

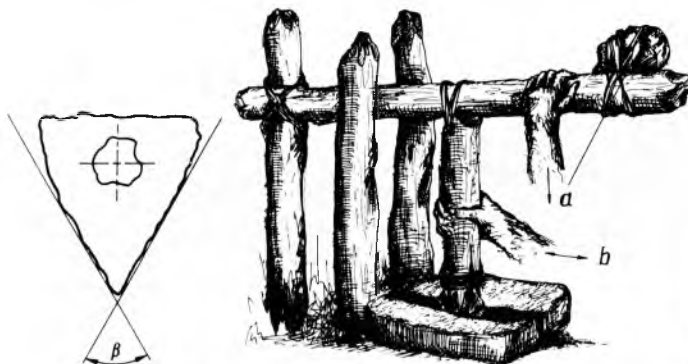
**POVRŠINSKA OBRADBA METALA ODVAJANJEM ČESTICA**, skup postupaka kojim se metalnom obratku daje određeni oblik i određena hrapavost površine. Zbog veoma velike upotrebe metala u različitim proizvodima obradba metala odvajanjem čestica posebno utječe ne samo na karakteristike proizvoda nego i na njihovu cijenu. Idealna bi se obradba metala postigla kad se čestice ne bi odvajale, već kad bi se one spojile u željeni oblik na dovoljno jednostavan i jeftin način. Idealnoj obradbi metala približavaju se lijevanje i postupci praškaste metalurgije.

Oblikovanje obradaka konvencionalnim postupcima, kao što su tokarenje, glodanje, bušenje i sl., tj. kad se materijal skida u obliku strugotine, naziva se obradba metala skidanjem strugotine. Strugotina ima definirani geometrijski oblik, dok

je čestica širi pojam i ne mora biti geometrijski definirana. Za skidanje strugotine primjenjuje se tzv. princip klina. Dio alata koji ima oblik klina utiskuje se u obradak tako da se skida strugotina. Princip klina čovjek je primjenjivao već u kameno doba.

Kamena sjekira imala je kut klina  $\beta$  (sl. 1) kao i današnji najmoderniji alati.

Postoje dokazi da je u mlade kameno doba oko  $\leftarrow 4000$ . god. čovjek upotrebljavao napravu za odrezivanje kamenim alatom (sl. 2). Jednom je rukom preko alata pritiskivao na obradak i time uzrokovao posmak u smjeru *a* dok je drugom rukom njihao alat u smjerovima *b*. Kružno gibanje alata za bušenje dobivalo se iz pravocrtnog gibanja luka (sl. 3; oko  $\leftarrow 1450$ ). Smisao vrtnje mijenjao se prema smjeru gibanja luka. Pilom se rezalo oko  $\leftarrow 500$ . god., što je, zajedno s kovanjem metala prikazano na sl. 4. Prva tokarena brončana posuda, nadena pored Tebe, izrađena je prije  $\leftarrow 26$ . god. U XVIII. stoljeću izrađeni su prvi alatni strojevi. Prva tokarilica izrađena je 1717, dok je prva blanjilica izrađena 1774. Poseban je problem bila pogonska snaga, jer je prilikom tokarenja otpor materijala mnogo veći nego pri piljenju i bušenju. Za obradbu cilindra (1776. god., sl. 5) glavno je gibanje ostvareno mlinskim kolom. Glodalica je izrađena 1818, revolverska tokarilica 1845, univerzalna glodalica 1862, a prva brusilica za cilindrično brušenje 1864. Prvo važnije istraživanje na području obradbe metala skidanjem strugotine obavljao je u tajnosti od 1880. do 1906. F. W. Taylor. Najvažniji rezultati tih istraživanja bili su: pronalazak brzoreznih čelika i tzv. Taylorove jednadžbe.



Sl. 1. Kamena sjekira.  $\beta$  kut klina

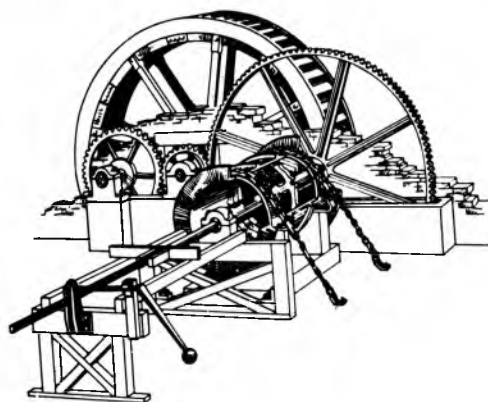
Sl. 2. Neolitski uređaj za obradbu kamenim alatom. *a* pomoćno gibanje, *b* glavno gibanje



Sl. 4. Grčki kovač i različiti ručni alati (oko  $\leftarrow 500$ . god.)



Sl. 3. Bušenje pomoću luka kojim se pravocrtno gibanje pretvara u kružno (oko  $\leftarrow 1450$ . god.)

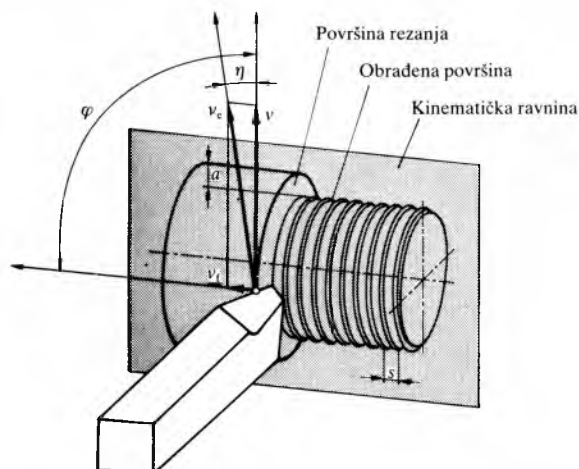


Sl. 5. Unutrašnja obradba cilindra s pogonom pomoću mlinskog kola (prema Wilkinsonu, 1776. god.)

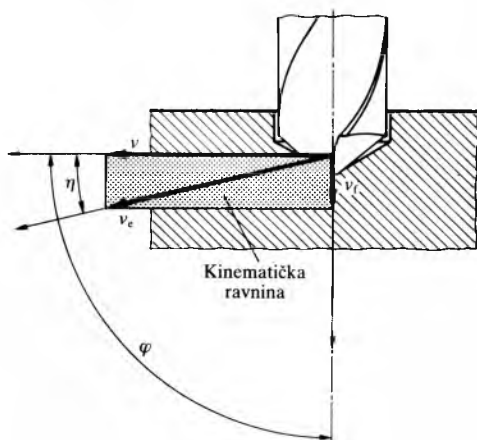
## OSNOVE OBRADBE METALA SKIDANJEM STRUGOTINE

**Kinematika postupka obradbe skidanjem strugotine.** U JUS K.A2.010 razrađena je kinematika postupaka obradbe metala skidanjem strugotine. Definicije gibanja i brzina odnose se na nepokretni obradak. Osnovna gibanja jesu: glavno gibanje, pomoćno gibanje i rezultatno gibanje.

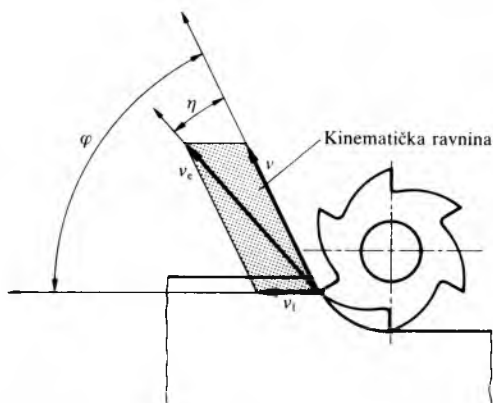
**Glavno gibanje** omogućuje stvaranje strugotine, a vrši ga alat ili obradak. Glavno gibanje može biti kružno, pravocrtno, neprekidno i prekinuto. Pravac glavnog gibanja (sl. 6–10) jest trenutni pravac glavnog gibanja u promatranoj točki oštrice s obzirom na obradak. Brzina glavnog gibanja  $v$  (brzina rezanja) trenutna je brzina promatrane točke oštrice s obzirom na obradak.



Sl. 6. Kinematika tokarenja.  $v$  brzina rezanja,  $v_f$  posmična brzina,  $v_e$  rezultatna brzina,  $\varphi$  kut pravca pomoćnog gibanja,  $\eta$  kut pravca glavnog gibanja,  $a$  dubina rezanja,  $s$  posmak



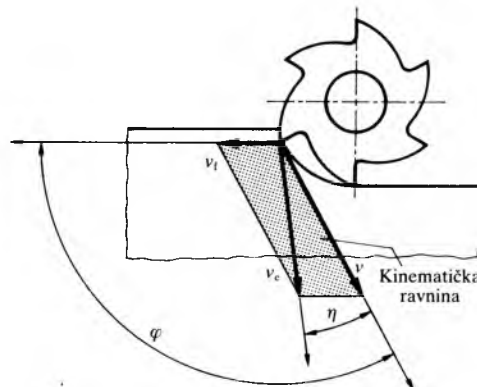
Sl. 7. Kinematika bušenja (oznake imaju isto značenje kao na sl. 6)



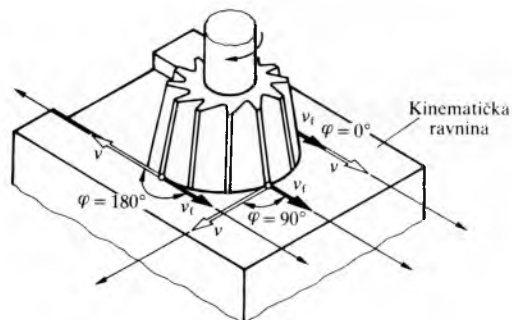
Sl. 8. Kinematika protusmjernog obodnog glodanja (oznake kao na sl. 6)

**Pomoćno gibanje** omogućuje s glavnim gibanjem neprekidno ili prekinuto stvaranje strugotine, a izvršava ga alat ili obradak. Pravac pomoćnog gibanja trenutni je pravac pomoćnog gibanja promatrane točke oštrice s obzirom na obradak. Brzina pomoćnog gibanja  $v_f$  (posmična brzina) trenutna je brzina promatrane točke oštrice s obzirom na obradak.

**Rezultatno gibanje** dobije se geometrijskim zbrajanjem glavnog i pomoćnog gibanja. Pravac rezultatnog gibanja (sl. 6, 7, 8 i 9) trenutni je pravac promatrane točke oštrice. Brzina rezultatnog gibanja  $v_e$  trenutna je brzina promatrane točke oštrice.



Sl. 9. Kinematika istosmjernog obodnog glodanja (oznake kao na sl. 6)



Sl. 10. Kinematika čeonog glodanja ili čeonog brušenja.  $v$  brzina rezanja,  $v_f$  posmična brzina,  $\varphi$  kut pravca pomoćnog gibanja

Kut pravca pomoćnog gibanja  $\varphi$  kut je između pravca pomoćnog i glavnog gibanja, mjereno u kinematičkoj ravnini. Kut pravca glavnog gibanja  $\eta$  kut je između pravca glavnog i rezultatnog gibanja mjereno u kinematičkoj ravnini.

Za sve postupke vrijedi:

$$\tan \eta = \frac{\sin \varphi}{\frac{v}{v_f} + \cos \varphi} \quad (1)$$

Kad je  $\varphi = 90^\circ$ , izraz (1) poprima oblik

$$\tan \eta = \frac{v_f}{v} \quad (2)$$

Za različite postupke obradbe kut  $\varphi$  može imati različite vrijednosti. Tako npr. za čeonu glodanje ili čeonu brušenje kut  $\varphi$  iznosi  $0 \dots 180^\circ$ .

Razlikuju se sljedeća područja brzine rezanja: male brzine rezanja  $0 \dots 33$  m/min; brzine rezanja koje se danas primjenjuju u industrijskim uvjetima  $33 \dots 650$  m/min; velike brzine rezanja  $650 \dots 2000$  m/min; vrlo velike brzine rezanja  $2000 \dots 20000$  m/min; ultravelike i balističke brzine rezanja  $20000 \dots 160000$  m/min.

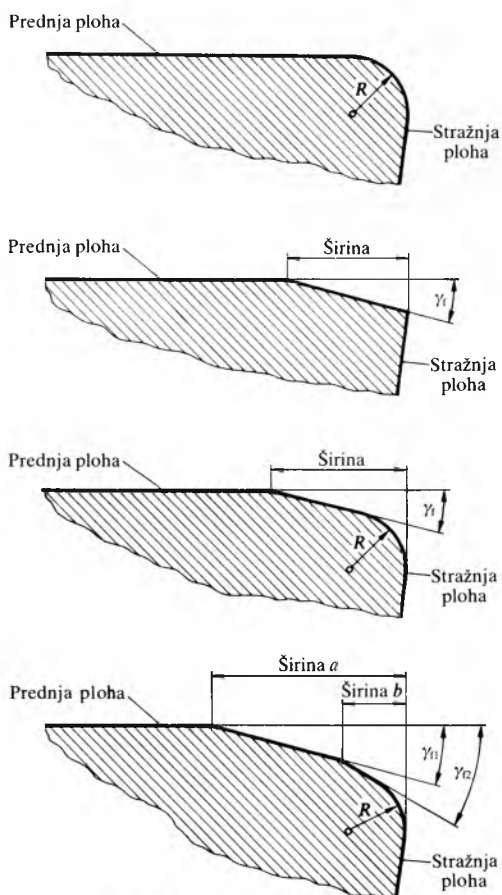
Za obradbu čelika i sivog lijeva najčešće se primjenjuje područje brzina rezanja  $33 \dots 650$  m/min, dok se brzine  $650 \dots 2000$  m/min upotrebljavaju za obradbu aluminija, alumi-

nijskih legura, bronce, bakra, mjedi, zlata i srebra, i to najčešće pomoću dijamantnog alata.

U fazi su istraživanja obradbe vrlo velikim brzinama i ultravelikim brzinama. Za velike brzine rezanja potrebne su velike brzine vrtnje, pa su tada najveći problem ležaji s glavnim vretenom.

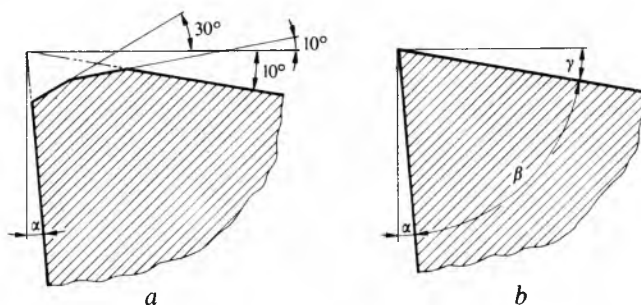
Za obradbu titana najprikladnije su brzine rezanja  $v = 8000 \dots 115000 \text{ m/min}$ . Budući da su potrebni alati relativno malog promjera, u fazi je istraživanja glavno vreteno s ležištem koje bi imalo brzinu vrtnje  $\sim 70000 \text{ min}^{-1}$ . Ležaji imaju prednapregnute šuplje valjke. Za obradbu balističkim brzinama rezanja alat ili obradak postavljaju se na topovsko tane. Ta su istraživanja još u toku. Očekuje se da će se primjenom novih materijala za alate (SIALON, KION i sl.) područje brzina rezanja koje se danas primjenjuju u industrijskim uvjetima ( $v = 33 \dots 650 \text{ m/min}$ ) proširiti prema većim brzinama rezanja.

**Geometrijski oblik alata.** Za bolju eksploataciju obradnog sustava, osim materijala alata, važan je i rezni geometrijski oblik alata (v. *Alati*, TE 1, str. 82; JUS K.A2.010). S obzirom na način pričvršćivanja rezne pločice postoje alati sa zalemljenom pločicom i alati s mehanički pričvršćenom pločicom. Oštrenjem alata sa zalemljenom pločicom mogu se postići bilo koji rezni kutovi, dok se alati s mehanički pričvršćenom pločicom ne oštire, pa je oblik alata određen reznom pločicom i držačem pločice. Za alate s mehanički pričvršćenom pločicom posebna se pažnja posvećuje obliku neposredno uz oštricu. Zato su oštrice reznih pločica za takve alate kvalitetnije od oštrica koje se dobiju oštrenjem alata sa zalemljenom pločicom u industrijskim uvjetima. Tako se npr. oštrica pločice rezne keramike najčešće oblikuje zaobljeno (sl. 11).



Sl. 11. Oblikovanje oštrice alata

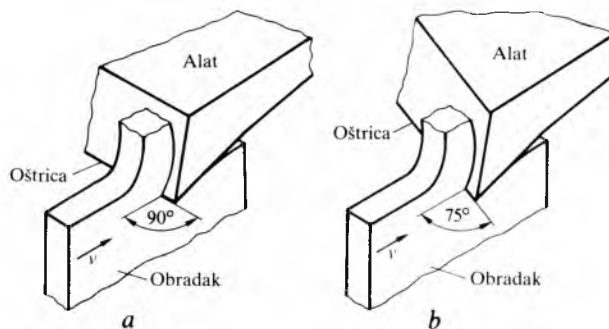
Primjenom fasete pri čeonom glodanju može se povećati postojanost alata čak za  $\sim 16$  puta s obzirom na alat bez fasete s pozitivnim prednjim kutom  $\gamma$  kad je udarac pri ulazu zuba upravo po glavnoj oštrici (sl. 12).



Sl. 12. Pločica tvrdog metala. a s dvostrukom fasetom, b bez fasete

Budući da oštrice mehanički pričvršćenih pločica proizvođač alata oblikuje brušenjem koje ne uzrokuje napukline pločice, nije potrebno naknadno oštrenje kad se oštrica istroši, a primjena je tih alata ekonomičnija nego alata sa zalemljenim pločicama.

**Stvaranje strugotine i naljepka.** Pri odradbi metala skidanjem strugotine alat prodire u obradak i skida strugotinu s obratka. Kad alat prodire u obradak, oštrica alata može biti pod kutom od  $90^\circ$  prema smjeru brzine (ortogonalna obradba skidanjem strugotine, sl. 13a), ili je oštrica alata pod nekim drugim kutom prema smjeru brzine rezanja (neortogonalna obradba, sl. 13b). Strugotina se stvara približno jednako pri ortogonalnoj i neortogonalnoj obradbi. Dvije su osnovne vrste strugotine: *trgana strugotina* (sl. 14a) i *tekuća strugotina* (sl. 14b). Kad je brzina rezanja malena, a materijal obratka žilav, može se stvoriti naljepak (lažna oštrica, sl. 14c). Ako se obrađuje u uvjetima koji su između uvjeta za stvaranje trgane i tekuće strugotine, nastat će *naslagana strugotina* (sl. 15b). Postoje različita mišljenja da li smicanje nastaje u jednoj ravni ili u širem području, u tzv. smičnoj zoni (sl. 16). Izgleda da pri manjim brzinama rezanja, a posebno kad je materijal obratka žaren, smicanje nastaje u smičnoj zoni, dok se pri velikim brzinama rezanja smicanje pojavljuje u suženom pojasu. Osim toga, o obliku alata ovisi odvijanje smicanja. Kad je prednji kut  $\gamma$  manji, veća je vjerojatnost da će se pojaviti smična ravina (sl. 17a) kad je na prijelazu s površine obratka na strugotinu mali polumjer zaobljenja. Uz velik prednji kut smicanje nastaje u smičnoj zoni (sl. 17b).



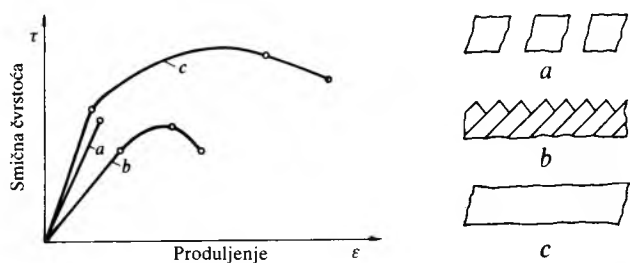
Sl. 13. Odnos oštrice alata prema smjeru brzine rezanja. a ortogonalna obradba: smjer brzine rezanja okomit na oštricu alata, b neortogonalna obradba: smjer brzine rezanja nije okomit na oštricu alata

Trgana strugotina stvara se kad je materijal obratka krhak (sl. 15a). Također, mali prednji kut, mala brzina rezanja i velika nedeformirana debljina strugotine  $h$  pogoduje stvaranju trgane strugotine. Ako se odlomci trgane strugotine drže zajedno, dobiva se naslagana strugotina. Prema C. A. van Luttervelt, ako nastaje naslagana strugotina, stvaraju se dvije paralelne smične ravnine, tj. prva i druga smična ravina. Međutim, ako se još stvara i naljepak, nastaju još dvije smične ravnine, tj. treća i četvrta smična ravina (sl. 18).

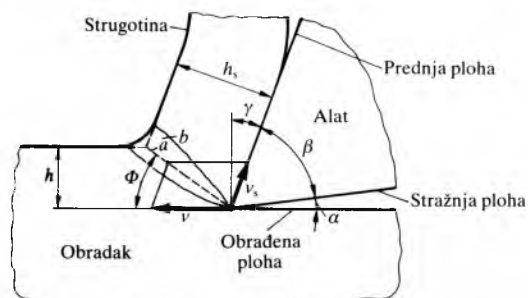
Primjenjujući model primarne i sekundarne smične zone H. Bao i M. G. Stevenson donekle su razjasnili osnovni mehanizam stvaranja strugotine različitim gradijentom napre-



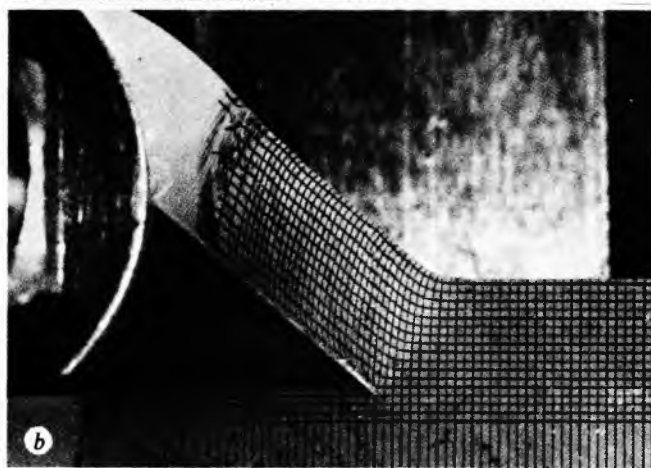
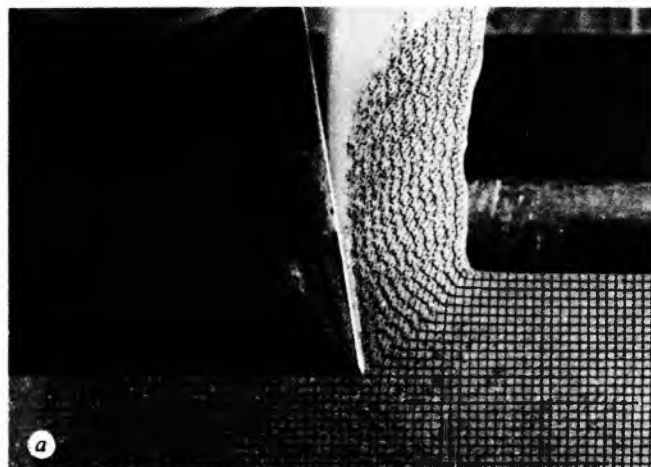
Sl. 14. Vrsta strugotine. *a* trgana strugotina, *b* tekuća strugotina, *c* tekuća strugotina s naljepkom



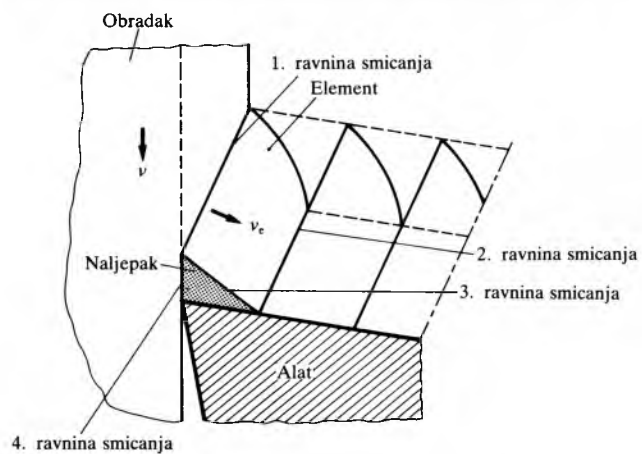
Sl. 15. Ovisnost vrste strugotine o mehaničkim svojstvima materijala obratka prikazanih dijagramom. *a* trgana strugotina, *b* naslagana strugotina, *c* tekuća strugotina



Sl. 16. Stvaranje strugotine pri ortogonalnoj obradbi. *a* smična ravнина, *b* smična zona; *h* nedeformirana debljina strugotine, *h<sub>s</sub>* debljina strugotine,  $\Phi$  kut smicanja, *v* brzina rezanja, *v<sub>s</sub>* brzina strugotine

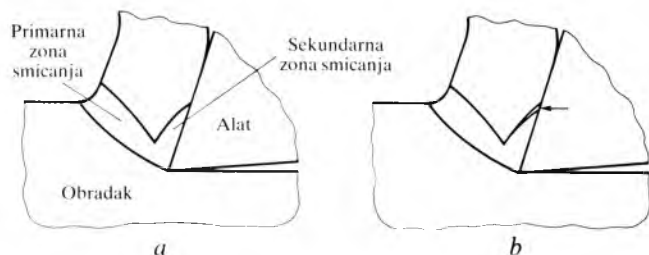


Sl. 17. Utjecaj prednjeg kuta  $\gamma$  na smicanje. *a* smična ravlina, *b* smična zona



Sl. 18. Ravniline smicanja kod naslagane strugotine

zanja u strugotini i u sekundarnoj smičnoj zoni (sl. 19). Takvi uvjeti nastaju pri manjim brzinama rezanja, npr. tokarenjem čelika brzinom 20...55 m/min. Periodično naljepak puca i jedan dio ostaje zavaren na strugotini, a drugi dio na obratku. Neposredno prije pucanja (sl. 14c) naljepak je najveći i stvara najveću dubinu brazde na obrađenoj površini, što povećava hrapavost obrađene površine. U praksi bi trebalo izbjegavati uvjete u kojima se stvara naljepak, a to se postiže povećanjem brzine rezanja.



Sl. 19. Stvaranje naljepka. a primarna i sekundarna zona smicanja prije stvaranja naljepka, b početak stvaranja naljepka

Omjer površine presjeka strugotine  $A_s$  i površine presjeka nedeformirane strugotine  $A$  naziva se faktor sabijanja i iznosi

$$\xi = \frac{A_s}{A} \quad (3)$$

Ako je  $b$  debljina obratka, tada je uz ortogonalnu obradbu (sl. 16)

$$\xi = \frac{h_s}{h} \cdot \frac{b_s}{b} = \frac{h_s}{h}, \quad (4)$$

jer je širenje strugotine zanemarivo, tj.  $b_s \approx b$ . Faktor sabijanja izražen brzinom strugotine  $v_s$  i brzinom rezanja  $v$  (sl. 16) iznosi

$$\xi = \frac{h_s}{h} = \frac{v}{v_s} \quad (5)$$

Izraz (5) slijedi iz jednadžbe kontinuiteta. Dakle smični kut  $\Phi$  ovisi o prednjem kutu  $\gamma$  i o faktoru sabijanja  $\xi$ , pa je

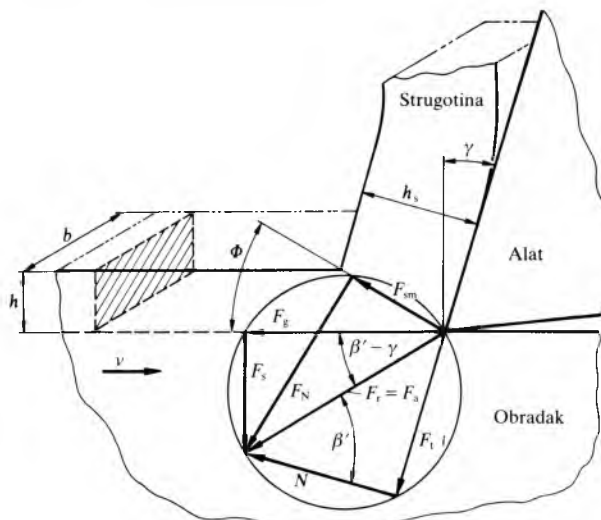
$$\tan \Phi = \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \quad (6)$$

Faktor sabijanja strugotine ovisi o više činilaca. Među njima su najutjecajniji: materijal obratka (što je mekši materijal obratka, veće je  $\xi$ ), prednji kut  $\gamma$  (što je veće  $\gamma$ , manje je  $\xi$ ), debljina strugotine  $h$  (što je veće  $h$ , manje je  $\xi$ ), brzina rezanja (pri tokarenju srednje čvrstog čelika ona više utječe do brzine rezanja od 100 m/min; što je veće  $v$ , to je manje  $\xi$ ). Također je važan smični kut  $\Phi$ . Njegov utjecaj na silu rezanja i na odrezivanje dobiva se pomoću modela tanke zone.

