

VISOKA POSLOVNO-TEHNIČKA ŠKOLA
STRUKOVNIH STUDIJA U UŽICU

OBRADA DEFORMISANJEM

Prof. dr Predrag M. Drobniak dipl.inž.maš.

SAVIJANJE

- Obrada savijanjem je veoma zastupljena kao grana tehnologije u metalnoj industriji.
- U kombinaciji sa tehnologijom zavarivanja proizvode se delovi kako u maloserijskoj tako i u velikoserijskoj proizvodnji.
- Konstrukcije izrađene tehnologijom savijanja su lakše od livenih, a proizvodni proces je jednostavniji što se odražava kroz ekonomske efekte.

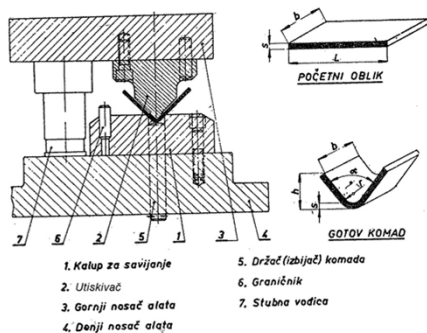
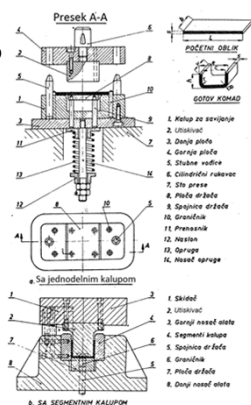
- Prema tehnološkim karakteristikama proces savijanja se može podeliti na:
 - Savijanje na univerzalnim presama (krivajnim, ekscentar, frikcionim i hidrauličkim) pomoću specijalnih alata;
 - Profilno savijanje limova na presama za savijanje profila iz lima (abkant prese);
 - Kružno savijanje valjcima na rotacionim mašinama za savijanje;
 - Savijanje delova iz žice ili relativno uske trake na specijalnim mašinama za savijanje i ostale specijalne vrste savijanja.

• Moguće je razlikovati:

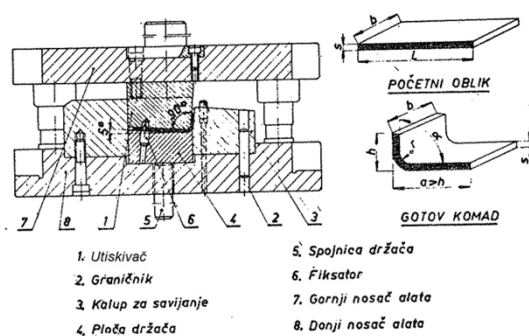
- savijanje lima (ploča i ravno valjanog materijala);
- savijanje profilisanog materijala.

Kao i :

