

Obrada metala

1 Teorija rezanja metala

1.1 Alati za rad skidanjem strugotine

Obradivanje skidanjem strugotine, kao np.: rezanje, tokarenje, struganje, glodanje, brušenje, provlačenje, grecanje, vrši se raznim alatima. Jednom to može biti **nož** s jednom oštricom (tokarenje, blanjanje), drugi puta **svrdlo** koje na sebi nosi dvije osnovne oštrice, treći puta alat sa više oštrica koje odjednom skidaju strugotinu mora, kao i ostali zahvatiti, odgovarati nekim zakonitostima. Te zakonitosti prvi je počeo proučavati amerikanac F.W.Taylor krajem prošlog stoljeća.

Svaki alat, koji koristimo pri skidanju strugotina, kao što smo vidjeli, sastoji se od jedne ili više oštrica. To nas dovodi do zaključka, da analogijom tu zakonitost prenesemo na sve druge.

Osnovna oštrica alata za rezanje bazira se na principu klina. Znači, moramo proučiti djelovanje klina. Zbog toga mi ćemo se zadržati na jednom alatu, a to je **tokarski nož**, te ćemo na njemu proučiti sve.

1.2 Geometrijski oblici oštrice alata i elementi oštrine

Rekli smo da je temeljni oblik svakog alata za rezanje klin. To vrijedi kod dljeta, kod oštrice škara, kod turpije, tokarskog noža, glodala itd.

Prvo da se upoznamo općenito s tokarskim nožem i njegovim elementima rezanja i plohama.

Osnovni elementi su:

- glavna oštrica
- pomoćna oštrica
- noža

Od površina koje trebamo razlikovati na nožu su

- prednja površina
- stražnja površina
- pomoćna stražnja površina

Prije nego što upoznamo detalje noža, spomenimo i sile koje se javljaju na nožu. To su:

- P - vertikalna sila- sila protivna rezanju
- P_v - sila posmaka - sila protivna uzdužnom posmaku
- P_r - natražni pritisak - sila protivna poprečnom posmaku, a nastoji otisnuti nož od predmeta

Sada ćemo se upoznati malo detaljnije s jednim nožem za tokarenje, nožem koji se najčešće koristi.

Analizirajući presjek x-x razlikujemo:

- α - stražnji ili slobodni kut - između stražnje površine i površine rezanja.
- β - kut oštrenja ili kut klina - kut između prednje i stražnje površine.
- γ - prednji kut, kut između prednje površine i okomice na površinu rezanja. Proizlazi da je $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$
- δ - kut rezanja - on je suma $\alpha + \beta$.
- ϵ - kut šiljka noža ili čeon kut, to je kut između stražnje i pomoćne stražnje površine.
- κ - kut namještanja noža je kut između površine rezanja i glavne oštrice.
- λ - kut nadvišenja - kut između glavne oštrice i površine u ravnini rezanja koja proizlazi kroz vrh noža.
- τ - natražni kut - koji se pojavljuje kod noževa za odrezivanje.

Evo nekoliko osnovnih primjera brušenja tokarskih noževa.

Položaj noža prema tokarenom predmetu može također djelovati na promjene osnovnih kuteva rezanja α , β , δ , dok nam kut β ostaje konstantan

Kod unutarnjeg tokarenja situacija je obratna. To nas upućuje da je važno paziti kako je postavlja nož kod obrade.

1.3 Proces rezanja i formiranja strugotine

Prilikom skidanja strugotine sudjeluje niz faktora koji definiraju oblik strugotine. U te faktore možemo svrstati:

- vrstu materijala koji se obrađuje
- vrstu materijala od kojeg je nož
- brzinu rezanja i
- presjek strugotina

Postoje tri osnovna tipa strugotine:

1. Kidana - lomljena strugotina

Materijal se najprije sabije na prednjoj površini noža, a zatim se zbog povećanog pritiska odlomi. Nakon toga proces se opet ponavlja.

