

PLASTIČNA OBRADBA METALA, tehnički postupci oblikovanja metalnih proizvoda zasnovani na svojstvu plastičnosti metala. Neposrednom ili posrednom primjenom vanjske sile tim se postupcima prerađuje metalna sirovina, pripremak ili poluproizvod u proizvod željenog oblika ili drugačijih dimenzija. Pri tom obradivani metalni materijal može biti u hladnom ili toploem stanju. Najvažniji postupci plastične obrade jesu: *valjanje, kovanje, savijanje, sabijanje, utiskivanje, istiskivanje, provlačenje, duboko vučenje, isprešavanje*.

Plastična obrada metala obuhvaća široko područje proizvodnje, od valjaoničkih proizvoda, kao što su limovi, trake, šipke, profili, tračnice, cijevi i žice, do finalnih i polufinalnih proizvoda, kao što su različiti otkivci i otpresci, posude i ambalaža, karoserije i dijelovi karoserija, plaštevi kotlova, lanci, vijčana roba, metalni novac i sl., što u SFR Jugoslaviji predstavlja godišnju proizvodnju veću od 4 milijuna tona. Prema vrsti proizvoda razvile su se posebne proizvodne grane: valjaonička proizvodnja, proizvodnja posuda i ambalaže, proizvodnja otkivaka i otpresaka, municije, metalnog novca, medalja i dr.

Osnovne značajke i prednosti većine postupaka plastične obrade jesu dobro iskorištenje sirovine i visoka proizvodnost, pa se zbog toga plastičnom obradom sve više proizvode i sitni dijelovi različitih aparata, motora, municije, ozubljeni elementi itd., što su se nekad izrađivali drugim postupcima, npr. skidanjem strugotine.

PLASTIČNA SVOJSTVA METALA

Vanjske sile koje djeluju na neko tijelo mijenjaju dimenzije i oblik tog tijela. Te se promjene sastoje od povratnih, elastičnih, i nepovratnih, plastičnih deformacija. Kad vanjske sile prestanu djelovati, nestaju elastične, a trajno ostaju samo plastične deformacije. U poredbenе svrhe kao mjerilo plastičnosti metala služe: *prijelomno produljenje δ , kontrakcija presjeka ψ , Charpyjeva žilavost ϱ te specifični utrošak radnje oblikovanja a* . Što su δ , ψ i ϱ veći a radnja a manja, to je povoljnija plastičnost metala.

Promjene oblika i dimenzija deformiranog tijela povezane su s promjenama kristalita i kristalne rešetke, a posljedica toga su i promjene mehaničko-fizikalnih svojstava metala. Sve te promjene ovise o stupnju i brzini deformacije, a pogotovo o temperaturi. Povećanje čvrstoće pri hladnom oblikovanju tumači se deformacijom kristalne rešetke i ravninom klizanja te izlučivanjem submikroskopskih čestica po ploham klizanja. Povećanje se čvrstoće pripisuje i promjeni otpora protiv dislokacija. Taj otpor raste tokom preoblikovanja, a glavno mu je hvatište negde na sjecištima ravnina klizanja, gdje se i nagomilavaju dislokacije. Pri postupcima u toploem stanju također se deformiraju kristalne rešetke, izdužuju zrnca u smjeru najintenzivnijeg plastičnog tečenja metala, zakreću osi i usitnuju kristaliti, pa se tako dobiva više ili manje orijentirana struktura. Zbog veće pokretljivosti atoma na višim temperaturama nastaju i neke promjene kojih nema pri hladnoj obradbi, pa se npr. smanjuju deformacije kristalne rešetke, nestaju zaostala naprezanja, stvaraju se novi kristaliti, potpuno ili djelomično nestaje orijentirana struktura, isčezavaju očvršćenja i povećava se žilavost. Koja će se od tih promjena zaista ostvariti, ovise o vrsti metala, o temperaturi i trajanju preoblikovanja te o stupnju i brzini deformacije. Dva glavna toplinska učinka što se iskoristavaju, odnosno pojavljuju u postupcima plastične obrade jesu: *oporavak (predah) i rekristalizacija* (v. *Termička obrada metala*; v. *Metalografija*, TE 8, str. 419).

Konstantnost volumena. Prepostavlja se da volumen V_0 plastično oblikovanog metala ostaje nepromijenjen. To je ipak samo korisna, ali dosta točna aproksimacija. Pokusi svestranog stlačivanja uzorka pod tlakom od 10^5 MPa pokazali su promjene volumena od svega 0,6% (za željezo) do 1,3% (za aluminij). Te su vrijednosti za materijale s izrazitim poroznostima nešto veće.

Stupanj deformacije izražava promjene duljina, presjeka i volumena nekog tijela zbog djelovanja vanjske sile. Pri sabijanju pravokutne prizme (sl. 1) od početnih h_0 , a_0 , b_0 na konačne dimenzije h_1 , a_1 , b_1 , zbog $h_0 \cdot a_0 \cdot b_0 = h_1 \cdot a_1 \cdot b_1 = V_0 = \text{const.}$, vrijedi izraz

$$\varphi_b + \varphi_a + \varphi_h = 0, \quad (1)$$

gdje su

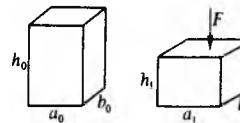
$$\varphi_h = \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad \varphi_a = \ln \frac{a_0}{a_1}, \quad \varphi_b = \ln \frac{b_0}{b_1}, \quad (1a)$$

logaritamski stupnjevi deformacije. Relativni stupanj deformacije ε u smjeru visine h definiran je izrazom

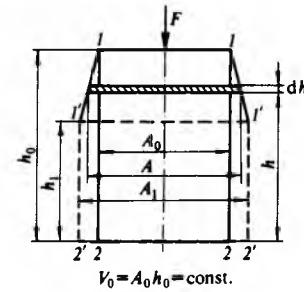
$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h_1}{h_0}. \quad (2)$$

Između ε_h i φ_h postoje odnosi

$$\varepsilon_h = 1 - e^{-\varphi_h}, \quad \varphi_h = \ln \frac{1}{1 - \varepsilon_h}. \quad (3)$$



Sl. 1. Promjene dimenzija prizme pri sabijanju silom F



Sl. 2. Promjena poprečnog presjeka A i volumena istisnutog metala V_{ist} pri sabijanju prizme

Za dovoljno male deformacije vrijedi $\varepsilon \approx \varphi$, za veće $\varphi > \varepsilon$. Logaritamski stupanj deformacije φ može se definirati i promjenom poprečnih presjeka A_0 i A_1 (sl. 2), pa je

$$\varphi_h = \ln \frac{A_1}{A_0}, \quad (4)$$

jer je $A_1/A_0 = h_0/h_1$. Također se φ može definirati i volumenom istisnutog materijala V_{ist} , jer je

$$V_{\text{ist}} = \int_{h_0}^{h_1} A \, dh = \varphi_h V_0, \quad (5)$$

pa slijedi da je

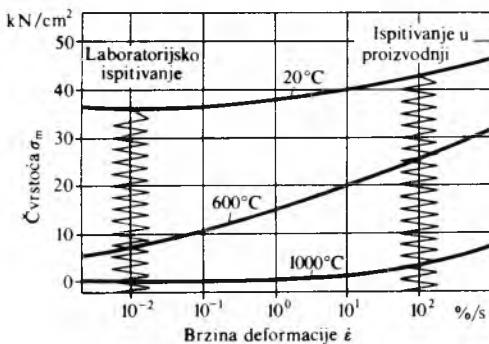
$$\varphi_h = V_{\text{ist}}/V_0. \quad (6)$$

Brzina deformacije. Razlikuje se brzina alata v_{al} kojim se oblikuje predmet i brzina deformacije predmeta $w = \Delta\varphi/\Delta t$. Pri sabijanju prizme od visine h_0 na visinu h_1 kroz vrijeme t srednja je brzina alata $v_{\text{al}} = \Delta h/t$, a trenutna brzina $v_{\text{al}} = dh/dt$. Stvarna brzina alata v_{al} mijenja se od početne $v_{\text{al}0}$ do nule na kraju sabijanja. Tok te brzine ovisi o vrsti stroja; za kovački bat najveća je na početku sabijanja, a za hidrauličku prešu ostaje konstantna sve do potkraj sabijanja kad naglo padne na nulu. Trenutna brzina deformacije definirana je izrazom

$$w = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dh}{dt} = \frac{v_{\text{al}}}{h}, \quad (7)$$

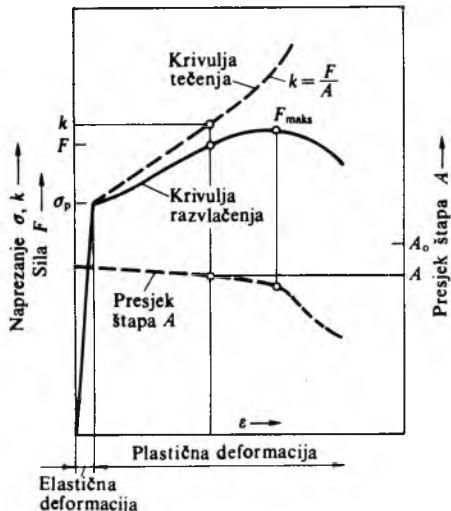
tj. trenutna brzina deformacije dobiva se dijeljenjem trenutne brzine alata s trenutnom visinom sabijanog predmeta h . Obično se računa samo s brzinom deformacije na početku sabijanja w_0 .

Utjecaj brzine deformacije. Već je odavno primijećeno da brzina deformacije utječe na mehanička svojstva materijala. Rezultate istraživanja tog utjecaja na čvrstoću mekoga čelika prikazuje sl. 3, gdje je brzina deformacije izražena omjerom de/dt . Naslije je označeno područje brzina deformacije za laboratorijska ispitivanja čvrstoće, te područja stvarnih brzina u proizvodnji. Vidi se da je utjecaj brzine deformacije više izražen samo na visokim temperaturama, kada se, npr., prijel

Sl. 3. Utjecaj brzine deformacije $\dot{\epsilon}$ na čvrstoću mekog čelika

zom od laboratorijske na proizvodnu brzinu čvrstoća povisuje se $150\cdots200\%$. Zbog toga je i deformacijski otpor pri kovanju na nekom brzohodnom batu relativno najveći.

Naprezanje plastičnog tečenja definira se kao vlačno ili tlačno naprezanje koje je potrebno da u deformiranom materijalu nastanu trajne plastične deformacije. To je naprezanje ovisno o stupnju i brzini deformacije te o temperaturi. Obično se označuje sa k , a može se odrediti na nekoliko načina. Pri ispitivanju probnog štapa na vlak snima se krivulja razvlačenja, pa se dijeljenjem trenutne sile F pripadnim presjekom štapa A dobije krivulja tečenja (sl. 4). Svaka točka na toj krivulji predstavlja naprezanje tečenja za pripadni relativni stupanj deformacije ε . Naprezanje k može se jednostavno odrediti samo u području homogenog razvlačenja, prije početka velikoga lokalnog utezanja, pa se zato vrijednosti k dobivaju samo do deformacije od najviše 20%.

Sl. 4. Krivulje razvlačenja i plastičnog tečenja. A_0 početni presjek štapa, A presjek štapa za trenutnu deformaciju ε , σ_p granica popuštanja

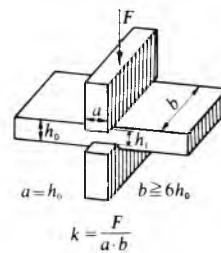
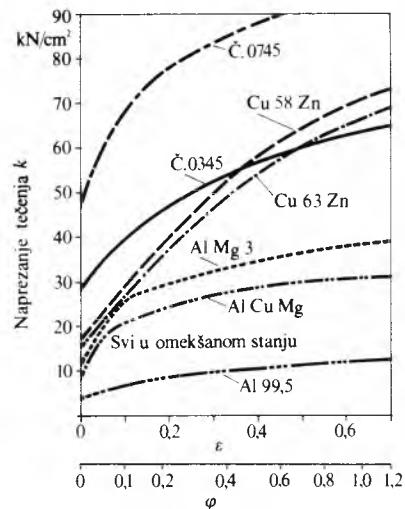
Sabijanje valjkastog adreska jednostavno je i najčešće se upotrebljava za određivanje naprezanja k ako je $\varphi < 1.0$. Za limove i trake određuje se naprezanje k obostranim utiskivanjem žigova (sl. 5). Da bi se postiglo dvoosno napregnuto stanje, širina ispitivane trake treba biti $b \geq 6h_0$. Naprezanje tečenja dobiva se iz izraza

$$k = \frac{F}{ab}, \quad (8)$$

gdje je F tlačna sila primjerena stupnju deformacije $\varphi = \ln(h_0/h_1)$.

Torzijski postupak određivanja k sve se više upotrebljava, pogotovo za velike vrijednosti φ . Ako na štalu promjera r djeluje zakretni moment M_d , tada je

$$k = \frac{2.6M_d}{r^3}. \quad (8a)$$

Sl. 5. Određivanje naprezanja k utiskivanjem žigovaSl. 6. Vrijednosti naprezanja k za neke metale

Krivulje tečenja za više vrsta metala pri sobnoj temperaturi (sl. 6) pokazuju da se veličina k može izraziti kao funkcija stupnja deformacije φ :

$$k = k_\varphi = k_0(1 + c\varphi^n) = \sigma_p(1 + c\varphi^n), \quad (9)$$

gdje je σ_p naprezanje na granici popuštanja, c i n iškustvene veličine ovisne o vrsti metala. Na primjer, za mehani aluminiј Al. 99,5 se veličine: $c = 2,1$ i $n = 0,5$. Iz izraza (9) proizlazi da je na početku deformiranja za vrlo maleni stupanj deformacije φ , koji pripada granici popuštanja ($\varphi \approx 0$), naprezanje plastičnog tečenja $k_\varphi = k_0 = \sigma_p$. Zbog promjenljivosti veličine k u toku deformiranja potrebno je za određivanje utroška rada računati s nekom srednjom vrijednošću

$$k_{sr} = 0,5(k_0 + k_1) \quad (10a)$$

ili točnije

$$k_{sr} = \frac{1}{\varphi} \int_0^\varphi k_\varphi d\varphi. \quad (10b)$$

Rad sabijanja neke prizme ili valjka, uzimajući u obzir izraz (10b), za idealni slučaj bez trenja na dodirnoj površini određen je izrazom

$$W = \int_{h_0}^{h_1} k_\varphi A dh = V_0 \int_{h_0}^{h_1} k_\varphi \frac{dh}{h} = V_0 k_{sr} \varphi, \quad (11)$$

a specifični rad po jedinici volumena

$$a = \frac{W}{V_0} = k_{sr} \varphi \text{ ili } k_{sr} = \frac{a}{\varphi}. \quad (12)$$

Pri određivanju sile sabijanja F treba, međutim, računati sa $k = k_\varphi$, koje vrijedi za φ na kraju sabijanja. Pri hladnom valjanju sile sabijanja F obično se računa sa srednjom vrijednošću

$$k_{sr} = 0,5(k_0 + k_1),$$

gdje je k_0 naprezanje plastičnog tečenja na ulazu u valjke, a k_1 na izlazu iz valjaka za pripadni $\varphi = \ln(h_0/h_1)$.

Za postupke plastične obrade metala u topлом stanju potrebno je uzeti u obzir i jači utjecaj brzine deformacije. U tu svrhu izrađeni su posebni dijagrami za vrijednosti k .

Uvjet plastičnog tečenja. Prema hipotezi o smičnom naprezanju, za početak tečenja u slučaju jednoosno napregnutog štapa mjerodavno je najveće smično naprezanje u ravni nagnutoj pod kutom 45° prema smjeru sile, koje iznosi

$$\tau = 0,5k = 0,5\sigma_p, \text{ ili } k = \sigma_p, \quad (13)$$

gdje je σ_p granica popuštanja. Kad postoji dvoosno naprezanje, djelovanjem vanjskih sila nastaju međusobno okomita napre-

zanja σ_1 i σ_2 , pa je prema spomenutoj hipotezi uvjet tečenja

$$\tau = 0,5(\sigma_1 - \sigma_2) = 0,5k, \text{ ili } \sigma_1 - \sigma_2 = k, \quad (14)$$

dakle razlika normalnih naprezanja treba da dosegne vrijednost k . Kad postoji troosno napregnuto stanje, s glavnim naprezanjima $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, uvjet glasi

$$\tau = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3) = 0,5k, \text{ ili } k = \sigma_1 - \sigma_3. \quad (15)$$

Mjerodavni su, dakle, samo najveće naprezanje σ_1 i najmanje σ_3 , dok je srednje naprezanje σ_2 bez utjecaja. Ipak se za troosno napregnuto stanje češće prihvata hipoteza o utrošku energije za promjenu oblika, prema Huber-Mises-Henckyu, prema kojoj uvjet tečenja glasi

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2k^2. \quad (16)$$

Dakle, tim je uvjetom obuhvaćen i utjecaj srednjeg naprezanja σ_2 . Razlika između izraza (15) i (16) postaje najveća kad je $\sigma_2 = 0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$, jer tada (16) prelazi u oblik $\sigma_1 - \sigma_3 = 1,15k$, što je 15% više nego prema izrazu (15). Samo za $\sigma_2 = \sigma_1$ i $\sigma_2 = \sigma_3$ daju izrazi (15) i (16) isti rezultat: $\sigma_1 - \sigma_3 = k$. Prema tome, može se uvjet plastičnog tečenja općenitije izraziti sa

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta k, \quad (17)$$

gdje je $1 \leq \beta \leq 1,15$, tj. $\beta = 1$ za $\sigma_2 = \sigma_1$ i $\sigma_2 = \sigma_3$, a $\beta = 1,15$ za $\sigma_2 = 0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$. Budući da to utječe na vrijednost deformacijske sile, potrebno je za svaki postupak plastičnog oblikovanja odrediti pripadnu vrijednost koeficijenta β . Pri sabijanju kružnog valjka, zbog $\sigma_r = \sigma_1$, dobiva se $\beta = 1$. Isto vrijedi i za sabijanje n-terostrane pravilne prizme. Pri hladnom valjanju limova i traka, pod pretpostavkom da nema povećanja širine, odnosno da je u smjeru osi valjaka $\varepsilon_2 = 0$, proizlazi iz relacije F. Körbera i A. Eichingera

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{D} [\sigma_2 - 0,5(\sigma_1 + \sigma_3)]$$

da je srednje naprezanje $\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$, pa je $\beta = 1,15$.

U općem slučaju, kad uz normalna naprezanja σ_x , σ_y i σ_z postoje i smična naprezanja τ_{xy} , τ_{yz} i τ_{zx} , uvjet plastičnog tečenja glasi

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = 2k^2, \quad (18)$$

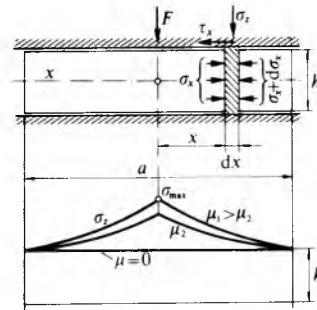
što za $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ prelazi u izraz (16).

Određivanje vrijednosti deformacijske sile. Za razliku od opće teorije plastičnosti, elementarnom teorijom plastičnosti određuju se vrijednosti i razdiobe naprezanja samo na dodirnoj plohi između predmeta i alata, što je dovoljno da se odredi sila. Kao prvo, uz pretpostavku da vrijedi Coulombov zakon trenja, određe se vrijednosti normalnih naprezanja na dodirnoj plohi, a zatim smična naprezanja, odnosno jedinične sile trenja. Diferencijalna jednadžba postavljena na osnovi uvjeta ravnoteže svih sila koje djeluju na neki elementarni izrezak rješava se uvijek pomoću jednadžbe uvjeta plastičnog tečenja. Takav pojednostavljeni postupak daje za praksu zadovoljavajuće vrijednosti deformacijske sile, ali ne može dati podatke za područje izvan zone dodira niti kvantitativno objašnjava pojavu ispuštanja pri sabijanju, premještanju čestica metala unutar poprečnog presjeka i sl. Sljedeći primjer pokazuje primjenu te jednostavne metode.

Sabijanje pravokutne ploče (sl. 7) primjer je dvoosno napregnutog stanja u ravnini x,z. Djelovanjem tlačne sile F sabijana ploča poprima širinu a i visinu h . Na iscrteni pločasti element na udaljenosti x od hrvatišta sile F djeluju naprezanja σ_z , σ_y , σ_x . Iz uvjeta ravnoteže sila za taj element slijedi

$$hb d\sigma_x + 2b\tau_x dx = 0, \quad (19)$$

gdje je b duljina ploče u smjeru y , a τ_x smično naprezanje na dodirnoj plohi. Iz uvjeta plastičnog tečenja: $\sigma_z - \sigma_x = k$ slijedi $d\sigma_z = d\sigma_x$, pa (19) prelazi u oblik



Sl. 7. Razdioba naprezanja σ_z po čelu sabijene ploče

$$\frac{d\sigma_z}{dx} = -\frac{2\tau_x}{h}. \quad (20)$$

Stavi li se za $\tau_x = \mu\sigma_z$, gdje je μ faktor trenja, proizlazi iz (20)

$$\sigma_z = k \exp \frac{2\mu}{h} \left(\frac{a}{2} - x \right), \quad (21)$$

što predstavlja zakon razdiobe naprezanja σ_z na čelu ploče. Za $x = 0$, tj. u središtu ploče, dobiva se

$$\sigma_z = \sigma_{\max} = k \exp \frac{\mu a}{h}, \quad (22)$$

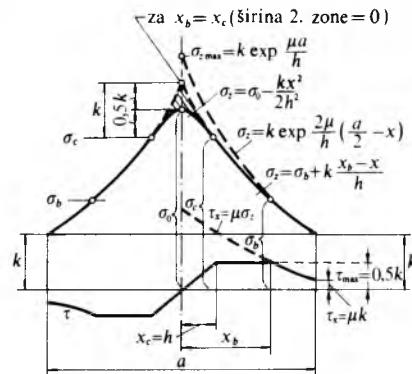
a za $x = 0,5a$, tj. na krajevima ploče, $\sigma_z = k$. Sila je sabijanja

$$F = 2b \int_0^{a/2} \sigma_z dx = abk \left(1 + \frac{\mu a}{2h} + \frac{\mu^2 a^2}{6h^2} + \dots \right), \quad (23)$$

a srednji tlak

$$p_{sr} = \frac{F}{ab} = k \left(1 + \frac{\mu a}{2h} + \frac{\mu^2 a^2}{6h^2} + \dots \right), \quad (24)$$

gdje je k naprezanje plastičnog tečenja za stupanj deformacije $\varphi = \ln(h_0/h_1)$. Budući da smično naprezanje τ_x može iznositi najviše $\tau_x = 0,5k$, to će za dovoljno široku ploču τ_x rasti od ruba prema sredini samo do neke udaljenosti x_b , dok ne dosegne vrijednost $0,5k$. Odatle pa do udaljenosti x_c ostaje τ_x konstantno, a zatim počinje linearno opadati prema središtu ploče. Tako je dodirna ploha ploče podijeljena u tri zone: od $a/2$ do x_b , od x_b do x_c i od x_c do središta ploče, i za svaku pojedinu zonu vrijedi drugi zakon razdiobe naprezanja σ_z (sl. 8).



Sl. 8. Razdioba naprezanja σ_z za trozonalnu razdiobu smičnih naprezanja τ_z

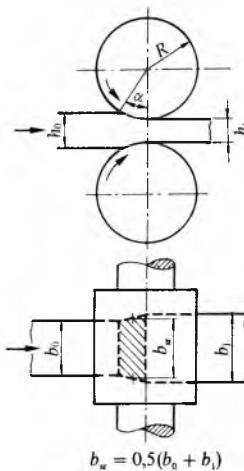
Vidi se da su tada vrijednosti σ_z u 2. i 3. zoni nešto manje od onih prema izrazu (22). Uz takvu trozonalnu razdiobu, sila sabijanja iznosi

$$F = kab \left(\frac{1}{4\mu} + \frac{a}{4h} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\ln 2\mu}{2\mu} + \frac{1}{4} \right), \quad (25)$$

što je manje nego prema izrazu (23).

VALJANJE

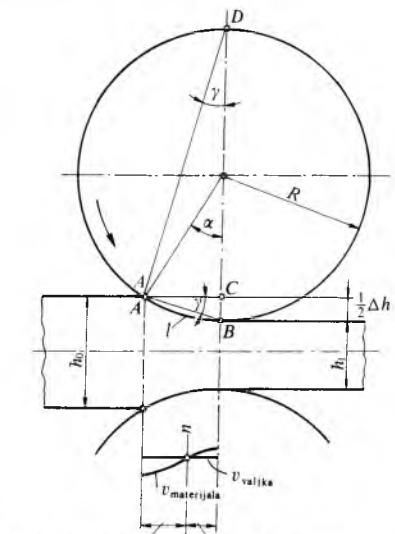
Od svih postupaka plastičnog oblikovanja metala najviše se primjenjuje valjanje. U SFR Jugoslaviji godišnje se proizvodi ~4 milijuna tona valjane robe, od toga najveći dio od čeličnog materijala. Postupak započinje valjanjem čeličnih ingota najprije u polufabrikate (blum, slab, gredice, platine), koji služe kao sировина za valjanje finalnih proizvoda kao što su profili, tračnice, cijevi, žice, limovi i trake. Limovi i trake od neželjeznih metala proizvode se valjanjem odlivenih debelih ploča (keksova) teških i do 10 tona.



Sl. 9. Princip postupka valjanja

Za vrijeme valjanja materijal prolazi nekoliko puta kroz suprotno rotirajuće valjke (sl. 9). Pri tom valjci kontinuirano sabijaju metal, smanjujući debljinu (visinu), a povećavajući širinu i duljinu valjanog predmeta. Predmeti većeg presjeka valjaju se u topлом stanju zbog relativno veće plastičnosti i mogućnosti puno većih redukcija presjeka, te manjih sila i manjeg utroška deformacijskog rada. Tanki limovi, trake i žice valjaju se najčešće u hladnom stanju, jer se tako postiže glaća površina, manje tolerancije i donekle očvršćenje metala. Za vrijeme valjanja, već prema stupnju deformacije i temperaturi valjanja, mijenjaju se fizikalna i tehnička svojstva metala.

Osnovni pojmovi i definicije. Pri toplosem valjanju debelih ploča (keksova) i debelih limova povećava se njihova početna širina b_0 . Važno je znati da li će se tim povećanjem postići zahtijevana širina lima nakon valjanja. To je važno i kad se valja na kalibriranim valjcima kojima se mogu ispravno dimenzionirati i oblikovati kalibri. Postoji niz iskustvenih izraza za



Sl. 10. Deformacijska zona

određivanje povećanja širine $\Delta b = b_1 - b_0$ (sl. 9), a jedan je od najjednostavnijih

$$\Delta b = c \frac{\Delta h \sqrt{R \Delta h}}{h_0}, \quad (26)$$

gdje je c iskustveni faktor koji iznosi 0,35 za čelik i bakar, a 0,45 za lake metale, R polumjer valjka, h_0 ulazna debljina lima, Δh smanjenje debljine lima. Izraz (26) vrijedi za tzv. slobođeno širenje koje nije ograničeno stranicama kalibara.

Površina dodirne plohe metal-valjak iznosi

$$A = b_{sr} l = b_{sr} \sqrt{R \Delta h}, \quad (27)$$

gdje je l luk zahvata $\widehat{AB} \approx \overline{AB}$ (sl. 10), a srednja širina $b_{sr} = 0,5(b_0 + b_1)$. Ako se radi s valjcima različitih polumjera R_1 i R_2 (npr. Lauthov trio), pod pretpostavkom da je tlačna sila na oba valjka jednak, površina dodirne plohe iznosi

$$A = b_{sr} \sqrt{\frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2} \Delta h}. \quad (28)$$

Uzduž luka zahvata l mijenjaju se stupanj i brzina deformacije. Zato se računa sa srednjim vrijednostima relativnog stupnja deformacije $\varepsilon_x = \Delta h / h_0$, logaritamskog stupnja deformacije $\varphi = \ln(h_0/h_1)$ i brzine deformacije

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{l} \int_0^l \dot{\varepsilon}_x dx, \quad (29)$$

gdje je

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{d\varepsilon_x}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{2x}{Rh_1 + x^2} \cdot \frac{v_1 h_1}{h_x}, \quad (30)$$

pa se nakon integracije i sređivanja izraza (29) dobiva izraz za srednju brzinu deformacije

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_1}{h_1} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}, \quad (31)$$

gdje je v_1 obodna brzina valjaka. Za dovoljno male deformacije vrijedi $\varepsilon = \varphi$ i $\dot{\varepsilon} = \dot{\varphi}$, pa vrijedi približno

$$\varphi \approx \frac{v_1}{l}. \quad (32)$$

Brzine unutar deformacijske zone. Na putu kroz valjke materijal se ne giba posvuda istom brzinom. Od ulaza do nekog mjesto brzina materijala nešto je manja od obodne brzine valjaka, a od toga mesta prema izlazu raste i na izlazu je veća od obodne brzine valjaka. Postoje, dakle, dvije zone brzina: zona zaostajanja i zona pretjecanja (sl. 10), a granica između njih je tzv. neutralna ravnila, gdje je brzina materijala jednaka obodnoj brzini valjaka. Umjesto neutralne ravnine može se pretpostaviti, npr. kod toplog valjanja, da postoji treća zona, tzv. zona lijepljenja, gdje je brzina materijala jednaka brzini valjaka.

