

Projektiranje tehnoloških procesa za izradu bubnja mjenjača

Šola, Iva

Undergraduate thesis / Završni rad

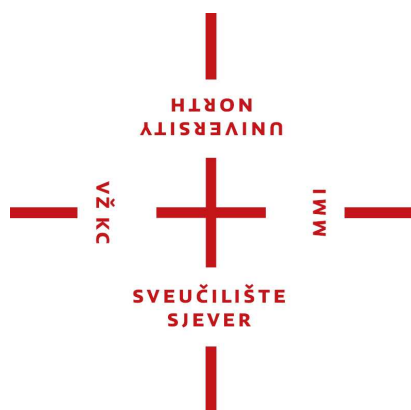
2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:047122>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

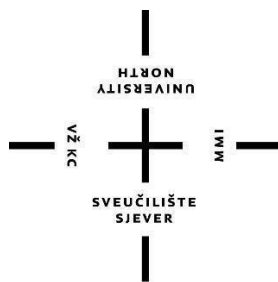
Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





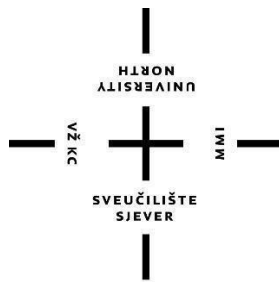
**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 385/PS/2022

**Projektiranje tehnoloških
procesa za izradu bubnja
mjenjača**

Iva Šola, 4198/336

Varaždin, rujan 2022. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 385/PS/2022

Projektiranje tehnoloških procesa za izradu bubnja mjenjača

Student

Iva Šola, 4198/336

Mentor

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj.

Varaždin, rujan 2022. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo		
PRISTUPNIK	Iva Šola	JMBAG	4198/336
DATUM	23.08.2022.	KOLEGIJ	Alatni strojevi
NASLOV RADA	Projektiranje tehnoloških procesa za izradu bubnja mjenjača		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Technological processes design for production of a gearbox drum		

MENTOR	dr. sc. Matija Bušić	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc.dr.sc. Zlatko Botak, predsjednik povjerenstva		
	2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva		
	3. dipl. ing. stroj. Marko Horvat, član povjerenstva		
	4. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, zamjenski član povjerenstva		
	5. _____		

Zadatak završnog rada

BROJ	385/PS/2022
OPIS	

U završnom radu potrebno je prikazati proces projektiranja tehnoloških procesa koji se koriste u izradi bubnja mjenjača. Opisati tijek i razradu tehnološke pripreme proizvodnje te važnost odabira prikladnog alata i režima obrade za postizanje optimalnog tehnološkog procesa. Na temelju dostupne literature opisati tehnološke procese i alate koji se koriste u proizvodnji. Opisati odabir oblika i vrste polaznog materijala sirovca te opisati podjelu i obradivost različitih materijala koji se uobičajeno obrađuju obradom odvajanjem čestica. Opisati tehnološke operacije i zahvate koji se koriste u proizvodnji bubnja mjenjača. Navesti izračune parametara obrade i opisati alate koji se koriste. Na kraju donijeti zaključak o odabranom slijedu proizvodnje, korištenim tehnologijama te samoj ekonomičnosti proizvodnje. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu te eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

29. 08. 2022.

POTPIŠ MENTORA

M. Bušić





IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnog rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, IVA ŠOLA (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom PROJEKTIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA ZA IZRADU BUBNJA MJENJACA (*upisati naslov*) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(*upisati ime i prezime*)

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, IVA ŠOLA (*ime i prezime*) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom PROJEKTIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA ZA IZRADU BUBNJA MJENJACA (*upisati naslov*) čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(*upisati ime i prezime*)

(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 8. Pravilnika o završnom i diplomskom radu na studijskim programima Sveučilišta Sjever, izjavljujem da sam ovaj rad napravila samostalno koristeći navedenu literaturu i stečena znanja tijekom studija.

Zahvaljujem se svome mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću, dipl. ing. stroj., na svojoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovoga rada, ali i tijekom studiranja.

Zahvaljujem se i svome mentoru stručne prakse g. Roku Kosu, dipl. ing. stroj., ali i svim kolegama na ukazanoj strpljivosti, susretljivosti i nesebičnim savjetima.

Ipak, najstrpljiviji i najnesebičniji su bili moji roditelji i bližnji kojima se ovim putem posebnom zahvaljujem.

Iva Šola

Sažetak

Zadatak pripreme proizvodnje je da prema procijenjenim potrebama tržišta planiranu ili ugovorenu proizvodnju pripremi tako, da omogući njenu realizaciju u predviđenim tehničkim i ekonomski uvjetima. Ovaj završni rad, u sklopu projektiranja tehnološkog procesa za bubanj mjenjača, ponajprije naglašava važnost odabira prikladnog alata i režima obrade za postizanje optimalnog tehnološkog procesa. Dakle, bavi se čimbenicima koji utječu na vijek trajanja alata, ali i odabirom prikladnog materijala i geometrije alata, materijala obratka, parametrima rezanja (brzina rezanja, brzina posmaka i dubina rezanja), tekućinama za hlađenje i podmazivanje, karakteristikama alatnih strojeva i vještinama operatera. Svi promatrani čimbenici su u sklopu tokarenja, kao najzastupljenije obrade odvajanjem čestica.

Ključne riječi: optimalni tehnološki proces, alati, režimi obrade, vijek trajanja alata

Abstract

The task of the preparation of production is to prepare the planned or contracted production according to the assessment of the production needs of the market in such a way as to enable its realization in the foreseen technical and economic conditions. This final paper, as part of the design of the technological process for the gearbox drum, primarily emphasizes the importance of choosing a suitable tool and processing regime to achieve an optimal technological process. Thus, it deals with factors that affect tool life, but also with the selection of suitable material and tool geometry, workpiece material, cutting parameters (cutting speed, feed rate and depth of cut), cooling and lubricating fluids, machine tool characteristics and operator skills. All the observed factors are part of turning, as the most common particle separation processing.

Key words: optimal technological process, tools, processing regimes, tool life

Popis korištenih kratica

CAD – oblikovanje s pomoću računala (eng. computer – aided design)

CAPP – planiranje procesa podržano s računalom (eng. computer-aided process planning)

CAM – proizvodnja uz pomoć računala (eng. computer – aided manufacturing)

HSS – brzorezni čelik (eng. high speed steel)

SHIP – sustav za hlađenje i podmazivanje

BUE – izgrađeni rub (eng. built-up edge)

ISO – Međunarodna organizacija za standardizaciju

HRSA – legure otporne na toplinu (eng. heat resistant alloys)

CBN – borov nitrid (eng. cubic boron nitride)

PCD – polikristalni dijamant (eng. polycrystalline diamond)

HBW – H-tvrdoća (eng. hardness), B-Brinell i W-materijal utiskivača (volframov karbid)

HRC – tvrdoća po Rockwellu po skali C

Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

Oznaka	Jedinica	Značenje
A	%	istezljivost
HBW	/	tvrdća po Brinellu
R_m	MPa	vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	konvenc. granica razvlačenja
R	mm	polumjer vrha alata
v	m/min	brzina rezanja
T	min	vijek trajanja alata
f	mm/okr	posmak alata
a_p	mm	dubina rezanja
VB	mm	širina bočnog trošenja na alatu
P_c	kW	potrebna snaga
k_c	N	specifična sila rezanja
η	%	učinkovitost stroja
LE	mm	duljina rezanja
KAPR	°	ulazni kut rezanja
n	min ⁻¹	brzina glavnog vretena
D_m	mm	vanjski promjer obratka
d	mm	unutarnji promjer obratka

Sadržaj

1.	Uvod	1
2.	Priprema proizvodnje	4
3.	Projektno-konstruktivska priprema proizvodnje.....	6
4.	Tehnološka priprema proizvodnje.....	7
5.	Polazni materijal	9
5.1.	Otpad tijekom obrade.....	11
5.2.	Podjela materijala prema obradivosti	14
5.2.1.	ISO P - čelik	14
5.2.2.	ISO M – nehrđajući čelik	15
5.2.3.	ISO K - Lijeveno željezo	16
5.2.4.	ISO N - Obojeni metali i legure.....	18
5.2.5.	ISO S – Superlegure (HRSA).....	18
5.2.6.	ISO H – Kaljeni čelik	19
5.2.7.	Pod grupiranje materijala izratka	19
6.	Tehnološke operacije i zahvati	20
6.1.	Operacija 10.....	23
6.2.	Operacija 20.....	25
6.3.	Operacija 30.....	28
6.4.	Operacija 40.....	39
6.4.	Operacija 50.....	41
7.	Karakteristike stroja	43
8.	Odabir alata	45
8.1.	Oblik pločice	46
8.2.	Stražnji kut pločice	48
8.3.	Lomljenje strugotine	48
8.4.	Veličina pločice.....	48
8.5.	Radijus vrha pločice.....	50
9.	Čimbenici koji utječu na vijek trajanja reznih alata.....	51
9.1.	Mehanizmi trošenja.....	51
9.2.	Parametri obrade	54
9.3.	Kutovi na reznim rubovima	58
9.4.	Oblici trošenja alata	60
9.4.1.	Bočno trošenje	60
9.4.2.	Kratersko trošenje.....	61
9.4.3.	BUE (izgrađeni rub).....	61
9.4.4.	Zarežno trošenje	61
9.4.5.	Plastična deformacija	62
9.4.6.	Toplinske pukotine	62
9.4.7.	Krhotine.....	62
9.4.8.	Zabijanje strugotine	63
9.4.9.	Lom	63

