

strane kanala predviđene su staze od po 4,0 m širine. Ukupna širina objekta iznosi prema tome 26,0 m. Kanal je pravougaonog preseka i od armiranog je betona, a leži na devet armiranobeton-skih kontinuiranih nosaća.

**Konstruktivni detalji.** Akvedukti kao gradevinske konstrukcije idu u grupu mostovnih konstrukcija, a razlikuju se od mostova i vijadukata samo u tome što umesto kolovoza imaju kanal ili vodovodnu cev.

Pri projektovanju ili građenju akvedukata važe, uglavnom, pravila kao za mostovne konstrukcije, kako u pogledu položaja ose akvedukta tako i u pogledu određivanja dimenzija pojedinih delova konstrukcija s obzirom na dopuštene napone i koeficijente sigurnosti.

Pri projektovanju akvedukata prvo se određuje *pad* i *po-prečni profil* kanala ili vode. Pad kanala ili cevi kraćih (manjih) akvedukata zadržava se obično isti kao i na deonici na kojoj se akvedukt nalazi. Na dužim akveduktima pad se povećava, kako bi se zbog povećanja brzine proticanja mogao smanjiti poprečni presek kanala.

Na akveduktima koji služe za plovne svrhe dno se obično pravi bez pada, jer plovni kanali po pravilu nemaju pada. Ako pak plovni kanal ima pad, taj se pad ili zadržava i na akveduktu ili se smanjuje da se dobije ista brzina vode, jer je na akveduktu, zbog glatkih bočnih površina, trenje manje nego na otvorenom kanalu pre i posle akvedukta.

Profil za provođenje vode na akveduktu zadržava se obično isti kao na delu ispred njega.

Prilikom određivanja profila zidanih, drvenih i čeličnih akvedukata mora se ponekad uzeti u obzir materijal od koga se gradi; za betonske akvedukte taj momenat pri izboru profila otpada, jer za betonske konstrukcije oblik ne predstavlja prepreku. Kada su odredeni profili i pad akvedukta, pristupa se određivanju svih potrebnih njegovih dimenzija. Statički proračun akvedukta vrši se slično kao i proračun mostova. Za konstrukciju akvedukta najvažnije je izbeći pojavu naprslina koje mogu dovesti do znatnih gubitaka vode i do težih udesa. Zato se ne smeju projektovati veliki otvori, a moraju se uvek predvideti dilatacione razdelnice za eliminisanje uticaja temperature na objekat.

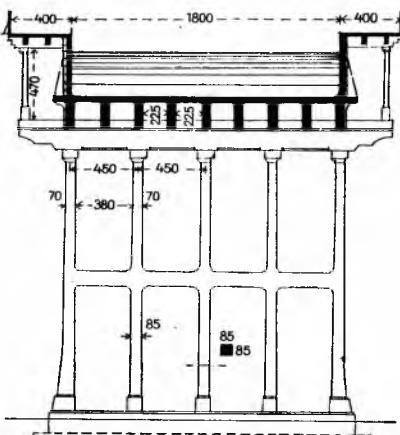
U cilju osiguranja akvedukta od pojave naprslina, armaturi onih delova koji su u dodiru sa vodom ne sme se davati suviše velik napon, nego se uzima manji, kako se to čini i pri proračunu drugih hidrotehničkih gradevina.

Naročito pažljivo treba projektovati i izvoditi korito akvedukta.

Posle izrade, bokovi i dno kanala izoliraju se da se dobije potpuna nepropustljivost akvedukta. Ova se izolacija može izraditi od bakarnih ili olovnih ploča 3 mm debljine čiji su sastavci lemljeni, ili pak asfaltnim ili bituminoznim premazima.

Sem pomenute izolacije plovnih kanala treba predvideti i njezinu zaštitu od spoljnog oštećenja prilikom plovidbe i od plivajućih predmeta.

Treba obratiti naročitu pažnju na pravilno izvođenje dilatacione razdelnice u kanalu i na dobru i nepropusnu vezu kanala na akveduktu sa kanalom na terenu, ispred i iza akvedukta.



Sl. 9. Akvedukt plovnog kanala, poprečni presek

**ALATI**, u užem smislu, sredstva kojima se obraduje materijal u toku proizvodnje. Prema načinu obrade dijele se na alate koji ne skidaju strugotinu i alate koji skidaju strugotinu.

#### ALATI KOJI NE SKIDAJU STRUGOTINU

Alati koji ne skidaju strugotinu mogu se prema funkciji grupirati u alate za sječenje, za rezanje, za probijanje i za plastično oblikovanje. Inače se, kao alati uopće, mogu dijeliti u ručne i strojne.

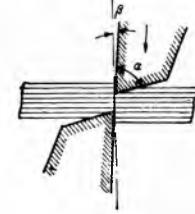
Ovdje će se prikazati najprije ukratko niz ručnih alata ove vrste koji se mnogo upotrebljavaju, a onda opširnije najvažniji strojni alat koji ne skida strugotinu: štance.

**Sjekala** su ručni alati za sječenje metalnih i nemetalnih materijala. Prema obliku i namjeni JUS razlikuju plosnata, krstasta, poluokrugla i savinuta sjekala, sjekala za žljebove, za rad u kamenu i šamotu, sjekala za mlinarske svrhe. Materijal sjekala je čelik čvrstoće najmanje 70 kp/mm<sup>2</sup>, za neke iznad 80 kp/mm<sup>2</sup>. Oštrica sjekala je zakaljena i izbrušena. Sl. 2a prikazuje neke vrste sjekala prema jugoslavenskim standardima (JUS).

**Dlijeta** su ručni alati za radove u drvu, cigli i betonu. Za radove u drvu JUS razlikuju lako i srednje dlijeto i to s ravnim i sa zakošenim ivicama, zatim dlijeta za rupe, poluokrugla i strugarska dlijeta. Za zidarske svrhe služi plosnato i šiljasto dlijeto (sl. 2b).

Materijal dlijeta za drvo je alatni ugljični čelik, za zidarska dlijeta je čelik čvrstoće iznad 70 kp/mm<sup>2</sup>. Radni dio alata je zakaljen i izbrušen.

**Škare** režu materijal time što u nj utiskuju klinaste rezne čeljusti (sl. 1) čije oštice leže u ravnini rezanja ili njoj sasvim blizu. Radi smanjenja rada trenja preporučuje se pri rezanju limova mala zračnost između oštice, zavisna o debljini lima i vrsti materijala. Oštice škara nagnute su jedna prema drugoj, čime se smanjuje sila rezanja. Što je veći taj nagib to je veća i sila koja potiskuje materijal ispred oštice. Pri zatvaranju ručnih škara mjesto rezanja putuje duž oštice čiji se nagib smanjuje a time se smanjuje i sila potiskivanja materijala ispred oštice. Oštrinu škara određuju kutevi rezanja, koji se odabiru prema vrsti rezanog materijala. Sl. 2c prikazuje neke vrste škara.



Sl. 1. Rezanje škarama.  
α prednji kut, β stražnji kut

Materijal škara za rezanje lima je alatni čelik, a za ostale vrste škara čelik čvrstoće najmanje 60 kp/mm<sup>2</sup>. Oštice su zakaljene i izbrušene.

**Kliješta** su ručni alat od višestruke do usko specijalne namjene. Materijal za pojedine vrste kliješta propisuju JUS. Kliješta za pridržavanje su od mekanog čelika čvrstoće najmanje 42 kp/mm<sup>2</sup>. Kliješta za sječenje mekane žice su od čelika čvrstoće najmanje 80 kp/mm<sup>2</sup>, za sječenje tvrde žice od čelika čvrstoće bar 100 kp/mm<sup>2</sup>. Sl. 2d prikazuje nekoliko vrsta kliješta.

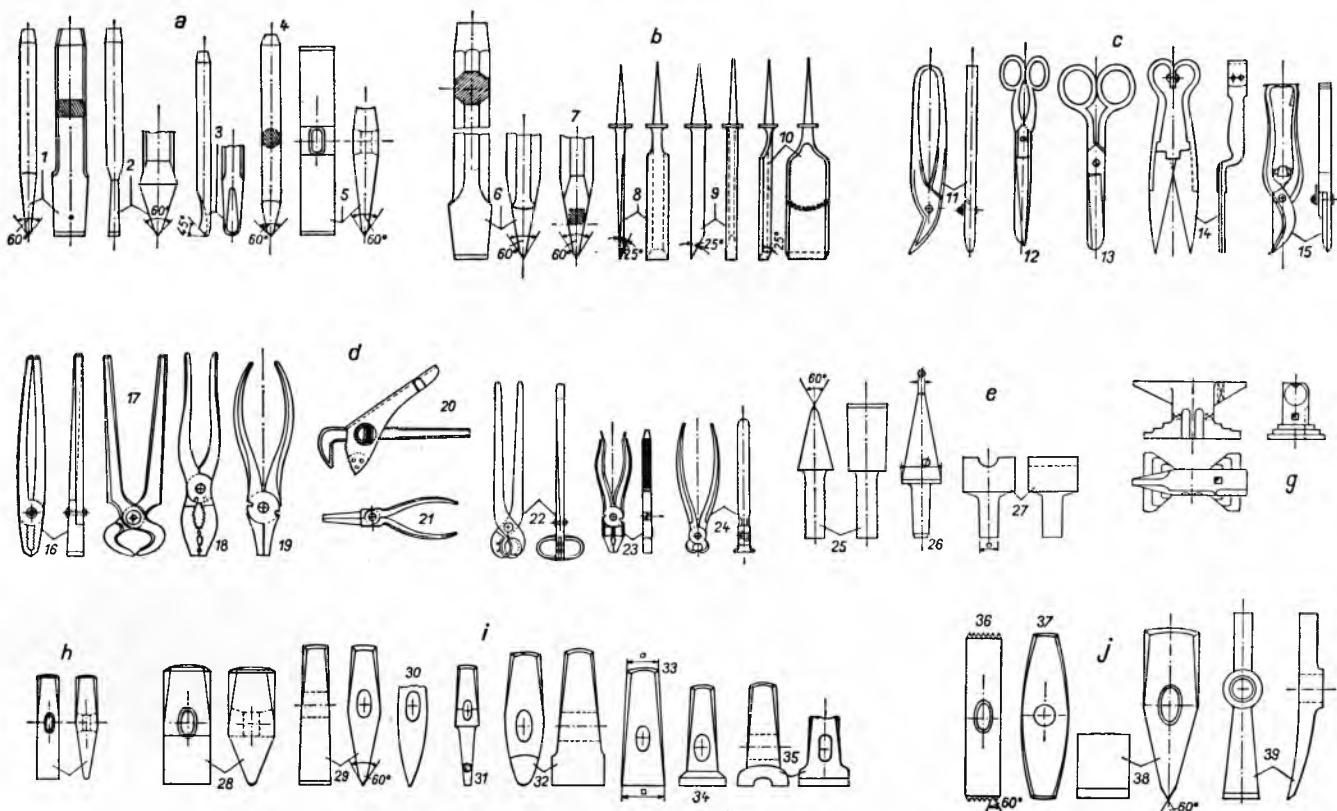
**Čekići, usadnici, nakovnji.** S obzirom na vrstu operacija razlikuju se prema JUS ove vrste kovačkih čekića: teški kovački čekići s poprečnim ili uzdužnim klinastim krajem mase 3...15 kg, ravni čekići mase 0,7...3,1 kg, čekići za poravnavanje mase 0,8...4,8 kg, zaobljeni čekići mase 0,8...2,6 kg, čekići za sječenje (hladno i toplo) mase 1...2,5 kg, čekići za probijanje okruglih rupa 5...25 mm promjera i četvrtastih rupa 6...20 mm mase 0,5...2,2 kg, čekići za oblikovanje mase 1,1...3,2 kg. Veći broj oblika predviđaju JUS za kamenarske, potkivačke i zidarske čekiće.

Na nakovnju služe usadnici za sječenje, odrezivanje, probijanje i proširivanje rupa, raskivanje, zagladivanje, zaobljivanje i ravnjanje.

Materijal bravarskih, kovačkih, kotlarskih i limarskih čekića i usadnika je čelik minimalne čvrstoće 60 kp/mm<sup>2</sup>. Čekići i usadnici za sječenje su od čelika čvrstoće bar 70 kp/mm<sup>2</sup>. Sl. 2e, h, i prikazuju standardne oblike bravarskih i kovačkih čekića i usadnika, a sl. 2j nekoliko oblika čekića za obradu kamena i šamota.

Masa kovačkih nakovnja iznosi 50...260 kg, a bravarsko-kovačkih 10...300 kg (sl. 2g).

Nakovnji su od lijevanog čelika čvrstoće 55...60 kp/mm<sup>2</sup>. Radna površina nakovnja je duž cijele sredine zakaljena, tvrdoće HB 450...550 kp/mm<sup>2</sup>, a na rubovima i uglovima 300...400 kp/mm<sup>2</sup>.



Sl. 2. Ručni alati. a sječala: 1 plosnato, 2 krstasto, 3 poloukruglo, 4 za šamot, 5 mlinarsko; b dlijeta: 6 plosnato zidarsko, 7 šiljasto zidarsko, 8 za drvo, 9 za rupe u drvetu, 10 poloukruglo za drvo; c škare: 11 za lim, 12 za domaćinstvo, 13 trgovacka, 14 škare za travu, 15 za vinogradarstvo; d kliješta: 16 kovačka nazubljena, 17 staklarska, 18 za motorna vozila, 19 za telegrafiste, 20 udesiva kliješta za cijevi, 21 okrugla, 22 za savijanje izolacionih cijevi, 23 kombinirana, 24 za sjećenje; e usadnici: 25 sjekac, 26 šiljasti, 27 oblikac; g nakovanji; h bravarski čekići; i kovački čekići: 28 teški poprečni, 29 za hladno sjećenje, 30 za toplo sjećenje, 31 probijač, 32 zaobljeni oblikac, 33 ravni oblikac, 34 ravnjač, 35 okrugli oblikac; j čekići za obradu kamena i šamota: 36 krunasti, 37 za tucanje, 38 za razbijanje kamena, 39 za šamot

### Štance

Štance čine skupinu alata specijaliziranih za izradu velikog broja jednakih predmeta obradom bez skidanja strugotine. Redovito se upotrebljavaju u prešama. Odlikuju se visokom i gotovo beskonkurentnom rentabilnošću proizvodnje.

Polažni oblik sirovine u proizvodnji artikala od lima može biti ploča, traka i vrpca. Ploča dolazi u obzir za izrezivanje većih rondela i platina, npr. u proizvodnji kuhinjskog posuda i električnih kuhalja. Sitniji artikli izrežu se iz trake. Za proizvodnju u velikim serijama, kad je dovod materijala automatiziran, najpodesnija je vrpca.

Jedan od glavnih uvjeta za visoku rentabilnost proizvodnje je dobro iskorištenje polaznog materijala jer najveći dio troškova štancanja otpada na materijal. Stoga je važno da već i oblik artikla bude racionalan, tj. da omogućuje dobro iskorištenje materijala trake. Često je dovoljna mala izmjena oblika da bi se otpad primjetljivo smanjio. Relativni smještaj predmeta u

ovakvim maksimalnim iskorištenjem materijala dovodi lako do složenih i skupih konstrukcija alata.

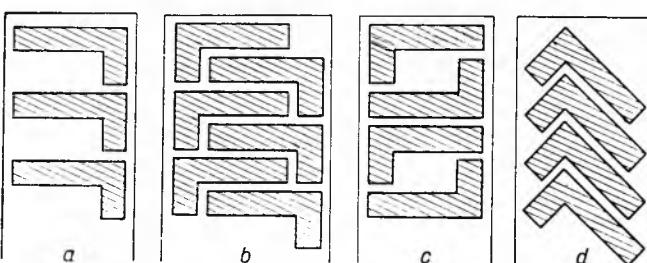
Na količinu otpatka utječe i širina ruba i mosta (sl. 4) od kojih se sastoji ostatak trake nakon izrezivanja. Rub i most ne smiju biti preuski zbog utjecaja na čistoću reza i količinu škarta. Sa širinom trake i debljinom lima općenito rastu i širina ruba i mosta. Za debljine lima 1...2 mm i širinu trake 50...150 mm iznosi širina ruba i mosta ~ 2,0...3,5 mm.

Prema vrsti rada koji vrše, štance se mogu podijeliti u dvije grupe: a) štance za rezanje: probijanje, izrezivanje, odrezivanje, zarezivanje i obrezivanje, b) štance za plastično oblikovanje: savijanje, ovijanje, ravnjanje, utiskivanje, vučenje, pečatanje i zaprešavanje.

Alati druge grupe provode često operaciju završnog oblikovanja u proizvodnji nekog artikla koji je u prethodnoj operaciji isječen na nekoj štanci iz prve grupe. Tako, npr., nakon izrezivanja izresa za ručicu lonca odlazi izrezak na štance koje ga savijaju u konačni oblik.

**Štance za rezanje.** Sl. 5 a prikazuje štancu za izrezivanje sastavljenu od žiga, učvršćenog u glavu preše koja ga vertikalno pomiče, i rezne ploče pritegnute u podnožju koje je pričvršćeno na stolu preše. Taj tip alata, kojemu žig nije voden, zove se *slobodni rezni alat*. Jednostavnost konstrukcije, dobra pristupačnost rezanog materijala i niska cijena odlike su ovakve izvedbe. Služi za izrezivanje rondela i platina većih promjera u ne prevelikom broju. Zbog toga što alat nema vođenja, tačnost izrade ovisi samo o tačnosti stroja tj. o kliznim plohami i glavi preše.

Sl. 5 b prikazuje alat za izrezivanje rondela u tankom limu, papiru, kartonu, koži, gumi i sl. Kut  $\alpha$  određuje oštrinu šuplje izvedenog noža; iznosi  $10\ldots20^\circ$  u zavisnosti o vrsti sjećenog materijala. Čep u sredini noža djeluje pomoću cilindričnog pera kao izbacivač. Sjećena traka stavlja se na drvenu dasku, fiber



Sl. 3. Iskorištenje materijala pri štancanju. a slabo iskorištenje, jednostavan alat; b, c dobro, odnosno bolje iskorištenje, komplikiraniji alat, d dobro iskorištenje uz jednostavan alat

traci (krojenje trake) također znatno utječe na iskorištenje materijala (sl. 3). Bitno bolje iskorištenje može se postići i istodobnim štancanjem dvaju i više različitih artikala koji se izrežu bilo iz otpadnog dijela izresa ili iz trake (v. sl. 5e). Težnja za

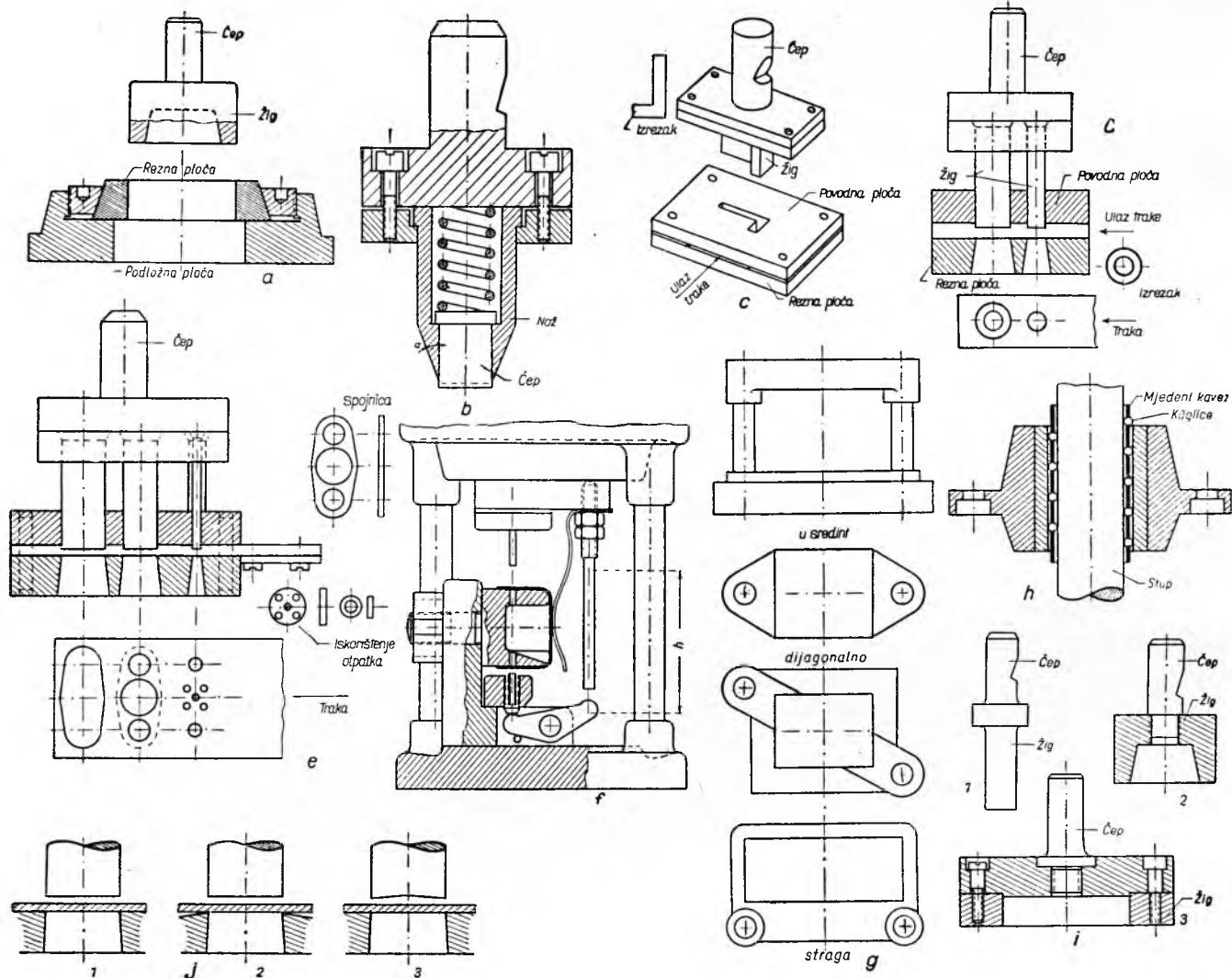
## ALATI

ili prešani papir. Ova jednostavna izvedba predstavlja također alat za slobodni rez.

Sl. 5c prikazuje štancu za izrezivanje izrezaka u obliku slova L. Gornji dio štance sastoji se od dvije ploče sa usadnim čepom odozgo i reznim žigom odozdo. Donji dio sastoji se od povodne ploče za vođenje žiga i rezne ploče. U obje ploče urezan je oblik izreska. Traka ulazi među njih kroz raspore koji može biti i nekoliko puta širi od debljine trake. Povodna ploča osigurava dobro vođenje žiga, čime se čuva alat i poboljšava kvalitet rada.

Sl. 5d prikazuje štancu sa dva žiga za izrezivanje podložnih pločica; prvi, manji žig probija rupu u pločici, a iza toga drugi,

Za kvalitet izreska i za trajnost alata važno je da sve radne rupe u reznoj ploči budu tačno izradene i nakon kaljenja fino izbrušene. Na alatu sa više žigova susjedne rupe ne smiju biti suviše blizu da ne bi zbog pretankog pregradnog zida došlo do pucanja ploče bilo u radu bilo prilikom kaljenja. Zračnost između žigova i rupe treba pravilno odmjeriti prema vrsti štančanog materijala i debljini lima. Za čelični lim srednje čvrstoće zračnost iznosi često  $\sim \frac{1}{15}$  debljine lima. Za tvrdi čelik zračnost je nešto malo veća, a za aluminijski je lim za  $\sim 50\%$  veća nego za čelik srednje tvrdoće. Rupa u reznoj ploči proširuje se pod kutom od najviše  $1^\circ$  ili odmah ispod svojeg reznog brida ili počevši od dubine od 1...2 mm. Zračnost rupe u povodnoj



Sl. 5. Štanci za rezanje. a slobodni rezni alat, b štanca za izrezivanje rondela s izbacivačem, c štanca s povodnom pločom, d štanca za izrezivanje podložnih pločica, e štanca za proizvodnju spojnica, f štanca za probijanje rupa na lončiću, g smještaj povodnih stupova, h povodni stup s kuglicama; i žigovi: 1 za male rupe, 2 za srednje rupe, 3 za velike rupe; j radne plohe reznih ploča i žigova: 1 ravno izbrušena gornja površina rezne ploče i čelo žiga, 2 koso izbrušena gornja površina rezne plohe i ravno izbrušeno čelo žiga, 3 ravno izbrušena gornja površina rezne plohe a čelo žiga koso (konično) prema unutra

veći žig izreže gotovu pločicu. Žigovi su vođeni u povodnoj ploči koja je smještena iznad rezne ploče. Traka putuje zdesna nalijevo kroz raspore između rezne i povodne ploče. Važno je da su obje ploče tačno paralelne. Povodna ploča ujedno skida otpatke sa žiga prilikom njegova povratnog gibanja. Vertikalni hod žiga je relativno mali. Kao nedostatak ove konstrukcije treba navesti da oblik izreska treba urezati u reznoj i u povodnoj ploči, što za složenije oblike poskupljuje izradu alata.

Sl. 5e prikazuje štancu za proizvodnju spojnica i za istodobno izrezivanje jedne kružne pločice s rupicama i dva prstena iz otpadaka. Traka putuje zdesna ulijevo. Svi žigovi vođeni su povodnom pločom koja ujedno skida ostatke trake sa žigova. Simetrala čepa poklapa se sa smjernicom rezultante sviju sile koje djeluju na žigove.

ploči prema žigu manja je od zračnosti rupe u reznoj ploči. Na povodnoj površini uredani su kanali za mazanje. Za vođenje žigova malog presjeka umeću se u povodnu ploču posebne zakljene vodice.

Sl. 5f prikazuje izgled alata za istodobno probijanje dviju nasuprot smještenih rupa na predmetu lončastog oblika nataknutom na šupljim čepom koji je učvršćen na posebnoj konzoli. Istodobno s gornjim žigom giba se prema dolje i svornik koji udari i zaokrene polugu i time pokrene donji žig prema gore. Traka-sta opruga pritiskuje lončić na čep. Gornju ploču u kojoj je učvršćen gornji žig vode dva stupna koji su dijagonalno smješteni na donjoj podložnoj ploči. U ovom primjeru radi se o naročito dugom hodumu žiga, koji je potreban zbog postavljanja i skidanja lončića. Vođenje alata sa povodnim stupovima često se izvo-

di, zbog veće tačnosti, kad se radi o artiklima složenijeg oblika. Povodni stupovi zamjenjuju povodnu ploču te se stoga konture izrezaka urezaju samo u reznu ploču. Smještaj stupova u donjoj podložnoj ploči može biti (sl. 5g): centralan (sjećanje okruglih predmeta), dijagonalan (sjećanje četvrtastih predmeta) ili na stražnjoj strani alata. U izvedbama sa 4 stupa stupovi su smješteni simetrično. U novije vrijeme uvodi se vodenje kuglicama (sl. 5h). Kuglice su utisnute u rupice mijedenog kaveza. Prstenski prostor između stupa i vodice smije imati za samo  $5 \mu$  veći promjer od promjera stupa + 2 promjera kuglice. Tačno vodenje, manje trošenje i mogućnost primjene na brzohodnim prešama glavne su odlike vodenja s kuglicama.

*Zigovi za rezanje i probijanje* oblikuju se prema veličini. Žig malih dimenzija izvodi se (sl. 5i, l) od jednog komada zajedno s čepom koji služi za usadijanje alata u glavu preše. Izvedba prema sl. 5i, 2 služi za srednje veličine žigova; usadni čep zavijen je u izdubljeno tijelo žiga. Sl. 5i, 3 pokazuje izvedbu za velike žigove: čep i žig zavijeni su u gornju podložnu ploču. U alatima sa 2 i više žigova žigovi su usadeni u posebnu ploču za žigove koja je pritegnuta na gornju podložnu ploču (v. sl. 5d i 5e). Fazonske žigove koji su na gornjem kraju kružnog presjeka treba osigurati od okretanja. Da se sprijeći utiskivanje žiga u gornju podložnu ploču, iznad žiga stavljaju se posebna čelična ploča.

Brušenje radne plohe reznih ploča i žigova može se izvesti na više načina (sl. 5j):

a) horizontalno se izbrusiti gornja površina rezne plohe i donja čeona površina žiga; sila rezanja djeluje udarno na alat i na stroj i relativno je visoka; b) gornja površina rezne ploče izbrusena je koso a čelo žiga ravno; sila rezanja je niža i nije toliko udarna; c) rezna ploča je brušena ravno, žig koso prema unutra; sila rezanja je kao pod b) ali izrezani dijelovi znaju biti toliko izbočeni da ih treba ravnati.

Pri dimenzioniranju žiga i rezne ploče treba voditi računa o tome da će pri probijanju mjera probijene rupe biti jednak mjeri žiga, a pri izrezivanju izresci poprimiti mjeru rupe u reznoj ploči.

Žigovi rezne ploče prave se od alatnog čelika, zakaljuju se i bruse. Gornja ploča za pričvršćenje žigova, usadni čep i povodna ploha rade se od mekanijeg strojograđevnog čelika čvrstoće najmanje  $42 \text{ kp/mm}^2$ . Povodni stupovi su od čelika za cementiranje, sa zakaljenim i izbrušenim kliznim površinama.

**Štance za plastično oblikovanje.** Sl. 6 prikazuje nekoliko osnovnih oblika tehnike rada štancama za plastično oblikovanje.