Valjaonički strojevi

Prema broju valjaka, njihovu razmještaju i zadaći kojih služe razlikuje se nekoliko vrsta valjaoničkih strojeva (sl. 11).

Duo-stroj, stroj sa dva valjka (sl. 12 i 13). Postoje dvije izvedbe: povratna (reverzibilna), sa smjerom vrtnje za valjanje u oba smjera (sl. 11a), i nepovratna, za valjanje samo u jednom smjeru (sl. 11b). Povratna izvedba služi za valjanje težih komada. Oba su valjka pogonjena.

Trio-stroj, stroj sa tri valjka (sl. 11c). Bez promjene smjera vrtnje valja se u oba smjera. Za valjanje profila i tračnica svi su valjci istog promjera, a za valjanje limova srednji je valjak manjeg promjera (Lauthov trio, sl. 11d). Pogon imaju samo gornji i donji valjak. Srednji se valjak više troši od vanjskih.

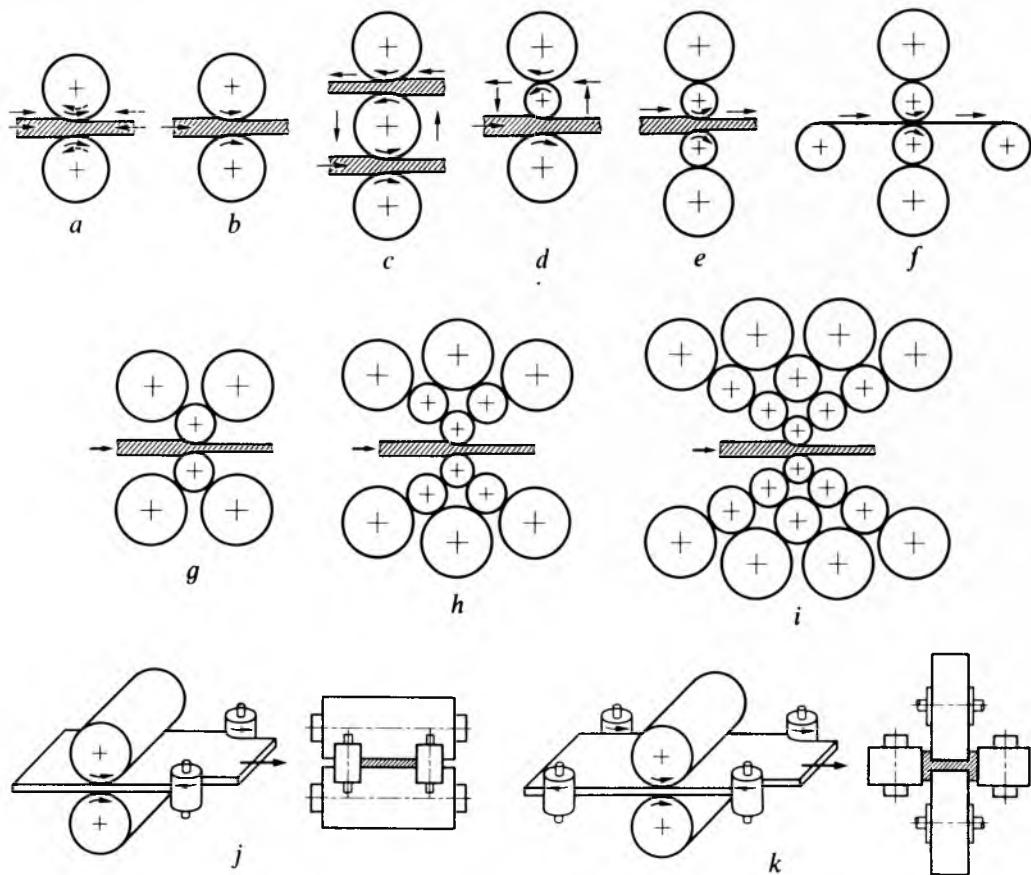
Kvarsto-stroj, stroj sa četiri valjka (sl. 14). Srednji, manji valjci su radni, a veći, vanjski valjci su poduporni (sl. 11e). Služi za toplo i hladno valjanje limova i traka, i to kao povratni i kao nepovratni stroj. Za valjanje traka predviđene su nama-

taljke trake na obje strane valjka (sl. 11f). Pogon imaju samo srednji radni valjci.

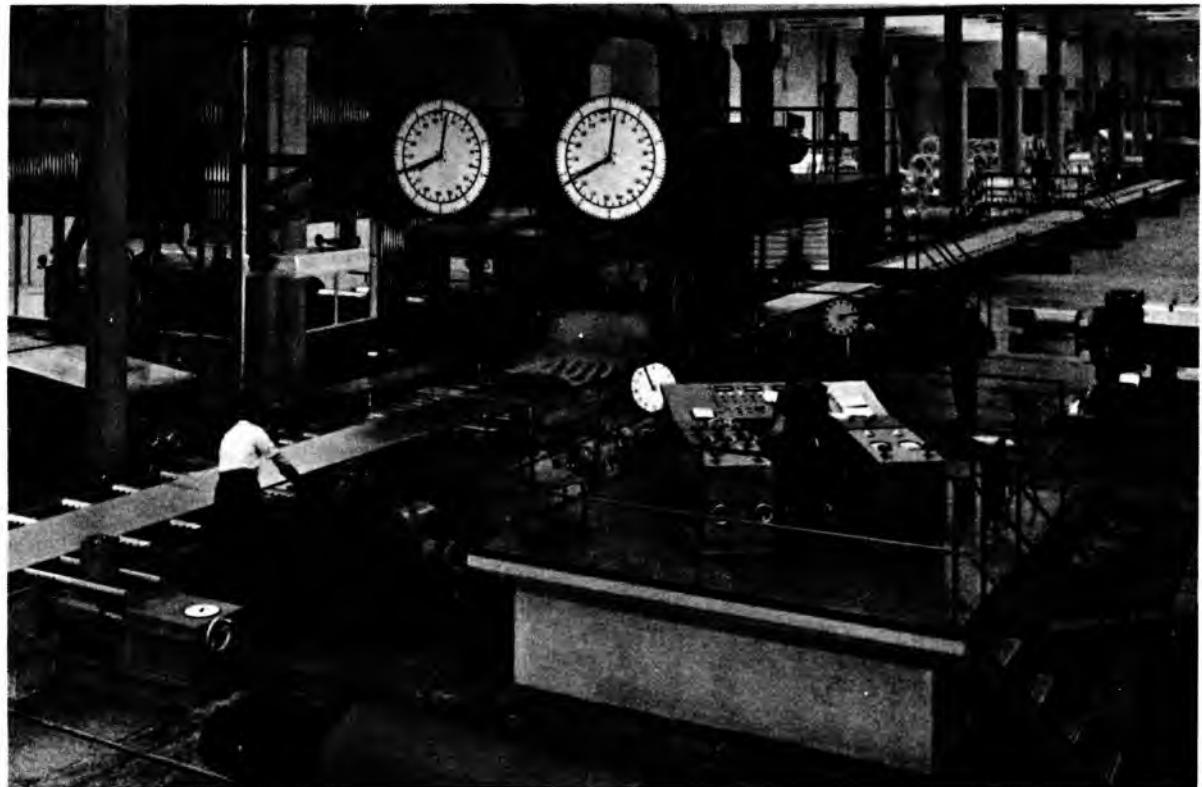
Strojevi s puno valjaka (6, 12 i 20 valjaka, sl. 11g, 11h i 11i) služe za hladno valjanje tankih i širokih listova, traka i

folija, kad debljina proizvoda mora biti u uskim tolerancijama. Samo su dva valjka radna, a svi ostali su poduporni.

Univerzalni strojevi (sl. 11j i 11k) primjenjuju se kad treba pomoću dodatnih vertikalnih valjaka provljetati i bočne po-



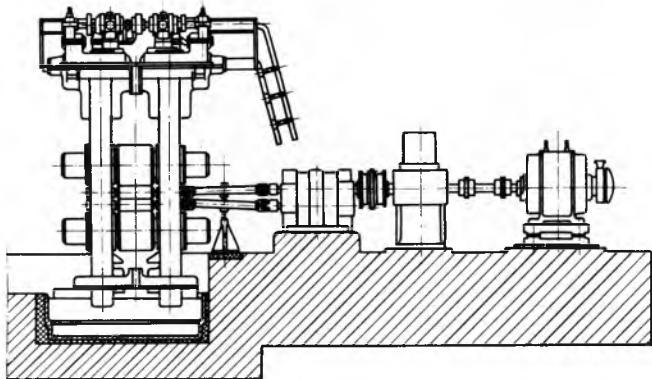
Sl. 11. Sustavi valjaoničkih strojeva



Sl. 12. Dio valjaonice s povratnim duo-strojem za toplo valjanje keksova od lakoih i obojenih metala



Sl. 13. Duo-stroj s kalibriranim valjcima za valjanje blokova mase do 6 t



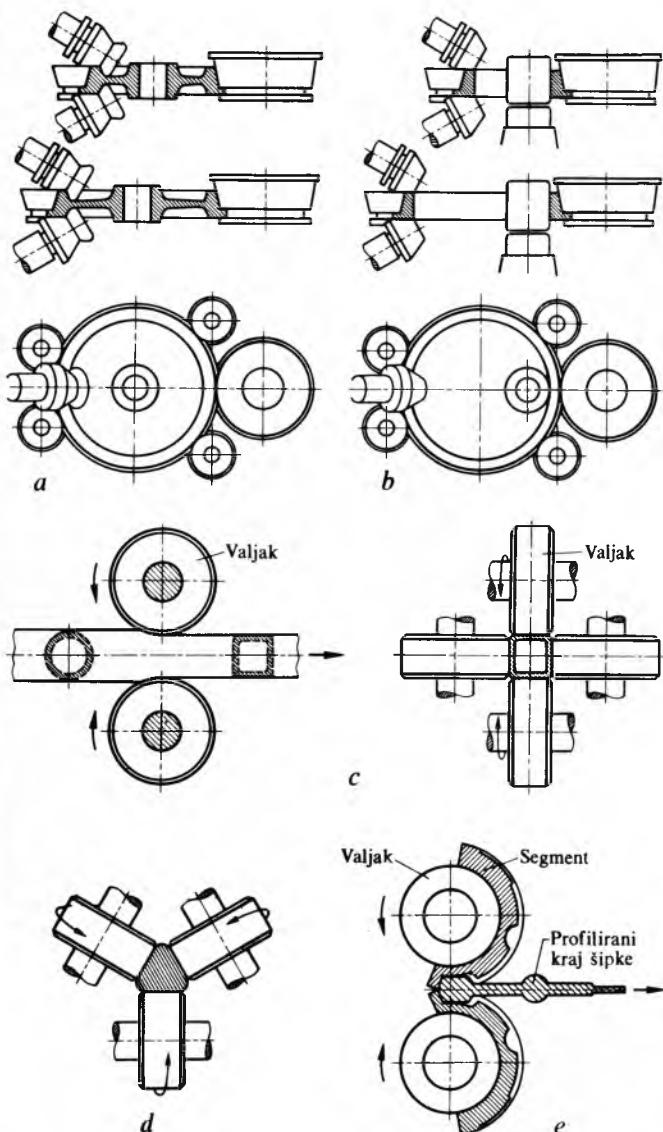
Sl. 14. Kvarto-stroj za hladno valjanje limova

vršine, npr. pri izradbi debljih ploča, punih greda i pravokutnih traka točnih dimenzija.

Specijalni strojevi (sl. 15) upotrebljavaju se za valjanje željezničkih kotača i bandaža, za cijevi pravokutnog presjeka, za uzdužno profiliranje šipki koje služe u kovačnicama za proizvodnju otkivaka, za šiljenje krajeva okruglih šipki i dr.

Valjaonička postrojenja. Prema vrsti proizvoda, razlikuju se valjaonice polufabrikata, valjaonice profila s teškim, srednjim i lakisim prugama, valjaonice debelog lima, valjaonice srednjeg i tankog lima, valjaonice traka i folija, valjaonice cijevi. Prema rasporedu strojeva i uređaja razlikuju se tri osnovna tipa valjačkih pruga: otvorene, kontinuirane i polukontinuirane.

Otvorena pruga (sl. 16a) ima pet do devet duo-strojeva ili trio-strojeva pogonjenih zajedničkim elektromotorom. Na dvo-stepenoj pruzi (sl. 16b) valjanje započinje na povratnom duo-stroju, a nastavlja se i završava na nizu trio-strojeva. Postoji i trostepena pruga s dvije završne pruge, a svaka pruga ima svoj pogonski motor. Prednosti kontinuirane ili tandem-pruge za proizvodnju traka, šipki i žice (sl. 16c) jesu: velike brzine



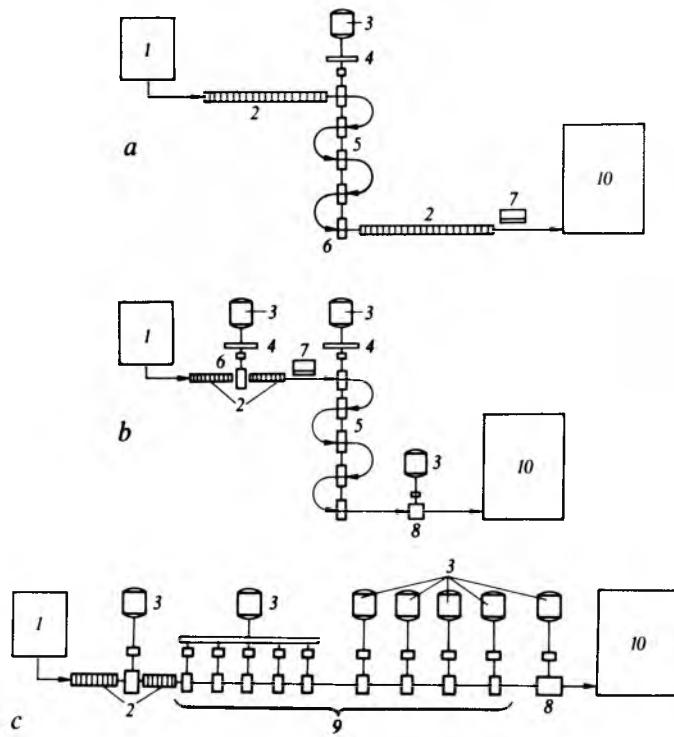
Sl. 15. Nekoliko specijalnih valjaoničkih strojeva za valjanje oboda (a) i bandaža (b), željezničkih kotača, okruglih cijevi u četvrtaste (c), šipki i žice trokutastog presjeka (d) te za uzdužno profiliranje šipkastih odrezaka (e)

valjanja, rad bez zastoja, brzina se valjanja dobro prilagođuje presjeku valjane robe, transport je automatski, a utrošak ručnog rada je malen. Svi strojevi imaju po četiri valjka. Izvaljana roba namata se na namataljke. Radi boljeg namatanja između namataljke i posljednjeg stroja izvaljani je proizvod nategnut. Visoke investicije takve pruge opravdavaju se visokom proizvodnošću.

Tipovi i materijal valjaka. Za valjanje limova, traka i folija služe glatki valjci, a za sve ostalo valjci su kalibrirani, s otvorenima (kalibrima) prilagođenim redoslijedu preoblikovanja. Glatki valjci kad rade imaju progib, pa treba njihovu radnu cilindričnu plohu izraditi s određenom izbočinom da izvaljani lim ne bi bio valovit, odnosno da debljina lima po širini ostane unutar dopuštenih tolerancija. Za kalibrirane valjke važno je da se ispravno oblikuju pojedini kalibri, jer ako je kalibr ispravno izrađen, metal će potpuno ispuniti njegov presjek. Potreban broj prolaza među valjcima, odnosno kalibara n može se približno odrediti iz izraza

$$n = \frac{\lg \frac{A_n}{A_0}}{\lg(1 - \psi)}, \quad (33)$$

gdje je A_0 presjek trupca na ulazu u prvi kalibr, A_n završni presjek na izlazu iz n -tog kalibra, a ψ srednja redukcija pre-



Sl. 16. Sheme valjaoničkih pruga. a) otvorena, b) dvostepena, c) kontinuirana pruga; 1 peć, 2 transportna staza, 3 elektromotor, 4 zamašnjak, 5 duo-strojevi ili trio-strojevi, 6 povratni duo-stroj, 7 škare, 8 namataljka, 9 kvarto-strojevi, 10 prostor za hlađenje valjanih proizvoda

tvrdće prema Shoreu 35–60, služe za valjanje platina, debelih limova, greda, tračnica i kutnih profila debljeg presjeka. Tvrdi valjci imaju tvrdću prema Shoreu 60–85, a služe za završno valjanje uskih i srednje širokih traka, te sitnih profila i žice. Za hladno valjanje traka i folija upotrebljavaju se i čelični cementirani valjci.

Računsko određivanje sila i zakretnih momenata valjanja. Postoje dvije grupe računskih postupaka za određivanje sila i zakretnih momenata valjanja: 1) na osnovi Karmanove diferencijalne jednadžbe ravnoteže sila, 2) na osnovi polja linija klizanja (PLK). Zadaća je tih postupaka da se odredi razdioba tlakova p_x uzduž luka zahvata l , pa se ukupna sila na valjak dobije iz izraza

$$F = b_{sr} \int_0^l p_x \, dx. \quad (34)$$

Problem se rješava kao ravinski u ravnni x,y , dakle zanemarene su deformacije u smjeru osi valjaka z , pa je zato uvjet plastičnog tečenja $p_x - \sigma_x = 1,15k$.

Postupci prve grupe upotrebljavaju se prvenstveno za valjanje u hladnom stanju, dok se proračuni na osnovi polja linija klizanja primjenjuju za toplo valjanje. Budući da pri hladnom valjanju obrađivani materijal očvrsne, računa se sa srednjim $k = 0,5(k_0 + k_1)$. Zbog visokih tlakova cilindrične se površine valjaka splošte i poveća se njihov polumjer na $R' > R$. Pretpostavlja se da temperatura ostaje konstantna te da svi poprečni presjeci ostaju ravni, tj. okomiti na smjer valjanja. Radi jednostavnosti prikaza sva se dalja razmatranja odnose na valjanje lima odnosno trake. Različite pretpostavke pri rješavanju prema pojedinim postupcima razlog su i razlikama u rezultatima proračuna.

VALJANJE PROFILA 55 × 55 mm				VALJANJE OKRUGLE ŠIPKE Ø 42 mm				VALJANJE KUTNIKA 100 × 100 × 10 mm			
Broj prolaza	Oblik presjeka	Površina presjeka mm ²	Redukcija površine presjeka %	Broj prolaza	Oblik presjeka	Površina presjeka mm ²	Redukcija površine presjeka %	Broj prolaza	Oblik presjeka	Površina presjeka mm ²	Redukcija površine presjeka %
1.	Φ 160 mm	25 600	—	1.	Φ 125 mm	15 625	—	1.	Φ 125 mm	15 625	—
2.	□	19 800	22,7	2.	□	13 000	16,8	2.	□	13 200	15,5
3.	◇	15 600	21,2	3.	□	10 370	20,2	3.	◇	10 560	20,0
4.	◇	12 800	17,9	4.	□	8 200	20,9	4.	◇	8 000	24,2
5.	◇	10 000	21,9	5.	□	6 400	22,0	5.	◇	6 400	20,0
6.	◇	7 300	27,0	6.	□	5 060	20,9	6.	◇	4 910	23,3
7.	◇	5 630	22,9	7.	○	4 000	20,9	7.	◇	3 470	29,3
8.	◇	4 360	22,6	8.	○	3 150	21,3	8.	◇	2 600	25,1
		3 025	30,6	9.	○	2 600	17,5	9.	◇	2 050	21,2
				10.	○	1 630	20,8		◇	1 920	6,3
				11.	○	1 400	14,1				

Sl. 17. Tri primjera preoblikovanja valjanjem

sekja koja pri toplovom valjanju najčešće iznosi 15–30%. Tri primjera prokušanog redoslijeda preoblikovanja pri valjanju kalibriranim valjcima prikazani su na sl. 17.

Materijal valjaka odabire se prema njihovu mehaničkom i toplinskom opterećenju te zahtijevanom vijeku trajanja. Kalibrirani valjci s duboko urezanim kalibrima izrađuju se od kovanog ili lijevanog čelika sa 0,4–1,0% C, 0,6–2,0 Cr, 0,6% Ni i do 0,3% Mo.

Valjci od lijevanog željeza mogu biti meki, polutvrdi ili tvrdi. Meki valjci imaju tvrdću prema Shoreu 25–35, a upotrebljavaju se za predvaljanje teških profila. Polutvrdi valjci,

Rješenje prema A. I. Celikovu. Prvo analitičko rješenje problema sile što djeluje na valjak dao je Th. Kármán (1925). Zbog potrebe da se u praksi sila proračuna nekom prikladnom brzom metodom, Celikov je Kármánovo rješenje upotpunjio, polazeći od diferencijalne jednadžbe postavljene na osnovi uvjeta ravnoteže sila na pločastom elementu (sl. 18):

$$\frac{dp_x}{dx} - \frac{k}{y} \frac{dy}{dx} \pm \frac{t_x}{y} = 0. \quad (35)$$

U toj jednadžbi predznak (+) ispred trećeg člana vrijedi za ulaznu zonu zaostajanja, a predznak (−) za izlaznu zonu pre-

tjecanja. Uz pretpostavku da je jedinična sila trenja $t_x = \mu p_x$, luk zahvata $l = \sqrt{R \Delta h}$, te da je

$$y = \frac{h_1}{2} + \frac{\Delta h}{2l} x, \quad (36)$$

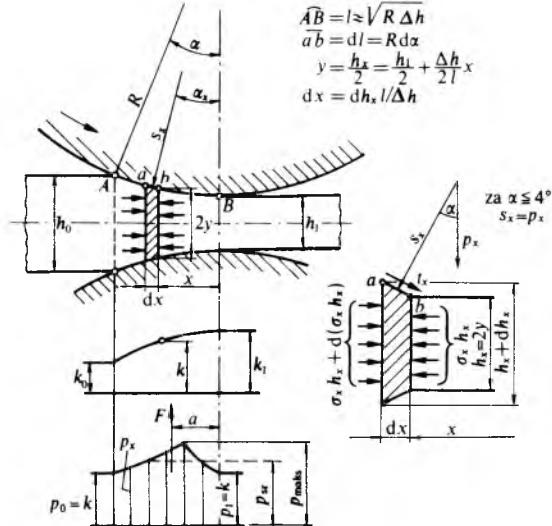
dolazi se do rješenja za razdiobu tlakova u zoni zaostajanja

$$p_x = \frac{k}{\delta} \left[(\delta - 1) \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + 1 \right], \quad (37a)$$

a u zoni pretjecanja

$$p_x = \frac{k}{\delta} \left[(\delta + 1) \left(\frac{h_x}{h_1} \right)^\delta - 1 \right], \quad (37b)$$

gdje je $\delta = (2\mu l)/\Delta h = h_0 - h_1$.



Sl. 18. Naprezanja na elementu izreska iz unutrašnjosti deformačke zone

Jednadžbe (37a) i (37b) prikazuju dvije krivulje koje se sijeku. Sjecište tih krivulja određuje položaj neutralne ravnine u kojoj je tlak $p_x = p_{\max}$, a visina (deblijina) $h_x = h_n$, koja iznosi

$$h_n = h_1 \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^\delta}}{\delta + 1} \right]^{\frac{1}{\delta}}. \quad (38)$$

Ako se u jednadžbu za silu valjanja

$$F = b_{sr} l \left[\int_{h_0}^{h_p} p_x dx + \int_{h_p}^{h_1} p_x dx \right] \quad (39)$$

uvrste izrazi (37a) i (37b), dobiva se nakon integracije izraz za silu

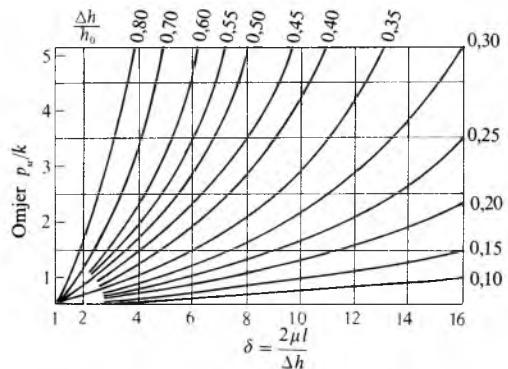
$$F = b_{sr} l \frac{2kh_n}{\Delta h(\delta - 1)} \left[\left(\frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1 \right], \quad (40)$$

odnosno za srednji tlak

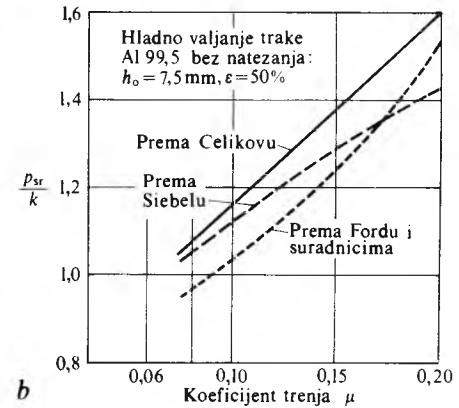
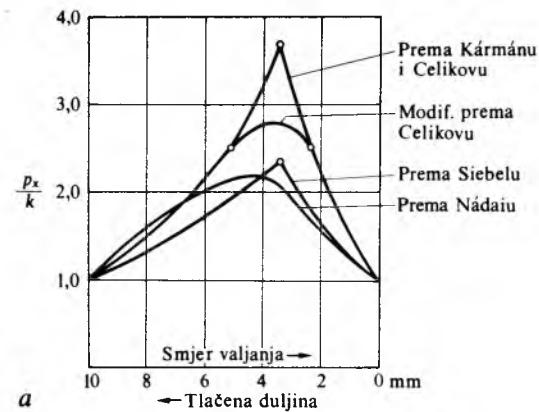
$$p_{sr} = \frac{F}{b_{sr} l} = \frac{2kh_n}{\Delta h(\delta - 1)} \left[\left(\frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1 \right]. \quad (41)$$

Za brzi proračun tlaka p_{sr} i sile F izračunate su vrijednosti p_{sr}/k iz jednadžbe (41) i grafički predočene na sl. 19 u ovisnosti o δ i $\Delta h/h_0$.

Prikazano rješenje vrijedi za valjanje u hladnom stanju. Za toplo valjanje, kad postoji umjesto neutralne ravnine treća široka zona lijepljenja metala uz valjak, pokušalo se (A. Celikov, A. Kneschke, A. Nádai) naći rješenje polazeći od pretpostavke da se problem može promatrati kao hidrodinamički, a za silu trenja t_x upotrijebiti zakone što vrijede za trenje u tekućinama.



Sl. 19. Dijagram za određivanje srednjeg tlaka p_{sr} prema Celikovu



Sl. 20. Utjecaj proračunskih postupaka na vrijednosti p_x/k (a) i p_{sr}/k (b)

Tako modificirano rješenje daje razdiobu specifičnih tlakova p_x samo po jednoj kontinuiranoj krivulji s izrazitim zaobljenjem unutar zone lijepljenja, te s relativno nešto nižim vrijednostima p_{\max} i p_{sr} (sl. 20a).

Stavi li se prema prijedlogu E. Siebela u jednadžbu (35) za jediničnu silu trenja $t_x = \mu k = \text{const.}$ za čitavo područje deformacije, a luk zahvata l zamijeni parabolom

$$y = \frac{\Delta h}{2} \left(\frac{x}{l} \right)^2 + \frac{h_1}{2}, \quad (42)$$

olakšava se rješavanje jednadžbe (35) i dobiva jedno od prvih analitičkih rješenja problema sile na valjak. Rezultat su toga nešto niži tlakovi p_x , p_{\max} i p_{sr} , što se vidi iz sl. 20.