Kidana - lomljena strugotina nastaje kada je prednji kut manji od 10° , a zatim kod tvrdih materijala i kada se radi s preniskim brzinama rezanja. U tako formiranoj strugotini ne nastaju plastične deformacije. Oštrica noža se grije do 600°C i to

nejednoliko. Kako se pritisak mijenja, mijenja se i zagrijavanje oštrice što dovodi do velikog kolebanja temperature. Kod takovog obnlika strugotine podmazivanje noža mnogo ne pomaže. Takav oblik strugotine javlja se kod ljevanjog željeza.

2. Rezana ili odrezna strugotina

Ovakav oblik strugotine nastaje kod prednjeg kuta $\gamma < 17^\circ$ i kod male dubine rezanja. Taj oblik strugotine je prijelazni oblik od kidane na trakastu strugotinu. Oblik strugotine je povoljan jer nije preduga i ne smeta pri radu.

3. Trakasta ili ljuštena strugotina

Ovakav oblik strugotine nastaje kod velikih brzina rezanja, male dubine i malog posmaka i kod prednjeg kuta $\gamma < 30^\circ$. Materijal se tari o prednju površinu noža i odlazi kao neprekinuta strugotina. Pritisak na nož je jednolikiji, što daje i jednoličniju temperaturu oštrice od približno 200°C . Kolebanje temperature noža su u granicama od 20° . dobrim podmazivanjem oštrice pri rezanju može se produžiti vijek rada noža, jer takovo podmazivanje pogoduje stvaranju povišene oštrice koja štedi oštricu. To svojstvo nam veoma važno kod rada na automatima.

1.4 Hrapavost obrađene površine

Kvaliteta obrađene površine ovisi o režimima rada i o izboru noža. Razlikujemo dvije osnovne forme noževa i to:

- noževi za grubu obradu
- noževi za finu obradu

Noževi za grubu obradu moraju biti izabrani tako da omoguće maksimalno moguće skidanje strugotina. Sa takovim noževima možemo postići prosječnu hrapavost $9-11\mu\text{m}$. Noževi za finu obradu već imaju posebne oblike raznih oštrica, te uz dobro izabrane režime rada mogu dati kvalitetu površine of $6-9\mu\text{m}$. Općenito uzevši, tokarski nož za vanjsku obradu možemo prvi moment podijeliti na lijeve i desne noževe. Dali je nož lijevi ili desni oderđujemo na sljedeći način. Uzmemo ga u ruku tako, daoštrica bude okrenuta prema našem tijelu i to prema gore. Strana na kojoj se nalazi glavna rezna oštrica vrijedi kao oznaka (lijevi, desni).

Druga podjela noževa za tokarenje može biti:

- noževi za vanjsko tokarenje.
- noževi za unutarnje tokarenje
- razni fazonski noževi za vanjsko ili unutarnje tokarenje a tu spadaju i noževi za rezanje raznih vrsta nareza, raznih oblika utora itd.

Pregled noževa za vanjsko tokarenje

1. - desni savijeni nož za čeonu grubo obrađivanje
2. - desni savijeni nož za čeonu obrađivanje uglova

3. - desni ravni nož za uzdužno grubo obrađivanje
4. - desni savijeni nož za uzdužno grubo obrađivanje
5. - nož za fino obrađivanje, šiljati
6. - nož za fino obrađivanje
7. - nož za utore
8. - nož za odrezivanje
9. - ravni nož za poprečno tokarenje

Već smo više puta spominjali termine **dubina**, **posmak**, **presjek strugotine**. Svi ovi termini, veoma se često koriste, kada se govori o skidanju strugotina. Da se sada upoznamo i s tim tako važnim podacima.

- Dubina rezanja - t - je dubina prodiranja noža u materijal i mjeri se u milimetrima
- Posmak noža - s - mm/okretaj - to je pomak noža duž osi obrađivanog predmeta za svaki okretaj
- Presjek strugotine - f - mm^2 - možemo ga smatrati umnoškom posmaka s i dubine rezanja t ; to bi bio teoretski presjek. Stvarni presjek je manji za neskinuti ostatak, koji ovisi o posmaku noža, o kutevima glavne i sporedne oštrice, te o zaobljenosti vrha noža.