Pri savijanju treba pažljivo odabratiti radijus zakrivljenosti na mjestu prevoja. Najmanji dozvoljeni radijus zakrivljenosti zavisi o debljini  $s$  i o elastičnosti oblikovanog materijala. Što je manja debljina zida to manji smije biti radijus zakrivljenosti. Za mekane metale i jednostavno oblikovanje (sl. 6a, 1...7) smije radijus  $r$  biti i manji od  $s$ ; za tvrde materijale je minimalno  $r = s - 2s$ . Prilikom savijanja opterećeni su vanjski slojevi materijala na vlast i unutarnji na tlak. Time se mijenja prvobitni pravokutni presjek u iskrivljeni trapezasti, mijenjaju se vanjski i unutarnji radijusi zakrivljenosti i prvobitni položaj neutralne osi (sl. 6b). Te su promjene općenito to veće što je manji omjer  $r/s$ . Premale vrijednosti omjera  $r/s$  treba izbjegavati radi boljeg kvaliteta izrade i radi smanjenja škarta.

Zbog vraćanja i otvaranja savinutog materijala nakon vodenja predmeta iz alata potrebno je materijal savinuti u luk nešto manjeg unutarnjeg radijusa zakrivljenosti  $r'$  i savinuti za nešto veći kut  $\alpha'$  od traženoga (sl. 6c). Treba li npr. za mekani čelični lim debeline 2 mm da je  $r = 10 \text{ mm}$  i  $\alpha = 90^\circ$ , odabrat će se  $r' = 9,4 \text{ mm}$  i  $\alpha' = 93^\circ$ . Što je veći omjer  $r/s$  to je jače ovo vraćanje i zato ne valja odabirati previše velike vrijednosti za omjer  $r/s$ .

Sl. 7a prikazuje žigove za izradu ugaonog oblika i U-oblika koji kompenziraju vraćanje i otvaranje savinutog materijala.

Pri odizanju rubova po opsegu neke rondele (sl. 6a, 5, 6) ne smije ni visina  $h$  biti prevelika jer se inače stvaraju nabori. Do-

zvoljena visina  $h$  raste s promjerom poruba i s debljinom lima  $s$ , kako se vidi iz dijagrama na sl. 6d. Da se oblik izbušenih rupa ne promijeni, moraju rupe ležati van zona jakih deformacija materijala. Radi li se o četvrtastoj platini koju treba po opsegu savinuti, mora se odabratiti dovoljno veliki radijus zakrivljenosti  $R$  u uglovima platine. Pri ovijanju (sl. 6a, 8, 9) unutarnji promjer  $d$  ne valja da je manji od  $2s$ .

Sl. 7b prikazuje štancu za oštro savijanje sa dva povodna stupa za dobro vodenje gornjeg žiga, dva graničnika za tačno ulaganje izresa i izbacivačem u sredini donjeg kalupa.

Sl. 7c prikazuje štancu za izradu Z-oblika. Gornji žig je dvostrajan. Jaki povodni zatisci preuzimaju horizontalne sile koje djeluju na alat.

Sl. 7d prikazuje izradu zatvorenog četvrtastog oblika u dvije operacije. Nakon prve operacije mijenja se gornji žig, skida se gornja ploča donjeg kalupa i s pomoću četvrtastog uloška dovršava se potpuno zatvaranje.

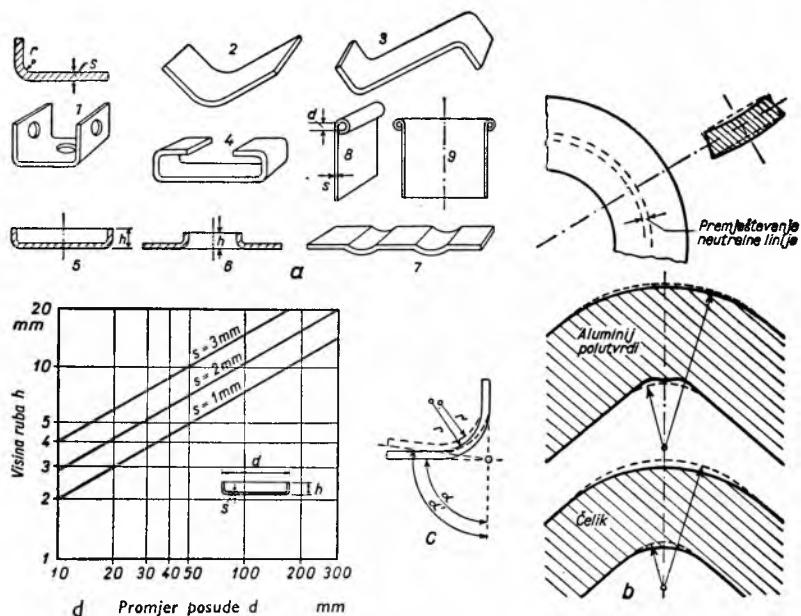
Sl. 7e prikazuje izradu zatvorenih cjevastih oblika u 2 operacije uz pomoć valjkastog uloška  $A$  i rovaša  $B$  za bolje zatvaranje savinutih krajeva cijevi.

Iz sl. 7f vidi se funkciranje štance za proizvodnju oglica iz limenih odrezaka. Ovakva jednostavna konstrukcija zadovoljava malu seriju proizvodnju. Savršenije izvedbe dovode do bitno složenijih konstrukcija štance za isti proizvod.

Sl. 7g prikazuje dvostruku štancu za istodobnu proizvodnju dvaju predmeta od istog limenog odresa. Štanca je simetrična pa se zato horizontalne sile poništavaju. Ljeva polovina slike prikazuje štancu u gornjem — otvorenom — položaju, a desna u spuštenom — zatvorenom — položaju. Kroz veliki žig prolazi mali žig za izbijanje isturenog donjeg dijela u koji će se urezati navoj. Nož u sredini štance prerezat će još na početku oblikovanja umetnuti limeni odrezak u dva dijela. Jaki povodni stupovi osiguravaju dobro vodenje štance a graničnici, lijevo i desno, pravilno ulaganje limenog odresa.

Sl. 7h prikazuje alat za ovijanje rubova na ravnim izresima. Gornji rub izresa koji se ovija treba prije stavljanja u alat malo iskretnuti ili bar malo stanjiti na brusu.

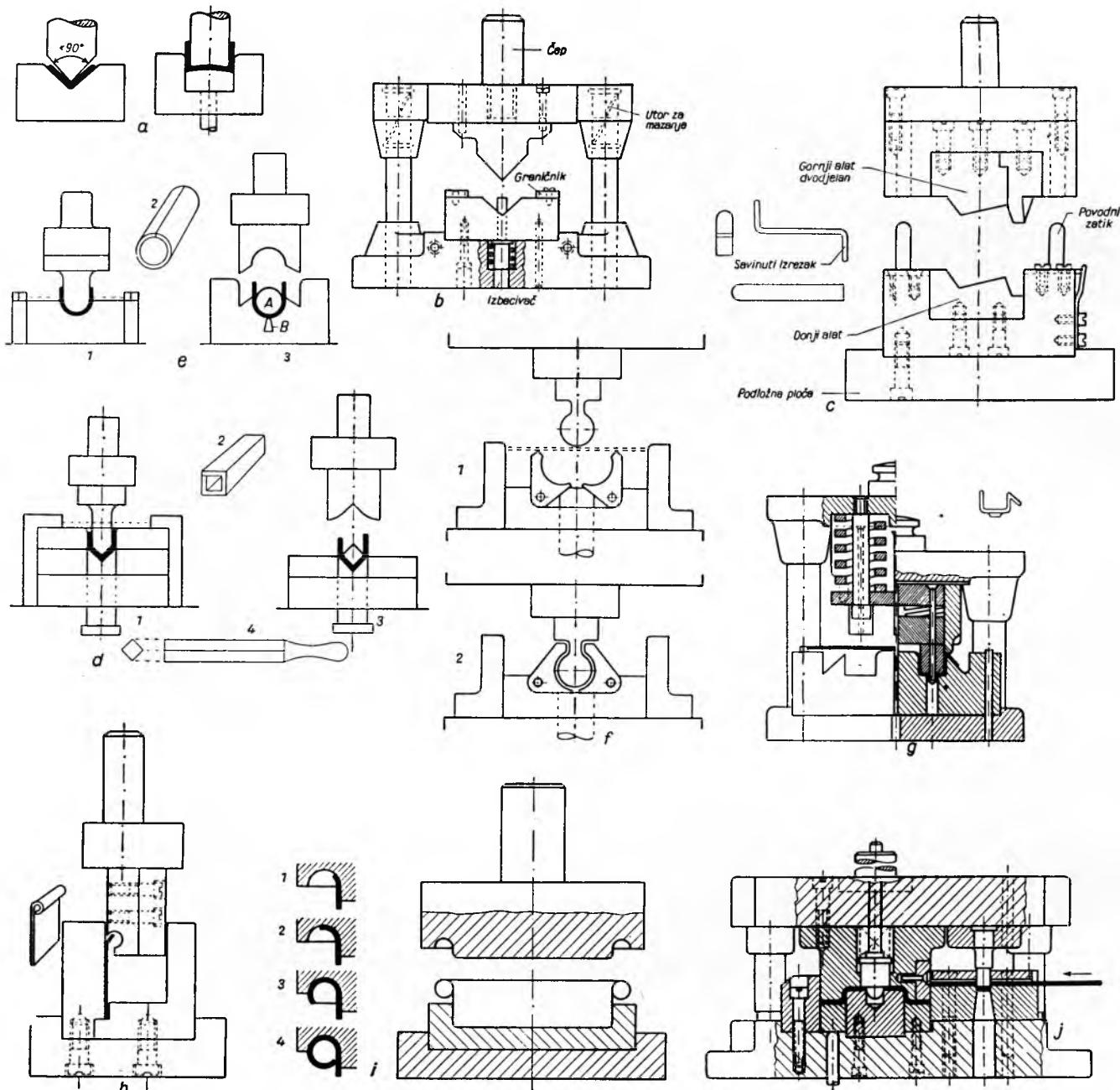
Sl. 7i prikazuje alat za ovijanje ruba na nekoj posudi i tok ovijanja ruba u žljebastom utoru gornjeg žiga prilikom njegova spuštanja.



Sl. 6. Oblikovanje štancama. a) nekoliko štancanih oblika, b) premještanje neutralne linije i promjene radijusa pri savijanju, c) vraćanje savinutog materijala i odgovarajući radijusi, d) zavisnost debljine lima, visine ruba i promjera posude

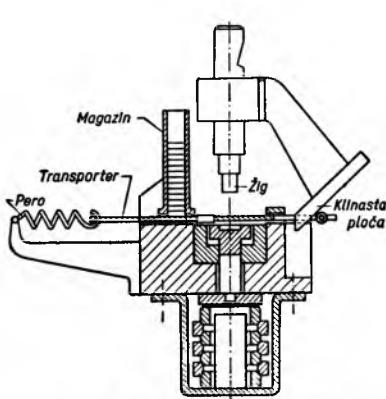
Sl. 7j prikazuje složenu štancu koja u svom desnom dijelu vrši odrezivanje kraja trake i probijanje rupe a nakon toga — u lijevom dijelu — savijanje odrezanog izresa. Pravilni položaj izresa prilikom savijanja osigurava čep koji ulazi u probijenu rupu.

## ALATI



Sl. 7. Štance za plastično oblikovanje. *a* štanca za izradu ugaonog i U-oblika, *b* štanca za izradu ugaonog oblika s izbacivačem, *c* štanca za izradu Z-oblika; *d* štanca za izradu zatvorenog četvrtastog oblika: 1 prva faza, 2 gotov izradak, 3 druga faza, 4 uložak; *e* štanca za izradu cjevastog oblika: 1 prva faza, 2 gotov izradak, 3 druga faza, *A* uložak, *B* rovati; *f* štanca za izradu ogrlica: 1 otvorena štanca, 2 štanca sa žigom u najnižem položaju; *g* dvostruka štanca, *h* štanca za ovijanje ruba na ravnim izrezcima; *i* štanca za ovijanje ruba na posudi: 1...4 tok ovijanja; *j* štanca za odrezivanje i savijanje

Za proizvodnju novaca, medalja, poklopaca za ručne satove i raznovrsnih ukrasnih predmeta služe štance za pečatanje sa ugraviranim likovima, natpisima itd. na radnim površinama žigova. U konstrukcijama tog tipa alata naročito su interesantni mehanizmi za automatsko dovođenje izrezaka u kalup. Sl. 8 prikazuje štancu s takvim mehanizmom. Iz magazina padaju rondele na transporter koji ih odvozi u kalup budući da je s gornjim dijelom alata spojena klinasta ploča koja pri spuštanju žiga povlači transporter udesno. Kad se žig vraća prema gore, kako pero vraća transporter ulijevo. Snažne opruge ispod ploče stola štite stroj od preopterećenja a u času prestanka pritiska izbacuju iz kalupa predmet koji se dalje odvodi pneumatski. Specifično



Sl. 8. Štanca za pečatanje

opterećenje graviranih površina je vrlo veliko i može biti  $\sim 3\ldots 4$  puta veće od čvrstoće formiranog materijala. Zato je zaštita stroja od preopterećenja često neophodna.

**Proračun sila štancanja.** Sila rezanja određuje se prema izrazu

$$F = c O s \tau,$$

gdje je  $O$  opseg svih rupa koje treba izrezati,  $s$  debljina lima,  $\tau$  čvrstoća materijala na smicanje,  $c \leq 1$ . Za ravno brušene žigove i rezne ploče je  $c = 1$ , a za oštriji oblik alata  $c$  se snizuje do 0,5.

Vitke žigove, duge a malih presjeka, treba računski kontrolirati s obzirom na izvijanje, a rezne ploče eventualno i na njihov progib.

Sila savijanja limenog odreska u pravokutni V-oblik određuje se jednadžbom:

$$F = a \cdot \frac{b s^2}{l} \sigma,$$

gdje su:  $b$  širina savijenog odreska,  $s$  debljina lima,  $l$  razmak rubova V-utora,  $\sigma$  čvrstoća materijala lima,  $a$  koeficijent zavisan o omjeru  $l/s$  kako pokazuje tablica:

|            |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|
| $l/s = 5$  | 10   | 15   | 20   | 30   |
| $a = 1,45$ | 1,28 | 1,21 | 1,18 | 1,16 |

Za savijanje u U-oblik može se sila savijanja približno odrediti iz jednadžbe

$$F = 0,4 \sigma s b.$$

Sila savijanja zavisi općenito o radijusu zakrivljenosti tlačnog žiga. Gornja jednadžba za silu savijanja u V-oblik vrijedi uz pretpostavku da je omjer između radijusa  $r$  i razmaka rubova  $l$  između 0,15 i 0,20.

#### ALATI KOJI SKIDAJU STRUGOTINU

Obrada skidanjem strugotine u proizvodnji je strojeva i raznovrsne metalne i nemetalne robe često jedna od vrlo opsežnih operacija, tako da dobar dio proizvodnih troškova i uloženih investicija otpada na alat i strojni park za obradu. Zbog toga mogu se racionalizacijom rada, boljim oblikovanjem alata, izborom alatnog materijala, ispravnim dimenzioniranjem i projektiranjem i boljim iskorišćivanjem alatnih strojeva postići značajne uštede i sniženje proizvodnih troškova. Zato se proučava čitav niz pitanja kao što su: sile na alatu i stroju uz odredene uvjete i vrstu obrade; trajanje alata i njegovih raznih oštrica u zavisnosti o radnim uvjetima; svršishodno oblikovanje alata prvenstveno s obzirom na karakteristične kuteve rezanja; materijal alata i njegov utjecaj na trajanje alata u radu.

Prvi pokusi o silama rezanja i trajanju alata provedeni su još potkraj prošlog stoljeća, a među prvima ih je počeo provoditi u Americi F. W. Taylor, i to na tokarskom alatu. Danas postoje brojni rezultati takvih ispitivanja koja su izvršena na raznovrsnim obradivanim materijalima i za različite vrste obrade. Po opsežnosti ispitivanja najviše je truda posvećeno tokarenju i tokarskim noževima. Što se tiče pokusnog obradivanih materijala, najopsežnije su obuhvaćeni čelici, obični i važniji legirani, pa lijevano željezo. Od neželjeznih metala nešto više pažnje posvećeno je lakiim metalima. Analogna ispitivanja na drvetu i plastičnim materijalima znatno zaostaju za ispitivanjem metalnih materijala.

**Materijali za izradu alata.** U suvremenoj proizvodnji služe dvije skupine materijala za izradu brzoreznog alata za skidanje strugotine: brzorezni čelici i tvrdi metali.

**Brzorezni čelici.** Radi postizanja dobre brzoreznosti dodaju se: krom (Cr), volfram (W), vanadij (V), molibden (Mo) i kobalt (Co). Preteča volframovih alatnih čelika jest Mushetov samokaljivi čelik iz 1861 sa  $\sim 5,5\%$  W,  $2,2\%$  C,  $1\%$  Si,  $1,5\%$  Mn i do  $0,5\%$  Cr; potkraj prošlog stoljeća penje se sadržaj volframa na  $8\text{--}12\%$ , sadržaj kroma na  $2,5\%$ , uz sadržaj mangana preko  $2\%$  i ugljika  $\sim 1,8\%$ . Kako u ono vrijeme te čelike nisu znali ispravno kaliti, njihove dobre sposobnosti rezanja nisu bile potpuno iskorištene. Slaba kovkost tih čelika bila je dalja teškoća koja je otežavala njihovu širu primjenu, ograničenu samo na obradu vrlo tvrdih materijala. Propalaškom ispravnog načina kaljenja i uz stanovitu promjenu u sastavu postignuto je sa čelikom sastava  $8\%$  W,  $3,5\text{--}4\%$  Cr i  $\sim 1,8\%$  C bitno poboljšanje. Taj je čelik prodro iz Amerike u Evropu 1900 te služi još i danas za obradu veoma tvrdih metala uz manje brzine rezanja. Prvih godina ovoga stoljeća počeo se dalje povisivati sadržaj volframa uz istodobno dodavanje vanadija i bitno snižavanje sadržaja ugljika, tako da se čelici iz 1906 po svom sastavu već malo razlikuju od današnjih visokovolframskih brzoreznih čelika. Od 1912 počelo je i dodavanje kobalta.

U tablici 1 prikazani su sastavi danas upotrebljavanih čelika za izradu brzoreznog alata. Krom, volfram, vanadij, molibden, a za najbolje alate i kobalt, glavni su sastojci koji treba da osiguraju što bolju brzoreznost alatu. Čelici starijega »klasičnog

sastava« sa mnogo volframa ( $17\text{--}19\%$ ) često se radi štednje volframa zamjenjuju čelicima s manje volframa, ali zato više molibdena, vanadija i kroma. Postoji stanovita zamjenljivost nekih elemenata drugim elementima, npr. volframa molibdenom i vanadijem. Računa se da npr.  $1\%$  molibdena može do stanovite količine biti ekvivalentno do  $2,5\%$  volframa. U skupini molibdenovih brzoreznih čelika zamjenjen je veliki dio volframa sa  $4\text{--}5\%$  molibdena, odnosno sav volfram sa  $8\text{--}9\%$  molibdena uz nešto povećani sadržaj vanadija. Kako je molibden ne samo vrlo skup nego za mnoge zemlje i kritičan elemenat, nastojala se ograničiti i količina molibdena, to više što se pokazalo da poboljšanje koje on daje naglo raste samo do količine od  $3\%$ . Tako je nastao poznati trojkačelik, koji sadržava po  $3\%$  molibdena, volframa i vanadija. Količina kroma kreće se oko  $4,0\text{--}4,5\%$ . Izuzetak čine neki čelici u kojima se količina kroma penje na  $8\text{--}13\%$  da bi se što više mogao smanjiti sadržaj volframa i molibdena, odnosno da bi se ovi elementi sasvim izostavili. Najbolje vrste čelika sa mnogo volframa sadrže kobalta, često  $10\text{--}15\%$ , koji povisuje temperaturu kaljenja, povisuje talište ledeburičnog eutektika te poboljšava izdržljivost reznog alata i njegovu produktivnost. Kao nedostatak treba naglasiti porast krtosti čelika kad poraste količina kobalta, zbog čega ta količina ne može biti veća od  $20\%$ .

Tablica 1  
SASTAV NEKIH BRZOREZNIH ČELIKA

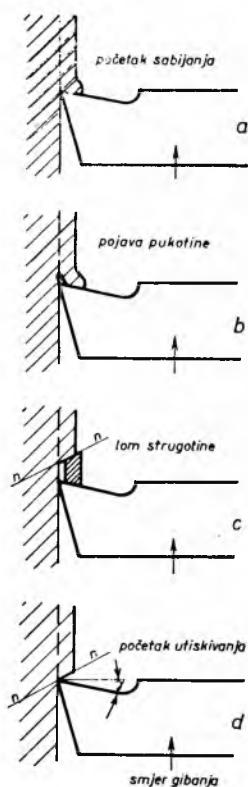
| C         | Cr        | W     | Mo   | V         | Co     | Sastav u %                           |                    | Podaci |  |
|-----------|-----------|-------|------|-----------|--------|--------------------------------------|--------------------|--------|--|
|           |           |       |      |           |        | Faktor ekvivalentnosti za $v_{40}$ : |                    |        |  |
|           |           |       |      |           |        | njem.                                | ruski <sup>1</sup> |        |  |
| 0,75      | 4,3       | 19    | —    | 1,2       | —      | 100                                  | 100                |        |  |
| 0,85      | 4,3       | 12,5  | 1,0  | 2,6       | —      | 103                                  | 100                |        |  |
| 1,00      | 4,3       | 3,0   | 2,8  | 2,5       | —      | 98                                   | 105...100          |        |  |
| 0,85      | 4,3       | 6,5   | 5,0  | 2,0       | —      | —                                    | 105...100          |        |  |
| 0,80      | 4,3       | 9,0   | 1,0  | 1,7       | —      | 101                                  | 105...100          |        |  |
| 1,30      | 4,5       | 12,5  | 1,0  | 4,0       | —      | 113                                  | —                  |        |  |
| 0,75      | 4,5       | 18,5  | 0,6  | 1,7       | 5,0    | 130                                  | 105...105          |        |  |
| 0,80      | 4,5       | 19,5  | 0,8  | 1,7       | 10,0   | —                                    | 110...110          |        |  |
| 0,90      | 4,5       | 12,5  | 1,0  | 2,2       | 3,0    | 115                                  | —                  |        |  |
| 0,70      | 5,0       | 18    | —    | —         | 3,0    | 119                                  | —                  |        |  |
| 1,35      | 4,5       | 12,5  | 1,0  | 4,0       | 5,0    | 137                                  | —                  |        |  |
| 0,80      | 4,3       | 12,5  | 1,25 | 1,8       | 4,7    | —                                    | —                  |        |  |
| 0,8...1,0 | 7,8...9,0 | 4...5 | —    | 1,0...1,5 | —      | —                                    | 90...85            |        |  |
| 1,0...1,2 | 11...13   | —     | —    | 2,5       | 1,3 Si | —                                    | 80...75            |        |  |

<sup>1</sup> Veće vrijednosti za obradu čelika tvrdoće HB 120...150 kp/mm<sup>2</sup>, manje vrijednosti za obradu čelika tvrdoće HB > 150...200 kp/mm<sup>2</sup>

Prilično velike razlike u sastavima čelika ove skupine čine da nisu svi čelici sa gledišta izdržljivosti oštice alata iste vrijednosti. Dva su čelika jednak vrednost uako uz posve jednakе uvjete rada oštice alata izdrže jednak dugo vrijeme u neprekidnom radu bez potrebe prebršivanja. U tablici 1 navedeni su približni faktori ekvivalentnosti s obzirom na brzinu  $v_{40}$ , i to relativno prema visokovolframskom čeliku sa  $19\%$  W, za koji je taj faktor uzet jednak 100. Razlike u ovim vrijednostima za dva brzorezna čelika postaju veće s porastom tvrdoće obradivoga čeličnog materijala. Tako bar vrijedi za tokarske rade. Kod svrdlačkih i glodačkih radova te su razlike, kako se čini, manje. Faktor ekvivalentnosti ovih čelika mnogo zavisi i o njihovoj pravilnoj termičkoj obradi — kaljenju i napuštanju — kao i o strukturi materijala prije kaljenja.

**Tvrdi metali.** Ima tri grupe tvrdih metala: lijevani steliti, lijevani tvrdi metali i sinterovani tvrdi metali. Steliti datiraju još od 1907 i sadrže  $\sim 17\%$  W,  $25\%$  Cr,  $35\%$  Co i  $3\%$  C, ostatak je Fe. Oblikovanje se izvodi lijevanjem u kokile ili pješčane forme, a obradivanje brušenjem ili sinterovanim tvrdim metalima. Toplinska obrada nije potrebna. U Americi su našli široku primjenu. Lijevani tvrdi metali sastoje se od volframovih karbida sa  $96\text{--}97\%$  W i  $3\text{--}4\%$  C uz dodatak drugih metala. Oblikuju se lijevanjem kao i steliti. Danas služe kao matrice za provlačenje tanke žice, kao ležajni materijal za različite ure, brojila i slično, zatim za rudarske krunске bušilice. Kao alat za rezanje nemaju više praktičnog značenja. Sinterovani tvrdi metali izgrađeni na bazi WC-Co,

WC-TiC-Co i WC-TiC-TaC-Co počeli su ulaziti u praksu potkraj treće dekade ovoga stoljeća. Zbog svoje odlične brzoreznosti oni su danas najbolja vrsta alatnog materijala, koja dopušta i nekoliko puta veće brzine nego najbolje vrste brzoreznih čelika.



Sl. 9. Proces skidanja strugotine

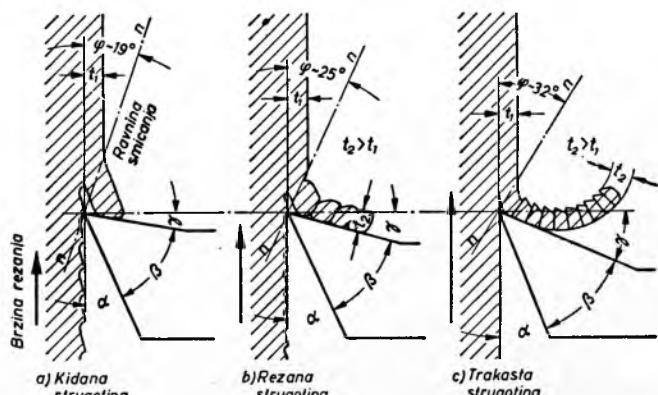
liku zrcalno sjajne površine. Što je teža obradivost nekog materijala to više dolaze do izražaja prednosti tvrdih metala. Tvrdi metali sve više istiskuju iz upotrebe ranije upotrebljavane alate s dijamantom, npr. dijamantne krune rudarskih bušilica i dijamantni alat za vrlo finu obradu površine.

Alat s pločicom tvrdog metala može dugo trajati samo uz dovoljnu pažnju ne samo u radu nego i prilikom lemljenja pločice na držak, kao i prilikom brušenja i dotjerivanja oštice. Kao nedostatak treba spomenuti da tvrdi metali zbog svoje krtosti ne podnose udarce, stoga treba izbjegavati sve izvore trešnje i udaraca. Visoka brzoreznost tvrdih metala može se dobro iskoristiti samo na modernim visokoturažnim alatnim strojevima krute izvedbe. Osjetljivost ovih materijala na zareze traži fino brušenje radnih površina i dotjerivanje izbrušenih površina i same oštice radi potpunog uklanjanja sitnih zareza i nazupčanih oruba preostalih od brušenja. Ovakva brižljiva obrada potrebna je za dug vijek alata i dobru izdržljivost njegove oštice. Za oštrenje tvrdih metala treba upotrebljavati posebne brusne ploče s mekanim vezivom koje lako ispušta zatuplja zrncu prije nego mogu uzrokovati štetne zareze na brušenim površinama. Isto tako treba izbjegavati prejako zagrijavanje prilikom oštrenja, da ne bi došlo do previških napona zbog razlike u toplinskoj vodljivosti i toplinskom istezanju između pločica tvrdog metala i čeličnog drška ili tijela alata.

Uz sinterovane tvrdi metale javljaju se posljednjih godina i sinterovani keramički materijali na bazi oksida i karbida nekih metala, npr.  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{Mo}$  i  $60\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{Mo}_2\text{C}$ , koji se za tokarske svrhe pričvršćuju u obliku pločica na čelične drške. Dopoljuju visoke brzine rezanja, vrlo su tvrdi — neki dosežu HR A 93 — ali su i vrlo krti,  $\sim 3\dots5$  puta niže čvrstoće na savijanje od sinterovanih tvrdih metala, što zahtijeva promjenu radnih uvjeta, a također drugačije oblikovanje i drugačiji način pričvršćivanja pločica. Relativna gustoća im je 5,3.

**Proces skidanja strugotine.** Proces skidanja strugotine, nežinog nastajanja, oblikovanja i odvajanja u uskoj je poveza-

nosti s procesom trošenja oštice i izdržljivosti alata, te je stoga posljednjih decenija lijep broj radova, teorijskih i eksperimentalnih, posvećen njegovu proučavanju. Proses skidanja odvija se ovako: utiskivani vrh alata vrši najprije stanovito sabijanje materijala ispred oštice, zatim se pojavljuje pukotina, a kad se alat giba dalje, odvojeni sloj materijala izvija se napolje sve dok ne dode do loma u ravnini smicanja  $n-n$  (sl. 9) i do otpadanja strugotine. Na slici je prikazan slučaj obrade krtog lijevanog željeza koje daje kratku, sitnu strugotinu. U času loma nastupa kratkotrajno rasterećenje alata i stroja, koje prestaje kad se ponovo utisne oštrica u materijal. Na početku utiskivanja pritisak djeluje na samu oštricu, a od časa stvaranja pukotine i za vrijeme oblikovanja i iskrećivanja strugotine napolje pritisak se premješta po prednjoj površini nešto dalje od same oštice. Dužina spomenute pukotine ispred oštice i oblik strugotine zavise o oštini alata i brzini rezanja. Oština alata određena je *prednjim kutom*  $\gamma$  (sl. 9 d); što je taj kut veći alat je oštriji i zadiranje oštice ispod površine je lakše a sile rezanja su manje. Tupi alati s malim kutem  $\gamma$  i male brzine rezanja daju relativno dulje pukotine i više usitnjenu strugotinu. S povećanjem kuta  $\gamma$  i povećanjem brzine rezanja pukotina dolazi sve bliže oštici, glatkota obradene površine postaje bolja a opterećenje stroja mirnije i jednoličnije. Prema obliku strugotine pri obradi žilavih materijala razlikuje se i tip *rezane strugotine* i tip *kontinuirane trakaste strugotine*

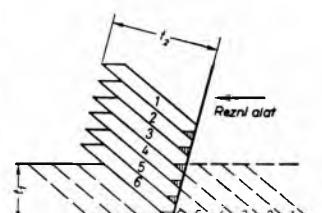


Sl. 10. Tipovi strugotine

(sl. 10a, b). Ostri noževi s dovoljno velikim prednjim kutom, relativno sitni presjek skidane strugotine i veće brzine rezanja daju glatku trakastu strugotinu; manje oštar alat, a pogotovo jači presjek strugotine, daje rezanu strugotinu, čija unutarnja strana pokazuje karakterističnu slojevitost i stepenatost, do koje je došlo relativnim smicanjem susjednih uskih slojeva materijala prilikom formiranja strugotine. Vanjska je strana strugotine glatka (sl. 11) jer su se oštri rubovi pojedinih stepenica izgladili u toku klijanjanja strugotine po prednjoj površini alata. Sl. 12 pokazuje shematski formiranje ovoga stepeničastog izgleda strugotine; vidi se prvočini položaj pojedinih slojeva u još neskinutom sloju a također i njihov položaj i premještanje u toku sklizanja po alatu.



