

2. HIDROSTATIČKA OBRADA

2.1. U V O D

Pionirske korake na području stvaranja saznanja o ponašanju materijala pod dejstvom visokog pritiska učinio je P.W. Bridgman, koji je za svoje radove 1946. godine dobio Nobelovu nagradu. Rezultati do kojih je Bridgman došao poslužili su kao osnova za razvoj novih pravaca istraživanja u fizici, hemiji, metalurgiji i geologiji kao i za stvaranje novih tehnoloških metoda u obradi deformisanjem i metalurgiji.

Istraživanja koja je Bridgman izvršio odnose se na ponašanje materijala u hidrostatičkim uslovima u smislu ispoljavanja pojedinih mehaničkih osobina i delovanje pritiska na strukturu materijala. Ovi rezultati omogućili su stvaranje novih metoda oblikovanja teško deformabilnih i uglavnom novih materijala koji su razvijeni kroz razvoj avio tehnike, kosmičke i nuklearne tehnike.

Hidrostatička obrada predstavlja proces oblikovanja sa povećanim pritiskom u zoni deformacije. Hidrostatičko oblikovanje izvodi se sa pritiscima od 2.000 do 3.000 MPa dok se laboratorijska ispitivanja vrše i sa pritiscima od nekoliko desetina hiljada MPa. Povećan hidrostatički pritisak u zoni deformacije omogućuje povećanje deformabilnosti materijala i izradu delova od materijala koji se konvencionalnim postupcima ne mogu oblikovati. Rad sa ovako visokim pritiscima nije jednostavan i zahteva specijalne uređjaje za stvaranje i transport tečnosti visokog pritiska. Konstrukcija radnog cilindra - kontejnera za hidrostatičko oblikovanje mora biti takva da obezbedi sigurnost u radu, što se postiže odgovarajućim rešenjem ojačavanja istog. Poseban problem kod hidrostatičke obrade je merenje visokog pritiska što se rešava primenom elektronskih davača. Osim toga, kod hidrostatičkog oblikovanja izražen je problem niske produktivnosti, pogotovu ako se radi o procesima koji se izvode na univerzalnim hidrauličnim presama. Ovaj problem se rešava primenom specijalnih automatskih mašina.

Tehnološke metode hidrostatičkog oblikovanja su praktično iste one koje se izvode konvencionalnim putem: istiskivanje, vučenje, sabijanje, duboko izvlačenje, savijanje, oblikovanje cevi itd. U metalurgiji se takođe primenjuje hidrostatički pritisak kod sinterovanja metalnog i nemetalnog praha - izostatičko presovanje. Potrebno je još naglasiti da hidro-

statičko oblikovanje ne uslovljava isključivu primenu tečnosti za stvaranje visokog pritiska u zoni deformacije. Visoki pritisak u zoni deformacije može se stvoriti i pomoću mekih materijala (kvazitečnosti) ili mehaničkim putem. Ovakav vid hidrostatičkog oblikovanja posebno je značajan za mašinske inženjere specijaliste za tehnologiju plastičnosti koji su u prilici da novim pristupom kod konvencionalnih postupaka primene pozitivne efekte hidrostatičkog oblikovanja.

Osim Bridgmana značajan doprinos razvoju i primeni hidrostatičke obrade dali su sovjetski istraživači B.I. Beresenjev, L.F. Veriščagin i dr. a u novije vreme veliki doprinos dao je škotski istraživač H.L. Pugh.

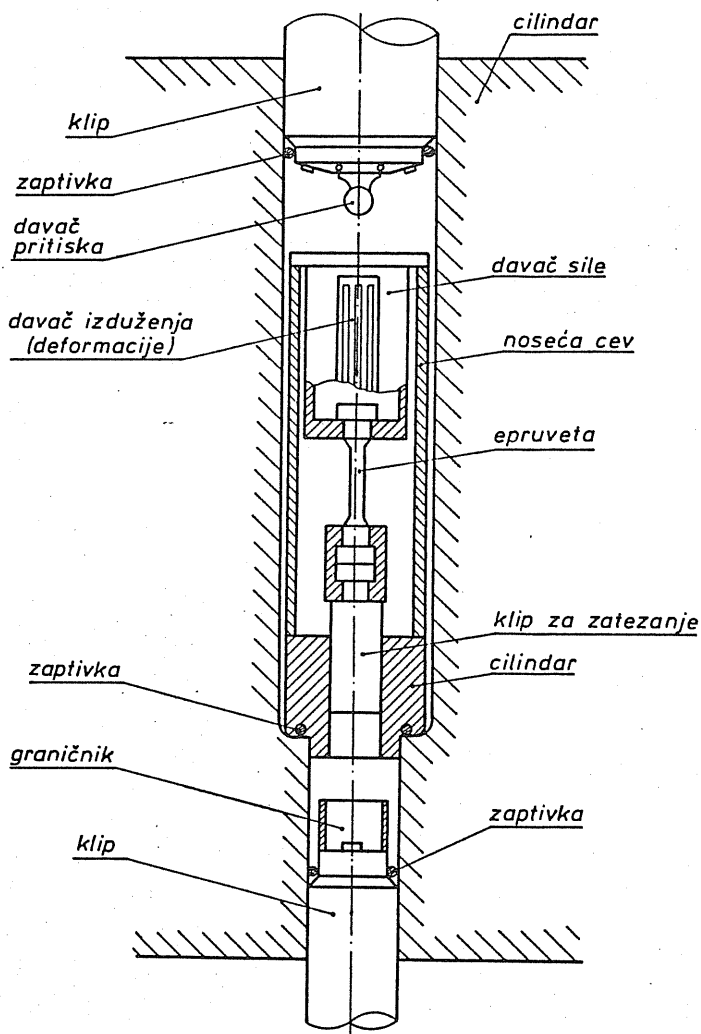
2.2. MEHANIČKE OSOBINE I PONAŠANJE MATERIJALA U HIDROSTATIČKIM USLOVIMA

Prva ispitivanja ponašanja materijala u polju visokog pritiska izveo je Karman /19/ na uzorcima od mermera. Njegovi eksperimenti su pokazali da se u hidrostatičkim uslovima i ovako krt materijal može plastično deformisati. Medjutim, značajnija su ispitivanja Bridgmana /19/ koji je usavršio uređjaje za ispitivanje materijala na zatezanje u zoni visokog pritiska. Osim toga u literaturi se mogu naći podaci o ispitivanju na uvijanje i smicanje u polju visokog pritiska, kao i ispitivanje uticaja hidrostatičkog pritiska na ojačavanje i deformabilnost materijala i uticaj visokog pritiska na fizičke i električne konstante materijala.

2.2.1. Ispitivanje na zatezanje

Ispitivanje na zatezanje u polju visokog pritiska osim Bridgmana vršili su još i Pugh, Brandes, Hu, Gladkovski, Olejnik i dr. /20/. Zajednička karakteristika svih ipitivanja je ta što je uzorak koji je u osnovi izložen aksijalnom zatezanju postavljen u kontejner sa tečnošću pod visokim pritiskom. Bridgman je još 1942. god. vršio ispitivanja na zatezanje u cilindru sa pritiskom od 3.000 MPa.

Na sl.2.1. šematski je prikazan Pughov uređjaj za ispitivanje na zatezanje u polju visokog pritiska (do 1.500 MPa). Epruveta prečnika 4 mm se postavlja gornjim krajem u nepokretni držač. Donji kraj epruvete postavljen je u pokretni držač sa klipom. Zatezna sila na epruveti ostvaruje se na osnovu razlike pritisaka u gornjem i donjem cilindru. Pomoću gornjeg klipa stvara se visoki pritisak u gornjem cilindru, a

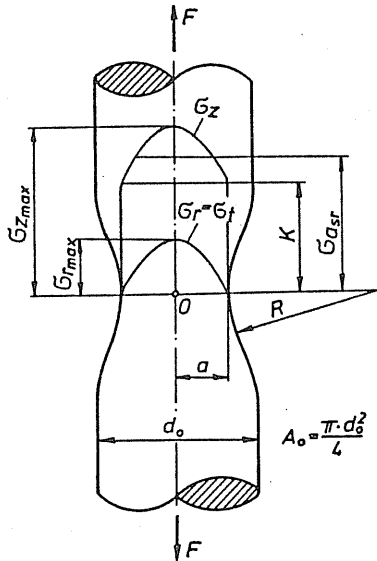


Sl.2.1. Uredjaj za ispitivanje na zatezanje u hidrostatičkim uslovima /20/

donjim klipom reguliše se hod donjeg držača epruvete odnosno hod istezanja epruvete. Zatezna sila na epruveti meri se pomoću elektronskog dinamometra koji je postavljen sa gornje strane epruvete. Hidrostatički pritisak meri se pomoću elektronskog manometra koji je postavljen na čelo klipa.

Raspored napona u zoni deformacije pri zatezanju

Raspored napona u zoni vrata epruvete opterećene na zatezanje istraživali su Hill, Bridgman, Davidenkov, Spiridonova i dr. /19/.



Sl.2.2. Distribucija napona u vratu epruvete /20/

Bridgmanovo rešenje za pojedine komponente napona ima oblik:

$$\sigma_r = \sigma_t = K \cdot \ln \left[\frac{a^2 + 2a \cdot R - r^2}{2 \cdot a \cdot r} \right] \quad (2.1.)$$

$$\sigma_z = K \cdot \ln \left[\frac{a^2 + 2aR - r^2}{2aR} \right] + K \quad (2.2.)$$

$$K = \sigma_z - \sigma_r$$

odnosno

$$K = \frac{\sigma_{asr}}{\left[1 + 2 \left(\frac{R}{a} \right) \right] \cdot \ln \left[1 + \frac{a}{2R} \right]} \quad (2.3.)$$

i

$$\sigma_{asr} = \frac{F}{\pi \cdot a^2} \quad (2.4.)$$

gde je:

a, R - dimenzije vrata epruvete

r - tekući radijus

F - sila zatezanja

K - napon tečenja

Sve tri komponente napona (σ_r , σ_t i σ_z) su pozitivne što znači da u vratu epruvete vlada troosno zatezno naponsko stanje. Na osnovu rasporeda napona sa sl.2.2. može se konstatovati da je najnepovoljnije naponsko stanje u centru obratka gde sve komponente imaju maksimalnu vrednost. Radi toga se početak nastanka pukotine javlja u sredini obratka što je eksperimentalno i potvrđeno.

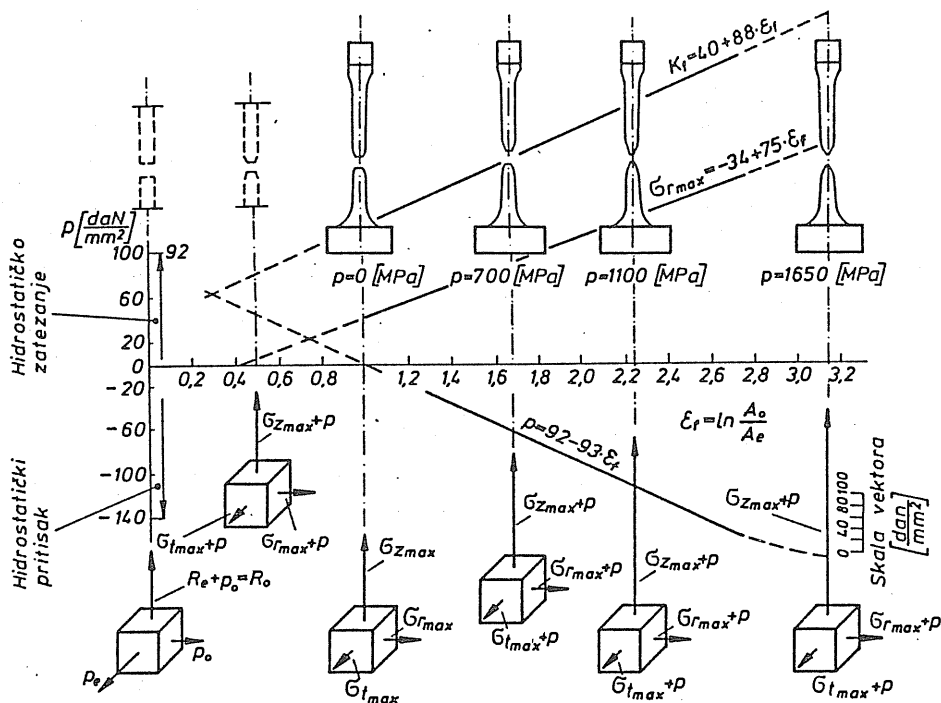
Prisustvo hidrostatičkog pritiska u zoni deformacije značajno menja naponsko stanje. Komponente napona na osi epruvete ($r=0$) mogu se odrediti prema izrazima:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma_{rmax} + p = K \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) + p \\ \sigma_t &= \sigma_{tmax} + p = K \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) + p \\ \sigma_z &= \sigma_{zmax} + p = K \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) + K + p\end{aligned}\quad (2.5.)$$

Na osnovu gornjih izraza može se konstatovati da dovoljnim povećanjem pritiska p može se troosno zatezanje prevesti čak u šemu napona sa troosnim pritiskom i na taj način uticati na veličinu deformacije pre pojave pukotine.

Na sli 2.3. je prikazan odnos naponskih komponenti za slučaj ispitivanja epruveta od čelika za ležajeve pri različitim vrednostima pritiska (od $p=0$ do $p=1.650$ MPa). Naponske šeme pokazuju da sa porastom pritiska smanjuje se uticaj radijalne komponente napona (σ_r) te zbog toga raste granična deformacija. Na istoj slici prikazana je i promena specifičnog deformacionog otpora u funkciji deformacije. Rezultat povećanja hidrostatičkog pritiska manifestuje se kroz značajno povećanje granične deformacije od vrednosti $\phi=1$ (pri $p=0$) na $\phi \approx 3,2$ (pri $p=1.650$ MPa).

Do sličnih rezultata došao je i Bridgman (sl.2.4.) ispitujući različite vrste čelika. Ove rezultate potvrdio je u svojim radovima Pugh uz korekciju da veza nije linearna kod svih materijala.

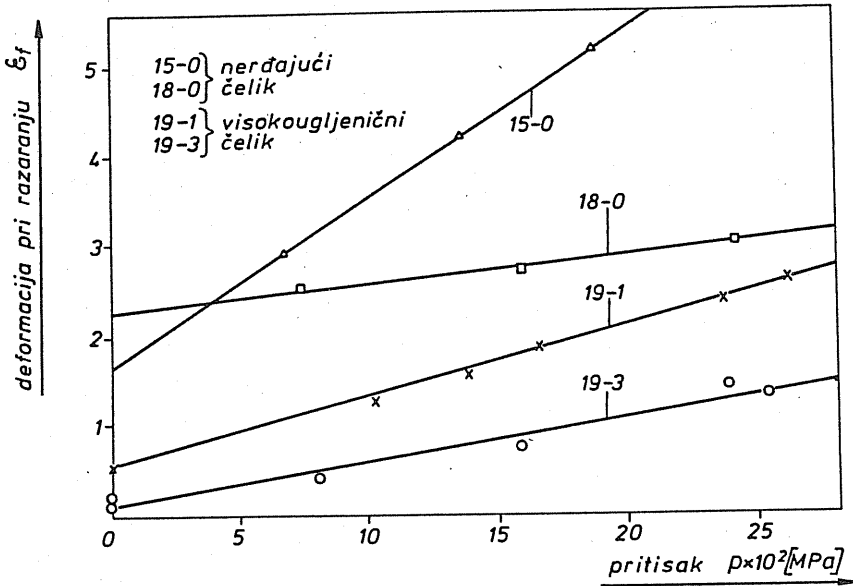


Sl.2.3. Naponsko stanje u centru lokalizacije deformacija /20/

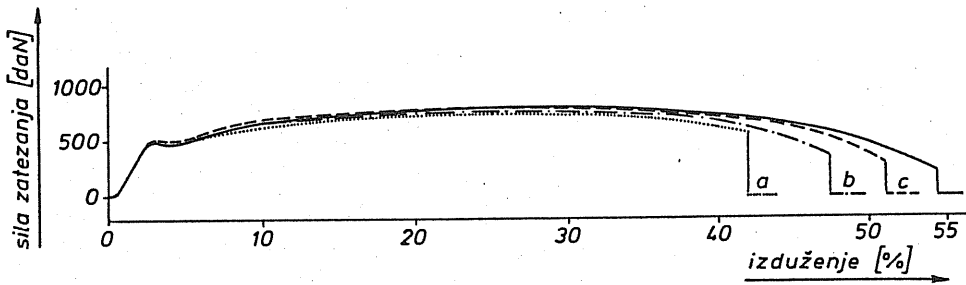
Što se tiče uticaja hidrostatičkog pritiska na ostale karakteristike pri ispitivanju zatezanjem većina rezultata je takva da se određeni zaključci mogu izvući iako nema baš potpune saglasnosti medju njima.

Ispitivanja Brandesa /20/ pokazuju da se izgled dijagrama zatezanja menja u smislu njegovog produženja zbog povećanja prekidne deformacije (sl.2.5.). Hidrostatički pritisak nema značajnijeg uticaja na granicu razvlačenja a takodje ni na čvrstoću materijala.

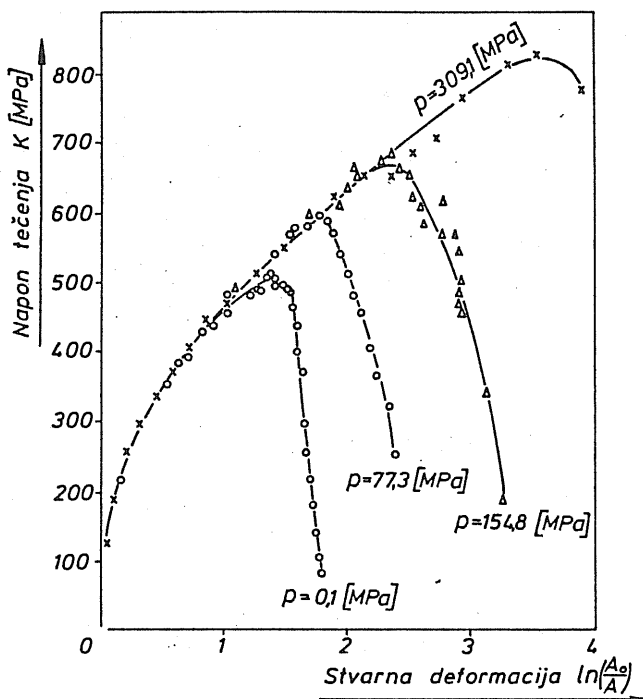
Ispitivanja uticaja hidrostatičkog pritiska na krivu tečenja vršena su na različitim materijalima i različitim vrednostima pritiska. Početna ispitivanja navodila su na generalni zaključak da hidrostatički pritisak ne utiče značajnije na vrednost deformacionog otpora. Medjutim, preciznija ispitivanja Bridgmana /19/ pokazala su da sa porastom hidrostatičkog pritiska raste i deformacioni otpor (sl.2.6.). Razlike dolaze do izražaja pri većim vrednostima stepena deformacije.



Sl.2.4. Promena deformacije pri prekidu epruvete u zavisnosti od hidrostatičkog pritiska /19/



Sl.2.5. Dijagram zatezanja za čelik sa 0,1%C, Brandes /20/
a) $p=400$ MPa; b) $p=600$ MPa; c) $p=700$ MPa

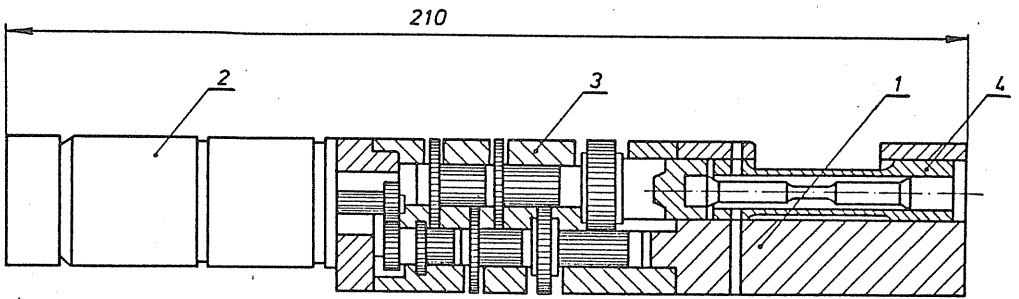


Sl.2.6. Uticaj hidrostatičkog pritiska na krivu tečenja /19/

2.2.2. Ispitivanje na uvijanje i smicanje

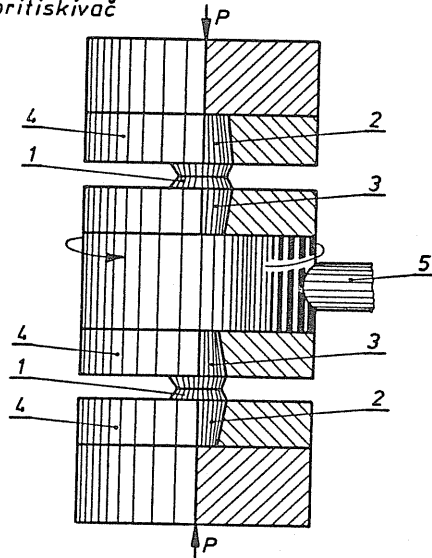
Na sl.2.7. je prikazan Pughov /20/ uređaj za ispitivanje uvijanjem u polju hidrostatičkog pritiska (do 1.000 MPa). Uređaj se sastoji od kućišta (1), pogonskog uređaja sa servomotorom (2) i zupčastim prenosnikom (3) i dinamometra za merenje obrtnog momenta (4). Pogonski uređaj sa zupčastim reduktorom omogućuje da se glavno vreteno obrće sa malom ugaonom brzinom pri ispitivanju (0,06 rad/min). Kompletan uređaj se nakon postavljanja uzorka stavlja u komoru sa visokim pritiskom u kojoj se obavlja proces ispitivanja. Pugh je u tu svrhu koristio komoru razvijenu za ispitivanje na zatezanje. Merenje obrtnog momenta vrši se pomoću dinamometra (4) koji se sastoji od cevi sa mernim trakama.

Konkretni podaci o ponašanju materijala pri tangencijalnom opterećenju u polju visokog pritiska mogu se pronaći u literaturi a bazirani su na ispitivanju smicanjem u kvazihidrostatičkim uslovima (sl.2.8.).



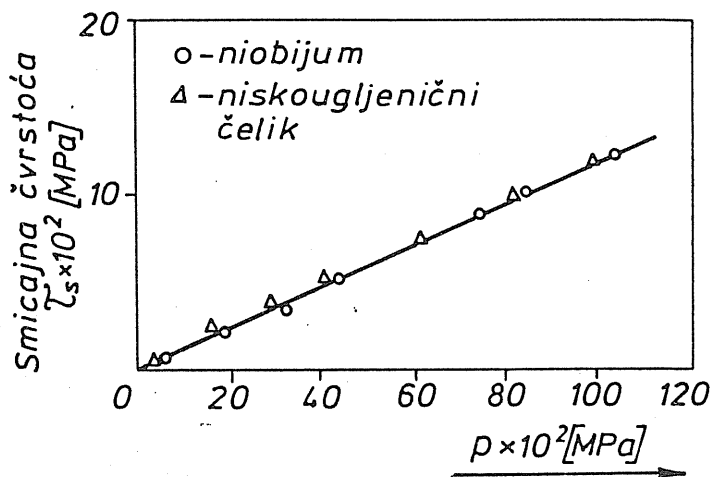
Sl.2.7. Uredjaj za ispitivanje na uvijanje

- | | |
|---------------------------|-----------|
| 1. epruveta | 4. prsten |
| 2. nepokretni pritiskivač | 5. poluga |
| 3. obrtni pritiskivač | |



Sl.2.8. Ispitivanje uvijanjem u kvazihidrostatskim uslovima /20/

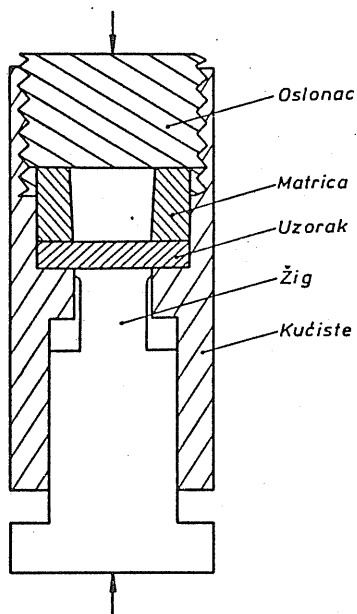
Ispitivanja se izvode na uzorcima male debljine ($0,03 \pm 0,3$ mm) prečnika 3 do 5 mm. Povećanje pritiska u uzorku ostvaruje se snažnim aksijalnim opterećenjem. Merenjem obrtnog momenta dolazi se do podataka o smicajnoj čvrstoći pri različitim vrednostima pritiska. Na sl.2.9. je data takva jedna zavisnost na bazi ispitivanja niskougljeničnog čelika i niobijuma. Ova, kao i ispitivanja drugih istraživača pokazuju da porastom



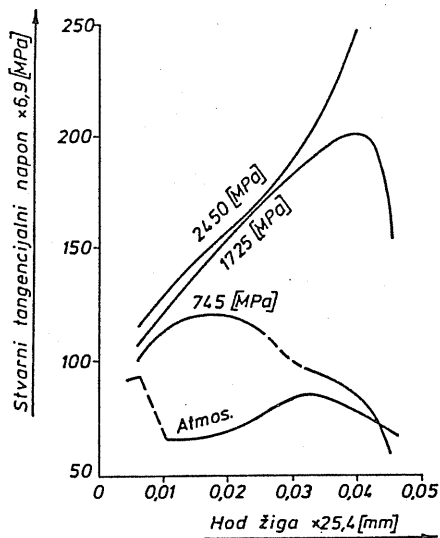
Sl.2.9. Promena smicajne čvrstoće od pritiska

hidrostatičkog pritiska raste smicajna čvrstoća materijala.

