

III klk iz TMO

NOMINALNI I STVARNI NAPON

Usled promena oblika metalnih obradaka u procesima njihovog deformisanja, dolazi do promena strukture metala. Obradu metala deformisanjem odlikuje očvršćavanje metala. S povećanjem stepena deformisanja, povećava se i otpornost materijala prema daljoj obradi deformisanjem. Istovremeno, opada plastičnost materijala.

Ispitivanjem epruveta na specijalnim mašinama za kidanje – kidalicama, dobija se dijagram napon-deformacija.

Postupak ispitivanja započinje tako što se u radne organe ove mašine postavljaju pripremljene epruvete za ispitivanje, a zatim se one opterećuju silom na istezanje, koje deluju u pravcu ose epruvete, pri čemu se sila stalno povećava, sve dok ne nastupi kidanje epruvete.

Za vreme ovog procesa, poseban uređaj na mašini registruje veličinu sile F , kao i vrednost apsolutnog izduženja probne epruvete Δl .

Probna epruveta ima prečnik d_0 , pa samim tim ima površinu poprečnog preseka:

$$A_0 = \frac{\bar{u} \cdot d_0^2}{4}$$

Epruveta pod dejstvom sile F , u toku ispitivanja na mašini za kidanje, povećava svoju dužinu od l_0 na l , odnosno tada apsolutni priraštaj dužine epruvete iznosi $\Delta l = l - l_0$.

Pri tome, površina preseka epruvete se smanjuje sa A_0 na A , tj. $A < A_0$.

Analitička interpretacija deformisanja probne epruvete se može prikazati u više oblika. Neki od tih oblika su:

1. Jedinično (relativno) izduženje ili deformacija prvog reda. Deformacija prvog reda je odnos između apsolutnog izduženja i početne dužine probne epruvete:

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

2. Poprečna kontrakcija (smanjenje poprečnog preseka epruvete) ili deformacija drugog reda. Izračunava se po vezi:

$$\psi = \frac{A_0 - A}{A_0} = \frac{\Delta A}{A_0}$$

Dijagram istezanja probne epruvete, prikazan na slici je grafička ilustracija koja predstavlja funkciju nominalnog napona u zavisnosti od jediničnog, odnosno relativnog izduženja.

Nominalni naponi se izračunavaju po vezi:

$$\sigma = \frac{F}{A_0},$$

što znači da je opterećenje redukovano na početnu površinu poprečnog preseka epruvete.

Stvarna naprezanja se izračunavaju po vezi:

$$K = \frac{F}{A},$$

gde je A – površina poprečnog preseka probne epruvete.

Kriva stvarnog naprezanja epruvete je na slici prikazana isprekidanom linijom. Ova kriva je jedna od osnovnih karakteristika materijala i veoma je značajna u obradi materijala deformisanjem.

Na dijagramu napon-deformacija se uočavaju tačke: P, E, T, M i Z.

P – granica proporcionalnosti

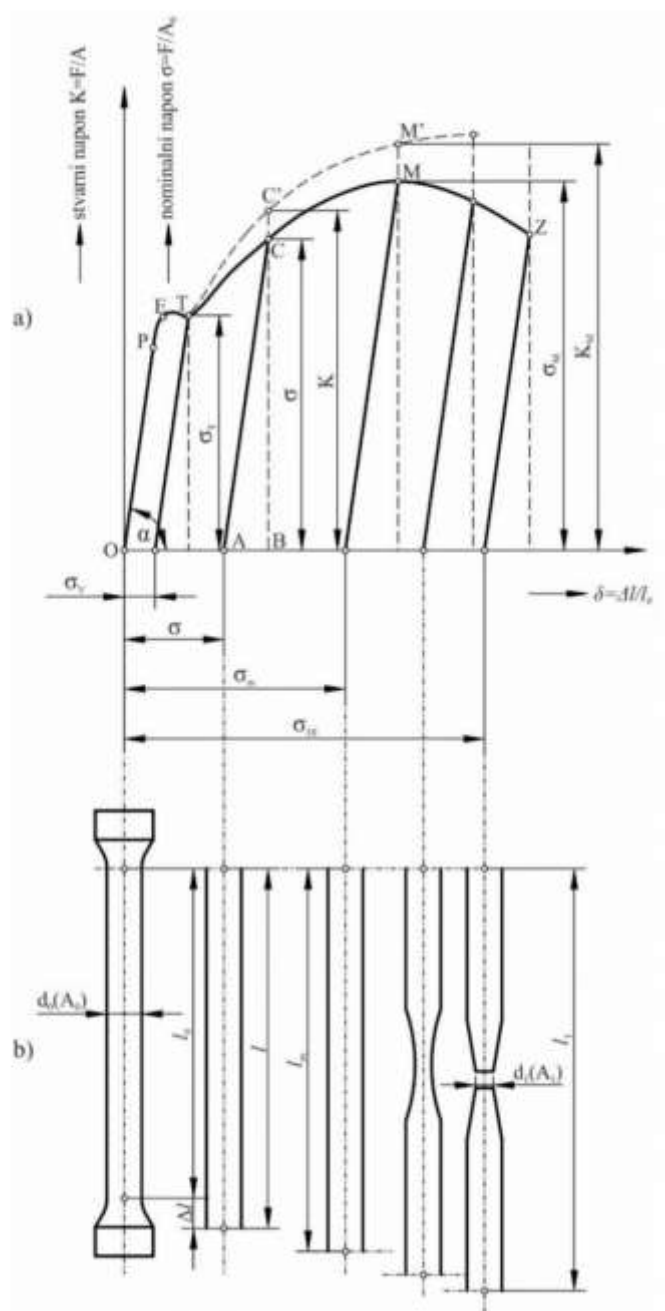
E – granica elastičnosti

T – tačka tečenja materijala

M – epruveta očvršćava do ove tačke

K – tačka kidanja

Dijagram napon-deformacija:



MEHANIZAM PLASTIČNOG DEFORMISANJA

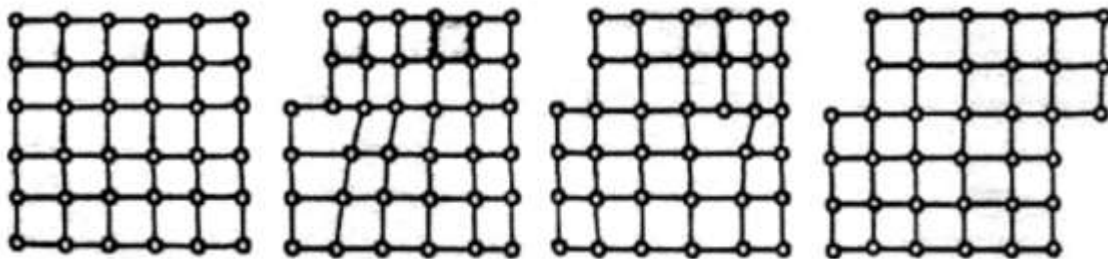
Najvažnija karakteristika metala je da su ona čvrsta tela kristalne građe, tj. atomi su raspoređeni unutar kristalne rešetke. Većina metala je kristalisana u tri prostorne kristalne rešetke: kubnu, tetragonalnu i heksagonalnu.

Gotovo sva svojstva metala zavise od njihove kristalne strukture.

Usled prinudnog trajnog pomeranja grupe atoma u kristalima metala, nastaje plastično deformisanje. Osnovni mehanizam plastičnog deformisanja sastoji se u klizanju i dvojnikanju u ravnima kristalnog konglomerata.

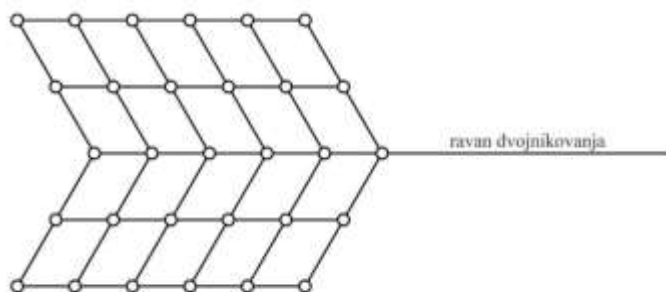
Tako se, na primer, kao rezultat klizanja pojavljuje, na površini ispitne epruvete, mreža međusobno upravni linija približno pod uglom od 45 stepeni. Ravni klizanja se pojavljuju na mestima gde postoje linerni defekti kristalne rešetke, koji se nazivaju dislokacija.

Prikaz pomeranja dislokacije kristalne rešetke pri plastičnom deformisanju:



Pri dvojnikanju se delovi materijala pomeraju proporcionalno rastojanju od ravni dvojnikanja. Dvojnikanje se najčešće pojavljuje pri dinamičkim deformacionim silama, dok je klizanje češće pri statičkim deformacionim silama.

