

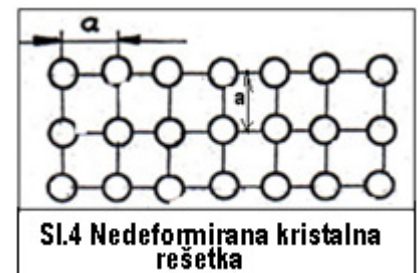
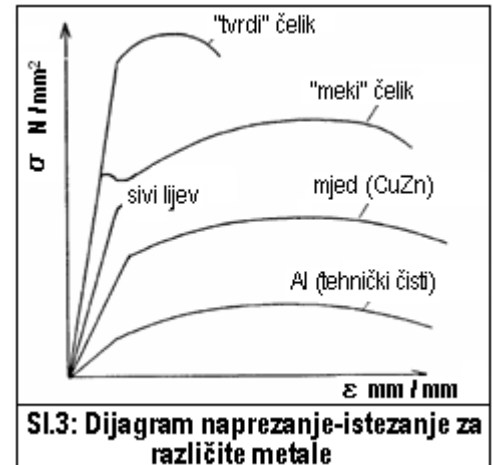
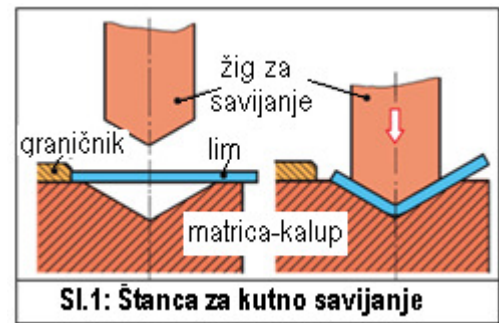
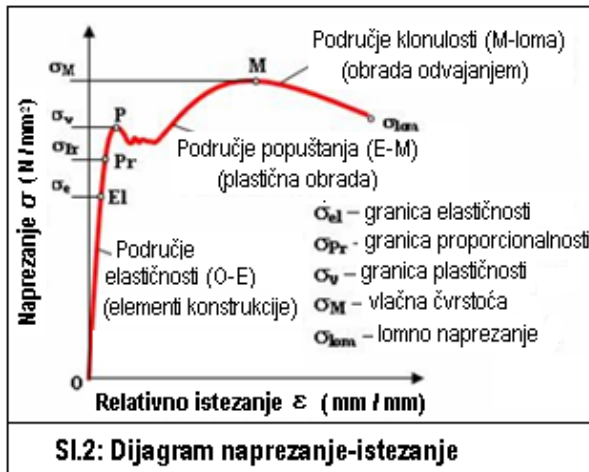
8. ALATI ZA PREOBLIKOVANJE

8.1 Osnove preoblikovanja

Preoblikovanje je promjena oblika čvrstog tijela postupcima **trajne ili plastične deformacije** bez odvajanja i promjene mase materijala (DIN 8850, 2.grupa).

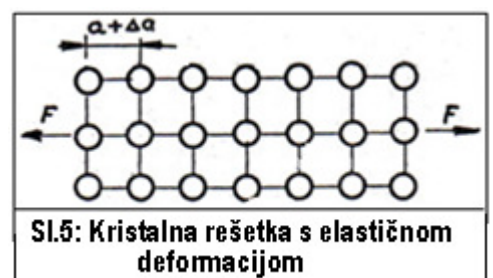
Postupci; valjanje, kovanje, prešanje, utiskivanje, istiskivanje, provlačenje, duboko vučenje, savijanje (**sl.1**), razvlačenje...

Deformabilnost ili plastičnost je svojstvo materijala da se lakše ili teže trajno deformira. Osnove deformacije metala pod opterećenjem prikazane su dijagramom naprezanje-istezanje $\sigma - \epsilon$ na **sl.2**, a usporedba ponašanja različitih metala na **sl.3**. Meki čelik se lako deformira i spada u plastične, a sivi lijev u neplastične metale (**sl.3**).



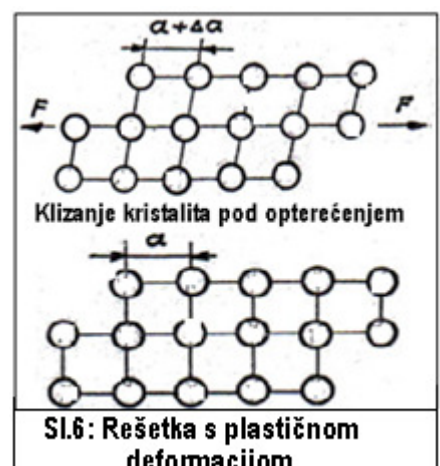
Teorijske osnove: Materijal pod opterećenjem se napreže i deformira. Deformacija može biti:

a) **elastična (sl.2, područje O-E):** Nakon rasterećenja materijal se vraća u početno stanje. Elastičnom deformacijom povećava se razmak između atoma kristalne rešetke ($a + \Delta a$, **sl.5**) koji se nakon rasterećenja vraća na prvobitnu veličinu (a , **sl.4**).



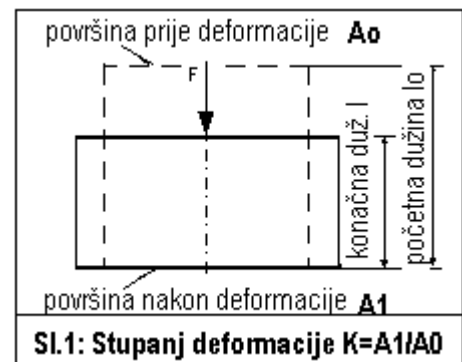
b) **plastična (sl.2, trajna – područje E-M):** Povećanjem naprezanja iznad granice elastičnosti σ_{el} (**sl.2**) nastupa međusobno **klizanje**, odnosno **pomicanje slojeva (kristalita, sl.6)** i početak trajne deformacije koja ostaje i nakon rasterećenja.

Promjena strukture i svojstva: Trajnom deformacijom zrnata struktura prelazi u vlaknastu, što mijenja i svojstva materijala: **povećava se čvrstoća i tvrdoća, a smanjuje istezljivost, odnosno plastičnost (sl.7).**



Stupanj deformacije (sl.1) je mjera deformacije. To je omjer površine poprečnog presjeka materijala poslije i prije ili prije i poslije deformacije $K = A_1 / A_0$ (**manji K** – hladna deformacija: savijanje lima, šipki, cijevi; **srednji K** – duboko vučenje posuda s međužarenjem, **veći K** – vruće valjanje tračnica, limova...).

Ako stupanj deformacije prijeđe određenu granicu, gube se plastična svojstva, dolazi do prekida povezanosti i loma materijala. Za nastavak deformacije potrebna je toplinska obrada **međužarenja**.



Rekristalizacija je toplinska obrada žarenja kojom nastaju zrnca slična onima prije deformacije. Povratom na početnu strukturu smanjuju se čvrstoća i tvrdoća, a povećava plastičnost pa se može nastaviti s daljnjom deformacijom bez prekida i loma materijala.

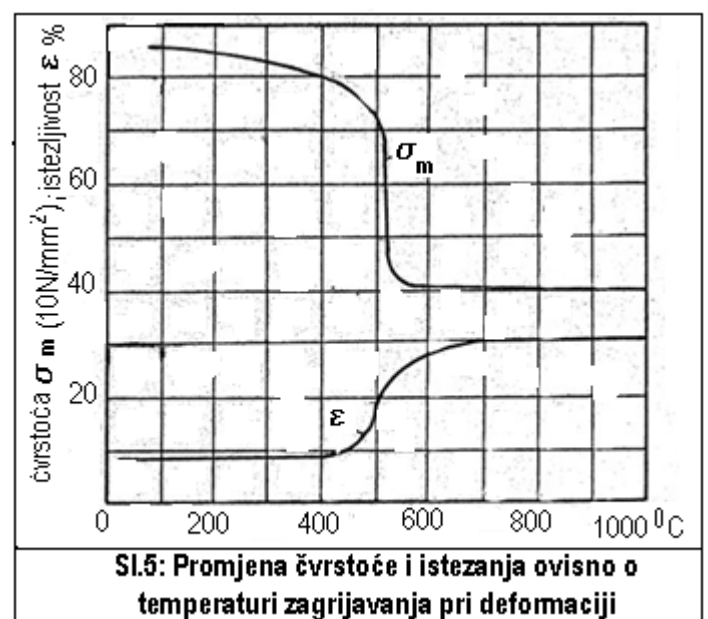
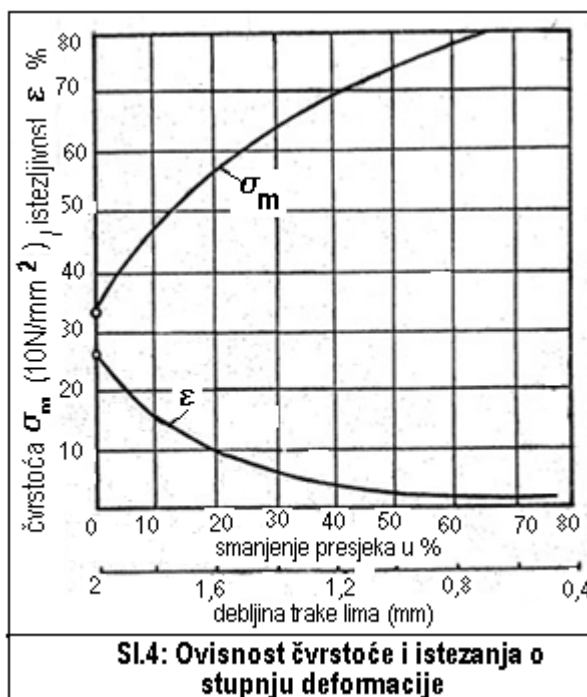
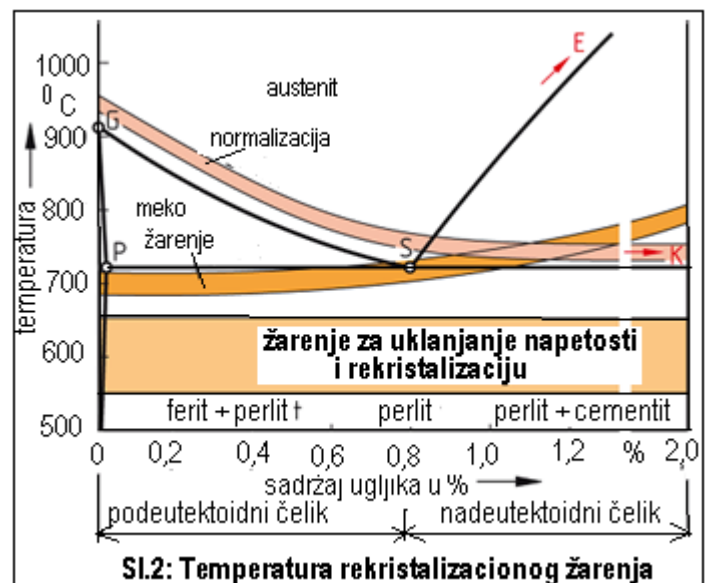
Temperatura rekristalizacije ovisi o vrsti materijala i stupnju deformacije (**sl.2**). Materijal se lagano zagrijava i žari više sati na temperaturi **550 - 650 °C**.

Plastična deformacija može biti :

- hladna** – ako se odvija na temperaturi nižoj od temperature rekristalizacije i
- vruća**, ako se odvija na višoj od temperature kristalizacije (austenit, oko 1100 °C).

Hladna deformacija povećava čvrstoću, a smanjuje plastičnost ovisno o stupnju deformacije (**sl.4**).

Vruća deformacija smanjuje čvrstoću, odnosno otpornost materijala na deformaciju i povećava njegovu plastičnost – istezljivost (područje (**sl.5**).