Analizirajući sliku, veličina neskinutog ostatka naglo raste s porastom posmaka, a isto tako je vidljivo da naglo pada s porastom zaobljenja vrha noža. Jedan od oblika noža koji ostavlja veoma mali ostatak je oblik koji predlaže Taylor. Zbog velike zaobljenosti vrha ostatak je minimalan. No jako zaobljeni noževi imaju cca 15% veće sile rezanja od običnih noževa. Specifična opterećenja duž ovih oštrica su dosta nejednolika. Zbog takove forme otežana je proizvodnja takovih noževa i međufazno prebrušavanje što dovodi do rijeđe primjene ovakvih oblika noževa.

Sile na nožu

U početku smo se već upoznali sa silama, koje se javljaju na nožu. Kod toga razlikujemo:

- P - vertikalnu silu - silu protivnu rezanju
- P_v - sila posmaka - sila protivna uzdužnom posmaku
- P_r - natražni pritisak - sila protivna poprečnom posmaku nastoji otisnuti nož od predmeta

Za nas je najinteresantnija vertikalna sila P , jer je ona znatno veća od drugih dviju sila. Odprilike možemo uzeti da je omjer sila na nožu $P : P_v : P_r = 5 : 2 : 1$. Iz toga je vidljivo da nam dimenzioniranje drška noža dovoljno uzeti samo vertikalnu silu P .

Na veličinu vertikalne sile djeluju mnogi faktori. Kao najutjecajnije smatramo čvrstoću obrađivanog materijala i presjek strugotine. Povezanost ovih dviju varijabli prikazat ćemo u dijagramu. Takova zakonitost sile P navodi nas da ju možemo brzo i jednostavno odrediti formulom:

$$P = A \cdot f \cdot \sigma_z . \quad (1)$$

Gdje je A faktor proporcionalnosti ovisan o materijalu, f presjek strugotine ($s \cdot t$) i σ_z čvrstoća materijala na vlak.

Eksperimentalno su dobiveni podaci za faktor proporcionalnosti i on se kreće:

- $A = 2,5 - 3,5$ za čelične materijale
- $A = 4,5 - 5,5$ za lijevano željezo
- $A = 3 - 4$ za A8 i A8-legure.

Na veličinu sile rezanja ne utječe samo čvrstoća materijala i presjek strugotine nego još i

- oblik presjeka strugotine koju može imati različite omjere posmaka i dubine rezanja, a može i oštrica biti zaobljena pa je presjek skidane strugotine duž oštrice raznolik.
- o kutu klina - oštrenja β
- o kutui namještanja noža κ
- o brzini
- o hlađenju i mazanju - kod lomljene strugotine sistemom mazanja nemožemo smanjiti silu.
- o unutaranim naprezanjima u materijalu koji obrađujemo.

Snaga potrebna za stvaranje strugotine, troši se najvećim dijelom na rada deformacije strugotine (75%), zatim na rad rezanja (15%) i na rad trenja (10%). Da bi sve ove faktore uzeli u obzir pri određivanju sile rezanja koristimo se formulom:

$$P = f \cdot k_s , \quad (2)$$

gdje je f presjek strugotine, a k_s koeficijent otpora rezanja. Koeficijent k_s određuje se eksperimentalno ili približno prema nekim formulama. Za točno definiranje sile rezanja pri nekim uvjetima uz odabrane režime i oblik noža, moguće je jedino saznati kroz eksperimente.

1.4.1 Radnja rezanja

Kod uzdužnog tokarenja, od triju sila koje se pojavljuju na nožu potrebno je savladati vertikalnu silu P i horizontalnu silu posmaka P_v . Da bi odredili radnju rezanja uz poznavanje tih sila trebamo znati i brzinu rezanja v i brzinu posmaka v_s (m/min). Iz tih podataka dobivamo

$$N_{rez} = P \cdot \frac{v}{60 \cdot 75} + P_r \cdot \frac{v_s}{60 \cdot 75} \quad (3)$$