Rješenje prema Bland-Ellis-Fordu razrađeno je za slučaj hladnog valjanja neke trake s tzv. natezanjem (sl. 21). Na ulazu među valjke nastaje zbog natezanja u traci vlačno naprezanje σ_u (zateg), a na izlazu iz valjaka naprezanje σ_i (nateg). Zbog toga normalno tlačno naprezanje na ulazu iznosi $s_0 = k_0 - \sigma_u$, a na izlazu $s_1 = k_1 - \sigma_i$. Diferencijalna jednadžba oblika

$$d(\sigma_x h_x) = 2s_x R' (\sin \alpha \pm \cos \alpha) \quad (43)$$

rješava se pod pretpostavkom da je $t_x = \mu s_x$, $h_x = h_1 + R\alpha^2$ i $p_x - \sigma_x = 1,15k$, te da se sploštavanjem valjaka polumjer povećava na $R' = R[1 + cF/(b\Delta h)]$, gdje je $c = 0,222$ za čelične valjke, a sila F izražena u tonama. Dobiva se da je izraz za silu što djeluje na valjke

$$F = kb \left(1 - \frac{\sigma_u}{k}\right) \sqrt{R' \Delta h} f_1, \quad (44a)$$

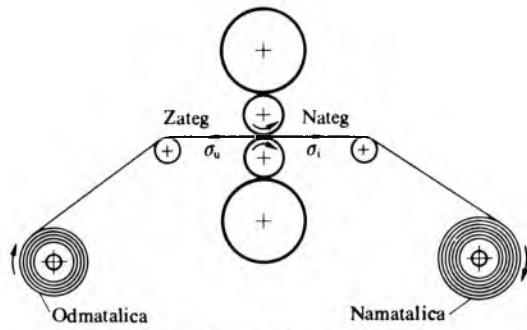
a za zakretni moment

$$M_d = 2kb \left(1 - \frac{\sigma_u}{k}\right) \sqrt{R' \Delta h} f_2, \quad (44b)$$

gdje su f_1 i f_2 složene funkcije od $\varepsilon = \Delta h/h_0$, $\mu \sqrt{R'/h_1}$ i stupnja natezanja trake

$$\varrho = \frac{1 - \frac{\sigma_u}{k}}{1 - \frac{\sigma_i}{k}}. \quad (45)$$

Kad se radi bez namatalica, tada je $\sigma_u = \sigma_i = 0$ i $\varrho = 1$, pa je sila F veća.



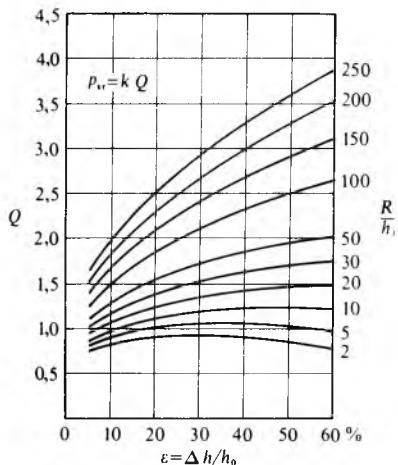
Sl. 21. Valjanje trake s natezanjem

Rješenje prema R. B. Simsu primjenjuje se u slučaju toplog valjanja, kada zbog lijepljenja metala na valjak jedinična sila trenja može dosegati maksimalnu vrijednost $t_x = 0,5k$ i kad je prema Orowanu uvjet plastičnog tečenja $s_x - \sigma_x = k\pi/4$. Pretpostavljeno je nadalje da se debljina h_x mijenja parabolički prema izrazu $h_x = h_1 + R\alpha^2$, te da nema sploštavanja valjaka. Uz te pretpostavke izraz za silu na valjke glasi

$$F = kb_{sr} \sqrt{R \Delta h} Q = kb_{sr} l Q, \quad (46)$$

gdje je Q funkcija od $\varepsilon = \Delta h/h_0$ i R/h_1 . Za praktične su potrebe vrijednosti Q predviđene u dijagramu (sl. 22). Srednji tlak iznosi

$$p_{sr} = \frac{F}{b_{sr} l} = k Q, \quad (47)$$



Sl. 22. Dijagram za određivanje p_{sr} prema Simsu

ili

$$\frac{p_{sr}}{k} = Q. \quad (48)$$

Više je autora (P. M. Cook, W. Lueg, O. Emicke i drugi) obavilo opsežna mjerjenja veličine k , pa podaci dobiveni tim mjerjenjima omogućuju da Simsov postupak daje za praksu dovoljno točnu vrijednost sile F .

Rješenja na osnovi teorije polja linija klizanja primjenjuju se za toplo valjanje ploča, limova i traka. Zahvaljujući rado-vima A. Celikova, J. M. Alexandra, H. Forda, E. Orowana i drugih došlo se do jednostavnih izraza za aproksimativno određivanje srednjeg tlaka p_{sr} . Pokazalo se da p_{sr} ovisi o luku zahvata l , srednjoj debljini valjanog lima h_{sr} , odnosno o omjeru l/h_{sr} . Zato je prepoređeno da se tlak p_{sr} računa prema jednom od sljedeća tri izraza, i to ovisno o iznosu h_{sr}/l :

$$\text{za } h_{sr}/l \geq 8,75: \quad p_{sr} = 2,5k \quad (49a)$$

$$\text{za } 1 \leq h_{sr}/l \leq 8,75: \quad p_{sr} = k \left(0,8 + 0,2 \frac{h_{sr}}{l}\right) \quad (49b)$$

$$\text{za } h_{sr}/l \leq 1: \quad p_{sr} = k \left(0,75 + 0,25 \frac{l}{h_{sr}}\right). \quad (49c)$$

Zakretni moment M_d može se dovoljno točno odrediti iz izraza

$$M_d = 2aF, \quad (50)$$

gdje je a krak sile F , tj. udaljenost hvatišta sile F od spojnica središta valjaka. Uzima se da je za toplo valjanje $a = 0,5l$, a za hladno $a = 0,4l$.

Utrošak energije po toni izvaljanog materijala prikazan je u tabl. 1.

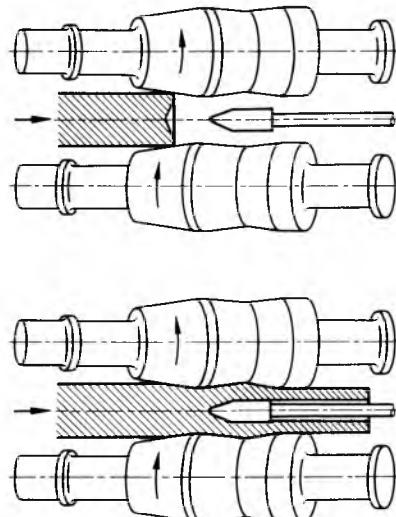
Tablica 1
UTROŠAK ENERGIJE PO TONI TOPLO
IZVALJANOG MATERIJALA

Teški blokovi i grede	15...25 kWh
Debeli limovi, željezničke tračnice	40...60 kWh
Profili i šipke srednjih i manjih presjeka	65...75 kWh
Šipke promjera 100...200 mm, trake, kutni profili 30x30 mm	75...90 kWh

Proizvodnja čeličnih cijevi

Cijevi služe za transport tekućina i plinova, kao konstrukcijski materijal i kao polazna sirovina u proizvodnji boca, čahura i sl. Prema postupcima izradbe i prema namjeni razlikuju se cijevi bez šava i cijevi sa šavom.

Bešavne cijevi služe za veća opterećenja kad se uz određena mehanička svojstva zahtijeva i visok stupanj sigurnosti. U nas

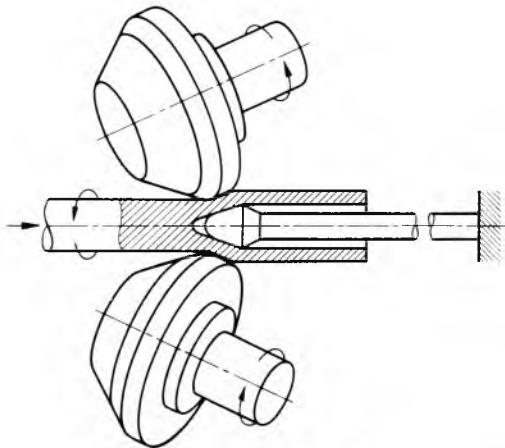


Sl. 23. Bušenje sirovca ukošenim valjcima (Mannesmannov postupak)

se toplo valjanje bešavnih cijevi izrađuje prema standardima JUS, s promjerima od $10\cdots 560$ mm i debljinom stijenke $1,6\cdots 12,5$ mm. Uz toplo valjanje, JUS razlikuje i hladno valjanje ili hladno provučene bešavne cijevi, što su nakon toplog valjanja još i hladno valjane ili hladno provučene, pa imaju uže tolerancije od samo toplo valjanih cijevi. Takve cijevi JUS klasificira kao svjetlo vučene i kao meko žarene cijevi.

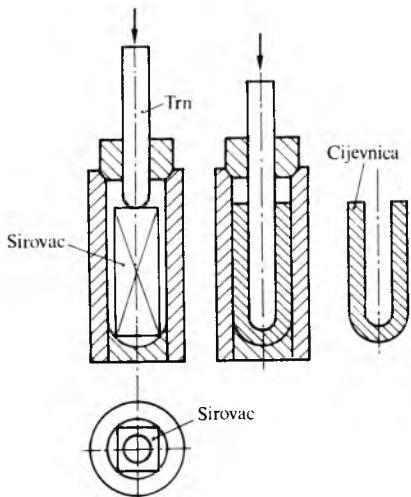
Proces proizvodnje bešavnih cijevi sastoji se od dvije glavne faze: izradbe tzv. cijevnice (to je kratka cijev s debelom stijenkicom) i valjanja cijevnice u konačni oblik cijevi. Nakon toga, ako je potrebno, slijede završni postupci kojima se cijev kalibrira na točne završne izmjere, dotjeruje se glatkoća vanjske i unutrašnje površine, reducira ili povećava promjer cijevi, te se cijev ravnja.

Izradba cijevnice. Cijevnica se izrađuje bušenjem usijanog sirovca pomoću valjaka ili utiskivanjem trna u usijani trupac. Sirovac se buši postupkom s ukošenim valjcima prema Mannesmannu (sl. 23) ili postupkom s pločastim i gljivastim valjcima (sl. 24).



Sl. 24. Bušenje sirovca gljivastim valjcima

Pri bušenju ukošenim valjcima usijani se sirovac stavlja među valjke koji ga zahvate i protiskuju preko trna na suprotnu stranu. Izlazni krajevi valjaka u obliku kratkog cilindra određuju vanjski promjer cijevnice. Presjek gotove cijevnice manji je $3\cdots 5$ puta od presjeka sirovca. Na trn djeluje tlačna sila od $700\cdots 1000$ kN, što zahtijeva velik presjek motke trna, pa se tim postupkom ne mogu bez naknadne redukcije proizvoditi cijevi promjera manjeg od 50 mm. Promjer bušenih sirovaca iznosi $120\cdots 550$ mm, promjer valjaka $600\cdots 1300$ mm, obodna brzina valjaka $8\cdots 3$ m/s, a potrebna snaga elektromotora $900\cdots 3700$ kW. Sirovac prolazi kroz valjke brzinom $u = v \sin \beta$, gdje je v obodna

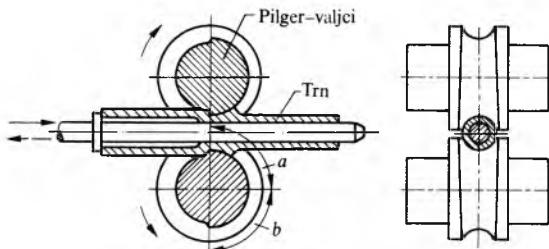


Sl. 25. Bušenje sirovca Ehrhardtovim postupkom

brzina valjka, β kut između osi sirovca i osi valjka i iznosi $3\cdots 12^\circ$. S porastom kuta β raste i brzina prolaza sirovca kroz valjke.

Prema Ehrhardtovu postupku cijevnica se oblikuje utiskivanjem okruglog trna u usijani četvrtasti trupac koji je stavljen u cilindrični kalup (sl. 25). Takvo se oblikovanje primjenjuje i u proizvodnji bešavnih boca.

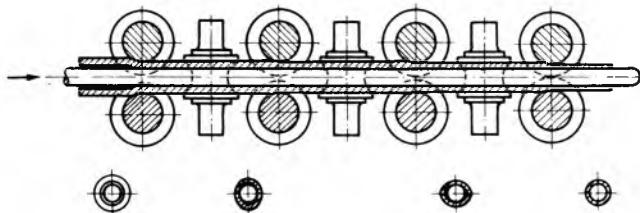
Valjanje cijevnice na završni oblik cijevi obavlja se jednim od sljedećih postupaka: *pilgerovanjem, kontinuiranim valjanjem, valjanjem s ukošenim valjcima.*



Sl. 26. Valjanje cijevi pilgerovanjem

Za pilgerovanje ili postupni način toplog valjanja prema Mannesmannu služe posebno kalibrirani valjci (sl. 26). Istaknuti dio kalibra zahvati cijevnicu na određenoj udaljenosti od kraja, pa okrećeći se gnjeći i stanjuje stijenku cijevnice. Samo jedan dio luka duljine a zahvaća i stanjuje stijenku, a nakon toga dio luka duljine b zaglađuje površinu stijenke. Valjak i stijenka cijevnice nalaze se u zahvatu samo kroz pola okretaja valjka, a zatim slijedi zastoj. Za vrijeme zastopa posebni uređaj zakrene motku s cijevnicom za $60\cdots 90^\circ$ i istodobno je vrati toliko natrag da kalibr valjka čas kasnije opet zahvati stijenku na određenoj udaljenosti od neizvaljanog kraja i ponovi proces na neobrađenom dijelu stijenke. Tako se korak po korak cijevnica izvalja po čitavoj duljini. Tim se postupkom valjaju cijevi promjera $48\cdots 600$ mm i debljine stijenke $2,5\cdots 15$ mm.

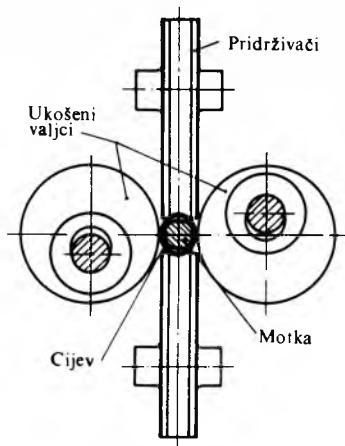
Kontinuirani postupak valjanja cijevnice prikazan je na sl. 27. Užarena cijevnica, nataknuta na dugu motku, prolazi kroz niz od $7\cdots 9$ pari kalibriranih valjaka, naizmjence s horizontalnim i vertikalnim osima, da bi se uklonila zadebljanja što nastaju na sastavima valjaka. Primjereno redukciji presjeka stijenke raste brzina valjanja od prvog do izlaznog valjka. Taj se postupak primjenjuje za cijevi promjera $40\cdots 125$ mm i debljine stijenke od $3,5\cdots 2,0$ mm. Prednosti su kontinuiranog postupka velike radne brzine i visoka proizvodnost. Zbog velikih radnih brzina cijevnica se tokom procesa suviše ne ohlađi, pa i cijevi s tankom stijenkicom imaju dovoljno visoku temperaturu na izlasku iz zadnjeg para valjaka. Slabe su strane postupka u tome što su valjci i motke (trnovi) veoma opterećeni, motke se teško izvlače iz cijevi, na unutrašnjoj cijevnoj ploni često nastaju uzdužne pukotine, ris, a stijenke se lako gužvaju, pa se stvaraju nabori. Suvremena postrojenja proizvode do 40 tona cijevi na sat, a sadrže i strojeve za redukciju promjera i završna kalibriranja cijevi.



Sl. 27. Kontinuirano valjanje cijevi

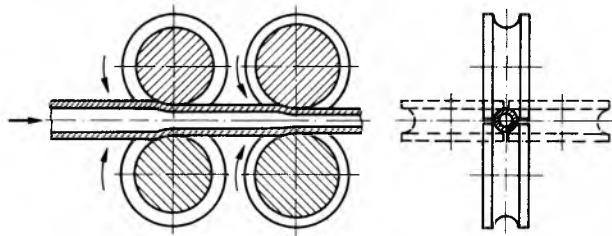
U posljednje se doba razvilo nekoliko postupaka za valjanje cijevnica pomoću dva ili tri ukošena valjka. Prema Diescherovu postupku (sl. 28) cijevnica, nataknuta na dugu motku, valja se između dva ukošena konična valjka i dvije rotirajuće pločaste vodilice koje zajedno s valjcima oblikuju okrugli kalibr. Tako se izrađuju cijevi s tankom stijenkicom promjera do 90 mm i

debljine stijenke 2...3 mm. Prednost je postupka u tome da je debljina stijenki jednolika, unutar tolerancija od samo +5%, a nedostatak je u tome što su ploče vodilice veoma opterećene i brzo se troše. Proizvodnja doseže do 12 tona cijevi na sat.



Sl. 28. Valjanje cijevi Diescherovim postupkom

Završni postupci u proizvodnji cijevi obuhvaćaju redukciju ili povećanje promjera cijevi, zagladivanje površine i ravnanje cijevi. Već prema dimenzijama i materijalu cijevi ta se završna obradba izvodi u toplom ili hladnom stanju. Promjer se cijevi reducira ili pomoću provlačenja, ili pomoću valjanja valjcima (sl. 29). Zagrijana cijev prolazi bez motke kroz niz valjaka i kalibara sve manjeg presjeka. Da stijenka ne zadeblja, dio cijevi između dva susjedna kalibra mora biti dovoljno napregnut na vlak, pa zato svaki valjak ima svoj elektromotor. Može se postići i šesterostruko produljenje cijevi uz istodobnu redukciju debljine stijenke. Redukcija promjera po kalibru iznosi 6...11%, a potrebna snaga 40...70 kW po kalibru. Proizvodnost tih strojeva iznosi 10...15 t/h.



Sl. 29. Redukcija promjera cijevi valjanjem

Materijal valjaka i trnova jesu legirani Cr-Ni-Mo čelici sa 0,5...2,5% Cr, do 2% Ni i 0,2...2,0% Mo.

Valjci za pilgerovanje sadrže 0,6...1,0% C, 1,6...2,5% Cr, 0,4...0,7% Mo. Valjci se lijevaju i termički obrađuju, a najtrajniji su oni koji imaju žilavu sredinu i tvrdu radnu plohu navarenim legiranim Cr-Ni elektrodama. Srednja trajnost valjaka primjerenog je proizvodnji od nekoliko tisuća tona cijevi.

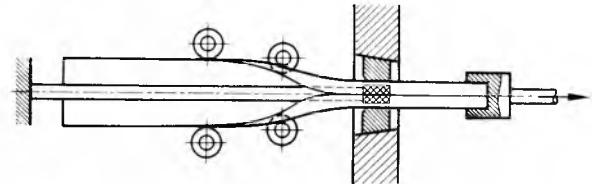
Trnovi za bušenje sirovca izrađeni su od čelika sa 0,4...0,6% C, 0,7...1,0% Cr, 1,5...2% Ni i 0,2...0,4% Mo. Izdrže do 200 bušenja.

Motke za kontinuirani postupak valjanja izložene su visokim temperaturama i visokim tlakovima. Često su izrađene od čelika sa 0,3...0,4% C, 0,6...1,2% Cr, 1,3...2,3% Ni i 0,3% Mo. Izdrže do 400 prolaza kroz valjke.

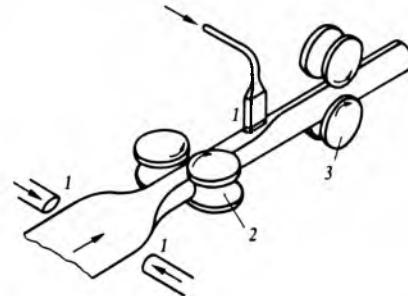
Savne cijevi služe za plinske, vodovodne, naftovodne instalacije, za instalacije centralnog grijanja, za niskotlačne instalacije u strojogradnji, poljoprivredi i sl. Pod nazivom **plinske cijevi** proizvode se s promjerom do 100 mm.

Proces proizvodnje uvekima ima dvije glavne faze: savijanje trake ili lima u oblik cijevi i zavarivanje savinutih rubova trake. Na te se glavne faze po potrebi nastavljaju: ravnanje i kalibriranje cijevi, rezanje navoja na krajevima cijevi, te reduciranjem ili povećanjem promjera cijevi.

Način savijanja trake u oblik cijevi ovisi o dimenzijama cijevi, o produktivnosti i o obliku šava. Za cijevi promjera do 100 mm primjenjuje se postupak savijanja provlačenjem trake kroz okruglu matricu i postupak postepenog savijanja, u toplom ili hladnom stanju, pomoću niza valjčića. Oba postupka daju uzdužni šav. Cijevi većih promjera oblikuju se i spiralnim natapanjem trake oko trna koji određuje unutrašnji promjer cijevi. Šavovi se zavaruju plinski, elektroprivremeno, elektrootporno, visokofrekventno ili induksijski uz istodobno natiskivanje savinutih rubova. Sl. 30 prikazuje princip izradbe cijevi savijanjem trake pomoću valjčića i provlačenjem preko trna kroz matricu.



Sl. 30. Savijanje i zatvarenje trake u oblik cijevi



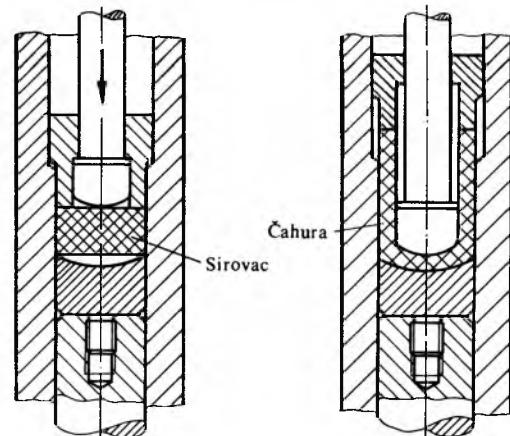
Sl. 31. Kružno zatvaranje trake u toplom stanju.
1 plinska sumpica za zagrijavanje trake, 2 valjci za zatvaranje trake, 3 kalibrirane elektrode

Brzina provlačenja iznosi do 100 m/min. Važno je dobro mazanje provlačnog alata. Sl. 31 prikazuje jedan od postupaka savijanja trake u toplom stanju. Traka se zagrijava plinom ispred ulaza među valjke koji traku kružno zatvore, a zatim valjkaste kalibrirane elektrode zavare šav natiskujući rubove jedan na drugi.

Proizvodnja čeličnih bešavnih boca

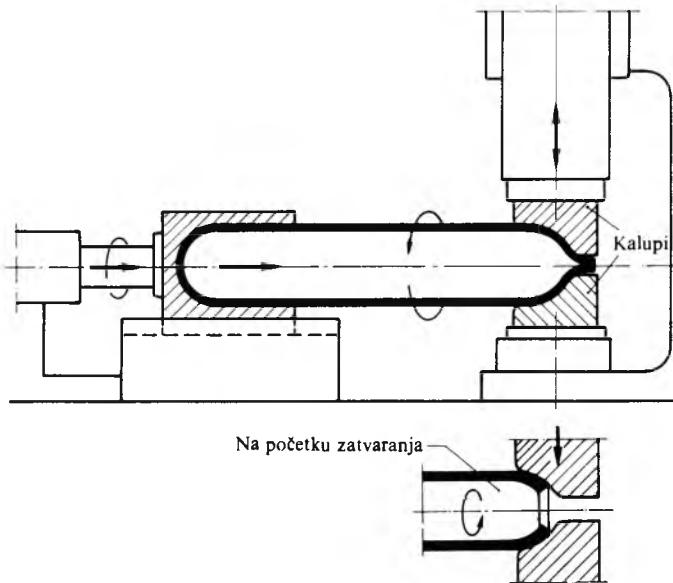
Čelične bešavne boce izrađuju se od cijevi ili od punog valjkastog trupca. U valjaonicama bešavnih cijevi boce se proizvode od odrezaka cijevi potrebnog promjera i duljine, kojima se oba kraja zatvore.

Izradba boca iz punog trupca ima tri faze. U prvoj se fazi užareni kratki valjkasti trupac stavlja u kontejner vertikalne hidrauličke prese i pod tlakom trna oblikuje u čahuru s debelom stijenkicom (sl. 32). Promjer trna je samo malo veći od unutrašnjeg promjera gotove boce. U drugoj se fazi čahura premjesti na horizontalni dugi trn i provlači na horizontalnoj hidrauličkoj



Sl. 32. Preoblikovanje sirovca u čahuru s debelom stijenkicom

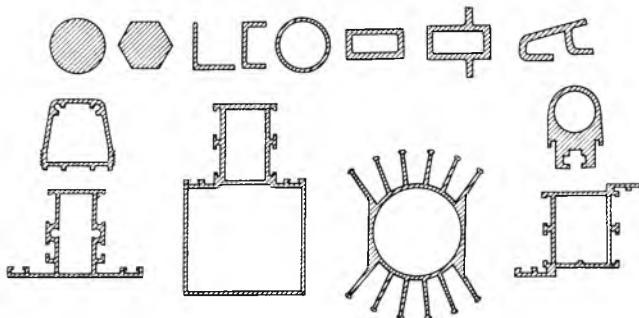
preši kroz 4-5 matrica sve manjeg otvora, te se na kraju natpisne na kalup za oblikovanje dna boce (kapičastog dna). U trećoj se fazi zatvara i oblikuje grlo boce. Sl. 33 prikazuje jedan od mogućih načina oblikovanja grla: boca užarena na otvorenom kraju stavi se u poseban uređaj u kojem rotira i istodobno se pomiče naprijed, utiskujući se u dvodijelni kalup. U kalupu se boca postepeno zatvara u polukuglasti oblik sa vršetkom u obliku kraćeg grla.



Sl. 33. Zatvaranje i oblikovanje grla boce

ISPREŠAVANJE

Isprešavanje (ekstruzija) razvilo se u prošlom stoljeću, kad je primjenjivano za proizvodnju olovnih cijevi, a veće je privredno značenje dobilo tek s razvojem industrije aviona poslije prvoga svjetskog rata. Danas se tim postupkom proizvode raznovrsni profili, šipke, trake i cijevi od lakih i obojenih metala, te čelični profili za specijalne svrhe (sl. 34). Najveća je prednost isprešavanja da se mogu proizvoditi profili najsloženijih oblika.

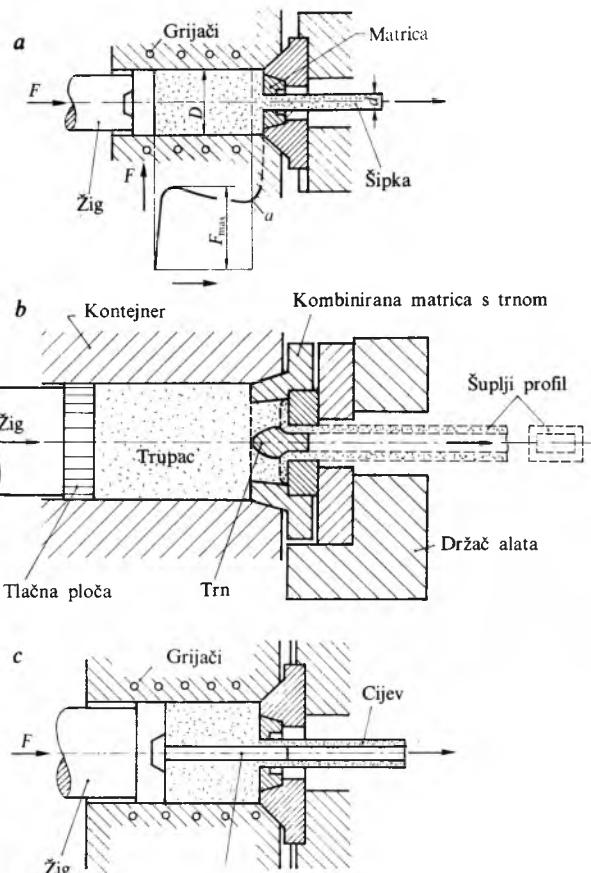


Sl. 34. Presjeci različitih profila proizvedenih isprešavanjem

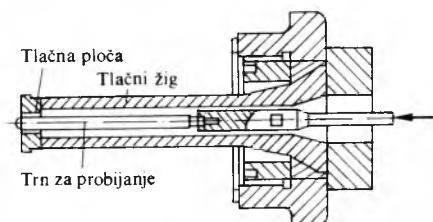
Glavni su potrošači predmeta proizvedenih isprešavanjem građevna industrija, industrija namještaja i kućanskih aparata, industrija vozila i elektroindustrija.

Postupci isprešavanja

Princip isprešavanja sastoji se u tom da se zagrijani okrugli trupac metalra, smješten u kontejneru preše, potiskuje žigom preše kroz otvor matrice. U kontejneru su ugrađena električna grijala koja održavaju temperaturu uloženog trupca. Sl. 35 prikazuje princip isprešavanja punih profila, šupljih i polušupljih profila te cijevi. Unutrašnji otvor cijevi oblikuje se pomičnim trnom, a šupljih profila trnom koji je dio matrice (*kombinirana matrica*). Ako su profili malog presjeka, može se iz trupca većeg promjera kroz ploču s više matrica istodobno isprešati više šipki (višežilno isprešavanje).



