

**UNIVEZITET U NOVOM SADU**

**FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA**

Dr Miroslav PLANČAK, vanr.prof.

Dr Dragiša VILOTIĆ, docent

Dr Vlado VUJOVIĆ, red. prof.

# **TEHNOLOGIJA PLASTIČNOSTI U MAŠINSTVU II**

- PREDGOVOR, OSNOVNE PRETPOSTAVKE
- HIDROSTATIČKA OBRADA
- VALJANJE
- VALJANJE MAŠINSKIH DELOVA
- POVRŠINSKO PLASTIČNO DEFORMISANJE
- HLADNO UTISKIVANJE
- KOVANJE U KALUPU
- ROTACIONO TISKANJE
- PROFILNO SAVIJANJE POMOĆU VALJAKA
- FINO RAZDVAJANJE PRESOVANJEM

Novi Sad 1992

Plančak Miroslav, Vilotić Dragiša, Vujović Vlado  
TEHNOLOGIJA PLASTIČNOSTI U MAŠINSTVU II

---

IZDAVAČ: Fakultet tehničkih nauka  
INSTITUT ZA PROIZVODNO MAŠINSTVO  
21000 NOVI SAD, Vladimira Perića-Valtera 2.  
Jugoslavija

*Uredjivački odbor:* Gatalo dr Ratko, red. prof.  
Šidjanin dr Leposava, vanr. prof.  
Glavardanov dr Ivan, vanr. prof.  
Plančak dr Miroslav, vanr. prof.  
Gostimirović mr Marin, asistent

*Glavni i odgovorni urednik:* Plančak dr Miroslav, vanr. prof.

---

**Recenzenti:** Prof. dr Predrag Popović  
Prof. dr Milan Jurković

---

**Rukopis predat u štampu:** 25.05.1992. godine

**Tiraž:** 300 primeraka

---

*Ova naučna publikacija izdaje se u skladu sa višegodišnjim planom i godišnjim planom izdavačke delatnosti Naučno-obrazovnog instituta za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, usvojenom na 182. sednici Zbora radnika Instituta, održanoj 12.06.1991. godine*

---

Troškovi štampanja ovog udžbenika sufinansirani su od strane DDOR "NOVI SAD".

---

## S A D R Ž A J

PREDGOVOR .....	1
<b>1. UVODNE OSNOVE .....</b>	<b>4</b>
1.1. KLASIFIKACIJA TEHNOLOGIJE PLASTIČNOSTI .....	4
1.2. TEHNOLOŠKE METODE U TEHNOLOGIJI PLASTIČNOSTI .....	9
1.2.1. Naponska šema .....	9
1.2.2. Alati .....	13
1.2.3. Mašine .....	14
1.2.4. Popis važnijih metoda tehnologije plastičnosti .....	15
<b>2. HIDROSTATIČKA OBRADA .....</b>	<b>18</b>
2.1. UVOD .....	18
2.2. MEHANIČKE OSOBINE I PONAŠANJE MATERIJALA U HIDROSTATIČKIM USLOVIMA .....	19
2.2.1. Ispitivanje na zatezanje .....	19
2.2.2. Ispitivanje na uvijanje i smicanje .....	25
2.2.3. Deformabilnost materijala .....	28
2.2.4. Osnovni principi hidrostatičke obrade .....	30
2.3. OSNOVNE ŠEME HIDROSTATIČKE OBRADE .....	32
2.4. TEORIJSKE OSNOVNE HIDROSTATIČKE OBRADE .....	37
2.4.1. Osnovne karakteristike radnog fluida .....	37
2.4.2. Analiza sila i uloga trenja .....	39
2.4.3. Pritisak radnog fluida .....	42
2.4.4. Stabilizacija pritiska .....	45
2.4.5. Uloga protivpritiska kod hidrostatičkog utiskivanja .....	47
2.5. TEHNOLOŠKE METODE HIDROSTATIČKOG OBLIKOVANJA .....	49
2.5.1. Hidrostatičko istiskivanje .....	50
2.5.2. Hidrostatičko istiskivanje sa vučenjem .....	53
2.5.3. Hidrostatičko oblikovanje delova neogra- ničene dužine i kontrinualni postupci .....	57
2.5.4. Postupci oblikovanja sa povećanim hid- rostatičkim pritiskom ostvarenim meha- ničkim putem .....	58
2.5.4.1. Suprotnosmerno istiskivanje .....	59
2.5.4.2. Radijalno istiskivanje .....	61

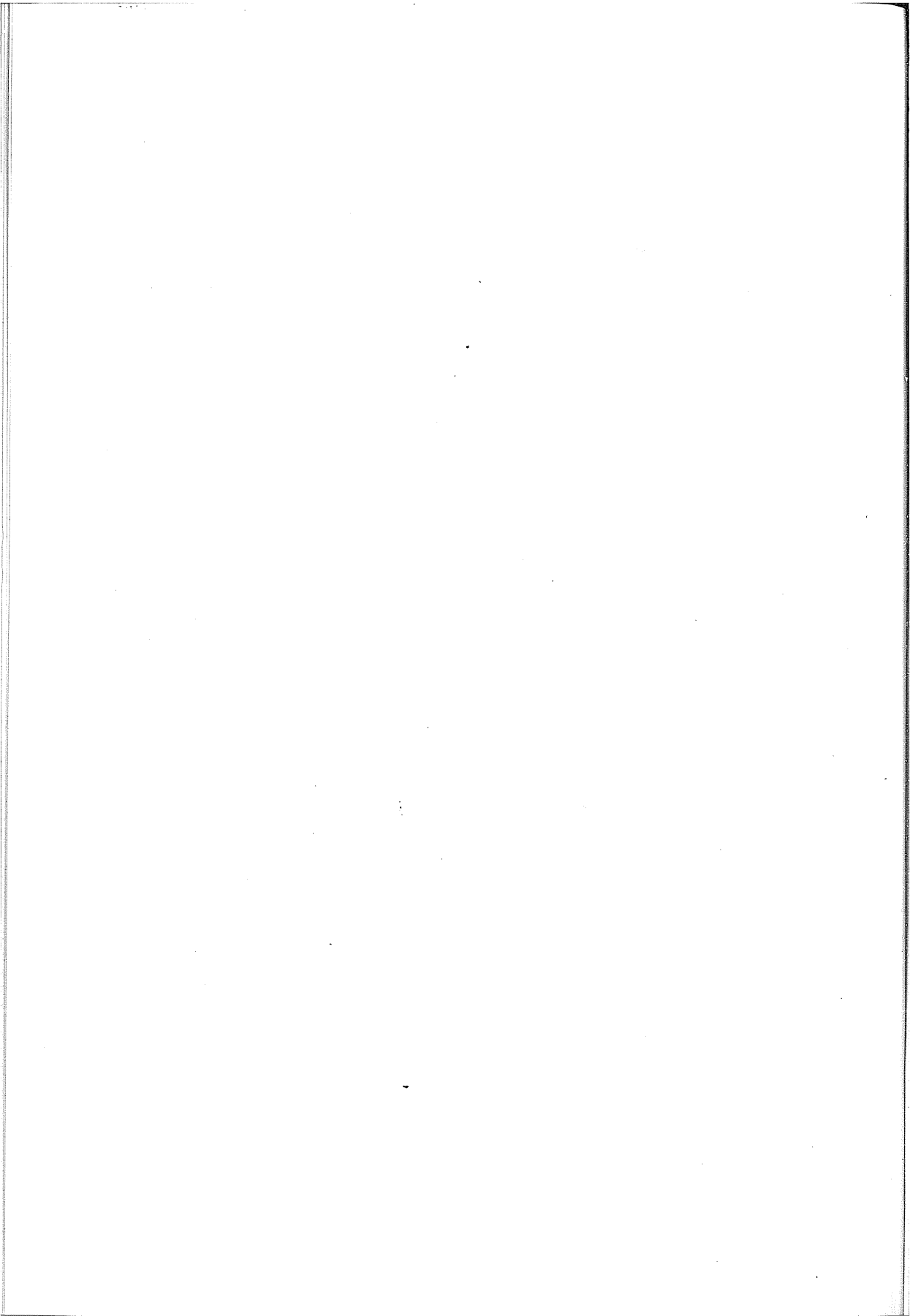
2.5.4.3. Kovanje u otvorenom kalupu .....	61
2.5.4.4. Fino razdvajanje presovanjem .....	63
2.5.4.5. Duboko izvlačenje .....	64
2.5.4.6. Oblikovanje cevi .....	66
2.6. TEHNOLOGIJA HIDROSTATIČKOG OBLIKOVANJA ....	67
2.6.1. Mehanička svojstva i deformabilnost polaznog materijala .....	68
2.6.2. Izbor tehnološke šeme oblikovanja .....	69
2.6.3. Proračun optimalnih tehnoloških parametara hidrostatičkog istiskivanja .....	71
2.6.4. Izbor radnog fluida i sredstva za podmazivanje .....	73
2.7. MAŠINE I ALATI ZA HIDROSTATIČKO OBLIKOVANJE .....	76
2.7.1. Uredjaji direktnog dejstva .....	76
2.7.2. Uredjaji sa posebnim izvorom pritiska .....	80
2.7.3. Uredjaj sa diferencijalnim pritiskom .....	81
2.7.4. Uredjaj za hidromehaničko oblikovanje .....	83
2.7.5. Specijalne hidrostatičke prese .....	84
2.7.6. Elementi alata za hidrostatičku obradu .....	89
2.7.6.1. Kontejner-radni cilindar .....	89
2.7.6.2. Klip i zaptivni elementi .....	94
2.7.6.3. Matrica .....	95
2.8. IZOSTATIČKO SABIJANJE PRAHA .....	98
2.8.1. Uvod .....	98
2.8.2. Hladno izostatičko presovanje .....	100
2.8.2.1. Konstrukcija uređaja .....	100
2.8.2.2. Priprema praha .....	103
2.8.3. Osobine presovanih obradaka .....	104
2.8.4. Toplo izostatičko presovanje .....	105
3. VALJANJE .....	109
3.1. UVOD, OSNOVNE KARAKTERISTIKE, PODELA .....	109
3.2. ANALIZA PROCESA VALJANJA .....	112
3.2.1. Odvijanje procesa, uslov valjanja .....	112
3.2.2. Deformacije i karakteristike zone deformacije .....	114
3.2.3. Kinematika u zoni deformacije .....	117
3.2.4. Naponi u zoni deformacije .....	119
3.2.5. Deformaciona sila .....	125
3.2.6. Obrtni momenat i potrebna snaga .....	127

3.3. VALJANJE RAVNIH PROIZVODA .....	129
3.3.1. Osnovni pojmovi, odvijanje procesa, tačnost, alat i mašine .....	129
3.3.2. Valjaonička postrojenja za valjanje limova i traka .....	140
3.4. VALJANJE PROFILA .....	143
3.5. VALJANJE CEVI .....	146
4. PRIMENA VALJANJA NA IZRADU MAŠINSKIH DELOVA ....	150
4.1. VALJANJE NAVOJA .....	150
4.2. VALJANJE OZUBLJENIH I NAŽLJEBLJENIH ELEMENATA .....	161
4.3. VALJANJE PRSTENASTIH PROFILA .....	168
5. POVRŠINSKO PLASTIČNO DEFORMISANJE (PPD).....	173
5.1. POJAM, DEFINICIJA, RAZVOJ I PRIMENA POVR- ŠINSKOG PLASTIČNOG DEFORMISANJA .....	173
5.2. ANALIZA PROCESA POVRŠINSKOG PLASTIČNOG DEFORMISANJA .....	181
5.2.1. Kontaktna površina i specifični pritisak alata na obradak .....	183
5.2.2. Dubina plastične zone ispod eliptičnog otiska .....	185
5.2.3. Dubina plastične zone ispod pravougaonog otiska .....	190
5.2.4. Deformaciona sila .....	191
5.3. TEHNOLOGIJA VALJANJA POVRŠINA .....	193
6. HLADNO UTISKIVANJE .....	207
6.1. UVOD, DEFINICIJA I OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROCESA .....	207
6.2. ANALIZA PROCESA .....	213
6.2.1. Odvijanje procesa .....	213
6.2.2. Deformaciona sila .....	216
6.3. PROJEKTOVANJE PROCESA .....	222
6.3.1. Materijal za utiskivanje .....	222
6.3.2. Alati za hladno utiskivanje .....	226
6.3.3. Osnovne karakteristike presa za hladno utiskivanje .....	228
6.3.4. Racionalizacija troškova izrade alata primenom hladnog utiskivanja .....	228
7. KOVANJE U KALUPU .....	231
7.1. ANALIZA SILA PRI KRAJU PROCESA NA OSNOVU MEHANIKE TEČENJA METALA .....	231

## IV

7.1.1. Analiza procesa kovanja pomoću modela kontinualne zone deformisanja .....	236
7.1.2. Analiza procesa kovanja pomoću modela diskontinualne zone deformisanja .....	243
7.2. SPECIFIČNI DEFORMACIONI OTPOR PRI KOVANJU .....	247
<b>8. ROTACIONO TISKANJE .....</b>	<b>251</b>
8.1. UVOD, KARAKTERISTIKE I VRSTE ROTACIONOG TISKANJA .....	251
8.1.1. Vrste rotacionog tiskanja .....	253
8.1.1.1. Rotaciono tiskanje bez promene debljine zida .....	253
8.1.1.2. Rotaciono tiskanje sa promenom debljine zida .....	259
8.2. ANALIZA PROCESA ROTACIONOG TISKANJA .....	264
8.2.1. Naponsko-deformaciono stanje obradka .....	264
8.2.1.1. Naponsko-deformaciono stanje pri rotacionom tiskanju bez smanjenja debljine zida .....	264
8.2.1.2. Naponsko-deformaciono stanje pri rotacionom tiskanju sa smanjenjem debljine zida .....	270
8.2.2. Deformaciona sila .....	275
8.2.2.1. Odredjivanje sile kod rotacionog tis- kanja cilindričnih delova bez prome- ne debljine zida .....	275
8.2.2.2. Odredjivanje sile kod istosmernog rotacionog tiskanja sa promenom debljine zida .....	277
8.3. PROJEKTOVANJE PROCESA ROTACIONOG TISKANJA .....	278
8.3.1. Pripremak .....	278
8.3.1.1. Oblik, dimenzije i način dobijanja....	278
8.3.1.2. Materijali .....	281
8.3.2. Obradak .....	282
8.3.2.1. Oblik, dimenzije i oblasti primene .....	282
8.3.2.2. Tačnost i kvalitet obrade .....	283
8.3.2.3. Mehaničke osobine .....	284
8.3.3. Brzina kretanja .....	285
8.3.4. Broj faza (prolaza) .....	286
8.3.5. Temperatura obrade i podmazivanje .....	290
8.3.6. Alati i mašine .....	290

<b>9. PROFILNO SAVIJANJE POMOĆU VALJAKA .....</b>	<b>295</b>
9.1. UVOD .....	295
9.2. ZONA DEFORMACIJE, ANALIZA OPTEREĆENJA i OBRTNIH MOMENATA VALJAKA .....	299
9.2.1. Definisanje zone deformacije .....	299
9.2.2. Distribucija kontaktnog opterećenja valjaka ....	301
9.2.3. Proračun ukupnog opterećenja valjaka .....	304
9.3. TEHNOLOGIJA PROFILNOG SAVIJANJA POMOĆU VALJAKA .....	307
9.3.1. Analiza tehnološkičnosti konstrukcije profila .....	307
9.3.2. Izbor polufabrikata za izradu profila .....	310
9.3.3. Tehnološke šeme profilisanja .....	310
9.3.4. Položaj profila u valjcima .....	313
9.3.5. Proračun širine priprema .....	314
9.3.6. Izbor režima profilisanja .....	315
9.3.7. Konstrukcija valjaka .....	319
9.4. MAŠINE ZA PROFILISANJE SA VALJCIMA .....	324
<b>10. FINO RAZDVAJANJE PRESOVANJEM .....</b>	<b>330</b>
10.1. UVOD, DEFINICIJA, OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROCESA .....	330
10.2. ANALIZA PROCESA .....	334
10.2.1. Odvijanje procesa .....	334
10.2.2. Naponsko stanje u procesu i konturni zub ..	340
10.2.3. Deformaciona sila .....	341
10.2.4. Deformacioni rad .....	345
10.3. PROJEKTOVANJE PROCESA .....	346
10.3.1. Tehnološkičnost obradka .....	346
10.3.2. Rezni zazor .....	356
10.3.3. Konturni zub .....	357
10.3.4. Materijali za FRP .....	359
10.3.4.1. Čelici .....	360
10.3.4.2. Obojeni materijali .....	364
10.3.5. Alati .....	365
10.3.6. Mašine .....	368
10.3.7. Ekonomski aspekti primene FRP .....	375
<b>LITERATURA .....</b>	<b>377</b>





## 0. PREDGOVOR

Nastavni planovi za školovanje diplomiranih mašinskih inženjera na Univerzitetu u Novom Sadu se primenjuju od šk.1989/90. godine, kompletnije obuhvataju područje tehnologije plastičnosti nego što je bilo u prethodno važećim nastavnim planovima. Ključne promene se odnose na ponovo uvođenje obaveze za sve studente mašinske struke da slušaju osnovni kurs iz **TEHNOLOGIJE PLASTIČNOSTI** i formiranje posebne izborne grupe za područje tehnologije plastičnosti. Prema važećem nastavnom planu područje tehnologije plastičnosti obuhvata predmete prema sledećem:

1. **Tehnologija plastičnosti I (TP1)**, IV sem., 2+2 slušaju svi studenti mašinske struke;
2. **Tehnologija plastičnosti II (TP2)**, VII sem., 3+3 slušaju studenti mašinske struke, usmerenja za obradu oblikovanjem;
3. **Mašine za tehnologiju plastičnosti (TP3)**, VIII, 4+4 slušaju studenti mašinske struke usmerenja za obradu oblikovanjem;
4. **Defornabilnost i optimizacija uslova obrade (TP4)**, VI i VII sem., 2+2, 2+2, slušaju studenti izborne grupe za tehnologiju plastičnosti;
5. **Alati za tehnologiju plastičnosti (TP5)**, VIII i IX sem., 2+2, 2+1, slušaju studenti izborne grupe za tehnologiju plastičnosti i
6. **Tehnološki sistemi u tehnologiji plastičnosti (TP6)**, IX sem., 4+3, slušaju studenti usmerenja za tehnologiju plastičnosti.

Pored navedenog Laboratorija za tehnologiju plastičnosti Univerziteta u Novom Sadu ima permanentno organizovane poslediplomske studije iz Tehnologije plastičnosti na kojima se dalje produbljuje izučavanje obe oblasti.

Tako razvijena nastavna delatnost iz područja tehnologije plastičnosti uslovljava pojačanu izdavačku aktivnost za ovo područje. Pored strane literature, koje ima u dovoljnoj meri, na Fakultetu postoji knjiga Tehnologija plastičnosti u mašinstvu I od Prof.V.Vujovića, kojom se

obuhvata program nastave za predmet TP1 - osnovni kurs. Ova knjiga sadrži i deo materije za predmet TP2. Monografija "Deformabilnost" od Prof. V. Vujovića, čije je izdavanje u toku, sadrži značajan deo materije predmeta TP4.

Sadržaj ove knjige autori su usmerili na obuhvatanje materije predviđene po programu predmeta Tehnologija plastičnosti II, koja nije obuhvaćena knjigom TP1. Osim toga ova knjiga sadrži i neka poglavlja koja nisu obuhvaćena programom predmeta TP2, ali su ili obuhvaćena drugim predmetima ove oblasti, ili predstavljaju potrebu inženjerske prakse. Knjiga "Tehnologija plastičnosti u mašinstvu II" predstavlja direktan nastavak knjige "Tehnologija plastičnosti u mašinstvu I". Ona u suštini predstavlja nastavak izučavanja Metoda tehnologije plastičnosti (tehnološke metode obrade deformisanjem) koje je započeto u prvoj knjizi. Zbog toga se u ovoj knjizi pojavljuju neke nekompletno obradjene metode, odnosno prezentira se samo deo materije, koji nedostaje u prvoj knjizi. To je slučaj sa kovanjem u kalupu, koje se u celini prezentira u prvoj knjizi, a u ovoj se daje samo dopuna analize procesa kovanja. Sličan slučaj je sa savijanjem, koje se takodje prezentira u prvoj knjizi, a u ovoj se dodaje deo koji se odnosi na profilno savijanje rotacionim alatima. U oblasti obrade razdvojnim deformisanjem, koje je takodje prezentirano i u prvoj knjizi, ovde se kompletno izlaže problematika Finog razdvajanja presovanjem, koja je u prvoj knjizi samo napomenuta. Iz navedenog proizlazi da je ova knjiga po svom sadržaju nastavak prve knjige, isto kao što je nastavni program predmeta TP2, nastavak programa izučavanog u okviru predmeta TP1.

Ova knjiga je kao što se vidi delo tri autora koji su obradili delove knjige prema sledećem:

- Prof. V. Vujović: Predgovor, Uvod, Površinsko plastično deformisanje i dodatak u vezi analize procesa kovanja u kalpu;
- Prof. M. Plančak: Valjanje, Hladno utiskivanje gravura, Rotaciono tiskanje i Fino razdvajanje presovanjem;
- Doc. D. Vilović: Hidrostatsičko oblikovanje i Profilno savijanje rotacionim alatima.

Autori su se trudili da u prezentaciji materije omoguće studentima što uspešnije savladjivanje nastavnog programa kako putem predava-

nja tako i putem laboratorijskih vežbi, izrade projekata i diplomskih radova. Osim izloženog, materija je tako sistematizovana da su metode izlagane putem strukture koja se može grupisati u tri dela: prvi deo čini osnovne pojmove, definicije, karakteristike, razvoj i primenu; drugi deo obuhvata analizu procesa, dakle, prezentaciju njegove teorije i treći deo projektovanje tehnologije u kome se prezentira niz priručnih informacija i podataka, koji mogu biti od značajne koristi za inženjersku praksu. Dakle, knjiga je namenjena kako za studente tako i za inženjersku primenu.

Autori se zahvaljuju ing. Provči Vladimiru na pomoći prilikom tehničke obrade ove knjige.

## 1. UVODNE OSNOVE

Tehnologija plastičnosti obuhvata veoma široko i u primeni razgranato područje tehnologije prerade metalnih materijala. Smatra se da se 80% svih metalnih materijala preradjuje nekom od metoda tehnologije plastičnosti. S obzirom na ovu činjenicu postoji više osnova za klasifikaciju, odnosno, podelu ovog područja. Ta klasifikacija je moguća s obzirom na naponsko stanje i prostiranje zone deformisanja. Ovo bi bila osnovna podela tehnologije plastičnosti. Zatim prema temperaturi obrade, brzini deformacije, zahvatu alata i prema nameni izradjenih delova - obradaka /sl.1.1./.

### 1.1. KLASIFIKACIJA TEHNOLOGIJE PLASTIČNOSTI

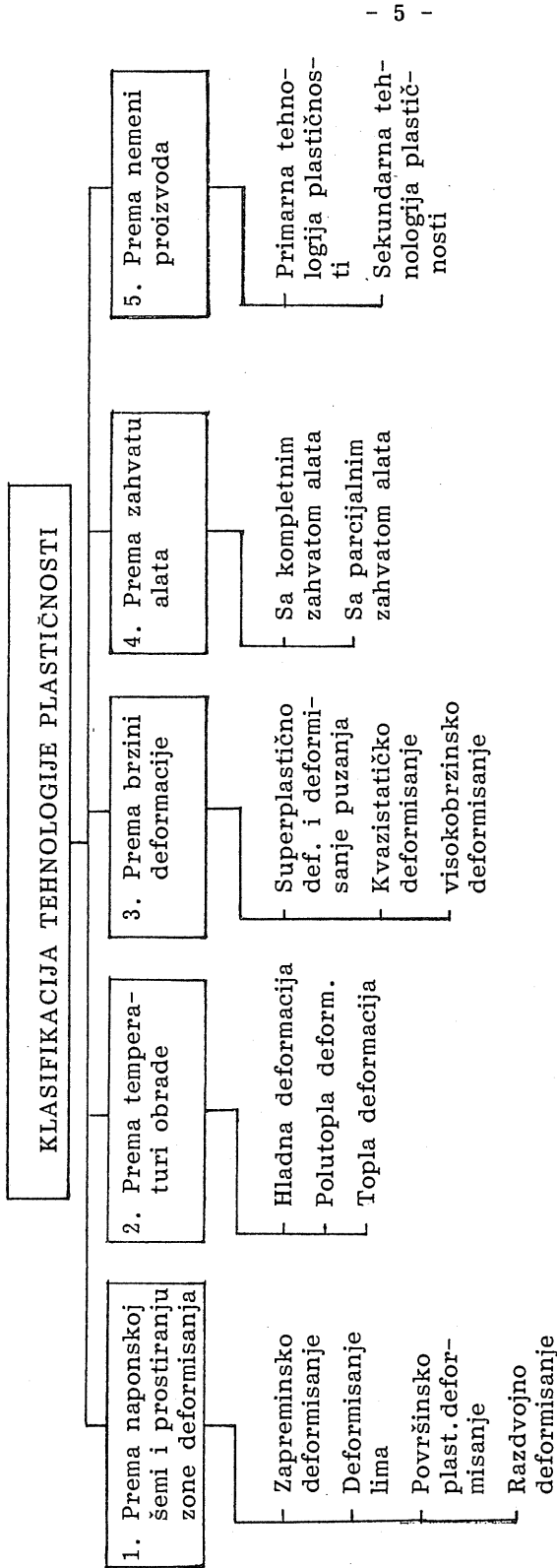
1. Prema naponskom stanju i prostiranju zone deformisanja moguće je:

- Zapreminsko deformisanje
- Deformisanje lima
- Površinsko plastično deformisanje i
- Razdvojno deformisanje

Naponska šema u plastičnoj zoni i prostiranje zone deformisanja u značajnoj meri odredjuju prirodu (vrstu) plastičnog deformisanja.

Zapreminsko deformisanje se karakteriše trodimenzionalnom naponskom šemom, pri čemu se najčešće koriste pritisne i raznosmerne šeme napona. Deformisanje lima se karakteriše dvoosnim naponskim stanjem uz pretežno korišćenje zateznih i raznosmernih naponskih šema. Svaka od navedenih oblasti obuhvata niz posebnih tehnoloških metoda zbog veoma široke razvijenosti u primeni.

Površinsko plastično deformisanje (PPD) se u novije vreme značajnije razvija u primeni i vezano je za povišene zahteve u odnosu na nosivost, trajnost i tačnost mašina i uređaja. To je područje finalne (završne) obrade metalnih delova. Karakteriše se time da se plastično deformiše samo sloj metala u neposrednoj blizini površine. Plastično deformisanje metalnog sloja u blizini površine omogućava menjanje strukture



Sl.1.1.1. Klasifikacija tehnologije plastičnosti

tog sloja, koja ima za posledicu promenu mehaničkih karakteristika obratka. Povećava se jačina i tvrdoća, smanjuje se hrapavost površine i menja se karakter hrapavosti i omogućava postizanje vrlo visokog stepena tačnosti. Primenuju se dve metode PPD: Valjanje površina i sačmarenje površina - bombardovanje površina (lima) kuglicama.

Razdvojno deformisanje ima za cilj delenje zapremine priprema na više elemenata i na taj način dobijanje željenog oblika i zapremine.

Razdvojno deformisanje omogućavaju smičući naponi u ravni razdvajanja. U ovom području se razlikuju dve oblasti, dva mehanizma razdvajanja u zavisnosti od dejstva alata i ponašanja materijala. Prvu oblast čini nekontrolisano razdvajanje ili kako se često naziva razdvajanje lomljenjem. To je slučaj kada prslina u materijalu "beži" ispred neposrednog dejstva alata, zbog čega ona u izvesnoj meri "luta" ostavljajući grubu površinu razdvajanja i nizak stepen tačnosti obrade. Drugu oblast čini kontrolisano razdvajanje pri kome naponsko stanje, uslovljeno obradnim sistemom, nedozvoljava "bežanje" prsline ispred vrha oštrice alata, već se razdvajanje vrši pod neposrednim dejstvom alata. Kao rezultat ovakvog mehanizma deformisanja dobija se fina razdvojena površina i visok stepen tačnosti obrade (fino razdvajanje presovanjem).

2. Prema temperaturi obrade moguća je:

- Hladna deformacija
- Polutopla deformacija i
- Topla deformacija

Razvoj primene tehnologije plastičnosti dominira u području hlande deformacije zbog izrazitih tehnološki i ekonomskih prednosti ove tehnologije. Kao što se zna hladna deformacija se odvija u području u kome je temperatura obrade ispod temperature rekristalizacije u koju oblast spada i polutopla deformacija. Hladna deformacija pokriva skoro kompletne oblasti obrade lima, površinskog plastičnog deformisanja i razdvojnog deformisanja, a naglo se širi njena primena i u oblasti zapreminskog deformisanja. Zbog ograničenja koja se nalaze u nedovoljnoj deformabilnosti materijala, teško deformabilni materijali naročito ako su u pitnaju složene geometrijske konfiguracije i velike dimenzije delova, oblikuju se toplom ili polutoplom deformacijom. Topla deformacija se odvija na temperaturi koja je viša od temperature rekristalizacije. Međutim, toplom deformacijom se dobija nizak stepen tačnosti izrade i nizak kvalitet obradjenih

površina, zbog čega se najčešće uslovljava primena dodatnih obrada skidanjem strugotine da bi se dobio željeni kvalitet obrade. To čini toplu obradu ekonomski manje prihvatljivom od hladne i polutople. U savremenom razvoju primene tehnologije plastičnosti pod hladnom deformacijom ipak treba podrazumevati tehnologiju u kojoj nema prethodnog zagrevanja priprema. U cilju korišćenja prednosti koje nudi hladna deformacija i dela prednosti, koje nudi topla deformacija, razvijena je polutopla deformacija. Ova deformacija se odvija na povišenoj temperaturi koja omogućava veće ispoljavanje deformabilnosti materijala, smanjuje deformacioni otpor i olakšava tečenje metala, a s druge strane temperatura nije tako visoka da izaziva intenzivnu oksidaciju površinu i time netačnost izradjenih delova u toj meri kao topla deformacija.

3. Prema brzini deformacije tehnologija plastičnosti se može podeliti na tri područja:

- Superplastično deformisanje i deformisanje puzanjem;
- Kvazistatičko deformisanje i
- Visokobrzinsko deformisanje

Područje brzine deformisanja u tehnologiji plastičnosti je veoma široko. Orijentaciono može se reći da se kreće u oblasti  $\dot{\phi} = 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$  do  $10^5 \text{ sec}^{-1}$ .

Superplastično deformisanje i deformisanje puzanjem su najsporniji procesi oblikovanja. Brzina deformacije u ovoj oblasti se kreće  $\dot{\phi} = 10^{-5}$  do  $10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ . Superplastično deformisanje karakteriše jedno novo područje u odnosu na ponašanje materijala pri plastičnom deformisanju. Reč je o isključenju pojave lokalizacije deformacije pri rastezanju kod metalnih materijala. Ta činjenica omogućava da se i rastezanje uključi u razvoj metoda tehnologije plastičnosti za konkretnu primenu u inženjerskoj praksi. Da bi se materijal superplastično ponašao nužno je ispunjenje tri uslova: određena brzina deformacije, veoma sitnozrna strukturna struktura materijala i određena temperatura (koja je ispod temperature rekristalizacije). Za svaki metalni materijal posebno se određuju tri navedena karakteristična uslova pri kojima će ispoljavati superplastično deformisanje.

Kvazistatičko deformisanje obuhvata područje brzine deformacije  $\dot{\phi} = 10^{-2}$  do  $10^2 \text{ sec}^{-1}$ . To je područje u kome je locirana većina konvencionalnih procesa deformisanja. Tako na primer ispitivanje materijala

na kidalici se vrši pri brzini deformacije  $\dot{\phi}=10^{-2}$  do  $10^{-1} \text{ sec}^{-1}$ , a kovanje na hidrauličnoj presi i duboko izvlačenje pri  $\dot{\phi}=10^{-1}$  do  $10^1 \text{ sec}^{-1}$ , dok se vučenje žice vrši pri brzini  $\dot{\phi}=10^2 \text{ sec}^{-1}$  pa i većoj. U okviru brzina koje važe za kvazistatičko deformisanje, parametri procesa bitno ne zavise od brzine.

Visokobrzinsko deformisanje obuhvata područje sa  $\dot{\phi} > 10^3 \text{ sec}^{-1}$ . U ovoj oblasti se deformisanje ne vrši pod neposrednim dejstvom alata, već pod dejstvom udarnog talasa pritiska. Zbog toga je pri ovom deformisanju ponašanje materijala drugojačije nego kod ostalih metoda obrade deformisanjem. Naime, teško deformabilni materijali se mogu oblikovati primenom visokobrzinskog deformisanja. U zavisnosti od načina stvaranja i prostiranja udarnog talasa VBO može biti: Eksplozivno, pneumatsko mehaničko, elektrohidraulično i elektromagnetno.

4. Prema zahvatu alata moguće je deformisanje:

- sa kompletnim zahvatom alata i
- sa parcijalnim zahvatom alata.

Klasična tehnologija plastičnosti razvijala je pretežno metode oblikovanja sa kompletnim zahvatom alata. Kod tih metoda alat je po obliku i dimenzijama potpuno vezan za proizvodnju samo jednog jedinog dela, dakle, u pitanju je strogo SPECIJALNI alat. Obzirom na cenu alata, nije bila moguća primena tehnologije plastičnosti sa kompletnim alatom na područje maloserijske i pojedinačne proizvodnje. To je osnovni razlog za vrlo intenzivan razvoj TP sa parcijalnim zahvatom alata na sva četiri osnovna područja (zapreminsko deformisanje, oblikovanje lima, PPD i razdvojno deformisanje), koje se karakteriše relativnom nezavisnošću oblika alata od oblika dela, isti alat se koristi za obradu delova raznih oblika i dimenzija, dakle, koriste se UNIVERZALNI alati. To je omogućilo razvoj primene tehnologije plastičnosti i u uslovima maloserijske i pojedinačne proizvodnje. Ova tehnologija je po ugledu na obradu rezanjem veoma pogodovala primeni savremene računarske tehnike u ovoj oblasti.

5. Prema nameni proizvoda (obradaka) moguće je tehnologiju plastičnosti podeliti u dve oblasti:

- primarna TP i
- sekundarna TP

U području primarne tehnologije plastičnosti proizvode se poluproizvodi kao što su limovi, profili, gređice i drugi šipkasti materijal, cevi, žica



i dr. Namena ovih proizvoda je da se koriste za dalju preradu, da bi se dobili mašinski delovi. Kao što je poznato primarna tehnologija plastičnosti se realizuje u tzv. metalurškim pogonima - čeličanama, u kojima je pretežno zastupljena topla deformacija.

Sekundarna tehnologija plastičnosti obuhvata mnoštvo tehnoloških metoda čiji je cilj obrade dobijanje metalnih delova iz različitih metalnih materijala, najraznovrsnijih oblika, dimenzija, stepena tačnosti i kvaliteta obradjenih površina.

## 1.2. TEHNOLOŠKE METODE U TEHNOLOGIJI PLASTIČNOSTI

Već je rečeno da postoji mnoštvo tehnoloških metoda koje se primenjuju u tehnologiji plastičnosti. Opravdano je postaviti pitanje na koji način je moguće definisati tehnološku metodu u ovoj oblasti. Suptilnijim razmišljanjem o suštini problematike u ovoj oblasti, moguće je postaviti tri osnovna kriterijuma koji okvirno odredjuju jednu tehnološku metodu. Ti kriterijumi su sledeći:

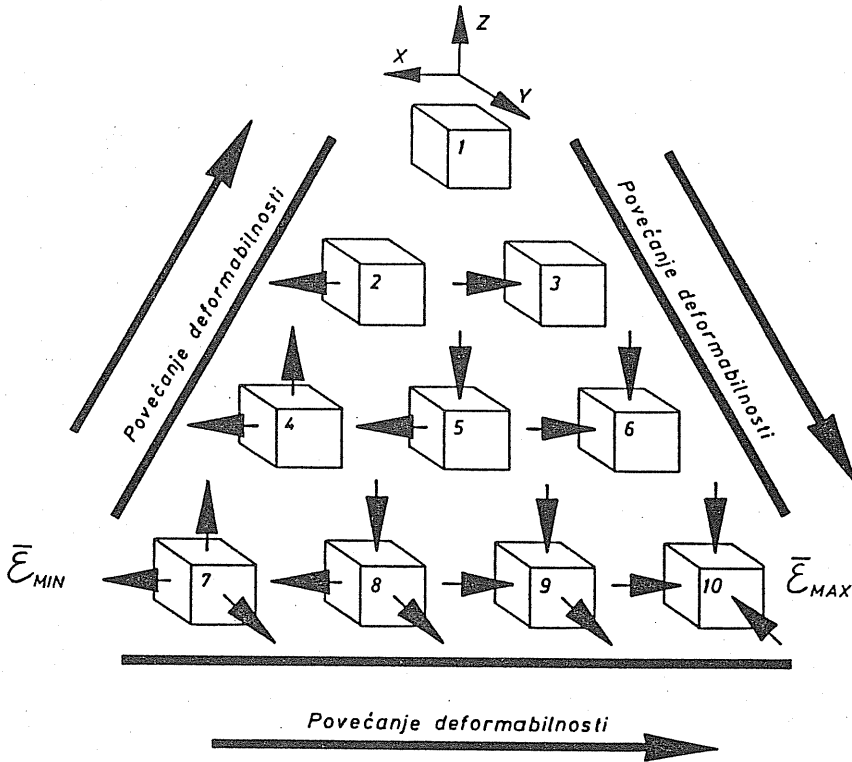
- Naponska šema, koja prevladjuje u zoni deformisanja;
- Karakteristike alata pomoću koga se izvodi proces deformisanja i
- Karakteristike mašine, koja služi za realizaciju procesa.

Istu tehnološku metodu čine oni procesi koji se odlikuju istim karakteristikama prema sva tri navedena kriterijuma. Drugim rečima dovoljna je bitna razlika samo po jednom od navedenih kriterijuma da bi bila formulisana nova tehnološka metoda.

### 1.2.1. Naponska šema

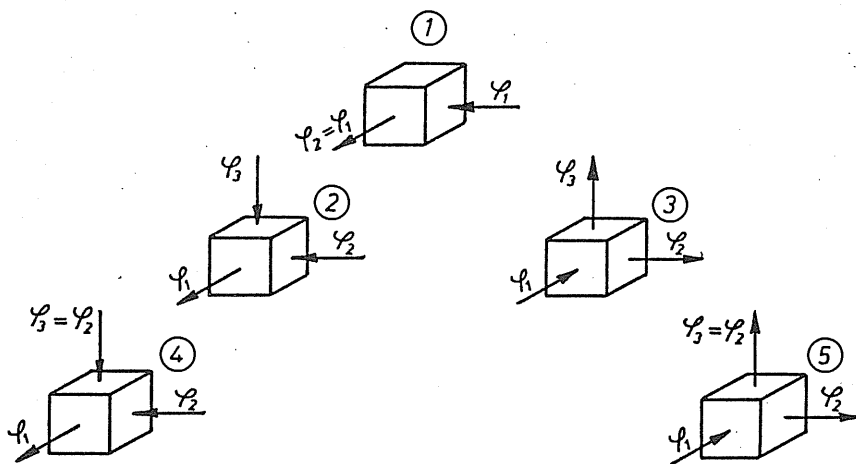
Za formulisanje mogućih naponskih šema koriste se samo glavne naponske komponente, odnosno,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  i  $\sigma_3$ . Vodi se računa o mogućim kombinacijama smerova normalnih naponskih komponentata. Moguće kombinacije normalnih naponskih komponentata, odnosno, moguće naponske šeme prikazane su na sl.1.2. prema /50/. Sa ove šeme je vidljivo da su moguće dve kombinacije sa jednom naponskom komponentom (aksijalno naponsko stanje). Te kombinacije su rastezanje i sabijanje. Sa dve naponske komponente (dvoosno naponsko stanje) moguće su tri kombinacije: Dvoosno rastezanje, dvoosni pritisak i raznosmerna naponska šema, koja u ovom slučaju predstavlja smicanje. Sa tri naponske

komponente (troosno naponsko stanje) moguće su četiri kombinacije: troosno rastezanje, troosni pritisak i dve raznosmerne naponske šeme (dva rastezanja sa jednim pritiskom i dva pritiska sa jednim rastezanjem). Na taj način je ostvareno devet mogućih naponskih šema od kojih su tri naponske šeme zatezne (prisutne su samo zatezne komponente šeme 2, 4 i 7), tri naponske šeme su pritiskne (prisutne su samo pritiskne naponske komponente - šeme 3, 6 i 10) i tri raznosmerne naponske šeme (5, 8, 9). Mogućnost ispoljavanja potencijala deformabilnosti raste u smeru naznačenih strelica, odnosno, porast je srazmeran povećanju pritiskne hidrostatičke komponente naponskog sistema.



Sl.1.2. Naponske šeme

Pravi uticaj naponskih šema na formulisanje tehnoloških metoda u tehnologiji plastičnosti moguće je sagledati ako se kombinuju navedene naponske šeme sa mogućim šemama deformacija. Moguće deformacione šeme prikazane su na sl.1.3. U suštini moguće su tri različite šeme deformacija: smicanje 1, rastezanje 2 i sabijanje 3 i dva specijalna slučaja: aksijalno simetrično rastezanje 4 i aksijalno simetrično sabijanje 5.

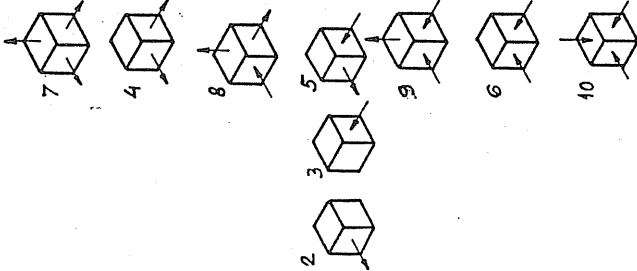


Sl.1.3. Moguće šeme deformacija

Kombinacijom naponskih šema (sl.1.2.) sa deformacionim šemama (sl.1.3.) dobija se mogući broj naponsko deformacionih šema koje mogu generisati odgovarajuće tehnološke metode. Moguće naponskodeformacione šeme prikazane su na sl.1.4.

Na ovoj slici sa strane tabelarnog dela, prikazane su naponske šeme sa sl.1.2. rasporedjene po vrstama tabelarnog dela prikaza. Zastupljive tabelarnog dela sadrži razvijeni oblik šema komponenata deformacija sa sl.1.3. Jasno je da su u ovim prikazima deformacije koje povećavaju dimenzije prikazane kao pozitivne, a deformacije koje smanjuju dimenzije kao negativne. Adekvatno tome zatezni naponi su pozitivni, a pritisni negativni. U tabeli na sl.1.4. pozitivne komponente su iznad nulte linije a negativne ispod ove linije. Dok sl.1.2. prikazuje devet

NAZIV NAPONSK. STANJA	KOMPONENTE DEFORMACIJA				
	AX.SIH. RASTEZ.	RASTEZANJE	SMICANJE	SABIJANJE	AX.SIH. SABIJANJE
	NAPONSKE KOMPONENTE				
	1	2	3	4	5
1 ZAPREMINSKO POZITIVNO					
2 RAVNO POZITIVNO	—				
3 ZAPREMINSKO RAZNOSEMNO (DVA POZITIVNA)	—				
4 RAVNO RAZNOSEMNO (AKSIJALNO)					
5 ZAPREMINSKO RAZNOSEMNO (DVA NEGATIVNA)					
6 RAVNO NEGATIVNO					
7 ZAPREMINSKO NEGATIVNO					



Sl. 1.4. Kombinacija naponskih i deformacionih komponenata

moćući kombinacija naponskih komponenata i sl.1.3. pet kombinacija deformacionih komponenata, pri čemu se uzima u obzir samo broj prisutnih komponenata i njihov smer dejstva, ne uzimaju se u obzir moguće kombinacije različitih intenziteta komponenata, na sl.1.4. uzimaju se u obzir donekle i različiti intenziteti komponenata. U tabeli na sl.1.4. prikazano je 35 polja, od kojih su četiri polja prazna - nemoguće kombinacije naponskih i deformacionih komponenata. Ako se ima u vidu razlaganje tenzora napona na devijatorski deo i na sferni tenzor, koji predstavlja hidrostatičku komponentu naponskog sistema, onda se prezentirane (razvijene) šeme naponskih komponenata u poljima od prvog do 35-tog, mogu posmatrati kao niz različitih naponskih šema u kojem neprekidno opada hidrostatička komponenta naponskog sistema. Polazi se od troosnog rastezanja da bi se završilo sa troosnim pritiskom. U istom smeru raste mogućnost ispoljavanja deformabilnosti materijala. Polja označena znakom plus predstavljaju pozitivne vrednosti sfernog tenzora, polja označena znakom minus predstavljaju negativne vrednosti sfernog tenzora a polja označena nulom, koja su i posebno uokvirena, predstavljaju čisto devijatorska naponska stanja. Na osnovu prikaza na sl.1.4. može se zaključiti da je moguće formirati 31 naponsku šemu, trideset jednu kombinaciju normalnih naponskih i deformacionih komponenata. Istina, u ovom slučaju su uzeti u obzir broj komponenata, kombinacije njihovih smerova i donekle odnosi njihovih intenziteta. To znači da samo prvi kriterijum - naponska šema može da generiše preko tirdeset različitih tehnoloških metoda.

### 1.2.2. Alati

Formulacija metode tehnologije plastičnosti zavisi značajno i od alata pomoću koga se izvodi proces plastičnog deformisanja. To znači da je moguće formulisanje posebnih tehnoloških metoda samo u zavisnosti od alata pri korišćenju istih naponskih šema i približno istih mašina. Za ilustraciju navedenog ima više primera. U skoro svim osnovnim oblastima tehnologije plastičnosti (zapreminsko deformisanje, deformisanje lima i dr.) postoje posebno formulisane tehnološke metode samo zbog toga što je u pitanju primena PARCIJALNOG ZAHVATA ALATA. Najčešće se sa primenom parcijalnog zahvata alata koristi i posebna mašina, prilagodjena takvom načinu obrade. Uglavnom alat utiče na formulisanje posebnih tehnoloških metoda načinom dejstva, oblikom i dimenzio-

nalnim karakteristikama. Primeri za ovu tvrdnju vrlo su ilustrativni u oblasti obrade razdvojnim deformisanjem. Ako je linija razdvajanja prava, onda je u pitanju odsecanje i korišćenje univerzalnog alata. Krivolinijsko razdvajanje uslovljava primenu specijalnih alata i kao što se zna primena metoda RAZDVAJANJE PRESOVANJEM. Razdvajanje sa parcijalnim zahvatom alata odredjuje metodu RAZDVAJANJE SECKANJEM. Fino razdvajanje presovanjem uslovljava posebne alate kao i razdvajanje lomljenjem. Ima niz primera i u području dubokog izvlačenja, gde naročito ima uticaja veličina obratka. Delovi sasvim malih dimenzija izradjuju se metodom DUBOKOG IZVLAČENJA NEPOSREDNO IZ TRAKE, gde alat ima odlučujući značaj, izrada delova srednje veličine vrši se primenom metode DUBOKOG IZVLAČENJA iz prethodno pripremljenog priprema, dok za izradu delova velikih dimenzija postoje posebni zahtevi u odnosu na konstrukciju alata. U zavisnosti od alata razvijena je i metoda hidromehaničkog dubokog izvlačenja. Slična situacija je i u oblasti savijanja. Alatom se odredjuje da li će biti savijanje na univerzalnoj presi, specijalnoj presi ili će biti kružno savijanje, odnosno profilno savijanje rotacionim alatima. Iz navedenih ilustracija se može zaključiti da alati načinom dejstva (kompletni ili parcijalni zahvat), oblikom i dimenzijama mogu značajno uticati na formulisanje posebnih tehnoloških metoda u tehnologiji plastičnosti.

### 1.2.3. Mašine

Treći odlučujući faktor za formulisanje tehnološke metode čini mašina. Mašine kao što se zna mogu biti univerzalne namene ili pak specijalne namene. Zatim mašine mogu biti različitog stepena automatiziranosti. Mašine se značajno razlikuju i prema tome da li je u pitanju primena alata sa kompletnim ili sa parcijalnim zahvatom. Izlazni parametri mašine takodje utiču na formulisanje tehnološke metode. Tako npr. različita su dejstva prese sa 0,1 MN jačine u odnosu na presu 1,0 MN, odnosno 10 MN jačine. Vrlo često za nove metode razvija se i nova konstrukcija mašine, kao npr. za visokobrzinsku obradu deformisanjem. U obradi razdvojnim deformisanjem za realizaciju metode razdvajanja odsecanjem koriste se MAKAZE različitih konstrukcija, za razdvajanje presovanjem, prese različitih konstrukcija, a za razdvajanje seckanjem posebne mašine. Mašinom se doziraju potrebni parametri procesu, pa se tehnološke metode razlikuju i u funkciji brzine deformacije, koja se u procesu realizuje. Prema izloženom može se zaključiti da mašina omogućava

realizaciju određene tehnološke metode, ali u određenim slučajevima odlučujuće utiče na formulisanje posebne tehnološke metode u tehnologiji plastičnosti.

#### 1.2.4. Popis važnijih metoda tehnologije plastičnosti

Tehnološke metode u tehnologiji plastičnosti u skladu sa ranije izloženom klasifikacijom mogu se grupisati po oblastima:

1. Zapreminsko deformisanje
  - 1.1. Slobodno sabijanje
  - 1.2. Sabijanje u kalupu
  - 1.3. Slobodno ubadanje
  - 1.4. Ubadanje u kalupu
  - 1.5. Oblikovanje konusno-konvergentnim alatom
  - 1.6. Vučenje: vučenje žice, vučenje cevi, vučenje šipkastog materijala
  - 1.7. Istiskivanje: istosmerno, suprotnosmerno, radijalno, kombinovano, istiskivanje punih preseka, istiskivanje šupljih profila
  - 1.8. Kovanje: kovanje u kalupu, slobodno kovanje
  - 1.9. Valjanje: valjanje limova, valjanje navoja, valjanje ozubljenja
  - 1.10. Rotaciono i radijalno kovanje
  - 1.11. Utiskivanje gravura u alate
2. Oblikovanje lima
  - 2.1. Duboko izvlačenje: bez promene debljine materijala, sa promenom debljine materijala, hidromehaničko duboko izvlačenje, duboko izvlačenje pomoću gume
  - 2.2. Savijanje: na univerzalnim presama pomoću specijalnih alata, profilno savijanje (abkant prese), kružno savijanje, uzdužno profilisanje savijanjem pomoću rotacionih alata, savijanje na specijalnim automatskim mašinama sa više delnim alatima za izradu metalne galanterije.
  - 2.3. Rotaciono tiskanje: bez promene debljine materijala sa promenom debljine materijala. U pitanju je primena alata sa parcijalnim zahvatom.
  - 2.4. Oblikovanje nemetalnim alatima.

3. Površinsko plastično deformisanje
  - 3.1. Valjanje površina (unitrašnjih, spoljnih, ravnih, profilisanih): fino valjanje (radi smanjenja hrapavosti), ojačavajuće valjanje (radi povećanja nosivosti i trajnosti) i tačno valjanje (radi ostvarenja propisanih tolerancija)
  - 3.2. Sačmarenje površina
4. Razdvojno deformisanje
  - 4.1. Razdvajanje lomljenjem
  - 4.2. Razdvajanje odsecanjem: sa pravim paralelnim noževima, sa pravim nagnutim noževima i sa kružnim noževima
  - 4.3. Razdvajanje presovanjem
  - 4.4. Razdvajanje seckanjem
  - 4.5. Fino razdvajanje presovanjem
  - 4.6. Fino razdvajanje odsecanjem
5. Posebna tehnološka područja u tehnologiji plastičnosti
  - 5.1. Superplastično deformisanje
  - 5.2. Deformisanje puzanjem
  - 5.3. Visokobrzinsko deformisanje: eksplozivno, pneumatsko mehaničko, elektrohidraulično, elektromagnetsko
  - 5.4. Hidrostatičko deformisanje
  - 5.5. Deformisanje u polju ultrazvuka.

Iz navedenih metoda vidljivo je da je u pitanju mnoštvo mogućnosti za oblikovanje metalnih elemenata. Ako se ima u vidu da je moguća hladna, polutopla i topla deformacija i zatim da je moguća primena na različite metalne materijale, koji takodje unose svoje specifičnosti, onda se može steći kompletan utisak o razudjenosti primene metoda tehnologije plastičnosti u preradi metalnih materijala.

Deo tehnoloških metoda se izučava u prvoj knjizi: slobodno sabijanje, sabijanje u kalupu, slobodno ubadanje, ubadanje u kalupu, oblikovanje konusno-konvergentnim alatom, vučenje, istiskivanje, duboko izvlačenje, savijanje (nekompletno) i kovanje (nekompletno). U ovoj drugoj knjizi izučava se: hidrostatičko oblikovanje, valjanje, utiskivanje gravura, površinsko plastično deformisanje, rotaciono tiskanje, uzdužno profilisanje savijanjem pomoću rotacionih alata i fino razdvajanje presovanjem. Na ovaj način se donekle kompletira izučavanje tehnoloških



metoda u tehnologiji plastičnosti. Kompletiranje ove materije ima poseban značaj za nastavak izučavanja problematike alata za tehnologiju plastičnosti i mašina primenjenih u ovoj oblasti, koje su vrlo raznovrsne.

## 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 deformaicje. 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.

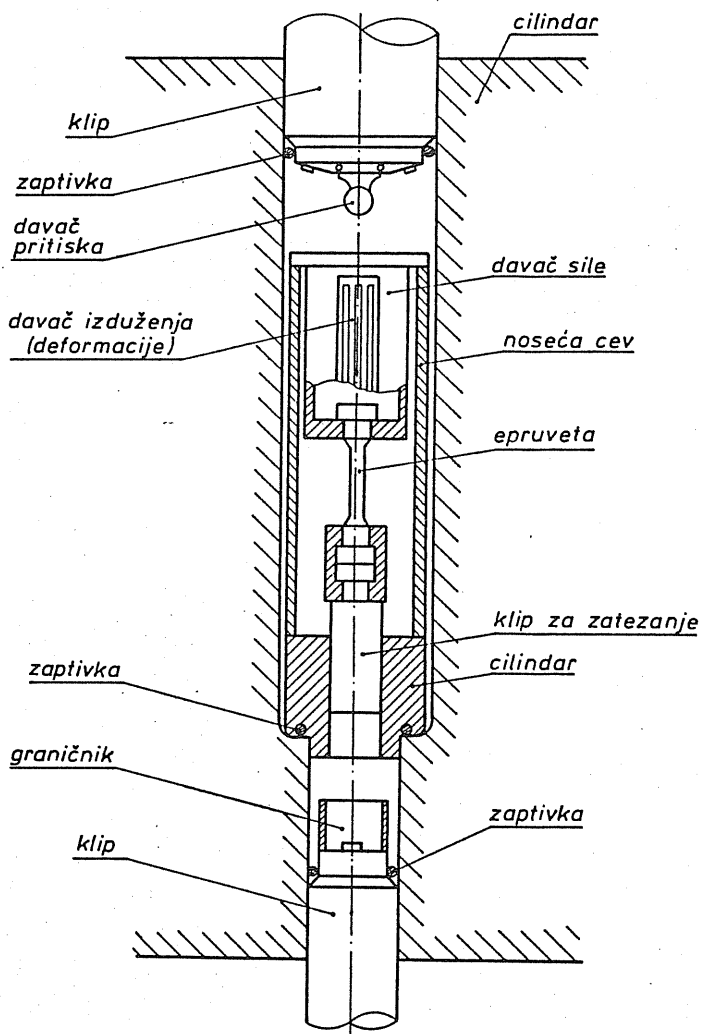
## 2.2. MEHANIČKE OSOBINE I PONAŠANJE MATERIJALA U HIDROSTATIČKIM USLOVIMA

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

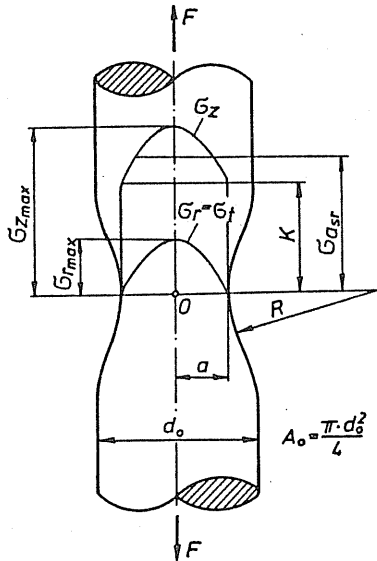


Sl.2.1. Uredjaj za ispitivanje na zatezanje u hidrostatičkim uslovima /20/

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 ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$  i  $\sigma_z$ ) 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.

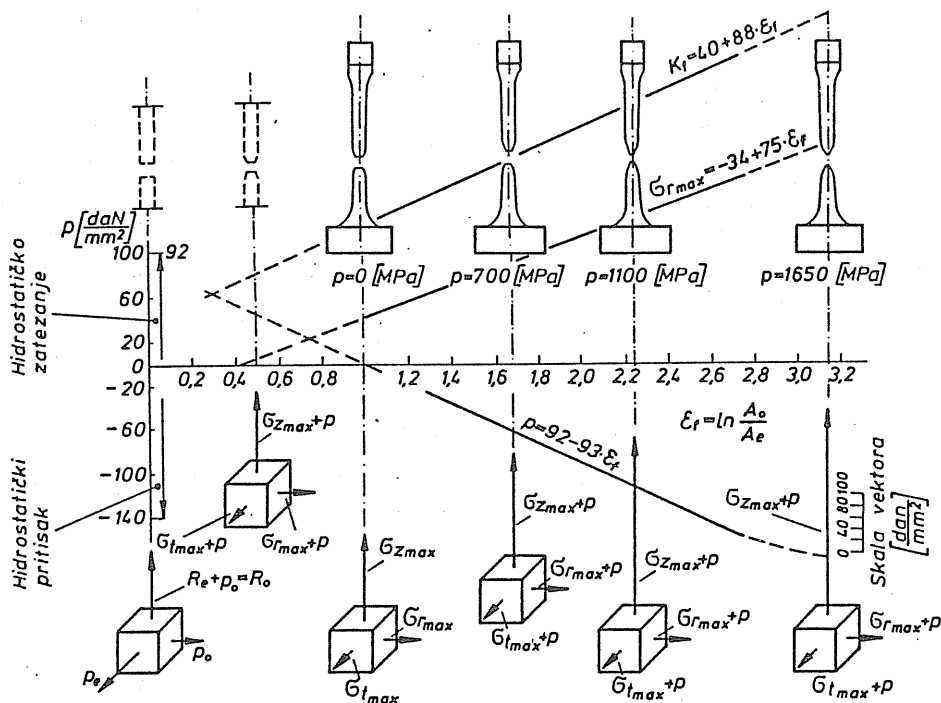
Prisustvo hidrostatičkog pritiska u zoni deformacije značajno menja naponsko stanje. Komponente napona na osi epruvete ( $r=0$ ) mogu se odrediti prema izrazima:

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

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 ( $\sigma_r$ ) 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.

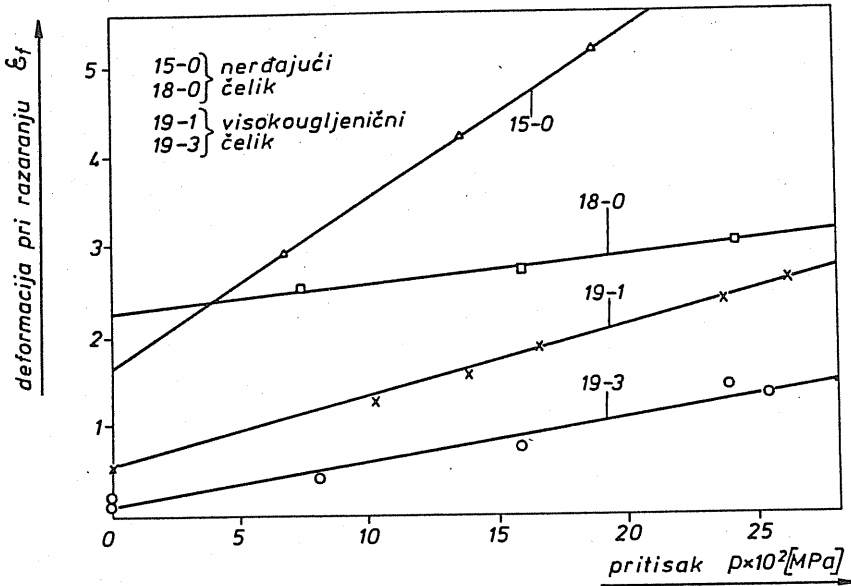


Sl.2.3. Naponsko stanje u centru lokalizacije deformacija /20/

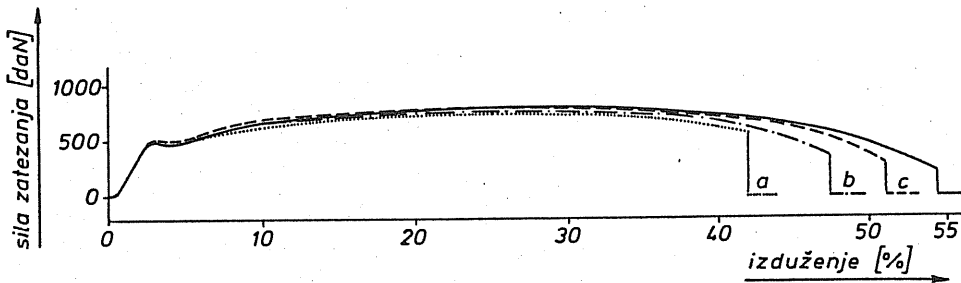
Što se tiče uticaja hidrostatsičkog pritiska na ostale karakteristike pri ispitivanju zatezanjem većina rezultata je takva da se određeni zaključci mogu izvući iako nema baš potpune saglasnosti medju njima.

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

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

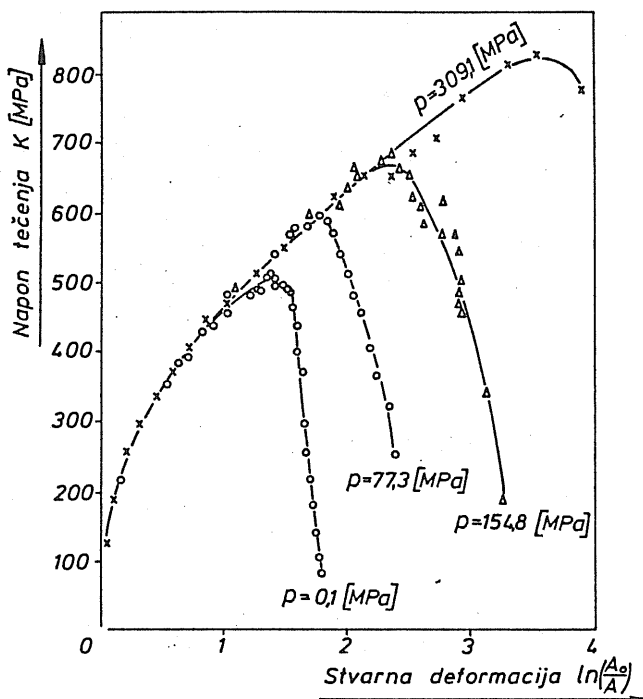


Sl.2.4. Promena deformacije pri prekidu epruvete u zavisnosti od hidrostatičkog pritiska /19/



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



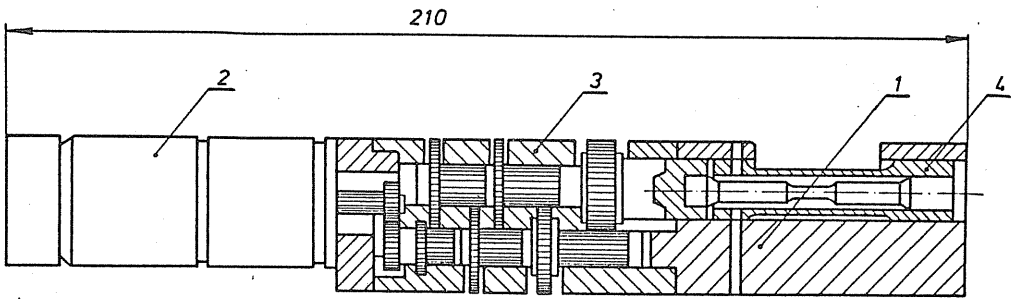


Sl.2.6. Uticaj hidrostatičkog pritiska na krivu tečenja /19/

### 2.2.2. Ispitivanje na uvijanje i smicanje

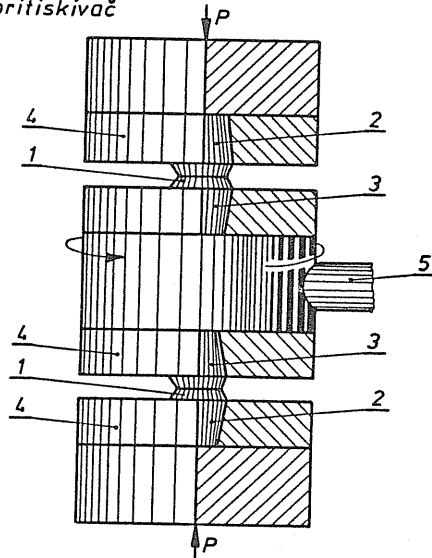
Na sl.2.7. je prikazan Pughov /20/ uređjaj za ispitivanje uvijanjem u polju hidrostatičkog pritiska (do 1.000 MPa). Uređjaj se sastoji od kućišta (1), pogonskog uređjaja sa servomotorom (2) i zupčastim prenosnikom (3) i dinamometra za merenje obrtnog momenta (4). Pogonski uređjaj sa zupčastim reduktorom omogućuje da se glavno vreteno obrće sa malom ugaonom brzinom pri ispitivanju (0,06 rad/min). Kompletan uređjaj 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.).



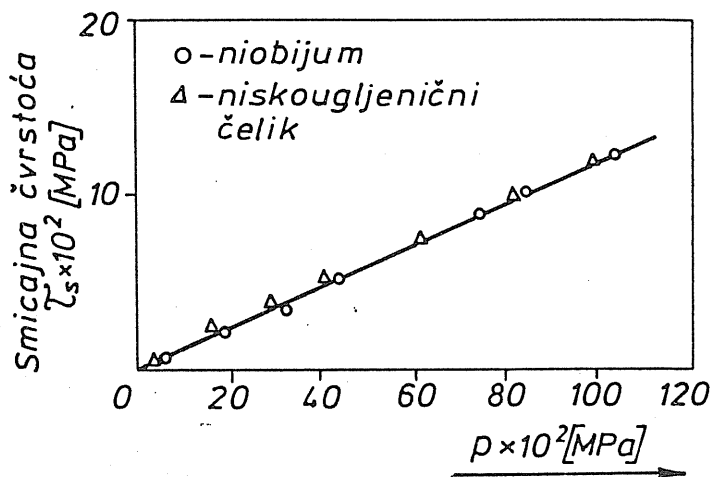
Sl.2.7. Uredjaj za ispitivanje na uvijanje

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



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

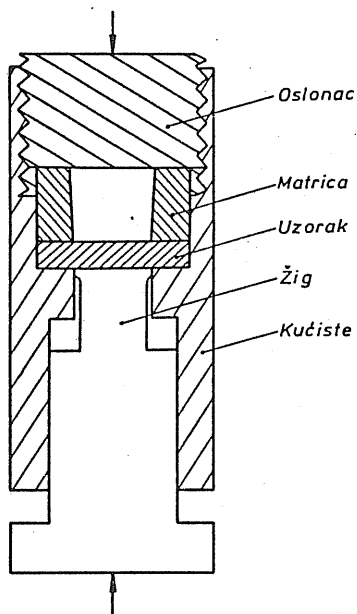
Ispitivanja se izvode na uzorcima male debljine ( $0,03 \pm 0,3$  mm) prečnika 3 do 5 mm. Povećanje pritiska u uzorku ostvaruje se snažnim aksijalnim opterećenjem. Merenjem obrtnog momenta dolazi se do podataka o smicajnoj čvrstoći pri različitim vrednostima pritiska. Na sl.2.9. je data takva jedna zavisnost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



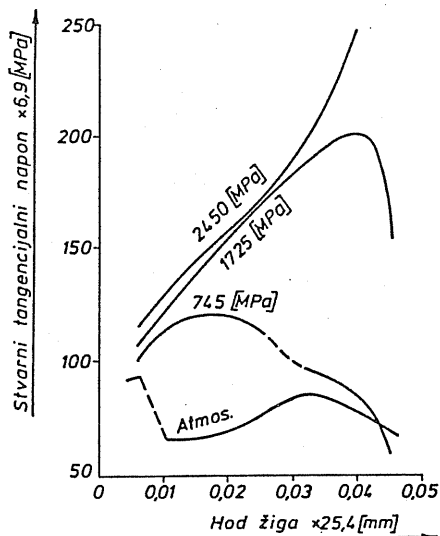
Sl.2.9. Promena smicajne čvrstoće od pritiska

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 vadjanja 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

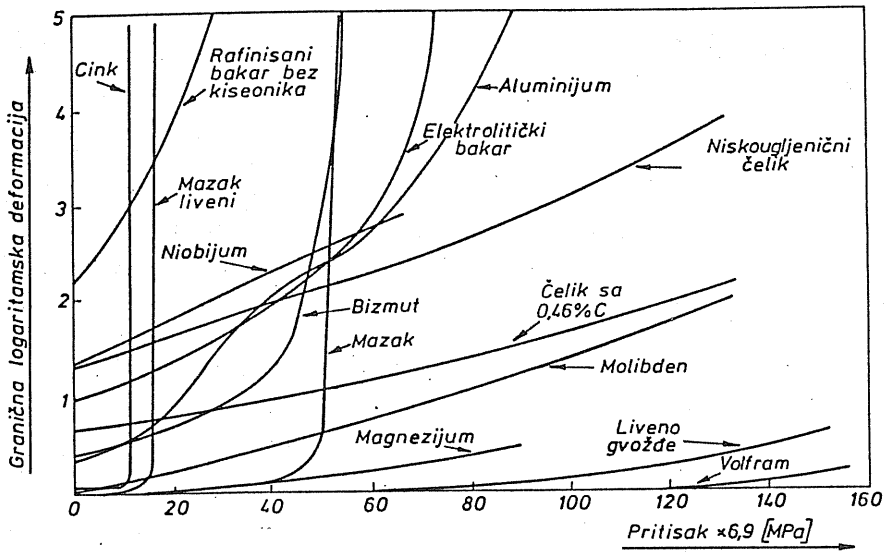
### 2.2.3. Deformabilnost materijala

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/.

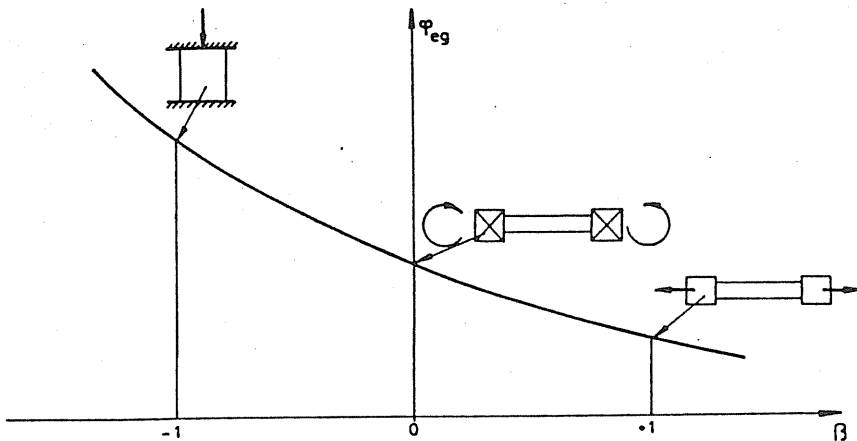
Na sl.2.12. su dati rezultati ispitivanja plastičnih svojstava različitih materijala koje su postigli Pugh, Brandes i dr. /20/. U svim slučajevima iskazan je porast graničnih deformacija sa porastom hidrostatičkog pritiska. Ispitivanja u ovom slučaju vršena su na uzorcima od bakra, cinka, bizmuta, aluminijuma 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 ( $\phi_{eg}$ ) sa pokazateljem naponskog stanja  $\beta$ . 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  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  i  $\phi_3$  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

$\sigma$  - hidrostatički napon

Pokazatelj naponskog stanja  $\beta$  može imati različite vrednosti,  $\beta \gtrless 0$  što isključivo zavisi od hidrostatičkog napona ( $\sigma$ ). 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

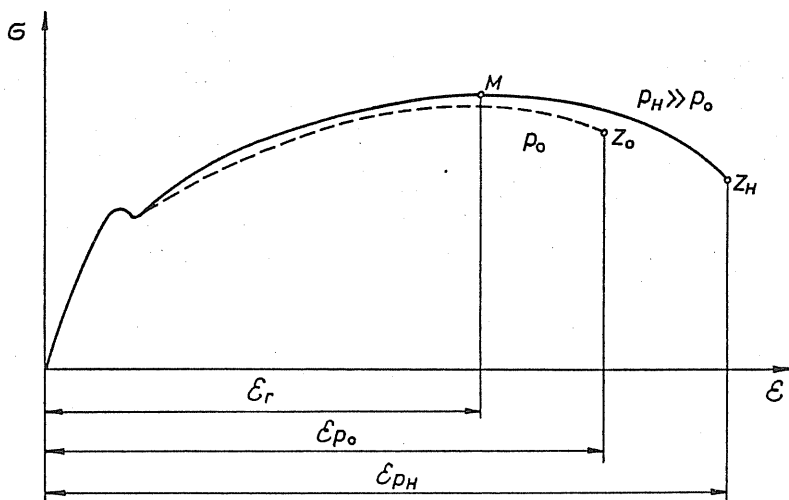
Na osnovi mnogobrojnih ispitivanja mehaničkih svojstava materijala i ispoljavanja deformabilnosti u hidrostatičkim uslovima ustanovljeni su osnovni principi hidrostatičke obrade koji imaju veliki značaj za primenu tehnoloških metoda hidrostatičkog oblikovanja.

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 uredjaja 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:

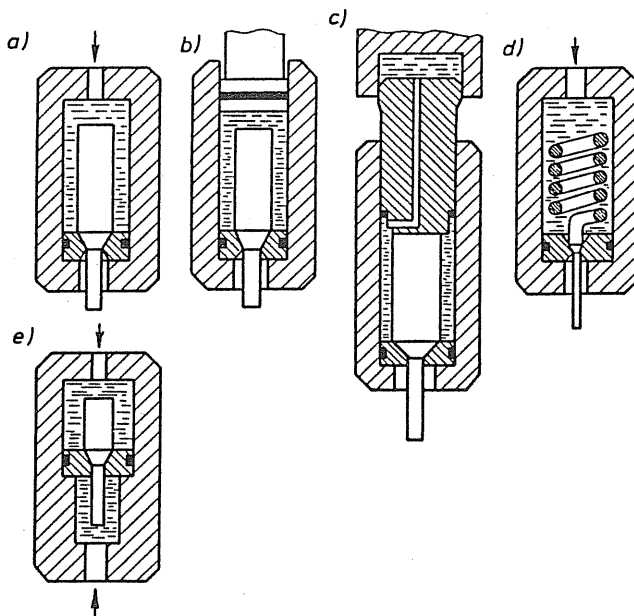
- postoji potreba za velikim hodom klipa,
- složeno zaptivanje klipa i cilindra.

Prednost uređjaja sa posebnim izvorom pritiska:

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

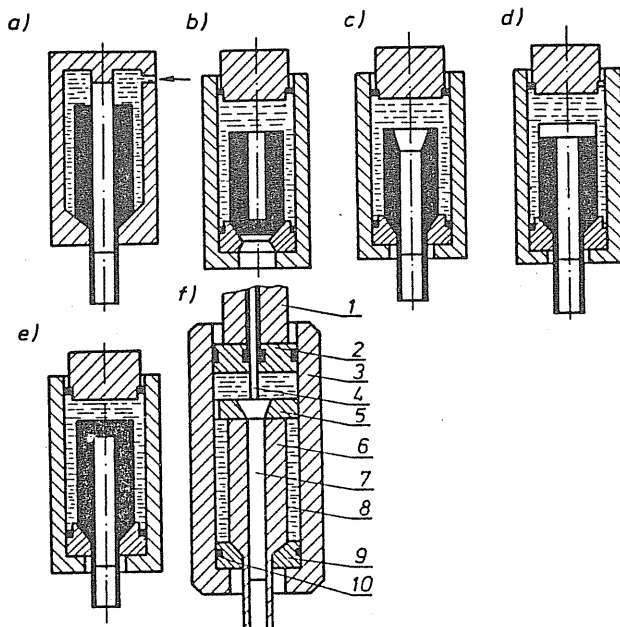
Nedostaci uređjaja sa posebnim izvorom za napajanje:

- 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.

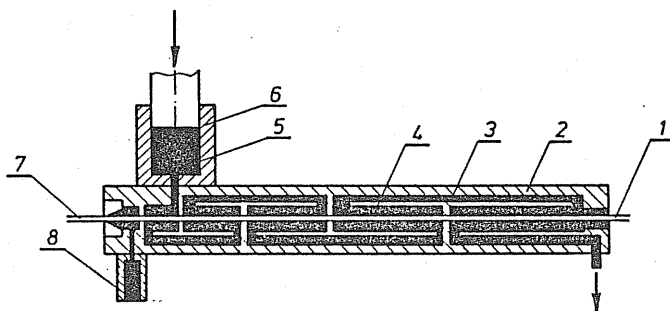


Sl.2.15. Hidrostatičko oblikovanje punih komada:

- 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 hidrostatski 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 hidrostatski oblikovanje se deli na:

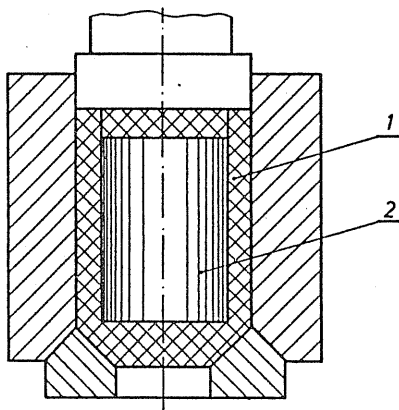
1. Kontinualno oblikovanje - oblikovanje žice (sl.2.17.) gde se potrebna aksijalna sila ostvaruje aktiviranjem sile trenja i njenim usmeravanjem u pravcu tečenja metala.

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

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

Hladno hidrostatski 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 hidrostatske 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



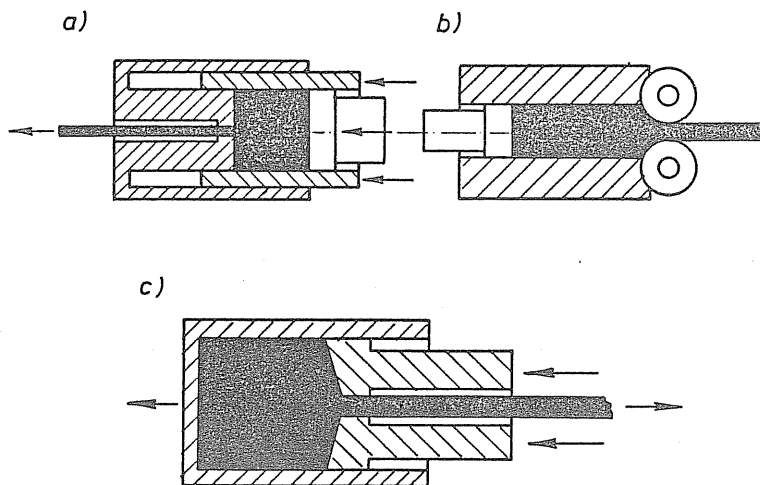
Sl.2.18. Istiskivanje sa oblogom

- 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 ( $\gamma$ ) 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 ( $\beta$ ):

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

Ako se pritisak sa početne vrednosti  $P_0$  poveća za  $\Delta p$  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

$\Delta Q$  - 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:

$\eta$  (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  $\eta$  i  $\eta_0$  koeficijenti na odgovarajućim temperaturama;  $\lambda$  - koeficijent zavisan od vrste tečnosti (za ulje  $\lambda = 0,023-0,033$ ).

Viskoznost takodje zavisi i od pritiska:

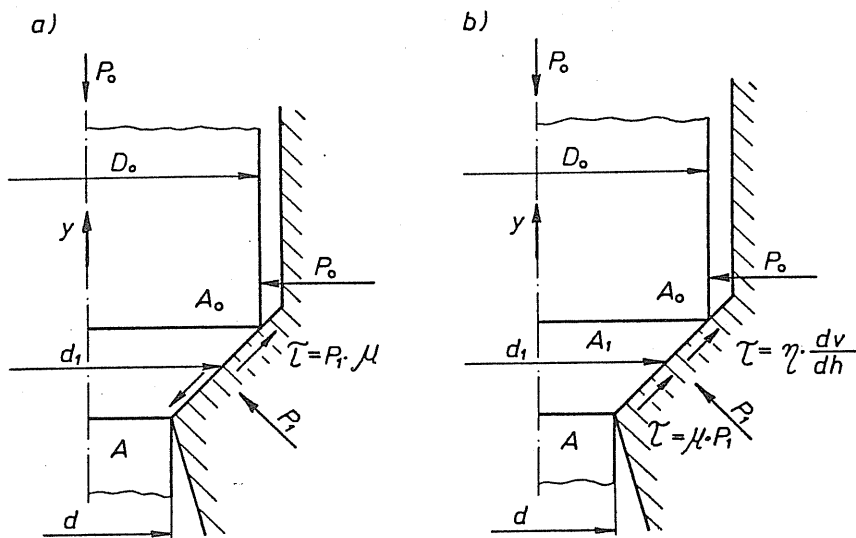
$$\eta = \eta_0 e^{q(p-p_0)} \quad (2.19.)$$

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:

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

$\eta$  - 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 ( $\mu$ ,  $\psi$  i  $\alpha$ ) koji dovode do pojave mokrog trenja. Povećanjem veličine redukcije preseka  $\psi$  i koeficijenta trenja  $\mu$ , odnosno smanjenjem ugla konusa matrice stvaraju se uslovi za pojavu mokrog trenja i obrnuto. Pri određenom odnosu parametara  $\psi$ ,  $\eta$ ,  $\mu$   $dv/dh$  i  $\alpha$  mokro trenje će se prostirati duž cele zone deformacije ( $d_1=d$ ) jer u tom slučaju iz uslova ravnoteže proizilazi:

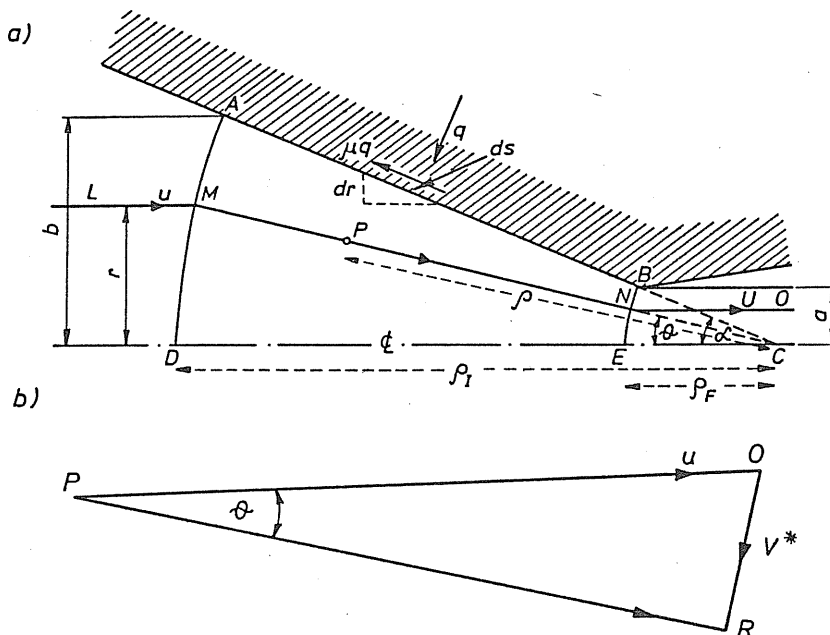
$$p_0 = \psi (p_1 + \eta \cdot \frac{dv}{dh} \cotg \alpha) \quad (2.32.)$$

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  $p \cdot A_0 \cdot \Delta z$  (gde je  $p$  - pritisak tečnosti,  $A_0$  - površina šnipremka,  $\Delta z$  - pomeranje obratka) troši je na:

- 1 - savladjivanje otpora homogene deformacije,
- 2 - savladjivanje unutrašnjeg trenja,
- 3 - savladjivanje trenja izmedju pripremk 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 - redundantni 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 redundantnog 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

$\alpha$  - ugao matrice

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

$\mu$  - koeficijent trenja

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

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

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

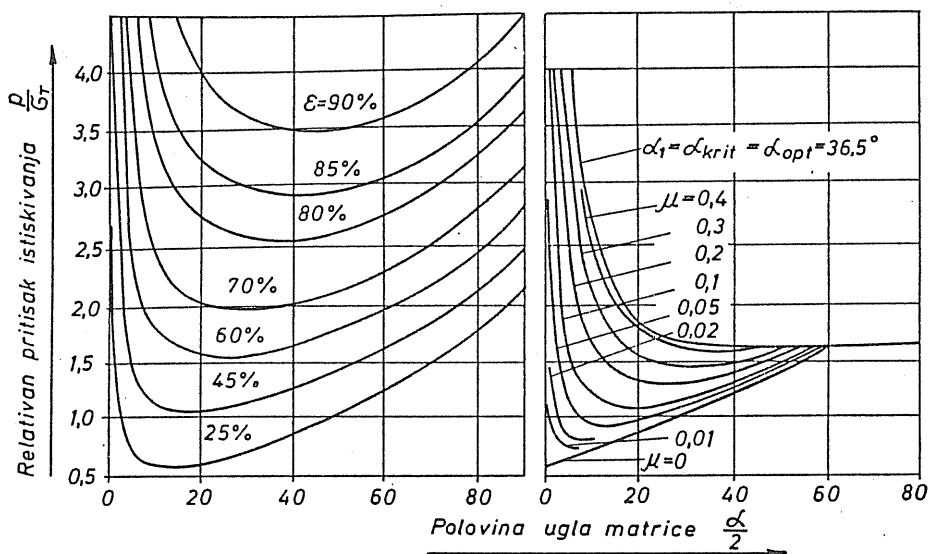
Vrednost funkcije  $f(\alpha)$  u uobičajenim uslovima hidrostatičkog istiskivanja približno iznosi  $f(\alpha) \approx 1$  i raste značajnije sa povećanjem ugla  $\alpha$  preko 90". Medjutim, hidrostatičko istiskivanje izvodi se sa manjim uglom matrice koji se odredjuje optimiranjem, tj. nalaženjem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

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

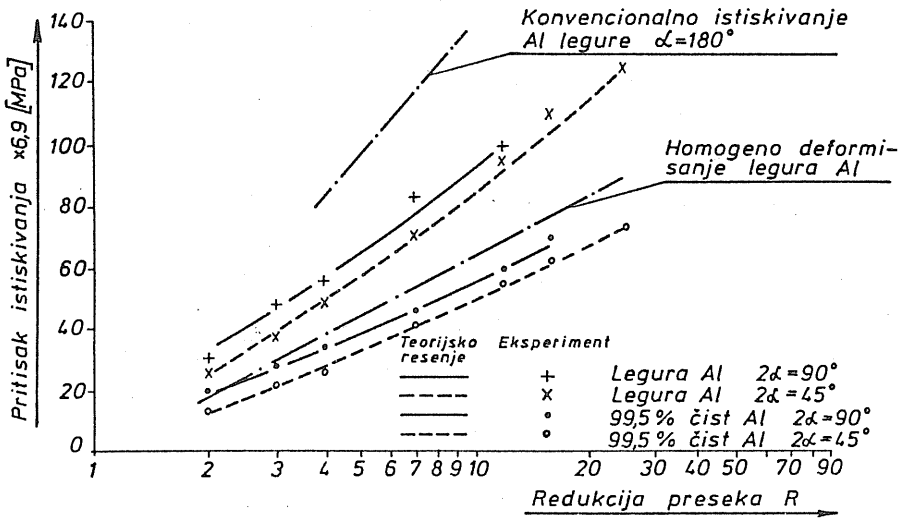
pri čemu je  $b \approx 0$ , odnosno:

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

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

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

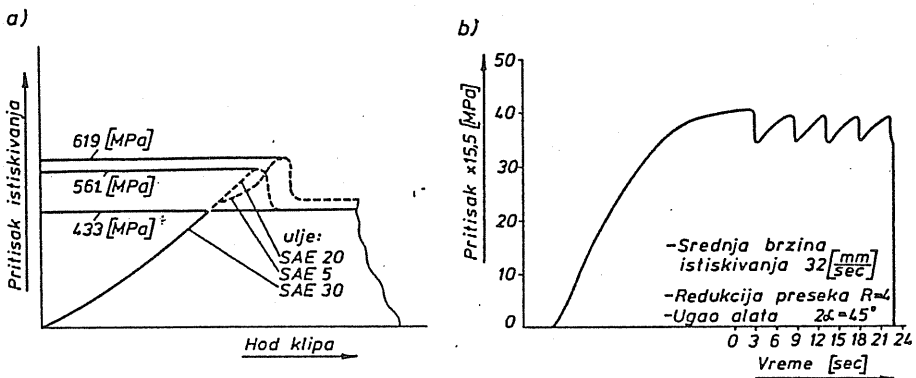
Linearna zavisnost pritiska istiskivanja od redukcije preseka eksperimentalno je potvrđena od strane Pugh (sl.2.23.).



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

2.4.4. Stabilizacija pritiska

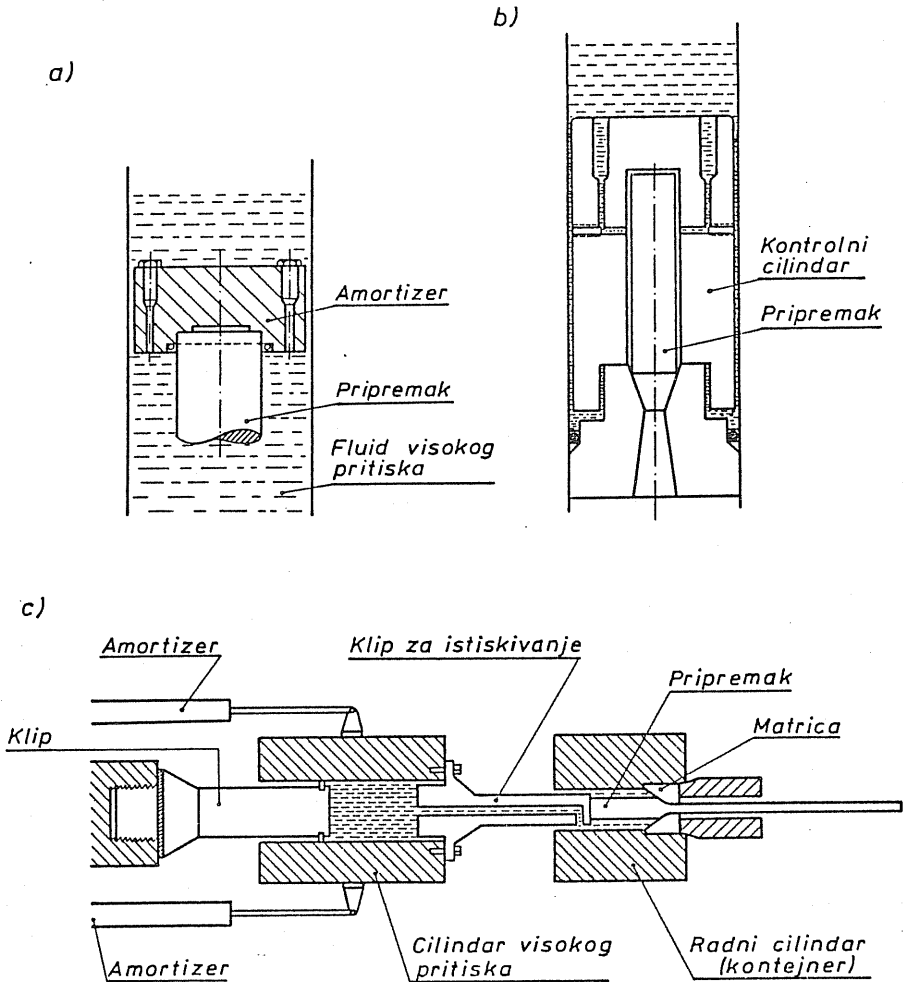
U početnoj fazi istiskivanja pritisak tečnosti znatno je veći od pritiska u stabilnoj fazi hidrostatičkog istiskivanja (sl.2.24.a). Karakter ove promene zavisi prvenstveno od kvaliteta upotrebene tečnosti i sredstava za podmazivanje. Ukoliko tečnost ne sadrži adekvatno sredstvo za



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

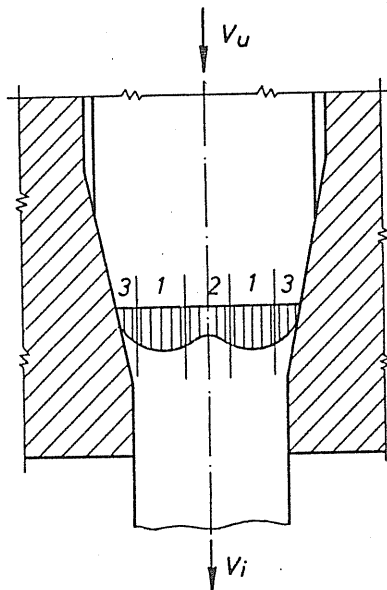
Izučavanje uticaja hidrostatičkog pritiska na plastična svojstva materijala su pokazala da plastičnost nije osobina već stanje u kojem se materijal nalazi. Porastom pritiska u zoni deformacije povećavaju se mogućnosti oblikovanja. Istiskivanje sa protivpritiskom primenjuje se kod teškodeformabilnih materijala 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:

$\sigma_t$  - napon tečenja

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

$\sigma$  - hidrostatički napon

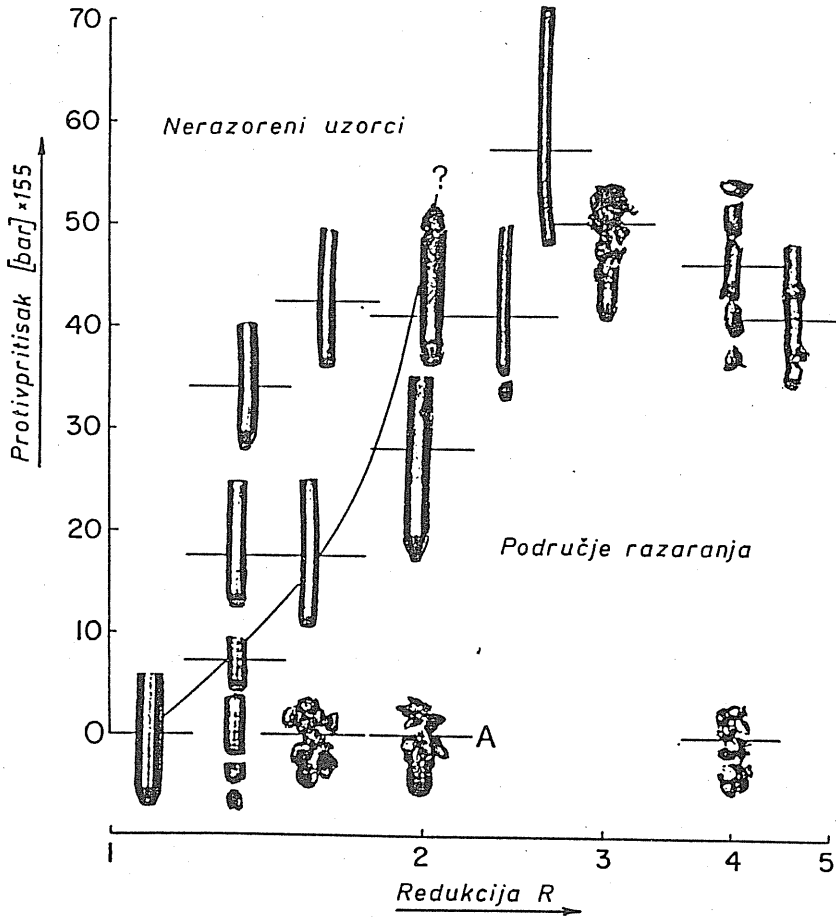
$\tau_e$  - tangencijalni efektivni napon

$p$  - 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  $45^{\circ}$ .



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/.

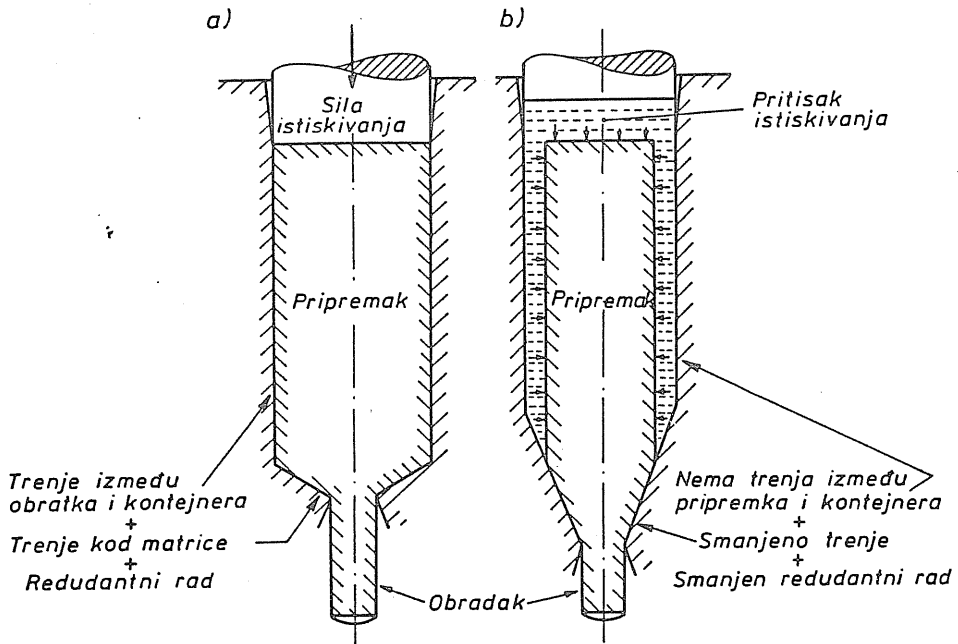
Hidrostatičko istiskivanje (sl.2.28.b) predstavlja proces hladnog oblikovanja punih i šupljih komada u alatu sa tečnošću pod visokim pritiskom (preko 3.000 MPa). Potrebno opterećenje obratka dobija se pomoću tečnosti pod pritiskom a ne direktno preko čvrstih elemenata alata kao što je to slučaj kod klasičnog 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)

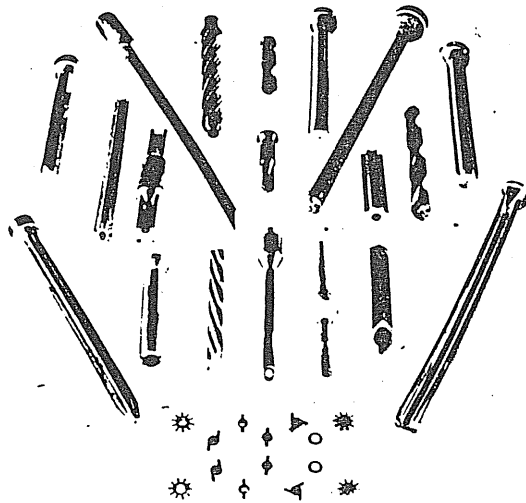
Uloga trenja u obradi deformisanjem je veoma značajna a jedna od karakteristika hidrostatičkog oblikovanja jeste njegovo smanjenje. Smanjenje trenja ne mora se uvek ostvariti hidrostatičkim putem, već pogodnom konstrukcijom alata kao što je to prikazano primerima na sl.2.19.

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.



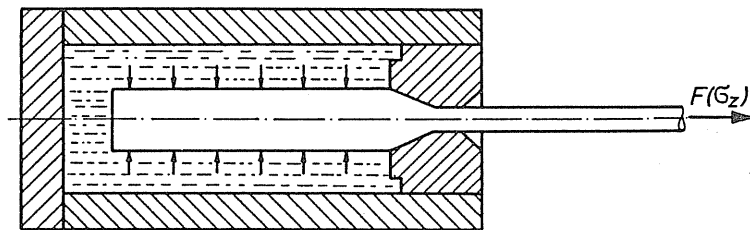
Sl.2.29. Proizvodi hidrostatičkog istiskivanja /20/

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.

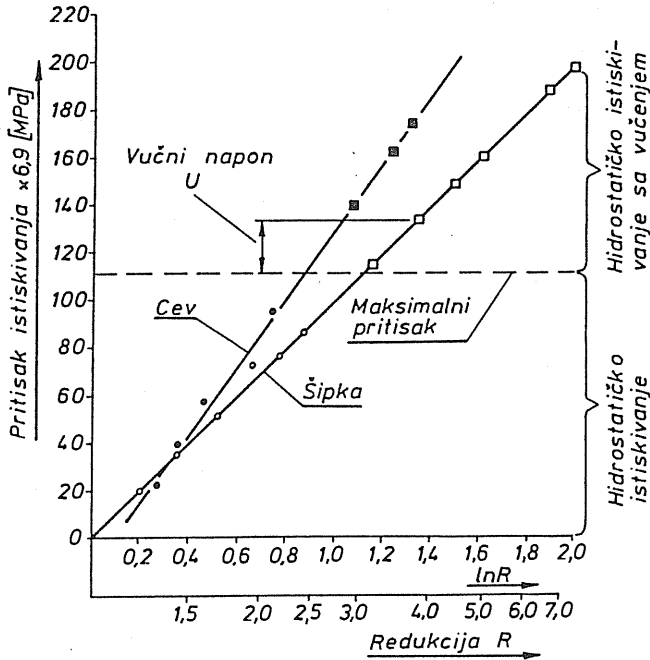
### 2.5.2. Hidrostatičko istiskivanje sa vučenjem

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.