**Model tanke zone.** U modelu se tanke zone (M. E. Merchant) pretpostavlja: a) da je alat deformiran i da ne postoji trenje između alata i obratka, b) da je deformacija dvodimenzionalna i da nema širenja strugotine u stranu, c) da su naprezanja u zoni smicanja jednoliko raspoređena i d) da je rezultantna sila  $F_r$ , koja djeluje na strugotinu u zoni smicanja, jednaka po iznosu, kolinearna i suprotnog smjera od sile kojom alat djeluje na strugotinu. Rezultantna sila rezanja  $F_r$  može se rastaviti na tri načina (sl. 20). Budući da rezultantna sila rezanja  $F_r$  mijenja vrijednost i smjer prema uvjetima obradbe, za ortogonalnu obradbu najčešće je podesno rastaviti silu  $F_r$  na glavnu silu rezanja  $F_g$  i posmičnu silu rezanja  $F_s$  za mjerenje pomoću dinamometra, koje uz gornje pretpostavke iznose

$$F_g = \frac{h b \tau \cos(\beta' - \gamma)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \beta' - \gamma)}, \quad (7)$$

$$F_s = \frac{h b \tau \sin(\beta' - \gamma)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \beta' - \gamma)} \quad (8)$$



Sl. 20. Sile rezanja pri ortogonalnoj obradbi.  $F_g$  glavna sila,  $F_s$  posmična sila,  $F_r = F_a$  rezultantna sila,  $F_{sm}$  smična sila,  $F_n$  normalna sila smicanja,  $F_t$  sila trenja,  $N$  normalna sila trenja,  $\gamma$  prednji kut,  $\beta'$  kut trenja,  $\Phi$  smični kut,  $h$  nedeformirana debljina strugotine,  $h_s$  debljina strugotine,  $b$  širina nedeformirane strugotine,  $v$  brzina rezanja

To vrijedi uz pretpostavku da je smično naprezanje jednoliko raspoređeno u smičnoj ravni. Ako su poznate vrijednosti veličina  $h$ ,  $b$  i  $\gamma$  (sl. 20), smično naprezanje  $\tau$ , kut trenja  $\beta'$  između alata i strugotine i smični kut  $\Phi$ , mogu se izračunati  $F_g$  i  $F_s$  iz (7) i (8). O smičnom kutu ovisi kakva će biti deformacija (sabijanje strugotine i sl.) kad se obrađuje skidanjem strugotine. Međutim, još se uvijek ne može samo teorijski odrediti smični kut  $\Phi$ . Da bi se odredio smični kut, primjenjuje se princip minimalne energije, pa je

$$\frac{dF_g}{d\Phi} = 0, \quad (9)$$

ako je brzina rezanja konstantna. Iz (7) i (9) slijedi da je

$$\Phi = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\beta' - \gamma). \quad (10)$$

Uvrštenjem (10) u (7) i (8) dobije se

$$F_g = 2 h b \tau \cot \Phi, \quad (11)$$

$$F_s = h b \tau (\cot^2 \Phi - 1). \quad (12)$$

Pri tom se pretpostavlja da je naprezanje  $\tau$  jednako smičnoj čvrstoći materijala obratka.

Jednadžbe (7) i (8) vrijede samo ako smicanje nastaje u smičnoj ravni. Jednadžbe (10), (11) i (12) dobivene su uz pretpostavku da su  $\beta'$  i  $\tau$  konstante i da ne ovise o  $\Phi$ . Pokusima je, međutim, dokazano da ta pretpostavka u potpunosti ne odgovara stvarnosti, tj.  $\beta'$  i  $\tau$  ovise o  $\Phi$ .

Na temelju pokusima dobivenih vrijednosti faktora sabijanja  $\xi$  (5), primjenom jednadžbe (6) može se odrediti smični kut  $\Phi$ .

Koeficijent trenja može se odrediti pomoću sila  $F_t$  i  $N$ , odnosno pomoću sila  $F_g$  i  $F_s$  koje se mogu dobiti mjerenjem (sl. 20), pa je

$$\mu = \tan \beta' = \frac{F_s + F_g \tan \gamma}{F_g - F_s \tan \gamma} \quad (13)$$

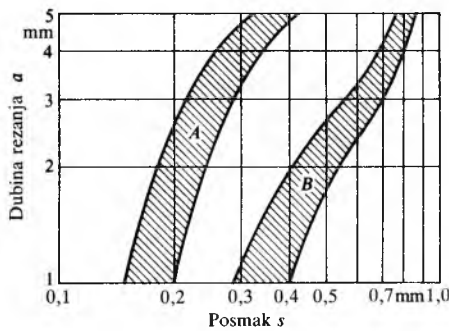
To vrijedi uz pretpostavku da su sile jednoliko raspoređene po površinama koje se taru. Međutim, iz kasnijih istraživanja proizlazi da su uvjeti u obradbi metala skidanjem strugotine znatno složeniji, pa analiza modela tanke zone samo kvalitativno tumači stvaranje strugotine.

**Utjecajne veličine na oblik strugotine.** Oblik strugotine posebno je važan za uspješnu eksploataciju obradnih sustava. Često nepovoljna strugotina stvara posebne teškoće, kao što su zaustavljanje stroja, lom alata i sl. Tekuća je strugotina najnepovoljnija, dok su kovčasta isprekidana, spiralno ispre-



kidana i ostale isprekidane strugotine povoljnije za obradbu. Alatni stroj treba imati dobru zaštitu koja ne dopušta frcanje strugotine. Oblik strugotine ovisi o režimu obradbe, obliku i materijalu alata, materijalu obratka, stepenici ili utoru za lomljenje strugotine, trošenju alata i dr.

**Utjecaj režima obradbe, oblika i trošenja alata.** Brzina rezanja bitno utječe na temperaturu strugotine o kojoj ovisi žilavost strugotine. O posmaku i prislonom kutu  $\alpha$  ovisi debljina strugotine  $h_s$ . S povećanjem debljine strugotine povećava se lomljivost strugotine. Utjecaj debljine strugotine ovisi o dubini rezanja. Zbog toga je za lomljenje strugotine bitan omjer dubine rezanja i posmaka  $a/s$ , odnosno omjer širine i debljine neodrezane strugotine  $b/h$  (sl. 21).



Sl. 21. Utjecaj dubine rezanja i posmaka na stvaranje podesne strugotine pri brzini rezanja  $v = 150$  m/min. A čelik za automate, B C.1530

Pri dovoljno velikoj brzini rezanja alat se više troši na prednjoj plohi, pa se stvara podesnija strugotina. Veliki pozitivan prednji kut  $\gamma$  može utjecati na stvaranje nepovoljne strugotine.

**Utjecaj materijala obratka.** Materijal obratka, odnosno njegova čvrstoća i žilavost veoma utječu na stvaranje i na lomljenje strugotine. Na stvaranje strugotine utječe mikrostruktura materijala. Tako, npr., tvrde faze u metalnoj osnovi stvaraju nejednoličnu strugotinu, jer se tada ona lakše lomi. Usmjerena mikrostruktura materijala obratka dobivena pret-hodnim valjanjem može utjecati na oblik strugotine. Legirni elementi također veoma utječu na lomljenje strugotine; tako se, npr., čeliku za obradbu na automatima dodaju sumpor i olovo da bi se povećala lomljivost strugotine.

**Utjecaj alata.** Na lomljenje strugotine najviše utječe utor ili stepenica za lomljenje strugotine na prednjoj plohi alata. Alati s mehanički pričvršćenim pločicama mogu imati iznad rezne pločice dodatnu pločicu (lomač strugotine), koja utječe na zakrivljenost strugotine pa se strugotina lomi. Osim toga, rezna pločica ima jedan ili više utora na različitim udaljenostima od oštice, koji također utječu na zakrivljenost, a time i na lomljenje strugotine. Utor bliži oštici lomi strugotinu kad se obrađuje s manjim posmacima, dok uz veće posmake strugotinu lomi dublji i udaljeniji utor od oštice. Ako alat nema mehanički pričvršćenu pločicu, izrađuje se na prednjoj plohi alata stepenica paralelna s glavnom ošticom alata, koja je duboka 0,5...1 mm i široka oko deset puta više od upotrijebljenog posmaka.

**Mehaničke pojave.** Utiskivanjem alata u obradak skida se strugotina s obratka, a pri tom materijal obratka pruža otpor prodiranju alata. Utrošena mehanička energija pretvara se u toplinu. Otpor prodiranju alata naziva se **silom rezanja**.

**Komponente sile rezanja.** Smjer i vrijednost sile rezanja  $F_r$  kojom obradak djeluje na prednju i stražnju plohu alata ovisi o materijalu obratka, obliku i materijalu alata, te režimu obradbe. Sila rezanja najjednostavnije se određuje pomoću komponenata:  $F_g$  glavna sila,  $F_s$  posmična sila i  $F_p$  natražna ili pasivna sila rezanja (sl. 22). Ako alat ima više oštica, npr. glodalo, svrdlo i sl., ukupna je rezultatna sila rezanja vektorski zbroj rezultatnih sila rezanja pojedinih oštica. Posebno su važne komponente sile koje se nalaze u kinematičkoj ravni:  $F_a$  aktivna sila,  $F_g$  glavna sila i  $F_s$  posmična sila.

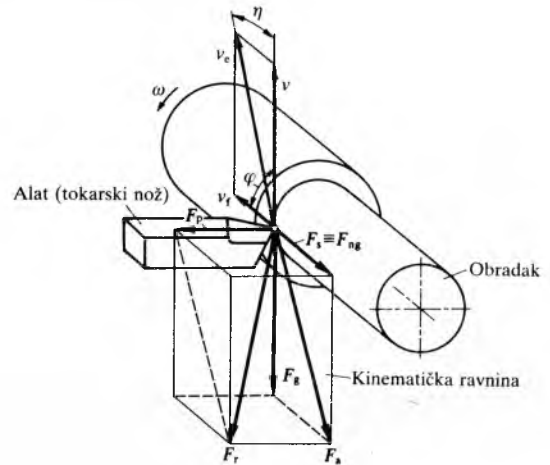
Za određivanje potrebne snage za obradbu skidanjem strugotine na oštici alata, tzv. snage rezanja  $P_r$ , ne uzima se u obzir natražna sila  $F_p$ , jer je okomita na glavno i posmično gibanje i ne obavlja rad. Također  $F_s$  malo utječe na  $P_r$ , jer je posmična brzina  $v_t$  vrlo malena s obzirom na brzinu rezanja  $v$ , tako da je

$$P_r = \frac{F_g v}{60000}, \quad (14)$$

gdje je  $P_r$  u kW, a  $F_g$  u N i  $v$  u m/min. Budući da je kut pravca glavnog gibanja  $\eta$  vrlo malen, to je brzina rezanja  $v$  približno jednaka brzini rezultatnog gibanja  $v_e$ . Snaga stroja  $P_s$  veća je od snage rezanja  $P_r$  zbog gubitaka u alatnom stroju, pa iznosi

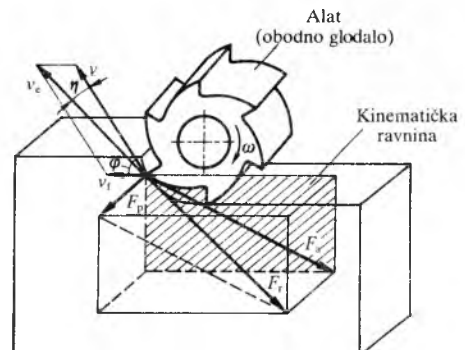
$$P_s = \frac{P_r}{\eta_s}, \quad (15)$$

gdje je  $\eta_s$  stupanj iskoristivosti stroja.



Sl. 22. Sile rezanja pri tokarenju.  $F_r$  rezultatna sila rezanja,  $F_g$  glavna sila rezanja,  $F_s$  posmična sila,  $F_a$  aktivna sila,  $F_p$  pasivna ili natražna sila rezanja

Pri obodnom protusmjernom glodanju kut je pravca gibanja  $\varphi < 90^\circ$ , pa se rezultatna sila rezanja i aktivna sila drukčije rastavljaju na komponente (sl. 23 i 24) nego na sl. 22. Već prema postupku obradbe kut pravca gibanja može biti  $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ .

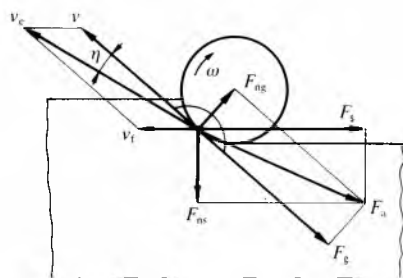


Sl. 23. Sile rezanja pri protusmjernom obodnom glodanju ( $\varphi < 90^\circ$ ).  $F_r$  rezultatna sila,  $F_a$  aktivna sila,  $F_p$  pasivna sila,  $v$  brzina rezanja,  $v_t$  posmična brzina,  $v_e$  brzina rezultatnog gibanja,  $\eta$  kut pravca glavnog gibanja,  $\varphi$  kut pomoćnog gibanja

**Računanje sile rezanja.** Najvažnija je i najčešće se pri računanju upotrebljava glavna sila rezanja  $F_g$ , koja ovisi o materijalu obratka, posmaku  $s$  i dubini rezanja  $a$ , pa je

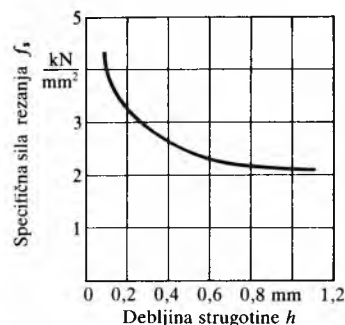
$$F_g = a s f_s = b h f_s, \quad (16)$$

gdje je  $f_s$  specifična sila rezanja ( $\text{N/mm}^2$ ). Oblik neodrezanog



Sl. 24. Komponente aktivne sile rezanja pri protusmjernom obodnom gibanju.  $F_g$  glavna sila rezanja,  $F_{ng}$  sila okomita na glavnu silu rezanja,  $F_s$  posmična sila,  $F_{ns}$  sila okomita na posmičnu silu, ostale oznake kao na sl. 23

hlađenje – manja sila) i trošenje alata (istrošen alat – veća sila). Za približno računanje posmične sile  $F_s$  i natražne sile  $F_p$  mogu poslužiti omjeri  $F_g:F_p:F_s = 5:2:1$ .

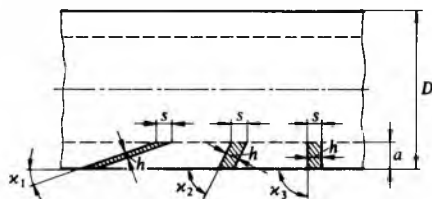


Sl. 26. Ovisnost specifične sile rezanja o debljini strugotine

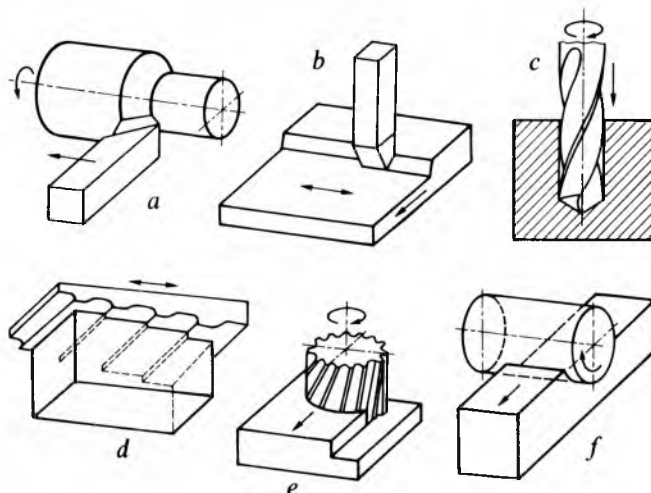
presjeka strugotine ovisi o prislonom kutu  $\alpha$  (sl. 25), koji utječe na debljinu strugotine  $h$ . Specifična sila rezanja  $f_s$  ne ovisi samo o materijalu obratka već i o debljini strugotine  $h$ , pa je prema Kienzleu (sl. 26)

$$F_g = bh^{z_1} f_{s,1-1}, \quad (17)$$

gdje je  $f_{s,1-1}$  specifična sila rezanja koja odgovara površini presjeka strugotine  $A$  kad je  $b = h = 1$  mm, a  $z_1$  je eksponent koji se dobije iz sl. 26 kad se nacrtu u logaritamskom mjerilu.



Sl. 25. Utjecaj prislonog kuta  $\alpha$  na oblik presjeka neodrezane strugotine pri uzdužnom tokarenju



Sl. 27. Postupci obradbe s konstantnom debljinom strugotine: a tokarenje, b blanjanje i dubljenje, c bušenje, d provlačenje. Postupci obradbe s promjenljivom debljinom strugotine: e čeoно glodanje, f obodno glodanje.

**Volumen i specifični volumen.** Volumen skinutog materijala obratka ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ), npr. pri tokarenju (sl. 25), dobiva se iz izraza

$$V = 1000Av = 1000asv = 1000bhv, \quad (18)$$

gdje je  $A$  površina presjeka neodrezane strugotine ( $\text{mm}^2$ ),  $v$  brzina rezanja ( $\text{m/min}$ ),  $a$  dubina rezanja ( $\text{mm}$ ),  $s$  posmak

Tablica 1

OVISNOST SPECIFIČNE SILE REZANJA  $f_s$  ( $\text{N/mm}^2$ ) O DEBLJINI STRUGOTINE PRI TOKARENJU ALATOM OD TVRDOG METALA  
( $v = 100 \dots 120$  m/min,  $\alpha = 5^\circ$ ,  $\beta = 79^\circ$ ,  $\gamma = 6^\circ$ ,  $\varepsilon = 90^\circ$ ,  $\kappa = 60^\circ$ ,  $\lambda = -4^\circ$ ,  $r = 1$  mm)

| Materijal<br>obratka | $\sigma_M$ (N/mm <sup>2</sup> )<br>ili<br>tvrdoća | Debljina strugotine h, mm |      |      |       |      |      |      |       |      |      |      |      | $f_{s,1-1}$<br>h = 1 mm | z <sub>1</sub> |
|----------------------|---------------------------------------------------|---------------------------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------------------------|----------------|
|                      |                                                   | 0,063                     | 0,08 | 0,1  | 0,125 | 0,16 | 0,20 | 0,25 | 0,315 | 0,4  | 0,5  | 0,63 | 0,8  |                         |                |
| Č.0362               | 340/370                                           | 2850                      | 2730 | 2630 | 2540  | 2430 | 2340 | 2250 | 2170  | 2080 | 2000 | 1930 | 1850 | 1780                    | 0,17           |
| Č.0545               | 520                                               | 4080                      | 3840 | 3620 | 3430  | 3210 | 3020 | 2850 | 2690  | 2530 | 2380 | 2250 | 2110 | 1990                    | 0,26           |
| Č.0645               | 620                                               | 3380                      | 3240 | 3120 | 3000  | 2880 | 2770 | 2670 | 2570  | 2470 | 2370 | 2280 | 2190 | 2110                    | 0,17           |
| Č.0745               | 720                                               | 5180                      | 4820 | 4510 | 4220  | 3920 | 3660 | 3430 | 3200  | 2980 | 2780 | 2600 | 2420 | 2260                    | 0,30           |
| Č.1531               | 670                                               | 3270                      | 3160 | 3060 | 2970  | 2870 | 2780 | 2700 | 2610  | 2520 | 2450 | 2370 | 2290 | 2220                    | 0,14           |
| Č.1731               | 770                                               | 3500                      | 3360 | 3220 | 3100  | 2960 | 2850 | 2730 | 2620  | 2510 | 2410 | 2310 | 2220 | 2130                    | 0,18           |
| Č.4320               | 770                                               | 4310                      | 4050 | 3820 | 3610  | 3380 | 3190 | 3010 | 2840  | 2660 | 2510 | 2370 | 2230 | 2100                    | 0,26           |
| Č.5420               | 630                                               | 5180                      | 4820 | 4510 | 4220  | 3920 | 3660 | 3430 | 3200  | 2980 | 2780 | 2600 | 2420 | 2260                    | 0,30           |
| Č.4732               | 730                                               | 5130                      | 4820 | 4550 | 4290  | 4030 | 3800 | 3580 | 3380  | 3170 | 2990 | 2820 | 2650 | 2500                    | 0,26           |
| Č.4731               | 800                                               | 4000                      | 3810 | 3630 | 3470  | 3290 | 3140 | 3000 | 2850  | 2720 | 2590 | 2470 | 2350 | 2240                    | 0,21           |
| Č.4830               | 600                                               | 4560                      | 4280 | 4040 | 3810  | 3580 | 3370 | 3180 | 3000  | 2820 | 2660 | 2500 | 2350 | 2220                    | 0,26           |
| Č.4721               | 590                                               | 3660                      | 3520 | 3390 | 3260  | 3130 | 3010 | 2900 | 2790  | 2680 | 2580 | 2480 | 2380 | 2290                    | 0,17           |
| Č.3131               | 770                                               | 3050                      | 2830 | 2660 | 2540  | 2350 | 2180 | 2050 | 1920  | 1830 | 1770 | 1740 | 1700 | 1680                    | 0,28           |
| Meehanite M          | 300 HB                                            | 2550                      | 2400 | 2260 | 2130  | 2000 | 1890 | 1780 | 1670  | 1580 | 1490 | 1400 | 1320 | 1240                    | 0,26           |
| SL 10                | 180 HB                                            | 1070                      | 1040 | 1010 | 980   | 950  | 920  | 900  | 870   | 840  | 820  | 800  | 770  | 750                     | 0,13           |
| SL 15                | 180 HB                                            | 1700                      | 1610 | 1540 | 1470  | 1400 | 1330 | 1270 | 1210  | 1150 | 1100 | 1050 | 1000 | 950                     | 0,21           |
| SL 20                | 220 HB                                            | 2040                      | 1920 | 1810 | 1720  | 1610 | 1530 | 1440 | 1360  | 1280 | 1210 | 1150 | 1080 | 1020                    | 0,25           |
| SL 25                | 220 HB                                            | 2380                      | 2240 | 2110 | 1990  | 1870 | 1760 | 1660 | 1570  | 1470 | 1390 | 1310 | 1230 | 1160                    | 0,26           |
| Tvrđi lijev          | 55 HRC                                            | 3860                      | 3690 | 3530 | 3390  | 3230 | 3100 | 2970 | 2850  | 2720 | 2600 | 2490 | 2390 | 2280                    | 0,19           |
| Č.5471 žaren         | 940                                               | 3380                      | 3190 | 3020 | 2870  | 2700 | 2560 | 2430 | 2300  | 2170 | 2050 | 1940 | 1840 | 1740                    | 0,24           |
| Č.5471 pobolj.       | 352 HB                                            | 3730                      | 3520 | 3340 | 3160  | 2980 | 2830 | 2680 | 2530  | 2390 | 2270 | 2150 | 2030 | 1920                    | 0,24           |

(mm),  $b$  širina neodrezane strugotine (mm), a  $h$  debljina neodrezane strugotine (mm).

Specifični volumen  $V_s$  ( $\text{mm}^3 \text{min}^{-1} \text{kW}^{-1}$ ) iznosi

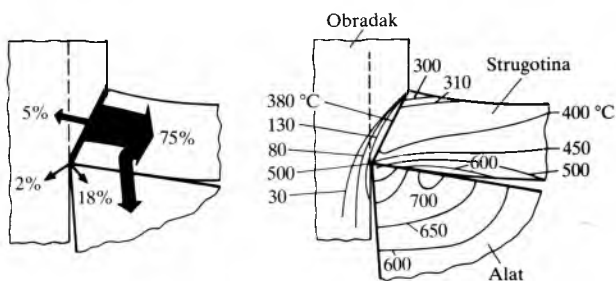
$$V_s = \frac{V}{P_r}, \quad (19)$$

gdje je  $P_r$  snaga rezanja (kW). Iz (14) i (19) slijedi važan odnos  $V_s$  i specifične sile rezanja  $f_s$  ( $\text{N/mm}^2$ )

$$V_s f_s = 60 \cdot 10^6. \quad (20)$$

#### Toplinske pojave i sredstva za hlađenje i podmazivanje.

Zbog velikih plastičnih deformacija u zoni smicanja i trenja strugotine po prednjoj plohi alata i obratka te po stražnjoj plohi alata pri obradbi metala skidanjem strugotine oslobađa se toplina (sl. 28). Koliki će dio stvorene topline prijeći na strugotinu, alat ili na obradak, najviše ovisi o brzini rezanja. Zbog razvijanja topline povećava se temperatura alata, obratka i strugotine dok se ne postigne skoro stacionarno stanje. Zbog povećanja temperature materijal alata postaje mekši, pa se povećava trošenje alata i smanjuje proizvodnost. Da bi se smanjila temperatura oštrice, dio se oslobođene topline može odvoditi sredstvom za hlađenje i podmazivanje. Osim hlađenja, to sredstvo donekle podmazuje dio površina koje se međusobno taru. Primjenom sredstva za hlađenje i podmazivanje može se povećati postojanost alata, smanjiti hrapavost obrađene površine, smanjiti savijanje i širenje obratka, poboljšati odvod strugotine te smanjiti sile rezanja i potrošak snage.



Sl. 28. Prijelaz topline i raspored lokalnih temperatura na obratku od čelika ( $\sigma_M = 850 \text{ N/mm}^2$ ), alatu od tvrdog metala P 20 i strugotini debljine  $h = 0,32 \text{ mm}$  pri brzini rezanja  $v = 60 \text{ m/min}$  i prednjem kutu  $\gamma = 10^\circ$

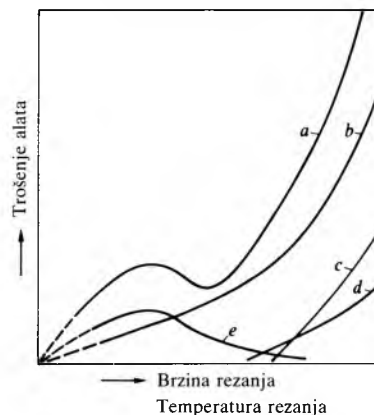
Primjenom sredstva za hlađenje i podmazivanje mogu nastati štetne popratne pojave: pojave otrovnih para, smrada, dima ili bakterija u rashladnom sredstvu. Ako rashladna sredstva imaju velik postotak slobodnog sumpora, pospješuje se korozija bakrenih legura, a može se uzrokovati i korozija željeznih legura.

Redovno se za manje brzine rezanja ( $30 \dots 70 \text{ m/min}$ ) upotrebljavaju ulja otporna na vrlo velike specifične tlakove, a za brzine rezanja veće od  $70 \text{ m/min}$  emulzije (voda i ulje) ili voda s inhibitorima korozije (v. *Podmazivanje i maziva*, TE 10, str. 443).

**Trošenje alata** nastaje kad strugotina i obradak stružu po alatu, a očituje se u odvajanju materijala alata. Temperatura na dodirnim površinama može iznositi  $\sim 1000^\circ\text{C}$ , sila rezanja može biti  $15000 \text{ N}$  i veća, površina na koju djeluje ta sila je malena, pa je tlak vrlo velik, a površine taru jedna po drugoj skoro u uvjetima suhog trenja. Izgleda da se mogu teško naći nepovoljniji uvjeti. O trošenju alata neposredno ovisi proizvodnost postupaka obradbe metala. Naime, ako se želi povećati proizvodnost, treba povećati brzinu rezanja, posmak i dubinu rezanja, zbog čega će se alat brže trošiti. Budući da se proizvodnja prekida za vrijeme zamjene alata, može se dogoditi da trajanje zamjene alata bude duže od obradbe.

Najvažnije su vrste trošenja alata: adhezijsko trošenje, abrazivno trošenje i mikroplastična deformacija, difuzijsko trošenje, trošenje zbog oksidacije i elektrokemijsko trošenje (sl. 29). Kakvo će trošenje nastati, odnosno koje će biti dominantnije, ovisi najviše o brzini rezanja, odnosno o temperaturi oštrice. Tako, npr., pri obradbi čelika dijamant-

nim alatom na temperaturi oštrice većoj od  $600^\circ\text{C}$  troši se dijamant zbog difuzijskog prijelaza ugljika s alata na strugotinu i na obradak. Trošenje alata određuje se pokusima.

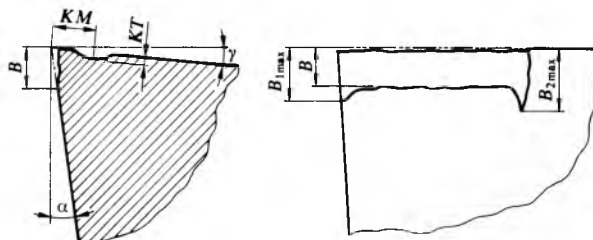


Sl. 29. Vrste trošenja alata.  $a$  ukupno trošenje,  $b$  abrazivno trošenje i trošenje zbog plastične deformacije,  $c$  difuzno trošenje,  $d$  oksidacijsko trošenje,  $e$  trošenje zbog skidanja privarenih čestica

Alat se troši na prednjoj i na stražnjoj plohi. Trošenje alata definira se srednjom vrijednošću širine pojasa trošenja  $B$  na stražnjoj plohi alata, ne uzimajući u obzir izrazito maksimalne vrijednosti (sl. 30). Prednja se ploha troši u obliku kratera i najčešće nastaje pri većim brzinama rezanja. Ako je trošenje prednje plohe veće od trošenja stražnje, trošenje je alata definirano dubinom kratera  $KT$  ili omjerom  $KT/KM$  (sl. 30). Trošenje alata  $B$  ovisi o brzini rezanja  $v$ , posmaku  $s$  i dubini rezanja  $a$  te o trajanju obradbe  $t$ , a određuje se pomoću izraza

$$B = K_1 v^{k_v} s^{k_s} a^{k_a} t^{k_t}, \quad (21)$$

gdje je  $K_1$  konstanta, dok eksponenti  $k_v$ ,  $k_s$ ,  $k_a$  i  $k_t$  ovise o karakteristikama obratka, alata i alatnog stroja, a određuju se regresijskom analizom rezultata pokusa.