Ispitivanje smicanjem u hidrostatičkim uslovima ima praktični značaj zbog veoma rasprostranjene primene tehnologije razdvajanja lima deformacijom. Prva ispitivanja na smicanje u hidrostatičkim uslovima izveo je Bridgman /19/ pomoću uređaja (sl.2.10), koji se ubacuje u kontejner sa visokim pritiskom. Za vreme ispitivanja merena je sila na žigu kao i hod žiga. Posle vadenja uzorka iz uređaja merena je visina glatkog dela površine. Na osnovu rezultata merenja određivana je promena stvarnog tangencijalnog napona u zavisnosti od hoda probojca. Na sl.2.11. dati su rezultati ispitivanja za čelik sa 0,4%C a iz kojih proizilazi da hidrostatički pritisak značajno utiče na povećanje stvarnog tangencijalnog otpora. Ova ispitivanja su još pokazala da porastom hidrostatičkog pritiska raste visina glatke zone na uzorku.



Sl.2.10. Uredjaj za hidrostatičko ispitivanje smicanjem



Sl.2.11. Promena stvarnog smičućeg napona u funkciji hoda alata i pritiska

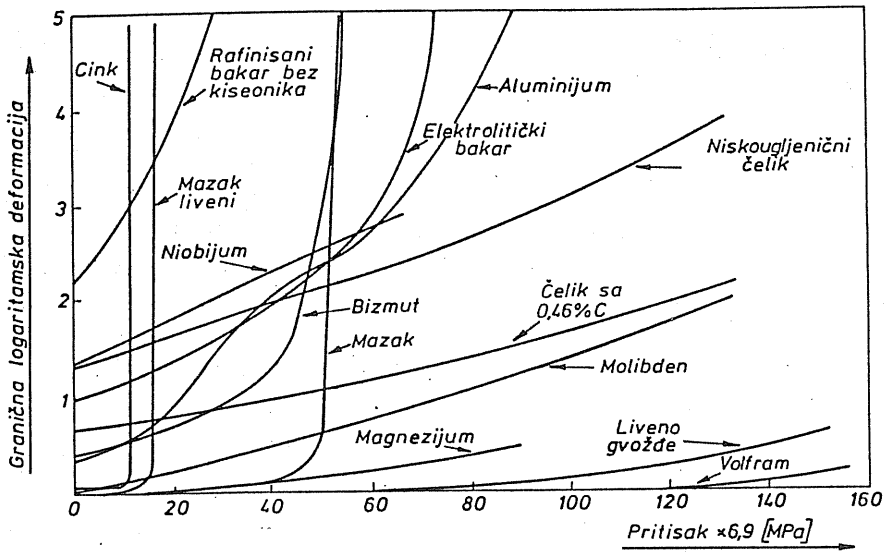
2.2.3. Deformabilnost materijala

Pozitivno dejstvo hidrostatičkog pritiska na povećanje deformabilnosti materijala objašnjava se njegovim uticajem na strukturu, odnosno, greške u strukturi materijala. Prisustvo visokog pritiska sprečava porast postojećih grešaka u strukturi materijala (mikropukotine) a takođe sprečava i nastojanje novih oštećenja što rezultira povećanjem granične deofrmacije.

Prva konkretna istraživanja uticaja hidrostatičkog pritiska na ispoljavanje plastičnih svojstava materijala, kao što je već rečeno, izvršio je Bridgman u eksperimentima zatezanja (sl.2.4.). Slična ispitivanja vršili su i drugi istraživači - Pugh, Brandes, Pleczinsky, Crosland i dr./20/.

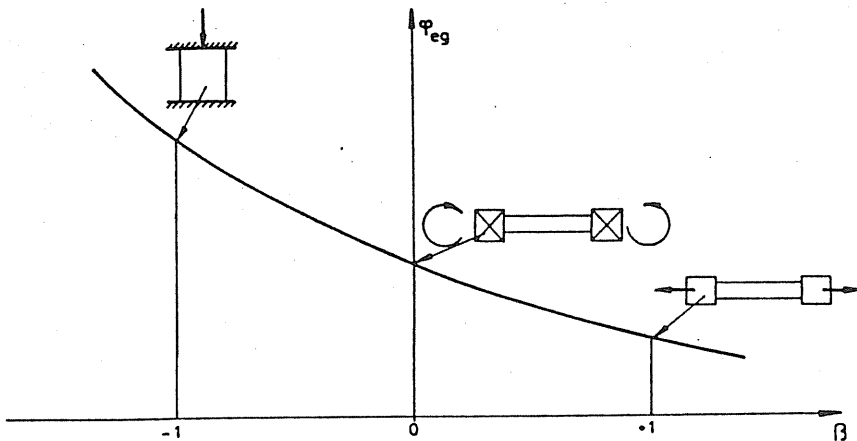
Na sl.2.12. su dati rezultati ispitivanja plastičnih svojstava različitih materijala koje su postigli Pugh, Brandes i dr. /20/. U svim slučajevima iskazan je porast graničnih deformacija sa porastom hidrostatičkog pritiska. Ispitivanja u ovom slučaju vršena su na uzorcima od bakra, cinka, bizmuta, aluminijuma čistog gvoždja, čelika i dr., sa pritiscima do 1.800 MPa.

Navedeni rezultati ukazuju da materijal ima veće mogućnosti oblikovanja u uslovima povećanog hidrostatičkog pritiska. Pri tome je važno naglasiti da nema značaja način ostvarivanja povišenog pritiska u zoni



Sl.2.12. Zavisnost granične deformacije od hidrostatičkog pritiska /20/

deformacije. Visoki pritisak se može ostvariti hidrauličnim putem, pomoću kvazi tečnosti ili mehaničkim putem. U određenim slučajevima prednost ima hidraulični način zbog smanjenja trenja u zoni deformacije.



Sl.2.13. Dijagram granične deformabilnosti

Povećanje deformabilnosti materijala kod hidrostatičke obrade u potpunosti je u skladu sa koncepcijom dijagrama granične deformabilnosti (sl.2.13.) koji povezuje veličinu granične deformacije (ϕ_{eg}) sa pokazateljem naponskog stanja β . Graničnu deformaciju predstavlja ukupna efektivna deformacija ostvarena do trenutka pojave lokalizacije deformacije ili vidljivih pukotina:

$$\phi_{eg} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\phi_1 - \phi_2)^2 + (\phi_2 + \phi_3)^2 + (\phi_3 - \phi_1)^2} \quad (2.6.)$$

gde su ϕ_1 , ϕ_2 i ϕ_3 glavne deformacije.

Pokazatelj naponskog stanja definisan je odnosom invarijanti tenzora napona i njegovog devijatora:

$$\beta = \frac{J_1}{\sqrt{3|J_{D2}|}} = \frac{3\sigma}{\sigma_e} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} \quad (2.7.)$$

gde je:

J_1 - prva invarijanta tenzora napona

J_{D2} - druga invarijanta devijatora napona

σ - hidrostatički napon

Pokazatelj naponskog stanja β može imati različite vrednosti, $\beta \gtrless 0$ što isključivo zavisi od hidrostatičkog napona (σ). U slučaju zateznog hidrostatičkog napona ($\beta > 0$) iz dijagrama proizilazi da se mogu očekivati niže vrednosti granične deformacije nego u slučaju negativnih vrednosti hidrostatičkog napona ($\beta < 0$) kada se postižu znatno više vrednosti graničnih deformacija. Granične deformacije rastu sa porastom hidrostatičkog pritiska što je potvrđeno i mnogobrojnim primerima hidrostatičke obrade.

2.2.4. Osnovni principi hidrostatičke obrade

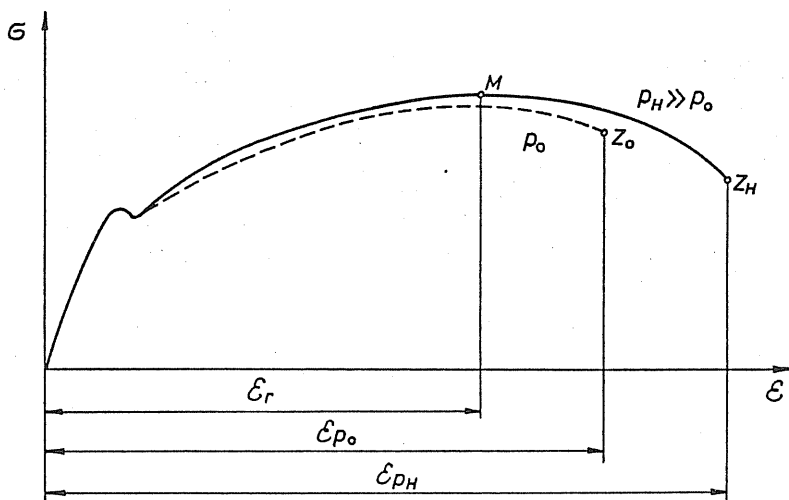
Na osnovi mnogobrojnih ispitivanja mehaničkih svojstava materijala i ispoljavanja deformabilnosti u hidrostatičkim uslovima ustanovljeni su osnovni principi hidrostatičke obrade koji imaju veliki značaj za primenu tehnoloških metoda hidrostatičkog oblikovanja.

1. Princip - odnosi se na uticaj hidrostatičkog pritiska na greške u strukturi materijala. Poznato je da zatezni naponi u materijalu uslovljavaju nastanak i rast mikropukotina čijim povećanjem do kritične vred-

nosti dolazi do razaranja materijala. Pritisni naponi sprečavaju širenje postojećih mikropukotina čime se produžava period "života deformacije" te se na taj način mogu ostvariti znatno više vrednosti stepena deformacije. Hidrostatički pritisak u određenim uslovima omogućava čak i "zalečivanje", tj. nestanak prethodno nastalih mikropukotina u materijalu. Prisustvo hidrostatičkog pritiska u materijalu ublažuje delovanje zateznih komponenti napona ne menjajući uslove tečenja metala jer devijator tenzora napona ostaje isti.

Na osnovu ovoga postaje jasno zašto se u procesima sa izraženim hidrostatičkim pritiskom (sabijanje, istiskivanje i kovanje) mogu ostvariti znatno više vrednosti stepena deformacije u odnosu na procese u kojima dominiraju zatezni naponi (vučenje, duboko izvlačenje...).

2. Princip - baziran je na uticaju hidrostatičkog pritiska na lokalizaciju deformacije. Naime, u početku se smatralo da hidrostatički pritisak utiče na trenutak pojave nestabilnosti, odnosno lokalizaciju deformacije pri ispitivanju na zatezanje. Detaljnija ispitivanja Bridgmana (sl. 2.14.) pokazala su da hidrostatički pritisak nema uticaja na lokalizaciju deformacije tj. da veličina ravnomerne deformacije ne zavisi od hidrostatičkog pritiska. Deformacija pri prekidu epruvete znatno je veća u slučaju ispitivanja sa hidrostatičkim pritiskom a ona je posledica odnosa definisanih prethodnim principom.



Sl.2.14. Uticaj hidrostatičkog pritiska na lokalizaciju deformacija

Na osnovu ovog principa proizilazi da kod procesa kod kojih dominiraju zatezni naponi ne mogu se očekivati pozitivni efekti delovanja hidrostatičkog pritiska, tj. kod procesa koji su limitirani lokalizacijom deformacije (npr. vučenje i duboko izvlačenje) hidrostatički pritisak nema uticaja. Međutim, poboljšanja se mogu ostvariti promenom naponske šeme sa dominantnim prisustvom zateznih napona u šemu u kojoj će preovladjivati pritisni naponi što se takodje može ostvariti delovanjem hidrostatičkog pritiska.

3. Princip - odnosi se na osobine obratka dobijenog deformisanjem u polju hidrostatičkog pritiska. Ovaj princip je u vezi sa prvim principom hidrostatičke obrade.

Naime, pri oblikovanju u hidrostatičkim uslovima visoki pritisak sprečava pojavu i širenje mikropukotina u materijalu. Na taj način dobijaju se obradci koji i dalje imaju dobra plastična svojstva jer u materijalu ne postoje oštećenja koja limitiraju veličinu granične deformacije. Potvrda ove činjenice nadjena je kod obradaka dobijenih hladnim istiskivanjem i dubokim izvlačenjem u hidrostatičkim uslovima /20/.

2.3. OSNOVNE ŠEME HIDROSTATICKE OBRADNE

U literaturi iz područja hidrostatičkog oblikovanja nalazi se značajan broj rešenja pojedinih metoda oblikovanja, naročito u oblasti istiskivanja i vučenja. U nastavku je izložena klasifikacija šema hidrostatičke obrade koja se u prvom redu odnosi na postupke istiskivanja i vučenja koji su našli najširu primenu.

Prema načinu stvaranja visokog pritiska u kontejneru razlikuju se:

1. Uredjaji direktnog dejstva kod kojih se pritisak ostvaruje delovanjem klipa, odnosno prese.
2. Uredjaji sa posebnim izvorom pritiska koji se napajaju sa tečnošću iz odgovarajućeg agregata.
3. Uredjaji sa hidromehaničkim pogonom kod kojih se opterećenje obratka ostvaruje kombinacijom hidrostatičkog pritiska i mehaničkim putem.

Prednosti uređaja direktnog dejstva su:

- mogućnost primene klasičnih presa za hidrostatičku obradu,
- kompaktna konstrukcija,
- obrada se izvodi sa minimalnom količinom tečnosti pod pritiskom,
- mali broj zaptivnih mesta,
- visoka pouzdanost.

Nedostaci uređjaja direktnog dejstva:

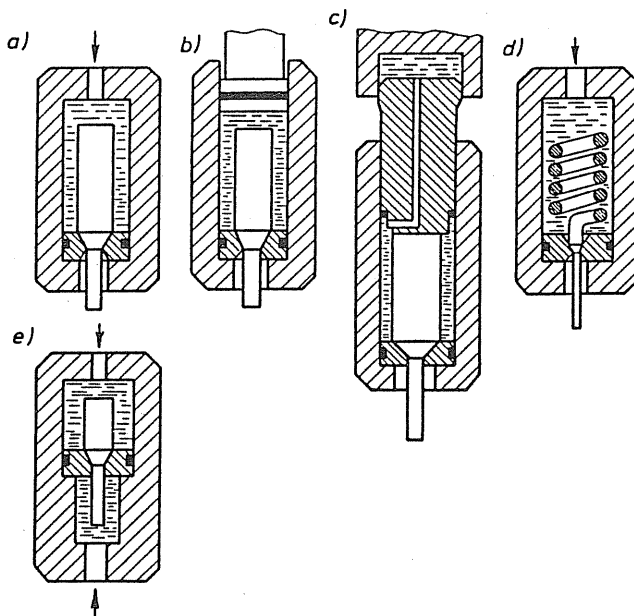
- postoji potreba za velikim hodom klipa,
- složeno zaptivanje klipa i cilindra.

Prednost uređjaja sa posebnim izvorom pritiska:

- ne postoje pokretne zaptivke,
- mogućnost obrade delova većeg prečnika,
- mogućnost napajanja većeg broja uređjaja sa jednim agregatom.

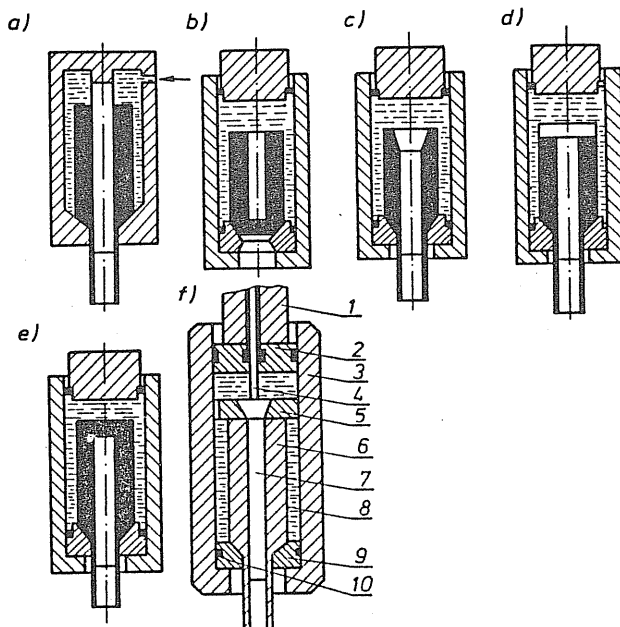
Nedostaci uređjaja sa posebnim izvorom za napajanje:

- glomaznost sistema i veliki broj zaptivnih mesta,
- potreba za specijalnim visokootpornim cevima,
- prisutni su značajni gubici pritiska kroz cevovod,
- u sistemu se nalazi velika količina tečnosti pod pritiskom koja akumulira energiju elastičnog sabijanja.

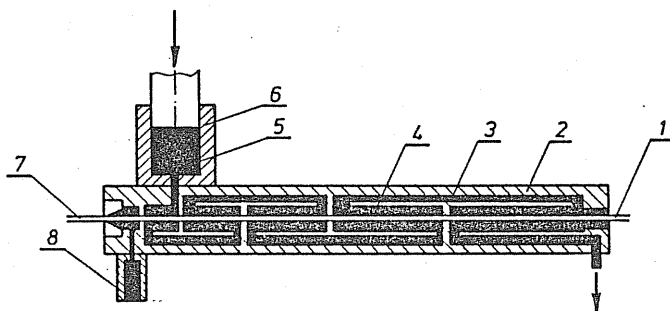


Sl.2.15. Hidrostatičko oblikovanje punih komada:

- a) Istiskivanje sa posebnim izvorom pritiska;
- b) uređjaj direktnog dejstva;
- c) hidromehaničko istiskivanje;
- d) istiskivanje žice;
- e) istiskivanje sa protivpritiskom.



Sl.2.16. Hidrostatičko oblikovanje šupljin komada:
a) uređaj sa nepokretnim trnom;
b,c,d,e) istiskivanje sa pokretnim trnom;
f) hidrostatičko istiskivanje sa pokretnim trnom.



Sl.2.17. Kontinualno istiskivanje žice

Hidromehaničko istiskivanje ima niz prednosti u odnosu na čisto hidrostatičko oblikovanje:

- Proces je stabilniji i ne postoji opasnost od "stick-slip" efekta;
- Regulacija brzine istiskivanja je jednostavnija;
- Pritisak tečnosti u kontejneru je za 10-20% niži zahvaljujući dodatnom mehaničkom opterećenju.

S obzirom na oblik obratka hidrostatskičko oblikovanje se deli na:

1. Oblikovanje punih komada (sl.2.15.)
2. Oblikovanje šupljih komada i cevi (sl.2.16.).

S obzirom na režim rada hidrostatskičko oblikovanje se deli na:

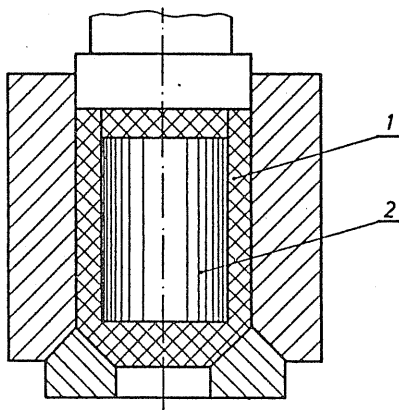
1. Kontinualno oblikovanje - oblikovanje žice (sl.2.17.) gde se potrebna aksijalna sila ostvaruje aktiviranjem sile trenja i njenim usmeravanjem u pravcu tečenja metala.

2. Oblikovanje pojedinačnih komada (sl.2.15. i 2.16.).

Osim hidrostatskičkog oblikovanja u hladnom stanju oblikovanje se vrši i na povišenim temperaturama. Medjutim, ova vrsta hidrostatskičke obrade znatno je složenija iako postoji prednost zbog smanjenja deformacionog otpora a time i hidrostatskičkog pritiska.

Hladno hidrostatskičko istiskivanje, pa i druge metode oblikovanja, uvode se u industrijsku primenu na postojećoj opremi (mašinama) i na taj način se značajno poboljšava kvalitet proizvoda, kroz poboljšanje mehaničkih osobina i tačnost izrade delova a takodje se produžava trajnost alata zbog poboljšanih uslova podmazivanja na kontaktnim površinama.

Osim navedenih šema hidrostatskičke obrade kod kojih se visoki pritisak u zoni deformacije ostvaruje hidrauličnim putem, postoje i postupci kod kojih se povećanje pritiska postiže pomoću čvrstih elemenata alata (npr. fino razdvajanje presovanjem) ili pomoću kvazi tečnosti kao u slučaju istiskivanja sl.2.18. U ovom slučaju pripremak se pre obrade



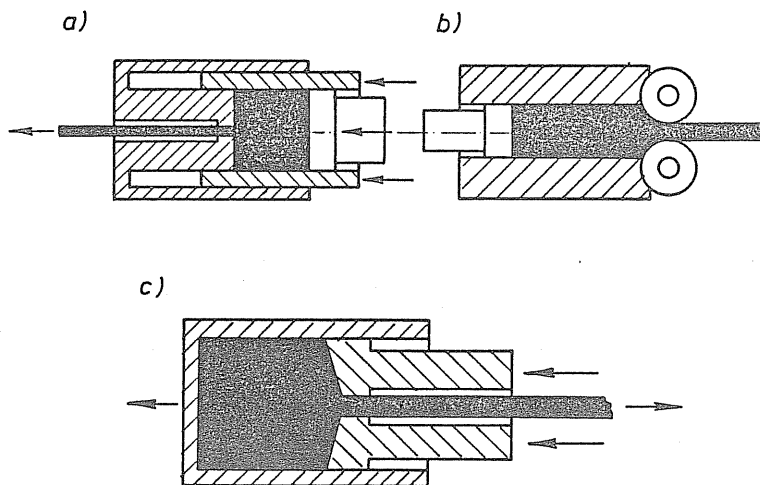
Sl.2.18. Istiskivanje sa oblogom

- 1 - košuljica od mekog materijala
- 2 - pripremak

postavlja u oblogu - košuljicu od materijala sa visokim plastičnim svojstvima (npr. olovo). Na taj način obezbedjuje se delovanje visokog pritiska po za-

premini obratka a takodje se razdvajaju kontaktne površine obratka i matrice i smanjuje trenje.

Smanjenje kontaktnog trenja kod hidrostatičkog oblikovanja koje je posledica prodiranja tečnosti izmedju površina obradka i matrice predstavlja još jednu prednost hidrostatičke obrade. Na taj način smanjuje se neravnomernost napona i deformacija što indirektno doprinosi povećanju deformabilnosti materijala, odnosno, povećanju efikasnosti ove vrste obrade. Radi toga se u šeme hidrostatičke obrade mogu uključiti i postupci kod kojih je na neki način obezbedjeno smanjenje trenja na kontaktnim površinama alata i obratka, kao što je to slučaj sa postupcima istiskivanja sl.2.19. U prvom slučaju (sl.2.19.a) smanjenje trenja na površini obratka je postignuto ubacivanjem pokretnog prstena. U drugom slučaju smanjenje trenja u zoni deformacije ostvareno je pomoću valjaka koji se obrću pa se trenje klizanja zamenjuje trenjem kotrljanja a u trećem slučaju (sl.2.19.c) trenje je smanjeno tako što je kretanje obratka zamenjeno kretanjem matrice.



Sl.2.19. Konstrukciona rešenja za smanjenje trenja u procesu istiskivanja

2.4. TEORIJSKE OSNOVE HIDROSTATIČKE OBRADE

U ovom poglavlju razmotreni su neki teoretski aspekti vezani za hidrostatičko oblikovanje. U prvom redu razmotrene su osnovne karakteristike radnog fluida, zatim uloga trenja sa analizom opterećenja, radni pritisak i dinamika procesa.

2.4.1. Osnovne karakteristike radnog fluida

U nastavku su prikazane osnovne fizičke karakteristike tečnosti bitne za hidrostatičko oblikovanje.

Gustina tečnosti definisana je odnosom mase tečnosti (m) i zapremine Q :

$$\rho = \frac{m}{Q} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2.8.)$$

Specifična težina tečnosti (γ) je odnos njene težine (G) i zapremine (Q):

$$\gamma = \frac{G}{Q} \quad (\text{N/m}^3)$$

Stišljivost fluida je osobina promene zapremine tečnosti pod dejstvom pritiska a definisana je koeficijentom stišljivosti (β):

$$\beta = -\frac{1}{Q_0} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta p} \quad (\text{m}^2/\text{N}) \quad (2.9.)$$

Ako se pritisak sa početne vrednosti P_0 poveća za Δp tada će se početna zapremina tečnosti Q_0 smanjiti na vrednost Q koja se sada može izračunati:

$$Q = Q_0 (1 - \beta \Delta p) \quad (2.10.)$$

Zbog promene zapremine promeniće se i gustina i specifična težina tečnosti:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \beta \Delta p} \quad (2.11.)$$

Zapreminski modul elastičnosti E_Q je veličina suprotna koeficijentu stišljivosti:

$$E_Q = \rho \cdot \frac{dp}{d\rho} \quad (2.12.)$$

odnostno:

$$\frac{E_Q}{\rho} = \frac{dp}{d\rho} = a^2 \quad (2.13.)$$

gde je a - brzina prostiranja talasa u elastičnoj sredini koja je jednaka brzini zvuka.