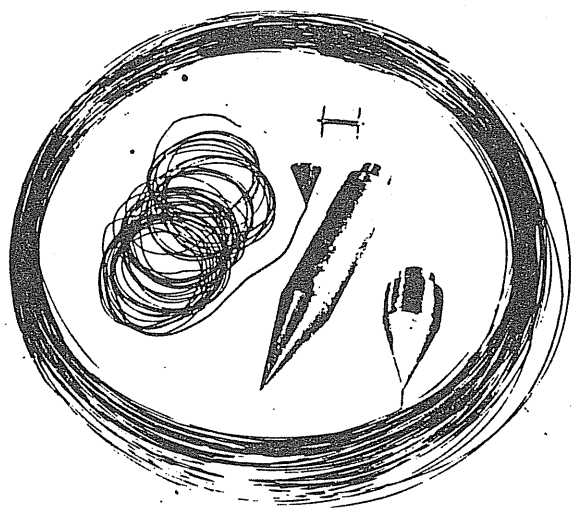
Sl.2.30. Šema hidrostatičkog istiskivanja sa vučenjem

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/

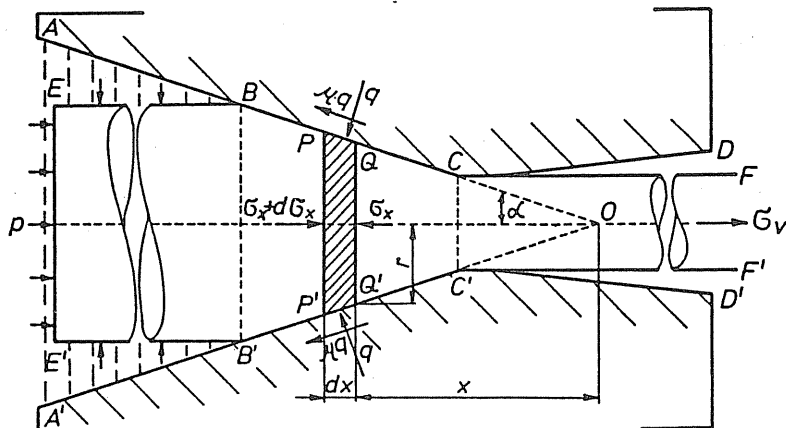
Postupak hidrostatičkog istiskivanja sa vučenjem je zbog svojih tehničkih mogućnosti veoma atraktivan za industrijsku primenu u izradi delova od čelika i drugih materijala, kružnog i drugog oblika poprečnog preseka. Ovaj proces može da zameni neke klasične postupke kao što je npr. valjanje i vučenje. Zbog izuzetno visokih redukcija preseka koje se postižu 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

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

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

dobija se

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

pa je:

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

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:  $\sigma_v + p = K \cdot \phi = \text{const}$  (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:

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

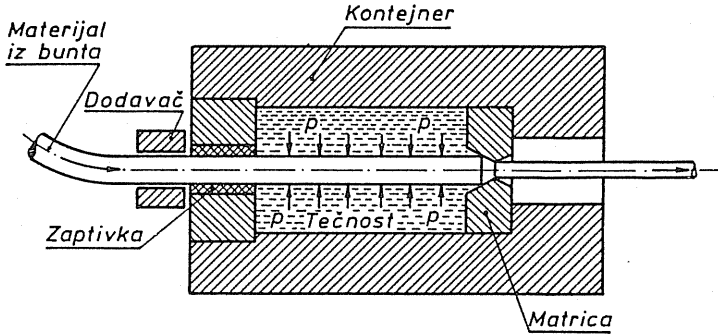
gde je:  $\lambda = \mu \cdot \cot \alpha$ .

### 2.5.3. Hidrostatičko oblikovanje delova neograničene dužine i kontinualni postupci

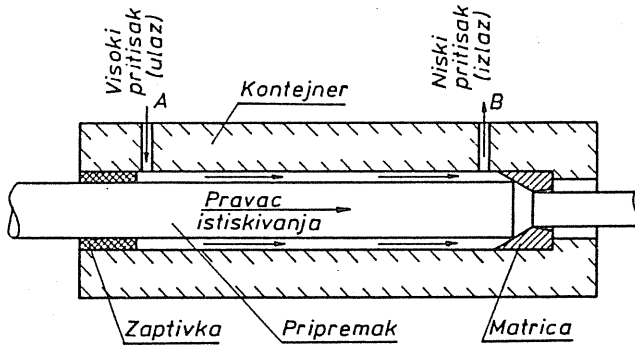
Zahvaljujući smanjenom uticaju trenja na površini priprema kod hidrostatičkog oblikovanja moguće je oblikovati veoma dugačke delove, različitog poprečnog preseka. Ova osobina hidrostatičkog oblikovanja iskorišćena je i za proizvodnju žice, prvenstveno iz teškodeformabilnih materijala.

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

Efekte 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.

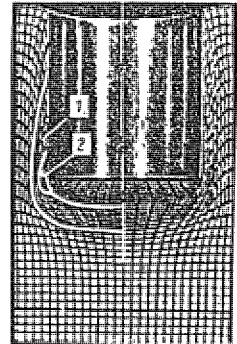
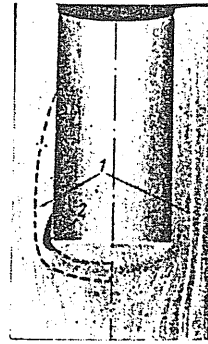
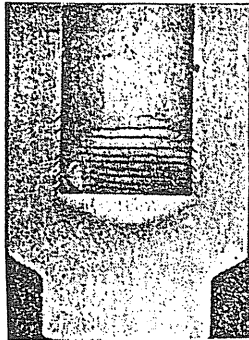
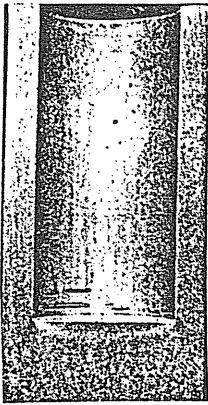
Osim toga, uzimajući u obzir drugi princip hidrostatičkog oblikovanja koji je objašnjen u tački 2.24. a odnosi se na nezavisnost nastanka lokalizacije deformacija od hidrostatičkog pritiska, stvorene su nove šeme pojedinih tehnoloških metoda koje respektuju ovako ponašanje materijala. Da bi se lokalizacija 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 pritisko i u ovom procesu redje se javlja problem obradivosti materijala. Limitirajući faktor primene hladnog istiskivanja je češće opterećenje na pojedinim elementima alata.

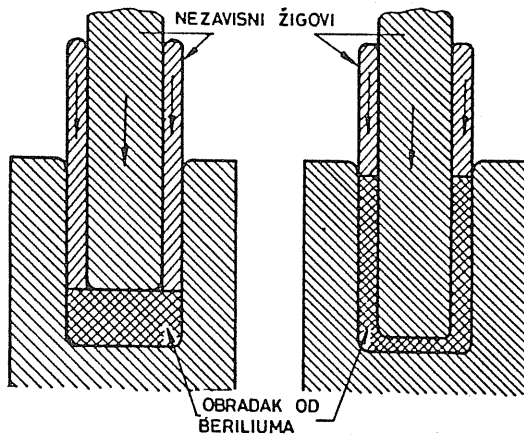
Medjutim, kada su u pitanju teško obradivi materijali problem obradivosti pojavljuje se i pri suprotnosmernom istiskivanju. Rene i Podlivačev /51/ ukazuju na mogućnost pojave pukotina pri hladnom istiskivanju obradaka od duraluminijuma (sl.2.36.). Etapnim posmatranjem obradaka sa prethodno nanetom koordinatnom 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/



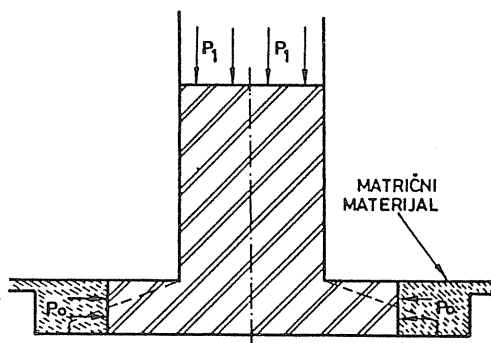
Sl.2.38. Suprotnosmerno istiskivanje s mehaničkim povećanjem hidrostatičkog napona /20/

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/)

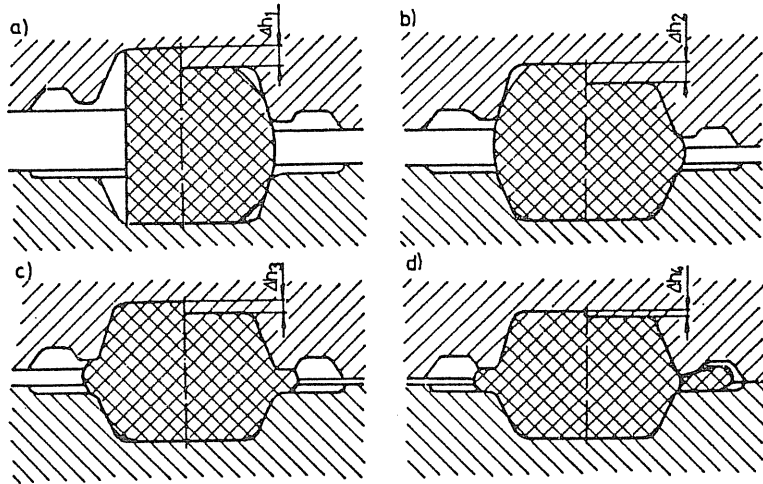
Vršeci eksperimente oblikovanja prirubnice od legure aluminijuma sa 10%Si, prema Coganovom konceptu, Alexander i Lengyel /20/ ostvarili su radijalni pritisak od 400 MPa primenom polietilena kao matričnog materijala, što je bilo dovoljno za oblikovanje bez pojave loma.

#### 2.5.4.3. Kovanje u otvorenom kalupu

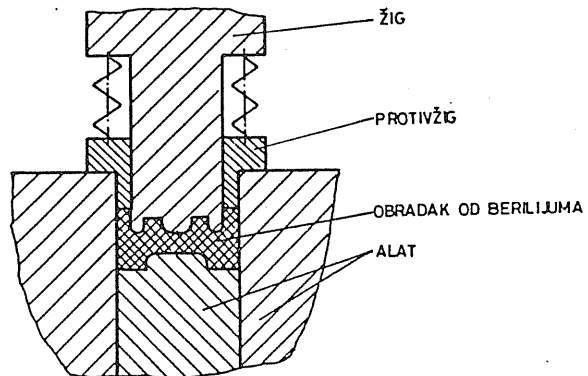
Za proces kovanja u otvorenom kalupu takodje se može reći da se odvija u hidrostatičkim uslovima (sl.2.40.). U završnoj fazi izrade otkovka dolazi do isticanja metala kroz kanal venca, odnosno ko kočenja tečenja metala, što izaziva snažno povećanje hidrostatičkog pritiska u zoni deformisanja i stvara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



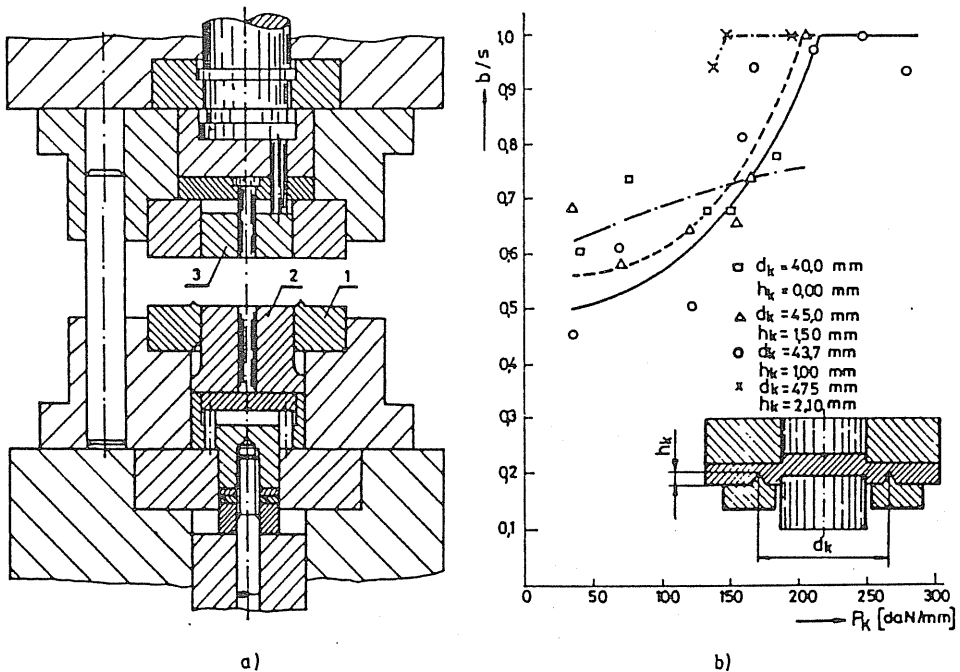
Sl.2.40. Faze kovanja u otvorenom kalupu



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-



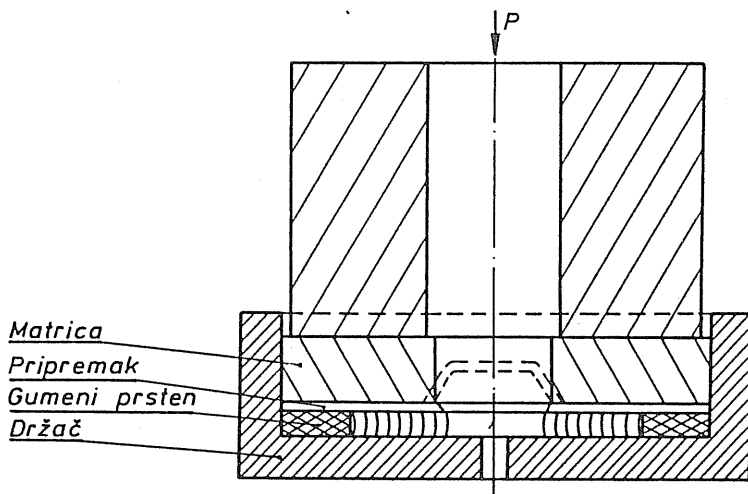
Sl.2.42. Fino razdvajanje presovanjem: a) konstrukcija alata, b) zavisnost kvaliteta površina od opterećenja konturnog zuba /20/.

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  $\sigma_i < \sigma_m$ .



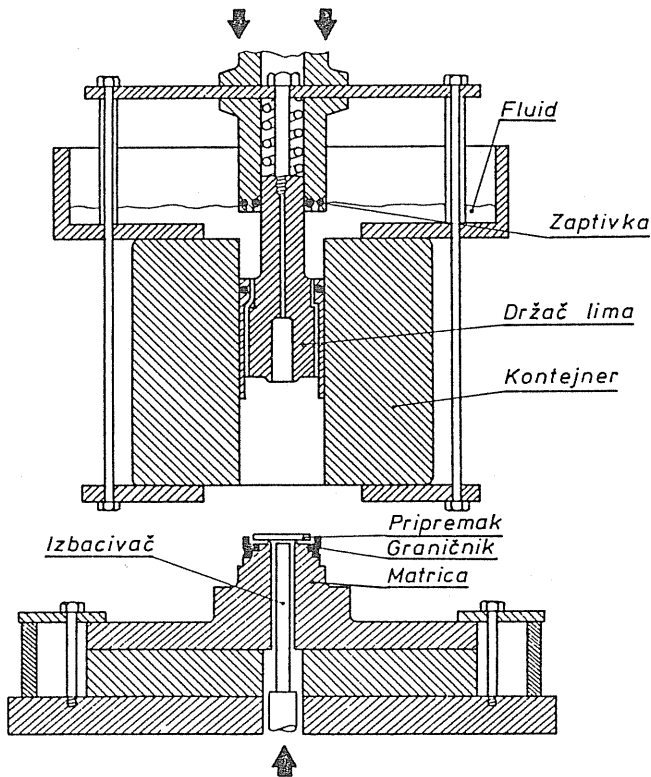
Sl.2.43. Duboko izvlačenje sa promenjenom naponskom šemom

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 pripremk. Tečnost pod pritiskom prodire izmedju 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/

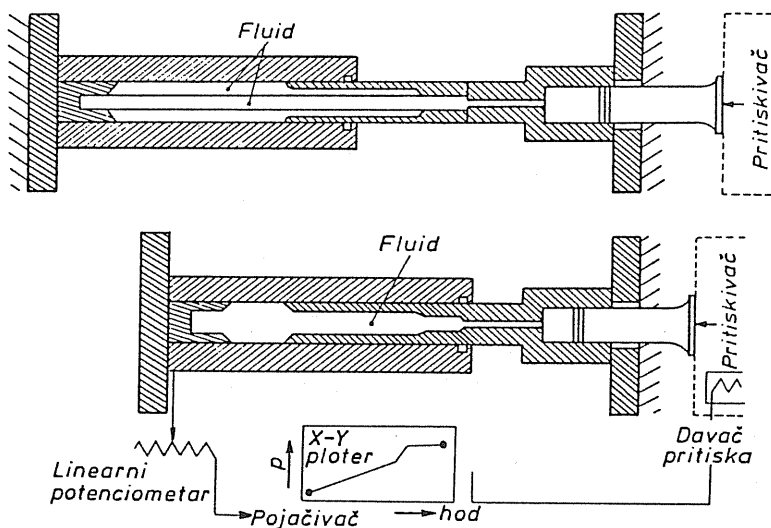
### 2.5.4.6. Oblikovanje cevi

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

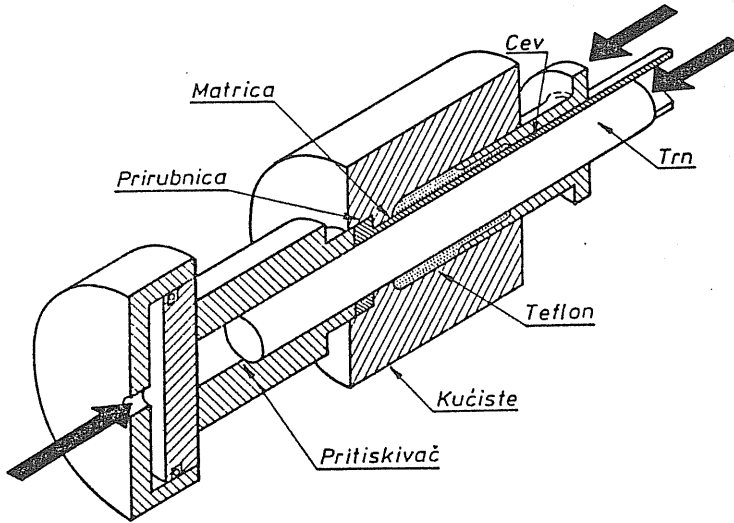


Sl.2.45. Uredjaj za hidrostatičko ekspanziranje cevi /20/

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 ekspaniranje 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 kontaknoj 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

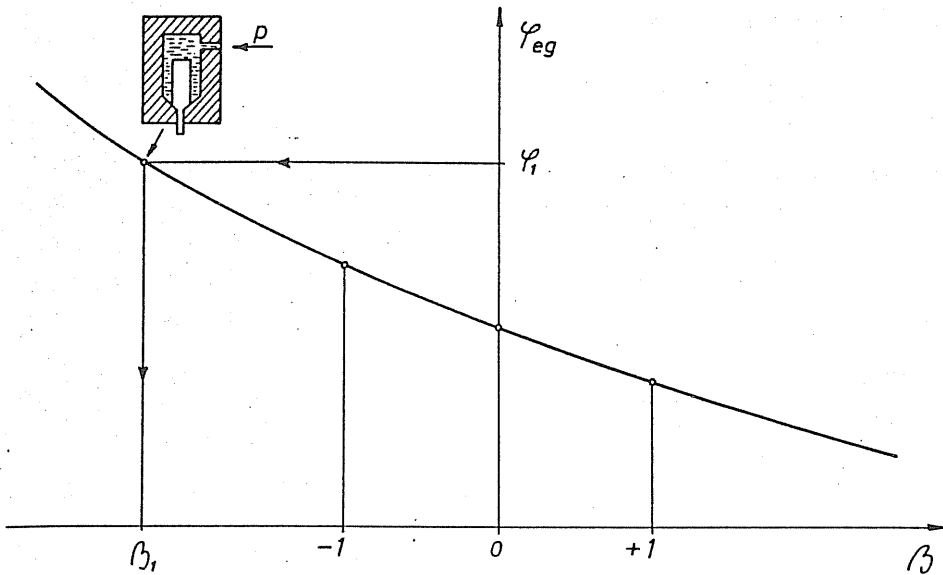
Osnovne prednosti hidrostatičkog oblikovanja nad konvencionalnim oblikovanjem proizilaze iz uticaja visokog pritiska na plastična svojstva materijala i uticaja visokog pritiska na trenje kako u zoni deformacije tako i na slobodnim površinama obratka. Prilikom projektovanja tehnološkog procesa proizvodnje 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 komponenata naponskog stanja. Dijagram granične deformabilnosti na najbolji način iskazuje mogućnosti hidrostatičkog oblikovanja jer je pokazatelj naponskog stanja definisan odnosom trostruke vrednosti hidrostatičkog napona ( $\sigma$ ) i efektivnog napona ( $\sigma_e$ ):

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

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 ( $\beta$  - 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

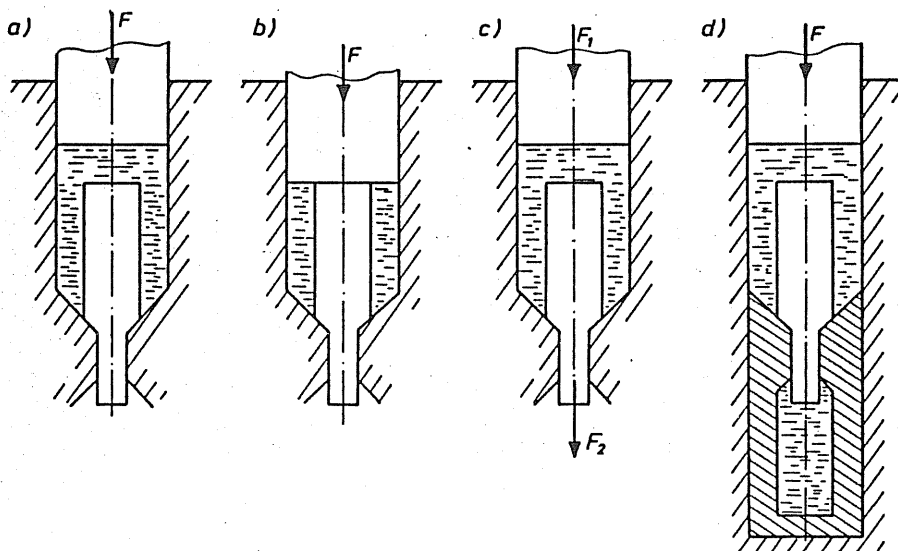
Osnovne tehnološke šeme hidrostatičkog istiskivanja obradjene su u poglavlju 2.3. i medju njima treba tražiti ideje za realizaciju konkretnog rešenja. U suštini postoje sledeći vidovi hidrostatičkog istiskivanja:

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

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

$\mu$  - 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/:

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

$\sigma_T$  - granica tečenja pripremk

$h_k$  - visina kalibrirajućeg dela matrice

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

$\alpha$  - 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

$\sigma$  - hidrostatički napon



$\tau_e$  - 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

$\beta$  - 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  $\text{MoS}_2$  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 antifkciona 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:

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

$\eta_0$  - viskoznost pri  $p=1$  bar i  $t=20^\circ\text{C}$

$\alpha$  - koeficijent pritiska

$m$  - koeficijent temperature

U tabeli 2.1. su date vrednosti viskoznosti  $\eta_0$  i koeficijenta  $\alpha$  na sobnoj temperaturi za razne vrste tečnosti.

Tabela 2.1. Vrednosti koeficijenta  $\eta_0$  i  $\alpha$

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). Poboľšanje 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 ( $\text{MoS}_2$ )	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  $\text{MoS}_2$  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  $400^\circ\text{C}$ . Preko ove temperature ne preporučuje se primena  $\text{MoS}_2$  jer dolazi do njegove oksidacije - stvara se  $\text{MoS}_3$  koji je abrazivan. Za hidrostatičko istiskivanje preporučuje se upotreba  $\text{MoS}_2$  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  $\text{MoS}_2$  opada porastom pritiska.

Osim  $\text{MoS}_2$  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.

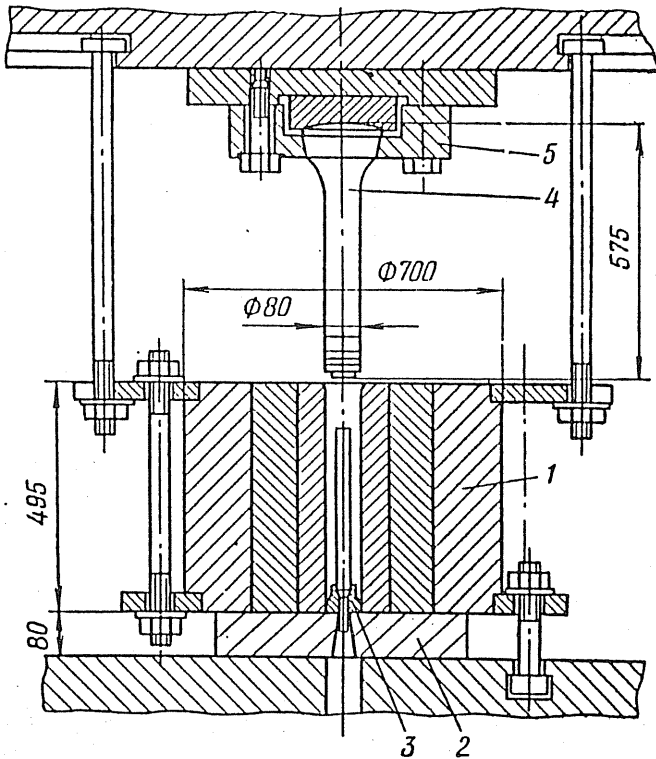
U nastavku su ukratko prikazana karakteristična rešenja pojedinih vrsta uređaja.

### 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.

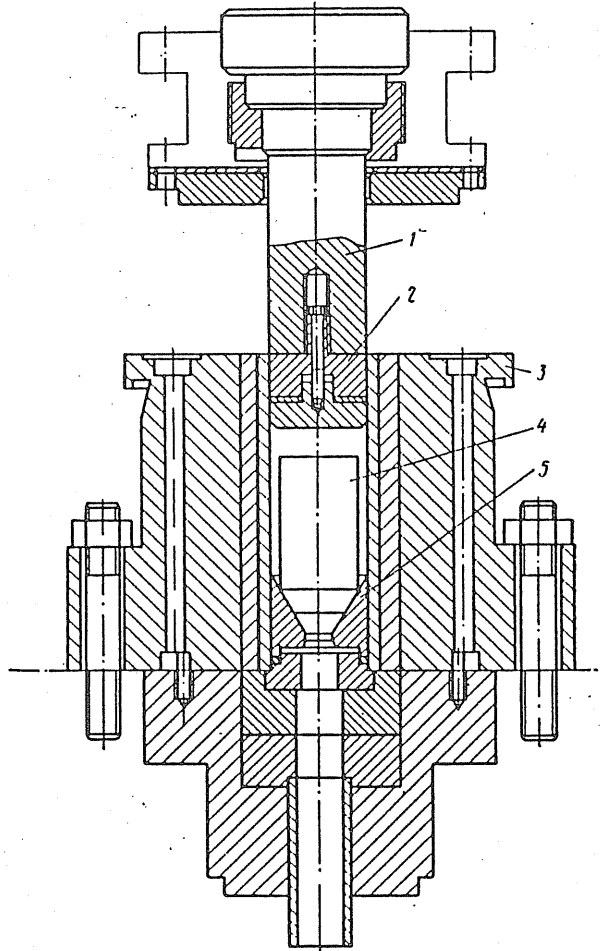


Sl.2.49. Uredjaj direktnog dejstva za istosmerno istiskivanje na vertikalnoj hidrauličnoj presi /23/

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.

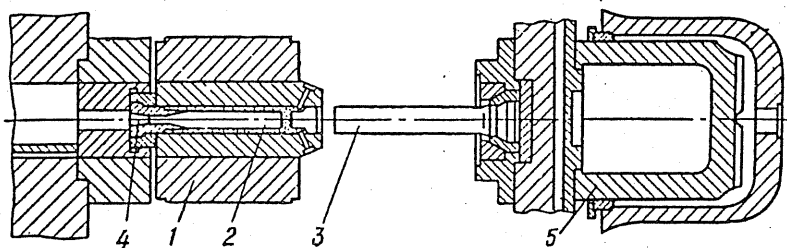
Na sl.2.50. je prikazan uredjaj direktnog dejstva za istiskivanje u toplom stanju. Konstrukcija ovog uredjaja je slična sa prethodnom. Pre



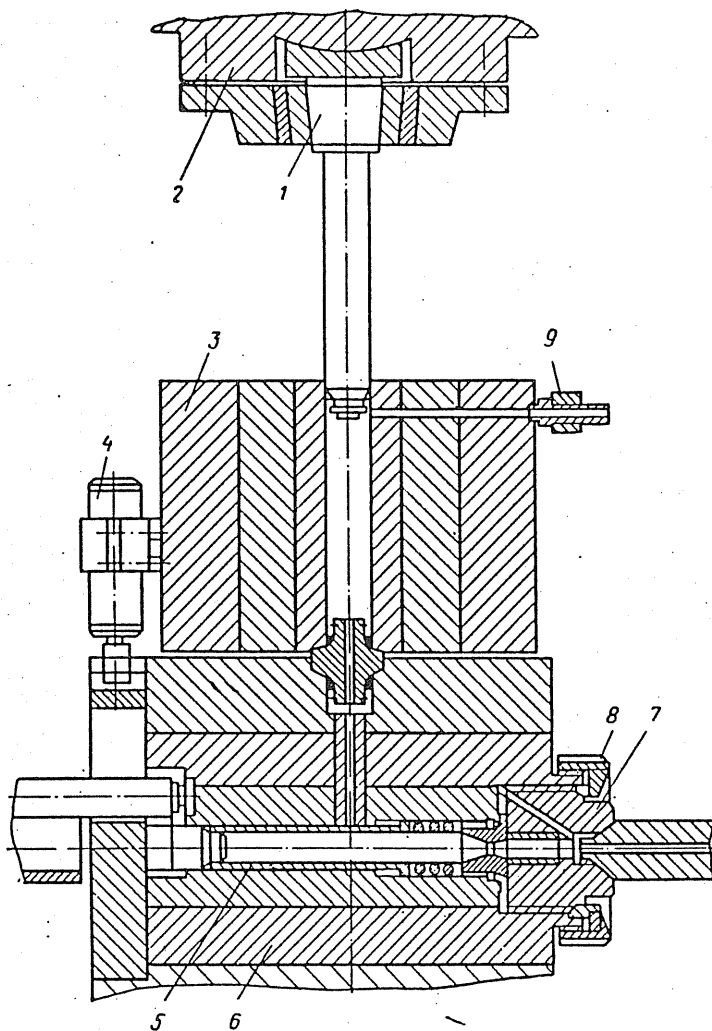
Sl.2.50. Uredjaj direktnog dejstva za istiskivanje u toplom stanju /22/

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 uredjaji direktnog dejstva (sl.2.51.) se ne razlikuju principijelno od prethodnih a konstrukcija im je prilagodjena horizontalnoj hidrauličnoj mašini. Osnovni elementi uredjaja 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/

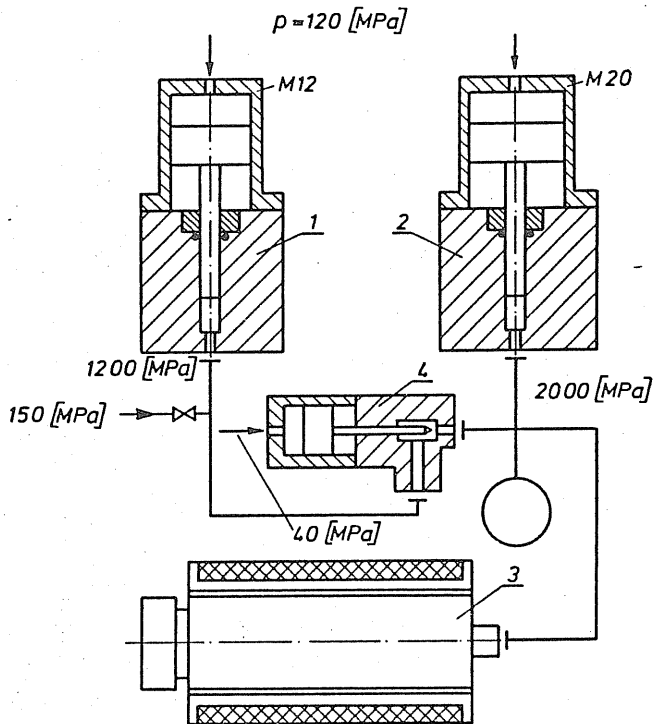


Sl.2.52. Uredjaj sa nezavisnim cilindrima /23/

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.

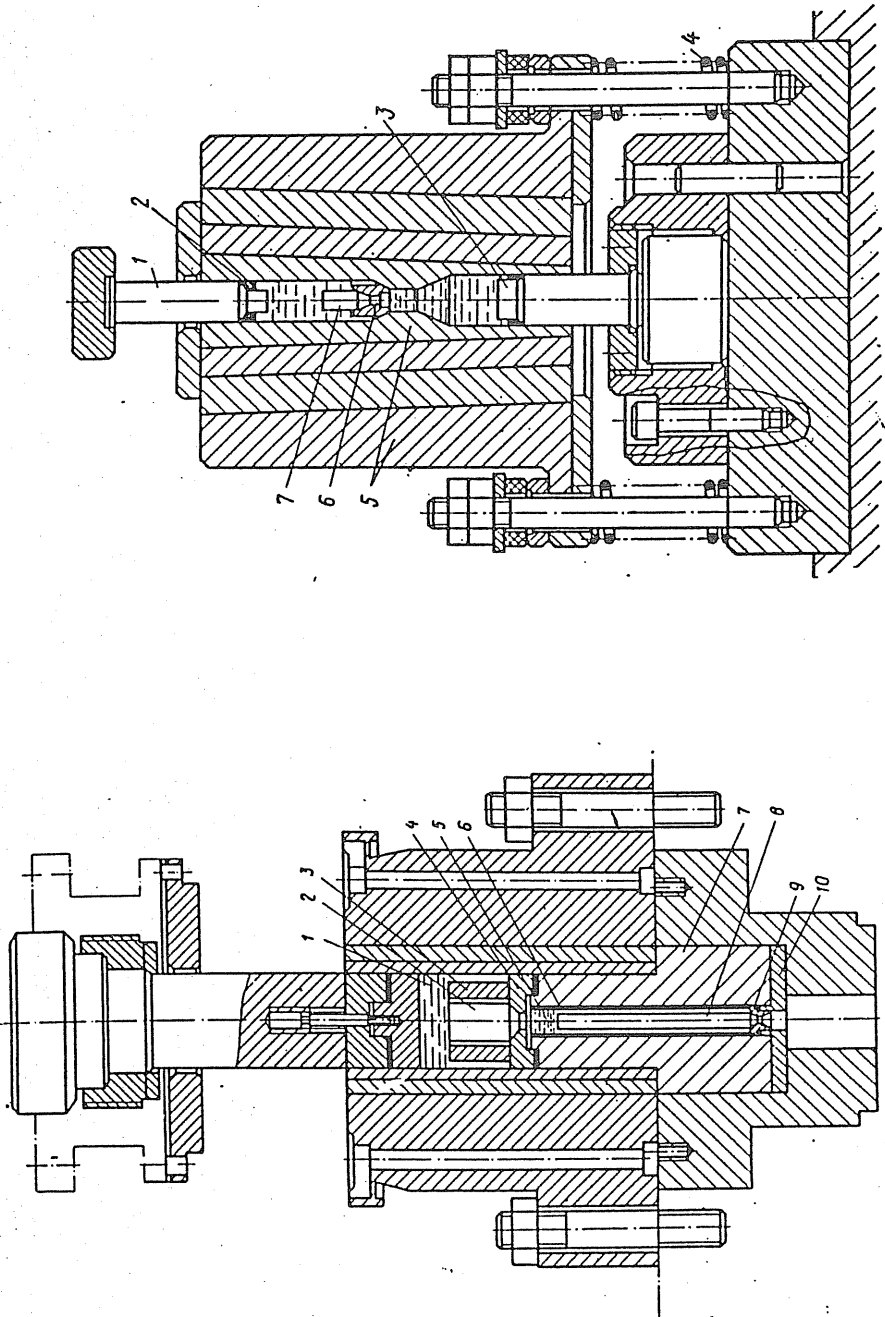
### 2.7.3. Uređaj sa diferencijalnim pritiskom

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 vodjenje 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.).



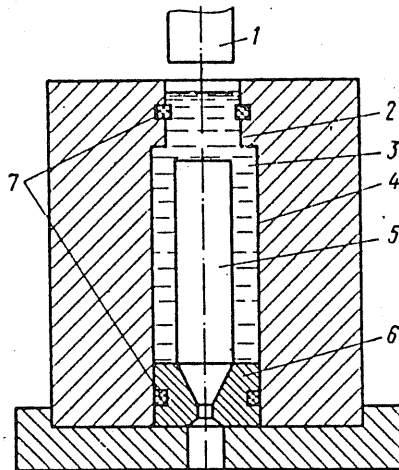
Sl. 2.54. Alat za istiskivanje sa protivpritiskom ostvarenim pomoću "parazitnog" obratka /22/

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

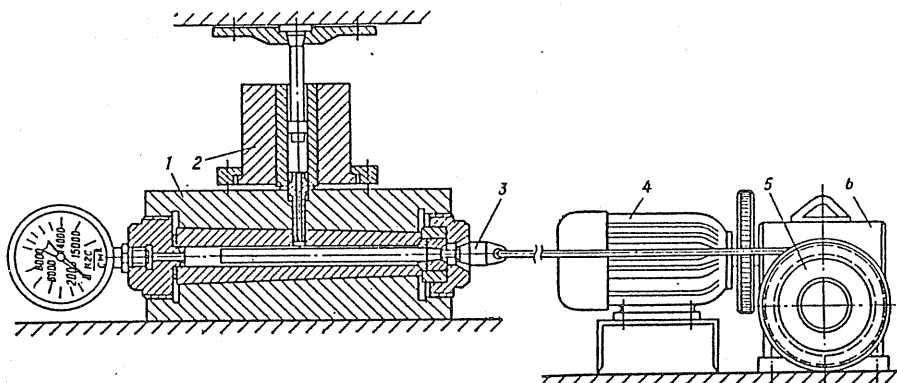


Sl.2.56. Uredjaj za hidromehaničko istiskivanje /22/

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 odredjuje. 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.



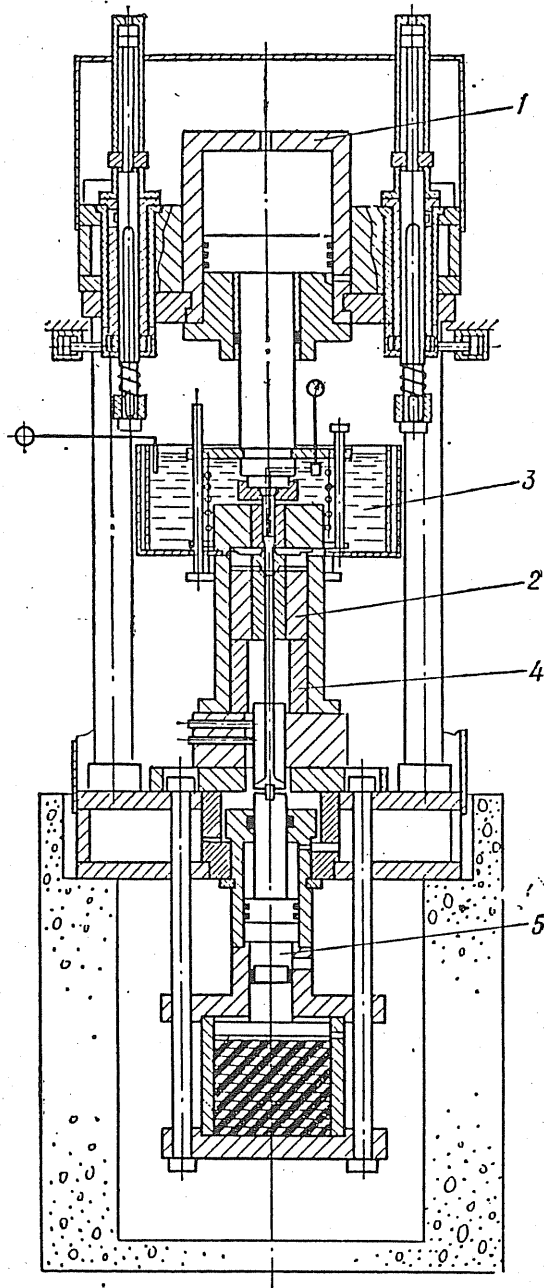
Sl.2.57. Hidromehaničko istiskivanje sa vučenjem /23/

#### 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.

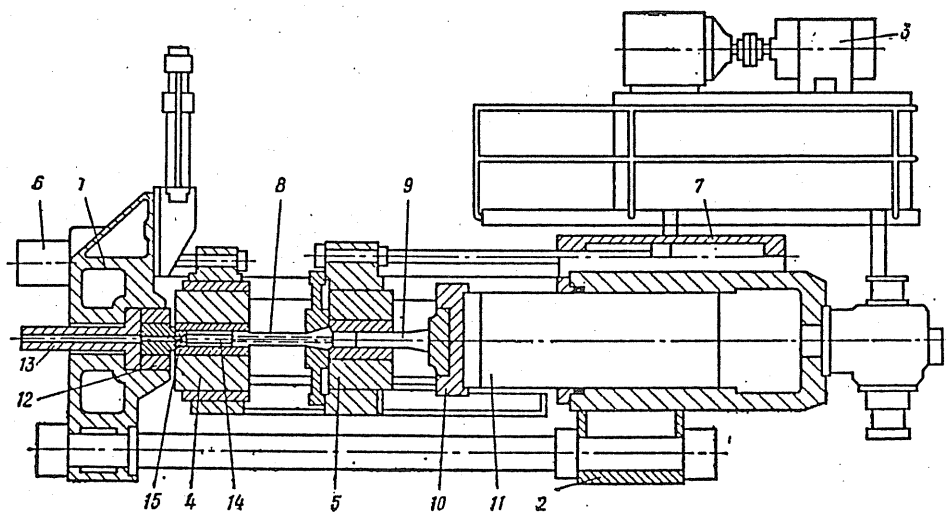
Nominalna sila ove mašine iznosi 2,5 MN, maksimalan radni pritisak je 3000 MPa a protivpritisak se kreće do 1500 MPa. Unutrašnje dimenzije radnog cilindra (prostor za pripremak) su  $\varnothing 30 \times 100$  mm.



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

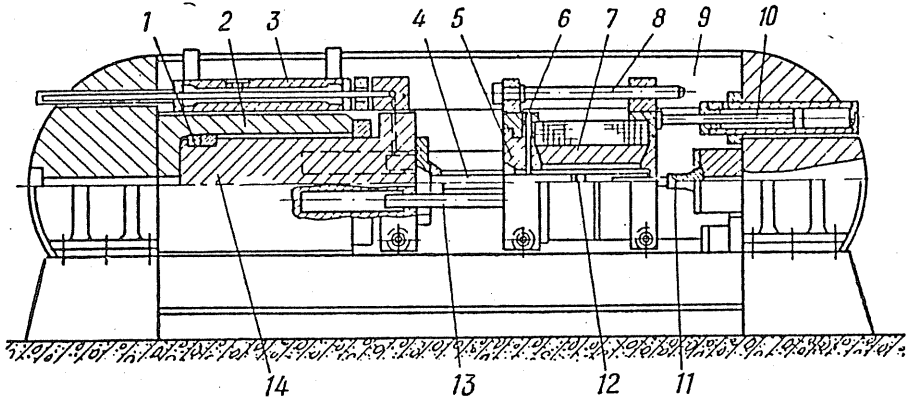
Osnovni elementi mašine prema slici su: 1 - pogonski cilindar, 2 - alat za hidrostatičko istiskivanje sa protivpritiskom, 3 - rezervoar radne tečnosti, 4 - klip za protivpritiskak, 5 - amortizer. Ova mašina namenjena je za obično hidrostatičko istiskivanje, istiskivanje sa protivpritiskom kao i za klasične 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  $\varnothing 120 \times 500$  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



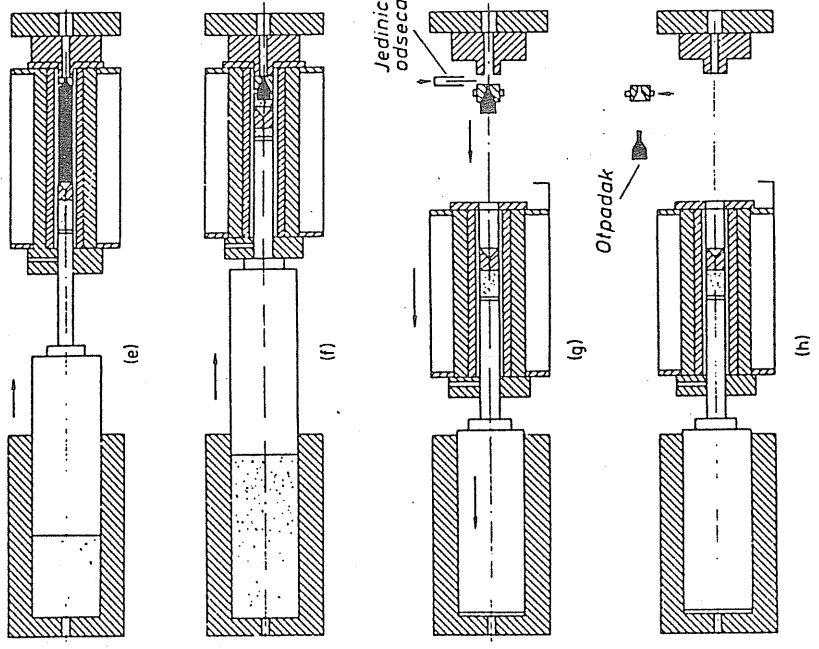
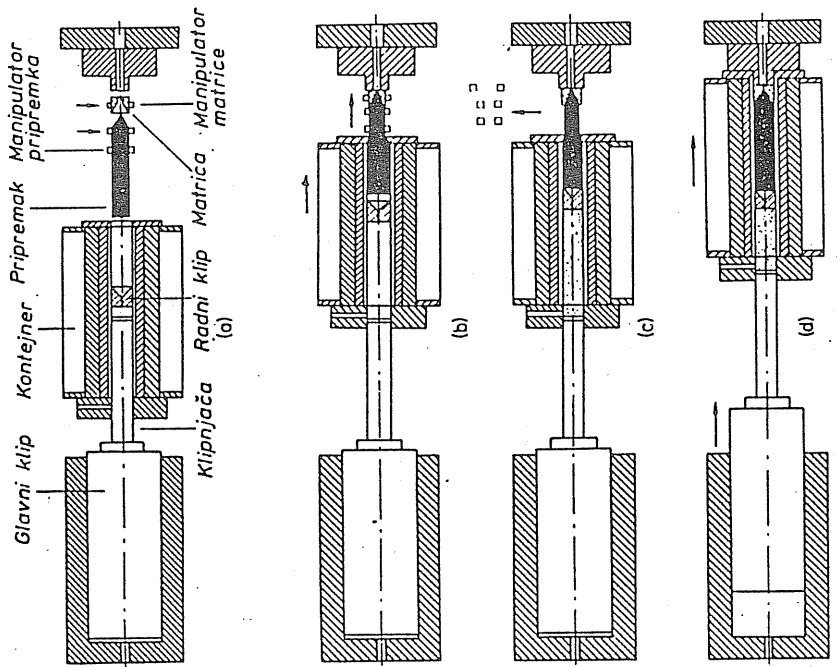
Sl.2.60. Horizontalna hidraulična presa firme "ASEA" /23/

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 privata 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:

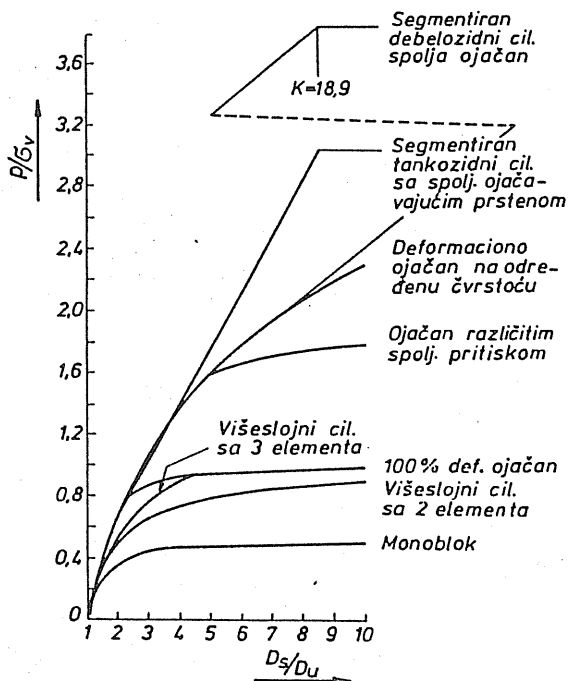
1. Jednoslojni (monoblok)

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/

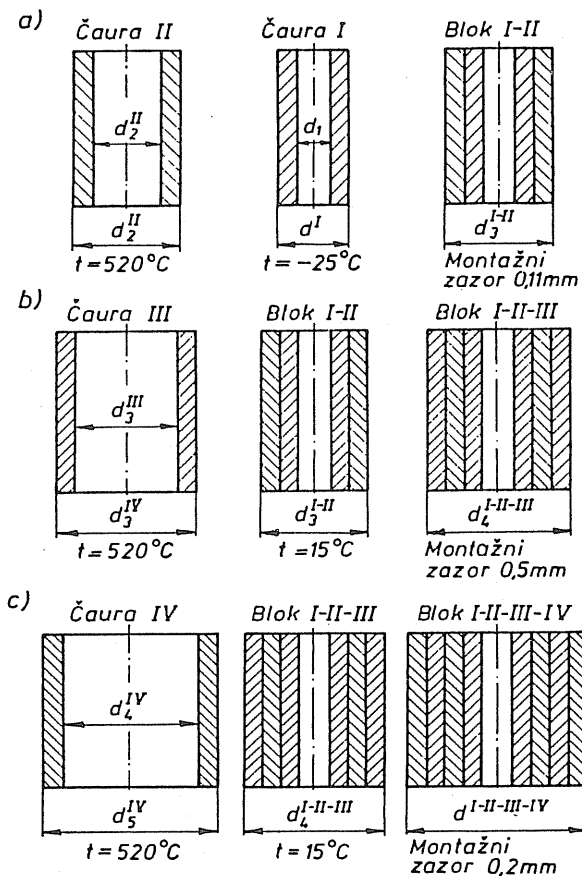
### 1. Jednoslojni kontejner

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. Svrshodna 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.

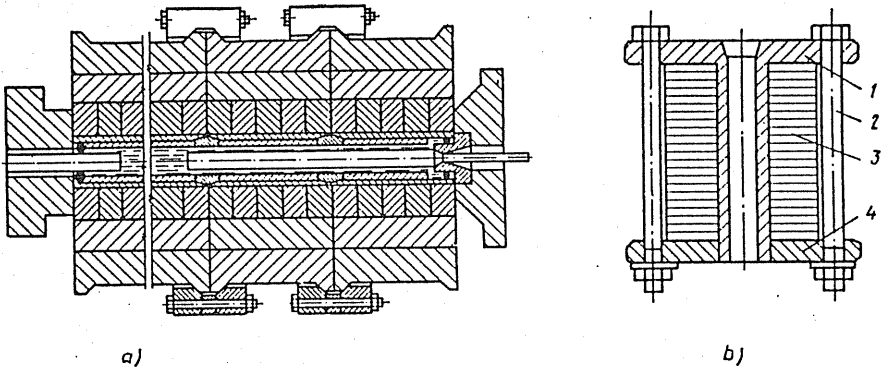
Na sl.2.63. je prikazano klasično ojačavanje radnog cilindra sa ojačavajućim prstenovima koji se navlače na taj način što se spoljašnji



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

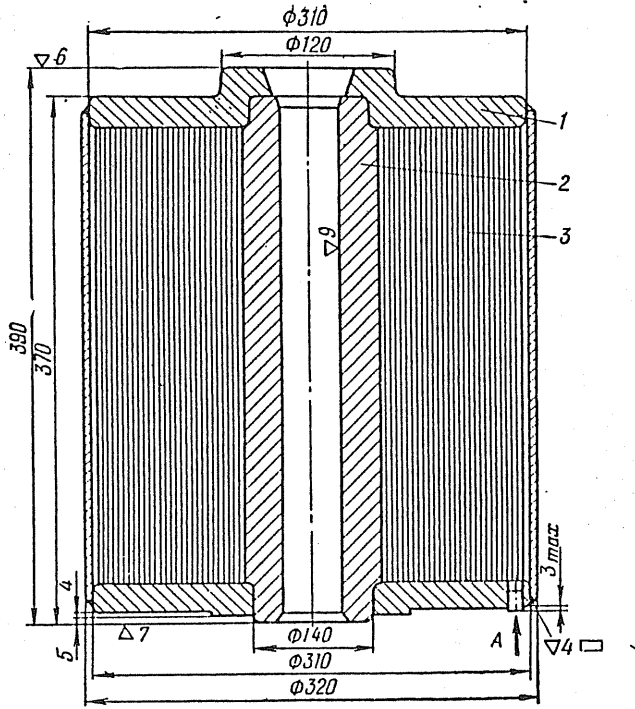


Sl.2.64. Radni cilindar ojačan prstenovima  
a) kovanim, b) od lima /22/

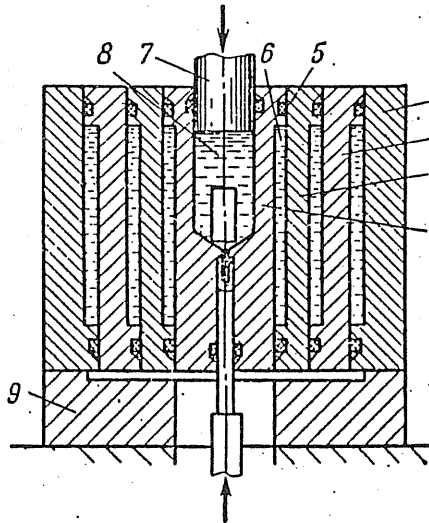
od kvalitetnog lima ( $\sigma_v=260-320$  MPa,  $\psi=35-40\%$ ). Prednost ove konstrukcije je u tome što se ojačavajući elementi izradjuju brzom tehnologijom, tj. razdvajanjem presovanjem. Ova vrsta kontejnera uspešno se primerjuje za pritiske do 3.000 MPa

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/

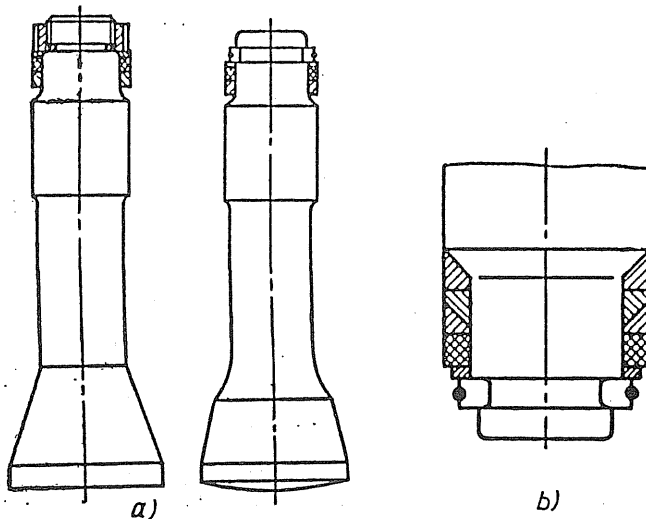
kontejnera (cilindar 1). Na sličan način dolazi do porasta pritiska u ostalim komorama. Prsten 4 se oslanja na kruti oslonac 9 koji prima ukupno aksijalno opterećenje.

### 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

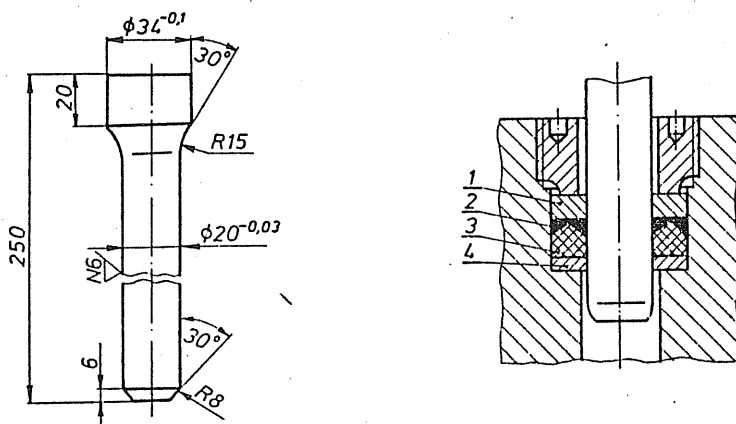
Opšti izgled klipa sa pokretnom zaptivkom dat je na sl.2.67.a. a na sl.2.67.b. prikazan je detalj vrha klipa sa prstenovima za zaptivanje.



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/

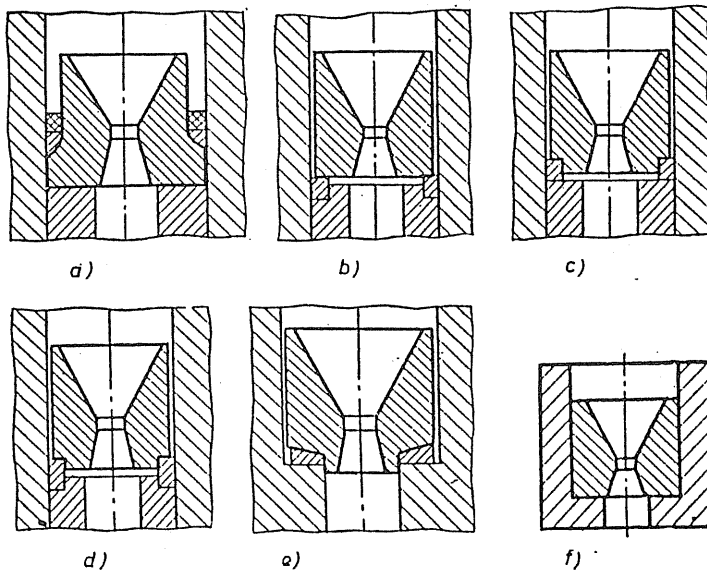
### 2.7.6.3. Matrica

U osnovi se razlikuju tri tipa matrica za hidrostatičku obradu:

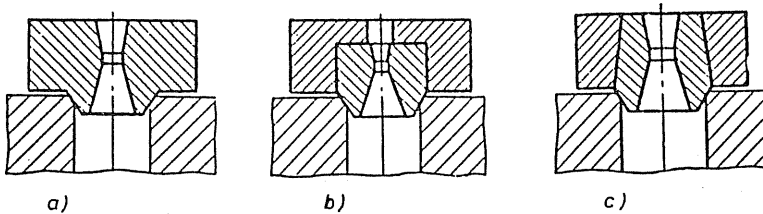
1. Matrice postavljene unutar radnog cilindra;
2. Matrice naslonjene na ivicu cilindra;
3. Matrice postavljene van radnog cilindra.

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/



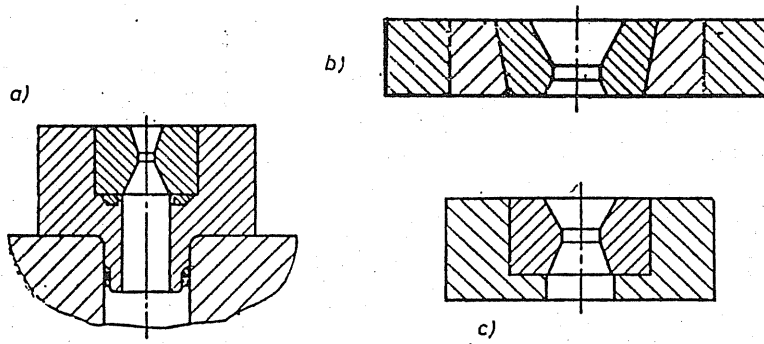
Sl.2.70. Matrica postavljena na ivicu cilindra /23/

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/

## 2.8. IZOSTATIČKO SABIJANJE PRAHA

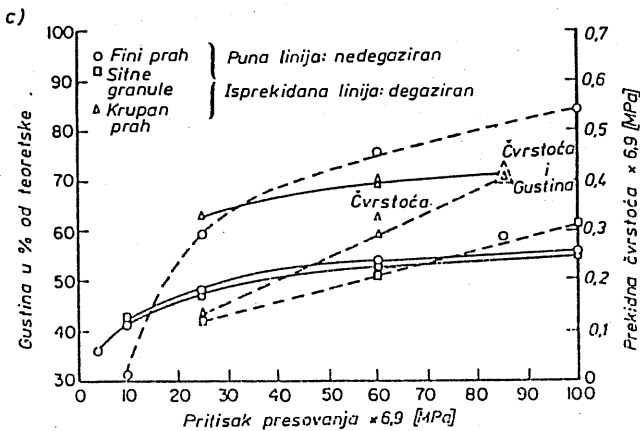
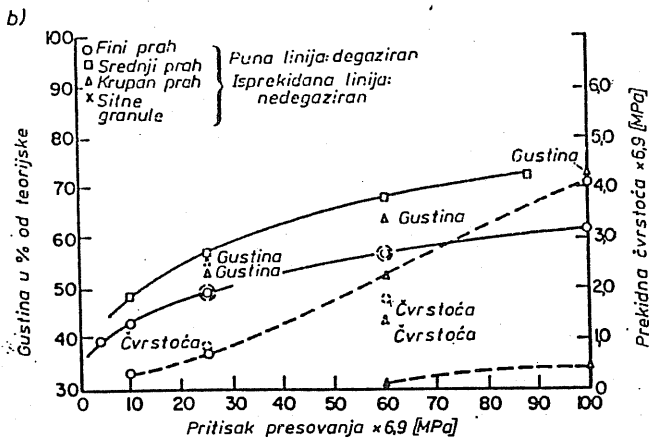
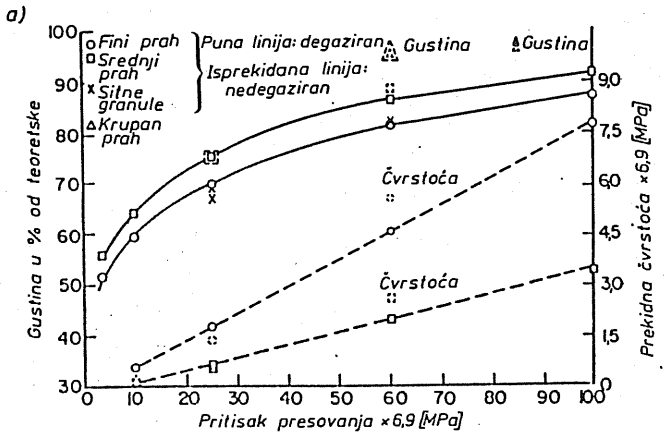
### 2.8.1. Uvod

Prvi pokušaji hidrostatičkog sabijanja praha izvodjeni su na taj način što se pripremljeni prah stavi u odgovarajući omotač od plastike ili gume, oslobodi vazduha, zatim postavi u kontejner u koji se ulije radna tečnost i potom optereti visokim pritiskom. Ovakav način presovanja praha ima određene prednosti u odnosu na presovanje praha u čvrstim alatima, jer stvara mogućnost postizanja različitih oblika obradaka u istom kontejneru. Izostatičko presovanje praha izvodi se na sobnoj temperaturi - hladno izostatičko presovanje ili na povišenoj temperaturi - toplo izostatičko presovanje. Pritisak fluida za izostatičko presovanje kreće se i do 1.500 MPa a temperatura obrade kreće se i do 2760°C. Visoki pritisak ostvaruje se pomoću specijalnih pumpi ili direktno na presi slično ostalim postupcima hidrostatičkog oblikovanja. Izostatičkim postupkom presuju se različite vrste praha: metalni i nemetalni - keramički, na bazi oskida, kompozitni materijali, materijali za elektroindustriju (poluprovodnici sa kontrolisanom poroznošću) itd.

Ponašanje praha za vreme presovanja kao i osobine dobijenog komada zavise od polaznih karakteristika praha kao što su: oblik i dimenzije čestica materijala, stanje površina čestica, distribucija faza, odnosno dodatnih materijala u masi itd. Za izradu delova od praha koriste se materijali krupnoće čestica od 1 µm do 500 µm različitih oblika, od pločastih pa do sferičnih. Jedna od karakteristika athezivne sposobnosti čestica je ukupna površina praha koja se definiše u mm<sup>2</sup>/gr. Od oblika čestica zavisi uspešnost procesa sinterovanja presovanog dela. Za matematičku analizu procesa presovanja praha uzima se da su čestice materijala sferičnog oblika.

Poseban problem kod presovanja metalnog praha predstavlja oksidacija površina čestica. Naime, da bi se obezbedilo potpuno sjedinjavanje čestica njihove površine moraju biti metalno čiste, bez oksida. Međutim, kod pojedinih vrsta metala vidljiv oksidni sloj stvara se nakon prisustva praha na vazduhu u trajanju od nekoliko sekundi. Radi toga se sirovi prah mora čuvati u izolovanoj atmosferi (argon, helijum, vakum).

Specifična površina čestica je pokazatelj mogućnosti sjedinjavanja materijala. Prah sa visokim specifičnim površinama ima niske



Sl.2.72. Osobine sirovih obradaka od praha /20/

moгуćnosti sabijanja. Da bi se povećalo hladno zavarivanje takvog praha za vreme sabijanja mora se povećati sila presovanja, odnosno pritisak.

Osnovna karakteristika praha je specifična težina rastresitog praha ( $\text{gr/cm}^3$ ) i od nje uglavnom zavisi stepen sabijanja prilikom presovanja. Međutim, za stepen sabijanja praha bitni su i drugi faktori a njihov uticaj na mogućnost presovanja generalno se može sagledati kroz sledeće uticaje:

1. Sitnije čestice praha imaju veću specifičnu površinu i veće unutrašnje trenje i niži stepen sabijanja. Tvrdnja se odnosi na čestice nepravilnog oblika a za sferični oblik čestica to ne važi.

2. U slučaju smeše krupnih (grubljih) i sitnijih (finijih) čestica postoji optimalan odnos koji daje maksimalan stepen sabijanja. To se postiže u slučaju kada sitnije čestice popunjavaju šupljine između krupnijih čestica.

Osobine sirovog obratka zavise od osobina praha (oblik zrna, veličina, stepen poroznosti) kao i od opterećenja za vreme sinterovanja. Povećanje opterećenja (pritiska) za vreme sinterovanja utiče na povećanje gustine obratka kod plastičnih materijala, međutim, uticaj pritiska na gustinu obratka je manje izražen kod dleova koji se sinte-ruju od tvrdih (nemetalnih) materijala koji nemaju izražena plastična svojstva.

Što se tiče osobina sirovog obratka dobijenog izostatičkim presovanjem, one zavise od kvaliteta praha (vrste, oblika i dimenzija i dr.) kao i od veličine pritiska. Na sl.272 su ilustracije radi dati podaci o gustini i čvrstoći sirovog obratka od čelika (a), volframa (b) i keramike (c). Dijagrami ukazuju da sa porastom hidrostatičkog pritiska raste kvalitet otpreska, s tim što je ovaj trend nešto manje izražen kod keramičkih obradaka.

### 2.8.2. Hladno izostatičko presovanje

#### 2.8.2.1. Konstrukcija uređaja

U današnje vreme za proizvodnju delova iz praha postupkom izostatičkog presovanja koriste se potpuno automatizovane, viskoproduktivne mašine. U principu se razlikuje dva tipa ovih mašina:

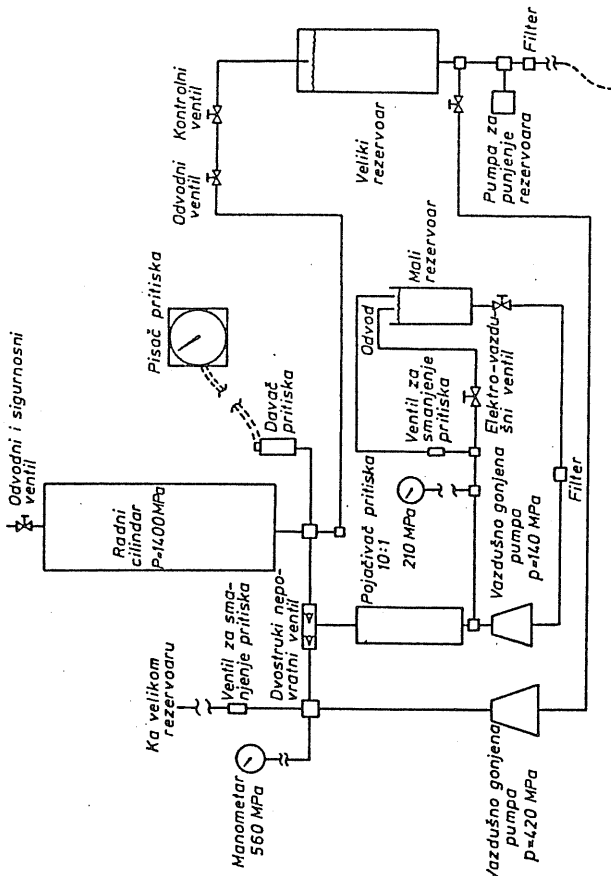
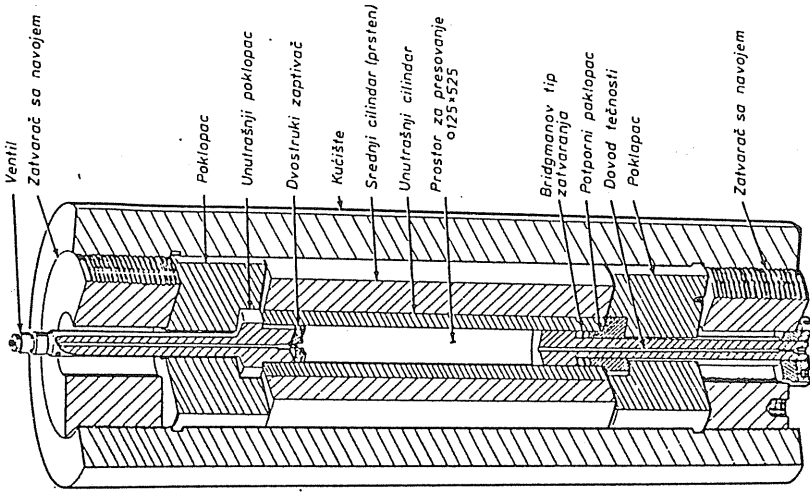
- Mašine direktnog dejstva i
- Mašine sa posebnim izvorom pritiska.

U prvom slučaju radi se o uređaju koji je sličan ostalim uređajima za hidrostatičko oblikovanje direktnog dejstva. Osnovni element alata je radni cilindar u koji se postavlja prah u omotu, zatim se naliva fluidom, zaptiva i opterećuje pomoću klipa kojeg pokreće hidraulična presa. Ovakav način izostatičkog presovanja sada se koristi uglavnom za eksperimentalna istraživanja.

Drugi tip mašine sastoji se iz dve osnovne jedinice: radnog cilindra i pumpnog postrojenja (sl.2.73.).

Konstrukcija radnog cilindra ima ključnu ulogu u funkcionisanju celog sistema izostatičkog presovanja. Radni cilindar je robusne konstrukcije ojačan od visokih pritisaka i mora biti tako konstruisan da omogućuje brzu manipulaciju sa materijalom i izratkom i kratak radni ciklus. U tom smislu razradjene su različite konstrukcije a jedno od rešenja sa svim funkcijama data je na sl.2.74.

U radni cilindar (sl.2.74.) se ubacuje prethodno pripremljeni praškasti materijal u plastičnoj foliji. Zatim se cilindar zatvara i potpuno zaptiva, uključuje se pumpa koju pokreće vazdušni motor i stvara pritisak do 420 MPa i puni cilindar radnim fluidom. Gornji ventil na cilindru je otvoren kako bi se obezbedilo odvođenje vazduha. Nakon punjenja radnog cilindra tečnošću gornji ventil se zatvara a zatim stupa u dejstvo druga vazdušno gonjena pumpa pritiska 140 MPa koja pokreće pojačivač pritiska (koeficijent pojačavanja 10:1). Tečnost visokog pritiska iz pojačivača ide u radni cilindar u kojem se obavlja proces izostatičkog presovanja. Nakon završenog sabijanja smanjuje se pritisak, prazni cilindar i obradak vadi napolje. Upravljanje procesom može biti ručno, poluautomatsko i automatsko. Zatvaranje radnog cilindra može biti sa bajonetskim sistemom, pomoću poklopaca sa navojem itd. Cilindar na sl.2.74. se zatvara zatvaračem sa navojem.



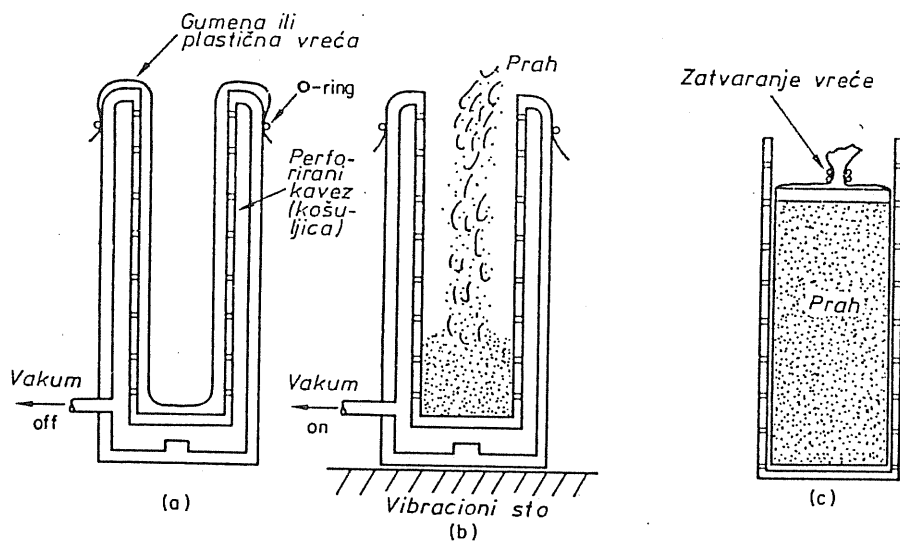
Sl.2.73. Blok šema postrojenja za izostatičko sabijanje praha /20/

Sl.2.74. Radni cilindar /20/

### 2.8.2.2. Priprema praha

Izostatičkim presovanjem mogu se izradjivati delovi složenog oblika različitih dimenzija. Veličina obradaka limitirana je veličinom radnog prostora u cilindru, dok je oblik obratka određen pomoćnim alatom - kavezom u koji se postavlja prah. Metalni ili keramički prah se najpre postavlja u plastičnu ili gumenu oblogu, zatim se oslobadja vazduha a potom se postavlja u metalni kavez (sl.2.75.) u kojem se vrši sabijanje. U principu se razlikuju dva načina izostatičkog presovanja: mokro i suvo. U slučaju mokrog postupka vreća sa prahom se postavlja u rešetkasti kavez kroz čije otvore prolazi tečnost i vrši sabijanje materijala. Posle toga otpresak se vadi napolje, plastična vreća se oslobadja obratka i ponovo puni prahom i priprema za naredno sabijanje.

Suvi postupak presovanja primenjuje se za jednostavnije oblike komada. U tom slučaju gumena obloga (master alat), čije dimenzije odgovaraju unutrašnjim dimenzijama radnog cilindra, je u direktnom kontaktu sa radnim fluidom i obezbedjuje prenošenje pritiska na prah. Ovaj postupak presovanja ima manji značaj u odnosu na mokro presovanje.

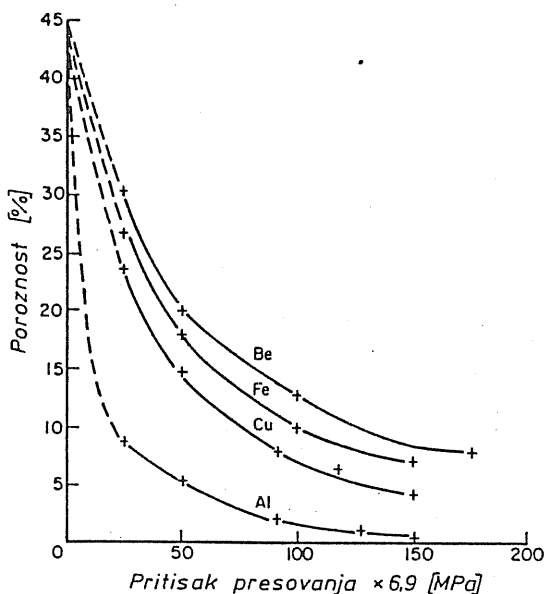


Sl.2.75. Priprema praha za mokri postupak hidrostatickog presovanja /29/

Na sl.2.75. prikazane su faze pripreme metalnog praha za postupak mokrog presovanja. U prvoj fazi (sl.2.75a.) plastična vreća se polaže u kavez i vrši vakumiranje radi boljeg naleganja. Zatim se u vreću sipa prah (sl.2.75b.) uz vibriranje radi boljeg popunjavanja vreće. Na kraju se vreća zatvara (sl.2.75c.) vezivanjem ili zavarivanjem. Nakon ovakve pripreme izvodi se hidrostatičko presovanje a oblik otpreska zavisi od oblika rešetkastog kaveza.

### 2.8.3. Osobine presovanih obradaka

Jedna od osnovnih karakteristika koja je bitna za kvalitet konačnog dela je gustina obratka posle izostatičkog presovanja, odnosno njegova poroznost. Ova karakteristika zavisi od vrste materijala i njegovih plastičnih svojstava, krupnoće čestica, pritiska radnog fluida itd. Na sl.2.76. je prikazana promena poroznosti presovanih obradaka od



Sl.2.76. Poroznost obratka posle presovanja /20/

različitih materijala (Be, Fe, Cu, Al) u zavisnosti od pritiska presovanja. Zapaža se da procenat poroznosti opada sa porastom plastičnosti



materijala i porastom pritiska presovanja. Ova promena se matematički može izraziti na sledeći način:

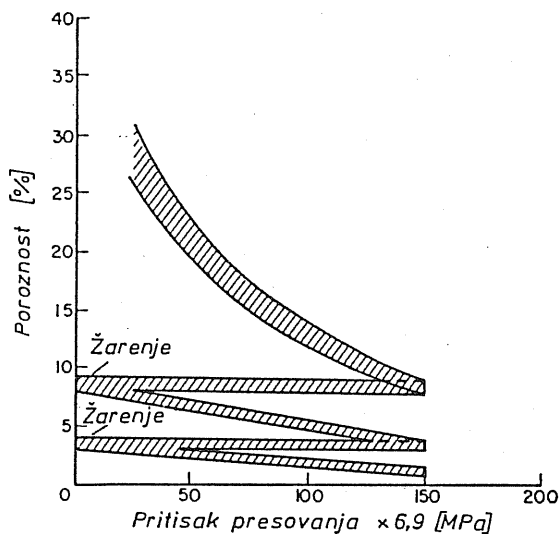
$$H = H_0 \cdot e^{-k \cdot p}$$

H - poroznost %

H<sub>0</sub> - početna poroznost %

k - faktor koji izražava plastična svojstva materijala

p - pritisak presovanja



Sl.2.77. Poroznost žarenog obratka od Be

Da poroznost opada sa povećanjem plastičnih svojstava materijala pokazuju rezultati ispitivanja obradaka od Be koji je ciklički sabijan a potom žaren na 815<sup>0</sup>C u trajanju od 4 časa. Konačna poroznost obradaka bila je 1% posle presovanja pritiskom od cca 900 MPa (sl.2.77.).

#### 2.8.4. Toplo izostatičko presovanje

Toplo izostatičko presovanje je proces istovremenog sabijanja i sinterovanja praha. Ovaj postupak je znatno složeniji od postupaka hladnog izostatičkog presovanja jer je sada potrebno izostatičke uslove

obezbediti na veoma visokim temperaturama. Toplo izostatičko presovanje izvodi se na pripremcima koji su prethodno oblikovani (obično presovani od praha) u hladnom stanju. Radna temperatura u komori postiže se pomoću sopstvenog grejača a visoki pritisak sabijanjem inertnog gasa.

Na sl.2.78. prikazan je poprečni presek komore za izostatičko presovanje u toplom stanju. Neposredno uz zid radnog prostora komore smešten je elektrootporni grejač a zatim do nejga (idući ka periferiji) postavljen je termoizolacioni sloj koji može biti od mikrokvarca. Oko ovoga sloja smeštena je spirala za hladjenje vodom. Komora je spolja obavijena plaštom. Sa gornje strane komore nalazi se zatvarač za brzu manipulaciju (postavljanje priprema i vadenje obratka) kao i vodovi visokog pritiska i vakum vod. U unutrašnjosti komore nalaze se davači pritiska i temperature. Visoki pritisak u komori postiže se komprimovanjem helijuma pomoću višestepenog klipnog kompresora. Ovakva konstrukcija komore, sa gasom kao radnim fluidom, može se koristiti za izostatičko presovanje praha sa pritiskom do 350 MPa na temperaturi do 1650°C. Za više pritiske i temperature primenjuju se drugi materijali za prenos pritiska i temperature.

Prethodno presovanje materijala odnosno praha vrši se u hladnom stanju primenom različitih postupaka, zavisno od vrste materijala, oblika i veličine zrna. Prah sa krupnijim česticama može se umesto predpresovanja vibrirati u master oblozi u kojoj se vrši toplo presovanje. Prah sa sitnijom strukturom mora se predpresovati kako bi se postigla određena gustina radi smanjenja promene dimenzija za vreme sinterovanja.

Prethodno presovanje izvodi se primenom sledećih postupaka:

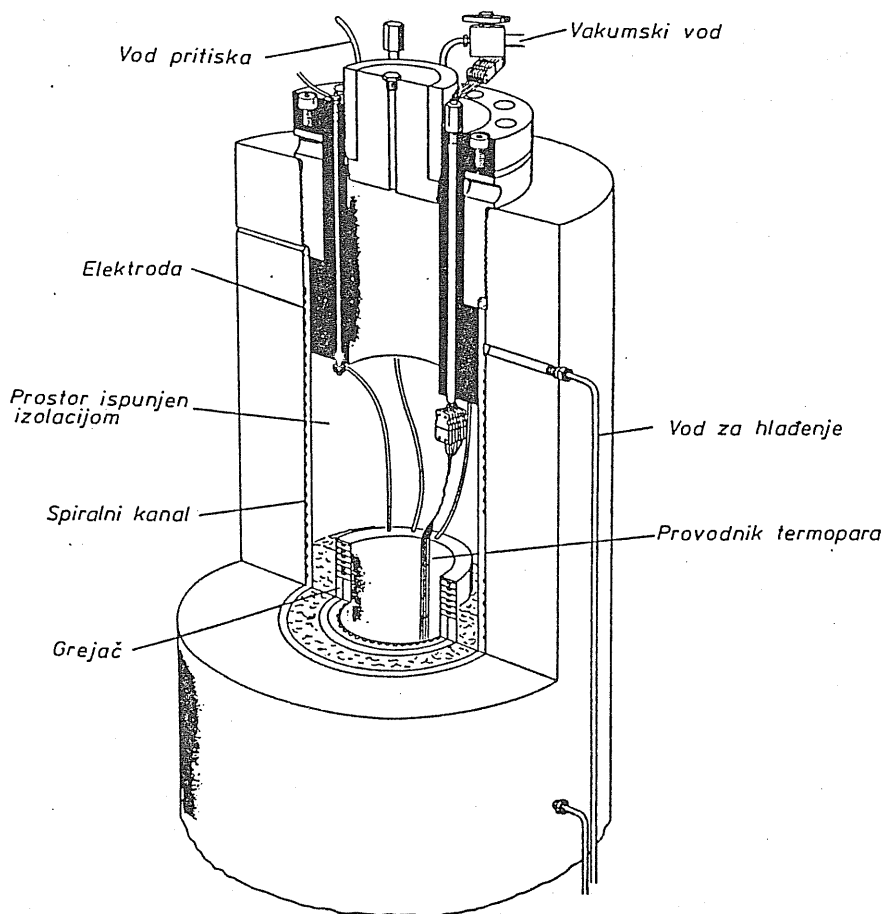
- Lako sabijanje u alatu za sinterovanje;
- Vibriranje;
- Presovanje u alatu;
- Hidrostatičko presovanje;
- Visokobrzinsko presovanje.

Popunjavanje alata sabijanjem praha primenjuje se za jednostavne, obično cilindrične obratke koji se izradjuju od praha sitnih čestica. Alat se naizmenično puni i sabija sve do konačnog popunjavanja ukupnog prostora. Sabijanje se vrši alatom sa ravnom čeonom površinom.

Vibriranje se primenjuje za prah sa krupnijim česticama. Vibriranje se obično izvodi u alatu za sinterovanje.

Predpresovanje praha može se vršiti u konvencionalnom alatu čiji oblik i dimenzije zavise od oblika i dimenzija obratka. Presovanje se

izvodi obično na hidrauličnoj presi. Za ovu vrstu predpresovanja bitan je odnos dimenzija zbog vadjenja obratka.



Sl. 2.78. Komora za toplo presovanje /20/

Izostatičko hladno presovanje je veoma pogodan način predoblikovanja praša. Ovaj način predpresovanja primenjuje se za različite sastave kompozita i različite veličine zrna. U jednom radnom cilindru moguće je predoblikovanje različitih oblika obradaka s tim što je potrebno menjati master oblogu. Izostatičkim hladnim predpresovanjem postiže se

i do 80% teoretske gustine materijala. Ovim postupkom predoblikuju se keramički materijali, berilijum, niobijum, nobijum-kandijum legure, grafit  $\text{UO}_2$  itd.

Visokobrzinsko sabijanje praha eksplozijom primenjuje se u slučaju potrebe za stvaranjem visoke gustine obratka koji se sinteruje na relativno niskoj temperaturi (do  $1370^\circ\text{C}$  do  $1590^\circ\text{C}$ ). Ovim postupkom vrši se hladno predoblikovanje praha od legure  $\text{W} - \text{UO}_2$  i  $\text{UO}_2 - \text{Be}$ .

### 3. VALJANJE

#### 3.1. UVOD, OSNOVNE KARAKTERISTIKE, PODELA

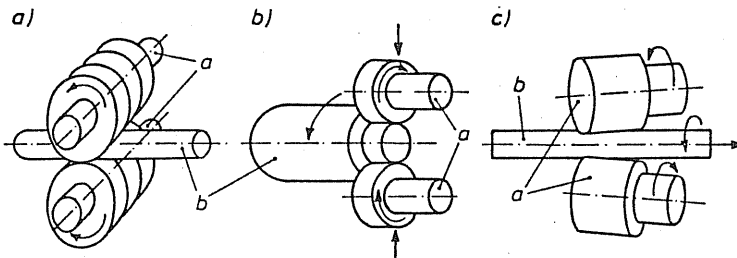
Valjanje je kontinualni ili diskontinualni proces deformisanja kod koga se koristi jedan ili više okretnih alata (valjaka). Preko ovih alata materijalu se saopštavaju pritisni naponi koji dovode do njegovog tečenja tj. deformisanja.

Valjanje je od izuzetnog značaja kako u oblasti dobijanja polufabrikata tako i u oblasti celokupne metaloprerađivačke industrije. Prema nekim podacima / 2 /, od ukupne proizvodnje čelika 90% se obrađuje, u ranijoj ili kasnijoj fazi, tehnologijom valjanja. Slično je i sa ostalim metalnim materijalima. Slobodno se stoga može reći da je valjanje najrasprostranjeniji proces obrade metala plastičnom deformacijom.

Najviše se valjaju čelični materijali ali značajno mesto zauzimaju i procesi valjanja bakra, obojenih metala i lakih metala.

Prema kinematici odvijanja procesa postoje sledeće vrste valjanja (sl.3.1.):

- a - uzdužno
- b - poprečno
- c - koso



Sl.3.1. Vrste valjanja /1/

Kod uzdužnog valjanja (sl.3.1.a) materijal se kreće u pravcu normalnom na ose valjaka. Pri tome materijal izvodi pravolinijsko kretanje.

Poprečno valjanje okarakterisano je obrtnim kretanjem materijala koji se valja, bez njegovog aksijalnog kretanja. Alat (valjci) pored obrtnog može vršiti i radijalno kretanje (sl.3.1b).

Koso valjanje predstavlja kombinaciju prethodna dva vida valjanja. Kod kosog valjanja osa materijala je pod odredjenim uglom u odnosu na osu valjaka. Materijal se kreće uzdužno ali se istovremeno okreće i oko svoje ose (sl.3.1c).

Moguća je i podela valjanja prema vrsti proizvoda koji se valjanjem dobijaju. Prema vrsti valjanih proizvoda, valjanje je moguće podeliti na (sl.3.2.):

- a) valjanje polufabrikata
  - b) valjanje gotovih valjaoničkih proizvoda
  - c) valjanje mašinskih delova
- a) Polufabrikati koji se dobijaju valjanjem su: blumovi, slabovi, gredice i platine.

Svi ovi polufabrikati imaju kvadratni ili pravougaoni poprečni presek i različite su dužine.

Veličina poprečnog preseka pojedinih vrsta polufabrikata su:

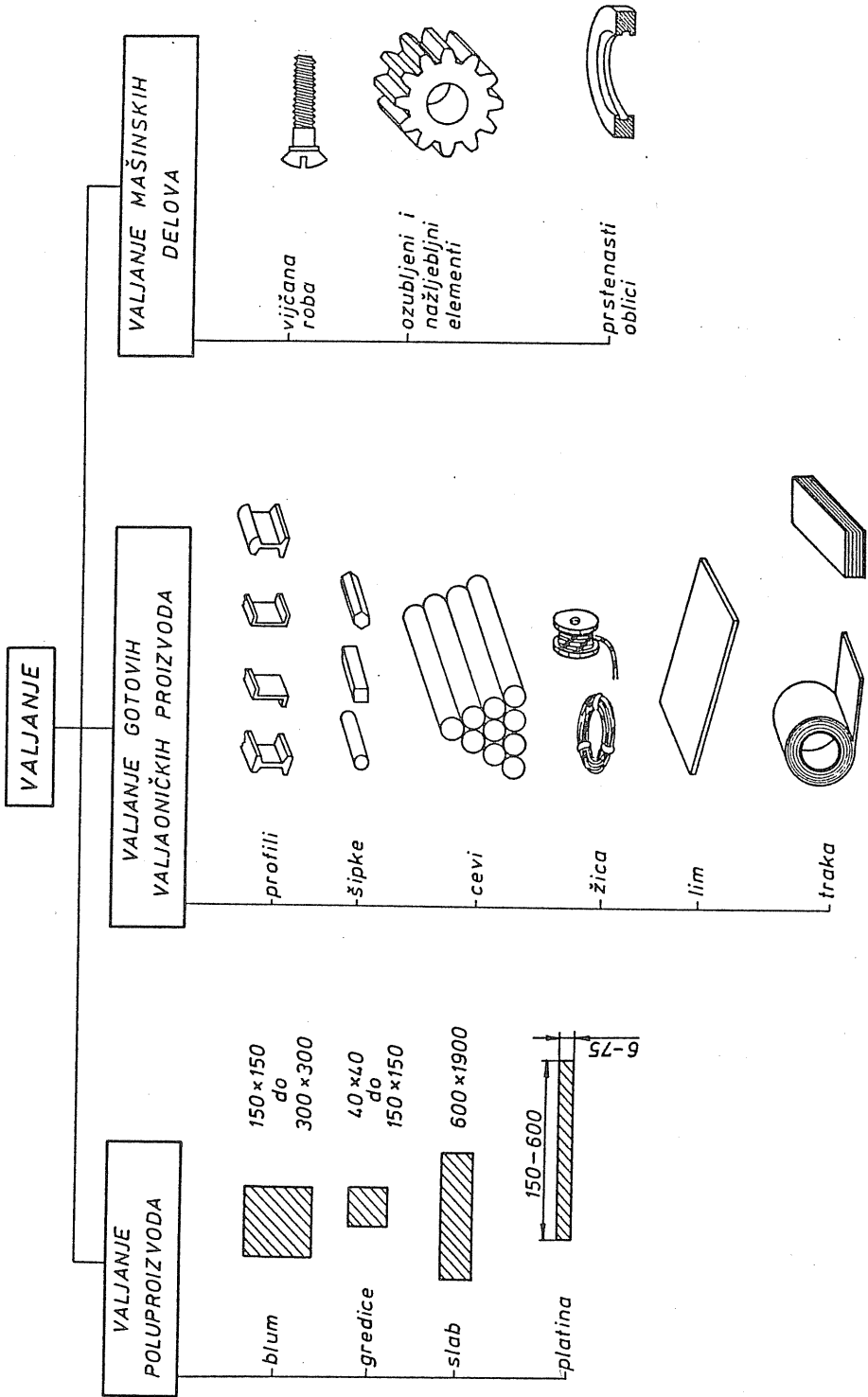
- blumovi: 150 x 150 mm do 300 x 300 mm
- gredice: 40 x 40 mm do 150 x 150 mm
- slabovi: do 600 x 1900 mm
- platine: 6 x 150 mm do 75 - 600 mm.

Ovi polufabrikati koriste se kao polazni materijal za valjanje gotovih valjaoničkih proizvoda.

b) Gotovi valjaonički proizvodi su: šipke, profili, cevi, žica, limovi i trake. Ovi proizvodi su gotovi u valjaoničkom smislu jer se njihova dalja obrada ne vrši u valjaonicama. U strogom smislu reči to još nisu gotovi proizvodi jer je za njihovo korišćenje neophodna dodatna obrada. Tako npr. da bi se limena tabla mogla koristiti kao finalni deo karoserije automobila neophodno je da se izvrše operacije razdvajanja i dubokog izvlačenja.

c) Mašinski delovi mogu takodje da se izradjuju valjanjem.

Tu pre svega spadaju: vijčana roba, ozubljeni i nažljebljeni elementi raznih oblika i veličina, prstenasti oblici i dr. Ovi proizvodi u procesu valjanja dobijaju svoj konačni geometrijski oblik a za njihovu konačnu ugradnju (korišćenje) nije potrebna nikakva naknadna obrada sem, eventualno, obrada nekih pomoćnih površina.



Sl.3.2. Podela valjanja

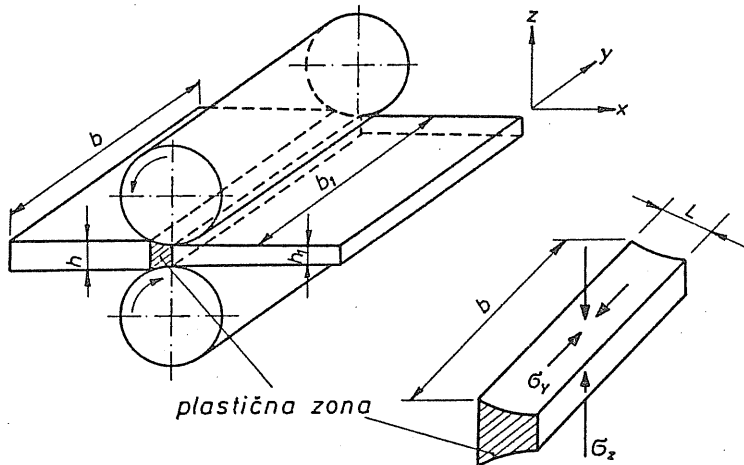
U okviru poglavlja 3. prezentirani su neki od najznačajnijih i najviše primenjivanih procesa valjanja gotovih valjaoničkih proizvoda (lim, trake, cevi, profili) dok je valjanje mašinskih delova (vijčana roba, ozubljeni i nažljebljeni elementi i prstenasti oblici) obradjeno u poglavlju 4.

Pre toga dati su osnovi opšte teorije valjanja.

### 3.2. ANALIZA PROCESA VALJANJA

#### 3.2.1. Odvijanje procesa, uslov valjanja

Osnovni pojmovi iz teorije valjanja biće prezentirani na primeru ravnog uzdužnog valjanja (sl.3.3. i 3.4.). Ova vrsta valjanja je daleko najzastupljenija u okviru celokupne tehnologije valjanja. Na početku valjanja materijal se postavi ispred valjaka koji se obrću u naznačenom smeru. Usled sila trenja materijal se od strane valjaka uvlači u prostor između njih gde se odvija deformacija. Pri tome se materijalu smanjuje debljina a povećava dužina.

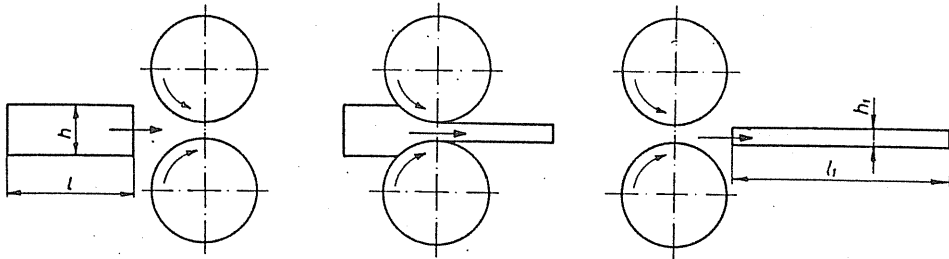


Sl.3.3. Proces ravnog uzdužnog valjanja

Proces je završen kada sav materijal sa leve strane valjaka prodje kroz valjke na desnu stranu (sl.3.4.).

Da bi proces valjanja mogao početi neophodno je da na materijal deluju sile koje će ga uvući u zonu deformisanja. Na sl.3.5. prikazan je trenutak kada materijal dolazi u dodir sa valjcima (analizira se samo gornja polovina zahvata).





Sl.3.4. Faze procesa valjanja

Na materijal u tom trenutku deluju dve sile:

- pritisna sila od strane valjka ( $F_N$ )
- sila trenja koja se pojavljuje izmedju valjaka koji se obrću i materijala ( $F_T$ )

Horizontalne komponente ovih sila iznose:

$$F_Z = F_N \sin \alpha \quad (3.1.)$$

$$F_E = F_T \cos \alpha \quad (3.2.)$$

Sa slike se uočava da je horizontalna komponenta sile trenja ta koja uvlači materijal u zonu deformisanja. Izmedju sile trenja  $F_T$  i sile  $F_N$  postoji odnos:

$$F_T = \mu F_N \quad (3.3.)$$

Da bi proces mogao da počne neophodno je da je ispunjen sledeći uslov:

$$F_E > F_Z$$

$$F_T \cos \alpha > F_N \sin \alpha$$

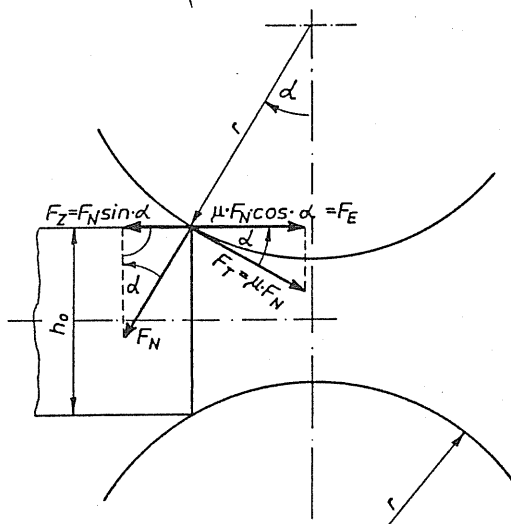
ili, uzimajući u obzir (3.3.):

$$\mu F_N \cos \alpha > F_N \sin \alpha$$

$$\mu > \operatorname{tg} \alpha \quad (3.4.)$$

( $\mu$  - koeficijent trenja,  $\alpha$  - ugao zahvata)

Relacija (3.4.) naziva se uslov valjanja.



Sl.3.5. Uslov valjanja

### 3.2.2. Deformacije i karakteristike zone deformacije

Prilikom prolaska kroz valjke materijalu se smanjuje debljina a povećava dužina i širina. Pri tome je moguće definisati sledeće pojmove vezane za geometrijske veličine valjanog materijala:

- apsolutno smanjenje debljine

$$\Delta h = h - h_1$$

- relativno smanjenje debljine

$$\epsilon_H = \frac{\Delta h}{h} = \frac{h-h_1}{h} \cdot 100\%$$

- logaritamska deformacija debljine

$$\phi_H = \ln \frac{h}{h_1}$$

- logaritamska deformacija dužine

$$\phi_1 = \ln \frac{l_1}{l}$$

(Oznake su u skladu sa sl.3.3. i 3.4.).

Takodje se mogu definisati sledeći koeficijenti:

- koeficijent smanjenja debljine

$$\frac{1}{\eta} = \frac{h}{h_1}$$

- koeficijent širenja:

$$\beta = \frac{b_1}{b}$$

- koeficijent izduženja:

$$\lambda = \frac{l_1}{l}$$

Zbog konstantnosti zapremine važi:

$$\eta \cdot \beta \cdot \lambda = \frac{h_1}{h} \cdot \frac{b_1}{b} \cdot \frac{l_1}{l} = \frac{V_1}{V} = 1$$

(V, V<sub>1</sub> - zapremine materijala pre i posle valjanja).