Sl. 30. Karakteristični parametri trošenja alata.  $B$  srednja širina trošenja na stražnjoj plohi alata,  $B_{\max}$  maksimalno trošenje alata,  $KT$  dubina kratera na prednjoj plohi alata,  $KM$  udaljenost središta kratera od početne oštrice,  $\alpha$  stražnji kut,  $\gamma$  prednji kut

Istrošenost alata određuje se kriterijem istrošenja što ga određuje širina pojasa trošenja  $B$ . Za tokarenje i glodanje kriteriji istrošenja jesu:  $B = 0,8 \dots 1,2 \text{ mm}$  za grubu obradbu alatom od brzoreznog čelika i od tvrdog metala,  $B = 0,2 \dots 0,4 \text{ mm}$  za završnu obradbu alatom od brzoreznog čelika i od tvrdog metala,  $B = 0,4 \dots 0,5 \text{ mm}$  za grubu obradbu alatom od rezne keramike,  $B = 0,2 \dots 0,3 \text{ mm}$  za završnu obradbu alatom od rezne keramike,  $KT/KM = 0,4$  za obradbu tvrdim metalom.

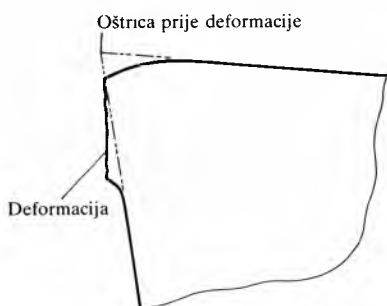
Pri obradbi alatom od brzoreznog čelika može se primijeniti kriterij potpunog istrošenja, tj. kad alat više ne skida strugotinu. Taj kriterij istrošenja alata nije poželjan, jer su troškovi oštrenja alata veliki i jer se pri oštrenju najčešće rekrutalizira materijal oštrice zbog prevelike dubine brušenja.

Širina trošenja  $B = 0,8 \text{ mm}$  upotrebljava se za grubu obradbu alatima od tvrdog metala i od brzoreznog čelika koji se oštire, dok je širina trošenja  $B = 1,2 \text{ mm}$  podesnija za alate s mehanički pričvršćenom pločicom, tj. za alate koji se ne oštire. Međutim, mogu poslužiti i drugi kriteriji istrošenja,



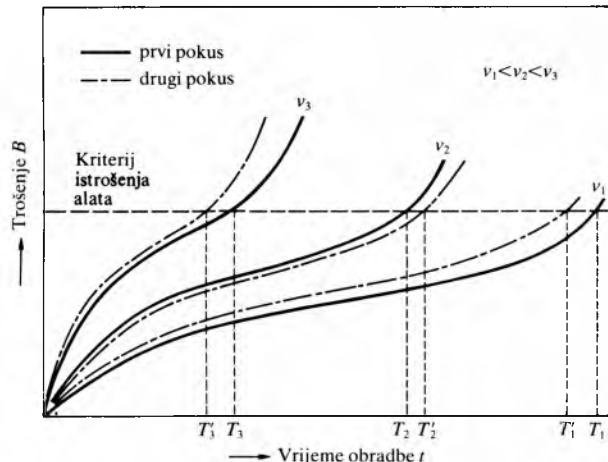
npr. dopuštena hrapavost obrađene površine ili dopuštena netočnost obradbe.

**Deformacija oštrice** trajna je promjena oblika oštrice zbog popuštanja materijala alata (sl. 31) uzrokovana glavnom silom rezanja i visokom temperaturom. Deformacija oštrice bit će češća kad se obrađuje metal veće čvrstoće. Budući da nije poželjno obrađivati s deformiranom oštricom, ta pojava može poslužiti kao kriterij maksimalnog iskorištenja alata. Naime, režimi obradbe (brzina rezanja, posmak i dubina rezanja) mogu se odrediti primjenom kriterija maksimalnog iskorištenja alata tako da se posmak smanjuje sve dok ne nestane deformacija oštrice, a da se zadrži brzina rezanja i dubina rezanja uz koje se pojavila deformacija oštrice.



Sl. 31. Deformacija oštrice alata

**Postojanost alata** stvarno je vrijeme obradbe do postizanja kriterija istrošenja alata. Ako se u vremenskim intervalima mjeri trošenje alata  $B$ , dobiva se krivulja trošenja alata (sl. 32). Povećanjem brzine rezanja uz nepromijenjeni posmak i dubinu rezanja dobivaju se strmije krivulje trošenja. Primjenom kriterija istrošenja alata dobiva se podatak o postojanosti alata  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_3$  na sl. 32.



Sl. 32. Krivulja trošenja alata pri konstantnom posmaku  $s$  i konstantnoj dubini rezanja  $a$ ,  $v$  brzina rezanja,  $T$  postojanost alata

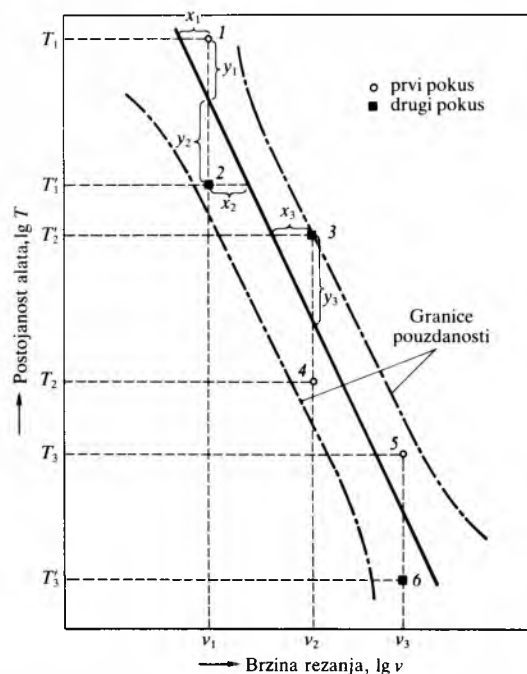
Ponove li se takvi pokusi u potpuno istim uvjetima, dobit će se druge krivulje trošenja i druge postojanosti alata. Kad bi se više puta ponovili pokusi u potpuno istim uvjetima, dobilo bi se rasipanje postojanosti alata oko neke očekivane vrijednosti.

**Taylorova jednadžba postojanosti alata** predstavlja ovisnost postojanosti alata  $T$  o brzini rezanja  $v$  (sl. 33), a može se dobiti regresijskom analizom na temelju krivulja trošenja (sl. 32.) Budući da nekoj brzini rezanja pripada više postojanosti alata, radi se o stohastičkoj ovisnosti koja se određuje regresijskom analizom, pomoću koje se dobiva izraz

$$T = K v^{k_v} \quad \text{ili} \quad v T^m = C, \quad (22)$$

gdje je  $T$  postojanost alata,  $v$  brzina rezanja,  $K$  i  $C$  su konstante, dok je  $m = -1/k_v$ , Taylorov eksponent. Ako se područje brzina rezanja proteže od malih pa do velikih brzina,

u dijagramu s dvostrukim logaritamskim mjerilom dobiva se krivulja blago zakrivljena prema ishodištu. Ako se, međutim, promatra malo područje brzina rezanja, dobiva se pravac u spomenutom dijagramu.



Sl. 33. Grafički prikaz Taylorove jednadžbe postojanosti alata (evropski postupak)

Budući da se radi o stohastičkoj zavisnosti, mogu se odrediti granice pouzdanosti (sl. 33).

Nije svejedno da li se regresijskom analizom određuje ovisnost postojanosti alata o brzini rezanja ili ovisnost brzine rezanja o postojanosti alata. Ako se na temelju istih rezultata pokusa dobivenih tokarenjem čelika alatom od brzoreznog čelika odredi ovisnost  $T$  o  $v$  (evropski postupak), dobiva se  $v T^{0.108} = 26,4$ , dok se za ovisnost  $v$  o  $T$  (američki postupak) dobiva  $v T^{0.077} = 24,9$ . Iako su dobivene iz istih rezultata pokusa, razlika je Taylorova eksponenta vrlo velika. Da bi se to izbjeglo, predloženo je (E. Kuljanić) da se primjenjuje samo evropski postupak, jer ta ovisnost ima fizikalni smisao, što je prihvatila Međunarodna organizacija za standardizaciju ISO (International Organization for Standardization).

Za približne vrijednosti  $n = 1/m$ , za različite postupke obradbe skidanjem strugotine, v. *Alati*, TE 1, str. 80. Međutim, Taylorov eksponent  $m$  može biti različit za alate od istog materijala različitih proizvođača. Također, struktura materijala obratka može mnogo utjecati na vrijednost eksponenta  $m$ , iako su svi ostali uvjeti obradbe nepromijenjeni, pa čak i tvrdoća materijala obratka. Kriterij istrošenja alata utječe na konstantu  $C$  ili  $K$  u izrazima (22).

**Proširena Taylorova jednadžba postojanosti alata** osim utjecaja brzine rezanja  $v$  na postojanost alata uzima u obzir i utjecaje posmaka  $s$  i dubine rezanja  $a$ , pa glasi

$$T = K v^{k_v} s^{k_s} a^{k_a}, \quad (23)$$

odnosno

$$v = \frac{C}{T^m s^x a^y}, \quad (24)$$

gdje su  $K$  i  $C$  konstante, a  $k_v$ ,  $k_s$ ,  $k_a$ ,  $m$ ,  $x$  i  $y$  eksponenti. Jednadžbe (23) i (24) mogu se dobiti iz jednadžbe (21) ako se uvrsti kriterij istrošenja  $B$ . Konstante i eksponenti u izrazima (23) i (24) određuju se nizom pokusa.

**Nova jednadžba postojanosti alata.** Može se dokazati da nezavisne varijable  $v$ ,  $s$  i  $a$  u izrazu (23) nisu potpuno nezavisne, već da mogu postojati interakcije između pojedinih varijabli, što se uzima u obzir novom jednadžbom postojanosti

alata, koja npr. za glodanje nerđajućeg čelika alatom od tvrdog metala (prema E. Kuljaniću) glasi

$$T = C' v^{k'_v} s_z^{k'_s} z^{k'_z} S^{k'_S} (v z)^{k_{vz}} (v S)^{k_{vS}} (z S)^{k_{zS}} (v z S)^{k_{vzS}} (v z S)^{k_{vzS}}, \quad (25)$$

gdje je  $C'$  konstanta,  $v$  brzina rezanja,  $s_z$  posmak po zubu,  $z$  broj zubi glodala ili glodaće glave, a  $S$  krutost obradnog sustava. Sređivanjem izraza (25) dobiva se

$$T = C v^{k_v} s_z^{k_s} z^{k_z} S^{k_S}, \quad (26)$$

gdje je

$$k_v = k'_v + k'_{vz} + k'_{vS} + k'_{vzS} + k'_{vzS}, \quad (27)$$

$$k_s = k'_s + k'_{vzS}, \quad (28)$$

$$k_z = k'_z + k'_{vz} + k'_{zS} + k'_{vzS}, \quad (29)$$

$$k_S = k'_S + k'_{vS} + k'_{zS} + k'_{vzS} + k'_{vzS}. \quad (30)$$

Nova jednadžba postojanosti alata pokazuje složenost fenomena trošenja alata, odnosno određivanja postojanosti alata. Ona, osim toga, tumači zbog čega se u literaturi vrijednosti Taylorova eksponenta  $m = -1/k_v$  znatno razlikuju. Nova jednadžba postojanosti alata može se primijeniti za optimizaciju obradnog sustava, za utvrđivanje činilaca i njihovih interakcija koje utječu na postojanost alata, odnosno može se dobiti bolja fizikalna predodžba o trošenju i postojanosti alata nego primjenom Taylorovih jednadžbi.

Ovisnost postojanosti alata  $T$  o brzini rezanja  $v$  i posmaku  $s$  za šire područje brzina rezanja određena je König-Depierreuxovom jednadžbom

$$T = \exp \left( -\frac{i_v}{m} v^m - \frac{i_s}{n} s^n - c \right), \quad (31)$$

gdje su  $i_v$ ,  $i_s$ ,  $m$ ,  $n$  i  $c$  konstante koje za određeni oblik alata ovise o materijalima obratka i alata.

**Primjena jednadžbi postojanosti alata.** Za uspješnu eksploataciju obradnih sustava, koji su numerički (NC, Numerical Control) ili adaptivno upravljani (AC, Adaptive Control), potrebne su za strojno programiranje jednadžbe postojanosti alata, jer su za tu svrhu nepodesnije tablice s podacima o

ovisnosti postojanosti alata o utjecajnim činiocima. Također su te jednadžbe potrebne za identifikaciju obradnog sustava koja je potrebna za optimalizaciju procesa obradbe, a najpouzdanije su ako se odrede za stvarne uvjete. Za pojedinačnu i maloserijsku proizvodnju mogu se upotrijebiti jednadžbe postojanosti alata iz literature.

**Hrapavost i integritet obrađene površine.** Često nije dovoljno da se obradbom metala skidanjem strugotine postigne zadani oblik obratka, već treba postići i traženu hrapavost obrađene površine. Hrapavost treba uzeti u obzir pri izboru postupka i režima obradbe. Za programiranje numerički upravljanih alatnih strojeva, odnosno obradnih sustava, također su podesnije jednadžbe od podataka u dijagramima i tablicama. Npr. prema M. H. Baueru totalna teorijska hrapavost pri tokarenju posmakom  $s > 0,1$  mm po okretaju iznosi

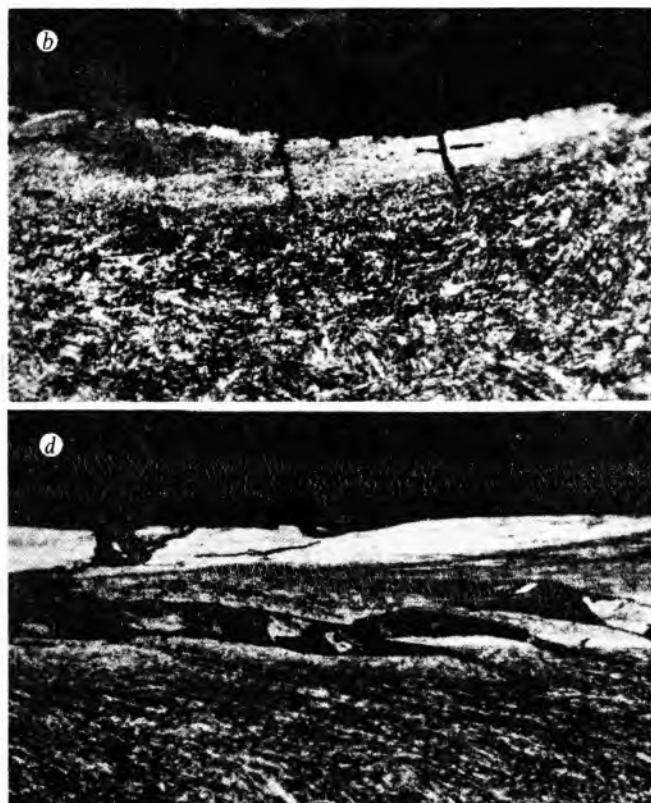
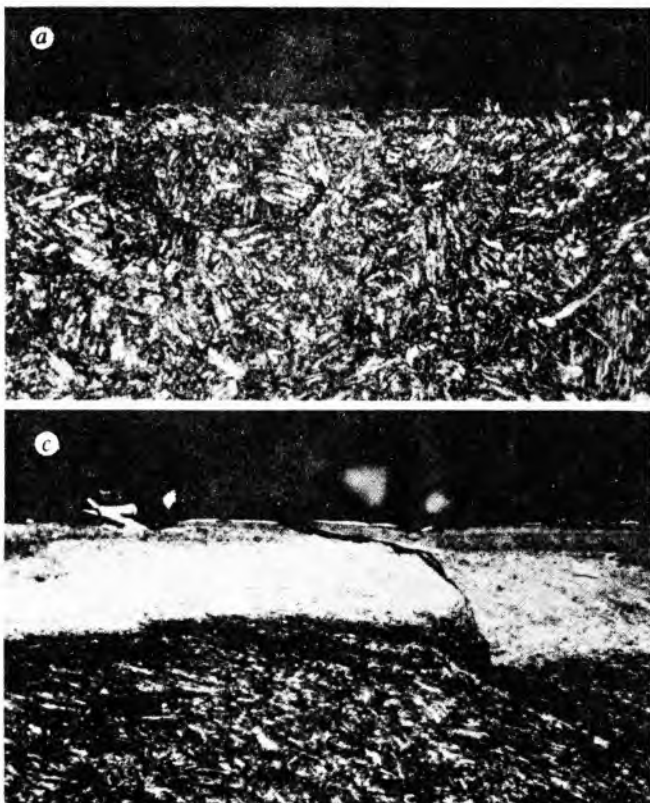
$$R_{tt} = \frac{s^2}{8r}, \quad (32)$$

gdje je  $r$  (mm) polumjer zaobljenja vrha noža. Međutim, ima empirijskih izraza za određivanje hrapavosti koji su obično pouzdaniji od teorijskih. Npr. prema E. Kuljaniću prosječno odstupanje profila  $R_a$  ( $\mu$ m) pri tokarenju mjedi alatom od tvrdog metala u području  $v = 100 \dots 400$  m/min,  $s = 0,04 \dots 0,315$  mm po okretaju i  $a = 0,2 \dots 2,0$  mm iznosi

$$R_a = \frac{1,533 s^{0,444}}{r^{0,655}}. \quad (33)$$

Pojedinim postupcima obradbe mogu se postići različite hrapavosti površine (tabl. 2), a JUS Z.A1.025-1964. i M.A1.065-1977. daju odnos hrapavosti i reda tolerancije.

Integritet obrađene površine širi je pojam koji se odnosi na površinski sloj obratka. Toplina, plastične deformacije i kemijske reakcije koje nastaju za vrijeme obradbe metala odvajanjem čestica uzrokuju promjene u površinskom sloju, npr. rekristalizaciju, plastičnu deformaciju, zareze (npr. zbog naljepka), promjenu tvrdoće, sitne i veće pukotine, zaostala naprezanja i dr. Osim navedenih pojava u površinskom sloju,

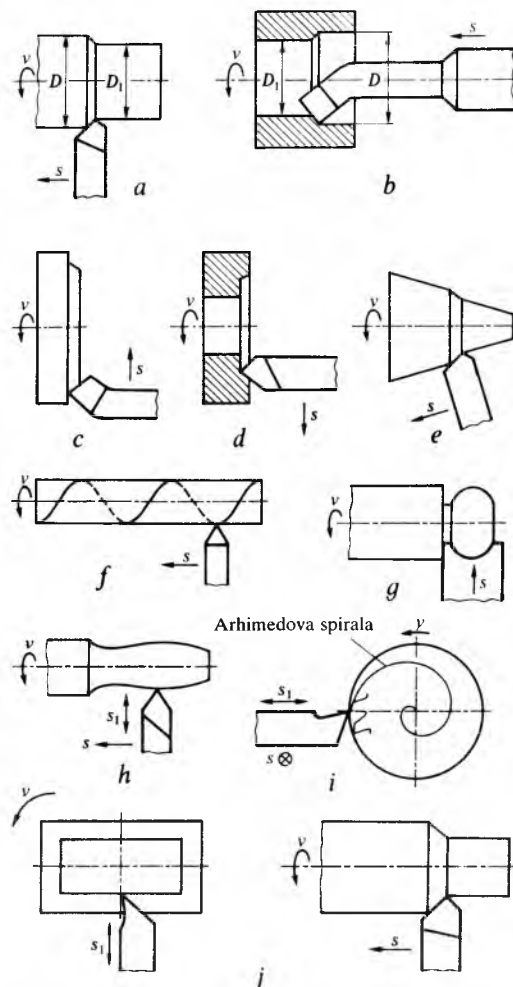


Sl. 34. Površinski sloj provrta dobivenog bušenjem svrdlom od brzoreznog čelika. Obradba ostrim alatom: a u površinskom sloju nema promjena. Obradba istrošenim alatom: b plastična deformacija i velike napukline površine, c martenzitna struktura površine (62 HRC) i napukline, d površina s izrazitim slojevima i ljuskama

Tablica 2  
OVISNOST POVRŠINSKE HRPAVOSTI O POSTUPKU OBRADBE  
(JUS M. A1.026-1965 i M.A0.065-1977)

| Postupak obradbe                                                  | $R_a$<br>0,012<br>$\mu\text{m}$ | Razred hrapavosti N |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | $R_a$<br>$\mu\text{m}$ |     |     |     |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|------------------------|-----|-----|-----|
|                                                                   |                                 | 1                   | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 100                    | 200 | 400 | 800 |
| Ručna obradba<br>grubo turpijanje<br>fino turpijanje              |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Lijevanje<br>u pijesak<br>u kokilu<br>u školjku                   |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Kovanje<br>toplo, slobodno<br>toplo u ukovnju<br>hladno u ukovnju |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Valjanje<br>toplo<br>hladno                                       |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Pjeskanje                                                         |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Tokarenje<br>grubo<br>fino                                        |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Blanjanje<br>grubo<br>fino                                        |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Glodanje<br>grubo<br>fino                                         |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Bušenje svrdlom                                                   |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Razvrtavanje                                                      |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Brušenje<br>grubo<br>fino                                         |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Poliranje<br>mehaničko<br>električno                              |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Honovanje,<br>lepovanje                                           |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Superfiniš                                                        | x                               | x                   | x | x |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Obrada navoja<br>rezanje<br>brušenje                              |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |
| Obrada zubaca<br>dubljenje<br>glodanje<br>brušenje                |                                 |                     |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                        |     |     |     |

35). Za profilno kopirno tokarenje (sl. 35h) primjenjuje se kombinacija uzdužnog i poprečnog posmaka. Smjer i vrijednost poprečnog posmaka ovisi o uzdužnom položaju tokarskog noža s obzirom na obradak. Pri neokruglom tokarenju (sl. 35i, j) smjer i vrijednost poprečnog posmaka ovisi o položaju alata s obzirom na položaj obratka u kružnom gibanju obratka, npr. natražno tokarenje. Kopirno tokarenje nekog kipa kombinacija je kopirnog (sl. 35h) i neokruglog tokarenja (sl. 35i, j).



Sl. 35. Vrste tokarenja. a) uzdužno vanjsko, b) uzdužno unutarnje, c) i d) poprečno (ravno), e) tokarenje konusa, f) tokarenje navoja, g) tokarenje profilnim fazonskim alatom, h) kopirno tokarenje, i) natražno tokarenje modulnog glodala, j) tokarenje pravokutnog presjeka

proučavanje integriteta obrađene površine obuhvaća i postupke da se te pojave izbjegnu, te utjecaje tih pojava na eksploatacijska svojstva obrađenog dijela, tj. na njihovu trajnost i pouzdanost. Istrošeni alat, npr., može pogoršati integritet obrađene površine (sl. 34).

Općenito, da bi se dobio bolji integritet obrađene površine, treba obrađivati s blažim režimima obradbe, npr. treba primijeniti mali posmak, malu brzinu rezanja i relativno oštar alat. Očito je da se tako smanjuje proizvodnost i povećavaju troškovi obradbe, pa se integritet obrađene površine poboljšava samo gdje je to potrebno.

### Tokarenje

Tokarenje je postupak kojim se skidanjem strugotine dobivaju valjkaste plohe (uzdužno tokarenje) i ravne plohe (poprečno ili plansko tokarenje). Glavno gibanje obavlja obradak, a pomoćno posmično alat (sl. 6). Karakteristike su tokarenja konstantan presjek neodrezane strugotine i kontinuiran rez. Tokarenje može biti vanjsko ili unutrašnje (sl.

Režim obradbe određen je brzinom rezanja  $v$ , posmakom  $s$  i dubinom rezanja  $a$ , o kojima najviše ovisi proizvodnost postupka.

Brzina rezanja obodna je brzina (m/min). Pri uzdužnom tokarenju ona iznosi

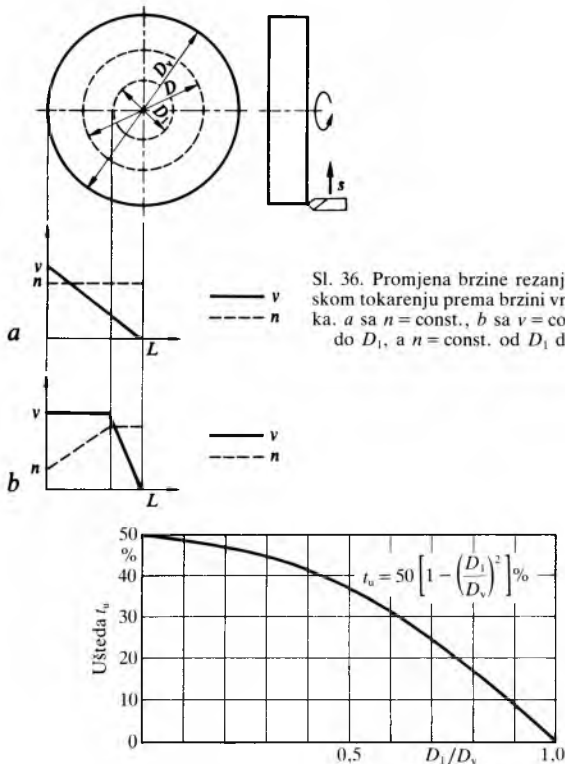
$$v = \frac{D \pi n}{1000}, \quad (34)$$

gdje je  $D$  promjer obratka (mm), a  $n$  brzina vrtnje ( $\text{min}^{-1}$ ).

Kad se poprečno tokari s konstantnom brzinom vrtnje obratka, brzina se rezanja mijenja kako se mijenja i promjer dijela koji se obrađuje (sl. 36), pa za računanje srednje brzine rezanja i za određivanje postojanosti alata treba uzeti da je  $D = 0,6 D_v$ , gdje je  $D_v$  vanjski promjer obratka. Promjer  $D$  dijeli obrađenu površinu na približno dva jednaka dijela. Srednja brzina rezanja iznosi

$$v = \frac{0,7 D_v \pi n}{1000}. \quad (35)$$

Budući da numerički upravljane tokarilice mogu kontinuirano mijenjati brzinu vrtnje, tada se poprečno tokari s konstantnom brzinom rezanja. Sa  $v = \text{const.}$  i za omjer promjera  $D_1/D_v = 0,25$  trajanje je obradbe za 46,8% kraće od poprečnog tokarenja sa  $n = \text{const.}$  (sl. 37). Cijela kružna površina ne može se obraditi poprečnim tokarenjem sa  $v = \text{const.}$  Tada bi, naime, brzina vrtnje obratka trebala biti beskonačno velika kad je alat u središtu obratka. Zbog toga se u blizini središta tokari s manjom brzinom rezanja (sl. 36b).



Sl. 37. Ušteda vremena obradbe punog presjeka ravnim tokarenjem sa  $v = \text{const.}$  s obzirom na tokarenje sa  $n = \text{const.}$

Posmak  $s$  (mm) prijedeni je put noža za jedan okretaj obratka koji iznosi

$$s = \frac{v_f}{n}, \quad (36)$$

gdje je  $v_f$  posmična brzina (mm/min), a  $n$  brzina vrtnje ( $\text{min}^{-1}$ ).

Dubina rezanja  $a$  (mm) određena je (sl. 35a) izrazom

$$a = \frac{D - D_1}{2}, \quad (37)$$

a površina presjeka neodrezane strugotine izrazom

$$A = as = bh, \quad (38)$$

gdje je  $b$  širina i  $h$  debljina neodrezane strugotine.

Glavna sila rezanja (sl. 22) iznosi

$$F_g = A f_s K_\gamma K_\gamma K_a K_i, \quad (39)$$

gdje je  $A$  površina presjeka neodrezane strugotine,  $f_s$  specifična sila rezanja prema tabl. 1,  $K_\gamma$  faktor prednjeg kuta ( $K_\gamma = 1 - (\gamma - \gamma_0)/66,7$ , gdje je  $\gamma_0 = 6^\circ$  za čelik,  $\gamma_0 = 2^\circ$  za sivi lijev),  $K_\gamma$  faktor brzine rezanja (sl. 38),  $K_a$  faktor materijala alata ( $K_a = 1$  za tvrdi metal,  $K_a = 0,95 \dots 0,9$  za rezu keramiku), a  $K_i$  faktor istrošenja alata ( $K_i = 1,3 \dots 1,5$ ).

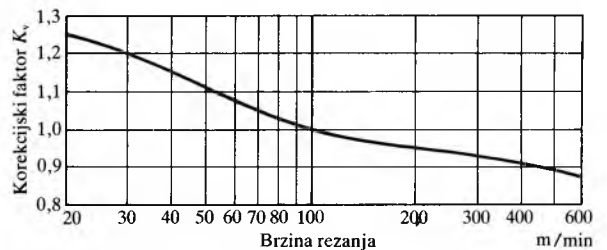
Snaga rezanja na oštici alata određena je izrazom (14), a snaga stroja izrazom (15).