Šema dvojnikanja:



DEFORMISANJE U HLADNOM STANJU

Karakteristike procesa obrade deformisanjem u hladnom stanju su:

- mogućnost dobijanja obradaka veoma tačnih dimenzija. Najčešće nije potrebno žarenje;
- proces se odvija u temperaturskom području u kojem se ne odvija i proces rekristalizacije, što dovodi do promene u kristalnoj strukturi metala, što dovodi i do promene mehaničkih osobina materijala obratka;
- zbog očvršćavanja materijala u toku obrade, ovaj proces se može izvoditi samo do određenog stepena deformisanja posle kojeg, ako se proces nastavi, dolazi do pukotina u materijalu obratka. Da bi se proces deformisanja nastavio i preko ovog kritičnog stepena, neophodno je da se u procesu žarenja kristalna struktura materijala obratka dovede u prvobitni oblik;
- proces deformisanja u hladnom stanju se, u opštem slučaju, ne odvija na „sobnoj temperaturi“. Proces potpunog hladnog deformisanja se najčešće odvija na temperaturama koje proizilaze iz relacije:
$$T_0 < (0,2 - 0,3) T_t [K],$$
gde je T_0 – temperatura na kojoj se odvija proces plastičnog deformisanja, a T_t – temperatura topljenja odgovarajućeg metala – materijala obratka;
- proces deformisanja u hladnom stanju se odvija sve dok ne nastanu uslovi za početak oporavljanja materijala, tj. do početka procesa njegove rekristalizacije.

DEFORMISANJE U TOPLOM STANJU

Karakteristike procesa obrade deformisanjem u toplom stanju su:

- ograničene mogućnosti u pogledu postizanja tačnosti dimenzija i kvaliteta;
- smanjeni deformacioni otpor i povećana plastična svojstva metala;
- kao posledica potrebe za zagrevanje materijala obratka, poskupljuju troškovi obrade;
- na temperaturama $T_0 > 0,65 T_t$, proces rekristalizacije metala je brži od procesa njegovog očvršćavanja.

BRZINA DEFORMACIJE

Brzina deformacije predstavlja brzinu kretanja čestica materijala koji se deformiše, tj. brzinu relativnog pomeranja materijala obratka u toku njegove deformacije. Brzina deformacije predstavlja promenu logaritamske deformacije u jedinici vremena:

$$V_{dh} = \frac{d\varphi_h}{dt} [1/s]$$

Sa druge strane, s obzirom da je

$$\varphi_h = \frac{V_{ih}}{V},$$

, brzina deformacije je:

$$v_{dh} = \frac{dV_{ih}}{V dt} [1/s],$$

BRZINA DEFORMISANJA

Brzina deformisanja zavisi od mašine i odnosi se na brzinu kretanja alata (npr. kod procesa to je brzina kretanja pritiskivača, a kod čekića brzina malja). Definiše se kao promena visine tela u jedinici vremena, tj. ako se u vremenskom intervalu Δt izvrši sabijanje komada za iznos Δh , tada je brzina deformisanja:

$$v_h = \frac{dh}{dt} [mm/s].$$

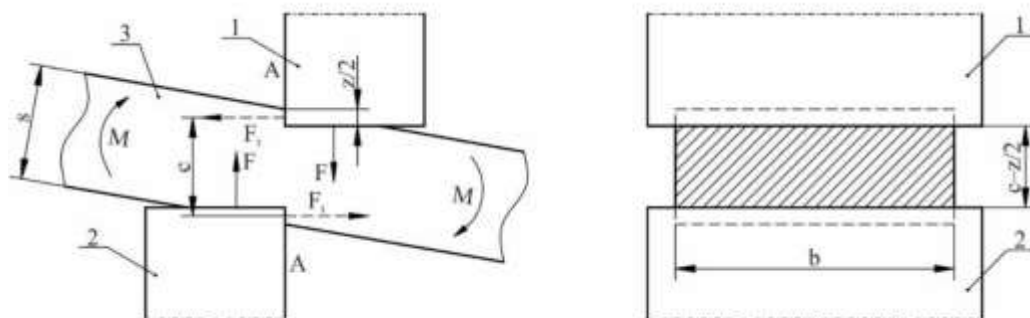
Ukoliko se za neko vreme Δt , telo sa početne visine h_0 sabije na visinu, onda je srednja brzina deformisanja:

$$v_{h(sr)} = \frac{h_0 - h_1}{\Delta t} = \frac{\Delta h}{\Delta t} [mm/s].$$

Veza između brzine deformacije i brzine deformisanja može se izraziti:

$$v_{dh} = \frac{dh}{h dt} = \frac{v_h}{h} \text{ ili } v_h = h v_{dh}$$

ODSECANJE NA MAKAZAMA SA PRAVIM PARALELNIM NOŽEVIMA

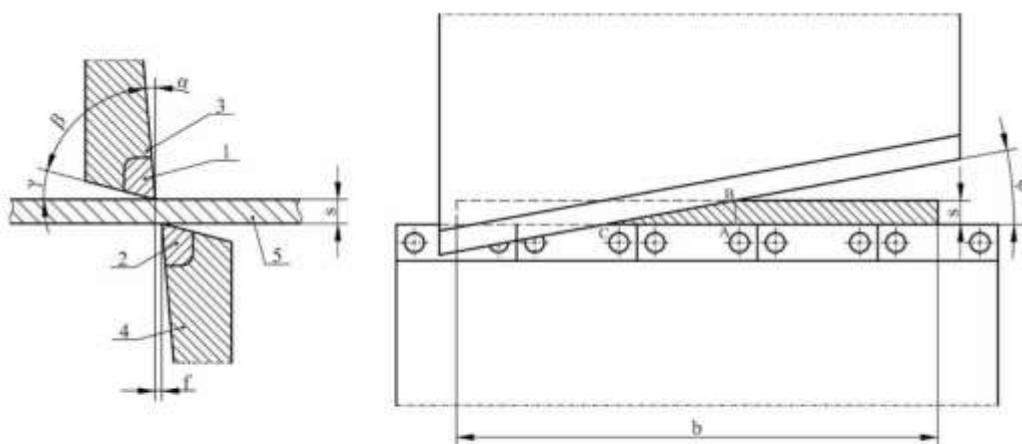


Slika 2.9. Shema odsecanja na makazama sa pravim paralelnim noževima: 1 – gornji nož, 2 – donji nož, 3 – materijal (lim)[1]

Neka je materijal pravougaonog oblika (širine b i debljine s). Ravan $A - A$, koja prolazi kroz rezne ivice oba noža naziva se ravan odsecanja.

U početku procesa odsecanja, pri dodiru materijala sa alatom, nastaje sabijanje materijala. Kada noževi prodru u materijal na neku dubinu z , koja se naziva apsolutna dubina prodiranja noža, počinje proces smicanja ili proces samog odsecanja.

ODSECANJE NA MAKAZAMA SA PRAVIM NAGNUTIM NOŽEVIMA



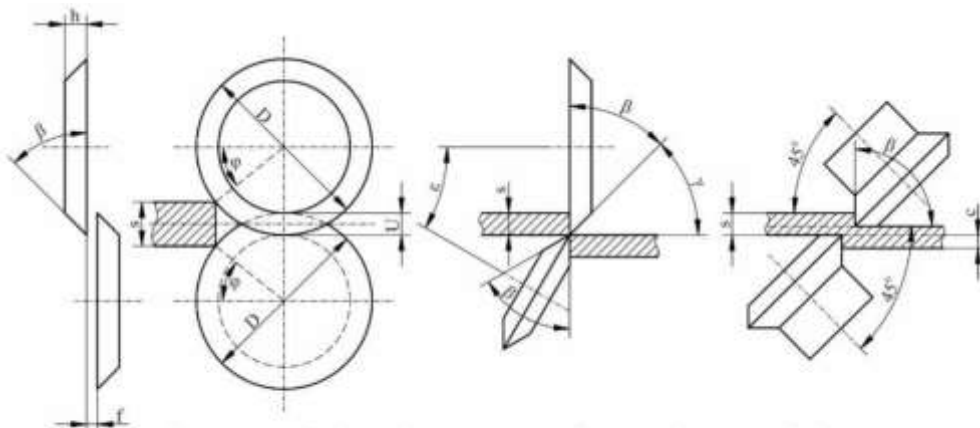
Slika 2.10. Shema odsecanja na makazama sa pravim nagnutim noževima: 1 – segmenti gornjeg noža, 2 – segmenti donjeg noža, 3 – gornji nosač, 4 – donji nosač, 5 – materijal (lim)[1]

Upotrebljavaju za odsecanje materijala sa relativno malom debljinom u odnosu na njegovu širinu.

Pri prodiranju u materijal, nož ne nailazi na otpor celog preseka, nego samo izvesnog dela preseka. U toku procesa odsecanja ovaj deo se može predstaviti trouglom ABC [1].

Deformaciona sila je znatno manja u odnosu na odsecanje sa pravim paralelnom noževima, ali je gotov komad u manjoj ili većoj meri savijen.