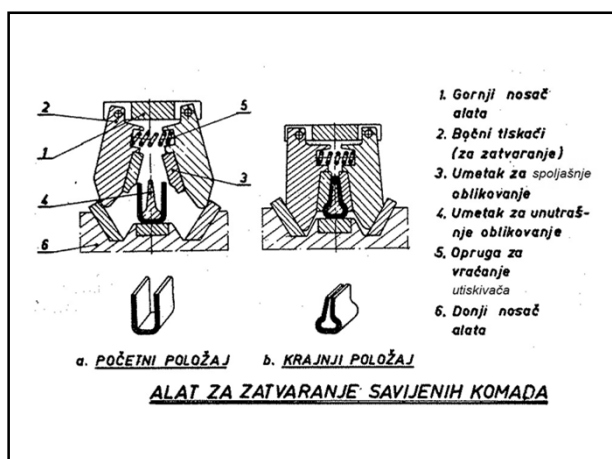
- Ugaono savijanje
- Kružno savijanje



Alat za savijanje V-profila

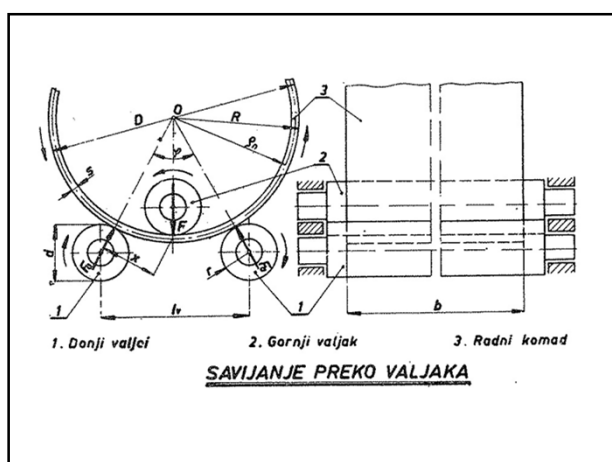


Alat za savijanje jednostrukog ugaonika



KRUŽNO SAVIJANJE POMOĆU VALJAKA

- Savijanje preko valjaka-kružno savijanje, primenjuje se za izradu cilindričnih delova relativno velikih prečnika (rezervoari, doboši..).
- Karakteristiše se velikim odnosom poluprečnika savijanja i debljine lima.



- Uslov za kružno savijanje pomoću valjaka:

- $\frac{D}{s} < \frac{E}{\sigma_v} + 1$

- Gde je:

- D – spoljni prečnik savijenog komada

- s – debljina lima

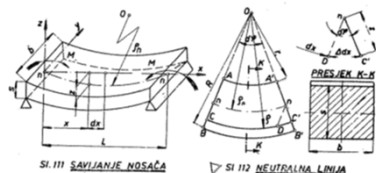
- E – modul elastičnosti

- σ_v - napon tečenja

UGAONO SAVIJANJE

- Dalje razmatranje biće ograničeno pretežno na jednougono savijanje limova, debljine do 10mm i odnosom širine prema debljini $b/s > 5$.

- Da bi se uočile promene posmatramo promene koje nastaju na elementu dužine nosača dx tj. AB i A'B' koji su se zakrenuli za $d\varphi$.



- Pod uticajem momenta M nosač se deformiše tako da se vlakna A-A' skraćuju a donja vlakna B-B' izdužuju.

- Negde između leže neutralna vlakna koja se pri ovom opterećenju ne menjaju, pa presek sa ravni savijanja daje neutralnu ili elastičnu liniju.

- Dužina neutralnog vlakna ostaje nepromenjena tj.:

- $nn = dx = \rho_n \times d\varphi$

- Jedinичna deformacija:

- $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_u} = \frac{\Delta dx}{dx} = \frac{z}{\rho_n} = \frac{\rho - \rho_n}{\rho_n}$

- Gde je:

- z – rastojanje vlakna od neutralne linije;

- ρ_n - poluprečnik krivine nn linije / posmatranog vlakna

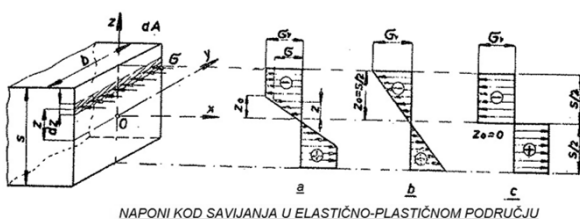
- Najveću deformaciju trpe najudaljenija vlakna od nn linije, pa ako linija prolazi kroz središte preseka tada je:

$$\epsilon_{\max} = \frac{s}{2 \rho_n} = \frac{R - \rho_n}{\rho_n} = \frac{\rho_n - r}{\rho_n} \text{ gde je:}$$

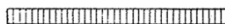
- s – debljina lima
- r – unutrašnji poluprečnik savijanja
- R – spoljašnji poluprečnik savijanja

- Zavisno od vrste i veličine napona koji se javljaju u ravni savijanja, problem savijanja se tretira na dva načina:

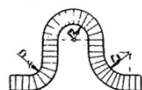
- Savijanje u elastično-plastičnom području,
- Čisto plastično savijanje.



- Za sve navedene slučajeve savijanja važi Bernulijeva hipoteza o ravnim presecima pri čemu svi poprečni presezi upravni na osu savijanja ostaju ravni u toku celog procesa, a uzdužne deformacije pojedinih slojeva linearno rastu od neutralne linije ka periferiji.