Stupanj iskoristivosti stroja  $\eta_s$  iznosi  $0,70 \dots 0,85$ .

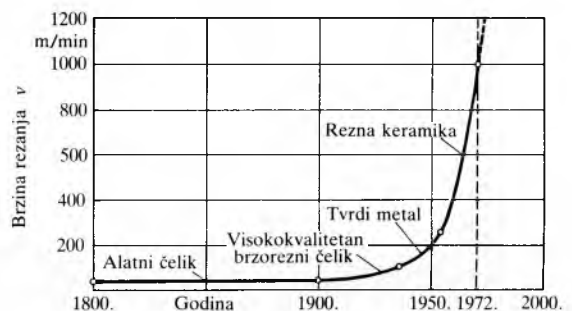
Za tokarenje služe tokarilice (v. *Alatni strojevi*, TE 1, str. 98).

Izbor režima obradbe, tj. određivanje brzine rezanja  $v$ , posmaka  $s$  i dubine rezanja  $a$  najodgovorniji je posao

inženjera tehnologa-programera. O režimu obradbe ovisi proizvodnost, troškovi obradbe, točnost izratka i hrapavost, odnosno integritet obradene površine, te trajnost i pouzdanost obradenog dijela u eksploataciji. Velike pogreške i još veće štete nastaju kad se za izbor režima obradbe upotrebljavaju stari podaci iz literature, jer novi i poboljšani materijali alata omogućuju mnogo oštrije režime obradbe, tj. veću proizvodnost. Novi materijali alata u posljednjih sedamdesetak godina omogućili su povećanje brzine rezanja za  $\sim 200$  puta (sl. 39). Zato treba režim obradbe izabrati prema najnovijim podacima proizvođača alata i uz primjenu metoda optimizacije.



Sl. 38. Ovisnost korekcijskog faktora  $K_v$  o brzini rezanja za čelik, čelični lijev i sivi lijev ( $a < 5$  mm,  $s = 0,2 \dots 1,2$  mm,  $\gamma = -5 \dots 10^\circ$ ,  $\kappa = 60 \dots 90^\circ$ )



Sl. 39. Povećanje brzine rezanja primjenom alata od novih materijala

Najčešće u literaturi postoje podaci za tokarenje brzinom  $v_{60}$  (brzina rezanja koja odgovara postojanosti alata  $T = 60$  min) i naziva se ekonomskom brzinom rezanja. Međutim, danas ekonomska postojanost alata (tj. postojanost kojoj odgovaraju najmanji troškovi obradbe) iznosi  $T_e = 10 \dots 15$  min, pa je i ekonomska brzina rezanja mnogo veća od  $v_{60}$ . Pri izboru režima obradbe mora se uzeti u obzir postojanost alata. Ako takve jednadžbe nisu raspoložive za materijale obratka i alata, treba primijeniti podloge za režim obradbe za koji brzine rezanja i posmaki odgovaraju približno ekonomskoj postojanosti  $T_e$  (tabl. 3). Najprije treba odabrati najveću moguću dubinu rezanja da bi se postigla maksimalna proizvodnost, zatim maksimalni posmak koji ovisi o traženoj hrapavosti obradene površine (završna obradba), te brzinu rezanja uzimajući u obzir ovisnost postojanosti alata o brzini i već odabranim vrijednostima veličina  $a$  i  $s$ . Sve to, dakako, ovisi o materijalu obratka, materijalu alata, postojanosti alata i kriteriju istrošenja alata. Odabrane vrijednosti brzine rezanja i posmaka moraju biti takve da se mogu ostvariti na odabranom stroju.

### Blanjanje i dubljenje

Blanjanje i dubljenje postupci su kojima se dobivaju ravne plohe. Za dugohodno blanjanje pravocrtno glavno gibanje  $v$  obavlja obradak, a pomoćno, posmično gibanje  $s$  alat (sl. 40A), dok za kratkohodno blanjanje glavno gibanje obavlja alat, a pomoćno obradak (sl. 40B). Za kratkohodno blanjanje u vertikalnoj ili kosoj ravnini alat se posmično giba. Kad se dubi, glavno gibanje obavlja alat, a pomoćno obradak (sl. 40C).

Veliki dijelovi (npr. postolja strojeva) blanjanju se na dugohodnoj blanjalici, a manji na kratkohodnoj blanjalici, šepingu (v. *Alatni strojevi*, TE 1, str. 98). Osim ravnih

Tablica 3

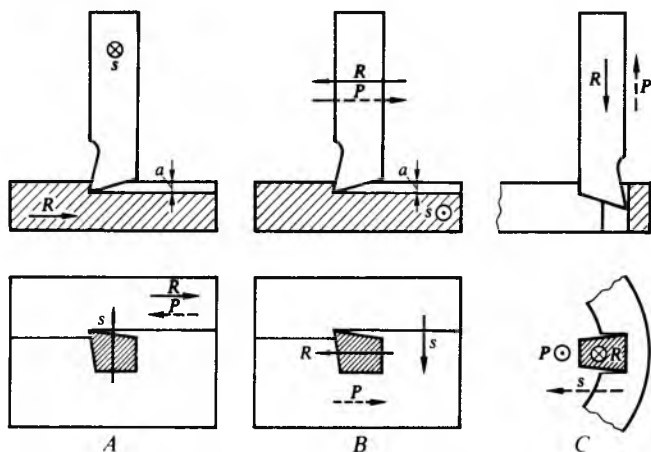
SMJERNICE ZA BRZINE REZANJA KOJE ODGOVARAJU POSTOJANOSTI ALATA OKO 15 min I KRITERIJU ISTROŠENJA ALATA  $B = 1,2$  mm PRI TOKARENJU OKRETNIM PLOČICAMA. ZA LEMLJENE ALATE BRZINA SE REZANJA SMANJUJE ZA 30%

| Materijal<br>obratka                                                                                                                                | Tvrdi metal (oznaka JUS i ISO)                                           |                                                                        |                                                                      |                                                                      |                                                              |                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                     | P01                                                                      | P10                                                                    | P20                                                                  | P30                                                                  | P40                                                          | P50                                                         |
|                                                                                                                                                     | Posmak, mm                                                               |                                                                        |                                                                      |                                                                      |                                                              |                                                             |
|                                                                                                                                                     | 0,3...0,15...0,05                                                        | 0,7...0,3...0,1                                                        | 1,2...0,3...0,15                                                     | 2,0...0,4...0,2                                                      | 2,5...1,0...0,4                                              | 2,5...1,0...0,4                                             |
|                                                                                                                                                     | Brzina rezanja $v$ , m/min                                               |                                                                        |                                                                      |                                                                      |                                                              |                                                             |
| Nelegirani ugljični čelik,<br>normalno žaren<br>C 0,15%<br>C 0,35%<br>C 0,70%                                                                       | 350...440...540<br>290...360...460<br>230...290...370                    | 200...290...410<br>170...240...350<br>130...190...280                  | 130...260...330<br>100...210...270<br>80...160...210                 | 80...190...250<br>65...150...200<br>45...115...160                   | 45...95...160<br>30...75...125<br>30...55...95               | 35...65...100<br>25...50...80<br>15...35...60               |
| Legirani čelik<br>žaren<br><br>poboljšan                                                                                                            | 230...290...370<br>180...230...290<br>145...180...230<br>115...145...185 | 130...190...280<br>105...150...220<br>85...120...175<br>65... 95...140 | 80...160...210<br>65...130...170<br>50...100...130<br>40... 80...105 | 50...120...160<br>40... 95...125<br>30... 75...100<br>25... 60... 80 | 35...60...95<br>30...50...75<br>20...40...60<br>15...30...50 | 20...40...60<br>15...30...50<br>10...25...40<br>8...20...30 |
| Nerdajući čelik, žaren<br>feritni<br>martenzitni<br>austenitni                                                                                      |                                                                          | 200...280                                                              | 120...190...225<br>140...175                                         | 95...165...200<br>80...125...150                                     | 65...90...115<br>55...80...110                               | 40...55...70<br>40...55...70                                |
| Čelični ljev<br>nelegiran<br>niskolegiran<br>visokolegiran                                                                                          |                                                                          | 160...200<br>115...160                                                 | 80...135...160<br>55... 95...115<br>90...105                         | 55...115...145<br>35... 75...100<br>30... 70... 90                   | 40...60...90<br>25...40...60<br>20...35...50                 | 25...40...60<br>20...30...40<br>15...25...35                |
| Materijal<br>obratka                                                                                                                                | Tvrdi metal (oznaka JUS i ISO)                                           |                                                                        |                                                                      |                                                                      |                                                              |                                                             |
|                                                                                                                                                     | K01                                                                      | K10                                                                    | K20                                                                  | P20                                                                  | P25                                                          | P30                                                         |
|                                                                                                                                                     | Posmak, mm                                                               |                                                                        |                                                                      |                                                                      |                                                              |                                                             |
|                                                                                                                                                     | 0,2...0,1                                                                | 1,0...0,5...0,2                                                        | 1,2...0,7...0,4                                                      | 1,0...0,7...0,2                                                      | 0,7...0,2                                                    | 1,0...0,7...0,3                                             |
|                                                                                                                                                     | Brzina rezanja $v$ , m/min                                               |                                                                        |                                                                      |                                                                      |                                                              |                                                             |
| Tvrdi čelik<br>manganski, 12% Mn<br>kaljeni čelik <sup>1), 2)</sup>                                                                                 |                                                                          | 20...35...55<br>10...20...35                                           | 10...30<br>10...20                                                   |                                                                      |                                                              |                                                             |
| Kovkasti (temper) ljev<br>kratka strugotina<br>duga strugotina                                                                                      |                                                                          | 90...140...200<br>95...160...230                                       | 60...90...110                                                        | 105...135...200<br>110...140...210                                   | 110...160<br>120...175                                       | 75...100...150<br>85...110...165                            |
| Niskolegirani sivi ljev                                                                                                                             | 160...200                                                                | 90...150...225                                                         | 65...90...105                                                        |                                                                      |                                                              |                                                             |
| Sivi ljev i legirani ljev<br>velike čvrstoće                                                                                                        | 90...135                                                                 | 65...110...175                                                         | 45...65...75                                                         |                                                                      |                                                              |                                                             |
| Kuglastografitni ljev<br>feritni<br>perlitni                                                                                                        |                                                                          | 65...110...175<br>55... 95...160                                       |                                                                      | 115...190<br>100...175                                               |                                                              | 70...115<br>40...55...90                                    |
| Kokilni tvrdi ljev <sup>2)</sup>                                                                                                                    | 6...20<br>4...15                                                         | 12...20<br>10...15                                                     |                                                                      |                                                                      |                                                              |                                                             |
| Elektrolitni bakar                                                                                                                                  |                                                                          | 250...350...475                                                        | 150...210...280                                                      |                                                                      |                                                              |                                                             |
| Bronca, mjedi, olovne slitine<br>kvaliteta za automate<br>crveni ljev<br>fosforna bronca                                                            |                                                                          | 350...420...500<br>250...300...360<br>150...210...275                  | 220...280... 35<br>160...200...240<br>100...130...165                |                                                                      |                                                              |                                                             |
| Aluminijske slitine, toplinski<br>neobradive<br>30... 80 HB<br>80...120 HB                                                                          |                                                                          | 1300...1700...2200<br>350... 480... 650                                | 800...1000...1300<br>200... 270... 350                               |                                                                      |                                                              |                                                             |
| Aluminijske slitine,<br>toplinski neobradive<br>100 HB<br>130 HB                                                                                    |                                                                          | 300...480...700<br>160...250...380                                     | 140...225...320<br>85...130...190                                    |                                                                      |                                                              |                                                             |
| Različiti materijali<br>tvrda guma<br>ebonit-vlakno<br>tvrde umjetne mase<br>porculan <sup>1)</sup><br>mramor <sup>1)</sup><br>granit <sup>1)</sup> |                                                                          | 230...350<br>115...230<br>230...460<br>15...25<br>55...90<br>10...15   | 115...230<br>85...170<br>175...350<br>5...15<br>55...90<br>6...10    |                                                                      |                                                              |                                                             |

<sup>1)</sup> Treba primijeniti prednji kut.<sup>2)</sup> Poželjna negativna faseta.



površina, blanjanjem se mogu obraditi i kombinacije ravnih površina (žljebovi, lastin rep i sl.). Dubljenje se najčešće upotrebljava za izradbu kraćih žljebova, npr. na zamašnjacima i zupčanicima u pojedinačnoj ili maloserijskoj proizvodnji. Odvalno se dubljenje upotrebljava za izradbu ozubljenja. Stroj za dubljenje naziva se dubilica (v. *Alatni strojevi*, TE 1, str. 106).



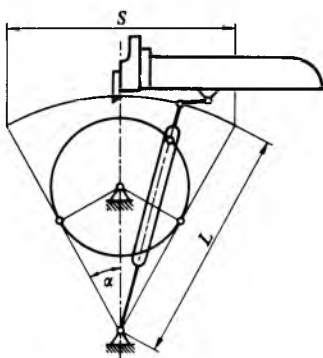
Sl. 40. Vrste blanjanja i dubljenja. A dugohodno blanjanje, B kratkohodno blanjanje, C dubljenje; R radni hod, P povratni hod, s posmak, a dubina rezanja

Režim obradbe određen je, kao i za tokarenje, brzinom rezanja, posmakom i dubinom rezanja. Budući da se obradba ostvaruje samo u radnom hodu, dok povratni (jalovi) hod služi samo za vraćanje obratka ili alata, brzina rezanja u radnom hodu ograničena je trošenjem alata (noža), odnosno postojanošću alata. Zato je brzina povratnog hoda veća od brzine radnog hoda. Presjek neodrezane strugotine definiran je izrazom (38).

Podaci za izbor režima obradbe blanjanja i dubljenja (tabl. 4) vrijede za alat od tvrdog metala za koji je povoljnija veća brzina rezanja. Konstrukcija strojeva uvjetuje male brzine. Za kratkohodno blanjanje srednja radna brzina rezanja iznosi

$$\bar{v}_r = Sn \frac{360^\circ}{180^\circ + 2\alpha}, \quad (40)$$

gdje je  $\sin \alpha = S(2L)$  (sl. 41), a  $n$  brzina vrtnje ( $\text{min}^{-1}$ ).



Sl. 41. Mehanizam kratkohodne blanjalice

Glavna sila rezanja računa se prema izrazu (39). Faktor je alata  $K_a = 1$ , jer se zasad ne upotrebljava alat od rezne keramike. Budući da su brzine rezanja pri blanjanju manje, srednji je faktor brzine rezanja  $K_v = 1,18$ , a faktori  $K_r$ ,  $K_f$  i  $f_s$  određuju se kao i za tokarenje. Snaga rezanja i snaga stroja određeni su izrazima (14) i (15). Stupanj iskoristivosti stroja iznosi 0,6...0,8. Za točnije računanje snage za dugohodno blanjanje uzima se u obzir i sila trenja između radnog stola i vodicica. Najveća snaga rezanja, odnosno snaga stroja, dobiva se kad se uzme u obzir maksimalna brzina rezanja radnog hoda.

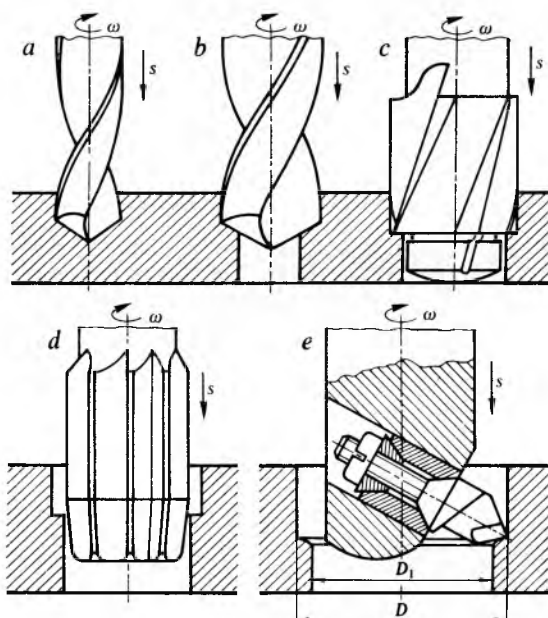
Tablica 4  
SMJERNICE ZA BRZINE REZANJA I POSMACI PRI  
BLANJANJU ALATOM OD TVRDOG METALA

| Materijal obratka                | Čvrstoća<br>N/mm <sup>2</sup> | Vrsta alata | Brzina rezanja*<br>m/min | Posmak<br>mm |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------|--------------------------|--------------|
| Nelegirani konstrukcijski čelici | 600                           | P30         | 50...70                  | 0,1...2      |
|                                  | 600...700                     | P30         | 40...70                  | 0,1...2      |
|                                  | 700...800                     | P30         | 25...70                  | 0,1...2      |
| Legirani čelici                  | 800                           | P10         | 15...60                  | 0,1...2      |
| Sivi lijev                       |                               | K20         | 25...60                  | 0,1...4      |
| Bakrene slitine                  |                               | K20         | 30...70                  | 0,1...4      |
| Laki metali                      |                               | K20         | 50...70                  | 0,1...5      |

\* Brzina rezanja je ograničena konstrukcijom stroja.

### Bušenje, upuštanje, razvrtavanje i istokarivanje

Za izradbu provrta služi više različitih postupaka obradbe. Zajedničko je svim postupcima da glavno gibanje obavlja alat, dok pomoćno gibanje najčešće obavlja alat, a rjeđe obradak (sl. 42), te da imaju konstantan presjek neodrezane strugotine i kontinuirani rez kao i tokarenje.



Sl. 42. Izradba provrta. a predbušenje, b proširivanje provrta, c upuštanje, d razvrtavanje, e istokarivanje (fino bušenje)

Bušenje (sl. 7) svrstava se u obično bušenje (provrt dubine do  $5d$ , gdje je  $d$  promjer svrdla), duboko bušenje i bušenje s izrezivanjem jezgre (najčešće bušenje većih provrta kad se želi sačuvati jezgra i pretvoriti manje materijala u strugotinu). Postoji, osim toga, bušenje vrlo malih provrta. Najmanji promjer provrta koji se može ostvariti skidanjem strugotine (kopljastim svrdlom) iznosi  $2,5\mu\text{m}$ , dok nekonvencionalni postupci (npr. bušenje laserom) za sada omogućuju provrte od  $\sim 0,25\mu\text{m}$ .

Za obično bušenje služi zavojno svrdlo (sl. 42a i b). Duboko bušenje manjih provrta obavlja se specijalnim zavojnim svrdlima, koja obično imaju dva provrta u obliku zavojnice u tijelu svrdla za sredstvo za hlađenje i podmazivanje. Za duboko bušenje većih provrta služe jednoredna i višeredna svrdla.

Upuštanjem se proširuje provrt, odnosno oblikuje dio već izrađenog provrta (sl. 42c). Alat za upuštanje zove se upuštal.

Razvrtavanjem se ispravlja ili dotjeruje provrt, te se smanjuje hrapavost obrađene površine (sl. 42d). Alat za razvrtavanje zove se razvrtalo.

Alati za bušenje, upuštanje i razvrtavanje opisani su u članku *Alati*, TE1, str. 85...88. Bušenje, upuštanje i razvrtavanje obavlja se na različitim alatnim strojevima: bušilicama, glodalicama, tokarilicama i dr. (v. *Alatni strojevi*, TE1, str. 98).

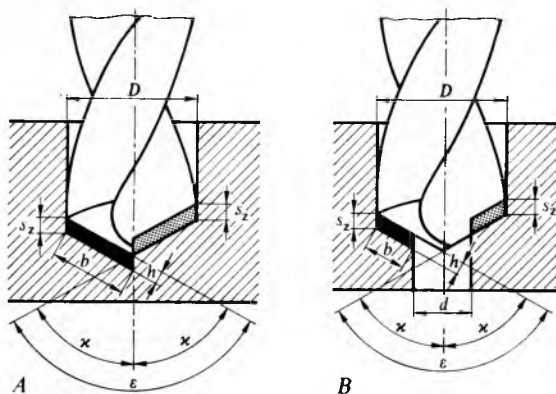
Istokarivanjem se grubo i završno obrađuju provrti, najčešće na velikim obracima, npr. kućištima, i sl. (sl. 42e). Kao alat služi bušna motka, a najčešće se obrađuje na horizontalnoj bušilici ili na glodalici (manji obraci), na bušilici-glodalici, odnosno na obradnom centru (v. *Alatni strojevi*, TE1, str. 98).

Režim obradbe obuhvaća brzinu rezanja i posmak pri bušenju, upuštanju i razvrtavanju. Brzina rezanja računa se prema jednadžbi (34), gdje je  $D$  promjer alata. Posmak  $s$  za jedan okretaj alata određuje se jednadžbom (36). Brzina rezanja pri istokarivanju računa se za promjer provrta  $D$  koji nastaje istokarivanjem (sl. 42e), a dubina rezanja određuje se prema izrazu (37).

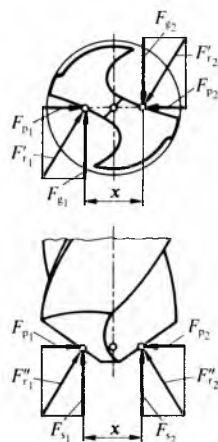
Presjek neodrezane strugotine pri bušenju i upuštanju iznosi

$$A = \frac{1}{2} s D = b h z, \quad (41)$$

gdje je  $z$  broj oštrica alata (npr. za zavojno svrdlo  $z = 2$ ),  $b$  širina strugotine i  $h$  debljina strugotine (sl. 43). Presjek neodrezane strugotine pri istokarivanju jednak je kao pri tokarenju.



Sl. 43. Dimenzije neodrezane strugotine pri bušenju. A bušenje u puno, B proširivanje provrta;  $s_z$  posmak po oštrici,  $h$  debljina strugotine,  $b$  širina strugotine,  $x$  prisloni kut,  $\epsilon$  vršni kut



Sl. 44. Sile rezanja na zavojnom svrdlu.  $F_{r1}$  i  $F_{r2}$  projekcije sile  $F_{r1}$  i  $F_{r2}$  u horizontalnoj ravni.  $F'_{r1}$  i  $F'_{r2}$  projekcije  $F_{r1}$  i  $F_{r2}$  u vertikalnoj ravni

Sile rezanja pri bušenju  $F_{r1}$  i  $F_{r2}$  na svakoj se oštrici rastavljaju na sljedeće komponente (sl. 44): glavne sile rezanja  $F_{g1}$  i  $F_{g2}$ , posmične sile  $F_{s1}$  i  $F_{s2}$  i pasivne sile  $F_{p1}$  i  $F_{p2}$ . Glavna je sila rezanja

$$F_g = F_{g1} + F_{g2} = 2 F_{gz}, \quad (42)$$

a posmična

$$F_s = F_{s1} + F_{s2} = 2 F_{sz}. \quad (43)$$

Tablica 5  
SPECIFIČNE SILE REZANJA PRI BUŠENJU

| Materijal obratka | $\sigma_M$<br>N/mm <sup>2</sup> | $1 - z^*$       | $f_{s,1+2}$<br>N/mm <sup>2</sup> | $1 - y^{**}$    | $f_{t,1+2}$<br>N/mm <sup>2</sup> |
|-------------------|---------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Č. 5421           | 600                             | $0,82 \pm 0,04$ | $2690 \pm 230$                   | $0,55 \pm 0,06$ | $1240 \pm 160$                   |
| Č. 4732           | 1080                            | $0,86 \pm 0,06$ | $2720 \pm 420$                   | $0,71 \pm 0,04$ | $2370 \pm 230$                   |
| Č. 4145           | 710                             | $0,76 \pm 0,03$ | $2780 \pm 220$                   | $0,56 \pm 0,07$ | $1630 \pm 300$                   |
| Č. 3230           | 650                             | $0,85 \pm 0,04$ | $2390 \pm 250$                   | $0,62 \pm 0,02$ | $1360 \pm 100$                   |
| Č. 1731           | 850                             | $0,87 \pm 0,03$ | $2200 \pm 200$                   | $0,57 \pm 0,03$ | $1170 \pm 100$                   |
| Č. 0545           | 560                             | $0,82 \pm 0,03$ | $1960 \pm 160$                   | $0,71 \pm 0,02$ | $1250 \pm 70$                    |
| Č. 4320           | 560                             | $0,83 \pm 0,03$ | $2020 \pm 200$                   | $0,64 \pm 0,03$ | $1220 \pm 120$                   |
| Č. 4830           | 610                             | $0,80 \pm 0,03$ | $1840 \pm 150$                   | $0,64 \pm 0,03$ | $1460 \pm 140$                   |

\* u izrazu (47b)

\*\* u izrazu (49)