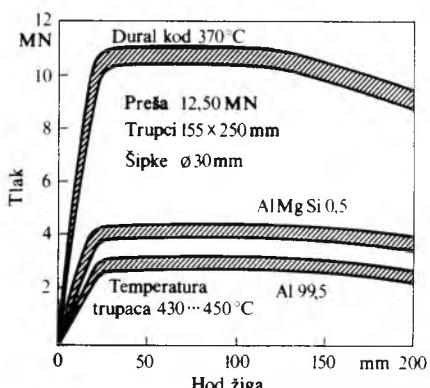
Sl. 35. Princip isprešavanja. a puna šipka, b šupljji profil, c cijev



Sl. 36. Tlačni žig s trnom za probijanje rupe u trupcu

Glavni tlačni žig alata za isprešavanje cijevi ima ugrađen mali pomicni trn kojim se najprije probije okrugli otvor u trupcu (sl. 36). Promjer trna treba biti dovoljno velik, a trupac relativno kratak, da se trn ne bi izvio i slomio.

Svi postupci isprešavanja imaju dvije faze. Prva je sabijanje trupca na nekoliko milimetara veći promjer kontejnera, a druga isprešavanje. Tokom prve faze tlak raste do maksimuma, a isprešavanje se nastavlja uz isti ili pomalo opadajući tlak (sl. 35a).



Sl. 37. Ovisnost tlaka o hodu žiga pri isprešavanju lakih metala

i 37). Specifični potrošak energije razmjeran je površini ispod krivulje tlaka u dijagramu tlak-hod žiga (sl. 37).

Od čitavog trupca isprešava se samo 80...90% njegove duljine, jer se tako izbjegava pojava uzdužnih šupljinica i pojedine troskastosti u isprešanom materijalu. Rjeđe se primjenjuje tzv. kontinuirani postupak isprešavanja, kad se neisprešani ostatak ne vadi, već se na njega nastavlja novi trupac. Materijal trupca mora biti bez šupljinica, unutrašnjih pukotina, nakupina troske, a važno je da bude i jednolike strukture. Zato se trupci lijevaju tzv. kontinuiranim postupkom, ali i tada nastaju izvjesne strukturne razlike po presjeku i duljini trupca. Te se razlike smanjuju dovoljno dugim zagrijavanjem trupaca (homogenizacijom). Svi površinski nedostaci uklanjanju se ljuštenjem trupca.

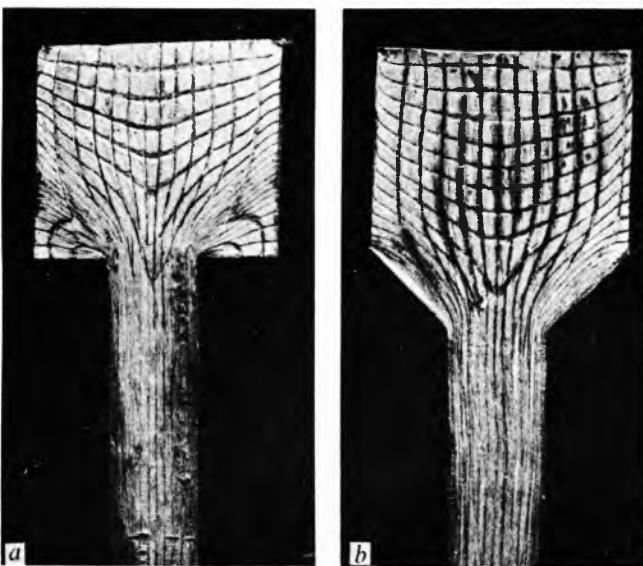
Temperature i brzine isprešavanja. Svi metali nisu jednak pogodni za isprešavanje. Metali složenijih struktura često se raspucaju ili se rascvjetaju. Da bi se izbjegle duboke poprečne pukotine, treba sniziti brzinu isprešavanja. Dopusene brzine isprešavanja ovise i o složenosti isprešavanog profila i o debljinji stijenke. Šuplje profile s tankom stijenkama složenog presjeka treba sporije isprešavati. Temperature i brzine isprešavanja za nekoliko vrsta metala prikazane su u tabl. 2.

Tablica 2
TEMPERATURE I BRZINE ISPREŠAVANJA

Metal	Temperatura isprešavanja C	Brzina isprešavanja cm/s
Aluminij	430...450	50...300
Bakar	830...900	30...150
Duraluminij	370...450	2...7
Peralumani (AlMg)	410...450	10...30
Mjed Cu 58 Zn	700...780	30...200
Mjed Cu 60 Zn sa 1% Sn	720...780	20...30
Mjed Cu 63 Zn	750...790	20...50
Aluminijска bronca, 5% Al	800...860	20...50
Silicijska bronca, 3% Si	790...840	10...20

Tokom isprešavanja utrošena se energija prešanja prenosi kao toplina na trupac i šipku, pa se njihova temperatura povećava. Zato treba paziti da temperatura šipke ne prijede dopuštenu granicu. Manjom brzinom isprešavanja i nejednakim zagrijavanjem trupaca po duljini izbjegava se preveliko zagrijavanje šipke. Održavanje određene temperature šipke (*izotermno isprešavanje*) osobito je važno ako se šipka na presi istodobno i zakaljuje. Osjetljive slitine, npr. dural, često se isprešavaju pri relativno nižim temperaturama, jer to dopušta nešto veće brzine isprešavanja, ali zahtijeva i veće sile tlačenja.

Struktura materijala. Ako se tokom isprešavanja dobro pragnjeći materijal trupca, postignut će se dobra mehanička i



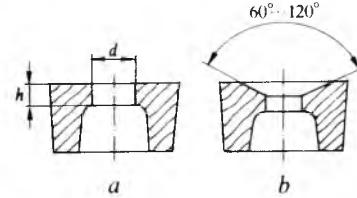
Sl. 38. Linije tečenja pri isprešavanju. a kroz ravnu matricu, b kroz koničnu matricu

strukturna svojstva isprešanog materijala. U tu je svrhu potrebno da omjer površine presjeka trupca A_t i površine presjeka šipke A_s bude veći od 7. U praksi je omjer A_t/A_s vrlo često unutar granica 20...80, a za isprešanu žicu i mnogo veći. Isprešavanjem kroz više matrica postaje taj omjer manji, što snizuje silu isprešavanja, ali skraćuje duljinu pojedinih šipki.

Sila isprešavanja definirana je jednostavnim izrazom $F = A_t p$, gdje je p tlak na čelu trupca. Visina potrebnog tlaka ovisi o vrsti materijala, omjeru A_t/A_s , veličini i složenosti presjeka profila, brzini i temperaturi isprešavanja, te trenutnoj duljini trupca. Za isprešavanje punih profila od aluminija potreban je tlak 10...20 kN/cm², dok je za složene šuplje profile s tankom stijenkama od tvrdih slitina 60...80 kN/cm². Temperatura trupca osobito utječe na potreban tlak. Snizi li se npr. temperatura isprešavanja slitine AlMgSi od 450 °C na 365 °C, povisit će se tlak za 80...100%. Utjecaj brzine isprešavanja relativno je malen, npr. 5...10 puta veća brzina zahtijeva svega 10...20% veću silu. I duljina trupca malo utječe na potreban tlak, jer metal trupca teče pretežno od periferije radikalno prema sredini trupca, a ne toliko uzduž kontaktne površine kontejnera (sl. 38).

Alati i uredaji za isprešavanje

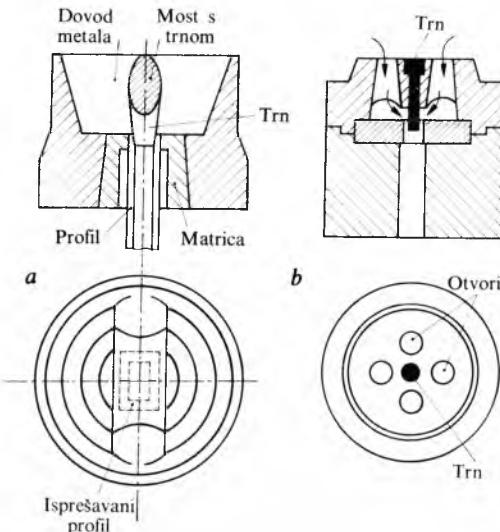
Matrice. Najviše se upotrebljavaju matrice ravnog oblika s oštrim ili neznatno zaobljenim ulaznim bridom i visinom vrata $h = 3...6$ mm, koji služi kao kalibracijski pojaz (sl. 39a). Konični oblik matrice s kutom do 120° olakšava dotok metala iz uglova kontejnera (sl. 39b).



Sl. 39. Oblici matrica. a ravna, b konična matrica

Matrice se izrađuju od alatnog čelika legiranog s kromom, volframom, molibdenom i vanadijem. Matrice za isprešavanje lakih metala izrađuju se od legiranog čelika 45 CrMoV 67, a za teške obojene metale od čelika 30 WCrV 53 sa 4,5% volframa. Za najveća opterećenja služi matrica od čelika 30 WCrV 93 sa 9% volframa. Tvrdi metali zasad uglavnom služe samo za isprešavanje žice.

Otvor matrice treba biti nešto veći od dimenzija isprešanog i ohlađenog profila. Taj dodatak na dimenzije otvora matrice potreban je zbog razlike u toplinskoj dilataciji materijala matrice i isprešanog profila, zatim zbog suženja otvora zbog progiba matrice i da bi se profil odvojio od stijenke matrice. Za

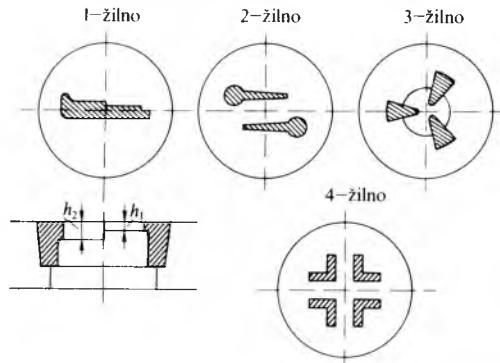


Sl. 40. Kombinirana matrica. a matrica s mostom, b matrica s dovodnim otvorima

čelične matrice sa stranicama otvora 20–60 mm ukupni dodatak iznosi 0,8–1,5%, a ako je profil s tankom stijenkom, taj je dodatak nekoliko puta veći, čak i više od 10% za stijenke debljine ~2mm. Zbog deformacija i trošenja matice te neispravnog dimenzioniranja njena svjetlog otvora tolerancije dimenzija isprešanog materijala iznose za promjere, stranice i debljine stijenki nekoliko desetinki milimetra, a za okrugle šipke promjera 15–30 mm standardna je tolerancija do +0,3 mm.

Za isprešavanje šupljih i polušupljih profila služe tzv. kombinirane matrice s ugrađenim trnom za oblikovanje svjetlog otvora profila (sl. 40). Zbog mosta s trnom dotok metala do izlaznog otvora veoma je otežan. Na mostu ili u dovodnim otvorima metal se cijepa u dvije i više pojedinačnih struja koje se u prostoru ispred izlaza sastaju i spajaju. Pri tome nastaju uzdužni šavovi u stijenici profila. Mehanička otpornost profila ovisi zbog toga o kvaliteti tih šavova. Lako zavarljive slitine (AlMgSi 1, AlZnMg 1) sa stijenkama koje nisu predebele uspješno se isprešavaju kroz kombinirane matrice.

Pri višežilnom isprešavanju brzina je najveća kroz matricu u središtu kontejnera. Također se to očituje pri jednožilnom isprešavanju nekog nesimetričnog profila, pa zato dio presjeka manje površine treba smjestiti što bliže središtu (sl. 41). Otpor istjecanja može se nešto smanjiti i tako povećati brzina ako se na tom mjestu vrat matrice načini nešto pliči.

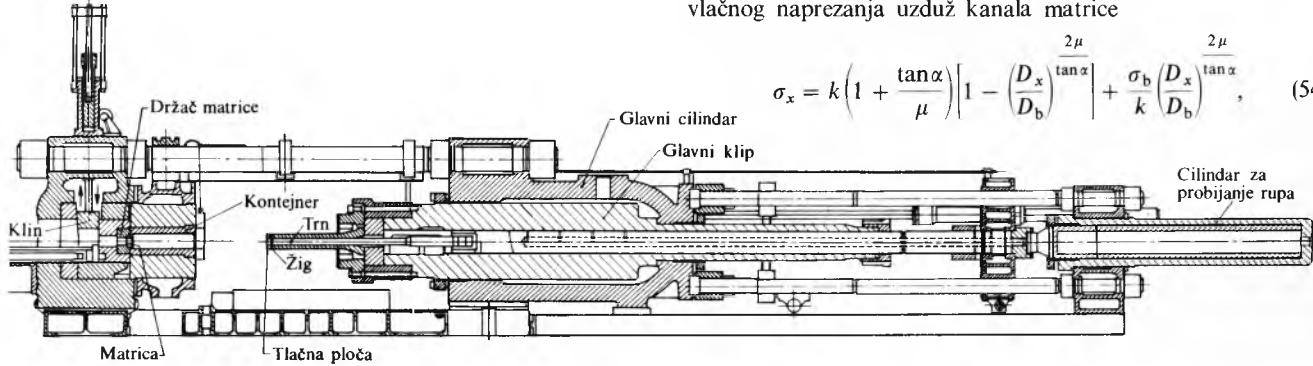


Sl. 41. Smještaj matrica u kontejneru pri jednožilnom i višežilnom isprešavanju

Vijek trajanja matrice izražava se obično masom (tonama) materijala što se može isprešati prije nego što se matrica toliko oštetiti da ju treba zamijeniti. Taj se vijek trajanja kreće u širokim granicama, od nekoliko tona pa do više desetaka tona, već prema kvaliteti materijala matrice, materijalu i složenosti isprešanog profila, temperaturi i brzini isprešavanja itd.

Ekstruzijske preše. Preše za isprešavanje metala uvijek su hidrauličke, većinom horizontalne, s tlačnom silom 6,5–150 MN. Iznimku su male vertikalne preše za proizvodnju sitnijih šipki i cijevi sa silom tlačenja do 8 MN. Uzdužni presjek srednje teške preše prikazan je na sl. 42.

Hidraulički cilindri i klipovi preše dimenzioniraju se prema maksimalnom hidrauličkom tlaku koji iznosi 22–32 MPa. Od hidrauličke sile na klipu preše prenosi se na trupac do 90%.



Sl. 42. Uzdužni presjek hidrauličke preše za isprešavanje

Teško opterećeni dijelovi preše jesu: tlačni žig i njegova tlačna ploča, trn za probijanje trupaca, košuljica kontejnera, držać matrice i njegova tlačna ploča. Ti se dijelovi uvijek grade od legiranih vrsta čelika, npr. za tlačne žigove uzima se čelik 45 NiCrMo 4, za košuljice kontejnera 45 CrMoV 67.

Proaktivnost preše ovisi o brzini isprešavanja i dimenzijama isprešavanog trupca, a izražava se masom isprešanog materijala na sat, pa iznosi:

$$G = n \frac{D^2 \pi}{4} L \varrho, \quad (51)$$

gdje je D promjer trupca, L duljina trupca, ϱ gustoća materijala trupca, a n broj isprešanih trupaca na sat.

Trajanje jednog ciklusa prešanja iznosi:

$$t = t_p + t_0, \quad (52)$$

gdje je t_p trajanje isprešavanja trupca, a t_0 jalovo vrijeme utrošeno na otvaranje i zatvaranje preše, na vadenje neisprešanog ostatka i na ulaganje trupca. Jalovo vrijeme t_0 iznosi 40–120 s, već prema konstrukciji preše, mehanizmu za dopremu trupca i prema veličini trupca.

Peći za zagrijavanje trupaca danas su najčešće elektroindukcijske. U usporedbi sa starijim izvedbama elektrootpornih peći tunelskog tipa elektroindukcijske peći imaju sljedeće prednosti: brzina zagrijavanja je velika i uskladena s brzinom rada ekstruzijske preše, mnogo su manjih dimenzija i imaju manje toplinske gubitke. Smještaju se u neposrednoj blizini kontejnera preše.

PROVLAČENJE

Postupak provlačenja služi u proizvodnji šipki, traka, cijevi, boca i žica, i to uglavnom za promjenu promjera i debljine stijenki, a rjeđe i za promjenu oblika presjeka. Provlačenje se primjenjuje kad su potrebne točnije dimenzije i glada površina proizvoda, ili kad je presjek proizvoda vrlo malen (žica, profili s tankom stijenkicom), pa bi izradba nekim drugim postupkom bila nerentabilna.

Provlačenje je većinom hladni postupak i samo se bešavne boce i čahure izrađuju provlačenjem u toploem stanju. Hladnim se provlačenjem materijalu povećava čvrstoća, a smanjuje istezljivost. U praktičnom radu važne su sljedeće okolnosti: sile provlačenja, optimalni oblik provlačnog alata, materijal i vijek trajanja alata, najveće dopuštene pojedinačne i grupne redukcije presjeka, optimalne brzine provlačenja te utjecaj i izbor maziva.

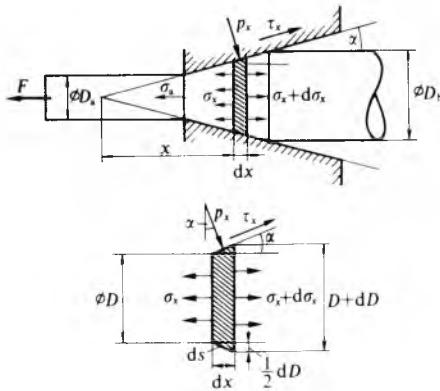
Teorija provlačenja šipki i traka. Raspored naprezanja pri provlačenju okrugle šipke prikazan je na sl. 43. Izraz za silu provlačenja dobiva se rješenjem diferencijalne jednadžbe postavljene na osnovi uvjeta ravnoteže sile koje djeluju na neki elementarni pločasti izrezak u udaljenosti x . Uz pretpostavku Coulombova zakona trenja $\tau_x = \mu p_x$ i uz uvjet plastičnog tečenja $\sigma_x + p_x = k$ dobiva se sljedeći oblik jednadžbe, zgodan za integraciju,

$$\frac{d\sigma_x}{B\sigma_x - k(1+B)} = 2 \frac{dD}{D}, \quad (53)$$

gdje je $B = \mu/\tan\alpha$, μ koeficijent trenja, a značenje ostalih oznaka vidi se iz sl. 43. Rješenje izraza (53) daje razdiobu vlačnog naprezanja uzduž kanala matrice

$$\sigma_x = k \left(1 + \frac{\tan\alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{D_x}{D_b} \right)^{\frac{2\mu}{\tan\alpha}} \right] + \frac{\sigma_b}{k} \left(\frac{D_x}{D_b} \right)^{\frac{2\mu}{\tan\alpha}}, \quad (54)$$

Cilindr za probijanje rupa



Sl. 43. Naprezanja na elementarnom isječku pri postupku provlačenja

gdje je σ_b protuvlak ili naprezanje na ulazu kanala matrice, koje je za istodobno provlačenje kroz dvije matrice veće od nule. Za provlačenje samo kroz jednu matricu $\sigma_b = 0$, pa izraz (54) prelazi u oblik

$$\sigma_x = k \left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{A_x}{A_b} \right)^{\frac{\mu}{\tan \alpha}} \right], \quad (55)$$

gdje je A_b presjek šipke na ulazu kanala matrice, A_x presjek šipke na udaljenosti x . Na izlazu iz kanala matrice, za $D_x = D_a$ i $A_x = A$, najveće naprezanje iznosi

$$\sigma_a = k \left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{A}{A_b} \right)^{\frac{\mu}{\tan \alpha}} \right], \quad (56)$$

a sila provlačenja

$$F = \frac{1}{4} D^2 \pi \sigma_a. \quad (57)$$

Razdioba naprezanja σ_x i p_x uzduž kanala matrice (sl. 44) pokazuje da je tlačno napezanje p_x najveće baš na ulazu, što otežava uvlačenje maziva u alat. Kad se pretpostavi da se veličina k ne mijenja, odnosno ako se računa s njenom srednjom vrijednošću koja iznosi

$$k = 0,5(k_a + k_b), \quad (58)$$

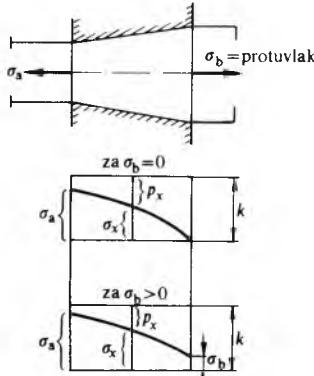
u idealnom slučaju bez trenja, $\mu = 0$, $B = 0$, izraz (53) prelazi u oblik

$$d\sigma_x = -2k \frac{dD}{D}, \quad (59)$$

pa slijedi da je

$$\sigma_a = k \varphi, \quad (60)$$

gdje je $\varphi = \ln(D_b/D_a)^2 = \ln(A_b/A_a)$.



Sl. 44. Razdioba naprezanja uzduž kojnici matrice kad je $\sigma_b = 0$ i $\sigma_b > 0$

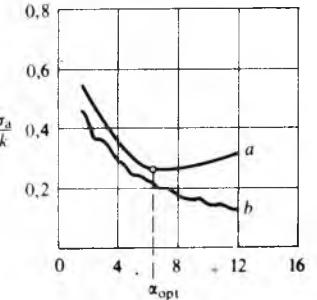
Iskustvo je pokazalo da uvijek postoji neki optimalni kut matrice α za koji su σ_a i F najmanji, što ne slijedi iz izraza (56). Zato se jednadžba (56) modificira u oblik

$$\sigma_a = k \varphi \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{c \alpha}{\varphi} \right), \quad (61)$$

gdje je c iskustvena veličina koja ovisi o provlačenom materijalu, pa je za čelik $c = 0,67$, a za lake metale $c = 0,4 \dots 0,5$. U izrazu (61) prvi član $k \varphi$ prikazuje utjecaj promjene oblika šipke, drugi $k \varphi \mu / \alpha$ svladavanje trenja, a treći $k c \alpha$ svladavanje tzv. unutrašnjeg otpora. Ako se postavi $d\sigma_a/d\alpha = 0$, dobiva se iz (61) izraz za optimalni kut matrice

$$\alpha_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{\mu \varphi}{c}}. \quad (62)$$

Iz dijagrama ovisnosti omjera σ_a/k o kutu α (sl. 45) vidi se da su vrijednosti prema izrazu (61) uvijek veće od onih prema (56), s minimumom za $\alpha = \alpha_{\text{opt}}$.



Sl. 45. Ovisnost omjera σ_a/k o kutu matrice α : a prema Siebelu, jednadžba (61), b prema Sachsu, jednadžba (56)

Ako se provlači traka pravokutnog presjeka (sl. 46), radi jednostavnosti se pretpostavlja da se samo smanjuje debljina trake h , bez promjene njezine širine b , pa nema ni naprezanja u smjeru širine trake. Iz uvjeta ravnoteže sile koje djeluju na neki elementarni izrezak dolazi se do diferencijalne jednadžbe slične izrazu (53)

$$\frac{d\sigma_x}{B\sigma_x - k(1+B)} = \frac{dh}{h}. \quad (63)$$

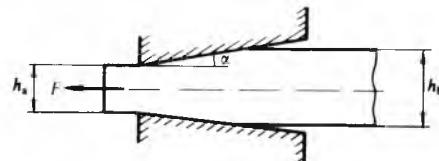
Rješenjem te jednadžbe dobiva se vlačno naprezanje σ_a na izlazu iz matrice

$$\sigma_a = k \left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{h_a}{h_b} \right)^{\frac{\mu}{\tan \alpha}} \right], \quad (64)$$

pa je sila provlačenja

$$F = \sigma_a b h_a, \quad (65)$$

gdje je b širina trake, a h_a i h_b debljina trake na izlazu, odnosno na ulazu. Jednadžba (64) lako se pretvara u oblik (61) gdje je stupanj deformacije $\varphi = \ln(h_b/h_a)$.



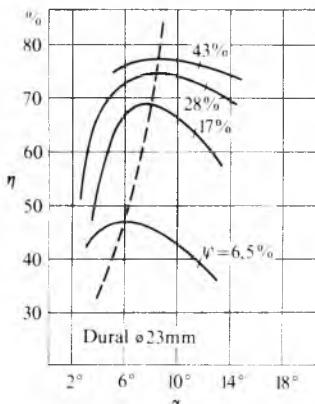
Sl. 46. Provlačenje trake izlaznog presjeka $h_a \times b$

Ako se stupanj djelovanja η definira kao omjer između idealnog vlačnog naprezanja $\sigma_{a0} = k \varphi$ i vlačnog naprezanja σ_a prema izrazu (64), dobiva se

$$\eta = \frac{\sigma_{a0}}{\sigma_a} = \frac{1}{1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{c \alpha}{\varphi}}. \quad (66)$$

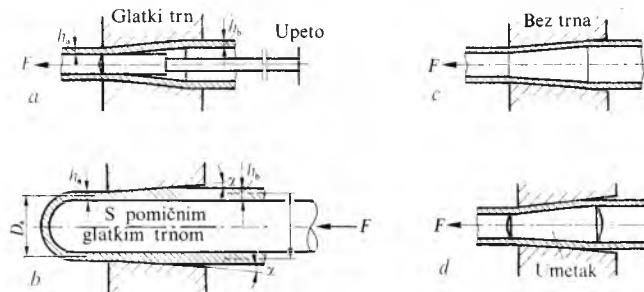
Tako definirani stupanj djelovanja η raste s porastom stupnja deformacije φ , a za neku zadatu vrijednost φ postiže maksimum

kad je kut matrice $\alpha = \alpha_{opt}$. Na sl. 47 prikazana je ovisnost stupnja djelovanja η o kutu matrice α i iznosu redukcije presjeka ψ za provlačenje duraluminjske šipke.



Sl. 47. Ovisnost stupnja korisnosti η o kutu matrice α i redukciji presjeka ψ

Provlačenje cijevi. U proizvodnji cijevi provlačenje služi kao postupak doradbe kojim se poboljšava kvaliteta cijevne plohe, mijenja promjer cijevi, povećava ili smanjuje debljinu stijenke cijevi itd. Razlikuju se četiri načina provlačenja (sl. 48): preko nepomičnog glatkog trna, s pomičnim glatkim trnom, bez trna i preko slobodnog koničnog umetka.



Sl. 48. Postupci provlačenja cijevi. a) postupak s nepomičnim trnom, b) postupak s pomičnim trnom, c) postupak bez trna, d) postupak sa slobodnim koničnim umetkom

Ako se pretpostavi da je debljina stijenke cijevi h relativno malena prema promjeru cijevi, tada se za *provlačenje cijevi preko nepomičnog trna* (sl. 48a) može računati s nekim srednjim promjerom D prstenastog elementa za koji se postavlja diferencijalna jednadžba ravnoteže sila. Taj je srednji promjer zajednički za proračun i vanjske i unutrašnje dodirne plohe prstenastog elementa, pa se dolazi do diferencijalne jednadžbe tipa (63), koja daje rješenja za vlačno naprezanje na izlazu

$$\sigma_a = k \left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{h_a}{h_b} \right)^{\frac{\mu}{\tan \alpha}} \right], \quad (67)$$

a za silu provlačenja

$$F = D_a \pi h_a \sigma_a. \quad (68)$$

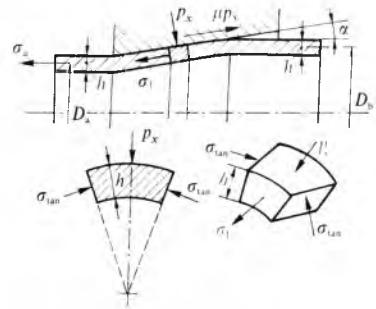
Provlačenje cijevi (boce) s pomičnim glatkim trnom (sl. 48b) zahtijeva ukupnu tlačnu silu na trnu

$$F = D_a \pi h_a k \left[1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right] \ln \frac{h_b}{h_a}, \quad (69)$$

što se za idealni slučaj bez trenja reducira na oblik

$$F_{id} = D_a \pi h_a k \ln(h_b/h_a). \quad (70)$$

Provlačenje cijevi bez upotrebe trna (sl. 48c) primjenjuje se samo za promjenu promjera cijevi bez promjene debljine stijenke. Budući da nema trna, materijal se može slobodno pre-



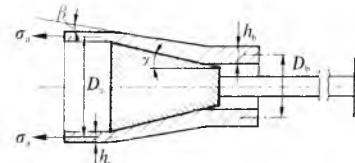
Sl. 49. Naprezanja pri provlačenju cijevi bez upotrebe trna

mještati u smjeru debljine stijenke (sl. 49). Da li će se pri tom premještanju stijenka zadebljavati ili stanjivati, ovisi o omjeru uzdužnog vlačnog naprezanja σ_a koje stanjuje i tangencijalnog tlačnog naprezanja σ_{tg} koje zadebljava stijenkou. Uzdužno vlačno naprezanje σ_a raste od nule na ulazu u matricu do najveće vrijednosti σ_a na izlazu, dok je tangencijalno tlačno naprezanje σ_{tg} najveće na ulazu, a opada prema izlazu iz matrice. Zbog toga u prvom ulaznom dijelu deformacijske zone najprije nastaje zadebljanje stijenke, a nakon toga slijedi stanjivanje, pa stijenka često ima na kraju početnu, ulaznu debljinu. Izvod izraza za vlačno naprezanje na izlazu σ_a i za silu provlačenja na izlazu F pojednostavljuje se ako se pretpostavi da debljina h ostaje konstantna, pa se dobivaju izrazi

$$\sigma_a = k \left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{D_a}{D_b} \right)^{\frac{\mu}{\tan \alpha}} \right], \quad (71)$$

$$F = D_a \pi h_a \sigma_a. \quad (72)$$

Provlačenje cijevi preko slobodnog umetka (sl. 48d) upotrebjava se za cijevi manjeg promjera. Umetak se tako postavi da raspored između njega i matrice bude jednak dimenziji na koju treba provući cijev. U tom položaju umetka unutar cijevi mora zbroj horizontalnih komponenata svih sila koje na njega djeluju biti jednak nuli. Iz tog uvjeta proizlazi da nagib izvodnice konusa umetka prema horizontali α_1 mora biti takav da je $\tan \alpha_1 > \mu$. Ako taj uvjet nije ispunjen, umetak će zakoći stijenku i provlačenje će zapeti. Iz istog razloga mora biti kut $\alpha_1 \geq \alpha$.