Kod vruće deformacije treba paziti i na brzinu deformacije koja ne smije biti veća od brzine rekristalizacije zbog mogućeg smanjenja plastičnosti materijala.

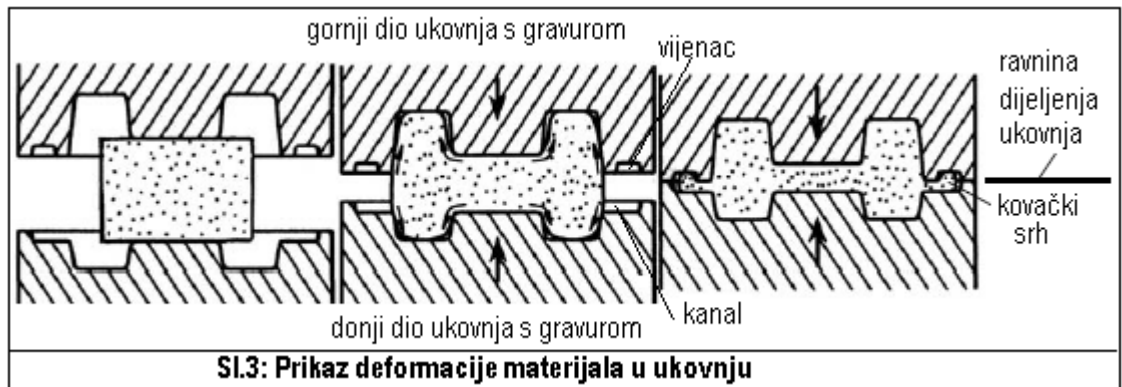
Postupci preoblikovanja prema vrsti naprezanja:

- a) **tlačni**: valjanje, kovanje i prešanje u alatu (ukovanj) ili bez njega, utiskivanje, istiskivanje (protiskivanje), tečenje...
- b) **vlačno – tlačni**: provlačenje, duboko vučenje...
- c) **vlačni**: proširenje, razvlačenje, ravnanje...

8.2 Alati za kovanje i prešanje - ukovnji

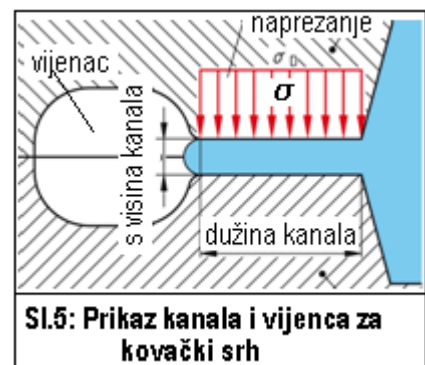
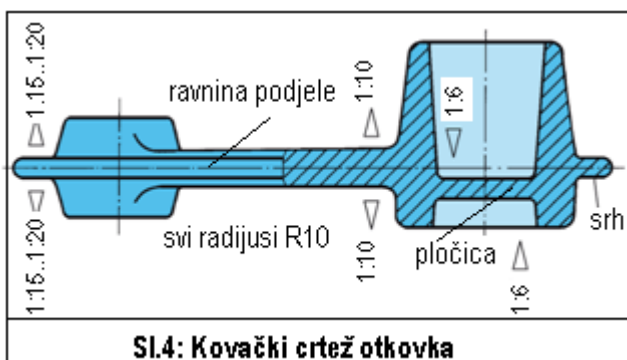
Kovanje je preoblikovanje materijala udarcima ručnog ili strojnog čekića (bat), najčešće u vrućem stanju. Koristi se kinetička energija čekića koji velikom brzinom (5-7 m/s) udara u materijal. Rad je popraćen jakim potresima i bukom. Nagli i kratki udarci čekića deformiraju prvenstveno gornji i donji sloj materijala. To je vrlo stara i raširena plastična obrada metala (meteorsko željezo) koja se strogo čuvala i prenosila s oca na sina. Danas su poznate teorijske osnove i tehnologija kovanja. Kovanje može biti **slobodno (sl.1 i 2)** ili **u ukovnju (sl.3)**.

Prešanje je preoblikovanje metala silom pritiska s manjom brzinom (do 1 m/s). Rad preše je mirniji, a mogu proizvesti veće sile. Sila preše djeluje duže i deformira materijal po cijeloj dubini. Mogu biti mehaničke i hidrauličke.

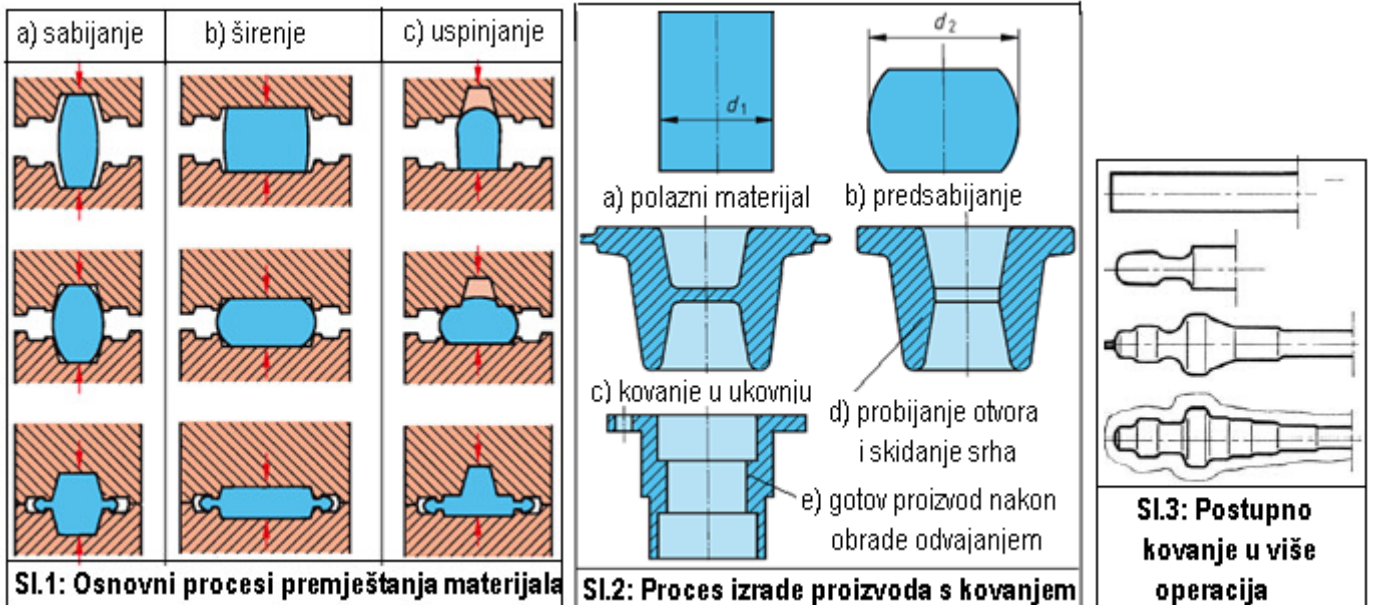


Tehnološki proces kovanja:

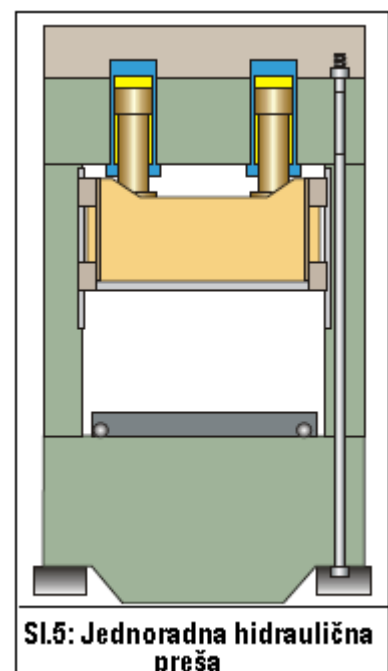
1. **Izrada kovačkog crteža otkovka na temelju crteža proizvoda (sl.4):** odrediti ravninu podjele ukovnja, dodatke za daljnju obradu, kovačke nagibe radi lakšeg vađenja iz ukovnja i radijuse radi lakšeg tečenja materijala te predvidjeti pločicu za naknadno probijanje otvora. Vanjski srh se skida na štancama za krzanje.
2. **Konstrukcija završne gravure ukovnja (sl.3 i 5)** s kanalom i vijencem za suvišni materijal (srh): gravura je po obliku i dimenzijama jednaka otkovku u vrućem stanju, vanjske mjere se povećavaju, a unutarnje smanjuju za toplinski koeficijent rastezanja: za čelik 0,8-1%, Al-leg.1,2% i Mg- leg.1,1%. Posebno paziti na omjer visine i dužine kanala o čemu ovisi sila kovanja, naprezanje u ukovnju i visina uspinjanja materijala (sl.3).



3. **Određivanje broja i redoslijeda operacija (sl.1):** obzirom da je deformacija ograničena stijenkama ukovnja, potrebno je voditi računa o procesu premještanja materijala (sl.1) te stupnju deformacije **K**. Ako je preveliki stupanj deformacije, potrebno je uključiti operaciju **međuzarenja**. Na **slici 2** je tehnološki proces izrade proizvoda s 5 operacija obrade: odrezivanje šipke, sabijanje na preši, kovanje u ukovnju, probijanje otvora i skidanje srha na preši i obrada odvajanjem čestica. Dobili smo proizvod s dobrim iskorištenjem materijala te čvrstom i homogenom strukturom. Na **slici3** je prikazan proces izrade proizvoda s operacijom odrezivanja i 3 operacije kovanja s postupnim preobliskovanjem.



4. **Konstrukcija gravura ukovnja po operacijama (npr.sl.3):** mjere korigirane za toplinski koeficijent rastezanja.
5. **Izbor materijala ukovnja:** odrediti mjere, masu i vrstu materijala; obično se koristi alatni čelik za rad u toplom stanju Č5741 (utop extra 1), radne tvrdoće 30 – 50 H_{RC}. Otporan je na udarno opterećenje i površinsko trošenje. Moguće popuštanje uslijed dužeg zadržavanja vrućeg proizvoda u ukovnju. U posebnim slučajevima ugrađuju se segmenti od tvrdog metala.
6. **Izbor stroja (sl.4 i 5):** prema postupku, sili kovanja i veličini ukovnja. Kovačkim batovima materijal brže popunjava gornju gravuru i brže teče u smjeru gibanja bata: za otkovke s promjenjivim promjerima, razgranatim površinama i ispupčenjima te za tanke otkovke. Prešama materijal brže popunjava gravuru u donjem dijelu ukovnja: za otkovke jednostavnijih oblika i bez velikih udubljenja. Često se kombinira s batovima, tako da je preobliskovanje na prešama, a završno kovanje na batovima.



8.3 Alati za utiskivanje

Utiskivanje je tlačna deformacija pri kojoj žig prodire u materijal do određene dubine i oblikuje udubljenje (meko žareni čelik **sl.1**). Rad se odvija na hidrauličkim prešama stalnom silom do 50 MN i malom brzinom 0,002 - 0,2 mm/s.

Pretežno se izrađuju unutarnji složeni i nerotacioni oblici na proizvodu (**gnijezda**, udubljenja, utisnuća, **sl.2**). Mjere gnijezda su iste dok se radi s istim žigom, a površine glatke. Vrijeme izrade je znatno kraće nego obradom odvajanja. Utiskivanjem se vlakna materijala ne prekidaju što produžuje vijek trajanja proizvoda.

Utiskivanje može biti u hladnom ili vrućem stanju. Materijal se grije na (850 – 1000) °C radi smanjenja sile utiskivanja i povećanja brzine.

Žig s vanjskim oblikom je jedna polovica kalupa, a materijal s gnijezdom (matrica), druga polovica.