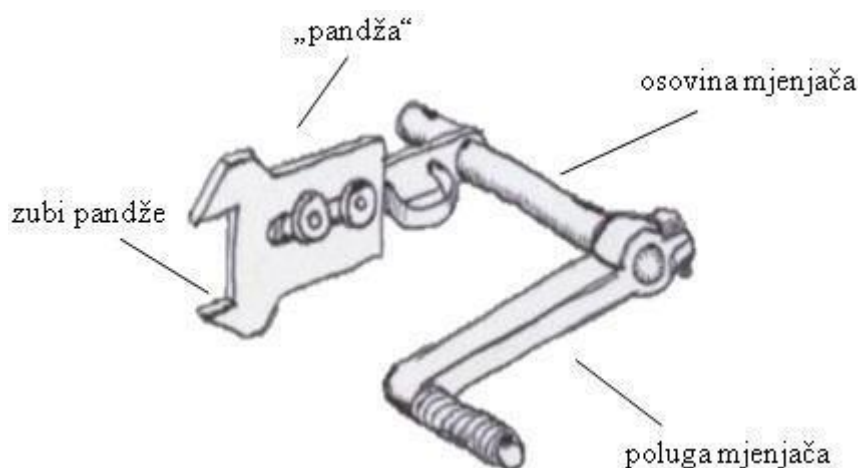
10. Materijal alata	64
10.1. Brzorezni čelik (HSS)	67
10.2. Tvrdi metal	67
10.3. Keramika	68
10.4. Polikristalni dijamant	68
10.5. Kubični bor nitrid	69
10.6. Kermet	69
11. Režimi obrade	70
11.1. Određivanje dubine rezanja i broja prolaza	71
11.2. Određivanje posmaka	72
11.3. Određivanje brzine rezanja	72
11.4. Preporuke proizvođača	74
12. Zaključak	76
13. Literatura	77
Popis slika	79
Popis tablica	81

1. Uvod

Pri projektiranju tehnološkog procesa definira se slijed postupaka i određuju se režimi obrade kako bi se iz polaznog materijala, slabije kvalitete dobio gotov proizvod viših upotrebnih vrijednosti pri čemu se mijenja oblik, dimenzije, sveukupni estetski izgled i unutarnja svojstva materijala obratka. Projektiranje u principu daje odgovor na pitanja vezana za sam tijek proizvodnje, među kojima su najvažnija: vrsta i redoslijed obrade, na kojim se obradnim i tehnološkim sustavim vrši ta obrada, s kojim alatima, priborom i mjerilima, pod kojim režimima obrade, za koje vrijeme i s kolikim troškovima. Za projektiranje uspješnog, drugim riječima, profitabilno tehnološkog procesa potrebno je poznavati tehnologije obrade, vrste metala i njihovu primjenu uz ograničenja, osnove konstruiranja, modeliranja, simulacija i optimizacije procesa, kontrolu kvalitete i analizu vremena, obradne sisteme, alate, naprave te CAD/CAPP/CAM sustave, i uz sve to treba imati praktično iskustvo. Iskustvo se stječe praktičnim radom, gdje se procesi definiraju, prate i poduzimaju se korektivne mjere tijekom proizvodne. Najčešće se stječe iz problematičnih procesa i odbačenih dijelova te se vrše korekcije kako bi se dobio uspješan rezultat. Rijetkost je da dva tehnologa proizvedu isti proces. Svaki proces će proizvesti dio kako je navedeno, iako će procesi rezultirati različitim vremenom i troškovima. No, 80 % vremena tehnolozi troše na pretraživanje knjiga, priručnika, dijagrama, tablica, prospekata i ranijih rješenja zbog čega se i javio razvoj CAPP sustava. Razvoj tih sustava je često otežan zbog raznolikosti proizvoda, kompleksnosti samog projektiranja i planiranja velikog broja složenih operacija koje se nalaze u sklopu tehnoloških procesa, i to sve pod različitim proizvodnim uvjetima. Zbog toga razvoj nekakvog univerzalnog rješenja nije moguć što posljedično uzrokuje nisku primjenu CAPP sustava. Za razliku od CAPP sustava, integrirani CAD/CAM sustavi su sve više u upotrebi. Ova vrsta sustava omogućava automatsku izradu NC programa na temelju 3D modela obratka, odabranih alata i režima obrade. Model se definira u jednom o CAD programa i na temelju njega se generira putanja alata, dok je redoslijed operacija i pripadajućih zahvata kao i režima obrade određen od strane tehnologa. Time je znatno skraćeno vrijeme, a samim time su smanjeni i troškovi izrade programa. No, potrebno je podatke obraditi u postprocesoru kako bi se dobiveni program prilagodio odnosno „preveo“ u jezik odabrane upravljačke jedinice CNC stroja na kojem se vrši obrada. U sklopu ovog završnog rada projektiran je tehnološki proces za izradu bubnja pri kojem je također korišten integrirani CAD/CAM sustav.

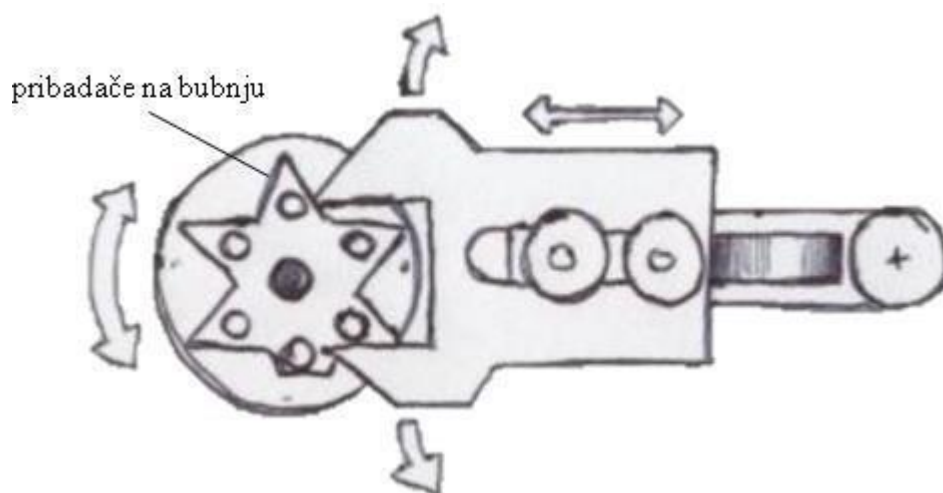
Bubanj mjenjača je komponenta prijenosa, cilindričnog oblika, sa strojno obrađenim utorima oko vanjskog promjera. Kada ga aktivira vanjski mehanizam, bubanj mjenjača se počinje okretati, a

za to vrijeme prorezi bubnja uzrokuju da vilice mjenjača pomiču klizne zupčanike, uzrokujući uključivanje i isključivanje različitih prijenosnih omjera. Većina motocikala danas koristi polugu (slika 1.1) koja se nalazi na lijevoj strani kao vanjski mehanizam. Ta poluga se može pomicati prema gore i prema dole pri čemu dolazi do sekvencijalnog mijenjanja brzina.



Slika 1.1 Shematski prikaz dijelova mehanizma rotacije bubnja [1]

Točnije, pomoću poluge mjenjača nasumično se pomiče mjenjač preko sklopa koji je poznat kao pandža. Na taj način, pomoću svojih „zubi“ pandža omogućava rotiranje bubnja zahvaljujući malim pribadačama koje se nalaze sa strane bubnja (slika 1.2).



Slika 1.2 Shematski prikaz pandže i pribadača na bubnju [1]

Rotiranjem toga bubnja, vilica mjenjača se pomiče lijevo ili desno kroz utore na bubnju. Pomicanjem vilice, pomiču se i parovi zupčanika. Parovi zupčanika nalaze se na čvrstim čeličnim vratilima. Mjenjač ima ulazno i izlazno vratilo (slika 1.3). Ulazno vratilo (spojeno na

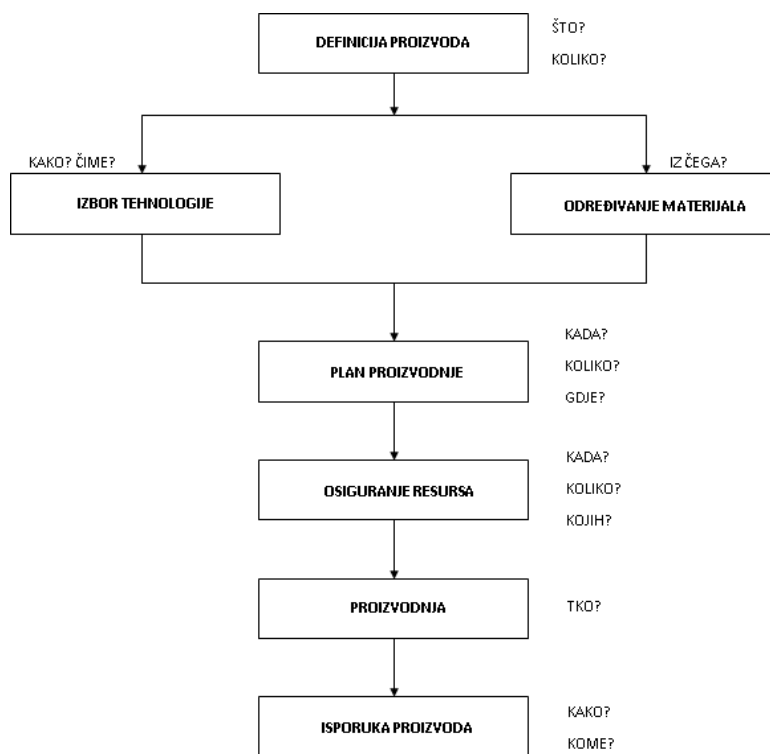
koljenasto vratilo) je vezano za motor, a izlazno je vezano za kotače.