Rad elastičnog sabijanja tečnosti:

$$A = F_k \cdot \int_0^{l_1} p dz = \int_0^{\Delta Q} p \cdot d(\Delta Q) \quad (2.14.)$$

gde je:

F_k - površina tečnosti koja se pomera zbog promene pritiska

l_1 - hod ili put pomeranja

ΔQ - promena zapremine tečnosti u zavisnosti od pritiska a može se izraziti preko koeficijenta stišljivosti (jednačina 2.9.) iz koje se dobija:

$$\Delta Q = \beta \cdot p \cdot Q_0 \quad (2.15.)$$

Viskozoznost predstavlja svojstvo tečnosti koje se izražava kao tangencijalni otpor ili otpor klizanju slojeva tečnosti. Viskozoznost je osobina tečnosti suprotna od osobine koja izražava tečljivost fluida.

Tangencijalni napon koji se javlja u sloju tečnosti zavisi od viskozoznosti tečnosti i izražava se sledećom relacijom:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dh} \quad (2.16.)$$

gde je:

η (PaS) - dinamički koeficijent viskozoznosti

$\frac{dv}{dh}$ - promena brzine v na rastojanju h .

Osim dinamičke viskozoznosti postoji i kinematska viskozoznost:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (m^2/s) \quad (2.17.)$$

Viskozoznost tečnosti značajno zavisi od temperature:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{-\lambda(t-t_0)} \quad (2.18.)$$

gde su η i η_0 koeficijenti na odgovarajućim temperaturama; λ - koeficijent zavisan od vrste tečnosti (za ulje $\lambda = 0,023-0,033$).

Viskoznost takodje zavisi i od pritiska:

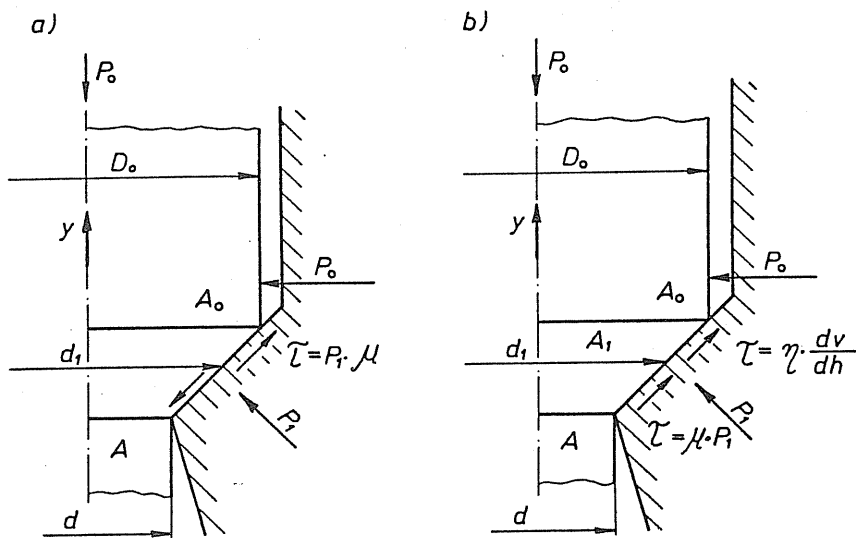
$$\eta = \eta_0 e^{q(p-p_0)} \quad (2.19.)$$

gde je q - faktor zavisan od vrste tečnosti a za ulje se kreće od 0,0023 do 0,003.

2.4.2. Analza sila i uloga trenja

U procesu hidrostatičkog istiskivanja postoje dve hipoteze o ulozi trenja u zoni deformacije /22/:

1. Hipoteza aktivnog trenja
2. Hipoteza pasivnog trenja..



Sl.2.20. Šema opterećenja kod hidrostatičkog istiskivanja
a) Suvo trenje; b) mokro trenje

Uslovi za pojavu suvog odnosno mokrog trenja mogu se definisati iz uslova ravnoteže sila koje deluju u aksijalnom pravcu ($\Sigma F_{iy} = 0$), sl. 2.20.

Aktivna spoljašnja sila proizvedena hidrostatičkim pritiskom iznosi:

$$F = p_o \cdot A_o = p_o \cdot \frac{D_o^2 \pi}{4} \quad (2.20.)$$

Reakcija konusnog dela matrice za oba slučaja (sl.2.20. a i b), projektovana u pravcu y-ose iznosi:

$$F_{ny} = p_1 (A_o - A) \quad (2.21.)$$

Prema hipotezi mokrog trenja tečnost pod pritiskom prodire u zazor izmedju obratka i matrice i stvara silu trenja čija projekcija u pravcu ose y deluje u pravcu tečenja metala i iznosi:

$$F_{ty} = -\eta \cdot \frac{dv}{dh} (A_o - A) \cdot \cotg \alpha \quad (2.22.)$$

η - koeficijent viskoznosti tečnosti

v - brzina tečnosti

h - debljina sloja tečnosti

U slučaju suvog trenja komponenta sile trenja deluje u suprotnom pravcu i iznosi:

$$F_{ty} = \mu \cdot p_1 (A_o - A) \cdot \cotg \alpha \quad (2.23.)$$

Jednačina ravnoteže svih sila u slučaju mokrog trenja glasi:

$$p_o \cdot A_o = p_1 (A_o - A) - \eta \cdot \frac{dv}{dh} (A_o - A) \cotg \alpha \quad (2.24.)$$

čijim sredjivanjem se dobija:

$$p_o = \psi (p_1 - \eta \cdot \frac{dv}{dh} \cdot \cotg \alpha) \quad (2.25.)$$

gde je:

$$\psi = \frac{A_o - A}{A_o} = 1 - \frac{A}{A_o} = 1 - \frac{1}{\lambda}$$

U slučaju suvog trenja jednačina ravnoteže ima sledeći oblik:

$$p_o A_o = p_1 (A_o - A) + \mu \cdot p_1 (A_o - A) \cotg \alpha \quad (2.26)$$

čijim sredjivanjem se dobija:

$$p_o = p_1 \psi (1 + \mu \cotg \alpha) \quad (2.27.)$$

Poboljšanje uslova obrade ostvaruje se u slučaju prolaza tečnosti između kontaktnih površina obratka i matrice, tj. u uslovima mokrog trenja. Iz jednačine (2.27.) proizilazi da će ti uslovi nastati u slučaju:

$$\frac{p_0}{p_1} \geq 1 \text{ tj. } \psi (1 + \mu \cot \alpha) \geq 1 \quad (2.28.)$$

odnosno:

$$\cot \alpha \geq \frac{1 - \psi}{\mu \cdot \psi} \text{ tj.}$$

$$\cot \alpha \geq \frac{1}{\mu \cdot (\lambda - 1)} \quad (2.29.)$$

gde je:

$$\lambda = \frac{A_0}{A}$$

Iz jednačine (2.25.) proizilazi da je p_1 uvek veće od p_0 što onemogućava stvaranje uslova za mokro trenje i u suprotnosti je sa hipotezom aktivnog trenja. Međutim, eksperimenti pokazuju da je kod hidrostatičkog istiskivanja ipak prisutno mokro trenje, a veličina zone mokrog trenja zavisi od faktora obuhvaćenih gornjom analizom. U stvari, u početnom stadijumu istiskivanja u pitanju je suvo trenje, kontaktne površine su priljubljene jedna uz drugu i time je ostvareno potpuno zaptivanje matrice. Porastom spoljašnjeg pritiska tečnost potpuno prodire između kontaktnih površina što dovodi do stvaranja uslova za mokro trenje i shodno jednačini (2.25.) raste pritisak p_1 . Kada pritisak p_1 dostigne određenu vrednost dužina zone mokrog trenja je konačna a može se odrediti iz uslova ravnoteže svih sila u pravcu Y-ose:

$$p_0 A_0 = p_1 (A_0 - A) + \eta \frac{dv}{dh} (A_0 - A_1) \cot \alpha + \mu \cdot p_1 (A_1 - A) \cot \alpha \quad (2.30.)$$

odakle je:

$$p_0 = p_1 \psi + \eta \frac{dv}{dh} \left(1 - \frac{d_1^2}{D_0^2}\right) \cot \alpha + \alpha p_1 \left(\frac{d_1^2 - d^2}{D_0^2}\right) \quad (2.31.)$$

Iz jednačine (2.28.) proizilazi odnos parametara (μ , ψ i α) koji dovode do pojave mokrog trenja. Povećanjem veličine redukcije preseka ψ i koeficijenta trenja μ , odnosno smanjenjem ugla konusa matrice stvaraju se uslovi za pojavu mokrog trenja i obrnuto. Pri određenom odnosu parametara ψ , η , μ dv/dh i α mokro trenje će se prostirati duž cele zone deformacije ($d_1=d$) jer u tom slučaju iz uslova ravnoteže proizilazi:

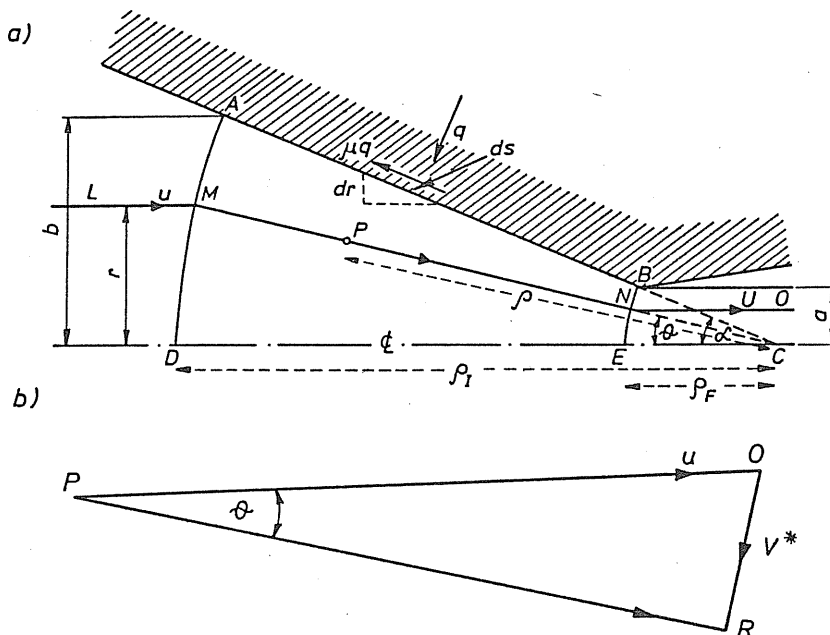
$$p_o = \psi (p_1 + \eta \cdot \frac{dv}{dh} \cotg \alpha) \quad (2.32.)$$

U slučaju mokrog trenja tangencijalna sila ima aktivnu ulogu - deluje u pravcu tečenja metala, pa prema tome treba uvek težiti takvoj kombinaciji parametara koji će stvoriti uslove za pojavu ove vrste trenja.

2.4.3. Pritisak radnog fluida

Pritisak tečnosti u kontejneru kod hidrostatičkog istiskivanja mora biti dovoljan da savlada otpor čiste deformacije i otpore unutrašnjeg i spoljašnjeg trenja. Spoljašnji priraštaj rada pri istiskivanju koji iznosi $p \cdot A_o \cdot \Delta z$ (gde je p - pritisak tečnosti, A_o - površina šripremka, Δz - pomeranje obratka) troši je na:

- 1 - savladjivanje otpora homogene deformacije,
- 2 - savladjivanje unutrašnjeg trenja,
- 3 - savladjivanje trenja izmedju priprema i kontejnera,
- 4 - savladjivanje trenja izmedju obratka i matrice.



Sl.2.21. Tečenje kroz konusni alat /20/

Rad utrošen na čistu deformaciju ne zavisi od ugla konusa matrice, dok rad unutrašnjeg trenja - redudantni rad, koji nastaje zbog promene pravca toka vlakana zavisi od ugla konusa matrice (sl.2.21.). Do promene pravca vlakana dolazi na ulazu u zonu deformacije (linija AD) kao i na izlazu iz zone deformacije (luk BE). Prema Pughu /20/ pritisak za savladjivanje redudantnog rada za oblik ulazne granice prema sl.2.21. iznosi:

$$P_{R1} = \frac{K}{2} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right] \quad (2.33.)$$

Sličan izraz postoji i za izlaznu zonu (BE).

Ukupni pritisak istiskivanja za slučaj idealnoplastičnog materijala prema Pughu iznosi:

$$\frac{p}{K_o} = 0,924 \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cos \alpha \right] + \ln R \left[1 + \frac{\mu R \ln R}{\sin \alpha (R-1)} \right] \quad (2.34.)$$

gde je:

K_o - specifični deformacioni otpor

α - ugao matrice

$R = \frac{A_o}{A}$ - redukcija preseka

μ - koeficijent trenja

Pugh je takodje primenom prethodnog modela metodom gornje granice odredio ukupni pritisak istiskivanja

$$\frac{p}{K_o} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cotg \alpha \right] + f(\alpha) \cdot \ln R + \mu \cotg \alpha \cdot \ln R \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \ln R \right) \quad (2.35.)$$

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left\{ 1 - \cos \alpha \cdot \sqrt{\left[1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha \right]} + \frac{1}{\sqrt{11 \cdot 12}} \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12}} \cdot \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}} \right\} \quad (2.36.)$$

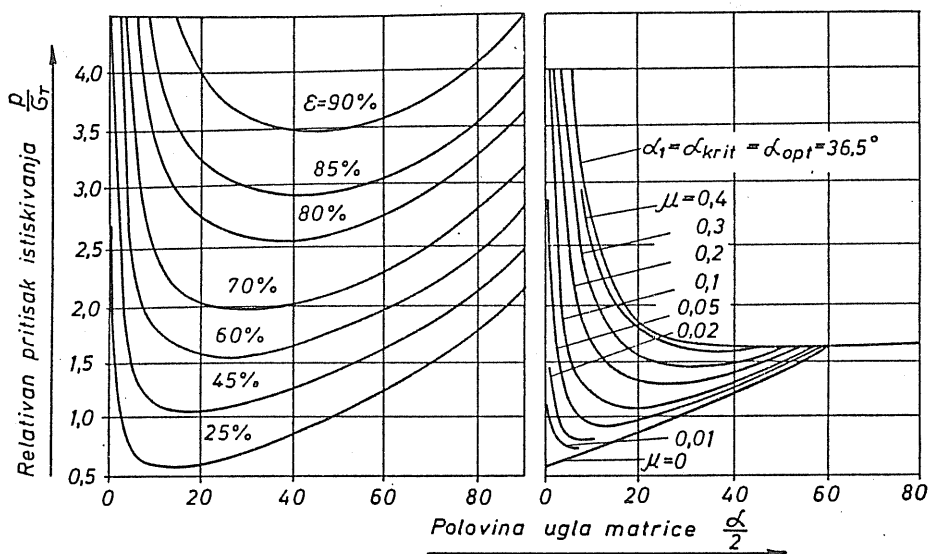
Vrednost funkcije $f(\alpha)$ u uobičajenim uslovima hidrostatičkog istiskivanja približno iznosi $f(\alpha) \approx 1$ i raste značajnije sa povećanjem ugla α preko 90". Medjutim, hidrostatičko istiskivanje izvodi se sa manjim uglom matrice koji se odredjuje optimiranjem, tj. nalaženjem minimalne vrednosti pritiska:

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \sqrt{3} \mu \cdot \left(1 + \ln \frac{D_o}{d} \right) \cdot \ln \frac{D_o}{d}} \quad (2.37.)$$

gde je:

D_0 - prečnik pripremljena

d - prečnik obratka



Sl.2.22. Optimalne vrednosti ugla matrice /22/

Rešenje Pugh za pritisak tečnosti može se pojednostavljeno prikazati u obliku:

$$p = a \cdot \ln R + b \quad (2.38.)$$

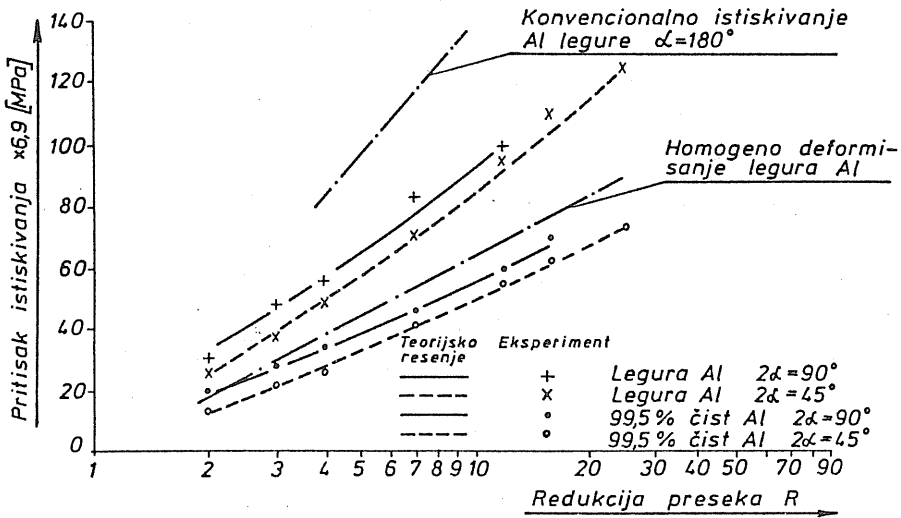
pri čemu je $b \approx 0$, odnosno:

$$p = a \cdot \ln R \quad (2.39.)$$

gde a - predstavlja faktor zavisan od mehaničkih osobina materijala - specifičnog deformacionog otpora, odnosno tvrdoće materijala. Prema Kolpašnjikovu ova zavisnost ima sledeći oblik:

$$p = 157,5 \ln R (0,375 HV+4) \quad (\text{daN/cm}^2) \quad (2.40.)$$

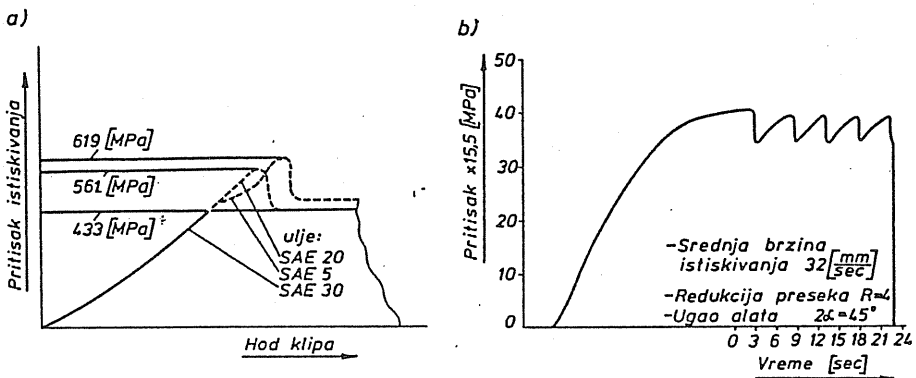
Linearna zavisnost pritiska istiskivanja od redukcije preseka eksperimentalno je potvrđena od strane Pugh (sl.2.23.).



Sl.2.23. Zavisnost pritiska istiskivanja od redukcije /20/

2.4.4. Stabilizacija pritiska

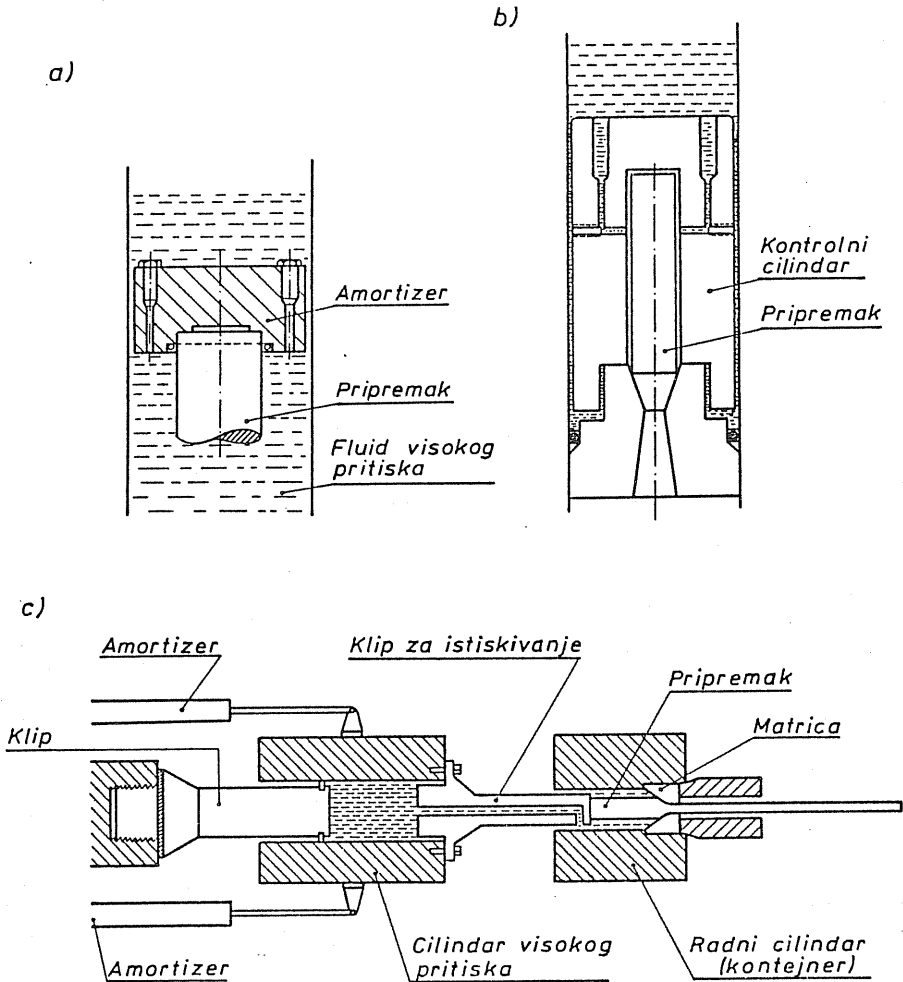
U početnoj fazi istiskivanja pritisak tečnosti znatno je veći od pritiska u stabilnoj fazi hidrostatičkog istiskivanja (sl.2.24.a). Karakter ove promene zavisi prvenstveno od kvaliteta upotrebene tečnosti i sredstava za podmazivanje. Ukoliko tečnost ne sadrži adekvatno sredstvo za



Sl.2.24. Promena pritiska pri hidrostatičkom istiskivanju /20/

podmazivanje pritisak istiskivanja neće se stabilizovati, biće prisutna pojava "stick-slip" efekta (sl.2.24.b), što može dovesti do oštećenja na spoljašnjoj površini obratka. Pojava "Stick-slipa" zavisi i od drugih faktora: brzine istiskivanja, ugla matrice, dimenzija pripremk, redukcije preseka i vrste materijala. Ova pojava redje se javlja kod deformabilnijih materijala.

Stablizacija procesa hidrostatičkog istiskivanja postiže se i primenom odgovarajućih konstrukcionih mera (sl.2.25.). U prvom slučaju (sl.2.25.a) stabilizacija procesa se postiže pomoću sile trenja koja se



Sl.2.25. Konstrukciona rešenja za stabilizaciju procesa

stvara između diska i kontejnera. Amortizacioni disk je pričvršćen za gornji kraj obratka a tečnost u donji deo kontejnera prolazi kroz zazor između diska i kontejnera. I u drugom rešenju (sl.2.25.b) koristi se sila trenja za stabilizaciju procesa. Sila trenja ostvaruje se u zazoru između kontrolnog cilindra i obratka.

Stabilizacija procesa istiskivanja kod rešenja prikazanog na sl. 2.25.c) ostvarena je specijalnom konstrukcijom celog sistema za hidrostatičko istiskivanje. U ovom slučaju pripremak je učvršćen na kraj radnog klipa, a radni klip je vezan za cilindar visokog pritiska. Amortizeri koji su vezani za cilindar visokog pritiska sprečavaju povećanje njegove brzine, odnosno brzine klipa i obratka. Na taj način se ostvaruje stabilizacija brzine a time i stabilizacija pritiska istiskivanja.

2.4.5. Uloga protivpritiska kod hidrostatičkog istiskivanja

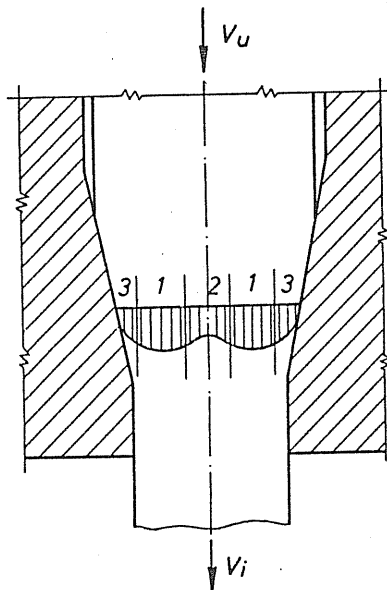
Izučavanje uticaja hidrostatičkog pritiska na plastična svojstva materijala su pokazala da plastičnost nije osobina već stanje u kojem se materijal nalazi. Porastom pritiska u zoni deformacije povećavaju se mogućnosti oblikovanja. Istiskivanje sa protivpritiskom primenjuje se kod teškodeformabilnih materijala kada obično hidrostatičko istiskivanje ne daje zadovoljavajući rezultat.

Na sl.2.15e prikazana je šema hidrostatičkog istiskivanja sa diferencijalnim pritiskom tj. sa tečnošću pod pritiskom u zoni izlaska obratka iz matrice.

Povećanje pritiska u zoni deformacije ima dvojaku ulogu: sprečavanje nastajanja mikropukotina usled prisustva zateznih napona i stvaranje uslova za eliminaciju već nastalih pukotina. Za "zalečivanje" mikropukotina potrebno je obezbediti ekstremno visoke vrednosti pritiska, dok se ublažavanje zateznih napona može ostvariti sa relativno malim vrednostima pritiska. Protivpritisk kod hidrostatičkog istiskivanja ima prvenstveno ulogu da eliminiše uticaj zateznih komponenti napona.