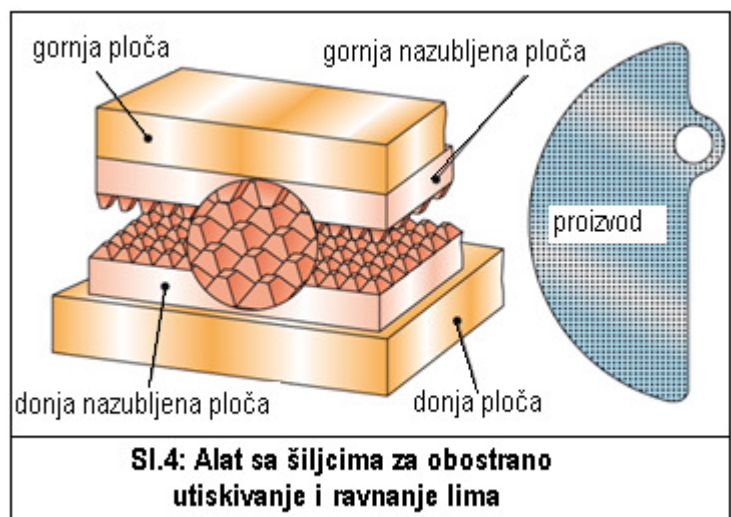
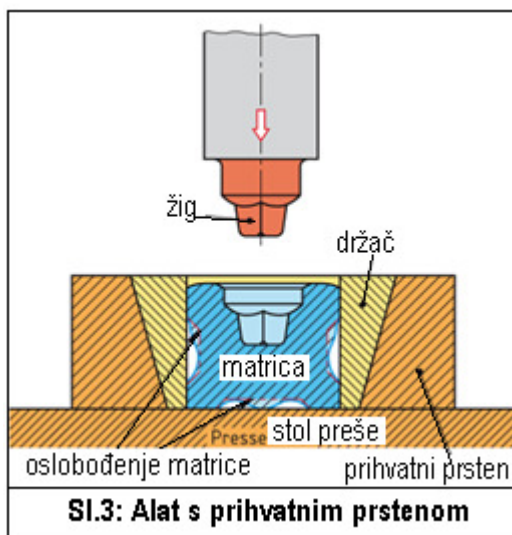
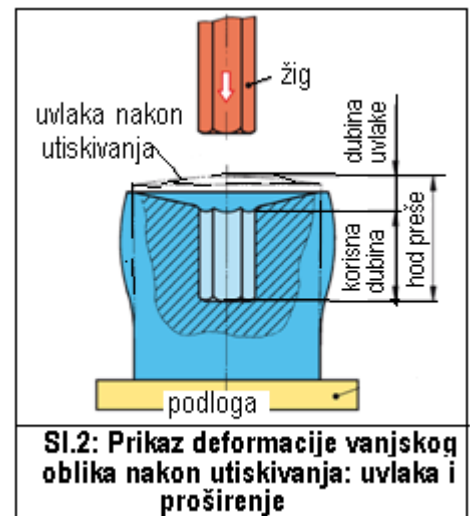
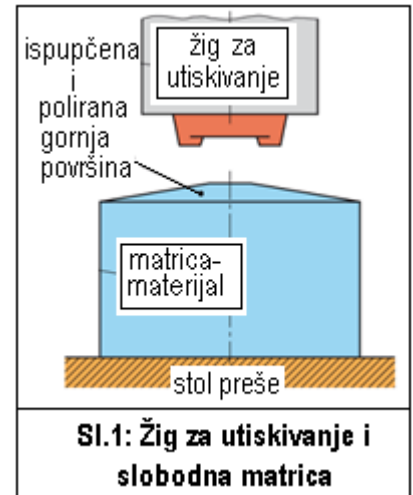
Žig s vanjskim oblikom gravure je relativno jednostavan za izradu (sl.2). Obično se radio od alatnog čelika Č4650 (OCR12 special) s povećanom otpornošću na pritisak i relativno dobrom žilavošću. Površina žiga se visoko polira, a za vrijeme rada podmazuje mineralnim uljem ili molibdenskim disulfidom MoS_2 radi smanjenja trenja u dodiru s materijalom.

Matrica (materijal) je izložena velikom opterećenju i deformaciji vanjskog oblika. Ona se širi, a gornja površina uvlači (utiskuje) sa žigom (**sl.2**). Zbog toga se, u pripremi materijala, radi ispupčeno i polira, a često je potrebno i naknadno poravnavanje obradom odvajanja. Bočne sile koje šire materijal može preuzeti prihvatni prsten (**sl.3**).

Često se rade i oslobođenja na vanjskom obliku materijala, a posebno na dnu, da se spriječi prekid ili lom materijala (naprsnuće, **sl.3**). Obavezna je zaštitna rešetka da se izbjegnu eventualne ozljede.

Za dublje utiskivanje radi se **više alata za postupno utiskivanje s međuzarenjem.**

Za ravnanje proizvoda od lima koristi se alat sa šiljcima koji se obostrano malo utisnu u površinu tako da ostane ravna. Šiljci na pločama se rade križnim brušenjem (**sl.4**).

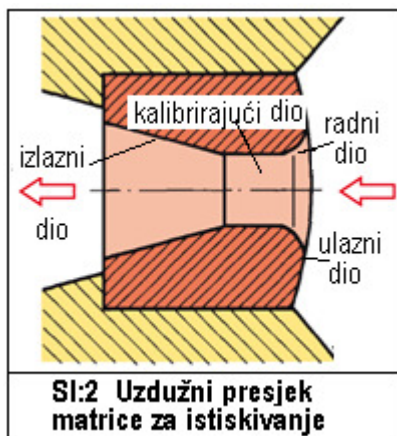
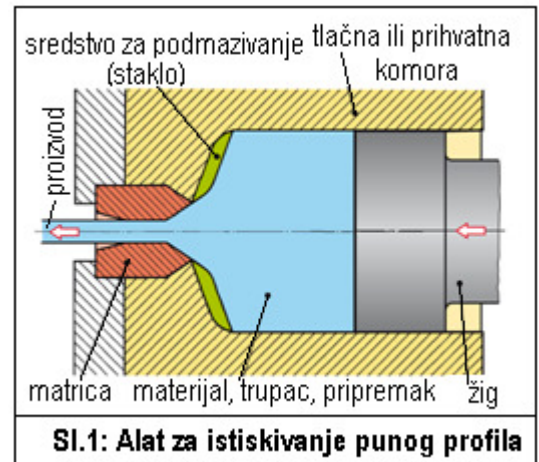


8.4 Alati za isprešavanje (istiskivanje i tečenje)

8.4.1 Istiskivanje ili ekstruzija je isprešavanje materijala kroz otvor u matrici radi smanjenja poprečnog presjeka ili promjene njegova oblika (sl.1).

Pod pritiskom žiga materijal se potpuno ili djelomično istiskuje kroz otvor u matrici. Proizvode se puni i šuplji profili, trake i cijevi od lakih i obojenih metala (sl.3 i 4) te čelični profili za posebne svrhe.

Istiskivanje može biti u hladnom i vrućem stanju za materijale veće čvrstoće (temperatura gnječenja).

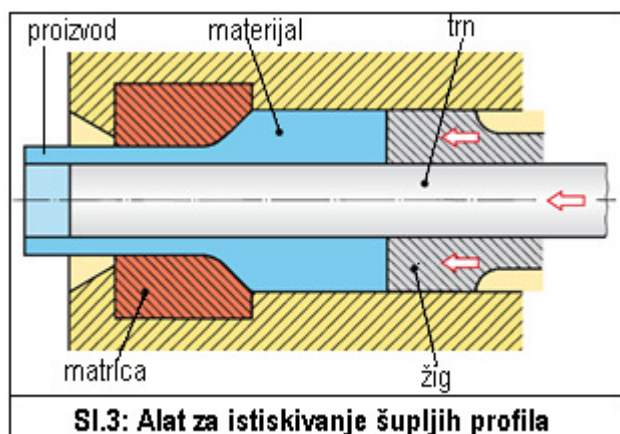


Alat za istiskivanje sastoji se od žiga, matrice, prihvatne ili tlačne komore te trna za izradu šupljih profila.

Poprečni presjek otvora matrice odgovara obliku proizvoda. U uzdužnom presjeku matrica se sastoji od ulaznog dijela s radijusom 1-5 mm radi lakšeg ulaza materijala, radnog, valjkastog kalibrirajućeg i izlaznog koničnog dijela radi smanjenja trenja uslijed elastičnog širenja materijala (sl.2).

Površine matrice i žiga treba fino polirati. Da bi se izbjeglo pojačano trošenje žiga i matrice koristi se staklo kao sredstvo za podmazivanje i toplinsku izolaciju.

Obično se rade od alatnog čelika za rad u toplom stanju Č6450 ili od tvrdog metala koji se lako obrađuje elektroerozijom sa žicom.



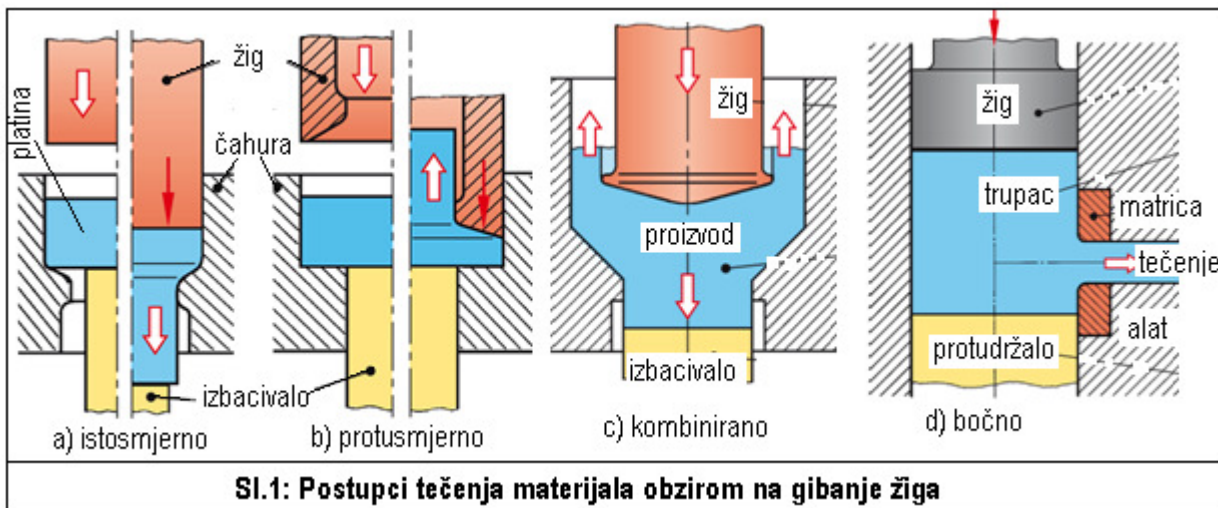
8.4.2 Tečenje ili udarno isprešavanje je postupak kojim se materijal pod visokim pritiskom dovodi u stanje plastičnog tečenja, najčešće u hladnom stanju.

Prikladni materijali za tečenje su olovo, kositar, cink, bakar, čisti aluminij i njegove legure te meke CuZn – legure. Čelik za tečenje treba biti s malim postotkom ugljika i visokom istezljivošću.

Tečenjem se ekonomično izrađuju šuplji dijelovi kružnog, ovalnog, kvadratnog i drugog poprečnog presjeka kao što su tube za paste, čahure, kućišta, sapnice i slično.

Materijal za tečenje priprema se kao uložak, odnosno deblja platina.