Pošto je P_r 2 do 3 puta manja od P a v_s i preko 100 puta manja od v , možemo drugi član ove formule zanemariti, te nam preostaje

$$N_{rez} = \frac{P \cdot v}{4500} \quad (4)$$

Da bio saznali potrebnu snagu za vršenje tokarenja, potrebno je uz radnju savladati i ostale otpore koji se javljaju u tokarskom stroju. Mjerenja su pokazala da je ukupna potrebna snaga stroja za 50% veća od radnje rezanja što nam daje

$$N_{tot} = 1.5 \cdot N_{rez} = \frac{P \cdot v}{3000} \quad (5)$$

1.4.2 Mjerenje sila na noževima

Prva podjela uređaja kojima mjerimo sile na nožu su na mehaničke uređaje i elektroničke metode. Mehanički uređaji za mjerenje sile sastoje se od ploče, poluge ili pera, na koji djeluje sila. Zbog djelovanja vanjske sile dolazi do elastične deformacije odnosno do pomaka iz nultog položaja. Veličina pomaka mjerimo raznim instrumentima (komparatorima ili manometrima) koji su baždareni da pokazuju veličinu sile.

Elektroničke metode registriranja mogu biti ostvarene na više načina:

1. **Piezoelektroničkim** - prijenos sile kvarcne kristale u kojima se javlja elektrostat-ski naboj čiju količinu mjerimo. Veličina elektrostatskog naboja proporcionalna je veličini djelujuće sile na kristale.
2. **Kapacitivnim** - djelovanje vanjske sile izaziva pomake koji se prenose neki elastični ili cilindrični kondenzator. Kondenzator je uključen u krug struje, a njegovom deformacijom mijenja se jakost struje čiju promjenu registrira galvanometar, baždaren u tu svrhu kilogramima.
3. **Induktivni** - pod djelovanjem vanjske sile dolazi do promjene zračnog rasporeda a to mijenja jakost inducirane struje u sekundarnoj zavojnici. Mjerenjima te promjene dolazimo do veličine sile koja je izazvala promjenu zračnog rasporeda.
4. **Magnetoelastični** - način se temelji na jakom utjecaju mehaničkih sila na krivulju magnetiziranja magnetoelastičnih materijala. Kroz svitak žice teče izmjenična struja, čija jakost ovisi o priključenom naponu, električnom otporu žice a i promjene magnetskih svojstava jezgre djeluju na veličinu struje čije promjene registriramo na instrumentima.

5. **Elektrolitički način** - električna vodljivost nekog elektrolita ovisi o specifičnom otporu samog elektrolita i o presjeku sloja elektrolita kroz koji prolazi struja. Vanjska sila mijenja presjek sloja, vodljivog elektrolita a time povećava njegov otpor koja protiče elektrolitom. Ampermetar registrira promjenu jakosti struje koja je neka funkcija sile.
6. **Elektrootporni način** - iz fine žice velikog otpora ($100 - 1000 \Omega$) napravljene su mjerne trake. Ljepljenjem tih traka na mjesta koja će preživjeti deformacije zbog djelovanja vanjskih sila moći ćemo saznati veličinu sile mjereći promjene jakosti struje koja protiče kroz mjernu traku. Zbog deformacija predmeta na koje su zaljepljene mjerne trake deformirat će se žica u mjernim trakama, što opet izaziva promjenu otpora žice koju registrira instrument.

Danas u principu najviše koriste metode električnog mjerenja jer imaju niz prednosti a najvažnija je jednostavnost.

1.5 Toplina pri procesu rezanja

Nastanak topline pri procesu skidanja strugotine je višestruka:

1. **Mehanički rad** - pretvara se djelomično u toplinu zbog međusobnog trenja čestica strugotina, kod formiranja strugotine i zbog kidanja strugotine.
2. **Toplina koja se stvara zbog trenjastrugotine o oštricu noža** - porizvedena toplina ovisi o
 - brzini rezanja
 - debljini strugotine
 - materijala koji se obrađuje
3. **Strugotina odvodi** sa sobom količinu topline koja proporcionalna presjeku strugotine. Jasno da tu vezano odvođenje topline i s brzinom rezanja.
4. **Nož odvodi** u principu uvijek iztu količinu topline, i ima zbog svojih dimenzija, konstantni toplinski kapacitet.
5. **Obradjeni predmet** se zbog preuzetog dijela topline obično rastegne, odnosno promjeni svoje dimenzije. Zbog toga se predmet mora mjeriti na temperaturi okoline.