Sl. 11. Trakasta strugotina



Sl. 12. Shematski prikaz oblikovanja stepeničastog izgleda strugotine

Vidi se da pri tom mora doći i do promjene u debljinu; debljina je strugotine veća od debljine skidanog sloja, zbog toga će i brzina njezina sklizanja i odvodenja biti manja od brzine rezanja. Šrafirani trokutici po vanjskoj strani strugotine znače onaj materijal koji se iz jednog sloja premjestio u toku gibanja alata u trokutaste

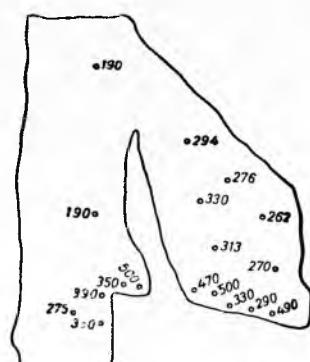
šupljinice između slojeva i tako poslužio za poravnavanje vanjske površine strugotine. Kad je alat naročito tup, presjek strugotine velik i brzina rezanja malena, može doći do jakog usitnjavanja strugotine i potpunog odvajanja pojedinih posmknutih slojeva, tj. do *kidane strugotine* (sl. 10a). Mijenjajući oštrinu alata, presjek strugotine i brzinu rezanja mogu se dobiti svi oblici strugotine počevši od tipa glatke trakaste preko tipa rezane do posve usitnjene kidane strugotine.



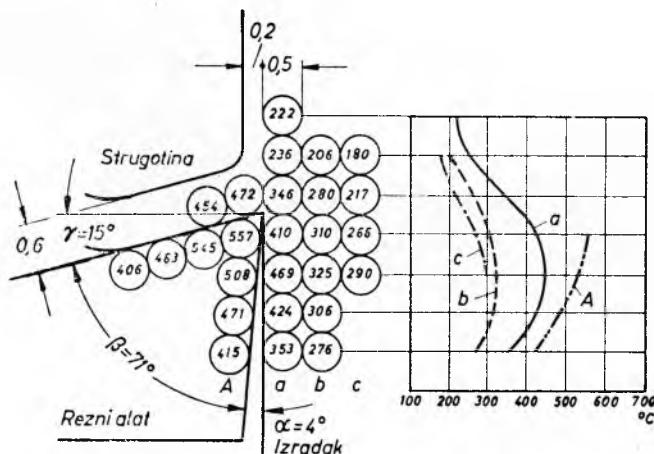
Sl. 13. Plastično deformiranje materijala strugotine

Skidanje i oblikovanje strugotine predstavlja jaku plastičnu deformaciju materijala strugotine u graničnoga površinskog sloja (sl. 13), koja izaziva i jače promjene mehaničkih svojstava.

Kao mjerilo plastične deformacije može poslužiti i povišenje tvrdoće obradene površine i strugotine ili koeficijent kompresije  $A_1/A_2$ , gdje je  $A_1$  presjek strugotine,  $A_2$  presjek skidanog sloja. Sl. 14 pokazuje razdiobu tvrdoće po uzdužnom presjeku strugotine i susjednoga graničnoga sloja u slučaju tipa rezane strugotine; vidi se da tvrdoća na mjestima najvećih deformacija poraste skoro za dvostruko. Kod tipa trakaste strugotine povišenje tvrdoće doseže samo  $\sim 50\%$ . Što se tiče koeficijenta kompresije, on zavisi, u saglasnosti s gornjim razmatranjem i s poskusima, o prednjem kutu  $\gamma$  i o brzini rezanja. Oštiri alati s velikim prednjim kutom daju niže koeficijente kompresije. Pri obradi čelika taj koeficijent s povišenjem brzine najprije raste, pa doseže neki maksimum, a kod naročito visokih brzina rezanja, negdje iznad 500 m/min, postaje konstantan za sve brzine. Ova složena zavisnost koeficijenta kompresije tumači se djelovanjem topline koja se razvija u procesu rezanja i koja mijenja mehanička svojstva materijala i uvjeti trenja. Sl. 15 pokazuje raspodjelu temperature.



Sl. 14. Razdioba tvrdoće (Brinell) po uzdužnom presjeku strugotine



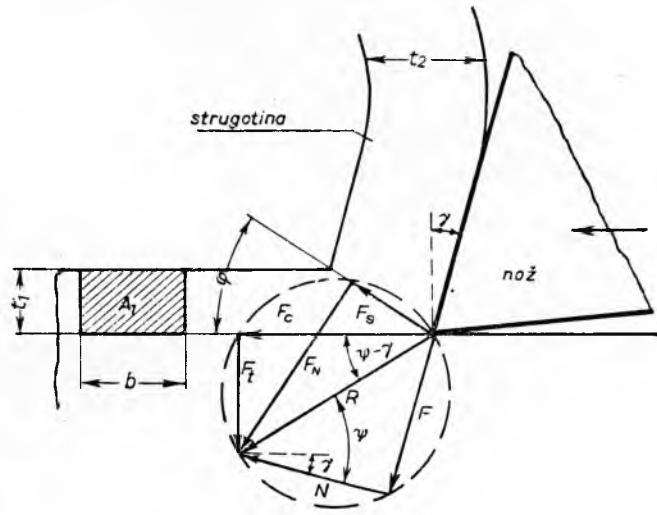
Sl. 15. Temperaturno polje (u  $^{\circ}\text{C}$ ) na površinama oštice alata i izratka

**Sile na alatu.** Iz druge polovine prošlog stoljeća imamo doduše više teorijskih razmatranja o silama rezanja (Time, Tresca, Zvorykin, Briks i dr.), ali tek novija istraživanja, koja iskorišćuju suvremenji razvoj teorije plastičnosti, teorije trenja i dr., uz moderne eksperimentalne metode, dovode do zadovoljavajućih rezultata. Na sl. 16 prikazane su sile na nožu prema Merchantu.  $F_c$

je sila rezanja u smjeru gibanja noža,  $F_t$  je sila trenja po prednjoj površini noža,  $F_s$  je sila na stražnjoj površini noža okomito na  $F_c$ .  $N$  djeluje okomito na prednju površinu noža.  $\mu$  je koeficijent trenja strugotine po prednjoj površini noža,  $\operatorname{tg} \psi = \mu = F_t/N$ . Ravnina smicanja nagnuta je pod kutom  $\varphi$ . U toj ravnini djeluje sila  $F_s$ , a okomito na nju sila  $F_N$ ,  $t_1$  je debljina, a  $A_1$  presjek skidanog sloja,  $t_2$  je debljina, a  $A_2$  je presjek odvojene strugotine. Iz slike se lako izvode ove jednadžbe:

$$\text{Debljina strugotine: } t_2 = t_1 \frac{\cos(\varphi - \gamma)}{\sin \varphi}, \quad (1)$$

gdje je  $\gamma$  prednji kut noža.



Sl. 16. Sile na nožu

Brzina strugotine relativno prema alatu:

$$v_{\text{str}} = v \frac{t_1}{t_2} = v \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \gamma)}, \quad (2)$$

gdje je  $v$  brzina noža, odnosno brzina rezanja.

Sila trenja:

$$F = F_t \cos \gamma + F_c \sin \gamma.$$

$$\text{Koeficijent trenja: } \mu = \frac{F}{N} = \frac{F_t + F_c \operatorname{tg} \gamma}{F_c - F_t \operatorname{tg} \gamma}.$$

Srednji napon smicanja materijala u ravnini smicanja je

$$\tau = \frac{F_s \sin \varphi}{A_1} = \frac{F_c \sin \varphi \cos \varphi - F_t \sin^2 \varphi}{A_1}.$$

Što je kut ravnine smicanja  $\varphi$  manji to će veća biti razlika između debljine strugotine  $t_2$  i debljine sloja  $t_1$  i to manja je brzina strugotine relativno prema brzini gibanja noža, kako se vidi iz jedn. (1), odnosno (2). Primjenjujući princip najmanjeg utroška energije na silu rezanja  $F_c$  i uz prepostavku da je čvrstoća na smicanje konstantna veličina i nezavisna o kutu  $\varphi$ , dolaze Merchant i Ernst do izraza:

$$2\varphi + \psi - \gamma = 90^\circ,$$

gdje je  $\psi = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \mu =$  kut trenja.

Poznaje li se  $\psi$  i  $\gamma$ , može se odatle naći kut  $\varphi$ .

Pokusni su, međutim, pokazali da je

$$2\varphi + \psi - \gamma < 90^\circ, \text{ tj. općenito}$$

$$2\varphi + \psi - \gamma = C,$$

gdje je  $C = 70 \dots 80^\circ$  za razne vrste strojograđevnih čelika. Činjenica da je  $C < 90^\circ$  pripisuje se naprezanju što ga izaziva sila  $F_N$  u ravnini smicanja. Poznaje li se veličina kuta  $C$ , može se sila rezanja  $F_c$  odrediti prema Merchantu iz jednadžbe:

$$F_c = A_1 \tau \left( \operatorname{tg} \frac{C + \psi - \gamma}{2} + \operatorname{ctg} \frac{C - \psi + \gamma}{2} \right),$$

a rad sile rezanja po jedinici volumena skinutog metala

$$W = F_c / A_1.$$

U saglasnosti s jcdn. (3) često se sila rezanja izražava u općem obliku, koji vrijedi za sve vrste obrada:

$$F = k_s \cdot A.$$

$A$  je presjek skidanog sloja (strugotine),  $k_s$  specifični otpor rezanja, zavisan o vrsti obradivog materijala i o veličini presjeka

strugotine;  $k_s = K/\sqrt{A}$ , gdje je eksponent korijena  $\epsilon > 1$ . Za silu  $F$  dobiva se oblik:

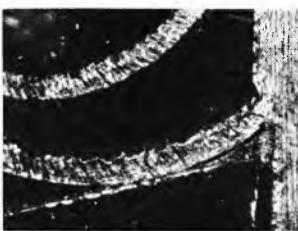
$$F = K/A^n, \text{ sa } n = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon} < 1.$$

$k_s$  i  $n$  zavise općenito o obradivom materijalu, vrsti obrade, oštrini alata, veličini i obliku presjeka  $A$ , mazanju, hlađenju, a donekle i o brzini rezanja. Kad je  $n$  samo nešto malo manje od 1, može se kao približno uzeti da se sila  $F$  linearno mijenja s presjekom  $A$ .

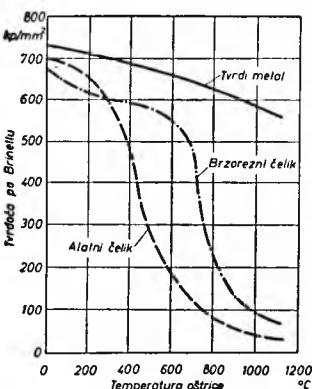
Prvenstveno radi oblikovanja i dimenzioniranja alata i alatnih strojeva sile se na alatu često i direktno mjeri, i to metodom koje se općenito upotrebljavaju za mjerjenje sile i o kojima je u ovoj enciklopediji riječ na drugom mjestu.

**Naljepljivanje.** Pri obradi metalnih materijala često dolazi do naljepljivanja sitnih odvojenih čestica obradivog metala i do nadogradnje vrha alata (sl. 17). Time se stvara tzv. lažna oštrica i mijenja se hvatište sile rezanja, karakter odvajanja i formiranja strugotine, a pri tokarenju ponešto i promjer tokarenog predmeta. Kada je naljepljeni sloj postao suviše visok, dolazi do njegova odvajanja, tako da jedan dio odlazi sa strugotinom a drugi se dio istiskuje kroz raspore između stražnje površine alata i površine predmeta napolje ostavljajući trage struganja na površini predmeta. Mekaniji su materijali više skloni ovakvu naljepljivanju, a prenike brzine rezanja također tome pogoduju. Visoke brzine rezanja, od nekih 70 m/min naviše, kao npr. na sl. 11, djeluju protiv naljepljivanja, jednako kao i prikladno hlađenje i mazanje. Pri finoj obradi treba ovo naljepljivanje što brižnije izbjegavati, jer loše djeluje na glatkoću obrađene površine.

**Zatupljivanje i trajanje oštice.** Brzina zatupljivanja oštice kao najosjetljivijega radnog elementa alata zavisi općenito o mehaničkom i toplinskom opterećenju oštice (sl. 18). Što je više specifično mehaničko i toplinsko opterećenje to brže napreduje



Sl. 17. Naljepljivanje i oblikovanje lažnog vrha alata



Sl. 18. Zavisnost tvrdoće o temperaturi za razne alate

trošenje i zatupljivanje. Faktori od utjecaja na trajanje oštice bit će dakle: vrsta i mehanička svojstva obradivog materijala; veličina i oblik presjeka skidane strugotine, odnosno, s time u vezi, i dužina oštice u radu; brzina rezanja; brzina odvođenja topline i kvalitet alatnog materijala. S porastom čvrstoće, tvrdoće i presjeka strugotine raste mehaničko opterećenje, a stoga i brzina trošenja oštice.

Jak utjecaj na zatupljivanje oštice ima brzina rezanja (sl. 19). S porastom brzine naglo raste toplinsko opterećenje oštice. Toplina koja se razvija u procesu rezanja povisuje temperaturu radnog vrha alata. Ovo povišenje iznosi prema Glebovu pri tokarenju srednjeg čelika:

$$\Delta \vartheta = 140 v^{0.4} t^{0.07} s^{0.16}.$$

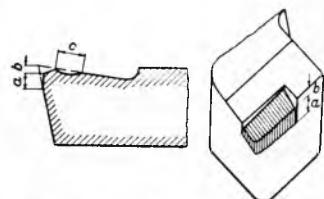
Nastaje dakle nagli porast temperature s brzinom rezanja  $v$ , nešto sporiji s posmakom  $s$  i mnogo sporiji s dubinom rezanja  $t$ .

Između trajanja oštice  $T$  u satima i brzine rezanja  $v$  u m/min uzima se da vrijedi općenito za sve vrste obrada jednadžba

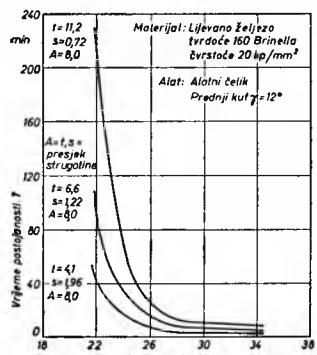
$$T = C/v^m,$$

gdje su  $C$  i  $m$  veličine zavisne o vrsti i svojstvima obradivog i alatnog materijala, zatim o vrsti obrade i ostalim uvjetima rada: hlađenju, presjeku strugotine i dr. Eksponent  $m$  kreće se u širokim granicama od 3 do 10. Za tokarski alat od tvrdih metala je npr.  $m = 4\dots 6$ , za alat od brzoreznog čelika i za tokarenje srednjeg čelika je  $m = 6\dots 8$ , za lijevanu željezo je  $m = 9$ . Za glodala i različite vrste glodačkih radova je  $m = 3\dots 5$ , za svrdla i svrdlačke radove je  $m = 5\dots 10$ . Ako je npr.  $m = 8$ , dovoljno je brzinu rezanja sniziti za samo 10% da bi se trajanje alata podvostručilo.

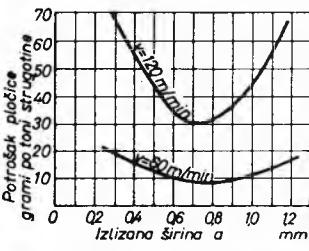
Zatupljivanje oštice alata napreduje postepeno: odvajana strugotina stvara na prednjoj površini alata udubine koje su u početku nešto dalje od oštice, ali u toku rada postaju sve dublje i dolaze sve bliže oštici. Istočitobno troši se i stražnja površina ispod same oštice u neposrednoj njenoj blizini. Sl. 20 prikazuje izgled potpuno zatupjela vrha alata: stražnji kut postao je jednak nuli, prednji kut je uza sam vrh postao čak negativan, prvobitni položaj oštice premješten je naniže, pravog rezanja više nema i alat treba bezuvjetno prebrusiti. Ovakva potpuna istrošenost radnog vrha alata uzima se kao kriterij zatupjelosti i potrebe prebrusivanja pri tokarenju željezognog materijala noževima od brzoreznog čelika, što je uveo još Taylor u svojim pokusima. Za alate od tvrdog metala i za sve alate složenog oblika i skupe izrade bilo bi nerentabilno dopuštati takvo potpuno zatupljivanje radnog vrha, jer bi to tražilo suviše jako skidanje skupog materijala i prejako trošenje alata prilikom brušenja. Stoga se ovdje kao kriterij zatupjelosti i potrebe prebrusivanja uzima određena širina  $a$  izlizane stražnje površine koja se proteže uzdužno ispod oštice (sl. 20). Ova se širina svršishodno odabira s obzirom na vrstu i kvalitet obrade i s obzirom na obradivani materijal. Pri obradi čelika uzima se kao kriterij zatupjelosti širina  $a = 0,5\dots 1,2$  mm, obično  $0,5\dots 0,8$  mm. Pri obradi elektrona uzima se manje, samo  $0,1$  mm, da ne bi suviše tupi alat uzrokovao zbog jačeg zagrijavanja zapaljenje strugotine. Za ostale lake metale uzima se  $0,1\dots 0,3$  mm. Pri obradi mehaničkih neželjeznih metala i umjetnih plastičnih materijala alatom od brzoreznog čelika i alatom od tvrdih metala uzima se često kao kriterij zatupjelosti također određena širina izlizane stražnje površine. I uz ovaku relativno blažu zatupjelost dolazi do promjene stražnjeg i prednjeg kuta, što ipak nema tako jaka utjecaja na karakter rezanja ni u času nastupa zatupjelosti, kao što je slučaj pri potpunoj istrošenosti radnog vrha alata. Dijagram na sl. 21 pokazuje da će za prije navedene širine  $a$  izlizane stražnje površine potrošak tvrdog metala, izražen u gramima po toni skinute čelične strugotine, biti najmanji, dakle najpovoljniji.



Sl. 20. Istrošenost vrha alata



Sl. 19. Utjecaj dubine reza  $t$  i posmaka  $A$  na vrijeme postojanja oštice alata u zavisnosti o brzini rezanja



Sl. 21. Najpovoljnija izlizana širina  $a$

Napredovanje zatupjelosti može se pri obradi žilavih materijala pratiti i po izgledu strugotine. U toku zatupljanja postaje strugotina više kovrčasta i usitnjena (sl. 22). Jače zagrijavanje pri nastupu veće zatupjelosti mijenja i boju čeličnoj strugotini.

**Ekonomična brzina rezanja.** Velike brzine rezanja uviјek su poželjne s gledišta ekonomičnosti i produktivnosti rada, ali ako su prevelike izazivat će — zbog brzog zatupljuvanija i čestog oštenja alata — suviše osjetne prekide rada i postaju stoga neprakladne. Postoji stoga neka najpovoljnija — ekonomična — brzina rezanja, za koju će produktivnost alata biti najbolja.

Na temelju studija i analiza pojedinih radnih procesa s gledišta postignutog učinka, utroška radnog vremena, utroška alata itd., uzima se za jednostavne alate, npr. tokarske noževe, kao ekonomična brzina rezanja ona brzina koju ti alati podnose u neprekidnom radu bez potrebe prebrušivanja 60 minuta; ta se brzina označuje sa  $v_{60}$ . Za složenije oblikovane alate, kao što su razna glodala i fazonski noževi, koji trebaju više vremena za prebrušivanje i gdje, osim toga, svako prebrušivanje znači osjetljive trošenje i skraćenje vijeka alata, odabiraju se brzine  $v_{240}$  ili  $v_{480}$ , tako da trajanje oštice između dva prebrušivanja bude 240, odnosno 480 minuta. I za jednostavno oblikovani alat koji se doduše lako i brzo prebrušuje ali je njegovo nameštanje na stroju skopčano s većim gubitkom vremena — npr. alat za automatske alatne strojeve — uzima se često brzina  $v_{480}$ , tj. alat treba da traje u radu jednu punu radnu smjenu. Za noževe s oštricama od tvrdih metala češće se uzima  $v_{120}$ . Kao kriterij za ekonomičnu brzinu rezanja svrdla uzima se ukupna dužina izbušenih rupa koju treba oštice da izdrži između dva prebrušivanja. Ta je dužina  $l = 2000$  mm a pripadajuća ekonomična brzina označuje se sa  $v_{1-2000}$ .

Između brzina  $v_{60}$ ,  $v_{120}$ ,  $v_{240}$  i  $v_{480}$  vrijede ove relacije:  $v_{120} = (0,92 \dots 0,86) v_{60}$ ;  $v_{240} = (0,84 \dots 0,72) v_{60}$ ;  $v_{480} = (0,68 \dots 0,46) v_{60}$ .

Između brzine rezanja, temperature i trajanja oštice postoji stanovita povezanost, kako pokusi potvrđuju. Uz određene radne uvjete odgovara ekonomičnoj brzini rezanja uviјek određena temperatura oštice. Snizi li se na neki način temperatura oštice, produljiće se njezino trajanje, ako se ne poveća brzina rezanja. Sniženje temperature postiže se tim što se odvodi toplina rashladnim sredstvima i smanjuje trenje s pomoću maziva. Dobrim hlađenjem može se brzina rezanja povisiti i do 40%. Za male i srednje brzine rezanja utjecaj je hlađenja na brzinu  $v_{60}$  relativno jak, za velike brzine je mnogo slabiji.

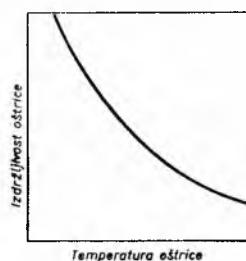
**Rashladna i maziva sredstva.** Za rashladivanje služe voda, vodena otopina sode, otopina kalcijeva kromata i sapunica, zatim različite uljne emulzije. Kao mazivo najjači učinak daju repičino i ricinusovo ulje i smjesa repičina i mineralnog ulja. Rashladna sredstva mogu imati pri finoj obradi utjecaj i na kvalitet obradene površine. Prema tome da li je važno samo rashladivanje ili je poželjno istodobno i mazanje, vrši se izbor i sastav rashladnog sredstva. Efekt rashladivanja zavisi ne samo o vrsti upotrebljenog sredstva nego i o količini i načinu dovodenja sredstva do mjesta rashladivanja. Suvremene metode dovodenja sredstva pod pritiskom bitno poboljšavaju taj efekt, koji se očituje u znatno duljem trajanju oštice alata.

**Određivanje ekonomične brzine rezanja.** Poznavanje ekonomične brzine rezanja ima za proizvodnju naročito praktično značenje te se stoga velik dio ispitivanja posvećuje određivanju te brzine. Tačne vrijednosti za ovu brzinu mogu dati samo dugotrajni i skupi pokusi, vršeni do nastupa zatupljelosti oštice uz određene radne uvjete. Umjesto ovih skupih pokusa danas u mnogo slučajeva uspješno služe u tu svrhu komparativne, kratkotrajne i relativno jeftine metode ispitivanja, od kojih će se ovdje opisati: metoda određivanja temperaturе oštice, metoda mjerjenja prevaljenog puta tokarenja i metoda poprečnog tokarenja. Opisane metode razradene su prvenstveno za tokarski alat i ispitivanja na tokarskim strojevima.

Sl. 22. Promjena izgleda strugotine u toku napredovanja zatupljuvajućeg alata (prema A. O. Schmidtu)

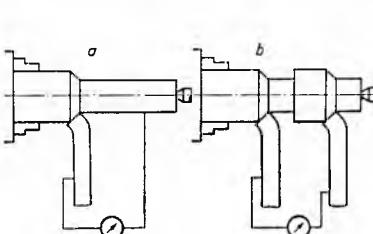
Za ostale vrste obrade potrebne su, dakako, izmjene u aparaturni i postupku.

**Metoda određivanja temperature oštice.** Ova metoda bazira na pokusima Reichela; on je utvrdio da ekonomičnoj brzini rezanja pripada uviјek odredena temperatura oštice i odredio je za neke slučajeve zavisnost između trajanja oštice i njezine temperature (sl. 23). Pri pokusima potrebno je brzinu rezanja mijenjati dok se ne postigne temperatura oštice koju je imao isti alat pri obradi drugoga kojeg materijala obradivanog ekonomskom brzinom rezanja  $v_{60}$ . U tom postupku krije se važna pretpostavka da su uz istu temperaturu i specifični pritisci na oštici alata isti, jer izdržljivost oštice zavisi, sigurno, ne samo o temperaturi nego i o mehaničkom opterećenju. Mjerjenje temperature oštice tokarskog noža izvodi se na više načina. Najpoznatiji su Herbert-Gottweinov način prema sl. 24a. Oštice i predmet tvore termoelement čiji napon mjeri osjetljivi milivoltmetar. Nož je upet na suport i prema njemu izoliran. Jedan kraj milivoltmetra priključen je na držak noža a drugi na rotirajući obradivanu osovinu. Što je jače zagrijavanje oštice u radu to viši će biti električni napon. Skala milivoltmetra baždarena je u tu svrhu u stupnjevima. Postupak je upotrebljiv samo pri obradi električki vodljivih materijala. Drugi je način prema Gottwein-Reichelu sa dva noža različita sastava (sl. 24b), koji istodobno skidaju isti presjek strugotine, tako da su i temperature njihovih oštice jednake. Milivoltmetar pokazuje stvoreni termonapon. I ovdje je potrebno da obradivani materijal bude

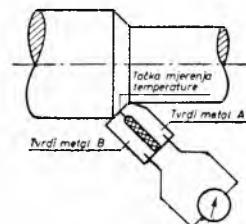


Sl. 23. Zavisnost trajanja oštice o njezinoj temperaturi

čina. Najpoznatiji su Herbert-Gottweinov način prema sl. 24a. Oštice i predmet tvore termoelement čiji napon mjeri osjetljivi milivoltmetar. Nož je upet na suport i prema njemu izoliran. Jedan kraj milivoltmetra priključen je na držak noža a drugi na rotirajući obradivanu osovinu. Što je jače zagrijavanje oštice u radu to viši će biti električni napon. Skala milivoltmetra baždarena je u tu svrhu u stupnjevima. Postupak je upotrebljiv samo pri obradi električki vodljivih materijala. Drugi je način prema Gottwein-Reichelu sa dva noža različita sastava (sl. 24b), koji istodobno skidaju isti presjek strugotine, tako da su i temperature njihovih oštice jednake. Milivoltmetar pokazuje stvoreni termonapon. I ovdje je potrebno da obradivani materijal bude



Sl. 24. Mjerjenje temperature oštice: a prema Herbert-Gottweinu, b prema Gottwein-Reichelu



Sl. 25. Mjerjenje temperature oštice prema Sahnazarovu

elektroprovodljiv. Tako određena temperatura predstavlja uviјek samo neku prosječnu vrijednost temperature oštice, odnosno vrha alata, a ne najvišu temperaturu oštice koja je mjerodavna za njezinu izdržljivost. Interesantan je i postupak mjerjenja temperature s pomoću noža kojemu je oštica sastavljena od dva različita tvrda metala (sl. 25), tako da se može upotrijebiti u slučaju obrade materijala koji su električki izolatori. Od ostalih postupaka može se spomenuti postupak s termokolornim bojama. Stražnja površina noža premaže se bojilom koja na određenoj povišenoj temperaturi mijenja boju pokazujući na taj način zonu na granici koje vlada ista temperatura. Upotrebljavajući redom više bojila koja na različitim temperaturama mijenjaju boju, može se dobiti na stražnjoj površini noža slika temperaturnog polja za neke zadane radne uvjete. Poznat je i postupak ugradnje sitnog termoelementa u unutrašnjost alata, neposredno ispod oštice gdje je najviša temperatura. Za snimanje temperaturnog polja na svima pristupačnim površinama vrha alata mogu poslužiti i sitni kontaktne termoelemente, a u posljednje doba primjenjuje se i postupak na bazi isijavanja topline posve malih površina,  $\sim 0,03 \text{ mm}^2$ . Poznaje li se slika temperaturnog polja određenog na taj način od tačke do tačke, može se ovo polje teorijski extrapolirati i tako naći zona i vrijednost najviše temperature oštice, makar je ta zona inače nepristupačna direktnom mjerjenju. Tako dobivene vrijednosti na oštici alata od tvrdog metala idu i preko  $1000^\circ$ , dakle znatno iznad onih prosječnih temperatura na vrhu alata koje daju gotovo sve prije opisane metode mjerjenja.