Tablica 6  
PREPORUKE REŽIMA OBRADBE PRI BUŠENJU  
ZAVOJNIM SVRDLOM

| Materijal obratka<br>čvrstoća<br>(N/mm <sup>2</sup> )<br>ili tvrdoća | Materijal svrdla* | Brzina rezanja<br>m/min | Promjer svrdla $D$ , mm |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                                                                      |                   |                         | 2                       | 5    | 8    | 12   | 16   | 25   | 40   |
|                                                                      |                   |                         | Posmak, mm              |      |      |      |      |      |      |
| Konstr. čelik.<br>500                                                | BČ                | 28...40                 | 0,04                    | 0,11 | 0,16 | 0,22 | 0,26 | 0,30 | 0,45 |
|                                                                      | P20               | 50...75                 | 0,03                    | 0,06 | 0,10 | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,22 |
|                                                                      | BČ                | 25...35                 | 0,03                    | 0,10 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,28 | 0,40 |
|                                                                      | P30               | 40...60                 | 0,02                    | 0,04 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 | 0,18 |
| 500...700                                                            | BČ                | 20...30                 | 0,02                    | 0,07 | 0,12 | 0,16 | 0,20 | 0,25 | 0,32 |
|                                                                      | BČ                | 12...25                 | 0,015                   | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,28 |
|                                                                      | P30               | 40...55                 | 0,01                    | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 |
|                                                                      | BČ                | 8...15                  | 0,01                    | 0,04 | 0,08 | 0,12 | 0,14 | 0,18 | 0,23 |
| 900...1100                                                           | P30               | 25...35                 | 0,01                    | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 |
|                                                                      | P30               | 15...25                 | 0,01                    | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,10 |
|                                                                      | P30               | 10...18                 | 0,008                   | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 |
|                                                                      | P30               | 10...18                 | 0,008                   | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 |
| 1100...1400                                                          | BČ                | 7...15                  | 0,02                    | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,28 |
|                                                                      | P30               | 20...30                 | —                       | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 |
|                                                                      | P30               | 20...30                 | —                       | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 |
|                                                                      | P30               | 20...30                 | —                       | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 |
| 1400                                                                 | BČ                | 7...15                  | 0,02                    | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,28 |
|                                                                      | P30               | 20...30                 | —                       | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 |
|                                                                      | P30               | 20...30                 | —                       | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 |
|                                                                      | P30               | 20...30                 | —                       | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 |
| Nerd. čelik                                                          | BČ                | 7...15                  | 0,02                    | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,28 |
|                                                                      | P30               | 20...30                 | —                       | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 |
|                                                                      | P30               | 20...30                 | —                       | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 |
|                                                                      | P30               | 20...30                 | —                       | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 |
| Mn tvrdi čelik                                                       | BČ                | 6...8                   | —                       | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,12 |
|                                                                      | P30               | 6...8                   | —                       | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,12 |
|                                                                      | P30               | 6...8                   | —                       | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,12 |
|                                                                      | P30               | 6...8                   | —                       | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,12 |
| Sivi kovkasti<br>(temper) lijev,<br>< 200 HB                         | BČ                | 20...35                 | 0,08                    | 0,16 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,45 | 0,50 |
|                                                                      | K20               | 75...90                 | 0,04                    | 0,08 | 0,10 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,30 |
|                                                                      | BČ                | 15...25                 | 0,05                    | 0,09 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,32 | 0,40 |
|                                                                      | K10               | 50...75                 | 0,02                    | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,12 | 0,16 | 0,20 |
| > 200 HB                                                             | BČ                | 20...35                 | 0,08                    | 0,16 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,45 | 0,50 |
|                                                                      | K20               | 75...90                 | 0,04                    | 0,08 | 0,10 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,30 |
|                                                                      | BČ                | 15...25                 | 0,05                    | 0,09 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,32 | 0,40 |
|                                                                      | K10               | 50...75                 | 0,02                    | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,12 | 0,16 | 0,20 |
| Kokilni lijev                                                        | K10               | 6...10                  | r.**                    | r.   | r.   | r.   | 0,05 | 0,08 | 0,12 |
|                                                                      | K10               | 6...10                  | r.**                    | r.   | r.   | r.   | 0,05 | 0,08 | 0,12 |
|                                                                      | K10               | 6...10                  | r.**                    | r.   | r.   | r.   | 0,05 | 0,08 | 0,12 |
|                                                                      | K10               | 6...10                  | r.**                    | r.   | r.   | r.   | 0,05 | 0,08 | 0,12 |
| Čelični lijev<br>450                                                 | BČ                | 30...40                 | 0,05                    | 0,12 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 |
|                                                                      | P30               | 40...60                 | 0,02                    | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,16 | 0,20 |
|                                                                      | BČ                | 25...35                 | 0,05                    | 0,10 | 0,15 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 |
|                                                                      | P30               | 25...40                 | 0,02                    | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 |
| 450...700                                                            | BČ                | 30...40                 | 0,05                    | 0,12 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 |
|                                                                      | P30               | 40...60                 | 0,02                    | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,16 | 0,20 |
|                                                                      | BČ                | 25...35                 | 0,05                    | 0,10 | 0,15 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 |
|                                                                      | P30               | 25...40                 | 0,02                    | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 |
| Bakar, bronca,<br>cink                                               | BČ                | 40...70                 | 0,04                    | 0,10 | 0,16 | 0,22 | 0,25 | 0,30 | 0,40 |
|                                                                      | K20               | 80...100                | 0,04                    | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 | 0,18 |
|                                                                      | K20               | 80...100                | 0,04                    | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 | 0,18 |
|                                                                      | K20               | 80...100                | 0,04                    | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 | 0,18 |
| Mjed<br>< 80 HB<br>> 80 HB                                           | BČ                | 60...120                | 0,07                    | 0,16 | 0,25 | 0,32 | 0,40 | 0,48 | 0,60 |
|                                                                      | BČ                | 30...75                 | 0,04                    | 0,10 | 0,15 | 0,18 | 0,20 | 0,24 | 0,28 |
|                                                                      | BČ                | 30...75                 | 0,04                    | 0,10 | 0,15 | 0,18 | 0,20 | 0,24 | 0,28 |
|                                                                      | BČ                | 30...75                 | 0,04                    | 0,10 | 0,15 | 0,18 | 0,20 | 0,24 | 0,28 |
| Al slitine<br>meke                                                   | AČ                | 40...80                 | 0,07                    | 0,14 | 0,20 | 0,26 | 0,30 | 0,36 | 0,40 |
|                                                                      | BČ                | 120...200               | 0,06                    | 0,16 | 0,22 | 0,32 | 0,40 | 0,50 | 0,62 |
|                                                                      | K20               | 200...300               | 0,08                    | 0,16 | 0,20 | 0,25 | 0,28 | 0,36 | 0,45 |
|                                                                      | BČ                | 100...160               | 0,05                    | 0,14 | 0,20 | 0,25 | 0,32 | 0,38 | 0,42 |
| tvrde                                                                | K20               | 150...250               | 0,03                    | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,16 | 0,20 | 0,24 |
|                                                                      | K20               | 150...250               | 0,03                    | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,16 | 0,20 | 0,24 |
|                                                                      | K20               | 150...250               | 0,03                    | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,16 | 0,20 | 0,24 |
|                                                                      | K20               | 150...250               | 0,03                    | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,16 | 0,20 | 0,24 |
| Mg slitine                                                           | AČ                | 80...120                | 0,07                    | 0,14 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 |
|                                                                      | BČ                | 100...120               | 0,07                    | 0,18 | 0,28 | 0,35 | 0,42 | 0,55 | 0,68 |
|                                                                      | K20               | 125...250               | —                       | 0,06 | 0,08 | 0,12 | 0,16 | 0,22 | 0,26 |
|                                                                      | K20               | 125...250               | —                       | 0,06 | 0,08 | 0,12 | 0,16 | 0,22 | 0,26 |
| Umjetne mase                                                         | BČ                | 30...80                 | 0,03                    | 0,05 | 0,08 | 0,12 | 0,16 | 0,22 | 0,28 |
|                                                                      | K20               | 120...200               | 0,03                    | 0,05 | 0,08 | 0,16 | 0,22 | 0,30 | 0,40 |
|                                                                      | K20               | 120...200               | 0,03                    | 0,05 | 0,08 | 0,16 | 0,22 | 0,30 | 0,40 |
|                                                                      | K20               | 120...200               | 0,03                    | 0,05 | 0,08 | 0,16 | 0,22 | 0,30 | 0,40 |
| Mramor                                                               | K10               | 25...30                 | r.                      | r.   | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,15 | 0,20 |
|                                                                      | K10               | 6...10                  | r.                      | r.   | 0,03 | 0,06 | 0,10 | 0,15 | 0,20 |
|                                                                      | K10               | 6...10                  | r.                      | r.   | 0,03 | 0,06 | 0,10 | 0,15 | 0,20 |
|                                                                      | K10               | 6...10                  | r.                      | r.   | 0,03 | 0,06 | 0,10 | 0,15 | 0,20 |
| Granit                                                               | K10               | 15...30                 | r.                      | r.   | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 |
|                                                                      | K10               | 15...30                 | r.                      | r.   | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 |
|                                                                      | K10               | 15...30                 | r.                      | r.   | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 |
|                                                                      | K10               | 15...30                 | r.                      | r.   | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 |
| Staklo                                                               | K10               | 10...30                 | r.                      | r.   | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 |
|                                                                      | K10               | 10...30                 | r.                      | r.   | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 |
|                                                                      | K10               | 10...30                 | r.                      | r.   | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 |
|                                                                      | K10               | 10...30                 | r.                      | r.   | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 |
| Porculan                                                             | K10               | 10...30                 | r.                      | r.   | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 |
|                                                                      | K10               | 10...30                 | r.                      | r.   | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 |
|                                                                      | K10               | 10...30                 | r.                      | r.   | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 |
|                                                                      | K10               | 10...30                 | r.                      | r.   | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 |

\* Materijal alata: AČ alatni čelik, BČ brzorezni čelik. P20, P30, K10 i K20 tvrdi metal.

\*\* r. ručni posmak.

Posmak po oštrici iznosi

$$s_z = \frac{s}{2}. \quad (44)$$

Presjek je neodrezane strugotine koju skida jedna oštrica zavojnog svrdla

$$A_z = bh = \frac{sD}{4}, \quad (45)$$

gdje je  $b = D/(2 \sin \kappa)$ ,  $h = s_z \sin \kappa$  (sl. 43). Glavna je sila rezanja na jednoj oštrici

$$F_{gz} = A_z f_s. \quad (46)$$

Kad se buši u puno, glavna je sila rezanja

$$F_{gz} = \frac{D}{2 \sin \kappa} \left( \frac{s}{2} \sin \kappa \right)^{1-z} f_{s,1-1}, \quad (47a)$$

a kad se proširuje provrt

$$F_{gz} = \frac{D-d}{2 \sin \kappa} \left( \frac{s}{2} \sin \kappa \right)^{1-z} f_{s,1-1}. \quad (47b)$$

Glavna sila rezanja  $F_{gz}$  može se odrediti mjerenjem zakretnog momenta

$$M = F_{gz} x, \quad (48)$$

gdje je  $x$  razmak između  $F_{s1}$  i  $F_{s2}$  (sl. 44), koji iznosi  $x = 0,5 D$ . Posmična je sila

$$F_s = D \left( \frac{s}{2} \sin \kappa \right)^{1-y} f_{t,1-1}. \quad (49)$$

Eksponenti  $(1-z)$  i  $(1-y)$ , te specifične jedinične sile  $f_{s,1-1}$  i  $f_{t,1-1}$  dobiveni su pokusima (tabl. 5).

Snaga rezanja (kW) iznosi

$$P_r = \frac{M \pi n}{30000}, \quad (50)$$

gdje je  $M$  zakretni moment (Nm), a  $n$  brzina vrtnje ( $\text{min}^{-1}$ ) zavojnog svrdla.

Snaga stroja određena je izrazom (15).

Volumen skinutog materijala ( $\text{m}^3/\text{min}$ ) iznosi

$$V = \frac{1}{4} D^2 \pi s n. \quad (51)$$

Posmake  $s$  u smjernicama za izbor režima obradbe zavojnim svrdlom (tabl. 6) treba pomnožiti korekcijskim faktorom dubine bušenja (tabl. 7).

Režimi obradbe za istokarivanje isti su kao i za tokarenje.

Tablica 7  
MULTIPLIKATORI POSMAKA ZA RAZLIČITE  
DUBINE BUŠENJA

| Promjer svrdla<br>mm | Dubina bušenja       |                    |                   |
|----------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| <20                  | $(4 \dots 5) D^*$    | $(5 \dots 8) D$    | $8 D$             |
| 20...32              | $(3,15 \dots 4) D$   | $(4 \dots 6,3) D$  | $(6,3 \dots 8) D$ |
| 32...50              | $(2,5 \dots 3,15) D$ | $(3,15 \dots 5) D$ | $(5 \dots 6,3) D$ |
| Multiplikator        | 1                    | 0,8                | 0,5               |

\*  $D$  je promjer svrdla (mm)

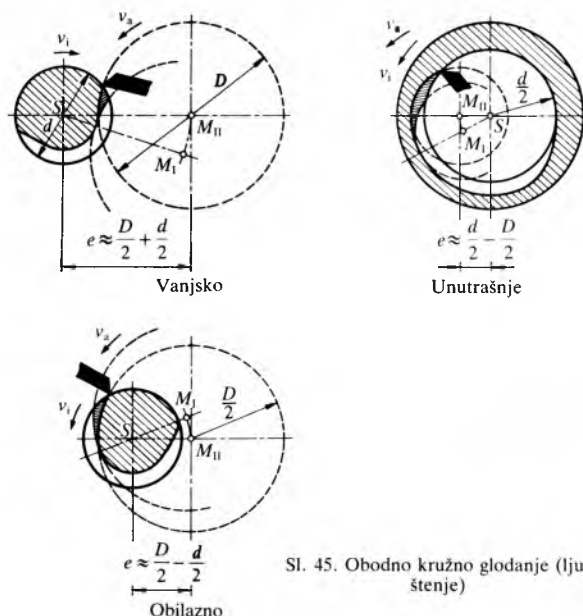
### Glodanje

Glodanje je postupak kojim se dobivaju ravne i zakrivljene plohe. Glavno gibanje obavlja alat, a pomoćno najčešće obradak. Presjek neodrezane strugotine nije konstantan, a rez je prekinut. Razlikuju se sljedeće vrste glodanja: obodno glodanje: plošno protusmjerno (sl. 8) ili istosmjerno (sl. 9), kružno (ljuštenje) vanjsko, unutrašnje i obilazno (sl. 45); čeonno glodanje (sl. 10); odvalno glodanje (v. poglavlje *Izradba ozubljenja*).

Obodno plošno glodanje podesno je za manje ravne i za profilirane površine, dok je obodno kružno glodanje vrlo produktivan postupak, npr. za izradbu trapeznog ili kvadratnog navoja (navojna vretena). Čeonno glodanje najproduktiv-

niji je postupak obradbe većih ravnih ploha. Podesnim oblikom glodaće glave (mali kut  $\kappa$ ) mogu se postići vrlo male hrapavosti obrađene površine, pa nije potrebno naknadno bušenje.

Istosmjerno glodanje ima veću srednju debljinu strugotine od debljine strugotine protusmjernog glodanja, pa je potrebna manja specifična sila rezanja za istosmjerno glodanje. Osim toga, vibracije se pojavljuju kasnije, pa je i hrapavost površine obrađene istosmjernim glodanjem manja. Izgleda da bi trebalo biti obratno, jer pri protusmjernom glodanju zub ulazi postepeno u obradak. Međutim, zbog podatljivosti protusmjernog obradnog sustava, površina obratka relativno se odmakne od osi glodala. Zato u početku zub tare po površini bez skidanja strugotine sve dok sila  $F_{ns}$  (sl. 24) ne postane dovoljno velika. Tada zub naglo uđe dublje u obradak nego pri istosmjernom glodanju. Zbog toga i otvrdnijuje obrađena površina (npr. pri protusmjernom glodanju nerđajućih čelika), što otežava obradbu i alat se više troši.



Sl. 45. Obodno kružno glodanje (ljuštenje)

Istosmjerno glodanje moguće je samo na glodalicama opremljenim uređajem za takvo glodanje kojim se poništava zračnost između navoja vučnog vretena i matice, ili kad ne postoji mogućnost da komponenta sile rezanja u smjeru posmaka povuče obradak ispod glodala, jer bi tada, zbog povećanja presjeka strugotine, mogli pući zubi i glodalo. Dakle, veću se proizvodnost postiže istosmjernim glodanjem. Ako je, međutim, površina obratka vrlo tvrda (npr. glodanje lijevanog željeza s tvrdom korom) prikladnije je protusmjerno glodanje.

Alati za glodanje su glodala i glodaće glave s mehanički pričvršćenim pločicama ili s umetnutim noževima (v. *Alati*, TE 1, str. 88, JUS K.D2.001...205, JUS K.D0.200...203, JUS K.D2.500...526). Oblik alata znatno utječe na postojanost glodala jer nastaju udarna opterećenja oštrice alata. Oblikovanjem oštrice tzv. fasetom (sl. 12) postojanost glodala i glodaće glave može se višestruko povećati. Alati za glodanje i ostali alati za sustave s automatskom izmjenom alata posebno su oblikovani.

Alatni strojevi za glodanje jesu glodalice i bušilice-glodalice (v. *Alatni strojevi*, TE 1, str. 98). Međutim, glodati se može i na drugim strojevima, npr. na horizontalnoj bušilici, specijalnim alatnim strojevima i dr.

Režim obradbe glodanja određen je brzinom rezanja  $v$ , koja se računa prema izrazu (34) gdje je  $D$  promjer glodala, posmičnom brzinom  $v_t$  i dubinom rezanja  $a$  (tabl. 8). Posmična brzina ( $\text{mm}/\text{min}$ ) (sl. 8, 9 i 10) iznosi

$$v_t = s_z z n, \quad (52)$$

Tablica 8  
SMJERNICE ZA BRZINE REZANJA PRI GLODANJU OKRETNIM PLOČICAMA OD TVRDOG METALA.  
ZA LEMLJENE PLOČICE BRZINA SE REZANJA SMANJUJE ZA 30%

| Materijal obratka                                               | Tvrdća HB                     | Tvrdi metal (oznaka JUS i ISO)                        |                                                      |                                                       |                                               |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                                                 |                               | P10                                                   | P15                                                  | P40                                                   | M40                                           |
|                                                                 |                               | Posmak po zubu, mm                                    |                                                      |                                                       |                                               |
|                                                                 |                               | 0,4...0,2...0,1                                       | 0,4...0,2...0,1                                      | 0,4...0,2...0,1                                       | 0,4...0,2...0,1                               |
|                                                                 |                               | Brzina rezanja, m/min                                 |                                                      |                                                       |                                               |
| Nelegirani ugljični čelik<br>C 0,15%<br>C 0,35%<br>C 0,70%      | 125<br>150<br>250             | 170...235...300<br>115...160...210<br>100...135...175 | 150...205...260<br>105...140...180<br>85...120...150 | 100...130...160<br>70... 90 ...110<br>55... 75 ... 90 | 70...95...115<br>50...65...80<br>40...55...65 |
| Niskolegirani čelik<br>žaren<br>poboljšan                       | 125...200<br>200...450        | 115...155...190<br>95...120                           | 100...135...165<br>60... 85 ...105                   | 65... 85 ...105<br>40... 55 ... 65                    | 45...60...75<br>30...40...45                  |
| Visokolegirani čelik<br>žaren<br>poboljšan                      | 150...250<br>250...500        | 135...180<br>90...115                                 | 90...115...150<br>55... 75 ...100                    | 60... 80 ... 90<br>40... 50 ... 60                    | 40...50...65<br>25...35...45                  |
| Nerdajući čelik<br>feritni<br>austenitni                        | 175...225<br>150...200        | 190...245                                             | 120...165...210<br>95...130...165                    | 80...105...130<br>65... 85 ...100                     | 60...75...90<br>45...60...75                  |
| Čelični lijev<br>nelegiran<br>niskolegirani<br>visokolegirani   | 225<br>150...250<br>150...300 | 140...175<br>115...145                                | 85...120...150<br>75...100...125<br>55... 75 ... 85  | 60... 75 ... 95<br>50... 65 ... 80<br>35... 45 ... 55 | 40...50...65<br>35...45...55<br>25...35...40  |
| Materijal obratka                                               | Tvrdća HB                     | Tvrdi metal (oznaka JUS i ISO)                        |                                                      |                                                       |                                               |
|                                                                 |                               | K10                                                   | K15                                                  | K20                                                   |                                               |
|                                                                 |                               | Posmak po zubu, mm                                    |                                                      |                                                       |                                               |
|                                                                 |                               | 0,4...0,2...0,1                                       | 0,4...0,2...0,1                                      | 0,4...0,2...0,1                                       |                                               |
|                                                                 |                               | Brzina rezanja, m/min                                 |                                                      |                                                       |                                               |
| Vrlo tvrdi čelik <sup>1), 2)</sup>                              | > 50 HRc                      | 10...15                                               |                                                      |                                                       |                                               |
| Kovkasti (temper) lijev<br>kratka strugotina<br>duga strugotina | 110...145<br>200...250        | 100...125...150<br>125...150...175                    | 90...115...135<br>100...125...150                    | 65...80...95<br>50...65...80                          |                                               |
| Sivi lijev<br>niske čvrstoće<br>visoke čvrstoće i legiran       | 150...225<br>200...300        | 90...130...170<br>75...100...125                      | 85...120...155<br>70... 90 ...115                    | 70...95...120<br>50...70...90                         |                                               |
| Kuglastografitni lijev<br>feritni<br>perlitni                   | 125...200<br>200...300        | 90...110...125<br>80...100...115                      | 70... 90 ...115<br>65... 85 ...100                   | 50...65...80<br>45...60...70                          |                                               |
| Kokilni lijev                                                   | 40...60 HRc                   | 15...25                                               |                                                      |                                                       |                                               |
| Aluminijske slitine<br>neotvrdnute<br>otvrdnute                 | 30...100<br>80...150          |                                                       | 600...800...1000<br>350...500...650                  | 600...800...1000<br>350...500...650                   |                                               |
| Bronce, mjedi                                                   | 60...150                      |                                                       | 80...130...180                                       | 80...120...170                                        |                                               |

<sup>1)</sup> Negativni prednji kut  $\gamma$ .

<sup>2)</sup> Negativna faseta.

gdje je  $s_z$  posmak po jednom zubu (mm),  $z$  broj zubi glodala, a  $n$  brzina vrtnje glodala ( $\text{min}^{-1}$ ).

Pri izboru posmične brzine najprije se treba odlučiti za vrijednost posmaka po zubu, jer o njoj ovisi opterećenje zuba. O posmičnoj brzini ovisi volumen ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ) skinute strugotine

$$V = ab_0 v_t, \quad (53)$$

gdje je  $a$  dubina rezanja, a  $b_0$  širina obradbe.

Postojanost alata ovisi o trošenju glodala, koje je slično trošenju tokarskog noža, iako su pri glodanju veća termička naprezanja. Srednje trošenje glodala ili glodače glave iznosi

$$B = \frac{B_1 + B_2 + \dots + B_z}{z}, \quad (54)$$

gdje su  $B_1, B_2 \dots B_z$  srednje širine pojasa trošenja na stražnjoj površini pojedinog zuba, a  $z$  broj zubi glodala. Kriterij istrošenja glodala različit je za grubu i za završnu obradbu

Tablica 9  
SREDNJA ŠIRINA POJASA TROŠENJA NA  
STRAŽNJOJ PLOHI KAO KRITERIJ ISTROŠENJA  
GLODALA

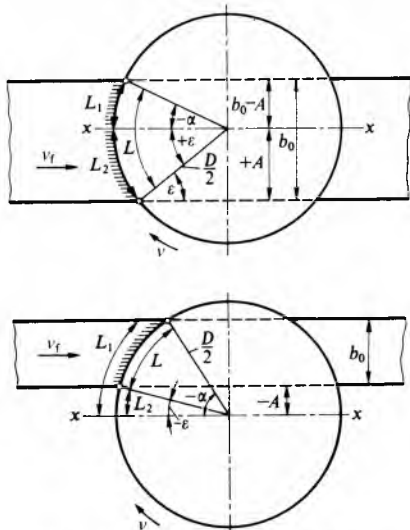
| Glodalo             | Kriterij istrošenja glodala B, mm |                 |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------|
|                     | Gruba obradba                     | Završna obradba |
| Valjkasto, za čelik | 0,4...0,6                         | 0,15...0,25     |
| za sivi lijev       | 0,5...0,8                         | 0,2...0,3       |
| Valjkasto, čelno    | 0,3...0,5                         | 0,2...0,25      |
| Prstasto            | 0,15...0,2                        | 0,1...0,15      |
| Kolutno             | 0,4...0,6                         | 0,15...0,25     |
| Profilno, modulno   | 0,6...0,7                         | 0,2...0,3       |
| odvalno             | 0,3...0,6*                        | 0,2             |
| Glodača glava       | 1...1,7                           | 0,3...0,5       |

\* Većim modulima odgovara veća vrijednost B zuba s najvećim istrošenjem.

(tabl. 9). Ovisnost postojanosti alata  $T$  o brzini rezanja  $v$  određena je Taylorovom jednadžbom (22), odnosno jednadž-

bama (23) i (24) u kojima je  $s$  posmak po zubu. Vrijednosti konstanti  $K$  i  $C$ , te eksponenta  $k_v$ ,  $k_s$ ,  $k_a$ ,  $m$ ,  $x$  i  $y$  mogu se naći u literaturi, ali zbog mnogo utjecajnih činilaca njihova je pouzdanost malena, pa za veće serije treba pokusima odrediti vrijednosti tih veličina.

Povećanje broja zubi glodala najviše utječe na smanjenje postojanosti alata jer se povećava dovedena energija. Zbog veće dovedene energije veća je temperatura oštice, pa je veće trošenje, odnosno manja postojanost alata. Način ulaza zuba u obradak i izlaza iz njega veoma utječe na postojanost glodala. Povoljna točka dodira postiže se prikladnim oblikom alata, npr. kombinacijom prednjeg kuta  $\gamma$  i kuta nagiba oštice  $\lambda$ , te povoljnim ulaznim kutom  $\varepsilon$ . Negativan ili mali ulazni kut  $\varepsilon$  postiže se ekscentričnim postavljanjem čeonog glodala s obzirom na obradak (sl. 46), pa se tako dobiva povoljan prvi dodir zuba s glodalom i veća postojanost alata.



Sl. 46. Ulazni kut  $\varepsilon$  pri čeonom glodanju

Promjer glodala pri čeonom glodanju odabire se tako da su zadovoljeni sljedeći omjeri širine glodanja  $b_0$  i promjera glodanja  $D$ :  $\frac{b_0}{D} = 0,5 \dots 0,6$  za obradbu čelika i čeličnog lijeva i  $\frac{b_0}{D} = 0,6 \dots 0,7$  za obradbu sivog lijeva i lakih metala.

Glavna sila rezanja (tangencijalna sila, sl. 24) jednog od zubi iznosi

$$F_{gz} = A f_s = b h f_s, \quad (55)$$

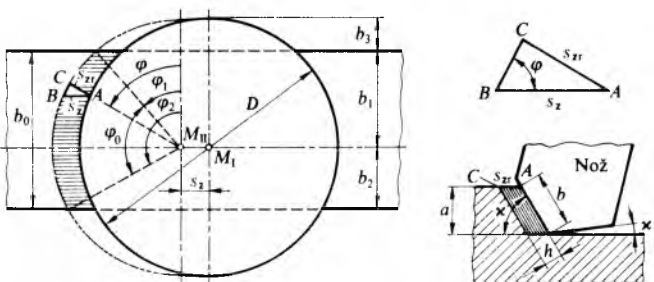
gdje je, prema sl. 47, za čeonu glodanje

$$b = \frac{a}{\sin \kappa}, \quad (56a)$$

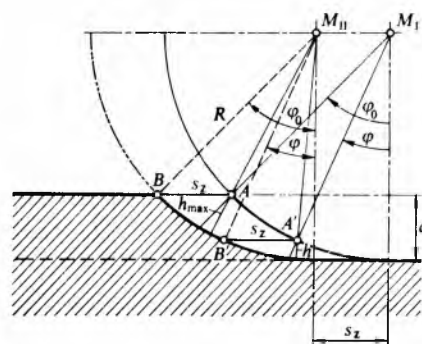
$$h = s_z \sin \varphi \sin \kappa. \quad (56b)$$

Srednja debljina (mm) neodrezane strugotine pri čeonom glodanju iznosi

$$h_{sr} = \frac{114,6}{\varphi_0} s_z \frac{b_0}{D} \sin \kappa, \quad (57)$$



Sl. 47. Dimenzije neodrezane strugotine pri čeonom glodanju



Sl. 48. Dimenzije neodrezane strugotine pri obodnom glodanju

dok je srednja debljina (mm) neodrezane strugotine pri obodnom glodanju, prema sl. 48,

$$h_{sr} = \frac{114,6}{\varphi_0} s_z \frac{a}{D}, \quad (58)$$

gdje je  $\varphi_0$  zahvatni kut u stupnjevima koji iznosi prema sl. 47:

$$\varphi_0 = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (59)$$

Kutovi  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  određeni su izrazima:

$$\cos \varphi_1 = \frac{2b_1}{D}, \quad (60)$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{2b_2}{D}. \quad (61)$$

Specifična sila rezanja  $f_s$  može se odrediti iz tabl. 1, već prema srednjoj debljini neodrezane strugotine  $h_{sr}$ , ili točnije prema vrijednosti  $f_{s,1-1}$

$$f_s = \frac{f_{s,1-1}}{h_{sr}^{z_1}}. \quad (62)$$

Vrijednosti eksponenta  $z_1$  nalaze se u tabl. 1. Također treba odrediti korekcijske faktore  $K_v$ ,  $K_f$  i  $K_t$ . Faktor  $K_s = 1$  ako se ne upotrebljava rezna keramika. Faktor je prednjeg kuta

$$K_v = 1 - \frac{\gamma - \gamma_0}{66,7}, \quad (63)$$

gdje je  $\gamma_0 = 6^\circ$  za glodanje čelika i  $\gamma_0 = 2^\circ$  za obradbu sivog lijeva. Faktor brzine rezanja  $K_v$  određuje se prema sl. 38, dok je faktor istrošenja alata  $K_t = 1,2 \dots 1,3$ .

Ukupna je srednja glavna sila rezanja

$$F_{gsr} = b h_{sr} f_s K_v K_f K_t K_s, \quad (64)$$

gdje je  $z_z$  zbroj zubi u zahvatu, koji je određen izrazom

$$z_z = \frac{\varphi_0 z}{360^\circ}, \quad (65)$$

gdje je  $z$  broj zubi glodala.

Snaga rezanja i snaga stroja određeni su izrazima (14) i (15).

Osnovni pristup izboru režima obradbe naveden za tokarenje vrijedi i za glodanje.

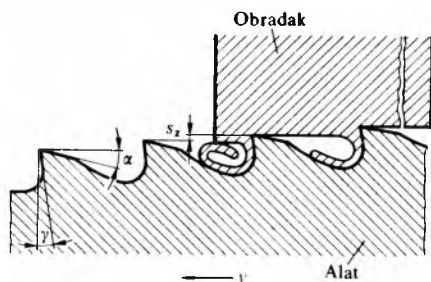
### Vlačenje (provlačenje i izvlačenje)

Vlačenje je postupak skidanja strugotine pri kojemu alat ima više različitih zubi, od kojih samo dio zubi (1...5, iznimno 8) istodobno skida strugotinu. Jedino se alat giba, i to pravocrtno. Povećanjem sljedećeg zuba postiže se da on skida određenu debljinu materijala, odnosno da postoji posmak po zubu  $s_z$  (sl. 49).

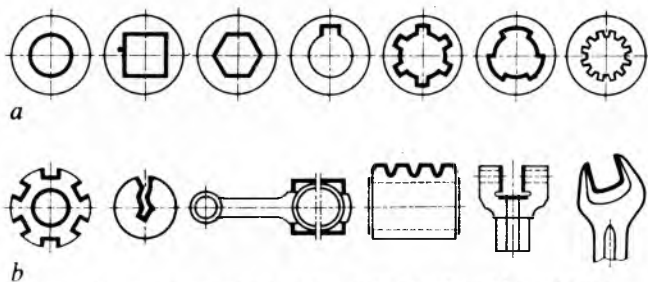
Obradba vlačenjem može biti unutrašnje provlačenje (sl. 50a) ili vanjsko izvlačenje (sl. 50b).

Alat za provlačenje jest igla za provlačenje (sl. 51) s reznim dijelovima, koji imaju zube za grubu obradbu (npr.  $s_z \approx 0,08$  mm), zube za polugrubu obradbu (npr.  $s_z \approx$

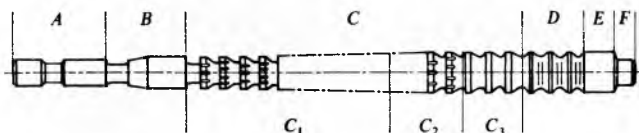
$\approx 0,01 \dots 0,02$  mm) i zube za završnu obradbu ( $s_z = 0$ ). Posmak po zubu  $s_z$  ovisi o vrsti alata za provlačenje i o materijalu obratka. Rezni dio za završnu obradbu ima konstantan promjer da bi se zadržala konačna dimenzija obrađenog provrta, iako se oštrenjem igle (brušenje prednje plohe) smanjuje promjer dijela igle za grubu, polugrubu i jednog dijela za završnu obradbu. Kad se oštrenjem alata smanji promjer i zadnjeg reda zubi za završnu obradbu, igla se ne može više upotrijebiti za taj promjer.