Toplina koja se prenosi na nož i diže temperaturu noža nepovoljno nam djeluje na izdržljivost oštrice. Iz dijagrama je vidljivo da je izdržljivost oštrice, tj. vrijeme rezanja u minutama, manje čim je temperatura oštrice veća.

Za razne tipovealatnih strojeva, poželjno nam je da nam neki nož izdrži određeno vrijeme rada s nekim optimalnim režimima. Ti zahtjevi su inicirali najrazličitije zahvate za pronalaženje materijala koji će moći izdržati sve teže režime rada. to je dovelo do otkrivanja materijala koji posjeduju velike mogućnosti i kod vrlo visokih temperatura. Tako možemo ukratko reći da su najpoznatiji materijali iz kojih se rade alati za skidanje strugotina:

1. **Alatni čelici** - osnovna im je karakteristika da u sebi imaju 1 – 1,45 % ugljika kad se na 700 – 850°C a napuštaju kad dođu na 180 – 250°C. Noževi od alatnog čelika se lako i dobro obrađuju a daje da su jeftiniji.
2. **Brzorezni čelici** - su legirani čelici koji u sebi sadrže volframa (W), kroma (Cr), vanadija (V) i molibdena (Mo). Kod kaljena prvo se polagano grije do crvenog žara a onda naglo do 1250 – 1350°C. Napušta se na temperaturu 200 – 270°C ili 575 – 600°C što ovisi o postotcima legiranih elemenata.
3. **Stelit** - je us tvarnosti tvrđa slitina koja omogućava korištenje još većih brzina rezanja od brzoreznih čelika. Stelit ima približno sastav od 40 – 50 % Co, 25 – 35 % Cr, 12 – 20 % W, 0,5 – 3 % C.
4. **Widia** - (wie Diamant) - materijal koji omogućava daljnje povećanje režima rada na alatnim strojevima. Za razliku od stelita koji se dobiva ljevanjem, widia se dobiva tako da se prašak volframova titana i molibdena s nekim vezivnim sredstvom (običnom kobaltom ili niklom) veže. Takvoj smjesi se prešanjem daje određeni oblik i zati se peće. Jedno pećenje je na 1400°C a drugo na 1900°C. Obradivati pločice možemo jedino brušenjem.
5. **Dijamanti** - noževi napravljeni od dijamanta su noževi koji omogućavaju maksimalne režime rada. Korištenje dijamantnih noževa je opravdano kod fine obrade slitina, papira, gume, umjetinih masa bronce i mesinga. Ne siplati se koristiti za nekalkjene čelike. Možemo približno uzeti da je odnos cijena između brzorezanog čelika, trvde slitine i dijamanta 1 : 5 : 150. Omjer brzine rezanja je 1 : 6 : 10, a dozvoljene temperature rezanja 1 : 1,35 : 3.

Na kraju izlaganja o temperaturama kod skidanja strugotina moramo još spomenuti da postoji čitav niz rashladnih sustava koja jednom odvede dio topline a kroz to omogućavaju povećanje režima rada. Uz odvođenje topline rashladno sredstvo omogućava dobivanje glatke površine nakon obrade, pospješuje odvođenje strugotine. Kao najpoznatije rashladno sredstvo je **emulzija** mlječna otopina sapuna i mineralnog ulja. Osim toga koriste se razne vrste ulja koja smanjuju trenje, dok se kod obrade ljevanog željeza za hlađenje noža koristi komprimirani zrak koji ujedno odpuhuje lomljenu strugotinu.

1.6 Ekonomske brzine rezanja

Kod skidanja strugotina poželjno nam je da nam brzina rezanja bude što veća, jer nam to omogućava produktivniju proizvodnju a kroz to i ekonomičniju proizvodnju. Velike brzine rezanja, izazivaju brže zatupljenje noža. pa je potrebno češće prebrušavanje i ponovno namještanje noža.