**Metoda mjerjenja prevaljenog puta tokarenja, uz povremeno povećavanje brzine rezanja.** Radi se tako da se nakon određenoga prevaljenoga puta tokarenja, npr. svakih 25 m opseg, povisi



brzina rezanja npr. za 5 m/min i tako sve do zatupljenja oštice. Do toga časa prevaljeni put služi kao mjera izdržljivosti alata, odnosno ekonomične brzine rezanja ili jednakovrijednosti obradivanja materijala u poredbi s nekim drugim ranije već ispitanim materijalom za koji je brzina  $v_{eo}$  bila odredena. Prednost metode je jednostavnost. Metoda zadovoljava ako treba samo ocijeniti npr. koji je materijal bolje obradljiv. Zaključivanje na brzinu  $v_{eo}$  u slučaju nejednakovrijednosti materijala je nesigurno.

*Metoda poprečnog tokarenja prema van Dongenu i Stegweeu.* Pokusno rezanje počinje prema sl. 26 na promjeru  $d_o$  s brzinom rezanja  $v_o$ , pa se ta brzina kontinuirano povisuje gibanjem noža prema periferiji. Pokus se vrši sve do nastupa zatupljenja noža, koje se pojavljuje kod neke brzine  $v_n$  na promjeru  $d_n$ . Odатle se može odrediti za zadani presjek strugotine zavisnost između brzine rezanja  $v$  i trajanja oštice  $T$ , dakle i ekonomična brzina rezanja  $v_{eo}$ . Polazi se od jednadžbe koja općenito vrijedi

$$v_T = \frac{C}{T^{1/m}},$$

gdje su  $C$  i  $m$  konstante koje još treba odrediti. Tražeći vrijednost srednje brzine rezanja dolazi se do jednadžbe:

$$v_n^{m+1} = 2\pi n^2 s(m+1) C^m,$$

gdje su:  $s$  radikalni posmak noža,  $v_n$  brzina rezanja u času zatupljenja oštice,  $n$  broj okretaja s kojim je izvršeno pokusno rezanje.

Tokareći tako da jedanput nastupa zatupljenje uz broj okretaja  $n_1$  i brzinu rezanja  $v_{n1}$  a drugi put uz  $n_2$  i brzinu  $v_{n2}$ , mogu se iz posljednje jednadžbe odrediti konstante  $m$  i  $C$ , koje se uvrste u prvu općenitu jednadžbu i tako dobije izraz:

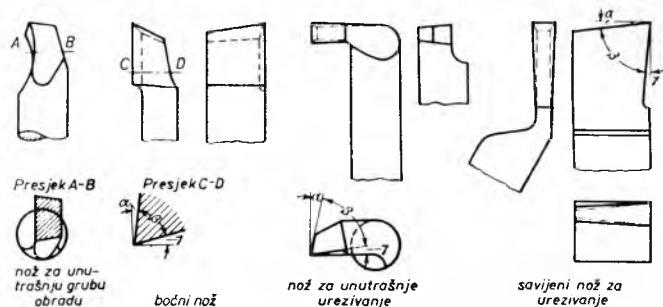
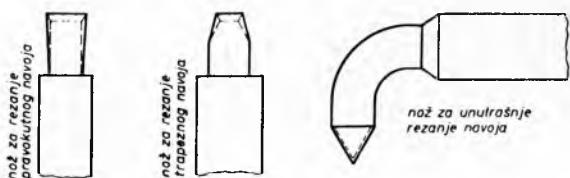
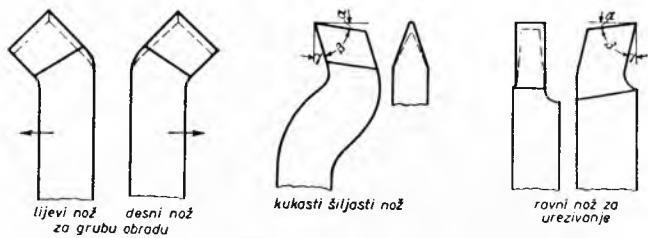
$$v_T = v_n \sqrt{\frac{d_n}{2s n(m+1) T}}, \quad m+1 = \frac{\log 2\pi(n_1/n_2)^2}{\log v_{n1}/v_{n2}}.$$

Za trajanje oštice  $T = 60$  min dobije se odatle ekonomična brzina rezanja  $v_{eo}$ .

### Tokarski noževi

Za obradu na tokarskim i njima srodnim strojevima služe tokarski noževi, koji po svom obliku predstavljaju najjednostavniji, a po upotrebi jedan od najčešćih alata za skidanje strugotine. Oblik prednjega radnog dijela noža i njegova drška zavise o vrsti obrade, izgledu obradivane površine i zahtijevanom kvalitetu obrade. S obzirom na vrstu obrade, koja ima nešto izrazitijeg utjecaja na oblikovanje alata, mogu se tokarski noževi grubo podijeliti u dvije grupe: noževe za vanjsko tokarenje i noževe za unutarnje tokarenje. S obzirom na izgled obradivane površine razlikuju se noževi za obradu glatkih cilindričnih površina, za obradu oko izdanaka, za rezanje različitih navoja, za prerezivanje, za obradu različito fazoniranih površina. Prema smjeru gibanja noža u radu često se razlikuju noževi za uzdužno i noževi za poprečno tokarenje, a noževi za uzdužno tokarenje se dijele prema smjeru gibanja na lijeve i desne noževe. Konačno, s obzirom na zahtijevani kvalitet obrađene površine razlikuju se noževi za grubu i za finu obradu. Sl. 27 prikazuje nekoliko najčešćih oblika noževa.

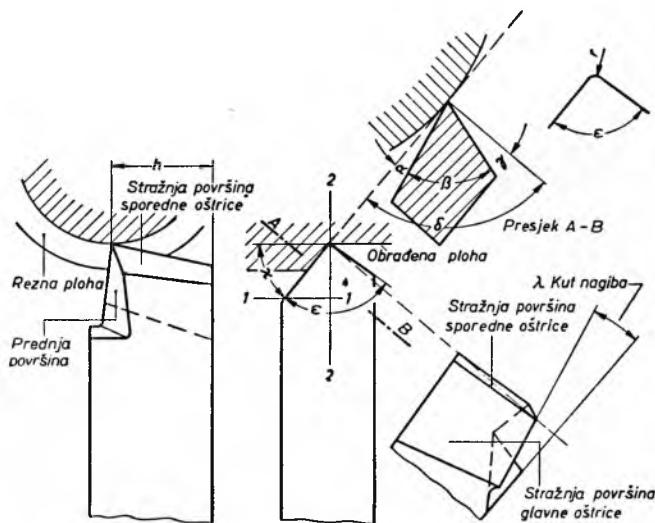
**Tokarski noževi za grubu obradu.** Sl. 28 prikazuje najčešći tip noža za grubu obradu glatkog cilindričnog površina sa svim karakterističnim elementima i kutovima: glavne i sporedne ravnine i oštice, prednji i stražnji kut, kut klina, kut rezanja, kut vrha, kut postave i kut nagiba glavne oštice. Oština noža određena je veličinom prednjeg kuta  $\gamma$ , odnosno veličinom kuta rezanja  $\delta$ . Stražnji kut  $\alpha$  treba da smanji trenje i struganje između stražnje površine noža i obradene površine predmeta. Kut klina  $\beta$  koji zatvara prednja i stražnja površina određuje mehaničku otpornost radnog vrha alata i izdržljivost oštice u radu. Nagib oštice  $\lambda$  prema horizontali računa se kao pozitivan ako glavna oštica visi prema vrhu noža. Taj se kut uzima  $\sim 3\text{--}5^\circ$ , a za luke metale i više. Time se dobiva nešto malo dulja oštica a sila rezanja usmjerenja je nešto dalje od samog vrha noža.



Sl. 27. Najčešći oblici tokarskih noževa

Veličine prednjeg i stražnjeg kuta odabiraju se prema vrsti obradivog materijala. Za noževe od brzoreznog čelika za grubu obradu JUS preporučuju ove vrijednosti za stražnje i prednje kuteve:

| Obradivani materijal  | stražnji kut $\alpha$ | prednji kut $\gamma$ |
|---|-----------------------|----------------------|
| Laki metali i ležajne legure  | 10°                   | 30°                  |
| Čelici čvrstoće 37...60 kp/mm <sup>2</sup> , bakar, mehanički sivi  | 8°                    | 25°                  |
| Čelici čvrstoće 60...95 kp/mm <sup>2</sup> , sivi lijev tvrdoće HB do 190 kp/mm <sup>2</sup> , mehanički sivi i bronze      | 8°                    | 15°                  |
| Čelici čvrstoće 105...120 kp/mm <sup>2</sup> , sivi lijev tvrdoće HB 210...240 kp/mm <sup>2</sup> , mehanički sivi i bronze | 6°                    | 5°                   |

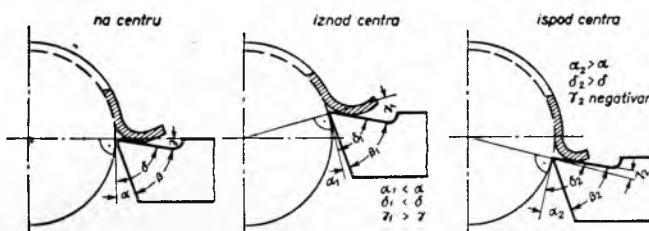


Sl. 28. Plohe i rezni kutovi oštice alata

Alati s pločicama od tvrdog metala imaju za iste svrhe prosječno za  $2^\circ$  manje stražnje i prednje kutove.

Kutu postave  $\alpha$  daje se obično za sve vrste čelika, čeličnog lijeva, sivog lijeva tvrdoće HB do 160 kp/mm<sup>2</sup> i za luke metale veličina  $45^\circ$ , za mjeri i bronze  $60^\circ$ . Što je manji kut postave  $\alpha$  to se veća duljina oštice nalazi u radu, to je stoga manje njezino opterećenje po 1 mm dužine i dulje njezino trajanje. Premašeni kut  $\alpha$  tražio bi suviše široki nož. Kut  $\alpha = 90^\circ$  bira se kada je to prijeko potrebno, npr. za obradu predmeta s tvrdom korom i za obradu oko izdanaka. On daje visoko specifično opterećenje oštice i veću komponentu sile u smjeru posmaka noža.

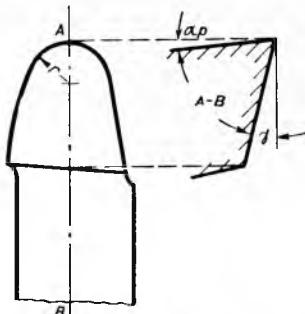
Navedene vrijednosti za kutove  $\alpha$  i  $\gamma$  odgovaraju za položaj noža na visini centra tokarenog predmeta. Stavi li se nož iznad centra, smanjuje se pri vanjskom tokarenju stražnji kut, a povisuje prednji kut; stavi li se nož ispod centra, raste stražnji kut



Sl. 29. Promjene kutova s položajem noža prema centru

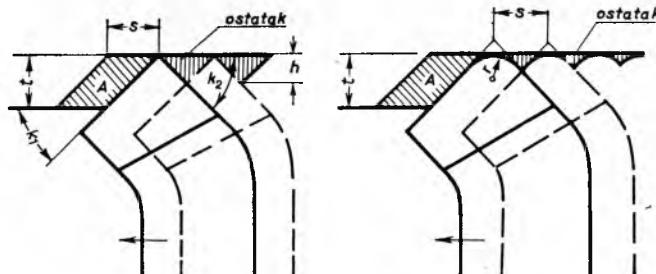
a opada prednji (sl. 29). Jedan te isti nož ponaša se dakle na položaju iznad centra kao oštiri, a ispod centra kao tuplji. Pri unutarnjem je tokarenju obrnuto. Postavljanje noža iznad centra pri vanjskom tokarenju ima i drugu prednost: da predmet djeluje kao potporan koji smanjuje progibanje noža pod djelovanjem sile rezanja, što ublažuje trešnju stroja i alata, pogotovo kad se obraduje krt materijal.

Poseban je tip noža Taylorov nož s jaks zaobljenom ošticom (sl. 30). Specifične su oznake ovog noža: vrlo mala količina neskinutog ostatka, debljina strugotine na vrhu noža vrlo tanka, sile rezanja za  $\sim 15\%$  više nego s noževima sa ravnom ošticom, specifično opterećenje uzduž oštice dosta nejednoliko. Zbog teže izrade i težeg prebrusivanja taj se tip noža rijedko upotrebljava.



Sl. 30. Taylorov nož

**Presjek skidanog sloja (strugotine) pri tokarenju.** Teorijski presjek skinutog sloja  $A = ts$  je od faktičnoga veći za veličinu neskinutog ostatka  $A'$ , koji zavisi o posmaku noža, o kutovima  $k_1$  i  $k_2$ , o zaobljenosti vrha noža  $r$ . Veličina neskinutog ostatka naglo raste s porastom posmaka  $s$ , a isto se tako naglo



Sl. 31. Veličina ostatka pri rezanju oštirim i zaobljenim nožem

smanjuje s povećanjem polujmera zaobljenosti vrha  $r$  (sl. 31). Dubina brazdā  $h$  koje ostavlja iza sebe na obrađenoj površini ostri vrh noža može se odrediti iz jednadžbe

$$h = s \frac{\sin k_1 \sin k_2}{\sin(k_1 + k_2)}.$$

Površina neskinutog ostatka je

$$A' = \frac{sh}{2} = \frac{s^2 \sin k_1 \sin k_2}{2 \sin(k_1 + k_2)}.$$

Površina stvarno skinutog sloja je

$$A - A' = ts - \frac{s^2 \sin k_1 \sin k_2}{2 \sin(k_1 + k_2)}.$$

Sa  $t/s = 4$  i  $k_1 = k_2 = 45^\circ$  je npr.  $A' = 6\%$  od  $A$ .

Za nož sa zaobljenjem  $r$  visina je brazda

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{s^2}{4}} \quad \text{i} \quad h_{\max} = r \quad \text{za} \quad r = \frac{s}{2}.$$

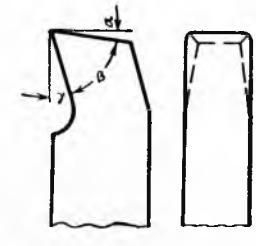
Površina neskinutog ostatka u tom slučaju može se odrediti iz jednadžbe:

$$A' = sr - \frac{s}{2} \sqrt{r^2 - \frac{s^2}{4}} - r^2 \arcsin \frac{s}{2r}.$$

Za uobičajene uvjete rada pri gruboj obradi ( $t/s \geq 4$ ) iznosi površina ostatka samo nekoliko postotaka od teorijske površine skidanog sloja te se može zanemariti pri promatranju sila na alatu. Zaobljivanje vrha noža naglo smanjuje količinu neskinutog ostatka i dubinu  $h$  i povisuje radnu dužinu oštice, što je korisno. Jače zaobljenje mijenja osim toga nešto i veličinu i smjer sile rezanja.

**Tokarski noževi za finu obradu.** Za postizavanje tačnih dimenzija i glatke površine služe noževi za finu obradu. Rade s relativno sitnim presjekom strugotine, malom dubinom i sitnim posmakom. Ovi noževi (sl. 32) imaju široki dio oštice u smjeru posmaka nekoliko puta dulji od posmaka, ili jako zaobljen vrh noža. Oštica se postavlja uvijek na visinu centra. Dovoljno dugo trajanje oštice u radu je jedan od glavnih zahtjeva kod ovih noževa. U tu svrhu odabiraju se i nešto manji prednji kutovi. Zbog sitnog presjeka skidane strugotine može se raditi s povećanim brzinama rezanja, često uz umjetno hlađenje (izuzevši lijevano željezo), što povoljno djeluje na kvalitet obrade.

Materijali za ove vrste noževa su alatni čelik i sinterovani tvrdi metali; ovi posljednji, uz dovoljno velike brzine rezanja što ih oni dopuštaju, daju obrađene površine visokog sjaja.



Sl. 32. Nož za finu obradu

**Sile na tokarskom nožu.** Sila što djeluje na nož prilikom obrade može se rastaviti u tri komponente: jednu — najveću ili glavnu — vertikalnu i dvije horizontalne (sl. 33). Vertikalna komponenta  $F$  često je nekoliko puta veća od horizontalnih komponenata  $H_1$  i  $H_2$ . Razlike su manje jedino kad je presjek strugotine sasvim sitan. Horizontalna komponenta  $H_1$  djeluje nasuprot smjeru posmaka noža, a komponenta  $H_2$  djeluje u smjeru drška noža. Pri određivanju potrebne snage i dimenzioniranju drška noža dovoljno je uzeti u obzir samo glavnu vertikalnu komponentu  $F$ . Sila  $F$  na nož raste s presjekom skidane strugotine i sa čvrstoćom obradivog materijala, kako pokazuju rezultati mjerjenja na sl. 34. Osim toga, sila rezanja zavisi općenito nešto i o obliku samoga presjeka, odnosno o obliku glavne oštice alata.

Sila  $F$  općenito nije statička veličina koja mirno djeluje nego se i pri obradi materijala koji inače daju kontinuiranu strugotinu mijenja u toku samog procesa nastajanja i oblikovanja skidane strugotine, kolebajući unutar širih ili užih graničnih vrijednosti, u zavisnosti o veličini presjeka strugotine. Ova kolebanja sile rezanja izrazitija su i mogu se registrirati samo kad su brzine

## ALATI

rezanja sasvim male. Uz stvarno upotrebljavanje brzine rezanja ova se kolebanja očituju kao male i blage promjene oko neke srednje vrijednosti. Zaobljena glavna oštrica noža povoljno djeluje na izjednačivanje sile  $F$ , jer pritisak nije na svim mjestima oštice noža istodobno najveći, odnosno najmanji, nož je zbog toga jednoličnije opterećen pa su vibracije manje, kako je već i Taylor zapazio. Kako je već spomenuto, sila rezanja  $F$  ne zavisi samo o presjeku  $A$  nego i o obliku toga presjeka i o oštrini noža, odnosno o kutu klina noža ( $\beta$ ). Za ilustraciju navodi se nekoliko poznatih formula za određivanje sile  $F$ . Za noževe sa zaobljenom glavnom oštricom daje Taylor formulu  $F = 200 (t/s)^{14/16}$  za neki srednji čelik. Ovaj izraz prelazi u oblik:

$$F = 200 A^{0.965} \text{ za } t = s,$$

$$F_{\max} = 216 A^{0.965} \text{ za } t = 10s,$$

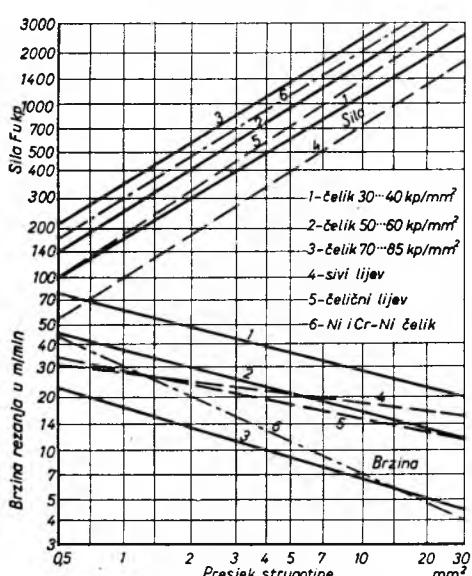
$$F_{\min} = 185 A^{0.965} \text{ za } t = 5s.$$

Odatle se razabira utjecaj omjera  $t/s$  na veličinu sile  $F$ . On ipak nije naročito velik, jer za široki dijapazon vrijednosti  $t/s$  daje varijacije sile  $F$  od samo 8%. Za mekše vrste lijevanog željeza daje Taylor analogni izraz:

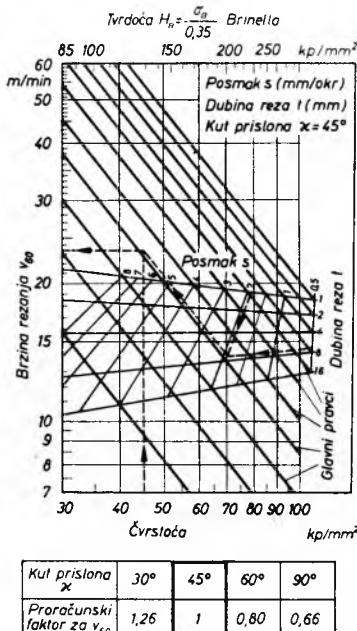
$$F = 88 t^{14/16} s^{3/4}, \text{ koji prelazi u oblik}$$

$$F = 88 A^{0.843} \text{ za } t = s.$$

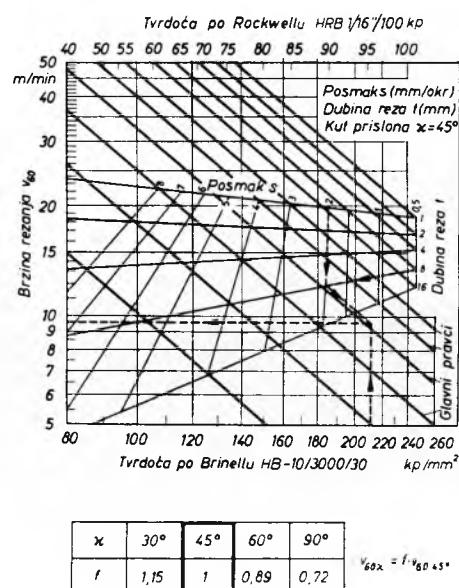
Utjecaj omjera  $t/s$  na veličinu sile  $F$  veći je pri obradi lijevanog željeza nego pri obradi čelika.



Sl. 34. Sila rezanja u zavisnosti o materijalu i presjeku strugotine



Sl. 35. Wallichs-Dabringhausov dijagram za čelik



Sl. 36. Wallichs-Dabringhausov dijagram za lijevanje željeza

Za noževe s ravnom oštricom daje Kronenberg, na temelju rezultata mjerjenja iz različitih izvora, ove izraze za sile rezanja:

$$F = 19,8 A^{0.862} \sqrt{HB} \cdot \sqrt{\frac{\beta}{50}} \text{ za mehanički čelik,}$$

$$F = 26 A^{0.862} \sqrt{HB} \cdot \sqrt{\frac{\beta}{50}} \text{ za srednje i kromnikalne čelike,}$$

$$F = 9,6 A^{0.865} \sqrt{HB} \cdot \sqrt{\frac{\beta}{50}} \text{ za lijevanje željeza,}$$

gdje je HB tvrdoća materijala po Brinellu a  $\beta$  kut klina. Prema njemačkim i ruskim pokusima postoji stanovita zavisnost sile rezanja i o brzini rezanja; prema nekim autorima ta je zavisnost izrazitija samo kad su brzine rezanja manje; kad su veće, zavisnost

se gubi. To izražavaju formulom  $F = \frac{c}{v^n}$ , gdje je  $n = 0,13 \dots 0,30$ .

Prema tomu bi povećanje brzine rezanja na dvostruku vrijednost smanjilo silu rezanja za 9...23%. Formule Taylora i Kronenberga ne uzimaju u obzir utjecaj brzine. Izrazi li se sila  $F$  u obliku  $F = k_s A$ , gdje je  $k_s$  specifični otpor rezanja u  $\text{kp}/\text{mm}^2$ , tada je  $k_s = F/A$ .

Iz gornjih jednadžbi za sile  $F$  izlazi da će za  $\beta = 50^\circ$  biti:

$$k_s = \frac{160}{\sqrt{\frac{7,5}{A}}} \text{ za mekane čelike čvrstoće } 37 \dots 40 \text{ kp/mm}^2, \text{ odnosno tvrdoće HB } \sim 110 \text{ kp/mm}^2,$$

$$k_s = \frac{260}{\sqrt{\frac{8}{A}}} \text{ za srednje ugljične i kromnikalne čelike čvrstoće } 60 \dots 70 \text{ kp/mm}^2,$$

$$k_s = \frac{73}{\sqrt{\frac{4}{A}}} \text{ za lijevano željezo tvrdoće HB } 140 \dots 180 \text{ kp/mm}^2.$$

Vidi se da  $k_s$  opada s porastom presjeka strugotine  $A$ .

**Učinak sile rezanja pri tokarenju.** Od triju komponenata sile rezanja vrše rad rezanja pri uzdužnom tokarenju samo vertikalna komponenta  $F$  i horizontalna komponenta  $H_1$ . Kako je sila  $H_1$  bar 2...3 puta manja od sile  $F$ , a brzina posmaka noža obično i preko stotinu puta manja od brzine rezanja  $v$ , zanemaruje se rad sile  $H_1$ , te je učinak sile rezanja:

$$P_{\text{rez}} = F v.$$

Ukupni učinak obuhvaća uz učinak sile rezanja i onaj učinak koji se troši na pokretanje samog stroja i svladavanje svih gubitaka u mehanizmu stroja. Na temelju mjerjenja uzima se da je ukupni učinak  $P_{\text{tot}}$  za prosječno 50% veći od učinka sile rezanja uz puno opterećenje stroja, tj.  $P_{\text{tot}} = 1,5 P_{\text{rez}}$ .

**Ekonomična brzina rezanja pri tokarenju.** S porastom presjeka  $A$  raste mehaničko i toplinsko opterećenje oštice te se stoga nužno skraćuje njezino trajanje  $T$ . Pokusi starijeg i novijeg datuma pokazuju da za ovu zavisnost kod tokarskih radova vrijedi relacija

$$\frac{C_v}{T} = \frac{C_v}{t^x s^y},$$

gdje je  $C_v$  konstanta zavisna o vrsti obradivog i alatnog materijala, a  $x$ ,  $y$  eksponenti manji od 1, zavisni o materijalu. U slučaju da je  $t/s = \text{konst.}$ , može se gornja relacija izraziti u obliku:

$$\frac{C_v}{T} = \frac{C_v}{\frac{n}{V} s^y},$$

# ALATI

gdje su vrijednosti za  $C$  i  $n$  dane (prema A. W. F) u idućoj tablici i to za alat od brzoreznog čelika i brzinu rezanja  $v_{se}$ .

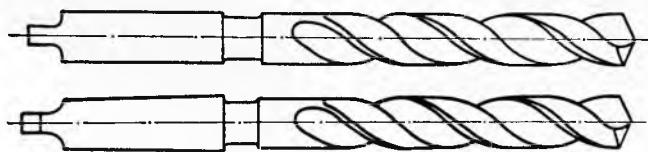
| Materijal  | $C_v$ | $n$  |
|--|-------|------|
| Čelik, $\sigma_m = 50 \dots 60$ kp/mm <sup>2</sup> | 35    | 2,44 |
| Čelik, $\sigma_m = 60 \dots 80$ kp/mm <sup>2</sup> | 20    | 2,44 |
| Sivi lijev, mehani                                 | 42    | 3,6  |
| Sivi lijev, srednji                                | 26    | 3,6  |
| Čelik, kromnikalni                                 | 29    | 1,75 |

Za potrebe prakse daju Wallichs i Dabringhaus dijagrame na sl. 35 i 36, koji pregledno pokazuju zavisnost brzine  $v_{se}$  o čvrstoći, odnosno tvrdoći obradivog čelika i sivog lijeva i o dubini  $t$  i posmaku  $s$ , za nož od brzoreznog čelika i za tokarenje s kutom postave  $\alpha = 45^\circ$ . Za neki drugi kut  $\alpha$  treba očitane vrijednosti  $v_{se}$  pomnožiti s korekturnim faktorom, koji za  $\alpha = 30^\circ$  iznosi 1,15...1,26, za  $\alpha = 60^\circ$ , 0,8...0,89.

Dijagram na sl. 34 pokazuje također zavisnost brzine  $v_{se}$  o presjeku strugotine za nekoliko vrsta materijala.

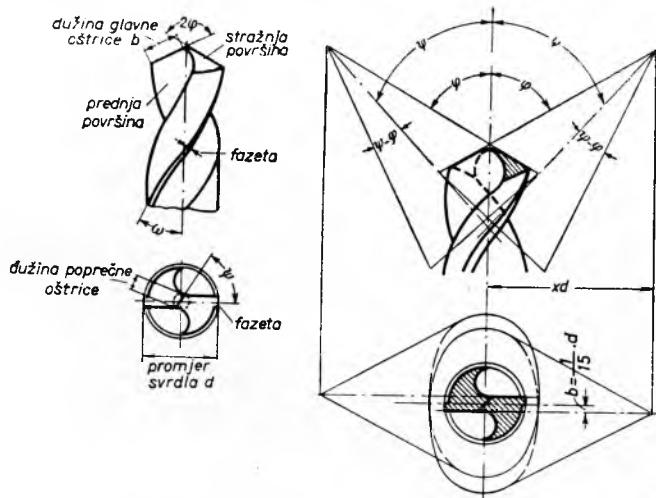
## Svrdla

Najvažniji tip svrdla u obradi metalnih materijala niza nemetalnih jest *spiralno svrđlo* (sl. 37) s koničnim radnim vrhom i utorima za odvod strugotine u obliku zavojnice, jer ispunjava dva



Sl. 37. Spiralno svrđlo s cilindričnim (gore) i koničnim drškom (dolje)

važna preduvjeta: promjer svrdla se ne mijenja kad se ono prebrušuje i postiže se automatski odvod strugotine iz bušotine. Sl. 38 pokazuje karakteristične pojedinosti svrdla. Pogled na vrh svrdla pokazuje dvije glavne rezače oštice i jednu tzv. poprečnu oštice. Smjer poprečne oštice zatvara sa smjerom glavnih oštice kut od  $45 \dots 55^\circ$ . Sam vrh svrdla sastavljen je od dviju zakrivljenih



Sl. 38. Karakteristični detalji spiralnog svrđla

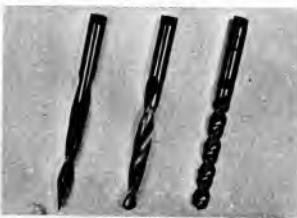
površina koje su dijelovi plašteva dvaju konusa čije osi zatvaraju u vertikalnoj projekciji kut od  $90^\circ$  (sl. 38 desno). U horizontalnoj projekciji vrhovi ovih konusa pomaknuti su izvan ravnine simetrije za  $\frac{1}{16}$  promjera svrdla. Sjedište tih dviju površina čini poprečnu oštice. Izbočeni rubovi utora, koji počinju na obodu oštice, izvedeni su u obliku uskih zavojnih površina, tzv. fazeta, koje su izbrusene na vanjski promjer svrdla i služe kao vodilice svrdla u bušenoj rupi. Držak manjih svrdla i svrdla za ručno bušenje je cilindričan, a inače je koničan. Da se oslabi trenje i sprječi zaribavanje, smanjuje se promjer svrdla u smjeru drške, i to do 0,1 mm na 100 mm dužine. Iz razloga čvrstoće raste debljina jezgre prema dršku, čime se i poprečna oštice povećava.