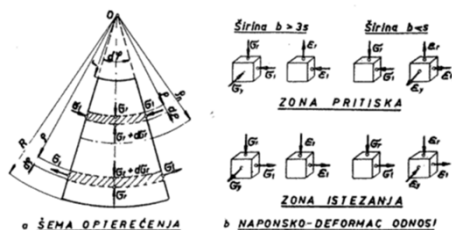
a. RAZVIJENA DUŽINA



b. SAVIJENI KOMAD

DOKAZ ODRŽIVOSTI
HIPOTEZE O RAVNIM
PRESECIMA

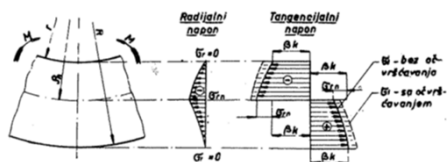
- Najveća deformacija u toku procesa savijanja javlja se u tangencijalnom pravcu i to iznad nn linije - tangencijalnim naponima na pritisak, a ispod nn linije na istezanje.



- Posmatrani slučaj $\epsilon_y = 0$ svodi se na problem ravanskog deformacionog stanja:
- $$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \sigma_y = \frac{\sigma_t + \sigma_r}{2}$$
- Iz uslovne ravnotežne jednačine projekcije svih sila u radijalnom pravcu za jedinicu širine ($b=1$), možemo dobiti obrazac za radijalni napon u zoni pritiska:
- $$\sigma_r = -\beta k \ln \frac{\rho}{r}$$
- Gde je $\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \beta k$ – uslov plastičnog tečenja
Pa ako je $\sigma_t = \sigma_r - \beta k$, onda je

- ...tangencijalni napon za istu zonu pritiska:
- $$\sigma_t = -\beta k \left(1 + \ln \frac{\rho}{r}\right)$$
- Ako se pretpostavi da je radijalni napon na nn liniji jednak (prema R.Hillu), dobijamo poluprečnik krivine nn linije:
- $$\rho_n = \sqrt{R r}$$
- Iz navedenog obrasca vidimo da kod čistog plastičnog savijanja, nn linija ne prolazi kroz središte preseka, već se pomera ka centru krivine i to više ukoliko je manji odnos unutrašnjeg radijusa savijanja i debljine materijala (r/s).

- Za razliku od savijanja u elastičnom području, kod plastičnog savijanja se povećava dužina savijenog komada, smanjuje njegova debljina, menja se oblik poprečnog preseka i položaj nn linije.



Promena napona kod čisto plastičnog savijanja

- Moment savijanja unutrašnjih sila pri plastičnom savijanju:

$$M = \beta k \frac{bs^2}{4}$$

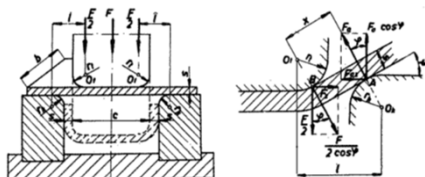
- Prema Romanovskom, dobijamo pojednostavljen obrazac:

$$M = n \sigma_m \frac{bs^2}{4}$$

- Gde je n korekcionni faktor očvršćavanja i kreće se u granicama $1,6 \div 1,8$.

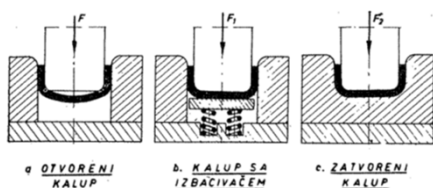
SAVIJANJE U PROFILA

- Sile savijanja se određuju iz uslova jednakosti spoljašnjeg momenta savijanja i momenta unutrašnjih sila.



- $F = \frac{2M}{l} (1 + \sin\varphi)$, gde je za $\varphi=90^\circ$ $\sin\varphi=1$, pa je $F = \frac{4M}{l}$ za otvorene kalupe.
- Ako se savijanje vrši u kalupu sa izbacivačem tada se sila savijanja povećava za iznos sile potrebne za izbacivanje komada iz kalupa:
- $F_1=1,3F$
- Ukoliko se pri savijanju želi postići potpuno ravno dno, potrebno je izvršiti i poravnanje na kraju hoda utiskivača, pa se presa i dimenzioniše na osnovu sile potrebne za poravnanje.

