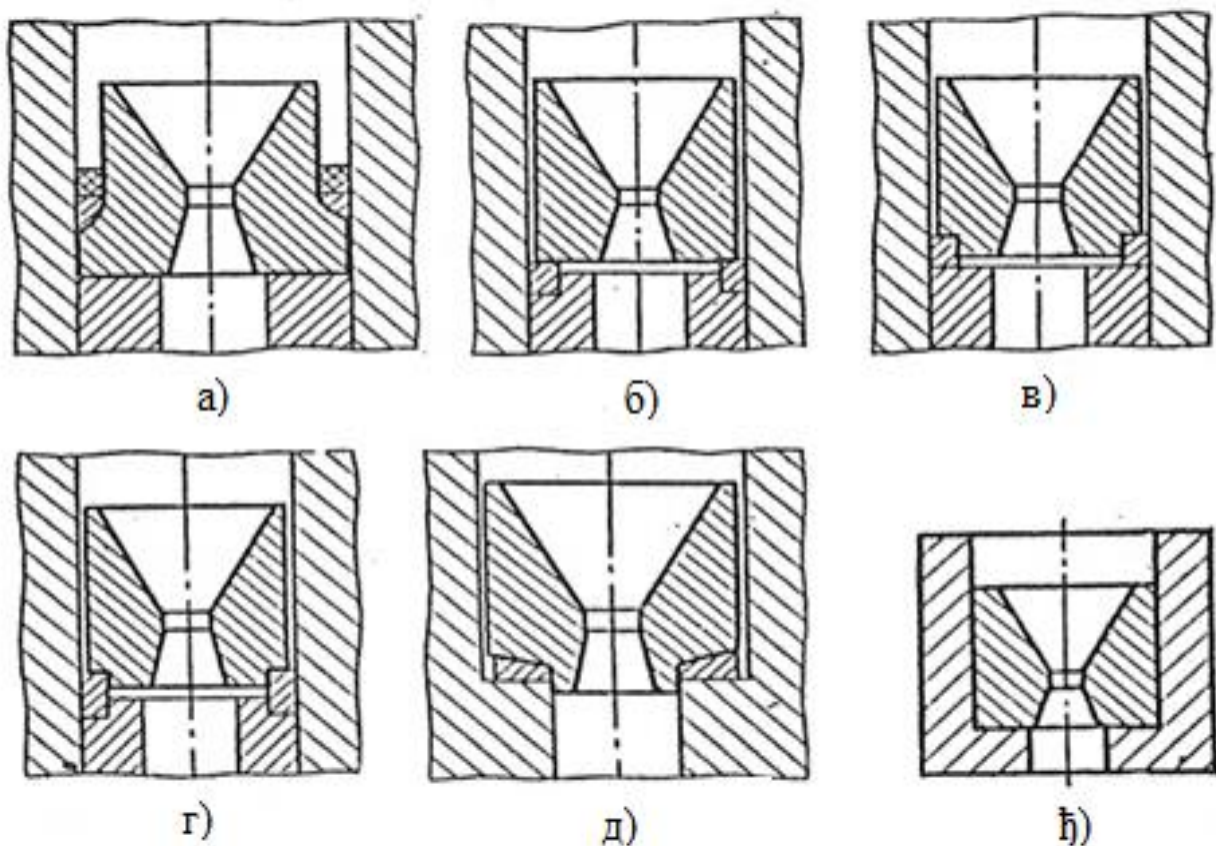
Сл. 1.60. Клип са непокретном заптивком

7.6.3. Матрица

У основи се разликују три типа матрица за хидростатичку обраду:

1. Матрице постављене унутар радног цилиндра;
2. Матрице наслоњене на ивицу цилиндра;
3. Матрице постављене ван радног цилиндра.