Slika 1.3 Mjenjač [1]

2. Priprema proizvodnje

Moderna i profitabilna proizvodnja počiva na zahtjevima tržišta, optimalnoj tehnologiji i optimiziranom tehnološkom procesu. Iz toga proizlaze osnovni ciljevi suvremenog projektiranog tehnološkog procesa, odnosno uspješne proizvodnje, a to su: osiguranje kvalitete proizvoda u skladu sa zahtjevima tržišta, što manji utrošak materijala i energije, te primjena modernih metoda u proizvodnji. Sve je ovo potrebno postići uz minimalno moguće vrijeme izrade, traženi rok isporuke i najniže moguće troškove proizvodnje. Drugim riječima, suvremena proizvodnja mora biti pravilno planirana, organizirana, vođena i kontrolirana, a za to joj je potrebna dobra priprema koja će prije same proizvodnje odrediti kako će se proizvod proizvoditi, a iz čega će kasnije proizaći sve gore navedene stavke. Glavne funkcije pripreme proizvodnje su: projektno-konstrukcijska priprema, tehnološka priprema proizvodnje, priprema materijala, priprema alata i operativna priprema [2]. Svaka od ovih aktivnost pripreme proizvodnje bavi se različitom fazom procesa, pri čemu svaka faza predstavlja jedinstvenu disciplinu i potrebna znanja. No, s obzirom da u svakom radnom okruženju vladaju specifični subjektivni i objektivni problemi, potrebe, zahtjevi i mogućnosti teško je propisati pravila za pripremu proizvodnje te je zbog toga vrlo važno da svaka aktivnost ima za svoju svrhu postizanje optimalnog omjera između rezultata rada i njegovih troškova. Na slici 2.1 prikazane su osnovne aktivnosti pripreme proizvodnje. Navedene aktivnosti trebaju dati odgovore na slijedeća pitanja: Što i koliko proizvoditi?, Kako i čime proizvoditi?, Iz čega tj. iz kojih materijala?, Kada tj. u kojim rokovima?, Gdje tj. na kojim kapacitetima, s kojim resursima i tko će obaviti proizvodnju? Pitanjem što i koliko treba proizvoditi, treba definirati proizvode, procijeniti za svaki proizvod tržišnu potrebu, izračunati troškove proizvodnje, te konkurentnost u kvaliteti i prodajnoj cijeni. Nakon pozitivne odluke da se usvoji taj proizvod treba izraditi prototip i konstrukcijsku dokumentaciju. Pitanjem kako i čime proizvoditi definiraju se strojevi, odnosno radna mjesta na kojima će se proizvoditi, te se opisuje način kako će se proizvoditi. To uključuje i ekonomsku analizu u cilju nalaženja najjeftinijeg oblika proizvodnog i tehnološkog procesa. Pitanjem iz čega će se proizvoditi definira se polazni materijal za proizvodnju. Često se ova aktivnost analizira u sklopu prethodne. Plan proizvodnje govori o vremenu kada što treba pripremiti, lansirati i proizvesti. Ovaj zadatak obavlja operativna priprema. Operativna priprema obavlja, pored toga, i zadatak provjere i pripreme resursa i dokumentacije za osiguranje radnih mjesta poslom.



Slika 2.1 Aktivnosti pripreme proizvodnje [2]

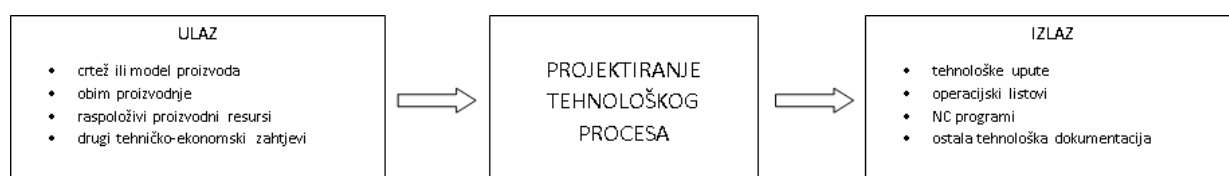
Sve te aktivnosti, povezane u pripremu proizvodnje osiguravaju resurse i pretpostavke da se proizvodni proces može obaviti u ugovorenom, odnosno planiranom vremenu, u traženoj standardiziranoj kvaliteti i funkcionalnosti, te da se na proizvodu ostvari planirana dobit.

3. Projektno-konstruktivska priprema proizvodnje

Brzina i karakter tehnoloških promjena sve je veći, što zahtijeva stalnu revitalizaciju, modernizaciju i unaprjeđenje procesa rada. Stoga budućnost pripada onima koji mogu najbrže ponuditi inovativne, kvalitetne i pristupačne proizvode, a upravo to je jedan od poslova koji se nalazi u okviru projektno-konstruktivske pripreme. Skupljanje ideja o novom i poboljšanju postojećeg proizvoda. Nadalje, zadatak projektno-konstruktivske pripreme je osigurati tehničku dokumentaciju koja će kasnije predstavljati osnovno polazište za ostale funkcije pripreme i stvoriti uvjete za neometanu proizvodnju. Time konstruktor već na samome početku stvara stabilne temelje koji proizlaze iz jednostavnog, pouzdanog, tehnološkog i funkcionalnog proizvoda čija će kvaliteta biti određena prema geslu: “daj samo onoliko kvalitete koliko je potrebno, a ne koliko je moguće”, a ostvarit će ga kroz idejna rješenja i proračune, konstruktivske crteže, specifikacije i sastavnice proizvoda i materijala. Međutim, suvremena tehnološka organizacija proizvodnje, koja konstantno teži povećanju produktivnosti, zahtijeva od konstruktora posvećivanje maksimalne pažnje ne samo tehnološnosti proizvoda nego i tehnološnosti same tehničke dokumentacije. To konkretno znači da bi tehnička dokumentacija trebala imati slijedeća kvalitativna svojstva: brz uvid u sadržaj tehničke dokumentacije te brz uvid u sadržaj potrebnih količina materijala koje je potrebno osigurati u cilju realizacije proizvodnih programa, odnosno mora biti jednostavna za upotrebu. U zadatke projektno-konstruktivske pripreme spadaju i poslovi standardizacije, unifikacije i tipizacije [3]. Po definiciji standardizacija je proces sastavljanja i uvođenja pravila za uređivanje određenog područja u korist i uz suradnju svih zainteresiranih. Početak standardizacije bio je na označavanju i ujednačavanju fizičkih, kemijskih i fizičko - kemijskih jedinica i veličina. Zatim se razvijala u svim područjima tehnike i društva u vidu raznovrsnih normi i propisa. Jedan oblik standardizacije je i tipizacija. Tipizacija predstavlja racionalizaciju proizvodnje jer obavlja smanjenje raznolikosti proizvoda. Dok se s unifikacijom postiže sužavanje značajki proizvoda u smislu njegovih vanjskih i unutarnjih svojstava.

4. Tehnološka priprema proizvodnje

Najvažniji ulazni podaci za projektiranje tehnoloških procesa su 2D crtež i/ili 3D model proizvoda, podaci o obimu proizvodnje u određenom vremenskom periodu, podaci o raspoloživim proizvodnim resursima, obradnim sustavima, alatima, priborima, mjerilima, itd., kao i drugi tehničko/ekonomski zahtjevi. Rezultat projektiranja tehnoloških procesa je tehnološka dokumentacija i informacije neophodne za planiranje i upravljanje proizvodnjom, kao i provođenje procesa proizvodnje, slika 4.1. Na temelju tih ulaznih podataka izrađuju se različite varijante tehnološkog postupka po operacijama i zahvatima, ovisno o raspoloživim kapacitetima, zahtjevima točnosti mjera i oblika te osiguranjem minimalnih troškova proizvodnje.