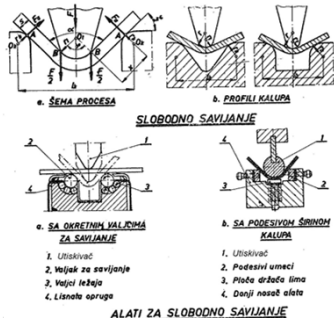
- $F=p \cdot A$ [kN]



c. poravnanje

SAVIJANJE V PROFILA

- Savijanje V profila može se posmatrati kao slobodno savijanje ili kao savijanje u kalupu.

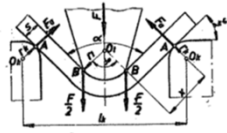


- Sila slobodnog savijanja:

$$F = \frac{4M}{l_k - 2l \sin \frac{\varphi}{2}} \cos^2 \frac{\varphi}{2}$$

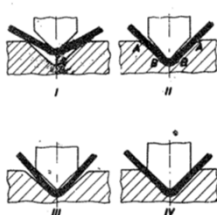
- gde je:

- M – moment slobodnog savijanja
- l_k – rastojanje između centara zaobljenja kalupa
- $l = r_t + r_k + s$
- φ – ugao savijanja

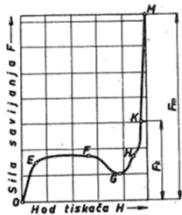


- Utiskivači kod slobodnog savijanja se izvode sa oštrim konusnim oblikom.
- Kod savijanja preko malih radijusa treba težiti da se trenje između komada i radnih površina kalupa svede na što je moguće manju meru (podmazivanje, visok kvalitet obrade radnih površina, trenje klizanja menjati trenjem kotrljanja).
- Prednost slobodnog savijanja je u alatima univerzalnog karaktera (savijaju se komadi pod raznim uglovima, materijali različitih mehaničkih karakteristika i raznih debljina).

- Kod savijanja V profila u kalupu, radne površine odgovaraju V-profilu.
- U toku procesa savijanja uočavamo 4 faze.



a. FAZE SAVIJANJA

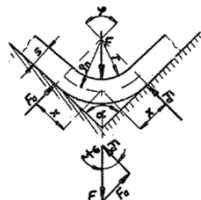


b. TOK SILE SAVIJANJA

- Određivanje sile savijanja V profila u kalupu je dosta otežano, obzirom da se sila menja po fazama savijanja.

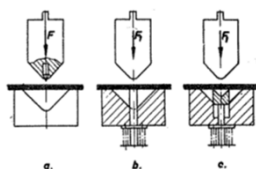
- Izračunava se moment savijanja, pa odatle dobijamo silu savijanja:

$$F = \frac{2M}{r_t + 0,5s} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}$$



- Da bi se sprečilo pomeranje lima u toku savijanja, postoji nekoliko konstruktivnih rešenja alata.

- a. Na vrhu utiskivača šiljak
- b. Pidržavanje lima
- c. Pidržavanje sa profilisanom glavom



DEFORMACIONI RAD SAVIJANJA

- Elementarni deformacioni rad savijanja, može se izraziti kao proizvod momenta i diferencijala ugla savijanja, što kada se prevede na specifični deformacioni rad na jedinicu volumena (zapremine), dobijamo:

$$W = V \frac{k}{\sqrt{3}} \frac{s}{2 \rho_n}$$

- Gde je:

- V- zapremina deformisanog dela
- k – specifični deformacioni otpor približno σ_m
- s – debljina lima
- ρ_n - poluprečnik krivine nn linije približno $r+0,5s$

RAZVIJANJE ELEMENATA

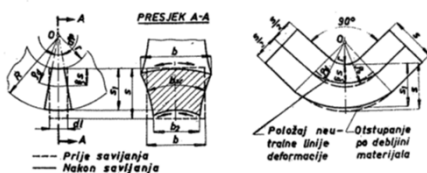
- Razvijena dužina elementa jednaka je dužini nn ose savijenog komada.
- Treba praviti razliku između:
- Neutralne ose napona [$\rho_n = \sqrt{R \cdot r}$]
- Neutralne ose deformacije [ρ_d]
- Neutralna osa deformacije je bitna za određivanje dužine elementa za savijanje.