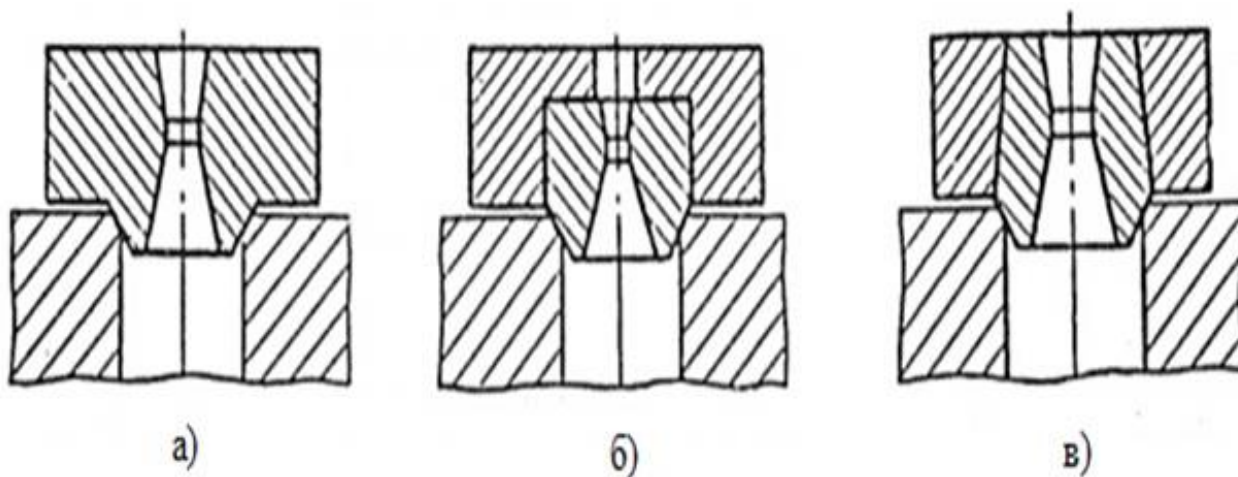
Код првог типа матрица (сл. 1.61.) хидростатички притисак је присутан и на спољној површини матрице тако да није потребно додатно ојачавање. Због тога је могуће израдити матрицу са танким зидовима. Међутим, ипак постоји опасност од разарања матрице у тренутку растерећења, тј. смањивања хидростатичког притиска када радни комад снажно оптерећује матрицу због заосталих еластичних деформација.



Сл. 1.61. Матрица у радном цилиндру

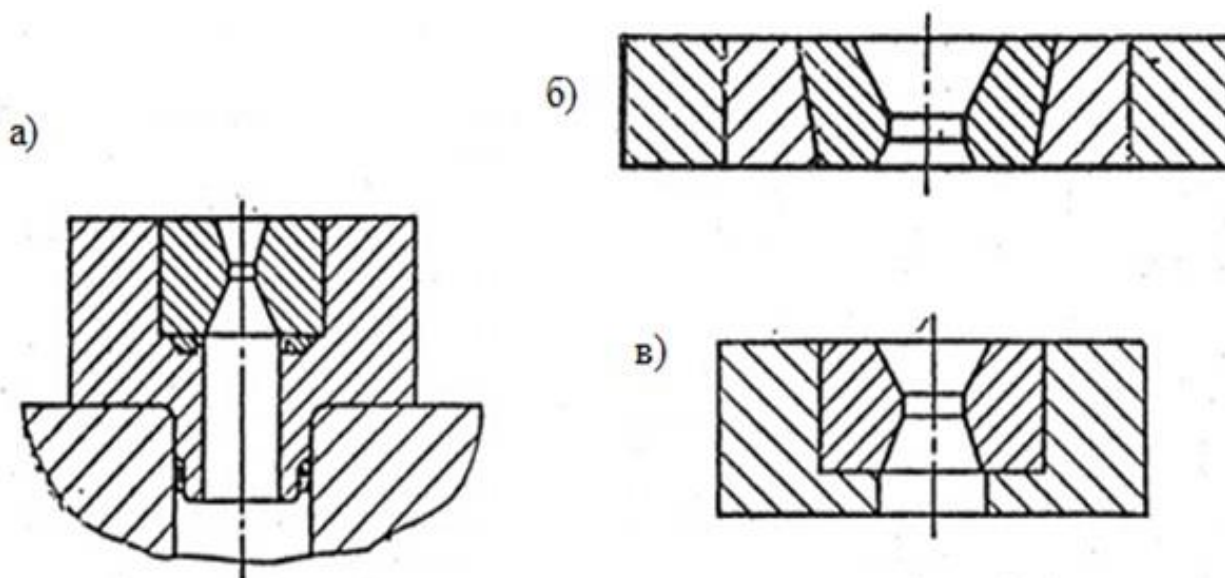
Матрица другог типа (сл. 1.62.) обично је механичким путем ојачана, а захваљујући високом механичком оптерећењу обезбеђено је добро заптивање споја матрица – контејнер.