ODSECANJE NA MAKAZAMA SA KRUŽNIM NOŽEVIMA



Slika 2.11. Razne izvedbe kružnih noževa: a) sa horizontalnim i paralelnim osama, b) sa horizontalnom i nagnutom osom, c) sa nagnutim i paralelnim osama[1]

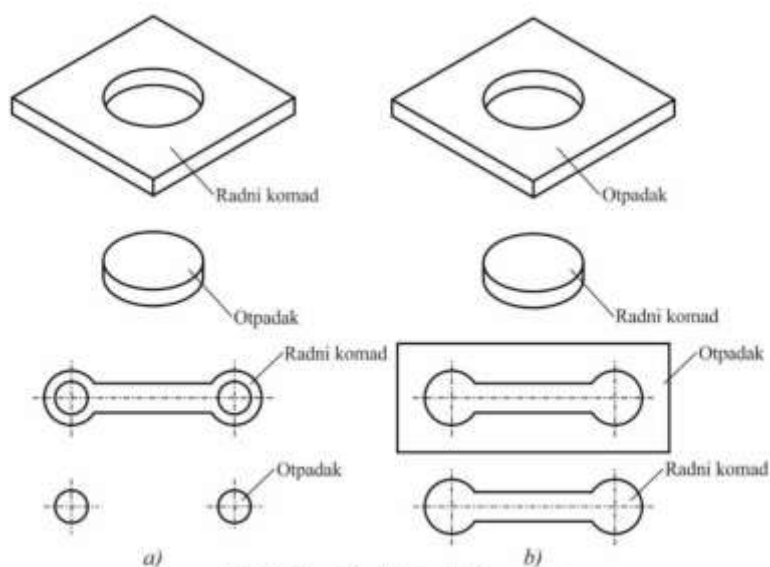
Proces odsecanja materijala namakazama sa kružnim noževima se primenjuje samo za odsecanje limova (obično u vidu traka velike dužine). Okretanjem noževa ostvaruje se odsecanje.

Vrlo često se primenjuje u slučajevima kada je neophodno izvršiti istovremeno odsecanje više užih traka iste širine.

PROSECANJE I PROBIJANJE

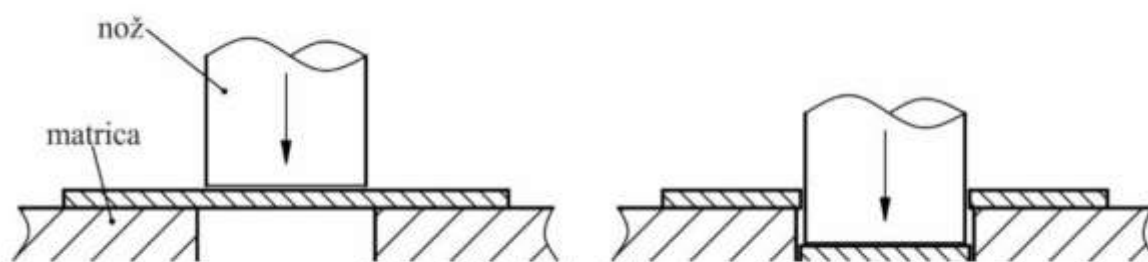
Tipične operacije razdvajanja materijala pomoću alata na presama su prosecanje i probijanje.

Kod ovih operacija se materijal razdvaja po zatvorenoj konturi. Kod prosecanja je prosečno jezgro radni komad, a ostatak trake je otpada, a kod probijanja je probijeno jezgro otpadak.



Slika 2.12. a) Probijanje, b) Prosecanje

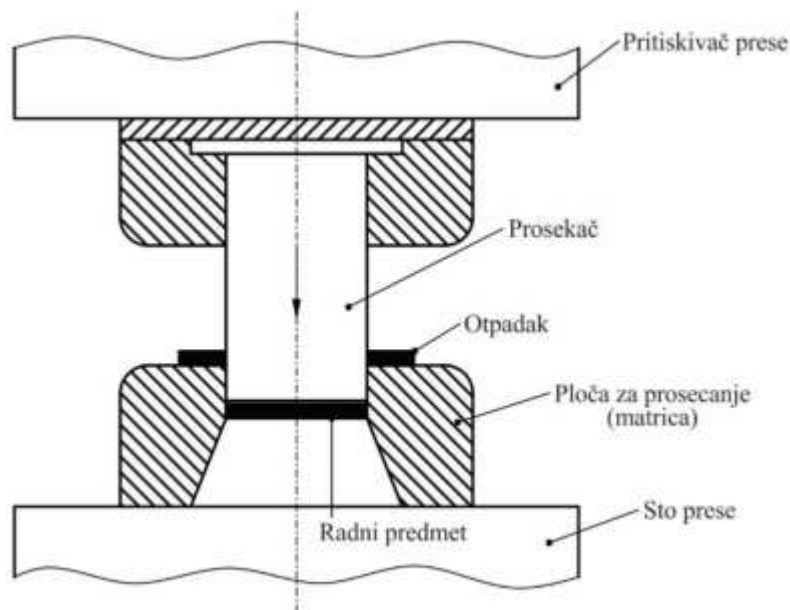
Polufabrikati su limene trake ili pojedinačni komadi od lima, a koriste se i nemetalni materijali u pločastoj formi. Gotovi komadi su ravni, sa konturama različitog oblika.



Slika 2.13. Radni elementi alata

Postupak prosecanja se odnosi na dobijanje finalnog komada sa spoljašnjom konturom, a termin probijanje se odnosi na dobijanje finalnog komada sa unutrašnjom konturom.

Proces u okolini rezne ivice je potpuno isti. Proces razdvajanja traje veoma kratko, svega delić sekunde, čak i kod većih debljina lima, ali je mehanizam njegovog odvijanja relativno složen.



Slika 2.14. Prikaz mehaničke prese za prosecanje

U uslovima većih proizvodnih serija, od izuzetnog je značaja ekonomično korišćenje materijala pri prosecanju, tj. obezbeđenje pravilnog rasporeda komada na traci.

Najčešće korišćeni polufabrikat, lim se dobija iz železara najčešće u obliku tabli. Iz njih se odsecaju trake odgovarajuće širine. Pri velikoserijskoj i masovnoj proizvodnji, neophodno je da se iz železare dobijaju koturovi lima potrebne širine.

Podela alata za prosecanje s obzirom na vođenje gornje polovine alata u odnosu na donju:

- bez vođenja
- sa pločastim vođenjem
- sa stubnim vođenjem
- sa kombinovanim vođenjem

S obzirom na broj mogućih prosecanja, alati se mogu podeliti na:

- jednosečne
- višesečne

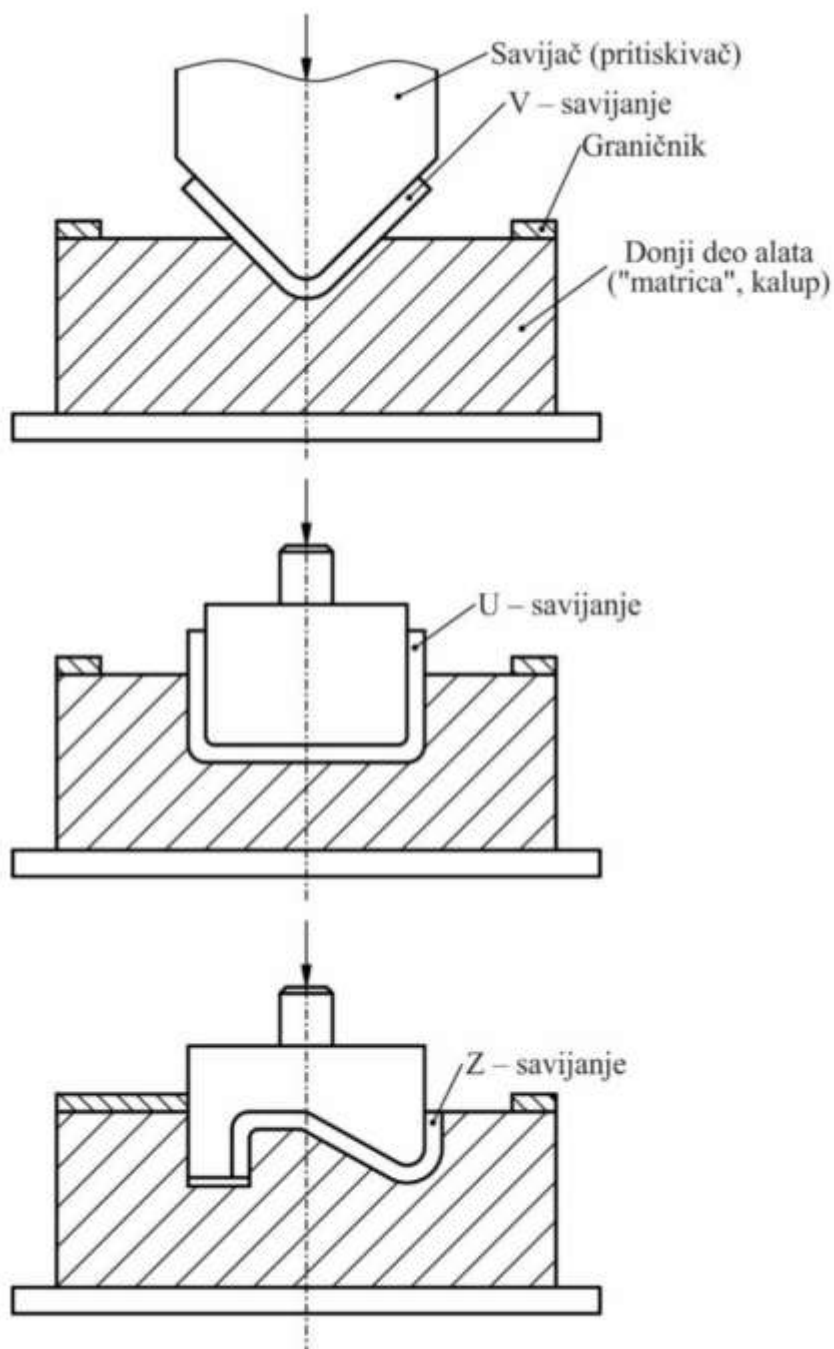
Prema formi rezne ivice razlikujemo:

- sa ravnim reznim ivicama
- sa kosim reznim ivicama

UGAONO SAVIJANJE

Izvodi se najčešće u alatima postavljenim na univerzalne prese ili na specijalnim presama. U zavisnosti od oblika i broja mesta savijanja može biti:

1. Jednougano,
2. Dvougano,
3. Višeuگانo.



Slika 2.15. Različiti prikazi ugaonog savijanja

Pri savijanju se javljaju elastično i plastično deformisanje, pri čemu se teži da udeo elastičnog deformisanja bude što manji.