Pojava zateznih napona pri istiskivanju dovodi se u vezu sa rasporedom brzina duž obratka. Deformacije u centralnoj zoni obratka su manje od deformacija u perifernoj zoni obratka. Na sl.2.26. je prikazana distribucija brzine deformacije u poprečnom preseku obratka iz koje se jasno zapaža neravnomernost prouzrokovana delovanjem trenja na kontaktnoj površini. Zona 1 ima najveću brzinu i povlači za sobom čestice iz zone 2 i 3 usled čega dolazi do stvaranja zateznih napona u radialnom

pravcu što dovodi do pojave pukotina. Pojava pukotina povezana je i sa lokalizacijom deformacije u radijalnom pravcu. Zavisno od uslova deformisanja, mogu u unutrašnjosti obratka nastati pukotine koje će se širiti



Sl.2.26. Promena brzine deformacije

ka periferiji i izazvati potpuno razaranje komada.

Veličina protivpritiska koja omogućuje uspešno istiskivanje zavisi od vrste materijala, koeficijenta trenja, redukcije preseka obratka, ugla matrice i dr. Kolmogorov /22/ daje izraz za odredjivanje veličine protivpritiska (P_b):

$$P_b = 0,58 \sigma_t \left[\frac{1}{\sqrt{3}} - \left(\frac{\sigma}{\tau_e} \right)_{kr} \right] - p \quad (2.41.)$$

gde je:

σ_t - napon tečenja

$\left(\frac{\sigma}{\tau_e} \right)_{kr}$ - pokazatelj napona na kritičnom mestu obratka

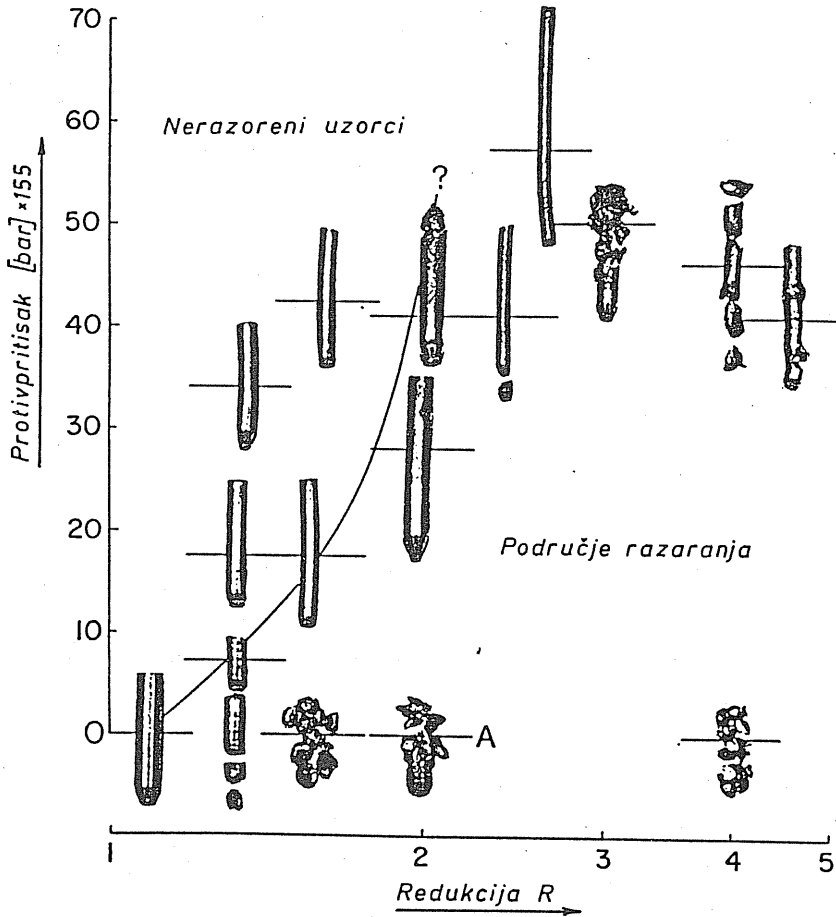
σ - hidrostatički napon

τ_e - tangencijalni efektivni napon

p - pritisak u gornjem cilindru

Pugh /20/ je eksperimentalno odredjivao zavisnost protivpritiska od različitih faktora. Na sl.2.27. je data promena protivpritiska u funkciji

redukcije preseka pri istiskivanju delova od legure magnezijuma sa 9,5% Al, 0,5%Zn i 0,3%Mg sa uglom matrice od 45° .



Sl.2.27. Uticaj protivpritisaka na redukciju /20/

2.5. TEHNOLOŠKE METODE HIDROSTATIČKOG OBLIKOVANJA

Većinu tehnoloških metoda hidrostatičke obrade predstavljaju postupci koji postoje i u klasičnim verzijama:

- Hidrostatičko istiskivanje;
- Hidrostatičko vučenje;
- Hidrostatičko kovanje (sabijanje);

- Hidrostatičko savijanje;
- Hidrostatičko duboko izvlačenje;
- Hidrostatičko oblikovanje cevi itd.

Najveći značaj za razvoj i primenu hidrostatičke obrade ima hidrostatičko istiskivanje i vučenje i njima je u nastavku posvećena odgovarajuća pažnja. Osim toga, poseban značaj imaju postupci hidrostatičkog oblikovanja kod kojih je povećanje pritiska u zoni deformacije ostvareno mehaničkim putem ili pomoću kvazitečnosti. Neki od tih postupaka takodje su obradjeni u ovom poglavlju.

2.5.1. Hidrostatičko istiskivanje

Hidrostatičko istiskivanje i uopšte upotreba hidrostatičkog pritiska pri oblikovanju predstavlja revolucionarno dostignuće u području hladnog deformisanja.

Početak značajnijih eksperimentalnih istraživanja hidrostatičkog istiskivanja vezuje se za Bridgmana. U novije vreme veliki doprinos razvoju ove tehnologije dao je Pugh /20/.

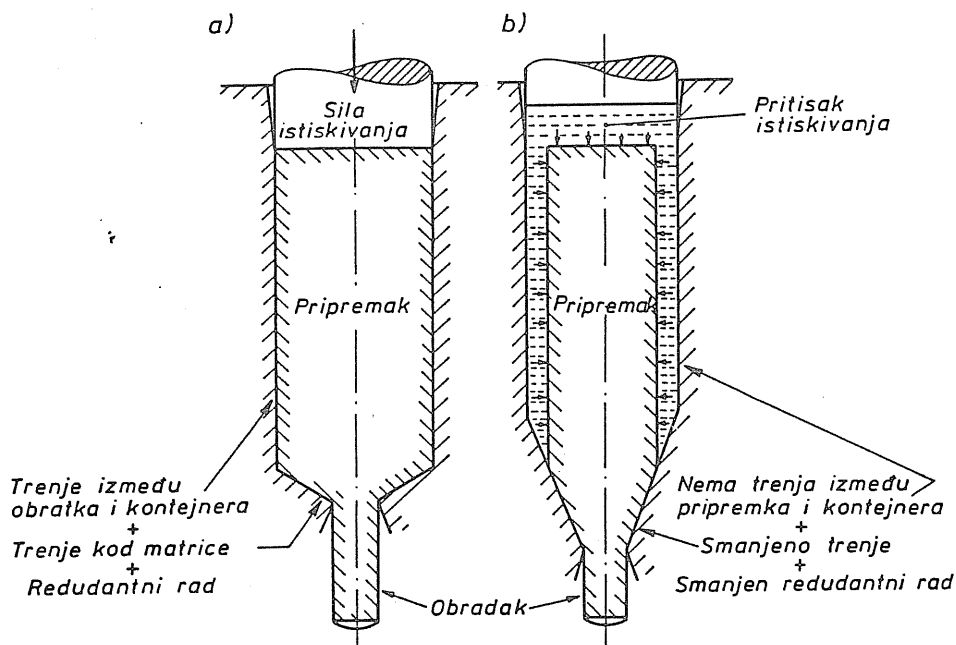
Hidrostatičko istiskivanje (sl.2.28.b) predstavlja proces hladnog oblikovanja punih i šupljih komada u alatu sa tečnošću pod visokim pritiskom (preko 3.000 MPa). Potrebno opterećenje obratka dobija se pomoću tečnosti pod pritiskom a ne direktno preko čvrstih elemenata alata kao što je to slučaj kod klasičnog istiskivanja (sl.2.28.a). Prisustvo tečnosti pod visokim pritiskom izaziva određene čisto praktične probleme kao što su konstrukcija odgovarajućeg kontejnera-posude, zatim zaptivanje spojeva, podmazivanje, kontrola stabilnosti procesa itd.

Osnovne karakteristike i prednosti hidrostatičkog istiskivanja mogu se definisati pomoću sl.2.28.

Pripremak kod hidrostatičkog istiskivanja nije u kontaktu sa zidom kontejnera te zbog toga pritisak istiskivanja ne zavisi od dužine obratka kao što je to slučaj sa konvencionalnim postupkom. Naponsko stanje u gornjem delu priprema je ravnomerno pritisno za razliku od klasičnog istiskivanja kod kojeg postoji i tangencijalni kontaktni napon kao posledica trenja.

Zahvaljujući visokom pritisku smanjeno je trenje na kontaktnoj površini obratka i matrice koji su razdvojeni tankim filmom tečnosti te je prisutno idealno podmazivanje. Smanjenje trenja duž zone deformisanja kod hidrostatičkog istiskivanja ima za posledicu smanjenje ukupnog sred-

njeg pritiska istiskivanja u odnosu na klasično istiskivanje. Osim toga, kod hidrostatičkog istiskivanja znatno je poboljšana ravnomernost deformacija i napona u zoni deformisanja što omogućuje veće vrednosti redukcije preseka u odnosu na konvencionalno istiskivanje.



Sl.2.28. Hidrostatičko istiskivanje (Pugh, 20)

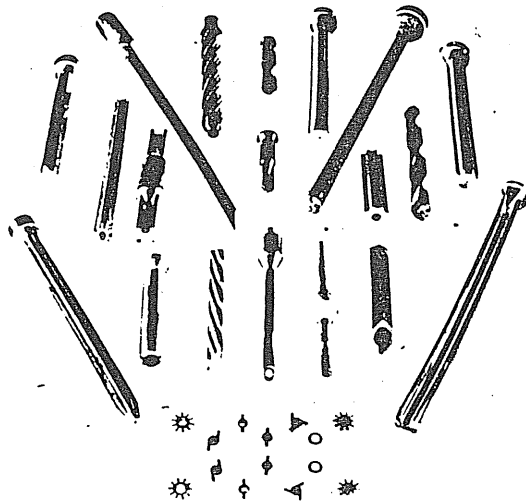
Uloga trenja u obradi deformisanjem je veoma značajna a jedna od karakteristika hidrostatičkog oblikovanja jeste njegovo smanjenje. Smanjenje trenja ne mora se uvek ostvariti hidrostatičkim putem, već pogodnom konstrukcijom alata kao što je to prikazano primerima na sl.2.19.

Povećanje redukcije preseka kod hidrostatičkog istiskivanja proizilazi iz dva razloga: zbog pozitivnog uticaja hidrostatičkog pritiska na greške u strukturi materijala i zbog smanjenja uticaja trenja odnosno povećanja ravnomernosti naponsko-deformacionog stanja u zoni deformacije. Redukcija kod hidrostatičkog istiskivanja je za 50% i više veća u odnosu na klasično istiskivanje.

Konstrukcija matrice za hidrostatičko istiskivanje se razlikuje od matrice klasičnog procesa. Naime, zbog okruženja matrice visokim pritiskom moguće je kod hidrostatičkog istiskivanja koristiti tankozidu matricu bez bojazni od pojave loma.

Ugao matrice kod hidrostatičkog istiskivanja znatno je manji u odnosu na konvencionalno istiskivanje čime se izbegava naglo skretanje vlakana materijala u zoni deformacije što daje manju mogućnost pojave površinskih pukotina.

U pogledu oblika, dimenzija i tačnosti izrade delova mogućnosti hidrostatičkog istiskivanja su velike. Oblik poprečnog preseka obratka ne zavisi od oblika kontejnera već samo od matrice te je na jednom uređaju moguće oblikovati veći asortiman proizvoda. Delovi čak ne moraju imati isti oblik duž aksijalne ose jer je moguće oblikovati komad u više faza. Zbog smanjenog uticaja trenja moguće je oblikovati delove veće dužine, sa veoma visokom tačnošću dimenzija poprečnog preseka. Na sl.2.29. prikazani neki od proizvoda hidrostatičkog istiskivanja.



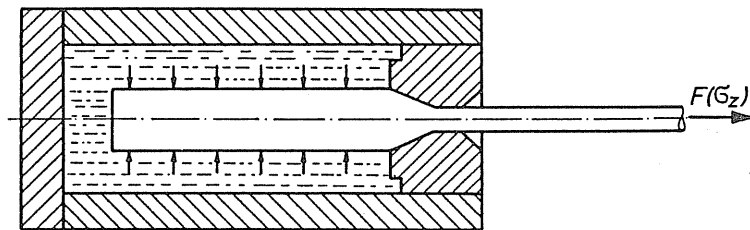
Sl.2.29. Proizvodi hidrostatičkog istiskivanja /20/

Hidrostatičko istiskivanje ima i određene nedostatke koji otežavaju njegovu primenu. Proces deformisanja sa tačnošću pod visokim pritiskom složeniji je od klasičnog istiskivanja. Proizvodnja i održavanje visokog

pritiska, zatim zaptivanje spojeva je veoma složeno i zahteva specijalna rešenja. Manipulacija sa pripremkom takodje je složenija kada se radi o hidrostatičkom istiskivanju. Osim toga, vrh priprema potrebno je pre istiskivanja obraditi i prilagoditi matrici. Postoje i problemi u regulisanju brzine istiskivanja i pojavi "stick-slip" efekta zbog neravnomernosti trenja. Tečnost pod pritiskom akumulira energiju koja se oslobađa u fazi rasterećenja i može prouzrokovati izbacivanje obratka velikom brzinom iz prostora za oblikovanje.

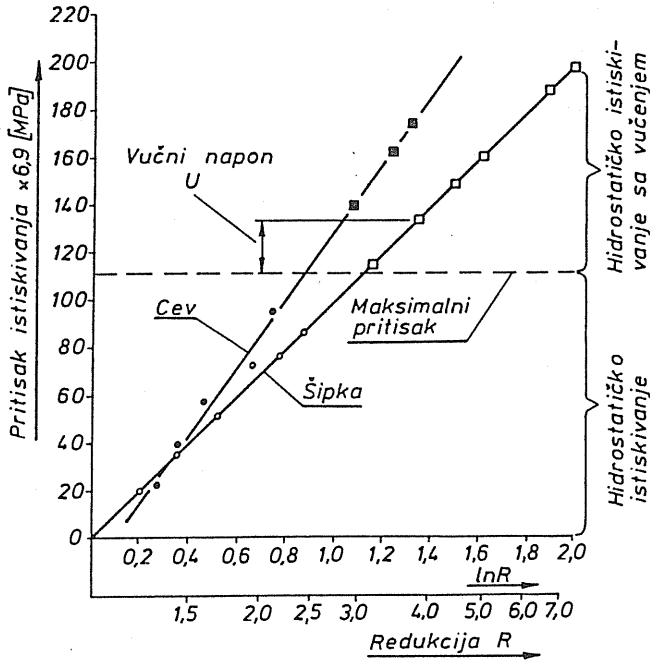
2.5.2. Hidrostatičko istiskivanje sa vučenjem

U ovom slučaju pored hidrostatičkog pritiska pojavljuje se i dodatna sila zatezanja koja pored ostalog utiče i na stabilizaciju procesa oblikovanja umanjujući pojavu "stick-slipa" i nestacionarnosti pritiska. Prisustvo zatezne sile utiče i na smanjenje hidrostatičkog pritiska, a takodje se dobija i bolji kvalitet površine obratka. Nedostatak ovog procesa je što se mora obezbediti poseban uređaj koji stvara vučnu silu. Potrebno je napomenuti da zatezni napon ne sme prekoračiti granicu tečenja jer bi u tom slučaju došlo do deformacije izvan matrice.



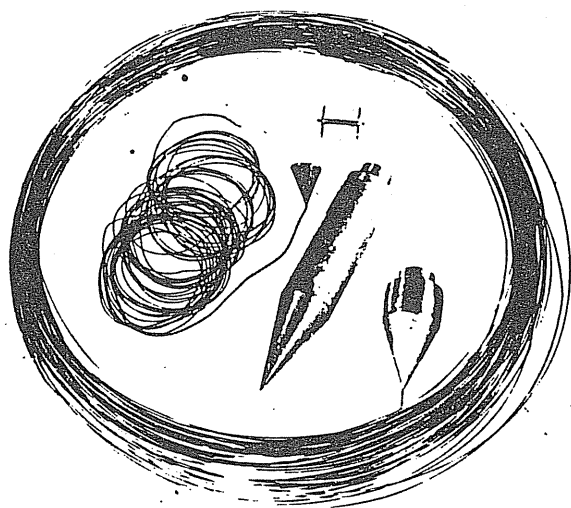
Sl.2.30. Šema hidrostatičkog istiskivanja sa vučenjem

Na sl.2.31. je dat dijagram koji ilustruje uticaj zateznog napona na redukciju preseka pri istiskivanju sa vučenjem punih komada i komada iz cevi od mekog čelika. U slučaju punih komada hidrostatičkim istiskivanjem sa pritiskom od 770 MPa ostvaruje se redukcija $R=3$, a povećanjem zateznog napona redukcija se povećava i do 7. Slični rezultati su dobijeni i na uzorcima od cevi.



Sl.2.31. Uticaj zateznog napona na redukciju /20/

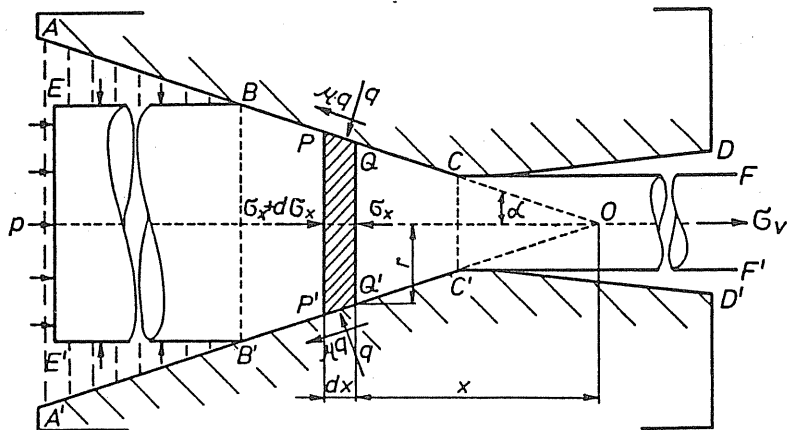
Postupak hidrostatskog istiskivanja sa vučenjem je zbog svojih tehničkih mogućnosti veoma atraktivan za industrijsku primenu u izradi delova od čelika i drugih materijala, kružnog i drugog oblika poprečnog preseka. Ovaj proces može da zameni neke klasične postupke kao što je npr. valjanje i vučenje. Zbog izuzetno visokih redukcija preseka koje se postižu u jednoj operaciji ovaj postupak zamenjuje od 10 do 20 operacija klasičnog vučenja kod izrade žice. Na sl.2.32. je prikazana žica prečnika 1 mm koja je dobijena u jednoj operaciji od aluminijumskog priprema (99,5%Al) prečnika 38 mm. Ostvarena redukcija preseka iznosi 1444.



Sl.2.32. Žica dobijena istiskivanjem sa vučenjem /20/

Teorija procesa

Analiza napona kod hidrostatičkog istiskivanja sa zatezanjem izvršena je prema Sachsovom modelu za slučaj homogenog deformacionog stanja idealno plastičnog obratka (bez uključivanja ojačavanja tokom deformisanja) i sa zanemarivanjem redundantnog rada koji se troši na savladjivanje unutrašnjeg trenja.



Sl.2.33. Šema opterećenja /20/

Na osnovu šeme opterećenja (sl.2.33.) može se napisati jednačina ravnoteže svih sila u aksijalnom pravcu:

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

čijim sredjivanjem se dobija:

$$r \cdot d\sigma_x = 2 \cdot dr [q(1 + \mu \cot\alpha) - \sigma_x] \quad (2.42.)$$

gde je $dl = dr/\sin\alpha$.

Ako se u gornjem izrazu radi lakše analize zanemari trenje čiji je uticaj kod hidrostatičkog oblikovanja neznatan, dobija se sledeća jednačina:

$$r \cdot d\sigma_x = 2 \cdot dr(q - \sigma_x) \quad (2.43.)$$

Jednačina plastičnosti za postojeću šemu napona glasi:

$$\sigma_x - q = K \quad (2.44.)$$

na osnovu čega je

$$r \cdot d\sigma_x = -2 \cdot K \cdot dr$$

a posle integrisanja se dobija

$$\sigma_x = -K \cdot \ln r^2 + C \quad (2.45.)$$

Iz graničnog uslova: za $r=r_1$ $\sigma_x = \sigma_v$

dobija se

$$C = \sigma_v + K \cdot \ln r_1^2 \quad (2.46)$$

pa je:

$$\sigma_x = \sigma_v - K \cdot \ln\left(\frac{r}{r_1}\right)^2 = \sigma_v - K \cdot \ln R \quad (2.47.)$$

ge je:

$$R = \frac{r_0^2}{r_1^2} = \frac{A_0}{A_1}; \quad \ln R = \phi \quad (2.48.)$$

Ako u gornju jednačinu uključimo i drugi granični uslov

$$\text{za } r=r_0 \quad \sigma_x = -P$$

dobija se:
$$\sigma_v + p = K \cdot \phi = \text{const} \quad (2.49.)$$

Iz gornje jednačine proizilazi da je kod hidrostatičkog istiskivanja sa vučenjem zbir hidrostatičkog pritiska i zateznog napona konstantan.

Ako se pak, u proračun uključi i trenje dobija se tačniji izraz:

$$p + \sigma_v = (R^\lambda - 1) \left[K \left(\frac{1+\lambda}{\lambda} \right) - \sigma_v \right] \quad (2.50.)$$

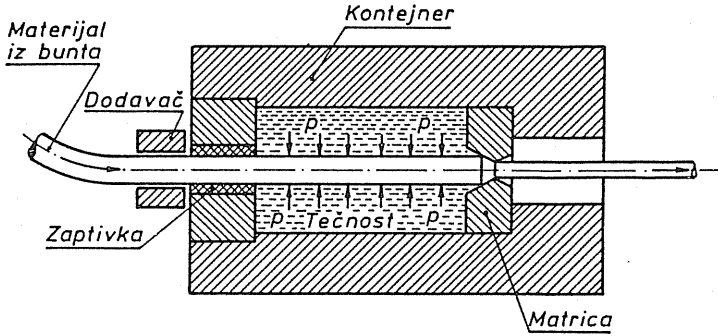
gde je: $\lambda = \mu \cdot \cot \alpha$.

2.5.3. Hidrostatičko oblikovanje delova neograničene dužine i kontinualni postupci

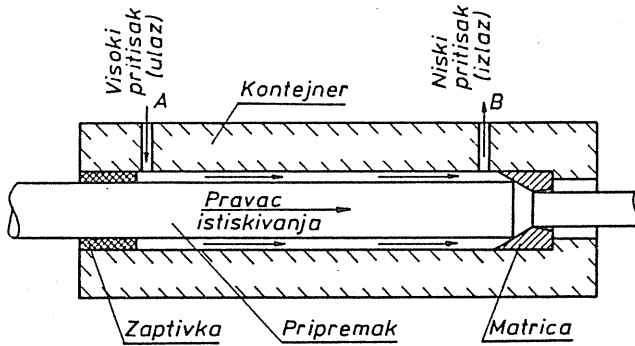
Zahvaljujući smanjenom uticaju trenja na površini priprema kod hidrostatičkog oblikovanja moguće je oblikovati veoma dugačke delove, različitog poprečnog preseka. Ova osobina hidrostatičkog oblikovanja iskorišćena je i za proizvodnju žice, prvenstveno iz teškodeformabilnih materijala.

Kod istiskivanja sa pojedinačnim ulaganjem priprema, aksijalna sila se ostvaruje delovanjem hidrostatičkog pritiska na čeonu površinu obratka. Međutim, kod kontinualnog procesa, čija je generalna šema data na sl.2.34. mora se pomoću specijalnog uređaja - dodavača obezbediti minimalna aksijalna sila koja će omogućiti dotok materijala u cilindar visokog pritiska. U odsustvu dodavača materijala delovanje hidrostatičkog pritiska u radijalnom pravcu na pripremak dovelo bi do njegovog stajanja pa čak i do razaranja i izbacivanja priprema nazad iz cilindra. Zbog toga se mora obezbediti aksijalna sila koja će to sprečiti i omogućiti istiskivanje materijala kroz matricu. Potrebna aksijalna sila u ovom slučaju (sl.2.34.) ostvaruje se pomoću dodavača, dok zaptivka na ulazu u kontejner ima ulogu stvaranja aksijalnog otpora koji sprečava povratak priprema unazad u trenutku kada dodavač izvodi povratno kretanje.