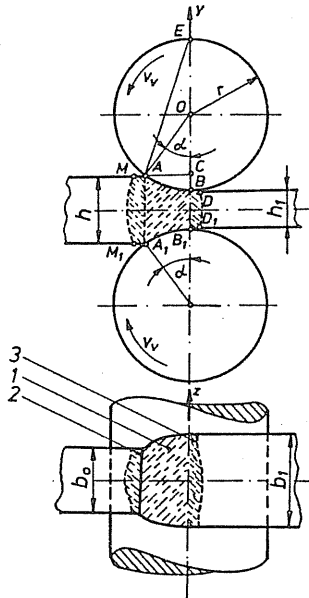
Geometrijski pojas deformacije ograničen je na zonu A-B-B<sub>1</sub>-A<sub>1</sub> (sl. 3.6.). U toj zoni dolazi do smanjenja debljine materijala. Ispred te zone nalazi se tzv. vankontaktne zone deformacije ispred valjaka (AMM<sub>1</sub>A<sub>1</sub>) a iza te zone je vankontaktne zone deformacije iza valjaka (BDD<sub>1</sub>B<sub>1</sub>).

Stvarni pojas deformacije definiše se kao zbir ove tri zone (1+2+3), i on je veći od geometrijskog pojasa deformacije (1) za 1,2-1,7 puta.

Geometrijski pojas deformacije određen je uglom zahvata, lukom zahvata i dužinom.

Ugao zahvata ( $\alpha$ ) predstavlja ugao na kome su valjak i materijal u direktnom kontaktu. Ovaj ugao iznosi (sl.3.6.):

$$\cos \alpha = 1 - \frac{h-h_1}{2r} = 1 - \frac{\Delta h}{D} \quad (3.5.)$$



Sl.3.6. Geometrijski parametri procesa valjanja /6/

Iz sličnosti trouglova ABE i ABC sledi:

$$\frac{AB}{BC} = \frac{BE}{AB}$$

$$AB = \sqrt{BE \cdot BC} = \sqrt{2r \frac{\Delta h}{2}} = \sqrt{r \Delta h} \quad (3.6.)$$

Izraz (3.6.) predstavlja dužinu kontaktne površine. Kontakt materijala i valjka se ostvaruje na luku zahvata:

$$l_s = r \cdot \alpha \quad (3.7.)$$

Radi pojednostavljenja u proračunima približno se mogu izjednačiti (3.6.) i (3.7.)

Dužina geometrijske zone deformacije određuje se iz trougla ABC (sl.3.6.)

$$AC = \sqrt{r\Delta h - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2}$$

Veličina  $\left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2$  je dovoljno mala u odnosu na drugu podkorenu veličinu pa se može zanemariti. To znači da se dužina geometrijske zone može sa dovoljnom tačnošću izjednačiti sa dužinom luka:

$$AC = l_s \quad (3.8.)$$

U procesu valjanja dolazi do određenog širenja materijala. Pod širenjem se podrazumeva razlika između konačne i početne širine valjanog materijala. Širenje u većini slučajeva predstavlja negativnu pojavu jer smanjuje izduženje pri valjanju.

Postoji veći broj matematičkih izraza za izračunavanje veličine širenja. Ovde će biti data dva izraza:

$$a) \quad \Delta b = \left(1 + \frac{\Delta h}{h}\right) \left(\sqrt{r\Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu}\right) \frac{\Delta h}{h} \quad (\text{Gupkin}) \quad (3.9.)$$

$$b) \quad \Delta b = 0,66 \cdot \frac{\Delta h}{h_0 + h_1} \sqrt{r\Delta h} \quad (\text{Zolotnikov}) \quad (3.10.)$$

Ipak, veličina širenja je kod većine procesa valjanja zanemarljiva pa se u matematičkim proračunima najčešće ne uzima u obzir.

### 3.2.3. Kinematika u zoni deformacije

Brzine čestica materijala u zoni deformacije su različite u različitim presecima zone deformacije. Ako se pretpostavi da nema širenja materijala ( $b_0 = b_1$ ), što je u najvećem broju slučajeva realna pretpostavka, brzina materijala u X-pravcu iznosi (sl.3.7.):

$$V = V_0 \cdot \frac{h_0}{h} \quad (3.11.)$$

$V$  - brzina u proizvoljnom preseku zone deformisanja

$h$  - debljina zone deformisanja u tom preseku

$V_0$  - brzina na ulazu u zonu deformisanja

$h_0$  - početna debljina materijala.

Istovremeno, horizontalna komponenta obimne brzine valjka iznosi:

$$V_{uH} = V_u \cdot \cos\beta \quad (3.12.)$$

$V_u$  - obimna brzina valjka.

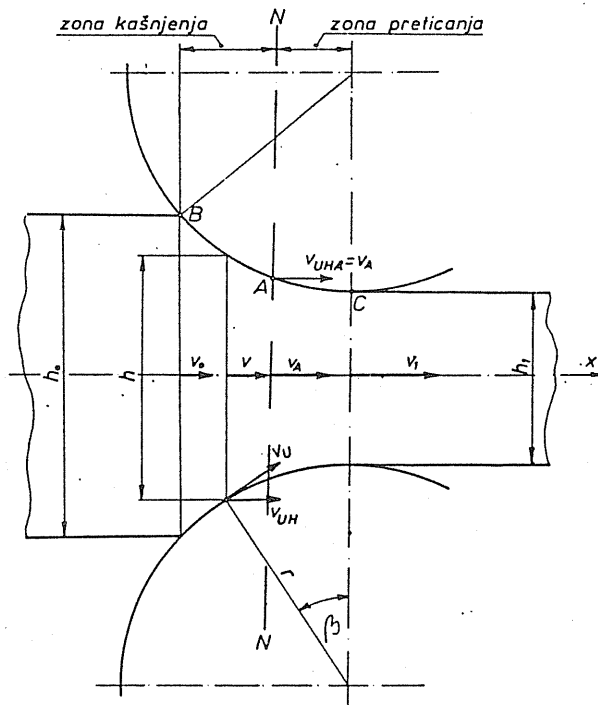
Odnos brzine kretanja čestica materijala i obimne brzine valjka je u pojedinim tačkama kontakta valjak-materijal različit.

Samo u jednom preseku zone deformisanja horizontalna komponenta brzine valjka ( $V_{uH}$ ) i brzina kretanja čestica materijala ( $V$ ) su iste. To je tzv. neutralni presek (N-N). U tom preseku važi:

$$V_{uHA} = V_A \quad (3.13.)$$

$V_{uHA}$  - horizontalna komponenta obimne brzine valjka u tački A

$V_A$  - brzina materijala u tački A, tj. preseku N-N.



Sl.3.7. Kinematika u zoni deformacije

Neutralna linija deli zonu deformisanja na dva dela. Na delu luka kontakta BA obimna brzina valjka je veća od brzine materijala (sl.3.7.). To je tzv. zona kašnjenja a relativna brzina u toj zoni iznosi:

$$V_{\text{Rel}} = V_u \cos \beta - V > 0 \quad (3.14.)$$

U ovoj zoni trenje koje nastaje kao rezultat relativne brzine između valjka i materijala, igra pozitivnu, aktivnu ulogu jer se zahvaljujući njemu materijal uvlači u prostor između valjaka. Na luku od neutralne linije do izlaska iz zahvata (luk AC), materijal ima veću brzinu od obimne brzine valjka i tu važi:

$$V_{\text{Rel}} = V_u \cos \beta - V < 0$$

Na ovom delu kontaktne površine trenje igra negativnu ulogu jer povećava potrebni obrtni momenat tj. deformacioni rad valjanja. Oblast od neutralne linije do izlaska materijala iz zahvata naziva se zona preticanja.

#### 3.2.4. Naponi u zoni deformacije

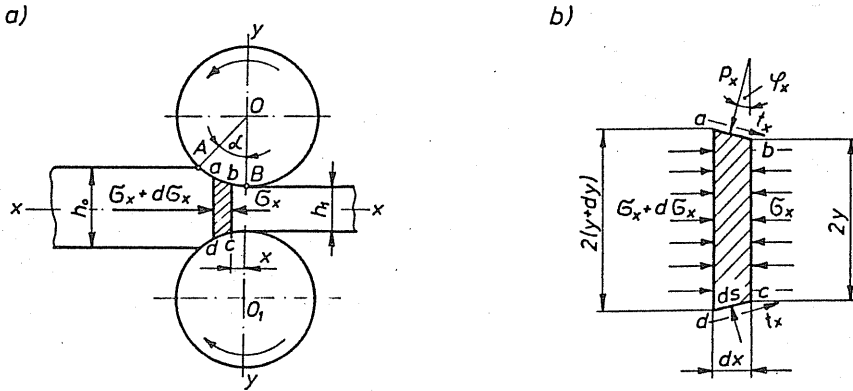
Poznavanje naponskog stanja u procesu valjanja je od suštinskog značaja kako sa stanovišta samog materijala koji se deformiše, njegovog ponašanja u toku procesa, njegove deformabilnosti, tako i sa stanovišta konstrukcije alata i mašina za valjanje i projektovanje celokupnog procesa valjanja.

Postoji više pristupa u analizi naponskog stanja u procesu valjanja a ovde će biti prikazan najčešće primenjivan način koji bazira na metodi preseka.

Na sl.3.8a prikazan je proces valjanja pri čemu je iz zone deformacije izdvojen element koji se nalazi na rastojanju "X" od ose 0-0<sub>1</sub>. Debljina elementa je "dx". Na sl.3.8b prikazan je taj izdvojeni element (a,b,c,d) uz naznačene geometrijske veličine kao i naponi koji deluju na pojedine površine tog elementa.

Pored pritiskih napona u materijalu u X pravcu ( $\sigma_x$  i  $d\sigma_x$ ), pritiska "p<sub>x</sub>" uzduž luka zahvata, na izdvojeni element deluje i specifična sila trenja i to tangencijalno na elementu luka "ds".

Iz uslova ravnoteže svih sila koje deluju na element u horizontalnom



Sl.3.8. Analiza naponskog stanja u procesu valjanja /18/  
 pravcu dobija se inicijalni oblik diferencijalne jednačine ravnoteže:

$$2(\sigma_x + d\sigma_x)(y+dy) - 2y\sigma_x - 2p_x \operatorname{tg}\phi_x dx + 2t_x dx = 0 \quad (3.15.)$$

Uzimajući u obzir da je

$$\operatorname{tg}\phi_x = \frac{dy}{dx}$$

nakon sredjivanja se dobija:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{p_x - \sigma_x}{y} \frac{dy}{dx} + \frac{t_x}{y} = 0 \quad (3.16.)$$

Uočava se da treći član gornje jednačine ima dva predznaka (+ i -) Ovaj član reprezentuje uticaj trenja na veličinu i raspored napona. Kako je u prethodnom poglavlju navedeno, sa stanovišta brzina u zoni deformisanja postoje tri oblasti: zona kašnjenja, neutralna zona i zona preticanja. U neutralnoj zoni nema relativnog kretanja između materijala i valjka pa je trenje jednako nuli. To znači da je u toj zoni član  $t_x/y = 0$ . U zoni kašnjenja predznak trećeg člana jednačine (3.16.) je pozitivan a u zoni preticanja negativan.

Jednačina plastičnosti za ovaj slučaj glasi:

$$p_x - \sigma_x = k$$



tj.

$$dp_x = d\sigma x$$

Zamenom gornje jednakosti u jednačinu (3.16.) dobija se:

$$\frac{dp_x}{dx} - \frac{k}{y} \frac{dy}{dx} \pm \frac{t_x}{y} = 0 \quad (3.17.)$$

U gornjoj jednačini postoje dve promenljive (" $p_x$ " i " $t_x$ "). Moguće je uspostaviti sledeću vezi izmedju njih:

$$t_x = \mu p_x$$

Gornji izraz predstavlja zakon Coulombovog trenja.

Sa gornjom relacijom jednačina (3.17.) poprima oblik:

$$\frac{dp_x}{dx} - \frac{k}{y} \frac{dy}{dx} \pm \frac{\mu}{y} \cdot p_x = 0 \quad (3.18.)$$

Opšte rešenje ove jednačine je:

$$p_x = e^{\int \frac{\mu}{y} dx} \left| C + \int \frac{K}{y} e^{\pm \int \frac{\mu}{y} dx} \cdot dy \right| \quad (3.19.)$$

U gornjoj jednačini konstanta "C" zavisi od graničnih uslova. Rešenje opšte jednačine (3.19.) dobija se na sledeći način: luk zahvata "1" aproksimira se tetivom AB a zatim se uspostavlja sledeća veza (videti sl. 3.9.

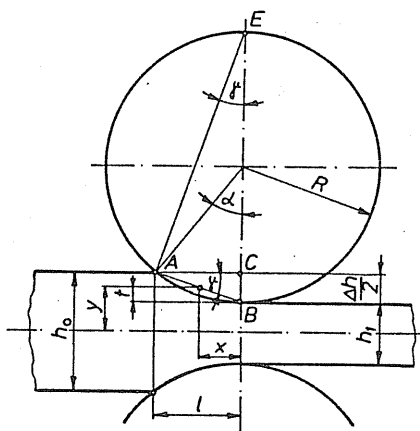
$$y = \frac{h_1}{2} + t \quad (3.20.)$$

$$\frac{t}{x} = \frac{\Delta h}{2l}$$

$$t = \frac{\Delta h}{2l} \cdot x$$

zamenom "t" u (3.20.) dobija se:

$$y = \frac{h_1}{2} + \frac{\Delta h}{2l} \cdot x \quad (3.21.)$$



Sl.3.9. Geometrijski elementi zone deformisanja

tj.

$$dx = dy \frac{2l}{\Delta h}$$

Uvršćavanjem veličine "dx" u (3.19.) dobija se:

$$p_x = e^{\pm \int \frac{\delta}{y} dy} \left| C + \int \frac{k}{y} \cdot e^{\pm \int \frac{\delta}{y} dy} \cdot dy \right| \quad (3.22.)$$

pri čemu je:

$$\delta = \frac{2l \cdot \mu}{\Delta h}$$

Daljom transformacijom (3.22) dobija se:

$$p_x = e^{\pm \delta \ln y} \left| C + \int \frac{k}{y} \cdot e^{\pm \delta \ln y} \cdot dy \right| \quad (3.23.)$$

Kako je:

$$e^{\pm \delta \ln y} = y^{\pm \delta}$$

to se dobijaju sledeće vrednosti za veličinu pritiska na kontaktu valjak - materijal:

$$p_x = C_0 y^{-\delta} + \frac{k}{\delta} \quad (3.24.)$$

za zonu kašnjenja i:

$$p_x = C_1 y^\delta - \frac{k}{\delta} \quad (3.25.)$$

za zonu preticanja.

Konstante u gornjim jednačinama dobijaju se iz graničnih uslova. Tako je za:

$$y = \frac{h_0}{2} \quad \text{i} \quad y = \frac{h_1}{2}$$

vrednost  $\sigma_x = 0$ . Uvrščavajući ovu vrednost u jednačinu plastičnosti:

$$p_x - \sigma_x = k$$

dobija se da je za  $y = \frac{h_0}{2}$  i  $y = \frac{h_1}{2}$  (ulazni i izlazni presek zone deformisanja):

$$p_x = k$$

Na osnovu toga dobijaju se konstante iz jednačine (3.24.) i (3.25.):

$$C_0 = (p_x - \frac{k}{\delta}) \cdot y^\delta \quad C_1 = (p_x + \frac{k}{\delta}) \cdot y^{-\delta}$$

$$C_0 = k(1 - \frac{1}{\delta}) \cdot (\frac{h_0}{2})^\delta \quad C_1 = k(1 + \frac{1}{\delta}) \cdot (\frac{h_1}{2})^{-\delta}$$

Zamenjujući ove konstante u (3.24.) i (3.25.) i zamenom  $y = \frac{h_x}{2}$  dobija se konačna vrednost za raspored pritiska na kontaktu valjak - materijal:

$$p_x = \frac{k}{\delta} \left| (\delta - 1) \left( \frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + 1 \right| \quad \text{za zonu kašnjenja} \quad (3.26)$$

$$p_x = \frac{k}{\delta} \left| (\delta + 1) \left( \frac{h_x}{h_1} \right)^\delta - 1 \right| \quad \text{za zonu preticanja} \quad (3.27.)$$

Kako je već rečeno, na ulazu ( $y = h_0/2$ ) i na izlazu ( $y = h_1/2$ ) iz zone deformisanja vrednost  $p_x = k$ . U svim ostalim tačkama kontakta  $p_x > k$ . Maksimalna vrednost " $p_x$ " max nalazi se u preseku dve krive (3.26.) i (3.27.). U isto vreme taj presek predstavlja i neutralnu liniju, tj. liniju na kojoj je relativna brzina valjka i materijala jednaka nuli.

Neutralni presek dobija se izjednačavanjem (3.26.) i (3.27.):

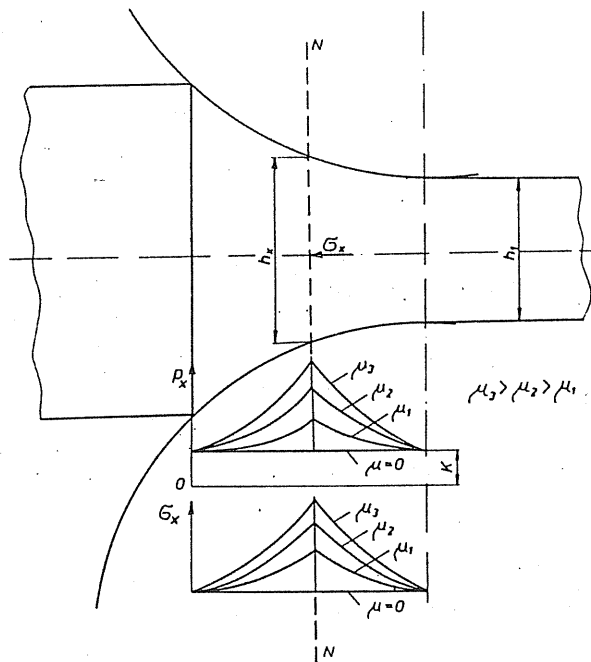
$$(\delta - 1) \left( \frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + 1 = (\delta + 1) \left( \frac{h_x}{h_1} \right)^{\delta - 1}$$

Iz gornje jednačine moguće je dobiti vrednost " $h_x$ ":

$$h_x = h_n = h_1 \left| \frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \left( \frac{h_0}{h_1} \right)^\delta}}{\delta + 1} \right|^{\frac{1}{\delta}} \quad (3.28.)$$

Izraz (3.28.) predstavlja visinu zone deformisanja u preseku gde se pojavljuje maksimalni pritisak " $p_x$  max". Istovremeno, taj presek je i neutralni presek.

Na sl.3.10. prikazan je raspored pritiska " $p_x$ " na valjak uzduž luka zahvata za razne vrednosti koeficijenta trenja  $\mu$ . Uočava se da je za hipotetički slučaj  $\mu=0$  raspored " $p_x$ " konstantan uzduž luka zahvata. Slučaj je hipotetičan jer u takvim uslovima nije uopšte moguć proces va-ljanja kako je to pokazano u odeljku 3.2.1.



Sl.3.10. Raspored pritiska na kontaktu valjak-materijal i aksijalnog napona ( $\sigma_x$ ) u materijalu

Vrednost napona " $\sigma_x$ " koji deluje u horizontalnom pravcu u presecima zone deformisanja takodje je data na sl.3.10. Uočava se da je raspored " $p_x$ " i " $\sigma_x$ " identičan, s tim što je apsolutna vrednost napona " $\sigma_x$ " manja od " $p_x$ " za iznos efektivnog napona "k". To proističe iz jednačine plastičnosti ( $p_x - \sigma_x = K$ ).

Prezentirana analiza bazirana je na sledećim pretpostavkama:

- trenje se opisuje Coulombovim zakonom
- problem je analiziran kao dvoosno-naponsko napregnuti sistem
- napon " $\sigma_x$ " je isti po visini poprečnog preseka (za  $x = \text{const}$ )
- ojačanje materijala nije uzeto u obzir
- važi jednačina plastičnosti u njenom najjednostavnijem obliku.

### 3.2.5. Deformaciona sila

Poznavajući raspored kontaktnog pritiska " $p_x$ " uzduž luka zahvata moguće je odrediti srednji specifični pritisak a preko njega i silu koja deluje na valjak:

$$F = A \cdot p_{sr}$$

F - sila na valjak

A - površina dodira izmedju valjka i materijala

$p_{sr}$  - srednji specifični pritisak izmedju valjka i materijala

Površina dodira se može odrediti kao (sl.3.11.):

$$A = l \frac{b_0 + b_1}{2}$$

$b_0$  - širina na ulazu

$b_1$  - širina na izlazu

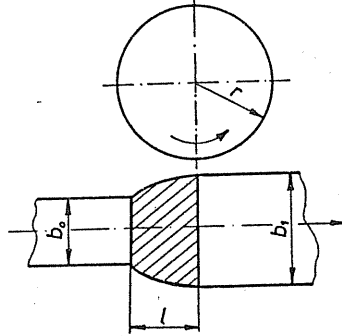
l - luk zahvata

Ako je  $l = \sqrt{r\Delta h}$ , (videti (3.7.)),

$$A = \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{r\Delta h}$$

Sila na valjak se dobija kao:

$$F = \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{r\Delta h} \cdot p_{sr} \quad (3.29.)$$



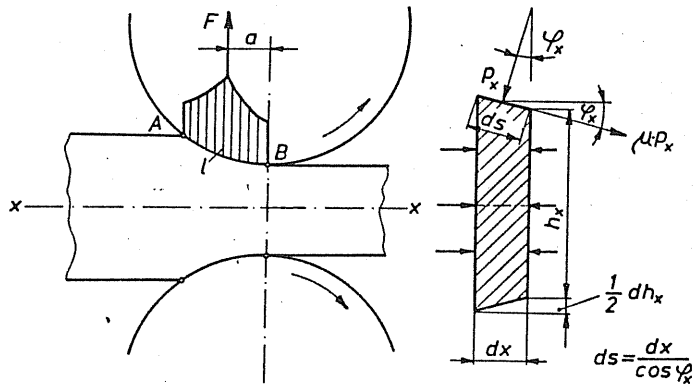
Sl.3.11. Površina dodira

Sa sl.3.12. dobija se da je:

$$F = \frac{b_0 + b_1}{2} \int_0^l (p_x \cos \phi_x \pm \mu p_x \sin \phi_x) ds = \frac{b_0 + b_1}{2} \int_0^l p_x (\cos \phi_x \pm \mu \sin \phi_x) \frac{dx}{\cos \phi_x} \cong$$

$$\cong \frac{b_0 + b_1}{2} \int_0^l p_x dx \quad (3.29.)$$

(predpostavka je da je proizvod  $\mu \cdot \operatorname{tg} \phi_x \cong 0$ )



Sl.3.12. Sila na valjak

$$dx = \frac{1}{\Delta h} \cdot dh_x$$

Zamenom vrednosti za "dx" kao i vrednosti "p<sub>x</sub>" [(3.26.) i (3.27.)] u jednačinu, (3.29.) dobija se:

$$F = \frac{b_o + b_1}{2} \cdot \frac{1}{\Delta h} \cdot \frac{k}{\delta} \left\{ \int_{h_n}^{h_o} \left[ (\delta - 1) \left( \frac{h_o}{h_x} \right)^\delta + 1 \right] dh_x + \int_{h_1}^{h_n} \left[ (\delta + 1) \left( \frac{h_x}{h_1} \right)^\delta - 1 \right] dh_x \right\} \quad (3.30.)$$

što nakon sredjivanja daje:

$$F = \frac{b_o + b_1}{2} \cdot \frac{1}{\Delta h} \cdot \frac{k}{\delta} h_n \left| \left( \frac{h_o}{h_n} \right)^\delta + \left( \frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 2 \right| \quad (3.31.)$$

gde je h<sub>n</sub> - visina neutralne ravni. Ovaj izraz može se pojednostaviti ako se izjednače (3.26.) i (3.27.). Ovim izjednačavanjem dobija se:

$$\left( \frac{h_o}{h_n} \right)^\delta = \frac{1}{\delta - 1} \left| (\delta + 1) \left( \frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 2 \right| \quad (3.32.)$$

čijom zamenom u (3.31.) se dobija konačan izraz za silu na valjak:

$$F = \frac{b_o + b_1}{2} \frac{21 \cdot h_n}{\Delta h (\delta - 1)} k \left| \left( \frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1 \right| \quad (3.33.)$$

Srednji specifični pritisak dobija se ako se gornji izraz za silu podeli sa veličinom površine na koju ta sila deluje:

$$A = \frac{b_o + b_1}{2} \cdot l$$

$$p_{sr} = k \frac{2h_1}{\Delta h (\delta - 1)} \left( \frac{h_n}{h_1} \right) \left| \left( \frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1 \right| \quad (3.34.)$$

ili

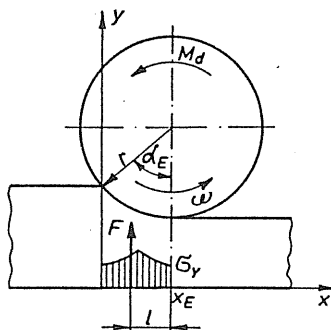
$$\frac{p_{sr}}{k} = \frac{2h_1}{\Delta h (\delta - 1)} \left( \frac{h_n}{h_1} \right) \left| \left( \frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1 \right| \quad (3.35.)$$

### 3.2.6. Obrtni moment i potrebna snaga

Obrtni moment potreban za deformisanje za jedan valjak iznosi, prema sl.3.13.

$$M_V = F \cdot l \quad (3.36.)$$

$F$  - sila koja deluje na valjak  
 $l$  - krak na kojem ta sila deluje



Sl.3.13. Obrtni moment kod valjanja

Krak sile valjanja zavisi od konkretnih uslova valjanja. U slučaju da su oba valjka istog prečnika tj. ako je proces simetričan u odnosu na uzdužnu osu, važi:

$$M_v = F \cdot \sqrt{r \Delta h} \cdot \phi \quad (3.37.)$$

$r$  - radijus valjaka

$\phi$  - za vruće valjanje 0,5

$\phi$  - za hladno valjanje 0,35-0,45

Moment za savladjivanje sile trenja u ležajevima valjaka i ostalim kliznim površinama može se približno izračunati kao:

$$M_t = F \cdot \mu \cdot d \cdot \eta \quad (3.38.)$$

$\mu$  - koeficijent trenja u ležajima

$d$  - prečnik rukavca valjka

$\eta$  - koeficijent za ostale gubitke (oko 2,0)

Ukupni moment:

$$M_u = M_v + M_t \quad (3.39.)$$

Snaga koju je potrebno saopštiti jednom valjku prilikom valjanja iznosi:

$$W = M_u \cdot \omega \quad (3.40.)$$



$M_u$  - obrtni moment

$\omega$  - ugaona brzina

$$W = M_u \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60}$$

n - broj obrtaja valjka.

### 3.3. VALJANJE RAVNIH PROIZVODA

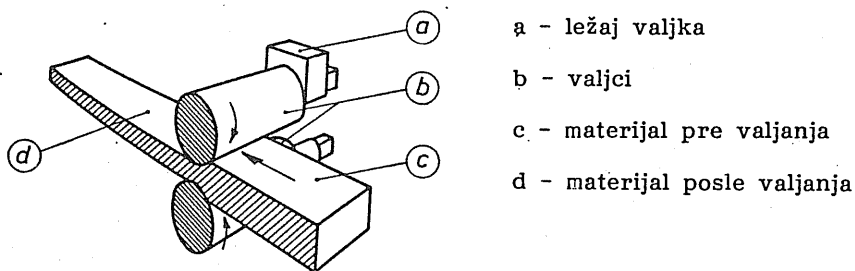
#### 3.3.1. Osnovni pojmovi, odvijanje procesa, tačnost, alat i mašine

Ovom vrstom valjanja (sl.3.14.) dobijaju se limovi i trake različiti-  
tih dimenzija.

Limovi i trake su proizvodi pravougaonog poprečnog preseka kod  
kojih je jedna dimenzija (debljina) znatno manja u odnosu na druge dve.

Valjanje limova i traka je najrasprostranjeniji vid valjanja. Od ce-  
lokupne palete svih valjanih proizvoda na limove i trake otpada oko 50%.

Limovi i trake imaju veoma široku primenu u metaloprerađivačkoj  
industriji i šire: autoindustrija, bela tehnika, elektrotehnika, energetska  
postrojenja i aparati, aparati za domaćinstvo, posudje, poljoprivredne ma-  
šine, hidrogradnja, gradjevina i mnoge druge.



a - ležaj valjka

b - valjci

c - materijal pre valjanja

d - materijal posle valjanja

Sl.3.14. Valjanje ravnih proizvoda (prikazana samo jedna polovina  
obradnog sistema, simetrična u odnosu na uzdužnu osu)

Prema vrsti materijala najviše je zastupljeno valjanje čeličnih limo-  
va i traka ali i valjanje ravnih proizvoda od aluminijuma i bakra ima ve-  
liki značaj, posebno za neke industrijske grane (elektrotehnika, gradjevina).

Valjanje limova i traka moguće je u hladnom i u toplom stanju. Hladnim valjanjem dobijaju se veće tačnosti, bolji kvalitet i visoke mehaničke i tehnološke osobine valjanih proizvoda. Ovim načinom valjaju se limovi i trake manjih debljina. Valjanje debelih limova i traka vrši se u toplom stanju.

U donjoj tabeli data je podela limova prema dimenzijama.

	Debljina			Širina	Dužina
	Fini	Srednji	Deblji		
lim	3 mm	3-5 mm	5 mm	max 5,5 m	max L=40 m

Kada je reč o valjanim trakama, uobičajena je podela prema širini trake:

	Š i r i n a		
	Uska	Srednja	Široka
Trake	b < 200 mm	b=20-600 mm	b > 600 mm

Trake su znatno veće dužine od limova i nakon valjanja namotavaju se na koturove. Debljine traka se kreću od 0,1-5 mm (hladno valjane trake) i 1,25-25 mm (toplo valjane trake).

Kod valjanih ravnih proizvoda dolazi do netačnosti u:

- težini
- dužini
- širini
- poprečnom preseku

valjanog proizvoda. Pri tome, odstupanje po težini rezultira iz ostala tri navedena odstupanja.

Netačnost po dužini i širini moguće je nakon valjanja eliminisati odsecanjem na makazama. Jedino odstupanje koje se nakon valjanja ne može eliminisati je ono po debljini. Pri tome treba razlikovati odstupanje po debljini u poprečnom preseku (odstupanje od pravougaonog preseka valjanog proizvoda) i u uzdužnom preseku.

Do ovih odstupanja dolazi usled različitih razloga od kojih su najglavniji nehomogenost materijala, nedovoljna krutost mašine za valjanje (valjaoničnog stana) i nejednako zagrejan ulazni materijal (kod toplog valjanja).

Za debele limove dozvoljena odstupanja po debljini u poprečnom preseku iznose:

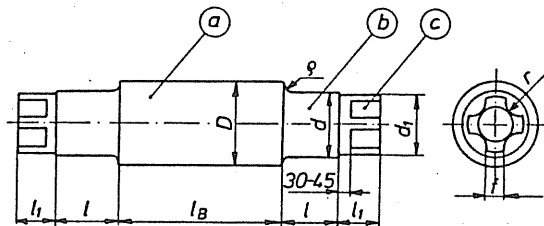
Debljina lima	Dozvoljeno odstupanje
5 - 10 mm	do 0,3 mm
10 - 30 mm	do 0,5 mm
50 - 60 mm	do 1,0 mm

za tanke limove ova odstupanja iznose:

Debljina lima	Dozvoljeno odstupanje
0,2 - 0,4 mm	$\pm 0,02$ do $\pm 0,04$ mm
0,8 - 1,2 mm	$\pm 0,08$ do $\pm 0,10$ mm
1,5 - 2,5 mm	$\pm 0,12$ do $\pm 0,15$ mm

Alati za valjanje su valjci. Postoje radni i podporni valjci. Radni valjci su u direktnom kontaktu sa materijalom u toku valjanja i oni vrše deformisanje materijala. Potporni valjci imaju zadatak da povećaju krutost sistema valjaka. Oni nisu u direktnom dodiru sa materijalom, nego se oslanjaju na radne valjke.

Izgled jednog valjka za valjanje ravnih proizvoda dat je na sl. 3.15.



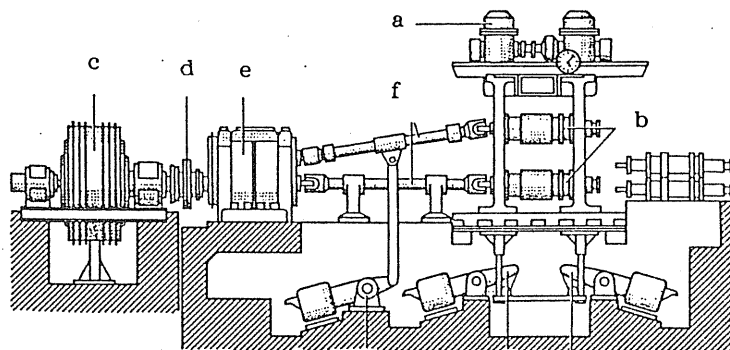
Sl.3.15. Valjak za valjanje ravnih proizvoda /2/

Uočava se sa slike da valjak ima tri funkcionalno različita dela: radni deo (a), koji vrši deformisanje materijala, rukavac za uležištenje (b) i deo za povezivanje sa pogonskim vratilom (c).

Valjci moraju imati veliku otpornost na habanje, visoku pritisnu čvrstoću kao i čvrstoću pri lomu. Takodje moraju biti otporni na termička opterećenja.

Valjci se najčešće izradjuju specijalnim postupcima livenja (liveno gvoždje, čelični liv) ili kovanjem (kovani čelik) dok se završne dimenzije dobijaju postupcima rezanja (struganje, brušenje).

Valjanje se obavlja na valjaoničkim mašinama koje se nazivaju valjaonički stanovi. Valjaonički stan se sastoji iz 2 nosača u kojima se nalaze uležišteni radni i potporni valjci (sl.3.16. i 3.17.). Okretanje valjaka vrši se pomoću elektromotora, preko reduktora i pogonskih vratila.



a - uređja za podešavanje valjka; b - valjci; c - pogonski motor; d - spojnica; e - reduktor; f - vratila

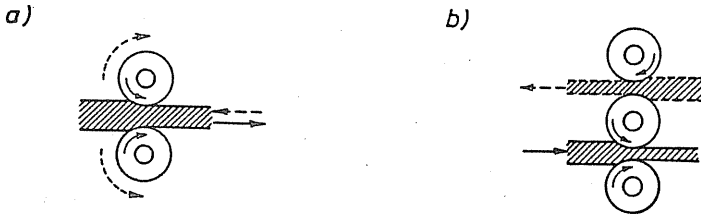
Sl.3.16. Valjaonički stan

Razmak između valjaka (kojim se definiše debljina valjanog proizvoda) podešava se pomoću specijalnog hidrauličnog ili električnog uređaja za podešavanje.

Tehnološki proces valjanja limova i traka najčešće se projektuje tako da se ukupna redukcija debljine ulaznog materijala postiže ne u jednom već u većem broju prolaza materijala kroz valjaonički stan. Nakon svakog prolaza, razmak između valjaka se smanjuje za određeni iznos, sve dok se ne postigne željena, finalna debljina valjanog proizvoda.

Broj valjaka jednog valjaoničkog stana može biti različit. Prema broju valjaka, valjaonički stanovi se dele na nekoliko grupa.

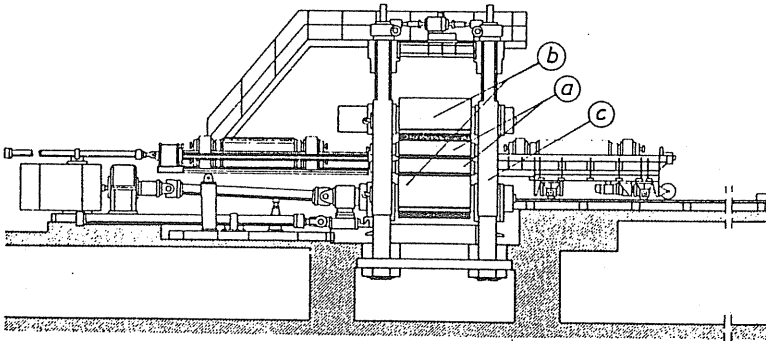
Duo-valjaonički stan ima samo dva valjka (sl.17a.) što znači da se smer obrtanja valjka u dva naizmenična prolaza materijala menja. Krućost ovakvih valjaoničkih stanova je relativno niska pa se oni pretežno upotrebljavaju za priprema valjanja, gde dimenzije valjanog proizvoda



Sl.3.17. Duo i trio valjaonički stanovi

nisu od presudnog značaja.

Trio-valjaonički stan ima tri valjka (sl.3.17b.). Smer obrtanja svih valjaka je tokom celog procesa valjanja isti jer se materijal prvo propušta kroz donji otvor a zatim kroz gornji otvor izmedju valjaka. Ovakvi stanovi upotrebljavaju se za valjanje profila, žice, nosača i dr.



a - radni valjci; b - potporni valjci; c - kućište (noseća struktura);

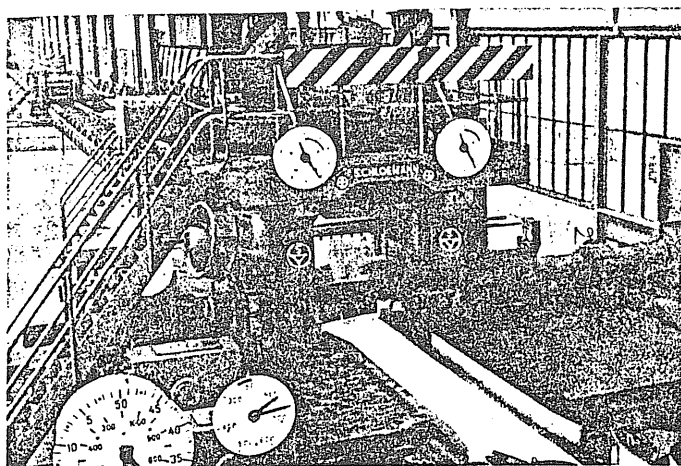
Sl.3.18. Quarto valjaonički stan

Qvarfo-valjaonički stanovi imaju 4 valjka (sl.3.18.). Dva su u direktnom kontaktu sa valjanim materijalom i oni su pogonjeni. Druga dva valjka su tzv. potporni valjci koji imaju zadatak da povećaju krutost celog stana i da smanje savijanje radnih valjaka.

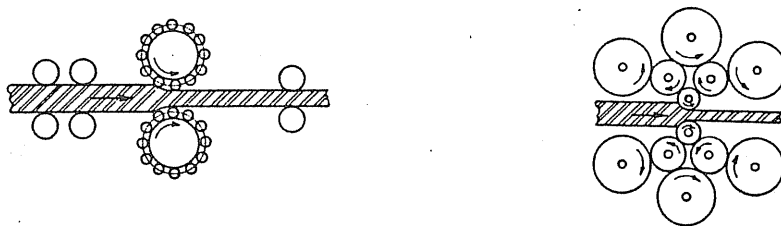
Na sl.3.19. prikazan je jedan quarto valjaonički stan za vreme rada.

Quarto valjaonički stanovi su najčešći u primeni.

U upotrebi su i valjaonički stanovi sa više valjaka (sl.3.20.). Ovakvi valjaonički stanovi u upotrebi su tamo gde se zahteva izuzetna tačnost debljine valjanog proizvoda, tj. izuzetna krutost valjaoničkog stana.



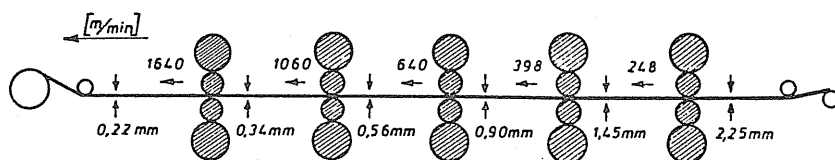
Sl.3.19. Quarto valjaonički stan



Sl.3.20. Valjaonički stanovi sa većim brojem valjaka

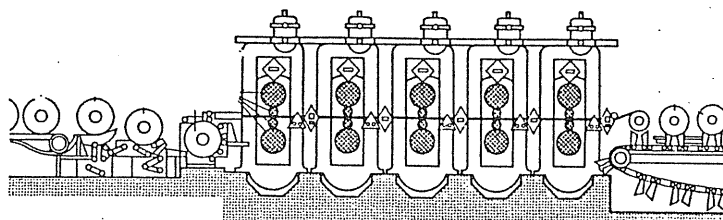
Valjaoničke pruge sastoje se iz nekoliko valjaoničkih stanova postavljenih u liniju. Pri tome je geometrija radnog prostora tj. razmak između valjaka pojedinih valjaoničkih stanova tako podešen da se konačna dimenzija valjanog proizvoda dobija samo jednim prolazom kroz prugu.

Na sl.3.21. prikazana je linija sa 5 stanova. Polazni materijal je lim debljine 2,25 mm a izlazni, završni, lim od 0,22 mm. Na slici je data debljina i brzina kretanja lima nakon izlaska iz svakog pojedinačnog valjaoničkog stana.



Sl.3.21. Režim sažimanja i brzina na valjcima sa 5 valjaoničkih stanova

Na sl.3.22. prikazan je oblik valjaoničkih stanova postavljenih u liniju.



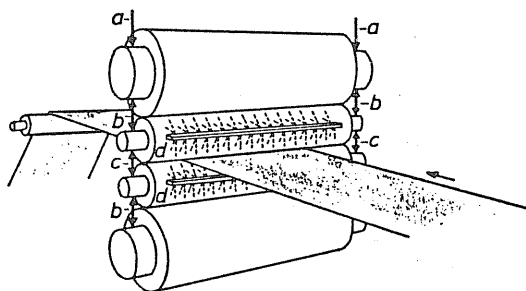
Sl.3.22. Valjaonička pruga

Za vreme procesa valjanja neophodno je vršiti intenzivno podmazivanje. Podmazivanjem se postiže smanjenje sile (momenta) valjanja, sprečava se lepljenje metala na valjke, poboljšava kvalitet površine lima i smanjuje se habanje valjka. Istovremeno, sredstva za podmazivanje vrši i hladjenje valjka. Kao sredstvo za podmazivanje koriste se: palmovo ulje, emulzije na bazi masnih kiselina, mineralna ulja i dr. Ova sredstva ubrizgavaju se u zoni zahvata valjaka i materijala.

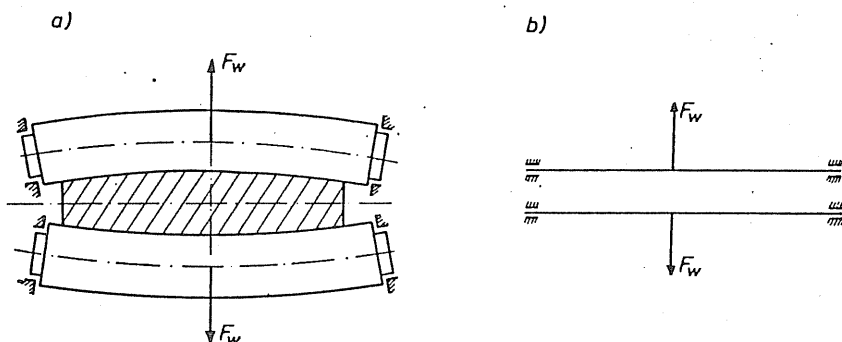
Pored podmazivanja vrši se i hladjenje valjaka u toku valjanja. Ovo hladjenje vrši se kontrolisano i to pomoću specijalnih brizgaljki a kao sredstvo za hladjenje služi voda ili tečnost za podmazivanje. Na sl.3.23. prikazan je jedan Quarto valjaonički stan sa sistemom brizgaljki za hladjenje.

Jedan od osnovnih problema koji se pojavljuje kod valjanja limova i traka na valjaoničkim stanovima jeste dobijanje pravilnog, pravougaonog poprečnog preseka lima (trake).

U procesu valjanja sila koja deluje na valjke dovodi do njihovog elastičnog savijanja.



Sl.3.23. Hladjenje valjaka u toku procesa /2/



Sl.3.24. Savijanje valjaka u toku procesa

Na sl.3.24. prikazana su dva valjka u procesu valjanja kao i sila valjanja, predstavljena kao koncentrisana sila, koja deluje na sredinu valjka. Pojednostavljeno, ovo se može posmatrati kao savijanje proste grede sa koncentrisanim opterećenjem u sredini grede (sl.3.24b.).

Savijanje valjka ima tu posledicu da presek valjanog lima (trake) odstupa od pravougaonog oblika.

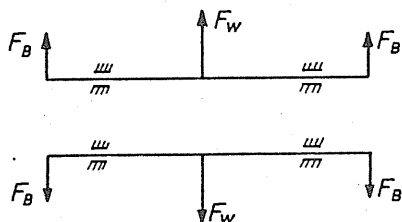
Ova negativna pojava može se neutralisati tzv. protivsavijanjem valjaka. Na sl.3.25. prikazan je jedan takav sistem.

Valjci imaju produžene rukavce, a pored sile valjanja  $F_W$  koja deluje u sredini valjka, na produžene rukavce se posebnim hidrauličkim uređajem nanosi sila protiv-savijanja. Šema opterećenja valjka silom valjanja

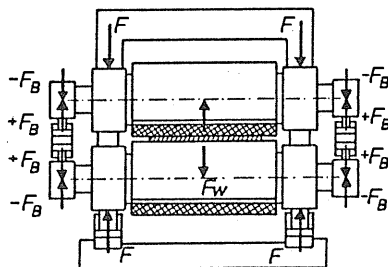


i silom protivsavijanja data je na sl.3.25a.

a)



b)



Sl.3.25. Protivsavijanje valjaka valjaoničkog stana

Pravilnim izborom protivsile  $F_B$ , moguće je u potpunosti eliminisati savijanje valjka usled sila valjanja  $F_W$  i na taj način dobiti valjani proizvod sa pravougaonim poprečnim presekom.

Postoje razne konstruktivne izvedbe sistema za protivsavijanje valjaka. Jedna od njih prikazana je na sl.3.25b.

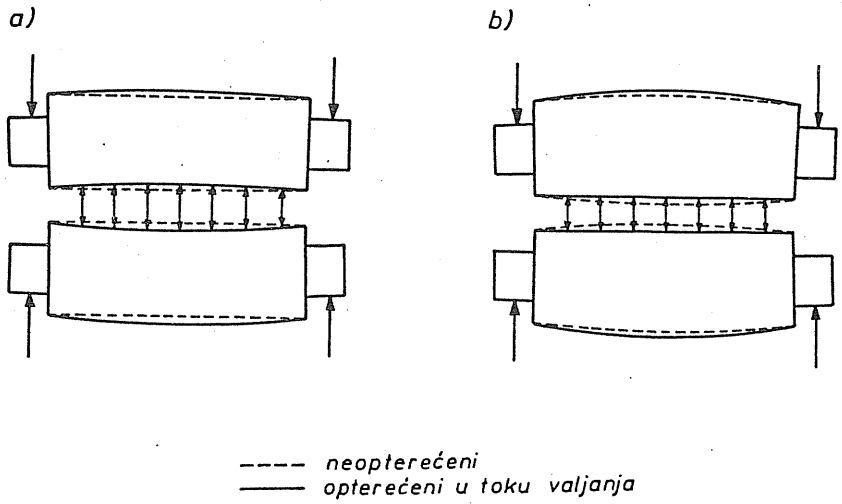
Drugi način kompenzacije savijanja valjaka usled sile valjanja jeste primena valjaka koji nisu cilindrični nego buričasti (bombirani). Ova buričastost postiže se mehaničkom obradom (brušenjem) valjaka.

Kod valjaoničkih stanova sa buričastim valjcima savijanje valjaka u toku procesa i buričastost se međusobno poništavaju pa je poprečni presek valjanog proizvoda pravougaoni.

Na sl.3.26. prikazan je proces valjanja sa: a) cilindričnim i sa b) buričastim (bombiranim) valjcima. Usled elastičnog savijanja valjaka, u slučaju valjanja sa cilindričnim valjcima dobija se lim čiji presek odstupa od pravougaonog a kada su valjci buričasti elastično savijanje valjaka i buričastost valjaka se kompenziraju pa je presek lima pravougaoni.

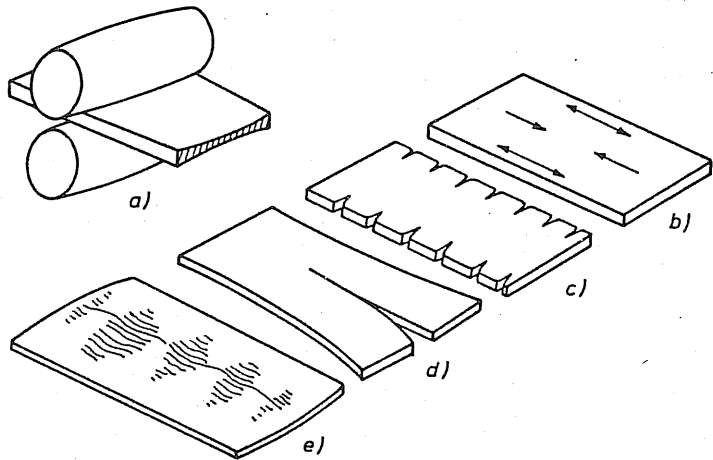
Ovakav način rešavanja problema elastičnog savijanja valjaka usled sile valjanja i s tim u vezi (ne)tačnost poprečnog preseka valjanog proizvoda ima značajne nedostatke u poredjenju sa prethodno opisanim načinom - protivsavijanjem valjaka. Odredjena buričastost valjaka može na zadovoljavajući način kompenzovati samo jedan odredjeni slučaj valjanja (širina lima, veličina sile). Za sve druge slučajeve valjanja poprečni presek valjanih proizvoda ima ili konveksni ili konkavni oblik.

Kao posledica odstupanja poprečnog preseka lima od pravougaonog na valjanom limu pojavljuju se, usled nepovoljnog naponskog stanja, određene greške.

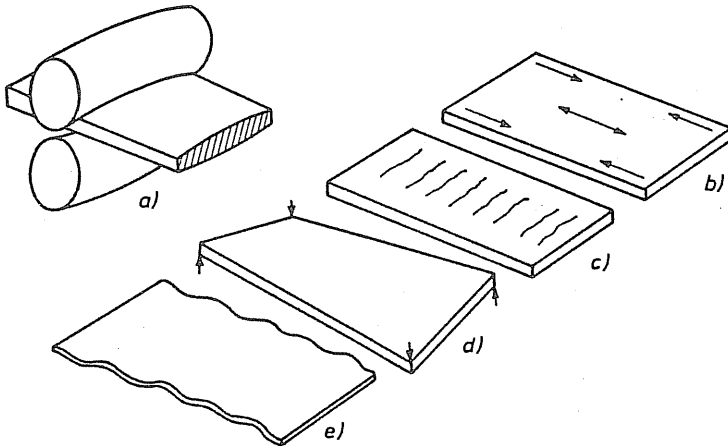


Sl.3.26. Valjanje sa cilindričnim i bombiranim valjcima

Za slučaj konkavnog preseka lima (sl.3.27.) mogu nastati sledeće greške na limu: b) zaostali unutrašnji naponi u naznačenim pravcima c) ivične pukotine, d) razdvajanje lima po sredini e) središnji talasi.



Sl.3.27. Posledice konkavnosti poprečnog preseka lima /3/

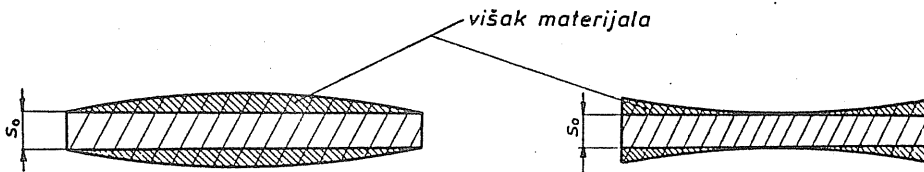


Sl.3.28. Posledice konveksnog poprečnog preseka lima /3/

U slučaju konveksnog poprečnog preseka lima (sl.3.28.) mogu se manifestovati sledeće greške: b) zaostali unutrašnji naponi u naznačenim smerovima, c) centralne pukotine, d) izvitoperenost lima, e) ivični talasi.

Odstupanje poprečnog preseka lima od pravougaonog, pored opisanih, čisto tehničkih negativnih posledica, ima i ekonomske posledice.

Naime, razlika debljine lima na njegovoj ivici i u sredini može činiti razliku u težini i do 7% - 10% od ukupne težine lima nominalne debljine  $s_0$  (sl. 3.29.). To znači da se u neki proizvod u koji je potrebno ugraditi lim debljine " $s_0$ " nepotrebno ugrađuje više materijala za 7% - 10% tj. investira toliko više kapitala.



Sl.3.29. Netačnost poprečnog preseka lima

Ovo je posebno značajno kod proizvoda kod kojih se ugradjuju velike količine lima, npr. u brodogradnji, autoindustriji i dr.

### 3.3.2. Valjaonička postrojenja za valjanje limova i traka

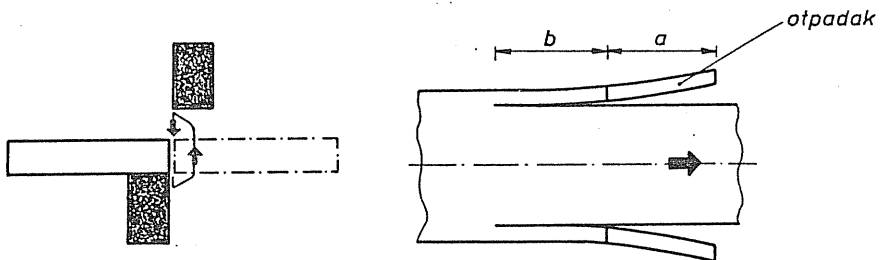
Jedno valjaoničko postrojenje (valjaonica), pored samog valjaoničkog stana, na kome se obavlja proces valjanja, sadrži i druga postrojenja i uređjaje, koji su neophodni za uspešno odvijanje procesa valjanja. To su peći, makaze, mašine za ravnanje, postrojenja za hladjenje valjanih proizvoda, transporteri u vidu rolni (kotrljače), razni manipulatori, uređjaji za slaganje valjanih limova u pakete, uređjaji za namotavanje valjane trake i dr.

Peći služe za zagrevanje polufabrikata na temperaturu valjanja (ako se radi o toplom valjanju) i one se nalaze na početku valjaoničke pruge.

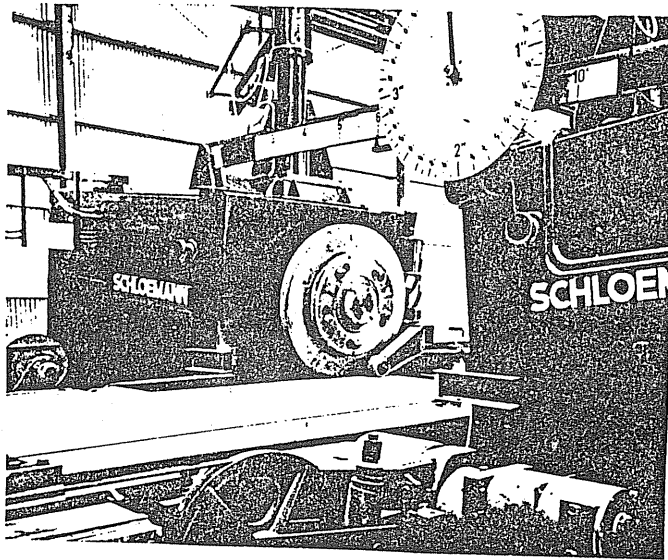
Peći se nalaze i u sastavu hladnih valjaonica gde služe za termičku obradu limova i traka. Ova termička obrada vrši se u cilju dobijanja potrebnih mehaničkih osobina valjanih proizvoda kao i radi uklanjanja unutrašnjih naprezanja i dobijanja potrebne strukture čelika.

Najčešće se za ove svrhe koriste zvonaste i protočne peći.

Makaze služe da bi se dobile konačne dimenzije dužine i širine valjanog lima ili trake. Postoje makaze za uzdužno sečenje (odsecanje krajeva) čime se dobija definitivna dimenzija širine lima (trake), i makaze za poprečno sečenje, kojima se dobija željena dužina valjanih proizvoda (sl.3.30.).

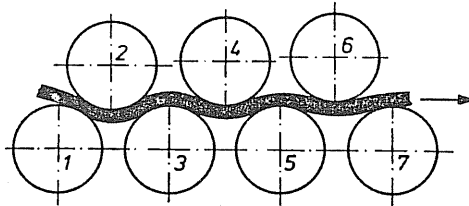


Sl.3.30. Uzdužno i poprečno sečenje



Sl.3.31. Makaze za odsecanje ivica lima

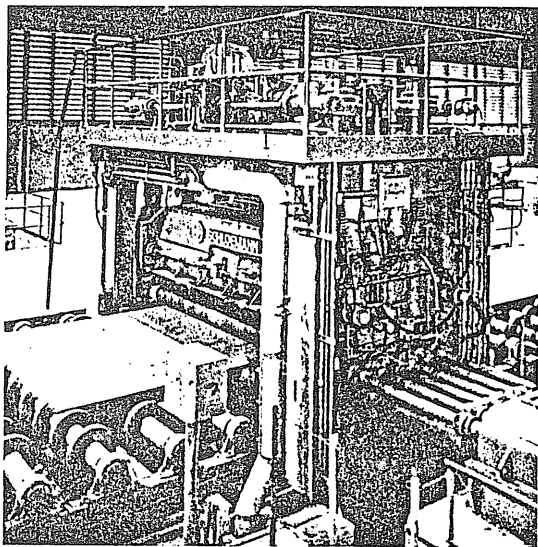
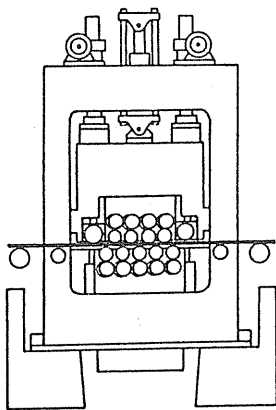
Na sl.3.31. prikazane su makaze za odsecanje ivice lima (uzdužno sečenje). Ovakve makaze imaju kružne noževe čime je omogućen kontinuirani proces sečenja.



Sl.3.32. Proces ravnanja lima

Nakon sečenja i eventualne termičke obrade limovi i trake se propuštaju kroz mašinu za ravnanje. Na ovoj mašini odstranjuju se neželjena zakrivljenja koja su se kao rezultat unutrašnjih napona na valjanim proizvodima pojavila u prethodnim fazama tehnološkog procesa valjanja.

Mašina za ravnanje (sl.3.33.) sastoji se od većeg broja valjaka kroz koje se propušta lim (traka). Medjusobni položaj gornjih i donjih valjaka takav je da lim, prolazeći kroz njih, biva plastično deformisan (savijan) u naizmeničnim pravcima. Ovo plastično deformisanje je posebno izraženo

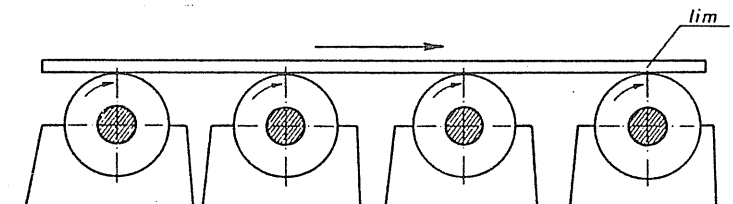


Sl.3.33. Mašina za ravnanje

u spoljašnjim vlaknima preseka lima. Na taj način neutrališu se unutrašnja naprezanja u limu i on postaje ravan.

Nakon toplog valjanja limovi i trake se hlade na posebnim uređjajima za hladjenje. Ovi uređjaji treba da obezbede što ravnomernije hladjenje kako usled nejednakog hladjenja ne bi došlo do nepoželjnih posledica po valjani proizvod (unutrašnji naponi, eventualne razlike u strukturi i sl.).

Kretanje limova kroz valjaoničko postrojenje, vrši se preko kotrljača (sl.3.34.). To su fiksno uležišteni cilindri koji imaju sopstveni pogon preko elektromotora. Ovi cilindri postavljeni su na bliskom medjusobnom rastojanju. Njihovim okretanjem vrši se translatorno kretanje lima koji se nalazi na kotrljači.

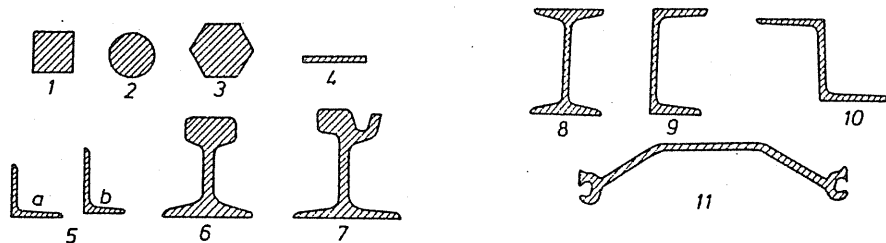


Sl.3.34. Kotrljače

### 3.4. VALJANJE PROFILA

Valjanjem se dobija veliki broj različitih profila od kojih su neki prikazani na slici 3.35.

Profili nalaze široku primenu u mašingradnji, građevinarstvu, brodogradnji i dr.



1 - kvadratni profil, 2 - kružni, 3 - šestougao, 4 - traka, 5 - ugaonik (a - ravnokraki, b - raznokraki), 6 - železnička šina, 7 - tramvajska šina, 8-I-nosač, 9-U-nosač, 10-Z-nosač, 11-žljebni nosač

Sl.3.35. Profili koji se dobijaju valjanjem /6/

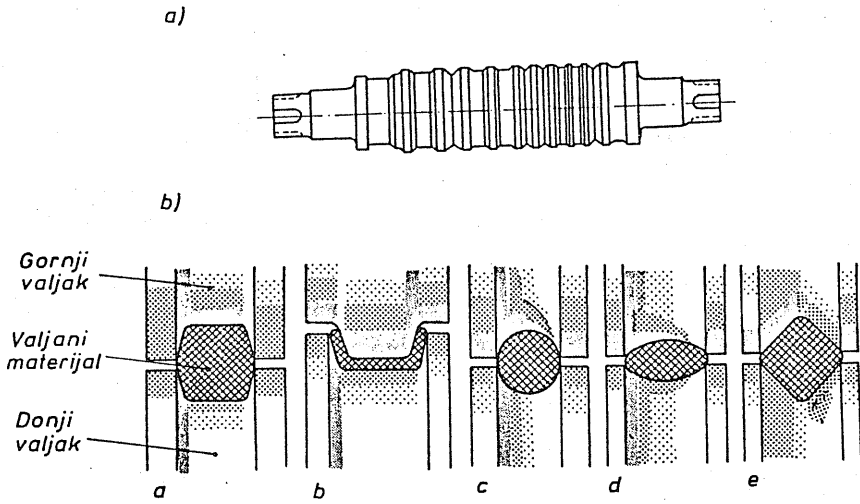
Valjanje profila vrši se na valjaoničkim stanovima koji su veoma slični valjaoničkim stanovima za ravno valjanje, s tim što valjci nisu cilindrični nego imaju odgovarajući profil koji predstavlja negativ profila koji se valja. To su tzv. kalibrisani valjci. Kalibar predstavlja svetli otvor kroz koji prolazi valjani materijal.

Na sl.3.36a. prikazan je jedan valjak na kome se nalaze više različitih profila, dok sl.35b. prikazuje jedan broj kalibrisanih valjaka sa odgovarajućim profilima.

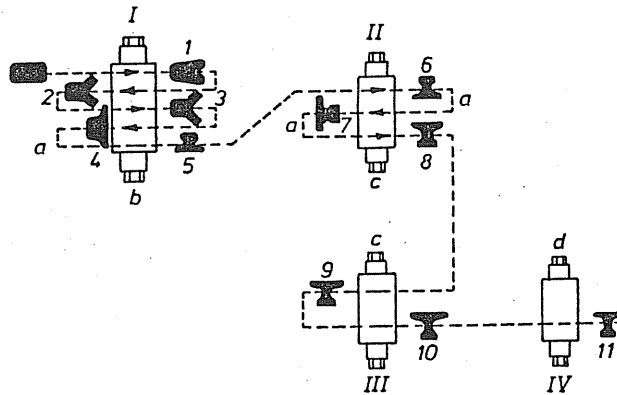
Valjanje profila vrši se u toplom stanju. Polufabrikat za valjanje profila su gradice ili blumovi. Dobijanje konačnog preseka profila najčešće se vrši u nekoliko prolaza materijala kroz kalibrisane valjke.

Na sl. 37-39. prikazana su tri primera valjanja karakterističnih profila koji se često koriste u praksi.

Na sl.3.37.prikazan je proces valjanja profila šine. Početni presek je pravougaoni a krajnji presek dobija se u 11 prolaza (kalibara) i to na 4 valjaonička stana (I-IV). Na prvom valjaoničkom stanu (I) od početnog, pravougaonog preseka, u 5 prolaza dobija se oblik 5 da bi se na stanovima (II) i (III) dobio oblik 10. Krajnji profil šine dobija se na četvrtom valjaoničkom stanu (IV).



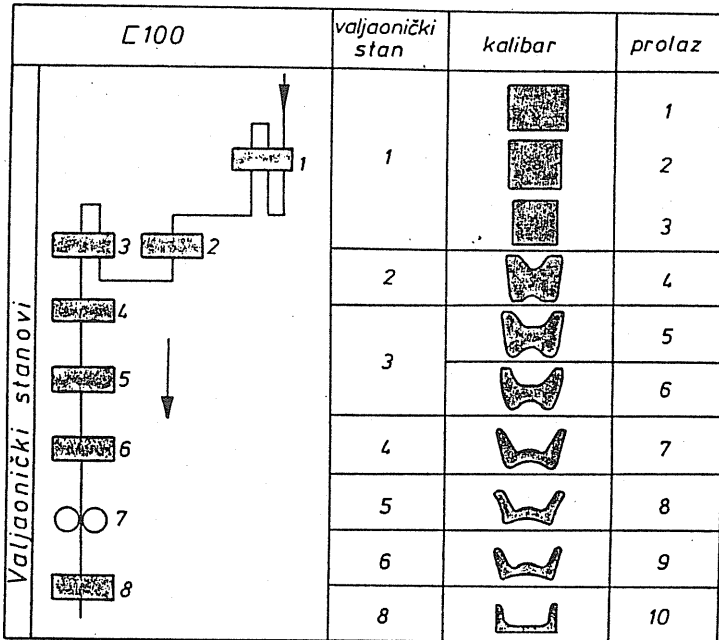
Sl.3.36. Valjci za valjanje profila



Sl.3.37. Proces valjanja željezničke šine

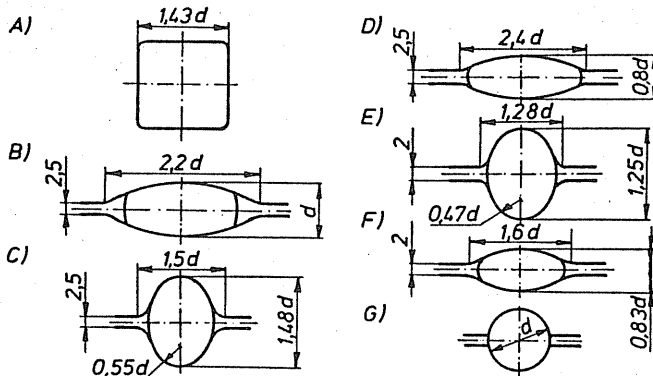
Faze dobijanja U-100 profila prikazane su na sl.3.38. Ovaj profil dobija se valjanjem u 10 prolaza od kojih su prva 3 na jednom valjaoničkom stanu, dok se ostalih 7 odvijaju na posebnim valjaoničkim stanovima. Na sl.3.38. šematski je prikazana linija valjanja sa označenim valjaoničkim stanovima (od 1-8) i oblicima profila koji se dobijaju na odgovarajućim stanovima.





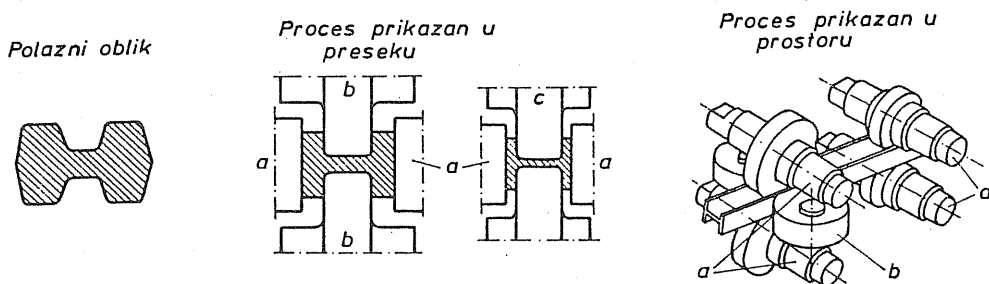
Sl.3.38. Faze valjanja U-100 profila

Dobijanje kružnog profila iz početnog kvadratnog prikazano je na sl.3.39. Uočava se da se finalni, kružni oblik dobija u 6 faza (B-G), pri čemu se od kvadratnog polufabrikata stranice  $a=1,43d$  dobija kružni presek prečnika "d". U prikazanim primerima valjanje se vrši u profilisanim, kalibrisanim valjcima.



Sl.3.39. Valjanje kružnog preseka

Jedan manji broj profila može se valjati i na valjaoničkim stanovima sa univerzalnim tj. cilindričnim valjcima. Ovi valjci su različito postavljeni jedan u odnosu na drugi, već u zavisnosti od profila koji se valja. Jedan takav slučaj prikazan je na sl.3.40. gde je prikazano valjanje duplog T profila (I). Polazni profil (A) propušta se kroz sistem horizontalnih i vertikalnih valjaka (B) čiji se međusobni položaj u toku procesa menja, određujući na taj način i oblik profila koji se valja.



Sl.3.40. Valjanje profila sa cilindričnim valjcima

Nakon samog procesa valjanja vrši se:

- odsecanje profila na makazama na određenu dužinu
- hladjenje profila na uređajima za hladjenje
- ravnjanje profila na ravnalicama.

Alati (valjci) za valjanje profila su slični po svojoj konstrukciji sa valjcima za ravno valjanje, sa tom razlikom da im je radni deo isprofilisan, već u zavisnosti od profila koji se valja (sl.3.35.).

Mašina za valjanje profila (valjaonički stan) je veoma slična valjaoničkom stanu za valjanje ravnih profila, s tim što su najčešće ovi stanovi snabdeveni samo sa radnim (profilisanim) valjcima.

### 3.5. VALJANJE CEVI

Cevi predstavljaju veoma značajan proizvod koji se koristi pre svega za provodjenje fluida u industrijskim pogonima (prenos tečnosti, gasova i pare u procesnoj industriji, kotlovske cevi, cevi u naftnoj industriji, cevi za sudove pod pritiskom) ali se sve češće koriste i u druge svrhe, npr. kao delovi konstrukcija u mašinskoj industriji, građevinarstvu, avijaciji i dr.

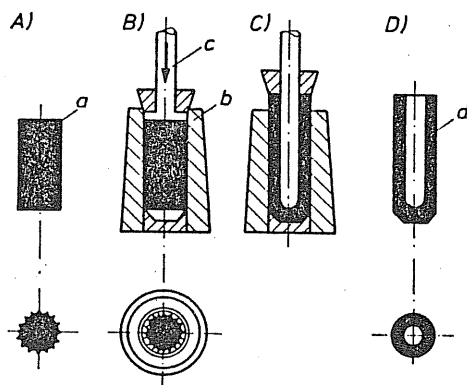
Cevi se mogu dobiti livenjem, zavarivanjem i valjanjem. Valjanjem se dobijaju najkvalitetnije cevi, tzv. bešavne cevi.

Valjanje cevi vrši se u dve faze, koje slede jedna za drugom:

- a) pripremna faza - dobijanje cevnice
- b) završna faza - valjanje cevi iz cevnice

Obe ove faze odvijaju se u toplom stanju.

a) Cevnica je kratka cev debelih zidova (sl.3.41.d) koja služi kao polazni oblik za završno valjanje cevi. Cevnica se može dobiti na više načina. Jedan od načina je prikazan na sl.3.41. Zagrejani blok poligonalnog preseka (a) postavlja se u kalup a zatim se u njemu preko trna (c) utiskuje cilindrični otvor i na taj način dobija cevnica (d). Ovaj proces izvodi se na horizontalnim ili vertikalnim hidrauličnim presama. Spoljašnji prečnik cevnice kreće se od 100-400 mm a debljina zida 20-100 mm.

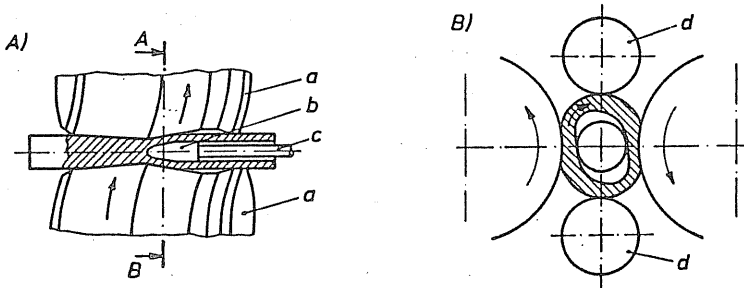


Sl.3.41. Dobijanje cevnice u alatu

Druga mogućnost dobijanja cevnice je tzv. Manesman-ov postupak (sl.3.42.).

Zagrejan puni cilindar propušta se između dva valjka čije su ose pod uglom od  $4^{\circ}$ - $14^{\circ}$ . Usled svog kosog položaja ovi valjci potiskuju cilindrični komad preko trna koji je postavljen između njih, stvarajući šupljinu u komadu. Na taj način nastaje cevnica.

Dobijene cevnice ponovo se zagrevaju da bi se u daljem postupku valjale u bešavne cevi.

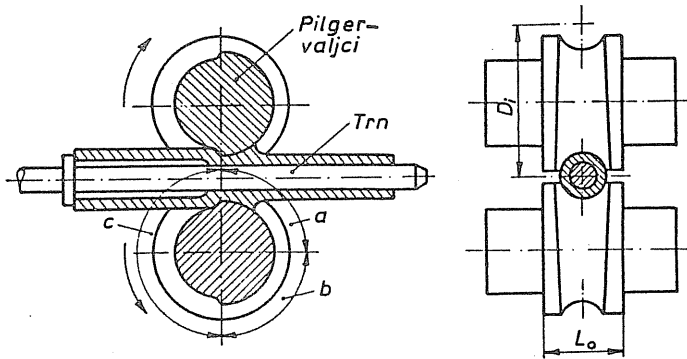


Sl.3.42. Dobijanje cevnice postupkom "Manesman"

b) Završna faza valjanja cevi iz cevnice može takodje da se obavi na nekoliko načina. Jedan od standardnih načina je tzv. Pilger postupak (sl.3.43.). To je diskontinualni, kovački postupak stanjivanja i izduživanja debelozidne cevnice, a vrši se pomoću profilisanih valjaka.

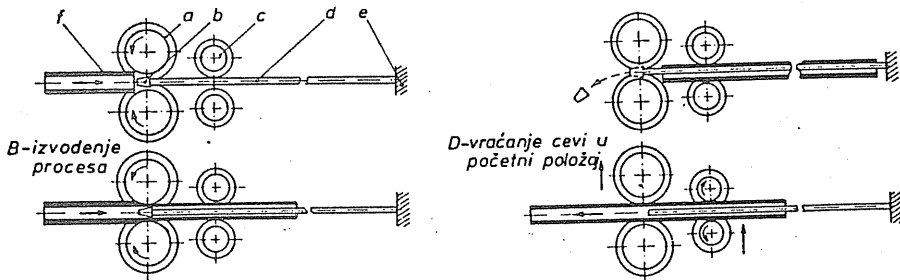
Valjak za "pilgerovanje" ima tri funkcionalno različita dela: radni deo kojim se vrši deformisanje cevi (a), deo za kalibrisanje (b), i deo koji ne dolazi u dodir sa materijalom (c). Sam postupak odvija se na sledeći način: u otvor cevnice postavi se trn nešto manjeg prečnika nego što je unutrašnji prečnik cevnice. Cevnica se zahvata radnim delom kalibra valjka (a) i tom prilikom dolazi do deformacije cevnice, tj. smanjenja debljine zida i povećanje dužine. Istovremeno cevnica se kreće i u aksijalnom pravcu prema naznačenoj punoj strelici (sl.3.43.). Za vreme kada valjci nisu u zahvatu sa cevnicom (deo valjka "c") preko trna se cevnica ponovo doturi u oblast valjanja, da bi se proces ponovio čim radni deo valjka opet dodje u kontakt sa cevnicom. Pri doturu vrši se i zaokretanje cevnice za  $90^{\circ}$ . Pilger postupkom moguće je proizvesti cevi dužine do 40 m prečnika 40-665 mm i debljine zida 2-100 mm.

Na sl.3.44. prikazan je još jedan način završnog valjanja cevi iz cevnice. To je tzv. postupak valjanja cevi preko trna. Cevnica (f) se pomoću pneumatskog uređaja navlači na trn (b) koji se nalazi između dva povratna valjka (c). Trn je postavljen na nosač (d) koji se oslanja na specijalni aksijalni ležaj (e). Radni valjci okretanjem u naznačenom smeru zahvataju cevnicu i na taj način započinje proces smanjenja debljine i povećanja dužine cevnice (sl.3.44.). Pri tome su dimenzije



Sl.3.43. "Pilger" postupak valjanja cevi

cevi definisane prečnikom trna i profilom radnih valjaka. U toj fazi povratni valjci nisu u kontaktu sa materijalom.



Sl.3.44. Valjanje cevi preko trna

Pošto je završen radni hod, radni valjci se međusobno razmaknu a povratni valjci se međusobno primaknu i stegnu cev. Okretanjem povratnih valjaka u naznačenom smeru, cev se dovodi u prvobitni položaj (D). Na nosač trna postavlja se trn većeg prečnika kako bi se u sledećem prolazu izvršila dalja redukcija debljine cevi. Tek nakon više ovakvih prolaza postiže se dovoljno smanjenje debljine zida.

## 4. PRIMENA VALJANJA NA IZRADU MAŠINSKIH DELOVA

U prethodnom poglavlju prikazane su teoretske osnove tehnologije valjanja kao i neke od najviše primenjivanih metoda valjanja kojima se dobijaju limovi, trake, profili i cevi. Ovi fabrikati u valjaoničkom pogledu jesu gotovi proizvodi ali za njihovu konačnu upotrebu neophodno je podvrgnuti ih dodatnim obradama (skidanjem strugotine, deformisanjem, zavarivanjem). Za razliku od toga, valjanje se može primeniti i za izradu gotovih mašinskih delova koji nakon valjanja ne zahtevaju nikakvu naknadnu obradu, sem u nekim slučajevima obradu nekih pomoćnih površina.

U ovom poglavlju prikazani su postupci valjanja koji se koriste za dobijanje gotovih mašinskih delova. Posebno se razmatraju metode valjanja navoja koje su pretežno zastupljene u proizvodnji vijčane robe, metode izrade nazubljenih i ožljebljenih elemenata valjanjem i metode valjanja prstenastih profila.

### 4.1. VALJANJE NAVOJA

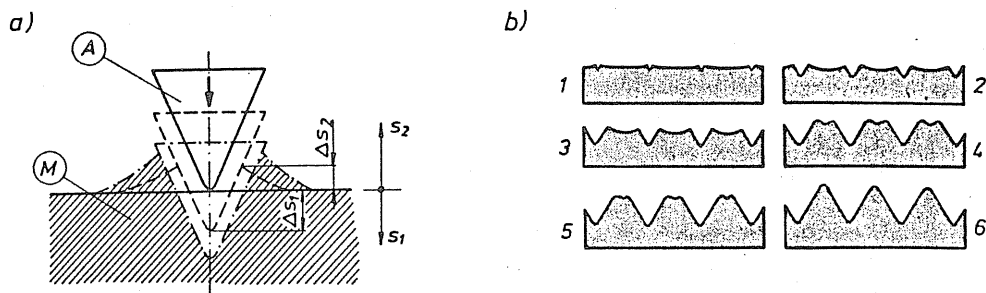
Za serijsku i visokoserijsku proizvodnju elemenata sa navojem danas se skoro isključivo koristi tehnologija hladnog valjanja.

Izrada navoja na ovaj način vrši se oblikovanjem spoljašnje površine rotaciono simetričnih oblika i to tako da se u toku procesa u materijal utiskuje reljef izradjen na površini alata koji odgovara navoju.

Na slici 4.1a prikazana je principijelna šema ovog postupka. Alat svojim prodiranjem ( $s_1$ ) potiskuje materijal koji teče suprotno kretanju alata ( $s_2$ ), čime se postupno stvara profil navoja. Faze procesa valjanja navoja za različite dubine utiskivanja alata ilustrovane su na sl.4.1b.

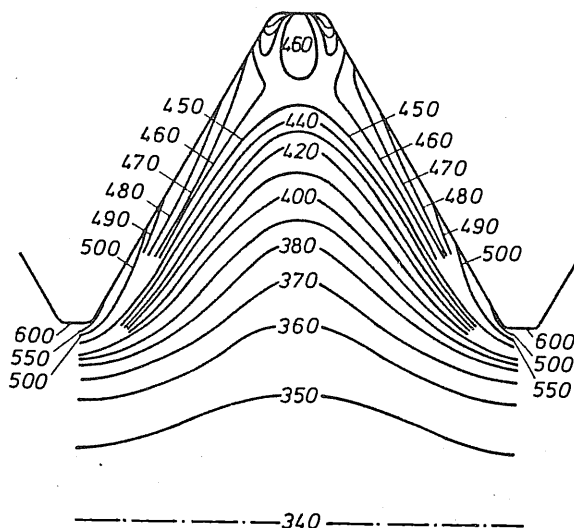
Elementi sa navojem dobijeni hladnim valjanjem odlikuju se poboljšanim mehaničkim svojstvima u odnosu na iste takve delove dobijene tehnologijom skidanja strugotine, jer u procesu njihovog dobijanja ne dolazi do prekidanja vlakana materijala a istovremeno dolazi i do ojačavanja materijala.

Na sl.4.2. prikazan je tok vlakana i raspored tvrdoće kod navoja izradjenog valjanjem. Materijal je hrom-vanadijum čelik. Na istoj slici dat



Sl.4.1. Faze procesa valjanja navoja /1/

je raspored tvrdoće po preseku navoja. Pri tome je tvrdoća tog materijala u polaznom stanju 340 HV. Uočava se da najveće ojačavanje materijala nastaje u korenu profila, upravo tamo gde je profil i najopterećeniji u primeni.

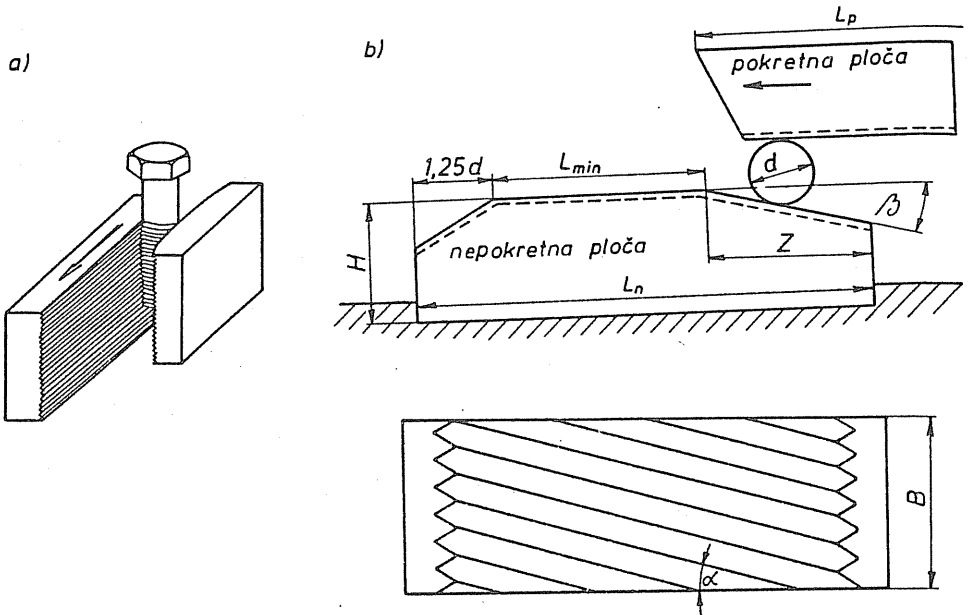


Sl.4.2. Tok vlakana i raspored tvrdoća kod navoja izradjenog valjanjem /4/

Valjanje navoja ima i ekonomske prednosti u odnosu na druge tehnologije izrade navoja: vreme izrade je znatno kraće a postiže se i ušteda u materijalu.

Valjanje navoja moguće je na više načina:

- valjanje pomoću ravnih profilisanih ploča
- valjanje pomoću segmenata
- valjanje pomoću valjaka



Sl.4.3. Valjanje navoja pomoću ravnih profilisanih ploča /4/

Najstariji način valjanja navoja je pomoću ravnih profilisanih ploča, (sl.4.3.).

Alat za ovu vrstu valjanja sastoji se iz jedne nepokretne i jedne pokretne ploče. Na obe ploče izradjeni su profili pod uglom navoja koji iznosi:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{h}{\pi d_f}$$

$h$  - korak navoja

$d_f$  - srednji prečnik navoja

Širina ploče  $B$  uslovljena je dužinom stabla navoja. U svom početnom delu obe ploče su zakošene radi postepenog započinjanja procesa. Kretnjem pokretne ploče uz istovremeni pritisak ploče na radni predmet, dobija se profil navoja.

Na sl.4.3b date su osnovne dimenzije profilisanih ploča:

- dužina ulaznog, zakošenog dela:

$$Z = 3 \text{ do}$$

$d_o$  - prečnik materijala na koji se valja navoj



- ugao zakošenja:

$$\beta = 3^{\circ} - 7^{\circ}$$

- dužina nepokretne ploče:

$$L_{\min} = 15 \cdot d_o$$

Pokretna ploča treba da je za 15-20 mm duža od nepokretne.

- širina ploče:

$$B = L_1 + 3 \cdot h$$

$L_1$  - dužina navoja

h - korak navoja

U tabeli T4.1 date su osnovne dimenzije ravnih profilisanih ploča i to za tri različite veličine navoja.

T4.1- Dimenzija alata za ravno valjanje navoja

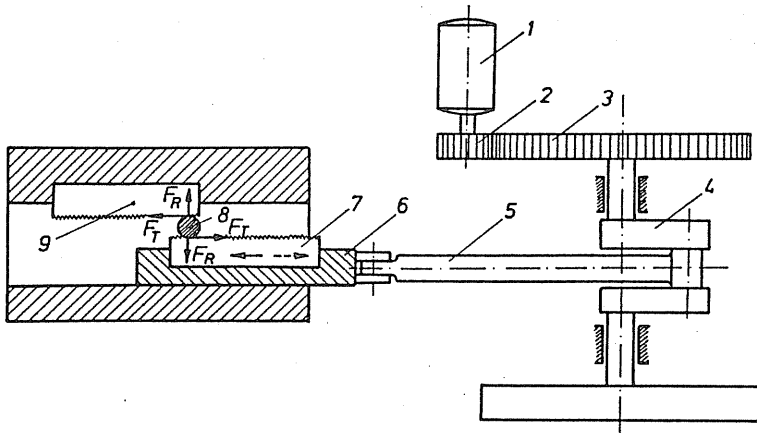
Prečnik navoja	Dužina ploče		Širina ploče B (mm)	Debljina ploče H (mm)	Zakošeni deo ploče z (mm)
	Pokretna Lp	Nepokretna Ln			
M 6	125	110	40	25	20
M 10	170	150	145	30	28
M 16	250	230	165	45	46

Šema mašine za izradu navoja pomoću dve ravne ploče (pravolinijsko glavno kretanje) data je na sl.4.4. Kretanje se prenosi sa elektromotora (1) preko zupčanika (2 i 3) na kolenasto vratilo (4) koje pokreće nosač pokretne ploče (6) i samu ploču (7). Između pokretne i nepokretne ploče (9) postavlja se radni predmet (8).

Pravolinijskim kretanjem ploče (7) vrši se izrada navoja.

Ovim načinom dobijaju se navoji manje tačnosti. Produktivnost ovakvog načina izrade navoja ograničena je obzirom na reverzibilnost kretanja pokretne ploče.

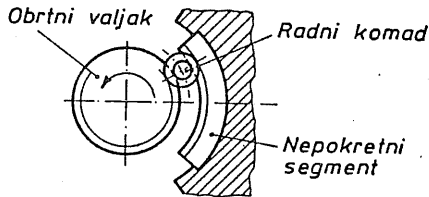
Znatno veća produktivnost pri proizvodnji navoja postiže se primenom principa valjanja pomoću obrtnog valjka i segmenta (sl.4.5.). Između nepokretnog segmenta i valjka koji se obrće postavlja se radni komad na kome treba izraditi navoj. I obrtni valjak i segment imaju na svojim



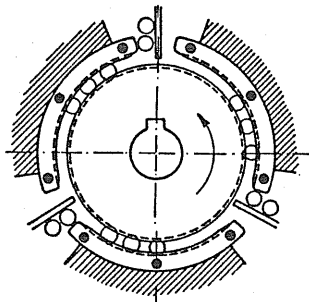
Sl.4.4. Mašina za izradu navoja pomoću ravnih ploča /5/

radnim površinama profile navoja.

Na sl.4.6. prikazana je usavršena varijanta koja bazira na opisanom principu. Umesto jednog, po obimu alata postavljena su tri nepokretna segmenta, čime se znatno povećava produktivnost izrade navoja. Jednim obrtajem valjka dobijaju se tri elementa sa navojem. Dužina segmenta odgovara obimu cilindra na kojem se izrađuje navoj.

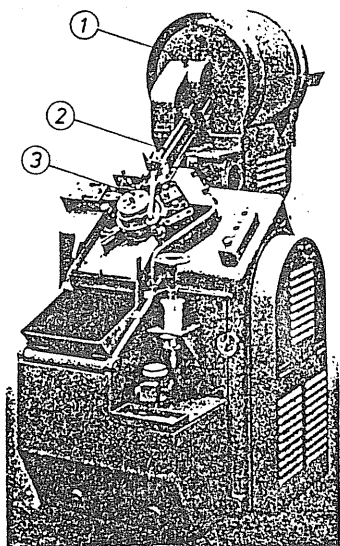


Sl.4.5. Valjanje navoja pomoću obrtnog valjka i segmenta



Sl.4.6. Valjanje navoja pomoću više segmenata

Mašina za valjanje navoja pomoću segmenata prikazana je na sl.4.7.



Centralni deo mašine predstavlja valjak sa segmentima (3.). Polufabrikati se iz magacina (1) do radnog prostora dopremaju preko posebnih vodjica (2).

- 1 - magacin za pripremk
- 2 - dovod pripremk u zonu alata
- 3 - valjak sa segmentima

Sl.4.7. Mašina za valjanje navoja pomoću segmenata

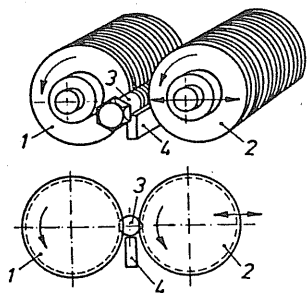
Navoji se mogu izradjivati i valjanjem izmedju valjaka.

Razlikuju se radijalno i aksijalno valjanje pomoću valjaka (sl.4.8a. i 4.8b.).

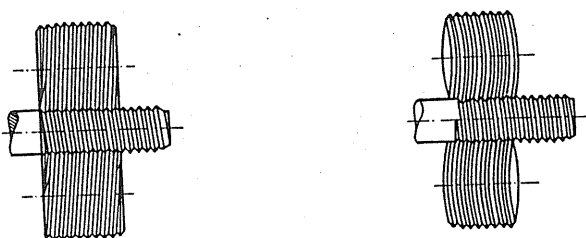
Kod radijalnog valjanja osa radnog predmeta i ose oba valjka su paralelne. Valjci vrše obrtno kretanje a jedan od njih ima i radijalni pomak.

Profil navoja izradjen je na valjcima pod uglom koji odgovara željenom navoju. U toku procesa, usled radijalnog pomaka jednog od valjaka, vrši se utiskivanje profila navoja u radni predmet. Radni predmet vrši samo obrtno kretanje i to usled trenja koje se pojavljuje izmedju valjaka i njega.

a) radijalno

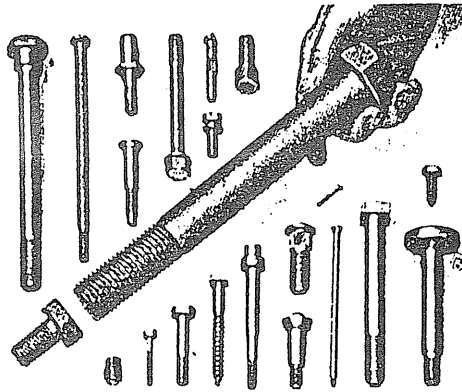


b) aksijalno



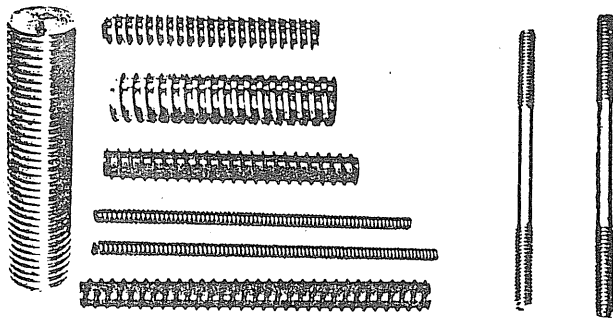
Sl.4.8. Valjanje navoja valjcima

Velika tačnost i visoka produktivnost osnovne su karakteristike ovog načina izrade navoja. Negativna strana jeste što se ovim načinom mogu dobiti elementi ograničene dužine. Iz opisa postupka jasno je da ta dužina može biti maksimalno jednaka dužini alata (valjka). Na sl.4.9. prikazan je deo asortimana navojnih elemenata dobijenih ovim načinom.



Sl.4.9. Navojni elementi dobijeni radijalnim valjanjem  
među valjcima /4/

Za proizvodnju dugačkih navojnih elemenata (sl.4.10.) koristi se aksijalno ili protočno valjanje navoja. Reljef navoja na valjcima kod ovog sistema nije pod nagibom kao u prethodnom slučaju već je izradjen u vidu zatvorenih kružnih prstenova. Ose valjanja su nagnute u odnosu na osu radnog predmeta pa prilikom izrade navoja radni predmet pored obrtnog kretanja vrši i aksijalno kretanje. Za jedan puni okretaj radni komad se pokrene u aksijalnom pravcu za vrednost jednog hoda navoja. Kod većih navoja puna dubina profila dobija se u nekoliko prolaza.

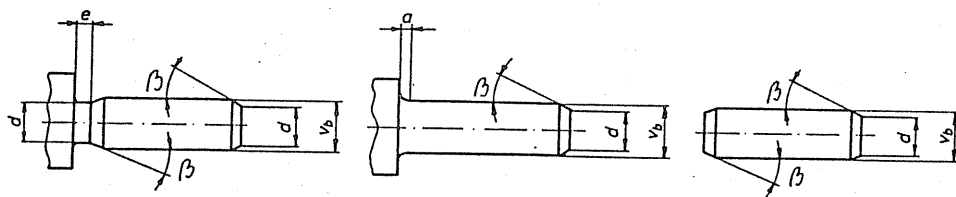


Sl.4.10. Dugački navojni elementi /4/

Jedna od bitnih pretpostavki za uspešno valjanje navoja je pravilno odredjivanje geometrije pripremk. Na sl.4.11. prikazana su tri različita oblika pripremk u kojima je potrebno izraditi navoj valjanjem između valjaka. Osnovni geometrijski parametri pripremk su:

$$V_B = d_o - 0,05 \cdot \sqrt{p}$$

$V_B$  - prečnik polufabrikata  
 $d_o$  - osnovni prečnik navoja  
 $p$  - korak navoja



Sl.4.11. Oblik i geometrija pripremk za valjanje navoja

$$a = 1 \times p$$

$$e = 1,5 p$$

$$\beta = 15^\circ \text{ (kod materijala čija je zatezna čvrstoća } \sigma_m > 1000 \text{ MPa )}$$

$$\beta = 20^\circ \text{ (} \sigma_m = 700\text{-}1000 \text{ MPa)}$$

$$\beta = 25^\circ \text{ (} \sigma_m = 500\text{-}700 \text{ MPa)}$$

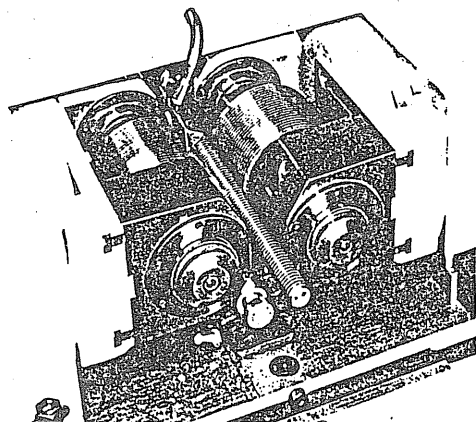
Valjci za kružno valjanje (sl.4.12.) smešteni su u pokretni i nepokretni klizač mašine.

Valjke je potrebno tako dimenzionisati da u procesu valjanja navoja ne dodje do njihovog savijanja usled radijalnih sila.

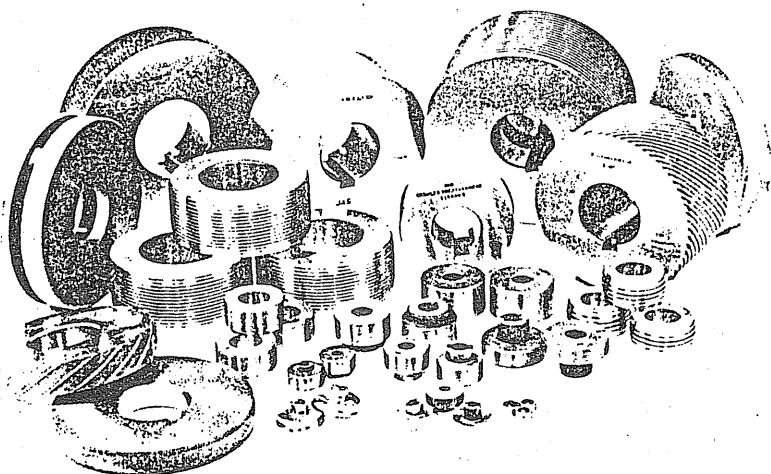
Na sl.4.13. prikazano je nekoliko alata (valjaka) za valjanje navoja po ovom principu.

Alati za izradu navoja (ploče, segmenti, valjci) izradjuju se od visokokvalitetnih legiranih čelika koji se odgovarajućom termičkom obradom dovode na visoku tvrdoću.

U tabeli T4.2. dati su materijali koji se najčešće koriste za ploče i valjke kao i veličina tvrdoće na koju se dovode.



Sl.4.12. Valjci za kružno valjanje /4/

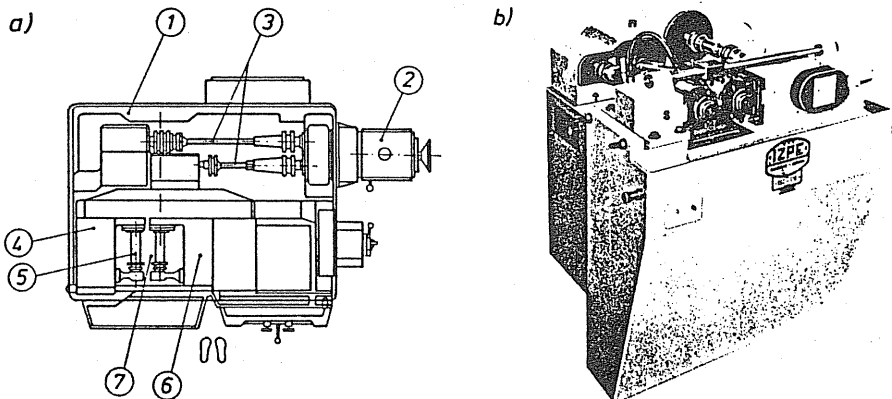


Sl.4.13. Alati (valjci) za valjanje navoja

**T4.2 Materijali za ploče i valjke za valjanje navoja**

Alat	Materijal	Tvrdoća alata nakon termičke obrade (HRC)
Ploče	Č. 4150	59-61
	X165CrV12	59-61
	Č. 6440	59-61
Valjci	50NiCr12	56-58
	Č. 1940	60-61

Na sl.4.14. data je šema mašine za kružno valjanje navoja (horizontalni presek). U kućište mašine (1) smešteni su svi elementi pogona. Prenos kretanja vrši se od elektromotora (2), preko reduktora i prenosnih vratila (3) na osovinu valjka. Jedan od valjaka (5) ima samo obrtno kretanje dok drugi (7) sem obrtnog vrši i radijalno kretanje zajedno sa klizačem (6). Ovo dodatno radijalno kretanje najčešće se vrši hidrauličnim putem. Na sl.4.14b dat je izgled takve mašine.



Sl.4.14. Mašina za kružno valjanje navoja /4/

Valjanje navoja može se vršiti i na tzv. glavama za valjanje (sl. 4.15.). To je uređaj u čijem kućištu su ugradjena tri valjka za valjanje. Ose tih valjaka mogu se zakositi a takodje i pomerati u radijalnom pravcu, već u zavisnosti od geometrije navoja koji se valja. Glave za valjanje ne zahtevaju posebnu mašinu nego se mogu, preko odredjenih elemenata, priključiti na neku od alatnih mašina sa obrtnim kretanjem (strug, bušilica). Pri tome postoje dve mogućnosti: a) glava sa valjcima vrši obrtno kretanje a radni predmet se ne obrće nego izvodi samo aksijalno kretanje, b) glava ne vrši obrtno kretanje nego samo aksijalni pomak a radni predmet se obrće.

Vreme izrade navoja pomoću glava za valjanje je veoma kratko. U donjoj tabeli data su vremena izrade navoja za dva tipična navoja.