Vršni kut svrdla zavisi o vrsti bušenog materijala, a nagib zavojnice utora prema osi svrdla zavisi, osim toga, i o promjeru svrdla. Tablica 1 pokazuje vrijednosti za vršne kutove i nagib

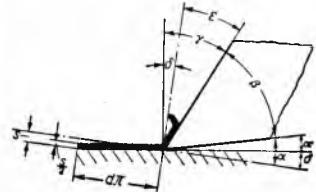
Tablica 1

| Bušeni materijal                          | Vršni kut | Nagib zavojnice |
|---|-----------|-----------------|
| Čelični materijali i sivi lijev           | 118°      | 30°             |
| Aluminij i aluminijске legure             | 140°      | 30...45°        |
| Magnezijeve legure i plitke rupe          | 100°      | 10...16°        |
| Isto, ali za duboke rupe                  | 120°      | 10...16°        |
| Mjed za vijke                             | 130°      | 10...25°        |
| Bakar i tombak                            | 120...140 | 30...45°        |
| Tvrda guma i prešani materijali           | 50        | 10...25°        |
| Miramor; škriljevac                       | 80...90°  | 10...25         |
| Porculan, staklo; šiljak od tvrdog metala | 100       | 10...25         |

utora. Svrdlo s oštrim kutom na sl. 39 lijevo je za tvrdu gumu; desno je svrdlo za aluminij, u sredini je normalno svrdlo za čelične materijale.



Sl. 39. Različita spiralna svrđla



Sl. 40. Kutovi oko radnog vrha svrđla

Veličina vršnog kuta utječe na duljinu glavnih oštice, na veličinu aksijalne komponente sile rezanja, na širinu skidane strugotine, na veličinu prednjeg kuta  $\gamma$  i stražnjeg kuta  $\alpha$ . Prednji kut  $\gamma$  (sl. 40), koji određuje oštrinu alata, određen je jednadžbom

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{d \pi}{h \sin \varphi},$$

gdje je  $d$  promjer svrdla,  $h$  korak zavojnice,  $2\varphi$  vršni kut. Prema centru svrdla opada dakle kut  $\gamma$ , a s opadanjem vršnog kuta postaje  $\gamma$  sve veći, dakle svrdlo djeluje kao oštice. Nagib zavojnice  $\varphi$  određen je jednadžbom  $\operatorname{tg} \varphi = d \pi / h$ , pa je najveći na periferiji svrdla, a znatno manji uz poprečnu oštice. Stanoviti manji utjecaj na kuteve  $\gamma$  i  $\alpha$  ima posmak svrdla  $s$ , koji je za sve tačke oštice isti. Što je veći posmak svrdla  $s$ , izražen u mm za 1 okret, to je veći i kut  $\gamma$ , dok stražnji kut  $\alpha$  opada. Taj je utjecaj posmaka na kuteve  $\gamma$  i  $\alpha$  mnogo jači u blizini centra nego na periferiji.

Uzduž glavnih oštice, polazeci od periferije prema sredini, mijenjaju se dakle radni uvjeti, brzina rezanja i oština alata, koje su na periferiji svrdla najveće. To utječe i na način trošenja glavnih oštice i općenito na trajanje alata, a u stanovitoj mjeri i na oblikovanje skidane strugotine.

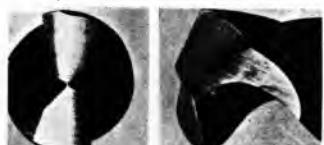
Presjek strugotine  $A$  koji skida jednu glavnu oštice određen je jednadžbama

$$A = b a = \frac{d}{2 \sin \varphi} \cdot \frac{s}{2} \sin \varphi = \frac{ds}{4},$$

gdje je  $b$  dužina oštice  $= d/2 \sin \varphi$ , a debljina strugotine okomito na oštice  $= s/2 \sin \varphi$ .



Sl. 41. Vrh svrđla sa širokom i s丈om poprečnom ošticom



Sl. 42. Naročito prebrušivanje oko poprečne oštice

Vrh svrdla s poprečnom oštricom predstavlja vrlo tup alat s negativnim prednjim kutom; takav alat ne može lijepo rezati, već gnjeći materijal ispod sebe. To izaziva velik otpor u obliku aksijalne sile kojom se materijal suprotstavlja prodiranju svrdla. Mjerenja pokazuju da ~40% od ukupne aksijalne sile otpada na samu poprečnu oštricu. Posebnim načinima prebrušivanja može se poprečna oštrica ili nešto skratiti ili učiniti reznim bridom stanovite sposobnosti rezanja, što primjetljivo snizuje aksijalnu silu. Na sl. 41 i 42 prikazani su oblici vrha svrdla prebrušenih u tu svrhu.

**Aksijalna sila i moment vrtnje na svrdlu.** Za dimenzioniranje stroja i alata mjerodavna je aksijalna sila kao rezultanta aksijalnih komponenata svih pojedinačnih sila na glavne oštice, na poprečnu oštricu, na fazete i dr. To je jedina sila koja se može direktno i jednostavno mjeriti. Veličina ove sile zavisi općenito o čvrstoći bušenog materijala, o promjeru svrdla, o presjeku skidane strugotine, o oštrini alata, o veličini vršnog kuta i nagiba zavojnica, o mazanju i rashladivanju. Pokusi sa spiralnim svrdlima pokazali su da za aksijalnu silu vrijedi izraz oblika:

$$F = C_F d^n s^m,$$

gdje su:  $F$  aksijalna sila,  $d$  promjer svrdla,  $s$  posmak svrdla,  $C_F$ ,  $n$  i  $m$  veličine zavisne o bušenom materijalu.

Novija istraživanja u SSSR daju ove izraze:

$$F = C_F d s^{0,7} \text{ za sve vrste čelika,}$$

$$F = C_F d s^{0,8} \text{ za sivo lijevano željezo.}$$

Za momente vrtnje daju istraživanja na istim svrdlima izraze:

$$M = C_M d^2 s^{0,8} \text{ za sve vrste čelika,}$$

$$M = C_M d^{1,9} s^{0,8} \text{ za sivo lijevano željezo.}$$

Vrijednosti za  $C_F$  i  $C_M$  prema ruskim podacima sabrane su za važnije materijale u idućoj tablici i vrijede za svrdla promjera od 10 do 60 mm.

| Materijal                       | $C_F$ | $C_M$ |
|---------------------------------|-------|-------|
| Nelegirani čelik                |       |       |
| $\sigma_m = 45 \text{ kp/mm}^2$ | 57    | 24    |
| $\sigma_m = 55 \text{ kp/mm}^2$ | 66    | 27,5  |
| $\sigma_m = 65 \text{ kp/mm}^2$ | 76    | 31    |
| $\sigma_m = 75 \text{ kp/mm}^2$ | 84    | 34,5  |
| Kromnikalni čelik               |       |       |
| $\sigma_m = 75 \text{ kp/mm}^2$ | 94    | 38    |
| $\sigma_m = 95 \text{ kp/mm}^2$ | 111   | 44,5  |
| Sivo lijevano željezo           |       |       |
| $HB = 170 \text{ kp/mm}^2$      | 58    | 21,5  |
| $HB = 210 \text{ kp/mm}^2$      | 67    | 25    |

Gornji izrazi za  $F$  i  $M$  vrijede za obična spiralna svrdla, za bušenje čeličnog materijala i za određeni omjer između dužine poprečne oštice i promjera svrdla. Da pokažu utjecaj ovog omjera, Boston i Oxford izrazili su aksijalnu silu formulom

$$F = C \left( \frac{d}{127} + \frac{l}{d} \right)^n s^m,$$

gdje je  $l$  dužina poprečne oštice.

Iz momenta  $M$  i broja okretaja svrdla u minuti  $n$  određuje se potrebna snaga bušenja

$$P = M n.$$

**Ekonomična brzina rezanja svrdla.** Kao ekonomična brzina rezanja uzima se  $v_{t=2000}$  kojom se može izbušiti u neprekidnom radu ukupna dužina rupa od 2000 mm do nastupa zatupjelosti svrdla. Pri pokušnom bušenju radi određivanja brzine  $v_{t=2000}$  buše se samo bušotine, a ne i provrti. Općenito ova brzina zavisi o bušenom materijalu, o promjeru, posmaku i materijalu svrdla, o relativnoj širini poprečne oštice, o hlađenju i mazanju, donekle i o vršnom kutu, a konačno i o dubini pojedine bušotine  $h$ , odnosno o omjeru  $h/d$ . Što je veći  $h/d$  to su lošiji uvjeti rezanja, zbog slabijeg rashladivanja i otežanog odvoda strugotine iz većih dubina, te je stoga trajanje svrdla kraće. Za svrdla od

brzoreznog čelika i za hlađenje pogodnim emulzijama daje Reznikov izraz za obodnu brzinu bušenja u čelike:

$$v = C \frac{d^{0,4}}{T^{0,2} s^{0,5}},$$

gdje je  $T$  trajanje svrdla u minutama,  $s$  posmak,  $d$  promjer svrdla. Za lijevano željezo i bušenje nasuho je

$$v = C \frac{d^{0,25}}{T^{0,13} s^{0,4}}.$$

$C$  zavisi o svojstvima bušenog materijala:

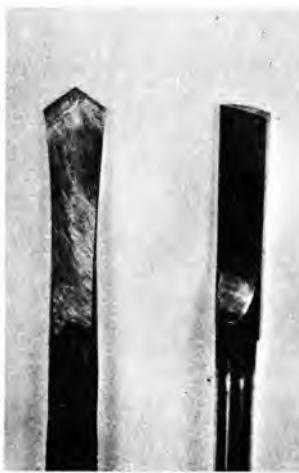
| Materijal                             | $C$  |
|---------------------------------------|------|
| Čelik $\sigma_m = 45 \text{ kp/mm}^2$ | 11,1 |
| $\sigma_m = 55 \text{ kp/mm}^2$       | 9,3  |
| $\sigma_m = 75 \text{ kp/mm}^2$       | 7,1  |
| Lijevano željezo                      |      |
| $HB = 170 \text{ kp/mm}^2$            | 14,4 |
| $HB = 210 \text{ kp/mm}^2$            | 10,5 |

Izrazi vrijede pod prepostavkom da je omjer  $h/d = 2,5$ , a za svrdla od 10 do 60 mm promjera. Iz gornjih se izraza vidi da trajanje svrdla naglo opada s porastom brzine rezanja i da brzina rezanja raste s promjerom svrdla.

**Odabiranje posmaka pri bušenju.** S porastom posmaka raste produktivnost i ekonomičnost rada, te je stoga cilj suvremene proizvodnje upotreba što većih posmaka. Pri tom ipak postoji neka granica koju ne valja prelaziti da ne bi došlo do velike aksijalne sile, odnosno velikih naprezanja u materijalu svrdla i stroja i do prebrzog trošenja oštice i zatupljenja. Tablica 2 pokazuje rađi orientacije veličine posmaka u zavisnosti o pro-

Tablica 2

| Brušeni materijal                        | Brzina rezanja m/min | Rashladno sredstvo | Promjer svrdla u mm |      |      |      |
|--|----------------------|--------------------|---------------------|------|------|------|
|  |                      |                    | 5                   | 8    | 16   | 40   |
| Posmak s mm/okret                        |                      |                    |                     |      |      |      |
| Čelik strojograđevni:                    |                      |                    |                     |      |      |      |
| $\sigma_m \leq 50 \text{ kp/mm}^2$       | 25...40              | sapunica           | 0,11                | 0,16 | 0,26 | 0,40 |
| $\sigma_m = 50\cdots70 \text{ kp/mm}^2$  | 25...32              | "                  | 0,10                | 0,14 | 0,22 | 0,40 |
| $\sigma_m > 70 \text{ kp/mm}^2$          | 20...28              | "                  | 0,07                | 0,12 | 0,20 | 0,32 |
| Čelici legirani:                         |                      |                    |                     |      |      |      |
| $\sigma_m = 70\cdots90 \text{ kp/mm}^2$  | 12...20              |                    | 0,06                | 0,10 | 0,18 | 0,28 |
| $\sigma_m = 90\cdots110 \text{ kp/mm}^2$ | 8...14               | "                  | 0,04                | 0,08 | 0,14 | 0,23 |
| Čelik nerđajući 18/8                     | 7...12               | "                  | 0,06                | 0,10 | 0,18 | 0,28 |
| Sivi lijev:                              |                      |                    |                     |      |      |      |
| $\sigma_m < 18 \text{ kp/mm}^2$          | 20...35              | suho ili sapunica  | 0,16                | 0,25 | 0,35 | 0,50 |
| $\sigma_m > 18 \text{ kp/mm}^2$          | 15...25              | isto ili petrolej  | 0,09                | 0,14 | 0,25 | 0,36 |



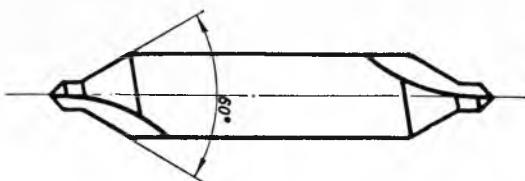
Sl. 43. Plosnato svrdlo (lijevo) i prebrusni svrdlo za duboke rupe (desno)

mjeru svrdla i bušenom materijalu a za svrdla od brzoreznog čelika. U tablici su navedena također i rashladna sredstva i brzine rezanja.

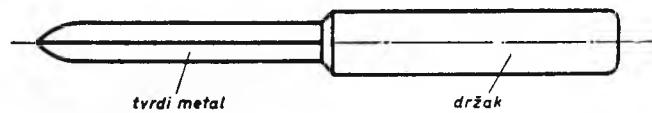
**Ostale izvedbe svrdla.** Plosnato svrdlo (sl. 43 lijevo) služi u obradi metala samo izuzetno, i to za vrlo sitne rupe promjera ispod 1 mm ili za vrlo velike rupe za koje nema raspoloživih spiralnih svrdala. Vršni kut iznosi 116...118°, za tvrde i krte materijale doseže do 130°, za mekane samo 90°. Brušenje smanjuje promjer svrdla.

Svrdlo za duboke rupe (sl. 43 desno) prebrusni se prema dršku za nekoliko stotinki mm tanje.

Svrdla za centriranje (sl. 44) služe za ubušivanje koničnih rupa (gnijezda) za centriranje. Prave se za kutove konusa od  $60^\circ$  i  $90^\circ$ .



Sl. 44. Svrđlo za centriranje



Sl. 45. Trobridno svrđlo od tvrdog metala za bušenje stakla i porculana



Sl. 46. Svrđla za bušenje drveta

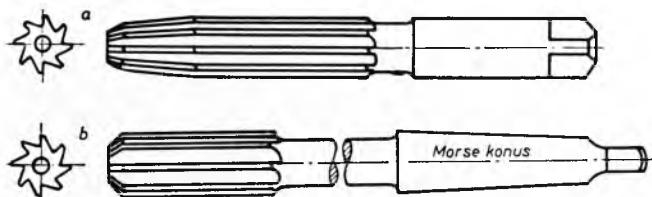
Trobridno svrđlo od tvrdog metala (sl. 45) služi za bušenje stakla i porculana.

Svrdla za bušenje u drvo pokazuju sl. 46, lijevo jednobrađno spiralno svrđlo, u sredini svrđlo s koničnim vršnim valjkom za centriranje i jednim zupcem za prerezivanje vlačanaca, desno — isto, ali sa dva zupca.

#### Razvrtala

Razvrtala služe za dotjerivanje glatkoće površina i postizavanje većih tačnosti izbušenih rupa. Radi se uvijek o skidanju relativno plitkih slojeva, možda samo od nekoliko stotinki milimetara pa najviše do nekoliko desetinki milimetra. Brzine rezanja su također relativno malene te se kreću i za brzoreznu razvrtalu u granicama od 4 do 10 m/min za rezanje u čeličnim materijalima.

Svako razvrtalo razvrtava samo svojim prednjim koničnim dijelom zubaca (sl. 47), ostali cilindrični dio služi više kao vodilica i za zagladivanje rupa. Dužina prednjeg koničnog dijela zavisi



Sl. 47. Razvrtalo. a ručno razvrtalo s cilindričnim drškom, b mašinsko razvrtalo s koničnim drškom

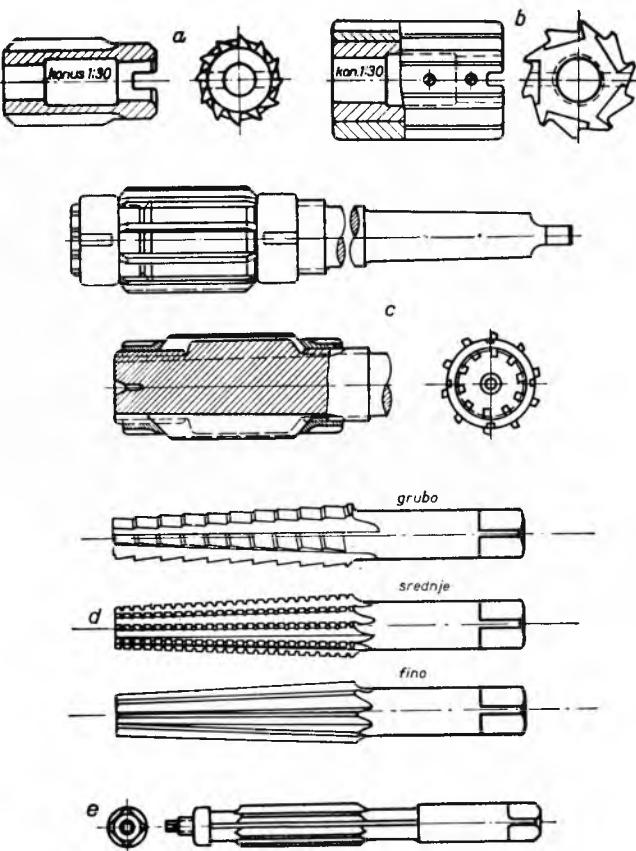
o vrsti obradivog materijala te je za obradu u čeliku, i općenito u materijalima koji daju kontinuiranu strugotinu, kraća, da se izbjegne stvaranje preširoke strugotine, koja bi suviše opteretila alat i lako uzrokovala lom. Veća dužina koničnog dijela inače osigurava bolje vođenje razvrtala te ono daje ljepešće i čišće obradenu površinu. Za ručna razvrtala uzima se dulji konični dio, i do jedne trećine od ukupne dužine zubaca. Za slijepu bušotinu koje treba razvrtati sve do dna mora biti konični prednji dio posve kratak. Vrlo je važno da svi zupci režu jednakom, što se može postići jedino mašinskim oštrenjem alata. Nejednakost rezanja i opterećivanje zubaca često su uzrok loma, a rupe ispadaju neokrugle i nečisto obrađene. Iza radnog koničnog dijela zubaca slijedi cilindrički dio, koji je samo na jednom dijelu dužine zaista cilindričan, jer se na stražnjem dijelu suzuje pod blagim nagibom ispod  $1^\circ$ .

Broj zubaca je obično paran, što olakšava mjerjenje promjera. Zubni razmak rado se izvodi nejednak jer to daje mirniji i čišći

rad. Zupci mogu biti ravni, kosi ili u obliku zavojnica. Lakša izrada i mnogo lakše mjerjenje važna je prednost ravnih zubaca. Za razvrtanje rupa s utorima povoljniji su kosi zupci jer nema opasnosti da se u utoru ukliješte.

Prema JUS zupci se izrađuju kao desnorezni a zavojnice kao lijevovojne. Lijevovojni zupci imaju prema ravnim zupcima i nedostatku: veće aksijalne sile, kidanje strugotine manje je povoljno, a i odvod strugotine je nešto otežan. Broj zubaca iznosi 6...10 za male i srednje promjere razvrtala, za veće promjere penje se i do 18. Što su sitniji zupci to se postiže čišća površina rupe. Prednji kut zubaca obično je  $0^\circ$ , a stražnji 4...8°. Sirina fazete iznosi 0,2...0,3 mm.

Razlikujemo razvrtala s krutim i s udesivim zupcima. Ovi posljednji daju se nakon istrošenja ponovo udesiti na prvobitni promjer. Nakon svakog razmicanja udesivih zubaca potrebno je razvrtalo kružno prebrusiti. Veća razvrtala za mašinski rad imaju koničan držak, ručna i manja mašinska razvrtala imaju cilindričan držak.



Sl. 48. Razvrtala. a mašinsko nasadno razvrtalo, b mašinsko nasadno razvrtalo s umetnutim zupcima, c razvrtalo s udesivim zupcima, d trodijelni slog razvrtala za grubo, srednje i konačno fino razvrtavanje koničnih rupa, e udesivo ručno razvrtalo

Za određivanje aksijalnih sile i momenata vrtnje na razvrtalu za obradu čeličnih materijala mogu poslužiti prema Schallbrochu ove formule:

$$\text{aksijalna sila } F = 8 d^{0,7} s^{0,72} t,$$

$$\text{moment vrtnje } M = 88 d^{1,18} s^{0,05} t^{0,64},$$

gdje znači  $d$  promjer razvrtala u mm,  $s$  posmak u mm/okret,  $t$  dubina rezanja u mm,  $F$  sila u kp,  $M$  moment vrtnje u kpm.

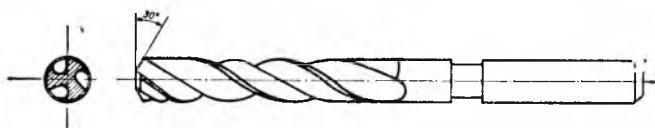
Slika 48 pokazuje nekoliko tipičnih izvedbi razvrtala.

#### Upuštala

Upuštala služe za proširenje postojećih provrta, za obradu udubljenih ili izbočenih ležišta na glavinama kotača, zupčanika, remenica i kućišta, za obradu sjedišta za upuštene matice i glavice zakovica, za obradu ventiltih sjedišta, za skidanje oruba izbu-

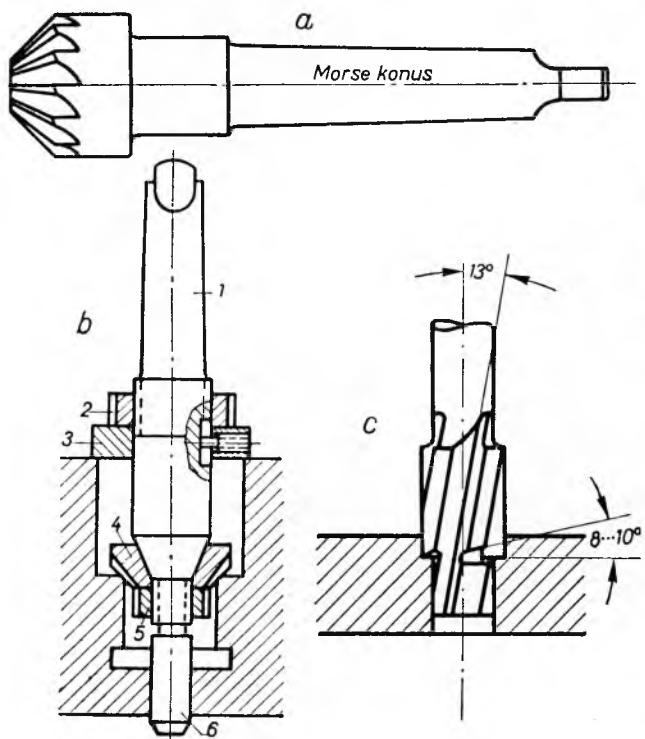
šenih ili odlitih rupa i sl. S obzirom na ovu raznolikost upotrebe postoji i raznolikost u obliku alata. Konstrukcija alata često predviđa posebno vođenje za postizavanje tačne obrade.

Za proširenje rupa služi cilindrični oblik upuštala (sl. 49) sa spiralnim utorima. Prednji krajevi zubaca zakošeni su pod  $30^\circ$  kako pokazuje slika. Od spiralnog svrdla razlikuje se po većem



Sl. 49. Spiralno upuštao cilindrična oblika

broju utora i vodećih fazeta, što osigurava vođenje bolje i tačniju obradu. Manji alati prave se sa tri, a veći sa četiri zupca. Nagib zavojnice prema osi iznosi općenito  $20\text{--}30^\circ$ , nagib zavojnice većih nasadnih upuštala samo  $12\text{--}15^\circ$ . Zupci se redovito izvode kao desnorezni, a zavojnice kao lijevovojne. Prednji kut zubaca  $\gamma$  je za obradu metalnih materijala  $0^\circ$ , a stražnji kut  $\alpha = 5\text{--}8^\circ$ . Brzine rezanja spiralnih upuštala odabiraju se redovito niže nego brzine spiralnih svrdala, da se očuva alat od prečesta oštrenja.

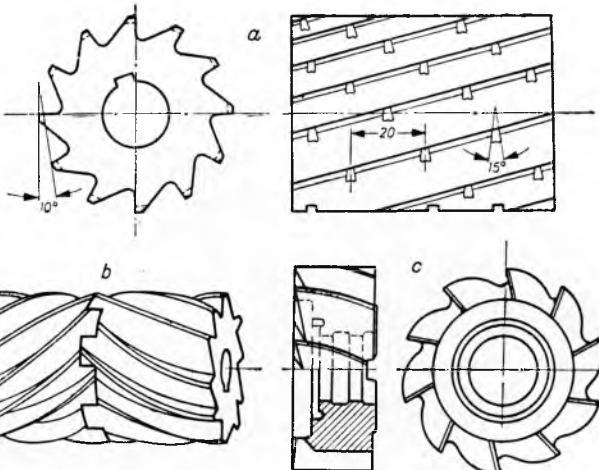


Sl. 50. Upuštala. a upuštao konična oblika za skidanje oruba; b nasadno konično upuštao za obradu ventilnih sjedišta: 1 strug, 2 matica za podešavanje graničnika, 3 graničnik, 4 noževi upuštala, 5 matica za podešavanje noževa, 6 vratilo; c vratno upuštao

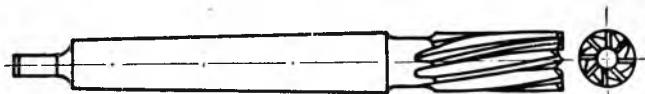
Za skidanje oruba i oblikovanje koničnih sjedišta služi konično upuštao prema sl. 50 a, s vršnim kutom od  $60\text{--}120^\circ$ . Kut od  $60^\circ$  uzima se za skidanje oruba, kut od  $75^\circ$  za poloukrugle zakovične glavice i poluupeštene zakovice, a  $90^\circ$  i  $120^\circ$  za upuštanje glavica vijaka i zakovica. Za obradu ventilnih sjedišta služi alat prema 50 b, s prednjim cilindričnim dijelom 6 kao vodilicom i s graničnikom 3. Za upuštanje glavica vijaka i slično često služi oblik vratnog upuštala prema sl. 50 c. Za veće promjere izrađuju se mašinska nasadna upuštala koja se od nasadnih razvrtala razlikuju po tome što imaju manji broj grubih zubaca.