Povezanost troškova obrade i troškova namještanje alata u ovisnosti brzine rezanja možemo prikazati u dijagramu. Iz dijagrama je vidljivo da postoji samo jedna ekonomska brzina rezanja za neki alat. Tako se za to koriste noževi od brzorezanog čelika. Ekonomska brzina smatra onu brzinu rezanja kod koje alat između dva prebrušavanja izdrži 60 okr/min, a označava se s v_{60} .

Za složenije alate, za koje je vrijeme prebrušavanja znatno veće a često prebrušavanje smanjuje vijek trajanja alata odabiru se kao ekonomske brzine v_{240} i v_{480} . U tu grupu alata ulaze fazonski noževi, glodala i drugi.

I kod jednostavnijih alata koji se doduše brzo prebrušavanju ali je njegovo namještanje skopčano s većim gubitkom vremena oko ponovnog namještanja na stroj, često se koriste brzine v_{480} . to se odnosi na alate koji se koriste na automatskim strojevima.

Kod svrdala se ekonomskom brzinom smatra ona brzina, kod koje svrdlo može izbušiti ukupno 2000 mm rupa. Ta se brzina označava s v_{2000} .

2 Blanjanje i dubljenje

Blanjanje je obrada predmeta skidanjem strugotina s jednim nožem. Međusobno pomicanje noža i predmeta je po pravcu. Kod toga razlikujemo dvije mogućnosti međusobnog gibanja noža i predmeta:

1. Nož vrši glavno kretanje a predmet vrši posmak. Takav način rada primjenjuje se kod kratkohodnih blanjalica ili šepinga. Maksimalna dužina hoda noža je fo 700 mm.
2. Predmet vrši glavno kretanje a nož vrši posmak. Predmet je učvršćen na stolu koji se gibapo saonicama, a nož je učvršćen na zasebnoj gredi po kojoj ostvari je posmak. Takav način međusobnog gibanja noža i predmeta primjenjuje se kod dugohodnih blanjalica, a točnost obrade je bolje nego kod kratkohodnih blanjalica.

Kod glavnog kretanja blanjalica razlikujemo:

- Radni hod - kad anož skida strugotinu
- Jalovi hod - kada se nož vraća

U grupu blanjlca spada i vertikalna blanjalica, od koje je gibanje noža vertikalno i to

- odozgo na dolje - glavno kretanje - radni hod
- odozdo na gore - glavno kretanje - jalovi hod
- posmak stola može biti u ravnini ili po luku.

Postoje i specijalne vrste blanjalica za izradu zupčanika. Kao najpoznatije tehnologije blanjalica zupčanika su

- FELLOW postupak - gdje je alat u obliku zupčanika.
- Maagov postupak - gdje je alat u obliku zubne letve.

2.1 Kratkohodna blanjalica - šeping

Jedan od klasičnih strojeva za obradu malih predmeta, koji ne traže naročito kvalitetne površine je šeping. Razlikujemo dvije vrste pogonskih uređaja za ostvarivanje glavnog kretanja pri šepingu i to:

- pogon na ekscentar
- hidraulički pogon

Princip rada pepinga s pogonom na ekscentar. Pogon je ostvaren preko elektromotora, remenice i zupčanika do kulisnog mehanizma. Na tom mehanizmu možemo ostvariti veći ili manji ekscentritet kulisnog kamena. Na taj način dobivamo veći ili kraći pomak glave na koju je učvršćen nož. Područje pomicanja glave može se posebno regulirati. Posmak predmeta je osiguran preko drugog kulisnog mehanizma poji je povezan s glavnim. Nosač noža može ostvariti vertikalno ručno pomicanje, a može se i nagnuti pod izvjesnim kutom za obradu kosina. Radni stol, na kome je smješten predmet može se pomicati ne samo horizontalno, kao nastajanje posmaka, nego i vertikalno pomoću zupčastog prijenosa. Zbog svojeg tereta stol se obično ukruti posebnim podpornjem. Dijagram brzina kod kulisnog mehanizma izgleda ovako. Kulisa se kreće od jedne tangente na kružnicu do druge i onda nazad. Na taj način ostvaruje dužina hoda L . Zbog konstantne kutne brzine ω , brzine gibanja glave šepinga od 1 prema 2 po kutu α raste od 0 do Vr_{max}