Sl. 49. Vlačenje



Sl. 50. Vrste vlačjenja. a unutrašnje provlačenje, b vanjsko izvlačenje

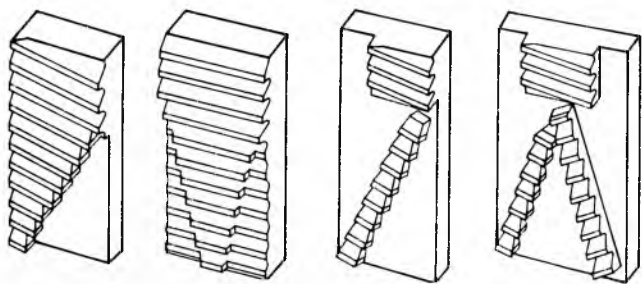
Sl. 51. Igla za provlačenje (kalibriranje). A hvatište, B prednja vodilica, C zubi za obradbu ( $C_1$  za grubu,  $C_2$  za polugrubu,  $C_3$  za završnu obradbu), D dio za zagladivanje, E stražnja vodilica, F hvatište

Postoje različite izvedbe alata za izvlačenje (sl. 52). Više o alatu za provlačenje v. *Alati, Provlačila*, TE 1, str. 91. Strojari za provlačenje su provlačilice, a za izvlačenje izvlačice (v. *Alati, Provlačilice i izvlačice*, TE 1, str. 109).

Vlačenje je postupak za grubu i završnu obradbu najčešće jednim alatom. Samo za veće dimenzije (dubine) skinutog materijala, zbog prevelike duljine igle ili rezne motke, treba upotrijebiti više alata za istu operaciju. Obično nakon vlačjenja nema dodatnih završnih obradbi. Zbog vrlo skupog alata vlačjenje uglavnom služi za veliku serijsku proizvodnju. Vlačjenje je visoko produktivan postupak, jer obradba traje samo dok igla prođe kroz obradak, npr. desetak sekunda.

Glavna sila rezanja  $F_g$  (sl. 53) iznosi

$$F_g = b s_z f_s z_z K_y K_i, \quad (66)$$

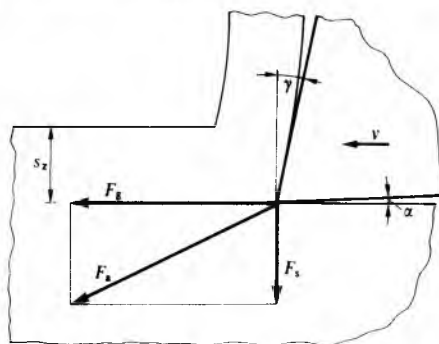


Sl. 52. Alati za izvlačenje ravnih površina (rezne motke)

gdje je  $b$  širina neodrezane strugotine koju skida zub,  $s_z$  posmak po zubu,  $z_z$  zbroj zubi u zahvatu,  $K_y$  faktor prednjeg kuta prema izrazu (63),  $K_i = 1,3 \dots 1,35$  faktor istrošenja alata, a  $f_s$  specifična sila rezanja,  $f_s = f_{s,1} \cdot h^{-0.2}$  (tabl. 1). Faktor brzine rezanja  $K_v$  za vlačjenje nije eksplicitno određen, ali treba spomenuti da se i pri malim brzinama rezanja ( $1 \dots 6$  m/min) sila smanjuje s povećanjem brzine rezanja. Ta je spoznaja vrlo važna za povećanje produktivnosti provlačenja, jer se u praksi smatra da će igla puknuti ako se poveća brzina rezanja. Posmična sila  $F_s$  (sl. 53) odnosi se prema glavnoj sili rezanja  $F_g$  približno kao 1:2.

Snaga rezanja i snaga stroja određene su izrazima (14) i (15), a stupanj je iskoristivosti stroja  $0,6 \dots 0,8$ .

Kriterijem istrošenja alata za vlačjenje određuje se, kao i za ostale postupke, trenutak kad treba prekinuti rad radi oštrenja alata. Jedan je od kriterija da je alat za vlačjenje istrošen kad srednja vrijednost maksimalne širine pojasa trošenja stražnje površine pet zubi koji se najviše troše iznosi  $B_{\max} = 0,2 \dots 0,4$  mm, što se određuje prema izrazu (54). Manja vrijednost  $B_{\max}$  vrijedi za provlačenje, a veća vrijednost za izvlačenje. Dobro konstruiran alat za vlačjenje može se oštriti  $10 \dots 30$  puta. Ako se jedan od zubi izrazito više troši od ostalih, rad treba prekinuti prije nego što je postignut kriterij istrošenja. Kao indirektan kriterij istrošenja alata za vlačjenje služi hrapavost obrađene površine ili odstupanja dimenzija koja više ne zadovoljavaju.



Sl. 53. Sile rezanja pri vlačjenju (ortogonalna obradba)

Vrlo približna postojanost alata za vlačjenje izražena brojem obrađenih obradaka iznosi: 25000 obradaka za žutu mjed, aluminij i legure aluminija, 15000 obradaka za bronzcu i čelik s dobrom obradiivošću, 6000 obradaka za legirane čelike i 800 obradaka za vatrootporne čelike.

Izbor režima obradbe vlačjenja razlikuje se od izbora režima obradbe do sada opisanih postupaka obradbe. Posmak po zubu  $s_z$  (tabl. 10) odabire se pri konstruiranju alata. Jedina je karakteristika režima obradbe koja se određuje nakon izradbe alata (u eksploataciji) brzina rezanja, za koju u literaturi postoje vrlo aproksimativni podaci (tabl. 11).

Vlačjenje se upotrebljava za velikoserijsku proizvodnju, pa se isplati obrađivati s različitim brzinama rezanja mjereći pri

Tablica 10  
POSMAK PO ZUBU ZA VLAČENJE

| Materijal obratka        | Posmak po zubu $s_z$ , mm |                 |
|--------------------------|---------------------------|-----------------|
|                          | Gruba obradba             | Završna obradba |
| Čelik, poboljšan         | 0,02...0,05               | 0,01            |
| Čelik, srednje tvrdoće   | 0,03...0,08               | 0,01            |
| Čelični lijev            | 0,05...0,10               | 0,01            |
| Kovkasti (temper) lijev  | 0,05...0,10               | 0,01...0,02     |
| Sivi lijev               | 0,10...0,25               | (0,01)...0,02   |
| Mjed                     | 0,10...0,30               | (0,01)...0,02   |
| Bronca                   | 0,10...0,60               | (0,01)...0,02   |
| Zn slitine, tlačni lijev | 0,10...0,25               | 0,02            |
| Al slitine               | 0,08...0,20               | 0,02            |
| Mg slitine, tlačni lijev | 0,20...0,40               | (0,02)...0,04   |
| Umjetne tvari            | 0,05...0,20               | 0,02            |

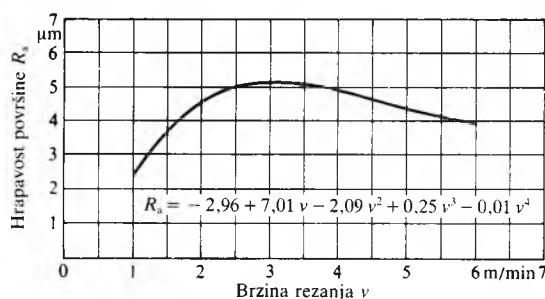
Materijal alata: brzorezni čelik.



Tablica 11  
BRZINE REZANJA ZA VLAČENJE

| Materijal obratka                        | Brzina rezanja $v$ , m/min |            |
|------------------------------------------|----------------------------|------------|
|                                          | Provlačenje                | Izvlačenje |
| Tvrđi lijev                              | 0,5...1                    | 0,5...1,5  |
| Čelik, vrlo tvrd                         | 1...2                      | 1...2      |
| Čelik, žilav                             | 2...4                      | 4...6      |
| Čelik, dobro obradljiv                   | 4...8                      | 6...10     |
| Sivi lijev, dobro obradljiv              | 6...8                      | 8...10     |
| Kovkasti (temper) lijev, dobro obradljiv | 4...8                      | 8...10     |
| Čelični lijev, dobro obradljiv           | 3...6                      | 6...8      |
| Mjed, bronca                             | 7,5...10                   | 8...12     |
| Lake legure                              | 10...14                    | 10...16    |
| Sivi lijev, zubi od tvrdog metala        | —                          | 35...45    |
| Poliplast                                | 3...6                      | —          |

Materijal alata: brzorezni čelik.



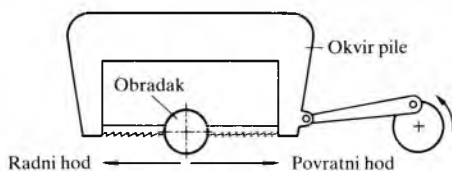
Sl. 54. Ovisnost hrapavosti obrađene površine o brzini rezanja pri provlačenju

tom hrapavost obrađene površine (sl. 54). Ako trošenje alata nije preveliko, uz zadovoljavajuću hrapavost obrađene površine, brzinu rezanja treba povećati i iznad brzina navedenih u tabl. 11. Zbog velikog trenja i relativno male brzine rezanja upotrebljava se ulje kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje.

### Piljenje

Piljenje obično služi za rezanje šipkastog materijala, cijevi i sl. Osnovni su postupci piljenja: okvirno piljenje, tračno piljenje, kružno piljenje i abrazivno piljenje.

**Okvirno piljenje** najstarije je strojno piljenje koje se u principu ne razlikuje od ručnog piljenja (sl. 55). Glavno pravolinijsko gibanje i posmično gibanje izvršava alat, tj. lisna pila s okvirom (v. *Alat*, TE 1, str. 93). Duljina lista pile mora biti mnogo veća od promjera obratka. Od svih postupaka piljenja okvirno piljenje ima najmanji učin odrezivanja.

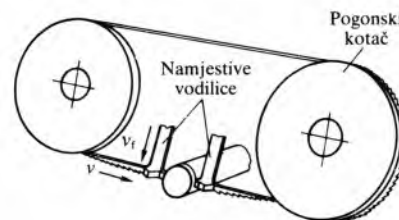


Sl. 55. Okvirno piljenje

**Tračno piljenje** (horizontalno i vertikalno) noviji je postupak piljenja metala. Najčešće se primjenjuje horizontalno tračno piljenje (sl. 56). Od navedenih četiriju postupaka piljenja tračno ima najmanju širinu reza, pa su otpad materijala piljenjem i potrebna snaga najmanji. Okomitost reza dobivena horizontalnim tračnim piljenjem može biti manja od 0,2 mm/100 mm. Osim velike proizvodnosti (npr. čelični trupac Č.1530 promjera  $D = 125$  mm može se odrezati za manje od 30 sekunda), najmanjeg otpada materijala zbog piljenja i najmanje potrebne snage, prednost je i u tome da se tračno piljenje može lako automatizirati.

Izboru alata za tračno piljenje treba posvetiti veću pažnju nego npr. za tokarenje, jer alat (broj zubi po jedinici duljine, vrsta ozubljenja i materijal trake) ne ovisi samo o materijalu

obratka, već i o obliku presjeka obratka (puni presjek, cijev, profil i sl.), o dimenzijama presjeka odrezivanja i o broju šipaka kad se odrezuje u snopu. Ako se zanemare te činjenice, što se u praksi često dešava, lako mogu puknuti zubi ili traka.

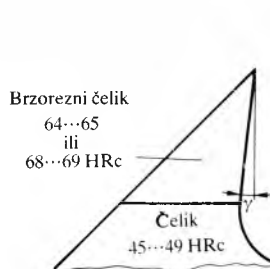


Sl. 56. Horizontalno tračno piljenje.  $v$  brzina rezanja,  $v_f$  posmična brzina

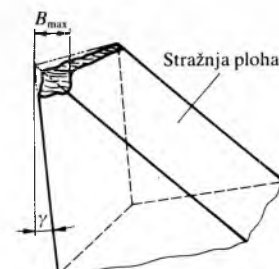
Alat je traka koja ima na stotine zubi, a izrađena je od alatnog ugljičnog čelika (v. *Alati*, TE 1, str. 93) ili od dva materijala, tzv. bimetalna traka. Tijelo bimetalne trake i korijen zuba izrađeni su od opružnog čelika, dok je ostali dio zuba od brzoreznog čelika (sl. 57) ili od tvrdog metala. Osim što se povećanjem tvrdoće zuba znatno povećava otpornost na trošenje, bimetalne se trake mogu oštiti. Da bi ih bilo moguće oštiti, ne smije biti prekoračen kriterij istrošenja trake prema izrazu

$$\bar{B}_{\max} = \frac{B_{\max 1} + \dots + B_{\max 5}}{5} \leq 0,2 \dots 0,3 \text{ mm}, \quad (67)$$

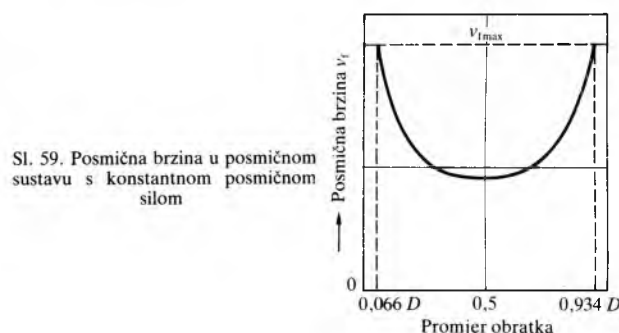
gdje su  $B_{\max 1} \dots B_{\max 5}$  (sl. 58) istrošenosti pet najviše istrošenih zubi. Traka se odabire na temelju podataka u tabl. 12. Broj zubi po jedinici duljine odabire se tako da su istodobno u zahvatu najmanje 3 zuba.



Sl. 57. Zub bimetalne trake tračne pile



Sl. 58. Trošenje zuba bimetalne trake

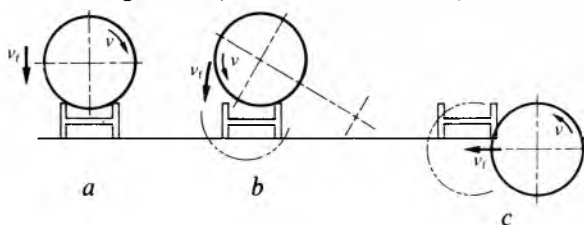


Sl. 59. Posmična brzina u posmičnom sustavu s konstantnom posmičnom silom

Režim obradbe određen je brzinom rezanja, koja je jednaka brzini gibanja trake, i posmičnom brzinom, tj. brzinom spuštanja okvira pile, odnosno trake. Različitim materijalima obratka i trakama odgovaraju brzine rezanja navedene u tabl. 12. Posmična brzina ovisi o posmičnom sustavu stroja koji najčešće ima konstantnu posmičnu silu, konstantnu posmičnu brzinu ili radi gravitacijski. Sustav s konstantnom posmičnom silom daje najveće posmične brzine na početku i na kraju odrezivanja okruglog presjeka, dok je najmanja posmična brzina u sredini obratka kad je najveća duljina reza (sl. 59). Posmak po zubu, za konstantnu

posmičnu silu i za odrezivanje okruglog presjeka, ovisi o brzini rezanja, broju zubi po jedinici duljine, posmičnom tlaku, duljini reza, odnosno položaju trake i promjeru obratka. Neki se od tih činilaca mijenjaju za vrijeme odrezivanja, pa zato nije jednostavno odrediti režime obradbe za horizontalno tračno piljenje. Da bi se izbjeglo preopterećenje zubi i eventualno pucanje zubi ili trake zbog nejednolike posmične brzine pri gravitacijskom odrezivanju ili s konstantnom posmičnom silom, uvedena je kao karakteristika trajanje praznog hoda. To je vrijeme potrebno da se traka i okvir spuste za 100 mm bez rezanja, a nalazi se u preporukama za različite uvjete odrezivanja (tabl. 12). Ovisnost postojanosti trake o brzini rezanja može se odrediti Taylorovom jednadžbom (22).

se i njezina debljina. Zbog toga je snaga potrebna za kružno piljenje dva do deset puta veća nego za tračno piljenje uz isti učin odrezivanja. Kružne pile manjeg promjera izrađene su od brzoreznog čelika (v. *Alati*, TE 1, str. 94), a kružne pile



Sl. 62. Načini kružnog piljenja. a vertikalno, b njihajuće, c horizontalno

Tablica 12  
SMJERNICE ZA IZBOR BROJA ZUBI TRAKE, BRZINE REZANJA I VREMENA PRAZNOG HODA PRI HORIZONTALNOM TRACNOM PILJENJU BIMETALNOM TRAKOM S BRZOREZNIM ČELIKOM (HSS) M2 I M42 PRVOMAJSKA RAŠA

| Materijal obratka                                         | Promjer obratka, mm        |                      |                  |                  |                  |                  |                  | Brzina rezanja<br>m/min                  | Vrijeme praznog<br>hoda t <sub>ph</sub><br>min/100 mm |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|                                                           | do 20                      | 20...30              | 30...50          | 50...80          | 80...120         | 120...200        | 200→             |                                          |                                                       |
|                                                           | Broj zubi trake na 25,4 mm |                      |                  |                  |                  |                  |                  |                                          |                                                       |
| Č.0360 Č.0460<br>Č.0545 Č.0645                            | 14<br>14                   | 10<br>14             | 8<br>10          | 6<br>6           | 4<br>4           | 3<br>2; 3        | 1<br>1           | 60...70*<br>60...70                      | 2,7**                                                 |
| Č.1120 Č.1220<br>Č.4320<br>Č.5426                         | 14<br>14<br>14             | 10<br>10<br>10       | 8<br>8<br>8      | 6<br>6<br>6      | 4<br>4<br>4      | 2; 3<br>3<br>3   | 1<br>2<br>2      | 60...70<br>55...65<br>50...60            | 2,7                                                   |
| Č.1430 Č.1530 Č.1531<br>Č.1730 Č.1731<br>Č.5434<br>Č.4732 | 14<br>14<br>14<br>14       | 10<br>10<br>14<br>14 | 8<br>8<br>8<br>8 | 6<br>6<br>6<br>6 | 4<br>4<br>4<br>4 | 3<br>3<br>3<br>3 | 2<br>2<br>2<br>2 | 60...70<br>55...65<br>50...60<br>50...60 | 2,7                                                   |
| Č.1190                                                    | 14                         | 10                   | 8                | 6                | 4                | 3                | 2                | 70...100                                 | 2,5                                                   |
| Č.4150<br>Č.4750                                          | 14<br>14                   | 14<br>14             | 8<br>8           | 6<br>6           | 4<br>4           | 3<br>3           | 2<br>2           | 25...50<br>20...40                       | 5,0                                                   |
| Č.9780<br>Č.9682                                          | 14<br>14                   | 10<br>10             | 8<br>8           | 6<br>6           | 4<br>4           | 3<br>3           | 2<br>2           | 25...40<br>20...40                       | 6,0                                                   |
| Č.4270                                                    | 14                         | 14                   | 8                | 6                | 4                | 3                | 2                | 20...40                                  | 6,0                                                   |
| Č.4580                                                    | 14                         | 10                   | 8                | 6                | 4                | 3                | 2                | 20...40                                  | 6,0                                                   |
| CuZn90                                                    | 14                         | 10                   | 6                | 4                | 3                | 2                | 1                | 55...65                                  | 2,7                                                   |
| P-CuSn8                                                   | 14                         | 10                   | 6                | 4                | 3                | 2                | 1                | 55...70                                  | 2,7                                                   |

\* Veća brzina odgovara manjem promjeru.

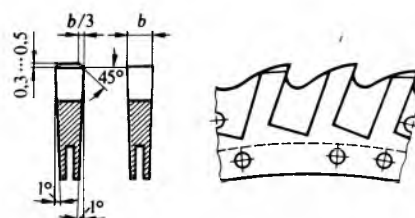
\*\* Vrijeme potrebno da se traka i okvir spuste za 100 mm bez rezanja.

Odrezivanje u snopu podesno je za šipke ili cijevi manjeg promjera (sl. 60). Tim se postupkom znatno povećava produktivnost. Za odrezivanje pri konstantnoj posmičnoj sili omjer visine  $h$  i širine  $w$  iznosi:  $h/w = 0,5 \dots 1$ . Manje su vrijednosti podesne za grubu obradbu. Ako se odrezuju snopovi velikih dimenzija, zbog velikog razmaka vodicica podesniji je omjer  $h/w > 1$ .

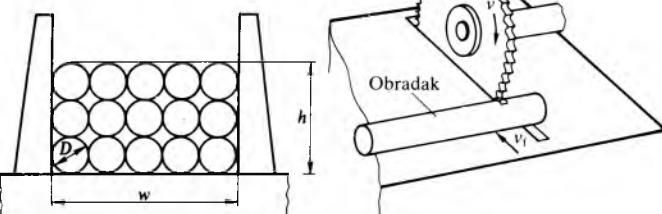
Kružno piljenje glodanje je tankim glodalom, koje je zapravo kružna pila (sl. 61 i 62). Sile rezanja, snaga i širina reza, odnosno otpad materijala veći su nego za okvirno i tračno piljenje. S povećanjem promjera kružne pile povećava

većeg promjera imaju segmente od brzoreznog čelika ili tvrdog metala (sl. 63).

Alatni stroj za kružno piljenje je kružna pila (v. *Alatni strojevi*, TE 1, str. 145).



Sl. 63. Segment kružne pile



Sl. 60. Smještaj šipki ili cijevi pri odrezivanju u snopu

Sl. 61. Kružno piljenje. v brzina rezanja,  $v_t$  posmična brzina

Režim obradbe određen je brzinom rezanja (tabl. 13) i posmičnom brzinom. U literaturi postoje najčešće zastarjele preporuke za brzinu rezanja kružnim pilama.

**Abrazivno piljenje.** Abrazivna ploča skida materijal s obratka u obliku sitne strugotine. Međutim, pri odrezivanju pomoću trenja stvara se mnogo topline, pa materijal obratka toliko omekša da se odstranjuje bez stvaranja strugotine.

Kinematika njihajućeg piljenja uglavnom je jednaka kinematici njihajućeg kružnog piljenja (sl. 62). Abrazivnim

piljenjem odrezuju se šipke malog promjera i obraci velikog promjera. Strojevi za abrazivno piljenje slični su strojevima za kružno piljenje. Debljina se abrazivne ploče povećava s povećanjem promjera ploče, pa je otpad materijala velik s obzirom na tračno piljenje, a potrebna je i veća snaga odrezivanja.

Tablica 13  
SMJERNICE ZA BRZINE REZANJA PRI KRUŽNOM  
PILJENJU PILAMA OD BRZOREZNOG ČELIKA

| Materijal obratka                        | Kružne pile<br>m/min | Segmentne pile<br>m/min |
|------------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Čelik do 700 N/mm <sup>2</sup>           | 50...80              | 14...28                 |
| Legirani čelik do 1000 N/mm <sup>2</sup> | 25...50              | 14...16                 |
| Alatni čelik                             | 25...40              | 6...12                  |
| Čelični lijev                            | 20...40              | 8...16                  |
| Sivi lijev                               | 20...40              | 12...18                 |
| Kovkasti (temper) lijev                  | 20...40              |                         |
| Bronca, mjed                             | 80...200             | 40...300                |
| Lake kovine, debeli obraci               | 200...500            | 300...800               |
| tanki obraci                             | 250...800            | 500...1250              |
| Pertinaks, debeli obraci                 | 400...500            |                         |
| tanki obraci                             | 2 500...3 000        |                         |
| Tekstolit                                | 300...400            |                         |
| Drvo                                     | 1 500...4 500        |                         |

Abrazivno piljenje podesno je za odrezivanje materijala male tvrdoće ili teško obradivih materijala. Obradena površina ima vrlo malu hrapavost, a zbog primjene sredstava za hlađenje i podmazivanje ne mijenjaju se svojstva obrađenog površinskog sloja.

### Turpijanje

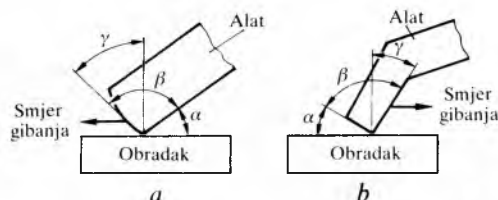
Turpijanje se upotrebljava kad treba skinuti malo materijala s obratka. Alati za turpijanje su turpije (v. *Alati*, TE 1, str. 94). Turpijanje može biti ručno i strojno. Strojno je turpijanje najbrži i najtočniji način turpijanja, a skinuti volumen materijala u jedinici vremena približno je devet puta veći od skinutog materijala ručnim turpijanjem. Brzina rezanja iznosi 15...80 m/min.

Rotacijsko strojno turpijanje upotrebljava se za obradbu drva, polimernih materijala, kože, aluminija, čelika, keramike i za obradbu zavarenih šavova. Alati za rotacijsko turpijanje (sl. 64) izrađeni su od brzoreznog čelika, tvrdog metala ili s pločicama tvrdog metala. Rotacijsko turpijanje podesno je za izradbu alata koji služe u plastičnoj obradbi.

### Grecanje

Grecanje je obradba skidanjem strugotine s negativnim prednjim kutom, a primjenjuje se za završnu obradbu, odnosno doradbu zaobljenih ili ravnih površina tvrdoće do približno 200 HB.

Grecanje može biti dosjedno za postizanje kliznog dosjeda i izgledno za postizanje površinskog izgleda. Već prema smjeru gibanja grecala, postoji potisno grecanje i povlačno grecanje (sl. 65).

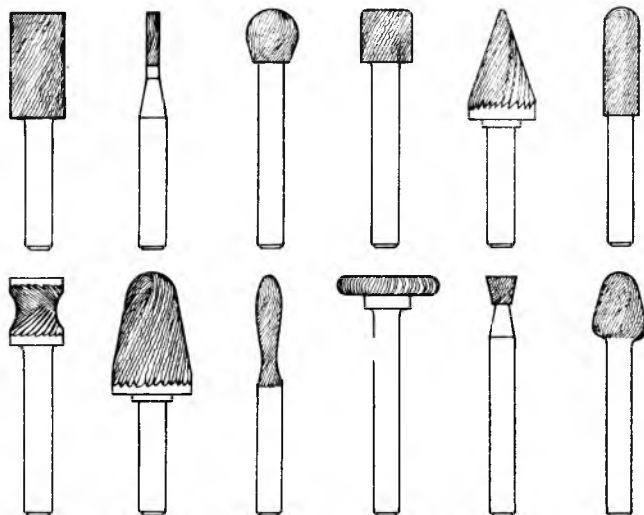


Sl. 65. Grecanje. a potisno, b povlačno; α stražnji kut, β kut klina, γ prednji kut

Dosjednim grecanjem dobiva se bolji oblik površine, odnosno periodična valovitost površine, koja omogućuje stvaranje uljnih klinova posebno pri translatorskom gibanju. Da bi se ustanovile dodirne točke između površine koja se obrađuje i praktički idealne kontrolne površine, upotrebljavaju se tuširne ploče, tuširni lineali i tuširna boja. Stupanj dosjeda postignut grecanjem određen je brojem dosjednih točaka na površini 25 mm × 25 mm, koji ovisi o namjeni izratka (tabl. 14).

Tablica 14  
STUPNJEVI DOSJEDA GRECANJEM

| Stupanj obradbe  | Obradba                                                   | Broj točaka naliježanja na 25 mm × 25 mm | Broj prolaza                  | Dubina prolaza μm          | Primjena                                                                                          |
|------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Predgrecanje     | Poravnavanje<br>Grubo grecanje                            | 1...2<br>3...4                           | 3...5<br>6...8                | 20...40<br>10...20         | Ravne površine za stezanje i sl.<br>Površine za stezanje vijcima<br>Slabija kvaliteta površine    |
| Završno grecanje | Fino grecanje<br>Vrlo fino grecanje<br>Najfinije grecanje | 6...8<br>10...12<br>20...24              | 10...12<br>14...18<br>20...24 | 5...10<br>5...10<br>3...10 | Bolja kvaliteta površine<br>Vodilice alatnih strojeva<br>Vrlo točne vodilice; tuširne ploče i sl. |

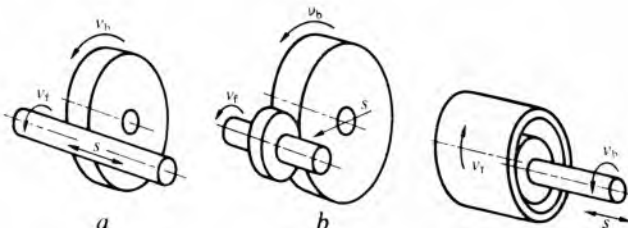


Sl. 64. Alati za rotacijsko turpijanje

### Brušenje

Brušenje je postupak obradbe metala alatom koji ima mnogo oštrica neodređenih oblika. Prema kinematici i obliku strugotine, koja ima promjenljiv presjek, brušenje je slično glodanju. Pri brušenju glavno je gibanje rotacija brusa, a pomoćno je pravocrtno ili kružno gibanje obratka ili alata.