#### Glodala

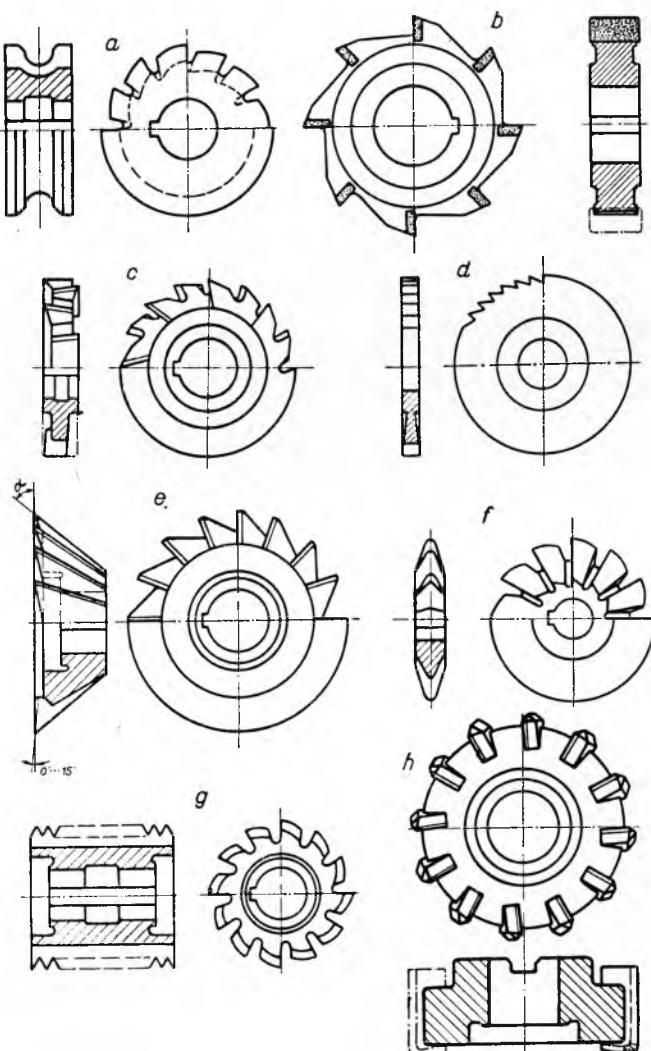
Glodala služe za obradu ravnih i po volji oblikovanih površina, za izradu različitih utora na osovinama i reznom alatu, za izradu zubaca na glodalima i zupčanicima, za rezanje navoja, za urez-



Sl. 51. Valjkasta glodala. a valjkasto glodalo s kosim zupcima i utorima za lomljenje strugotine, b dvodijelno valjkasto glodalo s kosim zupcima, c valjkasto čeno glodalo



Sl. 52. Vretenasto čeno glodalo



Sl. 53. Glodala. a polukružno udubljeno glodalo, b pločasto glodalo s umetnutim zupcima od tvrdog metal, c pločasto glodalo s ukrištenim zupcima, d pilasto glodalo, e ugaočno glodalo, f profilno glodalo sa zatokarenim zupcima za izradu utora, g valjkasto glodalo za rezanje navoja, h čeona glodačka glava s usadenim noževima

vanje, prerezivanje i dr. S obzirom na mnogostranu upotrebu, i oblik je glodala vrlo različit. Po osnovnom obliku razlikuju se ovi tipovi glodala:

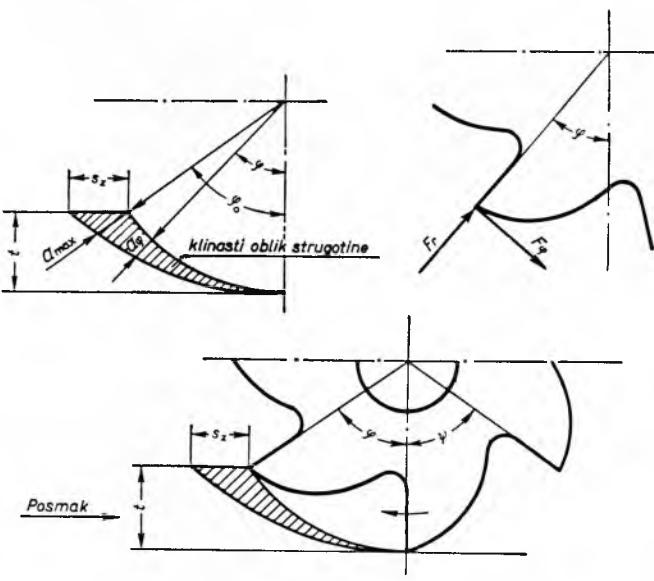
Valjkasto glodalo (sl. 51 a) za obradu ravnih površina, izvodi se s ravnim i kosim zupcima. Dvodijelno valjkasto glodalo (sl. 51 b) sa suprotno ukošenim zupcima radi poništenja aksijalne sile. Valjkasto čeonog glodalo (sl. 51 c), čiji zupci imaju oštricu ne samo po obodu nego i na bočnoj površini. Vretenasto glodalo (sl. 52), koje se razlikuje od valjkastoga čeonog glodala relativno većom dužinom u odnosu na promjer. Zupci mogu biti ravni i kosi, a držak cilindričan ili koničan. Polukružno udubljeno glodalo (sl. 53 a) za obradu polukružno profiliranih površina. Pločasto glodalo s umetnutim zupcima (sl. 53 b), kojemu je širina relativno mala prema promjeru, s oštricama bilo samo po obodu ili i po objema bočnim površinama. Pločasto glodalo s ukrštenim zupcima (sl. 53 c), s radnim oštricama na obodu i na oba čela. Pilasto glodalo (sl. 53 d), u obliku tanke ploče s relativno velikim brojem sitnih zubaca, služi za prerezivanje i urezivanje. Ugaono glodalo (sl. 53 e) za izradu utora i zubaca na alatima, pravi se za kutove  $\alpha$  od 50 do 85°. Profilno glodalo sa zatokarenim zupcima (sl. 53 f), čest tip glodala za izradu profiliranih spiralnih utora (žlebova). Valjkasto glodalo za rezanje navoja (sl. 53 g), sa zatokarenim ili s brušenim zupcima. Radi se kao desnorezno i kao lijevorezno. Čeone glodačke glave s usadenim noževima (sl. 53 h) za promjere do 250 mm. Tijelo alata je čelik čvrstoće 70 kp/mm<sup>2</sup> a noževi su od brzoreznog čelika.

Premda način izrade zubaca razlikuju se glodala s glodanim zupcima i glodala sa zatokarenim zupcima. Modulna glodala za izradu zupčanika i rezanje navoja imaju zupce izrađene zatokrivanjem. Profilna pločasta glodala za izradu spiralnih utora različitih alata, npr. svrdala, izrađuju se za zatokarenim i s glodanim zupcima.

**Proces skidanja strugotine pri gladanju.** Sl. 54 pokazuje relativni položaj nekoga pločastog ili valjkastog glodala prema predmetu. Skidana strugotina ima, kako se vidi, oblik savinuta klina čija se radikalna debljina mijenja od nule u početku zahvata pa do nekog maksimuma na izlasku zupca iz rada. Znaće li:  $t$  dubinu glodanja,  $s$  posmak predmeta za 1 okret glodala,  $s_z$  posmak po zupcu =  $s/z$ ,  $z$  broj zubaca na glodalu,  $d$  promjer glodala,  $\varphi$  središnji kut koji pripada luku zahvata  $l$ ,  $\psi$  središnji kut koji odgovara zubnom razmaku:  $\varphi = 2\pi/z$ , tada je radikalno mjerena debljina strugotine za kut  $\varphi$ :  $a_\varphi = s_z \sin \varphi$ , a najveća debljina  $a_{\max} = s_z \sin \varphi_0$ . Momentani je presjek skidane strugotine  $A_\varphi = a_\varphi b$ , ako je  $b$  širina glodane površine.

Broj zubaca koji se istodobno nalaze u rezanju jest

$$z_{\text{rez}} = \frac{\varphi_0}{\psi} \approx \frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{d}}.$$



Sl. 54. Protusmjerni način gladanja

što je dakle veći broj zubaca  $z$  i veća dubina glodanja  $t$  to veći će biti i broj zubaca istodobno u radu, a time i jednoličnije opterećenje stroja i alata. Ali velik broj sitnih zubaca previše usitnjuje strugotinu, što nužno uzrokuje i veći potrošak energije.

Sila koja djeluje na glodalo u slučaju ravnih zubaca svršišodno se rastavlja u dvije komponente: tangencijalnu silu  $F_\varphi$  i radialnu silu  $F_r$ . Tangencijalna sila  $F_\varphi$  mijenja se uzduž luka zahvata zajedno s presjekom skidane strugotine  $A_\varphi$ , odnosno s debljinom  $a_\varphi$ :

$$F_\varphi = k A_\varphi = k b a_\varphi = k b s_z \sin \varphi,$$

gdje je  $k$  specifični otpor rezanja u kp/mm<sup>2</sup>. On nije konstantna veličina nego opada s porastom presjeka  $A$ , kao i pri tokarenju, tako da vrijedi:

$$k = K/a_\varphi^x,$$

gdje  $K$  zavisi o vrsti obradivog materijala, oštrini zupca, mazivu i dr. Pokusima je nađeno da je  $x = 0,25 \dots 0,30$  za čelike,  $0,33$  za lijevano željezo. Prema tome se  $F_\varphi$  može izraziti u obliku:

$$F_\varphi = K b s_z^{1-x} \sin^{1-x} \varphi.$$

U času izlaska zupca je

$$F_{\varphi \max} = K b s_z^{1-x} \sin^{1-x} \varphi_0.$$

Radikalna sila  $F_r$  u smjeru okomito na  $F_\varphi$  može se jednostavno izraziti, slično kao pri tokarenju horizontalna sila u smjeru drška tokarskog noža, u obliku:

$$F_r = c F_\varphi, \text{ gdje je } c = 0,2 \dots 0,3.$$

Na glodalici se na jednostavan način mogu mjeriti samo horizontalne i vertikalne komponente sila rezanja; stoga je potrebno dati izraze za horizontalne i vertikalne komponente sila  $F_\varphi$  i  $F_r$ . Horizontalne su komponente:

$$H_\varphi = F_\varphi \cos \varphi,$$

$$H_r = F_r \sin \varphi,$$

a vertikalne komponente:

$$V_\varphi = F_\varphi \sin \varphi,$$

$$V_r = F_r \cos \varphi.$$

Postavi li se  $H = H_\varphi + H_r$  i  $V = V_\varphi + V_r$ , tada je rezultanta sile na zubac

$$R = \sqrt{H^2 + V^2}.$$

Nalazi li se u radu istodobno više zubaca, tada je

$$F_{\varphi 1} = K b s_z^{1-x} \sin^{1-x} \varphi_1,$$

$$F_{\varphi 2} = K b s_z^{1-x} \sin^{1-x} \varphi_2,$$

$$F_{\varphi 3} = K b s_z^{1-x} \sin^{1-x} \varphi_3 \text{ itd.},$$

gdje je  $\varphi_2 = \varphi_1 + \psi$ ,  $\varphi_3 = \varphi_1 + 2\psi$ .

Za radikalne sile će biti:  $F_{r1} = c F_{\varphi 1}$ ,

$$F_{r2} = c F_{\varphi 2},$$

$$F_{r3} = c F_{\varphi 3} \text{ itd.}$$

Sve ove sile daju se opet rastaviti u horizontalne i u vertikalne komponente:

$$H_{\varphi 1} = F_{\varphi 1} \cos \varphi_1,$$

$$H_{\varphi 2} = F_{\varphi 2} \cos \varphi_2 = F_{\varphi 2} \cos(\varphi_1 + \psi),$$

$$H_{r1} = F_{r1} \sin \varphi_1,$$

$$H_{r2} = F_{r2} \sin(\varphi_1 + \psi) \text{ itd.}$$

$$V_{\varphi 1} = F_{\varphi 1} \sin \varphi_1,$$

$$V_{\varphi 2} = F_{\varphi 2} \sin(\varphi_1 + \psi) \text{ itd.}$$

Odatle se konačno nalazi rezultirajuća sila  $R$  na glodalo.

Za moment vrtnje  $M$  mjerodavna je samo tangencijalna sila  $F_\varphi$ . Nalazi li se u radu samo jedan zubac, bit će

$$M = \frac{1}{2} d F_\varphi = \frac{1}{2} d K b s_z^{1-x} \sin^{1-x} \varphi.$$

Radi li istodobno više zubaca, bit će:

$$M = \frac{1}{2} d K b s_z^{1-x} \sum_{i=1}^n \sin^{1-x} \varphi_i.$$

Snaga rezanja izračunava se iz jednadžbe:

$$P_{rez} = M \cdot n.$$

Nalazi li se u radu samo jedan zubac, bit će u slučaju obrade čelika ( $x = 0,25$ ) najveća potrebna snaga u času izlaska zupca  $\varphi = \varphi_0$ :

$$P_{rez\ max} = \frac{1}{2} K b s_z^{0,75} d n \sin^{0,75} \varphi_0.$$

Prosječna snaga rezanja je, dakako, manja, za nju se može teorijski izvesti izraz s pomoću kojeg se nalazi da će prosječna snaga rezanja biti često samo 60% od najveće snage  $P_{rez}$ .

Nekoliko vrijednosti za  $K$  i  $x$  pokazuje ova tablica:

| Materijal                                | $K$      | $x$  |
|--|----------|------|
| Nelegirani čelik:                        |          |      |
| $\sigma_m = 40 \text{ kp/mm}^2$          | 116      | 0,37 |
| $\sigma_m = 60 \dots 70 \text{ kp/mm}^2$ | 140..150 | 0,28 |
| $\sigma_m = 80 \text{ kp/mm}^2$          | 160      | 0,28 |
| Kromnikalni čelik:                       |          |      |
| $\sigma_m = 90 \text{ kp/mm}^2$          | 175      | 0,26 |
| Sivo lijevano željezo:                   |          |      |
| $HB = 140 \dots 150 \text{ kp/mm}^2$     | 60       | 0,35 |
| $HB = 180 \dots 200 \text{ kp/mm}^2$     | 80       | 0,33 |

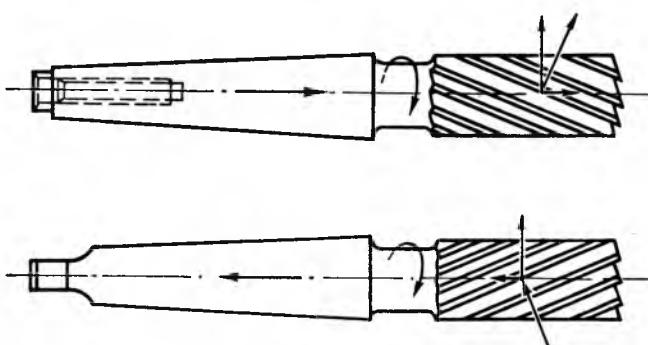
**Glodala s kosim zupcima.** Nejednako opterećenje glodala, koje se mijenja počevši od nule na početku zahvata zupca pa do neke najveće vrijednosti u času izlaska zupca, loše utječe na stroj, alat i tačnost obrade. Jednoličnije opterećenje može se postići ako se zupci izvedu koso u obliku dijela zavojnice urezane u cilindrično tijelo glodala, jer će se tada u radu nalaziti uvek dva ili više zubača. Jednolikost opterećenja koja se time može postići zavisi općenito o nagibu zavojnice zupca prema osi glodala, o širini obradivane površine (tj. o visini glodala) i o dubini glodanja. Što je veći spomenuti nagib zavojnice i što je veća širina obradivane površine to će veći broj zubača biti istodobno u radu i to će bolja biti i jednolikost opterećenja. Sile koje djeluju u nekom momentu na zupce rastavljaju se u ovom slučaju svršishodno u tri komponente: u tangencijalnu silu  $F_t$ , radikalnu silu  $F_r$  i aksijalnu silu  $F_z$  u smjeru osi glodala. Nagib zavojnice ima utjecaja na veličinu pojedinih komponenata, na visinu specifičnog opterećenja radne oštice zupca, a time i na njezinu trajanje u radu. Tangencijalna komponenta sile rezanja određena je prema izvodu Salamona izrazom:

$$F_t = \frac{2^{1-x}}{2-x} K s_z^{1-x} \frac{d}{\operatorname{tg} \beta} \left( \sin^{2-x} \frac{\varphi_2}{2} - \sin^{2-x} \frac{\varphi_1}{2} \right)$$

a aksijalna izrazom

$$F_z = \frac{2^{1-x}}{2-x} K s_z^{1-x} d \left( \sin^{2-x} \frac{\varphi_2}{2} - \sin^{2-x} \frac{\varphi_1}{2} \right),$$

gdje znače:  $\beta$  nagib zavojnice zupca prema osi glodala,  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  središnje kutove koji pripadaju prednjem i stražnjem kraju zupca u zahvatu.



Sl. 55. Smjer aksijalne sile na desnovojnom (dolje) i lijevovojnom (gore) vretenastom glodalu

Nagib i smjer zavojnice imaju utjecaja i na smjer i veličinu aksijalne sile, a također na veličinu prednjeg kuta, odnosno oštiru čeonih zubača. Tako će, npr., na neko vretenasto desnavezno i lijevovojno glodalo aksijalna sila djelovati tako da izvlači glodalo iz njegova koničnog ležišta. Ako je glodalo desnavezno i desnovojno,

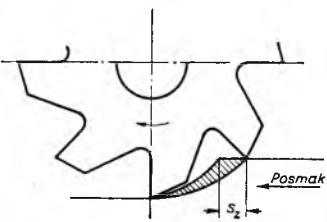
pritiskivat će ova sila glodalo u njegov konični ležaj, kako pokazuje sl. 55. Za rad čeonih zubača vretenastog glodala je povoljnije da desnavezno glodalo ima desnovojnu zavojnicu jer će tada prednji kut čeonih zubača biti pozitivan, što je uvek poželjno.

S obzirom na prije spomenuto jednoličnije opterećenje odabira se često nagib zavojnice od  $40^\circ$  do  $50^\circ$ , i to veće vrijednosti za glodala s manjim brojem zubača i u slučaju obrade predmeta manje širine.

**Prednji i stražnji kutovi zupca glodala.** Oštirina zupca kao i oblikovanje skidane strugotine zavise o veličini prednjeg kuta  $\gamma$ . Oštrica treba da skida materijal rezanjem, a ne gnječenjem, jer samo tada su radni uvjeti povoljni a trajanje oštrice alata dostatno. S porastom prednjeg kuta smanjuju se nešto i sila rezanja, potrošak snage i temperatura oštrice, kako su pokazali pokusi Opitzovi, Savinovi i dr. Veličina stražnjeg kuta određena je zahtjevom da se spriječi gnječenje poledine zupca obradivom površinom. Veličina kutova  $\alpha$  i  $\gamma$  odabira se prema vrsti obradivog materijala. Pri istosmjernom glodanju odabiraju se nešto veći kutovi nego pri protusmjernom. Za nelegirane strojogradne čelike, lijevano željezo, mjeđi i bronze često se preporučuje  $\delta = 10 \dots 15^\circ$  i  $\alpha = 5 \dots 10^\circ$ , za lake metale  $\gamma = 25 \dots 40^\circ$ ,  $\alpha = 10 \dots 15^\circ$ .

**Protusmjerni i istosmjerni način glodanja.** Osim dosad opisanog protusmjernog načina rada, prikazanog na sl. 54, danas

se dosta često upotrebljava i tzv. istosmjerni način. Slika 56 pokazuje razlike u relativnom gibanju i načinu skidanja strugotine između protusmjernog i istosmjernog glodanja. Vidi se da pri istosmjernom načinu rezanje počinje uz skidanje strugotine najvećeg presjeka. Pri protusmjernom glodanju dolazi u prvoj fazi rezanja, kada je debljina strugotine neznatna, više do nekog sklizanja



Sl. 56. Istosmjerni način glodanja

alata i gnječenja materijala nego do lijepog rezanja. Posljedica je toga sklizanja i gnječenja stanovito povećanje tvrdoće površinskog sloja, što otežava rad zupcu i njegovoj oštrici. To izaziva također nešto jače trošenje alata i veći potrošak rada pri rezanju. Ovo povećanje tvrdoće i otpora rezanja dolazi ipak do izražaja samo pri obradi žilavih materijala, koji daju kontinuiranu strugotinu. Pri obradi krtog lijevanog željeza ovo povećanje nije zapaženo. Pri istosmjernom glodanju javlja se druga teškoća: rezanje počinje sa skidanjem strugotine najveće debljine i presjeka, što djeluje na alat, stroj i predmet znatno više udarno. To zahtjeva kruću izvedbu stroja da se izbjegne trešnja. Na alatu treba predvidjeti dovoljno velike prednje kute da se olakša i ublaži udarno opterećenje. Sila rezanja protusmjernoga glodala nastoji odignuti predmet s podloge, pri istosmjernom glodanju pritišće ga na podlogu. Spomenute prednosti istosmjernoga glodanja čuvaju alat i dopuštaju veće ekonomске brzine rezanja. Koji će se način glodanja upotrijebiti, to treba od slučaja do slučaja posebno odlučiti s obzirom na vrstu obradivog materijala, konstrukciju i krutost stroja i alata, kao i s obzirom na predviđenu dubinu skidanog sloja i posmaku. Lijevano željezo s tvrdom korom je, s gledišta izdržljivosti alata, povoljnije obradivati protusmjerno jer oštrica radi u mehaničkom sloju ispod tvrde kore, dok bi pri istosmjernom načinu oštrica udarala na ulazu po samoj tvrdoj kori. Istosmjerni način daje bolji kvalitet obrade mehaničkih materijala koji lako stvaraju lažnu oštricu, jer taj način sprečava stvaranje lažne oštice.

**Brzine rezanja pri glodanju.** Napredovanje zatupjelosti izražava se širinom izlizane stražnje površine zupca. Kad je ta širina dosegla  $0,6 \dots 1,3 \text{ mm}$  — već prema složenosti i veličini glodala — smatra se da je potrebno oštrenje, jer bi jače zatupljanje učinilo rad nerentabilnim. Trajanje glodala između dva oštrenja zavisi o brzini rezanja i o ostalim radnim uvjetima: o presjeku strugotine, mazanju, vrsti obradivog materijala i dr., a odabire se, odnosno propisuje, u širokim granicama od 1 do 8 sati, i to opet u zavisnosti o obliku i dimenzijama glodala. Što je složeniji oblik glodala i što su veće njegove dimenzije to dulje treba da se odabira njegovo trajanje. S obzirom na to razlikuju

se i ekonomične brzine rezanja:  $v_{60}$ ,  $v_{180}$ ,  $v_{240}$ ,  $v_{450}$ . Zavisnost između brzine rezanja  $v$  u m/min, trajanja glodala  $T$  u minutama i ostalih utjecajnih faktora data je npr. za valjkasta brzorezna glodala i za glodanje čelika čvrstoće 45 kp/mm<sup>2</sup> izrazom:

$$v = \frac{60 d^{0.60}}{T^{0.3} t^{0.27} s_z^{0.30} z^{0.10} b^{0.09}}$$

Iduća tablica pokazuje granične vrijednosti brzina rezanja u zavisnosti o vrsti obradivog materijala, vrsti obrade i kvalitetu glodala.

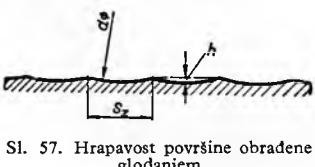
| Obradivani materijal                             | Brzine rezanja, m/min |         |              |          |
|--|-----------------------|---------|--------------|----------|
|  | brzorezni čelik       |         | tvrdi metali |          |
|  | grubo                 | fino    | grubo        | fino     |
| Nelegirani strojograd.<br>čelici i čelični lijev | 8...15                | 15...25 | 30...80      | 90...130 |
| Lijevano željezo                                 | 8...12                | 15...20 | 50...80      | 80...100 |
| Mjedi i bronze                                   | 20...25               | 30...50 | 90...120     | do 300   |

**Odabiranje posmaka pri glodanju.** S porastom posmaka po zupcu  $s_z$  rastu presjek skidane strugotine, sile na zupcu i hrapavost obradene površine. Visina posmaka odabira se u štanovitoj zavisnosti o dimenzijama glodala, o grubosti njegovih zubaca i o dubini glodanja. Iduća tablica daje nekoliko podataka o veličini posmaka  $s_z$  pri obradi željeznih i obojenih metala:

| Tip glodala               | Posmak za dubinu glodanja, mm |             |              |
|---------------------------|-------------------------------|-------------|--------------|
|                           | 2...3                         | 4...6       | 8...10       |
| Valjkasto:<br>sitni zupci | 0,08...0,05                   | 0,05...0,03 | —            |
| krupni zupci              | 0,15...0,10                   | 0,10...0,07 | 0,04...0,02  |
| Čeono:<br>sitni zupci     | 0,1...0,05                    | 0,05...0,03 | —            |
| krupni zupci              | 0,15...0,10                   | 0,10...0,07 | 0,07...0,04  |
| Pločasto:<br>ravni zupci  | 0,05...0,04                   | 0,04...0,02 | 0,02...0,015 |
| umetnuti zupci            | —                             | 0,1...0,07  | 0,07...0,04  |

Za lijевano željezo mogu se odabrati posmaci i do dva puta veći od onih koji su navedeni u tablici.

**Hrapavost glodanjem obradene površine.** Dubina hraposti  $h$  (sl. 57) koju zupci alata ostavljaju na obradenoj površini u obliku valovitosti bila bi teorijski:  $h = \frac{s_z^2}{4 d}$ . Mjerena pokazuju, međutim, da su faktične dubine zbog udaranja alata i radne osovine često i do 100 puta veće od teorijskih. Općenito  $h$  raste s posmakom



Sl. 57. Hrapavost površine obradene glodanjem

$s_z$  i dubinom glodanja  $t$ , a opada s promjerom glodala. Pri finoj obradi je  $h$  samo 3...10 mikrona, pri gruboj 20...40 mikrona.

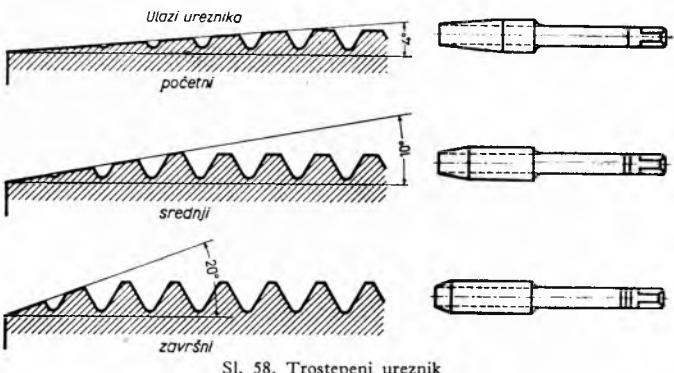
#### Ureznici i nareznice

Za rezanje navoja u matici služi *navojno svrdlo* ili *ureznik* (sl. 58), a za rezanje navoja vijka služi *nareznica* (sl. 59). Ovi alati režu navoj do pune dubine i konačnog oblika postepeno. Slog ureznika je u tu svrhu često sastavljen od tri dijela: za prvo, za srednje i za završno rezanje. S obzirom na to je prednji konični dio ureznika i njegovih zubaca (sl. 58) zakošen pod kutom  $\varphi = 4\ldots 20^\circ$ . Broj utora je 3 ili 4. Ima li ureznik po opsegu  $z$  redova zubaca, bit će debljina strugotine po jednom zupcu, mjereno okomito na smjer širine (sl. 60),

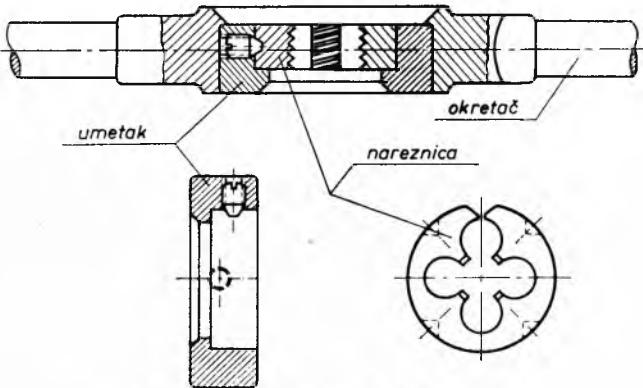
$$\delta = \frac{h}{2} \sin \varphi,$$

gdje je  $h$  zubni korak navoja.

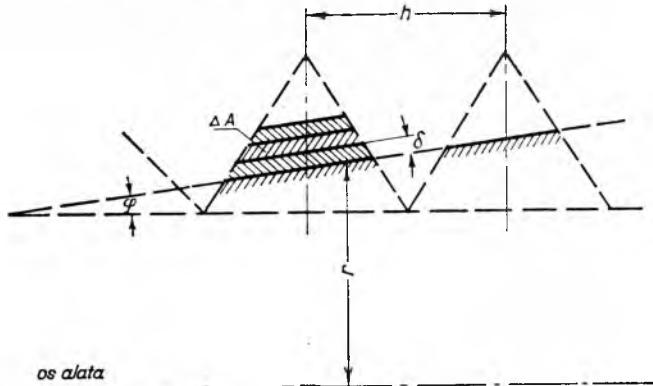
Šrafirane površine u sl. 90 pokazuju koliki presjek strugotine skida pojedini red zubaca unutar koničnog dijela alata. Poznaju li se ovi pojedini presjeci i njihove udaljenosti  $r$  od osi alata, može



Sl. 58. Trostepeni ureznik



Sl. 59. Nareznica s umetkom i okretaćem



Sl. 60. Debljina strugotine što je skida pojedini red zubaca

se postaviti za neki određeni trenutak izraz za moment vrtnje:

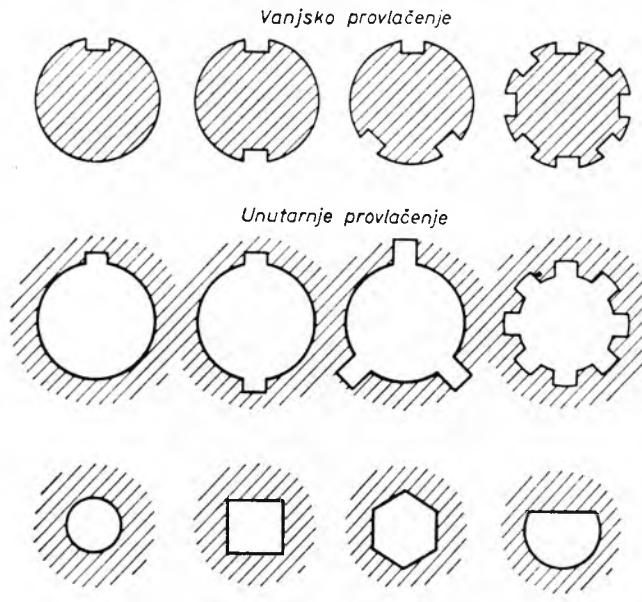
$$M_{\text{rez}} = \sum_{i=1}^n K A_i r_i,$$

gdje je:  $A_i$  presjek skidane strugotine,  $K$  specifični otpor rezanja.

#### Provlačila

Ovaj tip alata, koji je relativno kasno uveden u praksu, postigao je u suvremenoj proizvodnji veće značenje zbog visokog kvaliteta obrade i dobre produktivnosti. Za stanovite vrste radova, kao što su obrada dubokih rupa i izrada ravnih i spiralnih utora u njima, ovaj je alat postao nezamjenljiv. Izrađuje se u obliku nazubljenih motki s drškom i navojem na kraju za pričvršćivanje u stroju. Između drške na prednjem kraju i prvog radnog zupca, a često i na stražnjem kraju, predviđene su površine za vođenje alata. Razlikuju se provlačila za unutarnje i za vanjsko provlačenje.