Slika 4.1 Ulazni i izlazni rezultati projektiranja tehnološkog procesa [2]

Zadatak tehnološke pripreme je dakle pronaći i propisati optimalna rješenja za izradu svih dijelova u uvjetima raspoloživih proizvodnih resursa poduzeća i njegovih kooperanata [2]. Proces kojim se realiziraju ovako propisana uputstva za rad naziva se tehnološki proces. Tehnološki proces je dio proizvodnog procesa koji se odnosi na pojedini proizvod i obuhvaća rad na proizvodnim radnim mjestima, odnosno obuhvaća sve postupke kojima se materijalu/komadu mijenjaju oblik i/ili dimenzije i/ili svojstva. Tehnološki proces je sačinjen od niza tehnoloških operacija, a sama tehnološka operacija je osnovna jedinica tehnološkog procesa koja podrazumijeva sve aktivnosti na radnom predmetu koje se na jednom radnom mjestu (tj. u užem smislu u okviru jednog obradnog sustava kojeg čine alatni stroj, alat, obradak i po potrebi naprave) odvijaju u kontinuitetu (obično u jednom stezanju obratka na alatnom stroju) [2]. Svaku tehnološku operaciju je moguće podijeliti na tehnološke zahvate kod kojih se ne mijenjaju obrađivana površina, alati niti režimi obrade. U okviru projektiranja tehnoloških procesa rješavaju se mnogi zadaci (slika 4.2) i pri tome postoji niz faktora koji utječu na tehnološki proces. Faktori određeni tipom i vrstom obrade tip obrade - tokarenje, glodanje, brušenje te vrsta obrade: gruba ili fina. Faktori određeni obradnim strojem - vrsta stroja: univerzalni, obradni centar, vrsta upravljanja: klasična, CNC, kinematske karakteristike: brzina vrtnje, posmak, snaga stroja, točnost i preciznost obrade, veličina i krutost stroja, potrebno vrijeme pripreme stroja, cijena norma sata stroja. Faktori određeni izabranim alatom - vrsta materijala alata (tvrdi metal,

keramika,...) geometrijski oblik alata, svojstva alata (tvrdoća, postojanost,...), tip alata (jednorezni, višerezni,...), kemijski sastav i struktura materijala alata, mogućnost izmjene alata, podešavanje alata (na stroju ili izvan stroja), cijena alata. Faktori određeni vrstom proizvodnje i složenosti obrade - tip proizvodnje (pojedinačna, serijska, masovna), količina proizvoda, složenost obrade. Faktori određeni radnim predmetom i pripremkom - vrsta materijala radnog predmeta, složenost radnog predmeta, (dimenzije, geometrijski oblik, zahtijevana točnost obrade,...) geometrijski oblik i dimenzije radnog predmeta, tolerancije, površinska hrapavost, stanje priprema (vrsta, oblik, dimenzije, masa), stanje materijala i površinske kore priprema. Faktori određeni uvjetima obrade - način stezanja radnog predmeta, stabilnost i krutost radnog predmeta, režimi obrade, vrsta sredstva za podmazivanje i hlađenje [3].

Aktivnosti	Potrebni podaci
Analiza predmeta - ispitivanje konstrukcijske dokumentacije - razmatranje mogućnosti izrade predmeta	
Utvrđivanje polaznog materijala - određivanje polaznog materijala - određivanje vrste materijala - utvrđivanje mjera priprema - proračun težine	Podaci o materijalima
Određivanje operacija - određivanje sadržaja rada-potrebnih zahvata - određivanje redoslijeda zahvata - određivanje načina pozicioniranja i stezanja predmeta - razmatranje alternativnih mogućnosti	Podaci o zahvatima Podaci o operacijama
Određivanje sredstava za rad - izbor stroja - izbor pribora za pozicioniranje i stezanje predmeta - izbor alata	Podaci o strojevima Podaci o priborima Podaci o alatima
Određivanje elemenata za izvođenje operacija - određivanje režima obrade - određivanje osnovnih vremena - određivanje pomoćnih vremena, pripremo-završnog vremena i vremena trajanja operacija - oblikovanje dokumenata	Podaci o režimima obrade Obrasci za proračun osnovnih vremena Podaci o pomoćnim i pripremo-završnim vremenima

Slika 4.2 Aktivnosti projektiranja tehnoloških procesa [2]

5. Polazni materijal

Svaka skupina i podskupina materijala ponaša se specifično u jednakim radnim uvjetima. Vrijednosti pojedinih svojstava unutar pojedine skupine variraju u širokim granicama – ovisno o varijacijama u sastavu, strukturi i načinu proizvodnje. Ipak, svakoj se osnovnoj skupini (metali, polimeri, keramika i kompoziti) mogu pridružiti neka karakteristična zajednička svojstva. Čelici, na primjer, prekrivaju gotova sva područja primjene u kojima se postavljaju zahtjevi čvrstoće i žilavosti. Kod uporabe lakih i obojenih metala i njihovih legura u prvom je planu vrlo dobra otpornost na koroziju i manja gustoća. Konstrukcijsku keramiku biramo prvenstveno za rad pri povišenim temperaturama i/ili uvjetima intenzivnog trošenja [4]. S druge strane, polimerni materijali dolaze u obzir za izradu dijelova koji nisu visoko mehanički opterećeni, a radna temperatura nije previsoka. No, osim što materijal svojim svojstvima mora omogućiti funkciju tijekom uporabe, mora biti i u skladu s konstrukcijskim i tehnološkim parametrima. Drugim riječima materijal mora biti kompatibilan za određeni postupak proizvodnje. Slika 5.1 nam prikazuje okvirno pridruživanje postupaka proizvodnje pojedinim skupinama materijala.

Tehnologija/postupak	Sivi ljev i nodularni ljev	Nelegirani čelik	Legirani čelik	Nehrđajući čelik	Al i Al legure	Cu i Cu legure	Zn i Zn legure	Mg i Mg legure	Ti i Ti legure	Ni i Ni legure	Vatrostalni metali
Lijevanje i srodni postupci											
Lijevanje u pijesku	•	•	•	•	•	•	–	•	–	•	–
Precizno lijevanje	–	•	•	•	•	•	–	–	–	•	–
Tlačno lijevanje					•	–	•	•			
Injekcijsko prešanje											
Prešanje pjene											
Ekstruzijsko puhanje											
Injekcijsko puhanje											
Rotacijsko kalupljenje											
Kovanje i prešanje											
Istiskivanje		•	•	–	•	•	•	–			
Hladno sabijanje		•	•	•	•	•	–	–		–	
Kovanje u zatv. ukovnju		•	•	•	•	•	•	•	•	–	–
Prešanje i sinteriranje		•	•	•	•	•	•	•	–	•	•
Topla ekstruzija		•	–	–	•	•	•	•	–	–	–
Rotacijsko kovanje		•	•	•	•	–	–	•		•	•
Obrada odvajanjem čestica											
Obrada iz sirovca	•	•	•	•	•	•	•	•	–	–	–
Elektrokemijska obrada	•	•	•	•	–	–	–	–	•	•	–
Elektroerozija (EDM)		•	•	•	•	•	–	–	–	•	–
EDM s žicom		•	•	•	•	•	–	–	–	•	–
Oblikovanje deformiranjem											
Oblikovanje lima		•	•	•	•	•	–	–	–	–	
Toplo oblikovanje											
Optiskivanje		•	–	•	•	•	•	–	–	–	–

- normalna praksa; – manje primjenjivo

Slika 5.1 Kompatibilnost materijala i postupaka proizvodnje [4]

Kako materijal mora biti u skladu s proizvodnim postupkom, tako mora i proizvodni postupak biti prikladan za oblik poluproizvoda i gotovog dijela, minimalne i maksimalne dopuštene dimenzije izratka, kompleksnost oblika, tražene tolerancije i hrapavost površine, detalje na

površini (najmanji radijusi zakrivljenja i slično). Slika 5.2 sadrži ocjene pojedinih karakteristika za uobičajene postupke proizvodnje.

POSTUPAK	Hrapavost	Točnost dimenzija	Kompleksnost oblika	Proizvedena količina u jedinici vremena	Ukupna količina	Oblik	Trošak
Tlačno lijevanje	N	V	V	V/S	V	S/N	V
Centrifugalno lijevanje	S	S	S	N	S/N	V/S/N	V/S
Izravno prešanje	N	V	S	V/S	V/S	V/S/N	V/S
Injekcijsko prešanje	N	V	V	V/S	V/S	S/N	V/S/N
Lijevanje u pijesku	V	S	S	N	V/S/N	V/S/N	V/S/N
Precizno lijevanje	N	V	V	N	V/S/N	S/N	V/S
Glodanje	N	V	V	S/N	V/S/N	V/S/N	V/S/N
Brušenje	N	V	S	N	S/N	S/N	V/S
Elektroerozija	N	V	V	N	N	S/N	V
Puhanje	S	S	S	V/S	V/S	S/N	V/S/N
Kovanje	S	S	S	V/S	V/S	V/S/N	V/S
Valjanje	N	S	V	V	V	V/S	V/S
Ekstruzija	N	V	V	V/S	V/S	S/N	V/S
Metallurgija praha	N	V	V	V/S	V	N	V/S
ključ ocjena:							
V - visoko	>6,3	<0,13	visoka	>100	>5000	>0,5	
S - srednje	1,6...6,3	0,13...1,3	srednja	10...100	100...5000	0,02...0,5	
N - nisko	<1,6	>1,3	niska	>10	<100	<0,02	
Jedinice	μm ²	mm		kom/sat	komada	m ²	

Slika 5.2 Ocjene primjenjivosti postupaka proizvodnje na pojedine karakteristike [4]

Bubanj mjenjača je proizvod s preuzetom razrađenom konstrukcijskom dokumentacijom prema kojoj je kao polazni materijal zadan je 36SMnPb14 + QT + C. Prema normi EN 10087:1998 ta vrsta čelika smatra se čelikom za automate. Sve vrste čelika obuhvaćene ovom normom, prema kemijskom sastavu, svrstavaju se pod nelegirane čelike (prema normi prema normi HR EN 10020:2008). To su čelici koji pri strojnoj obradi stvaraju male strugotine čime je povećana obradivost materijala i izbjegnuto je zaplitanje strugotine u strojeve. U pravilu, ova vrsta čelika obično košta 15% do 20% više od standardnog čelika. Međutim, to je nadoknađeno povećanom brzinom obrade, dubinom rezanja i duljim vijekom trajanja alata. Točan kemijski sastav prikazan je u tablici 1.

Tablica.1 Kemijski sastav polaznog materijala [5]

Kemijski sastav					
C%	Si%	Mn%	P%	S%	Pb%
0,32-0,39	0,4	1,30-1,70	0,06	0,10-0,18	0,15-0,35
±0,03	±0,03	±0,06	±0,008	±0,03	±0,03-0,02

Povećana razina sumpora jedna je od najčešćih tehnika za poboljšanje obradivosti. No, upravo zbog povećanog udjela sumpora (i fosfora) obično se ovi čelici ne preporučuju za zavarivanje.