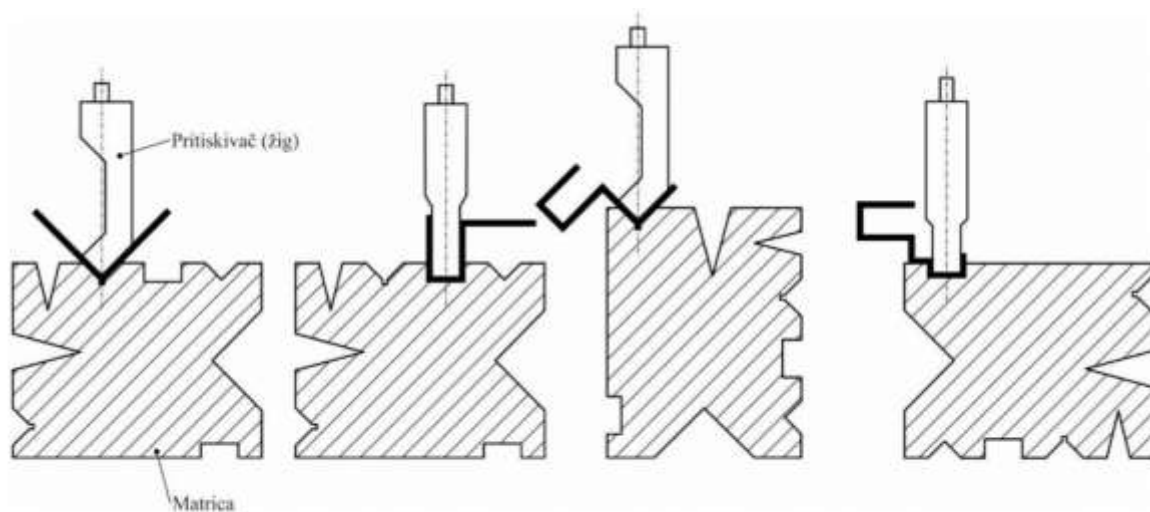
Pri savijanju razlikuju se momenti spoljašnjih sila (deformaciona sila, sile otpora, sile trenja itd.) i momenti unutrašnjih sila, definisani na osnovu naponskog stanja. Iz jednakosti ovih momenata, definiše se potrebna deformaciona sila. Zavisno od veličine uzdužnih napona po debljini lima postoje dva tipa savijanja, čisto plastično i elastično-plastično.

PROFILNO SAVIJANJE NA SPECIJALNIM PRESAMA

Ovaj tip savijanja se odnosi na ugaono savijanje komada koji najčešće imaju veliku širinu savijene zone (i više od nekoliko metara) i to na specijalnim, tzv. „abkant“ presama.

Pritiskivač (žig) je velike dužine, nožastog oblika, i najčešće izvodi jednougono savijanje uz pomoć univerzalne matrice.

Međutim, oblikovanje je vrlo često višeoperaciono i sastoji se iz više jednouganih savijanja uz zamenu alata, tako da se često dobijaju i vrlo složeni profili.

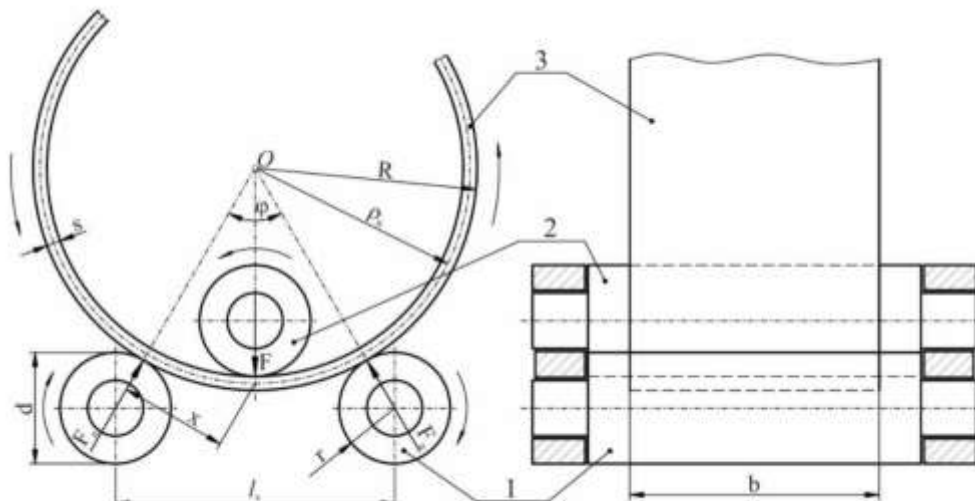


Slika 2.17. Profilno savijanje na „abkant“ presama

KRUŽNO SAVIJANJE LIMOVA POMOĆU VALJAKA

Savijanje preko valjaka se primenjuje kod izrade cilindričnih sudova relativno većeg prečnika u odnosu na debljinu lima s .

Sam proces se vrši na mašini za savijanje, koja se sastoji od dva donja i jednog gornjeg valjka. Gornji valjak se može podešavati u visini, u zavisnosti od prečnika komada koji se savija.



Slika 2.18. Savijanje preko valjaka: 1) donji valjci, 2) gornji valjak, 3) radni komad [1]

F – sila gornjeg valjka

F_a – sila reakcije donjeg valjka

R – spoljašnji poluprečnik savijenog komada

l_v – rastojanje između centara valjaka

d – prečnik valjaka

s – debljina lima

ϕ – ugao savijanja

ρ_n – poluprečnik krivine neutralne naponske linije

x – krak dejstva sile

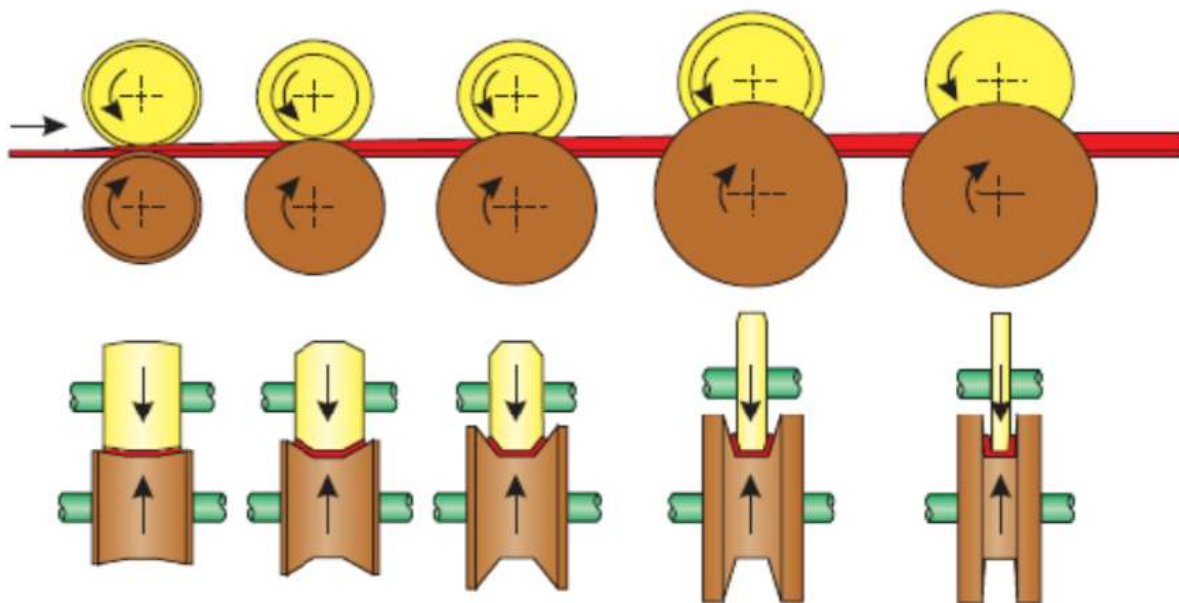
b – širina savijenog komada

PROFILNO SAVIJANJE LIMOVA POMOĆU VALJAKA

Masovna proizvodnja limenih profila veće dužine i talasastih limova izvodi se na mašinama za profilisanje limova pomoću valjaka. One mogu imati i više od 20 radnih pozicija sa odgovarajućim valjcima u zahvatu.