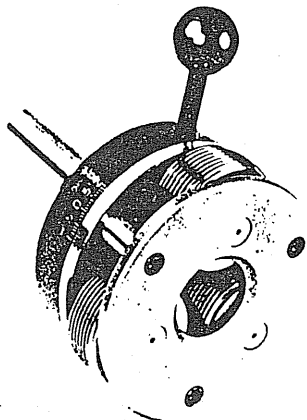
Metrički navoj  
M10x1,5  
Broj obrtaja  $n=1780 \text{ min}^{-1}$   
Dužina navoja  $L=50\text{mm}$

Vreme izrade  
0,9 sec



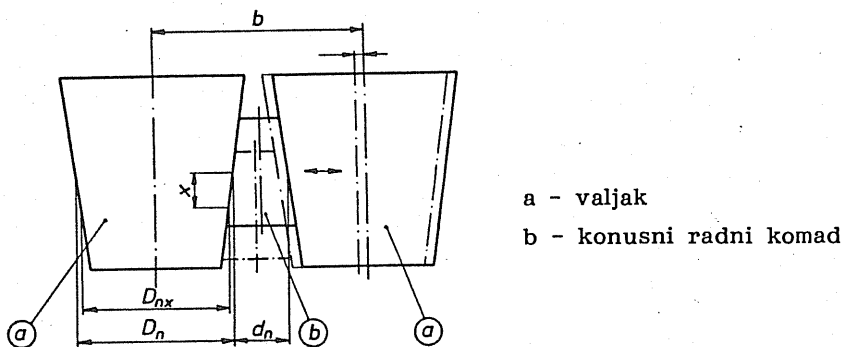
Testerasti navoj  
 $D = 10 \text{ mm}$ , ugao  $3^\circ$   
Korak = 2,2 mm  
Br.obrtaja  $n=1780^{-1}$   
Dužina navoja  $L=40 \text{ mm}$

Vreme izrade  
0,6 sec



Sl.4.15. Glava za valjanje navoja

Pored prikazanih načina moguće je i valjanje navoja na konusnim elementima (sl.4.16.). Ovakvi elementi najčešće se koriste kao vezni elementi kod cevnih konstrukcija kod kojih je neophodno dobro zaptivanje. Valjanje koničnih navoja vrši se između dva valjka čiji je ugao konusa jednak uglu konusa navoja. Oba valjka vrše obrtno kretanje a jedan od njih se i radijalno kreće, oblikujući profil navoja. Obzirom na konični oblik radnog komada, dolazi do različitih obimnih brzina na mestu kontakta alat-materijal što izaziva pojavu dodatnog trenja. Zbog toga je neophodno dobro hladjenje za vreme procesa.



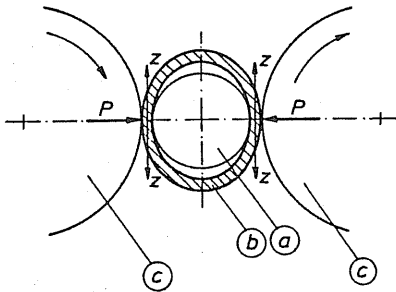
Sl.4.16. Valjanje konusnih elemenata sa navojem /4/

Valjanje unutrašnjeg navoja vrši se pomoću alata koji se sastoji iz dva valjka i trna (sl.4.17.). Na trnu je izradjen profil navoja dok su valjci glatki. Na trn se navlači cev u kojoj je potrebno izraditi navoj. Istovremenim obrtnim i radijalnim kretanjem valjaka vrši se oblikovanje



unutrašnjeg navoja. Trn je pri tome nepokretan.

Ovim načinom moguće je izraditi unutrašnji navoj u cevi sa najmanjom debljinom zida  $s=2$  mm.



- a - trn
- b - radni komad
- c - spoljni valjci

Sl.4.17. Valjanje unutrašnjeg navoja /4/

#### 4.2. VALJANJE OZUBLJENIH I NAŽLJEBLJENIH ELEMENATA

U novije vreme za izradu određenih oblika i dimenzija ozubljenih i nažljebljenih elemenata sve češće se primenjuje tehnologija hladnog valjanja. Ovo se posebno odnosi na proizvodnju zupčanika u uslovima visokoserijske i masovne proizvodnje.

Slično kao i kod valjanja navoja i ovde se reljef izradjen na spoljnoj površini alata utiskuje na spoljnim površinama aksijalno simetričnih radnih komada.

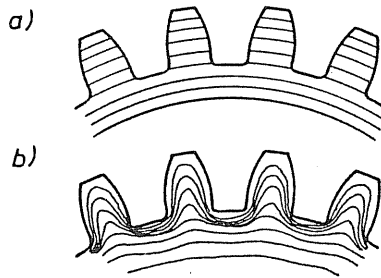
Osnovne prednosti ove tehnologije u izradi navedenih elemenata u odnosu na obradu rezanjem su:

- kraće vreme izrade
- ušteda u materijalu
- povoljan tok vlakana materijala (sl.4.18.)
- visoki kvalitet obradjene površine.

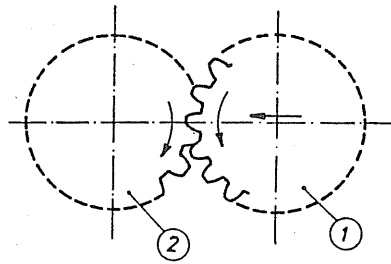
Ograničenja primene ove tehnologije odnose se pre svega na geometriju ozubljenja, vrstu materijala i veličinu serije.

Postoje različite mogućnosti izrade nazubljenih i ozubljenih elemenata metodom valjanja. One se medjusobno razlikuju prema geometriji alata kao i prema kinematici procesa.

Jedan od najranije primenjivanih načina valjanja zupčanika bazira na principu relativnog kotrljanja (sl.4.19.). Alat je u vidu zupčanika i



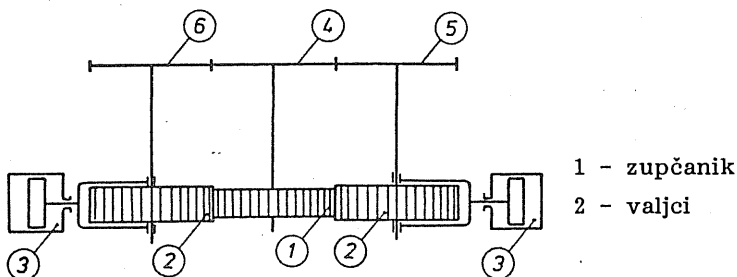
Sl.4.18. Tok vlakna materijala pri izradi zupčanika  
a) rezanjem, b) valjanjem



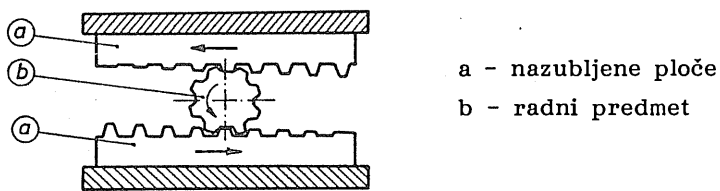
Sl.4.19. Princip valjanja zupčanika relativnim kotrljanjem

relativnim obrtanjem izmedju alata i materijala, uz dodatnu radijalnu silu, ostvaruje se utiskivanje profila alata u materijal. Radi poništenja radijalnih sila, moguće je valjanje izvesti sa dva alata. Na sl.4.20. prikazan je takav način valjanja zupčanika. Obrtno kretanje alati (nazubljeni valjci) dobijaju od elektro-motora preko prenosnika a radijalna sila se ostvaruje posebno hidrauličnim cilindrima (3). Da bi se ostvarilo prinudno relativno obrtanje izmedju alata i radnog predmeta, ovi elementi povezani su preko zupčanika 4, 5 i 6.

Valjanje ozubljenja preko dve nazubljene ploče prikazano je na sl. 4.21. Ove ploče pravolinijski se kreću u suprotnim smerovima a radni komad se nalazi izmedju njih, vršeći obrtno kretanje. Kretanje ploča vrši se preko hidrauličnog pogona s tim što se sinhronizacija kretanja ploča vrši preko jednog zupčanika i nazubljene letve (nije pokazano na slici).



Sl.4.20. Šema valjanja zupčanika sa dva alata (valjka) /5/



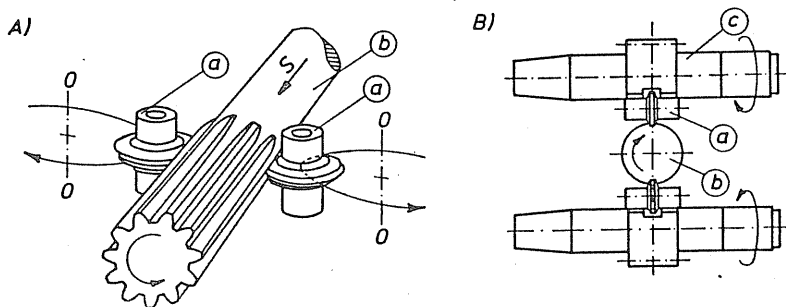
Sl.4.21. Valjanje navoja pomoću dve nazubljene ploče /2/

Radni komad je najčešće postavljen na svoja dva kraja u šiljke.

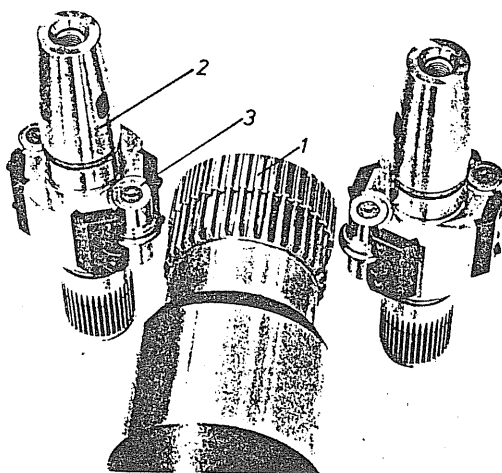
Posebnu vrstu valjanja zupčanika i nažljebljenih elemenata predstavlja tzv. Grob postupak. Osnovni princip ovog postupka je da se ceo proces izrade ozubljenja (ožljebljenja) izvodi u parcijalnom deformisanju materijala (sl.4.22.). Alati u obliku dva profilisana valjčića (a) rotiraju oko ose 0-0 i oko sopstvene ose i kod svakog obrtaja dolaze u kontakt sa materijalom (b).

Materijal se takodje obrće oko svoje ose. Brzina obrtanja materijala i obrtanja alata oko ose 0-0 sinhronizovana je u skladu sa brojem zuba koji se izrađuje. Za svaki obrtaj alata oko ose 0-0, materijal se okrene oko svoje ose za veličinu podele zuba, što znači da se kompletno ozubljenje izradi za jedan puni obrtaj ( $360^{\circ}$ ) radnog komada oko svoje ose. Materijal se istovremeno kreće i u aksijalnom pravcu čime se omogućuje izrada profila na određenu dužinu.

Na sl.4.23. prikazan je radni komad (1), nosači alata (2) i sami alati (3).



Sl.4.22. Grob-postupak /8/

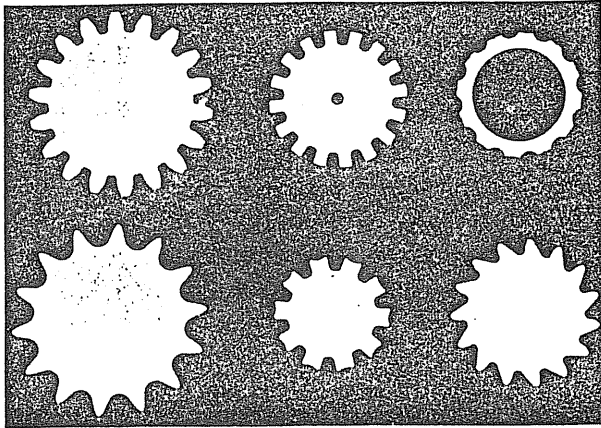


Sl.4.23. Radni komad, nosač alata i alat /8/

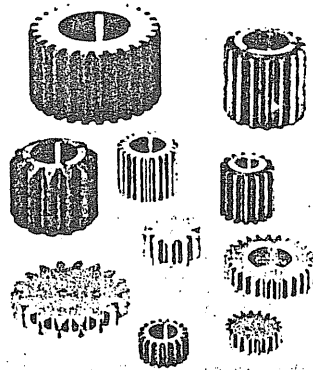
Broj obrtaja alata zavisi od veličine mašine i iznosi 800-3500 o/min. Aksijalni pomak radnog predmeta iznosi od 0,8-3 mm po jednom punom okretaju radnog predmeta, što znači da se za jedan minut može izraditi ozubljenje dužine oko 250 mm.

Ovim postupkom moguće je izraditi razne vrste zupčanika i ožljeb-ljenja (sl.4.24. i sl.4.25.).

Kvalitet obradaka dobijenih ovim postupkom nakon termičke obrade iznosi 7-8 prema DIN 3962 i to u uslovima visokoserijske industrijske proizvodnje.



Sl.4.24. Profili ozubljenja koje je moguće dobiti Grob-postupkom /8/



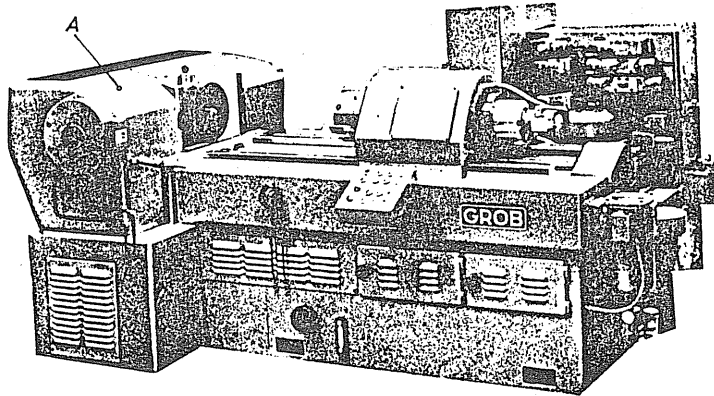
Sl.4.25. Ozubljeni elementi dobijeni valjanjem /8/

Alati za Grob postupak rade se iz visokolegiranih brzoreznih čelika ili iz tvrdog metala. Prifil alata (valjčića) izrađuje se na specijalnim profilisanim mašinama za brušenje. Ovi alati imaju izuzetno veliku postojanost (do 30.000 kom). Sama zamena alata je veoma jednostavna i brza i može biti izvedena i od strane osoblja niže kvalifikacije, što sve utiče na veću ekonomičnost ovog postupka.

Mašine za valjanje ozubljenih i nažljebljenih profila Grob postupkom sastoje se u principu iz dve celine (sl.4.26.). Sa jedne strane nalazi se deo u kome su smešteni nosači alata i gde se obezbeđuje njihovo rotaciono

kretanje (A). U tom delu vrši se proces deformisanja. Na drugom delu mašine je nosač radnog predmeta koji obezbeđuje njegovo rotaciono i aksijalno kretanje. Oba ova modula postavljena su na stabilno postolje a pogon i upravljanje mašinom vrši se elektro-hidraulički.

Najveći modul koji se može izradjivati na mašinama ovog tipa je modul 5. Takva mašina ima snagu od 25 kW.



Sl.4.26. Mašina za hladno valjanje zupčanika po Grob postupku/8/

Princip valjanja zupčanika sa alatom u vidu dva segmenta sa unutrašnjim profilom prikazan je na sl.4.27.

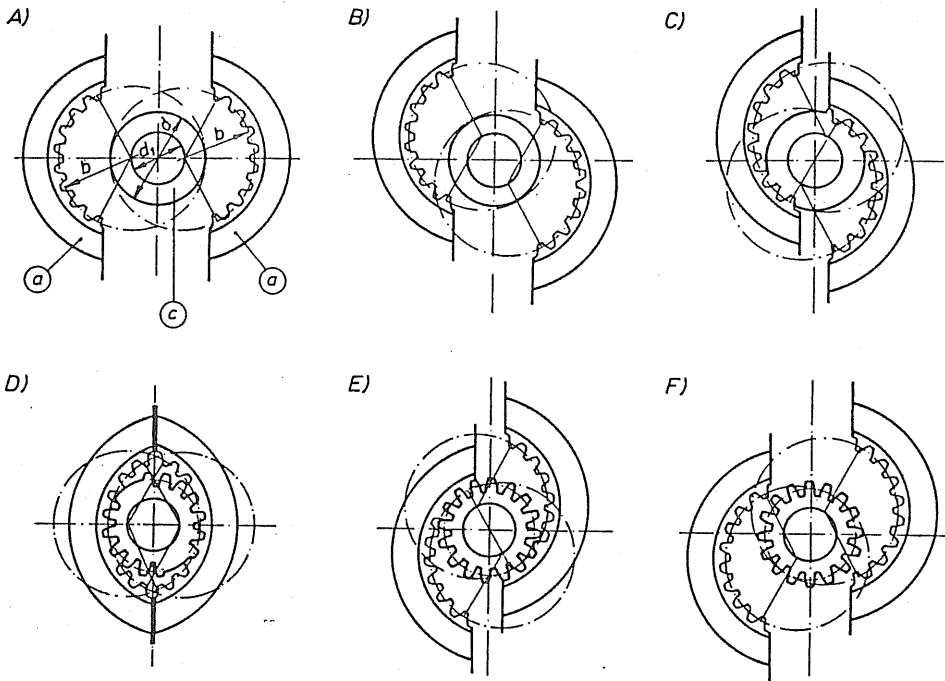
Svaki segment nezavisno se kreće preko pogona sa sistemom ekscentra i to tako da svaka tačka profila alata izvodi kružno kretanje. Ovaj sistem ekscentra je podešljiv, već prema geometriji radnog komada koji se obradjuje.

Kretanjem segmenata alata, oni dolaze u kontakt sa radnim komadom koji se takodje obrće oko svoje ose. Sinhronizacija kretanja alata i okretanja radnog predmeta vrši se preko posebnog prenosnika.

Na sl.4.27. prikazane su sve faze ovakvog načina izrade ozubljenja. Uočava se da proces deformisanja počinje u fazi C gde dolazi do prvog kontakta alata i radnog komada. U fazi D odvija se deformisanje (izrada ozubljenja) dok je faza E kraj procesa deformisanja.

Oblast primene ovog postupka ograničena je na evolventna ozubljenja do modula 3, maksimalnog prečnika  $d=120$  mm i maksimalne dužine  $l=630$  mm.

Ovaj način izrade ozubljenih i nazubljenih elemenata, koji bazira na originalnom rešenju kinematike procesa za sada nije našao širu primenu u praksi.



a - alat  
b - podetni krug ozubljenja alata  
c - ekscentar-vratila  
d - polazni prečnik komada

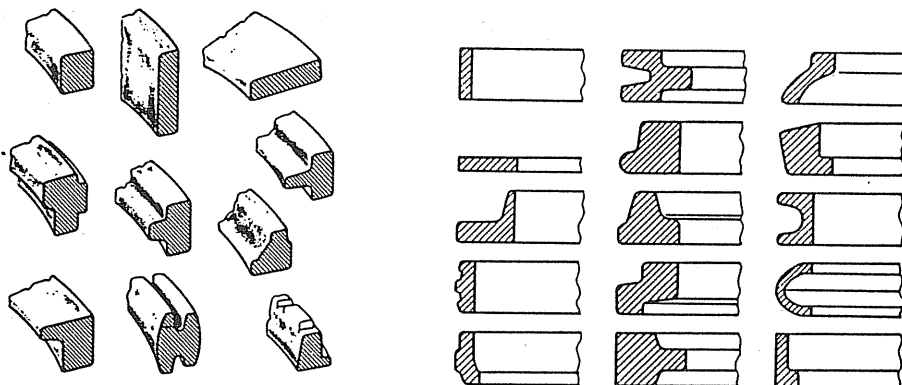
Sl.4.27. Faze valjanja nazubljenih elemenata pomoću segmenata /2/

### 4.3. VALJANJE PRSTENASTIH PROFILA

Ovim postupkom valjanja dobijaju se delovi čiji oblik u osnovi ima oblik prstena ili čaure (šupljeg valjka male visine i tankog zida). Ovi delovi mogu biti različitih dimenzija, mada se najviše primenjuju za delove čiji je spoljni prečnik 300-700 mm. Težine ovih delova idu od 1 kg do 100 tona.

Postupak se izvodi najčešće u toplom stanju mada se sitniji delovi rade i na hladno.

Glavnu oblast primene ova vrsta valjanja nalazi u industriji ležaja, za izradu raznih oblika prirubnica, za izradu točkova za željeznicu i sl. Na sl.4.28. dati su neki karakteristični preseci prstenastih profila dobijeni valjanjem.



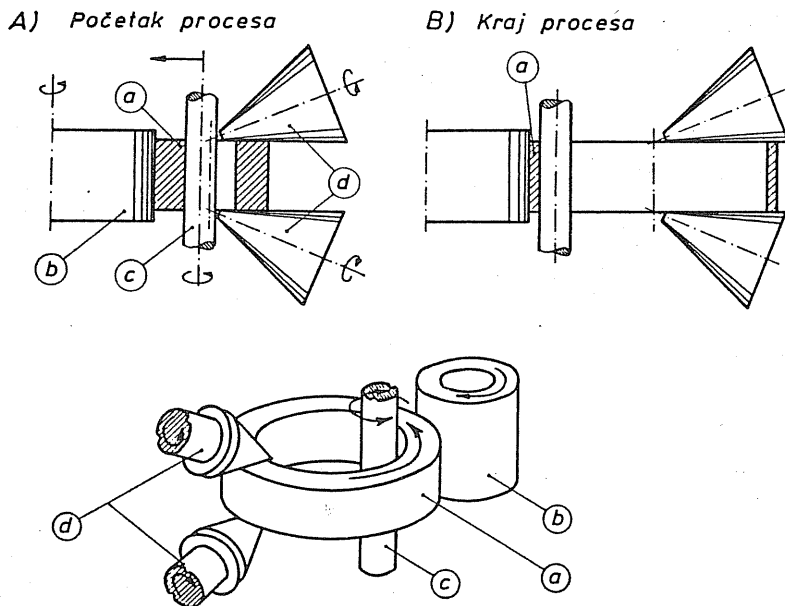
Sl.4.28. Karakteristični preseci prstenastih profila koji se dobijaju valjanjem /10/

Princip valjanja prstenastih profila sastoji se u tome da se pripremkom za vreme obrade smanjuje poprečni presek a povećava njegov obim.

Kao pripremak koristi se valjak u kome se na odgovarajući način proizvede kružni otvor, tako da se dobije debelozidni šuplji valjak (sl. 4.29a). Takav polufabrikat postavi se u mašinu sa sistemom valjaka koji svojim okretanjem i delovanjem na pripremak vrši njegovu deformaciju, tj. izradu prstenastog oblika.

Na sl.4.29. prikazan je najčešće primenjivani sistem valjanja prstenastih oblika: od dva cilindrična valjka, jedan je fiksiran (b) i okreće se samo oko svoje ose. On je u kontaktu sa spoljnim omotačem pripremkom (a).





Sl.4.29. Šema valjanja prstenastih oblika /2/

Unutrašnji cilindrični valjak (c) vrši obrtno kretanje oko svoje ose ali i pravolinijsko kretanje ka spoljašnjem cilindru, delujući pri tome na unutrašnji omotač pripremljen. Dva alata u vidu kupe (d) takodje se okreću oko svojih osa definišući pri tome geometriju budućeg obradka u aksijalnom pravcu.

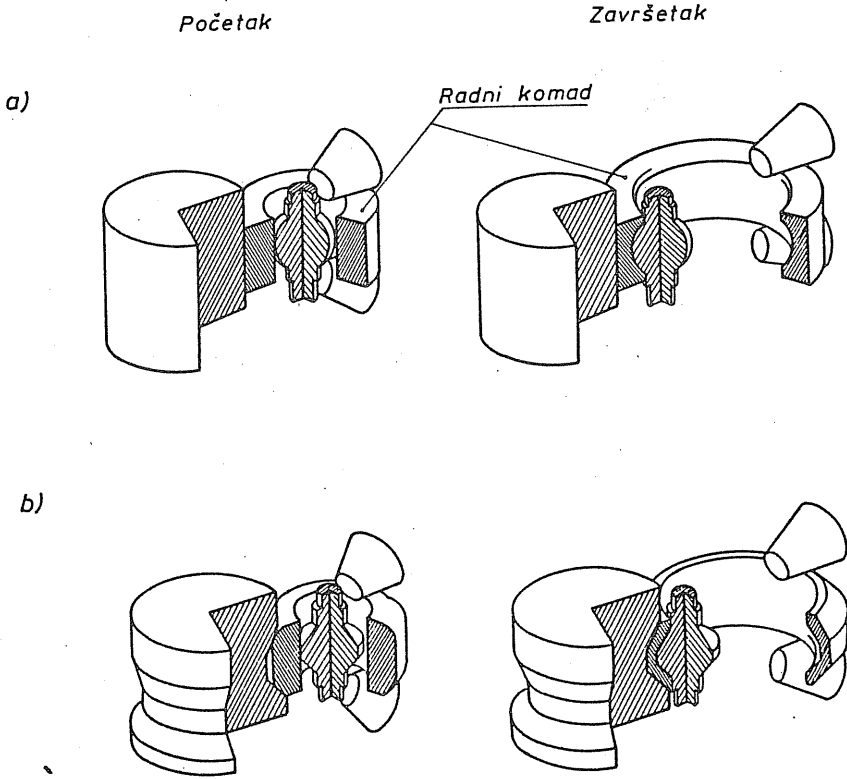
Sistemom valjaka kao na sl.4.29. dobija se obradak pravougaonog preseka.

Korišćenjem valjaka (b i c) koji nisu cilindrični nego imaju određeni profil dobijaju se prstenasti oblici sa unutrašnjim i/ili spoljašnjim profilom. Na sl.4.30. prikazana su dva takva slučaja. Sl.4.30a. prikazuje valjanje obradka sa unutrašnjim zakrivljenim profilom koji se dobija uz pomoć isprofilisanog unutrašnjeg alata (valjka). Sl.4.30b. prikazuje slučaj dobijanja obradka sa spoljnim i unutrašnjim profilom. U ovom slučaju i unutrašnji i spoljašnji valjak su profilisani.

Postoje određena ograničenja u procesu valjanja prstenastih oblika koja se odnose na konačne dimenzije obradka. Tako važi:

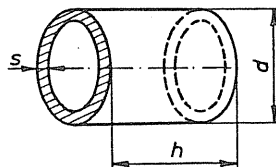
$$0,5 d_a < d_i < 0,9 d_a$$

( $d_i$  - unutrašnji prečnik;  $d_a$  - spoljašnji prečnik)



Sl.4.30. Valjanje prstenastih oblika sa profilisanim presekom /10/

iz čega proizilazi da se mogu valjati oblici čije su debljine zida maksimalno 25% a minimalno 5% od spoljnog prečnika. Uobičajena je podela prstenastih oblika na niske i visoke. Pri tome su niski prstenasti oblici oni kod kojih je  $\frac{s}{h} > 1$  ( $s$  - debljina zida,  $h$  - visina) a visoki kod kojih je  $\frac{s}{h} < 0,5$ . Treba, međutim, čisto terminološki, razlikovati visoki prstenasti oblik od cevi. Po konvenciji, za cevi važi odnos:  $\frac{h}{d} > 1$  ( $h$  - visina,  $d$  - prečnik) a ako je taj odnos  $\frac{h}{d} < 1$  radi se o prstenu.



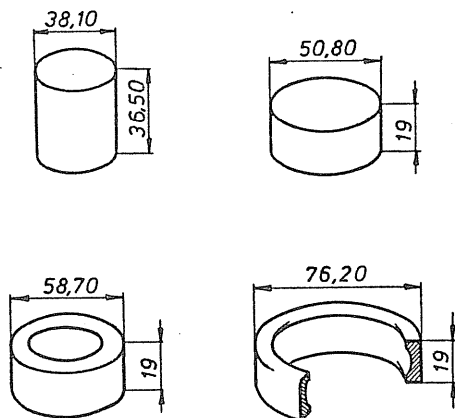
Sl.4.31. Dimenzije prstenastih oblika

Asortiman materijala koji se mogu obradivati na ovaj način je veoma širok: nelegirani niskouglenični čelici, visokolegirani nerđajući čelici, obojeni metali, titan legure, vatrootporne niki-legure i dr.

Alati tj. valjci za valjanje izrađuju se iz visokolegiranih čelika koji se termički obraduju.

Valjanje prstenastih profila vrši se na specijalnim mašinama koje mogu biti horizontalne ili vertikalne. Podela je napravljena u odnosu na ravan u kojoj obradak rotira za vreme obrade. Raširenije u primeni su horizontalne mašine jer je na njima moguće valjati obradke šireg dijapazona dimenzija.

Kao primer na sl.4.32. date su faze izrade spoljašnjeg prstena kugličnog ležišta spoljne dimenzije 76,2 mm i visine 19 mm.



Sl. 4.32. Faze valjanja prstena kugličnog ležaja /10/

Operacije:

- 1 - isecanje cilindra iz šipke na dužinu 36,5 mm
- 2 - meko žarenje
- 3 - sabijanje
- 4 - istovremeno suprotno smerno istiskivanje + istosmerno istiskivanje šupljeg obradka
- 5 - probijanje dna i dobijanje priprema za valjanje prstena
- 6 - valjanje prstena

Kao što se iz priloženog spiska operacija vidi, prsten kugličnog ležišta dobija se iz punog šipkastog materijala koji se u nekoliko operacija predhodno pripremi za samu operaciju valjanja prstena.

## 5. POVRŠINSKO PLASTIČNO DEFORMISANJE (PPD)

### 5.1. POJAM, DEFINICIJA, RAZVOJ I PRIMENA POVRŠINSKOG PLASTIČNOG DEFORMISANJA

Prema prostiranju plastične zone, odnosno, zone deformisanja i karakteristikama naponskog stanja u njoj, Tehnologija plastičnosti se može podeliti na četiri područja, koja su vrlo rasprostranjena i razgranata u primenu, kako je naznačeno u uvodu. Ta područja su:

1. Zapreminsko deformisanje, čija je karakteristika trodimenzionalno naponsko stanje;
2. Oblikovanje lima, čija je karakteristika dvodimenzionalno naponsko stanje;
3. Površinsko plastično deformisanje, kod koga se plastična zona prostire samo u neposrednoj blizini površine i
4. Razdvojno deformisanje, kod koga se plastična zona prostire samo u neposrednoj blizini razdvojene površine.

Za zapreminsko deformisanje u zoni deformisanja karakteristično je prisustvo pritisnih napona i donekle raznosmernih naponskih šema za oblikovanje lima zateznih napona i raznosmernih naponskih stanja, za razdvojno deformisanje smičućih napona. Površinsko plastično deformisanje se realizuje pritisnim naponima koji se javljaju samo u površinskom sloju relativno male dubine.

Površinsko plastično deformisanje, dakle, predstavlja jednu važnu oblast tehnologije plastičnosti, koja je u primeni značajno razvijena, ali je malo izučena i relativno manje poznata široj inženjerskoj praksi. Navedena literatura iz ove oblasti /33 do 45/ ukazuje na značaj primene PPD-a, ali i daje niz korisnih priručnih informacija za inženjersku praksu. Smatra se da se tehnologija površinskog plastičnog deformisanja koristi radi ostvarenja tri vrste ciljeva:

1. Radi povećanja nosivosti i izdržljivosti metalnih delova;
2. Radi ostvarenja visoke tačnosti dimenzija i
3. Radi smanjenja hrapavosti obradjenih površina.

Ostvarenje navedenih ciljeva se praktično može realizovati:

- Valjanjem površina
- Glačanjem površina dijamantskim alatom i

- Bombardovanjem površina mlazom kuglica - sačmarenjem. To su tehnološke metode površinskog plastičnog deformisanja. U prvom slučaju se na kontaktnoj površini javlja kombinovano trenje kotrljanja i trenje klizanja. U drugom slučaju je prisutno samo trenje klizanja. Treći slučaj se odlikuje posebnim karakteristikama da u klasičnom smislu nema alata u kontaktu sa obatom, već tu ulogu obavlja kuglica noseći sa sobom određenu količinu kinetičke energije. Bombardovanje površina mlazom kuglica se koristi pretežno u obradi elemenata lima, radi ostvarenja samo prvog cilja PPD, odnosno, radi povećanja jačine i izdržljivosti metalnih delova. Daleko najveću rasprostranjenost u primeni PPD ima valjanje površina. Radi toga će ovo poglavlje biti posvećeno valjanju površina, odnosno, radi ograničenog prostora, prezentiraće se ova tehnologija u veoma skraćenom obimu.

Valjanje površina omogućava ostvarenje bilo kojeg od navedenih ciljeva PPD ili sva tri istovremeno. Dakle, može biti:

- Ojačavajuće valjanje površina
- Tačno valjanje površina ili
- Fino valjanje površina.

Najčešći slučaj predstavlja ostvarenje sva tri navedena cilja istovremeno. Iz izloženog se može zaključiti da valjanje površina predstavlja završnu obradu metalnih delova, koja zamenjuje završne obrade putem skidanja strugotine (brušenje, poliranje, lepovanje, honovanje i sl.). Odgovorni metalni delovi na kojima je primenjena završna obrada valjanjem površina omogućavaju viši kvalitet proizvoda u koje se ugrađuju ovi delovi. To se odnosi kako na tačnost funkcionisanja, tako i na skraćeno vreme uhođavanja, jevtinije održavanje i veću trajnost. To su osnovni razlozi zbog kojih nije moguće zamisliti proizvode vrhunskog kvaliteta bez primene PPD-a pri izradi njihovih delova. Npr. Mercedes svojim strogim tehnološkim propisima uslovljava primenu ove tehnologije i pri izradi rezervnih delova, radi održavanja kvaliteta.

Površinsko plastično deformisanje, valjanje površina je metoda tehnologije plastičnosti, koja spada u područje obrade sa PARCIJALNIM ZAHVATOM ALATA. To znači da alati za obradu nisu neposredno zavisni od geometrije i dimenzija obratka, već se jedan alat može koristiti za obradu niza sličnih delova. To praktično znači da se ova metoda obrade odlikuje primenom univerzalnih alata, što znači da je pogodna i za primenu u uslovima pojedinačne i maloserijske proizvodnje delova. Mašine na kojima se izvodi valjanje površina mogu biti adaptirane univerzalne mašine za obradu rezanjem (strugoti, bušilice i sl.) ili specijalne mašine

namenjene za primenu samo valjanja površina. Te mašine su po pravilu vrlo slične strugu. Primenom valjanja površina postiže se:

- vrlo niska vrednost hrapavosti ( $R_a \approx 0,1$ )
- povišena otpornost na habanje zbog promenjenog karaktera hrapavosti u odnosu na metode obrade skidanjem strugotine
- niska cena obrade i
- neznatan utrošak alata

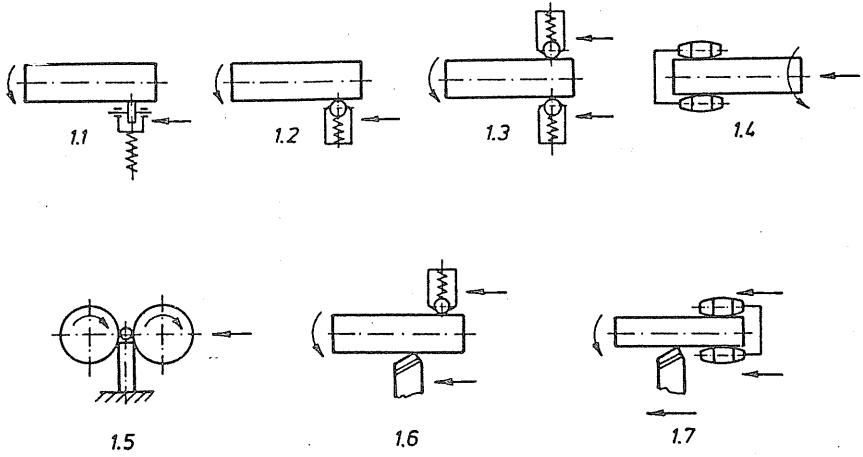
Zbog izloženih karakteristika valjanja površina ova tehnološka metoda je veoma raširena u primeni, kako s obzirom na vrste materijala, koji se mogu obradivati tako i s obzirom na raznovrsnost geometrijske konfiguracije delova, koji se mogu obradivati.

PPD se može primeniti na sledeće materijale:

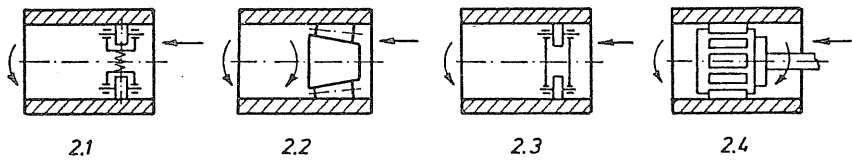
- konstrukcioni čelici Č.0250 do Č.0750;
- čelici za poboljšavanje Č.1330 do Č.5430 u žarenom i u poboljšanom stanju;
- čelici za cementaciju Č.1120 do Č.5421;
- čelici za opruge do prekidne jačine  $1600 \text{ N/mm}^2$ ;
- čelici za vijke;
- čelici otporni prema kiselinama i nerđajući čelici;
- čelici za automate;
- liveno gvoždje od SL14 do SL30 kao i temper liv;
- nečelični materijali kao što su: aluminijum i njegove legure, bakar i legure bakra (mesing, bronza i sl.).

Na sl.5.1. šematski je prikazan deo različitih mogućnosti primene valjanja površina s obzirom na geometrijske karakteristike površina /40/. Prvi deo ove slike 5.1-1. prikazuje obradu spoljnih cilindričnih površina. Naznačene su različite varijantne mogućnosti obrade ovih površina s tim što zadnja dva primera (1.6. i 1.7.) prikazuju mogućnost kombinovane primene valjanja površina sa struganjem, pri čemu iza strugarskog noža sledi alat za valjanje površine. Ovoj problematici kombinovane primene PPD-a sa obradom skidanjem strugotine posvećena je cela knjiga navedena pod /43/. Drugi deo sl.5.1. (5.1-2) prikazuje nekoliko različitih mogućnosti valjanja unutrašnjih površina. Treći deo (5.1-3) prikazuje načine valjanja ravnih površina. Najzad četvrti deo slike (5.1-4) ilustruje primenu valjanja na obradu površina različitih profila. Dalja ilustracija primene PPD prikazana je na sl.5.2. U pitanju su različite varijante valjanja rukavaca, odnosno, zaobljenja na prelazu rukavaca u osovinu i valjanje ravne površine (sl.5.2-4) zadnja skica (5.2-4)

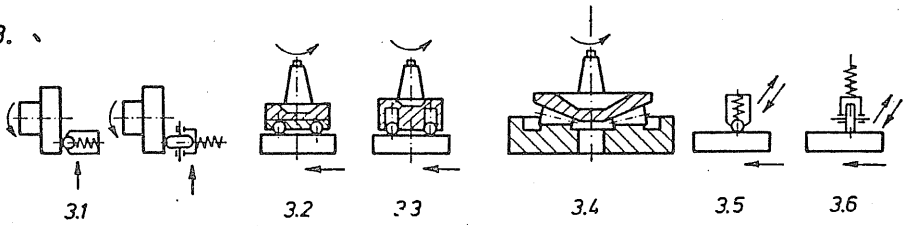
1.



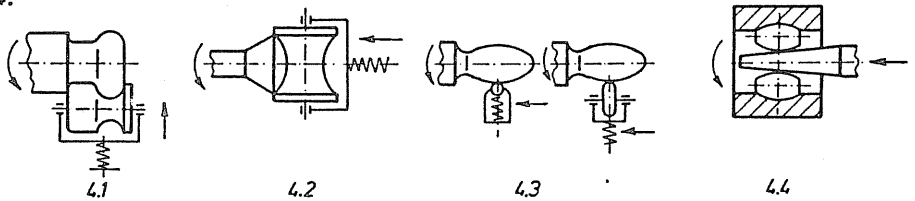
2.



3.



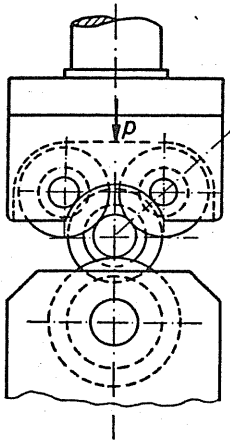
4.



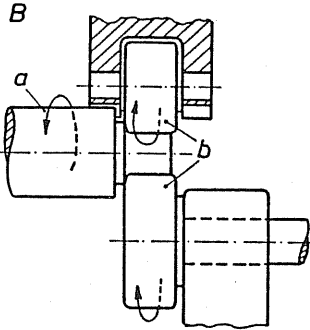
Sl. 5.1. Prikaz mogućnosti primene PPD /40/

1. obrada spoljnih površina
2. obrada unutrašnjih površina
3. obrada ravnih površina
4. obrada profilnih površina

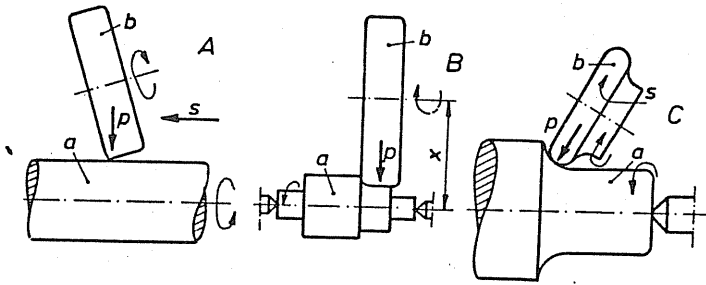
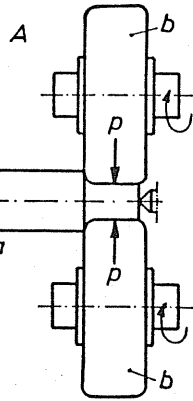




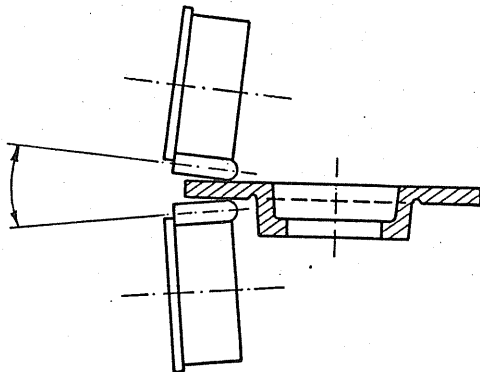
2.1



2.2



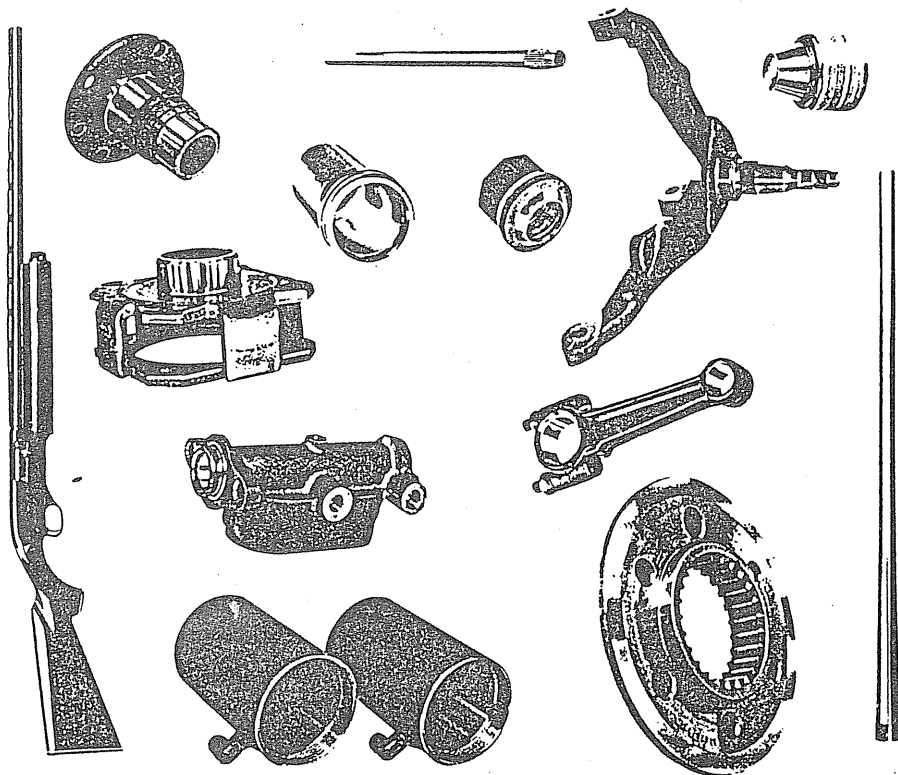
2.3



2.4

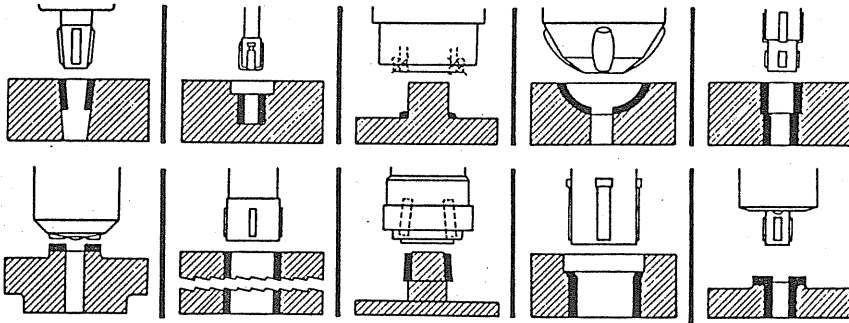
Sl.5.2. Primeri primene PPD

na ovoj slici prikazuje valjanje površine diska sa obe strane na disku za diskosnu kočnicu automobila. Na sl.5.3. prikazan je niz karakterističnih delova za koje se pri završnoj obradi primenjuje i valjanje površina.

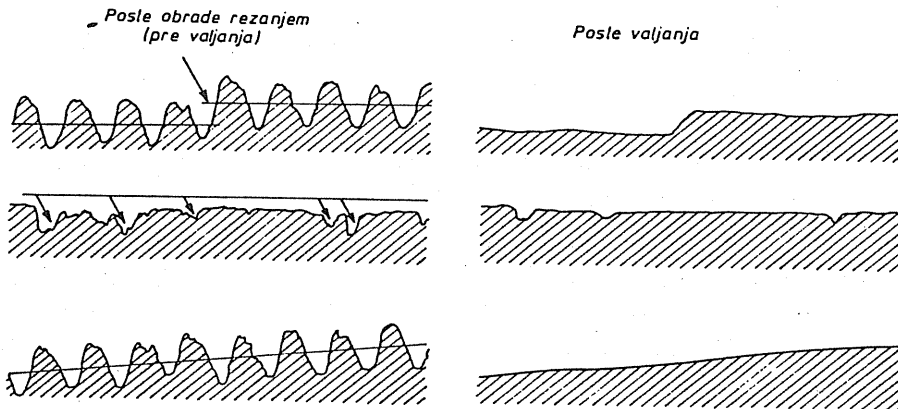


Sl.5.3. Karakteristični elementi za koje se u proizvodnji primenjuje tehnologija površinskog plastičnog deformisanja

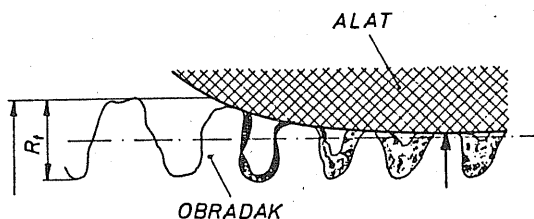
Dalji primeri primene PPD-a prikazani su na slici 5.4. Na slici 5.5. prikazan je karakter hrapavosti površina pre i posle valjanja, a na sl.5.6. se ilustruje način deformisanja neravnina pod dejstvom alata.



Sl.5.4. Primeri primene valjanja površine koji se mogu izvoditi na bušilicama.



Sl.5.5. Promena neravnina na površini primenom valjanja



Sl.5.6. Deformisanje neravnina na površini pod dejstvom alata za valjanje

Razvoj primene površinskog plastičnog deformisanja napredovao je sa porastom zahteva za višim kvalitetom proizvoda mašinske i metalopredjivačke industrije. Uslovima povećane izdržljivosti, veće tačnosti i bržeg uhodavanja ovih proizvoda odgovarala je primena površinskog plastičnog deformisanja. Početak primene valjanja površina odnosio se na obradu rukavaca raznih osovina, koji su se po pravilu okretali u kliznim ležajima. Takvi ležaji su zbog velikog habanja brzo trošeni. Utvrđeno je da takvom trošenju značajno doprinosi karakter hrapavosti površine rukavca. Zbog toga je započeta primena ove tehnologije za obradu rukavaca vagonskih osovina, pomoću relativno jednostavnih mašina u koje je stavljana komplet vagonaska osovina sa točkovima. Pošto su rezultati ove primene bili veoma povoljni, nastalo je izučavanje karakteristika PPD i širenja njene primene na niz mašinskih proizvoda. Tako je npr. ranije bilo neophodno uhodavanje automobila određeno vreme sa smanjenim režimima rada, radi prilagodjavanja obradjenih površina. Poznato je da takvo uhodavanje više nije neophodno, naročito kod kvalitetnijih automobila. Razlog za ovo pored ostalog leži i u primeni tehnologije površinskog plastičnog deformisanja na elementima i površinama, gde je to neophodno. Dubljim izučavanjem površinskog sloja posle obrade PPD došlo se do saznanja da se nosivost elementa može povećati ovom obradom. Ako se ima u vidu karakter krive tečenja, koja se u početnom delu veoma naglo penje, onda se može zaključiti da i male deformacije mogu uzrokovati

značajno povećanje jačine materijala. To je razlog da se površinsko plastično deformisanje u novije vreme veoma često koristi u cilju povećanja nosivosti dela, koje se ostvaruje deformacionim ojačavanjem materijala. U avionskoj industriji veoma je raširena primena PPD koja se realizuje mlazom kuglica u cilju deformacionog ojačanja elemenata iz lima većih površina. Ceo rad /44/ posvećen je ovoj problematici. Savremeni razvoj mašina alatki uključio je i primenu valjanja površina kao kombinaciju sa obradom rezanjem u obliku fleksibilnih tehnoloških ćelija odnosno fleksibilnih tehnoloških linija.

## 5.2. ANALIZA PROCESA POVRŠINSKOG PLASTIČNOG DEFORMISANJA

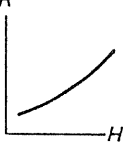
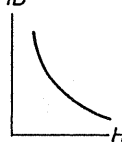
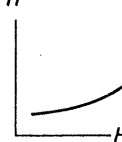
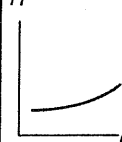
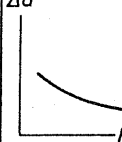
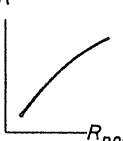
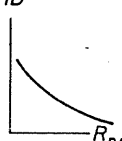
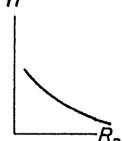
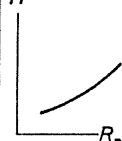
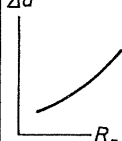
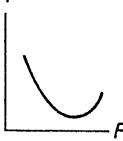
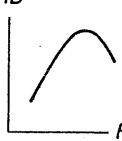
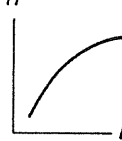
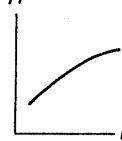
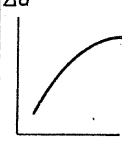

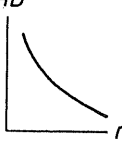
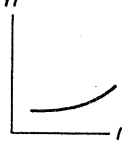

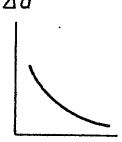
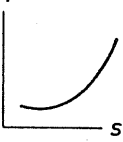
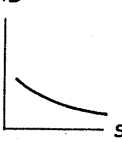

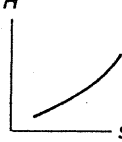
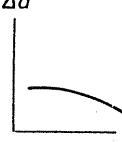
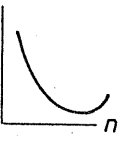
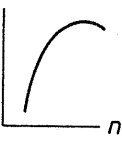
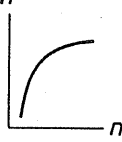
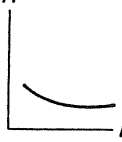
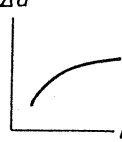
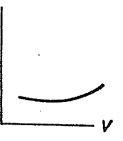
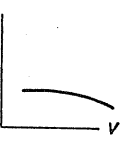
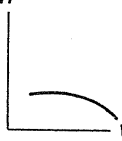
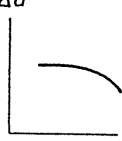
Analiza procesa površinskog plastičnog deformisanja ima za cilj da se dodje do podataka o osnovnim parametrima procesa na osnovu kojih je moguće uspešno projektovanje tehnološkog procesa. U osnovne parametre procesa valjanja površina mogu se uključiti:

- srednji specifični pritisak na kontaktnoj površini,  $p$ ;
- kontaktna površina,  $A_k$ , po veličini i obliku;
- veličina normalne sile, koja se putem alata prenosi na kontaktnu površinu.

Ovde spada i deformaciona sila sa svojim komponentama.

- dubina plastične zone,  $t$ ;
- dimenzije i geometrija alata,
- uzdužni pomak,
- brzina obrade.

Na sl.5.6. daje se kvalitativni grafički prikaz zavisnosti izlaznih karakteristika procesa valjanja (hrapavost, ojačanje, dubina ojačanja, talasavost površine i promena dimenzija) od ulaznih karakteristika materijala (tvrdoća, hrapavost) i parametara procesa obrade (deformaciona sila, geometrija alata, pomak, broj prolaza i brzina valjanja), prema /35/. U nastavku ovog dela detaljnije se analiziraju navedeni parametri procesa valjanja površina. Neki od parametara će se detaljnije analizirati u narednom poglavlju u kome će se više govoriti o tehnologiji površinskog plastičnog deformisanja, odnosno, tehnologiji valjanja površina.

Izlazni pokazatelj Pokazatelj procesa valjanja	Hrapavost posle obrade $R [\mu m]$	Stepen ojačanja $HD \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	Dubina ojačanja $h [\mu m]$	Talasavost površine $H [\mu m]$	Promena dimenzije $\Delta d [\mu m]$
Polazna tvrdoća metala $[HB]$					
Polazna hrapavost površine $R_{pol} [\mu m]$					
Sila valjanja $F [N]$					
Radijus alata u aksijalnom preseku, prečnik kuglice $r [mm]$					
Pomak $s \left[ \frac{mm}{ob} \right]$					
Broj prolaza $n$					
Brzina valjanja $v \left[ \frac{m}{min} \right]$					

Sl.5.6. Kvalitativni prikaz zavisnosti izlaznih karakteristika valjanja u zavisnosti od parametara procesa /35/.

### 5.2.1. Kontaktna površina i specifični pritisak alata na obradak

Deformacija materijala pri valjanju površina počinje utiskivanjem alata u površinu obratka. Početni kontakt alata sa obratkom može biti tačkasti ili linijski u zavisnosti od njihove konfiguracije. Pod dejstvom deformacione sile (spoljnog opterećenja) alat se utiskuje u obradak, obrazujući na njegovoj površini otisak, čiji oblik igra značajnu ulogu u procesu plastičnog deformisanja koji sledi u toku obrade.

Otisak eliptičnog oblika se formira pri valjanju obratka proizvoljnog oblika alatom kružnog profila, ako poluprečnik njegove krivine nije jednak radijusu krivine obratka, uzetom sa obrnutim znakom. Alati sa kružnim radnim profilom u osnom preseku, tj. izradjeni u obliku buričastom ili sfernom (naročito kugličnosti) imaju prednosti, koje im osiguravaju široku primenu u proizvodnoj praksi (sl.5.7.). Pri korišćenju takvih alata očuvava se konstantni oblik otiska nezavisno od tačnosti nosača alata i krutosti obradnog sistema. Alati kružnog profila široko se koriste pri finoj obradi i predstavljaju osnovni alat za ojačavajuće valjanje. Pravougaoni otisak nastaje pri linearnom početnom kontaktu alata i obratka. Uslov za formiranje pravougaonog oblika otiska je jednakost apsolutnih veličina krivina profila alata i obratka. Npr. linearni početni kontakt imaju cilindrični obradci sa alatom pravolinijskog profila pri paralelnim izvodnicama. Pravougaoni otisak stvara najbolje uslove deformacije pri obradi kratkih delova bez uzdužnog pomaka, u kom slučaju alat prekriva celu dužinu obrade. Primena alata koji formiraju linearni kontakt sa obratkom u slučaju obrade sa uzdužnim pomakom uslovljava preduzimanje mera koje uklanjaju koncentraciju kontaktnih napona na kraju valjanja, koji su suprotni pravcu pomaka; na tom mestu se završava kontakt alata i obratka i završno se formira valjana površina.

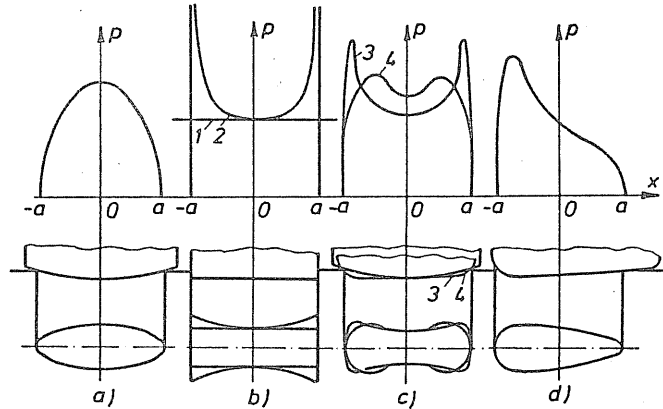
Elastično naponsko stanje u kome se alat i obradak nalaze pod dejstvom deformacione sile zavisi od njihovih elastičnih osobina i konfiguracije kontaktne površine, koja se formira kao rezultat plastične deformacije obratka. Prema teoriji Herca pri tačkastom polaznom kontaktu, koji se pod dejstvom opterećenja pretvara u eliptični, pretpostavlja se raspored kontaktnog pritiska po zakonu elipsoida sa maksimalnim pritiskom u centru (sl.5.7.a) /5/:

$$P_{\max} = \frac{3F}{2\pi ab} \quad (5.1.)$$

gde su:

F - sila utiskivanja

a i b - poluose eliptičkog kontakta u osnom i poprečnom preseku



Sl.5.7. Dijagrami pritiska na površini kontakta obratka sa alatima različitog oblika

- a) pri tačkastom kontaktu valjčića alata kružnog profila
- b) pri linijskom početnom kontaktu cilindričnog valjčića neograničene dužine - 1 i cilindričnog valjka s pravougaonim otiskom koji se formira čeonim površinama - 2.
- c) sa zaobljenim sprezanjem pri odnosu cilindričnog dela prema zaobljenom 0,9 - (3) i 0,4 - (4)
- d) sa kapljicaštim otiskom.

Formiranje plastičnog otiska, kako će se kasnije pokazati stvara bitno povećanje dimenzija kontakta, ali zbog elastičnog vraćanja rastećenog kontaktnog para, njihov početni kontakt zadržava se tačkastim. Ugao utiskivanja alata pri valjanju površina obično ne prelazi  $10^{\circ}$ . Za takav kontakt se može primeniti teorija Herca.

U slučaju linearnog kontakta cilindričnih površina prostorni dijagram rasporeda pritiska predstavlja cilindar eliptičnog preseka sa maksimumom u osnom preseku, konstantnim duž kontakta (sl.5.7.b):

$$P_{\max} = \frac{F}{\pi \cdot a \cdot b} \quad (5.2.)$$



Medjutim prema teoriji Herca, za slučaj linearnog kontakta, određuje se naponsko stanje u tačkama udaljenim od krajeva (kontakt beskrajne dužine). Za slučaj ograničene dužine kontaktni pritisak se može oceniti predpostavljajući ravno naponsko stanje u osnom preseku:

$$P(x) = \frac{F}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}} \quad (5.3.)$$

Na krajevima valjčastog alata, koji imaju nulti radijus krivine, kontakt- ni pritisak teži beskonačnosti (sl.5.7.b). Ova koncentracija se smanjuje čeonim zaobljenjima alata, kada krivina dobija konačnu vrednost. Uko- liko veću dužinu kontakta čine zaobljeni delovi utoliko se više smanjuje koncentracija pritiska (sl.5.7.c), tako da se može konstruisati profil alata, koji će stvarati u uslovima elastičnog kontakta bilo koji zadani dijagram pritiska delom konstantnim,  $p(x) = \text{const}$ . Koncentracija pritiska na krajevima alata ostavlja određene negativne posledice po kvalitet obrade valjanjem. Zbog toga se smatra da je radikalno sredstvo borbe protiv koncentracije pritiska na kontaktnoj površini ograničavanje ugla utis- kivanja alata u osnom preseku. To se ostvaruje povećanjem radijusa kri- vine, ograničenjem deformaione sile ili postavljanje alata pod malim fiks- nim uglom prema površini, koja se obradjuje (sl.5.7.d). U tom slučaju otisak 'dobija kapljičasti oblik, koji se sužava u pravcu suprotnom kre- tanju pomaka. Postoje posebne relacije /5/, pomoću kojih se izračunava- ju poluose elipse elastičnog otiska, koji prethodi plastičnom utiskivanju. Izračunavanje se izvodi prema formulama Herca u zavisnosti od sile utis- kivanja, krivina kontaktnog para i mehaničkih karakteristika materijala kontaktnog para.

#### 5.2.2. Dubina plastične zone ispod eliptičnog otiska

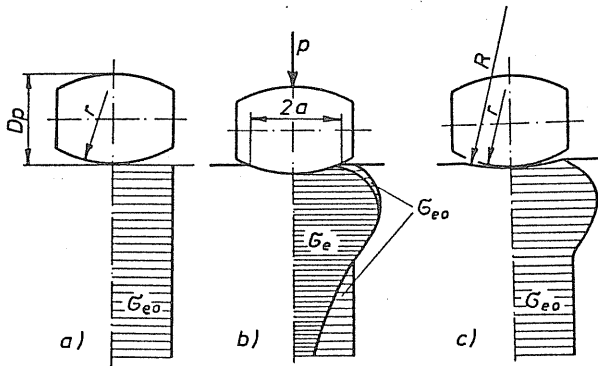
Za područje površinskog plastičnog deformisanja dubina plastične zone ima odlučujući značaj za izlazne parametre procesa. Pri valjanju po- vršina analiziraju se dva posebna slučaja određivanja dubine plastične zone: prvi slučaj se odnosi na dubinu ispod eliptičnog otiska, a drugi na dubinu ispod pravougaonog otiska. U ovom delu se analizira prvi slučaj, dok će drugi biti analiziran posebno.

Postoji mogućnost približnog određivanja dubine plastične zone ( $t$ ) kao funkcije sile utiskivanja ( $F$ ) i granice tečenja ( $\sigma_{eo}$ ) obratka prema sledećem:

$$t = \sqrt{\frac{F}{2\sigma_{eo}}} \quad (5.4.)$$

To je izraz dobijen kao rezultat analize kružnog elastičnog kontakta prema Hercu i daje rezultate koji su bliski rezultatima eksperimenata samo pri relativno malim dubinama. Dakle, treba imati u vidu da se rezultat zasniva na elastičnom stanju obratka bez uticaja plastične deformacije na naponsko stanje, zbog koje granica tečenja deformisanog materijala znatno prelazi granicu tečenja polaznog materijala. Zbog toga relacija (5.4.) se primenjuje za male kontaktne površine čiji je oblik blizak kružnom. Ispitivanjima je utvrđeno da dubina plastične zone zavisi od dimenzija plastičnog otiska. Zbog toga se u nastavku izlaže metoda određivanja plastične zone pomoću analize naponskog stanja u toj zoni, odnosno, određivanjem normalnih naponskih komponenti, pomoću kojih se izračunava efektivni napon, koji kada se izjednači sa naponom tečenja nedeformisanog materijala određuje koordinatu čija vrednost definiše dubinu plastične zone. Na sl.5.8. prikazani su odnosi alata, otiska i dubine plastične zone.

Po završetku plastične deformacije alat i obradak se nalaze u elastičnom stanju, koje uravnotežava spoljne opterećenje (sl.5.8.b). Pri ovome je od principijelnog značaja da se naponsko stanje obratka u kontaktu sa alatom određuje ne polazeći od polaznog oblika površine kontakta (sl.5.8.a), kako se to ranije radilo, već od plastično deformisanog oblika kontaktne površine. Posle rasterećenja alat (valjčić) prelazi u polazni oblik, a na obratku ostaje otisak (sl.5.8.c), čije dimenzije i oblik zavise od elemenata u kontaktu pre utiskivanja i tvrdoće materijala obratka. Elastično naponsko stanje obratka se uspostavlja pri ponovnom opterećenju alata prethodnom silom. Njenim povećanjem stvara se dodatna plastična deformacija površine i povećanje dimenzija kontakta do te mere dok se novonastalo naponsko stanje ponovo ne uravnoteži sa povećanom deformacionom silom. Na taj način, pri proračunu elastičnih napona, koji nastaju u obratku, mora se uzimati u obzir ne polazna već nova krivina plastično deformisane površine. Osim toga, pri plastičnoj deformaciji deformaciono ojačavajućih materijala obratka dijagram granice tečenja se menja u oblasti zone deformisanja izražavajući istoriju deformisanja. U toku deformacije maksimum granice tečenja raste i pomera se u dubinu dotle dok se ne postigne položaj koji odgovara najvećem opterećenju.



Sl.5.8. Prikaz kontakta valjka i obratka

- a - startni položaj
- b - pod opterećenjem deformacione sile
- c - posle rasterećenja

Merenjem tvrdoće u poprečnom preseku nalazi se tačka (dubina) pri kojoj se tvrdoća deformisanog sloja izjednačava sa tvrdoćom polaznog materijala obratka. Ta dubina istovremeno predstavlja dubinu plastično deformisanog sloja. Zbog ovoga se određivanje dubine plastične zone može izvesti metodama teorije elastičnosti.

U opštem slučaju kontakta tela proizvoljne zakrivljenosti površina, glavni naponi  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  na površinama, koje su normalne sa koordinatnim osama, pri čemu je osa z normalna na površinu kontakta, a osa x se pokalpa sa većom osom eliptične kontaktne površine, određuju se prema izazima /40/:

$$\sigma_x = -p \frac{\frac{b}{a}}{1 - \frac{b}{a^2}} \left\{ - \sqrt{\frac{\frac{b^2}{a^2} + \frac{z^2}{a^2}}{1 + \frac{z^2}{a^2}}} + 2 \frac{z}{a} (A-B) - \right.$$

$$\left. - 2\mu \left[ 1 - \frac{a^2}{b^2} \sqrt{\frac{\frac{b^2}{a^2} + \frac{z^2}{a^2}}{1 + \frac{z^2}{a^2}}} + \frac{z}{a} \left( \frac{a^2}{b^2} A-B \right) \right] \right\} \quad (5.5.)$$

$$\sigma_y = -p \frac{\frac{b}{a}}{1 - \frac{b^2}{a^2}} \left\{ \frac{1 + \frac{z^2}{a^2} \left( 2 \frac{a^2}{b^2} - 1 \right)}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{a^2}} \cdot \sqrt{\frac{b^2}{a^2} + \frac{z^2}{a^2}}} - 2 \frac{z}{a} \left( \frac{a^2}{b^2} A - B \right) - 1 + \right. \\ \left. + 2\mu \left[ 1 - \sqrt{\frac{\frac{b^2}{a^2} - \frac{z^2}{a^2}}{1 + \frac{z^2}{a^2}}} + \frac{z}{a} (A - B) \right] \right\} \quad (5.6.)$$

$$\sigma_z = -p \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{a^2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{z^2}{a^2}}} \quad (5.7.)$$

pri čemu su:

$$A(e, \theta) = \int_0^\theta \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \theta} \cdot d\theta \quad (5.8.)$$

i

$$B(e, \theta) = \int_0^\theta \frac{d\theta}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \theta}} \quad (5.9.)$$

eliptični integrali prvog reda, a  $\mu$  Poasonov koeficijent. Eliptični integrali zavise od parametara:

$$\theta = \text{arc ctg } \frac{z}{a} \quad \text{i} \quad (5.10.)$$

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} - \text{ekscentricitet elipse} \quad (5.11.)$$

Kao što se može videti u izrazima (5.5.), (5.6.) i (5.7.) glavni naponi su predstavljeni kao funkcije odnosa poluosa  $a$  i  $b$  eliptičnog otiska, odnosa koordinate  $z$  posmatrane tačke prema poluosama elipse i najvećeg pritiska  $p$  u centru površine kontakta.

Usvajajući za čelik  $\mu = 0,3$  mogu se izračunati glavni naponi prema relacijama (5.5.), (5.6.) i (5.7.) za niz vrednosti  $\frac{b}{a}$  i  $\frac{z}{b}$  i zatim

efektivni napon prema:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right]} \quad (5.12.)$$

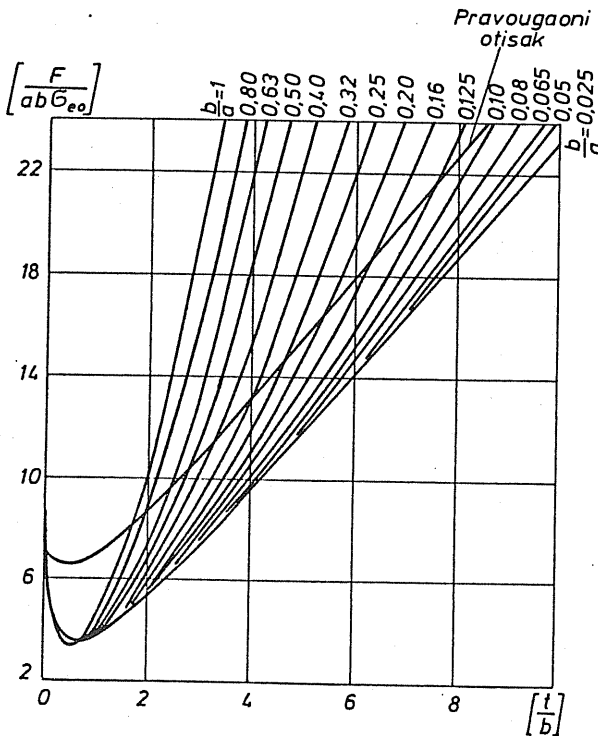
Dubinu plastične zone ili granicu plastično deformisanog sloja nalazimo izjednačavanjem efektivnog napona dobijenog prema relaciji (5.12.) sa granicom tečenja materijala obratka u polaznom stanju, stavljajući da je  $z=t$ , pri ovome ima se u vidu relacija (5.1.).

$$\sigma_{eo} = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi ab} \sqrt{\frac{1}{2p^2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right]} \quad (5.13.)$$

Ako se izraz pod korenom označi sa A, onda se može pisati:

$$\frac{F}{ab\sigma_{eo}} = \frac{2}{3} \frac{\pi}{A} \quad (5.14.)$$

Ovde A predstavlja  $\sigma_e$  pri  $p=1$ . Na sl. 5.9. daje se grafički prikaz zavisnosti  $F$ ,  $\sigma_{eo}$  i  $\frac{t}{b}$  za različite odnose  $\frac{b}{a}$ .



Sl.5.9. Zavisnost  $\frac{F}{ab\sigma_{eo}}$  i  $\frac{t}{b}$  za različite odnose  $\frac{b}{a}$

Dubina plastično deformisanog sloja određuje se prema zadanim vrednostima  $F$ ,  $\sigma_{eo}$  i  $\frac{b}{a}$ , koja zavisi od polazne krivine obratka i alata (sl.5.7.) i dimenzija plastičnog otiska neposredno izmerenog ili proračunatog prema empirijskim formulama /5/.

### 5.2.3. Dubina plastične zone ispod pravougaonog otiska

Ako je radijus profila alata  $r$  jednak po apsolutnoj vrednosti i suprotnog znaka radijusu krivine aksijalnog preseka obratka  $R$ , kontakt alata i obratka u početnom trenutku je linijski a sa utiskivanjem postoje pravougaoni. U posebnim slučajevima to je kontakt cilindričnog valjka alata sa obratkom pravolinijskog profila sa paralelnim izvodnicama.

U vezi sa različitom promenom pritiska duž ose kontakta za slučaj pravougaonog oblika mora se vršiti posebna analiza. U skladu sa Herce-ovom teorijom maksimalni pritisak, konstantan duž ose pravougaonog kontakta, određuje se prema relaciji (5.2.). Ako je  $a \gg b$ , taj pritisak se zadržava u srednjem delu otiska.

Glavni naponi u materijalu obratka u slučaju pravougaonog otiska u ravnima normalnim na koordinate ose određuje se izrazima:

$$\sigma_x = -p2\mu \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2} - \frac{z}{b} \right] \quad (5.15.)$$

$$\sigma_y = -p \left[ \frac{1 + 2\left(\frac{z}{b}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2}} - 2\frac{z}{b} \right] \quad (5.16.)$$

$$\sigma_z = -p \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2}} \right] \quad (5.17.)$$

Izjednačavanjem efektivnog napona dobijenog na osnovi glavnih napona i efektivnog napona polaznog materijala dobija se:

$$\sigma_{eo} = \frac{F}{\pi \cdot ab} \sqrt{\frac{1}{2p} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right]} \quad (5.18.)$$

Eksperimentalnim proverama /5/ pomoću alata prečnika 11,5 mm na ravnom obratku tvrdoće HB=202 i  $\sigma_{eo} = 410 \text{ N/mm}^2$  dobijeni su sledeći rezultati (T.5.1.).

Tabela T.5.1. Dubina plastične zone

Proračun	Dubina plastične zone t								
	1,95	2,15	2,5	2,7	3,8	4,9	6,4	0,92	1,92
Eksperiment	2	2	3	3,5	4	5	7	1	1,5

#### 5.2.4. Deformaciona sila

Deformaciona sila u procesu valjanja površina, koja je potrebna za osiguranje napona u zoni deformisanja zavisi od veličine napona i dimenzija kontaktne površine. U skladu sa potrebnom kinematikom odvijanja procesa valjanja npr. spoljnih cilindričnih površina (sl.5.10.), ukupna rezultujuća deformaciona sila  $F_r$  sastoji se iz tri komponente, u pravcu tri koordinatne ose. Razlikuju se normalna komponenta  $F_n$ , tangencijalna komponenta  $F_t$  i aksijalna ili komponenta posmaka  $F_a$  (sl.5.10). Osnovna sila, koja stvara potreban pritisak na kontaktnoj površini je normalna komponenta  $F_n$ .

Veličinu normalne komponente deformacione sile moguće je odrediti prema sledećem /41/:

$$F_n = p \cdot \pi \cdot (r \sin \alpha)^2 \quad (5.19.)$$

gde su:

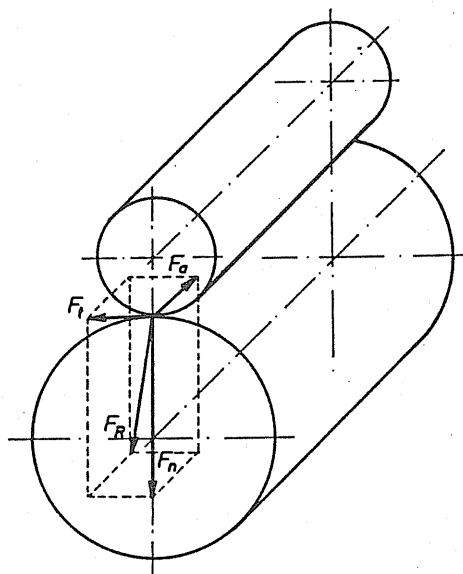
p - srednji kontaktni pritisak (sl.5.7.)

r - poluprečnik alata (valjčića)

$\alpha$  - ugao utiskivanja alata, koji zavisi od svojstava materijala, dimenzija obratka i alata.

Za slučaj valjanja cilindričnih spoljnih površina ugao može biti  $\alpha=5^{\circ}30'$  do  $7^{\circ}30'$ . U izrazu (5.19.)  $\pi(r \sin \alpha)^2$  predstavlja aproksimaciju kontaktne površine. Postoje i tačniji izrazi za ovu površinu, ali oni su istovremeno i mnogo komplikovaniji. Pritisak na kontaktnoj površini treba da se nalazi izmedju minimalne i maksimalne vrednosti. Minimalnu vred-

nost čini srednji specifični pritisak, koji osigurava takve napone u materijalu da se ostvari plastično stanje. Maksimalnu vrednost pritiska određuju oni naponi u materijalu, koji izazivaju lom materijala, odnosno



Sl.5.10. Šema sila pri valjanju cilindričnih spoljnih površina prouzrokuju nastajanje prslina.

Eksperimentalnim ispitivanjima utvrđeno je da je tangencijalna komponenta  $F_t$  u proseku deset puta manja od normalne. Istovremeno aksijalna komponenta je približno jednaka tangencijalnoj. Zbog ovoga se mogu postaviti relacije:

$$\frac{F_t}{F_n} = 0,07 \div 0,12 \quad \text{i} \quad \frac{F_a}{F_n} = 0,05 \text{ do } 0,1 \quad (5.20.)$$

Rezultujuća deformaciona sila se može dobiti kao dijagonala paralelo-pipeda (sl.5.10.), čije su ivice razmatrane komponente. Dakle, može se izraziti kao:

$$F_r = \sqrt{F_m^2 + [(0,07 \div 0,12)F_n]^2 + [(0,05 \div 0,1)]^2} = (1,004 \div 1,012)F_n \quad (5.21.)$$

Vidi se da je veoma mala razlika između intenziteta normalne komponente i intenziteta rezultante. To je rezultat odnosa intenziteta komponentata.



Za projektovanje tehnološkog procesa obrade valjanjem površina imaju praktični značaj uglavnom komponentalne vrednosti deformacione sile.

### 5.3. TEHNOLOGIJA VALJANJA POVRŠINA

Sadržaj projektovanja tehnologije neke tehnološke metode u tehnologiji plastičnosti po pravilu sadrži sledeće elemente:

- analiza tehnologičnosti konstrukcije;
- pripremak; definisanje pripremkama u odnosu na dimenzije, prethodnu obradu i način njegovog dobijanja;
- oblikovanje, odnosno, faze oblikovanja;
- alati
- mašine.

Obično se za posebnu metodu dodaju još neki elementi (zagrevanje, termička obrada, obrezivanje, fosfatiranje, itd.) karakteristični samo za razmatranu metodu.

Problemi definisanja elemenata tehnologije valjanja površina odnose se na njenu veoma raznovrsnu primenu, zbog čega je nemoguće dati uniformne elemente projektovanja tehnološkog procesa za čitavo područje primene. Raznovrsnost primene odnosi se prvo na oblik površine (sl.5.1.). Kao što je u uvodu rečeno površine mogu biti: rotacione spoljne, rotacione unutrašnje, rotacione profilne i ravne. mašine i alati se razlikuju za svaki oblik površine. Vrsta materijala obratka takodje utiče na elemente projektovanja tehnološkog procesa. Namena valjanja u odnosu na dobijanje izlaznih parametara: ojačavajuće, tačno i fino valjanje utiče na projektovanje procesa. Konačno, dimenzije obratka bitno utiču na način izvodjenja procesa valjanja. Obraci mogu biti od vrlo malih dimenzija, samo nekoliko milimetara, do vrlo krupnih delova, više metara dužine, kao što su razni pneumatski i hidraulični cilindri. Mogućnost kombinacije istovremenog valjanja površina sa obradom na strugu predstavlja problematiku za sebe, kojoj je posvećena čitava jedna knjiga /43/. Prostor ne dozvoljava da se ulazi u detalje navedenih područja. Zbog toga će se dati samo kraći osvrt na ovu problematiku. sa određenim ilustracijama u odnosu na alate i primenu.

Analiza tehnologičnosti konstrukcije obratka i dimenzija pripremkama. Valjanje površina kao završna obrada deformisanjem ima niz specifičnosti u odnosu na druge metode obrade u tehnologiji plastičnosti. U vezi s tim je i problematika analize tehnologičnosti konstrukcije obratka i

definisanje svih elemenata priprema. Rešavanje ove problematike će se ilustrovati sa nekoliko karakterističnih primera. Tehnogičnost konstrukcije obratka se analizira sa stanovišta karakteristika tehnologije površinskog plastičnog deformisanja, odnosno, valjanja površina u cilju dobijanja odgovora na pitanja: da li se može ova tehnologija primeniti na obradu odredjenih površina s obzirom na materijal obratka i njegove geometrijske karakteristike i kakve bi eventualne korekcije bile nužne u cilju primene ove tehnologije. Drugo osnovno pitanje odnosi se na izlazne rezultete, kako s obzirom na funkcionalnost elemenata, tako i s obzirom na ekonomske efekte primene ove tehnologije. Tako po dobijanju pozitivnih odgovora na obe ove grupe pitanja donosi se odluka o primeni ove tehnologije i rešavanju problema projektovanja odgovarajućeg tehnološkog procesa.

Osnovni parametri procesa valjanja površina. Da bi se projektovao proces potrebno je definisati režime obrade, koji su uslovljeni osnovnim parametrima procesa, a i režim obrade i relevantni parametri su zavisni od postavljenog cilja, odnosno, namene valjanja površine. Koliko povećanje tvrdoće površinskog sloja je poželjno i na kojoj dubini. Kolika hrapavost površine posle obrade je uslovljena i koja je izlazna tačnost propisana. Od ovih elemenata zavisi pritisak na kontaktnoj površini, a od njega i sve komponente deformacione sile. Od istih elemenata zavisi i brzina obrade i pomak.

Kontaktne pritisak i vrsta materijala su odlučujući faktori za deformaciono ojačavanje. Kod odredjene vrste materijala postoji optimalni pritisak sa kojim se ostvaruje najveće povećanje tvrdoće. Veličina pritiska zavisi i od tvrdoće polaznog materijala. U tabeli T.5.2. daju se preporuke za kontaktne pritisak u zavisnosti od polazne tvrdoće.

T.5.2. - Kontaktne pritisak

Polazna tvrdoća HRC	62 i više	58÷62	52÷ 58	45÷52	Manje od 52
Srednje kontaktne pritisak N/mm <sup>2</sup>	2800÷300	2700÷2900	2500÷2800	2300÷2500	2100÷2400

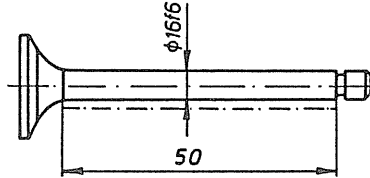
Oblikom alata se utiče na dubinu deformacionog ojačavanja. Za tvrdje polazne materijale alate treba koristiti u obliku kuglice, a ne u obliku valjčića. Veličina hrapavosti zavisi od pomaka i prečnika alata:

$$R_z = R - \sqrt{R^2 - \frac{s^2}{4}} \quad (5.22.)$$

gde su  $R$  - prečnik oalata,  $s$  - pomak, a  $R_z$  - maksimalna hrapavost. Pored ovoga hrapavost posle obrade valjanjem površina bitno zavisi i od polazne hrapavosti. Preporučuje se da za nekaljene čelike, obojene metale i njihove legure polazna hrapavost ne bude veća od  $R_a = 2,5 \div 5,0 \mu\text{m}$  a za kaljene čelike  $R_a = 0,75$  do  $1,25$ . Preporučuje se da obimna brzina pri obradi bude u granicama  $50$  do  $100 \text{ m/min}$ , a pomak  $0,06$  do  $0,10 \text{ mm/ob}$ . Male brzine i mali pomaci smanjuju produktivnost, a mogu čak da pogoršaju izlaznu hrapavost. Brzina utiče na temperaturu u zoni deformisanja. Valjanje površina se po pravilu izvodi u jednom prolazu. Samo u posebnim slučajevima kada krutost obratka nedozvoljava korišćenje optimalnog kontaktnog pritiska, već manjeg, treba koristiti dva do tri radna prolaza. Kao mazivno sredstvo pri obradi se koristi industrijsko ulje.

#### Primeri primene valjanja površina

##### 1. Ventil, sl.5.11. Materijal Č.4270

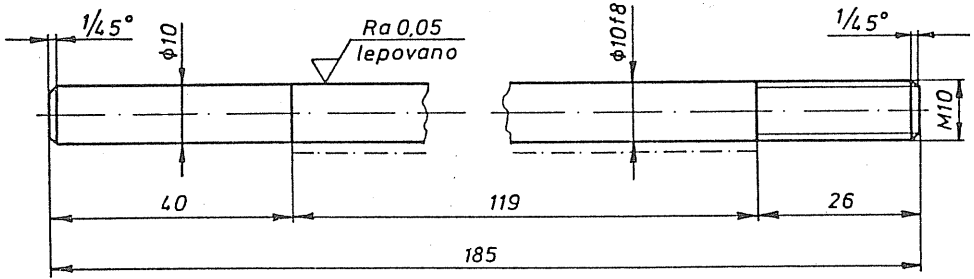
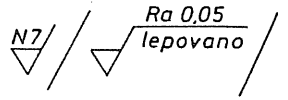


Sl.5.11. Ventil

Prethodna obrada je brušenje sa  $R_a = 4 \mu\text{m}$ , dodatak za obradu  $4 \mu\text{m}$ . Parametar hrapavosti posle obrade valjanjem površine  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ . Normalna sila valjanja  $F_n = 6000 \text{ N}$ . Vreme valjanja iznosi  $4 \text{ sec}$ , a izvodi se na automatskoj mašini.

##### 2. Podizač ventila, sl.5.12., materijal Č.1731.

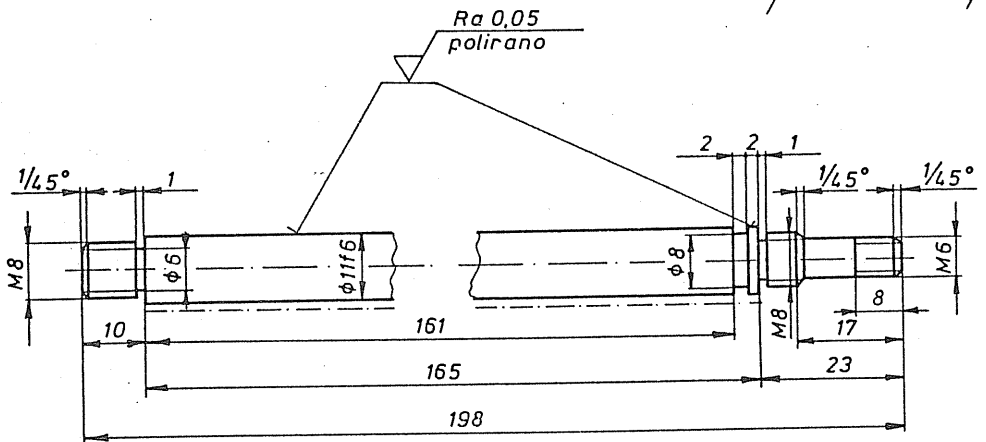
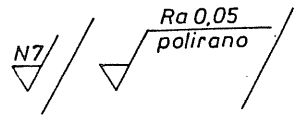
Prethodna obrada je struganje sa  $R_a = 10 \mu\text{m}$ , dodatak za obradu  $10 \mu\text{m}$ . Posle valjanja  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ . Normalna sila valjanja  $10.000 \text{ N}$ .



Sl.5.12. Crtež podizača ventila

3. Klipnjača amortizera, sl.5.13., Materijal Č.1531

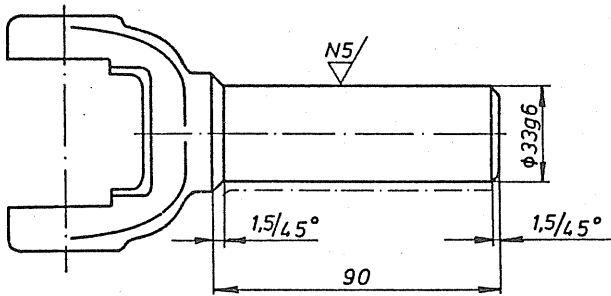
Prethodna obrada je brušenje sa  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$  i dodatkom za obradu  $4 \mu\text{m}$ . Posle valjanja hrapavost iznosi  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ . Sila valjanja 3500 N, a vreme obrade 5 sec.



Sl.5.14. Crtež klipnjače amortizera

4. Viljuška kardana, sl.5.15., Materijal Č.1531.

Prethodna obrada je brušenje sa  $R_a = 4 \mu\text{m}$  i dodatkom za obradu  $4 \mu\text{m}$ . Posle obrade valjanjem hrapavost iznosi  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . Sila valjanja  $F_n = 6500 \text{ N}$ , a vreme obrade iznosi 8 sec.

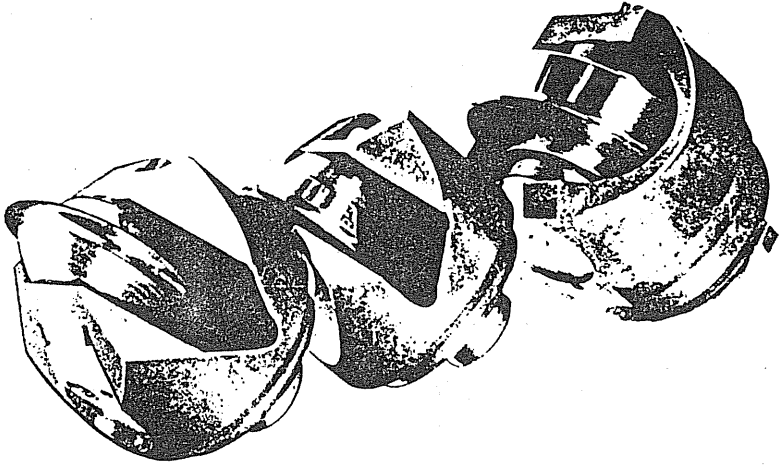


Sl.5.15. Viljuška kardana

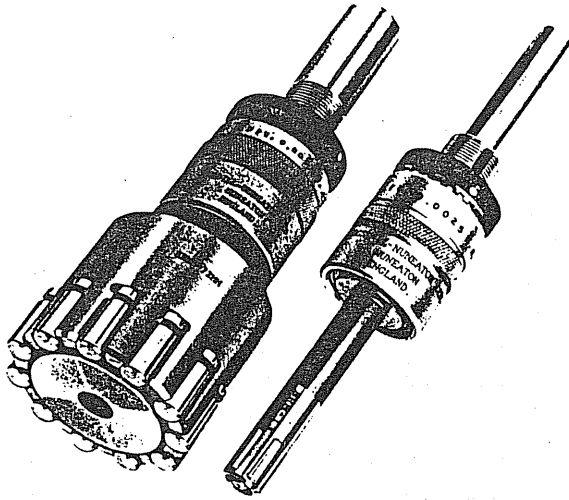
Navedeni primeri sasvim slučajno predstavljaju valjanje spoljnih cilindričnih površina, pošto su u pitanju veoma poznati mašinski delovi. Mogao bi se navesti veliki broj primera valjanja unutrašnjih cilindričnih površina kao i ravnih, ali se izostavljaju zbog ograničenog obima knjige.

Alati za valjanje površina. I ako se valjanje površina vrši sa parcijalnim zahvatom alata, što znači da alati u ovoj tehnološkoj metodi imaju univerzalni karakter, ipak je raznovrsnost primenjenih alata velika. Alati se mogu podeliti u nekoliko grupa. Prema obliku alati mogu biti loptasti i valjkasti. Loptasti alati se koriste za tvrdje materijale. Oni omogućavaju manju kontaktnu površinu, zbog čega se jednostavnije osigurava veći kontaktni pritisak. Prema konstrukciji alati mogu biti prostog dejstva (sa jednim radnim organom) i višestrukog dejstva (više radnih organa povezanih u kavez). Osim ovih osnovnih podela, alati se razlikuju s obzirom na namenu u odnosu na oblik površine koju treba valjati i prema dimenzijama obradaka. Alati prostog dejstva za valjanje spoljnih površina daju se na sl.5.16. Kao što je moguće primeniti u pitanju su razne geometrije izvršnog organa alata.

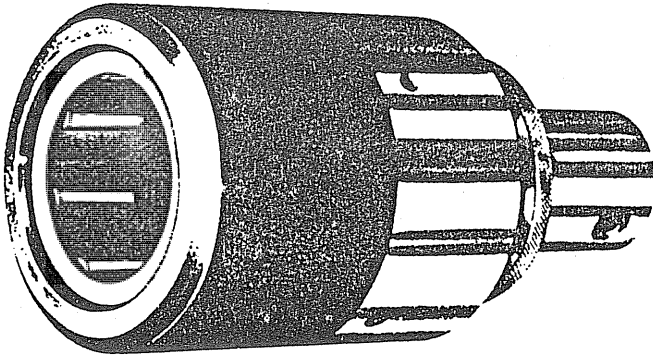
Na slikama 5.17. do 5.21. prikazane su fotografije alata različitih konstrukcija namenjenih za valjanje površina različitog oblika.



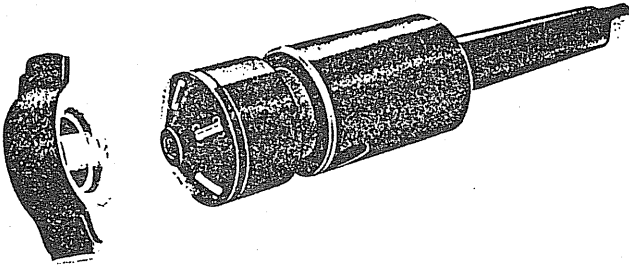
Sl.5.16. Alati za valjanje spoljnih površina različitog profila (prostog dejstva)



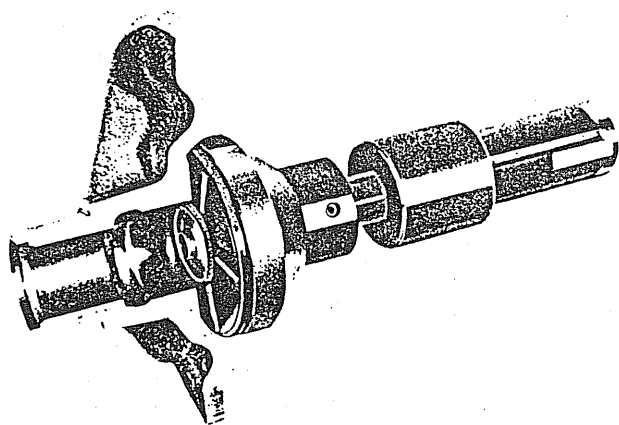
Sl.5.17. Alati za valjanje unutrašnjih cilindričnih površina višestrukog dejstva



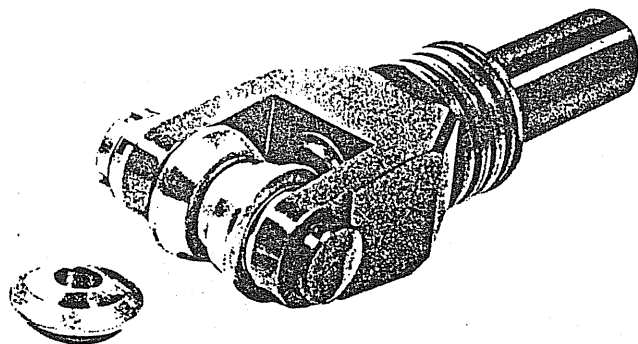
Sl.5.18. Alat višestrukog dejstva za valjanje spoljnih površina



Sl.5.19. Alat za valjanje konusne površine



Sl.5.20. Alat za valjanje ravne površine



Sl.5.21. Alat za valjanje određenog profilnog oblika površine

Mašine za valjanje površina. Raznovrsnost asortimana delova koji se obradjuju površinskim plastičnim deformisanjem otvara mogućnosti primene mašina vrlo različitih konstrukcija. S obzirom na karakteristike procesa valjanja površine i potrebne režime ove obrade, mašine kao osnovni element obradnog sistema, moraju osigurati unošenje potrebne energije u sistem kao i potrebna kretanja uz prenošenje odgovarajućih sila.



Zbog ograničenog obima ovog dela knjige nije moguće dublje ulaženje u konstrukciju ovih mašina. Ovde će se dati određene napomene u vezi mašina uz neke ilustracije izvedenih mašina. Jedna od bitnih karakteristika tehnologije valjanja površina odnosi se na parcijalno dejstvo alata, zbog čega mašine za ovu tehnologiju mogu imati sličnosti sa mašinama za obradu rezanjem (struganje, bušenje i dr.). Dalje sličnosti su u potrebi osiguranja rotacionog kretanja i odgovarajućih pomaka. Zbog ovoga mašine koje se koriste za valjanje površina se mogu podeliti u tri grupe:

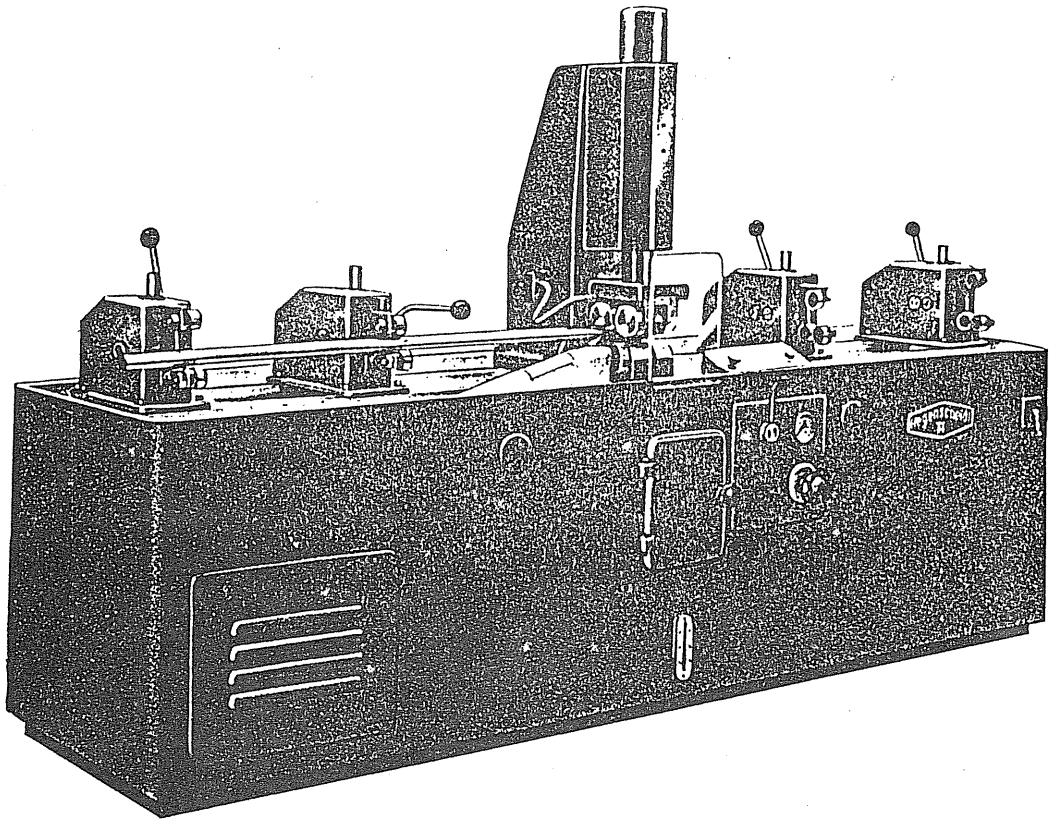
- Adaptirane mašine za obradu rezanjem (strugovi, bušilice)
- Univerzalne mašine za valjanje površina i
- Specijalne mašine za valjanje površina.

Korišćenje strugova i bušilica za valjanje površina je razvijeno u primeni i koristi se kada postoje slobodni kapaciteti mašina za obradu rezanjem, a proizvodne količine ne opravdavaju nabavku posebne opreme za valjanje površina. Ako se strug koristi kao mašina za valjanje površina, onda se mogu upotrebljavati alati kao na sl.5.16., 5.21. i dr. slični. Adaptacija se odnosi na način pričvršćivanja alata i eventualne mere za prenošenje normalne sile i osiguranje potrebnog rešima rada. Veoma je razvijeno korišćenje bušilica kao mašina za valjanje površina. U tom slučaju se koriste alati višestrukog dejstva sa mogućnošću podešavanja prečnika (sl.5.17. do 5.19.).