Bolje tehničko rešenje istiskivanja obratka neograničene dužine prikazano je na sl.2.35. i predstavlja takozvani kontinualni postupak hidrostatičkog oblikovanja. Aksijalna sila u ovom slučaju ostvaruje se aktivnim delovanjem sile trenja koja se stvara između tečnosti i obratka. Tečnost se u cilindar ubacuje kroz otvor A a izlazi kroz otvor B. Nedostatak ove konstrukcije je značajan pad pritiska tečnosti od ulaza do izlaza što uslovljava relativno nizak pritisak u zoni deformacije i umanjuje osnovno



Sl.2.34. Istiskivanje obradaka neograničene dužine /20/



Sl.2.35. Kontinualno istiskivanje /20/

svojstvo hidrostatičke obrade. Znatno bolje rešenje kontinualnog istiskivanja prikazano je na sl.2.17. gde se aksijalna sila takodje ostvaruje aktivnim delovanjem sile trenja, pri čemu je ulaz tečnosti postavljen u neposrednoj blizini matrice što obezbeđuje visoki pritisak u zoni deformacije i veću deformabilnost materijala. Lavirintski kanali omogućuju da se tečnost kreće u dva osnovna smera. Kroz unutrašnje kanale (neposredno uz obradak) tečnost se kreće u pravcu istiskivanja obratka a u spoljašnjim kanalima tečnost se kreće u suprotnom smeru, ka izlazu iz kontejnera.

2.5.4. Postupci oblikovanja sa povećanim hidrostatičkim naponom ostvarenim mehaničkim putem

Efekti hidrostatičkog pritiska kod procesa istiskivanja prikazani su u prethodnoj tački. Osim delovanja pritiska na strukturu materijala važnu ulogu visoki pritisak ima i u poboljšanju kontaktnih uslova kroz stvaranje

filma koji razdvaja površine matrice i obratka. Radi toga se smanjuje neravnomernost deformacija što opet utiče na povećanje deformabilnosti materijala. Medjutim, u nastavku će ukratko biti prezentirane neke od metoda konvencionalnog načina oblikovanja kod kojih je primenom dodatnih uređaja i novih konstrukcija povećan pritisak u zoni deformacije što je stvorilo uslove za hidrostatičko oblikovanje koji pre svega povoljno utiču na strukturu materijala sprečavajući nastanak i širenje pukotina.

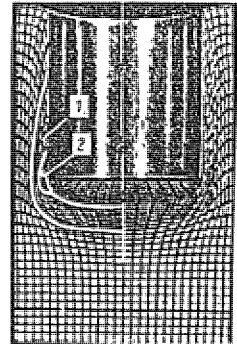
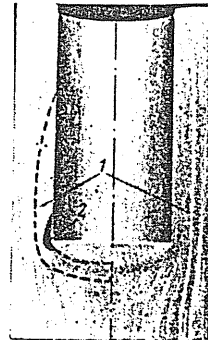
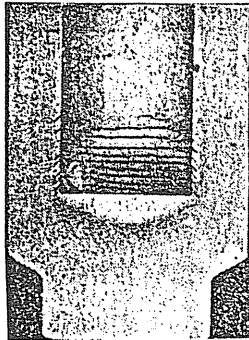
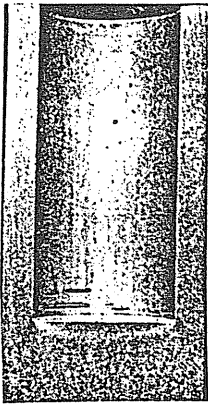
Osim toga, uzimajući u obzir drugi princip hidrostatičkog oblikovanja koji je objašnjen u tački 2.24. a odnosi se na nezavisnost nastanka lokalizacije deformacija od hidrostatičkog pritiska, stvorene su nove šeme pojedinih tehnoloških metoda koje respektuju ovako ponašanje materijala. Da bi se lokalizacija eliminisala kod procesa sa dominirajućim zateznim naponima izvršena je promena naponske šeme delovanjem pritisnih komponenti te su tako stvoreni uslovi za iskorišćenje pozitivnih efekata hidrostatičke obrade. U nastavku su prikazane neke od ovih metoda obrade kao i metode kod kojih se hidrostatički uslovi oblikovanja postižu mehaničkim putem.

2.5.4.1. Suprotnosmerno istiskivanje

Naponsko stanje kod suprotnosmernog istiskivanja je troosno pritiskno i u ovom procesu redje se javlja problem obradivosti materijala. Limitirajući faktor primene hladnog istiskivanja je češće opterećenje na pojedinim elementima alata.

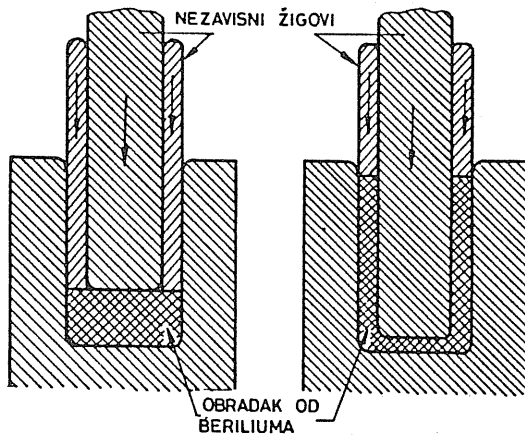
Medjutim, kada su u pitanju teško obradivi materijali problem obradivosti pojavljuje se i pri suprotnosmernom istiskivanju. Rene i Podlivačev /51/ ukazuju na mogućnost pojave pukotina pri hladnom istiskivanju obradaka od duraluminijuma (sl.2.36.). Etapnim posmatranjem obradaka sa prethodno nanetom koordinatnom mrežom, ustanovljeno je da je u procesu istiskivanja veoma izražena neravnomernost deformacije koja raste sa porastom hoda alata. Zone sa najintenzivnijim tečenjem metala (efektivna deformacija je najveća) nalaze se na unutrašnjoj površini zida - zona 1 i na ivici žiga - zona 2 (sl.2.37.). Eksperimentalno je ustanovljeno da je efektivna deformacija na unutrašnjoj površini zida četiri puta veća nego efektivna deformacija na spoljnoj površini. Tako izražena neravnomernost deformacije stvara uslove za nastajanje oštećenja obratka.

Radi poboljšanja naponskog stanja pri suprotnosmernom istiskivanju obradaka od berilijuma, Hayes i Yoblin /20/ primenili su konstrukciju (sl.2.38.) koja dodatnim pritiskivačem sa pogonom nezavisnim od kretanja žiga, povećava hidrostatički napon u zoni deformisanja, što je povećalo deformabilnost materijala.



Sl.2.36. Uzorci od duraluminijuma /49/

Sl.2.37. Zone intenzivnog tečenja metala /49/



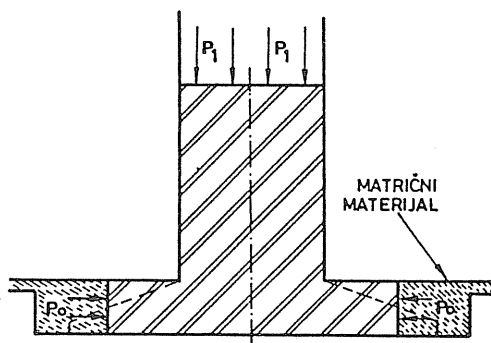
Sl.2.38. Suprotnosmerno istiskivanje s mehaničkim povećanjem hidrostatičkog napona /20/

Povećanje hidrostatičkog pritiska u zoni deformisanja mehaničkim putem veoma je značajno za konstruktore alata jer su u mogućnosti da

dogradnjom odgovarajućih elemenata utiču na promenu uslova obrade i na taj način poboljšaju deofmrabilnost materijala.

2.5.4.2. Radijalno istiskivanje

Na sl.2.39. šematski je prikazano oblikovanje prirubnice postupkom radijalnog istiskivanja (Cogan, /20/). Proces se odvija u uslovima povećanog hidrostatičkog pritiska, što je ostvareno prigušivanjem tečenja materijala kroz spoljni kanal. Za ovu svrhu preporučuje se olovo, zatim legure na bazi olova, bizmuta i drugi materijali.



Sl.2.39. Oblikovanje prirubnice (Cogan, /20/)

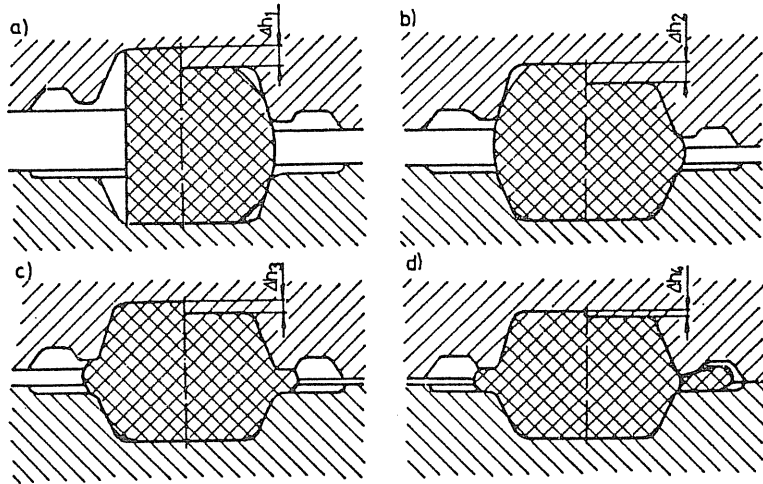
Vršeci eksperimente oblikovanja prirubnice od legure aluminijuma sa 10%Si, prema Coganovom konceptu, Alexander i Lengyel /20/ ostvarili su radijalni pritisak od 400 MPa primenom polietilena kao matričnog materijala, što je bilo dovoljno za oblikovanje bez pojave loma.

2.5.4.3. Kovanje u otvorenom kalupu

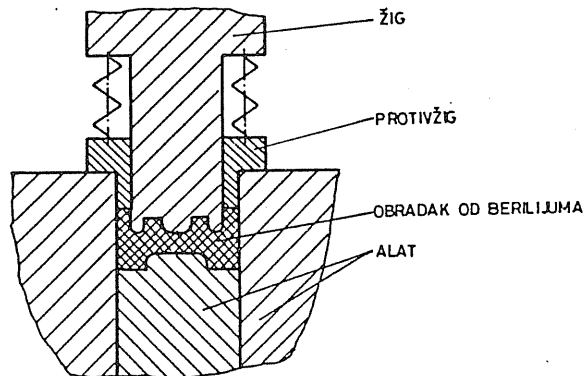
Za proces kovanja u otvorenom kalupu takodje se može reći da se odvija u hidrostatičkim uslovima (sl.2.40.). U završnoj fazi izrade otkovka dolazi do isticanja metala kroz kanal venca, odnosno ko kočenja tečenja metala, što izaziva snažno povećanje hidrostatičkog pritiska u zoni deformisanja i stvara uslove za dobro popunjavanje šupljine kalupa i sprečavanje pojava pukotina.

Na sl.2.41. dat je primer kovanja u zatvorenom kalupu pri kojem se povećanje hidrostatičkog pritiska u zoni deformisanja ostvaruje mehaničkim putem, uz pomoć dodatnog pritiskivača sa oprugama. Uredjaj je bio korišćen za kovanje berilijuma na temperaturama od oko 1000°C. Kovanje berili-

juma u alatu bez dodatnog pritiska praktično je nemoguće, jer već pri deformaciji od 25% dolazi do pojave pukotine. Konstrukcija koju su predložili Hayes i Yoblin omogućuje znatno veće vrednosti stepena deformacije. Ukoliko je potreban veći dodatni pritisak, umesto sistema sa oprugama može se primeniti sistem sa hidrauličnim pogonom.



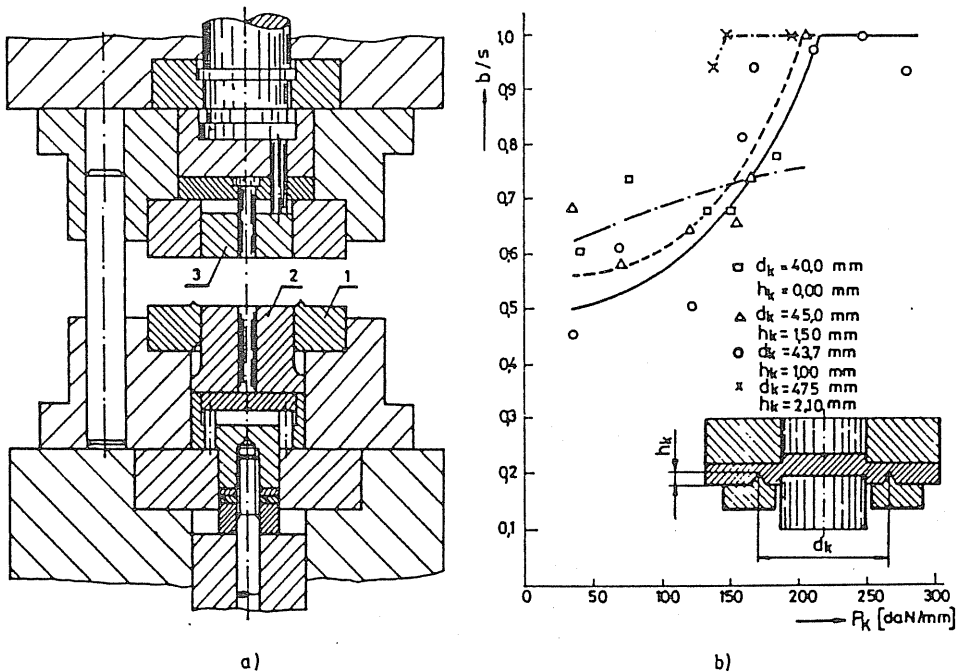
Sl.2.40. Faze kovanja u otvorenom kalupu



Sl.2.41. Hidrostatičko kovanje u zatvorenom kalupu /20/

2.5.4.4. Fino razdvajanje presovanjem

Fino razdvajanje presovanjem je još jedan primer povećanja hidrostatickog pritiska u zoni deformisanja mehaničkim putem. Na sl.2.42. dat je prikaz alata za fino razdvajanje kod kojeg se povećanje hidrostatickog pritiska u zoni razdvajanja realizuje delovanjem sledećih elemenata: konturnog zuba (1), žiga (2) i protivžiga (izbacivača) (3). Mašina za fino razdvajanje presovanjem je trostrukog dejstva. Redosled delova-



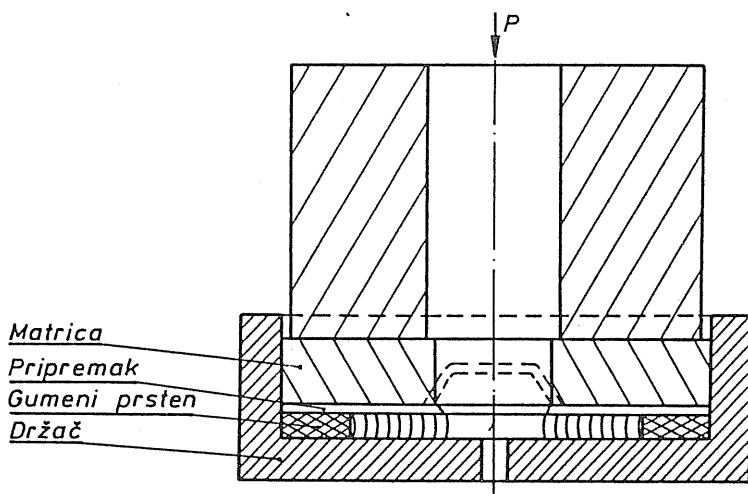
Sl.2.42. Fino razdvajanje presovanjem: a) konstrukcija alata, b) zavisnost kvaliteta površina od opterećenja konturnog zuba /20/.

nja pojedinih elemenata alata je sledeći: najpre se konturni zub utisku-je u materijal i na taj način se stvara dodatni bočni pritisak u zoni de-formisanja. Zatim deluje žig (2) a njegovom kretanju suprotstavlja se izbacivač (3). Materijal zahvaćen žigom i matricom nalazi se u uslovima pritiskog naponskog stanja, što obezbedjuje dobar kvalitet površina obratka.

Na sl.2.42b.dat je odnos visine glatkog dela i debljine materijala u zavisnosti od specifične sile na konturnom zubu. Iz dijagrama se može zaključiti da porastom specifičnog pritiska raste visina glatkog dela obratka, odnosno da porastom konturnog pritiska raste kvalitet obratka.

2.5.4.5. Duboko izvlačenje

Stepen deformacije, tj. odnos izvlačenja kod klasičnog dubokog izvlačenja limitiran je napon izvlačenja koji u omotaču obratka ne sme prekoračiti zateznu čvrstoću tj. mora biti zadovoljen uslov $\sigma_i < \sigma_m$.

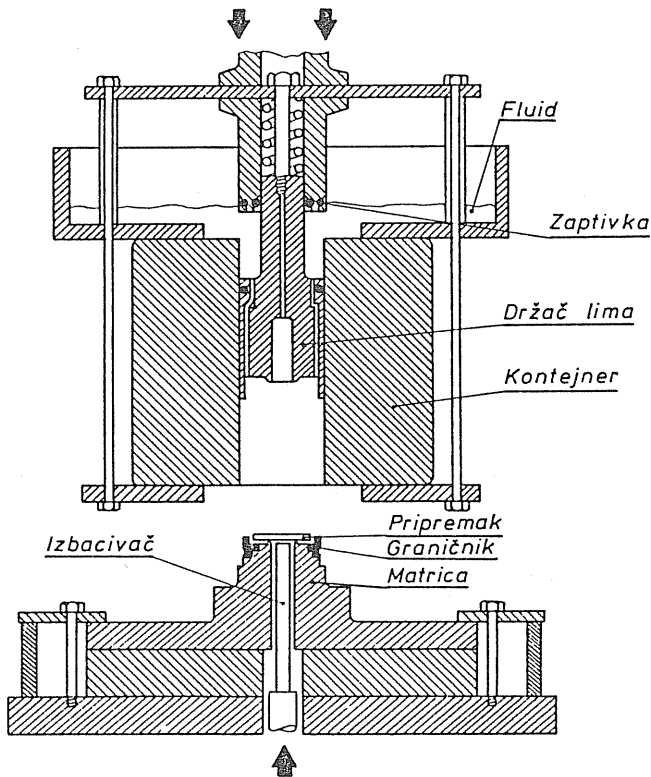


Sl.2.43. Duboko izvlačenje sa promenjenom naponskom šemom

Formiranje cilindričnog omotača kod konvencionalnog izvlačenja ostvaruje se delovanjem žiga na dno obratka usled čega se u omotaču stvara zatezni napon koji se preko radijusa matrice prenosi na ravni deo obratka. U trenutku kada napon izvlačenja dostigne vrednost čvrstoće materijala dolazi do lokalizacije deformacije a zatim i do razaranja. Da bi se ovo izbeglo potrebno je izmeniti naponsku šemu i zatezne napone zameniti pritiskim. Na sl.2.43., dato je jedno rešenje dubokog izvlačenja gde se kao aktivna sila koristi sila trenja koja nastaje na donjoj površini obratka na kontaktu sa gumom. Usled pritiska gornjeg

prstena i držača gume dolazi do tečenja gume u radijalnom pravcu i stvaranja aktivne sile trenja koja pomera čestice materijala ka otvoru matrice omogućavajući na taj način formiranje cilindričnog obratka bez prisustva aktivne sile zatezanja.

Na sl.2.44. je prikazano rešenje uređaja za hidrostatičko duboko izvlačenje kod kojeg se aktivna sila stvara delovanjem tečnosti visokog pritiska u radijalnom pravcu po prstenastoj površini po debljini priprema. Tečnost pod pritiskom prodire između obratka i držača lima i matrice smanjujući trenje na minimum. Za iniciranje procesa izvlačenja potrebno je delovati žigom sa veoma malom silom, tj. duboko izvlačenje se obavlja sa neznatnim zateznim naponom. Pomoću ovog uređaja sa pritiskom od oko 700 MPa Fuchs /20/ je na uzorcima od bakra ostvario odnos izvlačenja $D_o/d_1=4$.



Sl.2.44. Hidrostatičko duboko izvlačenje, Fuchs /20/

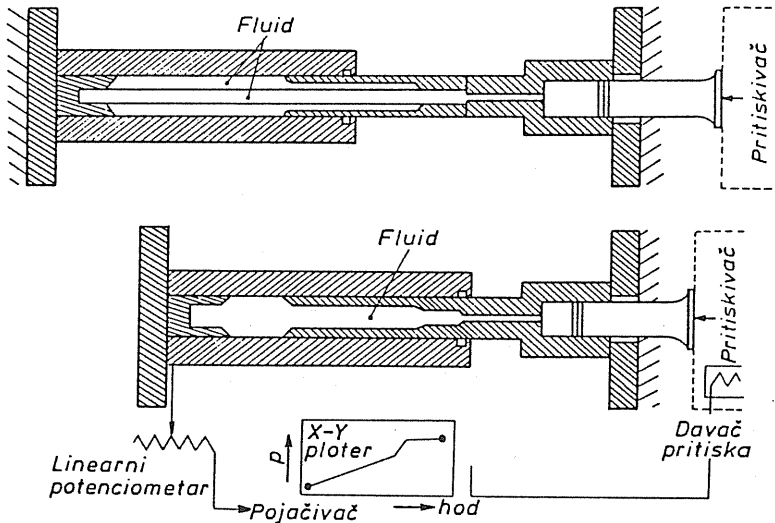
2.5.4.6. Oblikovanje cevi

Dve operacije oblikovanja cevi u hidrostatičkim uslovima ukratko su izložene u nastavku:

- ekspanziranje cevi i
- formiranje prirubnice.

Klasični postupak ekspanziranja cevi izvodi se na taj način što se u unutrašnjost zatvorene cevi ubacuje fluid pod pritiskom čijim delovanjem se stvaraju zatezni naponi te se formiranje novog oblika izvodi isključivo zatezanjem. Veličina dozvoljene deformacije i u ovom slučaju limitirana je pojavom lokalizacije, pa je zbog toga potrebno izvršiti promenu naponske šeme i smanjiti uticaj zateznih napona.

Na sl.2.45. je prikazan uređaj za hidrostatičko ekspanziranje cevi. Cev - pripremak, je ispunjena i okružena radnom tečnošću. Pomeranjem pokretnog bloka alata na desnu stranu povećava se unutrašnji pritisak

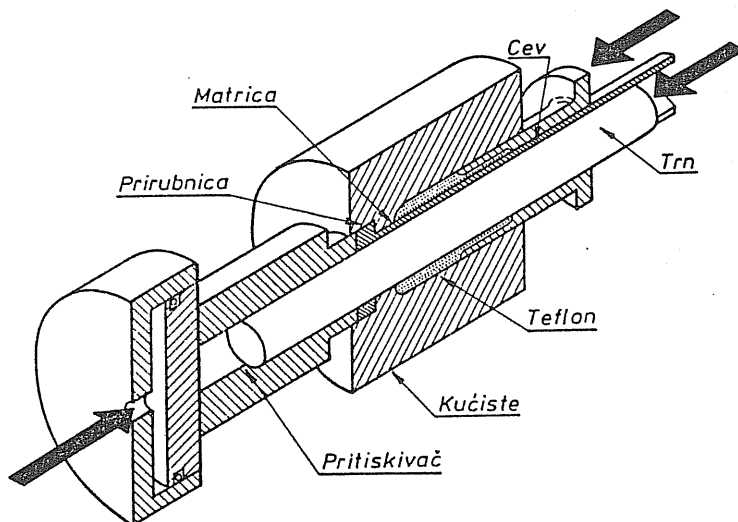


Sl.2.45. Uređaj za hidrostatičko ekspanziranje cevi /20/

u cevi a takodje se stvara i aksijalno pritisno opterećenje u pripremu na osnovu čega se izvodi proširivanje cevi. Kombinacijom unutrašnjeg i spoljašnjeg pritiska i aksijalne sile na pripremu može se postići da se proširivanje cevi ostvari bez smanjenja debljine materijala. Odnos

prečnika prema podacima sa slike je 2.0, tj., ukupna deformacija je 100%, što je u odnosu na klasično ekspanziranje 4:5 puta više.

Na sl.2.46. je prikazano konstrukciono rešenje alata za formiranje prirubnice u hidrostatičkim uslovima. Ovo je još jedan primer formiranja hidrostatičkih uslova mehaničkim putem. Visoki pritisak oko priprema (cevi) ostvaruje se pomoću trenja koje se zbog visokog pritiska



Sl.2.46. Oblikovanje prirubnice (Fuchs, /2/)

teflona stvara na kontaktnoj površini trna i cevi. Proces je vrlo pouzdan jer ne postoje teškoće oko zaptivanja tečnosti pod visokim pritiskom.

2.6. TEHNOLOGIJA HIDROSTATIČKOG OBLIKOVANJA

S obzirom da hidrostatičko istiskivanje i vučenje imaju najširu primenu od svih postupaka hidrostatičke obrade to se projektovanje tehnologije prvenstveno odnosi na te tehnološke metode.

Projektovanje tehnološkog procesa hidrostatičkog istiskivanja obuhvata niz aktivnosti potrebnih da se od polaznog materijala dobije željeni proizvod. Te aktivnosti su sledeće:

1. Ispitivanje mehaničkih svojstava i deformabilnosti materijala obratka;
2. Izbor tehnološke šeme oblikovanja;

3. Proračun tehnoloških parametara procesa;
4. Izbor radne tečnosti;
5. Projektovanje i konstrukcija uređaja i alata za hidrostatičko oblikovanje;
6. Mašine za hidrostatičko oblikovanje.