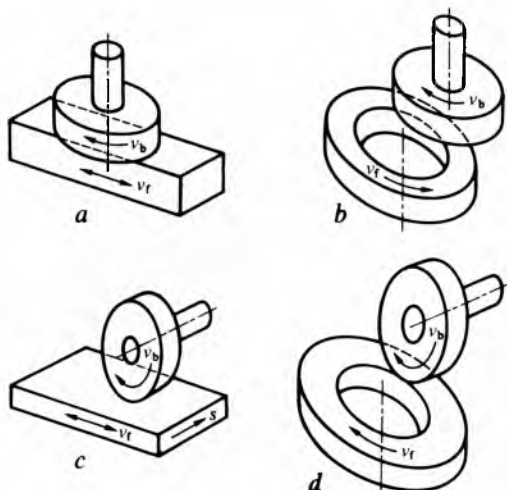
Prema obliku obratka postoji kružno brušenje, koje može biti vanjsko (sl. 66) i unutrašnje (sl. 67), te brušenje ravnih



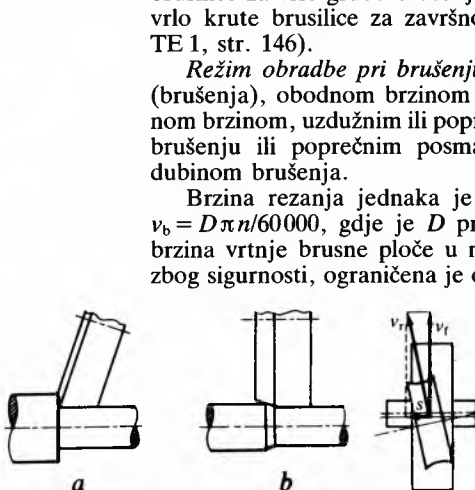
Sl. 66. Vanjsko kružno brušenje. a uzdužno, b poprečno;  $v_b$  brzina rezanja (brušenja),  $v_r$  obodna brzina obratka,  $s$  uzdužni ili poprečni posmak

Sl. 67. Unutrašnje kružno brušenje

površina (sl. 68). Zbog malih dubina rezanja pri brušenju i zbog podatljivosti brusnog sustava, prikladnije je protusmjerno brušenje, jer se pri istosmjernom brušenju brusna ploča može popeti na obradak i tako oštetiti obradak ili brusnu ploču. Za istodobno čeno i kružno brušenje može se primijeniti profilirana i koso postavljena brusna ploča (sl. 69). Sve više se upotrebljava brušenje bez šiljaka (centerless). Tada se obradak slobodno nalazi između brusne ploče kojom se brusi i ploče za podešavanje. Pri uzdužnom brušenju bez šiljaka, brusne ploče postavljaju se pod malim kutom (sl. 70) da bi se djelovanjem komponenata sile rezanja ostvarilo posmično gibanje obratka. Poprečnim brušenjem bez šiljaka s profilnim brusnim pločama mogu se izraditi male stepenaste osovine bez tokarenja, jer se tada istim pločama obavlja gruba i završna obradba. Budući da nema stezanja obratka, postupak se može lako automatizirati.



Sl. 68. Brušenje ravnih površina. a čeno brušenje s pravocrtnim pomoćnim gibanjem, b čeno brušenje s kružnim pomoćnim gibanjem, c obodno brušenje s pravocrtnim pomoćnim gibanjem, d obodno brušenje s kružnim pomoćnim gibanjem



Sl. 69. Vanjsko brušenje profiliranom brusnom pločom. a čeno i kružno brušenje, b kružno brušenje skošenom brusnom pločom za veće dubine rezanja

Brusne ploče s mekšim vezivima upotrebljavaju se za brušenje tvrdih materijala, jer se brusna zrnca brže troše pa moraju i lakše otpadati. Brusne ploče s tvrdim vezivima upotrebljavaju se za brušenje mekših materijala. Veziva mogu biti anorganska (keramička i mineralna), organska i prirodna (šlak i smole), umjetne smole (bakelit) i duromeri.

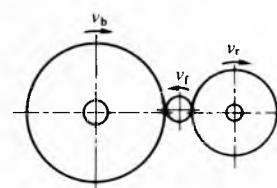
Pod tvrdoćom brusne ploče razumijeva se tvrdoća veziva, a ne tvrdoća brusnih zrnaca. Prema standardima JUS postoje sljedeće oznake za tvrdoće brusnih ploča: EFG (vrlo meka), HIJK (meko), LMNO (srednje tvrdo), PRS (tvrdo), TUV (vrlo tvrdo) i XYZ (posebno tvrdo).

Krupnoća brusnih zrnaca utječe na hrapavost obrađene površine i na volumen materijala što se u jedinici vremena skine s obratka. Struktura je brusne ploče određena omjerom obujma zrnca, te obujma veziva i šupljine.

Strojevi za brušenje zovu se brusilice. Postoje ručne brusilice za vrlo grubo brušenje (skidanje srha, šava i sl.), te vrlo krute brusilice za završno brušenje (v. *Alatni strojevi*, TE 1, str. 146).

Režim obradbe pri brušenju određen je brzinom rezanja (brušenja), obodnom brzinom obratka ili uzdužnom posmičnom brzinom, uzdužnim ili poprečnim posmakom pri kružnom brušenju ili poprečnim posmakom pri ravnom brušenju i dubinom brušenja.

Brzina rezanja jednaka je obodnoj brzini brusne ploče  $v_b = D\pi n/60000$ , gdje je  $D$  promjer brusne ploče u mm,  $n$  brzina vrtnje brusne ploče u  $\text{min}^{-1}$ . Najveća brzina rezanja, zbog sigurnosti, ograničena je centrifugalnom silom, odnosno



Sl. 70. Uzdužno vanjsko kružno brušenje bez šiljaka (centerless).  $v_b$  brzina rezanja,  $v_r$  obodna brzina obratka,  $v_s$  obodna brzina brusne ploče za podešavanje

Tablica 15  
NAJVEĆE DOPUŠTENE BRZINE REZANJA PRI  
BRUŠENJU (m/s)

| Vezivo brusne ploče       | Posmak |         |
|---------------------------|--------|---------|
|                           | Ručni  | Strojni |
| Keramičko                 | 25     | 35      |
| Mineralno                 | 15     | 25      |
| Organsko                  | 25     | 35      |
| Organsko (za odrezivanje) | 45     | 80      |

Napomena: S većim brzinama rezanja može se iznimno raditi posebnim brusnim pločama i s dodatnom zaštitom.

Alat za brušenje je brus, ili brusna ploča koja se sastoji od brusnih zrnaca i veziva (v. *Alati*, TE 1, str. 95). Kao materijali brusnih zrnaca služe: zrnati ili praškasti dijamanti koji se najčešće nanose na ploče sivog lijeva, aluminij-oksida (prirodni korund) pomiješan sa željezo-oksidiom ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), čisti aluminij-oksidi ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , umjetni korund, elektrokorund, trgovački nazivi alundum i aloksit), silicij-karbid ( $\text{SiC}$ , trgovački naziv karborund) i bor-nitrid (BN, trgovački naziv borazon). Najčešće se upotrebljava elektrokorund za brušenje čelika i žilavih materijala, a karborund za brušenje sivog lijeva, tvrdih i krhkih materijala. Ploče sa slojem dijamantnih zrnaca prikladnije su za brušenje i oštrenje tvrdih alata. Ploče sa zncima bor-nitrida upotrebljavaju se za brušenje vrlo tvrdih materijala.

Brusna zrnca spajaju se vezivom. O jačini veziva ovisi kad će istrošena zrnca ispasti, te kad će tako obradak biti zahvaćen novim i ostrim zrcima. Vezivo ne popunjava sav prostor između zrnaca, već ostaju šupljine za strugotinu i za sredstvo za hlađenje i podmazivanje koje se dovodi u zonu rezanja.

Tablica 16  
SMJERNICE ZA BRZINE REZANJA PRI BRUŠENJU  $v_b$  (m/s)

| Materijal obratka | Način brušenja |            |         |             |          |          |
|-------------------|----------------|------------|---------|-------------|----------|----------|
|                   | Vanjsko        | Unutrašnje | Ravno   | Odrezivanje | Oštrenje | Čišćenje |
| Čelik             | 30...35        | 25         | 25...45 | 45...80     | 25       | 30...45  |
| Alatni čelik      |                |            |         |             | 20...28  |          |
| Brzorezni čelik   |                |            |         |             | 16...24  |          |
| Tvrđi metal       | 8              | 8          | 8       | 45...60     | 12...22  |          |
| Sivi lijev        | 25...30        | 22...25    | 20...28 | 45...80     |          | 25...30  |
| Laki metali       | 35             | 20...25    | 25...40 | 60...80     |          | 30       |

čvrstoćom brusne ploče (tabl. 15). Brzina rezanja ovisi o vrsti brušenja i materijalu obratka (tabl. 16). Obodna brzina obratka  $v_r$  (m/min) računa se prema izrazu (34), gdje je  $D$  promjer obratka u mm,  $n$  brzina vrtnje obratka u  $\text{min}^{-1}$ , a odabire se prema preporukama navedenim u tabl. 17. Posmak za kružno i ravno brušenje ovisi o željenoj hrapavosti

Tablica 17  
SMJERNICE ZA OBODNU BRZINU OBRATKA  $v_r$  (m/min)  
PRI KRUŽNOM BRUŠENJU

| Materijal obratka   | Vanjsko brušenje |         | Unutrašnje brušenje |         |
|---------------------|------------------|---------|---------------------|---------|
|                     | Grubo            | Fino    | Grubo               | Fino    |
| Čelik, nekaljen     | 12...15          | 6...8   | 15...20             | 12...16 |
| kaljen              | 14...16          | 8...10  | 21...24             | 16...20 |
| cementiran          | 15...18          | 10...13 | 20...30             | 18...22 |
| Sivi lijev          | 12...16          | 8...12  | 20...24             | 16...20 |
| Bakar, bronca, mjed | 15...21          | 12...16 | 22...35             | 25...32 |
| Aluminij            | 50...70          | 30...40 | 35...40             | 32...35 |

Napomena: Za vrlo fino brušenje smanjuje se  $v_r$  na 1/3 do 1/4, ili se mora smanjiti zagrijavanje manjom dubinom rezanja, odnosno izdašnjim hlađenjem.

obrađene površine i o širini brusne ploče  $b$  (tabl. 18). Dubina brušenja ovisi o vrsti brušenja, materijalu obratka, površini dodira brusa i obratka, željenoj hrapavosti obrađene površine i čvrstoći brusnih zrnaca (tabl. 19).

Tablica 18  
SMJERNICE ZA POSMAK  $s$  PRI KRUŽNOM I RAVNOM  
BRUŠENJU

| Vrsta brušenja                 | Uobičajeni posmak<br>mm | Najveći posmak      |
|--------------------------------|-------------------------|---------------------|
| Grubo brušenje                 | 10...20                 | (0,67...0,75) $b^*$ |
| Grubo brušenje<br>sivog lijeva |                         | do 0,8 $b$          |
| Fino brušenje                  | 1...2                   | (0,25...0,33) $b$   |
| Najfinije brušenje             | 0,2...0,8               | (0,1...0,2) $b$     |

\*  $b$  je širina brusne ploče.

Tablica 19  
SMJERNICE ZA DUBINU BRUŠENJA  $a$  (mm)

| Način brušenja       | Brušenje čelika |                | Brušenje sivog lijeva |              |
|----------------------|-----------------|----------------|-----------------------|--------------|
|                      | Grubo           | Fino           | Grubo                 | Fino         |
| Vanjsko kružno       | 0,015...0,03    | 0,005...0,01   | 0,04...0,06           | 0,01...0,02  |
| Unutrašnje<br>kružno | 0,005...0,015   | 0,005          | 0,01...0,03           | 0,005...0,01 |
| Ravno                | 0,01...0,03     | 0,0025...0,005 | 0,1...0,3             | 0,01...0,03  |

U praksi se najčešće griješi u izboru dubine brušenja. Da bi se smanjio broj prolaza i skratilo vrijeme obradbe, odabire se veća dubina brušenja, pa se drobe brusna zrnca. Tako se ne povećava efektivnost brušenja, ali može nastati štetno paljenje, odnosno promjena mehaničkih svojstava brušenog površinskog sloja.

Dubine brušenja mogu biti veće ( $a = 0,05...0,2$  mm) ako je brusna ploča skošena (sl. 69b), ali tada treba smanjiti posmak. Pri poprečnom vanjskom kružnom brušenju (sl. 66b) posmak brusne ploče za jedan okretaj obratka ovisi o promjeru obratka i o širini brusne ploče (tabl. 20).

Tablica 20  
POPREČNI POSMAK BRUSNE PLOČE  $s$  (mm) PO  
JEDNOM OKRETAJU OBRATKA PRI ZAREZANOM  
VANJSKOM KRUŽNOM BRUŠENJU

| Promjer<br>obratka<br>mm | Širina brusne ploče $b$ , mm |          |           |           |
|--------------------------|------------------------------|----------|-----------|-----------|
|                          | do 50                        | 50...100 | 100...150 | 150...200 |
| 15...20                  | 0,004                        | 0,003    | 0,002     | 0,002     |
| 20...50                  | 0,005                        | 0,004    | 0,004     | 0,003     |
| 50...100                 | 0,007                        | 0,007    | 0,006     | 0,005     |
| 100...150                | 0,009                        | 0,009    | 0,008     | 0,007     |
| 150...200                | 0,010                        | 0,010    | 0,010     | 0,009     |

**Toplinske pojave i postojanost brusne ploče.** Skoro sva energija dovedena u zonu obradbe pretvara se u toplinu. Temperatura u zoni brušenja iznosi 1100...1650 °C. Uz uobičajene brzine brušenja temperatura na dubini 0,025 mm ispod obrađene površine iznosi ~430 °C, a na dubini 0,13 mm ~320 °C. Toličke temperature uzrokuju kemijske i druge reakcije između brusnih zrnaca i obratka. Tako ugljik iz dijamanta prelazi na čelični obradak, pa se dijamantna zrnca vrlo brzo troše. Zato se dijamantne brusne ploče ne smiju upotrijebiti za brušenje čelika. Tijekom brušenja brusna se zrnca u dodiru s obratkom naglo griju, a kad taj dodir prestane, naglo se hlade sredstvom za hlađenje i podmazivanje. Zbog tih termičkih naprezanja mogu pucati brusna zrnca uz smanjenje postojanosti brusne ploče.

Približna postojanost brusne ploče  $T$  (mm) iznosi

$$T = \frac{K d_b^{0,6}}{v_f^{1,82} s^{1,82} a^{1,1}}, \quad (68)$$

gdje je  $d_b$  (mm) promjer brusne ploče,  $v_f$  (m/min) obodna brzina obratka pri kružnom brušenju ili posmična brzina pri ravnom brušenju,  $s$  (mm) posmak za jedan okretaj obratka pri kružnom brušenju ili za jedan hod pri ravnom brušenju,

$a$  (mm) dubina brušenja, a  $K$  konstanta ovisna o materijalu obratka ( $K = 2260$  za kaljeni čelik,  $K = 2250$  za nekaljeni čelik i  $K = 2870$  za sivi lijev).

Efektivnost brušenja  $G$  određena je izrazom

$$G = \frac{V_{ob}}{V_{br}}, \quad (69)$$

gdje je  $V_{ob}$  obrušeni volumen s obratka, a  $V_{br}$  skinuti volumen materijala s brusne ploče. Sumpor u čeliku, a posebno u alatnom i nerđajućem čeliku povećava djelotvornost brušenja. Također, djelotvornost se brušenja povećava s povećanjem brzine rezanja.

Materijali sa srednjom i velikom djelotvornošću brušenja imaju najmanju sposobnost da brušenjem postignu malu hrapavost. Materijali, međutim, s malom djelotvornošću brušenja imaju bolju sposobnost da se postigne mala hrapavost, jer se brusna zrnca brže troše, pa je manja mogućnost stvaranja zareza.

**Osjetljivost materijala na brušenje** sklonost je materijala da se pri brušenju stvaraju napukline u površinskom sloju ili da se smanjuje tvrdoća površinskog sloja. Općenito, podesnom toplinskom obradbom može se smanjiti preosjetljivost na brušenje. Za materijale kojima se ne može smanjiti osjetljivost na brušenje treba odabrati blaže režime brušenja da bi se smanjila temperatura u zoni brušenja, što očito poskupljuje brušenje.

**Sile i snaga brušenja.** Glavna sila rezanja  $F_g$  (N) određena je izrazom

$$F_g = K v_f^{0,7} s^{0,7} a^{0,6}, \quad (70)$$

gdje su  $v_f$ ,  $s$  i  $a$  već definirane veličine, dok je  $K$  konstanta ovisna o materijalu obratka ( $K = 22$  za kaljeni čelik,  $K = 21$  za nekaljeni čelik i  $K = 20$  za sivi lijev). Odrivna je sila  $F_p = (1...3)F_g$ . Snaga (kW) stroja za brušenje određena je izrazom

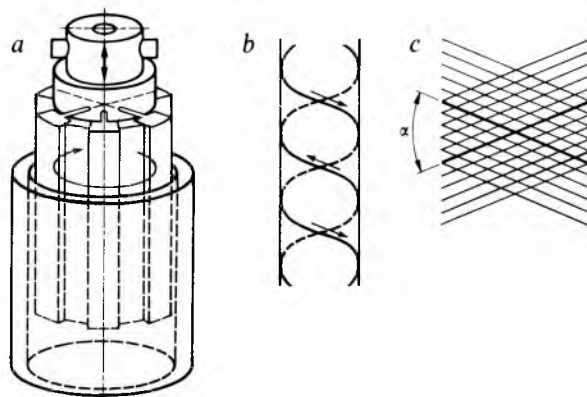
$$P_s = \frac{F_g v_b}{1000 \eta_s}, \quad (71)$$

gdje je  $v_b$  (m/s) brzina brušenja, a  $\eta_s$  stupanj iskoristivosti stroja ( $\eta = 0,7...0,8$ ).

### Honovanje

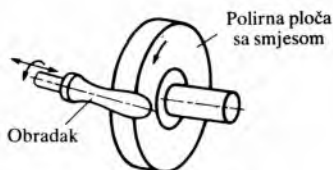
Honovanje je postupak završne obradbe, najčešće provrta (košuljice motora, ležaji, cijevi vatrenog oružja itd.) brusnim kamenima (segmentima). Glavno gibanje (rotacija i translacija) obavlja alat (sl. 71). Pri horizontalnom honovanju okreće se i obradak. Obodna brzina, tj. brzina rezanja mnogo je manja pri honovanju nego pri brušenju. Provrt koji se obrađuje vodi alat kojemu vreteno ima dva kardanska zgloba. Grubljim honovanjem postiže se hrapavost obrađene površine  $R_t = 1...5 \mu\text{m}$ , a završnim honovanjem  $R_t = 0,1...1,5 \mu\text{m}$  i moguća točnost oblika iznosi 3...7  $\mu\text{m}$ . Dodatak na obratku za grubo honovanje treba biti ~500  $\mu\text{m}$ , a za završno ~50  $\mu\text{m}$ .

Režim obradbe treba odabrati prema preporukama proizvođača alata. Brzina rezanja pri honovanju sastavljena je



Sl. 71. Honovanje. a princip rada, b putanje alata, c izgled obrađene površine

pasta za poliranje. Obodna je brzina ploča za poliranje  $\sim 2300$  m/min. Pri poliranju na brusilicama (sl. 77) obradak se drži rukom. Veća se proizvodnost postiže upotrebom poliautomatskih strojeva za poliranje. Troškovi poliranja mogu se mnogo smanjiti dobrom prethodnom pripremom površine obratka.



Sl. 77. Poliranje

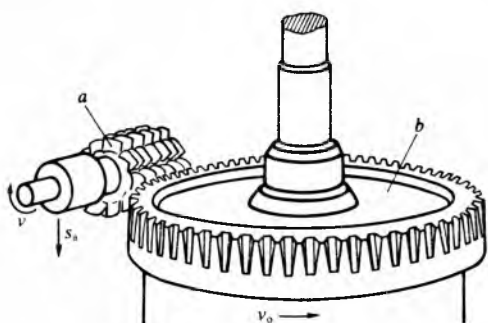
### Izradba ozubljenja

Ozubljenja se mogu izrađivati, osim postupcima obradbe metala skidanjem strugotine, i drugim postupcima: lijevanjem, plastičnom obradom i sl. Najvažniji postupci izradbe ozubljenja skidanjem strugotine jesu odvalno glodanje i odvalno dubljenje. O ostalim postupcima za izradbu ozubljenja skidanjem strugotine v. *Alatni strojevi*, TE 1, str. 163.

**Odvalno glodanje** postupak je izradbe cilindričnih zupčanika s vanjskim ozubljenjem (ravni i kosi zubi), zupčanih letvi i pužnih kola. Glavno i posmično gibanje obavlja odvalno glodalo. Obradak rotira, i to tako da se za jedan okretaj jednovojnog odvalnog glodala obradak okrene za jedan zub (sl. 78). Postoje tri načina odvalnog glodanja: aksijalno odvalno glodanje (sl. 79), dijagonalno odvalno glodanje (sl. 80) kad, osim aksijalnog posmaka  $s_a$ , glodalo ima i kontinuirano tangencijalno gibanje  $s_t$  u smjeru osi glodala, i tzv. *šifting*, što je u biti aksijalno odvalno glodanje pri kojemu se nakon jednog ili nekoliko obrađenih izradaka glodalo pomakne u aksijalnom smjeru za mali posmak  $p_m$ , npr. za 1 mm. Taj se posmak računa prema izrazu

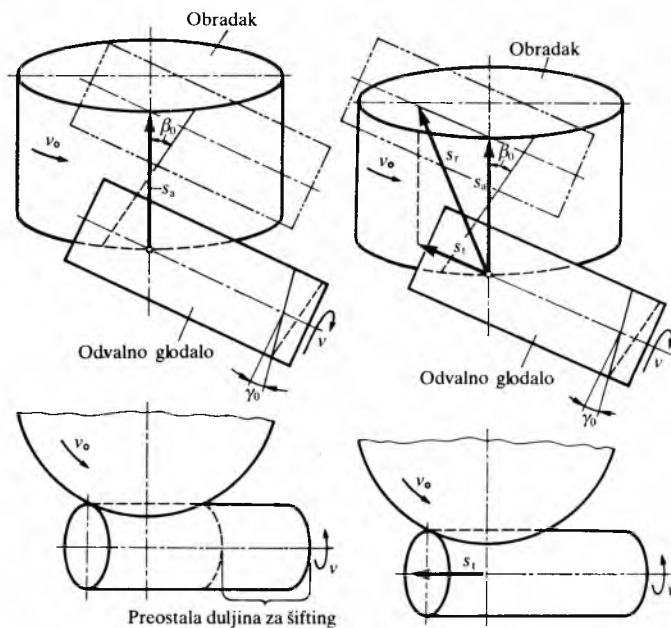
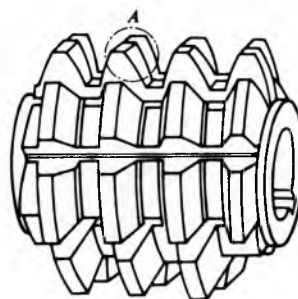
$$p_m = \frac{m_n \pi \cos \gamma_0}{i}, \quad (72)$$

gdje je  $m_n$  (mm) normalni modul,  $\gamma_0$  kut uspona zavojnice glodala, a  $i$  broj utora glodala koji čine prednje površine zubi. Dijagonalnim odvalnim glodanjem i šiftingom bolje se iskorištava duljina glodala. Za te dvije vrste odvalnog glodanja moguće je upotrijebiti dulja glodala, pa se tako povećava proizvodnost jer se rjeđe mijenja alat.

Sl. 78. Odvalno glodanje zupčanika. a odvalno glodalo, b obradak,  $v$  brzina rezanja,  $v_0$  obodna brzina obratka,  $s_a$  aksijalni posmak

Alat je odvalno glodalo kojemu su zubi raspoređeni po zavojnici (sl. 81). Prema broju zavojnica postoje jednovojna i viševojna odvalna glodala. Primjenom viševojnih odvalnih glodala povećava se proizvodnost. Odvalna glodala najčešće se izrađuju od brzoreznog čelika. Mnogo veća proizvodnost postiže se glodalima koja imaju uložene zube od tvrdog metala. Takvim se glodalima može izrađivati ozubljenje samo na krutim obradnim sustavima.

Trošenje zubi odvalnog glodala (sl. 81) može biti različito i ovisno o položaju zuba na glodalu. Ako samo jedan zub

Sl. 79. Aksijalno odvalno glodanje zupčanika.  $v$  brzina rezanja,  $v_0$  obodna brzina obratka,  $s_a$  aksijalni posmak,  $\beta_0$  kut nagiba zuba,  $\gamma_0$  kut uspona zavojnice glodalaSl. 80. Dijagonalno odvalno glodanje zupčanika.  $v$  brzina rezanja,  $v_0$  obodna brzina obratka

Sl. 81. Odvalno glodalo i trošenje zuba

postigne kriterij istrošenja alata, a svi su ostali zubi dovoljno oštri za obradbu, glodalo treba oštiti. Jednoličnije trošenje zubi odvalnog glodala postiže se velikim šiftingom.

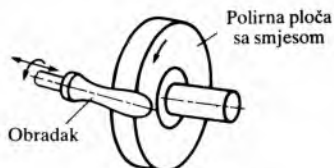
Kriterij istrošenja alata određen je vrijednošću trošenja  $B_{max}$  jednog ili više zubi. Kad se postigne ta vrijednost prekida se obradba i alat se mora oštiti. Također, kad se ne postiže tražena točnost obradbe zupčanika zbog istrošenosti odvalnog glodala, mora se mijenjati alat bez obzira na vrijednost  $B_{max}$ .

Veliki šifting omogućuje bolje iskorištenje cijele duljine odvalnog glodala s mnogo većim aksijalnim pomakom glodala od pomaka  $p_m$  prema izrazu (72) pri običnom šiftingu. Karakteristično je da je pomak glodala  $p$  pri velikom šiftingu  $\sim 20$  puta veći od pomaka  $p_m$  pri običnom šiftingu, što najviše ovisi o promjeru obratka. Postupak velikog šiftinga se sastoji u aksijalnom odvalnom glodanju do postignutog kriterija istrošenja alata, pomaku glodala  $p$ , ponovnom aksijalnom glodanju, što se ponavlja dok se ne iskoristi cijela duljina glodala. Pomak  $p$  odredi se pokusima u proizvodnji tako da ponovno dolaze u zahvat oni zubi koji nisu postigli kriterij istrošenja. Primjenom velikog šiftinga zubi se glodala troše mnogo jednoličnije nego pri dijagonalnom odvalnom glodanju ili pri malom (običnom) šiftingu (sl. 82 i 83). Veliki šifting može se primijeniti na svim odvalnim glodalima.

Režim obradbe određen je brzinom rezanja i posmakom obratka. Brzina rezanja računa se prema jednadžbi (34), gdje je  $D$  (mm) promjer odvalnog glodala. Pri odvalnom glodanju brzina rezanja ne ovisi samo o materijalu obratka i o materijalu alata, već i o normalnom modulu  $m_n$  (sl. 84). Obradljivost materijala obratka za odvalno glodanje izražena



pasta za poliranje. Obodna je brzina ploča za poliranje  $\sim 2300$  m/min. Pri poliranju na brusilicama (sl. 77) obradak se drži rukom. Veća se proizvodnost postiže upotrebom poluautomatskih strojeva za poliranje. Troškovi poliranja mogu se mnogo smanjiti dobrom prethodnom pripremom površine obratka.



Sl. 77. Poliranje

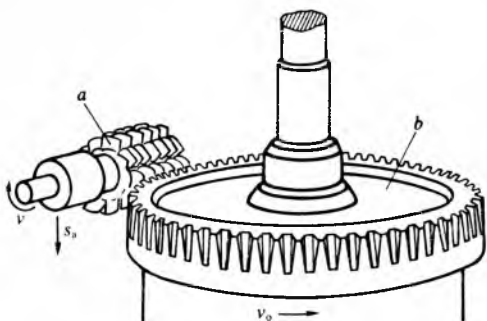
### Izradba ozubljenja

Ozubljenja se mogu izrađivati, osim postupcima obradbe metala skidanjem strugotine, i drugim postupcima: lijevanjem, plastičnom obradom i sl. Najvažniji postupci izradbe ozubljenja skidanjem strugotine jesu odvalno glodanje i odvalno dubljenje. O ostalim postupcima za izradbu ozubljenja skidanjem strugotine v. *Alatni strojevi*, TE 1, str. 163.