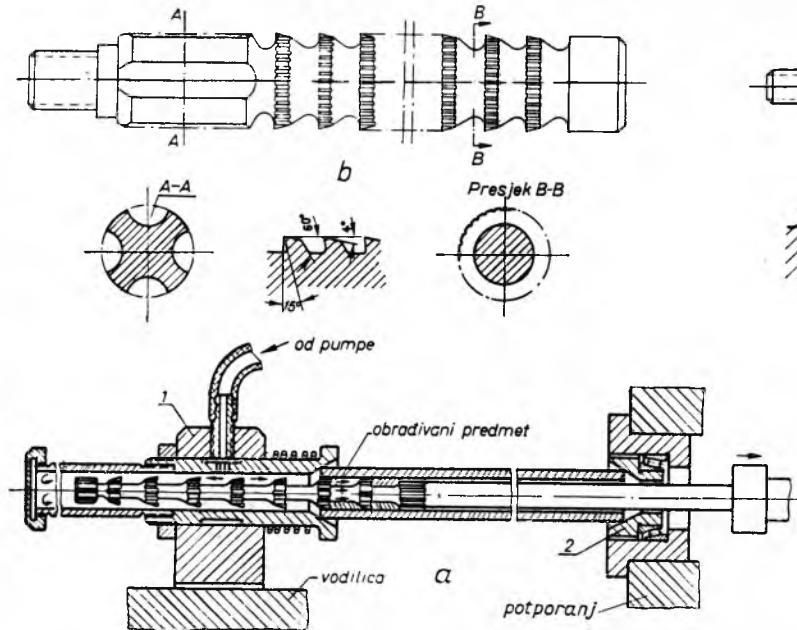
Kao alat za unutarnje provlačenje služe provlačila za izradu provrta za ležajeve i utore u glavina kotača, zupčanika, spojki, raznovrsnog alata i slično, za obradu predbušenih rupa, za izradu četvrtastih i okruglih rupa, za izradu zupčanika s unutarnjim ozubljenjem i dr. Kao alat za vanjsko provlačenje služe za obradu vanjskih površina predmeta, ravnih i raznovrsno oblikovanih, za izradu utora i ozubljenja segmentnih zupčanika, raspora i sl.



Sl. 61. Nekoliko uzoraka izrađenih provlačenjem

Sl. 61 pokazuje nekoliko uzoraka na kojima su rupe u glavini, zupci, utori za klinove i dr. izrađeni s pomoću alata ovog tipa. Sl. 62 a pokazuje shemu provlačenja dubokih rupa na horizontalnom stroju-provlačilici; prednji i stražnji kraj alata služe kao vodilica. U stražnjoj glavi stroja 1, koja se može po svojoj vodilici prema potrebi uzdužno premjestiti, nalazi se priključak pumpe za dobavu rashladnog sredstva. Rotirajući potporanj 2 omogućuje i izradu utora u obliku zavojnice malenog nagiba.

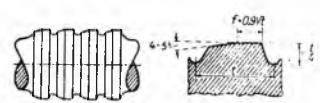
Sl. 62 b prikazuje konstrukciju alata za obradu dugih rupa kružnog presjeka. Da se izbjegnu strugotine u obliku prstena i dobije više usitnjena strugotina, zupci su izvedeni s rasporima koji su u svakom zupcu nešto zaokrenuti prema rasporima u



Sl. 62. Provlačila. a shema stroja-provlačilice, b provlačilo za obradu dubljih okruglih rupa (zupci imaju raspore za lomljenje strugotine), c spiralno provlačilo, d provlačilo za izradu dvaju utora s vodilicama

susjednom zupcu. Sl. 62 c pokazuje spiralno provlačilo za obradu rupa manjeg promjera; ono dopušta neprekidan odvod strugotine i dobro rashladivanje svih radnih dijelova zubaca. Sl. 62 d pokazuje provlačilo za izradu 2 utora, s postranim cilindričnim vodilicama.

Poseban tip su provlačila za zagladivanje dugoljastih cilindričnih prvrta. Ona ne skidaju strugotinu nego svojim zaobljenim prstenastim grebenima (sl. 63) vrše plastičnu deformaciju obradivane površine, što joj daje sjaj i veliku tačnost.



Sl. 63. Provlačilo za zagladivanje cilindričnih prvrta

**Oblikovanje ozubljenog dijela provlačila.** Na svaki pojedini zubac otpada određena debljina sloja  $a_z$  (sl. 64), koja se odabira prema vrsti obradivanih materijala. Za mehanički materijal  $a_z$  iznosi 0,02...0,07 mm, za tvrdi čelik doseže do 0,15 mm, za mehanički sivi lijev do 0,10 mm. Ova debljina ne smije biti ni suviše mala jer bi tada umjesto pravilnog rezanja nastalo više neko gnječeće materijala. Dobro rezanje zavisi o oštini zupca, tj. o veličini prednjeg kuta  $\gamma$ . Za čelične materijale je  $\gamma = 10\ldots 18^\circ$ , za sivi lijev  $6\ldots 10^\circ$ , za tvrde i krte mjeđi i bronze  $3\ldots 6^\circ$ . Stražnji kut  $\alpha$  je malen i kreće se od svega 1 pa do  $4^\circ$ . Širina fazete na poledini zupca iznosi često od 0,5 do 1,5 mm, rjeđe doseže i do 4 mm.

Znači li  $a$  predviđeni dodatak materijala za obradu, tada je broj radnih zubaca  $z = (a/a_z) + 1$ , gdje je  $a_z$  debljina skidanog sloja po jednom zupcu. Dužina nazubljenog dijela alata iznosi  $l = t(z-1)$ , gdje je  $t$  zubni razmak. Veličina  $t$  odabira se tako da bi se dobio dovoljno velik prostor među zupcima, potreban za dobro smještanje i za pravilno savijanje skinute strugotine. Visina zupca  $h$  raste sa zubnim razmakom  $t$  i često se uzima  $h = (0,2\ldots 0,4)t$ .

**Sile rezanja.** Na prednju površinu zupca tlači sila  $F_z$  (sl. 65) u smjeru suprotnom gibanju alata:  $F_z = K a_z b$ , gdje je  $K$  specifični otpor rezanja,  $a_z$  debljina sloja po zupcu,  $b$  širina skidanog sloja.

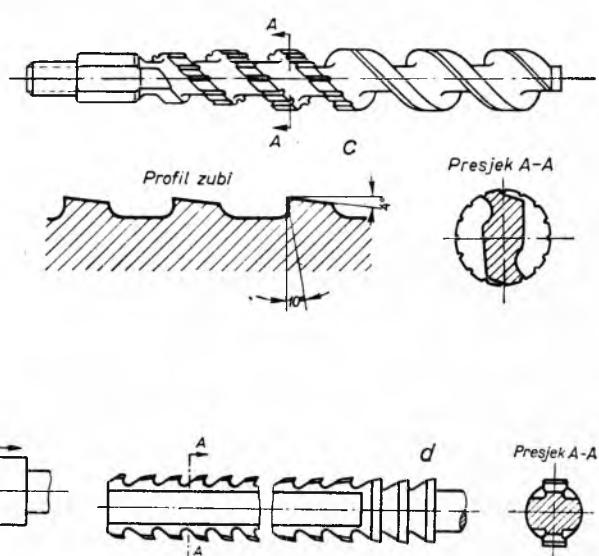
Ako je istodobno u radu  $z$  zubaca, bit će ukupna sila pod pretpostavkom jednakih sile na svaki pojedini zubac:

$$F = 1,1 K a_z b z,$$

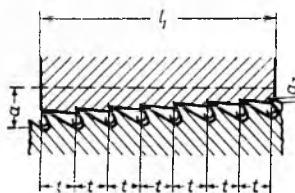
gdje su koeficijentom 1,1 uzete u obzir i sile trenja na poledini zupaca. Potrebno je kontrolirati napon koji sila  $F$  izaziva u najjače opterećenom presjeku drška alata:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{1,1 K a_z b z}{A},$$

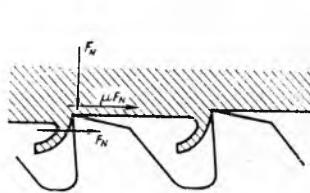
gdje je  $A$  najjače opterećeni presjek u dršku alata.



Dopušteni naponi  $\sigma$  kreću se, već prema kvalitetu čeličnog materijala provlačila, u granicama od 20 do 50 kp/mm<sup>2</sup>. Ispadne li  $\sigma$  previsok, potrebitno je provlačenje izvoditi postepeno, tj. većim brojem provlačila.



Sl. 64. Oblikovanje ozubljene dužine provlačila



Sl. 65. Sile na zupcu provlačila

**Brzine rezanja pri provlačenju.** Provlačenje se provodi s relativno niskim brzinama rezanja, da se čuva skupi provlačni alat i da se izbjegnu previsoke snage za pogon strojeva-provlačilica. Pri unutarnjem provlačenju iznose brzine rezanja za većinu materijala samo 2 do 3 m/min, jedino pri obradi nekih vrsta lakočih metala ide se na bitno veće vrijednosti. Pri vanjskom provlačenju ove se brzine penju za željezne metale na 5...10 m/min.

**Rashladna i maziva sredstva.** Obilata količina rashladnog sredstva koje pod pritiskom struji oko svih opterećenih oštirica alata prijeko je potreban uvjet za dobru izdržljivost alata i dobar kvalitet obrade, a olakšava i odvod strugotine. Pri obradi čeličnih materijala služe u tu svrhu uljne emulzije sa sapunicom i riblje ulje, za lijevano željezo — ukoliko se ne radi nasuho — uzimaju se sapunica i riblje ulje, a za aluminijske legure petrolej i lako mineralno ulje; sam aluminij, neke mjeđi i bronze provlače se i nasuho.

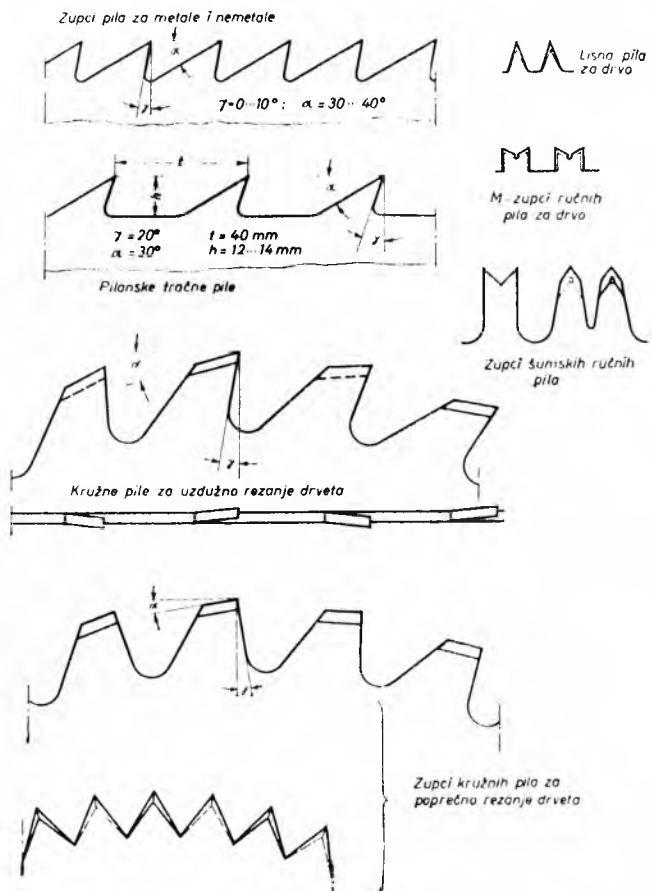
### Pile

Prema osnovnom obliku razlikuju se lisne, tračne i kružne pile. Lisne pile u obliku ozubljenog lista služe za ručno i za motorno piljenje, tračne i kružne pile su uvijek na motorni pogon. Oblik zubaca (sl. 66) zavisi o vrsti materijala koji se pili i načinu piljenja, a treba da zadovolji, kao i oštice drugog alata za rezanje, uvjete dobre sposobnosti rezanja, čistoće reza i dovoljne trajnosti reznih oštirica. Veličina zubaca, tzv. gruboća, izražava se brojem zubaca na jedinicu dužine, npr. na 1 cm ili 1 inč, a odabira se u zavisnosti o debljinu raspiljenog presjeka, a donekle i o njegovu obliku. Što je manja debljina ili promjer piljenog predmeta, to sitniji treba da budu zupci. Načelno se veličina zubaca odabira tako da bi se, uz predviđenu debljinu predmeta, u radu nalazila istodobno najmanje dva zupca. Zubni razmak  $t$  odabira se s obzirom na količinu strugotine skinute po jednom zupcu, jer ona treba da se lako smjesti u zubni meduprostor. Zupci su skoro svih vrsta pila razvršćeni, tj. izvinuti izvan ravnine lista pile da se sprječi trenje između lista i piljenog materijala. Širina propiljka je zbog toga nešto veća nego debljina lista pile, ona raste s debljinom lista pile. Svako povećanje širine propiljka uzrokuje i povećani potrošak energije piljenja. Razlikuje se više načina za razvršćanje zubaca (sl. 67): razvršćanje lijevo-desno, lijevo-desno-ravno, 3 lijevo-1 ravno-3 desno, valovito razvršćanje i dr.

Koji će se način odabrati zavisi, između ostalog, i o gruboći zubaca. Posve sitni zupci lisnih i tračnih pila vrlo se često razvršćaju valovito, zupci srednje veličine često se razvršćaju lijevo-desno-ravno. Zupci kružnih pila za nemetale (drvno) najčešće se razvršćaju naizmjenično lijevo i desno. Svaki od ovih načina ima svoje dobre i slabe strane s gledišta jednolikosti opterećenja i trošenja zubaca, jednostavnosti razvršćanja, lakoće oštrenja i mjerjenja.

**Lisne pile.** Za hladno piljenje metalnih materijala služe pile u obliku listova (sl. 68). Ozubljenje ručnih pila obično je dvostrano, ozubljenje motornih pila je jednostrano. Grade se za dužine  $l$  od 300 do 600 mm. Prednji kut zubaca  $\gamma$  ide od 0 do 5°, stražnji kut od 30 do 40°. Zupci su sitni i na ručnim pilama obično valovito razvršćeni.

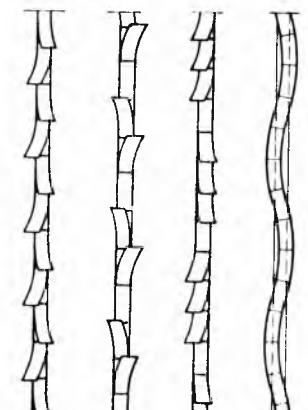
Za ručno piljenje drvne grade služe nešto dulji tanki listovi grubih zubaca istoga geometrijskog oblika i gotovo istih



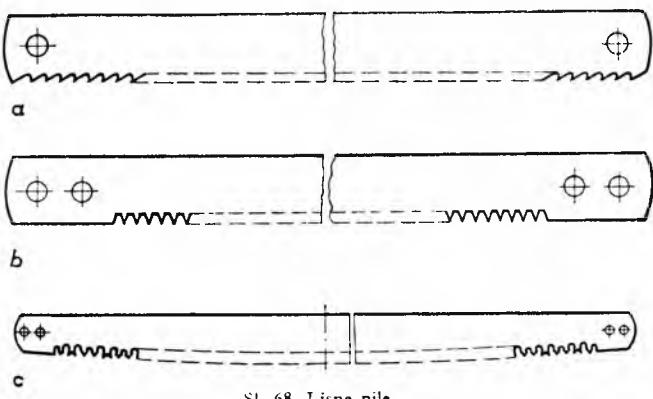
Sl. 66. Oblici zubaca pila

kutova. Povrh toga postoje za teže radove, kao što je piljenje trupaca, veliki listovi trbušasta oblika i raznovrsno oblikovanih zubaca.

**Tračne pile** za piljenje metalnih i nemetalnih materijala izraduju se u obliku čeličnih traka debljine 0,60...0,85 mm, širine 6...40 mm, s ozubljenjem i kutovima kao i na lisnim pilama. Jedino pilanske tračne pile, za piljenje trupaca, rade se kao trake debljine 1,2...1,8 mm, većih širina a s ozubljenjem i kutovima prema sl. 66.



Sl. 67. Razvršćanje zubaca na lisnim i tračnim pilama



Sl. 68. Lisne pile

Iduće tablice pokazuju kako se mijenja gruboća zubaca s materijalom i debjinom piljenog predmeta:

Tablica a)

| Materijal                                       | Broj zubaca na 1" za debjinu piljenog predmeta: |      |    |    |
|---|---|------|----|----|
|   | 1/16"   | 1/4" | 1" | 3" |
| Čelici  |   |      |    |    |
| 0,1...1,0 C i do 0,6 Mn                         | 24  | 14   | 10 | 6  |
| 0,13...0,5 C, do 0,9 Mn<br>do 4% Ni, do 1,2% Cr | 18  | 14   | 12 | 6  |
| Brzorezni čelici i čelici 18/8 nerđajući        | 24  | 14   | 10 | 8  |
| Mašinski sivi lijev                             | 18  | 14   | 10 | 6  |
| Čelični lijev                                   | 18  | 14   | 12 | 8  |

Tablica b

| Materijal   | Broj zubaca na 1" za debjinu piljenog predmeta: |    |    |    |
|---|---|----|----|----|
|   | 1/2"  | 2" | 4" | 6" |
| Aluminijeve legure, cink, magnezij                          | 4   | 3  | 3  | 2  |
| Bakar i mjedi   | 6   | 4  | 3  | 3  |
| Papir, tvrda guma, sve vrste tvrdog drveta                  | 6   | 6  | 6  | 4  |
| Umjetni plastični materijali na bazi fenola, celuloze i dr. | 6   | 4  | 3  | 2  |

Brzine rezanja iznose za čelike srednje čvrstoće  $\sim 45\ldots 50$  m/min, za čelike visoke čvrstoće 15...26 m/min, za mjedi 55 m/min, umjetne mase 80 m/min, lake metale 200...800 m/min. Za piljenje drveta (stolarske tračne pile) ta je brzina 15...20 m/s, a brzina pilanskih tračnih pila i do 40 m/s.

**Kružne pile** su vrlo čest oblik alata za piljenje metalnog materijala i drvene grade. Ozubljenje kružnih pila pokazuje slika 66.



Sl. 69. Presjek zubaca kružnih pila za metale

Kružne pile za metale izrađuju se bez razvraćanja zubaca (sl. 69), ali se list pile izvodi stanjen prema centru. Ova stanjenost raste s debjinom zupca i promjerom pile.

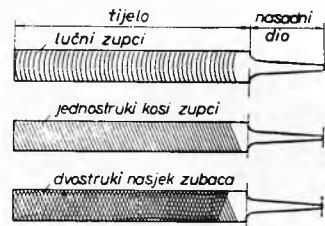
Danas se često upotrebljavaju i pile s umjetnim zupcima od kvalitetnoga čeličnog materijala ili čak tvrdih metala.

Za uzdužno piljenje i obrubljivanje drvene grade (u smjeru vlakanaca) služe pile s ozubljenostišću prema sl. 66. Za poprečno rezanje (okomito na smjer vlakanaca) služe trokutasti zupci s negativnim prednjim kutom. Veličina prednjih i stražnjih kutova zavisi o vrsti i vlažnosti drvene grade.

**Materijal pila.** Ručne lisne pile za metal rade se od nelegiranog čelika sa 0,9...1,0% ugljika i legiranih čelika kao: 0,9% C, 1,2...1,6% Si, 1,0...1,3% Cr, ili 1,1...1,2% C, 1,0...1,8% W, do 0,5% Cr i do 0,15% V. Mašinske lisne pile za metal rade se od visokolegiranoga brzoreznog čelika sa 0,85...0,95% C, 3,8...4,4% Cr, 8,5...10,0% W, 2...2,6% V, ili slabijeg niskolegiranog čelika sa 0,95...1,1% C, 1,3...1,7% Cr. Ručne pile za drvo obično su od nelegiranoga ugljičnog čelika ili niskolegiranoga sa  $\sim 0,5\%$  Cr i 0,2...0,3% V. Tračne pile za metalne materijale imaju najčešće ovaj sastav: 0,9...1,1% C, do 0,45% Mn, do 0,2% Si ili 1,0...1,15% C, do 0,15% V. Tračne pile za drvo mogu biti od nelegiranog čelika sa sadržajem ugljika do 0,8% ili nisko legiranog sa 0,55...0,75% C i do 0,5% Cr.

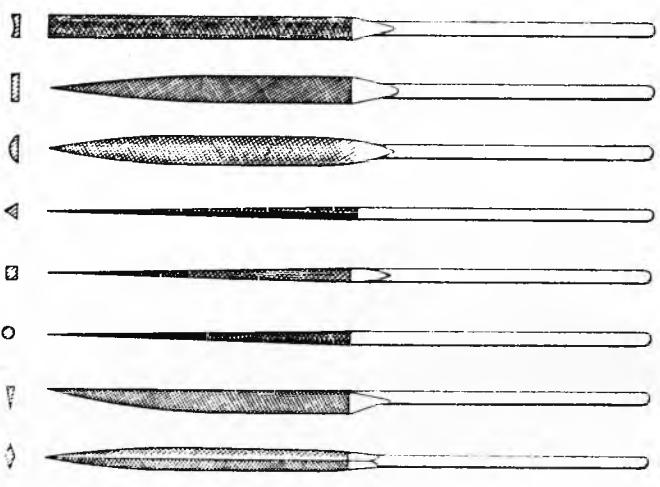
### Turpije, rašpe i grebala

**Turpije** služe za ručno i za mašinsko turpijanje metalnih materijala, a **rašpe** za drvo, nemetalne materijale i mekane metale. Na tijelu turpije izrađeni su zupci nasjecanjem, tj. bez skidanja strugotine, ili rezanjem uz skidanje strugotine (sl. 70). Rašpe imaju pojedinačno istaknute zupce u obliku vrhova. Na tijelu turpije i rašpe nastavlja se nasadni dio za nasadivanje držala ručnih turpija ili za stezanje u stroj mašinskih turpija. Postoje i turpije bez nasadnog dijela. Finoča turpije mjeri se brojem zubaca gornjeg nasjeka na 1 cm dužine a finoča rašpe brojem čitavih zubaca na 1  $\text{cm}^2$  površine.



Sl. 70. Turpije

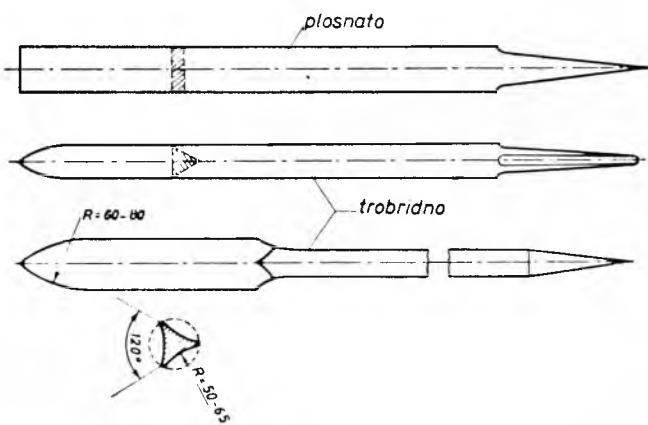
Turpije se rade u šest stupnjeva finoće: vrlo gruba, gruba, polugruba, polufina, fina i vrlo fina. Rašpe se rade u pet stupnjeva, od vrlo grube do fine. Broj nasječenih zubaca na 1 cm, za turpiju određenog stupnja finoće, nije konstantna veličina, već opada sa dužinom tijela turpije. Za grube turpije se npr. broj zubaca kreće od 5 do 14, za fine od 22 do 45 a za vrlo fine do 63 po 1 cm. Grube rašpe imaju prema JUS 5...14, polugrube 7...20, polufine 9...28 a fine 16...25 zubaca po 1  $\text{cm}^2$ .



Sl. 71. Precizne turpije

Sl. 71 prikazuje oblike preciznih turpija a sl. 72 nekoliko oblika turpija i rašpa prema JUS.

**Grebala** služe za ručnu obradu i dotjerivanje već obradenih metalnih površina. Plosnata su ili trobridna oblika (sl. 73). Prave se od tvrdog alatnog ugljičnog čelika sa 1,3...1,5% C.

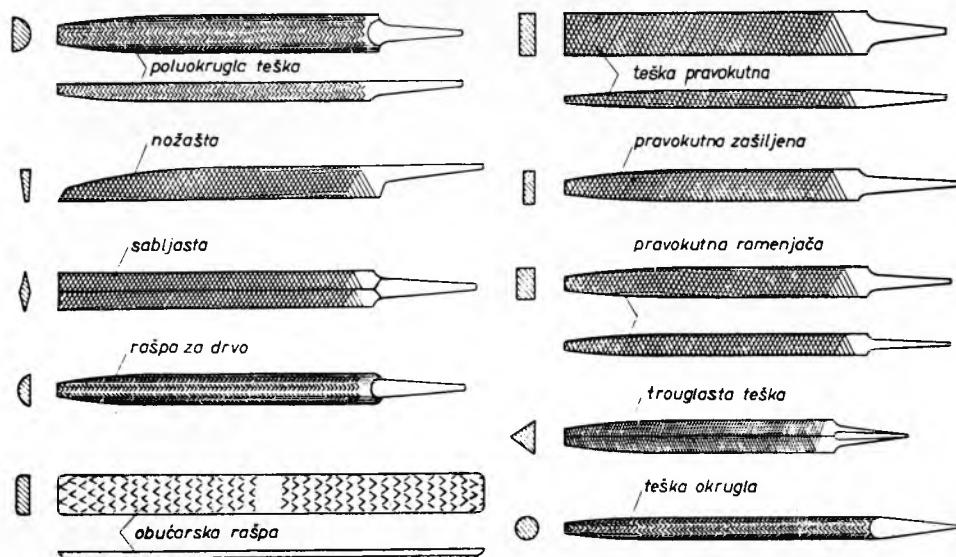


Sl. 73. Grebala

### Alat za brušenje

Sitna mineralna zrnca kao sastavni dio svakoga brusnog alata vrše svojim oštrim bridovima zadaću rezaceg alata za skidanje strugotine. Zbog sitnoće samih zrnaca moraju i presjeci skidane strugotine biti relativno vrlo sitni. Ovako jako usitnjavanje skidanog materijala nužno je praćeno jakim zagrijavanjem i relativno većim utroškom energije. Treba naglasiti da se brusni alat normalno dosta jako troši jer zatupjela zrnca treba da u toku rada neprekidno ispadaju da bi na njihovo mjesto došla nova, oštra zrnca. Rentabilnost rada zahtijeva stoga da se pri brušenju skidaju što tanji površinski slojevi. Jedna od najčešćih primjena brusnog alata jest oštrenje zatupjela raznovrsnoga ručnog i mašinskog alata. U proizvodnji strojeva njegova je najvažnija zadaća visok kvalitet obrade, isto toliko s gledišta glatkoće površina koliko s gledišta tačnosti dimenzija obrađenih predmeta. Osim toga, često se upotrebljava brusni alat — u obliku tankih okruglih ploča — i za prerezivanje šipkastoga metalnog materijala, zamjenjujući tako, do stanovitih debljina, visokom radnom produktivnošću brusnog alata spori rad raznovrsnih pila.

Mineralna se zrnca mogu za brušenje upotrijebiti na više načina: u obliku samih finih zrnaca, sipanih na obradivane površine, zatim u obliku praška nalijepljenog na papir ili platno, i konačno u obliku raznoliko obliskovanoga brusnog kamenja, sastavljenog od sortiranih zrnaca, povezanih odgovarajućim vezivom. Za površinsku obradu drveta najčešći je oblik primjene brusni papir ili brusno platno, u mašinstvu ima najšire značenje brusno kamenje.



Sl. 72. Oblici turpija i rašpa

**Materijali za brušenje (abrazivi).** Od minerala za brusne svrhe traži se općenito dovoljna tvrdoća i žilavost, da bi oštice zrnca bile upotrebljive kao rezni alat i otporne protiv prečestog loma zbog udarca ili pritiska prilikom obrade. S obzirom na to za obradu metala najvažniji su ovi materijali:

**Korund.** Čisti korund je kristalni  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , tvrdoće iznad 9 po Mohsu i dobre žilavosti. Za svrhe brušenja proizvodi se iz boksita i tada je količina  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u njemu (prema JUS) od 94 do 99,5%, ostalo otpada na  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  i  $\text{TiO}_2$ . Kvalitet korunda kao i njegova boja zavise o čistoći, tj. količini  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Čisti korund je bijele do bijledoružičaste boje, dok su ostali, manje čisti, crven-kastomodričaste do tamnosmeđe boje. Korund je danas jedan od najviše upotrebljavnih materijala za izradu brusnog alata.

**Karborund** je silicijev karbid  $\text{SiC}$ , dobiven taljenjem smjese kremenog pijeska i koksa u električnim pećima. Tako dobiveni  $\text{SiC}$  drobi se i usitnjava na zrnca, koja se zatim prosijavanjem sortiraju po veličini. Zbog prisutnih primjesa, boja je ovih kristala zelenasta do crnasta. Tvrdoća im je iznad 9. Lomovi kristala daju vrlo oštре i tvrde, ali i dosta krte i lomljive bridove.

Zbog toga se karborund upotrebljava najviše za brušenje krtih i tvrdih materijala, kao što su sivi i tvrdi lijev, porculan, staklo, mramor i slično, ali se upotrebljava i za vrlo mekane materijale, kao aluminij, bakar, tvrda guma i fiber. Za brušenje žilavog čeličnog materijala manje je prikladan. Prema JUS predviđena je za ove svrhe čistoća karborunda od 99%. Karborund nije tako univerzalno upotrebljiv kao korund, ali po opsegu upotrebe dolazi odmah iza njega.

**Dijamant**, kristalizirani ugljik, s tvrdoćom 10 u skali Mohsa najtvrdi je od svih poznatih minerala. Tehnički dijamanti koji se upotrebljavaju za brušenje tamne su boje i dijele se u dva kvaliteta: karbon, koji je konglomerat sitnih kristalića dijamana velike i jednolike tvrdoće, i bort, slabiji ali jeftiniji kvalitet.

Dijamant služi kao alat za obradu brusnih kola, obradu tvrdog kamena, duboka bušenja u ruderstvu i za vrlo finu obradu metala. U obliku finog praha služi za fino poliranje.