2.6.1. Mehanička svojstva i deformabilnost polaznog materijala

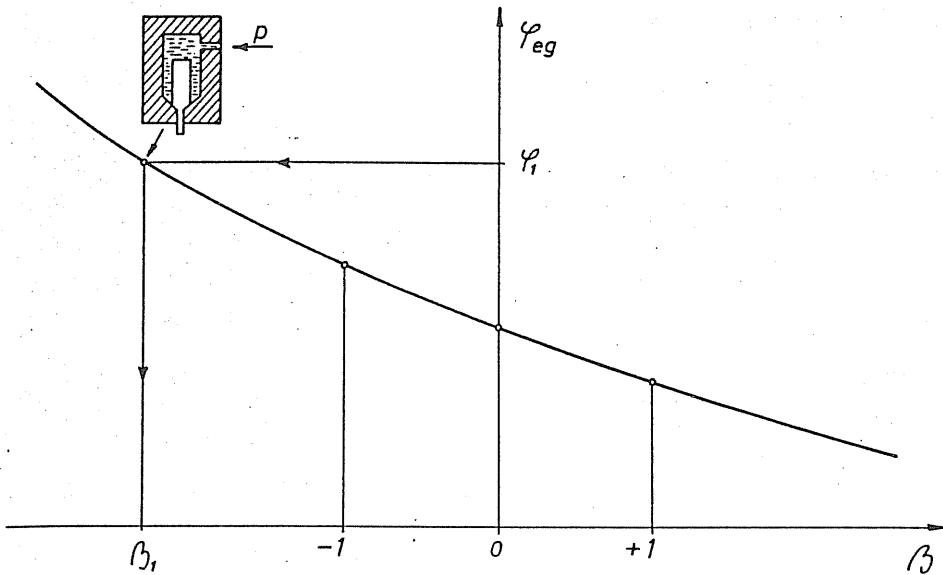
Osnovne prednosti hidrostatičkog oblikovanja nad konvencionalnim oblikovanjem proizilaze iz uticaja visokog pritiska na plastična svojstva materijala i uticaja visokog pritiska na trenje kako u zoni deformacije tako i na slobodnim površinama obratka. Prilikom projektovanja tehnološkog procesa proizvodnje nekog proizvoda odabranom tehnološkom metodom osim tehničko-tehnoloških kriterijuma treba voditi računa i o ekonomičnosti projektovanog procesa, te pri izboru optimalne varijante treba težiti rešenju koje obezbeđuje niže troškove proizvodnje.

Pre izbora optimalne varijante, odnosno u fazi traženja mogućeg rešenja za postavljanje tehnološkog procesa neophodno je poznavati mehanička svojstva materijala od kojeg se izrađuje dati deo kao i karakteristike plastičnosti, odnosno, deformabilnost materijala. S obzirom da se hidrostatičkim oblikovanjem dobijaju delovi i iz teškoobradivih materijala to bi za projektovanje tehnološkog procesa bilo od velike koristi poznavati dijagram granične deformabilnosti (sl.2.47.), koji direktno povezuje moguću veličinu deformacije u zavisnosti od uslova obrade definisanih komponenta naponskog stanja. Dijagram granične deformabilnosti na najbolji način iskazuje mogućnosti hidrostatičkog oblikovanja jer je pokazatelj naponskog stanja definisan odnosom trostruke vrednosti hidrostatičkog napona (σ) i efektivnog napona (σ_e):

$$\beta = 3.\sigma / \sigma_e$$

Dijagram granične deformabilnosti određuje se primenom različitih modela deformacije kao npr. slobodnog sabijanja, torzije i zatezanja.

Primena dijagrama granične deformabilnosti u projektovanju tehnologije hidrostatičke obrade omogućuje da se na osnovu potrebne efektivne deformacije definišu naponski uslovi oblikovanja (β - faktor, sl. 2.47.) odnosno veličina potrebnog hidrostatičkog napona u zoni deformacije. Pri tome je neophodno izvršiti kompletnu analizu naponskog i deformacionog stanja u zoni deformacije obratka i izvršiti odgovarajuća



Sl.2.47. Dijagram granične deformabilnosti

uskladjivanja geometrije priprema, kontaktnih uslova i drugih parametara sa željenim efektima obrade.

Prema tome, problematika deformabilnosti materijala kod hidrostatičkog oblikovanja obuhvata dva vrlo kompleksna zadatka:

1. Definisane dijagrama granične deformabilnosti za zadati materijal i
2. Primenu dijagrama granične deformabilnosti za definisanje naponskih uslova hidrostatičke obrade.

U svemu tome mora se voditi računa i o ekonomskoj opravdanosti tehnološkog procesa. Primena hidrostatičke obrade je opravdana u slučaju kada se traženi obradak ne može proizvesti primenom konvencionalnih tehnoloških metoda i kada se zahteva visoka tačnost dimenzija i visok kvalitet mehaničkih svojstava u pogledu ravnomernosti po zapremini obratka.

2.6.2. Izbor tehnološke šeme oblikovanja

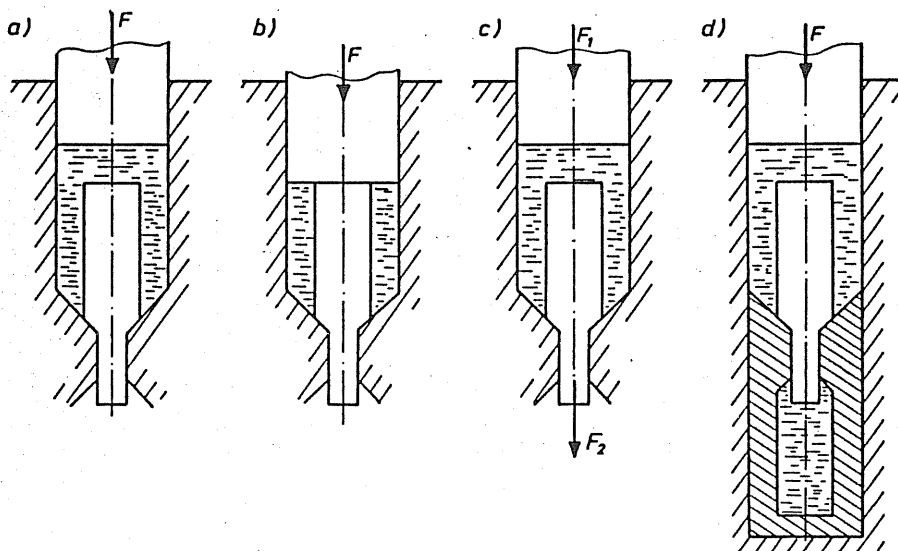
Osnovne tehnološke šeme hidrostatičkog istiskivanja obradjene su u poglavlju 2.3. i medju njima treba tražiti ideje za realizaciju konkretnog rešenja. U suštini postoje sledeći vidovi hidrostatičkog istiskivanja:

1. Čisto hidrostatičko istiskivanje;
2. Hidromehaničko istiskivanje;
3. Istiskivanje sa zatezanjem i
4. Istiskivanje sa protivpritiskom.

Izbor optimalne varijante oblikovanja, odnosno šeme hidrostatičkog oblikovanja u tesnoj je vezi sa svojstvima i deformabilnošću materijala.

Čisto hidrostatičko istiskivanje (sl.2.48.a) po svojim mogućnostima zadovoljava kod velikog broja materijala. Zahvaljujući povoljnom naponskom stanju i eliminaciji uticaja trenja ostvaruju se velike deformacije bez razaranja. Međutim, ovaj postupak ima i odredjenih nedostataka. Nepostojanje mehaničke veze klipa i obratka otežava regulaciju brzine istiskivanja i pritiska istiskivanja što može imati za posledicu pogoršanje kvaliteta obratka. Takodje postoje teškoće oko početka istiskivanja kao i na kraju procesa kada se može desiti da obradak izleti velikom brzinom iz matrice.

Kod hidromehaničkog istiskivanja (sl.2.48.b i c) pored visokog pritiska deluje i mehanička sila sa gornje ili sa donje strane obratka (vučenje). U ovom slučaju proces zadržava sve pogodnosti hidrostatičke obrade uz smanjenje pritiska zbog dejstva dopunske sile. Takodje su eliminisani problemi regulacije pritiska i brzine oblikovanja. Veličina mehanič-



Sl.2.48. Šeme hidrostatičkog oblikovanja

ke sile određuje se tako da ne dodje do izvijanja obratka u slučaju istiskivanja, odnosno u slučaju vučenja napon od sile zatezanja mora biti manji od granice razvlačenja.

Hidrostatski istiskivanje sa protivpritiskom (sl.2.48.d) primenjuje se za obradu teškodeformabilnih materijala. Pritisak u donjem cilindru koji je niži od pritiska u radnom cilindru, eliminiše zatezne napone i na taj način stvara pogodnije naponsko stanje u zoni deformacije. Oblikovanje sa protivpritiskom može se realizovati i sa mehaničkom silom, ali su efekti nešto niži, međutim, konstrukcija uređaja je jednostavnija.

Osim navedenih postupaka obrade za duže obratke (žica, profili) primenjuju se postupci kontinualnog oblikovanja prema šemama koje su prikazane u poglavlju 2.5.3.

2.6.3. Proračun optimalnih tehnoloških parametara hidrostatskog istiskivanja

Pri proračunu tehnoloških parametara hidrostatskog istiskivanja moraju se imati u vidu parametri obratka, tj.

- a) vrsta materijala, odnosno, hemijski sastav;
- b) oblik i dimenzije obratka;
- c) mehanička svojstva obratka.

Proračun optimalnih tehnoloških parametara vrši se na bazi analize procesa iz prethodnih poglavlja:

1. Dimenzije priprema

a) Prečnik priprema - određuje se na osnovu dozvoljenog stepena deformacije (preporučenih vrednosti ili podataka iz dijagrama obradivosti) i dimenzija obratka:

$$D_o = \sqrt{R \cdot d^2} \quad (2.51.)$$

D_o - prečnik priprema

d - prečnik obradka

R - redukcija preseka

$$R = \frac{A_o}{A} = \frac{D_o^2}{d^2}$$

b) Dužina priprema - određuje se iz uslova jednakosti zapremine priprema i zapremine obratka.

2. Optimalna veličina ugla matrice određuje se prema izrazu

$$\alpha_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{\sqrt{3} \cdot \mu \cdot \left(1 + \ln \frac{D_o}{d}\right) \cdot \ln \frac{D_o}{d}} \quad (2.52.)$$

μ - koeficijent trenja, obično se uzima $\mu = 0,05$

3. Proračun toplotnih efekata

Pri hidrostatičkom oblikovanju dolazi do povećanja temperature obratka, kao i kod drugih tehnoloških metoda, jer se deformaciona energija pretvara u toplotu. Oslobodjenu energiju absorbuje radna tečnost te zbog toga dolazi do povećanja njene temperature što se može negativno odraziti na kvalitet obratka u pogledu mehaničkih karakteristika (pad tvrdoće i čvrstoće i eliminacija uticaja ojačavanja). Osim toga, proračun priraštaja temperature je važan za izbor radne tečnosti i sredstva za podmazivanje.

Priraštaj temperature obratka i radne tečnosti može se izvesti na osnovu energetskog bilansa uz pretpostavku da se oslobodjena deformaciona energija pretvara u toplotu.

4. Pritisak radne tečnosti - određuje se prema izrazu /22/:

$$p = \sigma_T \left\{ 2 \cdot f(\alpha) \ln \frac{D_o}{d} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + 2 \mu \cot \alpha \cdot \left[\left(1 + \ln \frac{D_o}{d} \right) \cdot \ln \frac{D_o}{d} + \frac{2h_k}{d} \right] \right\} \quad (2.53.)$$

σ_T - granica tečenja pripremk

h_k - visina kalibrirajućeg dela matrice

$f(\alpha) \cong 1$ - funkcija ugla matrice

α - ugao matrice

D_o - prečnik pripremk

d - prenik obratka

5. Veličina protivpritiska:

$$p_d = 0,58 \sigma_T \left[\frac{1}{\sqrt{3}} - \left(\frac{\sigma}{\tau_e} \right)_{kr} \right] - p \quad (2.54.)$$

gde je:

$\left(\frac{\sigma}{\tau_e} \right)_{kr}$ - pokazatelj naponskog stanja na kritičnom mestu obratka

σ - hidrostatički napon

τ_e - efektivni tangencijalni napon

6. Proračun potrebne količine tečnosti

a) Visina stuba tečnosti nad gornjom ivicom obratka iznosi:

$$l_1 = \frac{D^2 \left(1 - \frac{D_0^2}{D^2}\right) \cdot 1 \cdot \beta \cdot p}{1 - \beta \cdot p} \quad (2.55.)$$

gde je:

l - visina obratka

β - koeficijent stišljivosti radne tečnosti

p - pritisak radne tečnosti

b) Zapremina radne tečnosti:

$$Q = (D_c^2 - D_0^2) \cdot \pi \cdot \frac{1}{4} + \pi \cdot \frac{D_0^2}{4} \cdot l_1 \quad (2.56.)$$

gde je:

D_0 - unutrašnji prečnik radnog cilindra.

2.6.4. Izbor radnog fluida i sredstva za podmazivanje

Od radne tečnosti veoma zavisi kvalitet delova dobijenih hidrostatičkim oblikovanjem kao i pritisak koji je potrebno stvoriti da bi se inicirao proces hidrostatičke obrade.

Za hidrostatičko oblikovanje primenjuju se tri osnovne vrste radne materije:

1. Čvrsta radna materija (olovo i njegove legure, zatim sintetički materijali);
2. Paste i praškasti materijali (grafit, rastvori sa MoS_2 i dr.);
3. Tečnosti (ulja i rastvori).

Čvrste i praškaste materije primenjuju se u slučaju hidrostatičkog oblikovanja na povišenim temperaturama. Osnovna prednost ovih materijala je jednostavno zaptivanje radnog cilindra, a koriste se za pritisak od 4000 MPa do 10.000 MPa.

Znatno više u primeni su tečne radne materije a one moraju zadovoljavati sledeće zahteve:

- a) Trebaju da imaju malu stišljivost pri visokim pritiscima;
- b) Viskozitet treba da se što manje menja sa porastom pritiska i da imaju "čvrst" podmazni film na kontaktnoj površini obratka i alata;

- c) Treba da imaju visoka antifikciona svojstva;
- d) Ne smeju izazivati koroziju i ne smeju biti toksične.

Elastična svojstva radnih tečnosti su takodje veoma važna i utiču na absorpciju energije a takodje i na stabilnost brzine istiskivanja. Promena zapremine tečnosti pri pritiscima od 2000 MPa iznosi od 20-30% početne zapremine, što zahteva povećanje ukupne zapremine radnog cilindra.

Promena viskoznosti radne tečnosti u zavisnosti od temperature i pritiska može se iskazati relacijom:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\alpha \cdot m \cdot p} \quad (2.57.)$$

η_0 - viskoznost pri $p=1$ bar i $t=20^\circ\text{C}$

α - koeficijent pritiska

m - koeficijent temperature

U tabeli 2.1. su date vrednosti viskoznosti η_0 i koeficijenta α na sobnoj temperaturi za razne vrste tečnosti.

Tabela 2.1. Vrednosti koeficijenta η_0 i α

Vrsta tečnosti	$\eta_0 \times 10^{-1}$ (PaS)	$\alpha \cdot 10^3$
Transformatorsko ulje	0,171	2,01
Vazelinsko ulje	0,733	2,35
Ricinusovo ulje	4,79	1,31
Turbinsko ulje	0,462	2,36
Vretensko ulje	0,249	2,14
Glicerin	2,39	0,324

Viskoznost radne tečnosti značajno utiče na kvalitet obratka. Pri nedovoljno visokoj viskoznosti nemoguće je formirati i održavati podmazni sloj između kontaktnih površina alata i obratka. Porastom pritiska raste i viskoznost tečnosti a time i debljina podmaznog filma na kontaktnim površinama. Zavisnost debljine filma (h) od viskoznosti i pritiska prema Rozneru i Faupelu /23/ ima sledeći oblik:

$$h = \frac{\sqrt{\eta \cdot V \cdot l}}{p_{sr}} \quad (2.58.)$$

V - brzina istiskivanja

l - dužina konusa matrice

p_{sr} - srednji pritisak

U određenim uslovima porast pritiska može dovesti do zgrušavanja tečnosti pa i do pojave čvrste faze, što dovodi do prekida procesa istiskivanja, pojave pukotina i razaranja obratka.

Izbor radne tečnosti zavisi od vrste materijala koji se obradjuje, stepena deformacije i pritiska u radnom cilindru. U slučaju istiskivanja sa pritiscima do 500 MPa uspešno se primenjuje transformatorsko, mašinsko i ricinusovo ulje. Pri radu sa pritiscima od 1.000 do 1.500 MPa ovim uljima se dodaje i određeni procenat benzina, kerozina ili špiritusa. Pri radu sa pritiscima preko 1.500 MPa dobre rezultate daju smeše glicerina sa etilenglikolom kao i rastvori kerozina, benzina i mineralnog ulja.

Od vrste radne tečnosti zavisi u značajnoj meri i karakter trenja (od graničnog do hidrodinamičkog). Pобољшanje antifrikcionih osobina radne tečnosti postiže se dodavanjem određenih materija koje su po kvalitetu poredjene u tabeli 2.2. /23/.

Tabela 2.2. Koeficijent trenja

MATERIJA	koef. trenja
Stearinska kiselina	0,022
Molibdendisulfid (MoS_2)	0,032
Grafit	0,036
Turbinsko ulje	0,060
Palmino ulje	0,063
Ricinusovo ulje	0,064
Cinkoksid	0,071
Šapunski prašak	0,076
Turbinsko ulje sa 1% grafita	0,081
Mašinsko ulje	0,099
Liskunov prašak	0,26

Veoma dobri rezultati kod hidrostatičkog istiskivanja postignuti su primenom MoS_2 kao podmaznog sredstva u kombinaciji sa različitim vrstama radne tečnosti. Ova materija primenjuje se i kod konvencionalnih postupaka obrade, stabilna je i ne oksidiše na temperaturama do 400°C . Preko ove temperature ne preporučuje se primena MoS_2 jer dolazi do njegove oksidacije - stvara se MoS_3 koji je abrazivan. Za hidrostatičko istiskivanje preporučuje se upotreba MoS_2 veličine zrna $75\ \mu\text{m}$ u koncentraciji 5-10% radne materije. Neka ispitivanja su pokazala čak da koeficijent trenja na kontaktnoj površini pri primeni radne tečnosti sa MoS_2 opada porastom pritiska.

Osim MoS_2 kod hidrostatičkog istiskivanja se primenjuje još i grafit vosak i druge materije.

Za postizanje boljih efekata podmazivanja potrebno je izvršiti pripremu površina priprema čiji je cilj da se postigne bolja adhezija sredstava za podmazivanje i njegova bolja ravnomernost. Priprema obuhvata:

- a) Čišćenje površina priprema (struganje, peskarenje i nagrizanje hemijskim sredstvima);
- b) Nanošenje plastičnog sloja (bakarisanje, kadmiranje, olovizacija i dr.);
- c) Nanošenje podmazanog sredstva na površinu obratka.

Pravilna priprema površine obratka smanjuje kontaktno trenje, poboljšava kvalitet površine, smanjuje ukupni radni pritisak i povećava stabilnost procesa.

Konkretan izbor radne materije i sredstava za podmazivanje može se izvršiti na osnovu datih podataka uz eksperimentalnu proveru i usaglašavanje tokom eksploatacije postrojenja.

2.7. MAŠINE I ALATI ZA HIDROSTATIČKO OBLIKOVANJE

Jedna od ozbiljnih prepreka široj primeni hidrostatičkog oblikovanja jeste potreba za specijalnim uređajima i alatima konstruisanim tako da sa sigurnošću mogu izdržati visoke pritiske koji omogućuju stvaranje potrebnih uslova za tečenje metala uz pretpostavku dovoljne produktivnosti. Početni razvoj uređaja za hidrostatičko oblikovanje bio je usmeren na korišćenje standardnih hidrauličnih presa uz izgradnju odgovarajućih uređaja i alata. Kasnije su se u industrijskoj primeni javile i specijalne mašine čija je osnovna karakteristika povećanje proizvodnosti.

Osnovne šeme hidrostatičke obrade date su u poglavlju 2.3. iz kojih proizlazi da se visoki pritisak u zoni deformacije ostvaruje na više načina:

1. Direktnim dejstvom klipa u cilindru ;
2. Pomoću posebnog izvora;
3. Kombinacijom hidrauličnog i mehaničkog pogona.

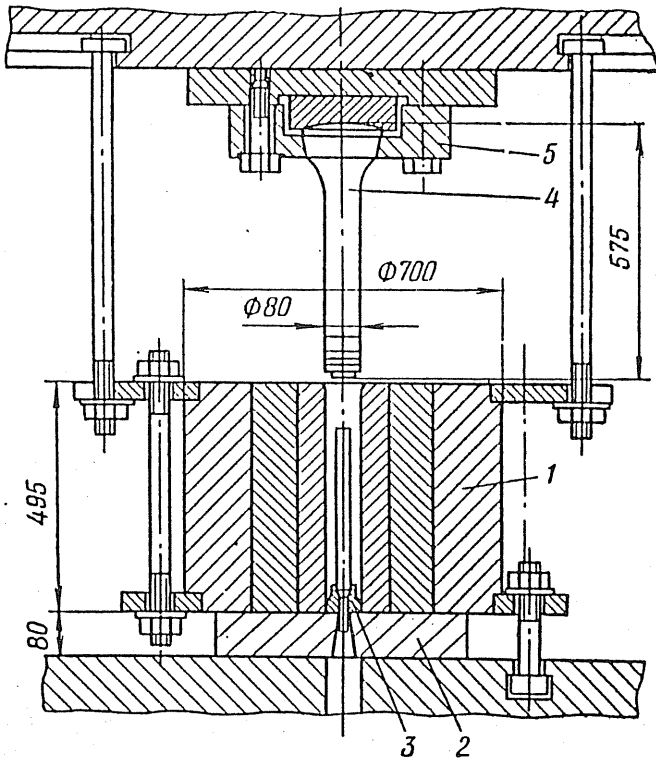
U nastavku su ukratko prikazana karakteristična rešenja pojedinih vrsta uređaja.

2.7.1. Uređaji direktnog dejstva

Ova vrsta uređaja za hidrostatičkog oblikovanje može se koristiti na vertikalnim i horizontalnim hidrauličnim presama.

Na sl.2.49. je prikazan uređaj direktnog dejstva za istosmerno

istiskivanje koji se postavlja na vertikalnu hidrauličnu presu. Osnovni elementi uređaja su: 1 - kontejner, 2 - donja ploča, 3 - matrica, 4 - žig, 5 - držač žiga. Uredjaj je namenjen za rad na hidrauličnoj presi od 10 MN. Unutrašnji prečnik radnog cilindra je 80 mm a kontejner je namenjen za rad sa pritiscima od 2.000 do 2.500 MPa.

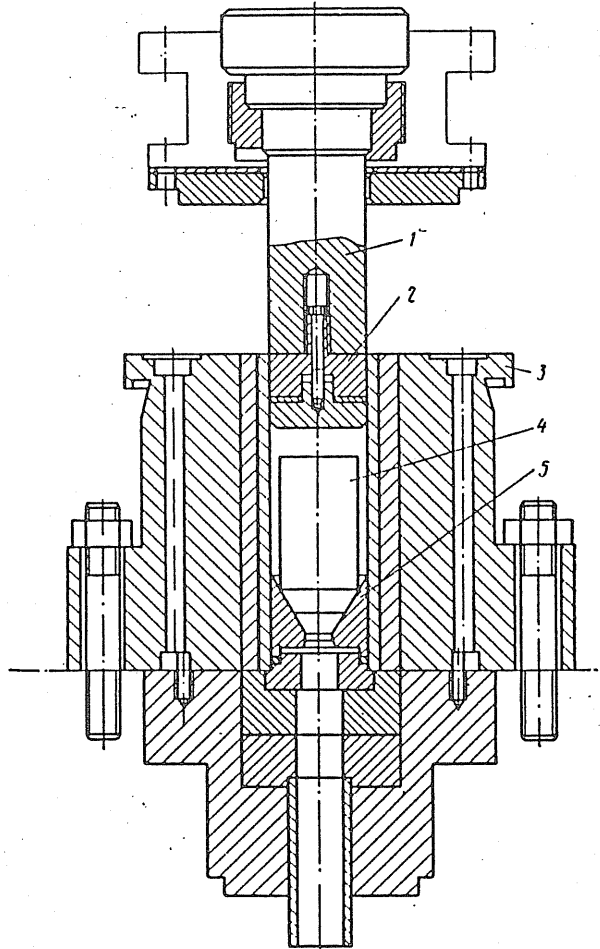


Sl.2.49. Uredjaj direktnog dejstva za istosmerno istiskivanje na vertikalnoj hidrauličnoj presi /23/

Proces istiskivanja na ovom uređaju odvija se prema sledećem re-dosledu. U matricu se postavlja pripremak i ubacuje kontejner koji je prethodno odvojen od donje ploče i podignut u gornji položaj. Potom se spušta kontejner sa matricom i vezuje za donju ploču. U kontejner se naliva radna tečnost a zatim pokreće žig i izvodi istiskivanje. Na kraju istiskivanja obradak i radna tečnost padaju u posebnu posudu sa donje strane. Potom se postupak ponavlja na isti način.

Uredjaji ovog tipa su kompaktne konstrukcije ali ne obezbeđuju vi-soku produktivnost.