Sl. 50. Proširivanje cijevi postupkom provlačenja

Proširivanje cijevi, tj. povećanje promjera cijevi uz istodobno stanjenje njezine stijenke, izvodi se navlačenjem preko koničnog trna ili se kratki cijevni odrezak protiskuje preko trna (sl. 50). Uz pretpostavku da je površina poprečnoga prstenastog presjeka cijevi svuda ista, $D_a \pi h_a = D_b \pi h_b = D_s \pi h_s = \text{const.}$, dobiva se pojednostavljeni izraz za vlačno naprezanje na izlazu:

$$\sigma_a = k \frac{1 + \frac{\mu}{\tan \alpha}}{1 - \mu \tan \alpha} \ln \frac{D_a}{D_b}. \quad (73)$$

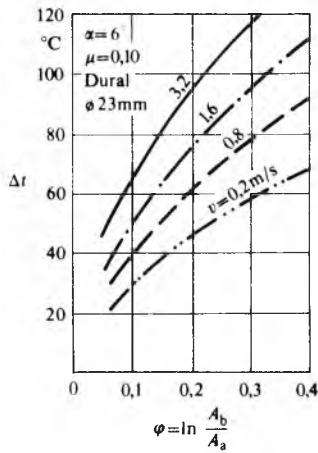
i za silu provlačenja

$$F = D_a \pi h_a \sigma_a. \quad (74)$$

Koefficijent trenja i mazivo. Pri provlačenju čeličnoga šipkastog materijala računa se obično s koefficijentom trenja $\mu = 0,05$. Za trake od lakih metala koefficijent trenja može biti nešto manji i neovisan je o stupnju deformacije φ , ali ovisi o kutu matrice α . Za provlačenje cijevi s trnom koefficijent trenja je nešto veći, $\mu = 0,06 \dots 0,10$.

Lakoća provlačenja, vijek trajanja alata i kvaliteta provučene površine ovise o pravilnom izboru maziva. Kao mazivo, ili sastojci maziva, upotrebljavaju se: loj, vosak, sapuni, vazelin, vodenog staklo, palmino i repičino ulje, maziva ulja i mazut, vapno, grafit i molibden-bisulfid. Za provlačenje lakih metala služe gusta maziva ulja s dodatkom grafita. Bakrene i mjeđene šipke podmazuju se mineralnim uljima s dodatkom biljnih masti ili sapuna. Za provlačenje čeličnih cijevi upotrebljavaju se sapu-nasta maziva s dodatkom krede i drugih punila. Za provlačenje srebra, zlata i platine služe vosak i parafin, eventualno s dodatkom repičina ulja.

Zagrijavanje pri provlačenju. Dio rada provlačenja pretvara se u toplinu, pa se provlačeni materijal, mazivo i alat zagrijavaju. U suvremenoj proizvodnji nastoji se da brzina provlačenja bude što veća uz što veće redukcije presjeka, pa je zagrijavanje sve važnije. Toplinu proizvode rad deformacije i rad trenja. Deformacija, prema prvom i trećem članu u izrazu (61), uzrokuje jednoliko povišenje temperature Δt_1 po čitavom poprečnom presjeku šipke. Zbog trenja, prema drugom članu u izrazu (61), povećava se temperatura na dodirnoj plohi i postepeno raste od ulaza do izlaza iz deformacijske zone, tako da je prosječno povišenje temperature Δt_2 . Ukupno je povišenje temperature na dodirnoj plohi, dakle, $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$. Sl. 51 pokazuje porast temperature Δt duraluminijске šipke promjera 23 mm pri različitim brzinama provlačenja v i različitim stupnjevima deformacije φ , uz pretpostavku da je koeficijent trenja $\mu = 0,10$, te da samo polovicu topline trenja preuzima šipka.



Sl. 51. Porast temperature Δt duraluminijiske šipke s obzirom na brzinu provlačenja v i stupanj deformacije φ

Brzine provlačenja kreću se u širokim granicama, od $0,2\cdots0,5 \text{ m/s}$ za šipke i cijevi do više od 10 m/s za žicu malog presjeka. Zbog velikog zagrijavanja, kad se žica provlači velikim brzinama, mora se proces obavljati uz hlađenje, npr. u uljnoj kupki.

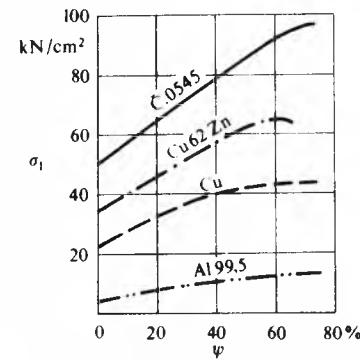
Programiranje provlačenja. Početni presjek A_0 neke šipke provlači se na završni presjek A_n u n prolaza. Potreban broj prolaza iznosi

$$n = \frac{\lg \frac{A_n}{A_0}}{\lg (1 - \psi)}, \quad (75)$$

uz pretpostavku da je redukcija presjeka ψ u svakom prolazu ista, što obično nije. U jednom prolazu provlačenja redukcija presjeka ψ iznosi za okrugle bakrene šipke $20\cdots30\%$, za pravokutne trake $18\cdots25\%$, a za složenije profile s tankom stijenkom $7\cdots16\%$. Da bi se promjer čelične žice smanjio od 5 mm na 2 mm , žicu treba provlačiti u $5\cdots6$ prolaza s redukcijom od $25\cdots33\%$ po prolazu. Ako se isti početni promjer žice smanjuje na $1,2 \text{ mm}$, potrebno je $8\cdots9$ prolaza.

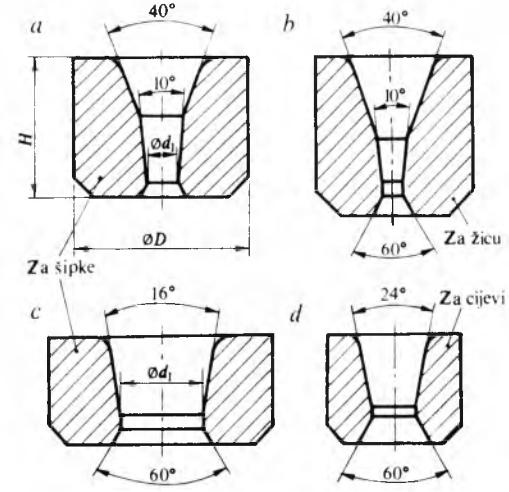
Da bi se točnije postavio plan provlačenja, upotrebljavaju se dijagrami očvršćivanja (sl. 52). Naime, redukcija presjeka od ukupno $60\cdots70\%$ skoro podvostručjuje početnu čvrstoću nekih

metala, npr. čelika, snizujući veoma istezljivost materijala. Zato je potrebno takve metale između prolaza provlačenja toplinski omekšati i vratiti u prvobitno istezljivo stanje.

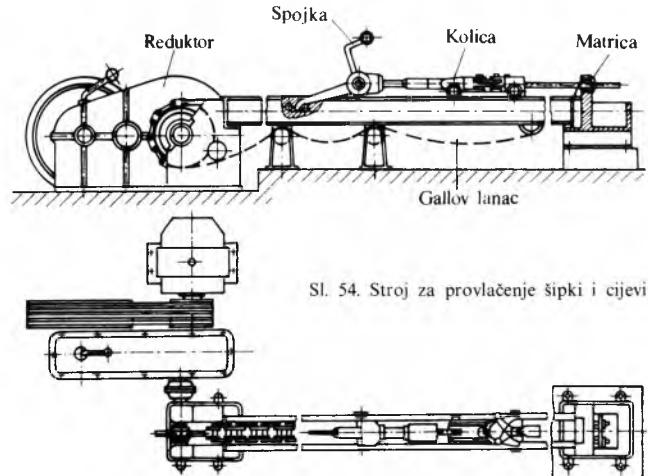


Sl. 52. Očvršćivanje provučenog metala prema redukciji presjeka ψ

Oblik i materijal matrica. Matrični kut α obično iznosi za žicu i tanke šipke $\sim 10^\circ$, za deblje šipke $\sim 16^\circ$, a za cijevi $\sim 24^\circ$ (sl. 53). Na radni konični dio otvora matrice nastavlja se često kratki cilindrični dio koji služi u prvom redu da se produži vijek trajanja matrice, jer cilindrični dio omogućuje da se konus prebrusi a da se ne promjeni izlazni promjer otvora matrice. Matrice su izrađene od čelika legiranog s kromom, a danas se sve više izrađuju i od tvrdih metala. Za provlačenje vrlo finih žica upotrebljavaju se i matrice sastavljene od dijamantata. Za šipke četvrtastog i višekutnog presjeka služe dvodijelne i višedijelne matrice, jer se lakše izrađuju i održavaju, a lakše se umeću i ulošci od tvrdog metalova.



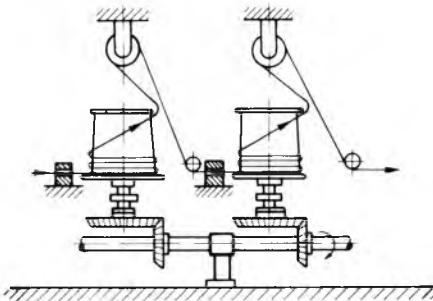
Sl. 53. Oblici matrica za provlačenje



Sl. 54. Stroj za provlačenje šipki i cijevi

Strojevi za provlačenje. Postoje provlačilice za šipkasti materijal i cijevi i provlačilice za žicu i trake malog presjeka.

Provlačilica za šipke i cijevi (sl. 54) ima masivnu dugu klupu po kojoj kližu kolica s klještim provlačeci šipku kroz matricu smještenu na kraju klupe. Kolica povlači Gallov lanac koji se neprekidno giba. Pogon kolica uključuje se i isključuje spojkom koja zahvaća u kariku Gallova lana. Sila provlačenja iznosi 10...150 kN, duljina je provlačenja 5...10 m, a brzina provlačenja do 30 m/min.



Sl. 55. Stroj za provlačenje žice

Za provlačenje žice i sitnih traka služe višestepene provlačilice s više matrica i bubnjeva (sl. 55). Provlačilice za mekanu čeličnu žicu imaju do 10 matrica i bubnjeva.

KOVANJE

Kovački radovi najčešće se obavljaju u topлом stanju jer se tada, zbog veće plastičnosti, metal može bolje i lakše oblikovati, a uz mnogo manje deformacijske sile i manji utrošak energije. Prema načinu preoblikovanja metala razlikuje se slobođeno (ručno) kovanje i kovanje u kalupima (ukovnjima).

Slobodno kovanje najstariji je postupak oblikovanja metala, a primjenjuje se kad je broj otkivaka malen. Osnovne su operacije tog postupka: sabijanje, iskivanje i raskivanje, probijanje, zasijecanje i savijanje.

Kovanje u ukovnjima (kalupima) primjenjuje se u suvremenoj masovnoj proizvodnji. Prednosti su takva kovanja: niži proizvodni troškovi, bolja i jednoličnija kvaliteta otkivaka, rad može obavljati i priučena radna snaga.

Kovanje u ukovnjima

Kovanje se u ukovnjima obavlja pomoću kovačkih strojeva koji udarcima ili tlakom oblikuju sirovac uložen u ukovanj.

Sirovac. U ukovanj se obično ulaže zagrijani sirovac, a vrlo rijetko se kuje sirovac u hladnom stanju. Temperature kovanja nekih metala navedene su u tabl. 3. Sirovci metalâ s uskim temperaturnim rasponom kovanja, npr. neki visokolegirani čelici, moraju se tokom kovanja dogrijavati.

Tablica 3
TEMPERATURE KOVANJA

Metal	Temperaturno područje °C
Aluminij	480...330
Bakar	1050...800
Mjedi za kovanje	880...640
Čelici, nelegirani:	
sa maks. 0,15% C	1250...750
sa 0,35...0,50% C	1200...800
sa 0,60...0,75% C	1150...800
do 0,6% C, do 0,9% Cr i do 3% Ni	1180...850
Čelici, svi brzorezni: Č.9782, Č.6980, Č.6880, Č.7680, Č.9780,...	1180...920

Zbog povišene temperature pri kovanju često izgori 3...5% materijala sirovca, i to na njegovoj površini. Da se taj izgorjeli materijal ne bi kovanjem uprešao dublje ispod površine u proizvodnji kvalitetnih i jače opterećenih otkivaka, skida se površinski sloj oksida udarcima bata po čelu sirovca, a ponekad i mlazom vode.

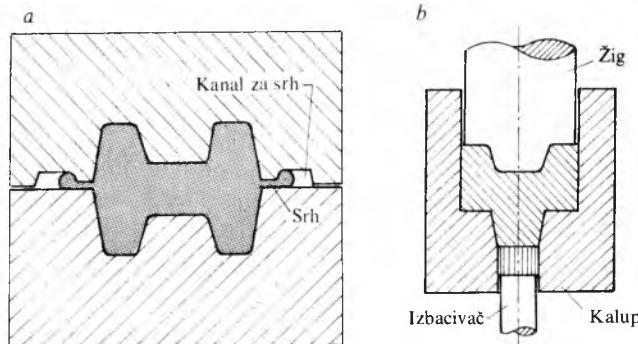
Masa sirovca m_s uvijek je veća od mase gotovog otkivka m_0 , pogotovo ako se kovanje obavlja u dvodijelnom ukovnju, pa je zbog srha potreban relativno velik višak materijala. Za kovanje u ukovnju masa je sirovca određena izrazom

$$m_s = c m_0, \quad (76)$$

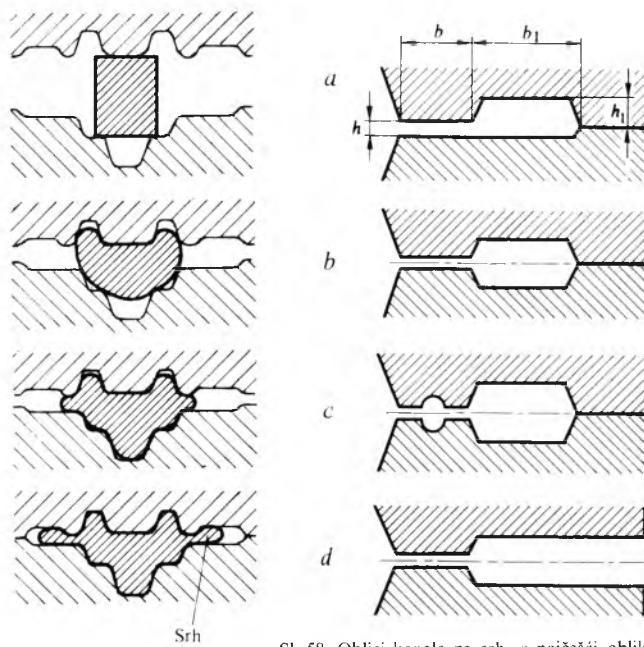
gdje je faktor c uvijek veći od jedinice, a ovisi o tipu ukovnja (jednodijelni ili dvodijelni), te složenosti i veličini otkivka.

Ukovnji mogu biti otvoreni ili zatvoreni tipa (sl. 56).

Otvoreni ukovanj ima dva dijela koji sklopljeni zatvaraju šupljinu (*gravuru*) gdje se oblikuje otkivak, tj. oblik gravure jednak je obliku otkivka. Uz gravuru se nalazi kanal za srh (porub) gdje se skuplja pretičak metala sirovca. Pod tlakom ili udarcima kovačkog stroja sirovac u dvodijelnom ukovnju postepeno popunjava gravuru, poprimajući njen oblik, a višak metala odlazi u kanal za srh (sl. 57).



Sl. 56. Ukonvani tipi. a otvoren tip, b zatvoren tip



Sl. 57. Primjer preoblikovanja sirovca u ukovnju

Kanal za srh mora biti tako dimenzioniran da može primiti sav višak metala a da još uvijek ne bude potpuno ispunjen. Profil kanala (sl. 58) ima dva dijela: most visine h i duljine b , te prošireni dio visine h_1 i duljine b_1 . Most treba da spriječi srušenje lako odvođenje metala u prošireni dio kanala, tako da se prošireni dio ne može ispuniti metalom prije nego što se popuni gravura. Visina mosta određuje se prema iskustvenoj formuli

$$h = 0,015\sqrt{A_h}, \quad (77)$$

gdje je A_h horizontalna projekcija otkivka bez srha. Za manje vrijednosti A_h duljina mosta b iznosi $\sim 10h$, a za velike vrijed-

nosti A_h iznosi $3 \cdots 4h$. Dimenzije proširenog dijela kanala iznose: $h_1 = h + 2 \cdots 3 \text{ mm}$, $b_1 = 5 \cdots 7h_1$.

Zatvoren ukovanj je jednodijelan. U bloku ukovnja izrađena je gravura bez kanala za srh, a sirovac se sabija u gravuru pomoću žiga (sl. 56b). Srh je nezatan, jer se oblikuje samo kao tanki, ostri porub u uskom rasporu između žiga i stijenke ukovnja. Veličina sirovca mora se točno primjeriti veličini gravure, tj. gotovog otkivka, jer u ukovnju nema mesta da se višak metala odloži u obliku srha.

Materijal za izradbu ukovnja. Ukovanj je podvrgnut velikim mehaničkim i termičkim opterećenjima, pa mora biti izrađen od čeliča potrebne tvrdoće, žilavosti i dinamičke izdržljivosti, otpornog prema visokim temperaturama i kratkotrajnim temperaturnim kolebanjima, te otpornog prema trošenju.

Ukovnji s jednostavnom malom i plitkom gravurom i ukovnji za otkivke od neželjeznih metala izrađuju se od nelegiranih alatnih čeliča sa $0,7 \cdots 0,85\%$ C. Za ukovnje sa složenjom gravurom i ukovnje za teške čelične otkivke upotrebljavaju se vatrootporni čelici legirani s kromom, niklom, manganom, molibdenom, vanadijem i volframom. Čelici s volfratom služe za toplinski teško opterećene gravure.

Ukovnji za toplo kovanje trebaju biti popušteni na tvrdoću $45 \cdots 50 \text{ HRC}$. Prije početka rada treba ih predgrijati na $250 \cdots 300^\circ\text{C}$, jer im se tako produžuje vijek trajanja.

Ukovanj postaje neupotrebljiv zbog sljedećih uzroka: lomovi ($\sim 33\%$), izlizana gravura ($\sim 37\%$), na gravuri se stvorи mreža pukotinica koje se preslikavaju na otkivak ($\sim 30\%$). Pukotinice su posljedica čestih i naglih temperaturnih promjena, ali nastaju i zbog zamora materijala. Na oštrim uglovima i prijelazima često nastaju fine tzv. utorne pukotinice, koje su vrlo opasne jer obično uzrokuju lom ukovnja. Jedan od oblika istrošenosti gravure jesu i brazde u smjeru tečenja metala.

Vijek trajanja ukovnja izražava se brojem otkivaka do glavnog remonta ukovnja. Vijek trajanja ovisi o nizu različitih faktora, a opada s veličinom i složenošću gravure, te s masom malja kovačkog bata, pa može iznositi od svega nekoliko stotina do više od 10000 otkivaka.

Kovački strojevi

Prema radnim karakteristikama i konstrukciji kovački se strojevi razvrstavaju u tri glavne grupe: batove, preše i horizontalne kovačke strojeve. Ti strojevi mogu biti konstruirani samo za slobodno kovanje ili za kovanje u kalupima.

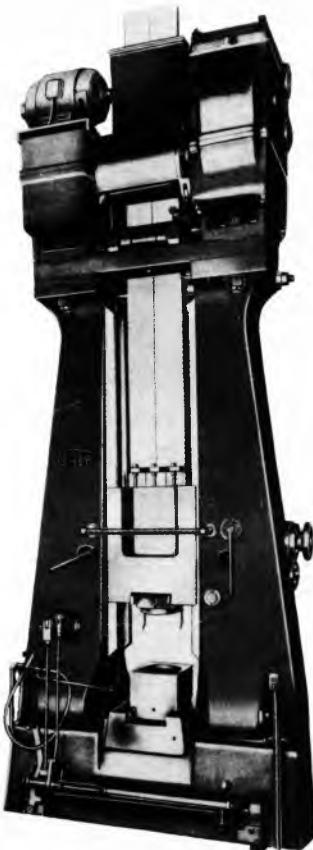
Batovi. U usporedbi s prešama, a pogotovo sporim hidrauličkim prešama, batovi imaju veću brzinu malja u trenutku sudara i nekoliko puta veću brzinu deformiranja otkivka. Pri obradbi batom oblikovani se metal zadržava u kalupu $10 \cdots 100$ puta kraće nego u prešama, što povoljno utječe na vijek trajanja gravure. S druge strane, snažni udarci malja po ukovnju smanjuju trajnost ukovnja, a trešnje nakon ukovnja, temelja i okoliša

zbog udaraca teških batova također djeluju nepovoljno. Prednost je batova što s nekoliko udaraca malja po sirovcu, prije ulaganja u gravuru, brzo skinu okujinu. Neke su konstrukcije batova jeftinije od preša istog učinka, ali su temelji, pogotovo težih batova, složeniji i skupljii.

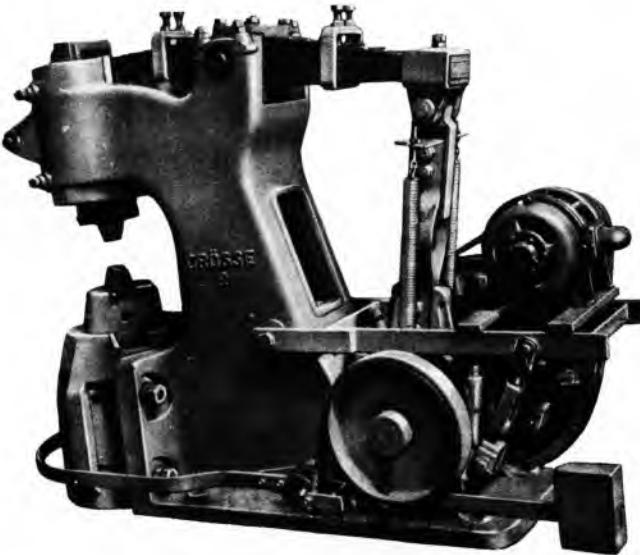
Prema vrsti pogona razlikuju se mehanički, pneumatski i parni batovi. Mehanički su polužni batovi i gravitacijski batovi s daskom, remenom ili lancem.

Sl. 59 prikazuje *polužni perni bat* koji ima radnu polugu sastavljenu od čeličnih lamela, a motka što povezuje polugu s ekscentrom također je od čeličnih traka pa djeluje kao opruga. Takvi batovi imaju bat mase $40 \cdots 250 \text{ kg}$ i rade sa $120 \cdots 300$ udaraca u minutu. Vrlo su prikladni za slobodno kovanje plitkih predmeta, kao što su tokarski i blanjački noževi, dlijeta, turpije i slični alati.

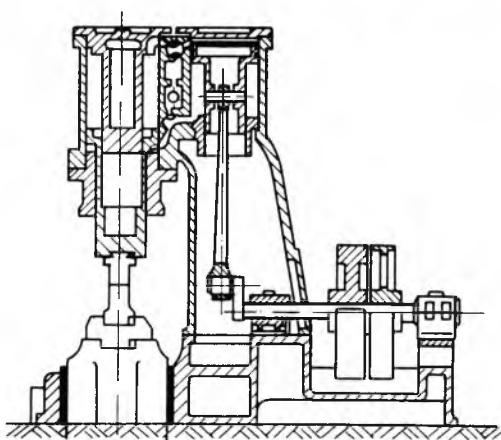
Gravitacijski bat s daskom (sl. 60) podiže drvenu dasku s maljem pomoću valjaka s ekscentričnim osovinama. Kad se valjci razmaknu, malj slobodno pada. Visina padanja, a time



Sl. 60. Gravitacijski bat s daskom



Sl. 59. Polužni perni bat

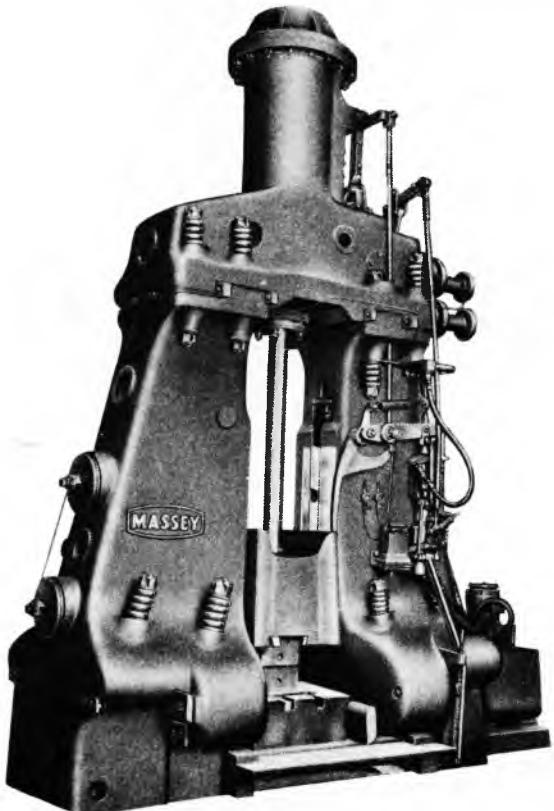


Sl. 61. Dvoradni zračni bat s kompresorom

i energija udarca, može se prema potrebi mijenjati. Masa malja takvih batova iznosi 40...1000 kg, a energija udarca do 16 kJ. Slične su izvedbe *batovi s remenom i s lancem* koji za rad u ukovnju imaju vodilice za točno vođenje malja.

Uobičajena konstrukcija *dvoradnog zračnog bata za slobodno kovanje* s prigađenim niskotlačnim kompresorom prikazana je na sl. 61. To su jednokonzolni batovi s masom malja 50...1000 kg, energijom udarca 0,63...25 kJ i visinama podizanja malja 250...900 mm. Dvoradni zračni ili parni bat za kovanje u ukovnjima radi pomoću komprimiranog zraka ili vodenе pare što se uvođe preko razvodnika čas s donje, čas s gornje strane klipa (sl. 62). Grade se u 13 veličina, s masom padajućih dijelova od 630...16 000 kg, energijom udarca 15,5...400 kJ i s visinom padanja 1000...1500 mm. Lakši su batovi tog tipa jednokonzolni i služe za slobodno kovanje.

Protuudarni bat (sl. 63) ima, umjesto teškoga nepomičnog nakovnja, pokretan protumalj do 10% teži od gornjeg malja. Oba se malja gibaju istodobno s istom brzinom, ali u suprotnom smjeru. Gornji i donji malj su međusobno povezani čeličnim trakama, a na velikim strojevima pomoću hidrauličkog sustava. Budući da nema teškog nakovnja, protuudarni bat je lakši i jeftiniji od ostalih tipova batova istog učina. Protuudarni batovi služe samo za kovanje u ukovnjima, obično samo s jednom gravurom. Imaju pogon komprimiranim zrakom ili vodenom parom, a obično se grade za energiju udarca od 80...1000 kJ. Najveći do sada izgrađeni protuudarni bat ima energiju udarca od 1500 kJ.



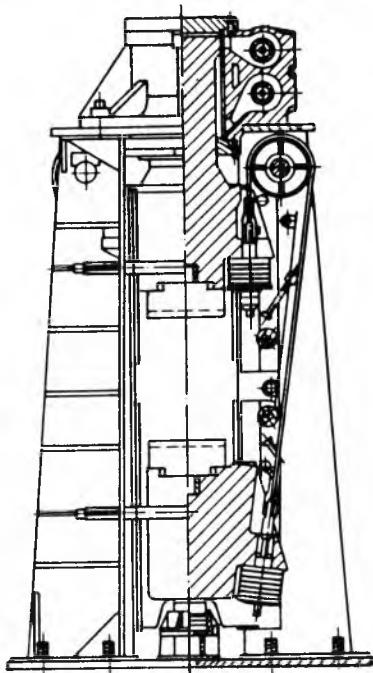
Sl. 62. Dvoradni bat na komprimirani zrak ili na paru

Stupanj korisnosti kovačkih batova. U tenetku sudara prenosi se na kovani predmet veći dio energije malja. Za batove s nepomičnim nakovnjem stupanj korisnosti može se odrediti pomoću izraza

$$\eta = \frac{m_2}{m_1 + m_2}, \quad (78)$$

gdje je m_1 masa malja, a m_2 masa nakovnja. Današnje konstrukcije batova imaju omjer $m_2/m_1 = 10\cdots20$, pa je prema tome stupanj korisnosti $\eta = 90\cdots95\%$. Izrazi li se stupanj korisnosti kao omjer između iskoristene radnje kovanja i energije koju

elektromotor uzima iz mreže, stvarni će ukupni stupanj korisnosti η_{tot} biti mnogo niži, i to toliko koliko je složenja konstrukcija bata. Stvarni ukupni stupanj korisnosti η_{tot} u praksi iznosi: za perne batove 35...45%, za batove na dasku i remen 50...60%, a za zračne batove s vlastitim kompresorom do 20%.