Овај тип матрице а такође и претходни се примењују за притиске од 20.000-30.000 бара.



Сл. 1.62. Матрица постављена на ивицу цилиндра

Матрице које се конструкционо постављају ван радног цилиндра користе се за радне притиске од 10.000-15.000 бара и по правилу су механички ојачане (сл. 1.63.).



Сл. 1.63. Матрице постављене ван радног цилиндра

Матрице за хидростатичку обраду израђују се од висококвалитетних алатних челика и тврдих легура. Термички се обрађују на различиту тврдоћу зависно од конструкције и услова експлоатације, углавном у дијапазону од 45-65 HRC. Радне површине морају бити високог квалитета. Матрице сложених профила радних комада израђују се електроерозијом. Радне површине матрице могу бити пресвучене неком од тврдих превлака (нитриране, титанкарбид, боркарбид и др.). У неким случајевима матрица за хидростатичко обликовање може бити вишеделна, тј. састављана од сегмената.

8. ЗАКЉУЧАК

На темељу проучене литературе, може се закључити да хидростатичка обрада представља процес пластичног обликовања метала са веома високим притиском у зони деформисања, најчешће у опсегу од 20.000 до 30.000 бара. Код хидростатичког обликовања изражен је проблем ниске продуктивности, и потребно је још нагласити да хидростатичко обликовање не условљава искључиву примену течности за стварање високог притиска у зони деформисања.

Најважнија карактеристика процеса хидростатичког обликовања, што је и главни мотив за примену, је значајно повећање деформабилности металних материјала у условима напонског стања свестраног притиска високог интензитета. То омогућава обликовање делова од веома тешко деформабилних материјала високе чврстоће. Постижу се високи квалитети обрађених површина и висока димензијска тачност.

У већини поступака су проблеми трења знатно умањени, с обзиром да се процес обликовања изводи у радном флуиду.

Потпуно дефинисање методе хидростатичког пластичног обликовања зависи значајно и од избора машина и алата помоћу којих се изводи процес хидростатичког обликовања. Потребно је користити специјалне уређаје и алате тако да могу издржати високе притиске који омогућавају стварање потребних услова за течење метала.

Хидростатичко обликовање представља веома значајну, али и веома специфичну област у оквиру технологије пластичног обликовања метала. Због високих захтева процеса углавном налази примену у процесима израде специјалних делова космичке технике, авиона, делова за војну индустрију итд.

9. ЛИТЕРАТУРА

1. Александровић С., Стефановић М.: Технологија пластичног обликовања метала, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2010.
2. М. Планчак, Д. Вилотић, В. Вујовић: Технологија пластичности у машинству 2, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1992.
3. Александровић С.: Технологија пластичног обликовања метала, скрипта, Факултет инжењерских наука, 2011.
4. Metal Forming Handbook, Schuler, Springer – Verlag, Berlin- Heidelberg. 1998.