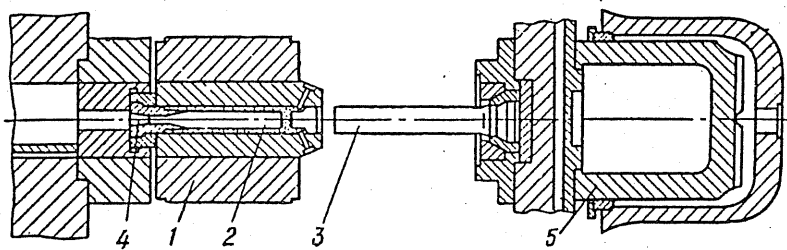
Na sl.2.50. je prikazan uređjaj direktnog dejstva za istiskivanje u toplom stanju. Konstrukcija ovog uređjaja je slična sa prethodnom. Pre



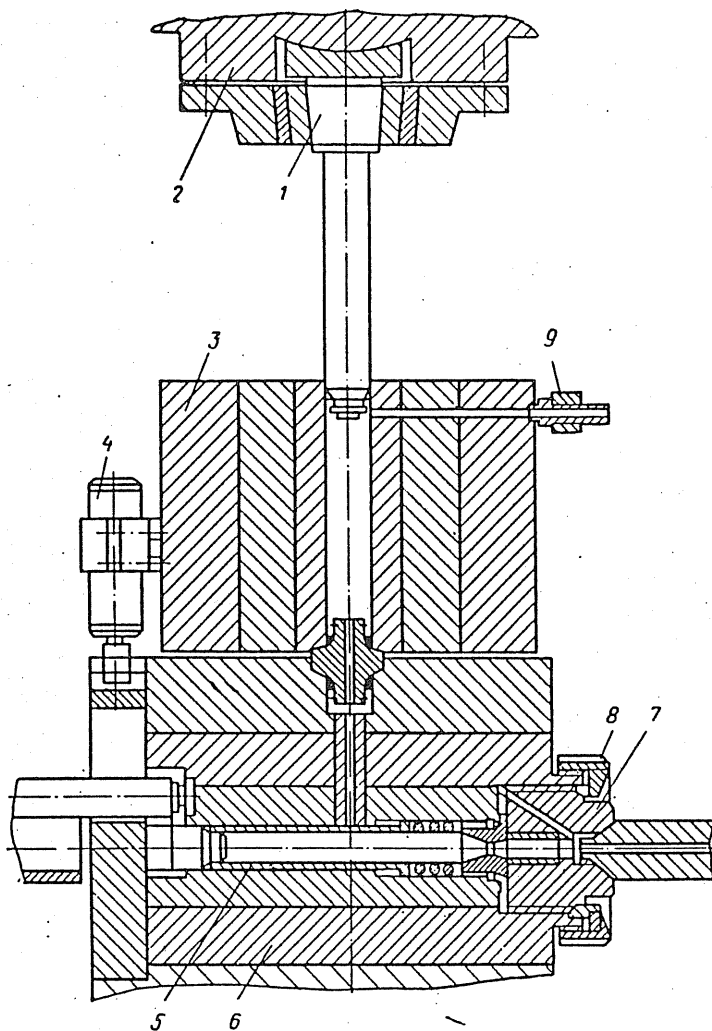
Sl.2.50. Uredjaj direktnog dejstva za istiskivanje u toplom stanju /22/

istiskivanja pripremak (4) se zagreva na potrebnu temperaturu i ubacuje sa gornje strane u matricu (5) koja je smeštena u kontejner (3). Zatim se u kontejner naliva radni fluid i delovanjem žiga (1) preko elementa (2) se ostvaruje proces istiskivanja.

Horizontalni uređjaji direktnog dejstva (sl.2.51.) se ne razlikuju principijelno od prethodnih a konstrukcija im je prilagodjena horizontalnoj hidrauličnoj mašini. Osnovni elementi uređjaja na sl.2.51. su: 1 - kontejner, 2 - pripremak, 3 - žig (klip), 4 - matrica, 5 - radni cilindar prese.



Sl.2.51. Horizontalni uredjaj direktnog dejstva /23/

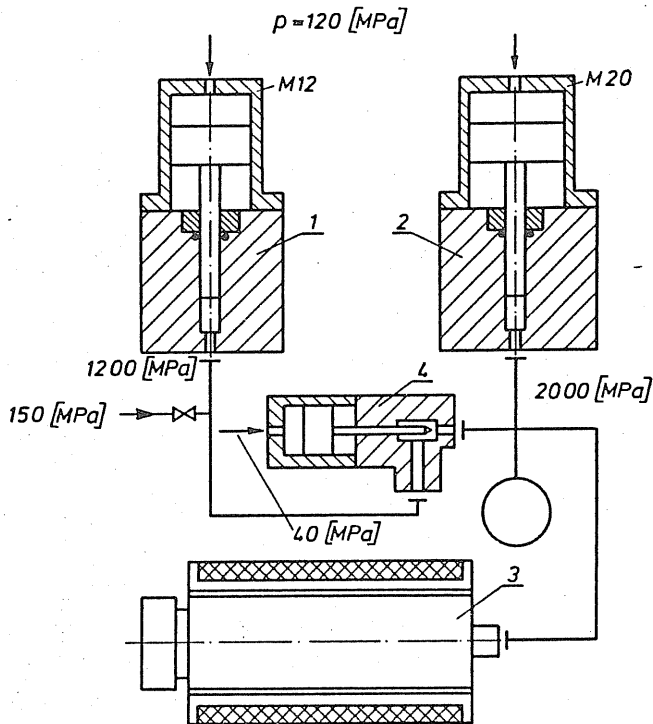


Sl.2.52. Uredjaj sa nezavisnim cilindrima /23/

Uređaji direktnog dejstva grade se i sa nezavisnim cilindrima (sl. 2.52.). U vertikalnom cilindru (3) stvara se visoki pritisak dok se u horizontalnom (6) obavlja proces istiskivanja. ovakvi uređaji omogućuju izradu dužnih izradaka i veću produktivnost. Osnovni elementi ovog uređaja prema slici 2.52. su: 1 - klip, 2 - ležište klipa, 3 - vertikalni kontejner, 4 - zatvarač, 5 - pripremak, 6 - horizontalni (radni) cilindar, 7 - kalibrirajući prsten, 8 oslonac matrice, 9 - dovod tečnosti.

2.7.2. Uređaj sa posebnim izvorom pritiska

Kod ove vrste uređaja za hidrostatičku obradu visoki pritisak se stvara pomoću specijalnih uređaja - multiplikatora koji su smešteni van mašina za oblikovanje. Pomoću jednog multiplikatora može se posluživati



Sl.2.53. Šema uređaja sa multiplikatorom /23/

jedna ili više mašina zavisno od kapaciteta i potrošnje tečnosti pod pritiskom.

Principijelna šema uređaja za hidrostatičko oblikovanje sa multiplikatorom kao izvorom radne tečnosti data je na sl.2.53., gde je: 1,2 - multiplikatori, 3 - radni cilindar, 4 - regulacioni ventil. Tečnost niskog pritiska (120 MPa) dolazi u cilindre multiplikatora koji na svojim izlazima stvaraju pritisak potreban za hidrostatičko oblikovanje (1.200 MPa odnosno, 2.000 MPa). Regulacija pritiska i protoka tečnosti ostvaruje se pomoću ventila 4.

Osnovni nedostatak ove vrste uređaja je potreba za transportom tečnosti visokog pritiska.

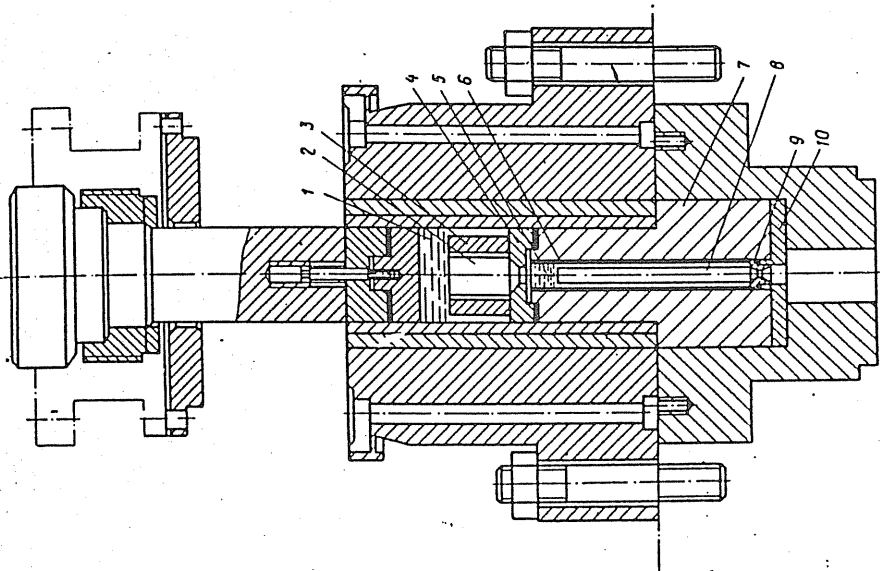
2.7.3. Uređaj sa diferencijalnim pritiskom

Uloga diferencijalnog pritiska kako je to objašnjeno u poglavlju 2.4.5. sastoji se u daljem povećanju deformabilnosti materijala kod hidrostatičkog istiskivanja delovanjem na smanjenje uticaja zateznih napona. Stvaranje pritiska u zoni izlaska obratka može se konstrukciono realizovati na različite načine: hidrauličnom putem, mehaničkim putem i kombinovano.

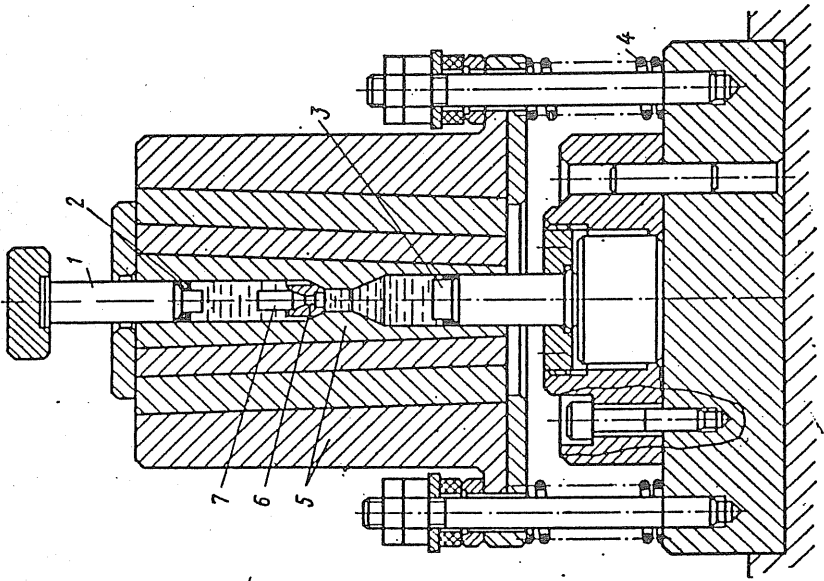
Na sl.2.54. prikazana je konstrukcija uređaja za hidrostatičko istiskivanje kod kojeg se diferencijalni pritisak ostvaruje pomoću "parazitnog obratka". Uređaj se montira na presu od 6 MN a na njemu se obraduju delovi dimenzija $\emptyset 40 \times 60$ mm /22/. Osnovni elementi uređaja su: 1 - radna tečnost (pritisak p_1), 2 - pripremak, 3 - čaura za vođenje priprema, 4 - matrica, 5 - tečnost (pritisak p_2), 6 - donji cilindar, 7 - donji kontejner, 8 - parazitni obradak, 9 - donja matrica, 10 - oslonac donje matrice.

U gornjem cilindru pomoću klipa stvara se radni pritisak p_1 koji omogućuje istiskivanje obratka 2, čijim ulaskom u donji cilindar se povećava pritisak p_2 . Veličina pritiska p_2 zavisi od plastičnih svojstava "parazitnog obratka" koji se istiskuje kroz donju matricu te se na taj način održava određena vrednost pritiska u donjem cilindru koji je dovoljan da se spreči pojava pukotina na obratku 2.

Bolja varijanta uređaja sa diferencijalnim pritiskom je konstrukcija sa hidrocilindrom sa donje strane koji reguliše pritisak u donjem delu obratka (sl.2.55.).



Sl. 2.54. Alat za istiskivanje sa protivpritiskom ostvarenim pomoću "parazitnog" obratka /22/

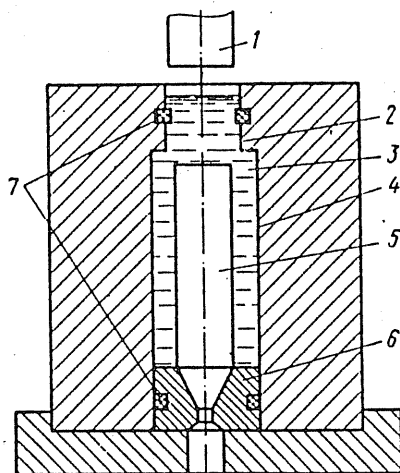


Sl. 2.55. Alat za istiskivanje sa protivpritiskom ostvarenim hidrauličnim načinom /22/

2.7.4. Uredjaji za hidromehaničko oblikovanje

Kod uredjaja sa hidromehaničkim pogonom pored tečnosti pod pritiskom na obradak deluje i mehanička sila koja se obično ostvaruje čvrstom vezom obratka sa žigom.

Na sl.2.56. je prikazano hidromehaničko istiskivanje punih komada u dvostepenom kontejneru. Osnovni elementi uredjaja su: 1 - žig, 2 - deo cilindra manjeg prečnika (d_1), 3 - radni fluid, 4 - deo cilindra većeg prečnika (d_2), 5 - pripremak, 6 - matrica, 7 - zaptivka. Uredjaj

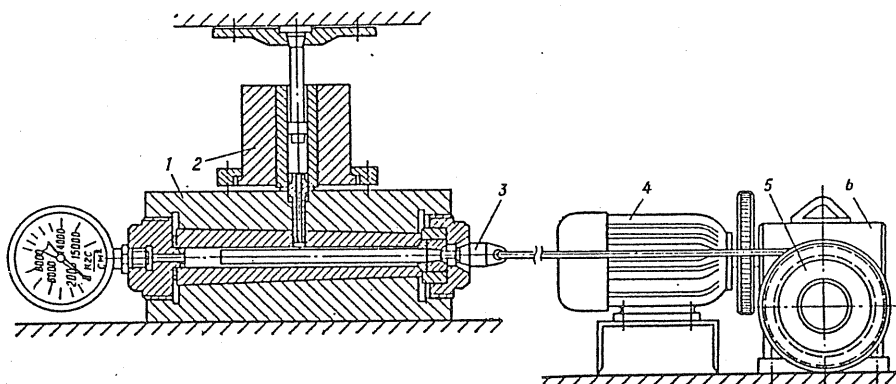


Sl.2.56. Uredjaj za hidromehaničko istiskivanje /22/

funkcioniše na sledeći način. U matricu se najpre postavlja pripremak sa konusnim početkom, a potom se cilindar puni radnom tečmpšću do visine koja se eksperimentalno određuje. Posle toga pokreće se klip, čiji je prečnik jednak prečniku obratka, usled čega dolazi do sabijanja tečnosti i povećanja pritiska u cilindru. Ovaj pritisak niži je od pritiska potrebnog za čisto hidrostatičko istiskivanje i on od trenutka dodira žiga i obratka pa do kraja istiskivanja ostaje konstantan zahvaljujući jednakosti prečnika klipa i prečnika obratka. Dodatno opterećenje potrebno za istiskivanje ostvaruje se mehaničkim delovanjem klipa na pripremak. Ovaj uredjaj se pokazao pouzdanim u radu i omogućuje još da se u cilindar ubacuju sledeći pripreмки koji ne moraju imati konusni vrh te se tako proces kontinualno odvija.

Osim ovog rešenja u poglavlju 2.4.4. na sl.2.25. prikazan je uređaj za hidromehaničko istiskivanja kod kojeg mehanička veza klipa sa obratkom sprečava nekontrolisano povećanje brzine obratka.

Mehaničko dejstvo kod hidrostatičke obrade može se ostvariti zateznom silom kao što je to slučaj kod oblikovanja istiskivanjem sa vučenjem (sl.2.57.). U kontejneru 2 stvara se visoki pritisak koji se u horizontalnom radnom cilindru (1) koristi za hidrostatičko oblikovanje. Na vrh obratka postavlja se specijalni držač (3) preko kojeg se pomoću elektromotora (4) reduktora (6) i kotura sa spojnicom (5) ostvaruje potrebna sila zatezanja. Regulacija zatezne sile ostvaruje se pomoću spojnice na koturu.



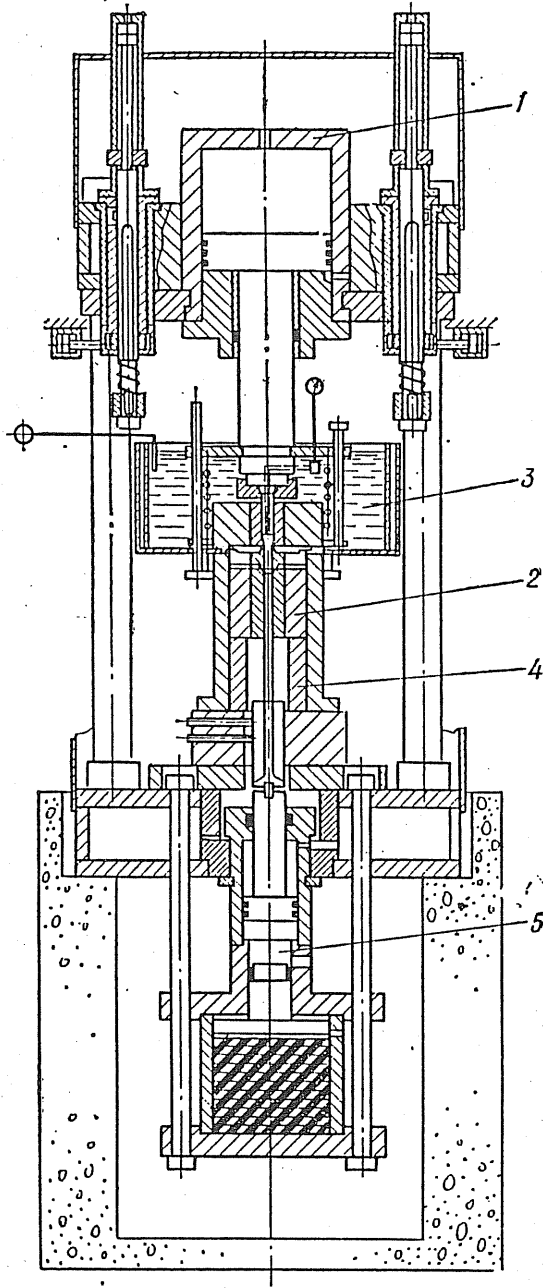
Sl.2.57. Hidromehaničko istiskivanje sa vučenjem /23/

2.7.5. Specijalne hidrostatičke prese

Adaptacija klasičnih hidrauličnih presa za hidrostatičku obradu često zahteva dosta truda i primenjuje se obično u eksperimentalnoj fazi hidrostatičke obrade sa relativno niskom produktivnošću i niskim stepenom automatizacije. Zbog toga se u industrijski razvijenim zemljama proizvode specijalne hidraulične mašine koje su konstruisane tako da respektuju zahteve hidrostatičke obrade.

Na sl.2.58. je prikazana jedna od prvih hidrauličnih presa proizvedena u SSSR-u a koja je namenjena za hidrostatičko istiskivanje.

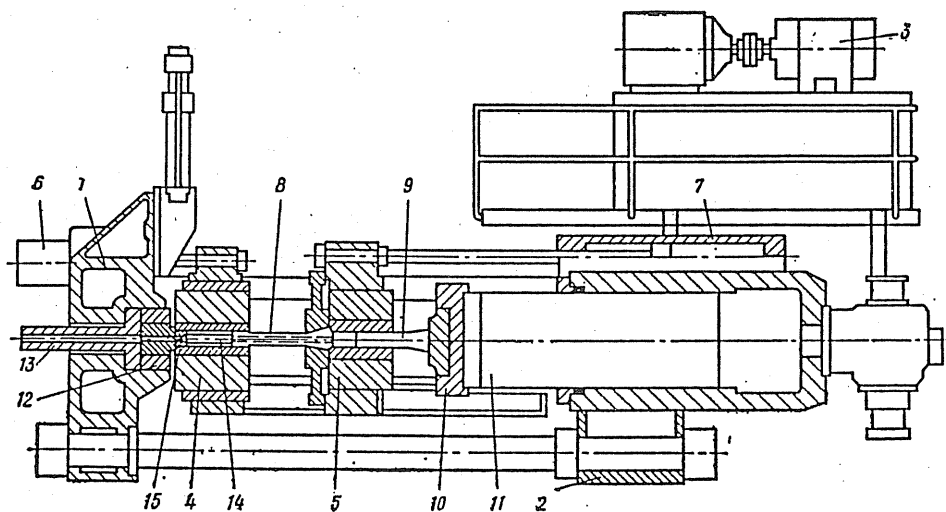
Nominalna sila ove mašine iznosi 2,5 MN, maksimalan radni pritisak je 3000 MPa a protivpritisak se kreće do 1500 MPa. Unutrašnje dimenzije radnog cilindra (prostor za pripremak) su $\varnothing 30 \times 100$ mm.



Sl.2.58. Specijalna presa za hidrostatičko istiskivanje /23/

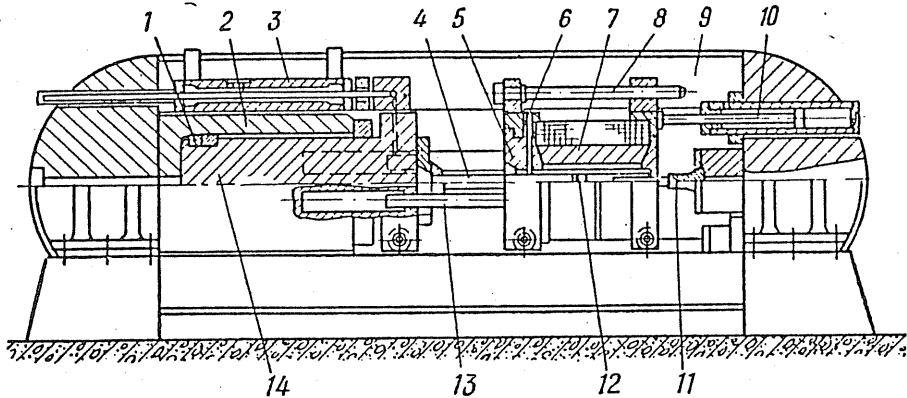
Osnovni elementi mašine prema slici su: 1 - pogonski cilindar, 2 - alat za hidrostatičko istiskivanje sa protivpritiskom, 3 - rezervoar radne tečnosti, 4 - klip za protivpritiskak, 5 - amortizer. Ova mašina namenjena je za obično hidrostatičko istiskivanje, istiskivanje sa protivpritiskom kao i za klasične operacije obrade deformisanjem. Presa je četvorostubna, pogon se ostvaruje preko glavnog cilindra (1) a povratni hod preko četiri manja cilindra koji se nalaze sa gornje strane mašine. Protivpritiskak se ostvaruje pomoću posebnog uređaja u kojem je ugradjen amortizer koji sprečava nekontrolisano povećanje brzine obratka. Radni ciklus prese iznosi 125 s.

Na sl.2.59. prikazana je horizontalna hidraulična presa od 16 MN firme "Filding" namenjena za hidrostatičko istiskivanje profila iz priprema $\emptyset 120 \times 500$ mm. Dužina obratka nije ograničena. Osnovni elementi mašine su: 1,2 - poprečne traverze, 3 - pumpa, 4 - glavni cilindar, 5 - cilindar visokog pritiska, 6,7 - pomoćni cilindri, 8 - klip (žig), 9 - klip, 10 - pokretna traverza, 11 - klip glavnog cilindra, 12 - držač matrice, 13 - komora za protivpritiskak, 14 - pripremak, 15 - matrica. Mašina je namenjena za obično hidrostatičko istiskivanje i istiskivanje sa protivpritiskom.