Od ostalih brusnih materijala mogu se spomenuti šmirak, kvarc, plavučac i staklo. **Šmirak** je po sastavu korund onečišćen većom količinom magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), tvrdoće ~8; služi kao prašak za brušenje i poliranje i za proizvodnju brusnog papira i platna. **Kvarc**, tvrdoće 7, u obliku brusnog papira služi za brušenje drveta. **Plavučac** dolazi u prirodi kao produkt vulkanske djelatnosti, porozan staklasti materijal tvrdoće 5...6, služi za fino brušenje drveta i poliranje mehaničkih metala. Od **stakla** pravi se brusni papir za drvo.

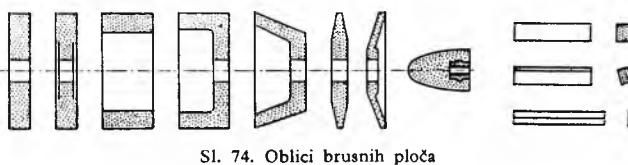
**Veziva.** Povezivanjem mineralnih zrnaca s pomoću podesnog veziva brusno kamenje dobiva potrebnu mehaničku otpornost.

Čvrstoću ove povezanosti treba odrabiti tako da zatupjela zrnca uz zadanje radne uvjete dovoljno lako ispadaju iz brusa i na površinu dolaze nova oštra zrnca. Prema JUS razlikuju se keramičko (V), bakelitno (B), (šelakovo E), magnezitno (O), silikatno (S), gumeno (R) i metalno (M) vezivo. Najraširenije je keramičko vezivo, sastavljeno od gline, kaolina i glinenca, koje se uz dodatak vode mijesu u određenom postotku s mineralnim zrcicima. Brusni alat s mineralnim vezivom odlikuje se dovoljnom poroznošću, neosjetljiv je na vodu i ulje te se za vrijeme rada može hladiti. Bakelitno vezivo sastoji se redovito od fenolformaldehidnih smola i furfurala (kao plastifikatora). Ovo vezivo daje brusnim pločama stanolitnu elastičnost. Ploče s bakelitnim vezivom služe za grube radove kao što je skidanje poruba i čišćenje odlivaka. Lako ispadanje zatupjelih zrnaca čini brusni alat s ovim vezivom.

vom prikladnim i za vrlo fino brušenje. Bakelitno vezivo dopušta izradu posve tankih ploča koje služe za razrezivanje materijala, s magnezitnim vezivom prave se brusne ploče za brušenje aluminija i cinka. — Silikatno vezivo sastoji se od vodenog stakla i manje količine različitih minerala. Brusno kamenje s ovim vezivom nije dovoljno porozno i ne može se hladiti vodom, stoga služi za suho brušenje. — Gumeno vezivo sastoji se od vulkanizirane prirodne ili sintetske gume uz još neke dodatke i čini brusni alat donekle elastičnim. Hladjenje vodom moguće je, ali bez dodavanja sode ili ulja. Metalno vezivo, sastavljeno od različitih legura, služi za dijamantne brusove.

**Obliskovanje brusnog alata** vrši se kalupima. Daljnji proces izrade zavisi o vrsti veziva. Formirano brusno kamenje s keramičkim vezivom najprije se brižljivo suši a zatim peče u pećima. Unutarnji naponi koji pri tom uvijek nastaju rastu s dimenzijama brusne ploče i mogu uzrokovati nevidljive pukotine. Visokoturažni brusni alat treba stoga prije upotrebe ispitati tako da se najmanje 3 minute drži na turaži koja će dati za 40...50% veću obodnu brzinu od dopuštenog radne brzine. Dalj-

nje se ispitivanje sastoji u provjeravanju izbalansiranosti. Važno je da svako brusno kolo, a pogotovo ako je veće, bude dobro izbalansirano, jer inače dolazi do vibracija brusa, stroja i predmeta, što loše djeluje na tačnost obrade i glatkoću obradene površine. Na sl. 74 vidi se nekoliko glavnih oblika brusnog alata.



Sl. 74. Oblici brusnih ploča

**Označivanje i izbor brusnog alata.** Za kvalitet i upotrebljivost brusne ploče mjerodavni su: vrsta i krupnoća mineralnih zrnaca, vrsta veziva, tvrdoća i poroznost (struktura) ploče.

Usvojene oznake za vrstu mineralnih zrnaca su ove: normalni korund čistoće 94...96% označen je sa A, specijalni korund čistoće 98...99,5% sa B, karborund čistoće 99% sa C, a dijamant sa D.

Krupnoća zrnaca  $N$  označuje se brojem očica po linearnom inču na standardnom situ kroz koje zrnca upravo još prolaze. Taj se broj kreće od 8 do 600 i iznosi za vrlo gruba zrnca 8...12, gruba 14...24, srednje gruba 30...60, fina 70...120, vrlo fina 150...240 i osobito fina 280...600.

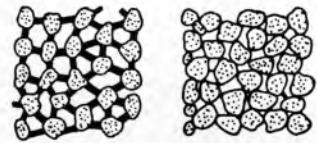
Za čišćenje težih odljevaka uzima se krupnoća 12...16, za grubo brušenje ravnih površina metala i kamena 20...24, za kružno i unutarnje brušenje metala i za fino brušenje kamena 30...46, za brušenje finog alata, fino brušenje metala i porculana 46...70, za brušenje stakla i poliranje mramora, za fino brušenje dijelova kugličnih ležajeva i dr. 90...220. Žilavi materijali, koji daju veću strugotinu, zahtijevaju i veće pore za smještanje strugotine, dakle ploče s grubljim zrnom. Krti materijali, koji daju sitniju strugotinu, dopuštaju finije zrno. Sto je dulji luk dodira između brusa i predmeta to grublje može da bude zrno.

Pri izboru krupnoće mineralnih zrnaca mogu nas rukovoditi ova razmatranja: što više materijala treba brušenjem skinuti i što grublja smije biti izbrušena površina to krupnije može biti zrno brusne ploče. Fini kvalitet brušene površine i materijali osjetljivi na zagrijavanje zahtijevaju finije zrno. Sa smanjenjem veličine zrnaca umanjuje se i presjek skidane strugotine, ali zato raste specifični potrošak rada brušenja u odnosu na krupno zrno. Fini izbrus može se inače postići i krupnozrnatim brusom ako se odabere ispravna brzina i dovoljno nizak posmak. Sviše krupno zrno nije podesno jer se u brusu slabije drži te lako ispadaju i u radu se brže lomi i troši nego sitno zrno.

Tvrdoća brusne ploče definirana je kao otpor protiv ispadanja zrnaca iz brusa. Ona zavisi o vrsti i količini veziva, o vrsti i krupnoći mineralnih zrnaca, o unutarnjoj poroznosti brusa (strukturi), i o načinu izrade. Za mjerjenje tvrdoće nema podešvih metoda. Jednostavan način za kontrolu tvrdoće sastoji se u procjenjivanju pritiska koji je potreban da bi se uvrтavanjem izvijača u brusni kamen odvojila brusna zrna. U jugoslavenskim standardima (JUS) prihvaćena je Nortonova skala tvrdoće i oznake u ovoj, nešto izmjenjenoj, klasifikaciji: vrlo mekana vez: E, F, G; mekana: H, I, J, K; srednja: L, M, N, O; tvrda: P, R, S; vrlo tvrda: T, U, V; osobito tvrda: X, Y, Z.

Pri izboru tvrdoće brusnih ploča treba imati na umu ovo: ako je ploča suviše tvrda, tj. ako je vez čvrsta, zrna će ispatiti iz ploče prekasno, kada su se već suviše zatupjela, tako da će ploča samo pritisikivati i razvijati toplinu trenja. Time raste opasnost od prejakog zagrijavanja brušenog predmeta i pojave finih površinskih pukotina. Mekane ploče lako ispuštaju zrnca, ne griju se, ali se razmjerno brzo troše. Za brušenje materijala osjetljivih na zagrijavanje odabiraju se stoga ploče s mekanom vezom. Nezakaljeni materijali mogu se brusiti tvrdim pločama. Vrlo mekani materijali, kao što su aluminijski i neke njegove legure, bruse se mekanim pločama. Za ručno brušenje odabiraju se tvrde ploče nego za mašinsko brušenje s automatskim posmakom. Što je veća dodirna površina između brusa i predmeta to mehanička treba da je veza. Brušenje utora i oštrih bridova zahtijeva tvrde ploče.

Svojstva i upotrebljivost neke brusne ploče zavise i o unutarnjoj šupljikavosti (strukturi) ploče (sl. 75) jer veličina i količina šupljinica utječe na tvrdoću ploče, na zagrijavanje u radu i na smještanje skinute strugotine. Šupljikava struktura čini ploču mehaničkom, zagrijavanje je slabije a smještanje strugotine povoljnije. Vrlo porozne ploče, s porama većim od zrnaca, prikladne su zbog svoga hladnog rada za brušenje predmeta osjetljivih na zagrijavanje, kao npr. finih oštrica i tvrdih metala. Izgled strugotine zavisi o količini upotrijebljenog veziva i načinu izrade ploče. Iduća tablica daje smjernice za izbor brusnog alata s obzirom na bruseni materijal i vrstu obrade te pokazuje način označivanja prema JUS. Prva slova — A, B, C — odnose se na vrstu mineralnih zrnaca, brojke označuju krupnoću zrnaca, a posljednja slova — G, H, I, J, K, L, M — znače tvrdoću brusne ploče.



Sl. 75. Poroznost brusne ploče

| Brušeni materijal   | Vanjsko brušenje | Unutarnje brušenje Ø ploče 16...35 mm | Brušenje ravnih površina |               |
|---|------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------|
|   |                  |                                       | Pločasti brus            | Lončasti brus |
| Čelik za cementiranje, alatni, kaljeni, tvrdoće HRC do 63 | B 60 J           | B 60 K                                | B 46 K                   | B 36 J        |
| Legirani zakaljeni čelik, HRC iznad 63                    | B 60 K           | B 60 J                                | B 46 I                   | B 36 I        |
| Brzorezni čelik kaljen, HRC do 63                         | B 60 J           | —                                     | B 46 G                   | B 46 G        |
| Brzorezni čelik kaljen, HRC iznad 63                      | B 60 I           | —                                     | B 46 G                   | B 46 G        |
| Tvrdi metal   | C 80 H           | —                                     | C 60 G                   | C 60 G        |
| Nekaljeni čelik čvrstoće do 70 kp/mm <sup>2</sup>         | A 60 M           | A 60 L                                | B 46 K                   | B 46 K        |
| Poboljšani čelik čvrstoće do 120 kp/mm <sup>2</sup>       | A 60 L           | B 60 K                                | B 46 I                   | B 46 I        |
| Sivo lijevano željezo                                     | C 60 I           | C 60 J                                | B 46 I                   | B 46 I        |
| Cinkove legure i laki metali                              | C 60 I           | C 60 J                                | C 36 I                   | C 36 I        |

**Proces brušenja.** Presjek skidane strugotine ima i ovdje, kao i pri glodanju, klinast oblik, sl. 76. O veličini skidanog presjeka, odn. najvećoj debljinji strugotine, zavisi opterećenje i trajanje brusne ploče. Znači li  $d_1$  promjer brušenog predmeta u mm,  $d_2$  promjer brusne ploče u mm,  $t$  dubina brušenja u mm,  $v$  obodna brzina brusnog kola u m/s,  $w$  obodna brzina brušenog predmeta u m/s,  $N$  krupnoća zrna, tada je najveća debljina strugotine  $h_{\max}$ :

$$\text{za vanjsko brušenje} \quad h_{\max} = \frac{51w}{Nv} \sqrt{t \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)},$$

$$\text{za unutarnje brušenje} \quad h_{\max} = \frac{51w}{Nv} \sqrt{t \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right)},$$

$$\text{za ravno brušenje} \quad h_{\max} = \frac{51w}{Nv} \sqrt{\frac{t}{d_2}}.$$

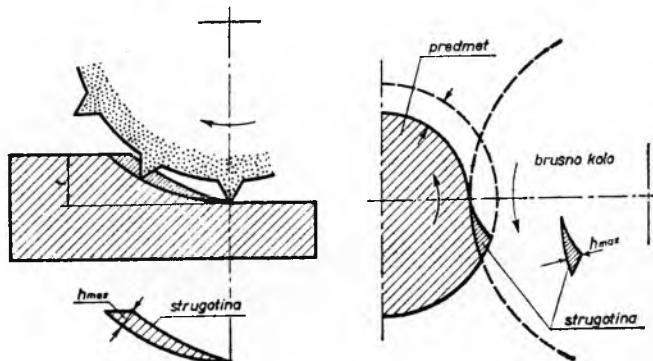
Satna količina strugotine, tj. učinak brušenja, razmjerna je dužini  $t$  i obodnoj brzini predmeta  $w$ , a obrnuto razmjerna obodnoj brzini brusnog kola  $v$ . Za opterećenje i trajanje brusne ploče povoljnije je povećati satnu količinu strugotine povećavajući dubinu  $t$  nego povećavajući  $w$  ili smanjujući  $v$ , jer — kako se vidi iz gornjih jednadžbi — povišenje dubine  $t$ , npr. na dvostruko, povisuje  $h_{\max}$ , a time i opterećenje brusnih zrnaca, samo za 41%, dok podvostručenje brzine  $w$  ili smanjenje brzine  $v$  na polovicu povisuje  $h_{\max}$  na dvostruku vrijednost. Iz gornjih se formula nadalje vidi kako je uputno raditi sa što većom brzinom  $v$ , jer time opada  $h_{\max}$ , a povisuje se broj zrnaca koja ulaze u rad u jedinicama vremena, tako da je i zatupljanje zrnaca manje. Istodobno s povećanjem brzine  $v$  može se povećati i dubina  $t$  ili brzina pred-

meta  $w$ ; to će povisiti produkciju, a  $h_{\max}$ , odnosno opterećenje zrnaca, može ostati isto. Povećanje promjera brusne ploče  $d_2$  snizuje debljinu  $h_{\max}$ , povisuje dužinu luka dodira i dužinu strugotine.

Previsoke se obodne brzine ne mogu odabirati zbog naprezanja od centrifugalne sile, a ploče s velikim obodnim brzinama djeluju i kao tvrde jer su sile na zrnca manja i ona teže ispadaju. Previsoke obodne brzine nisu prikladne jer je onda rad pojedinih zrnaca veći, strugotina krupnija, površina predmeta hrapavija, a ploče se brže troše. U tablici što slijedi navedene su za orientaciju obodne brzine za različite materijale.

| Vrsta rada                 | Brušeni materijal                    | Obodna brzina u m/s |
|----------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| Kružno i ravno<br>brušenje | čelik                                | 25                  |
|                            | sivi lijev                           | 20...25             |
|                            | aluminijske legure                   | 20...30             |
|                            | tvrdi metali                         | 8                   |
| Oštrenje alata             | čelik                                | 25                  |
|                            | tvrdi metal                          | 12...20             |
| Skidanje oruba             | čelik                                | 30...40             |
|                            | sivi lijev                           | 30                  |
| Sjećenje                   | čelik, sivi lijev,<br>obojeni metali | 45...80             |

Kako se vidi iz gornjih izraza za  $h_{\max}$ , morat će se brzina predmeta  $w$ , za neki zadani  $v$ , kretati unutar određenih granica da debljina  $h_{\max}$  ne bude prevelika, tj. da se brusno kolo prebrzo ne troši. S obzirom na to odabira se za vanjsko kružno brušenje čelika vrijednost omjera  $w/m = \frac{1}{125}$ , za sivi lijev  $\frac{1}{100}$ , za lake metale  $\frac{1}{50}$ . Za unutarnje kružno brušenje čelika je  $w/v = \frac{1}{50} \dots \frac{1}{80}$ , sivog lijeva  $\frac{1}{65}$ , a lakih metala  $\frac{1}{32}$ . Za ravno brušenje čelika je  $w/v = \frac{1}{50} \dots \frac{1}{80}$ , sivog lijeva  $\frac{1}{40} \dots \frac{1}{65}$ , a lakih metala  $\frac{1}{20} \dots \frac{1}{32}$ .



Sl. 76. Proces brušenja (shematski) i oblik strugotine pri ravnom i kružnom brušenju

Debljina skidanog sloja  $t$  uzima se za grubo brušenja 0,02...0,06 mm a za fino brušenje 0,005...0,01 mm. Posmak  $s$ , izražen pri kružnom brušenju u mm za 1 okret predmeta, zavisi o širini brusne ploče. Za grubo brušenje bira se  $s = \frac{2}{3} \dots \frac{3}{4}$  širine brusne ploče, a za fino brušenje  $s = \frac{1}{4} \dots \frac{1}{2}$  širine brusne ploče.

Sile koje djeluju na brusnu ploču pri vanjskom kružnom brušenju jesu: tangencijalna sila  $F_t$ , radikalna sila  $F_r$  i uzdužna (longitudinalna) sila  $F_l$  u smjeru suprotnom posmaku brusa. Veličina ovih sile raste s presjekom skidane strugotine. Za tangencijalnu silu je  $F_t = k t s w/v$ , gdje je  $k$  specifični otpor rezanja

zavisan o materijalu, ali i o veličini skidanog presjeka. Otpor  $k$  je daleko veći nego što je npr. pri glodanju zbog toga što je pri brušenju srednji presjek skidane strugotine znatno sitniji, a i zbog toga što mineralna zrnca brusne ploče djeluju kao relativno tup alat s negativnim prednjim kutom. Mjerenja pokazuju da je  $k 10\dots30$  puta veći pri brušenju nego pri glodanju.

Veličina tangencijalne sile  $F_t$  (u kp) pri vanjskom krušnom brušenju može se prema novijim pokusima odrediti iz jednadžbe:

$$F_t = C w^{0.7} s^{0.7} t^{0.6}$$

U njoj je  $C$  konstanta zavisna o vrsti brušenog materijala; za čelike i lijevano željezo iznosi  $2.0\dots2.2$ ,  $w$  obodna brzina predmeta u m/min,  $s$  uzdužni posmak predmeta u mm/okret predmeta,  $t$  dubina brušenja u mm. Izraz vrijedi za brusno kolo promjera 500 mm, širine 40 mm i obodne brzine 30 m/s.

Za samo skidanje strugotine potrebna je snaga

$$P_1 = F_t v.$$

Pri tom je  $F_t$  tangencijalna sila a  $v$  obodna brzina brusne ploče.

Za rotaciju brušenog predmeta potrebno je:

$$P_2 = F_t w,$$

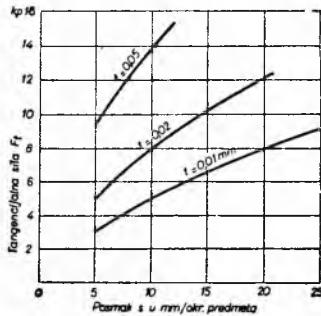
pri čemu je  $w$  obodna brzina predmeta. Za savladavanje uzdužnog posmaka potrebna je snaga

$$P_3 = F_1 s n_{pr},$$

gdje je  $F_1$  uzdužna sila a  $n_{pr}$  broj okretaja brušenog predmeta.

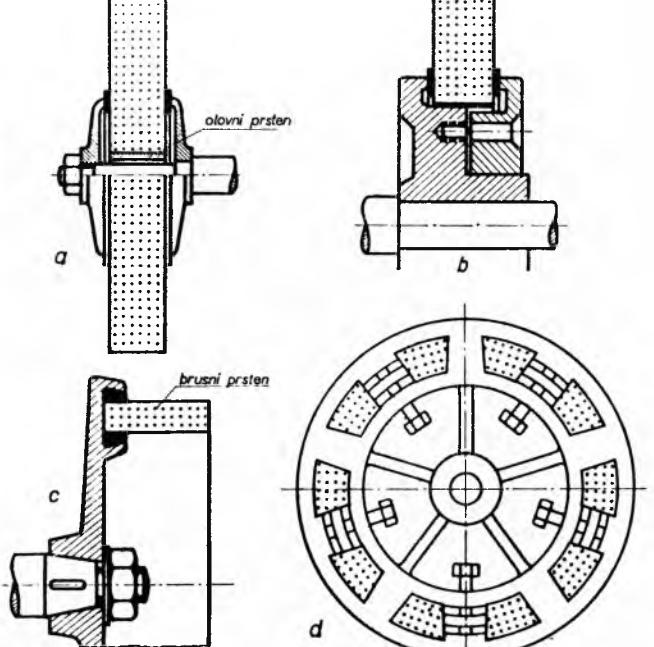
Sl. 77 pokazuje promjenu tangencijalne sile  $F_t$  s posmakom  $s$  i dubinom brušenja  $t$  prema pokusima. Razumljivo je da ovaj dijagram, kao i gornji izraz za silu  $F_t$ , vrijedi za brusnu ploču s oštrim zrcinicama. Zatupjela zrnca traže 2...3 puta veću silu  $F_t$ .

Količina skinute strugotine, izražena u  $\text{cm}^3$  u 1 minuti po 1 KS, iznosi za brušenje srednjeg čelika  $0.8\dots1.0 \text{ cm}^3/\text{min KS}$ , dakle  $\sim 20$  puta manje nego npr. za tokarenje istog čelika.



Sl. 77. Zavisnost tangencijalne sile od posmaka i dubine brušenja

a



Sl. 78. Učvršćivanje brusnih ploča

Potrošak korundnih brusnih ploča iznosi  $\sim 0,04$  kg po 1 kg skinute čelične strugotine, za karborundne ploče taj je potrošak oko dva puta veći. Tvrdo lijevanje željezo troši ploču oko tri puta više nego mehani sivi lijev.

**Rashladivanje pri brušenju.** Kako se relativno visoki specifični potrošak rada brušenja pretvara u toplinu, potrebno je predvidjeti hlađenje s pomoću prikladne tekućine koja će, osim toga, poslužiti i za odvod strugotine, a pri finoj obradi dat će i bolju glatkoću površine. Za čelik se uzima mlaz vode uz dodatak sode ili malo ulja, za aluminij se uzima petrolej ili smjesa petroleja i ulja. Količina rashladne tekućine mora biti to veća što su veće dodirne površine i brzina brusne ploče.

**Učvršćivanje brusnih ploča.** Na sl. 78 prikazano je nekoliko načina učvršćivanja brusnih ploča. Jedan od najčešćih načina za malene ploče pokazuje sl. 78a; za ploče većeg promjera i s većim prorptom u centru služi način prema sl. 78b. Između prirubnice i brusne ploče stavi se podloga od kartona, kože ili sličnog materijala da se dobije jednoliki pritisak na krtu ploču. Sl. 78c prikazuje učvršćenje prstenastih brusnih ploča na metalno kolo a sl. 78d pričvršćivanje segmentnih brusnih kola. Za nasadivanje na osovinu nalazi se u sredini ploče olovni prsten (sl. 78a) koji mora imati provrt za desetinku milimetra veći od promjera osovine.

LIT.: J. Dinnebier, Senken und Reiben, Berlin 1943. — Isti, Bohren, Berlin 1943. — I. Jagić, Alati za rezanje i savijanje na prešama, Zagreb 1947. — P. Stanković, Mašine alatke, Beograd 1948. — E. Matić, Alat i mašine alatke, Beograd 1949. — D. Mančić, Bušenje, Zagreb 1949. — E. Brödner, Zerspanung und Werkstoff, Essen 1950. — C. W. Hinman, Pressworking of metals, New York-London 1950. — H. Hilbert, Stanzereitechnik, München 1924. — G. Oehler i N. Kaiser, Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge, Berlin 1957. — A. H. Malov, Tekhnologija hladnog nitampona, Moskva 1958. — H. R. Zubricki, A. A. Ščiškin, D. L. Jodan, Obrađivanje metalova rezanim, Moskva 1958. — M. H. Kaušin, Rezanie metalova, Moskva 1958. — C. R. Hine, Machine tools for engineers, New York 1959.

J. Hr.

**ALATNI STROJEVI**, strojevi čijim posredstvom čovjek upravlja alatom u proizvodnom procesu. Njihova je zadaća da ostvare relativno kretanje alata prema izratku i da razviju snagu potrebnu za njegovo djelovanje. Preciznošću svojih pokreta i svojom snagom nadmašili su alatni strojevi čovjeka i omogućili suvremenim industrijskim načinom proizvodnju. Alatnim strojevima u užem smislu, koji se u ovom članku opisuju, smatraju se strojevi koji nose alat za obradu skidanjem strugotine.

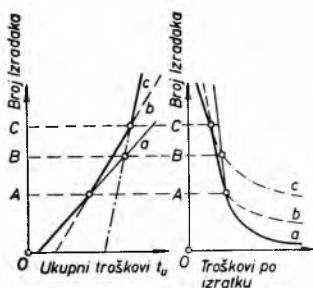
Postupak skidanja strugotine može se podijeliti prema relativnom kretanju alata na ove glavne vrste: bljanjanje, tokarenje, bušenje, glodanje, struganje i brušenje. Tablica 1 daje pregled ISO-kvaliteta koje se mogu postići pojedinim postupcima obrade, a tablica 2 daje pregled finoće obradene površine.

Tablica 1  
PREGLED DOSTIŽIVIH ISO-KVALITETA

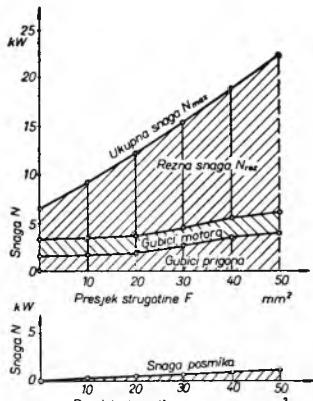
| Postupak obrade    | ISO-kvaliteti |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
|                    | 1             | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Bljanjanje         |               |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Tokarenje          |               |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Bušenje            |               |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Obodno glodanje    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Čeono glodanje     |               |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Struganje          |               |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Brušenje           |               |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Vlačno glačanje    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Titrajuće glačanje |               |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Lepanje            |               |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |

Izbor najpogodnijeg postupka ovisi o troškovima postupka i o broju izradaka. Troškovi  $t_u$  dijele se na čvrste troškove  $t_c$  i proporcionalne troškove  $t_p$ :  $t_u = t_c + t_p$ . Što su veći čvrsti troškovi  $t_c$  to mora biti i veći broj izradaka na raspolažanju da troškovi po jednom izratku budu što manji (sl. 1). Čvrsti troškovi  $t_c$  nastaju prilikom udešavanja alatnog stroja, a osim toga obuhvaćaju nabavne troškove samoga alatnog stroja i troškove izrade alata, naprava, steznih uređaja, mjerki i mjerila. Proporcionalni troškovi ovise o samim izracima. Ako su čvrsti troškovi pojedinoga postupka maleni, udio je proporcionalnih troškova u ukupnom trošku velik i zbog toga je takav postupak primjenljiv samo pri

obradi manjega broja izradaka. Na sl. 1 prikazani su ukupni troškovi triju postupaka a, b i c jedne te iste tehnološke obrade, u zavisnosti od broja obradenih izradaka, i troškovi koji otpadaju na pojedini izradak u zavisnosti od izabranog postupka i broja obrađenih izradaka. Vidi se da je do broja izradaka  $A$  ekonomski opravdan postupak a, od broja  $A$  do broja  $C$  dolazi u obzir postupak b, a kad je broj izradaka veći od  $C$ , ekonomski je opravдан postupak c. Krivulje desno pokazuju da su kod postupka a visoki proporcionalni troškovi  $t_p$ , a kod postupka c čvrsti troškovi  $t_c$ .



Sl. 1. Načinski prikaz troškova proizvodnje za tri razna postupka iste tehnološke obrade a, b, c u zavisnosti od broja izradaka



Sl. 2. Načinski prikaz podjele iskoristene snage  $N_{isk}$  u tokarilici u zavisnosti od presjeka strugotine  $F$

$$\text{a} \quad N_{max} = N_{neis} + N_{isk} = N_{neis} + N_{rez} + N_{jal}.$$

Tablica 2  
PREGLED FINOĆE OBRAĐENE POVRŠINE

| Postupak obrade | Dubina hraptavosti ( $\mu$ ) |     |     |     |    |    |    |    |    |   | Površinska nosivost (%) |
|-----------------|------------------------------|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|---|-------------------------|
|                 | 400                          | 250 | 160 | 100 | 60 | 40 | 25 | 16 | 10 | 6 |                         |
| Bljanjanje      |                              |     |     |     |    |    |    |    |    |   | 25...40                 |
| Tokarenje       |                              |     |     |     |    |    |    |    |    |   | 25...60                 |
| Bušenje         |                              |     |     |     |    |    |    |    |    |   | 25...40                 |
| Glodanje        |                              |     |     |     |    |    |    |    |    |   | 25...40                 |
| Struganje       |                              |     |     |     |    |    |    |    |    |   | 25...60                 |
| Brušenje        |                              |     |     |     |    |    |    |    |    |   | 10...80                 |
| Vlačno glačanje |                              |     |     |     |    |    |    |    |    |   | 10...40                 |
| Titrajuće „     |                              |     |     |     |    |    |    |    |    |   | 10...40                 |
| Lepanje         |                              |     |     |     |    |    |    |    |    |   | 60...90                 |
| Elek- erozija   |                              |     |     |     |    |    |    |    |    |   | 60...90                 |
| tro- poliranje  |                              |     |     |     |    |    |    |    |    |   | 40...80                 |
| brušenje        |                              |     |     |     |    |    |    |    |    |   | 40...80                 |

Ukupni stupanj djelovanja alatnog stroja  $\eta = N_{rez}/N_{max}$  raste ukoliko pri povećanju ukupnoj snazi  $N_{max}$  raste i udjel snage rezanja  $N_{rez}$  u ukupnoj snazi  $N_{max}$  (sl. 2). Stupanj djelovanja alatnih strojeva s kružnim glatnjacima kreće se oko 0,7. Alatni strojevi s prekinutim i reverzionim glavnim kretanjem (bljanjalice) imaju  $\eta \approx 0,3$ . Kod manjih tokarilica, bušilica i sličnih alatnih strojeva otpada na snagu posmaka  $\sim 0,1 N_{isk}$ ,