Iako traka kontinualno ide (često brzinom i preko 3 m/s) oblikovanje je postupno, višeoperaciono, sa relativno malim uglom savijene zone u jednoj operaciji. To omogućava dobijanje veoma složenih profila od lima. Izvode se i dopunske operacije (odsecanje itd.)

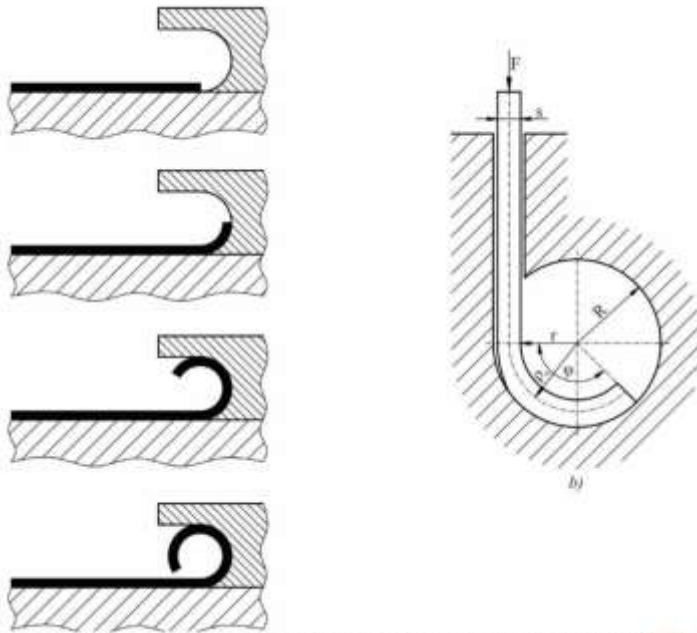
Šema profilisanja lima na valjcima:



KRUŽNO SAVIJANJE

Operacija kružnog zavijanja ima za cilj da se na komadu lima dobiju potpuno ili delimično zatvoreni delovi oblika cilindra ili konusa.

Zavijeni deo služi kao ležaj u raznim preklopnim slojevima (kao npr. šarke za spajanje dva ili više elemenata), a osim toga, kružnim zavijanjem se izbegavaju oštri rubovi komada.



Slika 2.20. Kružno zavijanje: a) faze zavijanja, b) analiza sila zavijanja[1]

Deformacioni rad kružnog zavijanja je:

$$W = M \cdot \varphi = F \cdot \rho_n \cdot \varphi,$$

pri čemu je: M – moment savijanja, φ – ugao savijanja, ρ_n – poluprečnik krivine neutralne naponske linije, r – unutrašnji poluprečnik, s – debljina lima.

Na osnovu prethodnog, sila kružnog zavijanja je:

$$F = \frac{M}{r + 0,5s}$$

DUBOKO IZVLAČENJE

Duboko izvlačenje predstavlja vid oblikovanja pri kome se od početnog nedeformisanog, ravnog oblika, dobija telo prostorno neprekidne konfiguracije. U suštini, to je oblik posude otvorene sa jedne strane, dok sa druge strane ima zatvoreno dno.

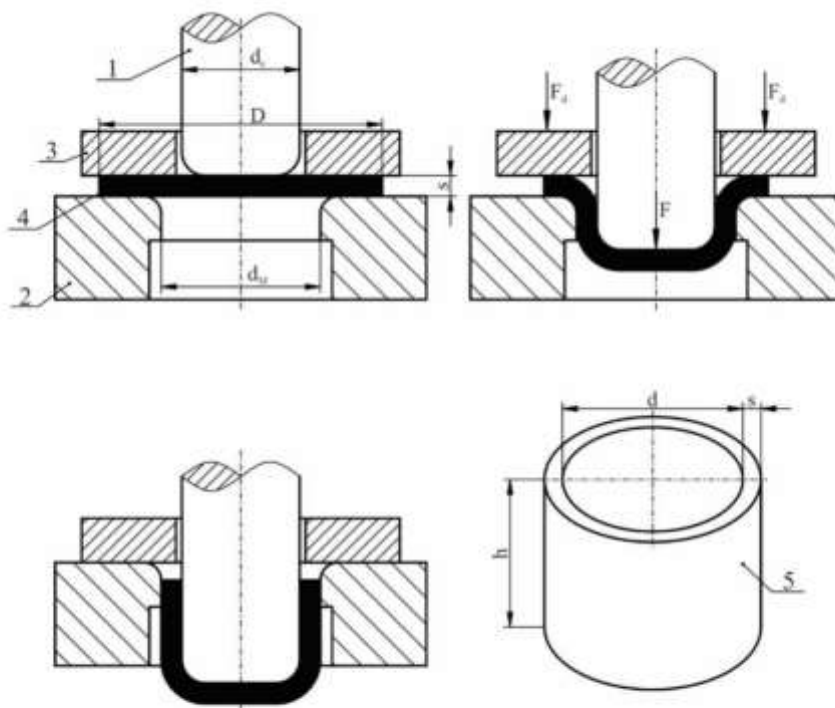
Obrada izvlačenjem se redovno vrši u hladnom stanju, izuzev u posebnim slučajevima kada se komad mora zagrevati, kao što su pogoršani uslovi obrade usled kojih se postiže mala plastičnost.

Prema ponašanju debljine lima tokom procesa oblikovanja, razlikuju se dva postupka:

- bez promene debljine lima;
- sa stanjenjem.

S, druge strane prema geometriji gotovog komada, razlikujemo:

- čisto duboko izvlačenje;
- duboko izvlačenje rotacionih delova;
- duboko izvlačenje kutijastih delova;
- duboko izvlačenje delova nepravilnog oblika.

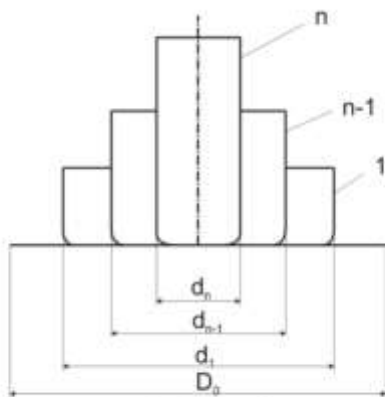


Slika 2.21. Šematski prikaz toka izvlačenja: 1) izvlakač, 2) prsten za izvlačenje, 3) ploča držača lima, 4) početni oblik materijala, 5) gotov komad (izvučeni deo)

Alati se sastoje iz tri glavna radna elementa (izvlakač, prsten za izvlačenje, držač lima) i skoro uvek imaju stubno vođenje gornje u odnosu na donju polovinu alata. Međutim, daleko više se koriste alati koji imaju objedinjenu operaciju prosecanja razvijenog stanja (npr. iz trake) sa dubokim izvlačenjem.

Za operacije dubokog izvlačenja, koriste se prese sa mehaničkim i hidrauličnim pogonom. Izbor prese treba da bude usaglašen sa konstrukcijom alata.

Broj operacija izvlačenja zavisi od debljine lima, visine gotovig dela , prečnika gotovog dela, radijusa zaobljenja itd.



Slika 2.26. Prikaz načina određivanja broja operacija izvlačenja

Stepeni izvlačenja za pojedine operacije su:

$$m_1 = \frac{d_1}{D_0}, m_2 = \frac{d_2}{d_1}, \dots, m_n = \frac{d_n}{d_{n-1}}.$$

U praksi je usvojeno da su stepeni izvlačenja za drugu i dalje operacije izvlačenja isti, pa sledi:

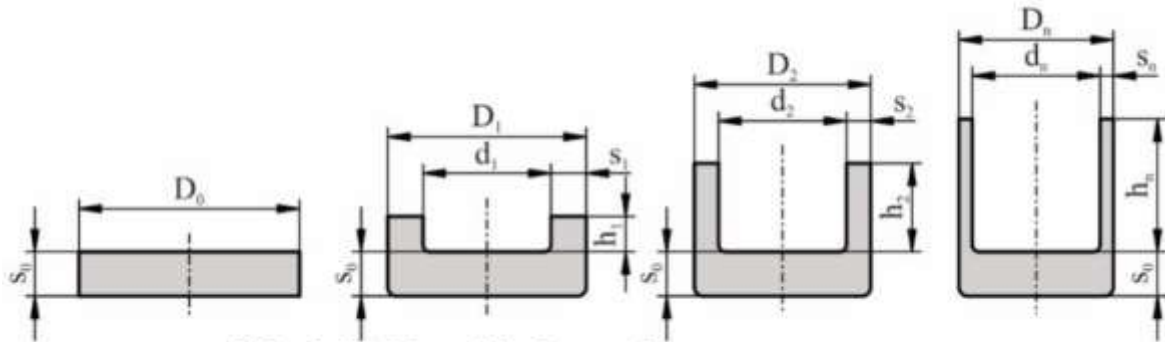
$$d_1 = m_1 D_0,$$

$$d_2 = m_2 d_1, \dots, d_n = m_1 m_2^{n-1} D_0$$

DUBOKO IZVLAČENJE SA STANJENJEM

U toku procesa obrade dubokim izvlačenjem sa stanjenjem, menja se prečnik komada i debljina zidova, dok debljina dna ostaje nepromenjena.