Obzirom na gibanje žiga **tečenje može biti: istosmjerno, protusmjerno, kombinirano i bočno (sl.1).**

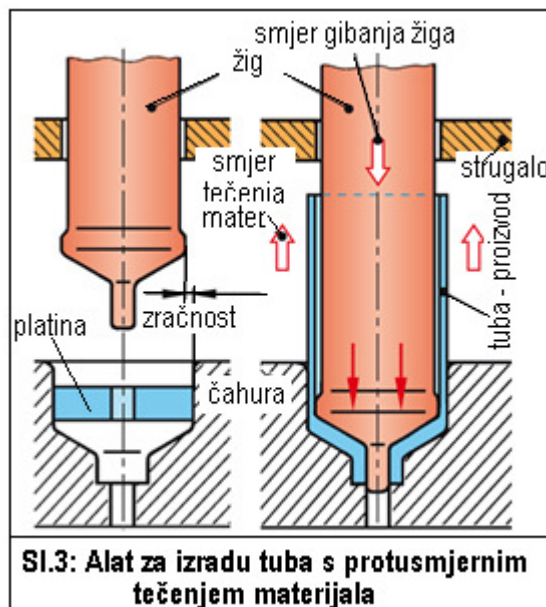
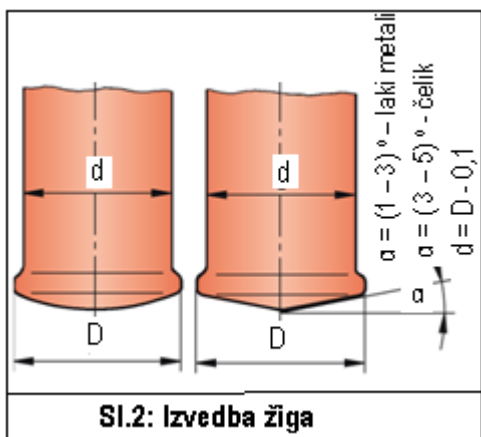


Alat za tečenje u osnovi se sastoji od žiga i čahure za tečenje. Izrađuju se kruto i stabilno obzirom na velike sile. Radne površine žiga i čahure se poliraju radi smanjenja otpora tečenja i trošenja.

Dužina tečenja za valjkaste šuplje dijelove od istezljivog materijala u jednom radnom hodu može biti do 8 puta veća od promjera.

Čelo žiga treba biti izbočeno što također olakšava tečenje materijala. Produžeci žiga i čahure rade se sa zračnošću 0,1 mm, a njihovi rubovi za tečenje valjkastog oblika na dužini 1 – 2 mm (sl.2). Alati za tečenje neželjeznih metala se ne podmazuju.

Na slici 3 je prikazan alat za izradu tuba s prethodno bušenom platinom.



8.5 Alati za provlačenje

Provlačenje je postupak vučenja materijala kroz otvor u matrici kojim se smanjuje njegov poprečni presjek, a povećava dužina (vučenje žice, šipke, cijevi, sl.1 i 2).

To je vlačno-tlačna deformacija u hladnom stanju kojom se, osim smanjenja presjeka, postiže kvalitetnija površina i veća točnost mjera.

Ako su potrebne veće promjene promjera, tada je provlačenje postupno s više alata i međuzarenjem.

Razlikujemo dva osnovna postupka: **provlačenje punog profila (žica) i šupljeg (cijev).**

Alat se sastoji od matrice s otvorom koji određuje vanjsku mjeru proizvoda, a kod vučenja cijevi pridodan je i **trn** koji određuju unutarnju mjeru cijevi.

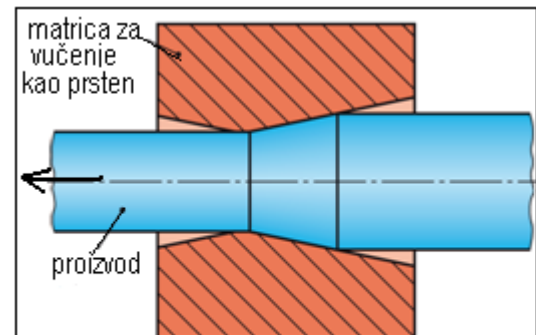
Matrica (sl.3) se sastoji od:

- ulaznog konusa koji osigurava uvlačenje maziva u matricu
- radnog konusa koji reducira presjek materijala s kutom uvlačenja $2\alpha = 8 - 16^\circ$.
- kalibrirajućeg dijela s laganim konusom 0.5° koji osigurava točnost mjere i
- izlaznog konusa koji sprečava lom matrice i eventualno oštećenje proizvoda

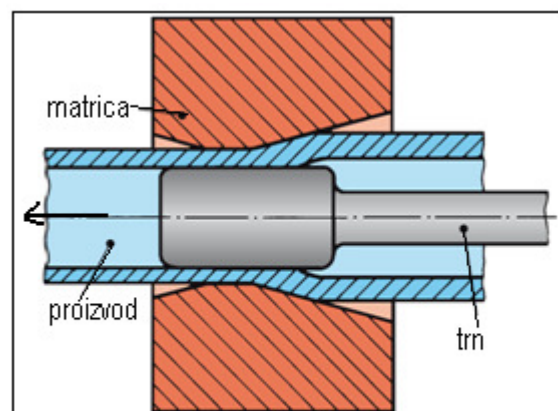
Otvor matrice se brusi i polira. Izrađuju se od Cr, CrNi ili CrMo legiranog čelika za veće promjere, tvrdog metala za manje i dijamanta za vučenje žice promjera do 0,2 mm.

Da bi se uštedilo na skupom materijalu matrica se ulaže u prihvatno grlo od konstrukcijskog čelika, a sa ulazne strane osigura od ispadanja.

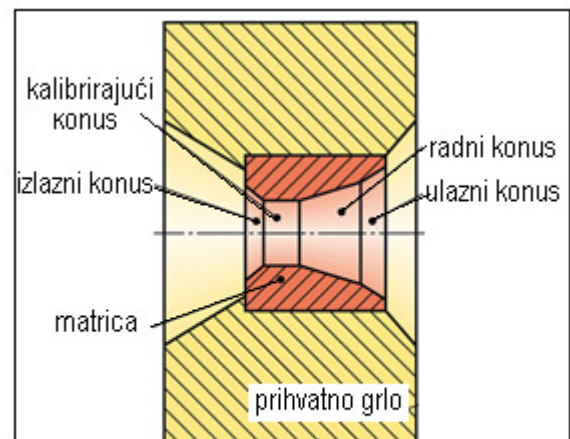
Na slici 5 je prikazana stara izvedba provlakalice s lancem za povlačenje.



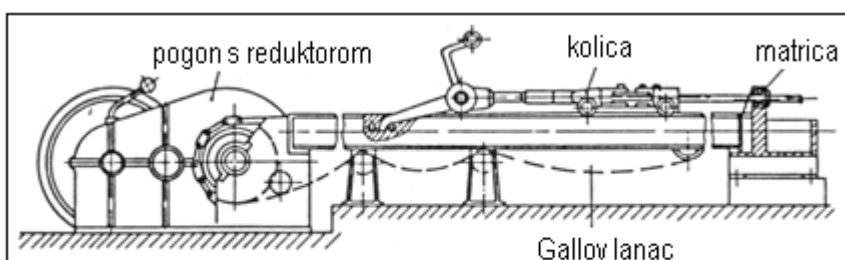
SI.1: Provlačenje punog profila



SI.2: Provlačenje šupljeg tijela - cijevi



SI.3: Izvedba matrice



SI.4: Provlakalica šipkastog materijala

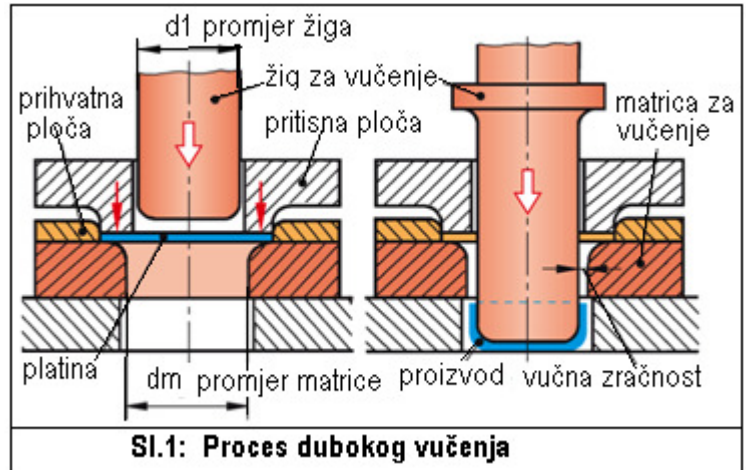
8.6 Alati za duboko vučenje

1. Duboko vučenje je preoblikovanje materijala iz ravne limene ploče (platina, rondela) u šuplje tijelo (posuda) različitog oblika i dubine, bez ili s promjenom debljine lima (sl.1).

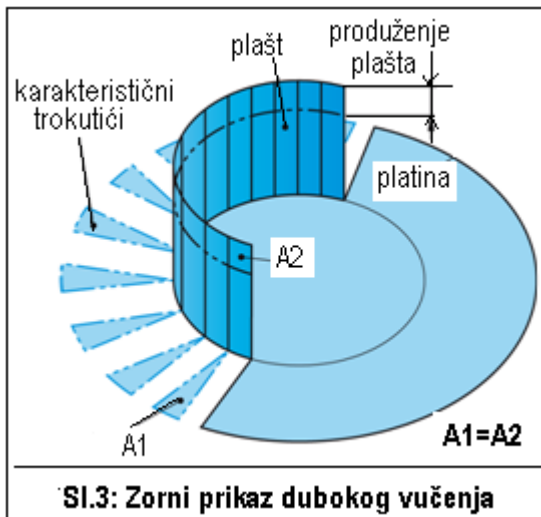
Alat se sastoji od: žiga i matrice za vučenje, prihvatne i pritisne ploče te skidala proizvoda sa žiga (sl.1 i 2).

Postupak vučenja: Platina se uloži u prihvatnu ploču i stegne pritisnom pločom po rubu matrice. Istovremeno se spušta žig koji silom vučenja preoblikuje platinu preko zaobljenog ruba matrice u šuplje tijelo. Sila pritisne ploče ne dopušta gužvanje materijala i osigurava njegovo ravnomjerno klizanje. Prevelika sila može prouzročiti pucanje materijala i probijanje dna posude.

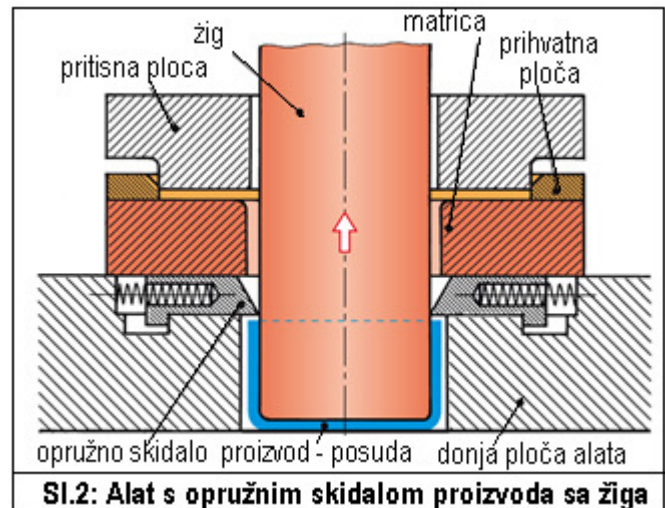
Dno posude je promjera žiga, bez deformacije i zadržava početnu debljinu lima. Izvučeni plašt posude se nešto izduži i stanji. No, pravi uzrok povećanja visine plašta je višak materijala platine u obliku karakterističnih trokutića (sl.3). Ako se zanemari stanjenje stijenke, onda je ukupna površina svih trokutića jednaka ukupnoj površini produženog dijela plašta: $\sum A_1 = \sum A_2$. Potrebna visina posude postiže se naknadnim obrezivanjem. Tijekom vučenja u platini djeluju vlačno-tlačne sile, a u plaštu vlačne (sl.4).