**Odvalno glodanje** postupak je izradbe cilindričnih zupčanika s vanjskim ozubljenjem (ravni i kosi zubi), zupčanih letvi i pužnih kola. Glavno i posmično gibanje obavlja odvalno glodalo. Obradak rotira, i to tako da se za jedan okretaj jednovojnog odvalnog glodala obradak okrene za jedan zub (sl. 78). Postoje tri načina odvalnog glodanja: aksijalno odvalno glodanje (sl. 79), dijagonalno odvalno glodanje (sl. 80) kad, osim aksijalnog posmaka  $s_a$ , glodalo ima i kontinuirano tangencijalno gibanje  $s_t$  u smjeru osi glodala, i tzv. *šifting*, što je u biti aksijalno odvalno glodanje pri kojemu se nakon jednog ili nekoliko obrađenih izradaka glodalo pomakne u aksijalnom smjeru za mali posmak  $p_m$ , npr. za 1 mm. Taj se posmak računa prema izrazu

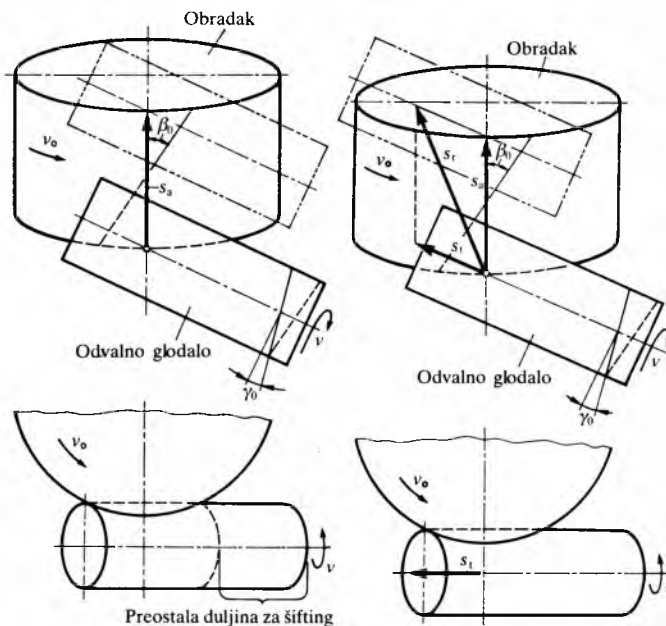
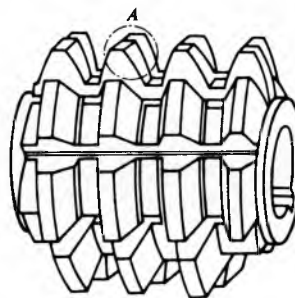
$$p_m = \frac{m_n \pi \cos \gamma_0}{i}, \quad (72)$$

gdje je  $m_n$  (mm) normalni modul,  $\gamma_0$  kut uspona zavojnice glodala, a  $i$  broj utora glodala koji čine prednje površine zubi. Dijagonalnim odvalnim glodanjem i šiftingom bolje se iskorištava duljina glodala. Za te dvije vrste odvalnog glodanja moguće je upotrijebiti dulja glodala, pa se tako povećava proizvodnost jer se rjeđe mijenja alat.

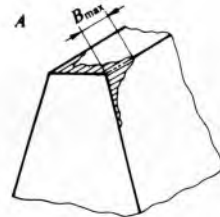
Sl. 78. Odvalno glodanje zupčanika. a odvalno glodalo, b obradak,  $v$  brzina rezanja,  $v_0$  obodna brzina obratka,  $s_a$  aksijalni posmak

Alat je odvalno glodalo kojemu su zubi raspoređeni po zavojnici (sl. 81). Prema broju zavojnica postoje jednovojna i viševojna odvalna glodala. Primjenom viševojnih odvalnih glodala povećava se proizvodnost. Odvalna glodala najčešće se izrađuju od brzoreznog čelika. Mnogo veća proizvodnost postiže se glodalima koja imaju uložene zube od tvrdog metala. Takvim se glodalima može izrađivati ozubljenje samo na krutim obradnim sustavima.

Trošenje zubi odvalnog glodala (sl. 81) može biti različito i ovisno o položaju zuba na glodalu. Ako samo jedan zub

Sl. 79. Aksijalno odvalno glodanje zupčanika.  $v$  brzina rezanja,  $v_0$  obodna brzina obratka,  $s_a$  aksijalni posmak,  $\beta_0$  kut nagiba zuba,  $\gamma_0$  kut uspona zavojnice glodalaSl. 80. Dijagonalno odvalno glodanje zupčanika.  $v$  brzina rezanja,  $v_0$  obodna brzina obratka

Sl. 81. Odvalno glodalo i trošenje zuba

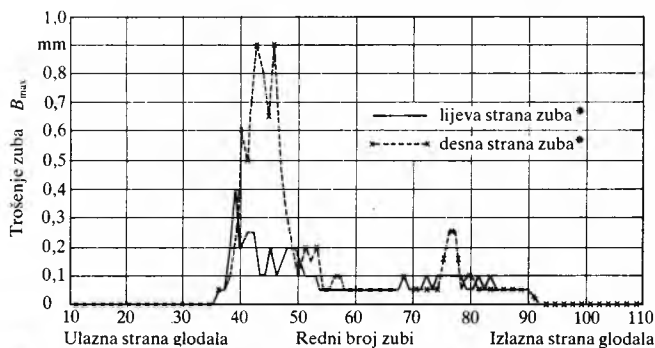


postigne kriterij istrošenja alata, a svi su ostali zubi dovoljno oštri za obradbu, glodalo treba oštiti. Jednoličnije trošenje zubi odvalnog glodala postiže se velikim šiftingom.

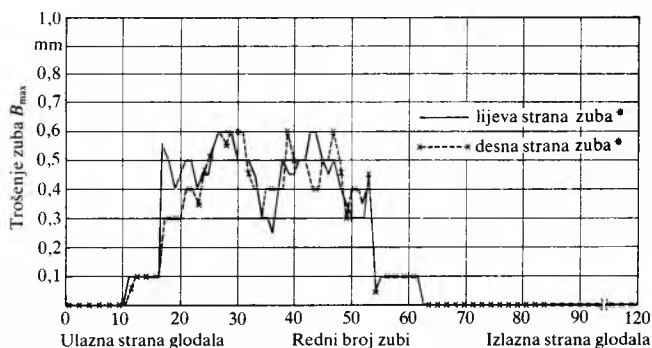
Kriterij istrošenja alata određen je vrijednošću trošenja  $B_{max}$  jednog ili više zubi. Kad se postigne ta vrijednost prekida se obradba i alat se mora oštiti. Također, kad se ne postiže tražena točnost obradbe zupčanika zbog istrošenosti odvalnog glodala, mora se mijenjati alat bez obzira na vrijednost  $B_{max}$ .

Veliki šifting omogućuje bolje iskorištenje cijele duljine odvalnog glodala s mnogo većim aksijalnim pomakom glodala od pomaka  $p_m$  prema izrazu (72) pri običnom šiftingu. Karakteristično je da je pomak glodala  $p$  pri velikom šiftingu  $\sim 20$  puta veći od pomaka  $p_m$  pri običnom šiftingu, što najviše ovisi o promjeru obratka. Postupak velikog šiftinga se sastoji u aksijalnom odvalnom glodanju do postignutog kriterija istrošenja alata, pomaku glodala  $p$ , ponovnom aksijalnom glodanju, što se ponavlja dok se ne iskoristi cijela duljina glodala. Pomak  $p$  odredi se pokusima u proizvodnji tako da ponovno dolaze u zahvat oni zubi koji nisu postigli kriterij istrošenja. Primjenom velikog šiftinga zubi se glodala troše mnogo jednoličnije nego pri dijagonalnom odvalnom glodanju ili pri malom (običnom) šiftingu (sl. 82 i 83). Veliki šifting može se primijeniti na svim odvalnim glodalima.

Režim obradbe određen je brzinom rezanja i posmakom obratka. Brzina rezanja računa se prema jednadžbi (34), gdje je  $D$  (mm) promjer odvalnog glodala. Pri odvalnom glodanju brzina rezanja ne ovisi samo o materijalu obratka i o materijalu alata, već i o normalnom modulu  $m_n$  (sl. 84). Obradljivost materijala obratka za odvalno glodanje izražena



Sl. 82. Primjer trošenja zubi odvalnog glodala pri malom (običnom) šifingu. (\* u smjeru gibanja zuba)



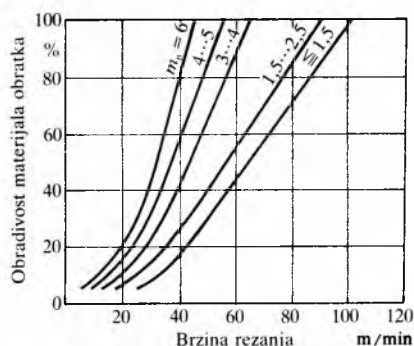
Sl. 83. Primjer trošenja zubi odvalnog glodala pri velikom šifingu. (\* u smjeru gibanja zuba)

u postocima prikazana je u tabl. 22 u kojoj je čelik Č.1120 referentni materijal (obradljivost 100%), jer se odvalnim glodanjem najlakše obrađuje uz najveću postojanost alata i malu hrapavost obrađenih površina. Posmak obavlja odvalno glodalo. Ako se cilindrični zupčanik s ravnim zubima od čelika ili sivog lijeva izrađuje pomoću jednovojnog odvalnog glodala, pri završnom glodanju posmak iznosi 0,8...2,0 mm po okretaju obratka. Posmak ovisi i o postupku koji slijedi nakon glodanja. Ako je završna obradba zubi brijanjem, posmak iznosi  $s = 2,5 \dots 6,0$  mm po okretaju obratka, a ako slijedi brušenje, posmak je  $s = 2,5 \dots 8,0$  mm po okretaju obratka. Pri obradbi kosih zubi aksijalni posmak  $s_a$  u smjeru osi obratka iznosi

$$s_a = s \cos \beta_0, \quad (73)$$

gdje je  $\beta_0$  kut nagiba zubi (sl. 79), a  $s$  posmak u smjeru zuba.

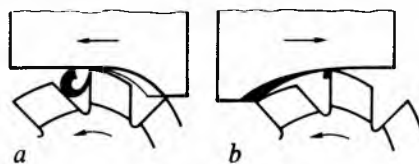
Pri odvalnom glodanju s viševojnim glodalom veće je opterećenje ostrica, pa je posmak za obradbu s dvovojn timer glodalom  $s_{2v} \approx 2/3 s$ , a s trovojn timer  $s_{3v} \approx 1/2 s$ .



Sl. 84. Izbor brzine rezanja za odvalno glodanje cilindričnih zupčanika glodalom od brzoreznog čelika.  $m_n$  normalni modul

Istosmjerno i protusmjerno odvalno glodanje može se primijeniti za izradbu ozubljenja. Istosmjernim glodanjem (sl. 85a) postiže se manja hrapavost obrađene površine i manja

je vjerojatnost pojave vibracija, pa se može postići i veća proizvodnost nego protusmjernim odvalnim glodanjem (sl. 85b i 78). Protusmjerno odvalno glodanje uspješno se primjenjuje za obradbu vrlo žilavih materijala.



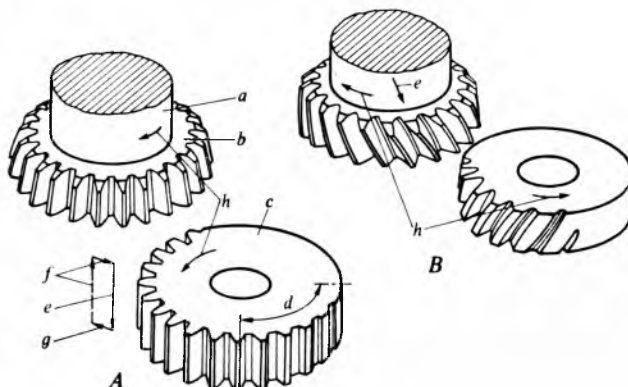
Sl. 85. Odvalno glodanje zupčanika. a istosmjerno, b protusmjerno

Tablica 22  
OBRAĐLJIVOST MATERIJALA OBRATKA ZA ODVALNO  
GLODANJE CILINDRIČNIH ZUPČANIKA OD ČELIKA

| Materijal obratka | Toplinski obrađen materijal       |                | Poboljšani materijal              |                |
|-------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|
|                   | Vlačna čvrstoća N/mm <sup>2</sup> | Obradljivost % | Vlačna čvrstoća N/mm <sup>2</sup> | Obradljivost % |
| Č.1120            | 460                               | 100            | —                                 | —              |
| Č.1220            | 490                               | 90             | —                                 | —              |
| Č.1430            | 590                               | 71             | 70                                | —              |
| Č.0545            | 590                               | 71             | 70                                | —              |
| Č.1530            | 710                               | 63             | 80                                | —              |
| Č.0645            | 710                               | 63             | 80                                | —              |
| Č.3131            | 750                               | 63             | 70...85                           | 56             |
| Č.4120            | 560                               | 90             | —                                 | —              |
| Č.4130            | 750                               | 63             | 72...92                           | 56             |
| Č.4131            | 750                               | 56             | 90...108                          | 45             |
| Č.4320            | 630                               | 80             | —                                 | —              |
| Č.4321            | 700                               | 71             | —                                 | —              |
| Č.5420            | 750                               | 63             | —                                 | —              |
| Č.5421            | 800                               | 56             | —                                 | —              |
| Č.4730            | 750                               | 63             | 70...95                           | 50             |
| Č.4732            | 750                               | 56             | 80...120                          | 40             |
| Č.5430            | 750                               | 50             | 85...115                          | 36             |

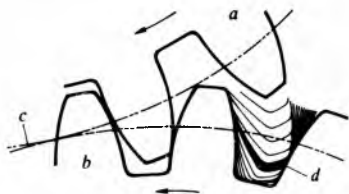
Ograničenja i podesnost odvalnog glodanja. Ako su dva zupčanika izrađena u jednom komadu (često u mjenjačima vozila), manji se zupčanik obično ne može izraditi odvalnim glodanjem, jer obično nedostaje prostor za izlaz glodala. Takav zupčanik izrađuje se odvalnim dubljenjem. Također, odvalnim glodanjem ne mogu se izraditi unutrašnja ozubljenja. Odvalno glodanje ima prednost za izradbu cilindričnih zupčanika s ravnim i s kosim zubima, a posebno ako je širina zupčanika velika i ako zupčanik s vratilom čini jednu cjelinu.

Odvalno dubljenje postupak je kojim se izrađuju zupčanici s unutrašnjim ozubljenjem (ravni i kosi zubi), cilindrični zupčanici (ravni i kosi zubi), te zupčane letve. Glavno gibanje obavlja alat (sl. 86) u obliku zupčanika s pripadnim skošenjima za prednji i stražnji kut. Alat se giba prema dolje i pri tom skida strugotinu. Zbog kružnog gibanja alata i obratka nastaje odvaljivanje (sl. 87). Alat ulazi u obradak na primjerenu dubinu radijalnim posmičnim gibanjem.



Sl. 86. Odvalno dubljenje ravnih (A) i kosih zubi (B). a držač alata, b alat, c obradak, d dio obratka u koji ulazi alat, e radni hod alata, f povratni hod alata, g odmicanje alata od obratka (0,3...0,8 mm), h pomoćno gibanje odvaljivanja

Alat je režno kolo izrađeno od brzoreznog čelika. Da bi se dobio pozitivan prednji kut, čeonu ploha alata je konkavna. Nakon istrošenja alata oštiri se samo prednja ploha da bi profil zubi alata ostao nepromijenjen. Stroj za odvalno dubljenje jest odvalna dubilica (v. *Alatni stojevi*, TE 1, str. 164).



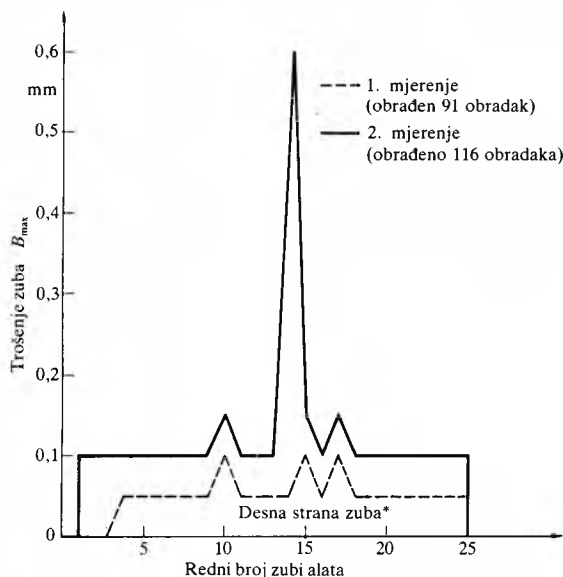
Sl. 87. Princip odvalnog dubljenja. a alat, b obradak, c diobena kružnica, d presjek neodrezane strugotine

Režim obradbe određen je brzinom rezanja i posmakom. U preporukama je obično određena najveća vrijednost brzine rezanja, jer se ona mijenja ovisno o položaju alata i o posmaku. Srednje vrijednosti posmaka i brzine rezanja navedene su u tabl. 23. Posmak za grubu obradbu veći je od posmaka za završnu obradbu, pa u praksi treba pokušima odrediti najveći posmak kojim se postiže tražena hrapavost i točnost oblika zuba. Istim alatom i jednim stezanjem obratka može se izvršiti gruba obradba, a najčešće drugim prolazom i završna obradba.

Tablica 23

SMJERNICE ZA MAKSIMALNU BRZINU REZANJA I POSMAK PRI ODVALNOM DUBLJENJU ALATOM SA  $D = 100$  mm

| Materijal obratka | Maksimalna brzina rezanja m/min | Posmak po dvostrukom hodu (mm) za modul |      |      |      |      |
|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|------|------|------|------|
|                   |                                 | 1                                       | 2    | 3    | 4    | 5    |
| SL 20             | 18...22                         | 0,17                                    | 0,20 | 0,23 | 0,27 | 0,32 |
| Č.1430            | 22...25                         | 0,17                                    | 0,23 | 0,23 | 0,27 | 0,27 |
| Č.1530            | 25...28                         | 0,17                                    | 0,23 | 0,23 | 0,27 | 0,27 |
| Č.1730            | 22...25                         | 0,17                                    | 0,23 | 0,23 | 0,27 | 0,27 |
| Č.4131            | 20...24                         | 0,17                                    | 0,20 | 0,23 | 0,27 | 0,27 |
| Č.3130            | 10...15                         | 0,14                                    | 0,17 | 0,20 | 0,23 | 0,20 |
| Č.4320            | 21...24                         | 0,17                                    | 0,20 | 0,23 | 0,27 | 0,23 |
| ČL.0400           | 22...26                         | 0,14                                    | 0,20 | 0,23 | 0,27 | 0,27 |
| P.CuSn14          | 40...50                         | 0,17                                    | 0,23 | 0,23 | 0,27 | 0,27 |
| Elektron          | 50...60                         | 0,17                                    | 0,23 | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
| Novotex           | 50...60                         | 0,17                                    | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 |



Sl. 88. Trošenje alata pri odvalnom dubljenju. (\* u smjeru gibanja zuba)

Trošenje zubi alata za odvalno dubljenje po obliku je slično trošenju pri odvalnom glodanju. Za trošenje alata za odvalno dubljenje karakteristično je da se zubi približno jednoliko troše do nekog određenog broja obradaka, a nakon toga trošenje jednog zuba naglo poraste (sl. 88). Zbog tako

velikog trošenja jednog od zubi treba alat oštiti, iako su ostali zubi još sposobni za obradbu. Jednoličnije i manje trošenje svih zubi može se postići ako se nakon određenog broja obradenih obradaka alat zakrene oko svoje osi za  $180^\circ$  ili za neki drugi kut s obzirom na obradak. Nakon zakretanja alata obradi se istim alatom još određeni broj obradaka. Tako se može povećati postojanost alata, odnosno proizvodnost pri odvalnom dubljenju.

Za ostale postupke za izradbu ozubljenja skidanjem strugotine v. *Alatni strojevi*, TE 1, str. 163.

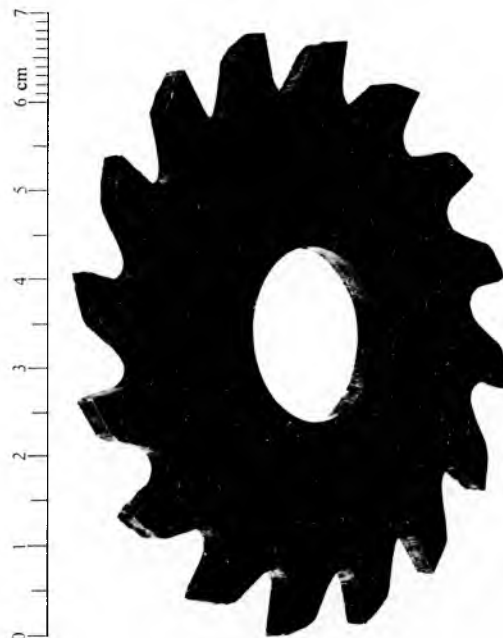
## NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADBE METALA

U nekonvencionalnoj obradbi metala najčešće se ne primjenjuje princip klina za skidanje materijala, već se iskorištava kemijsko, mehaničko ili toplinsko djelovanje električne struje, djelovanje topline i ultrazvuka. Karakteristika je takve obradbe da volumen skinutog materijala u jedinici vremena ne ovisi o tvrdoći i žilavosti materijala obratka, već o njegovim fizikalnim i kemijskim svojstvima (električna provodnost, toplinska vodljivost i dr.), te da alat, ako je potreban, ne mora imati veću tvrdoću od tvrdoće obratka. Osim toga, neki su nekonvencionalni postupci pogodni za obradbu vrlo malih površina ili provrta vrlo malih promjera.

Neki od nekonvencionalnih postupaka obrađeni su u posebnim člancima kao elektroerozijska obradba (v. *Elektroerozijska obrada*, TE 4, str. 355) i elektrokemijska obradba (v. *Elektrokemijska obrada*, TE 4, str. 393).



Sl. 89. Provrt promjera  $0,25 \mu\text{m}$  izrađen laserom i naknadno smanjen pozlaćivanjem

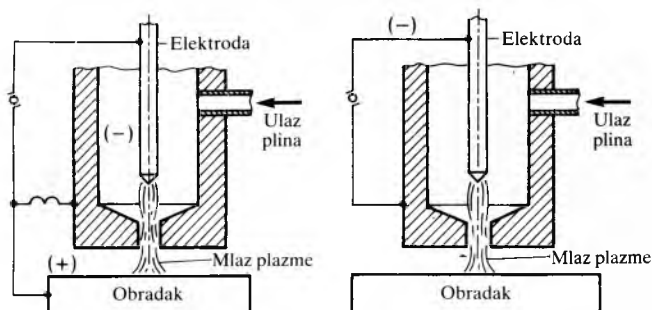


Sl. 90. Obradak izrađen laserom

**Obradba elektronskim mlazom** postupak je za skidanje malih količina materijala, a elektronski mlaz može poslužiti i za zavarivanje. Mlaz elektrona iz katodne cijevi usmjerava se pomoću magnetnog polja na obradak uz eventualno povećanje koncentracije energije pomoću magnetnih leća. Elektronski mlaz može imati veliku gustoću energije i do nekoliko  $\text{GW}/\text{cm}^2$ , pa temperatura na mjestu obradbe iznosi  $4000\cdots 6000\text{ K}$ . Taj je postupak pogodan za izradbu provrta promjera od nekoliko mikrometara.

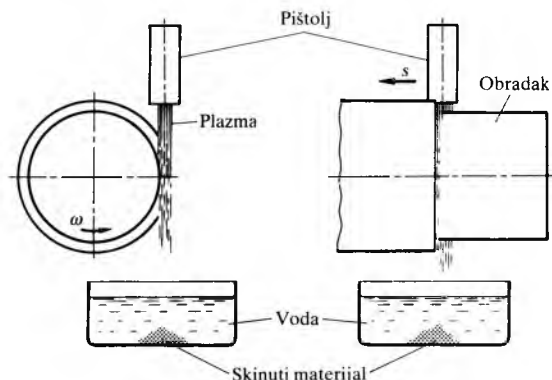
**Obradba metala laserom** zapravo je postupak za skidanje metala pomoću topline, a lasersko zračenje može se upotrijebiti i za zavarivanje. Taj je postupak posebno pogodan za izradbu provrta vrlo malog promjera (sl. 89). Primjena obradbe laserom ograničena je snagom laserskog zračenja. Materijal s velikom toplinskom vodljivošću (npr. bakar) nije pogodan za obradbu laserom. Prednost je toga postupka da obradak ne mora biti u neutralnoj atmosferi ili u vakuumu. Na sl. 90 vidi se obradak izrađen laserom. Primjena lasera za obradbu metala tek je na početku razvoja.

**Obradba metala plazmom** postupak je za skidanje metala toplinom (v. *Plazma*, TE 10, str. 352). Prijenosni mlaz plazme (sl. 91) pogodan je za skidanje metala, dok se neprijenosni mlaz plazme (sl. 92) mogu prenositi manje količine topline na obradak. Ako se na tokarskom stroju tokarski nož zamijeni mlazom plazme, tj. pištoljem za stvaranje plazme (sl. 93), moguća je gruba obradba valjkastih obradaka. Manja hrapavost obrađene površine može se postići kombiniranom obradbom metala plazmom i skidanjem strugotine s ugrijanog obratka. Za sada se obrađuju plazmom metali slabije obradljivosti. Osim toga, plazmom se režu limovi uspješnije nego autogenim rezanjem. Plazmom se mogu rezati deblji limovi uz veću brzinu rezanja i uz manju hrapavost obrađene površine.



Sl. 91. Prijenosni mlaz plazme

Sl. 92. Neprijenosni mlaz plazme



Sl. 93. Obradba metala plazmom

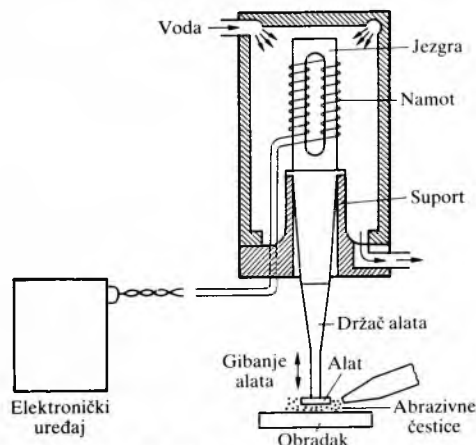
**Skidanje strugotine s ugrijanog obratka** postupak je kojim se strugotina skida kad su vanjski sloj obratka ili cijeli obradak zagrijani na temperaturu od  $950\cdots 1200\text{ K}$ , pa i više, što ovisi o materijalima obratka i alata. Zagrijani materijal ima manju tvrdoću i žilavost, pa je potrebna i manja sila rezanja, i to za  $\sim 50\%$  nego pri obradbi nezagrijanog obratka. Obradbom zagrijanog obratka, osim toga, povećava se

volumen skinute strugotine u jedinici vremena, smanjuju se troškovi obradbe, vibracije se pojavljuju tek pri većim brzinama, smanjuje se hrapavost obrađene površine i povećava se postojanost alata. Tako se, npr., postojanost alata s pločicom od rezne keramike za tokarenje čelika za ukovnje (tvrdoća 60 HRC) povećava čak za  $\sim 60$  puta, a za tokarenje nerđajućeg čelika za  $\sim 7$  puta s obzirom na tokarenje nezagrijanih obradaka.

Zagrijavanje plazmom i induksijsko zagrijavanje najpogodniji su postupci za zagrijavanje obradaka.

Skidanje strugotine s ugrijanog obratka pogodno je i ekonomično za obradbu materijala srednje tvrdoće i srednje obradljivosti.

**Ultrazvučna obradba** postupak je za bušenje provrta i dubljenje udubina tvrdih materijala pomoću brusnih zrnaca. Njih ubrzava alat zatitran ultrazvukom i oni s velikom brzinom udaraju na obradak i tako skidaju čestice obratka (sl. 94). Oblik presjeka alata odgovara obliku provrta ili udubine. Vibracije alata iznose  $15\cdots 30\text{ kHz}$ . Omjer skinutog materijala obratka i trošenje alata iznosi 10:1, što se smatra zadovoljavajućom postojanošću alata. Ultrazvučna obradba upotrebljava se samo za materijale tvrdoće veće od 64 HRC i za oblike provrta i udubina koji se ne mogu izraditi brušenjem. Prednost je ultrazvučne obradbe s obzirom na elektroerozijsku i elektrokemijsku obradbu da se ultrazvučno mogu obrađivati i nemetali.



Sl. 94. Ultrazvučna obradba

Ultrazvučnim postupkom izrađuju se matrice za provlačenje i za ekstruziju, a primjenjuje se i za rezanje poluvodiča i za izradbu gravura na staklu i keramici.

LIT.: M. Kronenberg, Grundzüge der Zerspanungslehre, I-III Band. Springer-Verlag, Berlin 1954, 1963, 1969. – G. C. Sen, A. Bhattacharya, Principles of Metal Cutting. New Central Book, Calcutta 1969. – H. Opitz, Moderne Produktionstechnik. Girardet, Essen 1970. – R. Zdenković, Obrada metala skidanjem. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1975. – B. Ivković, Nekonzvencionalni postupci obrade metala. Mašinski fakultet Kragujevac, Kragujevac 1975. – E. Kuljanić, Obrada materijala odvajanjem čestica. Sveučilište »V. Bakarić«, Rijeka 1987.

E. Kuljanić

**POZAMENTERIJA**, tekstilni proizvodi, široki  $5\cdots 150\text{ mm}$  ili promjera  $0,5\cdots 20\text{ mm}$ , koji se upotrebljavaju pri izradbi odjeće i obuće te kao ukras na odjevnim predmetima, u kućanstvu i u nekim industrijskim granama. Izrađuje se od svih vrsta tekstilnih, gumenih i metalnih niti ili vrpce na strojevima posebne konstrukcije koji rade tehnikom tkanja, pletenja, uvijanja ili opletanja.

Proizvodnja pozamenterije počinje u nas početkom XIX st. Snažnije se razvija od 1925. do 1930. godine. Tada se, uglavnom iz Njemačke, dovoze dotrajali strojevi i montiraju u naše pogone da bi se iskoristila jeftina radna snaga. Najviše se razvila tzv. konfekcijska pozamenterija koja obuhvaća