Sl. 63. Protuudarni bat

Potrošak zraka za pogon zračnih batova ovisi o tlaku i temperaturi zraka te veličini bata. Ako se zrak predgrije na 220...250 °C, potrošak iznosi približno samo 60% od potroška hladnog zraka.

Podaci o *proizvodnosti bata* prema energiji udara malja, uz pretpostavku da je masa otkivaka primjerena veličini stroja i da otkivci nisu veoma složenih oblika, prikazani su u tabl. 4.

Tablica 4
PROIZVODNOST KOVAČKOG BATA

Energija malja kJ	10	20	30	40	50	100
Proizvodnja otkivaka kg/h	70 do 160	120 do 270	150 do 330	170 do 370	200 do 400	250 do 500

Preše. Za oblikovanje metalra kovanjem upotrebljavaju se hidrauličke, vretenaste i koljenaste preše.

Hidrauličke preše (sl. 64) služe za slobodno kovanje većih i teških otkivaka, za kovanje u kalupima, za prešanje limenih otpresaka i za skidanje srha. Hidrauličke preše rade s relativno niskom i jednolikom brzinom gibanja pokretnih dijelova preše i alata, pa je rad miran. U usporedbi s batovima imaju nešto nižu produktivnost.

Preše za slobodno kovanje teških otkivaka grade se za sile do 50 MN, a one najveće i iznad 300 MN. Batovi nisu pogodni za kovanje u kalupima dubokih šupljih otkivaka čahurastog oblika, cijevnih razvodnika i slično kad se radi o dubokom utiskivanju, nego se za takve radove upotrebljavaju preše sa silom do 20 MN. Za skidanje srha s većih otkivaka i složenijeg oblika, kada ekscentarske preše više nisu dovoljne, služe hidrauličke preše sa silom od 4...15 MN.

Kovačke udarne preše ujedinjuju značajke hidrauličke preše i bata za kovanje u ukovnjima, pa su zato u prvom redu prikladne za kovanje dugačkih otkivaka s prirubnicom ili s glavom. Naime, hidraulička preša može u kratko vrijeme pre-

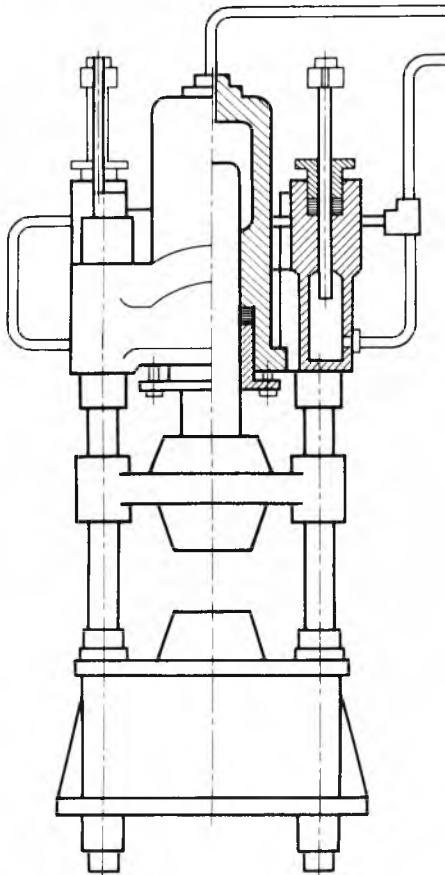
dati veliku energiju preoblikovanja, ali je njezina tlačna sila na kraju oblikovanja ograničena, dok bat postiže već s relativno malom energijom udarca velike završne sile, već prema duljini puta deformacije. Kovačka udarna preša omogućuje da se s istim strojem tlači i udara, pa je proizvodnja rentabilna i kad je otkivaka malo. Takav tip preše općenito služi za kovanje u zatvorenim kalupima te za toplo isprešavanje složenih oblika u kombinaciji s preoblikovanjem pomoću udaraca. Budući da preša udara poput bata, ona treba da ima relativno tešku konstrukciju. Velika krutost stalka preše povisuje točnost otkivaka. Za višefazne se operacije ugrađuje u prešu više alata, od kojih su neki smješteni izvan središta preše. Zato se udarna preša dimenzionira i za ekscentrična opterećenja.

1,3...150 kJ. Podaci o proizvodnosti tarne preše prema tlačnoj sili preše i masi otkivka prikazani su u tabl. 5.

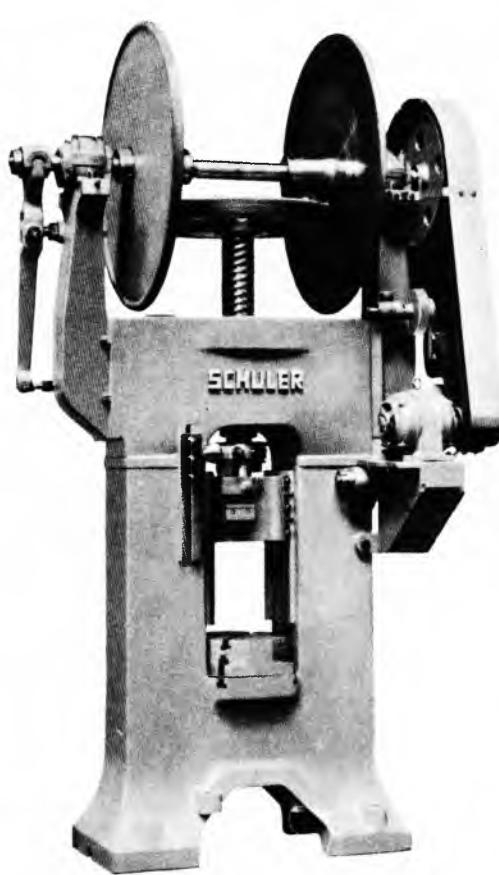
U vretenaste preše još spadaju *Vincentova preša* s vertikalno nepokretnim vretenom i uvihek istom brzinom gibanja malja, te *udarna vretenasta preša* (sl. 66), koja ima relativno male gubitke trenja.

UKupni stupanj korisnosti vretenastih preša ovisi o njihovoj konstrukciji i o postupku preoblikovanja, te za isti postupak iznosi ~20% za preše sa tri tarna diska, 15...18% za Vincentovu prešu, a 40...50% za udarnu vretenastu prešu.

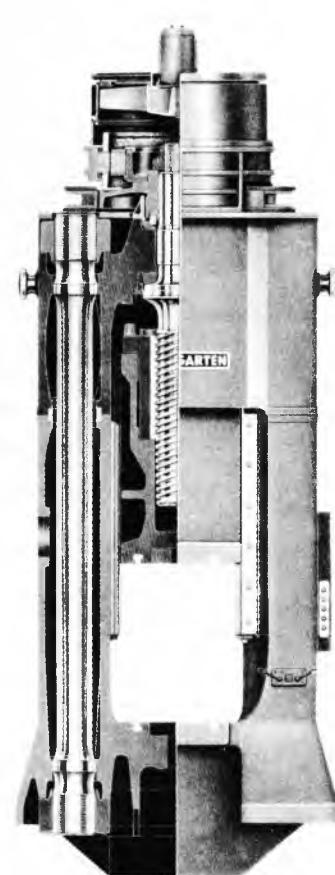
Koljenaste preše (sl. 67) sve više služe, umjesto bata, za proizvodnju složenijih otkivaka. Gibanje se prenosi od elektromotora preko reduktora i spojke na koljenastu osovnu. Po-



Sl. 64. Hidraulička preša s glavnim i s dva mala povratna cilindra



Sl. 65. Vretenasta tarna preša s tri tarna diska



Sl. 66. Udarna vretenasta preša s vertikalnim nepokretnim vretenom

Vretenaste preše služe u prvom redu za proizvodnju raznovrsnih svornjaka, zakovica, vretenastih tijela, zupčanika itd. Takvi se predmeti izrađuju sabijanjem šipkastih odrezaka vertikalno postavljenih u zatvorenim kalupima bez kanala za srh, često s ugrađenim izbacivačima otkivka iz kalupa. Služe i za kovanje relativno plitkih otpresaka u otvorenim dvodijelnim kalupima kada se oblikovanje može završiti u samo jednom hodu preše.

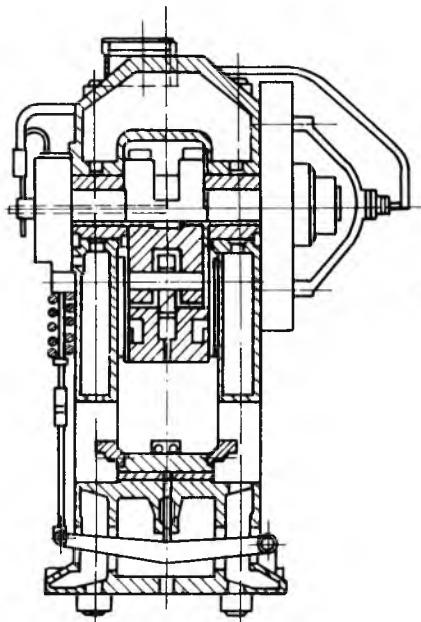
Jednostavna vretenasta tarna preša (sl. 65) ima jedan horizontalni i dva koaksijalna vertikalna tarna diska. Horizontalni je disk učvršćen na vrhu višenavojnog vertikalnog vretena koje se zajedno s maljem pokreće gore-dolje. Elektromotor pogoni vertikalne tarne diskove uvihek u istom smjeru vrtnje. Horizontalni tari disk u dodiru je samo s jednim od dva vertikalna diska. Zbog međusobnog trenja prenosi se vrtanja vertikalnog diska na horizontalni disk, a smjer vrtanje horizontalnog diska ovisi o tome s kojim je od dva vertikalna diska u dodiru. Prebacivanjem dodira s jednog na drugi vertikalni disk mijenja se smjer vrtanje horizontalnog diska, a time i smjer gibanja vretena s maljem. Brzina malja mijenja se s položajem po visini i najveća je u trenutku sudara. Vretenaste tarne preše grade se za tlačne sile od 0,4...15 MN, s energijama udaraca

Tablica 5
PROIZVODNOST TARNE PREŠE

Tlačna sila preše kN	1000	2000	3000	5000	10 000
Masa otkivaka kg	0,3...0,6	0,8...1,5	2...3	3...5	6...8
Proizvodnja otkivaka kg/h	60...70	120...150	300...400	500	800

sebna konstrukcija tarne lamelne spojke štiti prešu od preopterećenja. Preše tog tipa imaju tlačnu silu 6,3...80 MN, hod malja 200...500 mm sa 90...35 udaraca malja u minuti.

Posebne su izvedbe *koljenaste polužne preše* s koljenastim polužnim mehanizmom koji pretvara kružno gibanje vratila u pravocrtno gibanje malja (sl. 68). Te su preše prikladne za kovanje čahurastih otkivaka, pogotovo od lakih i obojenih metala.



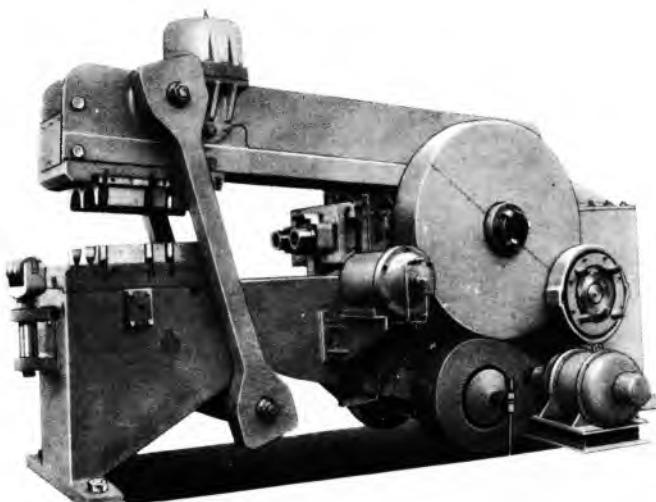
Sl. 67. Koljenasta preša za kovanje u ukovnjima

Horizontalni kovački strojevi (sl. 69) služe za proizvodnju sitnih dijelova u motornoj industriji (svornjaci, motke i poluge, cijevne spojnice, ventili i sl.). Polazni je oblik sirovca šipkasti odrezak ili šipka koja se preoblikuje postepeno u više gravura urezanih u dvodijelnom kalupu. Svi žigovi za ta postepena preoblikovanja upeti su u horizontalno pokretnom nosaču što ga pokreće glavna koljenasta osovina. Poseban mehanizam (sl. 70), povezan s gibanjem žigova, zatvara i otvara kalup, i to tako da se za vrijeme dok se žigovi vraćaju kalup otvara, a otpresak ručno premjesti u susjednu gravuru, odnosno na kraju se procesa izvadi iz kalupa. Strojevi imaju silu sabijanja do 30 MN, a hod žigova 80–380 mm.

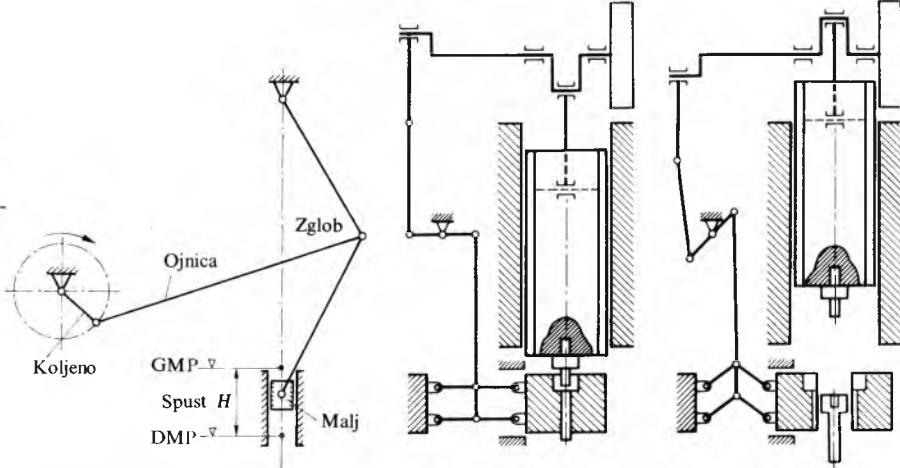
Pomoći predoperacijski strojevi jesu kovačka valjalica i kovačka sabijalica.

Kovačka valjalica (sl. 71) za uzdužno profiliranje okrugle šipke ima dva valjka u kojima su urezane gravure. Uzdužnim profiliranjem dobiva se sirovac potrebnog oblika za ulaganje u ukovanje. Zbog skupe izrade graviranih valjaka taj se postupak isplati samo za izradbu velike količine jednakih otkivaka.

Kovačke sabijalice, savijalice i ravnalice služe za prethodno sabijanje i zadebljavanje krajeva šipki, za savijanje šipki, za ubadanje i proširivanje cijevnog adreska i sl. To su jednostavniji horizontalni strojevi koji na jednoj strani stola imaju pritegnut nosač (poduporu) šipke, škripac ili polovicu kalupa, a s druge su

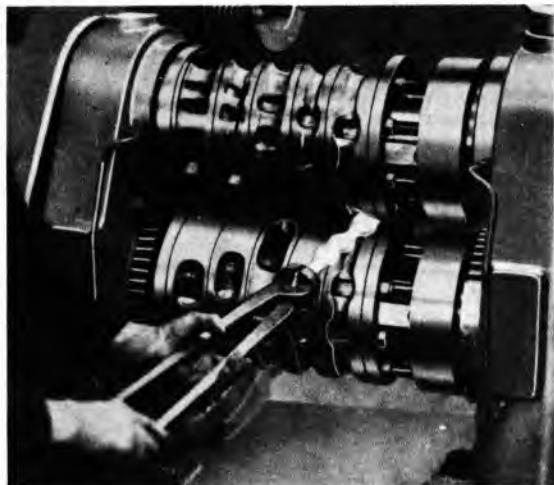


Sl. 69. Horizontalni kovački stroj



Sl. 68. Polužni mehanizam koljenaste polužne preše

Sl. 70. Mehanizam za zatvaranje i otvaranje kalupa



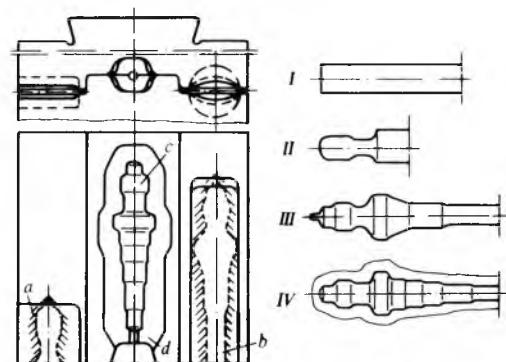
Sl. 71. Kovačka valjalica za uzdužno profiliranje šipki

strane držać sa žigom, tiskač ili druga polovica kalupa, pokretani koljenastom osovinom. Grade se obično za tlačne sile 0,2–3 MN.

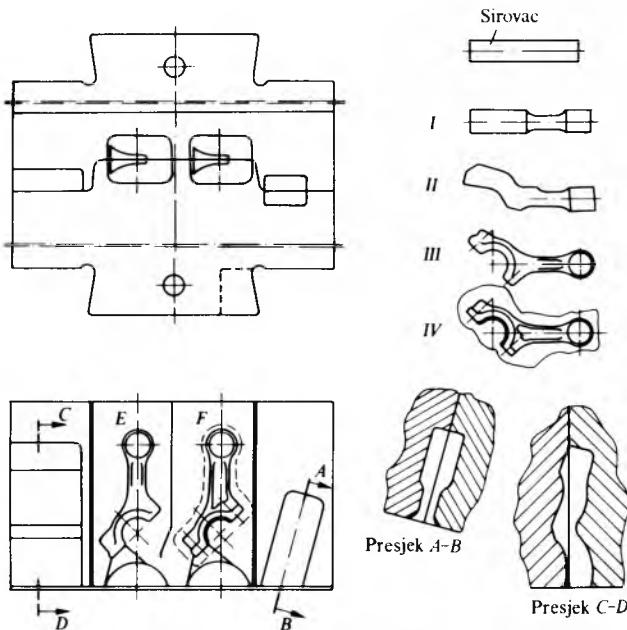
Primjeri kovanja u ukovnjima. Sirovci za jednostavnije otkivke oblikuju se bez prethodnih operacija neposredno u kalupu. Za složenije oblike otkivaka redovito je potrebno i po nekoliko predoperacija, od kojih se početne ponekad obavljaju slobodnim kovanjem izvan kalupa, a samo završne u kalupu. Predoperacije, kao što su sabijanje, savijanje, lokalno zadebljavanje ili produljivanje, izvode se često u istom kalupu uz glavnu završnu gravuru, što povećava dimenzije kalupa.

U primjeru prikazanom na sl. 72 polazi se od sirovca u obliku okruglog adreska I koji se najprije oblikuje u gravuri a na oblik II, zatim u gravuri b na oblik III i tek u gravuri c poprima završni oblik IV. Srh oko otkivka skida se na posebnom stroju (preši).

Redoslijed oblikovanja ojnice pomoći bata prikazuje sl. 73. Sirovac se obradi prvo u gravuri AB na oblik I, zatim u gravuri CD na oblik II,



Sl. 72. Postepeno oblikovanje sirovca u tri operacije

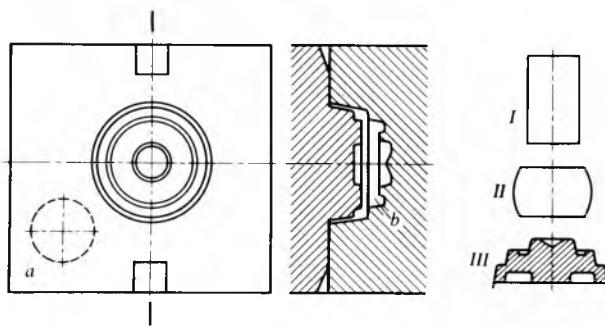


Sl. 73. Redoslijed oblikovanja ojnice

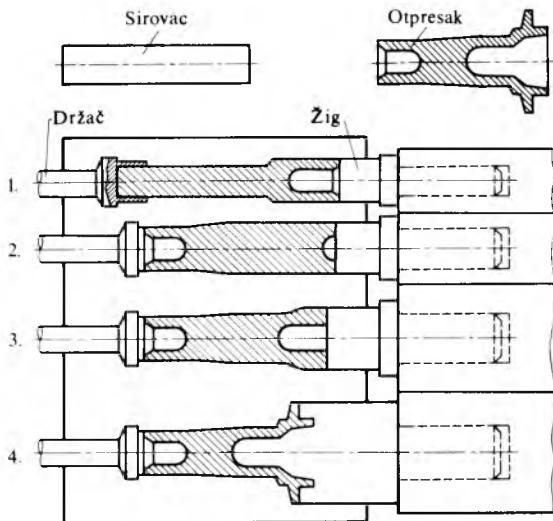
zatim na predzavršni oblik u gravuri E i konačno na završni oblik IV sa srhom u gravuri F.

Izradba rotacijskog tijela kovanjem pomoću bata u zatvorenom kalupu prikazuje sl. 74. Sirovac I najprije se na mjestu a sabija u oblik II i pri tom se oslobljava okujine. U gravuri b poprima završni oblik III s tankim porubom.

Kovanje otpreska na horizontalnom kovačkom stroju prikazuje sl. 75. Preoblikovanje se sastoji od četiriju operacija u dvodijelnom kalupu. Svi potrebiti žigovi za preoblikovanje upeti su u lijevo-desno pokretnom nosaču. Dok se žigovi vraćaju, kalup se automatski otvara, a otpresak prebacuje u sljedeću gravuru.



Sl. 74. Kovanje u zatvorenom ukovnju

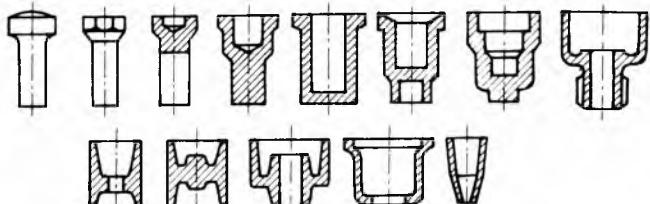


Sl. 75. Kovanje u četiri operacije na horizontalnom kovačkom stroju

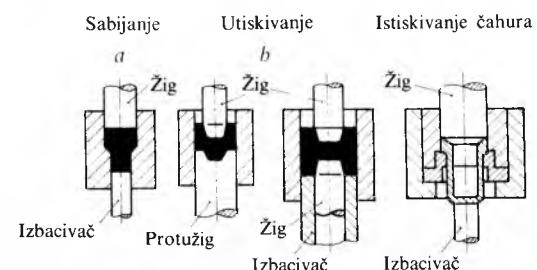
HLADNO OBLIKOVANJE SABIJANJEM, UTISKIVANJEM I ISTISKIVANJEM

Sitna metalna roba masovne potrošnje, kao što su različiti svornjaci, vijci s glavicama, matice, tube, tijela svjećica za motore, dijelovi različitih aparata i instrumenata, metalni novac, medalje i sl., proizvodi se različitim postupcima hladnog oblikovanja. Glavni su među tim postupcima: *hladno sabijanje i istiskivanje, duboko utiskivanje, površinsko valjanje, utiskivanje nivoja i ozubljenja, pečatanje*. Svi ti postupci zahtijevaju relativno velike tlakove, što utječe na vrijek trajanja alata i cijenu proizvoda. Značajka je tih postupaka da se veoma povećava čvrstoća i tvrdoća deformiranog metala.

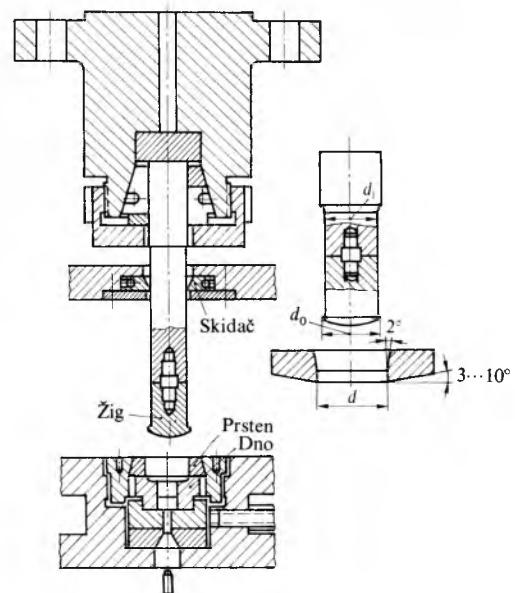
Hladno sabijanje i istiskivanje. Najčešći oblici predmeta izrađenih tim postupkom prikazani su na sl. 76. Neki su proizvodi ili potpuno puni predmeti ili s plitkim utisnućem, drugi su pretežno šupljii, čahurastog i zdjeličastog oblika. Prema obliku proizvoda odabire se i početni oblik sirovca: štapičasti odresci, limene rondele, zdjelice za čahure i šuplje otpreske. Svi sirovci moraju imati bespriječno glatkou plohu bez srhova i tragova rezanja. Sl. 77 prikazuje sheme alata za nekoliko oblika otpresaka. U jednih je metal sa svih strana zatvoren u kalupu, a u drugih metala može slobodno otjecati prema gore jer je kalup poluotvoren.



Sl. 76. Predmeti proizvedeni hladnim oblikovanjem

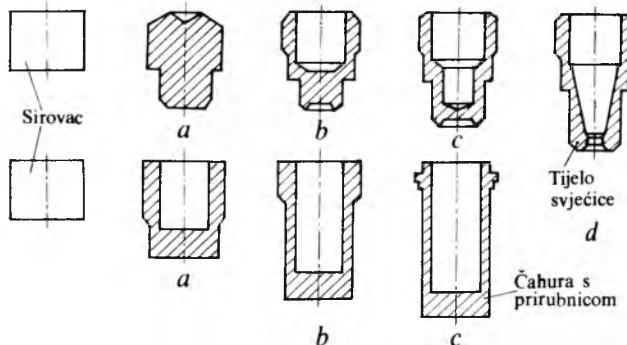


Sl. 77. Alati za sabijanje, utiskivanje i istiskivanje. a zatvoreni, b otvoreni kalup



Sl. 78. Alat za ekstruziju aluminijskih tuba

Ekstruzija aluminijskih tuba obavlja se pomoću alata prikazanog na sl. 78. Proces počinje od rondele tvrdoće 20...22 HB, koja se u rotirajućem bubnju oslobodi od oštrog srha i istodobno premaže cinkovim stearatom. Tube se izrađuju prema standardu u 28 veličina, s debljinama stijenki plašta od 0,09...0,18 mm. Za Al 99,5 potreban tlak na čelu žiga iznosi 80...110 kN/cm². Čelične se tube izrađuju samo od mehaničkih vrsta čelika, s debljinom stijenke plašta koja nije manja od 1 mm. Potreban je tlak od 200...250 kN/cm². Tijelo svjećice za motore i čahure s prirubnicom proizvode se višefaznim procesom (sl. 79), polazeći od sirovca valjkastog oblika.



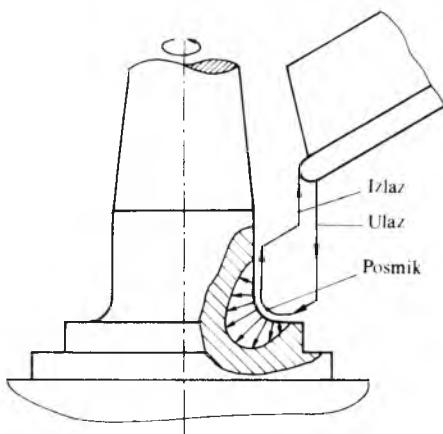
Sl. 79. Višefazna izradba tijela svjećice i čahure s prirubnicom

Visokoopterećeni tlačni žigovi i matrice za tube izrađuju se od kromnog čelika (sa 12% Cr), koji izdrži do 50 000 otpresaka. Radna površina žiga ima tvrdoću 60...62 HRc.

Duboko utiskivanje jest postupak izradbe kalupnih šupljinica za preradbu polimernih masa, alata za tlačni lijev, a dijelom i pri izradbi gravura u kovačkim ukovnjima. Sastoje se od utiskivanja žiga u blok relativno mekšeg materijala.