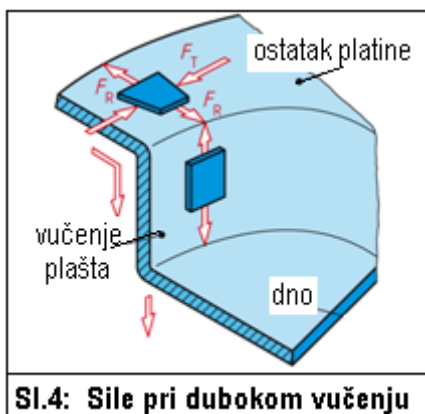
Sl.1: Proces dubokog vučenja



Sl.3: Zorni prikaz dubokog vučenja



Sl.2: Alat s opružnim skidalom proizvoda sa žiga



Sl.4: Sile pri dubokom vučenju

Za veće dubine vučenja, odnosno veći stupanj redukcije promjera izrađuje se više alata za postupno vučenje s međuzarenjem.

Zračnost između žiga i matrice ovisi o vrsti i debljini materijala. Premala zračnost uzrokuje naprsnuće, a prevelika nabor materijala (sl.1). Preporučuju se sljedeće vrijednosti vučne zračnosti:

- čelični lim (1,12 – 1,3) x s;
 - CuZn – legure (1,08 - 1,2) x s
 - Al - limovi (1,04 – 1,1) x s, gdje je s (mm) – debljina lima.
- Veće vrijednosti zračnosti su za tanje limove, a manje za deblje.

Podmazivanje pri vučenju je neophodno da bi se smanjilo trenje između alata i lima te omogućilo klizanje materijala po čitavom opsegu. Također se smanjuje trošenje alata i opterećenje materijala.

Izbor mazivog sredstva (tablica) ovisi o vrsti materijala i kvaliteti njegove površine, brzini vučenja i sili pritisne ploče.

Mazivo se nanosi u tankom sloju, ravnomjerno po cijeloj površini lima.

Vrste maziva:		
Materijal:	Jednostavno vučenje	Složeno vučenje
čelični lim	sapunica, vapneno mlijeko, sapunica s grafitom, petrolej s aluminijskim prahom	mješavina repičinog i ricinusova ulja s talkom, ulje s MoS, fosfatirani lim
nehrđajući čelik	voda s grafitom, fosfatirani lim	laneno ulje s blajvajsom i sumporom, fosfatirani lim
bakar i legure	repičino ulje s grafitom	repičino ulje sa sapunom otopljenim u vodi
aluminij i legure	vazelin, repičino ulje, loj	mineralno ulje, petrolej s grafitom

2. Tehnološki proces dubokog vučenja:

a) Određivanje oblika i mjera platine

Mjera platine određuje se po principu jednakih površina ili volumena prije i poslije vučenja. Ako se zanemari stanjivanje debljine lima, onda je površina platine prije vučenja jednaka površini posude nakon vučenja.

Oblik platine za rotacione posude je krug koji omogućuje ravnomjerno klizanje materijala po čitavom opsegu (sl.1):

$$A_{\text{platine}} = d_o^2 \pi / 4 \text{ (mm}^2\text{)} - \text{površina platine}; A_{\text{posude}} = A_{\text{dna}} + A_{\text{plašta}} = d_1^2 \pi / 4 + d_1 \pi h \text{ (mm}^2\text{)};$$

$$A_{\text{platine}} = A_{\text{posude}};$$

$$\text{Promjer platine: } d_o = (d_1^2 + 4d_1 h)^{1/2} \text{ (mm)}$$

Formule za izračunavanje površine **različitih rotacionih posuda mogu se naći u raznim tablicama.**

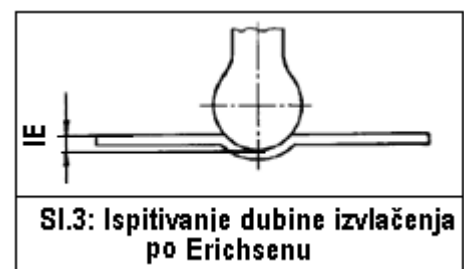
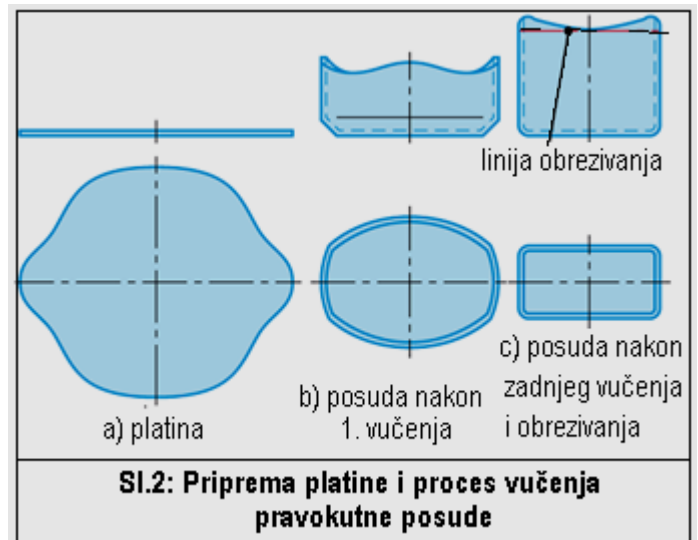
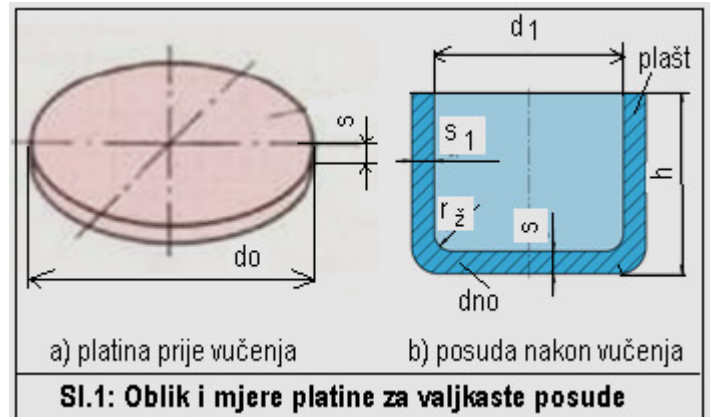
Određivanje oblika i mjera platine za nerotacione posude,

kvadratnog ili pravokutnog oblika, je otežano i bez dovoljno iskustva. Postoje formule za približno računanje. Najpovoljniji oblik platine se utvrđuje probom i dotjerivanjem. Na platini se ucrtava mreža s kvadratićima i analizira njihova deformacija nakon vučenja. Na taj se način postiže ravnomjerno klizanje i potrebna visina posude po čitavom opsegu te optimalno iskorištenje materijala. Oblik platine i proces vučenja pravokutne posude prikazani su na **sl. 2.**

b) Određivanje stupnja redukcije i broja operacija vučenja

Posude veće dubine i složenog oblika ne mogu se dobiti samo s jednom operacijom vučenja. Za određivanje broja operacija koristi se iskustvo, ispitivanje i probe vučenja te iskustveni stupanj redukcije "m".

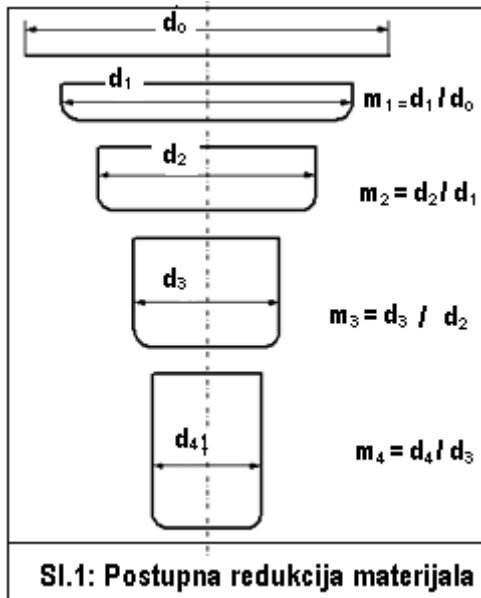
Pri ispitivanju dubine vučenja po **Erichsensu** mjeri se dubina prodora kuglastog utiskivala u lim u trenutku pojave prve napukline. Koristi se za limove debljine 0,2-3 mm (**dubina IE, sl.3**).



Stupanj redukcije je omjer promjera materijala poslije i prije vučenja (sl.1): $m = d_1 / d_0$ (d_2 / d_1 ; d_3 / d_2 ; ...),

gdje je: d_0 – promjer platine, d_1 – promjer posude nakon prvog vučenja, d_2 – promjer posude nakon drugog vučenja **Ukupni stupanj redukcije: $m_{uk} = m_1 \times m_2 \times m_3 \dots$**

Stupaj redukcije ovisi o: vrsti i svojstvima materijala (čvrstoća i istezljivost), veličini sile pritisne ploče, kvaliteti površine lima i vučne matrice, zaobljenju ruba matrice i žiga, vučnoj zračnosti te vrsti i načinu nanošenja maziva. Preporučljive i moguće vrijednosti stupnja redukcije prikazane su tablično (sl.2).



Vrste materijala	vlačna čvrstoća N/mm ²	stupanj redukcije			temp. žarenja °C
		1. vuč. m ₁	2. vuč. m ₂ bez sa žarenjem		
nelegirani čelik DC01 (St 12) DC03 (RRSt 13)	270-410 270-370	1,8 2,0	1,2 1,3	1,6 1,7	700
legirani čelik C4574 - prokron 12sp.	590-740	2,0	1,2	1,8	
legure bakra CuZn28 CuZn37	260-300 280-340	2,1 2,0	1,3 1,3	1,8 1,7	580
bakar Cu95,5	200	1,9	1,4	1,8	
laki metali Al99,8 AlMg1 Ti99,7	70 140 395-540	1,95 2,05 1,9	1,4 1,4 -	1,8 1,8 1,7	350

Sl.2: Preporučljive vrijednosti stupnja redukcije "m"

c) Određivanje potrebne sile vučenja

Potrebna sila vučenja ovisi prvenstveno o čvrstoći materijala, otporu sabijanja platine, trenju između platine i pritisne ploče s gornje strane i matrice s donje strane te otporu savijanja preko ruba matrice.

Ukupna sila vučenja računa se prema iskustvenoj formuli: $F_{uk.} = 1,15 F_v + F_p$ (N), gdje je: F_v - sila vučenja, a F_p – sila pritisne ploče.