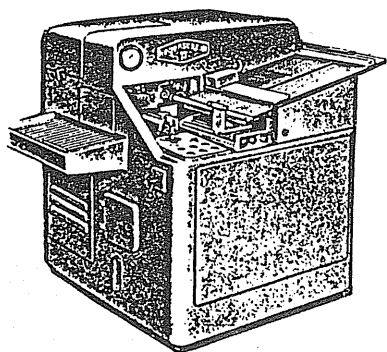
Univerzalne mašine služe za valjanje određenog asortimana delova sa režimima obrade koji se u celini mogu osigurati, pošto je mašina konstruisana za tehnologiju valjanja površina, a univerzalne je namene s obzirom na dimenzije delova koji se mogu obradivati. Na sl.5.22. prikazana je mašina za valjanje površina sledećih karakteristika:

- područje namene:
  - prečnik obratka 10÷100 mm
  - max. dužina obrade sa pridrživačima 3000 mm
- snaga motora 4 kW
- Dimenzije mašine
  - dužina 3 m
  - širina 0,8 m
  - visina 1,84 m
- Težina 2,5 t

Na sl.5.23. prikazana je automatska mašina za obradu sitnijih delova sa karakteristikama:



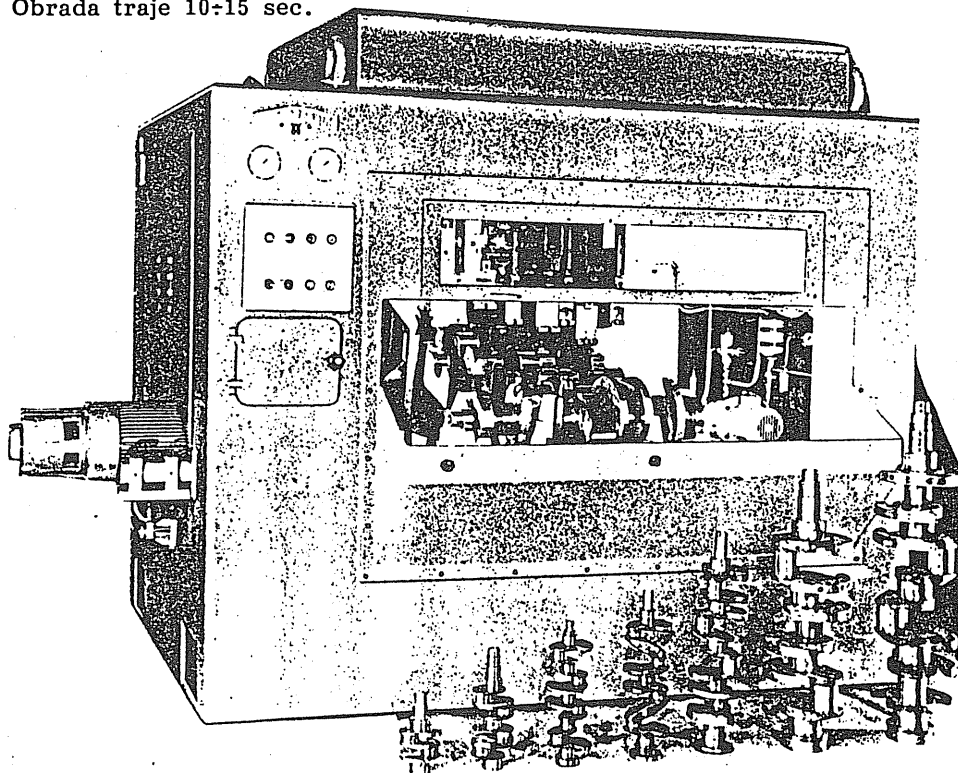
Sl.5.22. Mašina za valjanje površina univerzalne namene  
- prečnik obratka 10 do 100 mm  
- maksimalna dužina obrade 3000 mm  
- snaga motora 4 kW



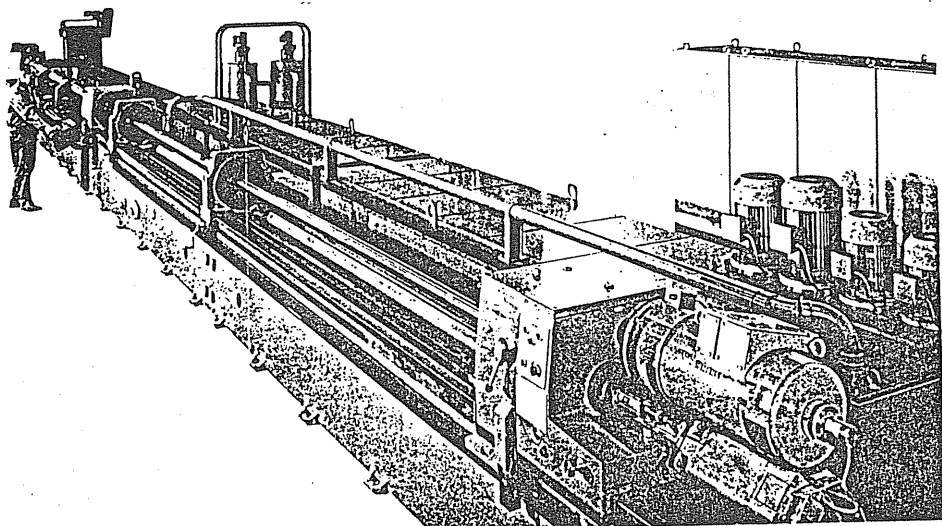
- područje namene
  - prečnik obratka 6÷20 mm
  - dužina 50÷50 mm
- dimenzije
  - dužina 1,30 m
  - širina 1,20 m
  - visina 1,30 mm
- težina 1,8 t

Sl.5.23. Mašina za valjanje površina sitnijih delova

Na sl.5.24. i 5.25. prikazane su specijalne mašine za valjanje površina. Sl.5.24. prikazuje specijalnu mašinu za visoko serijsku proizvodnju na kojoj se valjaju površine oslanjanja kolenaste osovine. Na ovoj mašini obradom oslonaca i zaobljenja povećava se dinamička čvrstoća za 30 do 300%, a dubina deformacionog ojačavanja se ostvaruje do 3 mm. Obrada traje 10-15 sec.



Sl.5.24. Specijalna mašina za valjanje kolenastih osovina

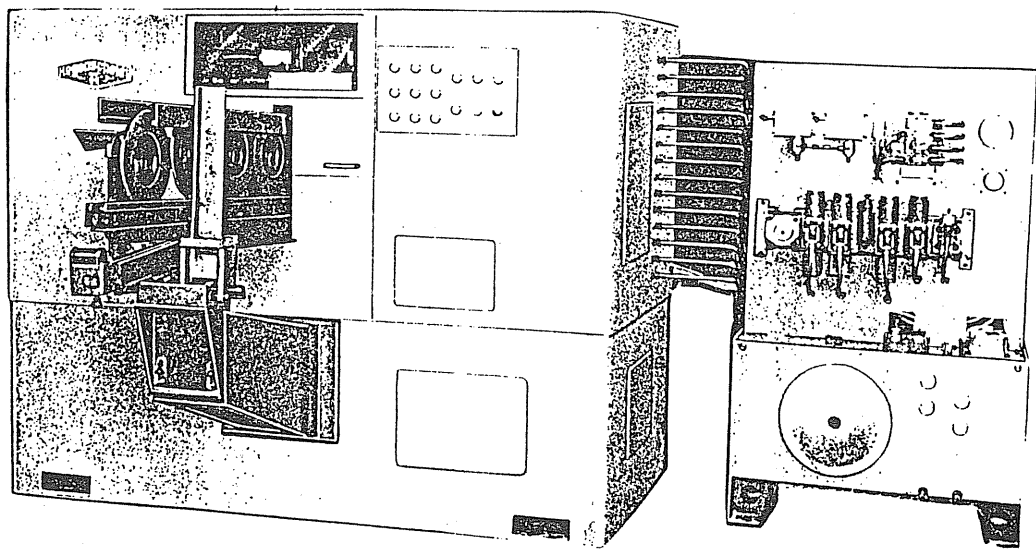


Sl.5.25. Fleksibilna ćelija za obradu cilindričnih površina

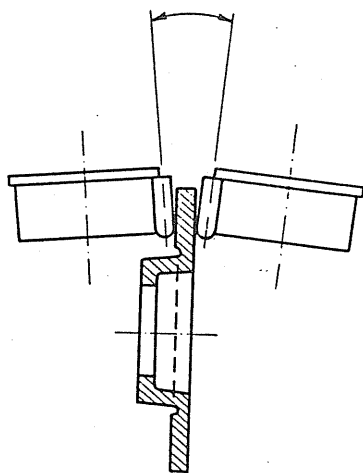
Na sl.5.25. prikazana je specijalna mašina za obradu cilindričnih površina manjih i većih dužina. Karakteristika ove mašine je u tome da je građena kao fleksibilna ćelija, pošto u sebi uključuje mogućnosti različitih obrada cilindričnih površina kao što su glodanje, struganje, brušenje, bušenje i valjanje površina. Različite tehnologije obrade se realizuju montažom odgovarajućih glava sa alatima. Naglašeno je više puta da se često valjanje površina primenjuje u kombinaciji sa različitim obradama (struganje, brušenje i sl.).

Na kraju se na sl.5.26., 5.27. i 5.28. ilustruje valjanje površina diska za diskosne kočnice. Karakteristike ove mašine i obrade su sledeće:

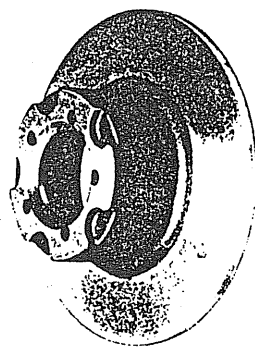
- Maksimalni prečnik diska	350 mm
- Maksimalni prečnik obrade	130 mm
- Maksimalna debljina diska	40 mm
- Broj okretaja radnog vretena	180 o/min
- Pomak valjanja	0 do 5 mm/obrtaja
- normalna sila valjanja	
- podešljiva	1000 do 10.000 N
- Snaga mašine	6 kW
- Težina	3 t



Sl.5.26. Specijalna mašina za valjanje površine kočionog diska



Sl.5.27. Šema valjanja površine kočionog diska



Sl.5.28. Kočioni disk

Prethodna obrada: struganje sa  $R_a = 25 \mu\text{m}$ . Vreme valjanja 20 ces.  
Hrapavost posle valjanja  $2 \mu\text{m}$ .

## 6. HLADNO UTISKIVANJE

### 6.1. UVOD, DEFINICIJA I OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROCESA

Hladno utiskivanje je proces zapreminskog deformisanja kod koga se žig sa malom brzinom utiskuje u pripremak na određenu dubinu. Žig je od specijalnog čelika i ima veliku tvrdoću a pripremak je od alatnog čelika i meko je žaren. Postupak hladnog utiskivanja izvodi se na specijalnim hidrauličnim presama.

Ova tehnologija koristi se za izradu gravure u alatima za zapreminsko deformisanje.

Potreba za izradom gravure pojavljuje se ne samo kod alata za zapreminsko deformisanje nego i kod alata za livenje pod pritiskom, alata za izradu delova od plastike, stakla kao i izradi kalupa u konditorskoj industriji. Osnovni problem kod izrade ovih alata jeste izrada šupljine (gravure) koja predstavlja negativ gotovog dela.

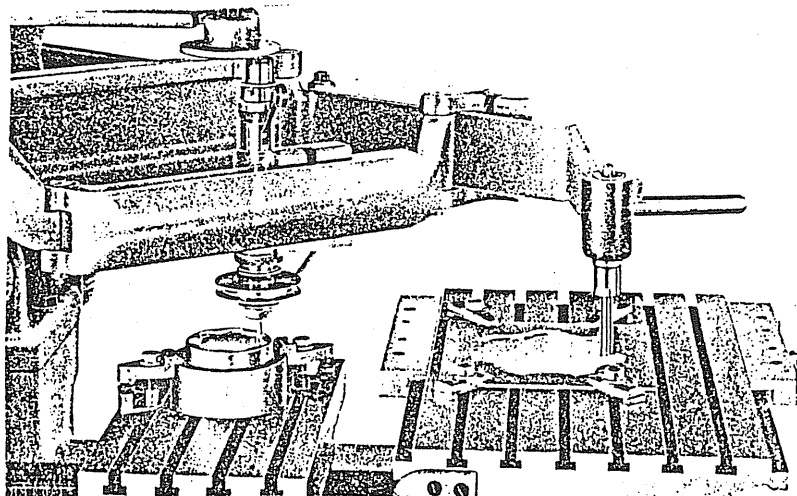
Gravure alata moguće je dobiti na više načina a najčešće metode koje se koriste za izradu gravura su:

- a) obrada skidanjem strugotine
- b) obrada elektro-erozijom uz ručno doterivanje (EDM)
- c) livenje
- d) izrada gravure u elementima alata iz tvrdog metala
- e) utiskivanje

Skidanje strugotine je još uvek najčešće primenjivana metoda za izradu alata za zapreminsko oblikovanje. Obrada struganjem se koristi za izradu rotaciono-simetričnih šupljina a glodanje za šupljine proizvoljnog oblika. Pri tome se najčešće primenjuje kopirno glodanje, sl.6.1.

Prednost ovog postupka je u tome što se njime mogu izraditi šupljine najrazličitijih oblika, dok je nedostatak postupka relativno nizak kvalitet obradjene površine. Zbog toga se gravure, dobijene skidanjem strugotine, najčešće moraju naknadno obradivati ručnim poliranjem. Pored toga, u slučaju izrade većeg broja gravura ne postižu se značajnije uštede u vremenu izrade, što je slučaj kod nekih drugih, alternativnih metoda.

Elektro-erozivna obrada (EDM) bazira na skidanju čestica materijala električnim pražnjenjem između elektroda (sl.6.2.). Pri tome, negativna elektroda ima oblik negativa gravure budućeg alata, a pozitivna gra-



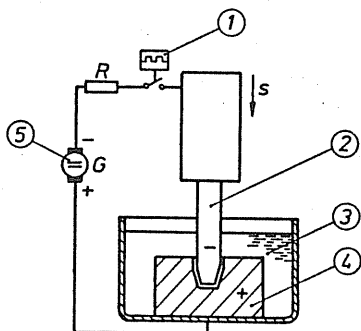
Sl.6.1. Izrada gravura kopirnim glodanjem

vura je sam pripremak. Elektrode su razdvojene specijalnom tečnošću - dielektrikumom, a postavljene su na veoma malom rastojanju jedna u odnosu na drugu. Variranjem tog rastojanja, kao i jačine struje kola, postižu se različite brzine skidanja delića materijala kao i različiti kvalitet obradjenih površina.

Oprema za obradu po EDM postupku je skupa a sama obrada traje dugo (i do nekoliko sati, već u zavaisnosti od oblika i veličine gravure). Tako npr. vreme potrebno za izradu alata (gravure) za kovanje kolenastog vratila dužine 250 mm metodom EDM iznosi oko 10 časova.

Kvalitet površine nije na visokom nivou pa je često potrebna naknadna ručna dorada.

Prednost ove metode je što se mogu izraditi gravure najrazličiti- jih oblika i dimenzija i to bez obzira na vrstu materijala.



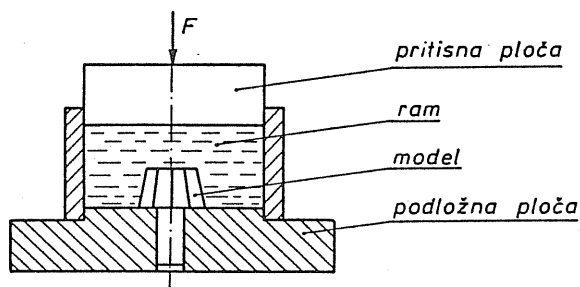
- 1 - prekidač kola
- 2 - negativna elektroda
- 3 - dielektrikum
- 4 - pozitivna elektroda (pripremak)
- 5 - izvor električne struje

Sl.6.2. Izrada gravura pomoću EDM postupka



Livenjem se najčešće dobijaju alati za kovanje kao i za preradu termoplastičnih masa od lako topljivih legura.

Osnovni elementi uređaja za livenje gravura su: model, podložna ploča, ram i pritisna ploča (sl.6.3.). Model se usadjuje u podložnu ploču koja se zajedno sa modelom i pritisnom pločom zagravaju na temperaturu 593-893 K. Ceo uređaj postavlja se na sto hidraulične prese. Nakon ulivanja rastopljene legure aktivira se presa kako bi se hladjenje legure odvijalo pod pritiskom. Pre potpunog hladjenja legure skida se ram a izlivenog kalupa vadi se model (negativ gravure).



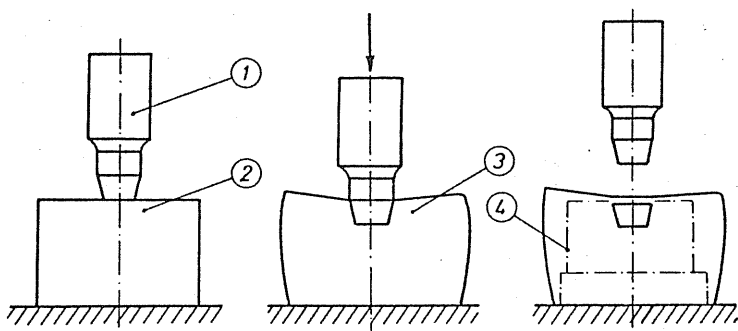
Sl.6.3. Izrada gravura livenjem

Izrada gravura primenom uložaka od tvrdog metala se vrši postupkom sinterovanja i presovanja na približnu meru gravure, da bi se konačne dimenzije i oblik gravure dobili dijamskim brušenjem.

Osnovna karakteristika ovako izradjenih alata je velika postojanost ali teška obrada, visoka cena kao i osetljivost ovako dobijenih alata na lom objektivno ograničavaju primenu ove tehnološke metode za izradu alata.

Gravure manjih i srednjih dimenzija veoma uspešno mogu da se izradjuju hladnim utiskivanjem.

Proces hladnog utiskivanja prikazan je na slici 6.4. Žig (1) se malom brzinom utiskuje u pripremak (2), koji predstavlja budući alat za zapreminsko oblikovanje. Pripremak je od alatnog čelika. Nakon izvršenog procesa utiskivanja na određenu dubinu, žig se izvlači iz materijala u kome je stvorena gravura. Sama gravura je procesom utiskivanja dovedena na završni oblik i dimenzije i nije potrebna nikakva naknadna



Sl.6.4. Izrada gravura hladnim utiskivanjem

obrada. Završni oblik alata dobija se mehaničkom obradom spoljnih površina (4).

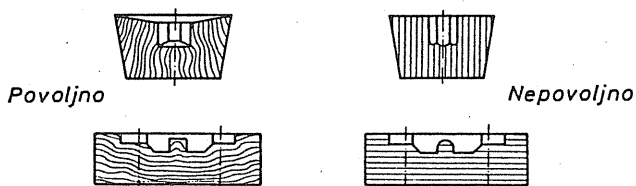
Hladno utiskivanje se sve češće primenjuje u izradi alata (gravura) za zapreminsko oblikovanje. Ovakav trend uslovljen je značajnim prednostima koje ova tehnologija - ako su ispunjeni određeni uslovi - pruža u odnosu na ostale mogućnosti izrade gravura.

Osnovne prednosti koje se ostvaruju primenom hladnog utiskivanja za izradu gravura su:

- visoka tačnost i kvalitet izradjene gravure. Dimenzije gravure odgovaraju dimenzijama žiga kojim se ta gravura utiskuje. Tehnički ostvarljive tolerancije kod hladnog utiskivanja su:  $T=0,01-0,02$  mm. Ekonomsko opravdane tolerancije, uzimajući u obzir postojanost žiga su:  $T=0,03-0,05$  mm,
- visok nivo identičnosti oblika gravure (u slučaju izrade više istih gravura),
- visoka postojanost alata dobijenih hladnim utiskivanjem, što rezultira iz povoljnog toka vlakana materijala i deformacionog ojačanja (sl.6.5.),
- proces hladnog utiskivanja može izvoditi radnik niže stručne kvalifikacije,
- često je jednostavnije izraditi spoljnu konturu žiga za utiskivanje nego odgovarajući unutrašnji oblik gravure. Na taj način hladno utiskivanje može biti ekonomičnije već i kod izrade samo jedne gravure,
- ušteda u ceni koštanja, pogotovu kada se izradjuje veći broj identičnih gravura,
- kratko vreme izrade gravura.

*Hladno utiskivanje*

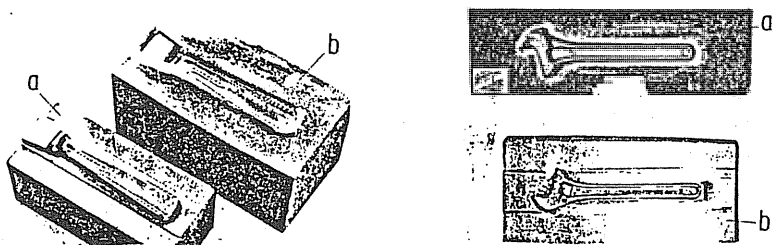
*Skidanje strugotine*



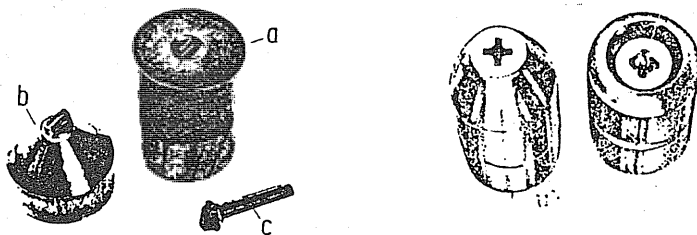
Sl.6.5. Tok vlakana u materijalu kod alata dobijenih hladnim utiskivanjem i skidanjem strugotine /4/

Zbog navedenih prednosti hladno utiskivanje nalazi primenu u izradi:

- kalupa za kovanje (sl.6.6.)
- alata za hladno i toplo oblikovanje vijčane robe (sl.6.7.)



Sl.6.6. Kalupi za kovanje /4/

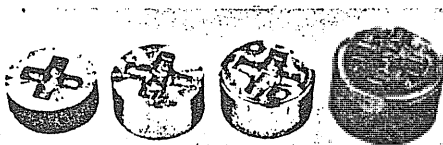


Sl.6.7. Alati za vijčanu robu /4/

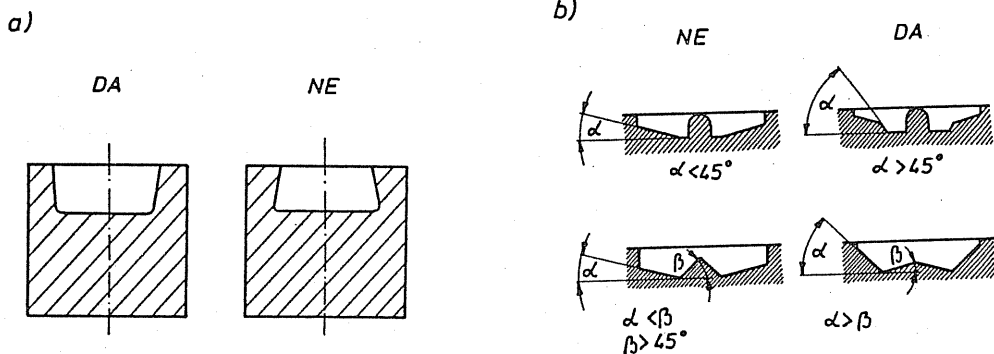
- alata za plitka utiskivanja (novac, oznake, ukrasi, igračke, pribor za jelo, delovi satova, okviri nameštaja, itd.), sl.6.8.
- alata za livenje u kokili, za plastične mase i gume, stakla, keramike.

Primena ove tehnologije ograničena je:

- obradivošću materijala gravure, posebno deformacionim ojačavanjem
- oblikom i veličinom gravure. Ne mogu se svi oblici gravure dobiti hladnim utiskivanjem, npr. oni kod kojih se poprečni presek gravure povećava idući ka njenom dnu (sl.6.9a).



Sl.6.8. Alati za plitka utiskivanja



Sl.6.9. Ograničenost primene hladnog utiskivanja obzirom na oblik gravure

Na sl.6.9b data su dva primera povoljnih tj. nepovoljnih oblika gravure za hladno utiskivanje.

Zbog velikih sila i pritiska koji se u procesu pojavljuju, izrada gravura hladnim utiskivanjem ograničena je na male i srednje veličine preseka gravure.

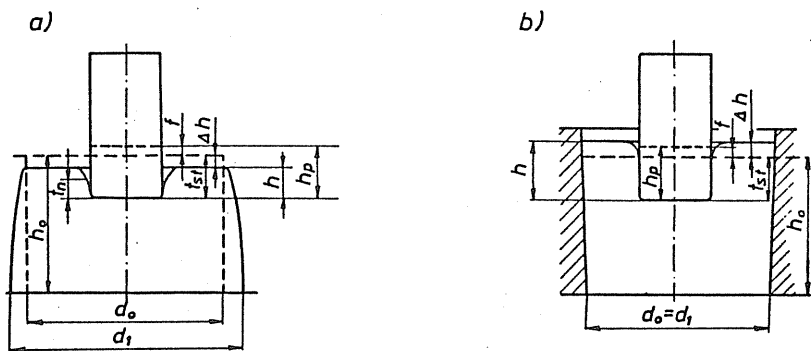
## 6.2. ANALIZA PROCESA

### 6.2.1. Odvijanje procesa

Hladno utiskivanje može se odvijati na dva načina i to kao:

- slobodno utiskivanje
- utiskivanje u kalupu

Oba ova slučaja prikazana su na sl.6.10.



Sl.6.10. Vrste utiskivanja: a - slobodno utiskivanje  
b - utiskivanje u kalupu

Kod slobodnog utiskivanja žig se utiskuje u materijal koji je slobodno postavljen na oslonu površinu, dok se kod utiskivanja u kalupu materijal postavlja u određeni kalup. Kod slobodnog utiskivanja dolazi, pored samog utiskivanja, i do sabijanja pripremljena, usled čega se menja njegova spoljna kontura (dolazi do naburičenja). Kako u toku procesa ne bi dolazilo do pucanja zidova usled tangencijalnih zatezних napona, neophodno je da odnos  $A_z/A_p$  ( $A_z$  - poprečna površina žiga,  $A_p$  - poprečna površina pripremljena) ne predje određenu kritičnu vrednost koja zavisi od vrste materijala pripremljena i geometrijskih odnosa žig-materijal.

Slobodno utiskivanje koristi se za izradu alata većih površina i manjih dubina (npr. kovački kalupi za ključeve za zavrtnjeve). Alati dobijeni na ovaj način imaju manju tačnost od alata dobijenih utiskivanjem u kalupu.

Kod utiskivanja u kalupu tok materijala se usmerava u smeru suprotnom od smera kretanja žiga. Usled ovog usmeravanja toka materijala kao i zbog većeg trenja, deformaciona sila koja se pojavljuje kod utiskivanja u kalupu veća je nego kod slobodnog utiskivanja. Po zapremini

materijala pojavljuje se povoljnije naponsko stanje sa stanovišta obradivosti materijala, što omogućava veće dubine utiskivanja. Tačnost gravura utisnutih u kalupu je veća nego što je to kod slobodno utisnutih gravura.

Osnovni geometrijski parametri procesa utiskivanja u kalupu i slobodnog utiskivanja prikazani su na sl.6.10. Isprekidanom linijom označena je početna visina priprema "ho" dok vrednost "f" predstavlja veličinu elastičnih deformacija u sistemu obradak - alat - mašina.

Dubina utiskivanja "h" je put koji čeona površina žiga izvrši u toku prodiranja u materijal.

Hođ koji je potrebno podesiti na presi "hp" razlikuje se od dubine utiskivanja za veličinu elastičnih deformacija žiga, kalupa i prese "f" i za veličinu promene visine obradka " $\Delta h$ " uslovljene tečenjem metala u toku obrade.

Promena visine " $\Delta h$ " može biti negativna (kod slobodnog utiskivanja) ili pozitivna (kod utiskivanja u kalupu), sl.6.10.

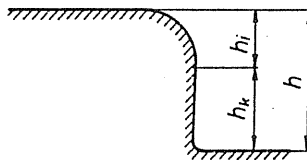
Na osnovu slike 10a i 10b moguće je uspostaviti sledeću vezu između navedenih geometrijskih veličina:

$$\begin{aligned} h &= h_p - f + \Delta h \text{ (utiskivanje u kalupu)} \\ h &= h_p - f - \Delta h \text{ (slobodno utiskivanje)} \end{aligned} \quad (6.1.)$$

Razlika između dubine utiskivanja "h" i hoda prese "hp" uzima se u obzir na osnovu iskustvenih podataka.

Korisna dubina gravure "hk" manja je od dubine gravure "h" za veličinu povijanja ivice "hi" (sl.6.11.).

$$\begin{aligned} h_k &= h - h_i \\ h_k &= h_p - f \pm \Delta h - h_i \end{aligned}$$



Sl.6.11. Korisna dubina gravure

Znak  $\pm$  u gornjoj jednačini u zavisnosti je od vrste utiskivanja, prema 6.1.

Relativna dubina utiskivanja " $\epsilon_n$ " je merilo veličine deformacije i predstavlja odnos dubine utiskivanja i prečnika žiga (kada je žig proizvodnog preseka):

$$\epsilon_n = h/d \quad (6.2.)$$

Ekvivalentni prečnik se dobija kao:

$$d_{ek} = 1,13 \sqrt{A} \quad (6.3.)$$

$d_{ek}$  - ekvivalentni prečnik

A - poprečna površina žiga

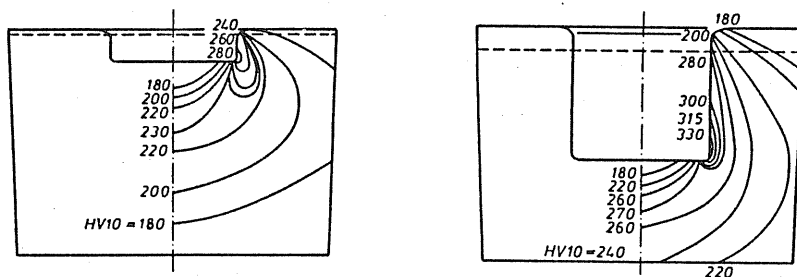
Logaritamska deformacija kod hladnog utiskivanja se definiše kao:

$$\phi_i = 33\epsilon_n - 1(\%) \quad (6.4.)$$

Proces hladnog utiskivanja izvodi se sa malim brzinama. U zavisnosti od vrste materijala i oblika i veličine gravure, ova brzina se kreće od 0,1 mm/min do 10 mm/min.

U toku procesa dolazi do povišenja mehaničkih osobina gravure. Step en ojačanja odredjen je vrstom materijala, oblikom žiga, dubinom utiskivanja kao i oblikom kalupa.

Na sl.6.12. prikazane su izodure (linije iste tvrdoće) na meridijalnoj ravni uzorka za materijal X32CrMoV33 i to za dve različite relativne dubine utiskivanja. Izodure reprezentuju tok materijala za vreme procesa i njegovo ojačavanje. Sa sl.6.12. uočava se zona intenzivnog tečenja materijala i ojačavanja, gde tvrdoće dostižu vrednost HV10=280 (za  $\epsilon_n=0,2$ ) tj. HV10=330 (za  $\epsilon_n=0,8$ ). Uočava se da tvrdoća po zapremini tela raste sa porastom relativne dubine utiskivanja.



Sl.6.12. Izodure HV10 kod utiskivanja u kalupu za materijal X32CrMoV33 /2/

Porast relativne dubine utiče i na porst potrebne sile utiskivanja.

Kad tvrdoća po zapremini tela dostigne određeni granični nivo, neophodno je izvršiti medjužarenje kako bi se omogućilo utiskivanje na još veće relativne dubine.

U procesu hladnog utiskivanja neophodno je intenzivno podmazivanje, kako zbog visokih kontaktnih pritisaka ne bi došlo do hladnog zavarivanja između žiga i materijala. Pokazalo se da je najpovoljnije sredstvo za podmazivanje molibdenisulfid ( $\text{MoS}_2$ ) uz upotrebu žiga sa bakarnim radnim površinama.

Alati (gravure) za zapreminsko deformisanje dobijeni hladnim utiskivanjem, pre njihove upotrebe najčešće se podvrgavaju termičkoj obradi - žarenju radi odstranjivanja napona. Hladjenje se vrši u peći. Na taj način odstranjuju se zaostali naponi iz obradka koji su nastali usled nehomogene deformacije.

Kao završna termička obrada ovih alata dolazi u obzir cementacija, nitriranje ili površinsko kaljenje sa odpuštanjem radi povećavanja žilavosti.

#### 6.2.2. Deformaciona sila

U procesu hladnog utiskivanja pojavljuju se velika opterećenja žiga i visoke vrednosti deformacionih sila. Zbog toga je od izuzetne važnosti određivanje ovih parametara kao i iznalaženje mogućnosti za njihovo smanjenje.

Deformaciona sila za hladno utiskivanje može se približno odrediti na nekoliko načina.

##### a) Prvi način

$$F_{\max} = A_z \cdot p \quad (6.5.)$$

$A_z$  - površina poprečnog preseka žiga

$p$  - maksimalno dozvoljeni specifični pritisak na žig. Ovaj pritisak iznosi od 2500-3000 MPa

##### b) Drugi način

Ovaj empirijski način određivanja sile utiskivanja bazira na vrednosti specifičnog deformacionog pritiska koji iznosi:



$$p = 4,5.k$$

Vrednost "k" u gornjem izrazu dobija se iz krive deformacionog ojačavanja za materijal pripremljena.

Sila utiskivanja iznosi:

$$F = A_z \cdot p = A_z \cdot 4,5.k \quad (6.6.)$$

c) Treći način

$$F = A \cdot p_{\max} \quad (6.7.)$$

gde se  $p_{\max}$  određuje u zavisnosti od materijala u koji se utiskuje gravura i relativne dubine utiskivanja  $h/d$ :

$$p = f(\text{materijal}, h/d)$$

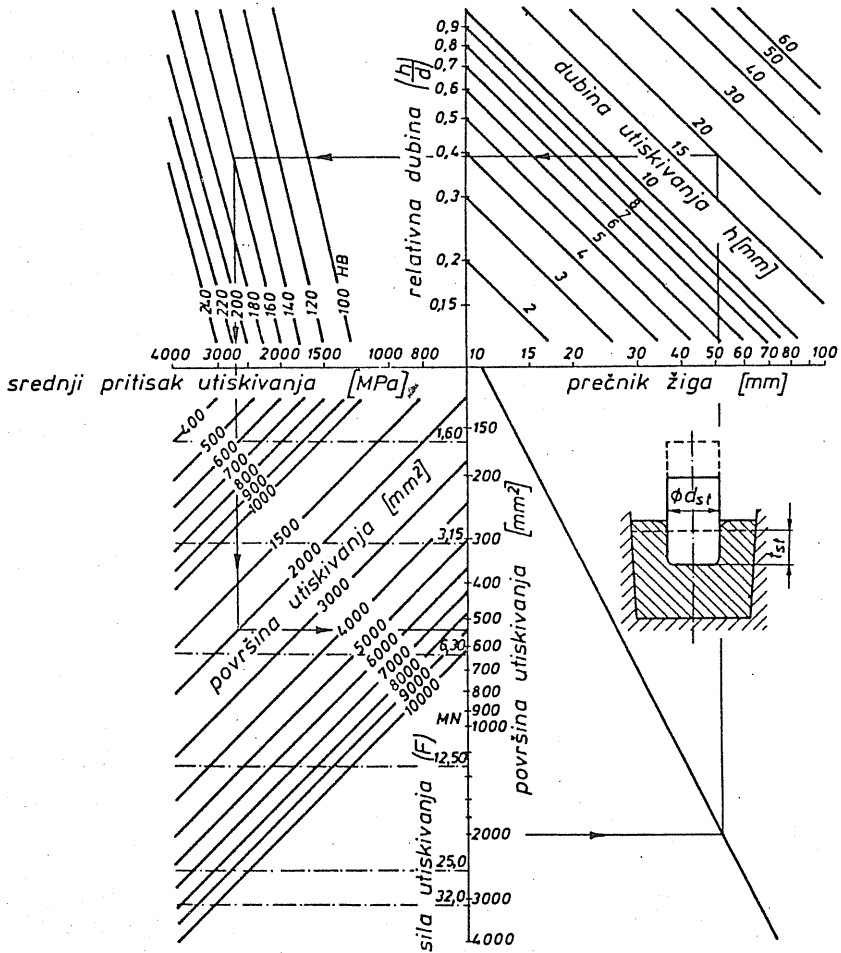
U tabeli T1 date su vrednosti za  $p_{\max}$  u zavisnosti od gore navedenih faktora. Pri tome se grupe materijala definišu u zavisnosti od HB tvrdoća (videti stranu 222).

d) Četvrti način

Silu utiskivanja moguće je odrediti i pomoću nomograma (sl.6.13). Polazna tačka u određivanju sile utiskivanja iz nomograma jeste površina gravure koja se utiskuje (desna strana negativne y-ose). Kretanjem kroz nomogram prema naznačenoj strelici dobija se prečnik žiga (pozitivna x-osa). U zavisnosti od dubine utiskivanja "h", na pozitivnoj y-osi dobija se vrednost relativne dubine utiskivanja, da bi se u zavisnosti od tvrdoće materijala (HB) pripremljena na negativnom delu x-ose dobila vrednost specifičnog pritiska na žig. Daljim kretanjem u nomogramu do odgovarajuće prave koja reprezentuje površinu žiga a zatim do leve strane negativnog dela y-ose dobija se konačno veličina sile utiskivanja.

Svi prikazani načini određivanja sile odnose se na slučaj kada žig ima paralelne ivice. Kod utiskivanja žigom sa nagnutim ivicama dolazi do povećanja ove sile i to u zavisnosti od ugla nagiba ivice žiga ( $\alpha/2$ ) i dubine utiskivanja.

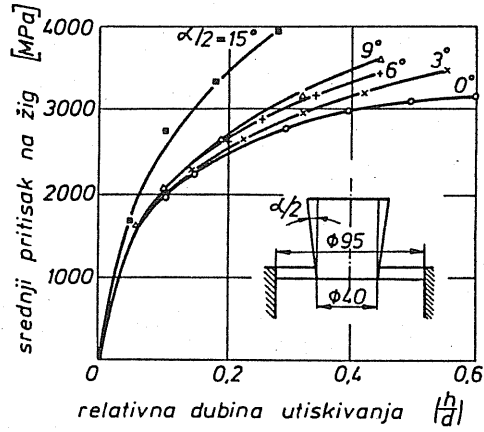
Uticao ugla nagiba ivice žiga na povećanje potrebne sile utiskivanja za jedan konkretan primer dat je na sl.6.14.



Sl.6.13. Nomogram za određivanje sile /2/

Uočava se sa sl.6.14. da npr. kod relativne dubine utiskivanja 0,3, vrednost pritiska na žig raste sa 2800 MPa (za  $\alpha=0$ ) na 3900 MPa (za  $\alpha/2=15^\circ$ ).

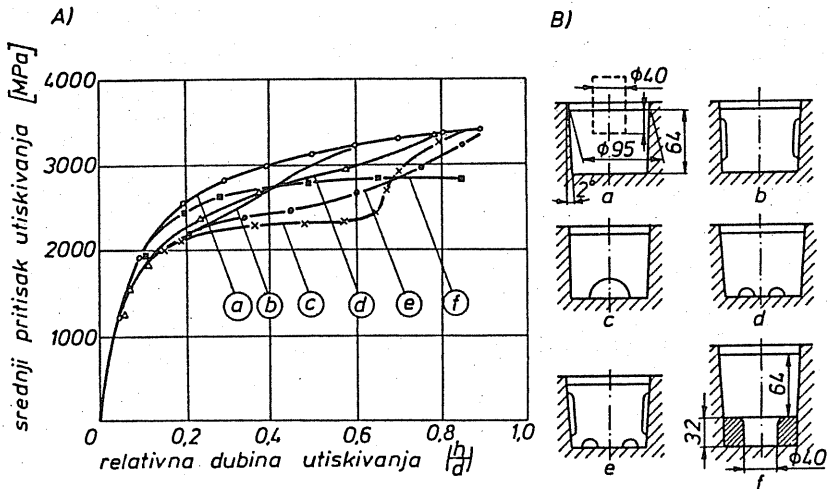
U cilju smanjenja veličine sile utiskivanja moguće je u pripremu izraditi šupljine za olakšavanje tečenja. Ove šupljine predstavljaju kanale po dnu ili obimu priprema. Prilikom utiskivanja u pripremak koji ima šupljinu rasterećenja materijal teče u pravcu najmanjeg otpora a to su šupljine. Na taj način se smanjuje pritisak utiskivanja. Čim je materijal ispunio šupljine ovaj pritisak postaje isti kao što je to slučaj kod



Sl.6.14. Sila utiskivanja za slučaj utiskivanja sa žigom nagnutih ivica /1/

utiskivanja u pripremak bez šupljina.

Nekoliko tipičnih oblika šupljina rasterećenja za jedan konkretan slučaj utiskivanja prikazan je na sl.6.15. Na toj slici data je i zavisnost sila - put za pripreme sa odgovarajućim oblicima šupljina.

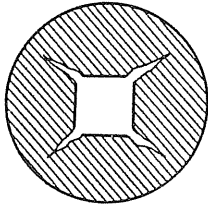


Sl.6.15. Šupljine rasterećenja /1/

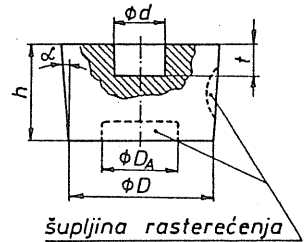
U cilju sprečavanja nastanka pukotina u materijalu za vreme utiskivanja gravure u kalupu (sl.6.16.) neophodno je da bude zadovoljen uslov:

$$D > 2,5d$$

(6.8.)



$D = 2,5 \cdot d$
$D_A = 1,5 \cdot d$
$h \geq 2,5 \cdot t$
$\alpha = 1,5^\circ \text{ do } 2,5^\circ$



Sl.6.16. Pukotina na utisnutoj gravuri i geometrija gravure

D - spoljašnji prečnik pripremk

d - prečnik gravure (ako je gravura kružna) ili najveće rastojanje izmedju pojedinih temena (ako gravura ima oblik sastavljen iz pravih linija).

Na sl.6.16b. dat je crtež pripremk u koga se utiskuje gravura prečnika "d", dubine "t". Pored osnovnih dimenzija, isprekidanim linijama označeni su položaj i dimenzije eventualnih šupljina rasterećenja. Na istom crtežu date su i orijentacione vrednosti za ukupnu visinu komada u odnosu na dubinu utiskivanja (h/t) kao i preporučeni nagib ivice.

#### PRIMER

U pripremk dimenzija  $D_0 = 33$  mm, potrebno je utisnuti gravuru kružnog oblika  $d = 17$  mm. Materijal pripremk je Č4120, meko žaren na tvrdoću HB130. Utiskivanje se vrši u kalupu (sl.6.17.), bez šupljina rasterećenja na pripremk.

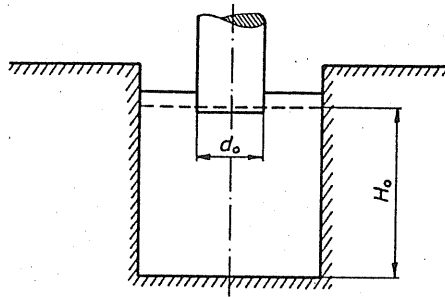
Potrebno je:

1. Izračunati potrebnu deformacionu silu i pritisak na žig za slučaj utiskivanja na sledeće dubine utiskivanja:

$$\epsilon_n = 0,3 - 0,5 - 0,7$$

Proračun izvesti na bazi 3 različite metode.

Materijal: Č.4120



Sl.6.17. Utiskivanja u kalupu

Izračunavanje deformacione sile:

1.1.  $F=p \cdot A$

$$A = D^2 \cdot \pi / 4 = 17^2 \cdot \pi / 4 = 227 \text{ mm}^2$$

$$p = (2200-3200) \text{ MPa, usvaja se } 2500 \text{ MPa}$$

$$F = 2500 \cdot 227 = 567,45 \text{ kN}$$

Vrednost sile je za sve tri relativne dubine ista.

1.2.  $F=4,5 \cdot k \cdot A$

$$\phi_1 = 33 \cdot \epsilon n_1 - 1 = 33 \cdot 0,3 - 1 = 8,9\%$$

$$\phi_2 = 33 \cdot \epsilon n_2 - 1 = 33 \cdot 0,5 - 1 = 15,5\%$$

$$\phi_3 = 33 \cdot \epsilon n_3 - 1 = 33 \cdot 0,7 - 1 = 22,1\%$$

Iz k- $\phi$  dijagrama za dati materijal očitavaju se sledeće vrednosti za "k".

$$K_1 = 480 \text{ MPa}$$

$$K_2 = 550 \text{ MPa}$$

$$K_3 = 600 \text{ MPa}$$

Vrednosti sile za pojedine relativne dubine utiskivanja iznose:

$$F_1 = 4,5 \cdot 480 \text{ MPa} \cdot 227 \text{ mm}^2 = 490 \text{ kN} \quad (\text{za } \varepsilon_n = 0,3)$$

$$F_2 = 561 \text{ kN} \quad (\varepsilon_n = 0,5)$$

$$F_3 = 612,8 \text{ kN} \quad (\varepsilon_n = 0,7)$$

1.3.  $F = p_{\max} \cdot A$

$$p_{\max} = f(h/d, \text{materijal})$$

Vrednost " $p_{\max}$ " dobija se iz tabele T.6.2. u zavisnosti od relativne dubine utiskivanja i tvrdoće materijala.

$$F_1 = 227 \text{ mm}^2 \cdot 2040 \text{ MPa} = 463,0 \text{ kN}$$

$$F_2 = 227 \text{ mm}^2 \cdot 2320 \text{ MPa} = 526,64 \text{ kN}$$

$$F_3 = 227 \text{ mm}^2 \cdot 2510 \text{ MPa} = 569,80 \text{ kN}$$

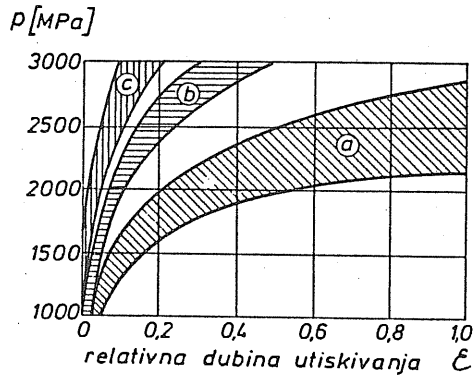
## 6.3. PROJEKTOVANJE PROCESA

### 6.3.1. Materijal za utiskivanje

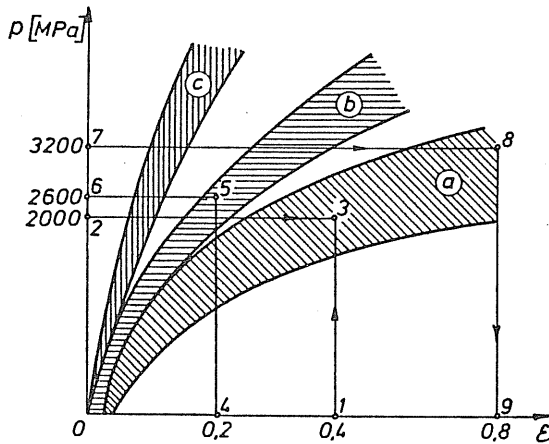
Kao materijal priprema u koji se utiskuje gravura koriste se alatni čelici. Pre same obrade vrši se termička obrada (žarenje) priprema u cilju snižavanja njegove tvrdoće. Tvrdoća predstavlja glavni pokazatelj pogodnosti materijala za utiskivanje jer od nje zavisi nivo deformacionog ojačavanja kao i veličina deformacione sile.

Pogodnost pojedinih alatnih čelika za obradu hladnim utiskivanjem određuje se na osnovu tzv. krivih utiskivanja (sl.6.18.). Ove krive povezuju relativnu dubinu utiskivanja ( $h/d$ ) sa pritiskom koji se pojavljuje na žigu prilikom utiskivanja na tu dubinu a sve to za različite grupe materijala (a, b, c). Ove grupe sačinjene su na bazi tvrdoće materijala pre početka utiskivanja:

- Grupa a - materijali tvrdoće HB110 do 140
- Grupa b - materijali tvrdoće HB170 do 210
- Grupa c - materijali tvrdoće HB210 do 250



Sl.6.18. Krive utiskivanja /1/



Sl.6.19. Načini korišćenja krivih utiskivanja

Krive utiskivanja omogućuju (sl.6.19.):

- a) odredjivanje materijala za utiskivanje kod definisane relativne dubine utiskivanja i definisanog maksimalno dozvoljenog pritiska na žig.

(Primer: zadato:  $\epsilon_n = 0,4$ ,  $p_{max} = 2000$  MPa . Materijal mora biti iz grupe "a". Redosled kretanja kroz dijagram 1-2-3).

- b) Odredjivanje pritiska na žig kod definisane relativne dubine utiskivanja i definisanog materijala.

(Primer:  $\epsilon_n = 0,2$ , materijal iz grupe "b". Pritisak na žig je  $p = 2600$  MPa . Redosled kretanja kroz dijagram 4-5-6).

T-6.1. Čelici za hladno utiskivanje

DIN Prema 17006	Proj. ma- ter. pre- ma DIN-u 17007	Oznaka	Sastav (%)							Namenjena		
			C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V		W	
Čelici za cementaciju												
Č10 WS	1.1805	-	0,10	0,3	0,4	-	-	-	-	-	110	Alati za livenje pod pritiskom
X6CrMo4	1.2341	-	0,06	0,10	0,12	0,4	0,5	-	-	-	110	
X8CrMoV5	1.2342	-	0,08	0,20	0,30	5,0	0,7	-	0,3	-	140	
21MnCr5	1.2162	č.4321	0,21	0,3	1,2	1,0	-	-	-	-	175	
15CrNi16	1.2712	č.5420	0,15	0,25	0,5	1,5	-	1,5	-	-	190	
Čelici za hladan rad												
Č100 W1	1.1540	č.1941	1,00	0,20	0,20	-	-	-	-	-	190	Žigovi i matrice u industr.vijčane robe
95 V4	1.2835	-	0,95	0,3	0,4	-	-	-	0,4	-	190	Žigovi za kalupe za livenje pod pritiskom
90 Cr3	1.2056	č.4140	0,9	0,2	0,3	0,8	-	-	-	-	195	otporni na koroziju
X40Cr13	1.2083	č.4173	0,4	0,4	0,3	13	-	-	-	-	210	Alati za utiskivanje
55NiCr10	1.2718	-	0,55	0,2	0,4	0,6	-	2,75	-	-	215	Kalupi za novac i pri- bor za jelo
X45NiCrMo4	1.2767	-	0,45	0,25	0,5	1,3	0,2	4,0	-	0,5	240	
X165CrMoV12	1.2601	č.4750	1,65	0,3	0,3	12	0,6	-	0,10	0,5	240	
Čelici za topli rad												
45CrMoV67	1.2323	-	0,45	0,25	0,7	1,5	0,7	-	0,3	-	175	Žigovi i matr. u ind.
X32CrMoV33	1.2365	-	0,32	0,3	0,3	2,8	2,8	-	0,5	-	165	vijč. robe, kalupi za prese, Alati za liv.
X38CrMoV51	1.2343	č.4751	0,38	1,0	0,4	5,3	1,5	-	0,4	-	210	pod pritiskom
45CrMoW58	1.2603	-	0,45	0,6	0,4	2,0	0,5	-	0,8	0,5	220	Kokile za liv. pod pritiskom
X30WCrV53	1.2567	-	0,3	0,2	2,3	2,5	-	-	0,6	4,5	220	Alati za kovanje na čekićima
55NiCrMoV6	1.2713	č.5741	0,55	0,2	0,6	0,7	0,2	1,7	0,1	-	220	
56NiCrMoV7	1.2714	č.5742	0,56	0,3	0,7	1,1	0,5	1,7	0,1	-	220	
Brzorezni čelici												
S3-2-2	1.333	-	0,95	0,25	0,3	4,5	2,5	-	2,8	3,0	240	Žigovi za vijke sa krstastom glavom
S2-9-1	1.3346	-	0,80	0,25	0,3	4,0	9	-	1,2	2,0	240	



T-6.2. Specifični pritisak utiskivanja gravura p (daN/mm<sup>2</sup>)

Tvrdoća po Brinelly HB: daN/mm <sup>2</sup>	Relativna dubina utiskivanja $\epsilon_n = \frac{h}{d}$										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
100	120	142	157	168	178	187	193	200	203	207	
105	126	149	165	176	186	196	202	210	214	217	
110	132	156	173	185	196	206	212	220	225	228	
115	138	163	181	193	204	215	222	230	235	239	
120	144	170	189	202	214	225	231	240	245	249	
125	150	177	196	210	223	234	241	250	255	260	
130	156	184	204	218	232	244	251	260	265	270	
135	162	192	212	227	241	253	260	270	275	280	
140	168	199	220	235	250	263	270	280	286	290	
145	174	206	288	243	259	272	280	290	296	300	
150	180	213	236	252	267	280	290	300			
155	186	220	244	261	276	290	300				
160	192	227	252	269	285	300					
165	198	235	260	278	294						
170	204	242	267	286							
175	210	249	275	294							
180	216	256	283								
185	222	263	291								
190	228	270	298								
195	234	277									
200	240	284									
205	246	291									
210	252	298									
215	258										
220	264										
225	270										
230	276										
235	282										
240	288										
245	294										
250	300										

PRIMERI

- Potrebno je u materijal tvrdoće 140 HB utisnuti gravuru relativne dubine 0,5. Koliki se pojavljuje pritisak na žigu? Odgovor: p=250 daN/mm<sup>2</sup>
- Ako je pritisak na žig ograničen na p=300 daN/mm<sup>2</sup> koja relativna dubina gravure se može utisnuti na materijal tvrdoće 155 HB? Odgovor:  $\epsilon=0,7$ .
- Ako se želi utisnuti gravura relativne dubine  $\epsilon=0,3$  a da pri tome pritisak na žig ne predje p=283 daN/mm<sup>2</sup> na koju polaznu tvrdoću se mora dovesti materijal pre utiskivanja? Odgovor: 180 HB.

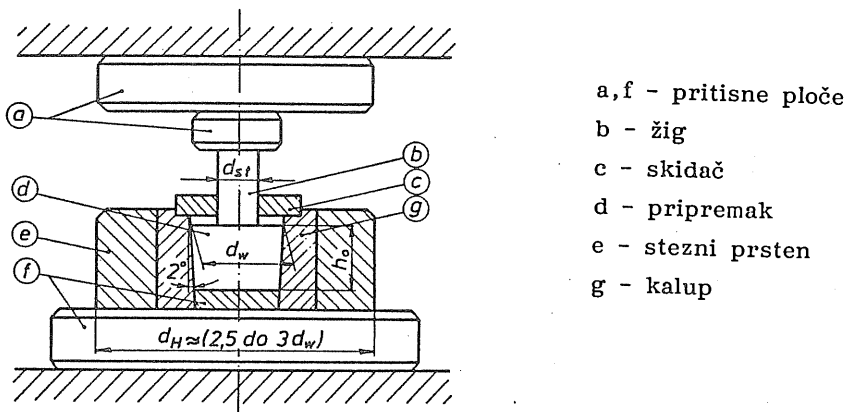
c) Određivanje maksimalne relativne dubine utiskivanja pri definisanom materijalu i definisanom maksimalnom pritisku na žig. (Primer:  $p = 3200 \text{ MPa}$ , materijal iz grupe "a". Iz dijagrama sledi da je maksimalna relativna dubine utiskivanja koja se može dobiti  $\epsilon_n = 0,8$ . Redosled kretanja kroz dijagram 7-8-9).

Povezanost između tvrdoće materijala po Brinelu, relativne dubine utiskivanja i specifičnog pritiska na žig data je u tabeli T.6.2.

U tabeli T.6.1. dati su materijali koji se primenjuju za hladno utiskivanje.

### 6.3.2. Alati za hladno utiskivanje

Osnovni elementi alata za hladno utiskivanje su: žig, kalup i stezni prsten (sl.6.20.). Zbog velikih radijalnih napona koji se pojavljuju u procesu, stezni prsten navučen je na kalup sa negativnim zazorom u cilju stvaranja prednapona. Pripremak se postavlja u kalup. Ispod prstena i kalupa kao i ispod žiga postavljene su pritisne ploče (male i velike) velike tvrdoće koje imaju zadatak da visoki pritisak koji se pojavljuje u procesu ravnomerno rasporede po površini stola mašine.



Sl.6.20. Alat za hladno utiskivanje /1/

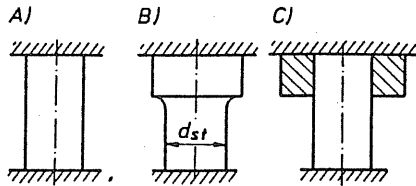
Spoljni prečnik prstena treba da je bar 2,5-3 puta veći od prečnika pripremk. Ivica treba da je pod malim nagibom ( $\alpha = 1,5-3^\circ$ ) radi olakšavanja toka materijala. Ako je pripremak pun, bez šupljina olakšavanja, njegova visina treba da je 2 do 2,5 puta veća od dubine utiskivanja.

Žig za hladno utiskivanje izložen je veoma visokim pritiscima i zbog toga njegovoj konstrukciji i izradi treba posvetiti posebnu pažnju.

Geometrija žiga uslovljena je geometrijom gravure koja se želi utisnuti.

U principu sama izvedba žiga može biti različita, kako se to vidi na slici 6.21. U idealnom slučaju podnožje i čelo žiga su istog prečnika, bez prelaza. Taj slučaj nije uvek moguć nego je mnogo češći oblik žiga prema sl.6.21b.

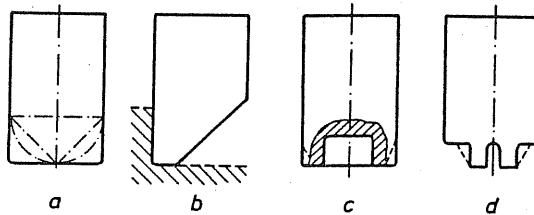
U cilju smanjenja negativnog dejstva koncentracije napona koji se pojavljuje na prelazu sa jednog prečnika na drugi, ovi prelazi izradjuju se sa velikim radijusom prelaza.



Sl.6.21. Oslanjanje žiga /1/

Treći oblik, kod koga se na sam žig navlači jedan prsten sa negativnim zazorom, povećava otpornost na opterećenje žiga (sl.6.21c).

Inače, kada je reč o samom obliku dela žiga koji se utiskuje u materijal, najveća opterećenja dozvoljena su za slučaj aksijalno-simetričnih oblika čela žiga (sl.6.22a). Kod nesimetričnih oblika kao i kod oblika žigova sa unutrašnjom šupljinom (sl.6.22b,c,d) pored aksijalnih opterećenja pojavljuju se i poprečna (smičuća) opterećenja, što znatno smanjuje otpornost takvih žigova.



Sl.6.22. Osnovni oblici žiga za utiskivanje /1/

Materijal za žigove jednostavnijeg oblika je Č.4750 a za žigove komplikovanih oblika najčešće se koristi 75CrMoN1W87. Ovaj čelik, kod iste tvrdoće ima znatno veću žilavost nego prethodno navedeni. Kalup kao i mala gornja i donja pritisna ploča (sl.6.20.) izradjuju se najčešće od čelika X45NiCrMo4. Spoljašnji prsten i velike pritisne ploče izradjuju se od Č.5741.

### 6.3.3. Osnovne karakteristike presa za hladno utiskivanje

Hladno utiskivanje izvodi se na specijalnim hidrauličnim presama. Osnovne karakteristike tih presa su njihova velika stabilnost i krutost, mogućnost postizanja velikih sila kao i mogućnost regulisanja brzine hoda nosača alata. Tako se hod približavanja odvija znatno većom brzinom nego radni hod utiskivanja (npr. hod približavanja sa brzinom 6,5 mm/sec a hod utiskivanja se može podešavati od 0-0,3 mm/sec, već u zavisnosti od vrste materijala, oblika gravure i dr.).

I sam proces utiskivanja, dakle radni hod, može da se odvija različitim brzinama, pogotovu kod dubokih gravura. Na početku procesa brzina utiskivanja je veća a pri kraju, kada se približava završnom obliku gravure, brzina se redukuje.

Kod ovih presa postoji mogućnost prethodnog postavljanja željene dubine utiskivanja i maksimalno dozvoljenog pritiska na žig. Ako se u toku procesa dostigne jedna od te dve veličine hod prese se automatski zaustavlja.

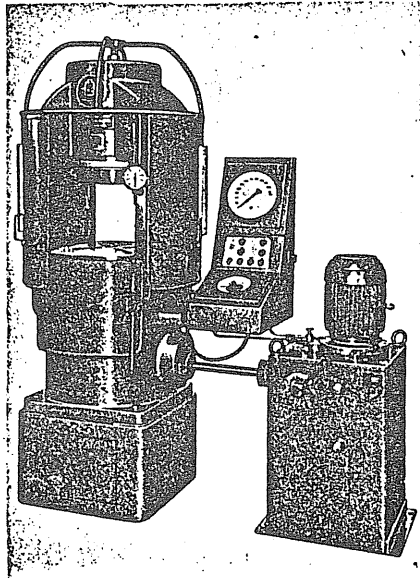
Na sl.6.23. prikazana je jedna tipična presa za hladno utiskivanje.

### 6.3.4. Racionalizacija troškova izrade alata primenom hladnog utiskivanja

Primenom hladnog utiskivanja postižu se, ako su ispunjeni odredjeni uslovi, pored tehničkih i značajni ekonomski efekti. Ovo se odnosi pre svega na slučajeve kada je potrebno izraditi veći broj identičnih gravura.

Sam proces utiskivanja traje kratko, ali je potrebno prethodno izraditi žig za utiskivanje, što zahteva znatne troškove. Sa druge strane, jednom uradjen žig može se koristiti za izradu većeg broja gravura, iz čega i proističe glavna prednost ove tehnologije.

Za određene konkretne oblike gravura vršena su uporedna istraživanja sa aspekta utroška vremena potrebnog za izradu 1 gravure. U daljem tekstu prikazan je primer izrade alata za glavu vijka M24 i to hladnim utiskivanjem i skidanjem strugotine.

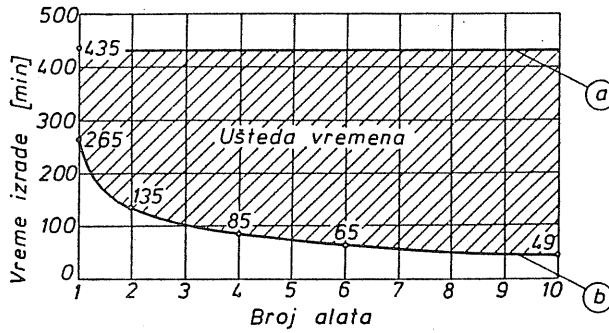


Sl.6.23. Presa za hladno utiskivanje

Izrada gravure skidanjem strugotine	Izrada gravure hladnim utiskivanjem
- prethodno struganje - 15 min	- prethodno struganje - 10 min
- ručna obrada šestogaone glave - 420 min	- utiskivanje - 15 min
	- izrada žiga za utiskivanje - 240 min
Ukupno vreme izrade - 435 min	Ukupno vreme izrade - 265 min

Iz datog primera uočava se da je kod izrade samo jedne gravure vreme izrade znatno kraće ako se primenjuje hladno utiskivanje. Ove uštede su još mnogo značajnije ako se izradjuje veći broj identičnih gravura.

Na sl.6.24. prikazana je zavisnost izmedju vremena potrebnog za izradu jedne gravure i broja komada gravura koje treba izraditi i to za dve različite tehnologije izrade: skidanjem strugotine (a) i hladnim utiskivanjem (b). Uočava se sa slike da za slučaje izrade skidanjem strugotine vreme izrade ne zavisi od broja komada koji se izradjuje, dok za slučaj izrade hladnim utiskivanjem ovo vreme opada sa povećanjem broja izradjenih komada. Tako npr. ako je potrebno izraditi 10 identičnih gravura vreme potrebno za izradu jedne gravure utiskivanjem iznosi 49 minuta. Ovo značajno smanjenje vremena izrade proističe iz činjenica da se istim žigom utiskuju svih 10 gravura.



Sl.6.24. Troškovi izrade gravure alata za glavu vijka M24  
za slučaj izrade:  
a) skidanjem strugotine  
b) hladnim utiskivanjem

## 7. KOVANJE U KALUPU

Ova metoda tehnologije plastičnosti je detaljnije obradjena u prvoj knjizi (TP1) u osmom poglavlju. Kao što se može videti u toj knjizi su posebno prezentirani: definicija i vrste kovanja, konstrukcija otkovka, klasifikacija otkovaka, deformacione sile i deformacioni rad pri kovanju, mašine za kovanje u kalupu i projektovanje tehnološkog procesa kovanja u kalupu. Nema posebnog dela koji prezentira analizu ovog procesa. Donekle deo 8.4. - deformaciona sila i deformacioni rad pri kovanju ulazi u ovu problematiku, ali pretežno sa praktično - inženjerskog stanovišta pomsatrajući prosečne veličine i ne ulazeći dublje u mehaniku tečenja metala pri kovanju u kalupu. Imajući u vidu mogućnosti koje nudi analiza zasnovana na mehanici tečenja metala pri plastičnom deformisanju i podloge iz teorije plastičnosti, moguće je suptilnije i egzaktnije rešavanje problematike kovanja u kalupu.

U ovom poglavlju se posebno izlaže problematika odredjivanja sila u završnom delu kovanja i to korišćenjem dva različita modela zone deformisanja. U jednom slučaju se pretpostavlja plastična zona sočivastog oblika i analizira se kao kontinualna, a u drugom se koristi diskontinualna plastična zona, koja se parcijalno analizira. Zatim se posebno prezentira problematika odredjivanja specifičnog deformacionog otpora pri kovanju u kalupu.

### 7.1. ANALIZA SILA PRI KRAJU PROCESA NA OSNOVU MEHANIKE TEČENJA METALA

U krajnje pojednostavljenom i grubo aproksimativnom pristupu maksimalna deformaciona sila na kraju procesa kovanja odredjuje se prema

$$F_{\max} = K_K \cdot A_K \quad (7.1.)$$

gde su:

$K_K$  - specifični deformacioni otpor na kraju kovanja

$A_K$  - kontaktna površina normalna na pravac kretanja alata na kraju kovanja

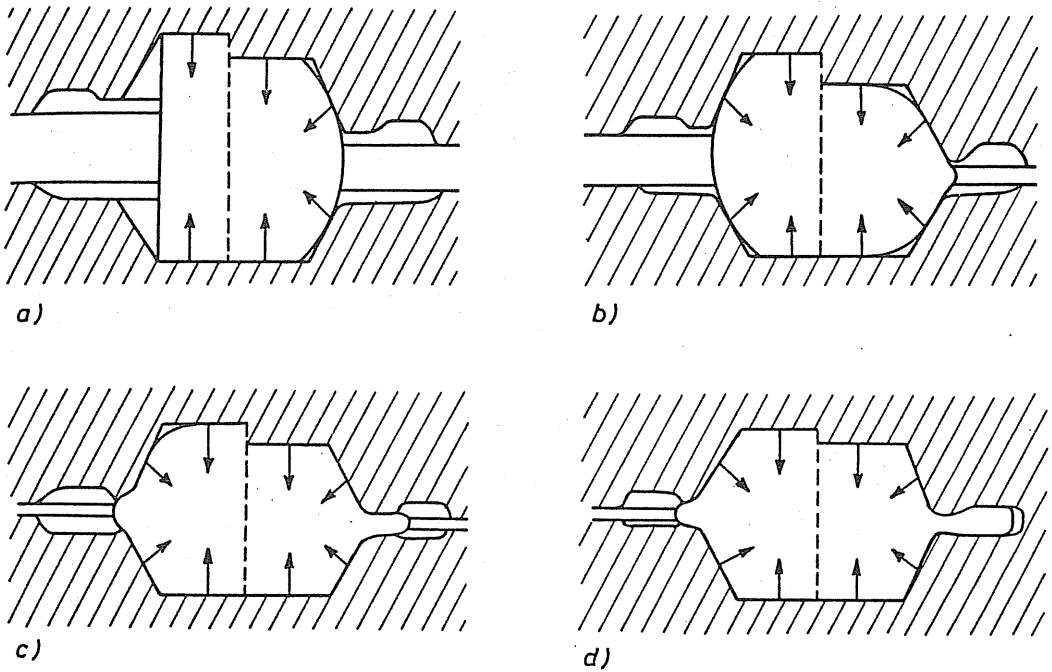
Relacija (7.1.) se koristi radi njene jednostavnosti. Međutim, i ovako krajnje pojednostavljen i grubo aproksimativan pristup sadrži niz problema u vezi sa određivanjem specifičnog deformacionog otpora.

Produbljena analiza tečenja metala u kalupu zasniva se na podeli procesa deformisanja na dve glavne faze. Ovde je reč o analizi procesa kovanja u otvorenom dvodelnom kalupu sa istovremenim izlivanjem materijala u venac. Prvu fazu deformisanja čini ispunjavanje centralnog dela gravure kalupa uz istovremeno izlivanje materijala u venac. U ovoj fazi nastaje potpuno ispunjavanje gravure (šupljine) kalupa. Na sl.7.1. šematski su prikazani elementi prve glavne faze deformisanja u kojima se naznačava pravac dejstva alata na materijal. Na svakoj od prikazanih šema daju se po dva stadijuma deformisanja, početni i sledeći. Tako sl. 7.1.a prikazuje početno stanje i sledeće stanje u kome je proces sabijanja toliko napredovao da će u sledećem stadijumu početi isticanje materijala u venac. Sledeća skica, 7.1.b, sadrži prethodni stadijum, ali i sledeći u kome je započeto isticanje materijala u venac. Naredna skica 7.1.c uključuje novi stadijum deformisanja u kome su centralna šupljina kalupa i kanal za venac potpuno ispunjeni. Ovde se završava prva glavna faza deformisanja. Sl.7.1.d šematski prikazuje drugu glavnu fazu deformisanja u kojoj se neznatno smanjuje visina i višak materijala istiskuje u šupljinu alata predviđenu za ove svrhe. Parcijalni prikaz ove druge faze prikazan je na sl.7.2., gde se vidi da je u pitanju istiskivanje viška materijala u kanal predviđen za ovaj višak.

Formiranje venca igra pozitivnu ulogu zbog toga što se približavanjem dve polovine alata, stvaraju dopunski otpori isticanju metala, odnosno, povećana hidrostatička komponenta naponskog sistema u šupljini kalupa, koja osigurava ispunjavanje i najisturenijih delova, praznina, gravure. Pri tome se kretanjem gornjeg dela alata smanjuje debljina venca, a deformacioni otpor se povećava, tako da se na kraju ove faze ispunjavaju sve šupljine u alatu.

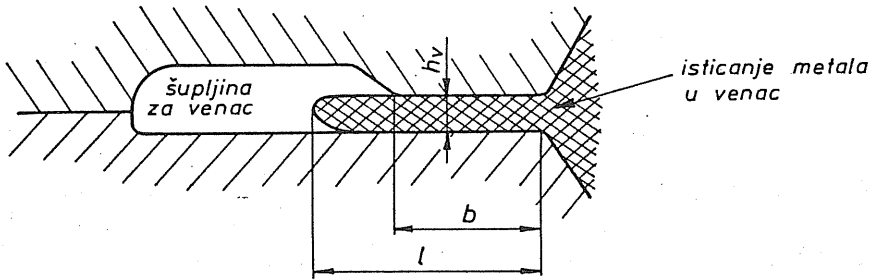
Druga faza procesa se odnosi samo na neznatno smanjuje visina za račun koje se istiskuje metal u venac, sl.7.2. Ova faza tečenja metala u venac je takodje neophodna za pravilno dovršavanje procesa kovanja i ako je oblik otkovka praktično formiran. Ona je nužna zbog sigurnosti ispunjavanja gravure i radi kompenzacije netačnosti izrade pripremka u svrhu čega se određuje mali dodatak materijala koji ističe u venac u drugoj fazi, kada je već popunjena gravura.





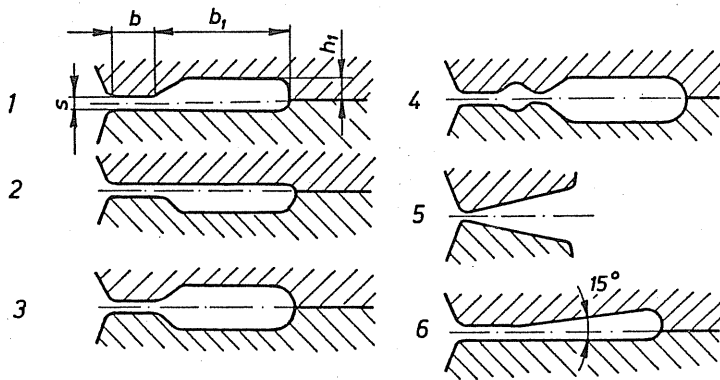
Sl.7.1. Prikaz elemenata prve glavne faze kovanja  
- ispunjavanje kalupa

- a) Početak procesa sabijanja, pri kome alat ostvaruje dejstvo samo preko dve paralelne površine i zatim u nastavku i sa bočnim komponentama;
- b) Nastavak višestrukog dejstva alata na materijal i početak isticanja materijala u kanal za venac;
- c) Alat ostvaruje dejstvo na materijal preko cele površine gravure, a isticanje materijala u venac je oformljeno potpuno;
- d) Realizovano je ispunjavanje gravure alata kao i značajni deo kanala za venac.



Sl.7.2. Isticanje metala u venac

Specifični deformacioni otpor materijala u vencu zavisi od konstrukcije alata, odnosno, od oblika i dimenzija kanala predviđenog za tečenje u venac. Na sl.7.3. prikazano je nekoliko mogućih konstruktivnih oblika kanala za venac. Promenom dimenzija ovoga kanala može da se ostvari



Sl.7.3. Konstrukcioni oblici kanala za venac

popunjavanje kalupa sa manjim ili većim isticanjem metala u venac. Ovi me se istovremeno može regulisati veličina hidrostatičkog pritiska u kalupu, od koje zavisi stepen poboljšanja strukture materijala otkovka.

Potrebna sila za ostvarenje deformacije u završnom trenutku procesa može se predstaviti kao zbir otpora pri deformisanju venca  $F_v$  i otpora pri deformisanju materijala u unutrašnjosti gravure  $F_a$ , sl.7.4.

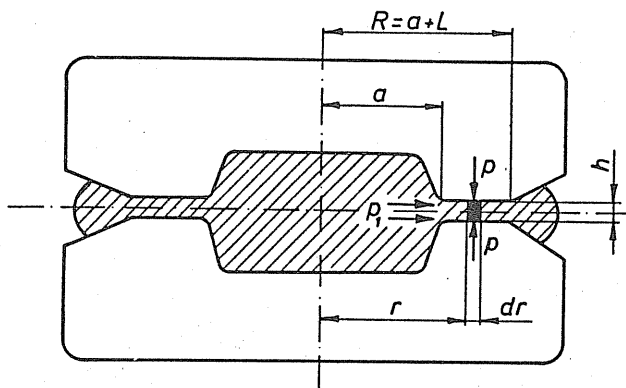
$$F = F_v + F_a \quad (7.2.)$$

koje se može smatrati kao sabijanje prstena, tako da se može koristiti ista diferencijalna jednačina ravnoteže kao za slobodno sabijanje prstena. Koristeći niz pretpostavki radi pojednostavljenja mogu se odrediti pritisci  $p$  i  $p_1$  označeni na sl.7.4.

$$p = K \left( 1 + \frac{2}{3} \frac{R-r}{h} \right) \quad (7.3.)$$

$$p_1 = K \left( \frac{2}{3} \frac{R-r}{h} \right) \quad (7.4.)$$

Medjutim ovi rezultati značajno odstupaju od realnosti zbog neadekvatne pretpostavke o plastičnoj zoni pri kraju kovanja. Zbog toga se ovde analiza provodi uz pretpostavku plastične zone prema sl.7.5., kontinualni model, odnosno, prema sl.7.7. diskontinualni model.

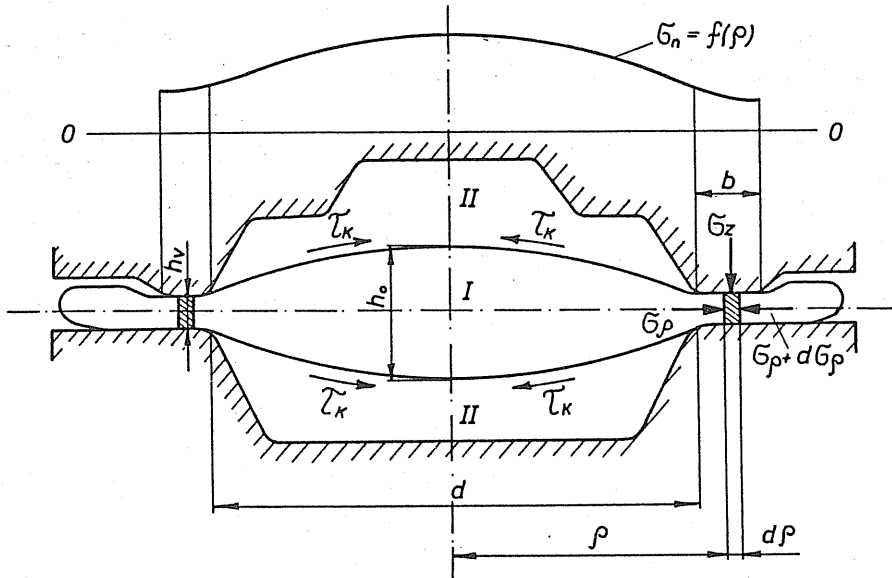


Sl.7.4. Prikaz završne faze popunjavanja kalupa

U nastavku se posebno daje kompletna analiza za slučaj kontinualnog modela zone deformisanja i za slučaj aproksimativnog diskontinualnog modela zone deformisanja.

### 7.1.1. Analiza procesa kovanja pomoću modela kontinualne zone deformisanja

Analiza se vrši za drugu glavnu fazu deformisanja, koja se odvija na samom kraju procesa kovanja. Pretpostavka je da je prva glavna faza kovanja završena i da je ispunjavanje gravure - šupljine alata potpuno kao i mosta kanala za venac. To znači da je deo materijala već istisnut i u kalan za venac. To znači da bi stanje popunjenosti kalupa moglo da se okarakterise kao što je prikazano na sl.7.4. Ostaje za drugu glavnu fazu procesa kovanja dovodjenje dimenzija otkovka u pravcu kretanja alata u područje propisanih tolerancija. Dakle, u ovoj fazi se vrši neznatno sabijanje i neznatno istiskivanje materijala u venac. Pitanje je koji deo zapremine otkovka u ovoj fazi deformisanja čini zonu deformisanja, odnosno zonu u kojoj se odvija plastična deformacija i plastično tečenje materijala. Poznato je da je pri toplom deformisanju kontaktno trenje veliko zbog koga dolazi i do lepljenja materijala za površine alata ( $\mu > 0,3$ ). Ispitivanje uslova tečenja materijala u alatu posle potpunog ispunjavanja njegove šupljine pokazuje da je u pitanju samo isticanje u venac i da u plastičnoj deformaciji pri tome učestvuje samo deo zapremine. Utvrđeno je da se plastična deformacija razvija u delu zapremine u šupljini kalupa u okolini podeone ravni. Ostali deo zapremine materijala, kojim je ispunjena šupljina gravure samo trpi određeni hidrostatički pritisak, a ne i plastične deformacije. To postaju "mrtve zone" u kalupu koje se nalaze u kruto elastičnom stanju. Logično je da je najveći intenzitet deformisanja u nivou podeone ravni, koji se postepeno smanjuje da bi u mrtvim zonama potpuno nestao. Prema tome zona deformisanja u kalupu se formira u oblasti oko podeone ravni simetrično u odnosu na tu ravan i u obliku sočiva, sl.7.5. Ta činjenica olakšava analizu procesa deformacije pri završetku kovanja naročito u odnosu na određivanje deformacione sile. Debljina, odnosno, visina sočiva u osi simetrije (maksimalna visina)  $h_o$  se menja u toku procesa. Tako sa porastom odnosa  $d/h_v$ , odnosno, sa smanjenjem  $h_v$ , odnos  $h_o/h_v$  raste i pri vrednosti  $d/h_v \approx 20$  dostiže maksimalnu vrednost  $(h_o/h_v) = 5$ . Sa daljim porastom odnosa  $d/h_v$ , relativna visina zone deformisanja se ne menja, već zadržava svoju maksimalnu vrednost. Zavisno od odnosa  $d/h_v$  pored promene visine zone deformisanja može doći i do promene njenog oblika. Tako pri odnosu  $d/h_v < 3$ , zona intenzivnog deformisanja ima udubljen (konkavan) oblik, a pri odnosu



Sl.7.5. Zona deformisanja u kalupu

odnosu  $d/h_v > 3$  ova zona dobija konveksan oblik. Na sl.7.5. zapremina šupljine alata podeljena je u osnovi na deo označen sa I, koji predstavlja zonu deformisanja sočivastog oblika u području šupljine kalupa i prstenastog oblika u području venca i na delove označene sa II sa gornje i donje strane zone deformisanja, koji predstavljaju kruto-elastične ili kao se obično nazivaju "mrtve zone". Analiza se izvodi posebno za područje venca - mosta između šupljine u alatu i šupljine za venac, kao sabijanje prstena i posebno za područje alata kao sabijanje sočivastog oblika.

Sabijanje u predelu venca. Na sl.7.5. područje radijusa

$$\frac{d}{2} < \rho < \frac{d}{2} + b$$

predstavlja predeo venca na kome se analiza može provesti kao sabijanje prstena. Opšta diferencijalna jednačina sabijanja ima oblik:

$$\frac{d\sigma_n}{dr} + \frac{2\tau_K}{h} = 0 \quad (7.5.)$$

odnosno ako se unesu odgovarajuće veličine i ima u vidu da tangencijalni napon dobioja svoju maksimalnu vrednost:

$$\tau_K = \frac{K}{2} \quad (7.6.)$$

relacija 7.5. prelazi u

$$d\sigma_{zv} = -\frac{K}{h_v} \cdot d\rho \quad (7.7.)$$

čije je opšte rešenje

$$\sigma_{zv} = -K \cdot \frac{\rho}{h_v} + C \quad (7.8.)$$

Za odredjivanje integracione konstante koristi se uslov da je radijalni napon na najvećem radijusu približno jednak smičućem naponu, odnosno polovini specifičnog deformacionog otpora, dakle

$$\text{za } \rho = \frac{d}{2} + b \rightarrow \sigma_r \cong 0,5K$$

a iz uslova plastičnog tečenja imamo da je

$$\sigma_{zv} - \sigma_r = K \text{ odnosno } \sigma_r = \sigma_{zv} - K$$

pa se zamenom u (7.8.) dobija

$$0,5K + K = -K \frac{\frac{d}{2} + b}{h_v} + C, \text{ odnosno } C = K(1,5 + \frac{\frac{d}{2} + b}{h_v}) \quad (7.9.)$$

Funkcija normalnog napona se dobija unošenjem (7.9) u (7.8.)

$$\sigma_{zv} = -K \cdot \frac{\rho}{h_v} + K(1,5 + \frac{\frac{d}{2} + b}{h_v}) \text{ ili konačno } \sigma_{zv} = K(1,5 + \frac{\frac{d}{2} + b - \rho}{h_v}) \quad (7.10.)$$

Maksimalna vrednost normalnog napona na području venca dobija se ako se u (7.10.) unese minimalna vrednost radijusa koja iznosi  $\rho_{\min} = \frac{d}{2}$ . Tako dobijamo

$$\sigma_{zv.\max} = K \cdot (1,5 + \frac{b}{h_v}) \quad (7.11.)$$

Deformaciona sila koja treba da pokrije deformacioni otpor na području venca dobija se korišćenjem opšteg izraza za deformacionu silu:

$$F = \iint_A \sigma_n dA$$

odnosno, primenjeno na ovaj slučaj

$$F_v = \iint_A \sigma_{zv} dA \quad (7.12.)$$

Element površine se uzima kao

$$dA = 2\pi\rho d\rho$$

čime se dvostruki integral prevodi u jednostruki se granicama  $d/2$  i  $d/2+b$

$$F_v = 2\pi K \int_{d/2}^{d/2+b} \left(1,5 + \frac{d}{2} \frac{+b-r}{h_v}\right) \rho d\rho \quad (7.13.)$$

Posle integracije i sredjivanja dobija se

$$F_v = K \cdot \pi \cdot b(d+b) \left(1,5 + \frac{b}{2h_v} \cdot \frac{d + \frac{3}{2} b}{d+b}\right) \quad (7.14.)$$

Imajući u vidu da je po pravilu  $d \gg b$ , može se sa greškom koja je ispod 10% usvojiti aproksimacija da je

$$\frac{d + \frac{3}{2} b}{d+b} \approx 1$$

čime se izraz za deformacionu silu pojednostavljuje i dobija oblik

$$F_v = K\pi b(d+b) \left(1,5 + \frac{b}{2h_v}\right) \quad (7.15.)$$

a srednji specifični pritisak se dobija iz

$$p_v = \frac{F_v}{\pi(d+b)b} = K \left(1,5 + \frac{b}{2h_v}\right) \quad (7.16.)$$

Kod otkovaka pravougaone projekcije, kao i kod otkovaka sa izduženom osom može se smatrati da u uzdužnom pravcu nema deformacije, zbog čega uslov plastičnosti glasi

$$\sigma_{zv} - \sigma_r = \frac{2}{3} K = 1,155K = K^* \quad (7.17.)$$

Granični uslov glasi

$$\text{za } x = \frac{a}{2} + b \rightarrow \sigma_r = 0 \quad \text{pa je}$$

$$\sigma_{zv} = 1,155K \quad (7.18.)$$

U ovom slučaju srednji specifični pritisak iznosi

$$p_v = 1,155K \left(1 + \frac{b}{2h_v}\right) \quad (7.19.)$$

Sabijanje u predelu gravure alata. Ovde je u pitanju sabijanje sočivastog oblika zone deformisanja, koja je izdvojeno prikazana na sl. 7.6. Postavljanje diferencijalne jednačine ravnoteže vrši se za izdvojeni element materijala iz zone deformisanja. Ovde se površina zone deformisanja smatra graničnom površinom na kojoj se javljaju maksimalni tangencijalni naponi

$$\tau_K = \pm \frac{1}{2}K \quad (7.20)$$

Diferencijalna jednačina ravnoteže se postavlja uz pretpostavke da se površina zone deformisanja za okrugle otkovke može smatrati sfernom, a za pravougaone cilindričnom i da se u zoni deformisanja odvija proces intenzivnog tečenja materijala. Dalje se predpostavlja da je zona deformisanja izložena sabijanju i da u toku procesa menja oblik. Pri tome se ima u vidu da se naponi i deformaciona sila izračunavaju za jedan trenutak procesa, a da su maksimalni upravo na kraju procesa. Radi jednostavnijeg postavljanja diferencijalne jednačine koristi se pravougaona osnova (projekcija) otkovka i radi se sa dužinom jednakom jedinici. Uslov ravnoteže u pravcu x-ose elementa prema sl.7.6. glasi:

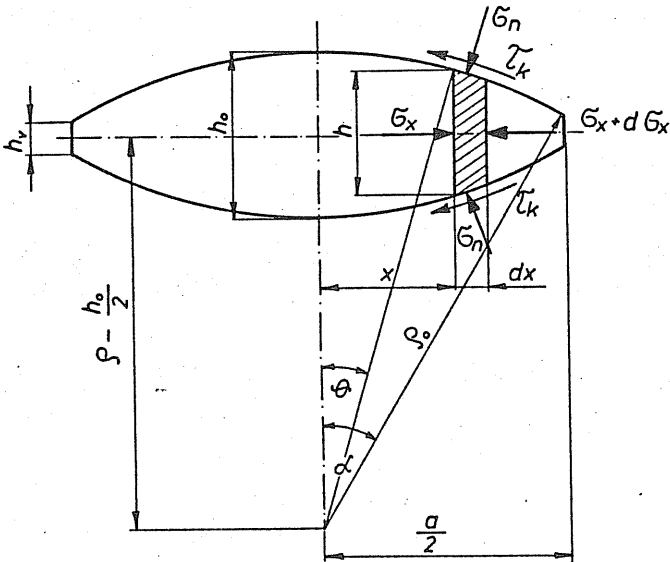
$$\sigma_x \cdot h - (\sigma_x + d\sigma_x)(h+dh) - 2\tau_K \cdot \frac{dx}{\cos\theta} \cdot \cos\theta - 2\sigma_n \cdot \frac{dx}{\cos\theta} \cdot \sin\theta = 0 \quad (7.21.)$$

Za rešavanje diferencijalne jednačine ravnoteže (7.21.) koriste se sledeće pretpostavke i relacije:

- U pravcu uzdužne ose (normalne na ravan crteža) nema deformacije zbog čega važi

$$\tau_K = \frac{1}{2}K^* = \frac{1}{2} \frac{2}{\sqrt{3}} K = \frac{1}{\sqrt{3}} K \quad (7.22.)$$





Sl.7.6. Sočivasti oblik zone deformisanja u predelu gravure alata

- Uslov plastičnosti ima oblik

$$\sigma_n - \sigma_x = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot K \quad (7.23.)$$

odakle je

$$d\sigma_n = d\sigma_x$$

- Iz geometrijskih odnosa sa slike 7.6. sledi da je:

$$\rho_o = \frac{1}{2} \frac{h_o - h_v}{1 - \cos\alpha} \quad \text{i} \quad (7.24.)$$

$$h = 2\rho_o (\cos\theta - \cos\alpha) + h_v, \text{ odnosno}$$

$$h = 2\rho_o \left[ \cos\theta - \left(1 - \frac{h_o}{2\rho_o}\right) \right] \quad \text{i} \quad (7.25.)$$

$$dh = - 2\rho_o \sin\theta \quad (7.26.)$$

$$x = \rho_o \sin\theta \quad (7.27.)$$

$$dx = \rho_o \cos\theta \quad (7.28.)$$

Imajući sve ovo u vidu i unošenjem odgovarajućih vrednosti u diferencijalnu jednačinu ravnoteže (7.21.) posle sredjivanja dobija se oblik:

$$\frac{d\sigma_n}{d\theta} = \frac{1}{\sqrt{3}} K \frac{2\sin\theta + \cos\theta}{\cos\theta - (1 - \frac{h_0}{2\rho_0})} \quad (7.29.)$$

Dalja uprošćenja su moguća ako se uvede da je  $B = h_0/2\rho_0$  i  $\sin\theta \approx \theta$ , čime se dobija novi oblik diferencijalne jednačine ravnoteže prema sledećem

$$\frac{d\sigma_n}{d\theta} = \frac{1}{\sqrt{3}} K \left[ 3 - \frac{1-B}{\cos\theta - (1-B)} \right] \quad (7.30.)$$

Na granici za  $x=a/2$  se dobija

$$\sigma_n = (\sigma_{zv})_{\max} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{b}{h_0} \right) \quad (7.31.)$$

U relaciji (7.31.)  $b$  predstavlja uzdužnu dimenziju otkovka u horizontalnoj ravni. Za te granične uslove i uz neka dopunska uprošćenja rešenjem diferencijalne jednačine (7.30.) dobija se raspored napona na površini sočivastog oblika zone deformisanja. Na osnovu toga dolazi se do srednjeg specifičnog pritiska u predelu alata:

$$p_a = \frac{1}{\sqrt{3}} K \left( 1 + \frac{b}{h_v} + 0,1 \frac{a}{h_v} \right) \quad (7.32.)$$

Deformaciona sila se određuje kao proizvod

$$F_a = A_K \cdot p_a \quad (7.33.)$$

Ukupna deformaciona sila se dobija prema relaciji (7.2.), odnosno imajući u vidu relacije (7.19.) i (7.32.) dobija se

$$F = \frac{1}{\sqrt{3}} K \left[ \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{b_v}{h_v} \right) A_v + \left( 1 + \frac{b}{h_v} + 0,1 \frac{a}{h_v} \right) A_a \right] \quad (7.34.)$$

Izraz (7.34.) daje vrednost deformacione sile za slučaj pravougaone osnove otkovka. Na sličan način se izvode i odgovarajuće relacije za slučaj kružne osnove otkovka. U tom slučaju srednji specifični pritisak u alatu iznosi:

$$p_a = K \left( 1,5 + \frac{b_v}{h_v} + 0,08 \frac{d}{h_v} \right) \quad (7.35.)$$

i ukupna deformaciona sila

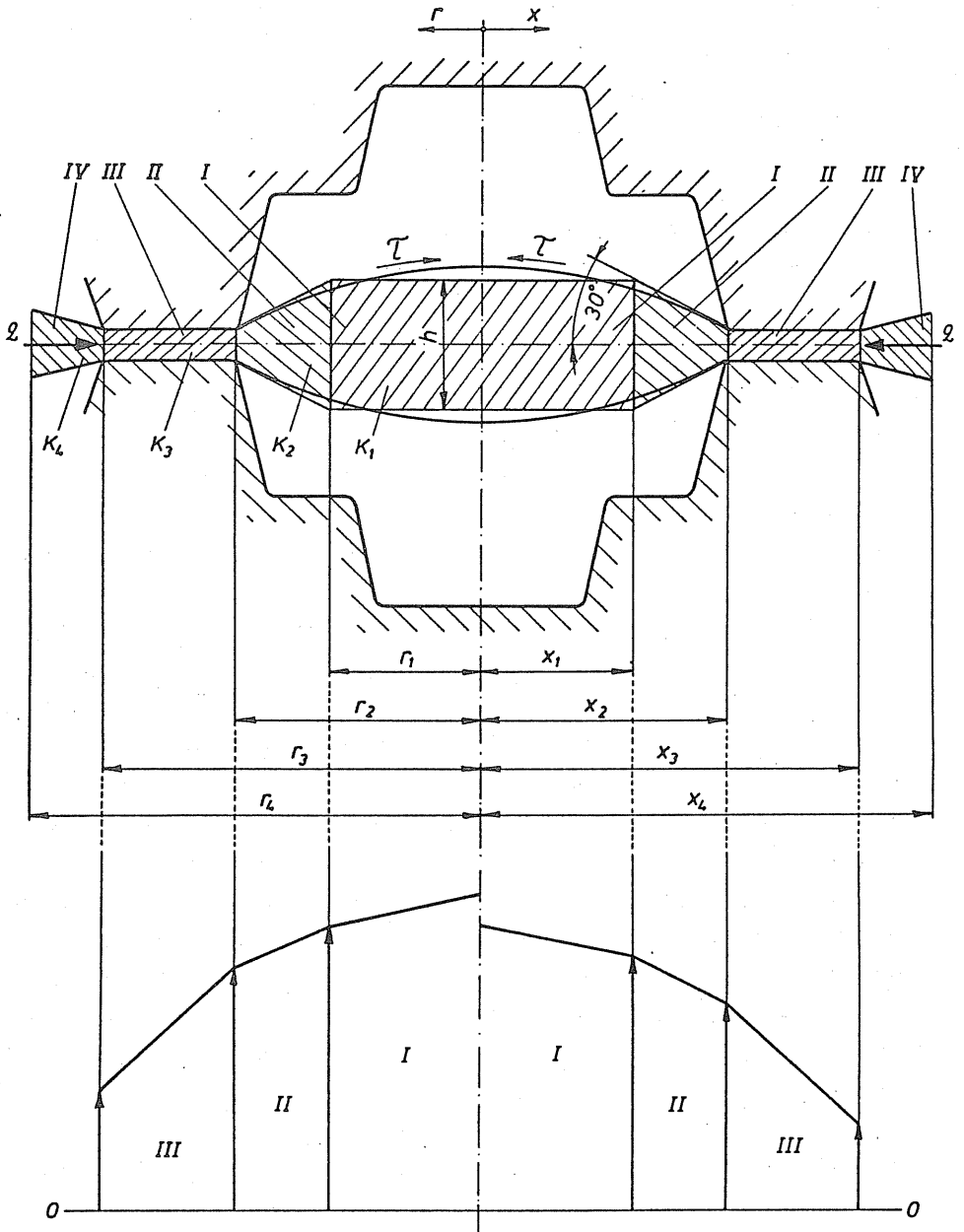
$$F = K \left[ \left( 1,5 + \frac{1}{2} \frac{b_v}{h_v} \right) A_v + \left( 1,5 + \frac{b_v}{h_v} + 0,08 \frac{b}{h_v} \right) A_a \right] \quad (7.36.)$$

### 7.1.2. Analiza procesa kovanja pomoću modela diskontinualne zone deformisanja

Pri analizi i ovog modela zone deformisanja polazi se od podele procesa kovanja na dve glavne faze, pri čemu se u prvoj ostvaruje popuna kalupa i glavno tečenje metala, a u drugoj neznatno tečenje metala i maksimalna deformaciona sila. Pri konačnom, završnom stadijumu plastičnog deformisanja u plastičnom stanju nalazi se zona deformisanja sočivastog oblika, čija se ravan simetrije pokalapa sa podeonom ravni. Ostali deo materijala izvan zone deformisanja nalazi se u kruto-elastičnom stanju. Šematski prikaz alata, zone deformisanja i njene podele na posebne segmente daje se na sl.7.7. Leva polovina ovog crteža odgovara okruglom obliku otkovka, a desna izduženom (pravougaonom) u pravcu normalnom na ravan crteža. Zona deformisanja na sl.7.7. se deli na četiri oblasti. Deo zone deformisanja označen sa I u centralnom delu čini kružni disk sa paralelnim ravnima. U ovom delu je sočivasti oblik u preseku zamenjen pravougaonim. Visina pravougaonika je  $h$ , a osnovica  $2r_1$ , odnosno  $2x_1$ . U ovoj oblasti se smatra da vlada aksijalnosimetrično, odnosno, dvodimenzionalno naponsko stanje. Druga oblast zone deformisanja, označenu sa II na sl.7.7., čini oblik konusnog diska, odnosno, zarubljene piramide, koja se prostire izvan poluprečnika  $r_1$ , odnosno, rastojanja  $x_1$ , do ulaska u kanal za venac, do mosta. I ovde je u pitanju dalja aproksimacija krive konture sočivastog oblika sa pravim linijama trapeza. Rezultati istraživanja pokazuju da je ugao nagiba ravni na konusnom prstenu u odnosu na ravan podele kalupa  $30^\circ$ . Utvrđeno je takodje, da je visina zone deformisanja  $h$  proporcionalna radijusu  $r_2$  otkovka i iznosi:

$$h \approx 0,44r_2 \quad (7.37.)$$

Ova relacija se koristi pri proračunu sila i napona. Tangencijalni napon na granici podele plastične i kruto-elastične zone usvojen je kao maksimalni tangencijalni napona, koji kao što se zna iznosi:



Sl.7.7.

$$\tau = \frac{1}{2} K \quad (7.38.)$$

Napon tečenja  $K$  je različit unutar zone deformisanja u kalupu i u vencu. Radi uprošćenja usvojeno je da su naponi tečenja po zonama I, II, III i IV konstantni i nejednakih veličina.

Odredjivanje potrebne sile kovanja vrši se putem integracije funkcije, koja opisuje raspored normalnih napona na odgovarajućoj površini. Raspored napona u pojedinim delovima zone deofrmisanja ilustruje se na donjem delu slike 7.7.

Istisnuti metal u zonu IV stvara kočiono dejstvo metalu, koji se nalazi u vencu (koji ističe preko mosta). Taj specifični otpor iznosi neku veličinu  $q$ . Prema istraživanjima Tomsen-a, koji pretpostavlja da se i zona IV nalazi u plastičnom stanju, pritisak  $q$  iznosi:

$$q = \frac{K_4}{3} \left[ \left( \frac{r_4}{r_3} \right)^3 - 1 \right] \quad (7.39.)$$

Normalni napon  $p_q$  na spoljnjem delu venca (poluprečnik  $r_3$ ) može se odrediti iz linearnog uslova plastičnog tečenja

$$p_q = q + K_3 \quad (7.40.)$$

Primenjujući metodu ravnih preseka u zoni III može se odrediti normalni napon prema

$$p_3 = q + K_3 \left( 1 + \frac{r_3 - r}{h_v} \right) \quad (7.41.)$$

Napon na unutrašnjoj ivici venca (mosta)  $p_{3gr}$  nalazimo ako u relaciju (7.41.) unesemo da je  $r=r_2$

$$p_{3gr} = q + K_3 \left( 1 + \frac{r_3 - r_2}{h_v} \right) \quad (7.42.)$$

Na osnovu postavki teorije plastičnosti Altan je dobio funkciju raspodele normalnog napona na nagnutim delovima kontaktne površine. Korišćenjem tih rezultata i imajući u vidu simetriju zone II odredjuje se normalni napon prema:

$$p_2 = \frac{c_2}{c_1} \ln \frac{c_3 + c_1 r}{h} + p_{3gr} \quad (7.43.)$$

gde su:

$$c_1 = -2tg\alpha$$

$$c_2 = 2tg\alpha K_2 + K_2(1+tg^2\alpha)$$

$$c_3 = h+2r_1tg\alpha$$

Površina koja deli zone I i II nalazi se na radijusu:

$$r_1 = r_2 - \frac{h-h_v}{2tg\alpha} \quad (7.44.)$$

Ako se zameni  $r=r_1$  u jednačini (7.43.) dobija se za posmatranu tačku normalni napon na granici zone I i II

$$p_{1gr} = -\frac{c_2}{c_1} \ln \frac{c_3+c_1r_1}{h_v} + p_2 \quad (7.44.)$$

Slično prethodnom se određuje normalni napon u zoni I u kojoj je

$$p_1 = \frac{K_1}{h} (r_1-r) + p_{1gr} \quad (7.45.)$$

Ukupna sila kovanja, kao što je rečeno, određuje se integracijom funkcije napona, koja daje raspored napona na kontaktnoj površini.

U opštem slučaju za otkovke kružnog oblika ograničene radijusima  $r_1$  i  $r_2$  sila se određuje izrazom:

$$F = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} p \cdot r \cdot dr \quad (7.46.)$$

Na osnovi ove relacije integracijom dobijaju se komponentalne deformacione sile po zonama:

- Za zonu I - centralni deo

$$F = 2\pi \left( p_{Igr} \frac{r_1^2}{2} + K_1 \frac{r_1^3}{6h} \right) \quad (7.47.)$$

- Za zonu II - konusni deo

$$F_{II} = 2\pi \left\{ -\frac{c_2}{c_1} \left[ h_v \left( \frac{h_v}{2} - c_3 \right) \ln h_v - h \left( \frac{h}{2} - c_3 \right) \ln h + \frac{1}{4} (h^2 - h_v^2) + c_3 (h_v - h) \right] \right\} \quad (7.48.)$$

- Za zonu III - prstensti deo

$$F_{III} = 2\pi \left[ q + K_3 \left( 1 + \frac{r_3}{h_v} \right) \frac{r_3^2 - r_2^2}{2} - K_3 \frac{r_3^2 - r_2^2}{3h_v} \right] \quad (7.49.)$$

Deformacionu silu kovanja čini zbir parcijalno izračunatih deformacionih sila:

$$F = F_I + F_{II} + F_{III} \quad (7.50)$$

Na osnovi poznatih geometrijskih veličina može se odrediti potrebna deformaciona sila.