- Obrazac za izračunavanje poluprečnika krivine neutralne linije deformacije po Romanovskom:

$$\rho_d = \left(\frac{r}{s} + \frac{m}{2} \right) s \times m \times n = r + \xi \times s$$

- Gde je:

- $m = \frac{s_1}{s}$ odnos savijenog komada i početne debljine;
- $n = \frac{b_{sr}}{b}$ odnos srednje širine i početne;
- ξ – koeficijent veličine pomeranja neutralne linije ka centru krivine.



- Obzirom da je smanjenje debljine savijenog komada različito u raznim presecima, sledi da i poluprečnik krivine neutralne linije deformacije u raznim presecima ima različite vrednosti.
- $\rho_d = r + \xi \times s < \rho_n = \sqrt{R \times r}$
- Poluprečnik krivine nn linije deformacije manji je od poluprečnika nn linije napona.
- Ovo odstupanje objašnjava se pojavom plastične histereze (neko vlakno u toku procesa savijanja menja predznak deformacije tj. deformiše se i na pritisak i na istezanje).

- Ako se komad sastoji od n ravni delova i N savijenih, tada se razvijena dužina elementa računa po obrascu:

$$L = \sum_{i=1}^n l_i + \frac{\pi}{180} \sum_{i=1}^N \varphi_i^\circ (r_i + \xi_i s);$$

- Gde su:

- l_i – dužine ravni delova
- φ_i – uglovi savijanja
- r_i – unutrašnji radijusi savijanja
- ξ_i – koeficijent pomeranja krivine
- s – debljina lima

- Razvijene dužine raznih oblika savijenih komada:

SKICA	RAZV. DUŽINA	SKICA	RAZV. DUŽINA
	$L = l_1 + l_2 + \frac{\pi r}{180} (\alpha)$ ($\alpha = 180^\circ - \alpha^\circ$)		$L = 2l + \pi(r + \xi s)$
	$L = l_1 + l_2 + l_3 + \pi(r + \xi s)$		$L = l + \frac{\pi r}{180} (360)$
	$L = l_1 + l_2 + \dots + l_n + \frac{\pi}{2} (r_1 + \xi_1 s) + \frac{\pi}{2} (r_2 + \xi_2 s) + \dots + \frac{\pi}{2} (r_{n-1} + \xi_{n-1} s)$		$L = l_1 + l_2 + l_3 + \frac{\pi r}{180} (\alpha_1 + \xi_1 s) + \frac{\pi r}{180} (\alpha_2 + \xi_2 s)$

RADIJUS SAVIJANJA

- Jedan od najbitnijih faktora koji utiče na kvalitet proizvoda je radijus savijanja koji mora da se kreće unutar određenih granica.

$$r_{\min} = c s$$

- $c = 0,85 \frac{\sigma_m}{\delta_{10}} + 0,5$, faktor koji zavisi od debljine i vrste materijala.

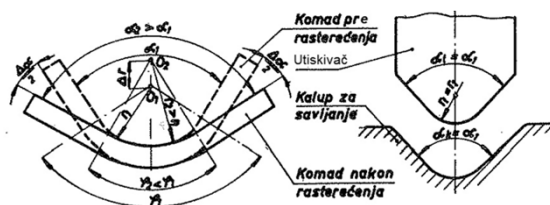
$$r_{\max} = \frac{s E}{2 \sigma_v};$$

$$r_{\min} < r < r_{\max}$$

- Ako je r manje dolazi do pucanja spoljnih vlakana savijenog komada, a ako je r veći, u savijenom komadu nema plastičnih deformacija.

ELASTIČNO ISPRAVLJANJE SAVIJENIH KOMADA

- Trajna deformacija se može predstaviti kao razlika plastične i elastične deformacije.



- Faktor elastičnog ispravljanja se računa prema obrascu:

$$K = \frac{r_1 + \frac{s}{2}}{r_2 + \frac{s}{2}} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$$

- Faktor K zavisi od vrste materijala i odnosa r_2/s .
- Posebnim konstrukcijama radnih organa alata za savijanje, uticaj elastičnog ispravljanja se može kompenzovati ili ublažiti.