Formule za izračunavanje navedenih sila uzimaju u obzir : čvrstoću materijala, promjer platine i otvora matrice, radijus matrice, debljinu lima, specifični površinski pritisak kao i razne korekzione koeficijente. Ukupna sila utječe na izvedbu alata i izbor preše.

d) Izbor i izrada alata za duboko vučenje

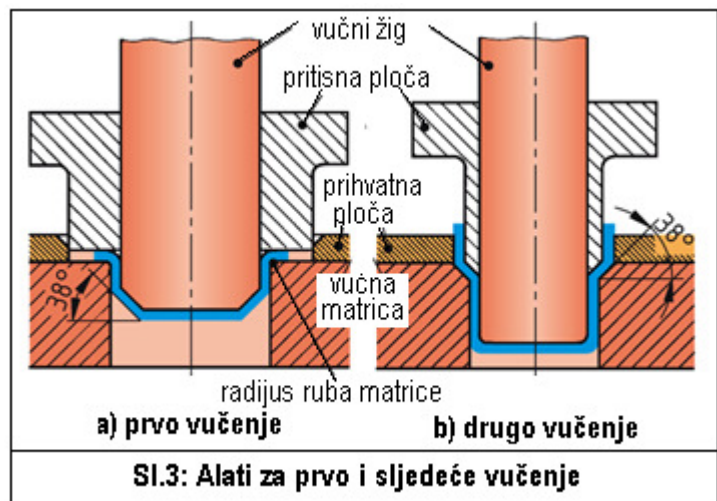
Alati za duboko vučenje su različiti i mogu se razvrstati po više kriterija:

- prema redoslijedu vučenja:

alati za prvo vučenje i alati za sljedeće vučenje (sl.3)

- prema načinu rada preš preše:

alati za rad na jednoradnoj i alati za rad na dvoradnoj preši



Napomene pri izradi alata za duboko vučenje:

- prodore u alatu, klizne površine i zaobljenja matrice potrebno je polirati ili još bolje lepati
- tragovi obrade smiju biti samo u smjeru klizanja materijala
- **veličina zaobljenja na matrici r_m** ovisi o debljini lima i stupnju redukcije. Računa se po iskustvenoj formuli:

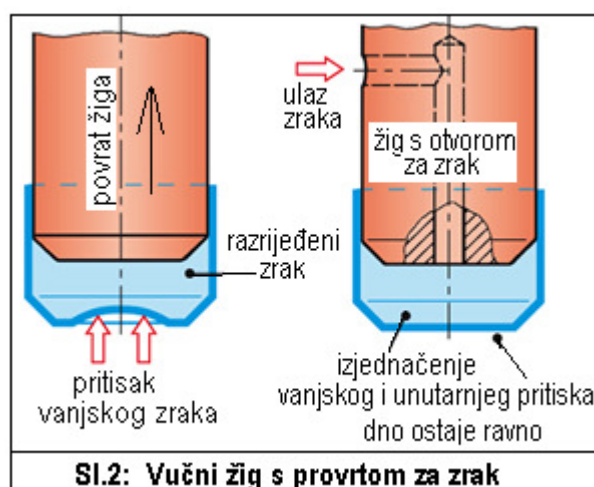
$$r_{m1} = 0,8 ((d_0 - d_1) s)^{1/2} \text{ (mm)} - \text{za prvo vučenje i}$$

$$r_{m2} = 0,8 ((d_1 - d_2) s)^{1/2} \text{ (mm)} - \text{za drugo vučenje}$$

- premali radijus uzrokuje napuknuće pri dnu posude, a preveliki nabore materijala na gornjem dijelu plašta
- **radijus zaobljenja žiga r_z** treba biti što veći, a posebno za postupno vučenje s više alata. Obično se radi konus pod kutom $2\alpha = 2 \times 38^\circ$. Rubovi konusa trebaju biti zaobljeni.
- **minimalna zračnost**, odnosno razlika u mjerama matrice i žiga je vrlo važna. Ona ovisi o materijalu i postupku vučenja: prvo ili sljedeće vučenje (sl.1).
- pritisna ploča za prvo vučenje je ravna, a za sljedeće konična s istim konusom kao na žigu prvog vučenja
- **pri skidanju proizvoda sa žiga nastaje potlak** zbog kojeg vanjski pritisak može udubiti dno posude. Da se izbjegne deformacija dna potrebno je izbušiti otvor u žigu za izjednačenje pritiska (sl.2).

	prvo vučenje	sljedeće vučenje
vučna zračnost	prvo vučenje	sljedeće vučenje
materijal	debljina lima s do 2 mm 2,5-4 mm	debljina lima s do 4 mm
čelik	$z_1 = 1,16 s$ $z_1 = 1,12 s$	$z_2 = 1,08 s$
teški metali	$z_1 = 1,08 s$ $z_1 = 1,06 s$	$z_2 = 1,04 s$
laki metali	$z_1 = 1,04 s$ $z_1 = 1,03 s$	$z_2 = s$

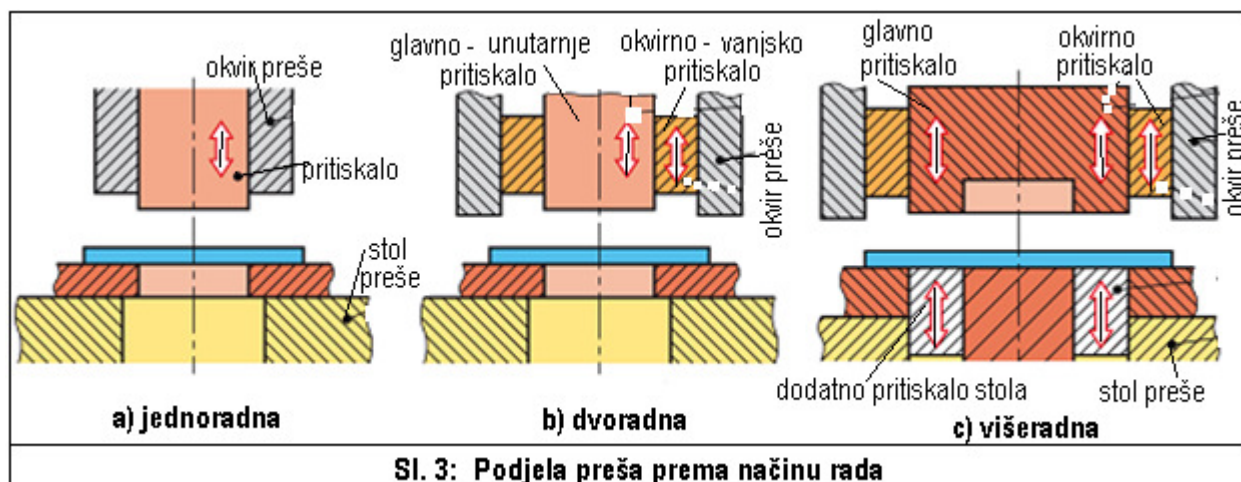
Sl.1: Vučna zračnost za prvo i sljedeće vučenje



e) Izbor preše i izvedba alata

Preše za rad s alatima (sl.3) dijele se prema načinu rada, odnosno prema gibanju koja prenose na alat:

- **jednoradne** – imaju samo jedno pritiskalo koje se pomiče gore – dolje.
- **dvoradne** – imaju dva pritiskala, glavno (unutarnje) i okvirno (vanjsko), s međusobno neovisnim gibanjem.
- **višeradne** – prema vrsti pogona izvode više gibanja istovremeno ili postupno. Unutar stola preše je hidraulički cilindar koji preko svornjaka prenosi dodatno gibanje na alat.

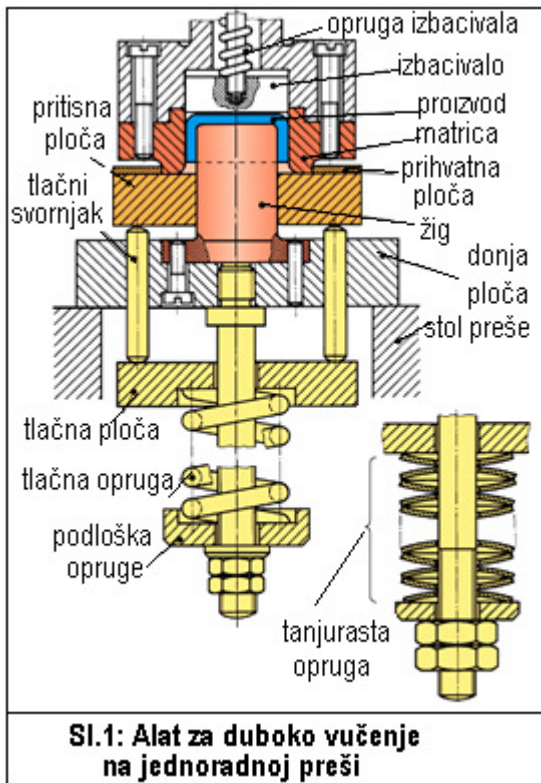


Izvedba alata za duboko vučenje ovisi o preši koju imamo na raspolaganju:

Alati za rad na jednoradnoj preši (sl.1):

Sila koja pridržava lim za vrijeme vučenja ostvaruje se opružnim sklopom na pritisknoj ploči. S povećanjem dubine vučenja povećava se i sila opruge što može prouzročiti pucanje materijala. Probom alata treba podesiti silu opruge. Dobro podešavanje sile je moguće s tanjurastim oprugama.

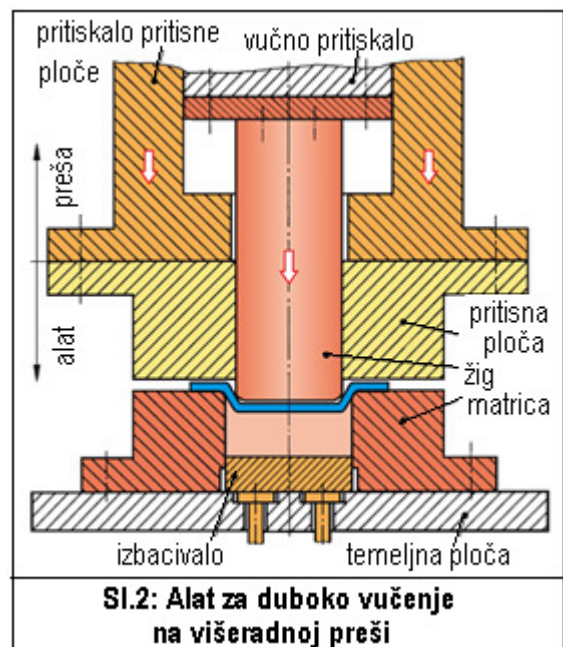
Na pritiskalo preše postavlja se matrica za vučenje s opružnim izbacivalom proizvoda, a na stol preše žig za vučenje s opružnom pritisknom pločom. Opružni sklop je unutar otvora u stolu preše.



Alati za rad na višeradnoj preši (sl.2):

Na vanjsko pritiskalo postavlja se pritiska ploča za pridržavanje lima, a na unutarnje (glavno) žig za vučenje. Matrica s izbacivalom proizvoda se postavlja na radni stol preše.

Za dvoradne preše izbacivalo je opružno.



f) Proba alata i greške vučenja

Proba alata zahtjeva iskustvo i odgovornost.

Brzina vučenja se utvrđuje na preši za koju je alat predviđen. Paziti na ravnomjernu raspodjelu vučne zračnosti po čitavom opsegu. Prije stezanja umeću se pravokutno savijeni limići debljine zračnosti po rubu matrice, spusti pritiskalo preše sa žigom, a zatim stegne matrica.