## 7.2. SPECIFIČNI DEFORMACIONI OTPOR PRI KOVANJU

Bez poznavanja ponašanja materijala u toku procesa deformisanja kovanjem u kalupu nije moguće izračunati nijednu veličinu napona, srednji specifični pritisak niti deformacionu. U napred izloženoj analizi u izraze za određivanje ovih mehaničkih veličina redovno ulazi specifični deformacioni otpor  $K$ , koji na određeni način u njih unosi karakteristiku materijala. Ponašanje materijala u procesu kovanja izražava se promenljivošću specifičnog deformacionog otpora. Tri su osnovna uticajna faktora na promenljivost specifičnog deformacionog otpora: deformacija  $\phi$ , brzina deformacije  $\dot{\phi}$  i temperatura  $v$ . Zbog toga implicitni oblik funkcije specifičnog deformacionog otpora može da se napiše kao:

$$K = K(\phi, \dot{\phi}, v) \quad (7.51.)$$

Ukupni uticaj ova tri faktora na promenu  $K$  može se izraziti preko totalnog diferencijala funkcije  $K$ .

$$dK = \frac{\partial K}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial K}{\partial \dot{\phi}} d\dot{\phi} + \frac{\partial K}{\partial v} dv \quad (7.52.)$$

Prvi član desne strane izraza (7.52.) uzima u obzir uticaj pojave deformacionog ojačavanja u toku deformisanja i za slučajeve potpune tople deformacije, pri kojoj nema deformacionog ojačavanja, pošto se rekristalizacija vrši u toku procesa deformisanja ( $T_o > 0,65 T_t$ ), nestaje i ovaj uticaj, jer tada važi

$$\frac{\partial K}{\partial \phi} = 0$$

U realizaciji procesa kovanja poznato je da se iz niza tehnoeekonomskih razloga koriste hladna, polutopla i topla deformacija. Prva dva slučaja sadrže uvek deformaciono ojačavanje a u trećem slučaju se pojavljuje pri kraju kovanja, odnosno, pri izvodjenju nepotpune tople deformacije. Zbog toga se, praktično, uvek mora voditi računa o uticaju deformacije na specifični deformacioni otpor. Informacije o tom uticaju moraju se imati u priručnom obliku za svaki materijal posebno. Brzina deformacije, čiji je uticaj izražen drugim članom relacije (7.52.), se uvek u toku procesa deformisanja menja. Kvizistatički uslovi deformacije ( $\dot{\phi} = 10^{-2}$  do  $10^2 \text{ sec}^{-1}$ ) u većini slučajeva osiguravanju da brzina deformacije ne utiče signifikantno na deformacioni otpor. Međutim, treba imati u vidu da se u osnovi materijali mogu podeliti u dve grupe u odnosu na deformacioni otpor. Jednu grupu čine materijali čiji je deformacioni otpor osetljiv na deformaciju, pri čemu se deformacioni otpor izražava krivim tečenja, odnosno, relacijom

$$K = C \cdot \phi^n \quad (7.53.)$$

Drugu grupu čine materijali osetljivi na brzinu deformacije, kada se deformacioni otpor može izraziti u funkciji brzine deformacije

$$K = C_1 \cdot \dot{\phi}^m \quad (7.54.)$$

Veću osetljivost na brzinu deformacije obično pokazuju materijali pri nepotpunom toplom deformisanju.

Treći član relacije (7.52.) određuje uticaj promene temperature u toku deformisanja. Ako bi se temperatura održavala konstantnom, onda bi izostao ovaj uticaj. U tom slučaju važi

$$\frac{\partial K}{\partial v} = 0$$

Za praktični proračun specifičnog deformacionog otpora kovanja može se koristiti izraz u obliku

$$K = K_n \cdot C_\phi \cdot C_\dot{\phi} \cdot C_v \quad (7.55.)$$

gde su:

$K_n$  - specifični deformacioni otpor pri



$$C_{\phi} = 1; C_{\dot{\phi}} = 1; C_{\nu} = 1$$

odnosno pri

$$T_o = T_t \text{ i } \dot{\phi} = 1 \text{ sec}^{-1}$$

$C_{\phi}$  - koeficijent uticaja stepena deformacije izračunava se tako da se usvaja da je  $C_{\phi} = 1$  ako važe uslovi:  $0,3 < \phi < 0,7$  i  $T_o > 0,65 T_t$ . Za manje deformacije  $\phi < 0,3$  koristi se izraz

$$C_{\phi} = \frac{T_t}{T_o} \quad (7.56.)$$

$C_{\dot{\phi}}$  - brzinski koeficijent se izračunava prema

$$C_{\dot{\phi}} = \dot{\phi}^n \quad (7.57.)$$

pri čemu se eksponent  $n$  određuje na osnovi sledećeg izraza

$$n = n_o \left( \frac{T_o}{T_t} \right)^2 \quad (7.58.)$$

$n_o$  - se dobija iz tabele 7.1.

$C_{\nu}$  - temperaturni koeficijent se izračunava prema

$$C_{\nu} = e^{m(T_t - T_o)} \quad (7.59.)$$

Za uslove  $0,3 < \phi < 0,7$ ,  $\dot{\phi} < 100 \text{ sec}^{-1}$  i  $T_o > 0,65 T_t$  vrednost konstante  $m$  iznosi:

$$m = 3,5 \cdot 10^{-3}$$

Da bi se mogle izračunati numeričke vrednosti specifičnog deformacionog otpora tople deformacije potrebni su podaci za konstante  $K_n$  i  $n_o$ , koje zavise od vrste materijala. Ti podaci za određeni broj vrste materijala daju se u tabeli T.7.1. Postoji i mogućnost čisto eksperimentalnog načina određivanja specifičnog deformacionog otpora, pri čemu se određuje njegova vrednost na početku kovanja za temperature 900, 1000, 1100 i 1200°C. Na kraju kovanja se vrednost specifičnog deformacionog otpora daje u zavisnosti od njegove vrednosti na početku i oblika otkovka, posebno u zavisnosti od razgranatosti njegovog oblika. Podaci o ovom načinu određivanja  $K$  mogu se naći u priručnoj literaturi.

Tabela T.7.1. Vrednosti za  $K_n$  i  $n_o$  za  $0,3 < \phi < 0,7$

R.br.	Materijal	Temperatura topljenja $T_t$ /°K/	$K_n$ (DAN/mm <sup>2</sup> )	$n_o$
1.	Aluminijum	933	1,6÷1,7	0,20
2.	Duraluminijum	933	3,5	0,18÷0,20
3.	Bakar	1350	1,8÷2,0	0,20÷0,25
4.	Ugljenični čelik sa 0,15%C	1760	2,2	0,20÷0,25
5.	Ugljenični čelik sa 0,5%C	1700	2,5	0,25
6.	Ugljenični čelik sa 1%C	1600	3,1÷3,3	0,23
7.	Čelik za opruge, Č.2330	1700	3,0	0,20
8.	Alatni čelik, Č.4150	1660	4,8	0,20
9.	Nerdjajući čelik, 4571	1660	4,2	0,16÷0,10
10.	Brzorezni čelik	1720	4,9	0,1

## 8. ROTACIONO TISKANJE

### 8.1. UVOD, KARAKTERISTIKE I VRSTE ROTACIONOG TISKANJA

Rotaciono tiskanje je obrada deformisanjem kojom se dobijaju šuplji rotaciono simetrični delovi različitih oblika, dimenzija i materijala pripremljena. Obzirom na kvalitet obradjene površine rotaciono tiskanje predstavlja završnu obradu. Tehnologija rotacionog tiskanja spada u red tehnologija sa parcijalnim zahvatom. Tečenje materijala ograničeno je na vrlo usku oblast trenutnog delovanja alata na materijal. Zbog parcijalnog zahvata alata i materijala u procesu se javljaju relativno male sile. Pored toga značajna prednost ovog postupka je i to što oblik alata nije direktno uslovljen oblikom gotovog dela. Sama obrada realizuje se složenim relativnim kretanjima elemenata alata i radnog komada, što je čini veoma fleksibilnom kako u odnosu na vrstu materijala radnog predmeta tako i u odnosu na njegove geometrijske karakteristike.

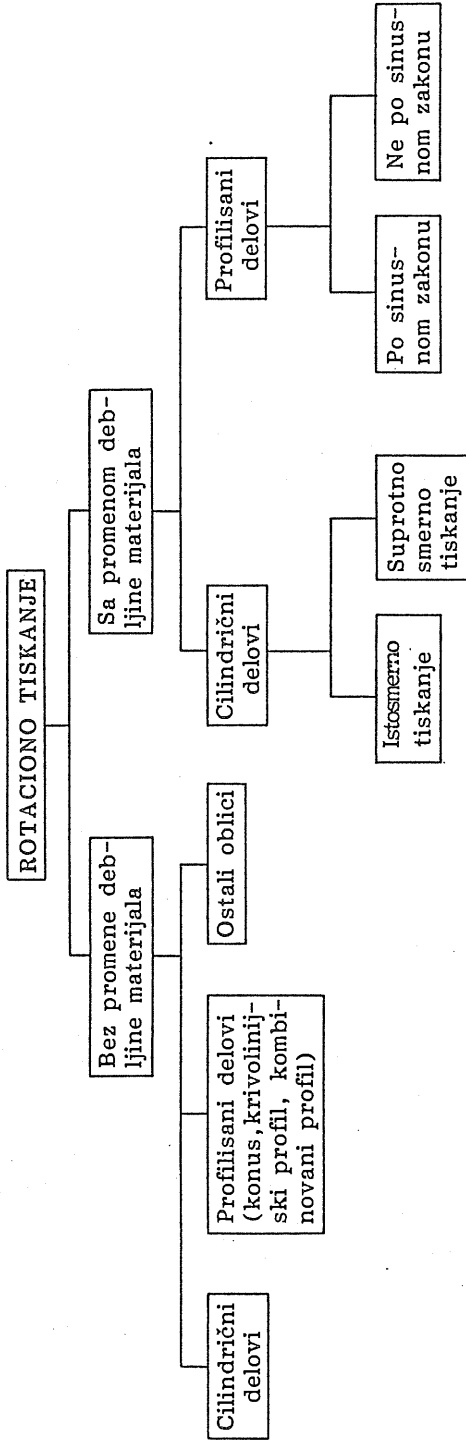
Proces se izvodi na specijalnim mašinama koje su po vrstama kretanja vrlo slične strugovima.

Rotaciono tiskanje može se izvoditi u kombinaciji sa drugim postupcima tehnologije plastičnosti. Tako se npr. ova obrada veoma uspešno kombinuje sa dubokim izvlačenjem. Pri tome je duboko izvlačenje po pravilu prva operacija da bi se deo zatim dovodio na krajnji oblik i dimenzije tehnologijom tiskanja. Tako se npr. izrađuju skoro sve vrste posudja.

Oblast primene ove tehnologije, sa stanovišta veličine serije, su maloserijske i srednje serijske proizvodnje. U tim uslovima rotaciono tiskanje daje najbolje efekte. Kod visokoserijske i masovne proizvodnje duboko izvlačenje je, zbog veće brzine izvodjenja procesa, ekonomičnije.

Rotaciono tiskanje se najčešće izvodi na hladno. Samo u nekim izuzetnim slučajevima (npr. teško obradiv materijal, komplikovana geometrijska forma radnog komada i sl.) može se pripremak pre obrade dovesti na povišenu temperaturu.

Ova obrada u svom rudimentalnom obliku, primenjivana je još kod starih Egipćana pa se slobodno može reći da pored kovanja predstavlja jednu od najstarijih obrada deformisanjem. Ali, sve do pedesetih



Sl. 8.1. Podela rotacionog tiskanja

godina ovog veka rotaciono tiskanje je bilo na nivou zanatske proizvodnje. Nakon toga počinje brzi razvoj i sve šira primena ove tehnologije u industrijskoj proizvodnji. Ovo je uslovljeno velikim mogućnostima rotacionog tiskanja i njegovim komparativnim prednostima u odnosu na druge tehnologije.

Značajan impuls u razvoju i primeni ove tehnologije dali su NC i CNC upravljački koncepti koji su na mašinama za rotaciono tiskanje veoma uspešno primenjeni.

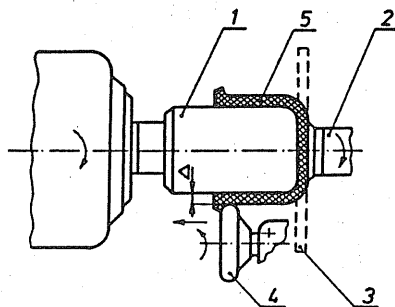
Tehnologija rotacionog tiskanja kompatibilna je i sa najnovijim trendovima razvoja u okviru proizvodnih tehnologija - robotikom i fleksibilnim obradnim sistemima.

### 8.1.1. Vrste rotacionog tiskanja

Podelu rotacionog tiskanja moguće je izvesti na različite načine, već u zavisnosti od usvojenog kriterijuma podele. Najčešće se podela vrši prema geometrijskom obliku obradka i načinu njegovog dobijanja. Pode- la prema tom kriterijumu data je na sl.8.1.

#### 8.1.1.1. Rotaciono tiskanje bez promene debljine zida

Osnovna karakteristika ove vrste tiskanja je da se debljina lima u toku procesa ne menja. Pripremak je ravna platina, najčešće kružnog oblika koja se postavlja na čelo kalupa (1), sl.8.2.



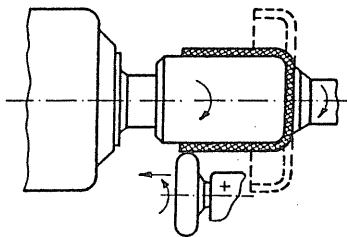
- 1 - kalup (trn)
- 2 - držač
- 3 - platina
- 4 - valjčić
- 5 - obradak

Sl.8.2. Rotaciono tiskanje cilindričnih oblika bez promene debljine zida

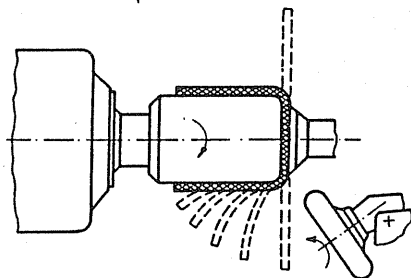
Platina se preko držača (2) pritiskuje na kalup. Glavno kretanje (obrtanje) vrši pripremak koji se obrće zajedno sa kalupom i držačem. Pomoćno kretanje vrši alat u vidu valjčića (4) koji je uležišten u nosač i može da izvodi kretanje u X i Y pravcu istovremeno se okrećući oko svoje ose. Valjčić pritiskuje lim koji se obrće oko glavne ose mašine, dovodeći ga pri tome na oblik kalupa.

Ako nije moguće dobiti krajnji cilindrični oblik iz jedne operacije, to se vrši u više operacija. Pripremak za narednu operaciju je obradak iz prethodne operacije (sl.8.3.).

Kod većih stepena deformacije rotaciono tiskanje se izvodi u nekoliko faza. Alat u svakoj fazi deformiše limeni pripremak za određenu veličinu, kako je to prikazano na sl.8.4. Broj potrebnih faza zavisi od geometrije procesa i vrste materijala (videti odeljak 8.3.4.).



Sl.8.3. Dobijanje krajnjeg cilindričnog oblika iz više operacija



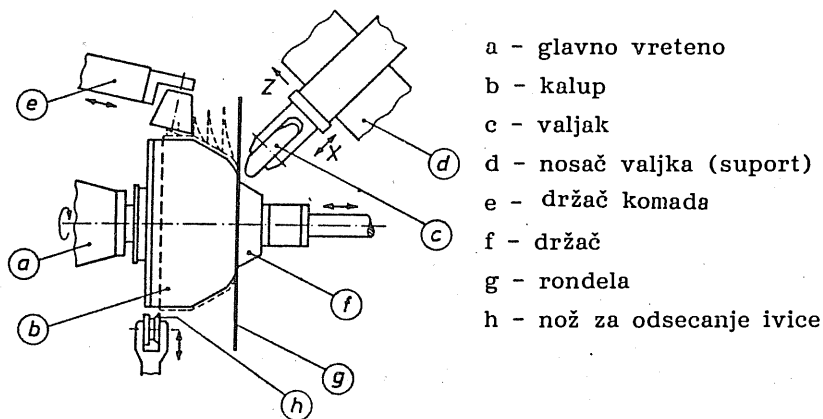
Sl.8.4. Rotaciono tiskanje cilindričnih oblika po fazama

Delovi čija kontura nije cilindrična nego nekog drugog oblika (konus, krivolinijski oblik, kombinovan oblik) dobijaju se na sličan način kao i cilindrični delovi. Pripremak je i u ovom slučaju ravna rondevla kružnog oblika koja se preko držača pritiskuje na kalup. Kalup ima oblik koji odgovara završnom obliku komada (sl.8.5.). Delovanjem alata na pripremak vrši se oblikovanje lima.

Kod necilindričnih oblika deformisanje se vrši najčešće u nekoliko faza.

Nakon procesa tiskanja, kao završna faza kompletne operacije može se izvršiti odsecanje ivica (vrhova) obratka i to dok se on nalazi još na kalupu. To se vrši posebnim alatom - nožem (sl.8.5.h)

Kombinacijom parametara pojedinih faza zatim brojem obrta glavnog kretanja kao i veličine pomaka alata, moguće je na ovaj način dobiti različite oblike obradka (8.6.).

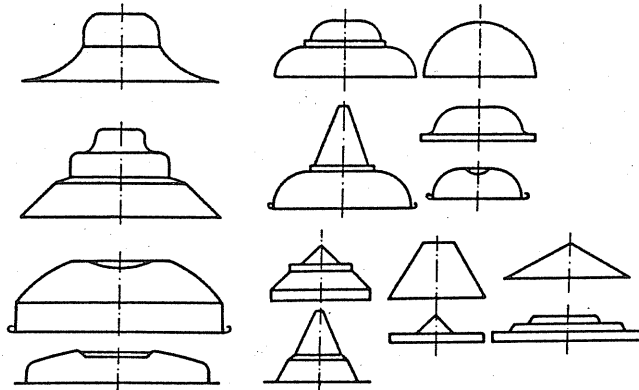
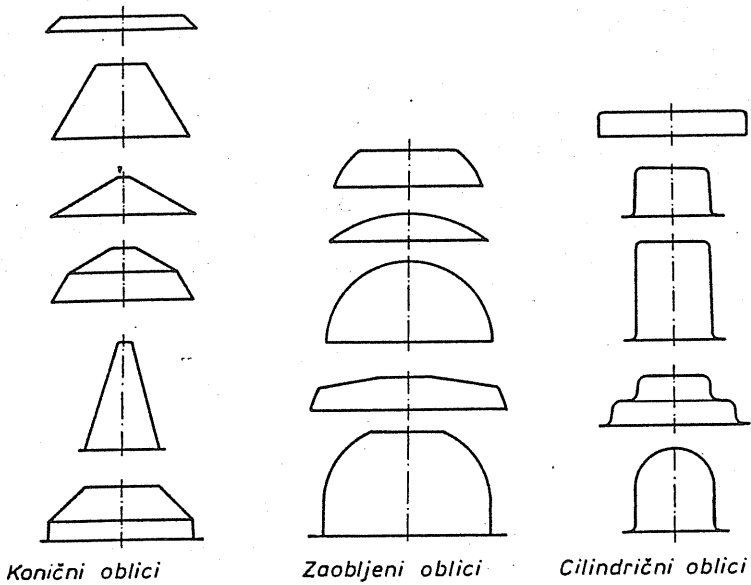


Sl.8.5. Rotacioni tiskanje profilisanih delova /1/

Pored prikazanih vidova izvodjenje procesa rotacionog tiskanja bez promene debljine zida, moguće su još neke posebne varijante ove obrade kojima se omogućuje dobijanje vrlo različitih oblika obradaka.

Na sl.8.7. prikazana je izrada jednog konkavnog elementa koji se dobija iz ravne platine. U ovom slučaju konfiguracija kalupa, držača i alata je nešto drugačija nego što je to slučaj kod prethodno opisanih

slučajeva ali je suština procesa ista: delovanjem alata na platinu koja se obrće, dobija se deo čiji je oblik identičan obliku kalupa. Ovim načinom dobijaju se dna rezervoara i slični elementi.

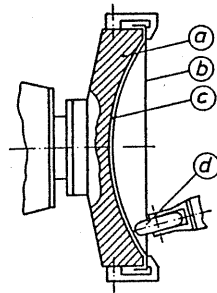


Kombinovani oblici

Sl.8.6. Različiti oblici obradaka dobijeni tiskanjem bez promene debljine zida

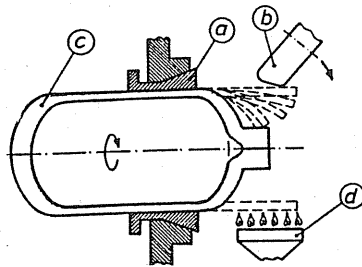


Rotacionim tiskanjem bez promene debljine zida mogu da se vrše i operacije sužavanja (sl.8.8.), pri čemu se polazni prečnik jednog dela cilindričnog obradka redukuje. Na slici je prikazano sužavanje jedne posude iz visokolegiranog čelika pri čemu se pre obrade všri lokalno zagrevanje.



- a - kalup
- b - platina
- c - obradak
- d - valjčić

Sl.8.7. Izrada dna rezervoara tiskanjem /2/

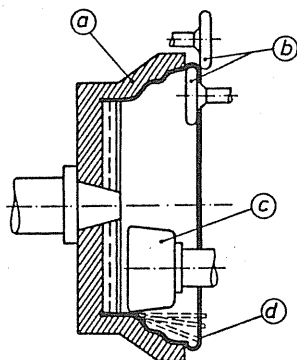


- a - držač
- b - valjčić
- c - posuda
- d - grejač

Sl.8.8. Proces sužavanja tiskanjem /2/

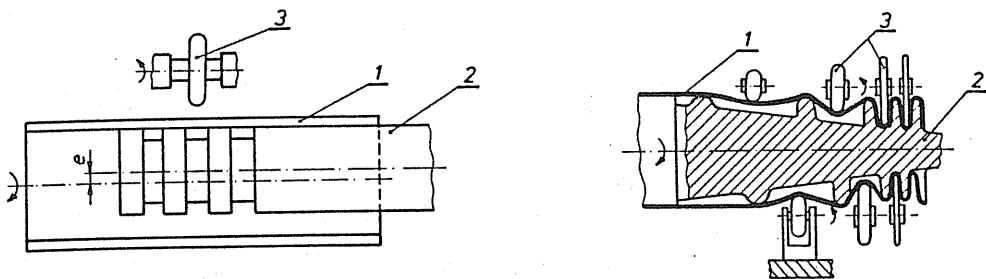
Moguća je i primena tiskanja za proširivanje (sl.8.9.). Polazni prečnik priprema u vidu cevi proširuje se pomoću alata - valjčića a oblik proširenja odgovara unutrašnjem obliku kalupa u koji se postavlja pripremak.

Dalje mogućnosti primene rotacionog tiskanja bez smanjenja debljine zida prikazane su na sl.8.10. i 8.11.



- a - kalup
- b - valjčići
- c - valjak
- d - obradak

Sl.8.9. Proširivanje tiskanjem /2/

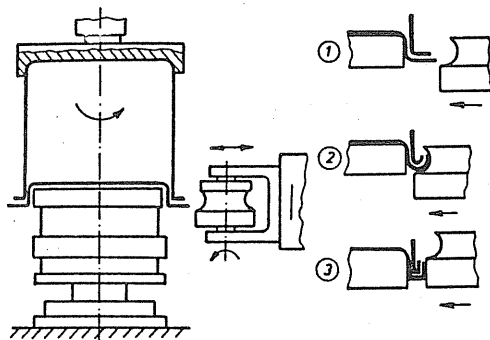


Sl.8.10. Različite mogućnosti izrade cevi sa rebrima

Dva načina izrade cevi sa rebrima data su na sl.8.10. Radijalnim delovanjem alata (valjaka) na cev koja se obrće izradjuju se rebra. Dimenzije i oblici rebara zavise od geometrije trna na koji je cev postavljena. Na ovaj način mogu se izradjivati i navoji na cevastim oblicima kao što je to npr. navoj na grlu sijalice i sl.

Operacija pertlovanja (spajanje dva elementa od lima npr. dna i omotača suda) takodje može da se izvodi rotacionim tiskanjem, kako

je to prikazano na sl.8.11. Kao što se sa slike vidi, alat za tu vrstu obrade ima dve radne površine: konveksnu, pomoću koje se vrši savijanje zajednički postavljenih limova i ravnu, pomoću koje se vrši njihovo sabijanje.



Sl.8.11. Pertlovanje (spajanje)

#### 8.1.1.2. Rotaciono tiskanje sa promenom debljine zida

Ovaj vid rotacionog tiskanja razlikuje se od prethodno opisanog po tome što se za vreme procesa pored oblikovanja dela prema kalupu vrši i smanjenje debljine zida. Očigledna je analogija ovog postupka sa dubokim izvlačenjem sa redukcijom zida i sa istosmernim istiskivanjem šupljih obradaka.

Ova obrada se svrstava u grupu postupaka zapreminskog deformisanja.

I ovde se podela vrši prema geometriji obradka i načinu izvodjenja procesa (videti sl.8.1.).

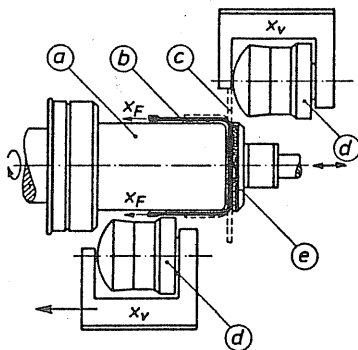
Rotaciono tiskanje sa promenom debljine zida cilindričnih delova moguće je izvesti na dva načina:

- istosmerno rotaciono tiskanje
- suprotno smerno rotaciono tiskanje

Kod istosmernog tiskanja smer pomoćnog kretanja (kretanje alata u uzdužnom pravcu) identičan je smeru kretanja materijala koji se deformiše. Polufabrikat za ovaj slučaj obrade može biti: a) ravna limena platina, b) pripremak u vidu čančeta dobijen dubokim izvlačenjem

ili rotacionim tiskanjem, c) pripremak dobijen hladnim istiskivanjem, kovanjem ili struganjem, d) cev (sl.8.26.).

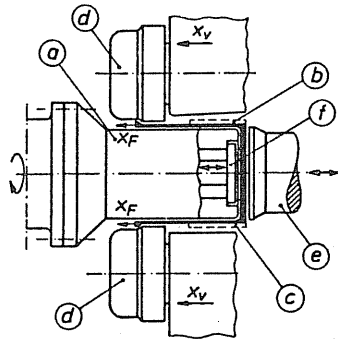
Na sl.8.12. prikazan je proces istosmernog rotacionog tiskanja sa promenom debljine zida i to za slučaj da je polufabrikat ravna rondela, tj. prethodno izvučeno čanče (sl.8.13.). Rondela se steže



Sl.8.12. Istosmerno rotaciono tiskanje sa promenom debljine zida  
Polufabrikat: platina /2/

pomoću držača (e) na kalup (a). Glavno kretanje je obrtno kretanje kalupa zajedno sa rondelom i držačem. Alat (d) vrši translatorno kretanje obrćući se pri tome oko svoje ose. Svojim prednjim delom alat prvo deformiše platinu u cilindrično čanče i već u toj fazi nastaje redukcija debljine zida čančeta za 30-40%. Krajnja redukcija debljine postiže se delovanjem zadnjeg dela valjka na materijal. Aksijalne brzine kretanja alata  $X_V$  i materijala koji se deformiše  $X_F$  nisu iste. Alat se brže kreće u aksijalnom pravcu od materijala a relativna brzina  $X_R = X_V - X_F$  zavisi od stepena deformacije.

Rotaciono tiskanje sa promenom debljine zida u slučaju da je pripremak u obliku čančeta prikazano je na sl.8.13. Čanče (c) se navlači na kalup (a) i pritiskuje držačem (e). Sva ova tri elementa (c, a, e) vrše glavno obrtno kretanje dok se redukcije debljine zida vrši pomoću valjčića koji se kreće u aksijalnom pravcu.



Sl.8.13. Istosmerno rotaciono tiskanje sa promenom debljine zida. Polufabrikat: cilindrično čanče /2/

Kod suprotno smernog rotacionog tiskanja sa promenom debljine zida materijal teče u smeru suprotnom od smera kretanja alata.

Pripremak se postavlja na kalup i to tako da se svojom čeonom stranom oslanja na čeonu graničnik na glavi mašine. Valjci se kreću u naznačenom smeru (sl.8.14.) a materijal teče u smeru suprotnom od kretanja valjaka.

Kod ove vrste tiskanja gotov komad može biti znatno duži od samog kalupa na koji se postavlja polufabrikat. Ta dužina može biti i do 6 m.

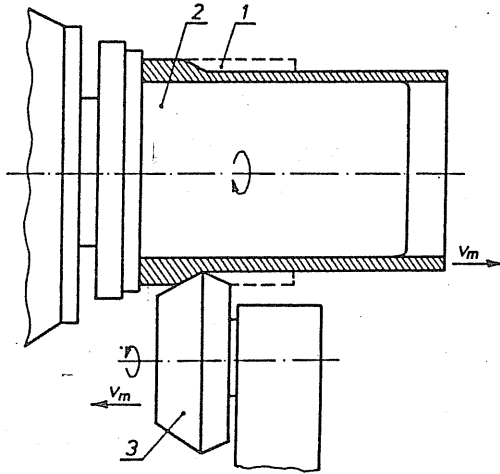
Pored cilindričnih geometrijskih oblika ovim vidom tiskanja moguće je obradivati i konične delove.

Rotaciono tiskanje koničnih delova sa redukcijom debljine zida može se izvoditi po tzv. sinusnom zakonu. U tom slučaju postoji sledeći odnos između početne i krajnje debljine materijala ( $s_0$ ,  $s_1$ , sl. 8.15.).

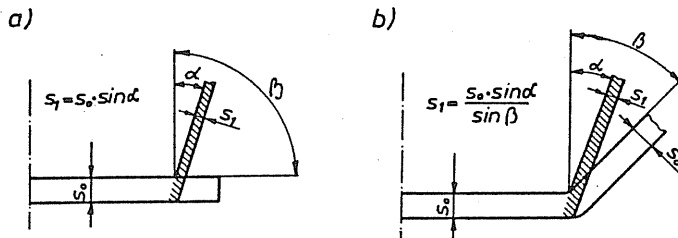
$$s_1 = s_0 \cdot \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \quad (8.1.)$$

Izraz (8.1.) je opšteg karaktera, tj. važi za sve oblike priprema. Za slučaj tiskanja iz ravne rondela, gde je  $\beta = 90^\circ$  izraz (8.1.) postaje:

$$s_1 = s_0 \cdot \sin \alpha \quad (8.2.)$$



Sl.8.14. Suprotno-smerno rotaciono tiskanje sa promenljivom debljinom zida

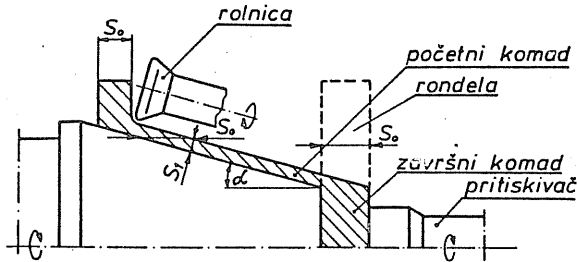


Sl.8.15. Veza izmedju početne i krajnje debljine materijala za slucaj a) priprema u vidu ravne rondele b) prethodno izradjenog priprema

Gornji izraz govori da je debljina zida obradka u aksijalnom pravcu jednaka početnoj debljini zida priprema.

Na sl.8.16. prikazan je proces rotacionog tiskanja konusnog obradka po sinusnom zakonu. Postupak je, u principu, isti kao i kod

ranije opisanih postupaka tiskanja sa redukcijom debljine lima s tim što se ovde pojavljuju veće sile i što je geometrija alata nešto drugačija. Zbog težih uslova obrade ovde je neophodno intenzivno podmazivanje u toku procesa.



Sl.8.16. Šema procesa rotacionog tiskanja konusnih delova po sinusnom zakonu

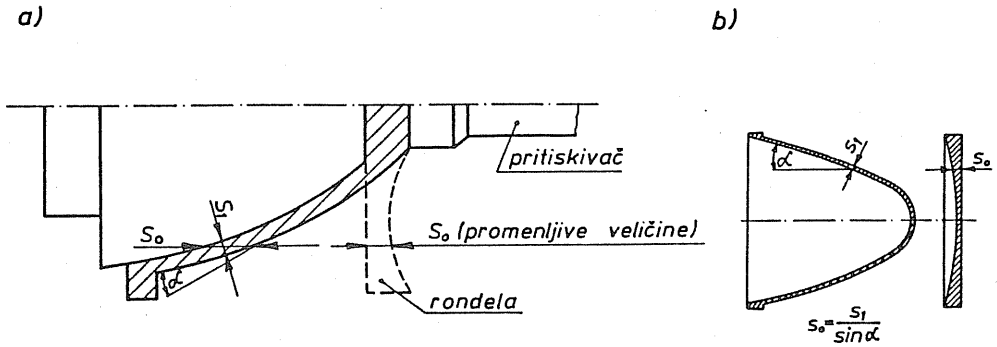
Ovaj vid rotacionog tiskanja može se vršiti i tako da promena debljine zida ne podleže sinusnom zakonu, tj. da je:

$$s_1 \neq s_0 \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (8.3.)$$

Pored koničnih moguće je i tiskanje i krivolinijskih geometrijskih oblika sa promenom debljine zida.

Kod ovakvih oblika, također, je moguće tiskanje po sinusnom zakonu ali je u tom slučaju, zbog promenljivog ugla nagiba izvodnice konure ("α"), potrebno izraditi pripremak sa promenljivom debljinom zida. Na sl.8.17a. prikazana je šema tiskanja krivolinijskog oblika po sinusnom zakonu a sl.8.17b. prikazuje pripremak i obradak za tu operaciju.

U najvećem broju slučajeva obrada rotacionog tiskanja izvodi se na hladno. Samo kod tiskanja teško obradivih materijala i debelih limova vrši se prethodno zagrevanje priprema u cilju smanjenja deformacione sile i povećanja obradivosti materijala.



Sl.8.17. Šema procesa rotacionog tiskanja krivolinijskih oblika po sinusnom zakonu, obradak i pripremak /2/

## 8.2. ANALIZA PROCESA ROTACIONOG TISKANJA

### 8.2.1. Naponsko-deformaciono stanje u obradku

Kao što je prikazano u prethodnom poglavlju, postoje različite vrste procesa rotacionog tiskanja sa stanovišta vrste polufabrikata, geometrije obradka kao i samog izvodjenja procesa. Deformaciono i naponsko stanje za svaki od navedenih vidova tiskanja u većoj ili manjoj meri je različito. Ipak, sa stanovišta proučavanja naponsko-deformacionog stanja može se uslovno napraviti podela na: a) rotaciono tiskanje bez smanjenja debljine zida i b) sa smanjenjem debljine zida.

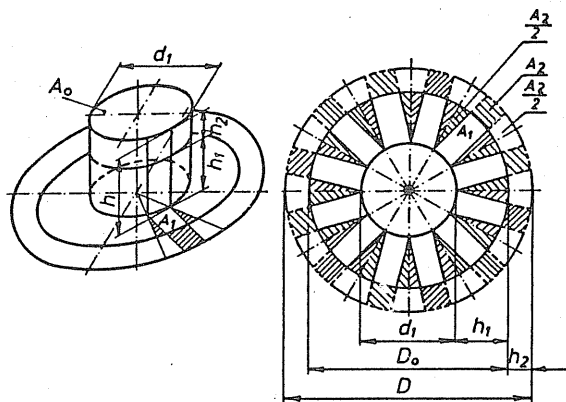
#### 8.2.1.1. Naponsko-deformaciono stanje pri rotacionom tiskanju bez smanjenja debljine zida

Kao primer za rotaciono tiskanje bez redukcije debljine zida posmatračće se dobijanje cilindričnog obradka sa dnom iz ravnog polufabrikata.

Pri analizi deformacija koje se odvijaju za vreme prevodjenja pločastog polufabrikata u cilindrični obradak sa dnom može se uočiti analogija izmedju rotacionog tiskanja i dubokog izvlačenja bez promene debljine zida.

Posmatrajući pločasti polufabrikat prečnika  $D_0$  (sl.8.18.) i uzimajući u obzir činjenicu da se površina dna cilindra ( $A_0$ ) ne deformiše,





Sl.8.18. Prevodjenje ravnog prirerka u cilindrični obradak sa dnom

zaključuje se da se ravni prsten  $D_0 - d_1$  prevodi u cilindričnu površinu obradka visine "h". Sa slike je uočljivo da se pri tome trouglaste površine  $2 \times \frac{A_2}{2}$  premeštaju i postaju pravougaonici visine "h<sub>2</sub>". Ukupna krajnja visina cilindričnog obradka sastoji se iz dva dela:

$$h = h_1 + h_2 \quad (8.4.)$$

Pri tome visina "h<sub>1</sub>" je formirana od površina  $A_{1i}$  a visina "h<sub>2</sub>" od površine  $A_{2i}$ .

U toku obrade neophodno je obezbediti takvo naponsko stanje koje dovodi do opisanog mehanizma deformisanja tj. premeštanja čestica materijala.

Analitički izraz za veličinu logaritamske deformacije za ovaj slučaj tiskanja glasi:

$$\phi = \ln \frac{d_{i-1}}{d_i} \quad (8.5.)$$

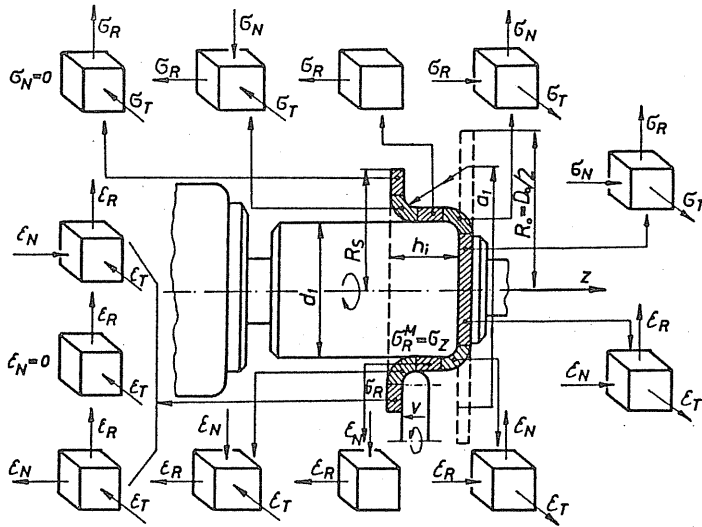
$d_{i-1}$  - prečnik u prethodnoj operaciji

$d_i$  - prečnik u narednoj operaciji

Ako se gotov komad dobija u samo jednoj operaciji rotacionog tiskanja onda je  $d_{i-1} = D_0$  a " $d_i$ " je prečnik gotovog komada.

Kvalitativni prikaz kompletnog naponsko-deformacionog stanja u karakterističnim zonama obradka dat je na sl.8.19.

U dnu obradka, kao i zaobljenom delu preko radijusa trna, deluju dve zatezne ( $\sigma_r, \sigma_t$ ) i jedna pritisna naponska komponenta ( $\sigma_n$ ). Takođe, u tim segmentima se javljaju dve pozitivne i jedna negativna komponenta deformacije.



Sl.8.19. Kvalitativan prikaz naponsko-deformacionog stanja u karakterističnim zonama obradka

U zidu omotača vlada čisto zatezno naponsko stanje ( $\sigma_r$ ) uz postojanje dve, po znaku, različite komponente deformacije ( $\epsilon_r, \epsilon_n$ ).

Zaobljeni deo preko tiskača okarakterisan je prostornim naponskim i deformacionim stanjem. U ovom segmentu postoje dve pritisne ( $\sigma_n, \sigma_t$ ) i jedna zatezna ( $\sigma_r$ ) naponska komponenta kao i odgovarajuće komponente deformacije ( $\epsilon_n, \epsilon_t, \epsilon_r$ ).

U vencu obradka vlada ravansko naponsko stanje ( $\sigma_r, \sigma_t$ ). Pri tome, radijalni napon je pozitivan a tangencijalni negativan. Za razliku od dubokog izvlačenja, ovde ne postoji normalni napon  $\sigma_n$ . Deformacija

u radijalnom pravcu ( $\epsilon_r$ ) je pozitivna a u tangencijalnom ( $\epsilon_t$ ) negativna. Deformacija po debljini ( $\epsilon_n$ ) je različita po veličini i znaku u različitim delovima venca.

Prevodjenje pločastog dela radnog komada u cilindrični vrši se pomoću pritisnih tangencijalnih i zateznih radijalnih napona u vencu. Zbog toga će se dalja analiza naponskog stanja koncentrisati na taj deo radnog komada.

Korišćenjem uslova plastičnog tečenja u obliku:

$$\sigma_r - \sigma_t = \beta \cdot \sigma_e \quad (8.6.)$$

kao i diferencijalne jednačine ravnoteže za slučaj bez postojanja trenja ( $\mu=0$ ), koja ima oblik:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_r}{d\rho} + \sigma_r - \sigma_t = 0 \quad (8.7.)$$

( $\rho$  - tekuća koordinata u r-pravcu)

Jednačine (8.6.) i (8.7.) daju:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_r}{d\rho} + \beta \cdot \sigma_e = 0 \quad (8.8.)$$

Rešavanjem j-ne (8.8.) i odredjivanjem integracione konstante, uz korišćenje uslova da je za  $\rho=R_s$  radijalni napon  $\sigma_r=0$  ( $R_s$  - trenutna vrednost spoljašnjeg prečnika venca), dobijaju se vrednosti za radijalni i tangencijalni napon u vencu:

$$\sigma_r = \beta \cdot \sigma_{esr} \ln \frac{R_s}{\rho} \quad (8.9.)$$

$$\sigma_t = -\beta \cdot \sigma_{esr} \left(1 - \ln \frac{R_s}{\rho}\right) \quad (8.10.)$$

U gornjim jednačinama vrednost " $\sigma_{esr}$ " predstavlja srednju vrednost efektivnog napona:

$$\sigma_{esr} = \frac{1}{2} (\sigma_{eo} + \sigma_{e\phi})$$

$\sigma_{eo}$  - efektivni napon na početku deformisanja

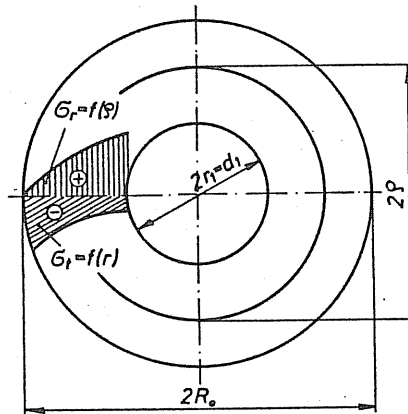
$\sigma_e$  - efektivni napon na kraju deformisanja

Raspored radijalnog i tangencijalnog napona u vencu prikazan je na sl.8.20. Radijalni napon na spoljnjem prečniku vena ima vrednost 0, dok je tangencijalni pritisni napon na tom mestu maksimalan. Na unutrašnjem prečniku vena radijalni napon ima maksimalnu vrednost. Dakle, važi sledeće:

$$\sigma_{r\max} = 1,1 \cdot \sigma_{\text{esr}} \ln \frac{R_s}{r_1} \quad \text{za } \rho = r_1 \quad (8.11.)$$

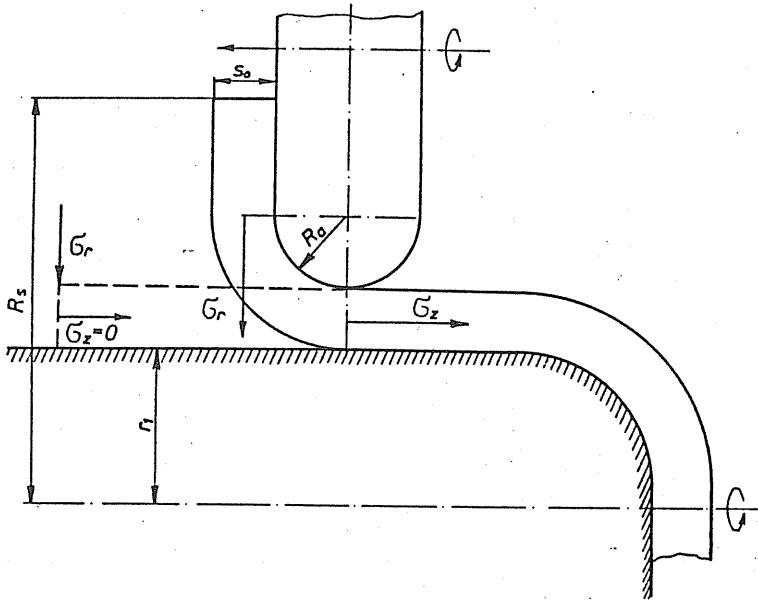
$$\sigma_{t\max} = 1,1 \cdot \sigma_{\text{esr}} \quad \text{za } \rho = R_s \quad (8.12.)$$

$r_1$  - poluprečnik obratka.



Sl.8.20. Raspored radijalnog i tangencijalnog napona u vencu obratka

Usled naponskih komponenti  $\sigma_r$  i  $\sigma_t$  (jednačine (8.9.) i (8.10.)) obavlja se deformacija materijala u vencu tj. prevodjenje trouglastih segmenata u pravougaone (sl.8.18.). Za određivanje aksijalnog napona u zidu obradka  $\sigma_z$  koristi se maksimalni radijalni napon u vencu (8.11.) kome je potrebno dodati udeo napona za savijanje na radijusu valjčića kao i udeo napona usled kontaktnog trenja između valjčića i materijala.



Sl.8.21. Prevođenje radijalnog napona u vencu u aksijalni napon u zidu obratka

Priraštaj radijalnog napona usled savijanja na radijusu alata iznosi:

$$\Delta\sigma_{rs} = \sigma_{esr} \frac{S_o}{2R_a + S_o} \quad (8.13.)$$

$R_a$  - radijus alata

$S_o$  - debljina materijala

Udeo kontaktnog trenja uzima se u obzir množenjem zbiru komponenti radijalnog napona (8.11.) i (8.13.) sa faktorom " $e^{\mu\alpha}$ ". Razvijanjem ovog faktora u Tajlorov red:

$$e^{\mu\alpha} = 1 + \mu\alpha + \dots$$

dobija se krajnji izraz za aksijalni napon u zidu obradka:

$$\sigma_z = (1,1 \cdot \sigma_{esr} \cdot \ln \frac{R_s}{r_1} + \sigma_{esr} \frac{S_o}{2R_a + S_o}) (1 + \mu\alpha) \quad (8.14.)$$

Za  $R_s = R_o$  aksijalni napon postiže maksimalnu vrednost ( $\sigma_z = \sigma_{zmax}$ ).

$\alpha$  - ugao nagiba izvodnice obradka, za cilindrične obradke

$$\alpha = \frac{\pi}{2}.$$

Na kraju procesa rotacionog tiskanja (isprekidana pozicija na sl.8.21.) radijalna komponenta dostiže svoj maksimum a aksijalna komponenta napona u zidu obradka jednaka je nuli ( $\sigma_z = 0$ ). Iz uslova plastičnosti u tom trenutku:

$$\sigma_r - \sigma_z = \beta \cdot \sigma_{esr}$$

$$\sigma_z = 0$$

dobija se vrednost radijalnog napona:

$$\sigma_r = \beta \cdot \sigma_{esr} \quad (8.15.)$$

Tangencijalna naponska komponenta na kraju procesa dobija se iz pretpostavke o ravanskom deformacionom stanju. Za taj slučaj važi odnos:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_z + \sigma_r}{2} = \frac{\beta \cdot \sigma_{esr}}{2} \quad (8.16.)$$

#### 8.2.1.2. Naponsko-deformaciono stanje pri rotacionom tiskanju sa smanjenjem debljine zida

Analiza naponsko-deformacionog stanja pri rotacionom tiskanju sa redukcijom debljine zida sprovedeće se na primeru istosmernog rotacionog tiskanja.

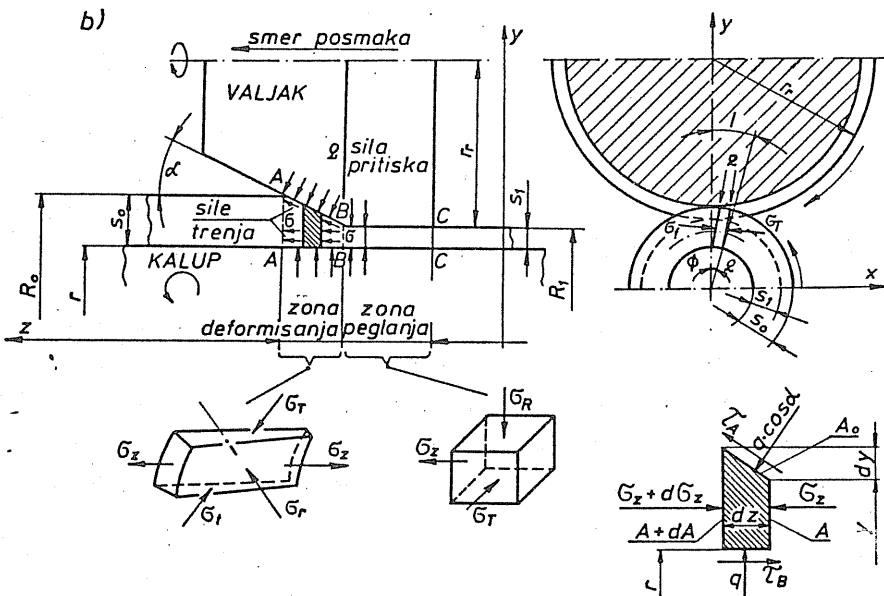
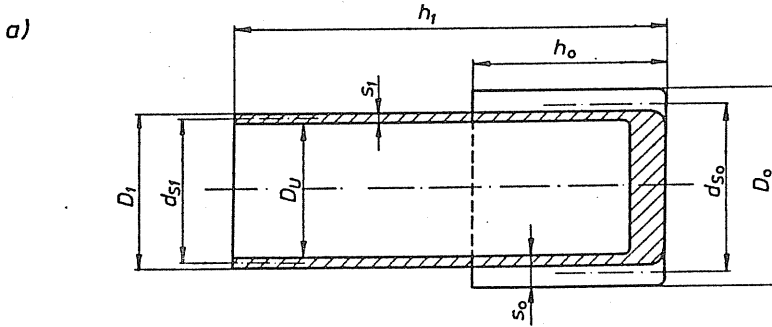
Kod ovog vida obrade početna debljina zida ( $s_o$ ) redukuje se u toku izvodjenja procesa na vrednost  $s_1$ . Zbog ove redukcije smanjuje se i spoljašnji prečnik sa  $D_o$  na  $D_1$  a istosmerno se povećava visina obradka sa  $h_o$  na  $h_1$  (sl.8.22a.).

Glavne deformacije, prema slici 8.22. mogu se definisati kao:

$$\phi_1 = \ln \frac{h_1}{h_o} > 0$$

$$\phi_2 = \ln \frac{d_{s1}}{d_{so}} \approx 0 \quad (8.17.)$$

$$\phi_3 = \ln \frac{s_1}{s_0} < 1$$



$$A = \phi(y^2 - r^2); \quad A + dA = \phi[(y^2 - r^2) + 2ydy]$$

Sl.8.22. Zona deformisanja i naponsko deformacioni odnosi kod rotacionog tiskanja sa redukcijom debljine zida

Deformacija dužine ( $\phi_1$ ) je pozitivna dok je deformacija debljine zida ( $\phi_3$ ) negativna. Kako se aproksimativno može smatrati da je:

$$d_{s0} \approx d_{s1} \approx D_u \approx \text{const}$$

$d_{s0}$ ,  $d_{s1}$  - srednji prečnici priprema tj. obradka

to se dolazi do zaključka da je deformacija srednjeg prečnika ( $\phi_2$ ) približno jednaka nuli. Na taj način, zbog jednakosti:

$$\phi_1 = -(\phi_2 + \phi_3)$$

dobija se:

$$\phi_1 = -\phi_3$$

tj.

$$\ln \frac{h_1}{h_0} = -\ln \frac{s_1}{s_0} \quad (8.18.)$$

Analiza naponskog stanja sprovedeće se pomoću metode preseka. Na sl. 8.22b. prikazana je konfiguracija elemenata procesa: radnog valjka, kalupa i obratka kome se redukuje debljina zida. Uočava se da valjak deluje na materijal sa dve različite površine: nagnutom (A-B) i površinom paralelnom izvodnici radnog komada (B-C). Prvi deo valjka vrši deformisanje a drugi peglanje (glačanje) prethodno deformisane zone.

Materijal je u zoni deformisanja pod dejstvom prostornog naponskog stanja. Aksijalni napon ( $\sigma_z$ ) je pozitivan dok su druga dva ( $\sigma_r$  i  $\sigma_t$ ) negativni. U zoni pegljanja na materijal takodje deluje zatezni aksijalni napon uz istovremeno dejstvo pritisnih radijalnih i tangencijalnih napona. Ove pritisne komponente su, međjutim, u zoni pegljanja neznatne po veličini u odnosu na zateznu komponentu napona pa se dalja analiza odnosi isključivo na zonu deformisanja.

Ako se posmatra izdvojeni element iz zone deformisanja i za njega postavi uslov ravnoteže svih sila u aksijalnom pravcu dobija se inicijalni oblik diferencijalne jednačine ravnoteže:

$$(\sigma_z + d\sigma_z)(A + dA) - \sigma_z \cdot A - \tau_B \cdot r \cdot \phi \cdot q \cdot dz + \phi \cdot q \cdot y \cdot dy \left( \frac{1}{\cos \alpha} + \frac{\mu_2}{\sin \alpha} \right) = 0 \quad (8.19.)$$

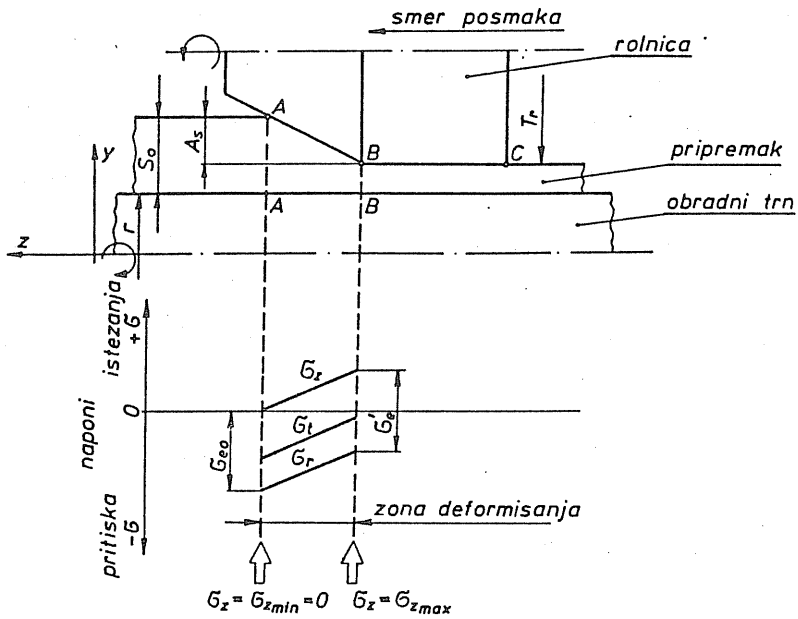
Daljim sredjivanjem dobija se:

$$2\sigma_z \cdot y dy + (y^2 - r^2) d\sigma_z + qy dy \left( \frac{1}{\cos \alpha} + \frac{\mu_2}{\sin \alpha} - \frac{\mu_1 r}{y \tan \alpha} \right) = 0$$

$\mu_1$  - koeficijent trenja izmedju kalupa i unutrašnjeg zida obratka

$\mu_2$  - koeficijent trenja izmedju alata (valjčića) i materijala





Sl.8.23. Naponi u zoni deformisanja kod rotacionog tiskanja sa promenom debljine zida

Uvodjenjem zamena u obliku:

$$b = \frac{1}{\cos\alpha} + \frac{\mu_2}{\sin\alpha} - \frac{\mu_1}{\operatorname{tg}\alpha}$$

$$n = \frac{y}{r} \quad (8.20.)$$

diferencijalna jednačina ravnoteže dobija oblik:

$$2\sigma_z \cdot y dy + (y^2 - r^2) d\sigma_z + bq \cdot y \cdot dy = 0 \quad (8.21.)$$

Zamenom vrednosti "q" iz uslova plastičnosti za ovaj slučaj koji glasi:

$$q = -(\sigma_e + \sigma_z)$$

u jednačinu (8.21.) dobija se:

$$\frac{d\sigma_z}{(b-2)\sigma_z + b \cdot \sigma_e} = \frac{y \, dy}{y^2 - r^2} \quad (8.22.)$$

Integracijom gornje jednačine uz korišćenje graničnih uslova u obliku:

$$\text{za } y = R_0 \quad \sigma_z = \sigma_z \text{ min} = 0 \quad (\text{presek A-A, sl.8.22.})$$

$$\text{za } y = R_1 \quad \sigma_z = \sigma_z \text{ max} \quad (\text{presek B-B, sl.8.22.})$$

kao i nakon potrebnog sredjivanja, dobija se krajnji izraz za veličinu napona u aksijalnom pravcu:

$$\sigma_z = 1,15 \cdot \sigma_{\text{esr}} \cdot \frac{b}{2(b-2)} \left( \frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}} \quad (8.23.)$$

Korišćenjem jednačine plastičnosti u obliku:

$$\sigma_r = -1,15 \cdot \sigma_{\text{esr}} - \sigma_z$$

dobija se naponska komponenta  $\sigma_r$ .

$$\sigma_r = 1,15 \sigma_{\text{esr}} \cdot \frac{1}{2(b-2)} \left\{ b \left| \left( \frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}} - 2 \right| + 4 \right\} \quad (8.24.)$$

Naponska komponenta " $\sigma_t$ " dobija se pod pretpostavkom:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_z - \sigma_r}{2}$$

tj.

$$\sigma_t = 1,15 \cdot \sigma_{\text{esr}} \cdot \frac{1}{2(b-2)} \left\{ b \left| \left( \frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}} - 1 \right| + 2 \right\} \quad (8.25.)$$

U izrazima (8.23.) do (8.25.) vrednost " $\sigma_{\text{esr}}$ " predstavlja srednji efektivni napon koji se dobija kao:

$$\sigma_{\text{esr}} = \frac{\sigma_{\text{eo}} + \sigma_{\text{e1}}}{2}$$

$\sigma_{\text{eo}}$  - efektivni napon za vrednost deformacije u preseku A-A

$\sigma_{\text{e1}}$  - efektivni napon za vrednost deformacije u preseku B-B

Raspored sve tri naponske komponente u zoni deformisanja prikazan je na sl.8.23.

### 8.2.2. Deformaciona sila

Prostorni vektor sile, koja se pojavljuje kod rotacionog tiskanja, moguće je razložiti na tri komponente (sl.8.24.):

- aksijalnu  $F_Z$
- radijalnu  $F_R$
- tangencijalnu  $F_T$

Komponente sila određuju se na osnovu naponskog stanja koje vlada u zoni deformisanja (poglavlje 8.2.1.).

Kao i kod razmatranja naponsko-deformacionog stanja u razmatranje problematike sila koje se pojavljuju u procesu biće koncentrisano na dva vida ove obrade:

- rotaciono tiskanje cilindričnih delova bez promene debljine zida
- istosmerno rotaciono tiskanje sa promenom debljine zida.

#### 8.2.2.1. Određivanje sila kod rotacionog tiskanja cilindričnih delova bez promene debljine zida

Komponente deformacione sile određuju se kao proizvod između odgovarajuće komponente napona i projekcije površine delovanja alata na materijal u posmatranom pravcu.

Aksijalna komponenta ukupne sile iznosi:

$$F_{Z_{\max}} = A_z \cdot \sigma_{z_{\max}}$$

Veličina " $A_z$ " može se definisati kao:

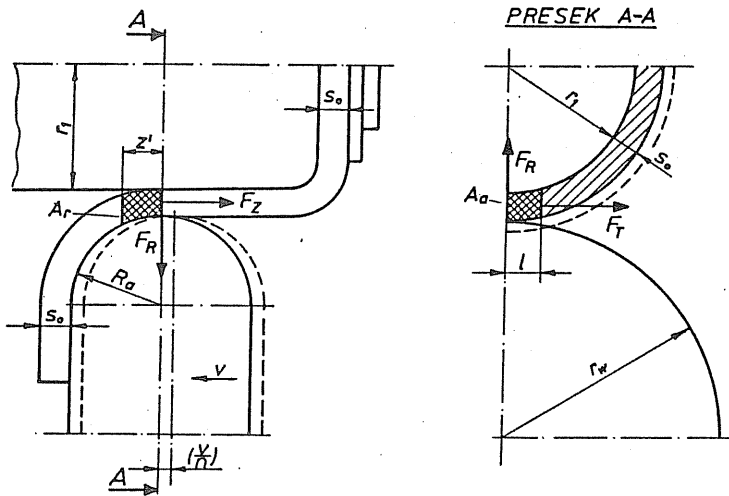
$$A_z = 2 \cdot l \cdot s_o = 2 \cdot s_o \sqrt{dw \left( \frac{V}{n} \right)}$$

Uzimajući u obzir jednačinu (8.14.) dolazi se do konačnog izraza za veličinu sile u aksijalnom pravcu:

$$F_{Z_{\max}} = \sigma_{z_{\max}} \cdot A_z = (1,1 \cdot \sigma_{\text{esr}} \cdot \ln \frac{R_o + \sigma}{r_1 \cdot \text{esr}} \frac{s_o}{2R_a + s_o}) (1 + \mu \alpha) \cdot 2 \cdot \sqrt{dw \left( \frac{V}{n} \right)} \cdot s_o \quad (8.26)$$

Pri tome su:

- $R_o$  (mm) - poluprečnik pripremljena
- $d_w$  (mm) - prečnik alata (valjčića)
- $\frac{V}{n}$  (mm) - pomak po obrtu
- $s_o$  (mm) - debljina materijala



Sl.8.24. Komponentalne sile  $F_z$ ,  $F_R$ ,  $F_T$

Na isti način određuju se i ostale dve komponente sile:

$$F_R = A_R \cdot \sigma_R \quad (8.27.)$$

$$A_R = 2 \left( \frac{V}{n} \right) \sqrt{d_w \left( \frac{V}{n} \right)} \quad (8.28.)$$

Koristeći izraz (8.15.) za radijalni napon dobija se:

$$F_{Rmax} = 1,15 \sigma_{esr} \cdot A_R = 1,15 \cdot \sigma_{esr} \cdot 2 \sqrt{d_w \left( \frac{V}{n} \right)} \cdot \left( \frac{V}{n} \right) \quad (8.29.)$$

Tangencijalna komponenta sile dobija se kao:

$$F_T = A_T \cdot \sigma_T$$

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

Uzimajući u obzir (8.16.) dobija se:

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot 1,15 \cdot \sigma_{\text{esr}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2R_a \left(\frac{V}{n}\right)} \cdot s_0 \quad (8.30.)$$

### 8.2.2.2. Određivanje sila kod istosmernog rotacionog tiskanja sa promenom debljine zida

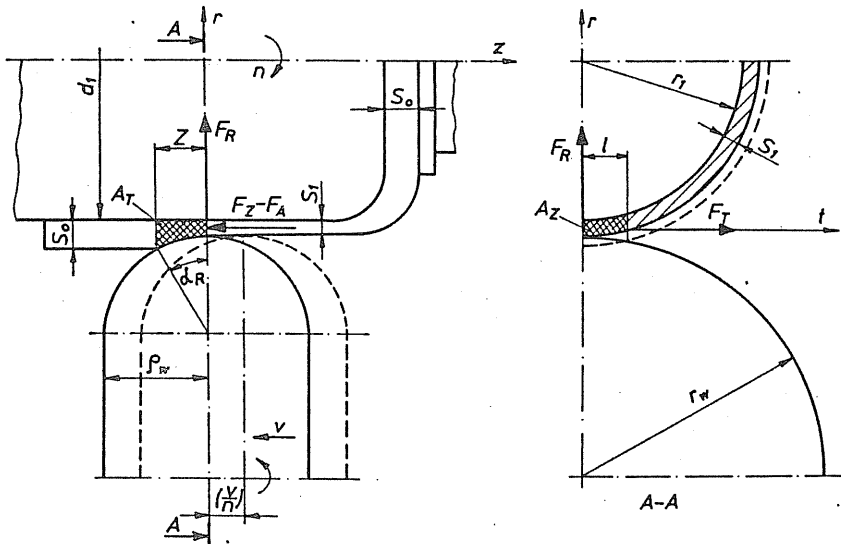
Kao i kod tiskanja bez promene debljine zida i za ovaj vid tiskanja komponentalne sile određuju se kao proizvod komponente napona i projekcije površine kontakta alata i materijala za dati pravac.

Projekcija površine u z-pravcu je:

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

(oznake videti sl.8.25.).

Komponenta sile u aksijalnom pravcu iznosi:



Sl.8.25. Komponente sile

$$F_z = 1,15\sigma_{esr} \cdot \frac{b}{2(b-2)} \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0}\right)^{\frac{b-2}{2}} \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_w}{d_1 + d_w} \left(\frac{v}{n}\right)} \cdot s_1 \quad (8.31.)$$

Ostale dve površine su date izrazima:

$$A_R = \rho_w \cdot \sin \alpha_R \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_w}{d_1 + d_w} \left(\frac{v}{n}\right)} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_R}{2}$$

gde je:

$$\alpha_R = \arccos \frac{\rho_w + s_1}{\rho_w + s_0}$$

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

Uzimajući u obzir jednačine (8.24.) i (8.25.) izrazi za veličinu sila u radijalnom i tangencijalnom pravcu iznose:

$$F_R = 1,15\sigma_{esr} \frac{1}{2(b-2)} \left\{ b \left| \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0}\right)^{\frac{b-2}{b}} - 2 \right| + 4 \right\} \cdot \rho_w \cdot \sin \alpha_R \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_w}{d_1 + d_w} \left(\frac{v}{n}\right)} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_R}{2} \quad (8.32)$$

$$F_T = 1,15\sigma_{esr} \frac{1}{2(b-2)} \left\{ b \left| \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0}\right)^{\frac{b-2}{b}} - 1 \right| + 2 \right\} \cdot \frac{1}{2}(s_0 + s_1) \cdot \rho_w \cdot \sin \alpha_R \quad (8.33.)$$

### 8.3. PROJEKTOVANJE PROCESA ROTACIONOG TISKANJA

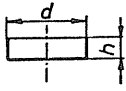
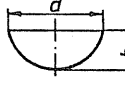
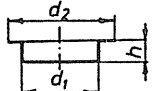
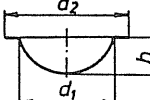
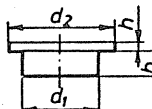
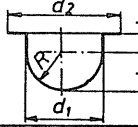
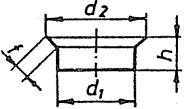
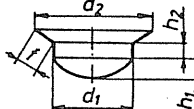
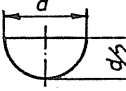
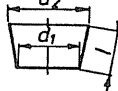
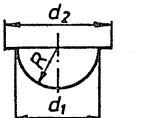
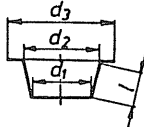
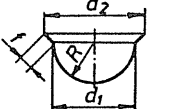
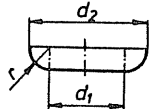
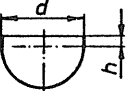
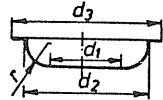
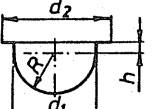
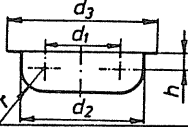
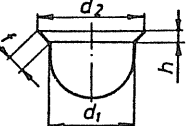
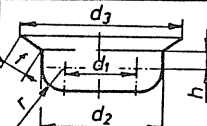
#### 8.3.1. Pripremak

##### 8.3.1.1. Oblik, dimenzije i način dobijanja

Za rotaciono tiskanje bez redukcije debljine zida kao pripremak se najčešće primenjuje ravna rondela iz lima. Prečnik ronđele zavisi od oblika obradka a određuje se iz jednakosti površine priprema i obradka. Postupak određivanja prečnika priprema je potpuno identičan sa onim koji se primenjuje u postupku dubokog izvlačenja bez promene debljine zida. U tabeli T-8.1. dati su karakteristični oblici obradka kao i odgovarajući izrazi za izračunavanje prečnika ronđele. Ravna rondela dobija se iz limene table ili trake operacijom razdvajanja.

Kao pripremak za rotaciono tiskanje sa i bez redukcije debljine zida može se koristiti i oblik dobijen u prethodnoj operaciji dubokog izvlačenja.

T-8.1. Karakteristični oblici obradaka i izrazi za prečnik rondele /17/

Oblik	$\phi$ rondele	Oblik	$\phi$ rondele
	$\sqrt{d^2 + 4dh}$		$\sqrt{d^2 + 4h^2}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4d_1h}$		$\sqrt{d_2^2 + 4h^2}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4(d_1h_1 + d_2h_2)}$		$\sqrt{d_2^2 + 4(h_1^2 + d_1h_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4d_1h + 2f(d_1 + d_2)}$		$\sqrt{d_1^2 + 4[h_1^2 + d_1h_2 + 0,5f(d_1 + d_2)]}$
	1,41d		$\sqrt{d_1^2 + 2l(d_1 + d_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$		$\sqrt{d_1^2 + 2l(d_1 + d_2) + d_3^2 - d_2^2}$
	$14\sqrt{d_1^2 + f(d_1 + d_2)}$		$\sqrt{d_1^2 + 2\pi rd_1 + 8r^2}$
	$14\sqrt{d^2 + 2dh}$		$\sqrt{d_1^2 + 2\pi rd_1 + 8r^2 + d_3^2 - d_2^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4d_1h}$		$\sqrt{d_1^2 + 2\pi rd_1 + 8r^2 + 4d_2h + d_3^2 - d_2^2}$
	$141\sqrt{d_1^2 + 2d_1h + f(d_1 + d_2)}$		$\sqrt{d_1^2 + 2\pi rd_1 + 8r^2 + 4d_2h + 2f(d_1 + d_2)}$

Maksimalni prečnik ronedele limitiran je geometrijom mašine na kojoj se operacija izvodi. U praksi se primenjuju rondele i do prečnika  $D_{max}=7.000$  mm.

Maksimalna debljina lima koji se može obradivati rotacionim tiskanjem različita je za različite materijale. Poznati su slučajevi rotacionog tiskanja lima debljine i do 150 mm. Ipak, to su samo ekstremni slučajevi, dok se najčešće tiskaju limovi debljina datih u tabeli T-8.2.

T-8.2. Debljina limova za tiskanje

Materijal	Maksimalna debljina
Aluminijum	do 10 mm
Cink i bakar	do 8 mm
Čelični lim	do 6 mm
Lim od nerdjajućeg čelika	do 4 mm

Pripremak za rotaciono tiskanje sa redukcijom debljine zida takodje je najčešće ravna limena rondela.

Pored toga, za ovu vrstu tiskanja pripremak može biti dobijen i hladnim istiskivanjem ili kovanjem. U takvim slučajevima, pre same obrade tiskanjem, vrši se obrada rezanjem pri čemu se unutrašnji prečnik polufabrikata dovodi na dimenziju kalupa na koji se postavlja pre operacije tiskanja.

U nekim slučajevima polufabrikat se može dobiti i struganjem ili bušenjem iz punog materijala. Zbog velikog otpadka materijala ovaj vid dobijanja polufabrikata se koristi samo u pojedinačnoj ili maloserijskoj proizvodnji.

Ako se kao polufabrikat koristi cev onda se kod istosmernog tiskanja, zbog načina izvodjenja samog procesa tj. zbog potrebe oslanjanja pripremkama na kalup, mora na cev zavariti puno ili prstenasto dno.

Kod suprotno smernog tiskanja sa promenom debljine zida kao pripremak se najčešće koristi cev. Kako se kod ovog vida obrade oslanjanje materijala ne vrši preko kalupa nego preko graničnika na glavni mašine to na cev nije potrebno zavariti dno.

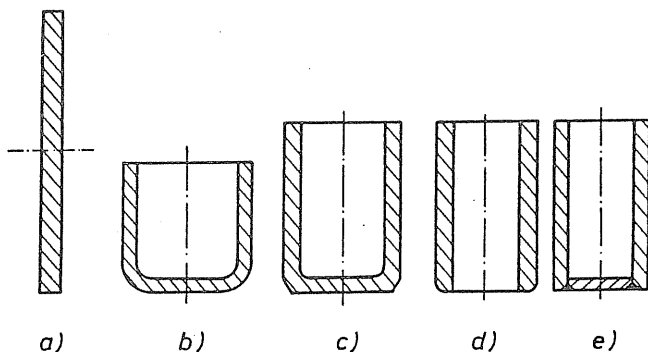
Na sl.8.26. prikazani su neki oblici pripremak za rotaciono tiskanje sa promenom debljine zida.

a) rondela (lim)

b) čanče dobijeno dubokim izvlačenjem ili rotacionim tiskanjem bez promene debljine zida



- c) pripremak dobijen kovanjem ili istiskivanjem sa naknadnom obradom struganjem. Ovakav oblik pripreмка moguće je dobiti i bušenjem ili struganjem iz punog materijala
- d) cev bez dna za suprotnosmerno rotaciono tiskanje
- e) cev sa zavarenim dnom koje služi za oslanjanje na kalup kod istosmernog tiskanja.



Sl.8.26. Oblici pripreмка za rotaciono tiskanje sa promenom debljine zida

#### 8.3.1.2. Materijali

Zahvaljujući povoljnom naponskom stanju koje vlada u zoni deformisanja sa stanovišta obradivosti materijala, tehnologiju rotacionog tiskanja moguće je primeniti na širok dijapazon metalnih materijala. Uslovno je moguće sve vrste metalnih materijala koje je moguće obradivati rotacionim tiskanjem podeliti u nekoliko grupa:

- laki metali
- čelici sa negarantovanim sastavom
- ugljenični čelici
- legirani čelici
- plemeniti metali

Od lakih metala najviše se primenjuju Al, Cu kao i njihove legure. Materijali iz ove grupe veoma su pogodni za obradu tiskanjem.

Veoma širok spektar proizvoda izradjuje se iz čelika sa negarantovanim sastavom (Č.0147, Č.0148, Č.0360, Č.0645).

Da bi se ugljenični čelici iz grupe za poboljšanje (Č.1330, Č.1530) mogli uspešno obradivati rotacionim tiskanjem, neophodno je da se pre obrade izvrši njihova normalizacija.

Iz široke grupe legiranih čelika za ovu vrstu obrade posebno su pogodni čelici iz grupe Cr, Mo za poboljšanje (Č.4730 do Č.4739) i čelici iz grupe Cr, Ni, Mo (Č.5430, Č.5432). Ovi materijali koriste se za izradu odgovarajućih delova u mašinskim sklopovima, naoružanju i sl.

Za delove letilica (aviona, raketa i sl.) kao i za veoma odgovorne delove u procesnoj industriji koriste se titanove, volframove i cirkonijumove legure. Zbog manje deformabilnosti ovih materijala, njihova obrada se vrši na povišenoj temperaturi.

Plemeniti metali (srebro, zlato, platina) koriste se u izradi nakita, delova nameštaja i za izradu medicinskih instrumenata.

### 8.3.2. Obradak

#### 8.3.2.1. Oblik, dimenzije i oblasti primene

Rotacionim tiskanjem moguće je dobiti obradke veoma različitih geometrijskih oblika i veličine. Radi se o rotaciono simetričnim šupljim obradcima kod kojih izvodnice mogu biti prave ili krive linije, sa konstantnom ili promenljivom debljinom zida. Maksimalne gabaritne dimenzije obradka (prečnik, dužina) kreću se oko  $D_{max}=6$  mm, dužine  $L=2$  m, i one su uslovljene raspoloživim prostorom mašine a ne limitirajućim tehnološkim parametrima procesa tiskanja.

Obzirom na prirodu ove obrade - parcijalni zahvat - ova tehnologija nije pogodna za izradu sitnih delova, tj. delove čiji je prečnik manji od 20 mm i dužina 30 mm. Ovo međjutim ne znači da se i takvi delovi ne mogu uopšte izradivati rotacionim tiskanjem.

Sprektar proizvoda koji se dobijaju rotacionim tiskanjem je veoma širok i raznovrstan. Ova tehnologija veoma je zastupljena u izradi delova iz domena "bele tehnike" (sve vrste posudja, delovi kućanskih aparata), zatim u izradi lampi, reflektora, metalnih buradi i raznih vrsta rezervoara, boca pod pritiskom, automobilske industriji (cilindri amortizera, kaišnici, kočnice, radkapne, felne za točkove), mašinogradnji (pneumatski i hidraulični cilindri). Poseban segment primene ove tehnologije predstavlja avio i vojna industrija (delovi letilica, aviona, raketa, delovi za atomske reaktore, precizne cevi, reflektori radara,

delovi municije). Ovde se pretežno radi o delovima velikih gabarita i iz visokokvalitetnih materijala. Kod izrade takvih delova rotaciono tiskanje najčešće nema alternative.

#### 8.3.2.2. Tačnost i kvalitet obrade

Na tačnost obradka utiče čitav niz faktora od kojih su najvažniji: vrsta materijala, apsolutne dimenzije obradka, oblik alata, vrsta tiskanja (sa ili bez redukcije debljine zida), režim obrade, krutost mašine i dr.

Kod tiskanja bez promene debljine zida određena netačnost dimenzija obradka javlja se pre svega kao rezultat elastičnog vraćanja materijala. Ovo vraćanje veće je kod materijala sa višim mehaničkim osobinama (legirani čelici) nego kod mekših materijala (npr. obojeni metali). Drugi uzrok odstupanja dimenzija obradka od zadatih može biti elastično deformisanje kalupa na koji se postavlja radni predmet, posebno u onim slučajevima gde se u procesu javljaju velike radijalne sile.

Orijntacione vrednosti veličine tolerancije prečnika obradka koje je moguće postići kod rotacionog tiskanja bez redukcije debljine zida su:

Prečnik obradka	Tolerancija
do 500 mm	$\pm 0,2$ mm
od 500 mm	$\pm 0,4$ mm

Kod rotacionog tiskanja sa redukcijom debljine zida, pored tolerancije prečnika obradka, od izuzetnog je značaja i tolerancija debljine zida obzirom da se tako dobijeni obradci ne obradjuju naknadnom obradom skidanjem strugotine. U tabeli T-8.3. date su orijntacione vrednosti odstupanja dimenzija obradka od zadatih.

Prema kvalitetu obradjene površine rotaciono tiskanje spada u red završnih obrada.

Kvalitet površina obradka zavisi od kvaliteta površine pripremljena kao i od veličine pomaka i prečnika alata (valjčića) kojim se vrši tiskanje. Za postizanje visokog kvaliteta površine potrebno je tiskanje izvoditi sa malim pomakom uz korišćenje valjčića (alata) što većeg prečnika.

Veličina hrapavosti koja se može postići ovom obradom iznosi  $R_a=0,4-1,6 \mu\text{m}$ .

T-8.3. Odstupanje dimenzija obradka kod rotacionog tiskanja sa promenom debljine zida u zavisnosti od dimenzija (mm)

Unutrašnji prečnik (mm)	do 150			do 250			do 400			do 600		
	1.0	do 2.0	>2.0	<1.0	<2.0	>2.0	<1.0	<2.0	>2.0	<1.0	<2.0	>2.0
Unutrašnji prečnik ±	0,10	0,10	0,15	0,10	0,15	0,15	0,20	0,25	0,25	0,25	0,30	0,35
ovalnost	0,05	0,05	0,10	0,10	0,12	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50
Debljine zida ±	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04

### 8.3.2.3. Mehaničke osobine

Za vreme obrade rotacionim tiskanjem menjaju se i mehaničke osobine radnog komada. Dolazi do usmeravanja toka vlakna materijala kao i do povećanja tvrdoće i čvrstoće materijala uz istovremeno opadanje duktilnosti. Ovo se posebno odnosi na rotaciono tiskanje sa promenom debljine zida.

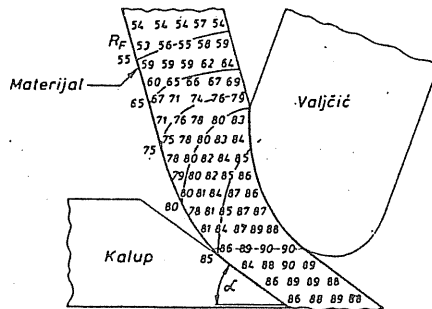
U tabeli T-8.4. dati su podaci o mehaničkim osobinama: granici tečenja, zateznoj čvrstoći kao i izduženju  $A_5$  (%) pre i posle izvođenja operacije rotacionog tiskanja.

T-8.4. Mehaničke osobine lima pre i posle rotacionog tiskanja

Debljina zida mm	Ukupna redukcija (%)	Zatezna čvrstoća (MPa)	Granica tečenja (MPa)	Izduženje $A_5$ (%)
12,70	0	386	229	34
10,40	17,5	541	478	13
8,33	35	572	525	12
4,9	61	592	541	11
4,39	66	600	554	11

Uočava se značajan porast granice tečenja i zatezne čvrstoće kao i opadanje izduženja sa redukcijom debljine zida sa 12,70 mm na 4,39 mm.

Na sl.8.27. prikazana je promena tvrdoće (u Rockwell-F jedinicama) u materijalu za vreme rotacionog tiskanja koničnih delova sa redukcijom debljine zida. Uočava se sa slike da nedeformisani delovi materijala imaju tvrdoću oko  $R_F=55$  dok je tvrdoća dela materijala koji je deformisan  $R_F=86-88$ . Pri tome se takodje uočava da je sa strane valjčica povećanje tvrdoće nešto veće nego što je to sa strane kalupa.



Sl.8.27. Promena tvrdoće u materijalu za vreme rotacionog tiskanja sa promenom debljine zida /10/

### 8.3.3. Brzina kretanja

Kao što se iz opisa procesa vidi (poglavlje 8.1.) kod rotacionog tiskanja se u toku obrade kreće i radni komad i alat. Radni komad vrši glavno obrtno kretanje oko glavne ose mašine a alat vrši pomoćno kretanje (pomak) oblikujući izvodnicu radnog komada.

Vrednost obimne brzine radnog komada zavisi od vrste materijala i geometrije obradka. Preporučene vrednosti obimne brzine kreću se u granicama od 0,2 m/sec - 5 m/sec.

Manje vrednosti odnose se na materijale veće čvrstoće, dok se za tiskanje mekših materijala (Al, Cu...) mogu koristiti veće vrednosti obimne brzine u okviru navedenog dijapazona.

Za obradu čeličnih materijala obimna brzina ne sme prelaziti 2 m/sec.

Broj obrtaja glavnog vretena određuje se prema:

$$n = \frac{60.000 \cdot v}{d} \quad \text{o/min}$$

$v$  (m/sec) - obimna brzina

$d$  (mm) - prečnik obradka (ili kalupa)

Brzina pomoćnog kretanja (pomaka) zavisa je, pre svega, od vrste materijala i geometrijskog oblika radnog predmeta, kao i od traženog kvaliteta površine obradka (tj. veličine hrapavosti).

Pomak se može izraziti na dva načina i to kao:

- referentni pomak  $s$  (mm/o)

- minutna brzina pomaka  $s_v$  (mm/min)

Veza između ova dva načina izražavanja pomaka je:

$$s = \frac{s_v}{n}$$

Preporučene vrednosti referentnog pomaka su:

$$s = 0,2 - 5 \quad (\text{mm/o})$$

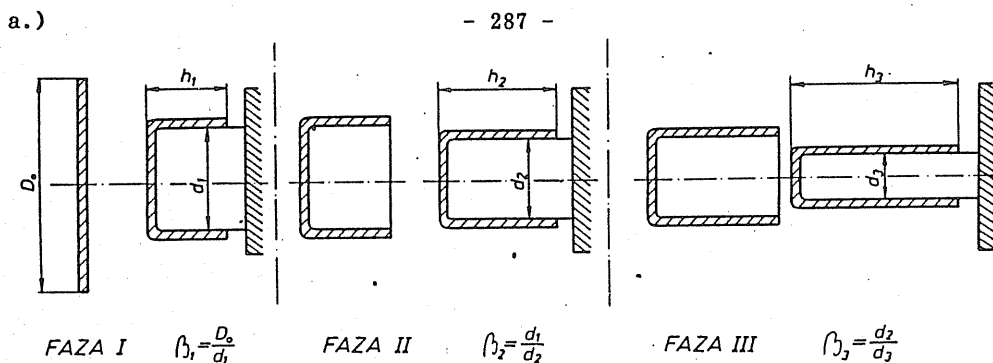
Za postizanje višeg kvaliteta obradka potrebno je koristiti niže vrednosti brzine pomaka.

Kod rotacionog tiskanja bez redukcije debljine zida brzina pomaka ima uticaj i na tačnost unutrašnjeg prečnika obradka, koji je jednak spoljnjem prečniku kalupa. Ako se koriste niže vrednosti brzine pomaka, može doći zbog elastičnog deformisanja do odstupanja unutrašnjeg prečnika obradka od prečnika kalupa.

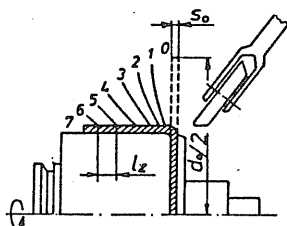
#### 8.3.4. Broj faza (prolaza)

U nekim slučajevima rotacionog tiskanja obradak nije moguće dobiti u samo jednom prolazu (fazi) obrade. Razlog za to je ograničenost resursa deformabilnosti materijala u datom obradnom sistemu. Zbog toga se krajnji oblik radnog predmeta u takvim slučajevima dobija u nekoliko faza koje slede sukcesivno jedna iza druge.

Kod rotacionog tiskanja bez redukcije debljine zida postoje dve mogućnosti izvođenja višefaznog procesa. Obe mogućnosti ilustrovane su na sl.8.28. koja pokazuje dobijanje obradka dimenzija  $d_3 x h_3$  iz priprema prečnika  $D_0$ .



b.)



Sl.8.28. Dve varijante višefaznog rotacionog tiskanja

U prvoj varijanti radni komad se deformiše na tri različita kalupa pri čemu se na svakom odvija smanjenje prečnika:  $D_0 \rightarrow d_1$ ,  $d_1 \rightarrow d_2$  i  $d_2 \rightarrow d_3$ . Podela na faze vrši se prema dozvoljenoj redukciji prečnika:

$$\beta_i = \frac{d_i}{d_{i+1}}$$

u jednoj fazi. Vrednosti ove granično dozvoljene redukcije zavise od vrste materijala. Za neke od karakterističnih materijala date su u tabeli T-8.5. vrednosti "β" za prvu fazu i sledeće faze.

Takodje je u tabeli T-8.5. navedeno da li i kada je (nakon koje vrednosti ukupne redukcije prečnika) neophodno izvršiti međujužarene obradke.

Kao što se uočava, ovakav način višefaznog tiskanja veoma je sličan sa višefaznim dubokim izvlačenjem.

Druga mogućnost izvodjenja višefaznog rotacionog tiskanja bez promene debljine zida pokazana je na sl.8.28b. Pripremak se nakon

T-8.5. Stepeni redukcija u jednoj fazi

Materijal	Dozvoljen stepen redukcije u jednoj fazi		Potrebno medjužarenje posle ukupnog stepena redukcije $\beta_{uk} = d_o/d_i$
	1. Faza $\beta = d_o/d_i$	2. ostale faze $\beta = d_i/d_{i+1}$	
Al 99,5	1,55	1,33	nije potrebno
Mesing i čelični lim za duboko izvlačenje	1,55	1,33	2
Nerdjajući čelik	1,27	1,10	<1,27

stezanja postepeno, u fazama, dovodi na oblik obradka. Putanje vrha alata u svakoj fazi prikazane su krivim linijama (1-7).

Broj faza kod ove varijante višefaznog tiskanja moguće je odrediti na više načina. Jedan od najviše primenjivanih u praksi je taj da se za svaku fazu odredjuje dužina aksijalnog pomaka " $l_z$ " prema:

$$l_z = 2 \cdot R_r \cdot K_t \cdot K_\theta \quad (8.34.)$$

$R_r$  - radijus alata (valjčića)

$K_t$  - koeficijent zavistan od debljine materijala

$K_\theta$  - koeficijent zavistan od prečnika radnog komada u posmatranoj fazi

Broj faza odredjuje se kao:

$$i = \frac{h_3}{l_{z_{max}}} \quad (8.35.)$$

$h_3$  - ukupna visina obratka.

Vrednosti koeficijenta  $K_t$  i  $K_\theta$  mogu se približno izračunati prema:

$$K_t = 0,3 + 0,23 \cdot s_o$$

$$K_\theta = 0,36 + 0,008 \cdot d_i$$

$s_o$  - debljina materijala

$d_i$  - prečnik radnog komada u pojedinoj fazi.



Kod rotacionog tiskanja sa promenom debljine zida broj faza određuje se na bazi ukupne redukcije debljine zida koju je potrebno izvršiti.

Ukupna redukcija debljine zida iznosi:

$$\epsilon_{uk} = \frac{s_o - s_n}{s_o} \quad (8.36.)$$

$s_o$  - početna debljina materijala

$s_n$  - krajnja debljina materijala

Ukupna redukcija ostvaruje se najčešće u nekoliko prolaza (faza). Za većinu čeličnih materijala redukcija u prvoj fazi ne bi trebala da predje 20% ( $\epsilon_1=0,2$ ), dok za mekše materijale kao što su aluminijum, bakar i sl. može iznositi do 30%.

U drugom i sledećim prolazima ( $\epsilon_i$ ) moguće su veće vrednosti redukcije debljine zida nego u prvom prolazu. Uobičajeno je da je za čelične materijale  $\epsilon_i > 30\%$  a za mekše materijale  $\epsilon_i > 40\%$ .

Podaci za jedan konkretan primer rotacionog tiskanja čeličnog materijala sa redukcijom debljine zida prikazani su u T-8.6. Primer se odnosi na redukciju zida cevastog priprema kod koga se početna debljina zida ( $s_o=19$  mm) smanjuje u 5 prilaza na krajnju debljinu ( $s_1=1,7$  mm). Unutrašnji prečnik priprema (cevi) je  $D_o=490$  mm. U tabeli su date konkretne vrednosti debljine zida kao i iznosi redukcije u svakom prolazu.

T-8.6. Debljine lima po prolazima

		$s_i - s_{i+1}$	$\epsilon_i$
Prvi prolaz	$(s_o - s_1)$ (mm)	19-15,6	17%
Drugi prolaz	$(s_1 - s_2)$ (mm)	15,6-10,6	32%
Treći prolaz	$(s_2 - s_3)$ (mm)	10,6-5,6	47%
Četvrti prolaz	$(s_3 - s_4)$ (mm)	5,6-3,4	39%
Peti prolaz	$(s_4 - s_5)$ (mm)	3,4-1,7	50%

Pre konačnog definisanja tehnološkog procesa broj faza, određen na gore prikazan način, potrebno je eksperimentalno verifikovati u konkretnim uslovima.

### 8.3.5. Temperatura obrade i podmazivanje

Tiskanje teško obradivih materijala i debelih limova uspješnije se izvodi na povišenim temperaturama.

Zagrevanje priprema se vrši ili u pećima ili samo lokalno, ako se obrada vrši samo na jednom delu radnog komada. Ilustracija za takvu vrstu zagrevanja je sužavanje cevi (sl.8.8.), gde se gorionicima zagreva samo zona priprema koja će neposredno nakon zagrevanja biti deformisana.

Toplo rotaciono tiskanje primenjuje se najčešće kod izrade dna rezervoara i sličnih proizvoda od debelih, teško obradivih materijala. U tom slučaju vrši se kompletno zagrevanje priprema u peći. Preporučene temperature na koje se zagrevaju pojedini materijali dati su u tabeli T-8.7.

T-8.7. Temperature toplog rotacionog tiskanja

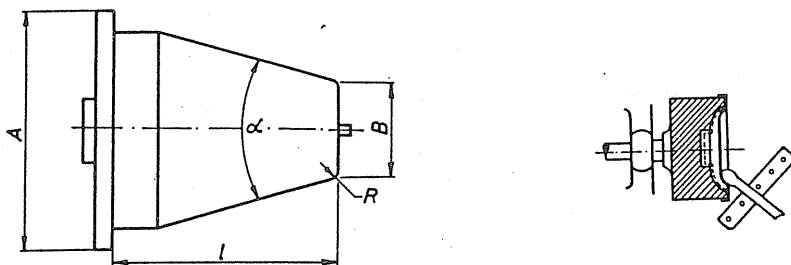
Materijal	Temperatura toplog rotacionog tiskanja °C
Čelik	900-1000
Nerdjajući čelik	850-1000
Nikal	870-1260
Bakar	600-800
Al i njegove legure	350-450

Da bi se smanjilo trenje između alata i materijala u toku procesa vrši se podmazivanje. Kao mazivna sredstva služi mašinsko ulje ili uljna emulzija. U novije vreme koristi se i postupak fosfatiranja priprema koji se zatim u toku obrade podmazuje sa  $\text{MoS}_2$  ili odgovarajućim vrstama sapuna.

### 8.3.6. Alati i mašine

Osnovni elementi alata za rotaciono tiskanje su; kalup, valjčić i pritiskivač (sl.8.2.).

Kalup određuje oblik i dimenzije radnog komada. On se nalazi na glavnoj osi mašine i vrši glavno obrtno kretanje. Već u zavisnosti od komada kojeg je potrebno izraditi, oblik i dimenzije kalupa mogu biti vrlo različiti. Na sl.8.29. prikazani su jedan spoljašnji i jedan unutrašnji kalup.



Sl.8.29. Spoljašnji i unutrašnji kalup

Kalup može u svom središnjem delu imati otvor u kome je smešten element za izbacivanje (skidanje) radnog komada sa kalupa (sl. 8.12b - element f).

Zahtev koji se postavlja kada je kalup u pitanju jeste postojanost oblika i dimenzija, otpornost na habanje, centričnost kao i što manje elastično deformisanje.

Materijal od koga se izradjuje kalup zavisi od materijala koji se obradjuje tiskanjem kao i od veličine serije.

Kod uhođavanja proizvodnje, probne serije i slično mogu se koristiti i kalupi od drveta.

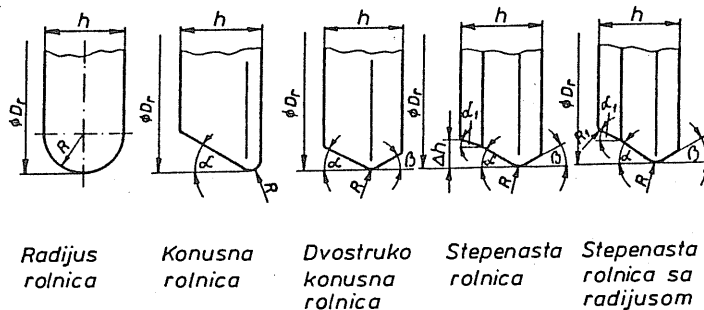
Sivo liveno gvoždje se upotrebljava za izradu kalupa kada se tiskaju mekani materijali u malim serijama (10-200 komada).

Za veće serije i odgovorne delove kalupi se izradjuju iz alatnih čelika (28CrMoV11.28, 16MnCr5) koji se termičkom obradom dovode na tvrdoću od oko 50 HRC.

Valjak za tiskanje predstavlja aktivni deo alata. Njegovim dejstvom na materijal vrši se deformisanje. Pored translatornog kretanja, pravolinijskog ili krivolinijskog, valjak se okreće i oko svoje ose.

Osnovni zahtevi od valjaka za rotaciono tiskanje su visok nivo tačnosti i kvalitet radne površine, visoka tvrdoća, što manje elastično deformisanje kao i visoka otpornost na habanje.

Geometrijski oblici i dimenzije valjaka odredjeni su empirijski i to u zavisnosti od radnog zadatka. Radni deo valjka je najčešće kružnog ili konusnog oblika. Na sl.8.30. prikazan je jedan broj različitih oblika valjaka za rotaciono tiskanje.



Sl.8.30. Različiti oblici valjaka za rotaciono tiskanje

T-8.8. Preporučene vrednosti osnovnih geometrijskih parametara valjka

karakteris. materijal	$\alpha$	$\beta$	$\alpha_1$	$\Delta h$	R	$\phi D^*$	$h^*$
čelik	0-40	>3	3-10	< Si	1-20	0,5-4 prečni- ka izradka	17-120
aluminijum i legure	10-15	>3	3	< Si	1-10		
mesing	25-30	>3	3	< Si	1-2		

Osnovni parametri valjka su spoljni prečnik i radijus valjka. Ovi parametri direktno utiču na tehnološke parametre obrade rotacionim tiskanjem kao i na kvalitet obradjene površine.

Preporučene vrednosti osnovnih geometrijskih parametara valjka za rotaciono tiskanje date su u tabeli T-8.8.

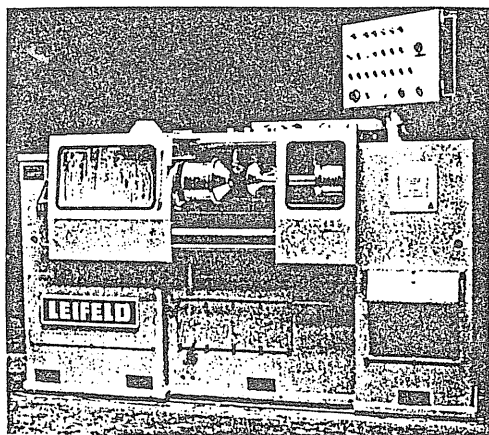
Materijali od kojih se izradjuju valjci su legirani alatni čelici (najčešće iz grupe čelika sa oznakom OCR tj. Č.4750, Č.4660, Č.4850) koji se termičkom obradom dovode na tvrdoću od 63-65 HRC. Spoljna površina valjka obradjuje se brušenjem i poliranjem.

Pritiskivač ima zadatak da na početku i u toku odvijanja procesa pridržava radni komad u odnosu na kalup. On se nalazi u osi glavnog kretanja a sila pridržavanja ostvaruje se hidraulično.

Obrada rotacionim tiskanjem obavlja se na specijalnim mašinama koje su po svojoj konstrukciji i kinematici pojedinih svojih elemenata slične strugovima.

Na stabilnom postolju mašine postavljen je nosač glavnog vretena na kome se nalazi kalup kao i pridrživač na svom nosaču (sl.8.31.).

Poprečno u odnosu na glavnu osu mašine postavljen je jedan ili više nosača valjka kojim se vrši deformisanje radnog komada (support).



Sl.8.31. Mašina za rotaciono tiskanje

Glavno obrtno kretanje glavnog vretena ostvaruje se preko elektromotora i prenosnika.

Pomoćno, translatorno radijalno i aksijalno kretanje valjčića u ranijim fazama primene ove tehnologije vršio je sam radnik ručno. Iskustvo i znanje radnika bili su od odlučujućeg značaja na kvalitet obradka. Takav način ostvarivanja pomoćnog kretanja još uvek se primenjuje za izradu sitnijih delova u maloserijskoj proizvodnji (npr. izrada nakita).

Sledeća faza u razvoju ovih mašina bila je uvođenje hidrauličnog šablonskog vodjenja valjčića. Putanja valjčića u toku procesa unapred je determinisana oblikom šablona. Za promenu oblika putanje neophodna je zamena šablona.

Kvalitativan skok u daljem razvoju ovih mašina predstavljalo je uvođenje numeričkog upravljanja, koje omogućava programiranje i ostvarivanje praktično neograničenog broja raznih oblika putanja valjčića.

Na taj način omogućena je izrada i najkomplicovanijih konfiguracija uz maksimalno iskorišćenje deformabilnosti materijala.

Jedan od najčešćih načina generisanja programa za numeričko upravljanje kretanjem alata je tzv. Teach-in-Play-back postupak.

Postupak se sastoji u tome da iskusan radnik preko odgovarajućih upravljačkih elemenata ručno upravlja izradom prvog komada u seriji. Svi elementi takvog, ručno upravljaniog procesa memorišu se. Nakon inspekcije ovako izradjenog radnog komada i ustanovljavanja da na njemu nema grešaka (pukotina, odstupanja oblika i dimenzija) memorisani program služi za automatsku izradu cele serije.

Postoje i drugi načini za generisanje programa za numeričko upravljanje mašina za rotaciono tiskanje.

Pored alata za rotaciono tiskanje ove mašine često su opremljene i sa alatima za razne pomoćne operacije kao što su odsecanje, razne vrste savijanja ivica i dr.

Mašine su po pravilu horizontalne izvedbe, a samo u izuzetnim slučajevima (izrada veoma dugačkih delova) mogu se izradjivati u vertikalnoj izvedbi.