Značajka je tog postupka visok tlak uz vrlo malu brzinu utiskivanja od samo 1...10 mm/min, što se postiže posebno konstruiranim vertikalnim hidrauličkim prešama tlačne sile od 1,6...25 MN. Za materijal matrice uzimaju se legirani čelici koji u omekšanom stanju imaju tvrdoću 100...130 HB. Tlak utiskivanja u te materijale iznosi 150...250 kN/cm². Žigovi su izrađeni od legiranih čelika koji u tvrdom stanju od 61 HRc podnose tlakove do 300 kN/cm².

Površinsko valjanje poboljšava glatkoću površine, ujednačuje odstupanja od propisanih dimenzija te povećava tvrdoću i čvrstoću površinskog sloja. Površinske hrapavosti od 40 µm smanjuju se površinskim valjanjem na samo nekoliko µm. Taj je postupak brz i pogodan za masovnu proizvodnju.

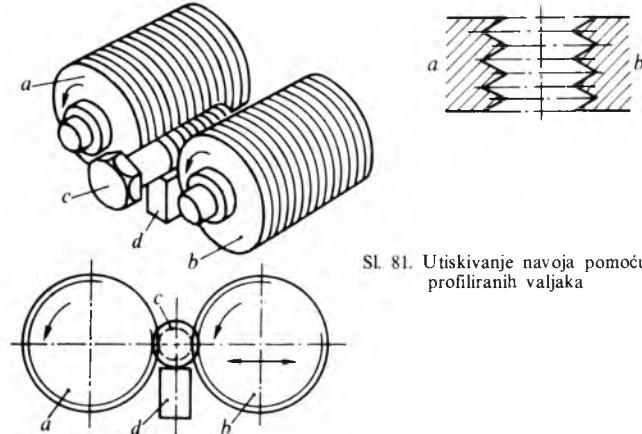


Sl. 80. Obrada površine struka ventila površinskim valjanjem

Sl. 80 prikazuje površinsko valjanje struka ventila da bi se njegova površina zagladila, otvorila i povećala otpornost protiv zamora. Slično se obraduju različiti prijelazi i zaobljenja na koljenastim osovinama.

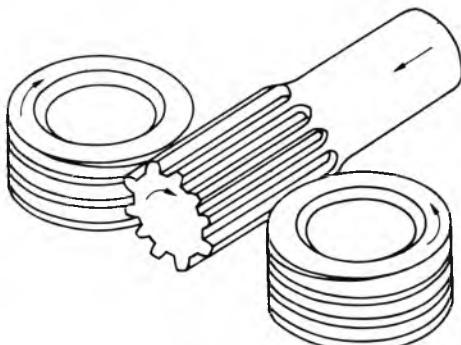
Utiskivanje navoja i ozubljenja. Navoj na vijke ili svornjaku može se izraditi jedinjenjem postupkom utiskivanja pomoću kalibriranog alata nego skidanjem strugotine (narezivanjem) na strugu. Postoje dva postupka utiskivanja navoja. Jedan je utiskivanje profila navoja pomoću ravnih profiliranih čeljusti, a drugi pomoću profiliranih valjaka.

Sl. 81 prikazuje izradbu navoja na vijke uloženom između dva kalibrirana valjka. Valjci su istog smjera vrtnje, jedan je na fiksnoj osovini, a drugi se može bočno translatoryno pomjerati i time podešavati radni tlak, obično pomoću hidrauličkog uređaja. Postoji i konstrukcija sa tri kalibrirana valjka kojima rotaciju daje obradivani vijak. Svi su ti postupci veoma produktivni i daju vrlo točne profile.



Sl. 81. Utiskivanje navoja pomoću profiliranih valjaka

Za izradbu ozubljenog dijela osovine utiskivanjem služe dva valjka s kalibriranim urezima određenog modula (sl. 82). Po stepenim primicanjem kalibrirani urezi sve dublje ulaze u osovinu i oblikuju evolventno ozubljenje. Zbog istisnutog materijala vanjski se promjer osovine poveća za ~2 modula. Tim se postupkom povećava čvrstoća površine osovine i postiže vrlo glatka površina zubača.



Sl. 82. Utiskivanje ozubljenja

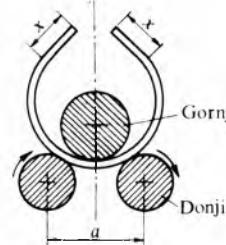
Pečatanje služi u proizvodnji metalnog novca, medalja, znački i sl. Pečat s ugraviranim oznakama utiskuje se relativno plitko u prethodno obrezanu rondelu ili platinu.

SAVIJANJE

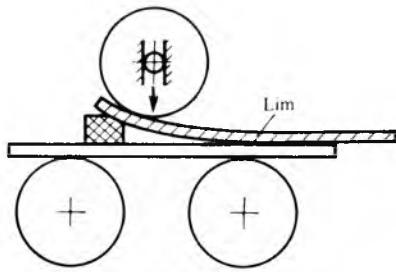
Postupci savijanja služe u proizvodnji različite limene robe, počevši od mnogobrojnih sitnih predmeta od tankog lima pa do plastičnih teških kotlova, bojlera, spremnika itd. Pretežno se savija u hladnom stanju, a jedino se debele ploče, teški profili i cijevi savijaju na toplo. Za vrijeme savijanja materijal je napregnut elastično-plastično, pa se, kad prestanu djelovati vanjske sile, savijeni komad, zbog elastičnosti, malo povrati i otvari. Razlikuju se dva načina savijanja: kružno savijanje i oštvo ili profilno kutno savijanje.

Kružno savijanje. Tim se postupkom savijaju limovi, trake, cijevi i profili za gradnju kotlova, cisterni, kuhalja i sl. Za savijanje se upotrebljavaju *savjalice*, strojevi koji imaju obično

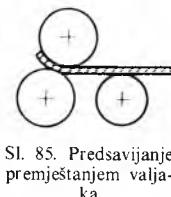
tri, a rjeđe četiri valjka. U stroju sa tri valjka dva su donja valjka gonjena, a nešto veći, gornji valjak nema pogona, ali se može vertikalno pomicati (sl. 83). Savijanje na završni promjer izvodi se postepeno, u više prolaza kroz valjke, a nakon svakog prolaza gornji se valjak malo spusti. Pri tom krajevi lima ostaju nesavijeni i ravni na nekoj duljini koja je približno jednaka polovici razmaka a donjih valjaka. Zato treba krajeve lima prije puštanja kroz valjke predsaviti (sl. 84). Postoje i tipovi savijalica koje mogu predsaviti krajeve lima pomicanjem donjih valjaka (sl. 85).



Sl. 83. Savijanje na savijalici sa tri valjka



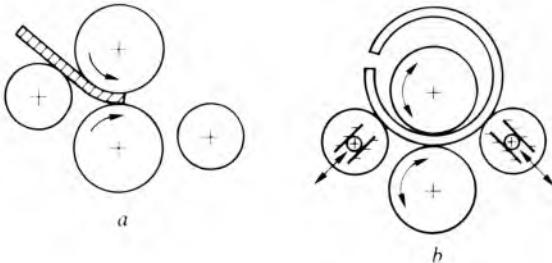
Sl. 84. Predsavijanje krajeva lima



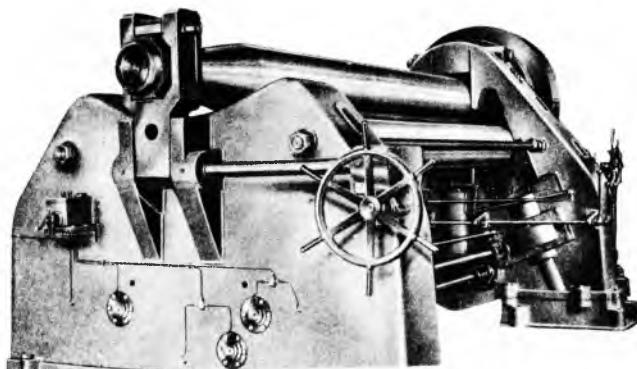
Sl. 85. Predsavijanje premeštanjem valjaka

Savijalice sa četiri valjka imaju pogonjen samo gornji veći valjak, a manji se valjci mogu premještati u smjeru strelica na sl. 86b. Na takvu se stroju krajevi lima predsavijaju prema sl. 86a.

Gonjeni valjci svih tipova savijalica imaju promjenljiv smjer vrtnje. Prednji ležaj gornjeg valjka tako je konstruiran da se može oslobođiti i zakrenuti kad se iz stroja vadi savijeni lim (sl. 87).



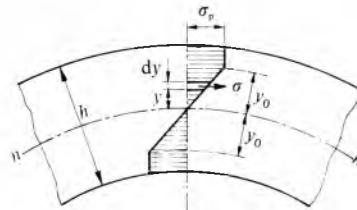
Sl. 86. Savijalica sa četiri valjka. a) predsavijanje. b) savijanje



Sl. 87. Savijalica limova sa tri valjka i napravom za oslobođanje prednjeg ležaja gornjeg valjka

Na savijalicama se mogu limovi i trake savijati i u oblik koničnih plašteva.

Sile i momenti savijanja. Materijal savijene trake debljine h i širine b napregnut je elastično do neke udaljenosti y_0 od neutralne linije, a plastično od y_0 do vanjskih slojeva (sl. 88).



Sl. 88. Naprezanje na savijanje po visini

Iz uvjeta ravnoteže momenata vanjskih i unutrašnjih sila slijedi da je ukupni moment savijanja

$$M_{\text{tot}} = 2b \int_0^{y_0} \sigma y \, dy + \int_{y_0}^{h/2} \sigma_p y \, dy, \quad (79)$$

gdje je σ elastično, a σ_p plastično naprezanje. Budući da je $\sigma = \sigma_p(y/y_0)$, slijedi da je

$$M_{\text{tot}} = \frac{b\sigma_p}{12} [3h^2 - 4y_0^2]. \quad (80)$$

Kad se radi o potpuno plastičnom savijanju, već je u neutralnoj osi $\sigma = \sigma_p$, i $y_0 = 0$, te je

$$M_{\text{tot}} = \frac{bh^2}{4} \sigma_p. \quad (81)$$

Iz (80) proizlazi da je visina

$$y_0^2 = \frac{3}{4} h^2 - \frac{3M_{\text{tot}}}{b\sigma_p}. \quad (82)$$

Za gredu duljine l opterećenu u sredini silom F moment savijanja u udaljenosti x od sredine iznosi

$$M_x = \frac{F}{2} \left(\frac{l}{2} - x \right), \quad (83)$$

što uvršteno u jednadžbu (82) daje

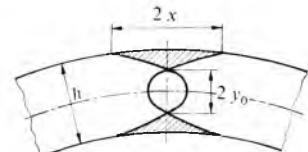
$$y_0^2 = \frac{3}{4} h^2 - \frac{3}{4} \cdot \frac{Fl}{b\sigma_p} + \frac{3}{2} \cdot \frac{Fx}{b\sigma_p}. \quad (84)$$

To je jednadžba dviju parabola. U sredini grede, tj. za $x = 0$, dobiva se

$$y_0 = \pm \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{h^2 - \frac{Fl}{b\sigma_p}}. \quad (85)$$

Za $y_0 = 0,5h$ plastično deformirana zona ima najveću širinu $2x$ (sl. 89), gdje je prema jednadžbi (84)

$$x = \frac{l}{2} - \frac{b\sigma_p}{3F} h^2. \quad (86)$$



Sl. 89. Područje plastične deformacije (iscrtano)

Označe li se sa F_d sila na donjem, a sa F_g sila na gornjem valjku (sl. 90), tada je

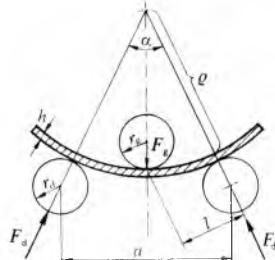
$$M_{\text{tot}} = F_d l = \frac{b\sigma_p}{12} (3h^2 - 4y_0^2), \quad (87)$$

a iz tog izraza, prema sl. 90, slijedi da je

$$F_d = \frac{bh^2}{2a} \sigma_p \left(1 + \frac{r_d}{\varrho} \right), \quad (88)$$

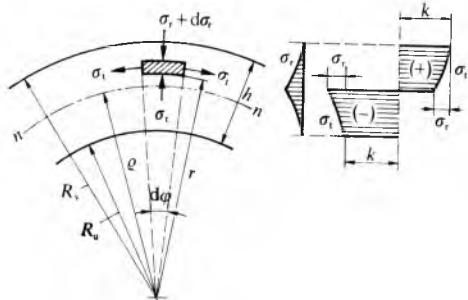
$$F_g = 2F_d \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (89)$$

gdje je r_d polumjer donjeg valjka, a ϱ polumjer zakrivljenosti luka savijanja.



Sl. 90. Sile i momenti savijanja

Kutno savijanje primjenjuje se u proizvodnji sitnih limenih odrezaka i profiliranih traka, pri čemu je, za razliku od kružnog savijanja, omjer polumjera zakrivljenosti savijanja ϱ i debljine trake h vrlo malen, katkada samo 1. Zbog toga se materijal po čitavom poprečnom presjeku deformira samo plastično, a osim toga nastaje promjena poprečnog presjeka i debljine stijenke h , a neutralna linija se premješta. Velike plastične deformacije veoma očvršćuju materijal.



Sl. 91. Razdioba radijalnog σ_r i tangencijalnog σ_t naprezanja pri kutnom savijanju

Iz uvjeta ravnoteže sile što djeluju na element izrezan iz unutrašnjosti vlačne zone (sl. 91) dobiva se izraz za radijalno naprezanje u vlačnoj zoni

$$\sigma_r = k \ln \frac{R_v}{\varrho}, \quad (90a)$$

i u tlačnoj zoni

$$\sigma_r = k \ln \frac{\varrho}{R_u}. \quad (90b)$$

Za neutralnu liniju vrijedi

$$k \ln \frac{R_v}{\varrho} = k \ln \frac{\varrho}{R_u}, \quad (91)$$

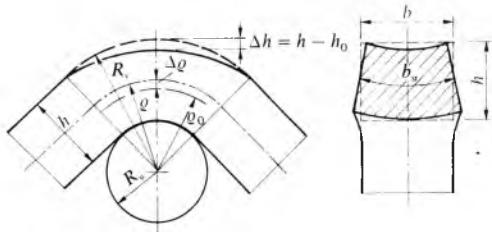
ili

$$\varrho = \sqrt{R_u R_v}. \quad (92)$$

Što je, dakle, veća razlika $R_v - R_u = h$, to se više neutralna linija približava unutrašnjoj periferiji polumjera R_u .

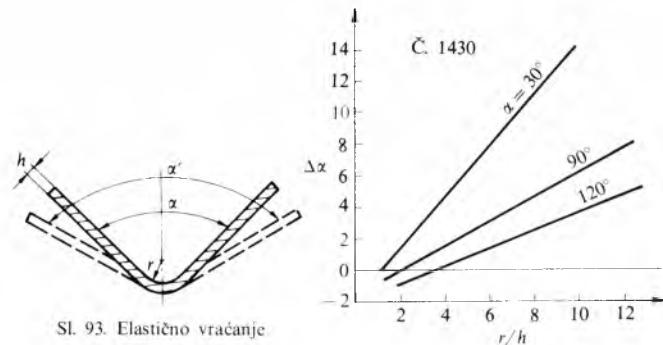
Tangencijalno naprezanje σ_t određuje se iz $\sigma_t = k - \sigma_r$ za vlačnu zonu i $\sigma_t = k + \sigma_r$ za tlačnu zonu (sl. 91). Zbog radijalnih naprezanja σ_r i tangencijalnih naprezanja σ_t mijenja se prvočitni pravokutni presjek $h \cdot b$ u trapezoidni oblik (sl. 92), što se primjećuje ako je širina $b \leq h$. Visina h ostaje praktički nepromjenjena već za $R_u/h \geq 5$. Visina h najviše se smanjuje, a promjene položaja neutralne linije i njena polumjer zakrivlje-

nosti najveće su u sredini deformacijske zone. Pri savijanju okruglih šipki promjera d na unutrašnji promjer $R_u \geq 1,5d$ ne nastaje promjena presjeka.



Sl. 92. Deformacija poprečnog presjeka pri kutnom savijanju

Elastično vraćanje očituje se u promjeni kuta α nakon što se predmet izvadi iz alata (sl. 93). Elastično je vraćanje to veće što je šire područje elastično deformiranog presjeka $2y_0$. Kut vraćanja $\Delta\alpha = \alpha' - \alpha$ ovisi o omjeru polumjera zakrivljenosti r i debljini trake h , o elastičnim svojstvima materijala te o veličini deformacije (sl. 94).



Sl. 93. Elastično vraćanje

Sl. 94. Ovisnost kuta vraćanja $\Delta\alpha$ o omjeru polumjera zakrivljenosti r i debljine trake h , te o kutu savijanja α za čelik C.1430

Pri kružnom savijanju limova u cilindrične plašteve očituje se elastično vraćanje kao promjena polumjera zakrivljenosti kad se plašta izvadi iz stroja. Za tu promjenu daje A. Geleji izraz

$$\varrho_2 = \varrho_1 \left| 1 + \frac{2h_1^3}{3h} \cdot \frac{1}{h^2 - h_1^2} \right|, \quad (93)$$

gdje je $h_1 = 2y_0$ širina elastične deformacijske zone, h debljina lima, ϱ_1 polumjer plašta u savijalici, ϱ_2 polumjer plašta nakon što se izvadi iz stroja. Širina elastične deformacijske zone h_1 izračunava se iz izraza

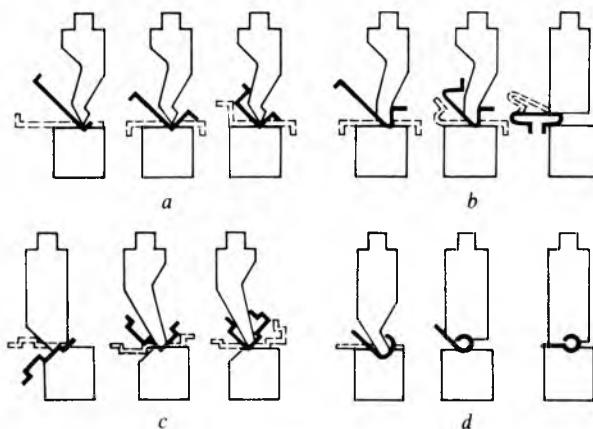
$$h_1 = \frac{2\varrho_1}{E} \sigma_p, \quad (94)$$

gdje je E modul elastičnosti materijala plašta.

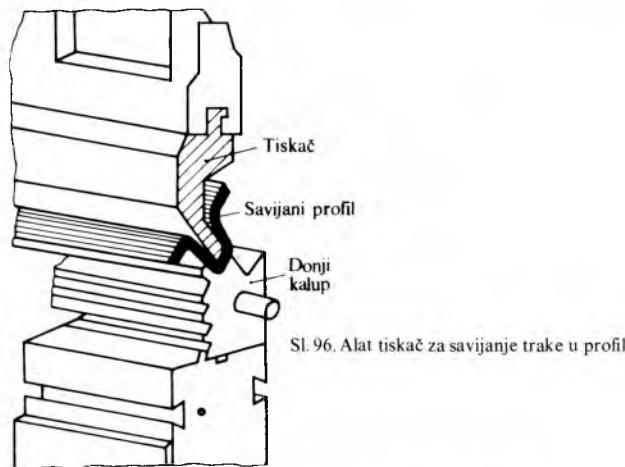
Profilno savijanje traka. Tim se postupcima limene trake debljine $h \geq 2$ mm i duljine do 5 m postepeno oblikuju u profile koji služe u građevnoj, bravariji, strojogradnji i brodogradnji.

Razlikuju se dva postupka profilnog savijanja traka. Prvi je *postepeno oštro presavijanje* trake na koljenastoj ili hidrauličkoj preši (sl. 95). Preša vertikalno potiskuje ploču na kojoj je učvršćen alat tiskač (sl. 96). Takve se preše grade za sile do 6 MN i duljine profila do 6 m.

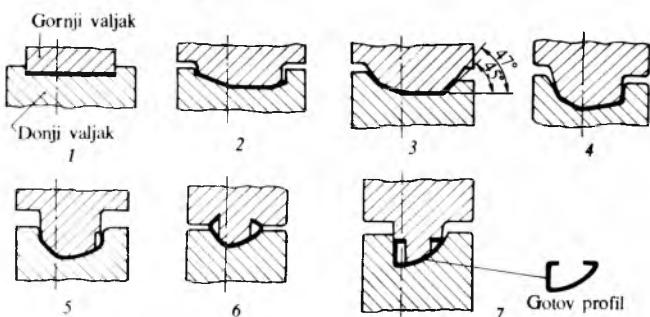
Dругi je postupak *kontinuirano oblikovanje* trake na valjalici s više parova valjaka poredanih u seriju i međusobno povezanih prijenosnim zupčanicima ili lancima. Svaki par valjaka obavlja određenu operaciju presavijanja koja mora teći vrlo postepeno (sl. 97). Par valjaka sastavljen je od osnovnog dijela i izmjenljivih perifernih prstena s urezanim kalibrima za različite profile. Ponekad su između pojedinih parova valjaka montirani posebni valjci-vodilice koji uvide traku u sljedeći kalibar.



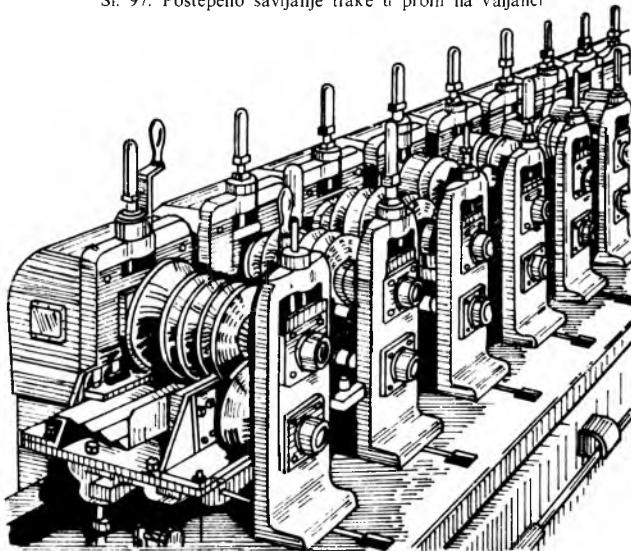
Sl. 95. Primjeri postepenog oštrenja i presavijanja trake u profil



Sl. 96. Alat tiskač za savijanje trake u profil



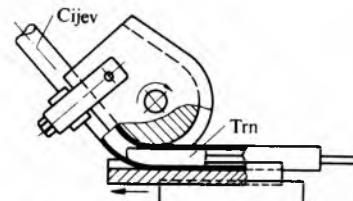
Sl. 97. Postepeno savijanje trake u profil na valjalici



Sl. 98. Valjalica za kontinuirano savijanje trake u profil

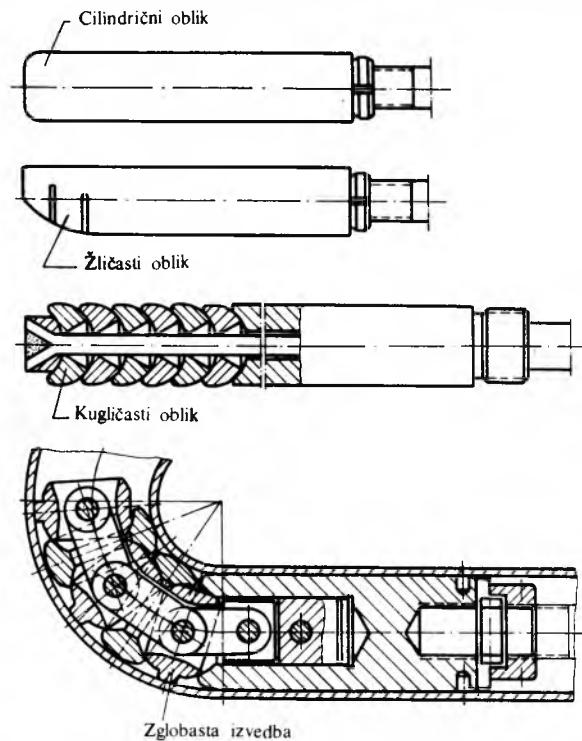
Strojevi mogu imati do 15 pari valjaka (sl. 98), a brzina prolaza trake kroz valjke iznosi $0,2\cdots0,4 \text{ m/s}$.

Savijanje cijevi. Cijevi se savijaju pomoću jednog od sljedeća tri postupka: primjenom momenta savijanja bez upotrebe poprečne sile, istodobnom primjenom momenta savijanja i poprečne sile, primjenom momenta poprečne sile uz superponiranje nekog dodatnog naprezanja na vlastiti tlak, torziju ili kombiniranog naprezanja. Cijevi većeg promjera savijaju se u toplom stanju uz zagrijavanje dijela cijevi na mjestu savijanja. Savijanje cijevi u hladnom stanju obavlja se prema nekoj šabloni uz upotrebu trna s unutrašnje strane, ili samo prema šabloni bez upotrebe trna.



Sl. 99. Naprava za kružno savijanje cijevi

Pri hladnom savijanju pomoću šablone i trna slobodni ravni dio cijevi pritegne se u kalupu s profilom žlijeba koji odgovara polukružnom presjeku cijevi (sl. 99). Zbog trenja između trna i cijevi nastaje dodatno vlačno opterećenje koje ovisi o koeficijentu trenja te o pritisku vođice na cijev s vanjske strane. Oblik i smještaj trna u cijevi utječe na veličinu potrebnog momenta savijanja te na pravilnost poprečnog presjeka cijevi.



Sl. 100. Oblici trnova za savijanje cijevi

Prema obliku trn može biti cilindričan, žličast, kugličast i zglobovasti (sl. 100). Trn se mora upotrijebiti kad se savija cijev s tankom stijenkama omjera $s/d_0 \leq 0,06$ na mali polumjer zakrivljenosti, jer tada lako nastanu nabori i uleknuća cijevne stijenke te velike neokruglosti presjeka cijevi. Cijevi s omjerom $s/d_0 > 0,06$ mogu se uspješno savijati i bez upotrebe trna. Čelične cijevi mogu se savijati bez trna ako je zadovoljen uvjet

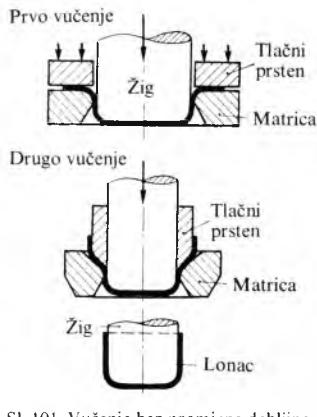
$$\frac{r_s}{d_0} \geq 9,25 \sqrt{0,2 - \frac{s}{d_0}}, \quad (95)$$

gdje je r_s srednji polumjer savijanja, d_0 vanjski promjer cijevi, a s debljina cijevne stijenke.

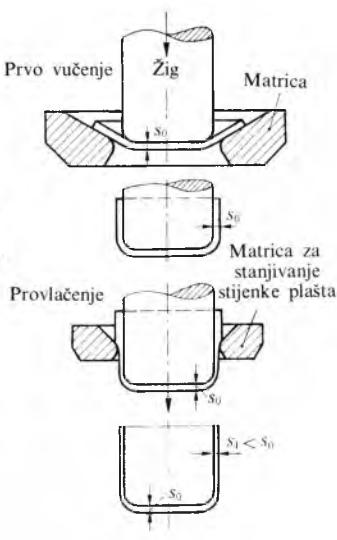
Strojevi za savijanje profila, šipki, traka i cijevi grade se sa tri valjka od kojih su dva pogonjena. Valjci imaju urezane kalibre prema obliku savijanog profila. Zbog vrlo mnogo potrebnih kalibara, različitih po obliku i dimenzijama, valjci su sastavljeni od osnovnih i izmjenljivih elemenata koji se međusobno mogu kombinirati da se dobije željeni kalibr.

DUBOKO VUČENJE

Dubokim vučenjem proizvodi se kuhinjsko posuđe, limena ambalaža, limeni radijatori, automobilske karoserije, kotlovska dna, municija i dr. Provlačenjem kroz jedan ili više alata skrojena limena ploča (rondela, platina) poprima oblik posude, kute, dna i sl. To je postupak obradbe u hladnom stanju, a iznimno se čelična kotlovska dna vuku u toploem stanju. Razlikuju se dva postupka: vučenje bez stanjenja stijenke lima (sl. 101) i vučenje kombinirano s provlačenjem uz stanjenje stijenke lima (sl. 102).