Greške pri vučenju:

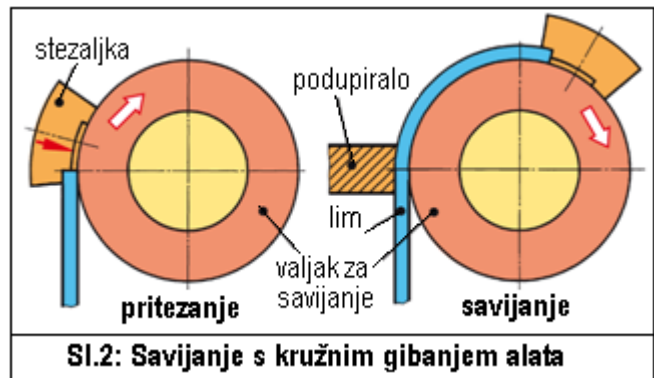
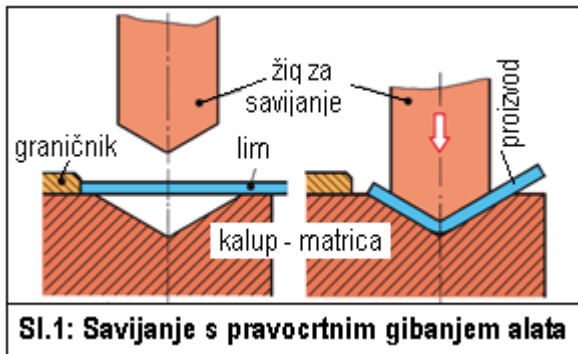
- proizvod puca pri dnu:** mala zračnost, mali radijus na žigu i matrici, visoka brzina vučenja, velika sila pritiskne ploče, veliki stupanj redukcije
- okomiti nabori materijala na gornjem dijelu plašta:** velika zračnost, veliki radijus matrice, mala pritiska ploča
- uglati i nepravilan proizvod:** nepravilna platina
- uglovi viši od stranica:** smanjiti platinu na ovim mjestima
- okomite pukotine na gornjem rubu:** premalo materijala na ovim mjestima
- valoviti rub plašta:** bolje vučenje lima u smjeru valjanja
- neispravan proizvod:** nesimetrična prihvatna ploča, pogrešno mazivo, neprikladni lim

8.7 Alati za savijanje

1. Opći pojmovi

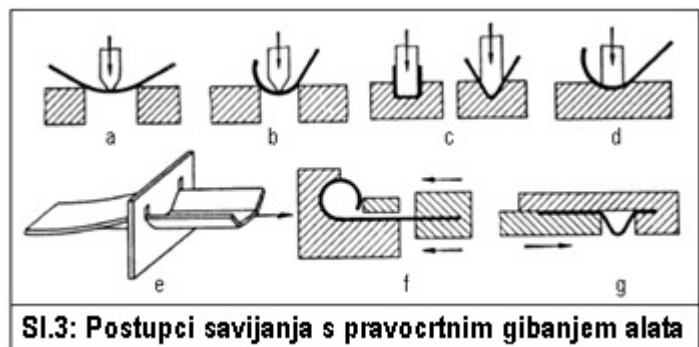
Savijanje je preoblikovanje lima, trake, cijevi i drugih poluproizvoda preko ruba alata bez značajne promjene debljine materijala.

Alati za savijanje mogu biti s pravocrtnim i kružnim radnim gibanjem (sl. 1 i 2).



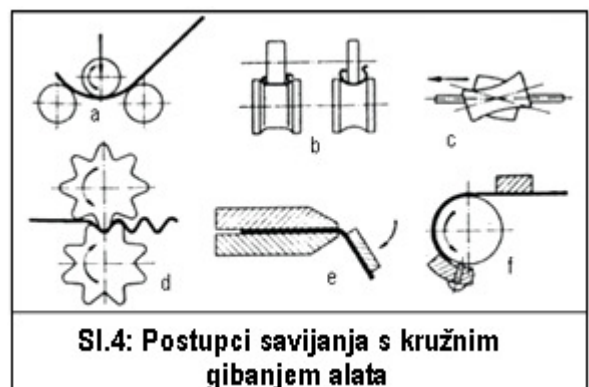
Postupci savijanja s pravocrtnim gibanjem alata (sl.3):

- slobodno savijanje
- slobodno zaobljavanje
- savijanje u alatu
- zaobljavanje u alatu
- savijanje vučenjem
- ovijanje
- izvijanje



Postupci savijanja s kružnim gibanjem alata (sl.4):

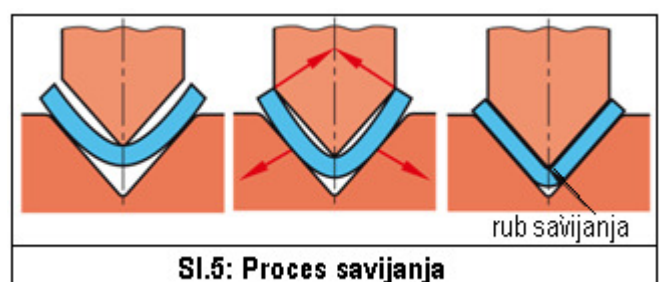
- zaobljavanje s valjcima
- profilno valjanje
- ravnanje valjcima
- valovito savijanje
- zakretno savijanje
- kružno savijanje



Proces savijanja (sl.5):

Pod opterećenjem, najčešće momentom savijanja materijala na rubu alata, mijenja se kutni položaj jednog dijela proizvoda u odnosu na njegov drugi dio.

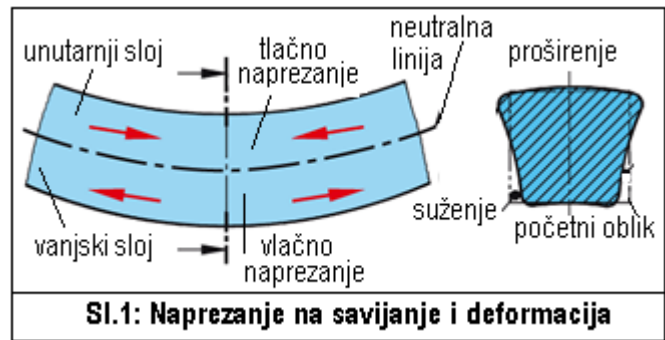
U prvoj fazi je slobodno savijanje i klizanje materijala po bokovima matrice, zatim zakretanje krakova i njihovo oslanjanje na bokove žiga te završno ispravljanje i ravnanje krakova između površina žiga i matrice. Najveće sile su u završnoj fazi ravnjanja (peglanje).



Savijanjem lima vanjski se sloj isteže i sužava zbog vlačnog naprezanja, a unutarnji sabija i širi zbog tlačnog naprezanja (sl.1).

Neutralna linija je linija prijelaza jedne vrste naprezanja u drugu. To je linija vlakana materijala bez naprezanja i promjene dužine te jednaka razvijenoj dužini lima prije savijanja (sl.1).

Položaj neutralne linije nije uvijek na sredini debljine lima, već se pomiče prema unutarnjem radijusu savijanja ovisno o veličini deformacije (sl.2).



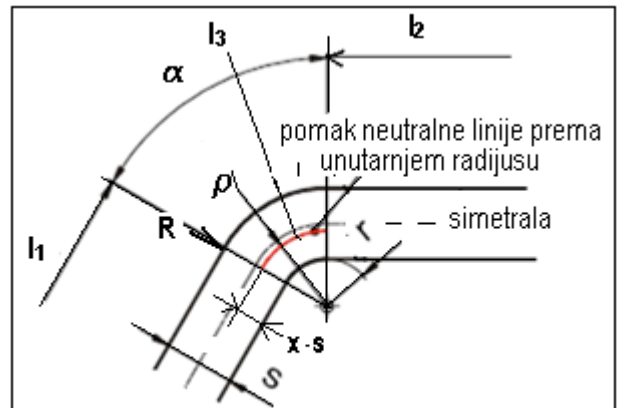
Sl.1: Naprezanje na savijanje i deformacija

2. Tehnološki proces izrade alata za savijanje

a) Neutralna linija i razvijena dužina lima (sl.2):

Radijus neutralne linije: $\rho = r + xs$,
gdje su: r – unutarnji radijus savijanja, s - debljina lima,
 x – korekcionni faktor pomaka neutralne linije koji ovisi o omjeru r/s prema tablici :

r/s	0,1	0,25	1,0	2,0	>4
x	0,27	0,32	0,42	0,455	0,5



Sl.2: Pomak i radijus neutralne linije $\rho = r + xs$

Dužina luka neutralne linije: $l_3 = \frac{\pi\alpha}{180} (r + x \cdot s)$ (mm), gdje je α – kut savijanja.

Ukupna dužina razvijenog lima (sl. 2): $l_0 = l_1 + l_2 + l_3 = l_1 + l_2 + \frac{\pi\alpha}{180} (r + x \cdot s)$ (mm).

b) Određivanje radijusa savijanja i povratnog kuta (sl.3):

Radijus savijanja r_1 na žigu ne smije biti manji od minimalnog pri kojemu nastupa pucanje materijala i veći od maksimalnog pri kojem prestaje trajna deformacija : $r_{min} < r_1 < r_{max}$.

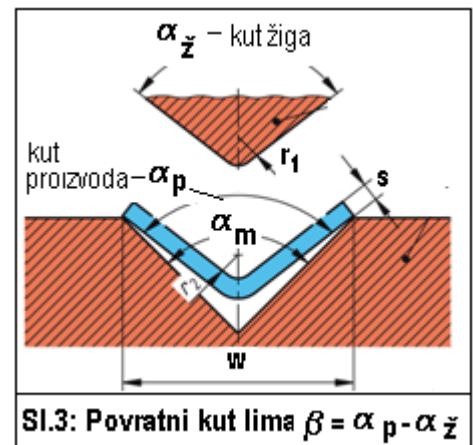
Veličina radijusa računa se po formulama:

$$r_{max} \ll \frac{E \cdot s}{2 \cdot R_e} \approx \frac{E \cdot s}{2 \cdot R_{p0,2}} \quad r_{min} \approx c \cdot s$$

gdje su: s – debljina lima, E – modul elastičnosti materijala,

R_e – granica elastičnosti, R_p - granica proporcionalnosti,

a c – koeficijent korekcije koji ovisi o vrsti materijala i položaju linije savijanja u odnosu na smjer valjanja materijala. Savijati po mogućnosti okomito na smjer valjanja (tablica).



Sl.3: Povratni kut lima $\beta = \alpha_p - \alpha_z$

Povratni kut β je elastični povrat materijala nakon savijanja. Zbog toga kut žiga mora biti manji od kuta na proizvodu (tablica i sl.3):

$$\alpha_z = \alpha_p - \beta.$$

koef. C	žareno		tvrdo	
	okomito	paralel	okomit	paralel
Č0361	0,2	0,6	0,6	1,6
Č0461	0,3	0,8	0,8	1,5
Č0561	0,5	1	1	1,7

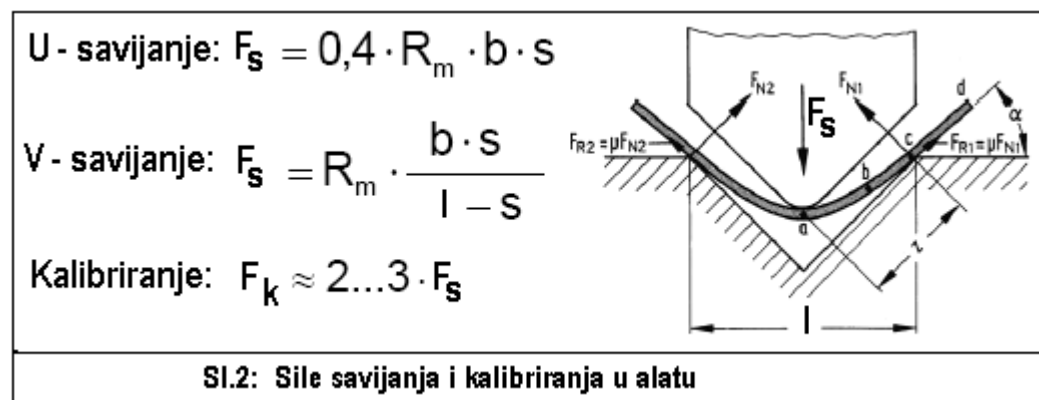
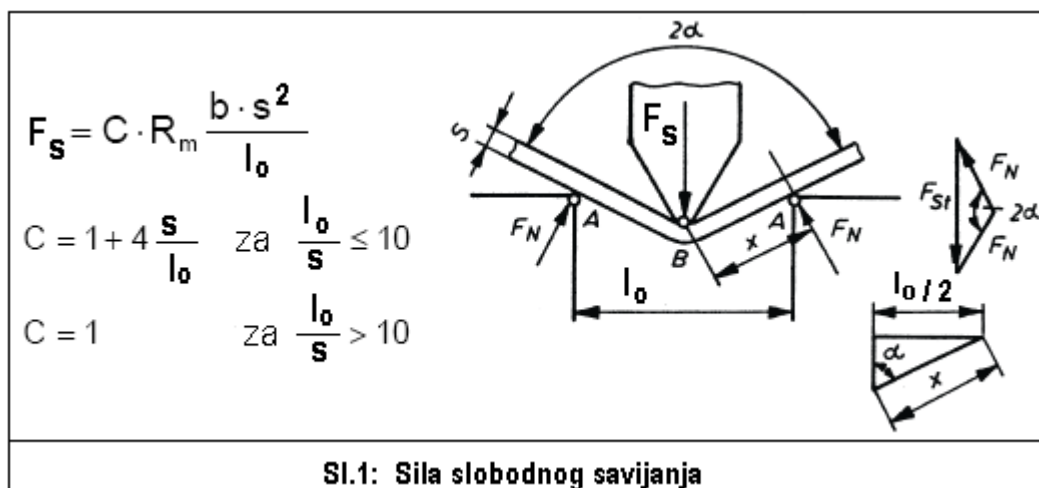
povratni kut za meki čelik β	omjer r/s		
	1	1-5	>5
$s = 0,8$ mm	4°	5°	6°
$s = 0,8 - 2$ mm	2°	3°	4°
$s > 2$ mm	0°	1°	2°

c) Izračunavanje sile savijanja

Sila savijanja F_s je promjenjiva tijekom procesa: u početku je najmanja zbog velikog kraka savijanja, zatim se povećava zbog elastične i plastične deformacije, ponovo smanjuje zbog klizanja materijala po rubovima matrice i na kraju poveća na najveću vrijednost zbog ispravljanja krakova lima.