## 9. PROFILNO SAVIJANJE POMOĆU VALJAKA

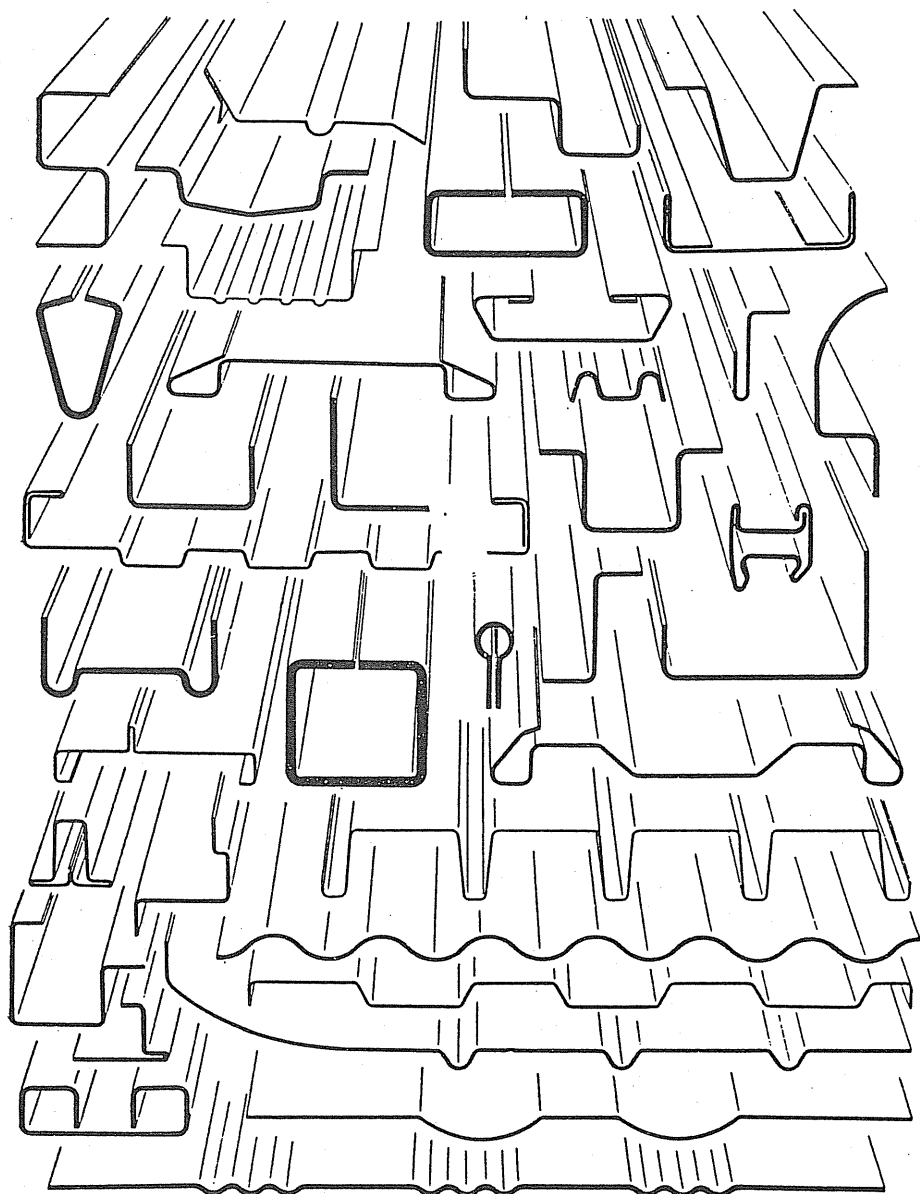
### 9.1. UVOD

Oblikovanje profila pomoću valjaka je jedna od metoda izrade profila od lima hladnom deformacijom. To je postupak višefaznog kontinualnog oblikovanja profila različitog oblika i dimenzija od različitih materijala (čelični lim, lim od obojenih metala i njihovih legura, pocinkovani lim, obojeni lim, lim presvučen plastičnim prevlakama, perforirani lim itd.). Postupak profilisanja pomoću valjaka je veoma produktivan sa brzinom kretanja obratka i do 180 m/min. U obradne sisteme za profilisanje pomoću valjaka lako se uključuju i drugi agregati koji omogućuju izvođenje dodatnih operacija kao što je perforiranje lima, spajanje zavaranjem i savijanjem i dr.

Hladno oblikovani profili primenjuju se u zamenu sa toplovaljanim profilima i po kvalitetu imaju čitav niz prednosti. Hladnooblikovani profili omogućuju najracionalnije iskorišćenje materijala s obzirom na nosivost. Primena hladno oblikovanih profila uslovljena je razvojem novih konstrukcija u oblasti automobilske industrije, vazduhoplovne tehnike, železnice, poljoprivrednih mašina, aparata za domaćinstvo, elektroindustrije i drugih oblasti tehnike.

Oblik poprečnog preseka profila koji se izradjuje savijanjem pomoću valjka može biti veoma različit (sl.9.1.). U principu treba razlikovati dve osnovne grupe ovih elemenata: a) pojedinačne profile čija je širina znatno manja u odnosu na dužinu profila i b) profilisane (talasaste) limove veće širine. Osim toga, pojedinačni profili mogu biti: otvoreni i zatvoreni, ravnokraki i raznokraki, kutijasti, koritasti, ugaoni, profili L, U C, Z oblika itd. Talasasti limovi se izradjuju sa naizmeničnim i pojedinačnim talasima, a osim toga oni mogu imati uzdužna i poprečna ojačanja (orebrenja).

Materijal za izradu profila je lim odgovarajuće širine. Profili se izradjuju od različitih materijala: niskouglednog čelika, legiranog če-



Sl.9.1. Vrste hladnooblikovanih profila



lika (hrom-nikl nerđajući i vatrootporni čelik), obojenih metala - aluminijum i njegove legure, bakar i njegove legure, mesing itd.

Izrada profila od lima može se izvesti primenom različitih metoda:

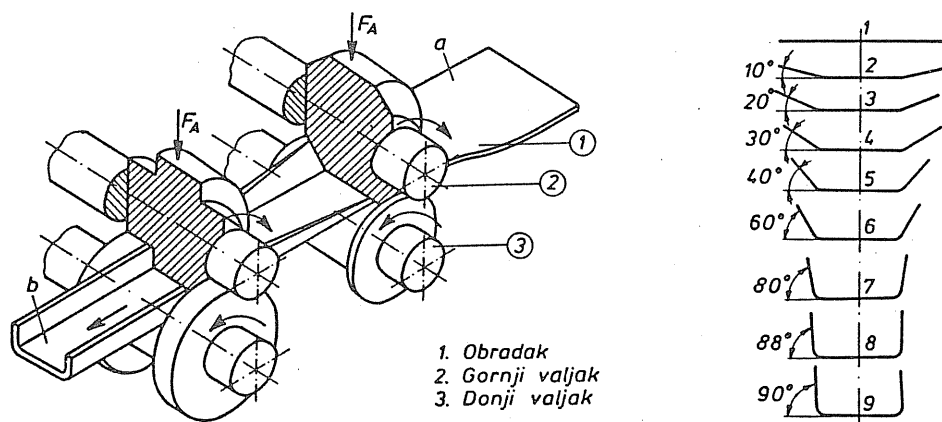
1. Savijanjem na abkant presi;
2. Savijanjem na univerzalnim presama sa specijalnim alatom;
3. Savijanjem na univerzalnim mašinama za savijanje i
4. Savijanjem na mašinama sa valjcima.

Osnovna karakteristika profilisanja pomoću valjaka je postupnost formiranja zadatog oblika (višefazno oblikovanje) koje se postiže prolaskom obratka kroz veći broj jedinica za savijanje (sl.9.2.). Karakteristike ovako dobijenih profila i procesa profilisanja su:

1. Širok asortiman poprečnih preseka profila sa maksimalnom nosivošću i racionalnim iskorišćenjem materijala.
2. Mogućnost stvaranja lakih konstrukcija.
3. Debljina lima je prilično ujednačena po poprečnom preseku obratka.
4. Dodatna obrada hladnooblikovanog profila je minimalna i stepen iskorišćenja materijala se kreće do 99,9%.
5. Hladno oblikovani profili su ojačani.
6. Tačnost dimenzija poprečnog preseka profila je viša u odnosu na profile dobijene drugim postupcima.
7. Hladnooblikovani profili imaju visok kvalitet površine što omogućuje kvalitetno naonošenje dekorativnih prevlaka i boje. Osim toga, visok kvalitet površine omogućuje povećana antikorozivna svojstva profila.
8. Tehnološki postupak profilisanja lima pomoću valjaka može se komponovati sa drugim postupcima u istoj proizvodnoj liniji, kao što je na primer, perforiranje lima, uzdužno zavarivanje, lemljenje, plakiranje, odsecanje i dr.
9. Mašine za hladno oblikovanje profila sa valjcima su vrlo produktivne i obično potpuno automatizovane. Na jednoj istoj mašini može se oblikovati širok asortiman profila s tim što treba obezbediti odgovarajuće garniture alata tj. valjaka. Deo mašine koji obezbeđuje profilisanje sastoji se iz većeg broja istovetnih jedinica.

10. Alati za profilisanje veoma su trajni a njihova izrada nije komplikovana.

11. Iako se profili od lima izradjuju na mašinama sa valjcima ovaj proces nema nikakve suštinske sličnosti sa procesom valjanja. Naime, kod valjanja oblik i dimenzije profila se ostvaruju deformisanjem (promenom dimenzija) poprečnog preseka obratka a kod profilnog savijanja oblik profila se dobija savijanjem lima.



Sl.9.2. Profilno savijanje pomoću valjaka  
a) šema procesa; b) faze oblikovanja

Profilno savijanje pomoću valjaka suštinski se razlikuje u odnosu na postupak izrade profila pomoću specijalnog alata na univerzalnoj presi i u odnosu na postupak profilisanja na abkant presi. Pri profilisanju sa specijalnim alatom na presi alat izvodi pravolinijsko kretanje, zona deformisanja obuhvata celu dužinu obratka a deformaciona sila se menja od nule do maksimalne vrednosti. Pri tome se obradak ne kreće u aksijalnom pravcu a njegova dužina je ograničena dužinom alata. Kod profilisanja sa valjcima obradak se kreće aksijalno, zona deformacije je mala, deformaciona sila je takodje manja a dužina obratka je neograničena.

Uprkos navedenim prednostima profilisanja pomoću valjaka treba naglasiti da je primena ovog postupka obrade moguća samo u slučaju velikoserijske i masovne proizvodnje.

## 9.2. ZONA DEFORMACIJE, ANALIZA OPTEREĆENJA I OBRTNIH MOMENATA VALJKA

### 9.2.1. Definisanje zone deformacije

Poznavanje distribucije opterećenja na kontaktnim površinama valjaka značajno je za određivanje ukupnog opterećenja i obrtnih momenata valjaka i vratila na osnovu kojih se određuje i ukupna snaga pogonskog agregata.

U nastavku je prikazana metodologija određivanja opterećenja valjaka prema Triševskom /28/ za pojedine elemente karakterističnih profila:

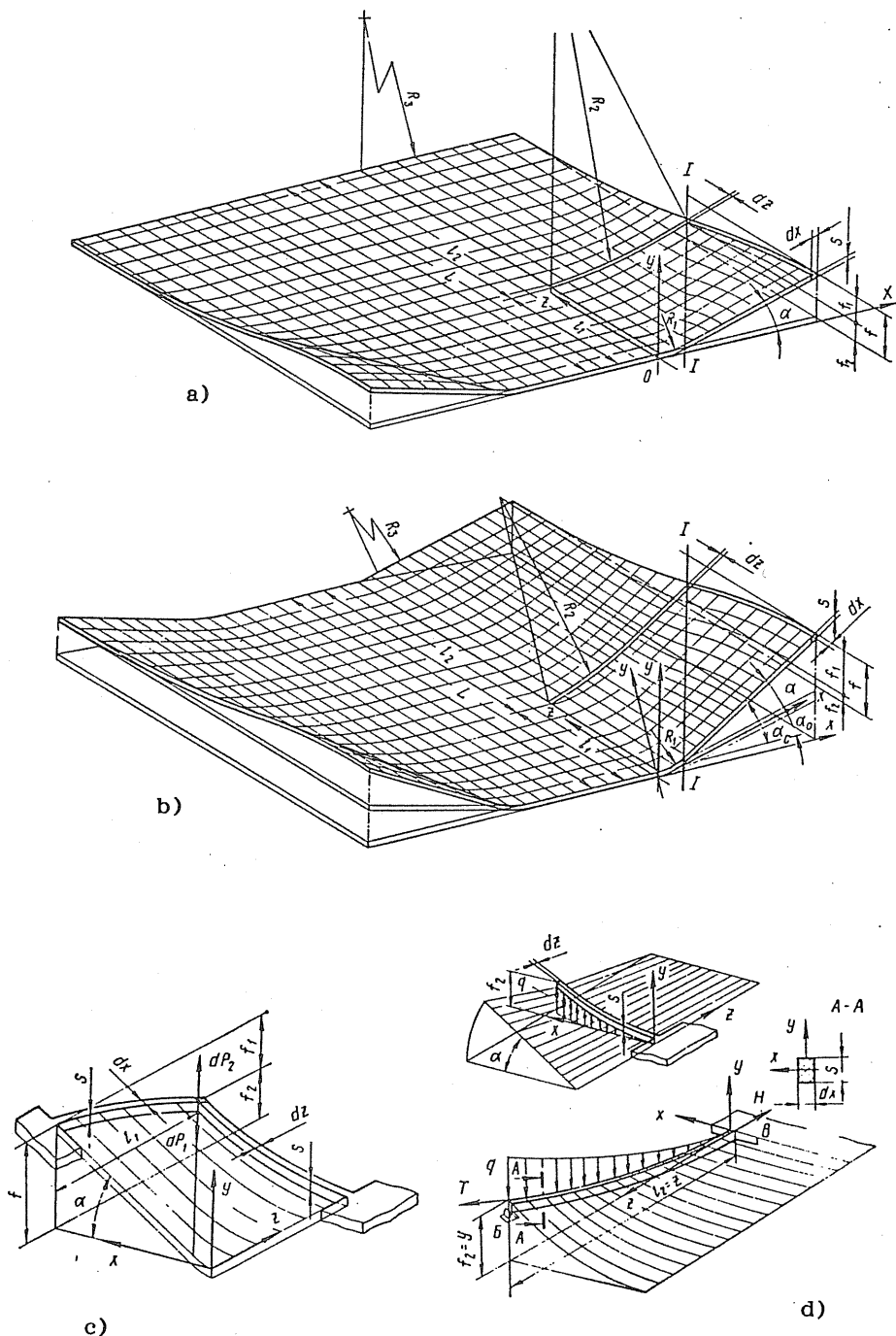
1. Profil sa jednim mestom savijanja i slobodnim kracima (ugaonici i sl.);
2. Profil sa dva mesta savijanja sa podizanjem krakova profila u istu stranu (stranice U- i C- profila i sl.);
3. Profil sa dva mesta savijanja sa pomeranjem krakova u suprotnim smerovima (npr. stranice z-profila, bočne stranice koritastih profila itd.).
4. Mesto savijanja - zona radijusa savijanja.

Distribucija opterećenja pojedinih tipova profila određena je na bazi šeme opterećenja (sl.9.3.) koja je stvorena na osnovu eksperimentalnih istraživanja. Zona deformacije podeljena je na dva dela koje su međusobno razdvojene linijom I-I. Zona deformacije I (dužine  $l_1$ ) sastoji se iz međusobno upravni elemenata koji se nalaze u naponskoj ravnoteži. Dužina zone  $l_1$  određuje se na osnovu ugiba uzdužnog i poprečnog nosača  $f_1$  i  $f_2$  (sl.9.3c.) koji su međusobno povezani šarnirom na liniji I-I:

$$\begin{aligned} f_1 &= 4dP_1 \cdot z^3 / (E S^3 dx) \\ f_2 &= 4dP_2 \cdot x^3 / (E S^3 dz) \end{aligned} \quad (9.1.)$$

gde je:

$dP_1, dP_2$  - sila na uzdužnom, odnosno poprečnom nosaču  
 $dx, dz$  - širina uzdužnog, odnosno poprečnog nosača  
 $S$  - debljina lima  
 $E$  - modul elastičnosti



Sl.9.3. Zona deformacije /28/

a) Prva faza profilisanja; b) i-ta faza profilisanja; c) šema ekvivalentnog opterećenja I dela zone deofmracije; d) ekvivalentno opterećenje II dela zone deformacije

Pošto se sistem nosača nalazi u ravnoteži to je  $dP_1 = dP_2$  sledi da je:

$$f_2/f_1 = z^3 dz/(x^3 dx)$$

$$z = \sqrt[4]{f_1(x^4 - C^4)/f_2}$$

za  $x=x_0$   $z=0$   $C=x_0 = \pi \cdot r_1 / 180$

gde je  $r_1$  - radijus donjeg valjka, a  $\alpha$  - ugao savijanja kraka. Sada je:

$$z = \sqrt[4]{\frac{f_1}{f_2} \left[ x^4 - \left( \frac{\pi r_1 \alpha}{180} \right)^4 \right]}$$

a za  $f_1 = f_2$  i  $x = b$   $z = l_1$ , tj.:

$$l_1 = \sqrt[4]{b^4 - (\pi r_1 \alpha / 180)^4} \quad (9.2.)$$

Granica drugog dela zone deformisanja (dužina  $l_2$ ) određena je uslovom  $R_3 = \alpha$ . U ovom delu zone deformacije (sl.9.3.a,b) pretpostavlja se da je osim opterećenja na savijanje elemenata u uzdužnom i poprečnom pravcu, prisutno i zatezno opterećenje u uzdužnom pravcu. Uz pretpostavku trouglastog rasporeda linijskog opterećenja u poprečnom i uzdužnom pravcu (sl.9.3.d) na osnovu jednačine ugiba i drugih zavisnosti dolazi se do rešenja za dužinu drugog dela zone deformacije ( $l_2$ ):

$$l_2 = 0,134 \sqrt[5]{\alpha^2 x^7 / S^2} \quad (9.3.)$$

Sada je ukupna dužina zone deformacije:

$$L = l_1 + l_2 = \sqrt[4]{b^4 - \left( \frac{\pi r_1 \alpha}{180} \right)^4} + 0,134 \sqrt[5]{\alpha^2 x^7 / S^2} \quad (9.4.)$$

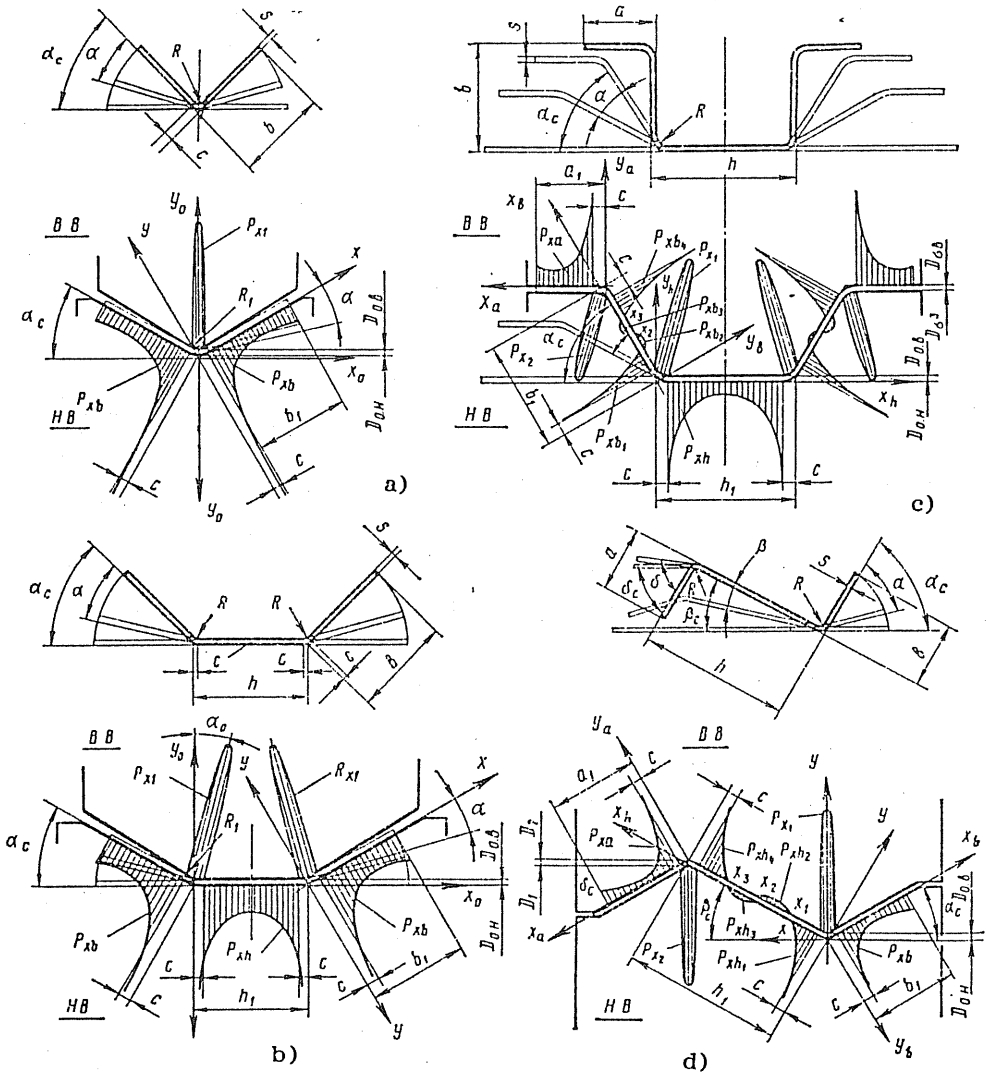
### 9.2.2. Distribucija kontaktnog opterećenja valjaka

Na osnovu dužine zone deformacije i na osnovu uvedenih pretpostavki o trouglastom rasporedu opterećenja kod uzdužnih i poprečnih elemenata dolazi se do distribucije opterećenja valjaka za pojedine elemente profila.

a) Tip I - ugaoni profil sa jednim mestom savijanja (sl.9.4a.)

Raspored pritiska na konusnoj površini donjeg valjka za ovaj tip profila određen je izrazom:

$$P_{xb} = \frac{\sigma_{11} \cdot S^2}{4 \cdot x} + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \alpha^{1,4} \left(\frac{S}{b}\right)^{2,6} \cdot x \quad (\text{N/mm}) \quad (9.5.)$$



Sl.9.4. Distribucija opterećenja na valjcima  
 a) Ugaonik; b) U-profil; c) Koritasti profil; d) z-profil

Opterećenje u zoni savijanja iznosi:

$$P_{x1} = 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \alpha^{1,4} \left(\frac{S}{b}\right)^{2,6} \cdot x \quad (\text{N/mm}) \quad (9.6.)$$

gde je:

$\sigma_T$  - granica tečenja za lim

E - modul elastičnosti lima

$\alpha$  - ugao savijanja

S - debljina lima

b - dužina kraka profila

x - tekuća koordinata

Na sl.9.4a. za ilustraciju je prikazana distribucija pritiska na valjke za razmatrani profil.

b) Tip II - horizontalni element U-profila

Raspored pritiska ispod kraka profila određuje se prema prethodnim izrazima, dok se pritisak na donji valjak za horizontalni element (dimenzija h) određuje prema sledećem izrazu:

$$P_{xh} = \frac{\sigma_T \cdot S^2 \cdot h}{4x(h-x)} + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \alpha^{1,4} \cdot \left(\frac{S}{h}\right)^{2,6} \cdot h \quad (\text{N/mm}) \quad (9.7.)$$

gde je:

h - veličina horizontalnog elementa profila.

Raspored pritiska za ovu vrstu profila dat je na sl.9.4b.

c) Tip III - bočna stranica koritastog profila

Elementi profila III tipa pojavljuju se kod koritastih profila i z-profila (sl.9.4c,d). Sledećim izrazom određen je raspored pritiska na bočnoj strani koritastog profila (veličina b) ili na elementu z-profila dimenzije  $h_1$  (sl.9.4d.):

$$P_{xb} = \frac{\sigma_T \cdot S^2}{4} \left(\frac{2x-b}{x^2-xb}\right) + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \alpha^{1,4} \left(\frac{S}{b}\right)^{2,6} \cdot (2x-b) \quad (\text{N/mm}) \quad (9.8.)$$

Ilustracija rasporeda pritiska na valjcima za ove slučajeve data je na sl.9.4c,d. Potrebno je naglasiti da se distribucija pritiska kod složenih profila, kao što je slučaj sa koritastim profilom dobija kombinacijom odgovarajućih izraza za pojedine elemente profila. U slučaju koritastog profila (sl.9.4c.) raspored opterećenja određuje se na sledeći način:

za element dužine  $a_1$  primenjuje se izraz (9.5.); za element  $b_1$  primenjuje se izraz (9.8.) i za element  $h$ , primenjuje se izraz (9.7.). Raspored napona na mestu savijanja za sve profile određuje se pomoću izraza (9.6.).

### 9.2.3. Proračun ukupnog opterećenja valjaka i obrtnih momenata

Na osnovu distribucije linijskog kontaktnog opterećenja valjaka za pojedine tipove profila integracijom se može odrediti ukupno opterećenje a takodje i obrtni momenti na pogonskim vratilima.

#### a) Ugaoni profili

U slučaju oblikovanja ugaonika kontaktno opterećenje se na donjem valjku javlja u predelu kraka ugaonika, dok je na gornjem valjku prisutno opterećenje u zoni radijusa profila.

Ukupno opterećenje pri formiranju ugaonika (sl.9.4a) određuje se prema izrazu:

$$F = 2 \int_c^{b_1} P_{xb} \cdot dx \cdot \cos \alpha_c \quad (9.9.)$$

gde su  $b_1$ ,  $c$  i  $\alpha_c$  - geometrijske veličine ugaonika.

Opterećenje a takodje i obrtni momenti gornjeg i donjeg valjka kod oblikovanja prilfa nisu medjusobno jednaki a što je u vezi sa postojanjem zazora izmedju valjaka koji je veći od debljine lima ( $S$ ).

Obrtni moment na donjem valjku izračunava se na osnovu rasporeda opterećenja, tj.:

$$M_d = 2 \int_c^{b_1} P_{xb} \left( -\frac{D_{od}}{2} + x \cdot \sin \alpha_c \right) \cdot \mu_c \cdot dx \quad (9.10.)$$

gde je:

$D_{od}$  - prečnik donjeg valjka

$\mu_c$  - koeficijent trenja klizanja izmedju valjaka i ugaonika



b) U-profil

U-profilu sastoje se iz jednog elementa II tipa i dva elementa I tipa (sl.9.4b.).

Ukupno opterećenje za ovaj tip profila određuje se na sledeći način:

$$F = 2 \cdot F_b \cdot \cos \alpha_c + F_h \quad (9.11.)$$

gde je:

$F_b$  - ukupno opterećenje donjeg valjka po kraku profila koje se određuje integracionom linijskog kontaktnog opterećenja

$F_h$  - ukupno opterećenje donjeg valjka na horizontalnom delu profila.

Obrtni moment donjeg valjka u ovom slučaju iznosi:

$$M_d = M_1 + M_2 = \int_c^{h-c} P_{xh} \cdot \frac{D_{od}}{2} \mu_k \cdot dx + 2 \int_c^{b_1} P_{xb} \left( \frac{D_{od}}{2} + x \cdot \sin \alpha_c \right) \mu_c \cdot dx \quad (9.12.)$$

gde je:

$\mu_k$  - koeficijent trenja kotrljanja.

Obrtni moment na gornjem valjku određuje se na osnovu opterećenja na mestu radijusa profila ( $P_{x1}$ ).

c) Koritasti profili

Koritasti profil (sl.9.4c) sastoji se od dva elementa tipa I (dimenzija  $a_1$ ), dva elementa tipa II (dimenzija  $b_1$ ) i jednog elementa tipa II (dimenzija  $h$ ). Ukupno opterećenje i obrtni momenti na valjcima dobijaju se sumiranjem veličina za pojedine elemente.

Izraz za ukupno opterećenje za slučaj koritastog profila ima sledeći oblik:

$$F = \int_c^{h_1-c} P_{xh} \cdot dx_h + 2 \int_c^{b_1-c} P_{xb} \cdot \cos \alpha_c \cdot dx_b + 2 \int_c^{a_1} P_{xa} \cdot dx_a \quad (9.13.)$$

gde je:

$a_1, b_1, c$  - geometrijske veličine profila.

Obrtni moment donjeg valjka iznosi:

$$M_d = \int_c^{h_1-c} p_{xh} \mu_K dx + 2 \int_c^{x_1} p_{xb} \mu_c \left( \frac{D_{0d}}{2} + x \sin \alpha_c \right) dx_b + 2 \int_{x_2}^{x_3} p_{xb} \mu_c \left( \frac{D_{0d}}{2} + x \sin \alpha_c \right) dx_b + \frac{2D_{0d}}{2} \mu_c \sqrt{\left( \int_c^{a_1} p_{xa} dx_a \right)^2 + 2 \cos \alpha_c \left( \int_c^a p_{xa} dx_a \left( - \int_{x_1}^{x_2} p_{xb} dx_b - \int_{x_3}^{b-c} p_{xb} dx_b + \left( - \int_{x_1}^{x_2} p_{xb} dx_b - \int_{x_3}^{b-c} p_{xb} dx_b \right)^2 \right) \right)} \quad (9.14.)$$

Na sličan načni određuje se opterećenje i obrtni moment kod z-profila.

U tabeli 9.1. dati su kompletni izrazi za određivanje ukupnog opterećenja valjaka za pojedine tipove profila prema Triševskom /28/.

Tabela 9.1. Izrazi za određivanje ukupnog opterećenja valjaka

Profil	Formula
Ugaonik	$F = \cos \alpha_c \left[ \frac{\sigma_T s^2}{2} \ln \frac{b_1}{c} + 3,52 \cdot 10^{-4} E \alpha^{1,4} s^{2,6} b_1^{2,6} (b_1^2 - c^2) \right]$
U-profil	$F = \frac{\sigma_T s^2}{2} \ln \left[ \frac{h-c}{c} \left( \frac{b_1}{c} \right)^{\cos \alpha_c} \right] + 3,52 \cdot 10^{-4} E \alpha^{1,4} s^{2,6} \times$ $\times \left( \frac{b_1^2 - c_1^2}{b^{2,6}} \cos \alpha_c + \frac{h-2c}{h^{1,6}} \right)$
Koritasti profil	$F = \frac{\sigma_T s^2}{2} \ln \left\{ \frac{a(h_1-c)}{c^2} \left[ \frac{\left( \frac{\sigma_T^{b^{1,6}}}{7,04 \cdot 10^{-4} E \alpha^{1,4} s^{0,6}} \right)^2}{cb-c^2} \right]^{\cos \alpha_c} \right\} +$ $+ 3,52 \cdot 10^{-4} E \alpha^{1,4} s^{2,6} \left\{ 4 \cos \alpha_c \left( \frac{1}{4b^{0,6}} + \frac{cb-c^2}{b^{2,6}} \right) + \right.$ $\left. + \frac{h_1-2c}{h_1^{1,6}} + \frac{a_1^2-c^2}{a_1^{2,6}} \right\} - 2\sigma_T s^2 \cos \alpha_c.$
Z-profil	$F = \frac{\sigma_T s^2}{4} \ln \left\{ \left( \frac{a_1}{c} \right)^{\cos \delta_c} \left( \frac{b_1}{c} \right)^{\cos \alpha_c} \left[ \frac{\left( \frac{\sigma_T h_1^{1,6}}{7,04 \cdot 10^{-4} E \beta_c^{1,4} s^{0,6}} \right)^2}{ch_1-c^2} \right]^{2 \cos \beta_c} \right\} +$ $+ 3,52 \cdot 10^{-4} E s^{2,6} \left[ \delta_c^{1,4} \cos \delta_c \frac{a_1^2-c^2}{2a_1^{2,6}} + \alpha_c^{1,4} \cos \alpha_c \frac{b_1^2-c^2}{2b_1^{2,6}} + \right.$ $\left. + \beta_c^{1,4} \cos \beta_c 2 \left( \frac{1}{4h_1^{0,6}} + \frac{ch_1-c^2}{h_1^{2,6}} \right) \right] - \sigma_T s^2 \cos \beta_c.$

### 9.3. TEHNOLOGIJA PROFILNOG SAVIJANJA POMOĆU VALJAKA

Izrada profila i talasastih limova postupkom savijanja pomoću valjaka je visokoproduktivna metoda koja se primenjuje u masovnoj proizvodnji. Radi toga neophodno je pažljivo razmotriti svaku fazu obrade kako bi proizvodni proces bio stabilan i obezbedjivao visoki kvalitet profila.

U projektovanje tehnologije izrade profila spada čitav niz aktivnosti a osnovne su:

1. Analiza tehnološkičnosti konstrukcije profila;
2. Izbor kvaliteta polaznog materijala;
3. Izbor tehnološke šeme profilisanja;
4. Utvrđivanje položaja profila u valjcima;
5. Odredjivanje dimenzija priprema;
6. Izbor režima profilisanja;
7. Konstrukcija alata (valjaka);
8. Izbor mašina za profilisanje i dr.

U nastavku su ukratko prezentirane navedene faze projektovanja tehnologije rotacionog profilnog savijanja.

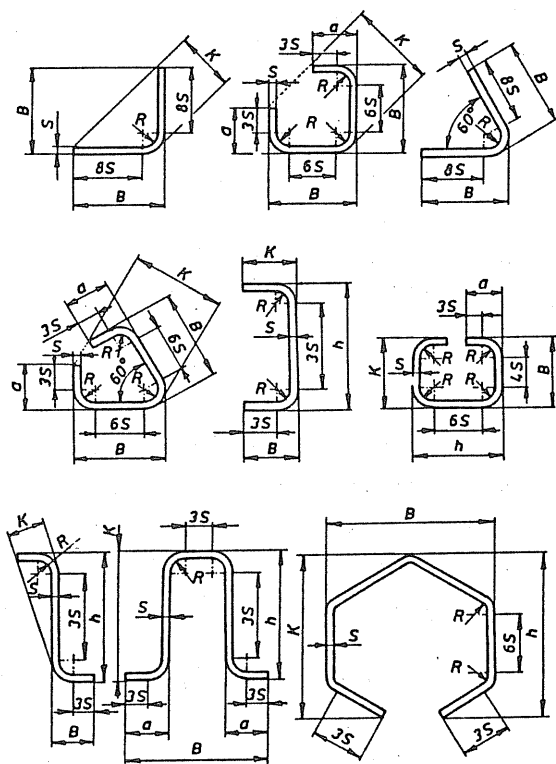
#### 9.3.1. Analiza tehnološkičnosti konstrukcije profila

Oblik i dimenzije hladno oblikovanih profila u potpunosti su određeni standardima ili internim normama pojedinih proizvođača. Međutim, često se javlja potreba za oblicima profila koji odstupaju od standardnih. Pri konstruisanju novog profila potrebno je imati u vidu određena pravila koja doprinose boljoj tehnološkičnosti, tj. omogućuju lakšu izradu profila:

1. Profil mora odgovarati konstrukcionim i eksploatacionim zahtevima uz ispunjavanje tehnoloških mogućnosti za proizvodnju.
2. Potrebno je uskladiti odnos dimenzija profila prema debljini materijala u skladu sa preporukama (sl.9.5.).
3. Uskladiti radijuse savijanja sa preporučenim vrednostima imajući u vidu minimalne vrednosti istih.
4. Uskladiti mehanička svojstva materijala, odnosno, izvršiti pravilan izbor vrste materijala s obzirom na deformacije koje nastaju u pojedinim zonama profila, tj. razmotriti aspekt deformabilnosti materijala.

5. Predvideti eventualne dodatke za naknadnu mehaničku obradu profila.

Osim toga, potrebno je proveriti opravdanost nove konstrukcije profila s obzirom na unifikaciju profila i tehnološke mogućnosti opreme, zatim proveriti da li je moguće isti profil dobiti spajanjem dva ili više standardnih profila i proveriti eventualne potrebe za ojačanjima profila sa rebrima. Takodje, pri projektovanju novog profila treba uzeti u obzir i agresivnost sredine u kojoj će se profil koristiti te u tom smislu predvideti odgovarajuću zaštitu površina i izvršiti pravilan izbor materijala.



Sl.9.5. Minimalni odnosi dimenzija profila prema debljini lima

Posle projektovanja profila određuje se širina priprema za njegovu izradu. Za pravilno oblikovanje profila preporučuje se širina obratka u zavisnosti od debljine materijala:

S = 2 - 3 mm

B ≤ 120 mm

S = 2 - 7 mm

B = 120 - 250 mm

Takodje postoje preporuke za minimalni odnos širine pripremkama prema debljini materijala - tabela 9.2.

Tabela 9.2. Minimalne vrednosti širine prepremkama /28/

Vrsta profila	B/S
Ravnokraki ugaonici sa uglom savijanja od 90°	18,3-19,2
Raznokraki ugaonici sa uglom savijanja od 90°	25-27,6
C-profil	29,4-32,5
Z-profil	13,2-15,3
Koritasti profil	24,4-27,6
Poluzatvoreni šestostrani profil	45,5-53,5

Maksimalne dimenzije profila određene su pre svega mogućnostima raspoložive opreme. Tu se pre svega mora voditi računa o maksimalnoj širini profila kao i o maksimalnoj visini profila koja je limitirana maksimalnim prečnikom valjka.

Minimalni radijusi savijanja limitirani su plastičnim svojstvima polaznog materijala. Po pravilu minimalni radijus ne treba da je manji od debljine materijala. U tabeli 9.3. date su vrednosti minimalnog radijusa savijanja u zavisnosti od mehaničkih svojstava materijala.

T.9.3. Minimalne vrednosti radijusa savijanja /28/

Čelik	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>p</sub> MPa	ψ %	δ %	$\frac{r_{min}}{s}$
Niskougljenični čelik sa garant. mehaničkim osobinama - umiren	431	274	62	25	0,11
Legirani konstrukcioni čelik	676	510	28-31	15-17	1,54-1,27
Niskolegirani konstrukcioni čelik	470	353	47	23	0,44
Niskouglj. čelik sa garant. mehaničkim osobinama sa niob.	461	343	40	22	0,71
Niskouglj. čelik term. obradjen	568	470	57	17	0,19

### 9.3.2. Izbor polufabrikata za izradu profila

Pripremak za izradu profila je lim odgovarajuće širine i debljine koji može biti u obliku traka ili tabli određene dužine ili namotan u bunt kada je u pitanju kontinualni proces profilisanja. Kvalitet priprema u pogledu njegovih dimenzija, pre svega debljine i širine a takodje i u pogledu mehaničkih i plastičnih svojstava, bitno utiče na stabilnost procesa profilisanja i kvalitet profila. Debljina materijala određuje zazor valjaka i mora se nalaziti u granicama definisanim standardom. Širina priprema utiče na konačne dimenzije profila te se i ona mora držati u određenim granicama. Eventualne greške u proizvodnji lima, kao što su neravnine u obliku talasa, oštećenja bočnih ivica lima nepovoljno se odražavaju na kvalitet profila.

Za izradu profila rotacionim alatima koriste se uglavnom hladno valjani dekapirani limovi, a u određenim slučajevima koriste se i toplovaljani (crni) limovi.

Za oblikovanje profila pogodni su čelični limovi čije izduženje iznosi najmanje 10-15% a maksimalna čvrstoća ne prelazi 700-800 MPa. Struktura lima treba da je meko žarena.

Za izradu profila često se koriste nerdjajući čelici na bazi hroma i nikla i oni se mogu svrstati u tri grupe:

1. Hrom čelik sa 11,5 - 13,5%Cr i do 0,15%C
2. Hrom-nikl čelik sa 17-19%Cr i do 0,2%C
3. Obični hrom čelik sa 14-18%Cr i do 0,12%C.

Profilisanje nerdjajućih čelika i drugih legiranih čelika izvodi se sa nižim vrednostima režima obrade, pre svega sa smanjenom brzinom u odnosu na niskouglenične čelike.

Limovi od aluminijuma i njegovih legura često se koriste za izradu profila, pri čemu se režimi obrade podešavaju u skladu sa mehaničkim osobinama materijala.

Izrada profila postupkom rotacionog profilisanja moguća je i od plakiranih, zatim plastificiranih limova, obojenih limova i limova sa perforacijom.

### 9.3.3. Tehnološke šeme profilisanja

Izrada profila na mašinama sa valjcima izvodi se na dva načina s obzirom na režim rada:

1. Kontinualnim postupkom profilisanja i
2. Pojedinačnim profilisanjem.

U prvom slučaju polazni materijal je traka odgovarajuće širine namotana u bunt. Po istrošenju trake iz jednog bunta postavlja se novi bunt a krajevi lima se međusobno zavare ručno ili automatski.

Pri pojedinačnom profilisanju pripremak je traka odgovarajuće dužine i širine. Sa stanovišta odvijanja procesa pogodniji je postupak kontinualnog profilisanja. Kod takvog procesa moguće je iza poslednjeg para valjaka postaviti leteće makaze i odsecati profile na potrebnu dužinu.

Talasasti limovi izrađuju se polukontinualnim postupkom, tj. iz lima koji se nalazi u buntu s tim da se ne vrši međusobno spajanje materijala iz dva susedna bunta.

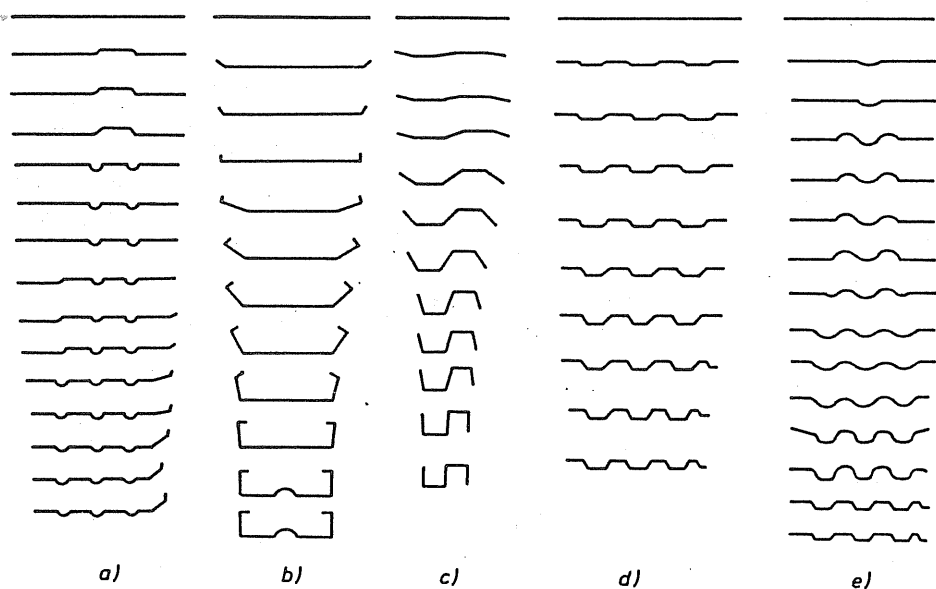
Na kvalitet profila pri savijanju pomoću valjaka bitno utiče redosled formiranja elemenata profila, tj. tehnološka šema profilisanja. U tom smislu postoji pet varijanti (sl.9.6.):

1. Posetpeno formiranje profila od ose ka periferiji;
2. Postepeno formiranje profila od periferije ka osi;
3. Jednovremeno profilisanje po celoj širini pripremk;a;
4. Kombinovano profilisanje;
5. Profilisanje sabijanjem talasa.

U prvom slučaju puni oblik profila dobija se postupnim formiranjem elemenata počev od ose obratka (sl.9.6a.) idući ka periferiji. Ovakav način profilisanja u principu omogućuje izradu kvalitetnih profila zadovoljavajuće tačnosti. Netačnost u širini pripremk;a ne ometa proces profilisanja ali se odražava na konačnu širinu profila. Nedostatak ove šeme profilisanja je zahtev za velikim brojem valjaka.

Prema drugoj tehnološkoj šemi profilisanja (sl.9.6b.) najpre se oblikuju periferni elementi profila. Ovakav način profilisanja primenjuje se u slučaju kada postoji izričit zahtev za tačnošću oblika i dimenzija krajnjih elemenata profila i kada se formiranjem krajnjih elemenata želi izvršiti ukrućenje profila. Proračun širine pripremk;a u ovom slučaju mora biti vrlo precizan, u protivnom mogu nastati problemi u postupku profilisanja izazvani manjkom ili viškom materijala. I u ovom slučaju potreban je veliki broj valjaka u procesu profilisanja.

Postupak jednovremenog oblikovanja po celoj širini profila (sl. 9.6c.) izvodi se sa najmanjim brojem valjaka, i do 50% manje u odnosu



Sl.9.6. Šeme profilisanja /28/

na prethodne postupke. Za ovakav način profilisanja potrebno je veoma precizno odrediti broj faza obrade i oblik profila po pojedinim fazama kao i polaznu širinu obratka. Proračun faza obrade izvodi se sa početkom od gotovog profila pa zatim unazad do I faze. Kod ovoga postupka profilisanja javljaju se i veća opterećenja što može dovesti do stanjenja lima i pojave neželjenih deformacija profila.

Istovremeno delovanje svih valjaka može dovesti do pojave krivljenja profila u jednom pravcu što se može eliminisati prethodnim savijanjem priprema u suprotnom pravcu. Za slučaj jednovremenog formiranja profila treba računati i sa većom tačnošću izrade alata i većom cenom alata.

Kombinovani postupak profilisanja (sl.9.6d.) sastoji se od postepenog i jednovremenog formiranja profila. U prvim fazama obrade vrši se oblikovanje svih ili nekih odabranih elemenata profila, a zatim se prelazi na postupno formiranje pojedinih elemenata profila. Ovaj postupak predstavlja kombinaciju istovremenog profilisanja po celoj širini profila sa šemama postupnog oblikovanja, a eventualne greške nastale u fazi



istovremenog profilisanja mogu se otkloniti u fazama postupnog formiranja profila.

Peta šema profilisanja (sl.9.6e.) predstavlja postupak oblikovanja profila sabijanjem prethodno formiranih talasa. Postupak se izvodi u dve faze:

I - formiranje talasa u više prolaza

II - sabijanje, odnosno oblikovanje profila.

U drugoj fazi obrade dominiraju pritiski naponi što je povoljno sa stanovišta deformabilnosti materijala.

#### 9.3.4. Položaj profila u valjcima

Položaj profila u odnosu na horizontalnu osu valjka mora da obezbedi sledeće zahteve:

- a) Izradu profila sa najprostijim oblikom valjaka;
- b) Pravilan brzinski režim profilisanja (minimalno prisustvo klizanja);
- c) Visok kvalitet površine profila;
- d) Visoku trajnost valjaka i niske troškove izrade i održavanja.

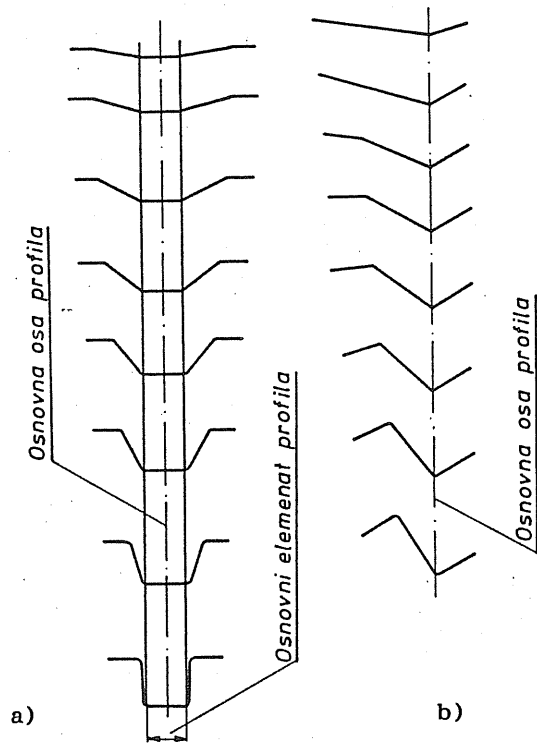
Ispunjavanje gornjih zahteva u tesnoj je vezi sa pravilnim izborom osnovne ose i osnovnog elementa profila.

Osnovnu osu profila predstavlja prava linija koja prolazi kroz tačku profila koja ne menja svoj položaj tokom profilisanja. Pri izboru osnovne ose profila treba težiti da to bude osa simetrije profila (sl.9.7a). Kod simetričnih profila osnovna osa prolazi po sredini profila ili po radijusu savijanja.

Deo profila paralelan sa valjcima koji za vreme oblikovanja ne menja položaj naziva se osnovnim elementom profila.

Položaj profila u valjcima treba da je takav da se elementi profila pri savijanju podižu na gore.

Da bi se pri profilisanju smanjio uticaj proklizavanja potrebno je da zone deformacije sa najvećim opterećenjem leže u neposrednoj blizini osnovnih prečnika valjka. Osnovni prečnici valjaka (donjeg i gornjeg) su oni kod kojih su obimne brzine jednake. Odnos osnovnih prečnika valjaka  $D_{og}$  (gornjeg) i  $D_{od}$  (donjeg) definisan je prenosnim odnosom pogonskog mehanizma (i) tj.:  $D_{og}/D_{od}=i$ . Ako je profil postavljen u valjke tako da je donji valjak urezan, onda se osnovni prečnik donjeg valjka ( $D_{od}$ ) određuje na osnovu proračuna čvrstoće a prečnik gornjeg valjka na osnovu



Sl.9.7. Osnovna osa profila

prenosnog odnosa. Slično tome vrši se proračun za slučaj da je gornji valjak urezan.

Agregati za oblikovanje talasastih limova obično se grade sa jednakim osnovnim prečnicima valjaka.

### 9.3.5. Proračun širine pripremk

Prisustvo zateznih napona u tangencijalnom pravcu u zoni savijanja dovodi do stanjenja polaznog materijala pa se na taj način uvećava dužina neutralne linije. Da bi se obezbedilo kvalitet profila s obzirom na dimenzije potrebno je navedena izduženja uzeti u obzir, što se postiže pravilnim izračunavanjem širine pripremk.

Širina pripremk određuje se kao dužina neutralne linije profila. Širinu pripremk predstavlja zbir dužina neutralnog sloja pravolinijskih i

krivolinijskih elemenata:

$$B = \sum b_p + \sum b_k \quad (9.15.)$$

$b_p$  - dužina pravolinijskih elemenata

$b_k$  - dužina krivolinijskih elemenata

Dužina krivolinijskog elementa određuje se prema izrazu:

$$b_k = \rho_n \frac{\pi \alpha}{180} = (R + \xi \cdot S) \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \quad (9.16.)$$

$\rho_n$  - poluprečnik neutralne linije

$R$  - radijus unutrašnjeg zaobljenja

$\alpha$  - ugao savijanja

$\xi$  - faktor zavisen od odnosa  $R/S$  - tabela 9.4.

Tabela 9.4. Vrednosti koeficijenta  $\xi$

R/s	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$\xi$	0,23	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,36	0,37
R/s	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,3	1,5	
$\xi$	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	
R/s	2,0	3,0	4,0	5,0	6,5			
$\xi$	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49			

U slučaju zatvorenih profila širina pripremljena određuje se na osnovu središnje linije profila ne uzimajući u obzir moguća izduženja.

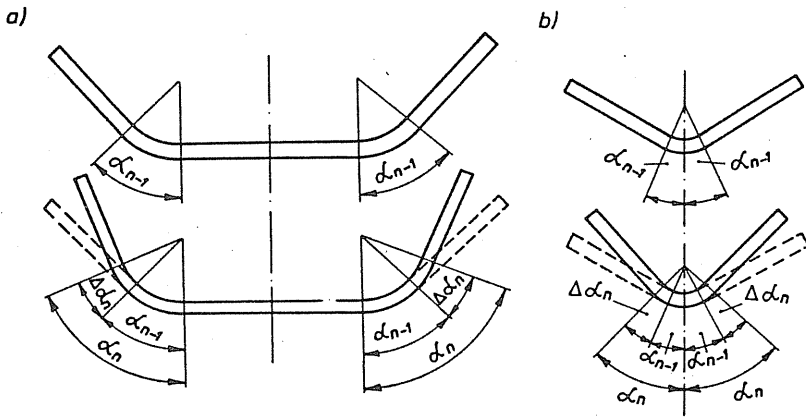
### 9.3.6. Izbor režima profilisanja

U režime obrade koji značajno utiču na proces profilisanja i kvalitet profila, spadaju veličina ugla savijanja i radijusi zaobljenja po fazama obrade.

Sumarni ugao savijanja predstavlja ugao između početnog i posmatranog položaja savijenog elementa, dok ugao savijanja u jednoj fazi predstavlja razliku sumarnih uglova posmatrane i prethodne faze savijanja (sl.9.8.).

Prekomerno povećanje ugla savijanja u okviru jedne faze obrade dovodi do pogoršanja naponskih uslova i stanjenja debljine materijala što

se nepovoljno odražava na kvalitet profila.



Sl.9.8. Ugao savijanja

Režimi profilisanja nisu identični u svim fazama obrade, a takođe se mora imati u vidu način profilisanja - pojedinačno ili kontinualno profilisanje.

Kod pojedinačnog profilisanja uglovi savijanja su manji u prvim fazama obrade kako bi se obezbedio pravilan ulaz priprema u valjke, a u narednim fazama može se povećati ugao savijanja.

Kod kontinualnog režima profilisanja takodje je kritična prva faza obrade i defekti se najčešće u njoj javljaju.

Podaci o uglu savijanja za ugaonike i jednostavne profile od niskougleničnog čelika dati su na dijagramima sl.9.9.

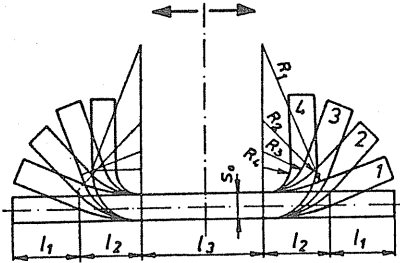
U tabeli 9.5. takodje su dati podaci o uglu savijanja za pojedine tipove profila i pojedine faze obrade (prva, sledeća, poslednja).

Drugi važan parametar koji definiše režim profilisanja je veličina radujusa zaobljenja po fazama obrade u kombinaciji sa rastojanjem centra zaobljenja. U tom smislu moguće su tri varijante (sl.9.10.)

1. Promenljivi radijus zaobljenja ( $R_1$ ) sa konstantnim rastojanjem centra  $L_3$  (sl.9.10a.)
2. Konstantan radijus zaobljenja, sa promenljivim rastojanjem  $L_{3i}$  (sl.9.10b.)
3. Konstantna veličina radijusa i konstantno rastojanje izmedju centra zaobljenja (sl.9.10c.).



1)



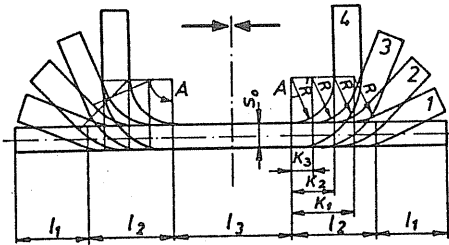
1.  $L_3 = \text{const} \quad R_i \neq \text{const}$

$$L_2 = \rho_n \cdot \alpha_i \frac{\pi}{180} =$$

$$= (R_i + \xi \cdot S) \cdot \alpha_i \frac{\pi}{180}$$

$$R_i = \frac{L_2}{\pi \alpha_i} \cdot 180 - \xi \cdot S$$

2)

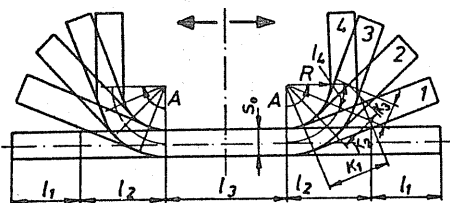


2.  $L_3 \neq \text{const} \quad R = \text{const}$

$$L_{3i} = L_3 + 2K_i$$

$$K_i = L_2 - (R + \xi \cdot S) \cdot \alpha_i \frac{\pi}{180}$$

3)



3.  $L_3 = \text{const}, \quad R = \text{const}$

$$L_2 - K_i - \text{savijeni deo}$$

$$L_2 - K_i = (R + \xi \cdot S) \cdot \alpha_i \frac{\pi}{180}$$

Sl.9.10. Varijante radijusa savijanja po fazama profilisanja /30/

prvoj fazi obrade i smanjuje se na zadatu vrednost u poslednjoj fazi. Ovakav postupak profilisanja je povoljan i obezbedjuje minimalno stanje materijala zbog toga što je opterećenje rasporedjeno po celoj dužini zone deformacije.

U drugom slučaju ( $L_3 \neq \text{const}$ ,  $R = \text{const}$ ) deformacija počinje na periferiji zone i kreće se ka centru obratka. Opterećenje valjaka raste iz faze u fazu i najveće je na kraju procesa profilisanja. Medjutim, ovakav postupak obezbedjuje izradu profila sa tačnim radijusom savijanja sa manjim brojem faze obrade. Rasotjanje centra zaobljenja po fazama određuje se na osnovu ugla savijanja  $\alpha_1$  i veličine nedeformisanog dela zone ( $K_1$ , sl.9.10b.).

U trećem slučaju (sl.9.10c.) profilisanje se izvodi sa konstantnim radijusom i konstantnim rastojanjem centra zaobljenja ( $R = \text{const}$ ,  $L_3 = \text{const}$ ). U ovom slučaju profilisanje se izvodi sa deformacijom koja se kreće od centra ka periferiji. Savijeni deo profila određen je veličinom ( $L_2 - K_1$ ), sl.9.10c. a zavisi od ugla savijanja. Problem koji je prisutan kod ovog načina profilisanja je teškoća održavanja položaja centra radiusa po fazama, što može dovesti do stanjenja debljine lima.

### 9.3.7. Konstrukcija valjaka

Konstrukcija valjaka sledi nakon potpune razrade tehnološkog postupka izrade datog profila. Konstrukciono oblikovanje valjka vrši se na osnovu oblika obratka po fazama profilisanja. Geometrija obratka u posmatranoj fazi obrade u najvećoj meri definiše geometriju valjaka za tu fazu .

Valjci za prvu fazu obrade moraju biti konstrukciono oblikovani tako da obezbedjuju sigurno uvodjenje trake što se postiže predviđanjem bočnih elemenata na valjku (sl.9.11.). Širina kalibra kod prvog para valjaka iznosi:

$$B_{k1} = B_o + 1 \quad (\text{mm})$$

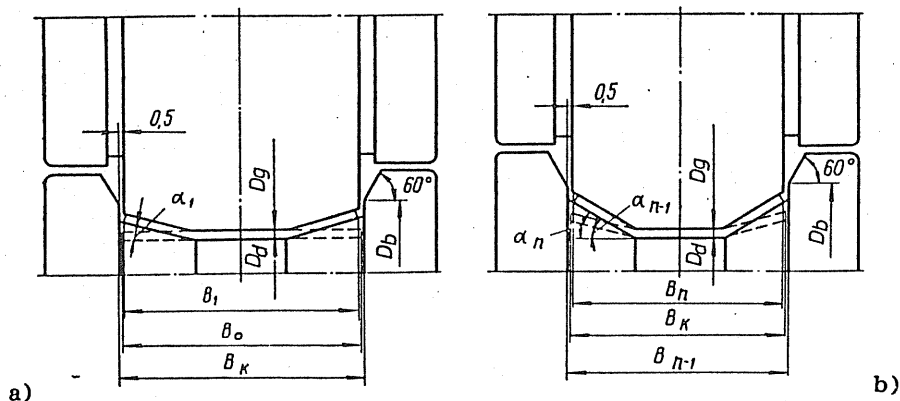
a kod sledećih valjaka:

$$B_{kn} = 0,5 (B_n + B_{n-1})$$

gde je:

$B_o$  - širina pripremk

$B_n$  i  $B_{n-1}$  - širina obratka po fazama (sl.9.11b.)



Sl.9.11. Šema za određivanje širine valjaka

Vodjenje obratka za slučaj oblikovanja ugaonika je bolje u slučaju konstrukcije valjaka sa konusima čiji ugao odgovara uglu savijanja (sl. 9.12.).

Osnovni prečnici donjeg i gornjeg valjka određuju se na osnovu proračuna čvrstoće i prenosnog odnosa pogonskog agregata  $D_{og}/D_{od}^i$ .

Položaj profila u valjku treba podesiti tako da zone najvećih deformacija leže na osnovnim prečnicima.

Radijusi zaobljenja valjka određuju se na osnovu šeme profilisanja i režima obrade s obzirom na mogućnosti koje su date u prethodnoj tački ( $R_1$  i  $L_3$ ).

Radi smanjenja trenja na konusnim površinama valjaka donji i gornji valjak se izrađuju sa različitim uglom konusa (sl.9.13.).

Zbog povećanja dužine obratka iz faze u fazu osnovni prečnik donjeg valjka se povećava po fazama:

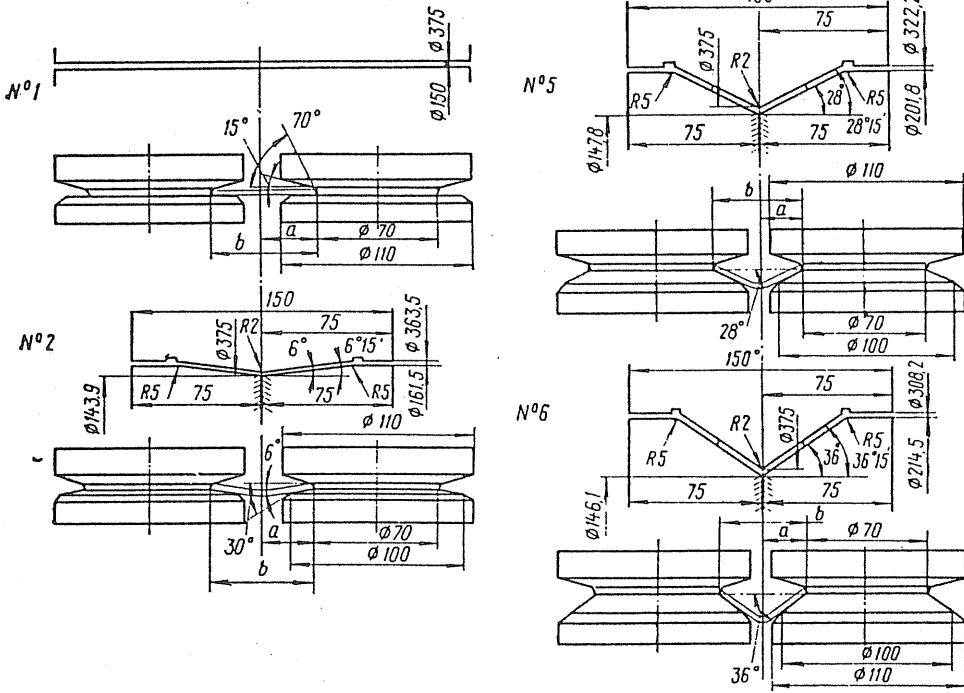
$$D_{od(n)} = K \cdot D_{od(n-1)}$$

gde je:

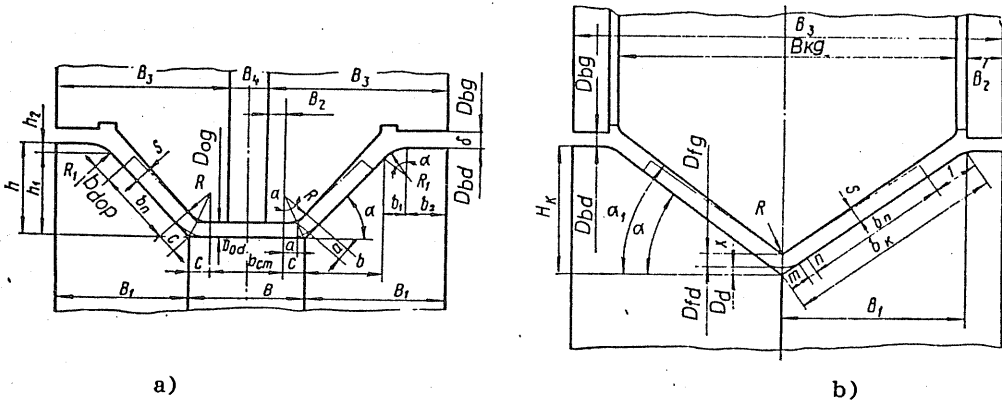
$K = 1 - 1,004$  - korekcionni faktor

Na sl.9.14. ilustracije radi dat je primer faza oblikovanja U-profila sa svim konstrukcionim detaljima valjaka.

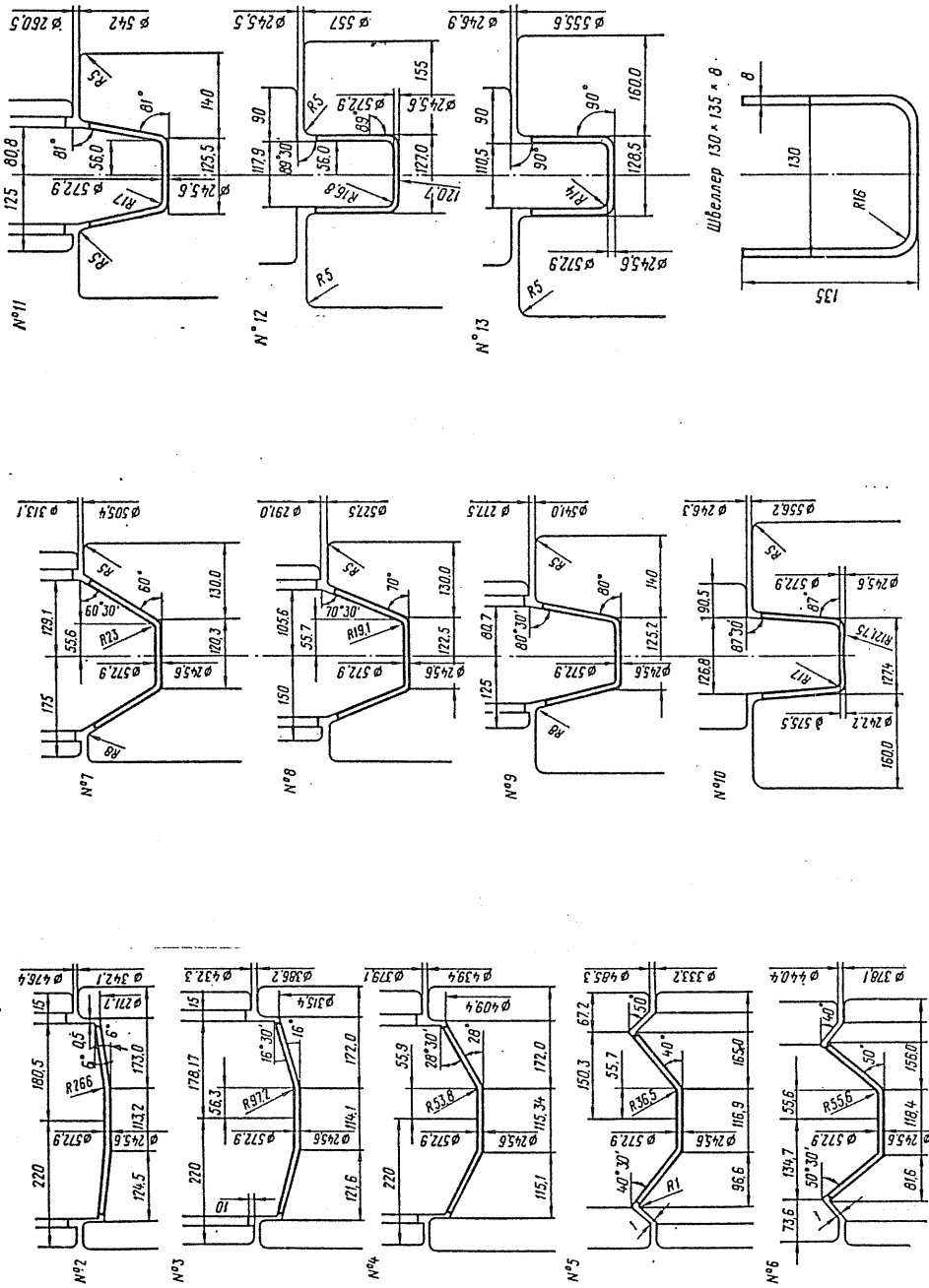




Sl.9.12. Faze profilisanja ugaonika



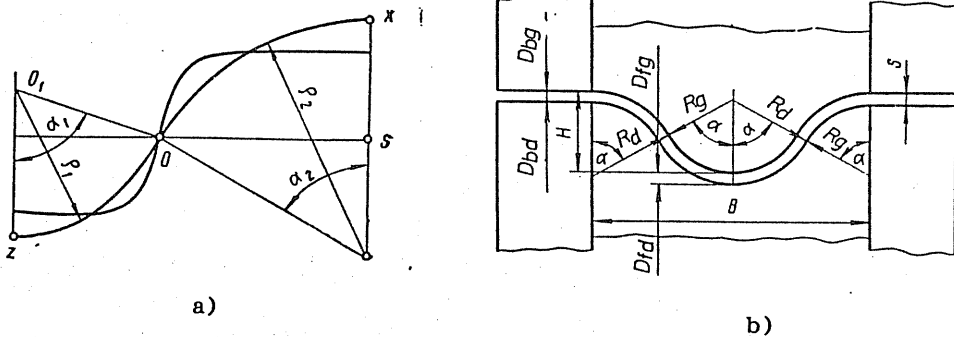
Sl.9.13. Geometrija valjaka



Sl.9.14. Konstrukcija valjka za oblikovanje U-profila /28/

Konstrukcija valjaka za profilisanje talasastih limova izvodi se na osnovu ustanovljene šeme obrade i definisanog oblika obratka po fazama. Pri tome prelazi oblik obratka mora zaodovljavati sledeće uslove:

1. Dužina profila po neutralnoj liniji po pojedinim fazama oblikovanja mora biti jednaka dužini gotovog profila.
2. Rastojanje izmedju centara pojedinih talasa se ne menja po fazama obrade.
3. Srednje tačke pravolinijskih delova profila poklapaju se sa tačkama spajanja lukova profila u medjufazama (sl.9.15.).
4. Tačke spajanja lukova prelaznih formi ne menjaju svoj položaj u odnosu na ose valjaka.



SL.9.15. Šema za proračun oblika obratka po fazama

Osnovni parametri prelaznih formi kod talasastih limova su radijus krivine i ugao savijanja.

Radijus krivine talasa određuje se na osnovu dužine luka talasa koji je jednak dužini neutralne linije profila (sl.9.15a.).

$$\rho_1 = 0_z / \alpha_1 \quad ; \quad \rho_2 = 0_x / \alpha_2$$

gde

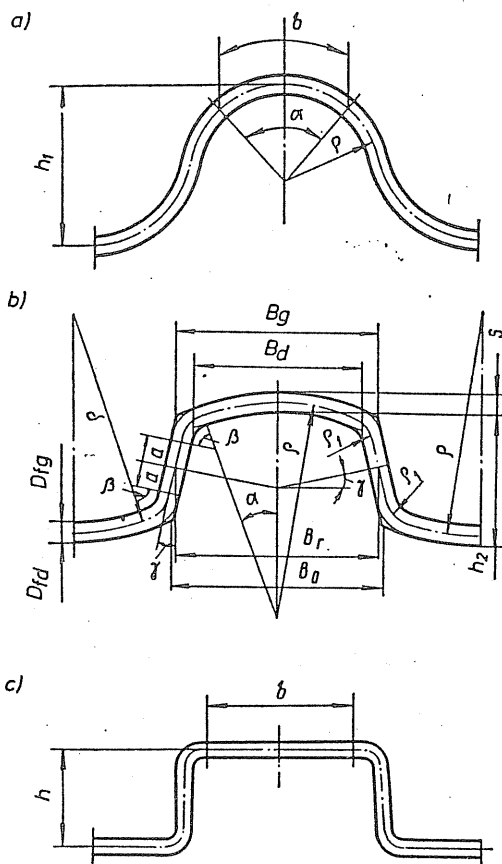
$0_z$  i  $0_x$  - odgovarajuće dužine lukova (sl.9.15a.)

Na osnovu radijusa neutralne linije talasa određuju se dimenzije valjaka (sl.9.15b.).

$$R_d = \rho + (0,5 + \xi) \cdot S; \quad R_g = \rho - (0,5 + \xi) \cdot S$$

$$H = (1 - \cos \alpha) (R_d + R_g)$$

Na sl.9.16. date su faze oblikovanja profilisanog lima postupkom savijanja sa sabijanjem. U prvim fazama obrade formiraju se talasai čiji je oblik dat na sl.9.16a, a zatim se preko više faza trapeznog tipa (sl.9.16b) dolazi do završnog oblika profila (sl.9.16c.).



Sl.9.16. Profilisanje sa sabijanjem talasa

#### 9.4. MAŠINE ZA PROFILISANJE SA VALJCIMA

Struktura i konstrukcija mašina za profilisanje pomoću valjaka zavisi od oblika i dimenzija profila koji se proizvodi, od stepena složenosti profila, debljine lima, mehaničkih osobina materijala, kompozicije

tehnologije (savijanje, zavarivanje, perforiranje, odsecanje i dr.) kao i od količine profila odnosno proizvodnosti mašine.

Podela mašina (postrojenja) za proizvodnju profila može se izvršiti prema različitim kriterijumima a ovde se daje podela s obzirom na režim profilisanja, prema kojem se mašine za profilisanje dele u četiri osnovne grupe:

1. Mašine sa neprekidnim režimom profilisanja;
2. Mašine sa pojedinačnim režimom profilisanja;
3. Mašine sa kombinovanim režimom profilisanja;
4. Mašine sa polukontinualnim režimom profilisanja.

Mašine sa kontinualnim režimom profilisanja primenjuju se za oblikovanje različitih i veoma složenih oblika profila iz lima relativno male debljine. Kontinuitet proizvodnje se ostvaruje zavarivanjem krajeva lima iz dva susedna bunta. Sečenje profila na dužinu vrši se iza poslednjeg para valjaka pomoću letećih makaza. Kontinualno profilisanje omogućuje primenu vrlo oštih režima obrade na račun kojih se smanjuje broj valjaka.

Kod mašina sa pojedinačnim režimom rada polazni materijal je u obliku traka ili tabli dužine koja odgovara dužini gotovog profila. Odsecanje priprema na dužinu može se vršiti na smoj mašini neposredno pre oblikovanja profila.

Postrojenja ovog tipa nemaju leteće makaze za odsecanje profila, ni uređaj za zavarivanje.

Na mašinama sa pojedinačnim režimom profilisanja primenjuju se niži režimi obrade pa ove mašine imaju veći broj valjaka.

Mašine sa kombinovanim režimom rada omogućuju izradu jednostavnijih profila manje debljine lima postupkom kontinualnog profilisanja i oblikovanje složenijih profila postupkom pojedinačnog profilisanja. Ove mašine su snabdevene makazama za odsecanje lima i letećim makazama za odsecanje profila na dužinu.

Mašine sa polukontinualnim režimom rada omogućuju izradu profila kontinualnim postupkom ali u okviru materijala koji se nalazi u jednom buntu. Kod ovih mašina ne postoji mogućnost spajanja krajeva lima iz dva susedna bunta. Mašine su snabdevene letećim makazama za odsecanje profila na dužinu. Primenjuju se za izradu profila od tanjih limova.

Prema dimenzijama gotovog profila mašine za profilisanje se dele u četiri grupe:

Tip mašine	I	II	III	IV
Debljina lima (mm)	0,5-2	1-4	2-8	5-12
Širina profila (mm)	100-150	50-300	100-600	400-1200

U tabeli 9.6. date su tehničke karakteristike mašina koje se primenjuju u SSSR-u.

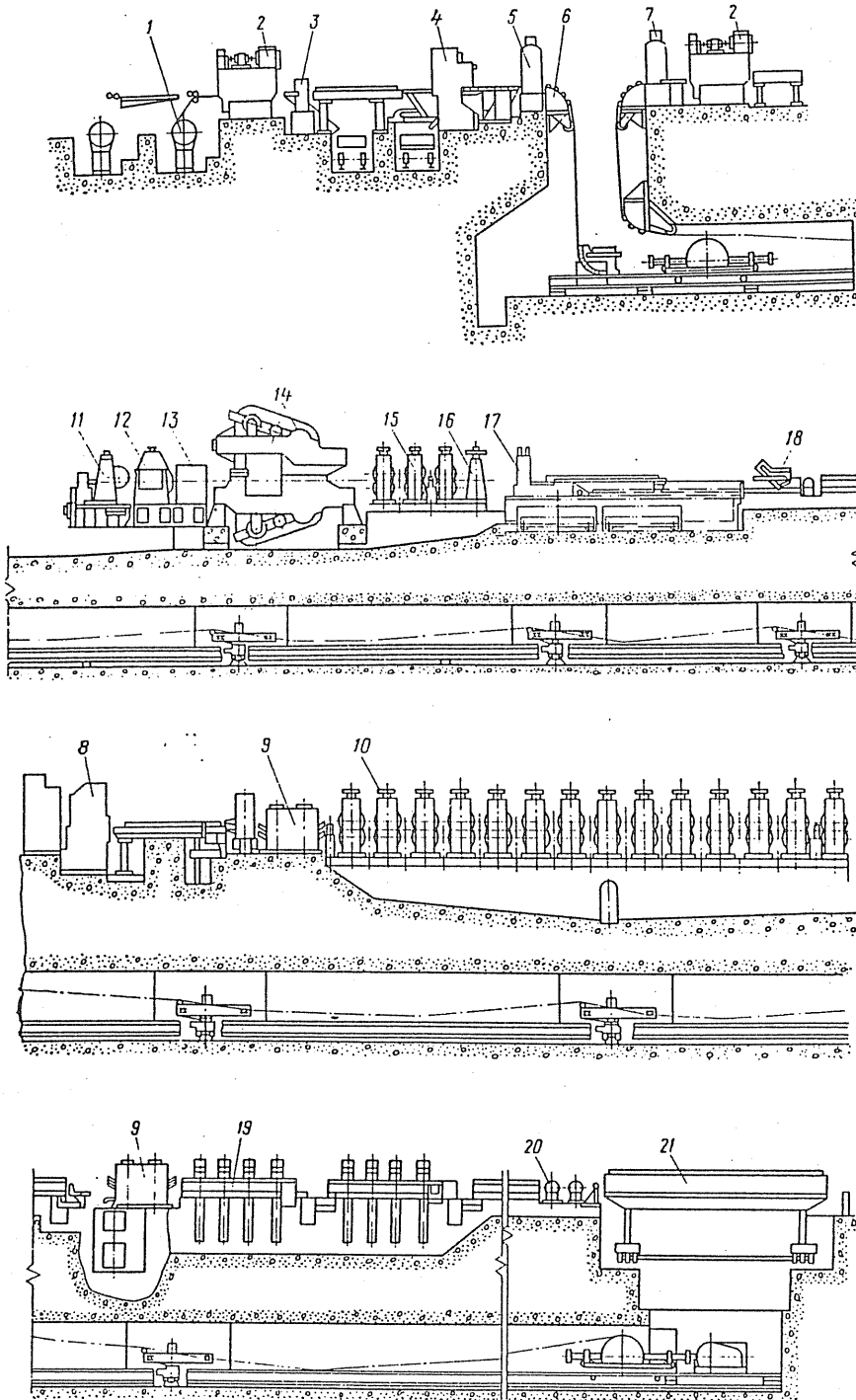
Tabela 9.6. Tehnički podaci mašina za profilisanje /28/

Parametar	1-4x50-300	2-7x80-500	2-8x100-600	1-4x400-1500	0,5x2,5x 300-1500
Dimenzije priprema (mm)					
- debljina	1-4	2-7	2-8	1-4	0,5-2,5
- širina	50-300	80-50	100-600	400-1500	300-1500
Visina profila (mm)	120	160	180	200	100
Prečnik bunta (mm)					
- unutrašnji	500-750	580-760	600-750	500-760	600-750
- spoljašnji	900-1500	1000-1500	1000-1750	1000-1500	1000-2200
Maksimalna masa bunta (t)	3,5	5,0	7,5	10,0	16,0
Broj jedinica sa valj.	17	14	14	20	30
Prenosni odnos zupč.prenosnika	2,515	2,333	2,48	2,2	1
Prečnik valjka (mm)	165-477,22	245,6-572,9	280-694,4	304,4-669,6	478
Brzina obratka (m/min)	12-150	60-150	30-150	45-180	30-90
Dužina profila (mm)	3-12	3-12	3-12	6-12	3-12

Na sl.9.17. šematski je prikazano postrojenje za proizvodnju profila kombinovanim postupkom. Osim toga, ovo postrojenje omogućuje uzdužno zavarivanje profila, perforiranje i nanošenje zaštitnih prevlaka. Mašina je namenjena za oblikovanje profila širine 100-160mm od lima debljine 2-8 mm.

Postrojenje za oblikovanje profila sastoji se od niza agregata (sl. 9.17.) čija uloga je u nastavku ukratko prikazana.

Pomoću kрана bunt trake se postavlja na uređaj za odmotavanje 1, a zatim se lim uvodi u mašinu za ispravljanje 2. Odsecanje (poravnanje) početka i kraja trake izvodi se na stabilnim makazama 3. Zavarivanje



Sl.9.17. Obradni sistem za oblikovanje profila širine 100-600 mm od lima debljine 2-8 mm /28/

krajeva trake iz dva susedna bunta omogućuje agregat 4 stik postupkom. Pomoću uredjaja 5, 6 i 7 stvara se takozvana petlja, tj. rezerva dužine lima koja je potrebna da bi se omogućio kontinualni režim profilisanja. Petlja lima stvara se u prostoru ispod linije za profilisanje. Leteće makaze 8 omogućavaju odsecanje priprema na željenu dužinu u slučaju pojedinačnog profilisanja. Podmazivanje lima obavlja se pomoću specijalnog agregata 9.

Profilisanje lima izvodi se pomoću agregata 10 koji se sastoji od 14 grupa (stanova) valjaka. Sve valjke pokreću dva jednosmerna elektromotora snage 640 kW. Profilisanje se izvodi sa brzinom obratka od 150 - 180 m/min.

Postrojenje je takodje snabdeveno agregatom za uzdužno zavarivanje zatvorenih profila (11, 12 i 13) koji se sastoje iz jedinice za uvođenje profila (11), aparata za zavarivanje (12) i uredjaja za obradu šava (13).

Odsecanje otvorenih profila vrši se pomoću letućih makaza 14 a njihovo kalibrisanje i ispravljanje obezbedjeno je valjcima 15 i uredjajem 16.

Odsecanje zatvorenih profila vrši se pomoću letće testere 17. Maksimalna brzina kretanja obratka pri odsecanju je 80 m/min.

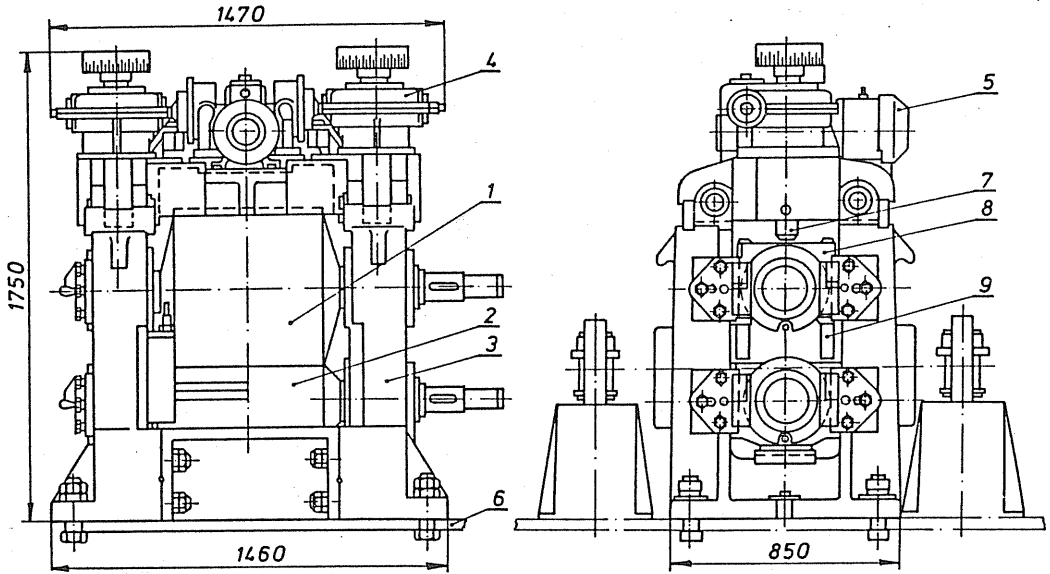
Agregat 18 namenjen je za čišćenje profila od emulizije koja se koristi za podmazivanje. Čišćenje se vrši komprimovanim vazduhom.

Pomoću rolganga 19 i 20 vrši se transport profila a na uredjaju 21 obavlja se pakovanje i vezivanje gotovih profila.

Konstrukcija jedne jedinice (strana) za profilisanje lima pomoću valjaka data je na sl.9.18. Valjci 1 i 2 smešteni su u robusno kućište 3 koje se sastoji od vertikalnih stubova i poprečnih traverzi. Pogon valjaka ostvaruje se preko zupčastog reduktora. Približavanje valjaka radi podešavanja zazora i vučne sile postiže se mehanizmom sa zavojnicom 4 koju pokreće elektromotor 5 preko prenosnika koji se sastoji od zupčanika i pužnog para. Zavojnica 7 prenosi kretanje na ležaj gornjeg valjka 8 i tako ostvaruje promenu zazora odnosno vučne sile. Fino podešavanje valjaka može se izvesti ručno pomoću ključa kojim se direktno okreće zavojno vreteno.

Blok jedinica za savijanje pomoću vijaka je vezana za postolje mašine 6.





Sl.9.18. Konstrukcija stana za profilisanje

## 10. FINO RAZDVAJANJE PRESOVANJEM

### 10.1. UVOD, DEFINICIJA, OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROCESA

Rezna površina kod konvencionalne obrade razdvajanjem sastoji se iz dva dela: manji deo površine - oko  $1/3$  preseka - ima relativno dobar kvalitet, dok je ostali, veći deo -  $2/3$  preseka - nastao lomljenjem i nižeg je nivoa kvaliteta. Ovakav raspored kvaliteta rezne površine kod konvencionalnog razdvajanja uslovljen je samim mehanizmom procesa.

Zbog relativno niskog kvaliteta rezne površine, obradci dobijeni konvencionalnim razdvajanjem mogu se koristiti samo za manje odgovorne delove, a ako su rezne površine funkcionalne, na njima se najčešće mora vršiti naknadna obrada. To u mnogome poskupljuje ukupnu cenu takvih obradaka.

Fino razdvajanje presovanjem (u daljem tekstu FRP) je takva obrada razdvajanjem kojom se dobijaju kvalitetne rezne površine po celom preseku i to u samo jednoj operaciji, bez naknadne obrade.

Na sl.10.1. prikazan je isti deo dobijen a) konvencionalnim i b) finim razdvajanjem. Uočljiva je razlika u kvalitetu rezne površine.

Suština ovog postupka sastoji se u tome da se pomoću posebnog elementa alata, konturnog zuba, ostvaruje promena naponskog stanja u zoni obrade i na taj način povećava potencijal deformabilnosti materijala.

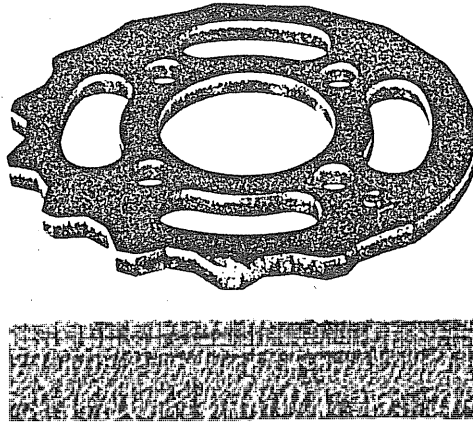
Kod konvencionalnog razdvajanja u zoni obrade prevladaju zatezne (pozitivne) naponske komponente, što dovodi do brzog stvaranja pukotina, a krajnji rezultat je presečna površina relativno niskog kvaliteta.

Pomoću konturnog zuba kod FRP se u zoni obrade stvaraju pritisne naponske komponente čime se povećava obradivost materijala tj. odlaze trenutak nastanka prve pukotine. Celokupna razdvojena površina nastaje kao rezultat kontrolisanog deformisanja a ne kao rezultat nastanka pukotine, zbog čega je njen kvalitet znatno viši.

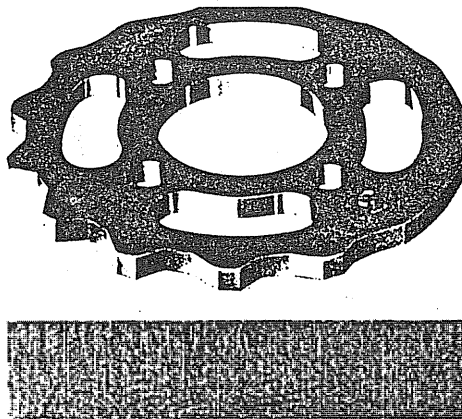
Primenom FRP ostvaruje se:

- završni kvalitet obradjene površine
- znatno veća tačnost obradjene površine

a) konvencionalno razdvajanje



b) fino razdvajanje presovanjem



Sl.10.1. Razlika u kvalitetu rezne površine dobijene /7/  
a) konvencionalnim i  
b) finim razdvajanjem

- proširenje primene obrade razdvajanjem

Da bi se ova obrada uspešno mogla obavljati neophodna je:

- posebna mašina trostrukog dejstva
- poseban alat sa konturnim zubom
- dovoljno obradiv materijal

U početku razvoja primena FRP je bila ograničena na relativno uzak asortiman proizvoda, pre svega na elemente mehaničkih biro mašina. Zbog svojih tehničkih i ekonomskih prednosti ova tehnologija se kasnije proširila i na sledeće obalsti:

- automobilska industrija (brave, karburatori, menjači, uredjaji za podešavanje nagiba sedišta, disk kočnice, električna instalacija ...),
- kućni aparati (mašine za pranje rublja i posudja, pegle, mikseri, kafe-mašine, tosteri, noževi),
- sportska oprema (vezovi za skije, klizaljke, oprema, za ribolov),
- komunikacioni uredjaji (telefoni, teleksi, radio, TV aparati),
- industrija satova, precizna industrija, foto-aparati, kamere,
- audio oprema (magnetofoni, gramofoni ...),
- elektro-industrija (utikači i razne vrste kontakata, preklopni mehanizmi),
- mašinska industrija (delovi najrazličitijeg oblika i dimenzija za razne sklopove mašina)

Celokupni tehnički razvoj uslovljava i promene u primeni FRP-a. Tako npr. udeo mehaničkih biro mašina je, kroz uvodjenje elektronskih mašina, naglo opao pa je i ovaj semgent primene FRP-a danas neznatan. Medjutim, istovremeno se otvaraju i nova polja primene, sa odgovarajućim specifičnostima i zahtevima, što uslovljava stalnu aktuelizaciju, razvoj i adaptaciju ove obrade u skladu sa novim uslovima. Prema podacima proizvođača mašina za FRP primena ove obrade u svetu je u permanentnom rastu.

Proces FRP ima niz prednosti u odnosu na konvencionalno razdvajanje.

Najglavnije prednosti su:

a) Visok kvalitet obradjene površine. Vrednost hrapavosti koja se dobija je  $R_a = 0,3-1,5 \mu\text{m}$  što zavisi od vrste materijala, debljine i oblika konture komada i od vrste podmazivanja.

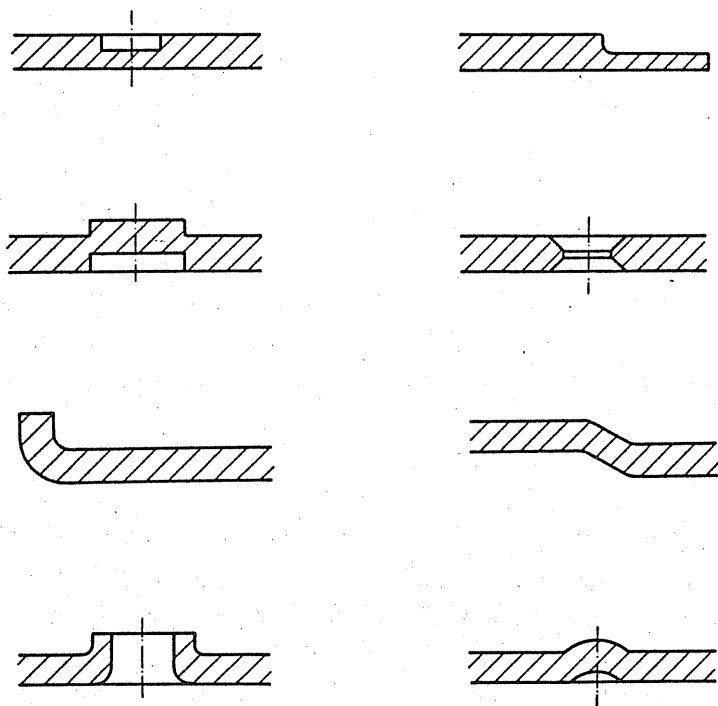
b) Tačnost dimenzija. U određenim slučajevima postiže se kvalitet IT6, dok je kvalitet površine kod konvencionalnog razdvajanja IT9-IT11.

c) Primenom FRP otpadaju sve naknadne obrade rezne površine (npr. kalibrisanje).

d) Primenom FRP proširuje se polje primene procesa razdvajanja.

e) U procesu FRP pored razdvajanja vrši se istovremeno i ravnanje obradka jer na njega u procesu, pored žiga, deluje i izbacivač sa protivsilom.

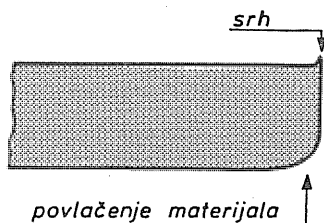
f) Proces FRP moguće je kombinovati sa drugim obradama deformisanja (savijanje, hladno deformisanje itd.) čime se proširuje mogući spektar delova obradaka (sl.10.2.).



Sl.10.2. Obrade koje se mogu kombinovati sa FRP

Ovom tehnologijom mogu se razdvajati materijali do debljine 16 mm. Idealna brzina je 15 mm/s. Nedostaci ovog procesa su:

- a) Pojava srha i povlačenja površine (sl.10.3.) na obradku. Ova geometrijska odstupanja u zavisnosti su od vrste materijala, oblika rezne linije i debljine materijala.
- b) Veći utrošak materijala usled potrebe utiskivanja konturnog zuba.
- c) Ograničenost primene procesa obzirom na materijal (videti poglavlje 10.3.4).



Sl.10.3. Pojava srha i povlačenja materijala

## 10.2. ANALIZA PROCESA

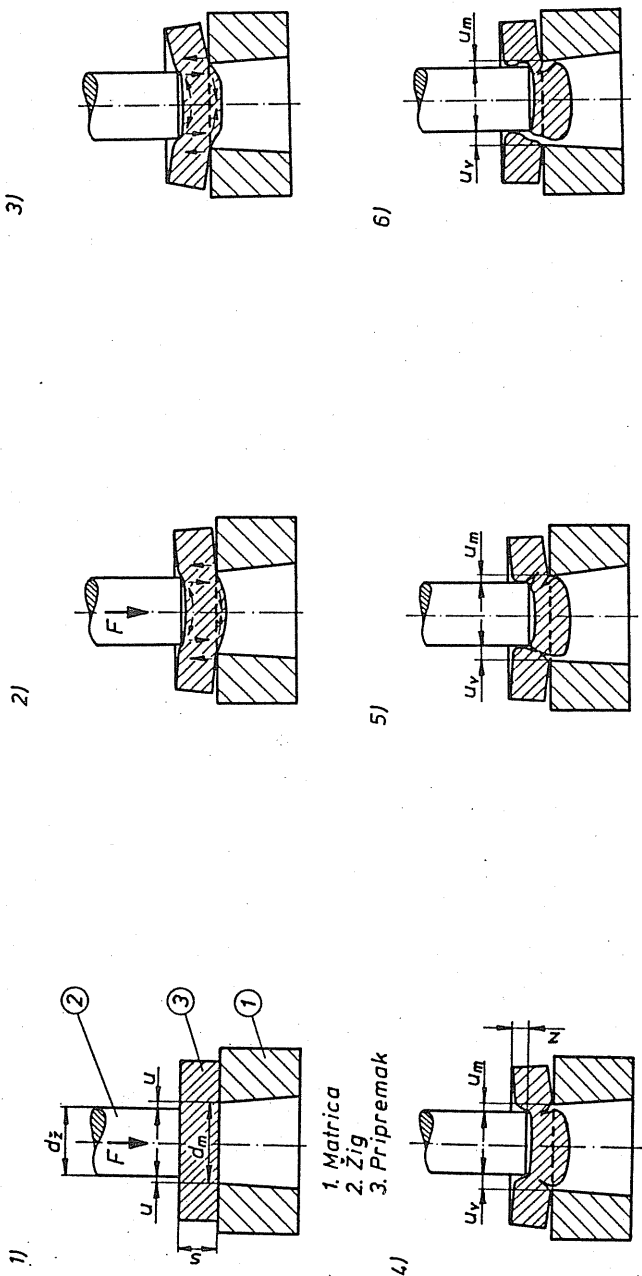
### 10.2.1. Odvijanje procesa

U cilju detaljnog sagledavanja suštine postupka FRP, biće uporedjene faze procesa konvencionalnog razdvajanja i FRP.

Faze procesa konvencionalnog razdvajanja za jedan kružni obradak prikazane su na sl.10.4. Prva faza (1) je početni položaj. Žig je manjeg prečnika od prečnika matrice a zazor je definisan kao:

$$u = \frac{d_m - d_{\dot{z}}}{2}$$

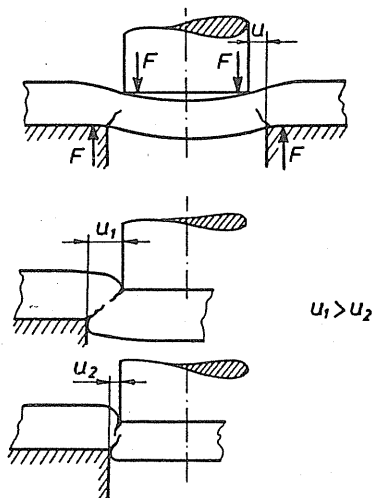
Pod dejstvom deformacione sile materijal se plastično deformiše i to tako da se sa strane žiga stvara prstenasta kontaktna površina unutar rezne linije a sa strane matrice sa vanjske strane rezne linije (faza 2). Preko ovih prstenastih površina prenose se sile sa strane alata na materijal i to u obliku sprega sila u vertikalnoj ravni. Ovaj spreg izaziva deformacije savijanja u zoni razdvajanja (faza 3) koje kao posledicu imaju pojavu zatežućih napona sa strane matrice i pritisnih napona sa strane žiga. U četvrtoj fazi zatežućii naponi prelaze granicu jačine materijala pa se pojavljuju pukotine - prvo sa strane matrice a kod mekših materijala i sa strane žiga (faza 5).



Sl.10.4. Faze procesa kod konvencionalnog razdvajanja

U zavisnosti od veličine zazora, pukotine sa strane matrice i sa strane žiga se susreću (ako je veći zazor) ili se mimoilaze (ako je manji zazor), sl.10.5. Kao rezultat odvijanja procesa konvencionalnog razdvajanja prema opisanim fazama dobija se rezna površina relativno niskog kvaliteta.

Samo jedan manji deo te površine nastao je deformisanjem dok je ostatak nastao lomljenjem materijala.



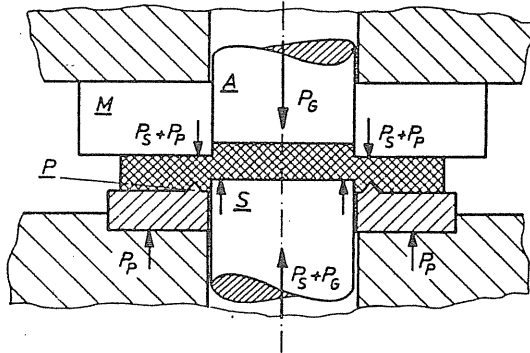
Sl.10.5. Položaj pukotina u materijalu u zavisnosti od veličine zazora

Obrada finog razdvajanja presovanjem odvija se prema sledećem principu (sl.10.6.): pre samog procesa razdvajanja u materijal se, na odgovarajućem odstojanju od rezne linije, utiskuje konturni zub, silom  $P_P$ . Istovremeno, na materijal se preko izbacivača deluje protivsilom  $P_G$ . Na taj način materijal je unutar rezne linije potpuno fiksiran žigom i izbacivačem. U takvom stanju počinje proces razdvajanja.

Razdvajanje se vrši dejstvom žiga na materijal. Nakon završetka procesa razdvajanja konturni zub i žig se vraćaju u svoj početni položaj a izbacivač izbacuje komad iz matice.

Odvijanje procesa po fazama prikazano je na sl.10.7. U pojedinim fazama obavljaju se sledeće radnje:



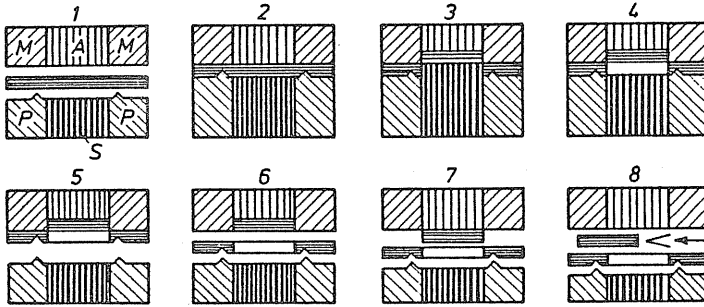


Sl.10.6. Princip obrade FRP

1. Alat je u početnom položaju, materijal se uvodi u radni prostor,
2. U materijal se utiskuje konturni zub uz istovremeno delovanje izbacivača. Na taj način materijal je potpuno fiksiran i spreman za početak procesa razdvajanja,
3. Odvijanje procesa razdvajanja kretanjem žiga. U ovoj fazi deluje sila razdvajanja (žiga), protivsila izbacivača i sila konturnog zuba,
4. Završeno kretanje žiga tj. proces razdvajanja. Obradak se nalazi u matrici. Žig se vraća u početni položaj,
5. Rasterećenje konturnog zuba i protivsile izbacivača, alat se "otvara" (tj. konturni zub se vraća u početni položaj),
6. Dejstvo izbacivača u cilju izbacivanja obradka iz matrice,
7. Gotov komad je izbačen iz matrice,
8. Izbacivanje gotovog komada iz zone obrade (najčešće pneumatski) i pomeranje trake za jedan korak, čime se postiže početni položaj alata i materijala.

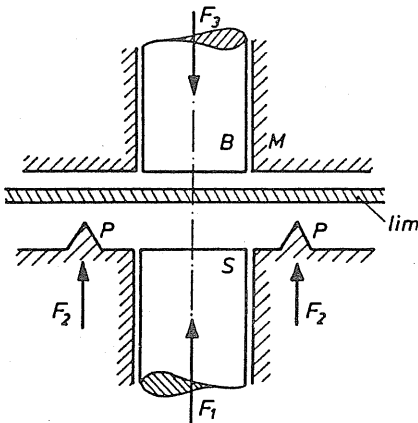
Na osnovu prikazanog principa obrade i njenih pojedinačnih faza moguće je uočiti da postoje znatne razlike između konvencionalnog razdvajanja i finog razdvajanja presovanjem. Ove razlike odnose se kako na sam alat i mašinu tako i na odvijanje procesa.