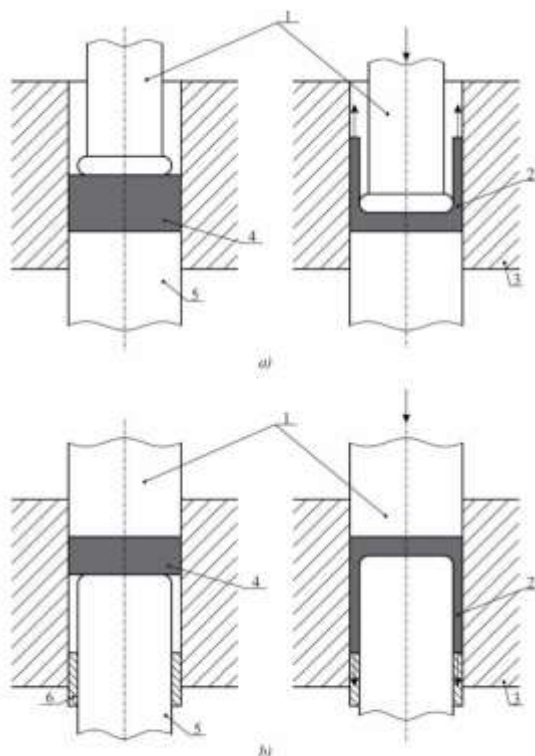
Na račun promene debljine, dolazi do istovremenog povećanja visine. Početni oblik je razvijeno stanje prečnika D_0 i debljine s_0 .



Slika 2.27. Faze dubokog izvlačenja sa stanjenjem

ISTISKIVANJE

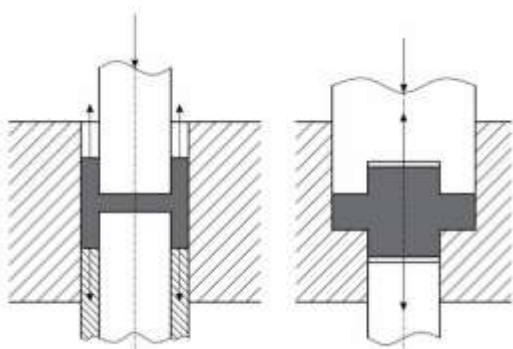
Istiskivanje predstavlja metodu obrade plastičnim deformisanjem, gde se materijal u obliku valjka, koluta i sl. istiskuje kroz zazor između istiskivača i kalupa (suprotnosmerno istiskivanje) ili kroz otvor u kalupu (istosmerno istiskivanje).



Slika 2.29. a) Suprotnosmerno, b) Istosmerno istiskivanje:
1) istiskivač, 2) obradak, 3) kalup, 4) pripremak, 5) izbacivač, 6) odstojna čaura

Najčešće se vrši istiskivanje rotacionih delova i to uglavnom u hladnom stanju.

Za izradu složenijih delova koristi se kombinovano istiskivanje, a razlika ovog postupka u odnosu na suprotnosmerno i istosmerno istiskivanje ogleda se u tome što se u ovom postupku jedan deo materijala kreće u istom, a jedan deo u suprotnom smeru u odnosu na smer kretanja istiskivača



Slika 2.30. Primeri kombinovanog istiskivanja

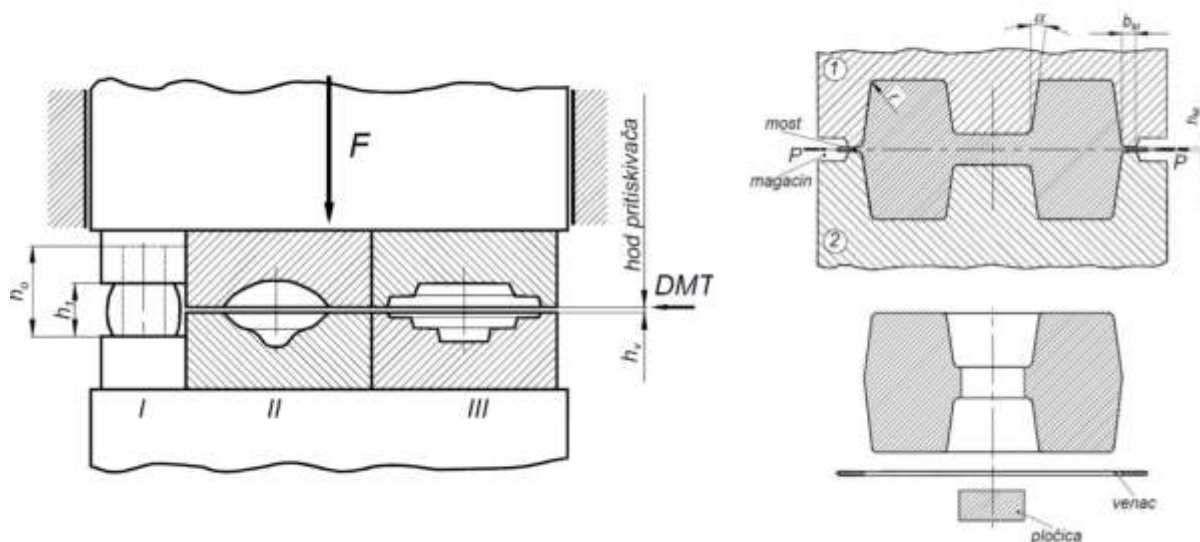
KOVANJE NA PRESAMA

Kovanje na kovačkim presama se najčešće izvodi u 3 faze:

- I – pripremno kovanje,
- II – prethodno kovanje,
- III – završno kovanje (kovanje sa vencem).

Glavne karakteristike kovanja na presi:

- alati za pojedine operacije su razdvojeni,
- površine gornjeg i donjeg kalupa se ne dodiruju,
- nije dozvoljeno preopterećenje prese,
- oblikovanje u svakoj operaciji se završava u samo jednom hodu mašine,
- parametar za dimenzionisanje prese je sila kovanja,
- prese poseduju sisteme za izbacivanje otkovaka iz gravure,
- rad sa manjom bukom i vibracijama u odnosu na kovačke čekiće,
- mogućnost automatizacije kovanja,
- minimalni zahtev u pogledu zagrevanja je korišćenje električnih peći.

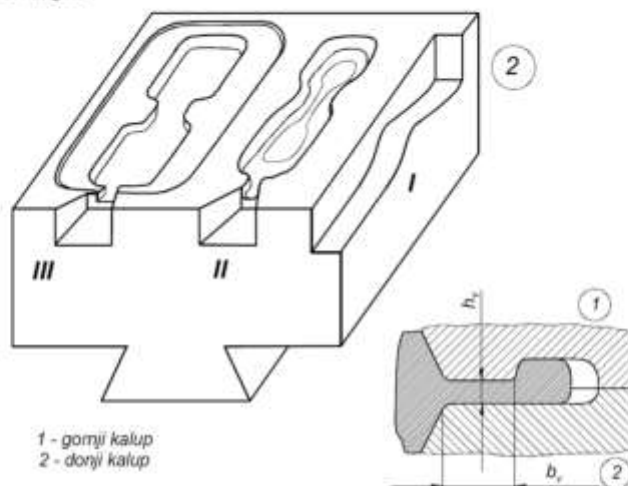


Slika 3.10. Prikaz kovanja na kovačkim presama: 1) gornji kalup, 2) donji kalup, P-P – podeona ravan, b_M , h_M – širina i visina mosta kanala za venac, $\alpha(0-7^\circ)$ – ugao nagiba kovačke gravure

KOVANJE NA ČEKIĆIMA

Kovanje na kovačkim čekićima se najčešće izvodi iz više (od jednog) udarca u svakoj operaciji (po svakoj gravuri) i to:

- I faza – pripremno kovanje,
- II faza – prethodno kovanje,
- III faza – završno kovanje.



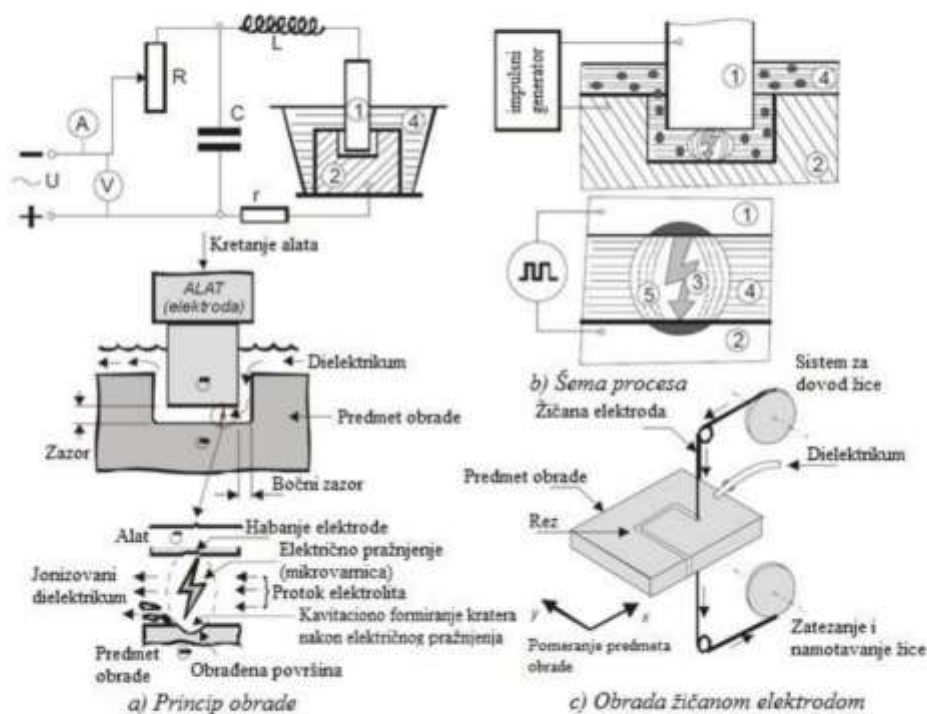
Slika 3.11. Pikaz kovanja na kovačkim čekićima