Za kvalitetne proizvode provodi se i **kalibriranje**, odnosno ravnanje krakova i dotjerivanje radijusa savijanja sa silom koja je 2 do 3 puta veća od najveće sile savijanja.

Formule za izračunavanje sile savijanja (sl.1 i 2):



Oznake i mjerne jedinice:

F_s (N) – sila savijanja

C – korekcionni koeficijent ovisan o omjeru l_0 / s

R_m (σ_m) (N/mm²) – vlačna čvrstoća materijala: za meki čelik 270 – 410, nehrđajući austenitni čelik 600 – 700 u mekom i 950 u otvrdjenom stanju, aluminij 75 – 155, Al – legure 205 – 310, bakar 220 – 260 i mjed 280 – 380

b (mm) – širina lima, odnosno dužina linije savijanja

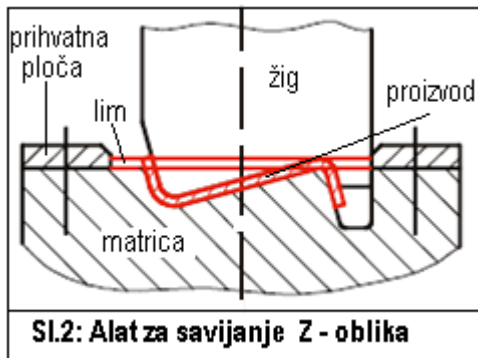
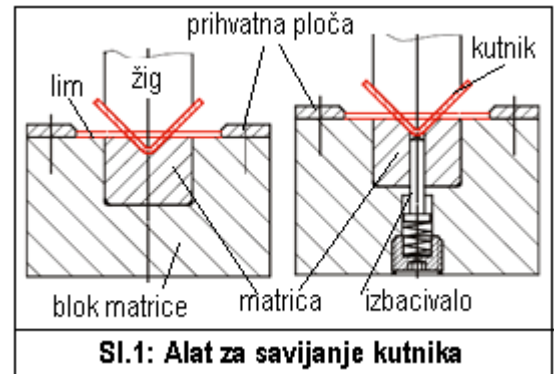
l_0 (mm) – početni krak kod slobodnog savijanja

l (mm) - krak savijanja u alatu (razmak između rubova matrice)

3. Izvedbe alata za savijanje

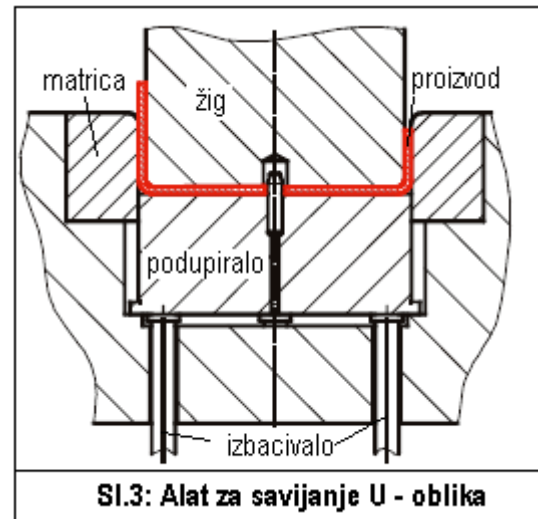
a) Alat za savijanje L – oblika (kutnik sl.1):

Jednostavni su za izradu. Pripjatna ploča (graničnik) treba osigurati točan položaj lima tako da linija savijanja bude u sredini matrice. Pri postavljanju alata na prešu paziti da se poklapaju površine savijanja žiga i matrice. Mogu biti s izbacivalom proizvoda ili bez njega. Za savijanje dužih proizvoda od tanjeg lima koriste se rubne savijalice (abkant – preše) s dugim žigovima i prizmama s različitim udubljenjima.



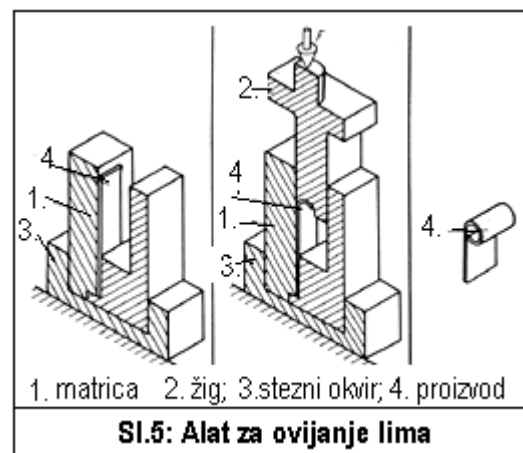
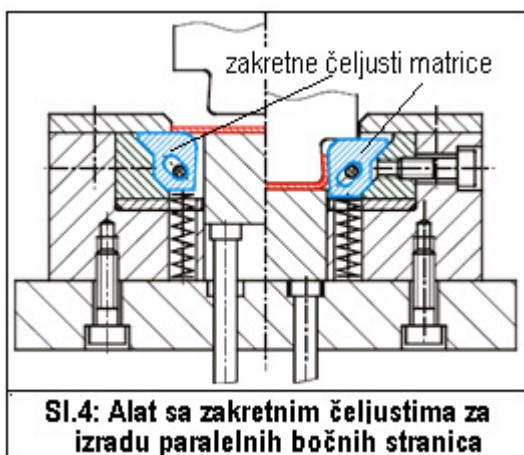
b) Alat za savijanje Z – oblika (sl.2):

Savijanje može biti s dva alata ili s jednim za velike količine proizvoda. Zbog dvostrukog savijanja žig mora istovremeno dodirnuti i početi savijati lim na dva mjesta.



c) Alat za savijanje U – oblika (sl.3):

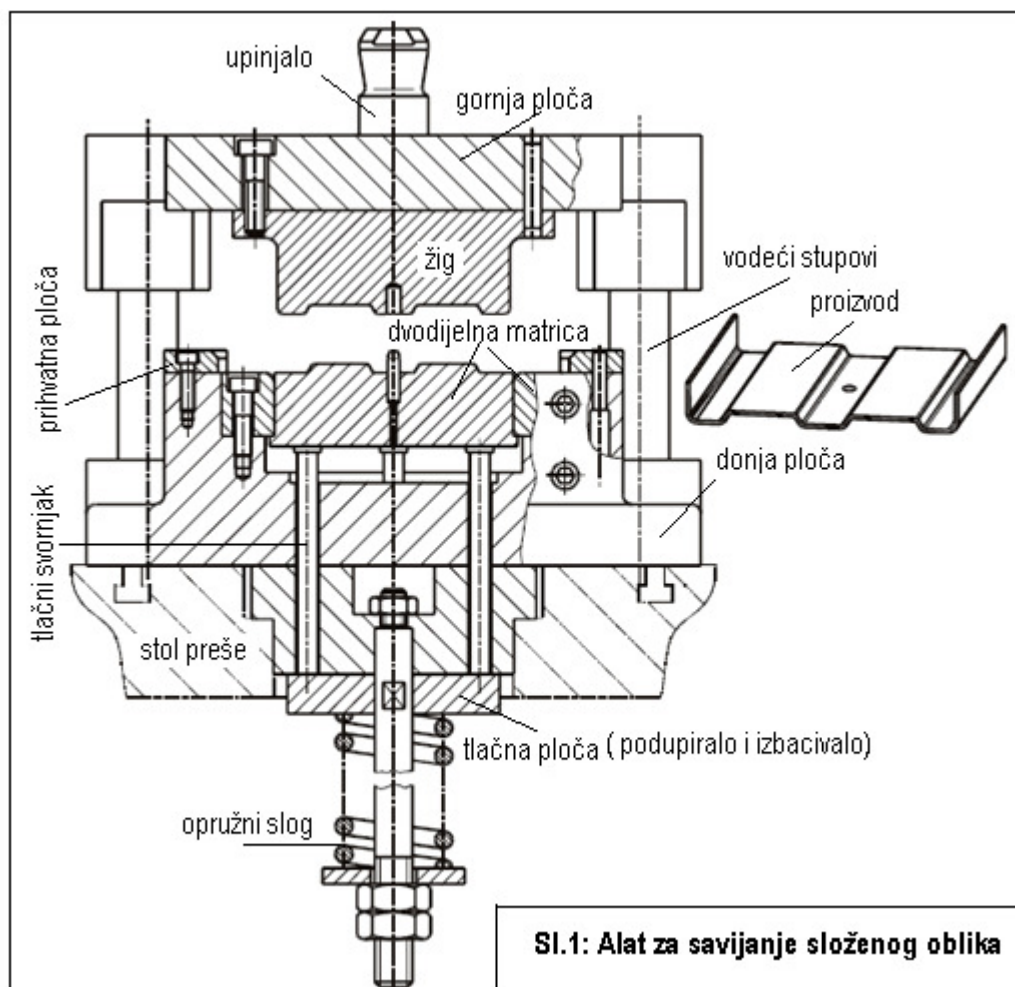
Savijanje može biti u jednom alatu, tako da istovremeno počne po svim linijama savijanja. Zbog elastičnog povrata materijala (otvaranje bočnih stranica) obvezno se ugrađuje izbacivalo proizvoda, a bočne stranice nisu potpuno paralelne. Za točnu paralelnost koriste se alati s negativnim kutom na žigu ili matrici i posebnim konstrukcijskim rješenjima (zakretne čeljusti matrice sl.4).



d) Alat za ovijanje (sl.5):

Materijal se uloži u donji dio alata tako da njegov prethodno predsavijeni jedan kraj bude prema gore. Pri spuštanju žig zahvaća materijal rubom svog valjkastog udubljenja i ovija ga. Zbog velikog trenja žig se kali i polira.

e) **Alat za savijanje složenog oblika (sl.1):**



Alat je predviđen za izradu složenog proizvoda s 10 linija savijanja u jednom radnom hodu. Potrebna je pomna analiza procesa savijanja pri konstrukciji alata da se izbjegnu mjesta sa stanjenjem ili gužvanjem lima. Ovdje je trebalo uskladiti mjere i oblik proizvoda s procesom savijanja (dubina i nagib unutarnjih bočnih stranica).

Matrica se sastoji od nepomičnog vanjskog prstena i pomičnog unutarnjeg dijela koji je povezan preko svornjaka s tlačnom pločom te služi i kao podupiralo lima tijekom savijanja i izbacivalo proizvoda nakon savijanja.