Duktilnost i žilavost također imaju niže vrijednosti nego kod običnih ugljičnih čelika. Uz kemijski sastav, u ovisnosti o vrsti obrade čelika korištenjem raznih vrsta opreme i temperature također se utječe na mehanička svojstva. Tako se pri obradi hladnim valjanjem dobiva čelik koji ima visoku vlačnu čvrstoću, što rezultira većom otpornošću na savijanje ili lomljenje pod opterećenjem. Toplo valjani čelik se obično koristi kada preciznost oblika i tolerancije nisu bitne. Za proizvodnju bubnja koristi se hladno vučeni čelik (cold drawn, +C) koji ima prednosti kao i hladno valjani čelik. Međutim, hladno valjanje proizvodi ravne proizvode, a hladno vučeni čelik proizvodi tanke proizvode kao što su šipke ili žice. Uz to što je hladno vučeni, polazni materijal za bubanj je podvrgnut toplinskoj obradi popuštanja i kaljenja. Pri čemu se čelik zagrijava do visokih temperatura i nastaje struktura koja se zove austenit. Austenitna struktura stvara vrlo mekan metal. Korištenjem TTT dijagrama može se razviti ciklus toplinske obrade koji će osigurati željenu strukturu zrna i potrebna svojstva. TTT dijagram je funkcija temperature i vremena, pokazujući strukturu zrna koja će se formirati na temelju brzine hlađenja ili gašenja materijala. Što je proces hlađenja sporiji, to će ostati austenitnija zrnasta struktura, dajući mekani materijal dobre duktilnosti, ali manje tvrdoće. Vrlo brzo hlađenje proizvodi ukupnu zrnastu strukturu martenzita, čineći proizvod visoke tvrdoće, ali ne i duktilnosti. Čelik je praktički neupotrebljiv nakon kaljenja jer bi teško dopuštao bilo kakvu deformaciju pod opterećenjem i odmah bi se slomio. Upravo zbog toga se nakon kaljenja provodi popuštanje kako bi se smanjila tvrdoća i povećala duktilnost. Čak i ako su se vrijednosti tvrdoće i čvrstoće manje ili više smanjile nakon popuštanja, one su i dalje značajno veće u usporedbi s izvornom mikrostrukturom.

5.1. Otpad tijekom obrade

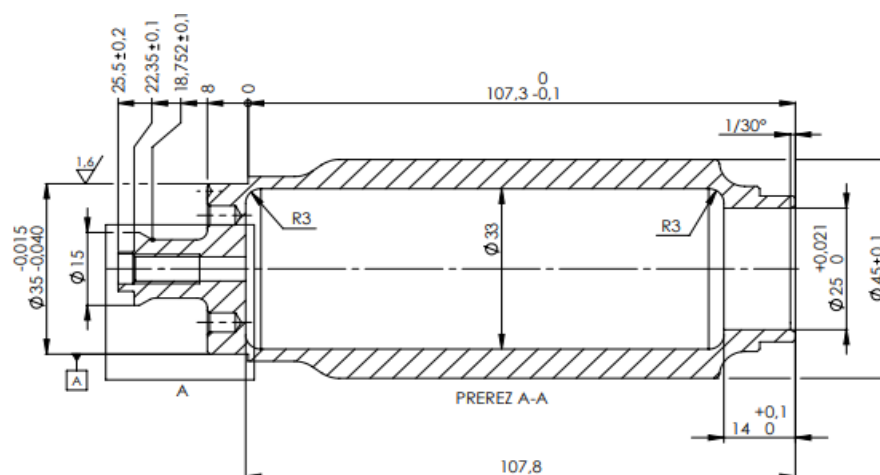
Nakon što su zadovoljena funkcijska svojstva materijala, polazni materijal treba odabrati tako da sa što manjim otpadom kod obrade dobije dio sa svim zahtjevima radioničkog crteža [6]. Na slici 5.3 je usporedan prikaz iskorištenja materijala i utroška energije kod pojedinih postupaka obrade. No, iako je najmanje iskorištenje materijala i najveći utrošak energije kod obrade odvajanjem čestica, oko 80% svih dijelova obrađuje se upravo tim postupkom zahvaljujući velikom broju prednosti koje ova vrsta obrade posjeduje. Neke od prednosti su: obrada geometrijskih složenih oblika, obrada teško obradivih ili neoblikovljivih materijala, obrada površina visoke kvalitete i uskih tolerancija i dr [6].



Slika 5.3 Iskorištenje materijala kod pojedinih postupaka obrade [6]

S obzirom da je udio cijene materijala otprilike 60% ukupne cijene proizvoda, neminovno nastali otpadni materijal treba što racionalnije ponovno iskoristiti. No, uz ovisnost o postupku obrade iskorištenje materijala ovisi i o samome obliku našeg polaznog materijala, pa tako možemo govoriti o odljevcima, otkivcima i profilnim poluproizvodima kao vrstama polaznog materijala. Općenito se kod izrade rotacijskih dijelova najčešće za polazni materijal uzima profilni poluproizvod. No, već kod većih serija postoji neka veličina serije kod koje prestaje biti ekonomična proizvodnja iz šipkastog materijala i postaje biti ekonomična iz otkivka. Za proizvodnju bubnja polazni materijal je profilni poluproizvod, odnosno šipkasti materijal u obliku cijevi upravo zato jer je za potreban broj komada bio najisplativije rješenje. Funkcija proizvoda u eksploataciji također utječe na odabir polaznog materijala tj. priprema. U eksploataciji materijal treba odgovoriti zahtjevima u pogledu statičke i dinamičke čvrstoće, površinske čvrstoće, tvrdoće, otpornosti prema trošenju, koroziji i dr. Ako se traži dinamička izdržljivost priprema se obično dobiva deformiranjem, dok za proizvode statičkog opterećenja priprema može biti odljevak. Kao što je vidljivo sa slike 5.4 najveći promjer iznosi ϕ 45mm, a ukupna duljina komada je 132,8 mm, ali na to je potrebno odrediti dodatke (po poprečnom presjeku i po dužini) s kojima će se postići propisani i oblik – dimenzionalna točnost i obrađena površina. Veličina dodataka je ovisna o različitim faktorima i propisana je tablicama. Greške, tj. netočnosti zbog čije se kompenzacije određuje dodatak za obradu određene površine se mogu svrstati u nekoliko grupa: netočnost mjera, hrapavost površina, geometrijska netočnost, netočnost oblika u poprečnoj ravni (ovalnost, poligonalnost i sl.), netočnost oblika u uzdužnoj ravni (konusnost, udubljenost, ispupčenost i sl.), netočnost položaja (neparalelnost, neokomitost, necentričnost i sl.), defektna struktura materijala površinskog sloja. Postavlja se pitanje koliki treba dodatak za obradu? Dodaci za obradu ne bi trebali biti prevelik jer uzrokuju: povećanje

broja zahvata, povećanje utroška materijala alata, energije, vremena i sl., smanjenje točnosti obrade zbog povećanih otpora rezanja, povećanje angažiranja opreme i radnika, povećanje troškova obrade, tj. proizvodne cijene proizvoda, itd. No, dodaci za obradu ne smiju biti ni premaleni jer uzrokuju: nemogućnost uklanjanja svih nedostataka površinskog sloja, potrebu za povišenom točnošću priprema, što povećava troškove, potrebu za većom stručnošću i većim oprezom pri obradi, što povećava troškove, povećanje škarta u procesu proizvodnje, itd. Prema tome nestručno određivanje dodataka za obradu uzrokovat će štete. Zadatak tehnologa je odrediti minimalno potrebne dodatke za obradu.



Slika 5.4 Konačne dimenzije proizvoda

Nadalje, s obzirom na zahtijevanu hrapavost površine prema slici 5.5 se odabire odgovarajući način obrade.

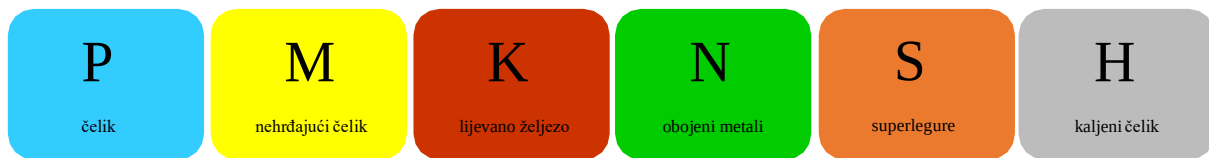
Postupak obrade	Stupanj površinske hrapavosti (μm)												
	Ra (μm)	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
	Stara oznaka	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
Tokarenje i glodanje	grubo i čisto												
	fino												
Brušenje	grubo i čisto												
	fino												
Poliranje													
Bušenje													
Razvrtanje													

Slika 5.5 Postupci obrade prema zahtijevanoj površinskoj hrapavosti [7]

Kod ovih profila mora se voditi računa o standardnim dimenzijama koje su 3000, 4000, 5000 i 6000 mm, iako nije isključeno da postoje i druge duljine što je ovisno o promjeru i materijalu šipke. S obzirom na količinu otpada koja nastaje pri pojedinim dimenzijama odabire se najprikladnija dimenzija šipke. Budući da je masa otpada po komadu najmanja kod šipki duljine 1500 mm, kao polazni materijal za izradu bubnja je uzeta šipka duljine 1500 mm.