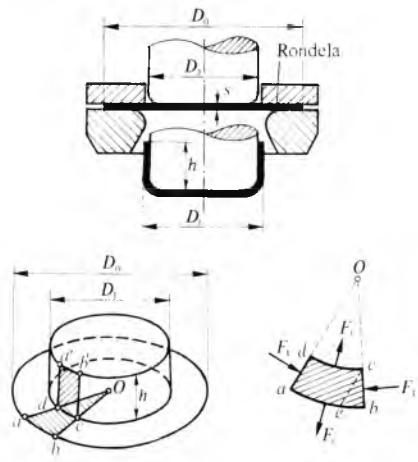
Sl. 101. Vučenje bez promjene debljine stijenke lima



Sl. 102. Vučenje kombinirano s provlačenjem

Vučenje bez stanjenja stijenke lima. Različita roba s tankom stijenkom, ambalaža i sve vrste dana proizvode se vučenjem bez promjene debljine obrađivanog lima. Postupak je jednofazan samo za plitke predmete, a koliko puta će se vući, ovisi o složenosti završnog oblika predmeta. Alat za vučenje sastoji se od žiga, provlačnog prstena (matrice) i tlačnog prstena.

Deformacije obradivog lima mogu se rastumačiti na jednostavnom primjeru vučenja rondelle (sl. 103). Trokutasti isječak rondelle Oab prelazi u oblik $Ocd'a'b'$, dakle prvobitni trapezni oblik $abcd$ prelazi u plašt lonca $a'b'cd$. Pri tom se dužina ab morala skratiti na $a'b' = cd$. Na tom elementu rondelle djeluje uz radikalnu vlačnu silu F_r i tangencijalna tlačna sila F_t koja



Sl. 103. Deformacija trokutastog isječka rondelle

moe uzrokovati nabore na tankoj stijenki rondelle (sl. 104). Zadatak je tlačnog prstena da sprječi stvaranje nabora. Tlak p tlačnog prstena na rondelu iznosi za čelične limove 150...250 N/cm², za mjedeni lim 100...150 N/cm², a za limove od lakih metala 50...100 N/cm². Točnije se taj tlak određuje iskustvenom formulom

$$p = 0,0025 \sigma_1 \left(\frac{D_0}{D_1} - 1 \right)^3 + \frac{D_1}{200s}, \quad (96)$$

gdje je σ_1 vlačna čvrstoća materijala rondelle, D_0 promjer rondelle, D_1 promjer lonca, a s debljina lima.

Tlačni prsten nije potreban ako je ispunjen uvjet

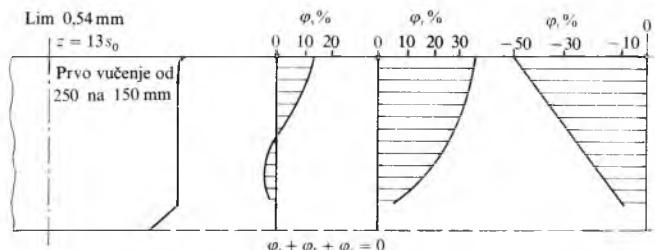
$$\frac{100s}{D_0} > 4,5 \left(1 - \frac{D_1}{D_0} \right), \quad (97)$$

što vrijedi za plitke posude, čahure s debelom stijenkom i sl.



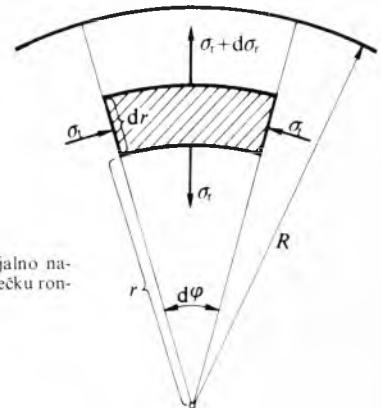
Sl. 104. Štetni nabori zbog tangencijalne tlačne sile pri dubokom vučenju

Stupanj deformacije φ , o kojem ovisi očvršćenje materijala, može se približno definirati izrazom $\varphi \approx \ln D_0/D_1$. Stvarni je φ , međutim, promjenljiva veličina uzduž visine plašta (sl. 105). Pri svakom se vučenju u donjoj polovici lonca stijenka plašta malo zadeblja, u gornjoj se polovici stanji, a na rubu se debljina stijenke smanji za više od 10%.



Sl. 105. Razdioba stupnjeva deformacije φ_s , φ_r i φ_t po visini plašta

Narezanja i sile pri prvom vučenju. Iz uvjeta ravnoteže sile koje djeluju na izrezak rondelle smješten na udaljenosti $0,5 D_0 > r > 0,5 D_1$ (sl. 106) dobiva se diferencijalna jednadžba



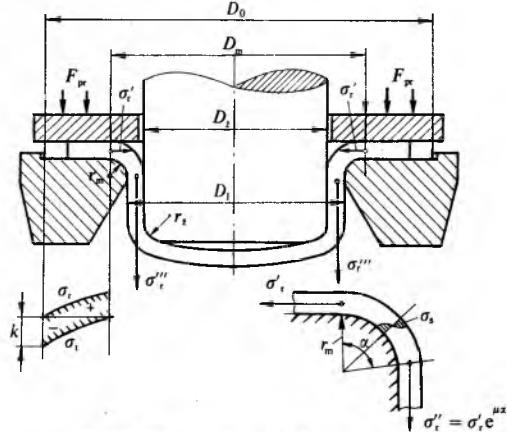
Sl. 106. Radikalno i tangencijalno naprezanje na elementarnom isječku rondelle

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r + \sigma_t}{r} = 0, \quad (98)$$

odakle, uz uvjet plastičnog tečenja $\sigma_r + \sigma_t = k$, slijedi da je radijalno naprezanje

$$\sigma_r = k \ln \frac{R}{r} = k \ln \frac{D_0}{D}. \quad (99)$$

Naprezanje σ_r na periferiji ($r = R = 0,5 D_0$) jednako je nuli, a najveće je za $D = D_m$, gdje je $D_m = D_1 + 2r_m$, a r_m je polujmjer zaobljenosti ulaznog ruba matrice (sl. 107).



Sl. 107. Naprezanje pri dubokom vučenju

Budući da je rondela upeta među prstenima silom F_{pr} , treba svladati silu trenja $T = 2\mu F_{pr}$, što zahtijeva nešto veće radijalno naprezanje

$$\sigma'_r = \sigma_r + \frac{2\mu F_{pr}}{D_m \pi s} = k \ln \frac{D_0}{D_m} + \frac{2\mu F_{pr}}{D_m \pi s}. \quad (100)$$

Tokom vučenja rondela klizi uzduž ruba kojemu je polujmjer zaobljenja r_m , pa je potrebno na izlazu iz matrice još nešto veće radijalno naprezanje $\sigma''_r = \sigma'_r \exp \alpha \mu > \sigma'_r$. Uzme li se u obzir i naprezanje na savijanje zbog savijanja lima preko ruba, ukupno će naprezanje na izlazu iz matrice iznositi

$$\sigma'''_r = \left(k \ln \frac{D_0}{D_m} + \frac{2\mu F_{pr}}{D_m \pi s} \right) \exp \alpha \mu + k \frac{s}{2r_m + s}, \quad (101)$$

a sila vučenja

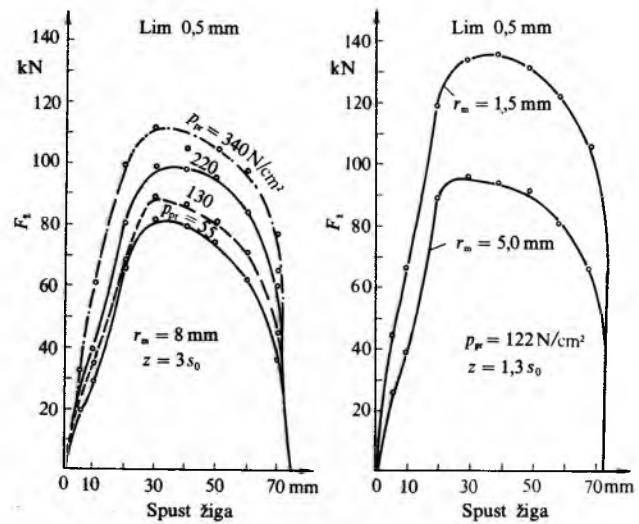
$$F = D_1 s \pi \sigma'''_r = D_1 \pi s \left[\left(k \ln \frac{D_0}{D_m} + \frac{2\mu F_{pr}}{D_m \pi s} \right) \exp \alpha \mu + k \frac{s}{2r_m + s} \right]. \quad (102)$$

Ako se radi bez tlačnog prstena, tada je $F_{pr} = 0$, te (102) prelazi u oblik

$$F = D_1 \pi s k \left[\exp(1,57\mu) \ln \frac{D_0}{D_m} + \frac{s}{2r_m + s} \right], \quad (103)$$

gdje je kut $\alpha = \pi/2$.

Izrazi (101) do (103) daju nešto prevelike vrijednosti za σ_r i F , jer nije uzeto u obzir da će već u trenutku kad lonac počinje izlaziti iz matrice promjer rondele biti $D_0 < D_0$. Isto će tako prvi član u izrazima (101) i (102) biti najveći na početku vučenja, tj. kad još nema naprezanja na savijanje i kad je $\exp \alpha \mu = 1$. Postojat će, dakle, neka razlika između izračunane i stvarne sile vučenja prikazane na sl. 108. Na slici se vidi da se sila vučenja smanjuje (a time i utrošak energije) s porastom polujmjera r_m , da sila raste s porastom tlaka prstena p_{pr} , te da na silu vučenja utječe zračnost $z = 0,5(D_1 - D_2)$ i vrsta maziva. Zračnost mora biti nešto veća od debljine lima s , jer se inače stijenka razvlači, pa vučenje postaje otežano, a



Sl. 108. Ovisnost sile žiga F_z tokom spuštanja z i o tlaku tlačnog prstena p_{pr} pri prvom vučenju od $D_0 = 250$ mm na $D_1 = 150$ mm

matrica se naglo troši. Za rondele s tankom stijenkama obično se uzima $z = 1,1 \dots 1,3$ s. Ako je zračnost prevelika, na plaštu lonca nastaju sitni nabori.

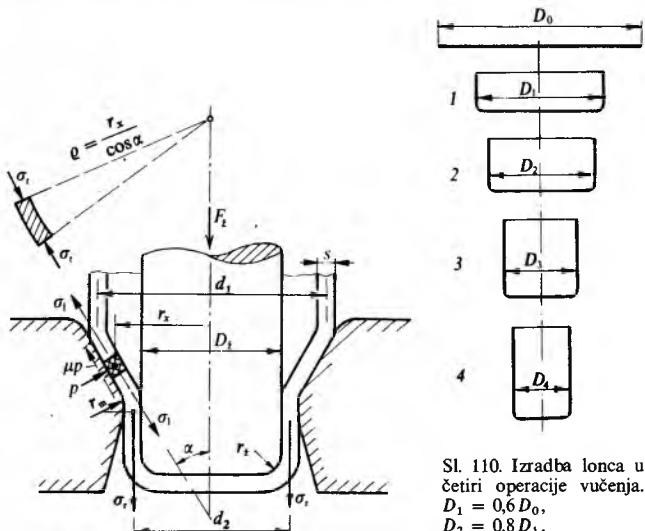
Naprezanja i sile pri drugom i sljedećim vučenjima. Rješenje diferencijalne jednadžbe za element u zoni deformacije (sl. 109) daje za radijalno vlačno naprezanje izraz

$$\sigma_r = k \left[\left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right) + \frac{s}{2r_m + s} \right] \exp \alpha \mu, \quad (104)$$

a za silu žiga

$$F_z = d_2 \pi s \sigma_r. \quad (105)$$

Ti izrazi vrijede kad nema tlačnog prstena, a ako se upotrebljava tlačni prsten, bit će σ_r i F_z do 30% veći.



Sl. 109. Naprezanje pri drugom dubokom vučenju

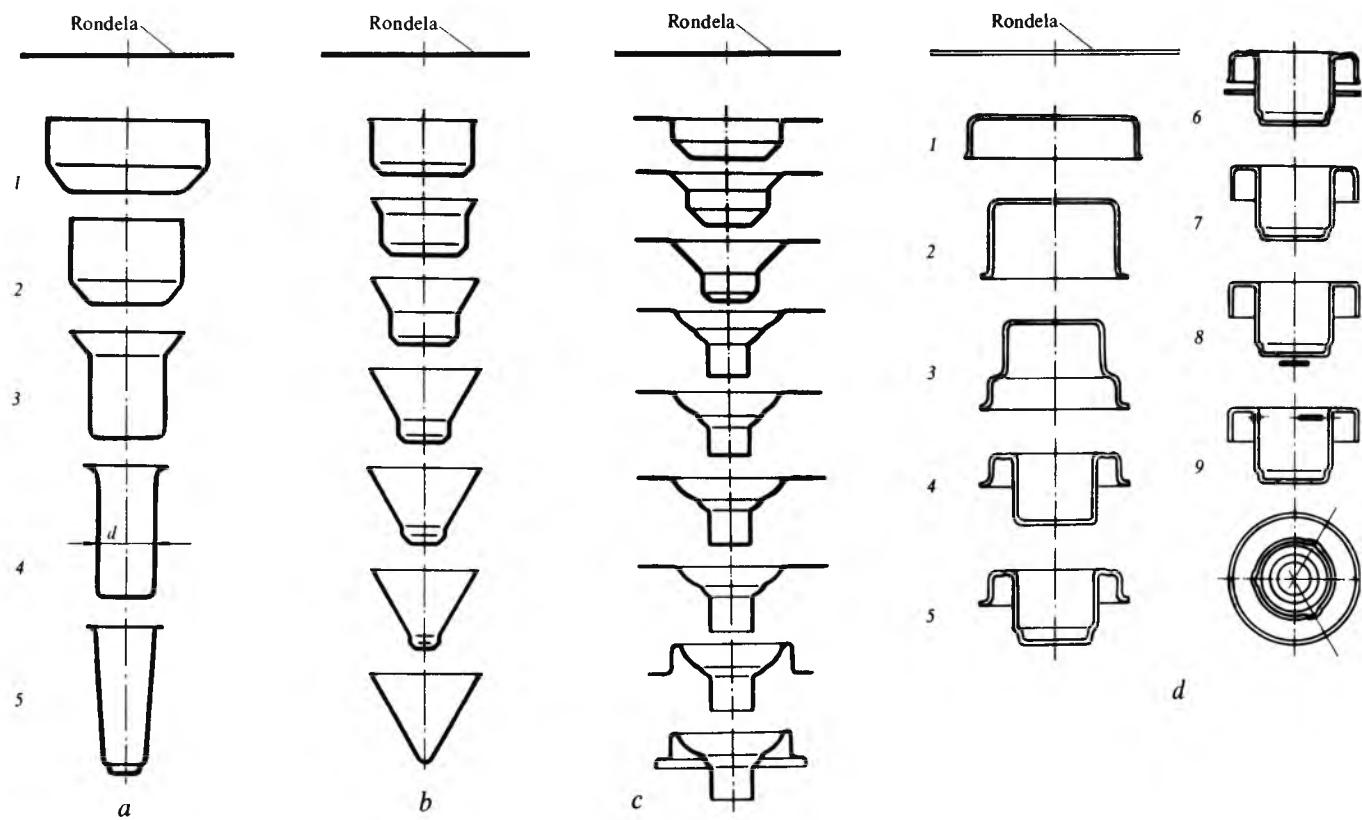
Sl. 110. Izradba lonca u četiri operacije vučenja.
 $D_1 = 0,6 D_0$,
 $D_2 = 0,8 D_1$,
 $D_3 = 0,8 D_2$,
 $D_4 = 0,85 D_3$

Redukcije promjera ograničene su dopuštenom veličinom naprezanja σ_r . Zato su u proizvodnji kuhičkog posuđa od međugrađenog lima često potrebna 3-4 vučenja, uz postupnu redukciju promjera posude, i to od ~40% za prvo vučenje do samo 15% za četvrto (sl. 110).

Praktične formule za silu vučenja. Sila vučenja F može se brzo izračunati i pomoću sljedećih iskustvenih formula:

$$\text{prvo vučenje: } F = C_1 D_1 \pi s \sigma_1, \quad (106)$$

$$\text{n-to vučenje: } F_n = C_n D_n \pi s \sigma_1, \quad (107)$$

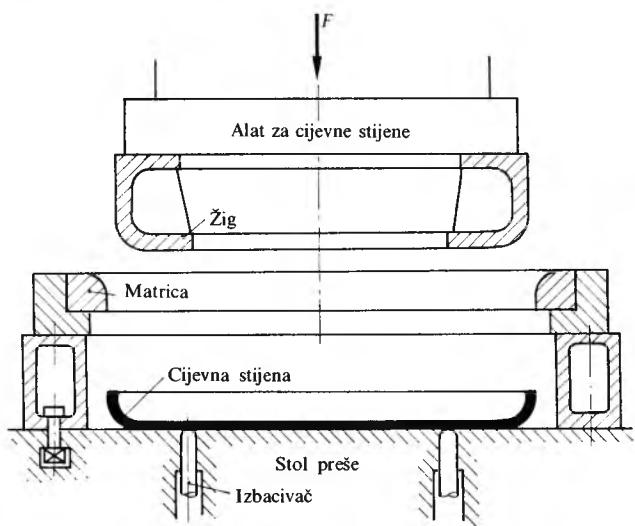


Sl. 111. Primjeri redoslijeda operacija vučenja rotacijskih predmeta s tankim stijenkama

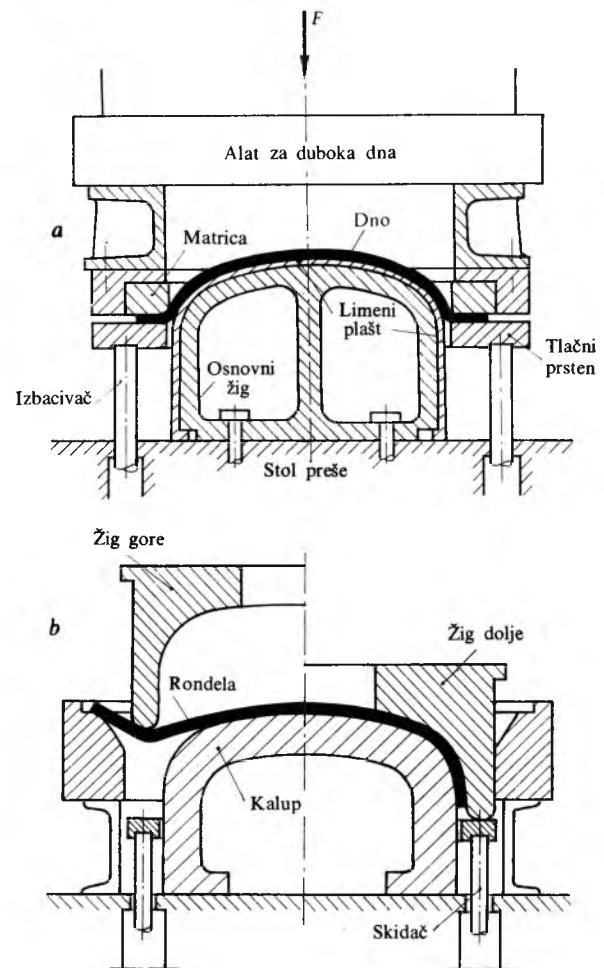
gdje je σ_1 početna čvrstoća materijala rondele. Pokazalo se da vrijednosti koeficijenta C ovise o tlaku p_{pr} prstena, o debljini lima s , te o polumjeru zaobljenosti r_m . Za rondele s tankom stijenkama vrijedi: $C_1 = 0,80 \dots 1,10$ za prvo vučenje, $C_2 = 0,75 \dots 1,0$ za drugo i $C_3 = 0,65 \dots 0,90$ za treće vučenje. Vrijednosti C smanjuju se s porastom omjera s/D_0 i polumjera zaobljenosti r_m .

Redoslijed i broj operacija. Površina rondele treba biti nešto veća ili jednaka površini izvučenog proizvoda. Redoslijed preoblikovanja odabire se tako da se predmet proizvede sa što manje vučenja. Za složenije oblike proizvoda često se redoslijed preoblikovanja rješava pretokusima. Sl. 111 prikazuje nekoliko primjera prokušani redoslijed operacija vučenja u izradbi rotacijskih predmeta s tankom stijenkama.

Vučenje dna. Prema obliku razlikuje se ravno dno (cijevne stijenke) i bombirano ili duboko dno. RAVNO dno obično je toliko plitko i s relativno debelom stijenkama da se može vući



Sl. 112. Vučenje ravnog dna (cijevne stijenke)



Sl. 113. Vučenje dubokog dna. a pomoću tlačnog prstena, b pomoću posebnog alata

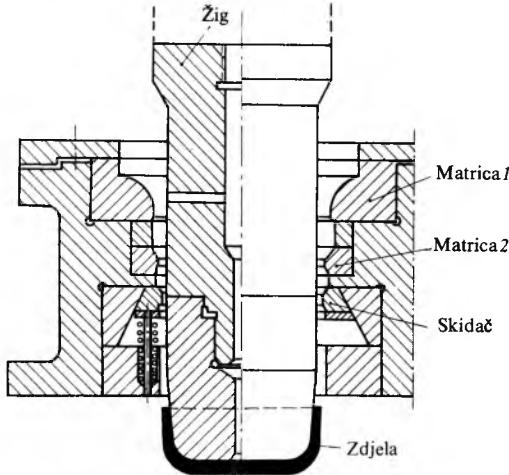
bez tlačnog prstena (sl. 112). Duboka se dna vuku pomoću tlačnog prstena (sl. 113a). Međutim, postoji i poseban alat (sl. 113b) kojim se može uspješno raditi bez tlačnog prstena ako je

$$\frac{100s}{D_0} \geq 1,7 \left(1 - \frac{d}{D_0}\right), \quad (108)$$

gdje je d promjer izvučenog dna.

Dna se vuku obično u topлом stanju na specijalnim vertikalnim hidrauličkim prešama s ugrađenim uređajem za vađenje dna, odnosno za skidanje s kalupa.

Vučenje uz stanjenje stijenke lima. Tim se postupkom proizvode čahure za topovsku i puščanu municiju te slični predmeti s relativno tankom stijenkicom izduženog plastičnog dna. Postupak se sastoji od dubokog vučenja rondele u oblik plitke zdjelice bez upotrebe tlačnog prstena, a zatim se zdjelica provlači kroz više matrica sve manjeg promjera da bi se plastično stanjio i izdužio.

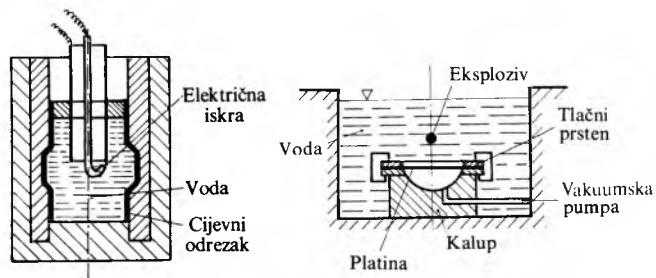


Sl. 114. Alat za vučenje i prvo provlačenje

Alat tandem-konstrukcije (sl. 114) služi za dvije operacije: vučenje rondele u zdjelicu i prvo provlačenje zdjelice. U prvom se vučenju reducira promjer rondele za ~40%. Postupak se izvodi u hladnom stanju, ako to dopuštaju plastična svojstva materijala, kao što su npr. meki čelik sa 0,1% C, mned sa 67...72% Cu te aluminij Al 99,5. Tokom preoblikovanja materijal lima veoma otvrđne i opadne mu istezljivost, pa ga treba višekratno toplinski omešavati i vraćati u početno istezljivo stanje. Uz toplinsku obradbu površina se lima kemijski ili mehanički čisti od posljedica žarenja. Velika naprezanja u rondeli s debelom stijenkicom mogu uzrokovati već u prvoj operaciji vučenja visoki postotak škarta. Da bi se to izbjeglo, rub se matrice zaoblji u oblik provlačene krivulje (traktrise) ili se pretvara u pretodno rondela fosfatira.

Brzi postupci u proizvodnji duboko vučene robe. Osim običnih postupaka dubokog vučenja upotrebljavaju se i tzv. brzi postupci u kojima se potrebna tlačna sila dobiva na jedan od sljedećih načina: primjenom pogodnog eksploziva, eksplozivnim izgaranjem plinske smjese, djelovanjem visokonaponske električne iskre (tzv. elektrohidraulički postupak) te djelovanjem impulsnog magnetskog polja. Svi ti postupci imaju relativno visoke brzine deformiranja, od 30 do više od 200 m/s. Prednosti su brzih postupaka: jednostavna i jeftina konstrukcija alata, jer nema tlačnih žigova, preše su nepotrebne pa je tlak odmah od početka jednak po čitavoj površini platine, što je osobito pogodno za proizvodnju limenih otpresaka velikih dimenzija kao što su dna, cilindrične posude s istaknutim cijevnim priključcima, velike rebraste stijenke avionskog trupa, trbušasti cijevni otpresci itd.

Elektrohidrauličkim (sl. 115) i eksplozivskim postupcima prenosi se djelovanje visokonaponskog izvora na platino posredno preko nekog medija, npr. vode. Praktički je najjednostavniji postupak dubokog vučenja pomoću nekog eksploziva (sl. 116).



Sl. 115. Oblikovanje prstenastog proširenja na cijevnom odresku pomoću električne iskre

Sl. 116. Uređaj za duboko vučenje platine pomoću eksploziva

Prve ideje o primjeni eksploziva potječu još iz prošlog stoljeća, a prvi patent podijeljen je u Engleskoj god. 1898. Stupanj iskoristivosti energije eksploziva u postupcima plastičnog preoblikovanja iznosi 15...20%.

LIT.: E. Siebel, Die Formgebung im bildsamen Zustand. Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1932. — G. Sachs, O. Hoffman, Introducion to the Theory of Plasticity for Engineers. Mc Graw-Hill Co., New York 1933. — A. Geleji, Walzwerks- und Schmiedemaschinen. VEB Verlag Technik, Berlin 1955. — A. N. Bruchanov, A. W. Rebelski, Gesenkschmieden und Warmpressen. VEB Verlag Technik, Berlin 1955. — И. П. Перши, Теория волочения. Металлургиздат, Москва 1957. — А. И. Зеликов, Lehrbuch der Walzwerksbau. VEB Verlag Technik, Berlin 1957. — K. Lange, Gesenkschmieden von Stahl. Springer Verlag, Berlin 1958. — Е. П. Униксов, Инженерная теория пластичности. Машиз, Москва 1959. — С. Е. Pearson, R. N. Perkins, The Extrusion of Metals. Chapman and Hall, London 1960. — W. Johnson, P. B. Mellor, Plasticity for Mechanical Engineers. Van Nostrand Co., London 1961. — H. Mäkelt, Die mechanischen Pressen. Hanser Verlag, München 1961. — W. D. Franz, Das Kaltbiegen von Rohren. Springer Verlag, Berlin 1961. — Z. Wusatowski, Grundlagen des Walzens. Verlag Grundstoffindustrie, Leipzig 1963. — А. И. Целиков, Основы теории прокатки. Металлургия, Москва 1965. — E. C. Larke, The Rolling of Strip, Sheet and Plate. Chapman and Hall, London 1967. — M. W. Storožev, E. A. Popov, Grundlagen der Umformtechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1968. — O. Kinzle, Mechanische Umformung. Springer Verlag, Berlin 1968. — G. Rowe, An Introduction to the Principles of Metalworking. E. Arnold Ltd., London 1968. — B. Musafia, Obrada metala plastičnom deformacijom. Svetlost, Sarajevo 1970. — А. И. Целиков, А. И. Гринков, Теория прокатки. Металлургия, Москва 1970. — K. Lange, Lehrbuch der Umformtechnik. Springer Verlag, Berlin 1972. — А. И. Брюханов, Конка и объемная штамповка. Машиностроение, Москва 1975. — J. Hribar, Plastična obrada metala. Sveučilišna naklada Liber, Zagreb 1975.

J. Hribar

PLASTIFIKATORI (omešavala), organske tvari koje se dodaju polimernim materijalima da poboljšaju neka njihova fizikalna ili kemijska svojstva, u prvom redu fleksibilnost, elastičnost i rastezljivost. Plastifikatori se polimernim materijalima primješavaju u toku njihove proizvodnje, ali se mogu dodavati i već gotovim, tvrdim i krhkim proizvodima. Poboljšanje svojstava polimernih materijala dodavanjem plastifikatora, u toku proizvodnje ili kasnije, naziva se *plastifikacijom* (omešavanjem).

Plastifikatori se najviše upotrebljavaju za omekšavanje prerađevina poli(vinil-klorida), te naliči i ljepila koji nakon sušenja tvore tanke površinske slojeve (filmove). Oni ponekad služe i za omekšavanje polimernih materijala na osnovi drugih termoplasta, a samo rijetko i za druge vrste umjetnih makromolekularnih tvari.

Omekšavanje dodavanjem plastifikatora trebalo bi se, strogo uvezši, nazivati vanjskom plastifikacijom, jer ga valja razlikovati od unutrašnje plastifikacije, kojom se izravno dobivaju dovoljno fleksibilni polimerni materijali iz svojih temeljnih monomera kopolimerizacijom s drugim prikladnim monomerima kao nosicima fleksibilnosti.

U širem smislu, što se ne razmatra u ovom članku, plastifikacija obuhvaća i neke anorganske procese. Tako se, npr., vodom plastificira gлина u lončarstvu, vapnom se poboljšava preradljivost cementa i sl.