Sl.2.59. Horizontalna presa za hidrostatičko istiskivanje firme "Filding" /23/

Švedska firma "ASEA" proizvodi familiju horizontalnih mašina za industrijsku primenu hidrostatičke obrade. Nominalna sila mašine se kreće od 2 do 63 MN a pritisak radnog fluida od 1600-3000 MPa. Principijelna šema ovih mašina data je na sl.2.60. Kućište mašine astoji se od dva nosača i izmedju kojih su postavljena četiri stuba (9) koji su armirani hladnovaljanom čeličnom trakom. Glavni cilindar (2) postavljen je na zadnjem



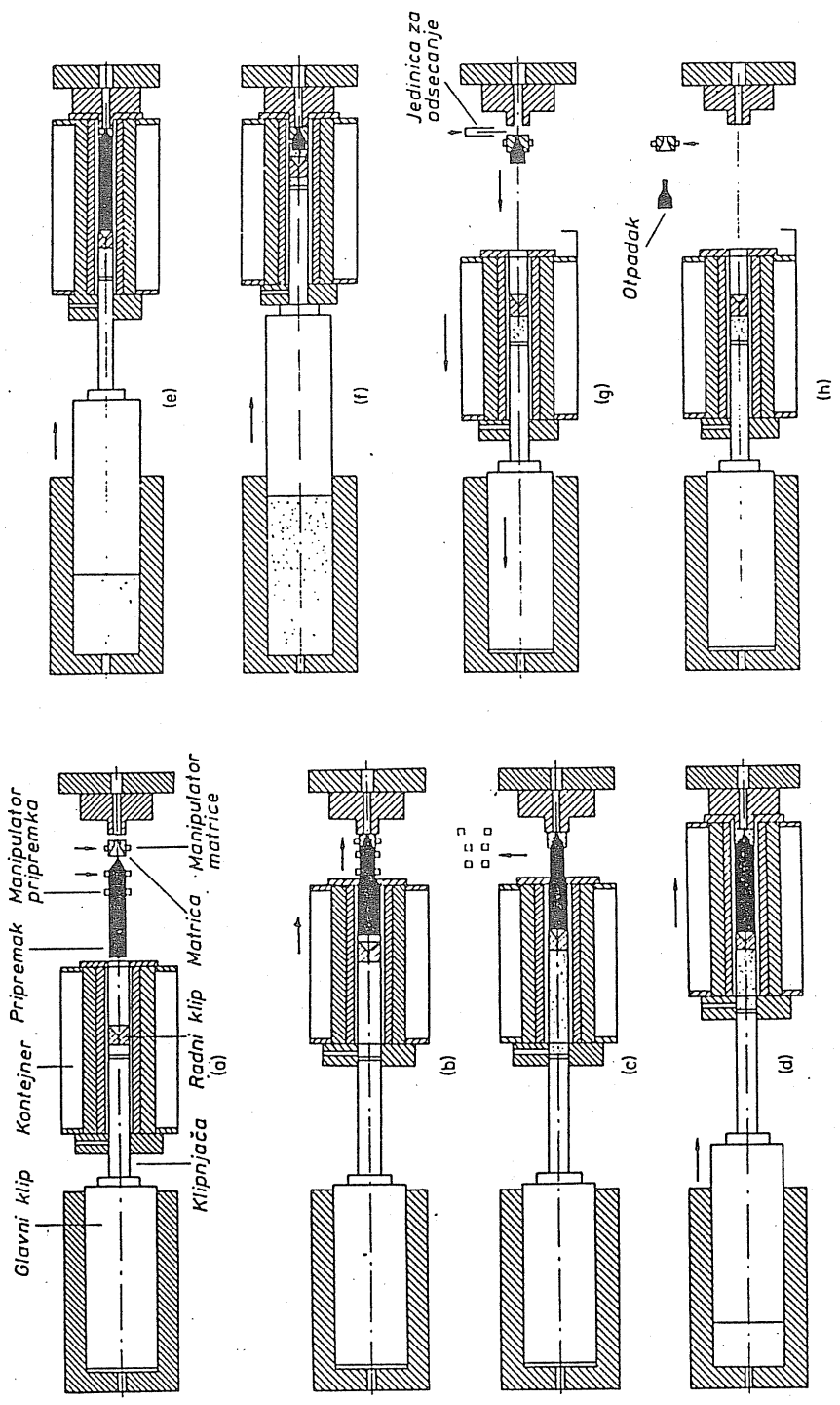
Sl.2.60. Horizontalna hidraulična presa firme "ASEA" /23/

nosaču a njegov klip (14) je produžetak pokretne traverze. Vodjenje traverze vrši se pomoću čaure (1) koja se nalazi na kraju klipa. U klipu glavnog cilindra smešteni su cilindri za povratni hod glavnog klipa. Žig 4 vezan je za traverzu i služi za stvaranje visokog pritiska u kontejneru 7. Kontejner je smešten na specijalni nosač koji se sastoji od dva diska koji se vode preko vodjica 8. Pomeranje kontejnera ostvaruje se cilindrima 10. Kontejner je armiran čeličnom trakom visoke čvrstoće. Prednja prirubnica kontejnera (5) pridržava se klipom 13, dok se matrica 11 oslanja na prednji stub mašine. Obradak se u matricu stavlja pomoću klipa 12. Povratni hod glavnog klipa ostvaruje se pomoću teleskopskog sistema 3.

Osnovna karakteristika ovog tipa mašina je potpuna automatizacija svih operacija u toku radnog ciklusa. Svi spojevi na kontejneru su razdvojivi a zaptivanje se ostvaruje pomoću odgovarajućih cilindara.

Na sl.2.61. je prikazan radni ciklus hidrostatičkog istiskivanja na ovoj vrsti mašina :

Pozicija a - Glavni klip i kontejner su pomereni sasvim nazad. Manipulator postavlja pripremak u matricu.



Sl. 2.61. Šema radnog cilusa mašine "ASEA" /20, 23/

Pozicija b - Kontejner se kreće napred (u desno) i pripremak ulazi u kontejner.

Pozicija c - U kontejner se kroz otvor na prirubnici i klip, ubacuje radna tečnost. Pod dejstvom radne tečnosti obradak opterećuje matricu koja se naslanja na odgovarajući oslonac. Manipulator se pomera u stranu.

Pozicija d - Glavni klip i kontejner se pomeraju do oslonca matrice. Obradak sa matricom potpuno ulazi u kontejner.

Pozicija e - Glavni klip i radni klip se kreću unapred izazivajući porast pritiska u kontejneru.

Pozicija f - Glavni klip i radni klip se kreću u desno i pri dostizanju određenog pritiska započinje istiskivanje kroz matricu.

Pozicija g - Glavni klip i kontejner se kreću unazad, manipulator prihvata matricu sa ostatkom materijala. Ostatak materijala se testerom odvaja od obratka.

Pozicija h - Matrica sa ostatkom materijala se odnosi iz ose mašine, ostatak materijala se izbacuje i time je radni ciklus mašine završen.

2.7.6. Elementi alata za hidrostatičku obradu

Elementi alata za hidrostatičku obradu izloženi su dejstvu ekstremnih opterećenja te se njihovoj konstrukciji, izboru materijala, mehaničkoj i termičkoj obradi mora posvetiti posebna pažnja. Delovi ovih alata moraju biti jednostavnih oblika, bez naglih prelaza (radi smanjenja koncentracije opterećenja) i sa fino obradjenim površinama. Kao materijal za izradu alata koriste se posebne vrste alatnih čelika koji su dobijeni u elektropecima u vakuumu.

Osnovni elementi alata za hidrosatičku obradu su kontejner, klip i matrica, a u nastavku su prezentirane preporuke za njihovu konstrukciju.

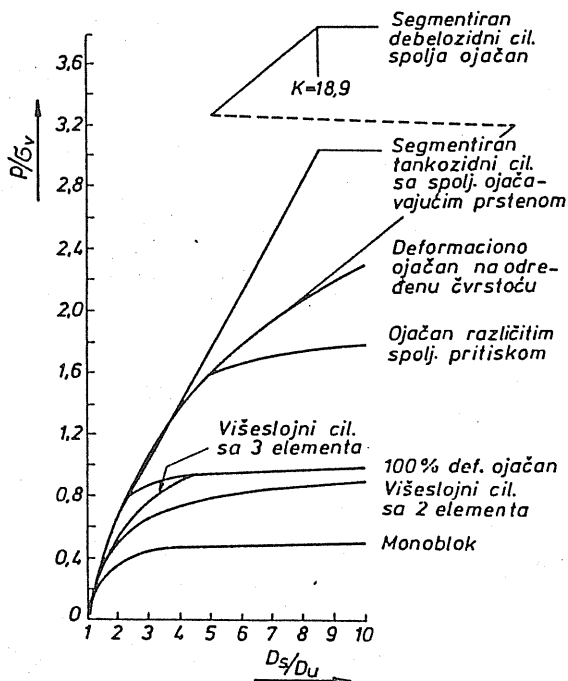
2.7.6.1. Kontejner (radni cilindar)

Kontejner je najopterećeniji element alata za hidrostatičku obradu, a njegov kvalitet određuje nivo pritiska tečnosti sa kojim se izvodi proces oblikovanja. Osnovni tipovi konstrukcije kontejnera su:

1. Jednoslojni (monoblok)
2. Višeslojni - armirani:
 - 2.1. Kontejner ojačan prstenovima;

- 2.2. Kontejner ojačan pločtim prstenovima ;
- 2.3. Kontejner ojačan žicom ili trakom ;
- 2.4. Kontejner ojačan hidrauličnim putem, itd.

Na sl.2.62. je data teorijska zavisnost promene faktora K ($K=P/\sigma_v$) od odnosa prečnika cilindra a ($a=D_s/D_u$) za pojedine načine ojačavanja kontejnera.



Sl.2.62. Zavisnost opterećenja kontejnera od odnosa prečnika /20/

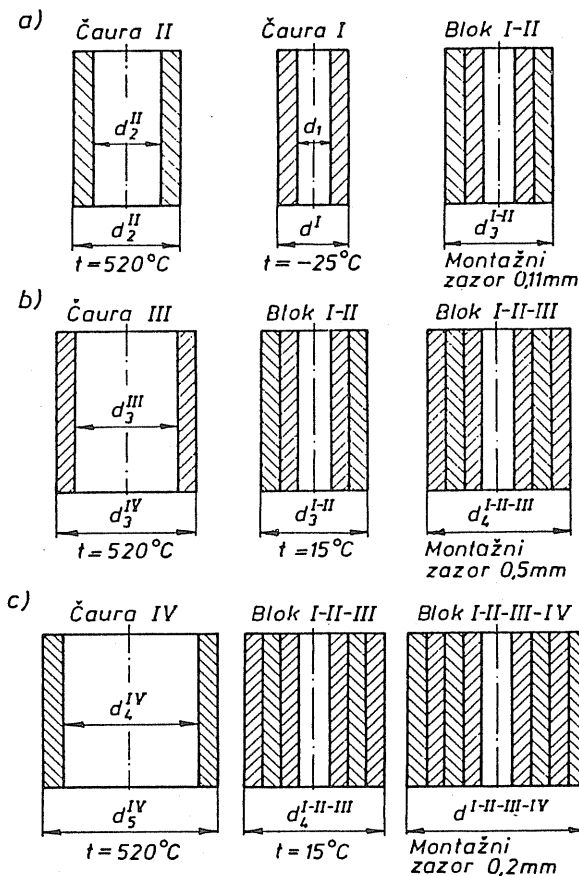
1. Jednoslojni kontejner

Jednoslojni kontejneri primenjuju se za hidrostatičku obradu sa nižim pritiscima. Pritisak tečnosti ne sme prelaziti polovinu granice razvlačenja materijala cilindra, a čak i značajno povećanje D_s/D_u ne dovodi do bitnijeg povećanja dozvoljenog pritiska radnog fluida (sl.2.62.). Povećanje nosivosti monocilindra može se postići njegovim ojačavanjem plastičnom deformacijom. Svršishodna je primena ove konstrukcije u slučaju manjeg prečnika obratka (unutrašnji prečnik cilindra do 40 mm).

2. Višeslojni cilindar

Armirani cilindri omogućuju rad sa znatno višim pritiscima (do 3.000 MPa) a unutrašnji prečnik se kreće i do 100 mm. Broj ojačavajućih slojeva se kreće do četiri a dalje povećanje ne doprinosi značajnijem efektu ojačavanja konstrukcije cilindra. Ojačavanje radnog cilindra izvodi se na različite načine i oni su u nastavku ukratko opisani.

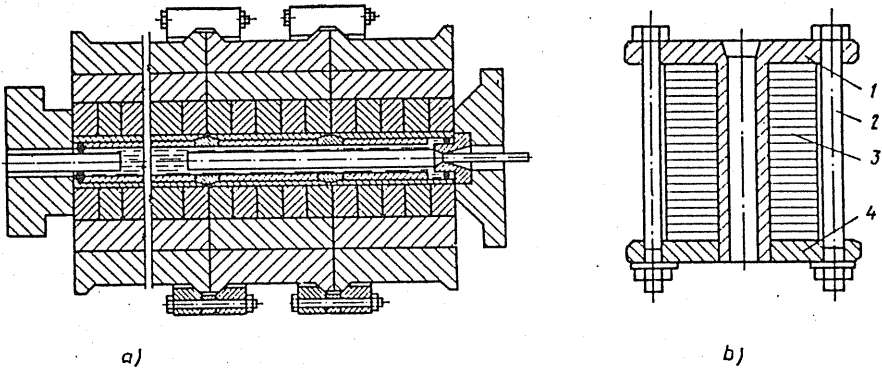
Na sl.2.63. je prikazano klasično ojačavanje radnog cilindra sa ojačavajućim prstenovima koji se navlače na taj način što se spoljašnji



Sl.2.63. Radni cilindar sa ojačavajućim prstenovima /23/

prsten zagreje na određenu temperaturu, a unutrašnji ohladi u tečnom azotu. Konus ojačavajućih prstenova je 1:100 ili 1:50 a tvrdoća se kreće od 48-52 HRC. Ovako ojačani radni cilindri koriste se za pritiske od 2.000 do 2.500 MPa.

Na sl.2.64. je prikazana konstrukcija cilindra ojačanog kružnim prstenovima. Prva konstrukcija (a) ima prstenove izradjene kovanjem. Zbog veće dužine obratka cilindar je izradjen iz tri međusobno spojena bloka. U drugom slučaju (sl.2.64.b) ojačavanje je izvršeno prstenovima

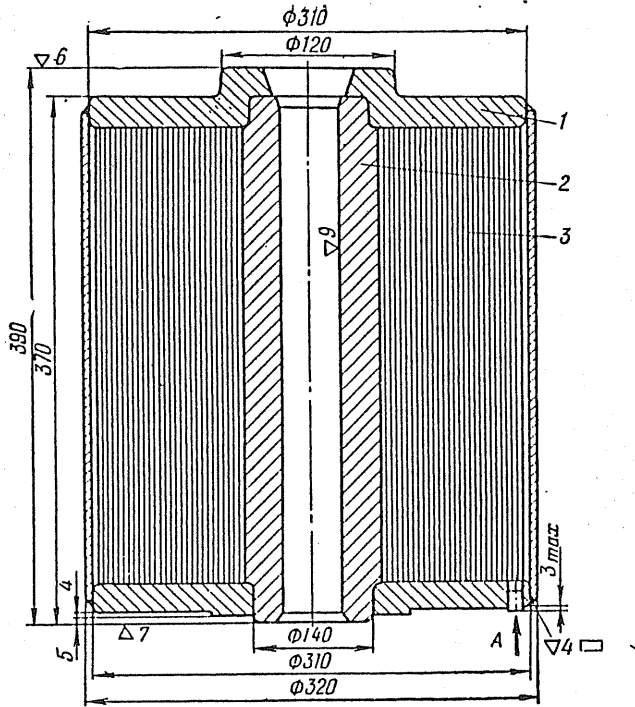


Sl.2.64. Radni cilindar ojačan prstenovima
a) kovanim, b) od lima /22/

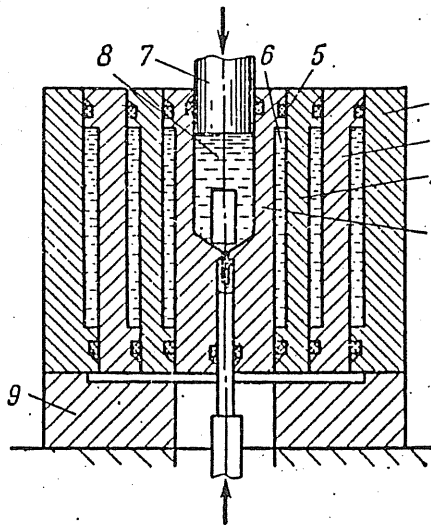
od kvalitetnog lima ($\sigma_v=260-320$ MPa, $\psi=35-40\%$). Prednost ove konstrukcije je u tome što se ojačavajući elementi izradjuju brzom tehnologijom, tj. razdvajanjem presovanjem. Ova vrsta kontejnera uspešno se primerjuje za pritiske do 3.000 MPa

Na sl.2.65. je prikazana konstrukcija radnog cilindra ojačanog namotavanjem čelične trake. Ovaj radni cilindar namenjen je za eksploataciju pri pritisku od 2.000 MPa. Slično ovoj konstrukciji u primeni su cilindri ojačani namotavanjem uske čelične trake (dimenzija 2,5x0,8 mm) čija je jačina 1600 MPa. Namotavanje čelične trake se može izvesti i na strugu uz dodatak uređaja za zatezanje.

Osim navedenih konstrukcija kontejnera sa mehaničkim ojačavanjem u primeni su i radni cilindri ojačani hidrauličnim putem. Jedno rešenje ovog tipa dato je na sl.2.66. Radni cilindar 1 ojačan je sa tri prstena (2, 3 i 4) izmedju kojih se nalazi tečnost visoke viskoznosti (radi lakšeg zaptivanja). Cilindar 1 i čaure 2, 3 i 4 se mogu aksijalno pomerati za malu veličinu hoda. Opterećenje sa klipa 7 se prenosi na radnu tečnost stvarajući uslove za hidrostatičku obradu. Aksijalna sila sa cilindra 1 se preko prstenaste površine prenosi na tečnost u komori 6 usled čega dolazi do porasta pritiska i ojačavanja središnjeg elementa



SI.2.65. Kontejner ojačan čeličnom trakom /23/



SI.2.66. Kontejner sa hidrauličnim ojačanjem /23/

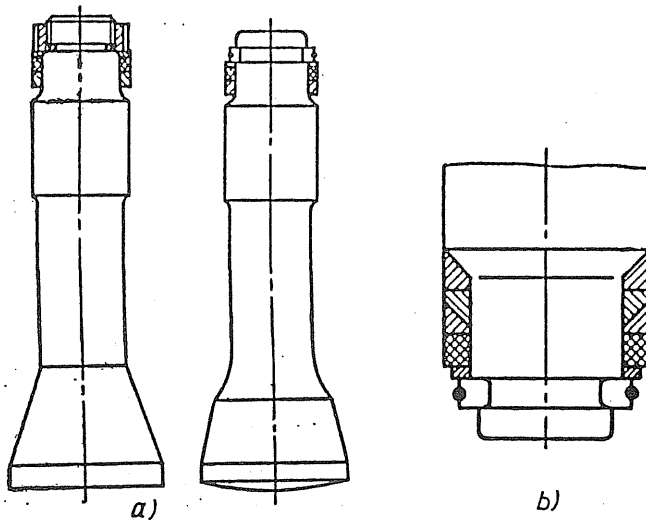
kontejnera (cilindar 1). Na sličan način dolazi do porasta pritiska u ostalim komorama. Prsten 4 se oslanja na kruti oslonac 9 koji prima ukupno aksijalno opterećenje.

2.7.6.2. Klip i zaptivni elementi

Kod uređaja za hidrostatičko oblikovanje direktnog dejstva, visoki pritisak radne tečnosti dobija se prenošenjem mehaničkog opterećenja preko klipa na radnu materiju. Konstrukcija klipa može biti dvojaka zavisno od načina zaptivanja:

- a) klip sa pokretnom zaptivkom
- b) klip sa nepokretnom zaptivkom

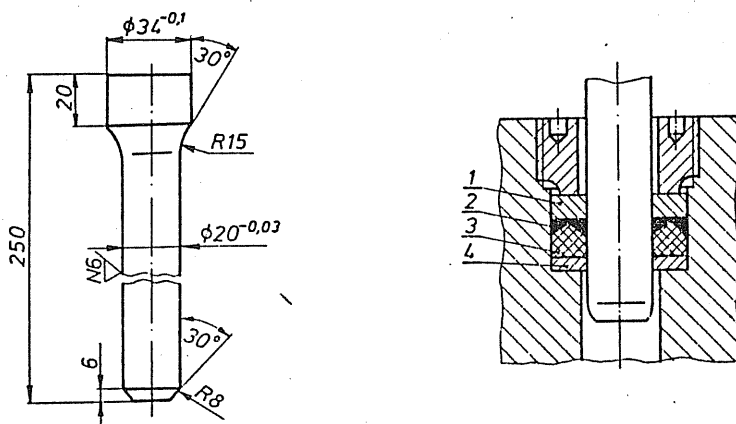
Opšti izgled klipa sa pokretnom zaptivkom dat je na sl.2.67.a. a na sl.2.67.b. prikazan je detalj vrha klipa sa prstenovima za zaptivanje.



Sl.2.67. Klip sa pokretnom zaptivkom /23/

Klip je stepenastog oblika sa glavom za učvršćivanje čija čeona površina može biti ravna ili sferična radi samopodešavanja. zaptivanje spoja klip - cilindar se ostvaruje pomoću metalnih i gumenih prstenova. Nedostaci ove konstrukcije su: 1. Potreba za visokom tačnošću i kvalitetom površine cilindra po kojoj klizi zaptivka; 2. Zaptivanje je osetljivo na eventualno zákošenje ili izvijanje klipa.

Konstrukcija klipa sa nepokretnom zaptivkom kao i rešenje zaptiva-
nja dati su na sl.2.68. Sam klip je jednostavne konstrukcije sa fino ob-
radjenom spoljnom površinom preko koje klizi zaptivka. Zaptivni čvor
sastoji se od čeličnog prstena (1) , zaptivke visokog pritiska (2), za-
ptivke niskog pritiska (3) i prstena za oslanjanje (4).



Sl.2.68. Klip sa nepokretnom zaptivkom /22, 23/

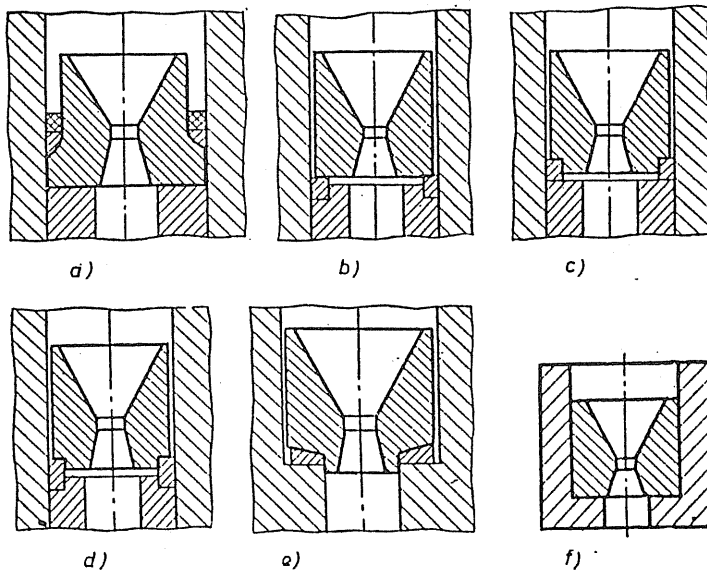
2.7.6.3. Matrica

U osnovi se razlikuju tri tipa matrica za hidrostatičku obradu:

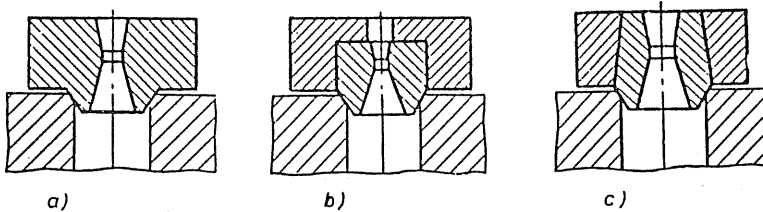
1. Matrice postavljene unutar radnog cilindra;
2. Matrice naslonjene na ivicu cilindra;
3. Matrice postavljene van radnog cilindra.

Kod prvog tipa matrica (sl.2.69.) hidrostatički pritisak je prisutan i na spoljnoj površini matrice tako da nije potrebno dodatno ojačavanje. Zbog toga je moguće izraditi matricu sa tankim zidovima. Međutim, ipak postoji opasnost od razaranja matrice u trenutku rasterećenja, tj. smanjivanja hidrostatičkog pritiska kada obradak snažno opterećuje matricu zbog zaostalih elastičnih deformacija. Ovakva konstrukcija matrice primenjuje se za manje serije.

Matrica drugog tipa (sl.2.70.) obično je mehaničkim putem ojačana a zahvaljujući visokom mehaničkom opterećenju obezbeđeno je dobro zaptivanje spoja matrica - kontejner. Ovaj tip matrice omogućuje brže manipulisanje u eksploataciji jer je spoj matrica - cilindar rastavljiv što omogućuje brzo postavljanje priprema i vadenje obratka. Ovaj tip matrice a takodje i prethodni se primenjuju za pritiske od 2000-3000 MPa



Sl.2.69. Matrica u radnom cilindru /23/

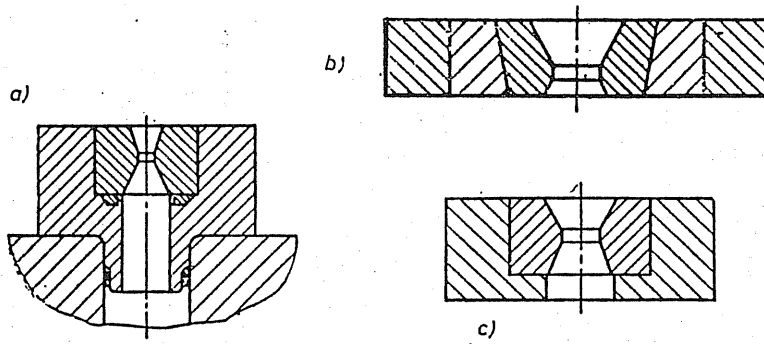


Sl.2.70. Matrica postavljena na ivicu cilindra /23/

Matrice koje se konstrukciono postavljaju van radnog cilindra koriste se za radne pritiske od 1000-1500 MPa i po pravilu su mehanički ojačane (sl.2.71.).

Matrice za hidrostatičku obradu izrađuju se od visokokvalitetnih alatnih čelika i tvrdih legura. Termički se obraduju na različitu tvrdoću zavisno od konstrukcije i uslova eksploatacije, uglavnom u dijapazonu od 45-65 HRC. Radne površine moraju biti visokog kvaliteta. Matrice za složene profile obradaka izrađuju se elektroerozijom. Radne površine matrice mogu biti presvučene nekom od tvrdih prevlaka (nitrirane, titankarbid i dr.). U nekim slučajevima matrica za hidrostatičko oblikovanje može

biti višedelna, tj. sastavljena od segmenata.



Sl.2.71. Matrice postavljene van radnog cilindra /23/