5.2. Podjela materijala prema obradivosti

Postoji dakle širok izbor materijala koji se koriste u industriji, a prema ISO 513:2012, materijali izratka mogu se podijeliti u šest skupina koje se međusobno razlikuju prema obradivosti (slika 5.6). Svaki razred metala ili legure označen je šifrom i bojom. Materijali su podijeljeni na temelju dominantnih fizičkih svojstava različitih materijala. Ova svojstva određuju legirajući elementi, toplinska obrada itd. Ove grupe materijala koriste se za pomoć pri određivanju ispravnog reznog alata i početnih vrijednosti za uvjete obrade u određenim primjenama pa tako je često od strane proizvođača na samom alatu naznačena grupa materijala za koju je taj alat prikladan.



Slika 5.6 Klasifikacija tvrdih metala za rezanje

5.2.1. ISO P - čelik

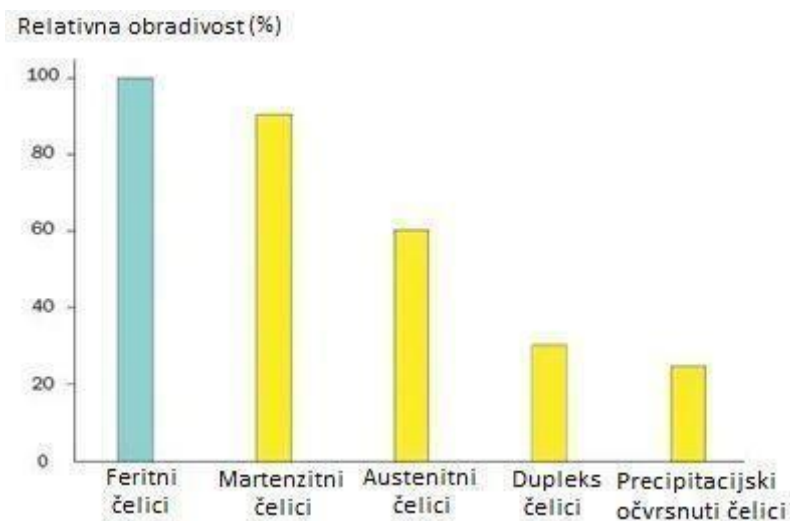
Raznolikost materijala ove grupe koji se kreću od duktilnih niskougljičnih čelika do visoko legiranih otežava njihovu obradu. Pri čemu tvrdoća različitih čelika značajno varira od jednog do drugog kraja spektra. Obradivost čelika se također razlikuje, ovisno o legirnim elementima (slika 5.7), toplinskoj obradi i proizvodnom procesu (kovani, valjani, lijevani, itd.). Lijevani čelik ima hrapavu površinsku strukturu, koja može uključivati pijesak i trosku, te postavlja visoke zahtjeve za žilavošću reznog ruba. Valjani čelik karakterizira grubozrnata struktura koja uzrokuje varijacije u silama rezanja. Kovani čelik ima manju veličinu zrna i ujednačenije je strukture, što stvara manje problema pri rezanju.

legirni element	efekt djelovanja
C	utječe na tvrdoću (veći sadržaj povećava abrazivno trošenje), dok nizak sadržaj ugljika, < 0,2%, povećava adhezivno trošenje, što će dovesti do nakupljenog ruba i lošeg lomljenja strugotine
Cr, Mo, W, V, Ti, Nb	(tvorci karbida) povećavaju abrazivno trošenje
O	ima veliki utjecaj na obradivost; tvori nemetalne, oksidne i abrazivne inkluzije
Al, Ti, V, Nb	čine čelik čvršćim i težim za obradu
Pb	u čeliku za slobodnu obradu smanjuje trenje između strugotine i umetka, smanjuje trošenje i poboljšava lomljenje strugotine
Ca, Mn (+S)	tvore meke sulfide za podmazivanje, visok sadržaj S poboljšava obradivost i lomljenje strugotine
S	Ima povoljan učinak na obradivost. Male razlike, poput onih između 0,001% i 0,003% mogu imati značajan učinak na obradivost. Ovaj učinak se koristi u čelicima za slobodnu obradu. Tipičan je sadržaj sumpora od oko 0,25%. Sumpor tvori mekane inkluzije mangan sulfida (MnS) koje će formirati sloj za podmazivanje između strugotine i reznog ruba. MnS će također poboljšati lomljenje strugotine. Olovo (Pb) ima sličan učinak i često se koristi u kombinaciji sa S u čelicima za slobodnu obradu na razinama od oko 0,25%.

Slika 5.7 Utjecaj legirnih elemenata na svojstva čelika [8]

5.2.2. ISO M – nehrđajući čelik

Nehrđajući čelici kao što naziv implicira, namijenjeni su da se odupiru oksidaciji i drugim oblicima korozije. Ovi materijali imaju znatno veću otpornost na koroziju zbog značajnog dodatka kroma kao legirajućeg elementa. Nehrđajući čelici se nalaze u brojnim primjenama kao što su automobilske komponente (ispušne cijevi, motor, šasija, cijevi za vodove goriva, itd.), u kemijskim obradnim postrojenjima, vodoopskrbni cjevovodi, brodogradnja i pomorstvo, sportska oprema (skije za snijeg), prijevozni strojevi (vagone), i dr. Nehrđajući čelici su dostupni u do 150 različitih kemijskih sastava. Širok izbor ovih materijala dizajniran je da zadovolji širok raspon svojstava koje zahtijevaju potencijalni kupci i industrije. Nehrđajući čelici dijele se u pet različitih metalurških kategorija. Ovih pet kategorija uključuju; austenitne, feritne, martenzitne, dupleks čelike i čelike koji otvrdnjavaju precipitacijom. Austenitni nehrđajući čelici smatraju se materijalima koji se teško obrađuju zbog visoke duktilnosti, žilavosti i niske toplinske vodljivosti. Pored toga, na poteškoće obrade utječe i njihova tvrdoća, sadržaj ugljika i sadržaj nikla. Zbog svega nabrojenog potrebno ih je obrađivati reznim alatima visoke krutosti. Kako bi se poboljšala obradivost austenitnih nehrđajućih čelika često se dodaju elementi kao što su sumpor, olovo, selen, telurij, bakar, aluminij, fosfor. Ovi elementi pomažu u smanjenju trenja između radnog komada i alata. Razvoj čelika s dodatkom bakra i sumpora ima najviše pažnje jer njihov dodatak poboljšava obradivost bez velikog utjecaja na otpornost na koroziju. Feritni nehrđajući čelik ima općenito dobru obradivost i najbolju u cijeloj skupini nehrđajućih čelika (slika 5.8). Iako ne posjeduju istu čvrstoću i otpornost na koroziju kao austenitni nehrđajući čelici, njihov nizak sadržaj ugljika osigurava vrhunsku duktilnost, dopuštajući im da prođu obradu bez slabljenja materijala. Također se ne stvrdnjavaju toplinskom obradom. Martenzitni nehrđajući čelici strukturno su slični feritnim čelicima, ali sadrže veći postotak ugljika (sadržaj ugljika u feritnim čelicima obično je ispod 0,10%, dok martenzitni čelici mogu sadržavati do 1% ili više). Martenzitni čelici imaju superiornu čvrstoću i otpornost na habanje nakon obrade u usporedbi s drugim nehrđajućim čelicima, ali pri tome mogu povećati lomljivost materijala. Nadalje, njihov povećani sadržaj ugljika povećava osjetljivost materijala na hrđu i koroziju. Stoga su idealni za primjene koje zahtijevaju visoku čvrstoću i izdržljivost, ali samo prosječnu otpornost na koroziju, kao što su komponente turbine, vrhunski pribor za jelo i mehanički ventili i pumpe. Alati obradu ove vrste materijala trebaju imati visoku tvrdoću i otpornost na trošenje kratera.



Slika 5.8 Relativna obradivost nehrđajućih čelika [9]

Dupleks nehrđajući čelici su legure iznimno otporne na koroziju koje sadrže austenitnu i feritnu mikrostrukturu. Rezultat je prilično savitljiv i zavarljiv skup čelika s mješavinom karakteristika iz obje kategorije. Ova kombinacija visoke čvrstoće i otpornosti na koroziju čini dupleks legure idealnim za podvodne primjene gdje dijelovi moraju izdržati korozivnu slanu vodu tijekom duljeg razdoblja. Relativna obradivost je općenito loša (30%) zbog visoke granice popuštanja i visoke vlačne čvrstoće. Veći sadržaj ferita, iznad 60%, poboljšava obradivost. Strojna obrada ovih materijala proizvodi strugotine koje mogu stvoriti velike sile rezanja. Zbog toga se tijekom rezanja stvara puno topline, što može uzrokovati plastičnu deformaciju i ozbiljno trošenje kratera.

5.2.3. ISO K - Lijeвано željezo

Lijeвано željezo se često koristi za lijevanje pješčanih odljevaka jer materijali iz ove skupine imaju izvrsna svojstva tečenja i stoga su, kada se zagriju na ekstremne temperature, idealni materijali za složene lijevane oblike i zamršene kalupe. Ovaj se materijal često koristi za automobilske blokove motora, glave cilindara, tijela ventila, razdjelnike i baze strojeva (slika 5.9). Većina materijala od lijevanog željeza vrlo je krhka, nedostaje im duktilnost i općenito imaju slaba mehanička svojstva. S druge strane pri obradi se vrlo lako stvaraju male strugotine, koje su pogodne, zbog čega imaju izvrsnu obradivost (slika 5.10). Lijeвано željezo s perlitnom strukturom povećava abrazivno trošenje, dok feritne strukture povećavaju adhezivno trošenje. Općenito, obradivost je relativno visoka i ovisi uglavnom o kvaliteti izrade i tvrdoći. Kreće se od

gotovo 200% u mekim legurama kao što je GG10 (sivi lijev), pa sve do 60% u tvrdim legurama kao što je GGG80 (nodularni lijev), slika 5.11.