Osnovni elementi alata kod konvencionalnog razdvajanja su žig i matrica (sl.10.8.). Kod FRP (sl.10.8a), pored žiga (S) i matrice (M) pojavljuju se još i konturni zub (P) i izbacivač (B). Alat ima tri nezavisna dejstva: dejstvo žiga (glavno dejstvo), dejstvo konturnog zuba i izbacivača.

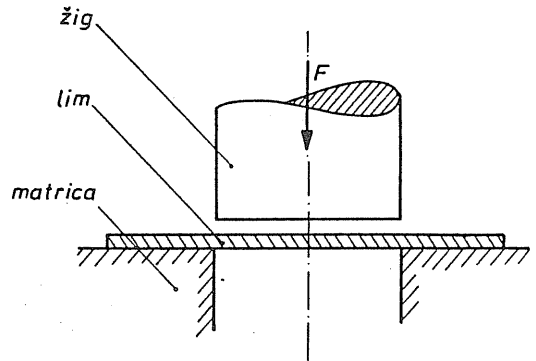


Sl.10.7. Faze procesa FRP

a)

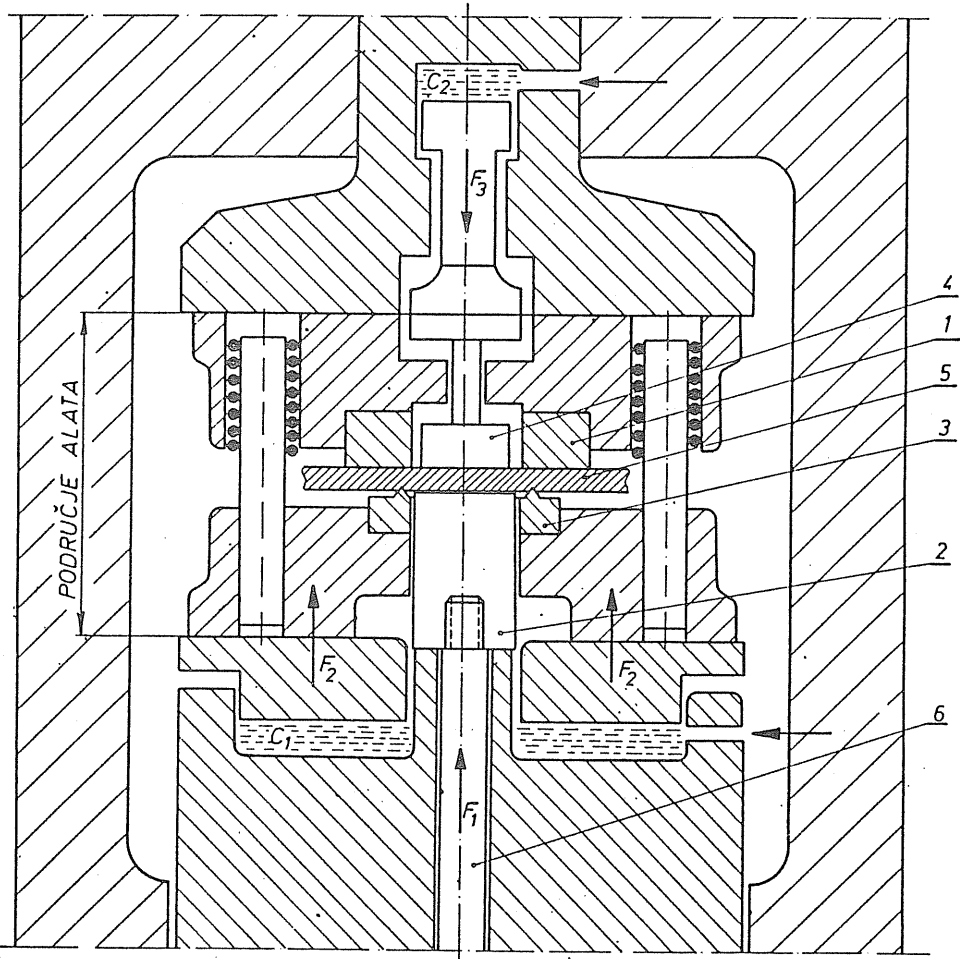


b)



Sl.10.8. Alat za konvencionalno i fizno razdvajanje

Kod konvencionalnog razdvajanja jedan od dva glavna elementa vrši kretanje a drugi je stacionaran. Izmedju žiga i matrice postoji određeni zazor. U materijalu se pojavljuju pretežno zatezni naponi koji vrlo brzo, već pri malom putu žiga, dovode do pojave prvih pukotina.



Sl.10.9. Alat za FRP i radni sto mašine /7/

- 1 - matrica; 2 - žig; 3 - konturni zub
- 4 - izbacivač; 5 - materijal (lim); 6 - nosač žiga

Kada je reč o mašini potrebnoj za odvijanje procesa, za konvencionalno razdvajanje dovoljna je mašina jednostrukog dejstva.

Za FRP neophodna je mašina sa tri nezavisna dejstva:

- dejstvo konturnog zuba,
- dejstvo žiga,
- dejstvo izbacivača.

Uočava se da kod FRP mašina ima tri odvojena izvora sile koja su neophodna za tri nezavisna kretanja elemenata alata. Prvo nezavisno kretanje je kretanje žiga koje se ostvaruje mehaničkim putem ( $F_1$ ). Druga dva kretanja tj. izvori sile (za konturni zub i izbacivač  $F_2$  i  $F_3$ ) su hidraulični (sl.10.9.).

U prvoj fazi procesa stvara se prednapon u materijalu utiskivanjem konturnog zuba duž rezne linije. Ovaj deo procesa obavlja se pod dejstvom sile  $F_2$  koja nastaje kao rezultat pritiska hidraulične tečnosti u cilindru prese  $C_1$ . Preko elemenata prese i alata ova sila se prenosi na konturni zub. Silom  $F_3$ , koja nastaje u cilindru prese  $C_2$ , dejstvuje se izbacivačem na materijal.

Sam proces razdvajanja obavlja se pod dejstvom rezne sile  $F_1$ , koja se mehaničkim putem, od elektromotora, preko zupčastih prenosnika, prenosi na nosač žiga (6) tj. žig.

Nakon završenog procesa razdvajanja izbacivač (4) uz pomoć sile  $F_3$ , koja se ostvaruje hidraulično, izbacuje radni predmet iz matrice.

Potrebno je napomenuti da postoje i izvedbe mašina gde su sva tri kretanja - dakle i kretanje žiga - hidraulična. To se odnosi, pre svega, na prese većih sila.

#### 10.2.2. Naponsko stanje u procesu i konturni zub

Kako je u predhodnom poglavlju rečeno, kod konvencionalnog razdvajanja se u materijalu sa strane matrice pojavljuju zatežući naponi koji već u ranoj fazi obrade dovode do pukotine u materijalu. Pojava pukotine predstavlja završetak kontrolisanog deformisanja a kao krajnji rezultat pojavljuje se rezna površina niskog kvaliteta.

Kod finog razdvajanja presovanjem specijalnom konstrukcijom alata ostvaruje se promena naponskog stanja u zoni deformisanja i to tako da se umesto zatežućih naponskih komponenti u toj zoni generišu pritisne naponske komponente. Na taj način povećava se deformabilnost materijala i sprečava nastanak pukotine u materijalu.

Element alata pomoću koga se mehaničkim putem vrši promena naponskog stanja u zoni deformisanja je konturni zub. Neposredno pre dejstva žiga na materijal konturni zub se utiskuje u materijal sa određenom silom (videti odeljak 10.2.3. i 10.3.3.) na određenom rastojanju od rezne linije. Kretanje konturnog zuba je potpuno nezavisno od kretanja žiga i ono se ostvaruje hidrauličnim putem.

### 10.2.3. Deformaciona sila

Kada se razmatra problematika sila u procesu FRP uobičajeno je da se navede ukupna sila procesa kao zbir tri nezavisne komponente:

Ukupna sila je:

$$F = F_1 + F_2 + F_3$$

gde su:

$F_1$  - deformaciona sila razdvajanja

$F_2$  - pritisna sila konturnog zuba

$F_3$  - protivsila izbacivača

U tom smislu oznake mašina za FRP sadrže u sebi vrednost sile rezanja i ukupne sile. Npr. mašina tipa 50/80 ima silu rezanja od 500 kN a ukupnu silu 800 kN.

U daljem tekstu biće analizirane sve tri komponente ukupne sile.

Sila razdvajanja u svakom trenutku procesa iznosi:

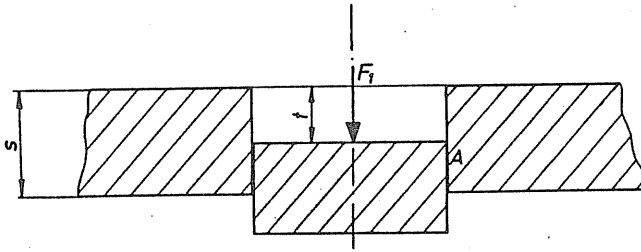
$$F_1 = A \cdot K_S \quad (10.1)$$

$A$  - trenutna površina preseka

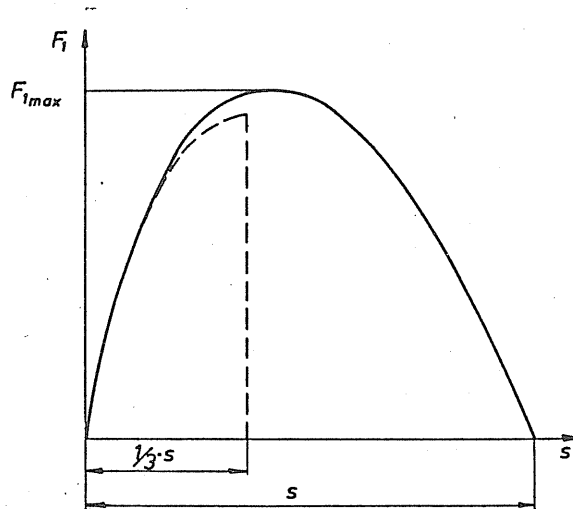
$K_S$  - smičući specifični deformacioni otpor

Veličina ( $A$ ,  $K_S$ ) u toku procesa su promenljive i to u obrnutom smislu: veličina "A" se u toku procesa smanjuje a " $K_S$ " povećava (sl.10.10.).

I zavisnosti sile (10.1.) od puta žiga je promenljiva (sl. 10.11.). Sa slike se uočava da sila u početku raste, da u jednom trenutku postigne svoj maksimum, da bi na kraju procesa (put žiga - debljina materijala) sila pala na nulu.



Sl.10.10. Proces razdvajanja



Sl.10.11. Tok sile razdvajanja

Na istoj slici prikazana je isprekidanom linijom i zavisnost sila - put za konvencionalno razdvajanje. Uočava se da približno na putu žiga  $h_z = (1/3)s$  dolazi do naglog pada sile na nulu. To je zbog toga što u tom trenutku dolazi do stvaranja pukotine u preostalom delu poprečnog preseka.

Izraz (10.1.) može se, uzimajući u obzir oznake sa sl.10.10. prikazati kao:

$$F_1 = l(s-t)K_S = ls(1 - \frac{t}{s}) K_S \quad (10.2.)$$

l - dužina rezne linije

s - debljina materijala

Maksimalna vrednost sile dobija se ako se umesto " $K_S$ " u jednačini (10.2.) uvrsti vrednost za zateznu čvrstoću  $\sigma_m$ . (Ovo je opravdano ako se uzme u obzir analogija procesa kidanja na kidalici i razdvajanja).

$$F_{1\max} = l \cdot s \left(1 - \frac{t'}{s}\right) \sigma_m$$

$t'$  - veličina prodiranja žiga u materijal pri kojoj se pojavljuje maksimalna sila

Izraz:

$$\left(1 - \frac{t'}{s}\right) \sigma_m \quad (10.3.)$$

predstavlja specifični otpor smicanja uzet kao srednja vrednost za celu smičuću površinu.

Faktorom "C" definiše se izraz:

$$C = 1 - \frac{t'}{s} \quad (10.4.)$$

Za krte materijale maksimalna sila se postiže već kod vrlo malih hodova žiga ( $t' \approx 0$ ) pa je specifični otpor definisan izrazom (10.3.) jednak zateznoj čvrstoći  $\sigma_m$ . Za deformabilne materijale maksimalna vrednost sile postiže se na većim dubinama prodiranja žiga pa je specifični otpor (10.3.) manji od  $\sigma_m$ .

Veličina "C", dakle, zavisna je od materijala, tačnije od odnosa  $\sigma_v/\sigma_m$ . Na sl.10.12. dat je dijagram zavisnosti:

$$C = f \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_m}\right)$$

Na osnovu poznate vrednosti faktor "C" kao i vrednosti za zateznu čvrstoću i geometriju obradka dobija se veličina sile razdvajanja FRP kao:

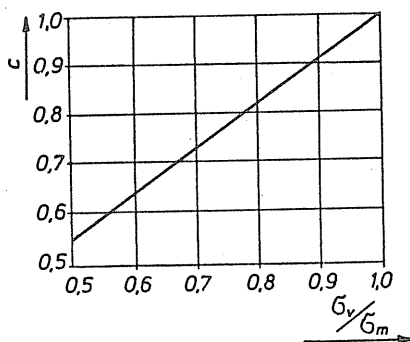
$$F_1 = l \cdot s \cdot C \cdot \sigma_m \quad (10.5.)$$

Veličina sile sa kojom se konturni zub utiskuje u materijal iznosi:

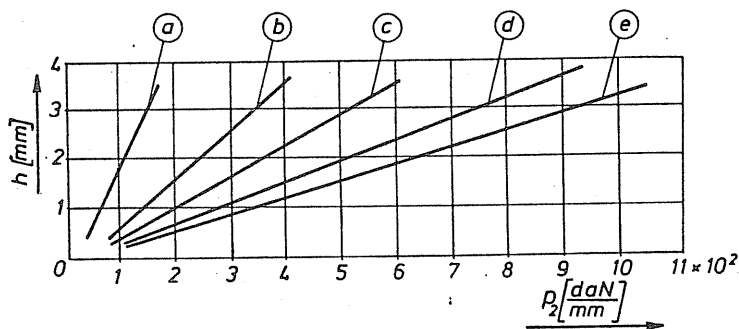
$$F_2 = l_z \cdot P_2 \quad (10.6.)$$

$l_z$  - dužina konture zuba

$p_2$  - jedinična pritisna sila (N/mm). Njene vrednosti dobijaju se iz dijagrama (sl.10.13.) u zavisnosti od visine zuba "h" i materijala.



Sl.10.12. Zavisnost faktora "C" od materijala



a - Al; b - Cu; c - čelici za cementaciju; d - mesing AlMgSi  
e - čelici otporni na kiselinu i nerdjajući čelici

Sl.10.13. Medjuzavisnost dubine utiskivanja i jediničnog pritiska

Sila izbacivača potrebna je da bi se obradak izbacio iz matrice ali isto tako se u toku procesa pomoću ove sile obradak može ispravljati, savijati ili nešto u njega utisnuti (npr. znak, oznaku, naziv, itd.).

Veličina ove sile izračunava se kao:

$$F_3 = p_3 \cdot A_0 \quad (\text{daN}) \quad (10.7.)$$

$A_0$  - površina obradka ( $\text{mm}^2$ )

$p_3$  - specifični pritisak (MPa). Preporučene vrednosti za taj pritisak su:  $p_3 \approx 20-70$  (MPa)



Ukupna sila, uzimajući u obzir (10.1.), (10.5.), (10.6.) i (10.7.) iznosi:

$$F = l \cdot s \cdot c \cdot \sigma_m + l_z \cdot p_2 + p_3 \cdot A_o \quad (10.8.)$$

#### 10.2.4. Deformacioni rad

Ukupni deformacioni rad kod finog razdvajanja presovanjem znatno je veći nego što je to kod konvencionalnog razdvajanja. Ovo proizilazi iz činjenice da kod konvencionalnog razdvajanja relativno brzo dolazi do faze nastanka pukotina u materijalu, što znači da je površina u F-s dijagramu (sl.10.11.) za konvencionalno razdvajanje znatno manja nego kod FRP.

Obzirom na postojanje 3 nezavisne sile, i ukupni deformacioni rad se može razčlaniti na 3 komponente:

- rad sile razdvajanja  $F_1$  se izračunava kao:

$$W_1 = f_c \cdot l \cdot s^2 \cdot \sigma_m \quad (10.9.)$$

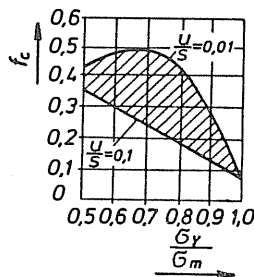
Faktor " $f_c$ " u gornjoj jednačini zavistan je od materijala (odnos  $\sigma_v / \sigma_m$ ) i specifičnog zazora (u/s) a dobija se očitavanjem sa dijagrama (sl.10.14.).

- rad pritisne sile konturnog zuba  $F_2$  dobija se kao:

$$W_2 = \frac{1}{2} F_2 \cdot h = \frac{1}{2} l_z \cdot p_2 \cdot h \quad (10.10.)$$

- rad protiv sile  $F_3$ :

$$W_3 = F_3 \cdot s = p_3 \cdot A_o \cdot s \quad (10.11.)$$



Sl.10.14. Veličina faktora " $f_c$ "

(oznake u gornjim izrazima odgovaraju oznakama iz odeljak (10.2.3.).

Ukupni deformacioni rad predstavlja zbir gore navedena 3 elementarna rada:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (10.12.)$$

### 10.3. PROJEKTOVANJE PROCESA

#### 10.3.1. Tehnološkičnost obradka

Prilikom konstrukcije dela kojeg treba izraditi tehnologijom FRP, pored osnovnog zahteva, a to je mogućnost izvršavanja određene funkcije, neophodno je voditi računa i o mogućnostima izrade tog dela obradom FRP.

Kvalitetan obradak, uz minimalni utrošak materijala i maksimalnu postojanost alata može se postići samo ako je taj obradak konstruisan tako da zadovolji uslove tehnološkičnosti finim razdvajanjem (FRP).

U tom pogledu postoje određena pravila vezana za geometrijski oblik obradka kojih se treba pridržavati prilikom konstrukcije dela koji će se kasnije izradivati FRP.

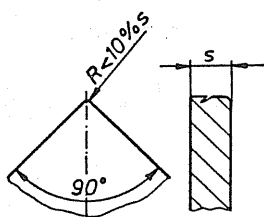
U daljem tekstu biće prikazana neka od najvažnijih pravila iz domena tehnološkičnosti obradka.

Radijus zaobljenja na obradcima mora imati određenu minimalnu vrednost koja zavisi od debljine materijala i ugla pod kojim se nalaze ivice koje se spajaju preko tog radijusa. Ako je radijus zaobljenja manji od dozvoljenog, dolazi do pojave pukotine na tom delu rezne površine. Na sl.10.15. prikazan je deo obradka čije se ivice susreću pod uglom od  $90^\circ$ . Kao posledica nedovoljno velikog radijusa zaobljenja (sl.10.15a.) pojavljuje se pukotina na presečnoj površini dok se kod pravilno izabranog radijusa (sl.10.15b.) dobija kvalitetna rezna površina.

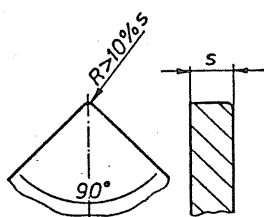
Veličina radijusa zaobljenja može se odrediti pomoću dijagram (sl.10.15c.). Na apscisi tog dijagrama je radijus zaobljenja a na ordinati debljina materijala. Očitavanje se vrši za razne veličine uglova pod kojim se susreću ivice dela ( $\alpha = 30^\circ - 120^\circ$ ). U zavisnosti od debljine materijala i tog ugla, očitava se veličina radijusa zaobljenja (Primer: debljina materijala 5 mm, ugao  $\alpha = 60^\circ$ , minimalni radijus zaobljenja 1,4 mm).

Minimalno rastojanje između spoljnje i unutrašnje konture (sl. 10.16a. i b.) zavisno je od debljine materijala. Ova zavisnost prikazana

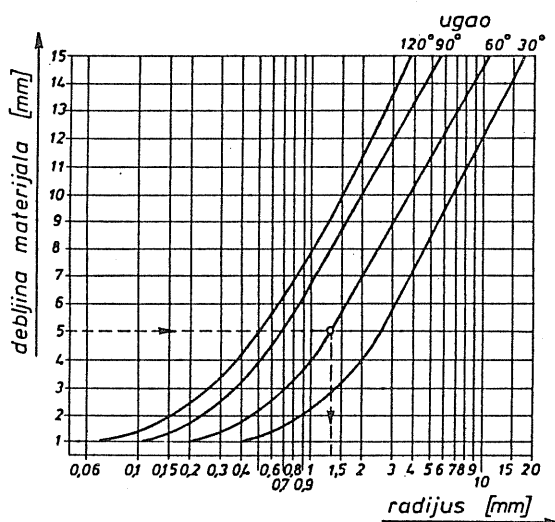
a)



b)



c)

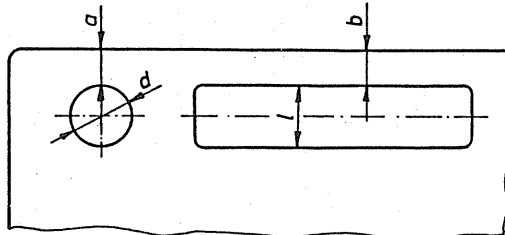


Sl.10.15. Određivanje minimalnog radijusa /7/

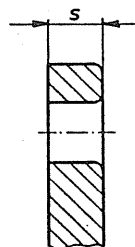
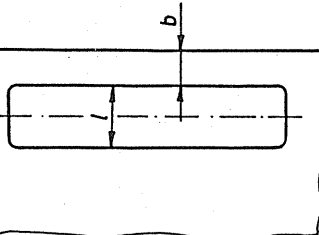
je na (sl.10.17.) gde se, u zavisnosti od debljine materijala dobija vrednost mosta "a" i to u procentualnom iznosu od debljine materijala.

Ako se radi o dugačkim otvorima (sl.10.16b.) tzv. šlicevima, onda je minimalna veličina mosta zavisna i od dužine šlica. Na sl.10.18. je dat dijagram za određivanje minimalne veličine mosta u zavisnosti od debljine materijala i dužine otvora (šlica).

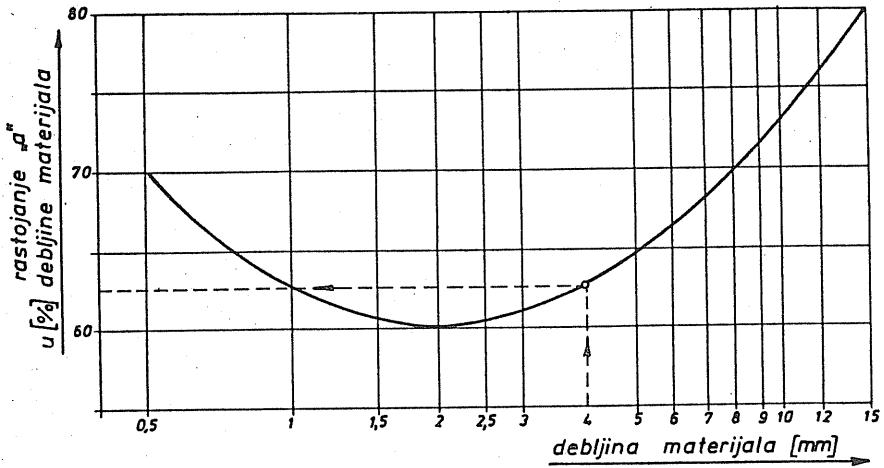
a)



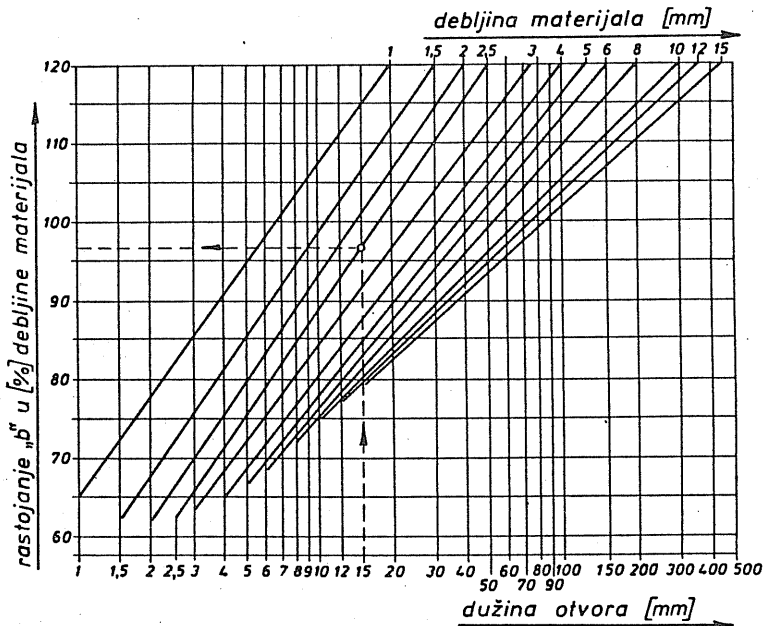
b)



Sl.10.16. Minimalno rastojanje izmedju unutrašnje i spoljne konture /7/

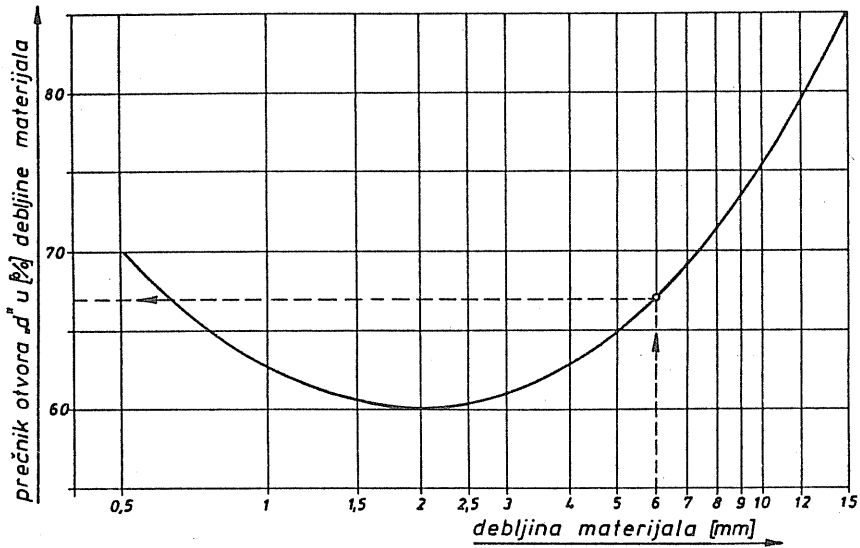


Sl.10.17. Zavisnost minimalne debljine mosta od debljine materijala /7/

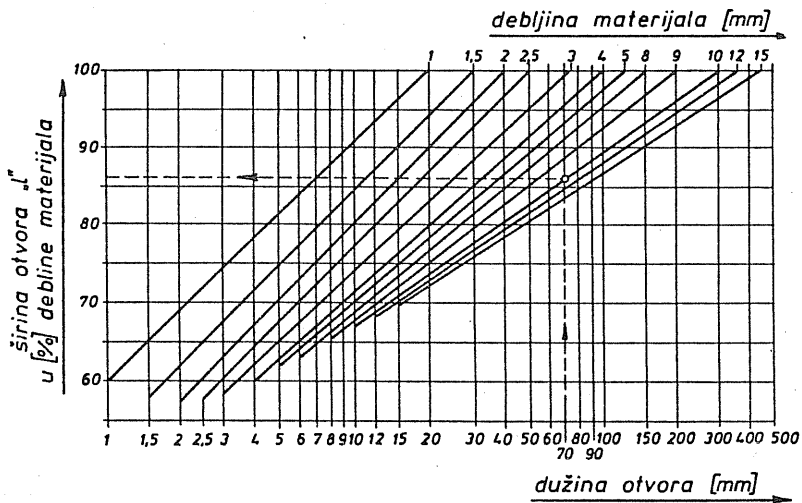


Sl.10.18. Zavisnost minimalne debljine mosta od debljine materijala i dužine otvora /7/

Minimalni prečnik otvora koji se može dobiti FRP takodje je zavislan od debljine materijala (sl.10.19.) a širina dugačkog otvora (šlica), pored debljine materijala zavisi i od dužine šlica (sl.10.20.).



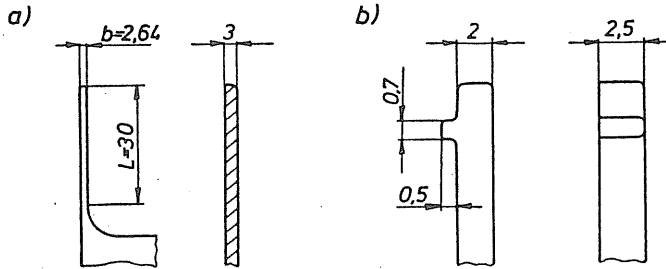
Sl.10.19. Minimalna veličina otvora "d" /7/



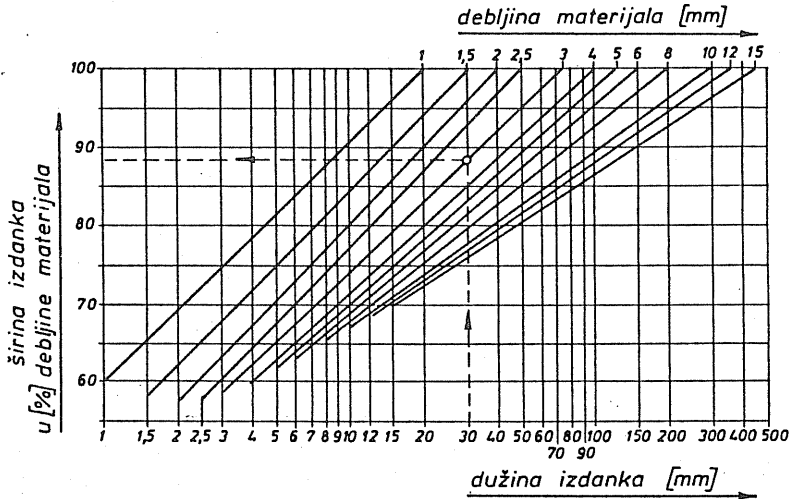
Sl.10.20. Minimalna širina otvora "l" /7/

Vrlo uspešno se FRP mogu dobiti i elementi ozubljenja (zupčani-  
ci, zupčaste letve, nazubljeni segmenti i sl.). Osnovni preduslov za iz-  
radu ozubljenja ovom tehnologijom je da debljina zuba na podeonom kru-  
gu iznosi najmanje 60% debljine materijala. Pored toga, prelazi na podnož-  
ju i na čelu zuba moraju biti u skladu sa preporukama o minimalnoj ve-  
ličini radijusa zaobljenja.

Kod oblika sa dugim izdancima (sl.10.21.) postoji ograničenje u pogledu širine tih izdanaka "b". Ova širina zavisna je od debljine mate-



Sl.10.21. Oblici sa izdancima



Sl.10.22. Oblici sa dugim izdancima /7/

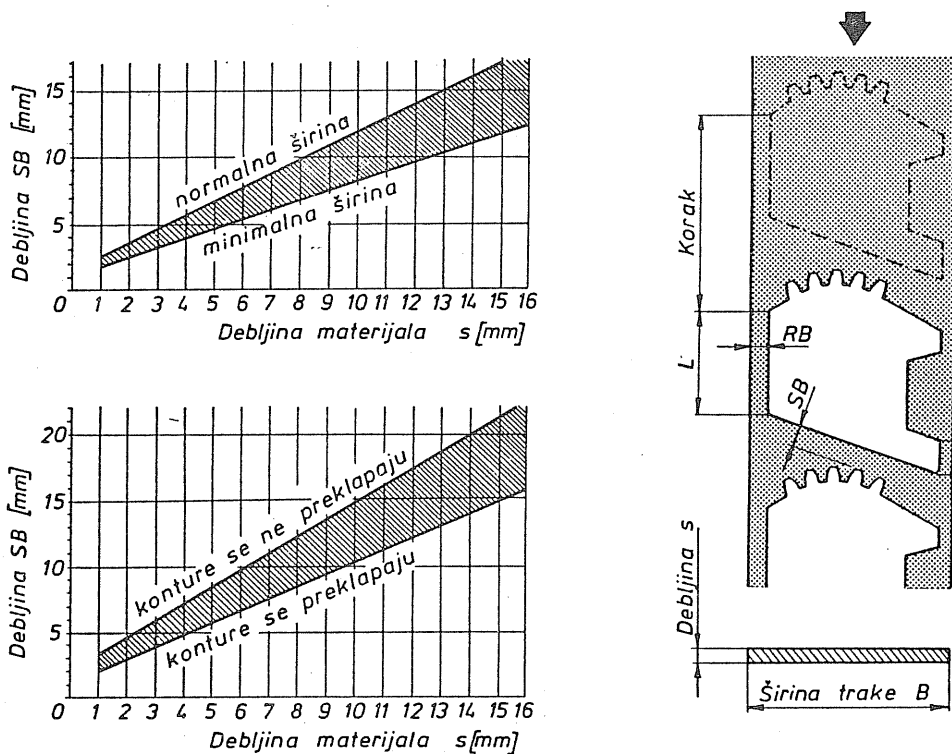
rijala i od dužine izdanka. Sa dijagrama (sl.10.22.) moguće je odrediti minimalnu debljinu izdanka (Primer:  $L=30$  mm,  $s=3$  mm,  $b=0,88.3=2,64$  mm).

Na sl.10.23. prikazan je način izrade jednog dela iz trake, širine B. Deo je na jednom svom segmentu nazubljen. Sam položaj obradka u traci treba da obezbedi:

- maksimalno iskorišćenje materijala
- mesto za utiskivanje konturnog zuba
- dovoljnu krutost preostale trake radi bezbednog kretanja trake.

Potrebno je napomenuti da se dozvoljava preklapanje utisnutih kanala konturnog zuba.

Pored samog prikaza položaja obradka u traci, na sl.10.23. su date vrednosti za debljinu mosta izmedju ivice trake i rezne linije kao



Sl.10.23. Položaj obradka u traci

i izmedju dve rezne linije. Za ovaj drugi slučaj date su dve vrednosti za SB: ako se konture konturnog zuba a) preklapaju i ako se b) ne preklapaju.

U okviru procesa FRP, pored samog procesa razdvajanja mogu biti uključene i druge operacije kojima se vrši kompletna izrada i komplikovanih delova. Neke od tih dodatnih operacija koje se mogu izvršiti u toku procesa FRP prikazane su na sl.10.2. Jasno je da u tom slučaju alat za FRP mora sadržavati dodatne elemente koji svojim dejstvom omogućuju izvodjenje određene dodatne operacije.

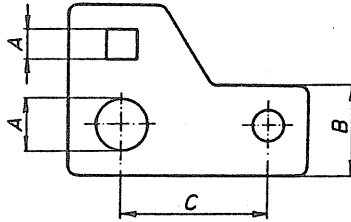
Tačnost delova koji se dobijaju FRP zavisi od:

- tačnosti alata
- kvaliteta materijala
- debljine materijala
- složenosti geometrijskog oblika dela

U tabeli T.10.1. date su orijentacione vrednosti za tačnost:

- unutrašnjih oblika (A)
- spoljašnjih oblika (B)
- rastojanje otvora (C)

T-10.1. Tačnost obrade



ISO-Tolerancije

Debljina /mm/	A	B	C
do 1	IT 7	IT 7	IT 7 + 0,02 mm
od 1 do 2,5			IT 7 + 0,03 mm
2,5 4		IT 8	IT 7 + 0,04 mm
4 6,3	IT 9		IT 7 + 0,06 mm
6,3 10		IT 8	IT 10
10 16	IT 9		

Tolerancija ( $\mu\text{m}$ )

	Oblast mere (mm)												
	od 1 do 3	3 6	6 10	10 18	18 30	30 50	50 80	80 120	120 180	180 250	250 315	315 400	400 500
IT 7	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63
IT 8	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97
IT 9	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155
IT 10	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250



Vrednosti u tabeli T-10.1. su u zavisnosti od debljine materijala. Primer prema slici:  $s=7$  mm,  $A=9$  mm,  $B=22$  mm,  $C=35$  mm.

Tolerancije koje je moguće postići:

Dimenzije	Kvalitet	Tolerancija
A	IT 8	0,022 mm
B	IT 9	0,052 mm
C	IT 7 + 0,06	0,085 mm

Hrapavost rezne površine zavisi od:

- stanja alata
- kvaliteta materijala
- podmazivanja

Uobičajene vrednosti hrapavosti  $R_a$  koje se mogu dobiti FRP date su u tabeli T-10.2.

T-10.2. Hrapavost obradjene površine

Klasa hrapavosti	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Stanje alata
N6	0,8	Posebne mere održavanja alata
N7	1,6	Normalno održavanje
N8	3,2	Duži intervali između dva oštrenja (brušenja) aktivnih elemenata alata
N9	6,4	

Kod FRP uvek dolazi do određenog povlačenja materijala (sl.10.3.) koje je, međutim, znatno manje nego što je to slučaj kod klasičnog razdvajanja.

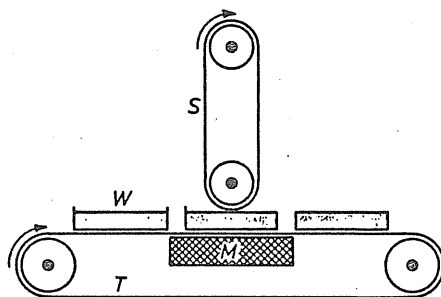
Povlačenje je veće kod debljih limova i kod oblika sa manjim radijusima zaobljenja. Kod izrade nekih oblika zupčanika ovo povlačenje može biti i do 30% od debljine materijala. U takvim slučajevima smanjenje veličine povlačenja postiže se primenom matrice sa konturnim zubom. Ovaj dodatni konturni zub, za razliku od konturnog zuba na pritisnoj ploči ne mora da prati konturu zupčanika nego je dovoljno da je kružnog oblika.

Povećavanjem veličine protivpritisaka na izbacivaču takodje je moguće smanjiti veličinu povlačenja.

Pojava srha takodje je česta pojava kod operacije FRP. Na veličinu srha utiče vrsta materijala, kvalitet alata i zazor između žiga i matrice.

Preveliki srh može se smanjiti brušenjem (oštrenjem) alata i povećanjem zazora.

Potpuno odstranjivanje srha vrši se nakon operacije FRP postupkom brušenja na posebnom uređaju (sl.10.24.).



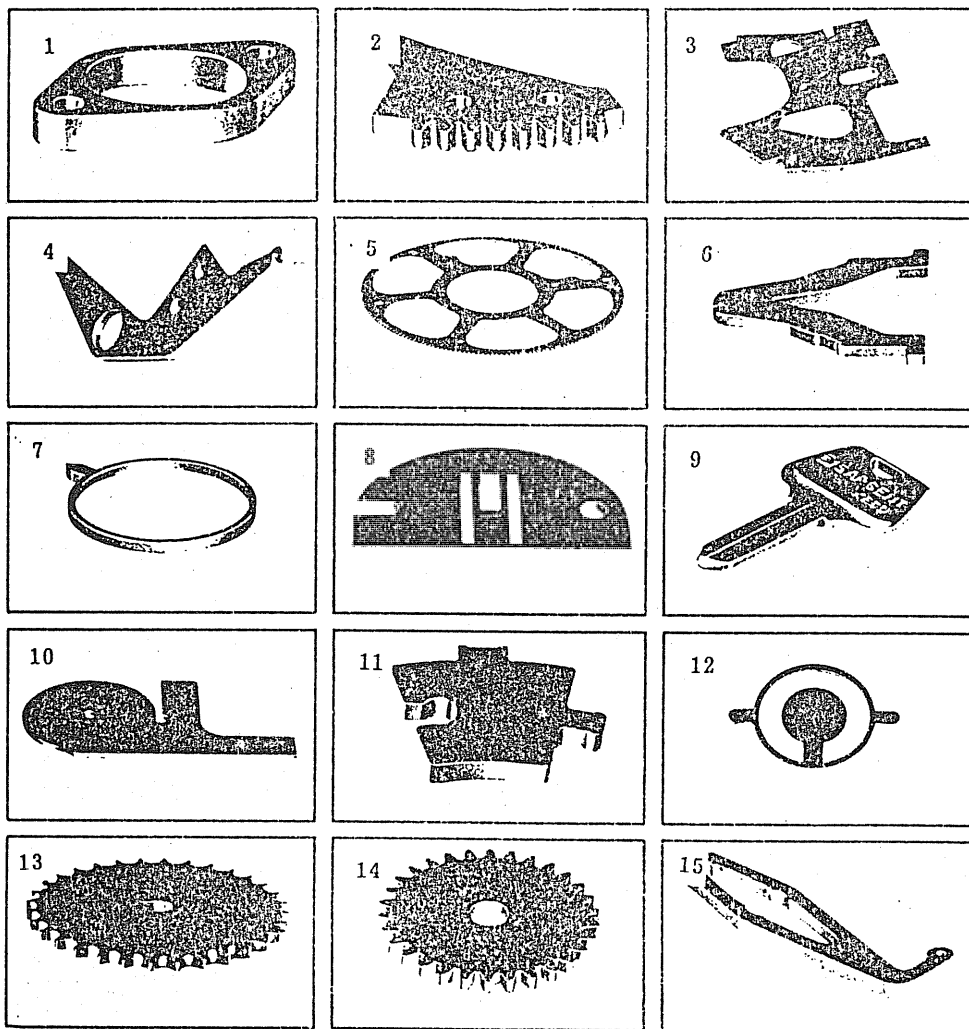
*S*-brusna traka  
*W*-komad  
*M*-magneti  
*T*-transportna traka

Sl.10.24. Uređaj za skidanje srha

Na transportnu traku postavljaju se komadi sa kojih je potrebno skinuti srh. Ispod pokretne trake nalaze se magneti koji se kreću zajedno sa trakom i koji fiksiraju komade. Brusna traka (S) je u kontaktu sa komadima i svojim kretanjem vrši skidanje srha. Pri tome je potrebno intenzivno podmazivanje.

Na jednom uređaju takve vrste moguće je odstraniti srh na 200-4000 delova/čas.

Mogućnosti primene tehnologije FRP ilustrirane su na sl.10.25. na kojoj su prikazani delovi različitih oblika dobijeni ovom obradom.



1 - vozila, 2 - tekstilne mašine, 3 - biromašine, 4 - audioelektronika  
5 - telefonija, 6 - električni aparati, 7 - optički aparati, 8 - šivače  
mašine, 9 - ključevi, 10 - merni alati, 11 - avio-industrija, 12 - oruž-  
je, 13 - poljoprivredne mašine, 14 - opšte mašinstvo, 15 - aparati za  
domaćinstvo

Sl.10.25. Delovi izradjeni tehnologijom FRP

### 10.3.2. Rezni zazor

Jedan od najvažnijih uticaja na kvalitet površine jeste zazor između žiga i matrice. Pri razmatranju ovog problema postoje dva suprotna stanovišta: stanovište postojanosti alata i stanovište kvaliteta obrađene površine. Smanjenjem zazora poboljšava se kvalitet površine ali se istovremeno smanjuje postojanost alata i obrnuto. Zbog toga je potrebno pronaći kompromisna rešenja koja daju zadovoljavajuće rezultate kako sa stanovišta postojanosti alata tako i sa stanovišta kvaliteta površine.

Preporučene vrednosti od strane firme "Feintool" koja proizvodi ove alate date u tabeli T-10.3. u zavisnosti od debljine materijala i oblika obradka predstavljaju takva kompromisna rešenja.

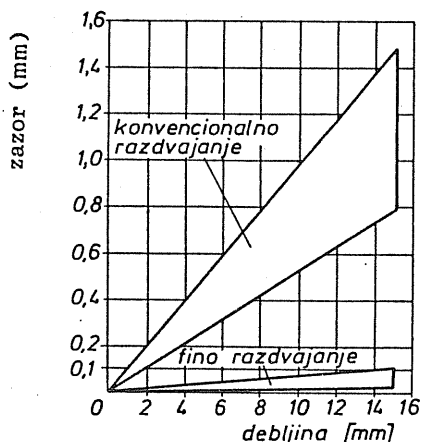
Tabela 10.3. Zavisnost zazora od debljine materijala

debljina materijala s(mm)	spoljni oblici	unutrašnji oblici	unutrašnji oblici $\theta=s$	unutrašnji oblici $\theta 2,5 s$
0,1	1% <sub>s</sub>	2,5% <sub>s</sub>	2% <sub>s</sub>	1% <sub>s</sub>
1	1%	2,5%	2%	1%
2	1%	2,5%	1%	0,5%
3	1%	2%	1%	0,5%
4	1%	1,7%	0,75%	0,5%
6	1%	1,7%	0,5%	0,5%
10	1%	1,5%	0,5%	0,5%
15	1%	1%	0,5%	0,5%

Na dijagramu (sl.10.26.) grafički su prikazane oblasti potrebnih zazora za konvencionalno i fino razdvajanje presovanjem u zavisnosti od debljine lima.

Vidi se da je potrebni zazor za fino razdvajanje presovanjem koji garantuje dobar kvalitet površine reda veličina  $10^{-1}s$  gde je s - zazor pri konvencionalnom razdvajanju.

Pored veličine zazora naročito je važno da taj zazor bude ravnomerno raspodeljen po celoj dužini rezne linije.



Sl.10.26. Potreban zazor za fino i konvencionalno razdvajanje

### 10.3.3. Konturni zub

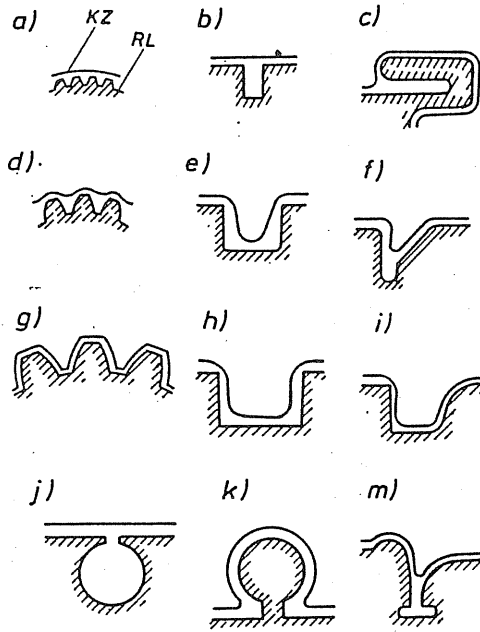
Konturni zub je poseban deo alata za FRP i njegov zadatak je da svojim dejstvom na materijal ostvari promenu naponskog stanja u zoni obrade, tj. poveća deformabilnost.

Aktiviranje i funkcionisanje konturnog zuba u sklopu rada kompletnog alata prikazano je u odeljcima 10.2.1. i 10.2.2. Konturni zub prati reznu liniju na odredenom rastojanju. Za tanje limove on se nalazi samo na pritisknoj ploči dok se, za limove debljine  $s > 5$  mm, konturni zub nalazi kako na pritisknoj ploči tako i na matrici.

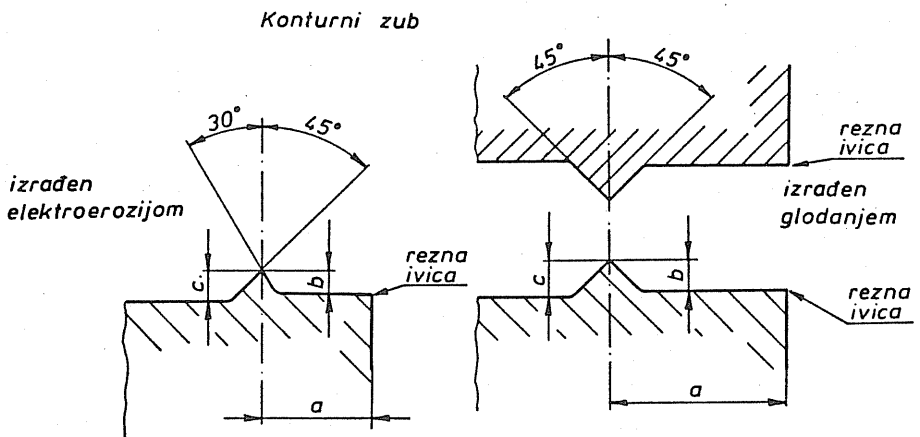
Na sl.10.27. dato je nekoliko primera medjusobnog položaja rezne linije (RL) i konturnog zuba (KZ). Uočava se da kod geometrijskih oblika sa malim krivinama konturni zub ne prati konsekventno reznu liniju (sl. 10.27a.) kao i kod obradaka sa udubljenjima (b,c,j).

Ne postoje egzaktno metode kojima bi se odredili geometrijski elementi konturnog zuba nego je to, za sada, uglavnom zasnovano na empiriji. Zbog toga u literaturi postoje donekle različiti podaci od različitih proizvođača alata za FRP, kada se radi o geometrijskim elementima konturnog zuba.

Na sl.10.28. i tabeli T-10.4. dati su podaci o geometriji konturnog zuba firme "Feintool". Uočava se da se preporučuje da za debljine lima  $s > 4$  mm konturni zub bude sa obe strane alata. Takođe se uočava



Sl.10.27. Tok konturnog zuba i rezne linije /17/.



Sl.10.28. Oblik i dimenzije konturnog zuba /2/

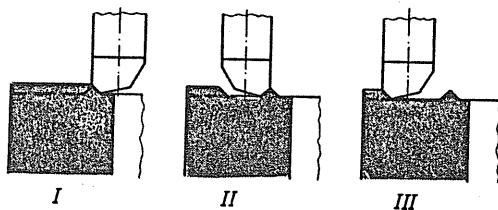
Tabela 10.4. Geometrija konturnog zuba

Debljina lima do 4 mm				Debljina lima preko 4 mm			
S	a	b	c	S	a	b	c
0,5	0,5	0,2	0,25	4,5	3,2	0,5	0,55
1	0,7	0,3	0,35	5	3,7	0,55	0,6
2	1,4	0,4	0,45	6	4,2	0,6	0,65
3	2,1	0,45	0,5	8	5	0,7	0,75
4	2,8	0,5	0,55	10	6	0,85	0,9

nesimetričnost konturnog zuba u odnosu na vertikalnu osu (uglovi  $35^{\circ}$  u  $45^{\circ}$ ) ako je konturni zub samo na pritisnoj ploči.

Konturni zub se izrađuje ili glodanjem (konvencionalnim ili kopirnim) ili elektroerozijom.

Izrada konturnog zuba glodanjem ima tu prednost što ona ne utiče na promenu strukture materijala. Izvodi se obično u tri faze (sl. 10.29.):



Sl.10.29. Izrada konturnog zuba glodanjem

- glodanje unutrašnje strane
- glodanje spoljne strane
- glodanje ostalog dela površine.

#### 10.3.4. Materijali za FRP

Da bi se dobili optimalni rezultati kod obrade FRP, kako u pogledu kvaliteta reznih površina tako i u pogledu postojanosti alata, posebna pažnja mora se posvetiti problematici materijala pogodnih za ovu tehnologiju.

Kod konvencionalnog razdvajanja presovanjem ne postavljaju se strogi zahtevi u pogledu materijala koji se obradjuje. Ograničenja primene konvencionalnog razdvajanja sa stanovišta materijala praktično i ne postoje.

Za razliku od toga, kod FRP materijal mora posedovati odredjeni potencijal deformabilnosti da bi kvalitet rezne površine bio na zahtevanom nivou.

Finim razdvajanjem presovanjem mogu se obradivati čelici kao i obojeni metali i njihove legure.

Osnovni preduslovi za uspešnu primenu FRP jesu:

- kvalitetna površina lima
- struktura materijala koja je pogodna za FRP

#### 10.3.4.1. Čelici

Više od 90% delova dobijenih FRP su od čelika. Pri tome se upotrebljavaju:

- niskougljenični čelici (meki nelegirani čelici)
- ugljenični čelici
- legirani čelici
- nerdjajući čelici
- specijalni čelici

Niskougljenični čelici ( $C < 0,1\%$ ) su veoma pogodni za obradu FRP.

U ovu grupu spadaju:

Č.0146	Č.0147	Č.0148 (po JUS-u)
U St 12	R St 13	RR St 14 (po DIN-u)

Za dobar kvalitet obradaka je važno da sa površine lima pre obrade bude uklonjena voda i nečistoće, što se postiže bajcovanjem ili peskarenjem.

Ipak i kod ove grupe čelika mora se obratiti pažnja na ravnomernost strukture i nečistoće u čeliku, pogotovu ako se radi o debljim limovima i složenijim oblicima rezne linije.

Jedan od problema koji se može javiti u tom pogledu jeste mikrosegregacija, koja nastaje prilikom nejednakih uslova očvršćavanja čelika. Kao rezultat toga čelična traka može imati različiti hemijski sastav na ivici i sredini.



Posledice mikrosegregacije posebno su nepovoljne na složenijim delovima rezne linije (mali radijusi) i kod debljih limova.

Pored mikrosegregacije kod ove vrste čelika može doći do poja-ve slojevitosti mikro strukture (slojeviti raspored ferita, perlita i ne-metalnih mikro uključaka), što takodje negativno utiče na kvalitet rez-  
ne površine.

Mikrosegregacija i slojevitost strukture uklanjaju se homogeniza-  
cionim žarenjem.

Negativan uticaj na proces FRP imaju nemetalni uključci koji se u većoj ili manjoj meri uvek nalaze u materijalu. Ovi uključci ne pose-  
duju plastična svojstva pa su često inicijatori nastanka pukotina. Zbog toga je od značaja da čelik koji se upotrebljava u FRP sadrži što manje nemetalnih uključaka.

U grupu ugljeničnih čelika koji se koriste za FRP spadaju:

Č.1220    Č1330    Č1530    Č1730

Sadržaj ugljenika kod ovih čelika je od 0,15%-1,1%.

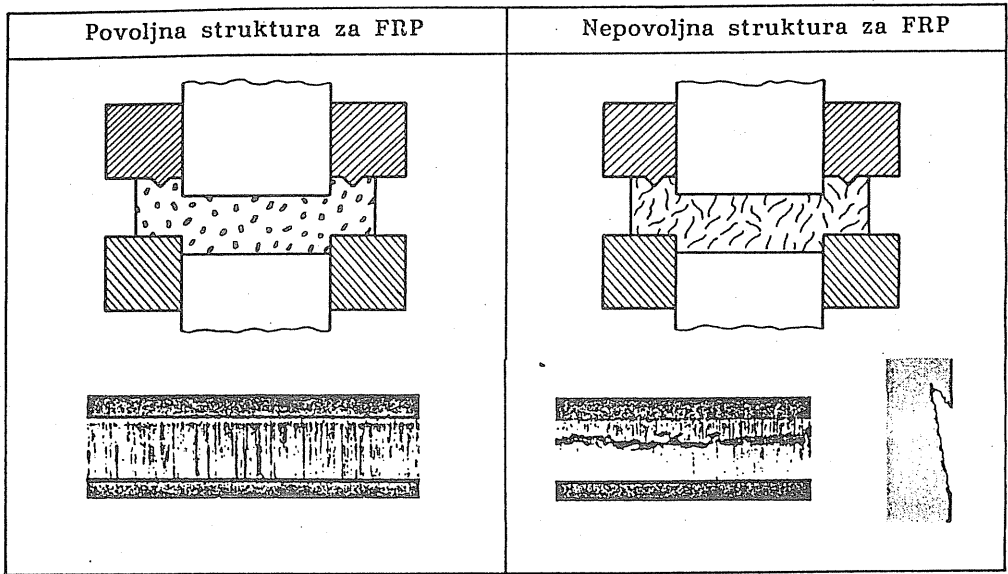
Sa porastom sadržaja ugljenika u čeliku opada njegova pogod-  
nost za obradu FRP jer se u čeliku povećava udeo cementita ( $Fe_3C$  -  
karbid željeza) koji ima veoma slaba plastična svojstva.

Za ocenu podobnosti ovih čelika za obradu FRP od značaja je  
poznavati sadržaj ugljenika u čeliku kao i oblik u kome se cementit na-  
lazi u strukturi.

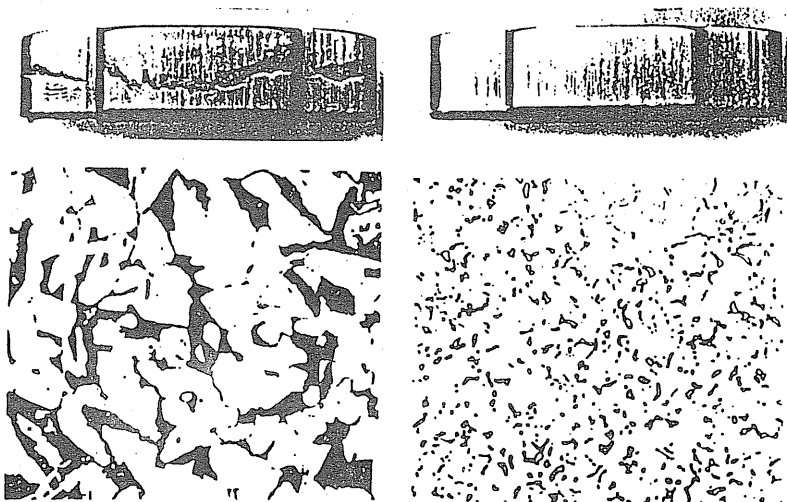
Kod čelika sa određenim sadržajem ugljenika odlučujući uticaj  
na kvalitet obrade ima oblik cementita u feritnoj osnovi. Za povećanje  
obrdivosti neophodno je da karbid, koji ima čvrstoću i do 2000 (MPa),  
bude raspoređen u osnovnoj masi ferita (čvrstoća oko 200 MPa) u ob-  
liku kuglica a ne u obliku lamela (izduženih pločica).

Na sl.10.30. ilustrovan je uticaj oblika strukture čelika na kva-  
litet rezne površine. Obradak je od istog čelika ali različitih struktura.  
U prvom slučaju (sl.10.30a.) materijal je pogodnom termičkom obradom do-  
veden u stanje pogodno za FRP (95% karbida u loptastom obliku) - što  
je pojednostavljeno prikazano na preseku materijala. U tom slučaju rez-  
na površina je visokog kvaliteta. Kada se karbid nalazi u materijalu u  
obliku lamela (sl.10.30b.), dolazi do pojave pukotine na reznoj površini.

Drugi primer uticaja strukture na kvalitet rezne površine pri-  
kazan je na sl.10.31. Prikazana su dva slučaja dobijanja jednog istog  
dela.



Sl.10.30. Uticaj oblika karbida na kvalitet rezne površine /2/

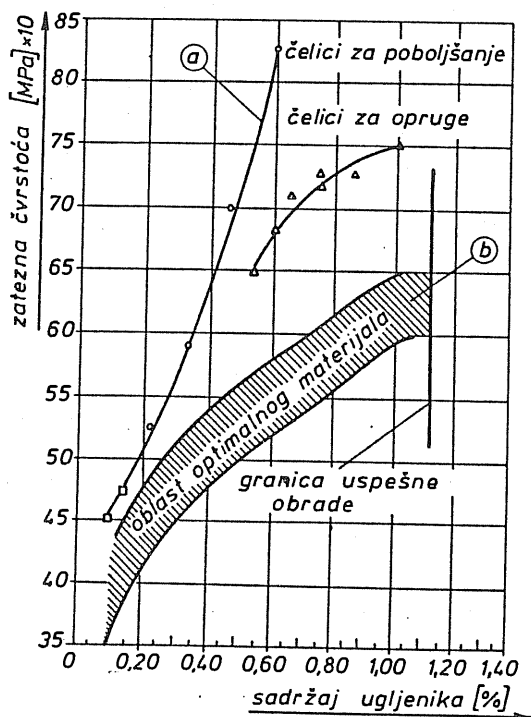


Sl.10.31. Uticaj strukture materijala na kvalitet rezne površine /2/

U oba slučaja radi se o istom materijalu (C45) ali dve različite strukture (odgovarajuća struktura prikazana je ispod fotografije rezne površine). U prvom slučaju se uočavaju pukotine na reznoj površini što se može objasniti nepovoljnom strukturom materijala (lamelarni oblik cementita). U drugom slučaju postignut je visoki kvalitet rezne površine zahvaljujući loptastom obliku cementita u feritnoj osnovi .

Prevodjenje lamelnarnog cementita u loptasti oblik, vrši se žarenjem. Dužinom žarenja povećava se udeo loptastog u odnosu na lamelarni cementit pa sa time raste i obradivost materijala. Što je sadržaj ugljenika u materijalu veći i što je kontura koju treba izraditi složenija utoliko proces žarenja treba da je duži.

Na sl.10.32. prikazano je područje obradivosti čelika FRP u zavisnosti od sadržaja ugljenika. Uočava se da se ta obradivost iscrpljuje kod čelika sa sadržajem ugljenika 1,1%C.



Sl.10.32. Oblast primene čeličnih materijala za FRP /7/

Zatezna čvrstoća (ordinata na sl.10.32.) takodje zavisi od sadržaja ugljenika ali i od oblika karbida u feritnoj osnovi. Čelik istog hemijskog sastava ali različitih struktura ima različite vrednosti zatezne čvrstoće. Za čelike u normalizovanom stanju važi zavisnost prikazana krivom "a" na sl.10.32., dok je za slučaj da je pogodnim žarenjem istog čelika dobijena struktura sa 90-100% cementitom u loptastom obliku ta zavisnost prikazana šatiranim poljem. Kao što je već napomenuto, za FRP dolaze u obzir samo čelici iz polja sl.10.32b.

Od legiranih čelika za obradu FRP najčešće se koriste sledeći:

Č4320	Č4321	Č7421	Č5420
Č4732	Č4830		

Odredjeni legirajući elementi grade sa ugljenikom vrlo tvrde i krte karbide. Da bi se ovakvi čelici mogli obradivati FRP, ovi karbidi moraju u strukturi biti ravnomerno raspoređeni u obliku optica.

Što je sadržaj ugljenika i legirajućih elemenata veći to čelici postaju sve nepovoljniji za obradu FRP.

Nerdjajući čelici imaju drugačiju strukturu od do sada prikazanih čelika. Kako se u tim čelicima nalazi 8% nikla i 10% hroma ti čelici imaju austenitnu strukturu. U ovu grupu čelika spadaju:

Č.4571	Č.4580	Č.4582
--------	--------	--------

Ovi čelici, za razliku od feritnih, sadrže mali procenat ugljenika i zbog toga ne grade karbide.

Austenitni čelici poseduju dobru deformabilnost i zbog toga su pogodni za FRP, iako zahtevaju veće sile za razdvajanje od ugljeničnih čelika. Zbog toga kod obrade ovih čelika postoji opasnost od povećanog habanja alata.

#### 10.3.4.2. Obojeni metali

Od obojenih metala, za FRP se najviše upotrebljava mesing (legura bakra i cinka), aluminijum i bakar. Od raznih vrsta mesinga, najbolji rezultati se dobijuju kod CuZn36,00, mada su i CuZn33,00, CuZn30,00 i CuZn38,00 pogodni za FRP. Bitno je da mesing ne sadrži olovo, koje se inače nekad dodaje mesingu zbog bolje obradivosti skidanjem strugotine.

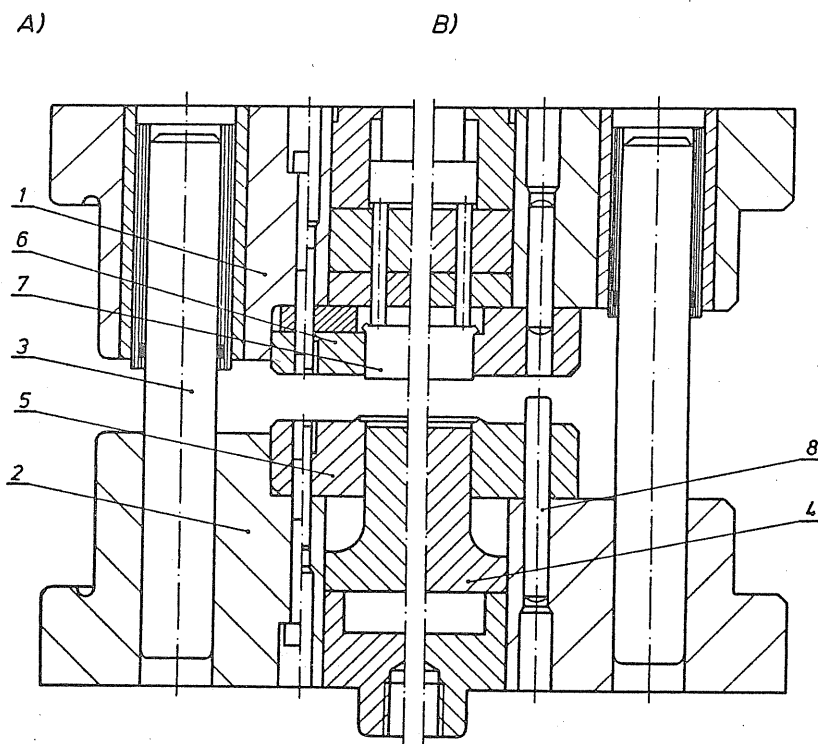
Bakar je takodje dobro obradiv ovom tehnologijom s tim što se u tom slučaju postavljaju posebni uslovi u pogledu podmazivanja. Ovo

se odnosi i na legure bakra: bronzu, Al-bronzu, novo srebro i dr.

Isti zahtevi u pogledu podmazivanja odnose se i na aluminijum i njegove legure.

### 10.3.5. Alati

Za razliku od alata za konvencionalno razdvajanje, alat za FRP poseduje 4 funkcionalna elementa: žig, matrica, pritisna ploča sa konturnim zubom i izbacivač tj. protivvrdržač. Elementi alata izvode za vreme obrade 3 nezavisna kretanja.



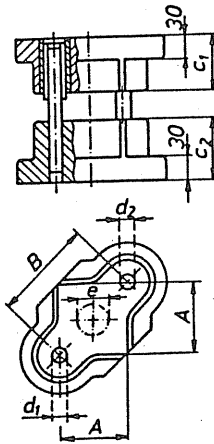
Sl.10.33. Alat za fino razdvajanje presovanjem /2/

Na sl.10.33. dat je presek alata za FRP. Osnovni elementi alata su:

- 1 - gornje kućište
- 2 - donje kućište
- 3 - vodjice
- 4 - žig

- 5 - pritisna ploča sa konturnim zubom
- 6 - matrica
- 7 - izbacivač
- 8 - spoljni elementi

Kućište alata je veoma robusno. i stabilno a vodjenje gornjeg u odnosu na donje krućište izvodi se preko kugličnih vodjica. Kućišta su standardizovana i izvode se sa 2 ili 4 vodjice. Na sl.10.34. date su standardne dimenzije jednog kućišta sa dve vodjice. Izvedba kućišta je livena.



A (mm)	B (mm)	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	c <sub>1</sub> (mm)	c <sub>2</sub> (mm)	e	
						l (mm)	m (mm)
100	140	24	25	75	80	30	15
125	165	24	25	75	80	40	25
160	200	30	32	75	80	55	40
200	250	38	40	90	90	75	55
250	300	38	40	95	95	95	75

- e - korisni krug
- l - jednodelni
- m - podeljen
- A - radna površina

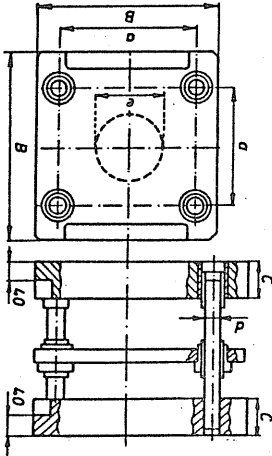
Sl.10.34. Kućište sa dve vodjice /2/

Za veće obradke koriste se alati sa 4 vodjice. Standardizovan oblik i dimenzije takvog kućišta dat je na sl.10.35. Na sl.10.36. prikazan je donji i gornji deo alata za FRP sa 4 vodjice.

Na donje kućište se pričvršćuje pritisna ploča sa konturnim zubom i žig. Žig se vodi u samom kućištu i u pritisnoj ploči.

Na gornje kućište pričvršćuje se matrica u kojoj se vodi izbacivač.

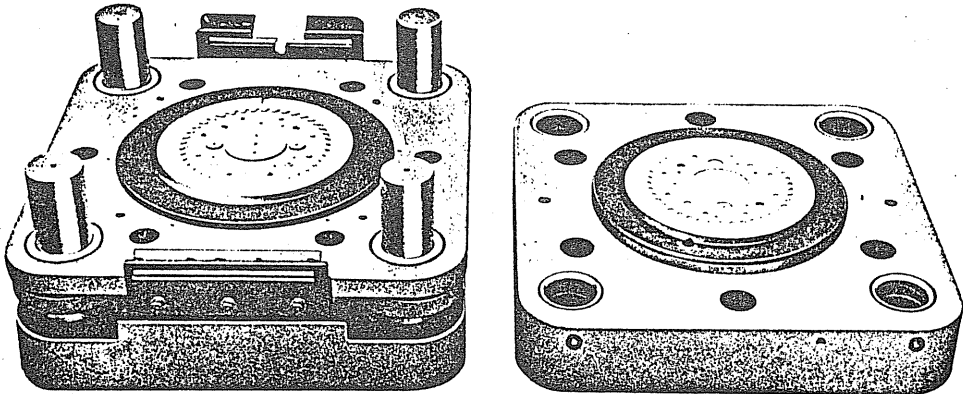
U gradnji alata za FRP se primenjuje visoki nivo standardizacije (tzv. "Baukasten" sistem). Pojedini elementi alata su normirani što znatno olakšava konstrukciju i izradu alata. Postojanjem standardizovanih elemenata alata (kućište, pritisna ploča, izbacivač ...) konstrukcija alata svodi se u najvećoj meri na izbor i kombinovanje pojedinih standardizovanih elemenata u jednu celinu-alat.



A			B			e	
B (mm)	a (mm)	a <sub>1</sub> (mm)	c (mm)	c <sub>1</sub> (mm)	d (mm)	l (mm)	m (mm)
360	260	226	80		40	80	120
400	294	250	80	65	40	120	155
440	330	280	95	60	40	155	190
480	360	340	95	80	50	190	230
540	410	390	95	80	50	230	28

A - radna površina      e - korisni krug  
 B - izvedba              l - sa ojačanjem  
 c - visoka                m - bez ojačanja  
 c<sub>1</sub> - niska

Sl.10.35. Kućište sa četiri vodjice /2/



Sl.10.36. Alat za fino razdvajanje presovanjem sa 4 vodjice /2/

Za izradu pojedinih elemenata alata za FRP koriste se visokokvalitetni legirani čelici. Posebna pažnja mora se posvetiti izboru materijala za najodgovornije delove alata: žig, matrica, konturni zub. Materijal za ove elemente alata mora biti otporan na habanje, na pritisak i savijanje a takodje mora posedovati odredjenu žilavost.

U tabeli T-10.5. dati su materijali koji se najčešće upotrebljavaju za izradu aktivnih elemenata alata.

Ostali elementi alata, koji nisu u direktnom kontaktu sa materijalom izraduju se od manje kvalitetnih materijala (tabela T-10.6.).

T-10.5. Materijali za izradu aktivnih elemenata alata

	Prema DIN-u	Prema JUS-u	Broj materij.	Hemijski sastav						
				C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
Matrica i žig	X210CrW12	Č.4650	1.2436	2,1	0,25	0,3	11,5	0,1		0,8
Žig	X165CrMoV12	Č.4750	1.2601	1,6	0,3	0,3	12	0,6		0,5
Matrica i pritisna ploča	X90CrMoV12	-	-	0,9	0,3	0,3	11,5	0,9	0,9	

T-10.6. Materijali za izradu ostalih elemenata alata

	Prema DIN-u	Prema JUS-u	Broj materij.	Hemijski sastav						
				C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
Stezni prstenovi do Ø400	100Cr6	Č4145	1.3505	1,0	0,25	0,35	1,5			
Ø200-Ø400	105WCr6	Č6440	1.2419	0,9	0,2	1,2	0,5	-	0,1	0,5
Oslonac žiga	90MnCrW5	Č3840	1.2842	0,9	0,25	1,2	0,6	-	0,1	0,6
Podložne ploče	100MnCrW4		1.2510	0,95	-	1,0	0,5	-	-	0,6

### 10.3.6. Mašine

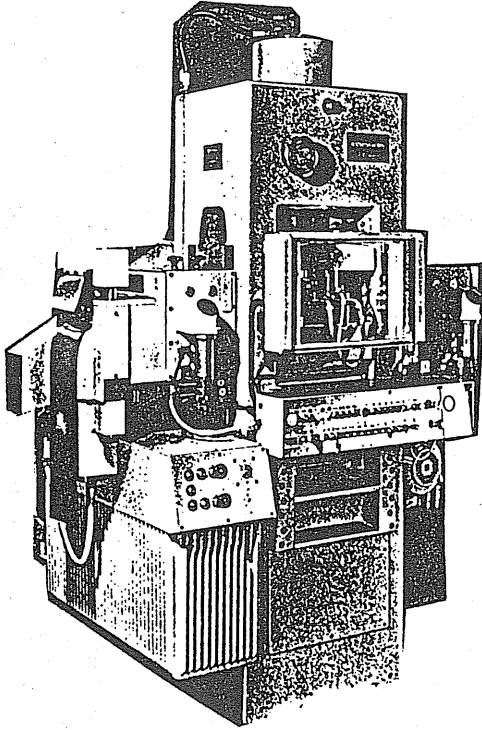
Fino razdvajanje presovanjem obavlja se na specijalnim mašinama trostrukog dejstva (sl.10.37.). Zahtev za trostrukim dejstvom mašine proizilazi iz same suštine procesa FRP. Glavno dejstvo mašine (sila razdvajanja) obezbeđuje se mehaničkim putem (za manje prese - do 1600 kN) ili hidraulično (za veće prese - preko 1600 kN). Dejstvo konturnog zuba i izbacivača ostvaruje se hidrauličnim putem.

Ove mašine u potpunosti su po svojoj koncepciji, konstrukcije i izvedbi prilagodjene procesu FRP i ne mogu se koristiti za druge obrade.

Osnovni delovi prese za FRP su:

- kućište
- pogonsko-prenosni mehanizam





Sl.10.37. Mašina za fino razdvajanje presovanjem

- donji i gornji sto
- upravljačka tabla
- uređaj za dotur i podmazivanje trake
- uređaj za odsecanje iskorišćene trake (makaze)
- uređaj za zaštitu

Kućište prese je veoma robusno , zatvorenog tipa, po pravilu četvorostubno i simetrično u odnosu na pravac dejstva sile. Na taj način elastične deformacije kućišta svedene su na najmanju meru a usled simetričnosti preseka kućišta, ravnomerno su raspoređene po preseku prese. Kućište je liveno, velike mase, te veoma uspešno abosrbuje vibracije koje se javljaju u procesu. Masa kućišta, zajedno sa elementima pogona skoncentrisana je u donjem delu mašine, što povećava njenu stabilnost.

Pogonsko-prenosni mehanizam glavnog kretanja kod presa do 1600 kN je mehanički (sl.10.38.). Kretanje se od elektromotora sa varijatorom preko klinastog kaiša prenosi na zamajac tj. spojnicu a zatim preko pužnog prenosa na kolenasti sistem i dalje na sam žig koji vrši pravolinijsko kretanje u vertikalnom pravcu. Brzina kretanja žiga reguliše se preko varijatora.

Ovakvim pogonsko-prenosnim mehanizmom obezbedjuje se:

- veoma tačan hod žiga (gornja i donja mrtva tačka)
- visoka stabilnost kretanja žiga
- veliki broj hodova (do  $140 \text{ min}^{-1}$ )
- relativno mala potrošnja energije
- jednostavno održavanje i podešavanje

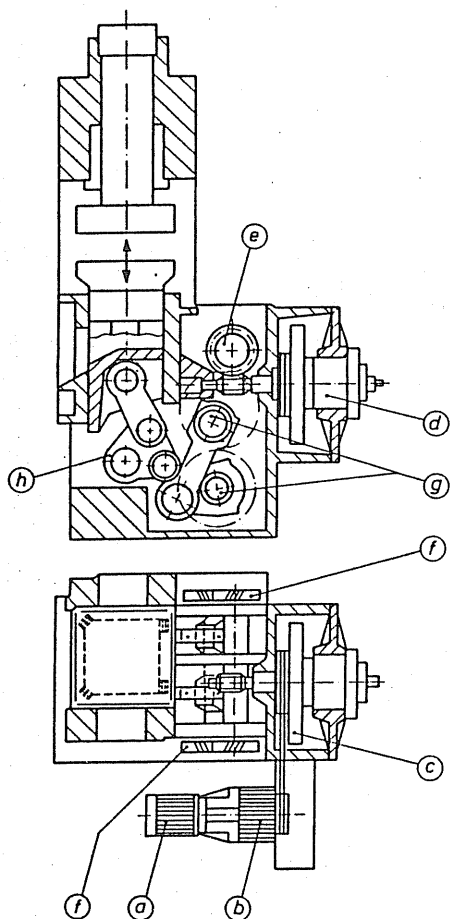
Pogonsko-prenosni mehanizam koncipiran je u potpunosti na principu simetrije. To se odnosi na uležištenja svih vratila, na zubčaste prenose (zupčanici su strelasti kako bi se neutralisale aksijalne sile) i sve ostale elemente pogona. Na taj način postiže se veoma miran rad mašine, bez dodatnih opterećenja u poprečnim pravcima.

Posebna pažnja posvećena je kinematici prese. U poglavlju ( 10.1. ) je rečeno da je idealna brzina kojom se obalja proces FRP 15 mm/s. To je brzina koja obezbedjuje najbolji kvalitet obradka i najmanje habanje alata. Ova relativno mala brzina, medjutim, ne obezbedjuje dovoljno visoku produktivnost (broj hodova u min.). Zbog toga prese za FRP poseduju takav pogonsko-prenosni sistem koji obezbedjuje brzo primicanje alata limu i njegovo brzo odmicanje nakon obavljene operacije, dok se sam proces razdvajanja obavlja znatno manjom brzinom. Na taj način su dva kontradiktorna zahteva za brzinu (velika produktivnost i visok kvalitet i malo habanje alata) zadovoljena.

Na sl.10.39. prikazana je kinematika žiga i to za tri različite vrste presa:

- 1 - FRP
- 2 - kolenasta presa
- 3 - ekscentar presa

Vrednosti na ordinati predstavljaju vertikalni položaj žiga a na apscisi ugao okretanja ekscentra  $\alpha$  ( $360^\circ$  - jedan puni okretaj), tj. vreme odvijanja procesa. Delovi krive sa većim nagibom predstavljaju brže kretanje žiga i obratno. Ravni odsecci krivih predstavljaju faze sa konstantnom brzinom a zakrivljeni predstavljaju ubrzanje ili usporenje.



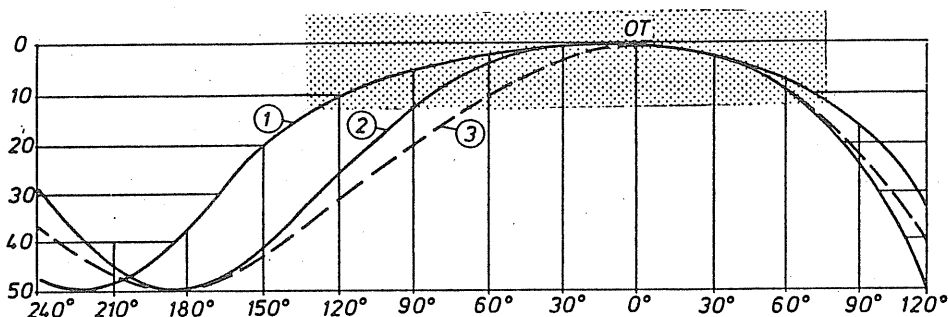
- a - elektromotor
- b - varijator
- c - zamajac
- d - spojnica
- e - pužni prenosnik
- f - zupčasti prenos
- g - kolenasto vratilo
- h - duplo kolenasto vratilo

Sl.10.38. Pogonsko-prenosni mehanizam prese za FRP /7/

Uočava se da kriva 1 (FRP-presa) u hodu približavanja ( $\alpha=240^{\circ}-120^{\circ}$ ) ima veliki nagib tj. brzina žiga u fazi približavanja je velika. U trenutku početka procesa razdvajanja brzina žiga naglo opada da bi se nakon završetka procesa žig sa velikom brzinom vratio u početni položaj. Kod ostala dva tipa pogona kinematika izvršnog organa nije tako povoljna jer je brzina u trenutku dodira sa materijalom relativno velika (što dovodi do udarnog opterećenja alata) a brzina nakon obavljene operacije nije tako velika kao kod FRP-presa.

Opisana kinematika presa za FRP postiže se zahvaljujući specijalnom sistemu kolenastog prenosa.

Za deblje limove (preko 5 mm) koriste se prese sa hidrauličnim pogonom žiga. Hidraulični cilindar smešten je u donjem delu prese a



Sl.10.39. Kinematske karakteristike različitih presa

klip cilindra je direktno vezan za nosač alata (žig).

Moguća su dva različita pogona hidrauličnog cilindra glavnog kretanja: direktni pogon ili pumpno-akumulatorski pogon.

Pogon konturnog zuba i protivdržača/izbacivača je kod svih FRP-presa hidrauličan sa mogućnošću međusobno nezavisnog podešavanja veličine sile.

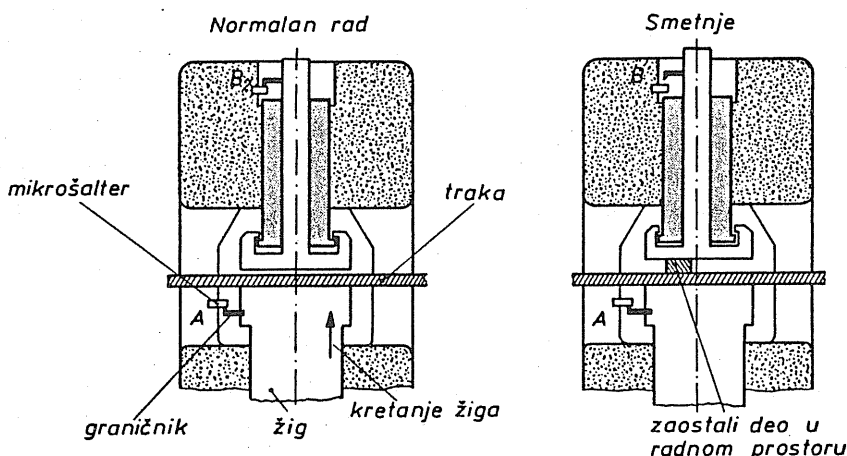
U cilju obezbedjenja ravnomernog dotura trake u radni prostor kao i ravnomernog odvodjenja iskorišćene trake iz radnog prostora, mašina je snabdevena sa uređajem za dotur i odvodjenje trake. Uređaj se sastoji od dva valjka koji, sinhronizovano za kretanjem žiga, stežu traku i svojim okretanjem za određeni ugao, doturaju je u radni prostor. U toku samog razdvajanja valjci se međusobno razmaknu kako bi u tom trenutku traka bila slobodna.

Pre ulaska trake u radni prostor vrši se automatsko podmazivanje trake pomoću specijalnog uređaja za podmazivanje koji je snabdeven sopstvenom pumpom.

Nakon izvršenog procesa razdvajanja vrši se rezanje trake na kraće komade, radi lakše dalje manipulacije. Ovo rezanje iskorišćene trake vrši se na makazama koje se takodje nalaze na samoj mašini.

Upravljačka tabla služi za izbor željene operacije (načina rada) kao i za podešavanje parametara procesa.

Za razliku od konvencionalnog razdvajanja, kod FRP obradak i otpad nakon obrade ostaju u radnom prostoru alata. Iz tog prostora oni se uklanjaju ili pneumatski (izduvavanjem) ili mehanički. Ako se ipak desi da se u radnom prostoru zadrži obradak ili otpad dobijeni u prethodnoj operaciji, postojala bi opasnost od preopterećenja pa i oštećenja alata. Da se to ne bi desilo presa za FRP opremljena je sa jednostavnim ali efikasnim uređajem za osiguranje od preopterećenja alata (sl. 10.40.). Uredjaj se sastoji od dva mikroprekidača i radi na principu pravilnog redosleda uključivanja tih prekidača.



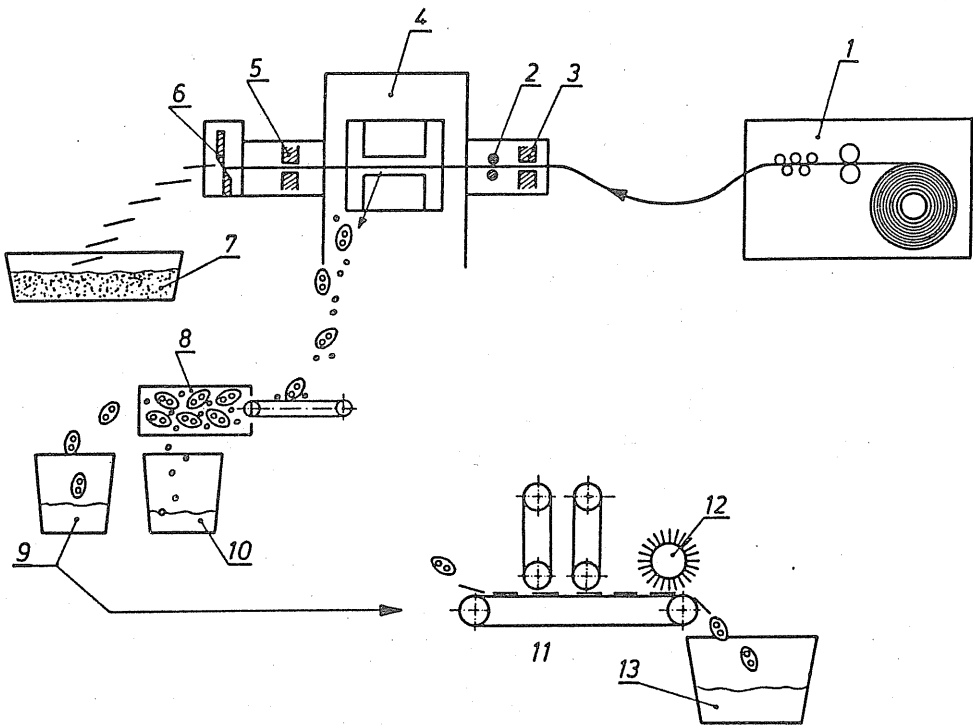
Sl.10.40. Osiguranje od preopterećenja alata /7/

U normalnom radu, kada u radnom prostoru alata nema stranog predmeta, kretanjem žiga prvo se aktivira mikroprekidač "A" a tek zatim se, daljim kretanjem žiga prekine kontakt na prekidaču "B".

Kada se u alatu pored trake nalazi i neki strani predmet (npr. otpad iz prethodne operacije) koji ga može oštetiti, u tom slučaju se remeti medjusobni položaj mikroprekidača, žiga i izbacivača. Taj poremećaj uslovljava obrnuti redosled aktiviranja mikroprekidača od gore opisanog: prvo se prekida kontakt na prekidaču "B" a tek zatim se uspostavlja kontakt na prekidaču "A". Ovakav redosled uključivanja mikroprekidača automatski zaustavlja mašinu, kako bi se omogućilo odstranjivanje stranog tela iz radnog prostora.

Jedno kompletno postrojenje za FRP sadrži i sledeće uređaje (sl. 10.41).

- uređaj za smeštaj i odmotavanje trake, uključujući i uređaj za ispravljanje trake
- mašinu za FRP sa uređajima za pomak, za podmazivanje trake i za odsecanje trake
- uređaj za odvajanje obradaka od otpada
- uređaj za skidanje srha sa obradka



- |                                     |                              |
|-------------------------------------|------------------------------|
| 1 - kotur trake sa ravnalicom trake | 8 - uređaj za sortiranje     |
| 2 - uređaj za dotur trake           | 9 - obradci                  |
| 3 - uređaj za podmazivanje trake    | 10 - otpadak                 |
| 4 - FRP presa                       | 11 - uređaj za skidanje srha |
| 5 - pomak                           | 12 - četke                   |
| 6 - makaze                          | 13 - sanduk za gotove komade |
| 7 - ostaci trake                    |                              |

Sl.10.41. Kompletno postrojenje FRP

### 10.3.7. Ekonomski aspekti primene FRP

Ekonomičnost procesa FRP proizilazi iz činjenice da se ovom tehnologijom postiže visok kvalitet obradka i to u samo jednoj operaciji, bez potrebe za naknadnom doradom. Na taj način FRP zamenjuje više različitih i često skupih operacija.

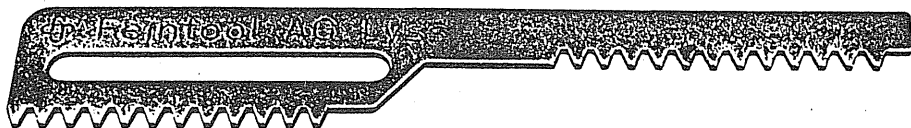
Pored toga proces se izvodi automatski, čime se postiže visoka produktivnost.

Obzirom da se ceo proces izvodi na samo jednoj mašini, to je potreban relativno mali prostor u hali za ovu tehnologiju a takodje nema ni međutransporta materijala.

Troškovi radne snage su takodje manji u slučaju primene FRP.

Tehnologija FRP je utoliko ekonomičnija ukoliko se primenjuje u uslovima većih serija i ukoliko je oblik dela takav da bi za njegovu izradu konvencionalnim putem trebalo primeniti veći broj komplikovanih operacija.

Nasuprot tome, primena ove tehnologije u slučaju malih serija ili pojedinačne proizvodnje, i za delove kod kojih se ne zahteva visoki kvalitet nije ekonomski opravdana.



Sl.10.42. Zupčasta letva

Sa aspekta investicija, posmatrajući pojedinačno, cena mašina i alata za FRP veća je od cene mašine i alata za konvencionalno razdvajanje. Ali, ako se uzme u obzir da jedna mašina za FRP istovremeno zamenjuje više mašina za konvencionalno razdvajanje, onda su često investicioni troškovi za tehnologiju FRP manji od troškova za konvencionalno razdvajanje (za slučaj izrade istog dela).

Na primeru izrade zubčaste letve (sl.10.42.) biće analizirani i upoređeni troškovi izrade a) konvencionalnim putem i b) FRP. Pregled pojedinih troškova za obe varijante izrade dat je tabelarno (T-10.7).

T-10.7. Komparacija troškova izrade dela prikazanog na sl.10.42.

Vrsta troškova	FRP	Konvencional.
	jedinica troškova/ 1000 kom.	jedinica troškova/ 1000 kom.
Udeo troška alata	11,85	7,88
Troškovi materijala	174,26	144,72
Naknadna obrada alata/oštrenje	0,80	1,28
Operacija FRP i skidanje srha	49,21	-
Operacija konvencionalnog razdvajanja		
- razdvajanje	-	18,84
- ravnanje	-	72,20
- naknadna obrada šlica	-	85,80
- skidanje srha	-	12,86
- glodanje ozubljenja	-	144,40
- skidanje srha	-	9,43
Unutrašnji transport	0,34	1,01
<b>UKUPNO:</b>	<b>236,80</b>	<b>498,42</b>

Uočava se da je odnos troškova 1:2,1 u korist tehnologije FRP. Ova prednost proističe pre svega iz činjenice da jedna operacija FRP zamenjuje 6 klasičnih operacija. Jedina stavka ukupnih troškova koja je nepovoljnija kod FRP nego kod konvencionalnog razdvajanja jeste materijal (zbog potrebe utiskivanja konturnog zuba).

Kako trend troškova u metaloprerađivačkoj industriji ide u pravcu daljeg smanjenja cene materijala i povećanja cene ljudskog rada, to će u budućnosti ekonomska opravdanost primene FRP biti još očiglednija.



L I T E R A T U R A

- /1/ Lange K.: Lehrbuch der Umformtechnik - Band 1,2 und 3, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1974.
- /2/ Spur G. - Stöferle Th.: Handbuch der Fertigungstechnik Band 2/1, 2/2 i 2/3 - Umformen - Carl Hanser Verlag München, Wien, 1983.
- /3/ Mielnik E.: Metalworking Science and Engineering, McGraw Hill inc. 1991.
- /4/ Tschätsch H.: Taschenbuch Umformtechnik, Verfahren Maschinen Werkzeuge, Carl Hausen Verlag, München, Wien, 1977.
- /5/ Stanković P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina, Naučna knjiga, Beograd, 1966.
- /6/ Pešić M., Mišković B., Milenković V.: Prerada metala u plastičnom stanju, ICS Beograd, 1975.
- /7/ Feinschneiden-Handbuch für die Praxis, Izdanje Firme Feintool AG, Lyss, Švajcarska, 1970.
- /8/ 1 Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt 1980, Herausgeber D. Schmoeckel - Institut für Umformtechnik TH Darmstadt
- /9/ Devedžić B.: Obrada metala deformisanjem, drugi deo, IRO "Gradjevinska knjiga", Beograd, 1981.
- /10/ Naujoks W., Fabel D.: Forging Handbook, American Society for Metals, Cleveland, Ohio, 1953.
- /11/ Schwenzfeier W.: Walzwerktechnik, Springer Verlag, Wien-New York, 1979.
- /12/ Lange K.: Gesenkschmieden von Stahl, Springer Verlag Berlin/ /Göttingen/Heidelberg, 1958.
- /13/ Rowe G.: Principles of Industrial Metalworking Processes, E. Arnold, 1977.
- /14/ Johnson, Mellor: Plasticity for Mechanical Engineers - D. Van Nostrand Company LTD, London, Toronto, New York, 1962.
- /15/ Hilbert H.: Stanzereitechnik, Band 1,2 - Carl Hansen Verlag, Munchen, 1970.
- /16/ Oehler-Kaiser: Schnitt, Stanz und Ziehwerkzeuge, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1966.
- /17/ Romanovski V.P.: Spravočnik po holodnog štamovke, 1979. "Mašinstroenie", Leningrad, 1979.
- /18/ Hribar J.: Plastična obrada metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1975.
- /19/ Bgridgman, P.W. Studies in Large Plastic Flow and Fracture Harvard Univ. Pres, Cambridge, Massachusetts, 1964.
- /20/ Pugh, H.Li.D.: The Mechanical Behaviour of Materials under Pressure, Applied Science Publischer Ltd. London, 1970.

- /21/ Verščagin L.F.: Tverdoe telo pri vysokih davlenijah Izabranye trudy, Izdatel'stvo "Nauka", Moskva, 1981.
- /22/ Kolpašnikov A.I., Ygalov V.A.: Hidroressovanie metallov Metalurgija, Moskva, 1973.
- /23/ Ural'skij V.L. i dr. Deformacija metallov ždkostju vysokogo davlenija, Metalurgija, Moskva, 1976.
- /24/ Prozorov L.V. i dr.: Pressovanie metallov židkostju vysokogo davlenija, Mašinostroenie, Moskva, 1972.
- /25/ Ciklis D.S. Tehnika fizičko-himičkih issledovanij pri vysokih i sverhuvsokyh dovlenijah, Hemija, Moskva, 1976.
- /26/ Grupa autora: Pročnost i plastičnog metallov pod vysokim davlenijem, Akademija nauk SSSR-a, Severdlovsk, 1977.
- /27/ Ulmer G.C.: Research Techniques for High Pressure and High Temperature, Springer-Verlag, New York, 1971.
- /28/ Triševskij I.S. i dr.: Proizvodstvo gnutyh profilej, Metallurgija", Moskva, 1982.
- /29/ Bogojawlenskij N., Neubaure A., Wladimirowich V.: Technologie der Fertigung von Leichtbau profilen. VEB Deutcher Verlag für Grun Stoffindustrie, Leipzig, 1979.
- /30/ Berezovskij S.F., Kropylev F.M.: Proizvodstvo gnutyh profilej, "Metalurgija", Moskva, 1978.
- /31/ Triševskij I.S. i dr.: Gnutye profili prokata, spravočnik "Metallurgija", Moskva, 1980.
- /32/ Grupa autora: Vysokoekonomičnye gnutye profili prokata, Zbornik radova "Metallurgija", Moskva, 1965.
- /33/ Konovalov E.G. i dr.: Čistovaja i upročnajuščaja rotacionnaja obrabotka poverhnostnej, Višejš škola", Minsk, 1968.
- /34/ Konovalov E.G. i dr.: Rotacionnaja obrabotka povjerhnostnej s avtomatičeskoj podačej, "Višejšaja škola", Minsk, 1976.
- /35/ Šnajder, JU.G.: Instrument dlja čistovoj obrabotki metallov davlenijem, "Mašinostrojenije", Leningrad, 1971.
- /36/ Leiser, H., Schippers G.: Glattwalzen ebener Flächen, Institut für Werkzeugmaschinen, Karl-Marx-Stadt, 1963, Sonder Neft 13.
- /37/ Braslavskij V.M.: Tehnologija obkatki krupnih detaljej rolkami, "Mašinostrojenije", Moskva, 1975.
- /38/ VDI-Richtlinien (VDI 3177): Oberflächenfeinwalzen. VDI-Handbuch Betriebstechnik, Mai 1963.
- /39/ Vujović V.: Istraživanje mogućnosti primene savremenih metoda plastične obrade metalnih delova, II deo - Valjanje površina, Institut za alatne strojeve, Zagreb, 1970.
- /40/ Vujović V.: Prilog analizi tehnologije površinskog plastičnog deformisanja, Zbornik radova sa prvog naučno-stručnog skupa FOSIP'88 - Fleksibilni obradni sistemi za obradu profila, Bihać, Maj'88, str. 73-84.
- /41/ Papšev D.D.: Otdjeločno-upročnajuščaja obrabotka povjerhnostnim plastičeskim deformirovanijem, "Mašinostrojenije", Moskva, 1978.

- /42/ Kaledin B.A. i dr.: Povišenije dolgovečnosti detalje povjerhnošnim deformirovanijem, "Nauka i tehnika", Minsk, 1974.
- /43/ Čistosjerdov P.S.: Kombinirvanije instrumenti dlja otdečnoupročnajuščeje obrabotki, "Belorus", Minsk, 1977.
- /44/ Markovina R.: Istraživanje uticaja plastičnog deformisanja površinskih slojeva elemenata na njihova nosiva svojstva, Univerzitet u Mostaru, Mašinski fakultet, Doktorska disertacija, april 1991.
- /45/ Kosilovoj A.G., Meščerjakova R.K.: Spravočnik tehnologija mašinstroitelja, Tom 1, "Mašinstrojenije", Moskva, 1972, str.528-555.
- /46/ Vujović V., Plančak M., Vilotić D.: Primena tehnologije kovanja lakih metalnih legura u masovnoj proizvodnji, Studija radjena po posebnom ugovoru, 129 str., Novi Sad, 1991.
- /47/ Vujović V.: Tehnologija plastičnosti u mašinstvu, I deo, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 1990.god.
- /48/ Strezov V.: Obrabotka so deformacija I, Univerzitet "Kirili i Metodij" Skopje, Skopje, 1987.
- /49/ Rene, I.P., Podlivajev, Ju.V.: Issledovanie tehnologičeskih vozmožestej zakritoj prošivki vysokopročnyh aluminievych splavov. KŠP, No 5, 1976.
- /50/ Prospekti raznih firmi.

CIP – Каталогизација у публикацији  
Библиотека Матице Српске, Нови Сад

621.7(075.8)

ПЛАНЧАК, Мирослав

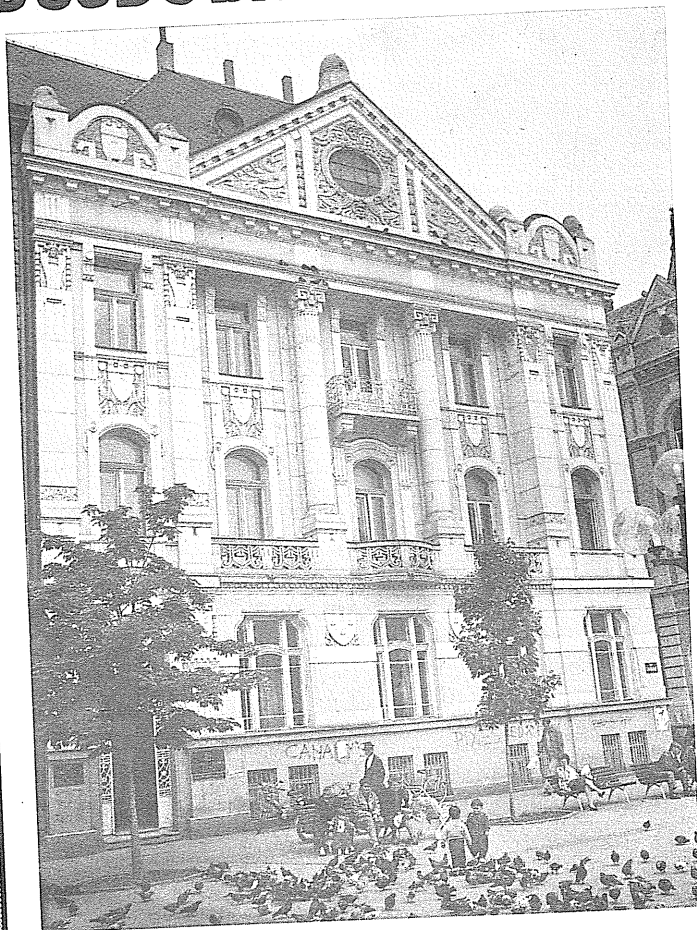
Tehnologija plastičnosti u mašinstvu II / Miroslav Plančak, Dragiša Vilotić, Vlado Vujović. - Novi Sad : Fakultet tehničkih nauka, 1992 (Novi Sad : Offsetprint). - 380 str. : ilustr. : 24 cm.

1. Вилотић, Драгиша 2. Вујовић, Владо. -  
I. Технологија пластичности в. Метали  
Обрада деформисањем

а) Метали - Обрада деформисањем  
25562119

ISBN 86 - 80249 - 02 - 5

# ВОЈВОЂАНСКА БАНКА



БАНКА УНИВЕРЗИТЕТА У НОВОМ САДУ