Karakteristike kovanja na kovačkom čekiću:

- kovanje u svakoj operaciji (gravuri) izvodi se iz više (od jednog) udaraca,
- sve gravure su smeštene u jednom (monolitnom) bloku (kalupu),
- pri kovanju (u završnim udarcima) dolazi do sudara površina gornjeg i donjeg kalupa,
- parametar za dimenzionisanje mašine je energija potrebna za kovanje (ili masa padajućih delova),
- nema posebnih zahteva u vezi zagrevanja (gasne plamene peći kao ekonomski najpogodnije rešenje se koriste najčešće),
- kod kovačkih čekića nema izbacivača,
- rad čekića praćen je velikom bukom i jakim vibracijama,
- cena čekića i ukupni troškovi mašine su znatno niži u odnosu na prese.

ELEKTROEROZIONA OBRADA

Elektroeroziona obrada (engl. *Electric Discharge Machining – EDM*) obuhvata postupke obrade metala gde se uklanjanje viška materijala ostvaruje serijom električnih pražnjenja periodičnog karaktera, nastalih između alata 1 – katode i predmeta obrade 2 – anode. Prilikom odgovarajućeg rastojanja alata i predmeta obrade ($0,005 - 0,5 \text{ mm}$) uspostavlja se električni luk 5 ili iskra. Pojavom luka ili iskre dolazi do jonizacije radne tečnosti 4 (dielektrika), formiranja stuba pražnjenja 3 (jonizujućeg stuba), topljenja i isparavanja čestica materijala predmeta obrade, pod dejstvom električne struje visoke gustine, koja protiče kroz stub u vrlo kratkom vremenskom periodu – intervalu.



Slika 4.1. Prikaz elektroerozione obrade – EDM[2]

Prekid pražnjenja tj. prekid strujnog kola dovodi do pucanja jonizujućeg stuba, izbacivanja rastopljenog materijala i njegovog odnošenja iz zone obrade. Hlađenje rastopljenog materijala i njegovo odnošenje ostvaruje se putem dielektrika koji cirkuliše. Naizmeničnim impulsnim

pražnjenjem obezbeđuje se razaranje materijala, prodiranje alata i formiranje profila koji odgovara profilu alata.

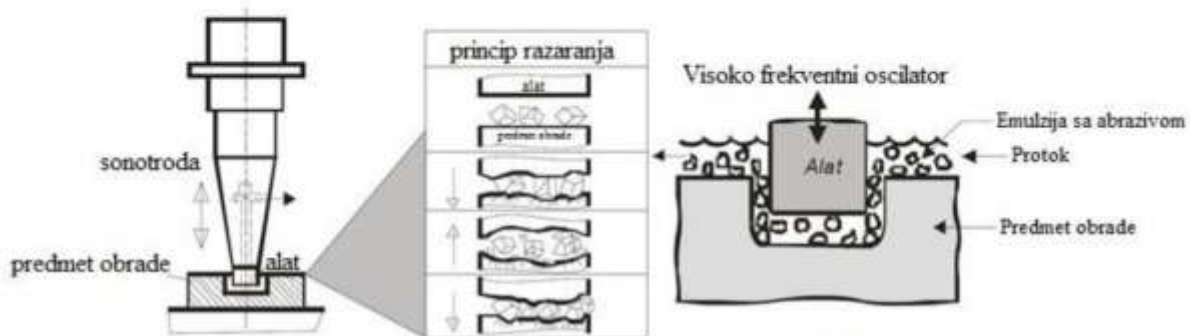
Primenom elektroerozionih postupaka obrade je moguće realizovati veliki broj proizvodnih operacija, korišćenjem profilisanog ili neprofilisanog alata u vidu pune ili žičane elektrode. Otuda se EDM postupci obrade dele na:

- EDM postupke obrade punim i
- EDM postupke obrade žičanim elektrodama.

Pri tome, postupak oblikovanja površina ostvaruje se kopiranjem alata ili uzajamnim kretanjem alata i predmeta obrade i neprofilisanog alata (žičane elektrode). EDM obrada se koristi i u slučajevima kada je mehanička obrada nemoguća ili krajnje otežana, pri obradi tvrdih materijala (čelika otpornih na visoke temperature, koroziju i sl.), izradi otvora malog prečnika ($0,1 - 1 \text{ mm}$), otvora i proizvoda složene konfiguracije, itd.

ULTRAZVUČNA OBRADA

Ultrazvučno oscilovanje alata može se koristiti za uklanjanje viška materijala (dimenzionalna obrada) ili poboljšanje postojećih konvencionalnih i nekonvencionalnih postupaka obrade – obrade rezanjem i deformisanjem, elektrohemijske, elektroerozione, hemijske i drugih postupaka obrade. U savremenim proizvodnim uslovima, postupci ultrazvučne obrade (engl. *Electric Ultrasonic Machining – EUS*) se mogu koristiti za izradu proizvoda različitih konfiguracija, posebno proizvoda od tvrdih i super tvrdih materijala (izolacioni materijali, elementi elektronike, ...).



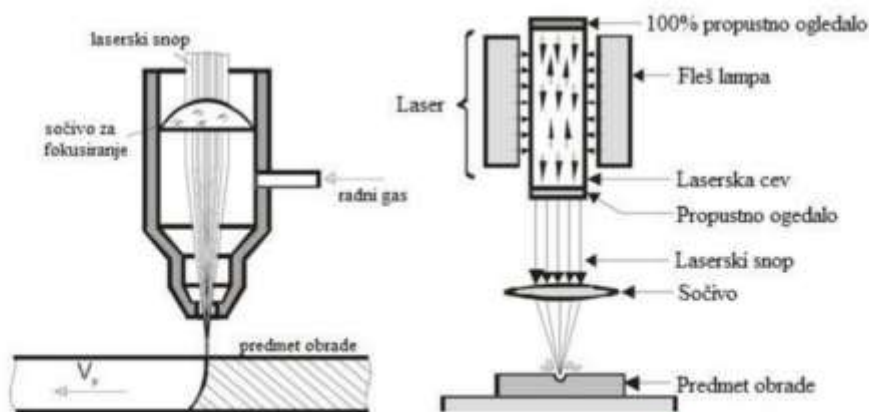
Slika 4.2. Prikaz ultrazvučne obrade – EUS[2]

Ultrazvučna obrada se odnosi na proces obrade kod koga se koriste zrna brusnog materijala (abraziva). Potrebna energija za proces obrade formira se preko izvora vibracija i prenosi na abrazivna zrna, koja u kontaktu sa predmetom obrade, koji je postavljen u kadu sa abrazivnom suspenzijom (najčešće vodeni rastvor brusnog materijala), dovode do razaranja površinskih slojeva i formiranja konfiguracije predmeta obrade u skladu sa konfiguracijom alata. Relativno visok intenzitet procesa obezbeđen je visokom frekvencijom oscilovanja alata ($18 - 25 \text{ kHz}$) i velikom količinom zrna brusnog materijala koja se nalaze u procesu. Usled prodiranja zrna abraziva, pri delovanju ultrazvučnih vibracija, u materijalu predmeta obrade dolazi do nastanka i širenja mikro i makropukotina, koje se međusobno presecaju formirajući mehanički oslabljen sloj, koji se relativno lako razara, uz pojavu produkata obrade.

Dva osnovna kretanja koja se javljaju pri ultrazvučnoj obradi su glavno i pomoćno kretanje. Alat izvodi glavno kretanje, zajedno sa izvorom vibracija koji omogućava oscilatorno kretanje alata, odnosno kretanje visoke frekvencije. Pomoćno kretanje alata ili predmeta obrade, uz odgovarajući pritisak alata ili predmeta obrade, obezbeđuje postepeno obrazovanje udubljenja i kopiranje oblika radnog dela alata.