Slika 5.9 Kompleksni proizvodi iz lijevanog željeza [10]

Sivi lijev ima relativno nisku udarnu čvrstoću i stvara male sile rezanja, stoga se može reći da mu je obradivost dobra. Istrošenost u procesu rezanja nastaje samo abrazijom; ne podliježe kemijskom trošenju. Često se legira s kromom kako bi se poboljšala njegova mehanička svojstva, ali veća čvrstoća tada dovodi do smanjene obradivosti. Bijeli lijev nema gotovo nikakvu duktilnost i stoga kada je podvrgnut bilo kakvom opterećenju savijanja ili uvijanja, dolazi do loma. Tvrdi krhki bijeli površina poželjna je u onim slučajevima kada je potreban materijal s ekstremnom otpornošću na abraziju. Zbog izuzetne tvrdoće materijala, vrlo ga je teško obrađivati.



Slika 5.10 Usporedba obradivosti po različitim grupama metala [9]



Slika 5.11 Usporedba obradivosti između sivog lijeva (GG-25) i nodularnog [9]

5.2.4. ISO N - Obojeni metali i legure

Obuhvaćaju širok raspon materijala od uobičajenih metala kao što su aluminij, bakar i magnezij, do legura s visokom čvrstoćom na visokim temperaturama kao što su volfram, tantal i molibden. Iako su skuplji od željeznih metala, obojeni metali i legure imaju važnu primjenu zbog svojih brojnih svojstava, kao što su otpornost na koroziju, visoka toplinska i električna vodljivost, niska gustoća i jednostavnost izrade. Ova skupina sadrži obojene, meke metale s tvrdoćom ispod 130 HB, osim bronce čija je čvrstoća >225HB. Aluminij i legure se većinom lako obrađuju jer su sile rezanja, a time i snaga potrebna za njihovu obradu, niske. Odnosno, aluminij ima relativno laku kontrolu strugotine, ako je legiran, dok je čisti aluminij ljepljiv i zahtijeva oštre rezne rubove i visoke brzine rezanja. Materijal se može strojno obrađivati s finoiznatim, neobloženim vrstama karbida kada je sadržaj Si ispod 7 -8%, i s PCD alatima za aluminij s višim sadržajem Si. Legiranjem sa silicijem, željezom, niklom, manganom i kromom mogu se povećati čvrstoća i tvrdoća aluminijske legure. Obradivost bakra i njegovih legura uvelike varira. Legure s visokim udjelom bakra i čisti bakar vrlo su čvrste, abrazivne i sklone kidanju. Ove vrste materijala trebaju se obraditi s geometrijama alata za rezanje s pozitivnim nagibnim kutom. Za broncu se također, zbog njegove duktilnosti i žilavosti, treba koristiti alat za rezanje s pozitivnim nagibom.

5.2.5. ISO S – Superlegure (HRSA)

Superlegure su materijali koji se mogu strojno obrađivati na temperaturama većim od 540°C. Nijedan drugi sustav legura nema bolju kombinaciju otpornosti na koroziju na visokim temperaturama, otpornosti na oksidaciju i otpornosti na puzanje. Zbog ovih karakteristika, superlegure se često koriste u komponentama zrakoplovnih motora i industrijskih plinskih turbina za proizvodnju električne energije. Visokotemperaturne legure općenito su klasificirane u tri skupine: legure na bazi nikla, legure na bazi kobalta, željeza i nikla te legure na bazi titana. Superlegure općenito imaju lošu obradivost. Same karakteristike koje osiguravaju vrhunsku čvrstoću na visokim temperaturama također otežavaju njihovu obradu. Imaju nisku toplinsku vodljivost, što znači da se toplina koja se stvara tijekom strojne obrade ne prenosi niti na strugotinu niti na obradak, već je koncentrirana u području reznog ruba. Te temperature mogu biti od 1100°C do 1300°C i mogu uzrokovati kratersko trošenje i ozbiljne plastične deformacije ruba reznog alata. Kratersko trošenje može zauzvrat oslabiti oštricu stoga je otpornost na kratersko trošenje važan zahtjev za svojstvo alata za obradu visokotemperaturnih legura. Plastična deformacija, s druge strane, može otupjeti rub, čime se povećavaju sile rezanja.

Zadržavanje čvrstoće ruba na povišenim temperaturama također je vrlo važan zahtjev za alat tijekom obrade ovih legura. Strugotina proizvedena strojnom obradom ovih legura je čvrsta i kontinuirana te zahtijeva vrhunsku geometriju lomača strugotine.

5.2.6. ISO H – Kaljeni čelik

Ova skupina materijala sadrži čelike tvrdoće veće od 45 – 68 HRC. Obradivost kaljenog čelika je najmanja s gledišta strojne obrade, dok je dorada najčešća operacija obrade. Zbog velikih sila rezanja koje se javljaju, zahtjevi za snagomreznog alata su prilično visoki. Materijal reznog alata mora imati dobru otpornost na plastičnu deformaciju, kemijsku stabilnost (pri visokim temperaturama), mehaničku čvrstoću i otpornost na abrazivno trošenje. CBN alat ima ove karakteristike dok tvrdi metal dominira u primjenama glodanja i bušenja i koristi se do približno 60 HRC. Keramika ojačana vlaknima koristi se kada obradak ima umjerene zahtjeve za završnu obradu površine, a tvrdoća je previsoka za tvrdi metal.

5.2.7. Pod grupiranje materijala izratka

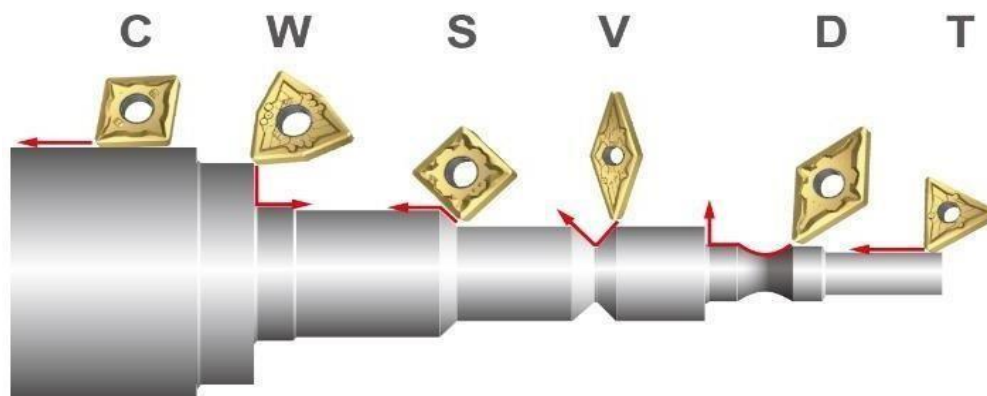
Za izbor geometrije alata obično je dovoljna gornja klasifikacija u šest glavnih skupina. Međutim, kako bi se odabrale ispravne brzine rezanja, glavne skupine moraju biti raščlanjene u podskupine. Neki dobavljači alata za rezanje koriste standard VDI 3323 za podgrupiranje, dok drugi izrađuju vlastiti sustav grupiranja. Tako je na primjer, poznati proizvođač alata - Sandvik Coromant, generirao svoju klasifikaciju materijala koja ima detaljniju strukturu, uključuje više podskupina i ima zasebne informacije o vrsti, sadržaju ugljika, proizvodnom procesu, toplinskoj obradi, tvrdoći itd, kako bi dao još konkretnije preporuke koje će pomoći u poboljšanju produktivnosti. Struktura je postavljena tako da takozvani „MC kod“ može predstavljati različita svojstva i karakteristike materijala koristeći kombinaciju slova i brojeva. Za primjer imamo šifru P1.2.Z.AN gdje je P ISO kod za čelik, 1 predstavlja grupu nelegiranih čelika, 2 je podskupina materijala za sadržaj ugljika $> 0,25\% \leq 0,55\%$ C, Z je proizvodni proces: kovani/valjani/hladno vučeni, AN je toplinska obrada: žareno, s vrijednostima tvrdoće. Opisivanjem ne samo sastava materijala, već i procesa proizvodnje i toplinske obrade, što nedvojbeno utječe na mehanička svojstva, dostupan je točniji opis. To se zatim može koristiti za generiranje poboljšanih preporuka za podatke o rezanju.

6. Tehnološke operacije i zahvati

Vrsta i redoslijed tehnoloških operacija ovise o zahtjevu radnog predmeta za točnost mjera i oblika pa se tako s različitim obrada postižu različite kvalitete površine odnosno klase hrapavosti. Odabir tehnoloških operacija ovisit će o konfiguraciji, odnosno obliku radnog predmeta kako je prikazano na slici 6.1, u konačnici i sam odabir alata, slika 6.2.