OBRADA LASEROM

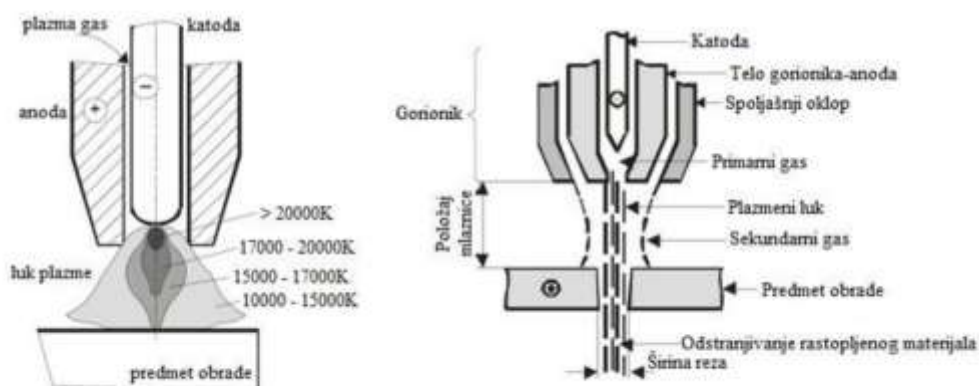
Pojava lasera dovela je do razvoja različitih postupaka obrade laserom (engl. *Laser Beam Machining - LBM*). Usmeravanjem laserskog snopa na predmet obrade može se izvesti veliki broj proizvodnih operacija, kao što su bušenje, sečenje, otvrdnjavanje, nanošenje prevlaka, zavarivanje, itd. Zahvaljujući isključivo visokom usmerenju – fokusiranju snopa (na površinu reda 10^{-6} mm^2), visokoj gustini energije snopa (do 10^8 kW/mm^2), mogućnosti jednostavnog upravljanja laserskim snopom i obrade u različitim sredinama, obrada laserom dobija sve veći značaj i ima niz prednosti. Za realizaciju proizvodnih operacija obrade laserom najčešće se koristi čvrsti rubinski ili gasoviti (CO_2) laserski uređaji.



Slika 4.3. Prikaz obrade laserom - LBM [2]

OBRADA PLAZMOM

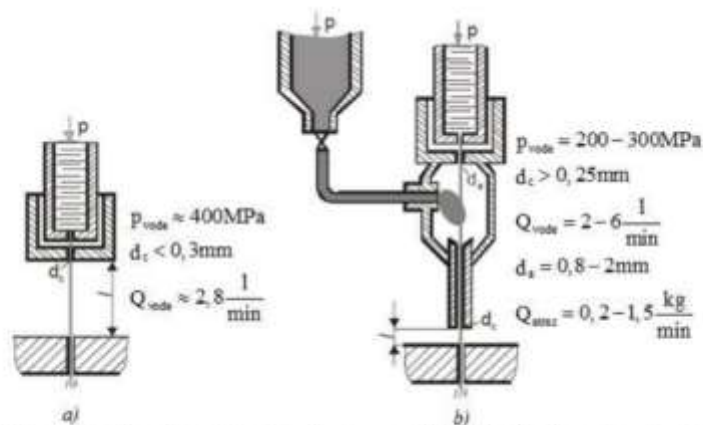
Obrada plazmom (engl. *Plasma Jet Machining - PJM*) se koristi pri realizaciji proizvodnih operacija koje zahtevaju visoku koncentraciju toplotne energije. Tu spadaju operacije topljenja, zavarivanja, sečenja metala i nemetala, nanošenja prevlaka, itd. Prilikom propuštanja plazma gasova, a u plazma gasove spadaju radni gasovi kao što su argon, vodonik, kiseonik i sl., preko električnog luka, stvorenog između anode i katode, formira se buktinja – plazma. Plazma predstavlja svaki materijal zagrejan na visoku temperaturu, koja je dovoljna da taj materijal pretvori u jonizovano gasno stanje (četvrto agregatno stanje). Materijal u tom stanju se ponaša po zakonima karakterističnim za normalne gasove, a njegove osnovne karakteristike pri tom su: veoma visoka temperatura pojedinih zona, energetska nestabilnost, elektroprovodljivost, vrlo velika brzina kretanja čestica koje sačinjavaju plazmu, itd.



Slika 4.4. Prikaz obrade plazmom - PJM [2]

OBRADA ABRAZIVNIM MLAZOM

Hidromehaničke metode obrade, obrade abrazivnim (AJM) ili vodenim mlazom (WJM), se koriste za hidromehaničko rezanje i oblikovanje lima. Predstavljaju metode kod kojih se uočava stalni napredak i zasnovane su na korišćenju energije rezanja, koju poseduje mlaz tečnosti velike brzine i visokog pritiska. Primenom hidrauličkih instalacija snage 8 – 80 kW, visokog pritiska (150 – 1000 MPa i više) i brzine strujanja tečnosti (voda sa ili bez abraziva), stvaraju se uslovi za sečenje i isecanje različitih konfiguracija na predmetima izrađenim od metala i nemetala.



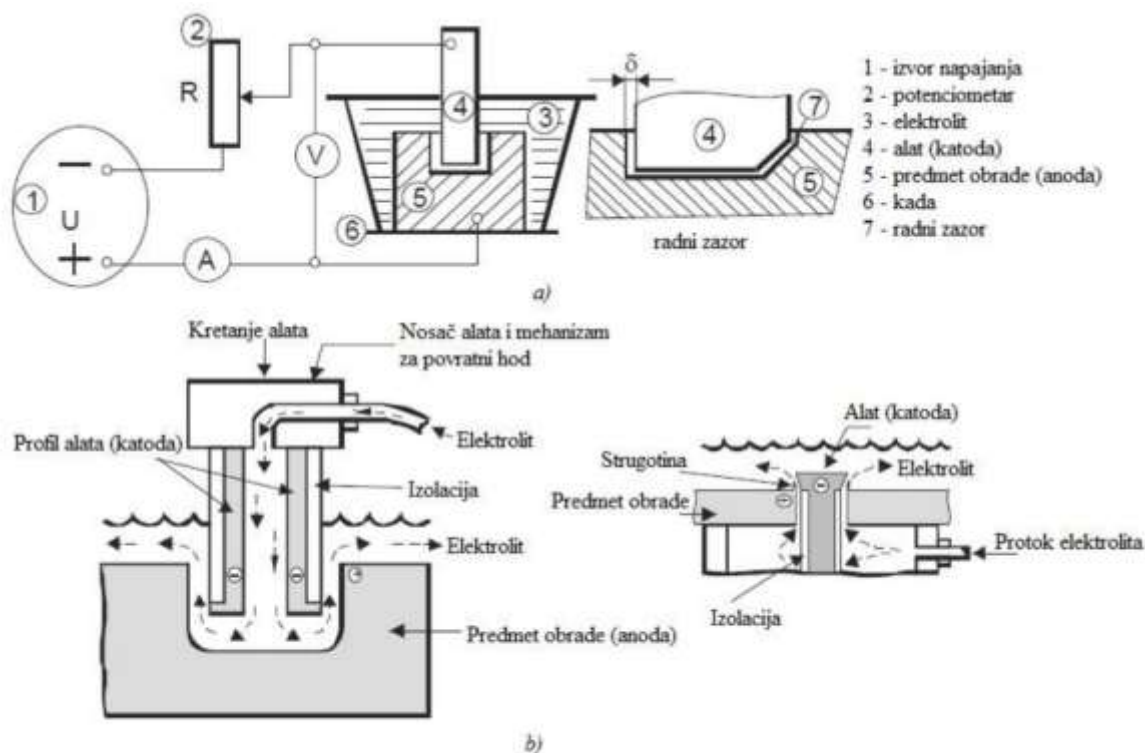
Slika 4.5. Prikaz: a) obrade vodenim mlazom – WJM, b) obrade abrazivnim mlazom[2]

ELEKTROHEMIJSKA OBRADA

Elektrohemijska obrada (engl. *Electric Chemical Machining - ECM*) se zasniva na hemijskim procesima, koji nastaju pri prolasku jednosmerne struje kroz električno kolo između elektroda potopljenih u elektrolit. Prolaskom jednosmerne struje na anodi, dolazi do anodnog rastvaranja metala i njegovog prelaska u elektrolit. Intenzivnim kretanjem elektrolita, rastvoreni metal se uklanja iz zone obrade, a predmet obrade poprima oblik alata – katode.

Osnovu procesa obrade čine procesi lokalnog anodnog rastvaranja pri prolasku jednosmerne struje visoke gustine (od nekoliko desetina do nekoliko stotina A/cm^2) kroz elektrolit (vodeni rastvori kiselina, baza i soli, najčešće natrijum hlorida) koji cirkuliše. Anodno rastvaranje površinskih slojeva predmeta obrade dovodi do izmene konfiguracije zazora (veličine $0,05 - 1\text{ mm}$) između elektroda, preraspodele gustine električne struje, izmene hidrodinamičkih i drugih parametara procesa. Intenzivnim kretanjem elektrolita obezbeđuje se odnošenje produkata anodnog rastvaranja iz zone obrade i kopiranje profila katode na površini anode, stabilnost i visoka proizvodnost obrade, odvođenje toplote i odgovarajuća vrednost ostalih parametara procesa [2].

Elektrohemijska obrada se koristi za izradu delova složene konfiguracije i male krutosti, obradu nepristupačnih površina i visokokvalitetnih materijala sklonih obrazovanju pukotina (silicijum, germanijum, berilijum i sl.), kao i realizaciju drugih proizvodnih operacija. ECM postupcima obrade se realizuju operacije bušenja otvora različitih profila, izrade površina složenih konfiguracija (gravure alata za kovanje, livenje, probijanje, prosecanje, presovanje, kompresorske i turbinske lopatice i sl.) [2].



Slika 4.6. Prikaz elektrohemijske obrade – ECM: a) princip obrade, b) elektrohemijsko čišćenje i brušenje [2]