Površinska hrapavost Ra (μm)				
Broj	Proces	minimalno postiziva	početna maksimalna	Vrsta alata/stroja za
Okrugli simetrični oblici				
1	tokarenje	0,8	25,0	tokarilica
2	brušenje	0,1	1,6	brusilica
3	honanje	0,1	0,8	honanje
4	poliranje	0,1	0,5	poliranje
5	lepanje	0,05	0,5	lepanje
Prizmatični oblici				
6	glodanje	0,8	25,0	glodalica
7	brušenje	0,1	1,6	brusilica
8	honovanje	0,1	0,8	honanje
9	poliranje	0,1	0,5	poliranje
10	lepanje	0,05	0,5	lepanje
Provrti, navoji, ostalo				
11	bušenje svrdlom	1,6	25,0	tokarilica, glodalica
12	razvrtanje	0,8	6,3	tokarilica, glodalica
13	bušenje tokarskim nožem	0,8	10,0	tokarilica
14	obodno glodanje	0,8	15,0	glodalica
15	proširivanje	0,2	0,4	proširivanje
16	provlačenje	0,8	6,3	provlačenje

Slika 6.1 Ovisnost procesa obrade o traženoj hrapavosti i obliku radnog predmeta [7]

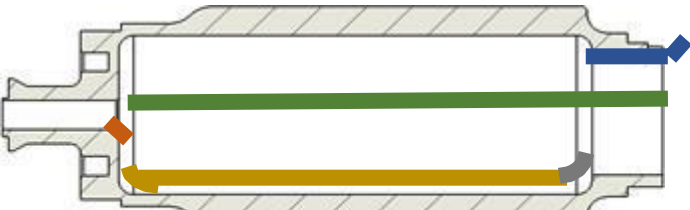
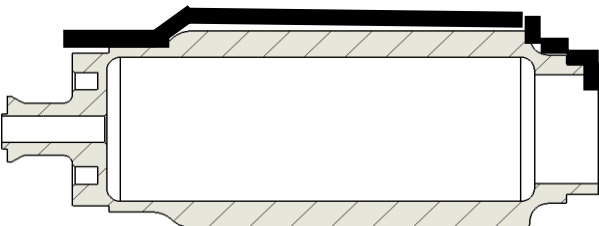


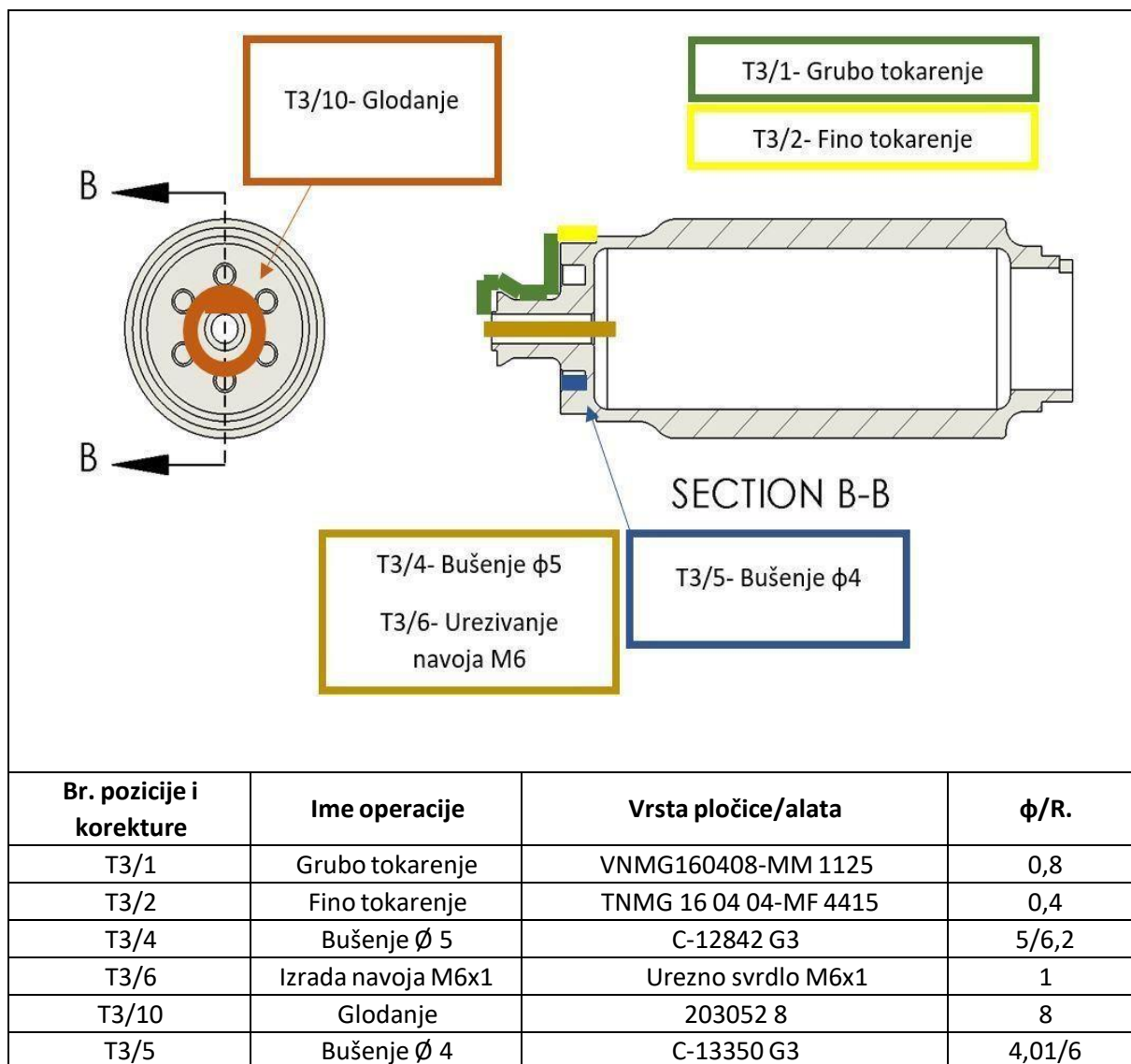
Slika 6.2 Različiti oblici rezne pločice s različitim namjenama obrade [10]

Pored prethodno navedenog, na odabir tehnološkog procesa utječe i dimenzija pripremk za izradu radnog predmeta, kvaliteta materijala i stanje njegovih površina, količina radnih predmeta u seriji te raspoloživost reznih, mjernih i kontrolnih alata. Nakon odabranih tehnoloških

operacija (tablica 2.), određuje se međusobni odnos operacija odnosno prirodni redoslijed operacija (neophodno je prvo izbušiti provrt, zatim narezati navoj, toplinski obraditi, brusiti, zavariti, zatim završno obraditi i na koncu montirati i sl.).

Tablica 2. Tehnološke operacije za izradu bubnja i pripadajući rezni alati

T3/8 – Bušenje T2/7- Fino tokarenje Ø25  T3/7 Skošenje na Ø5,1 T3/9 –Grubo tokarenje T2/6 –Fino tokarenje  T2/2 – Grubo T2/3 - Fino			
Br. pozicije i korekture	Ime operacije	Vrsta pločice/alata	φ/R.
T3/8	Bušenje	880-05 03	25
T3/9	Grubo unutarnje tokarenje	VCMT 11 03 04-PM 4335	0,4
T2/6	Fino unutarnje tokarenje	DCMT 07 02 04-PF 4415	0,4
T2/7	Fino unutarnje tokarenje	DCMT 07 02 08-UM 4425	0,8
T2/2	Grubo vanjsko tokarenje	VNMG160408-MM 1125	0,8
T2/3	Fino vanjsko tokarenje	VNMG160404-QM 4325	0,4



No, uvijek postoji više različitih načina za izradu istog obratka. Cilj je pronaći najučinkovitiji, pravovremen i točan način za proizvodnju svakog dijela. Operacije su obično organizirane prema tome koje uklanjaju najviše materijala na najmanje. Na primjer, ako prednja strana dijela ima utor, osnovni materijal na vrhu utora prvo se ukloni, a zatim se izreže utor. U suprotnom bi operater gubio vrijeme na urezivanje materijal koji će ionako biti uklonjen. Također se treba uzeti u obzir zahtjev za minimiziranjem izmjene alata i smanjenjem putne udaljenost između operacija kako bi se postiglo najkraće moguće vrijeme ciklusa.

6.1. Operacija 10

Naziv operacije: Bušenje provrta $\varnothing 25 \times 107,3$

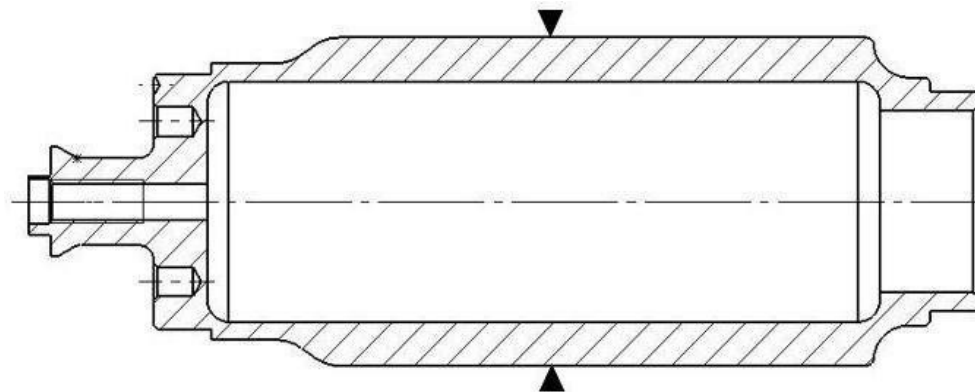
Stroj: CNC tokarsko – glodači obradni centar

Zahvat 1: Stezanje

ALAT: stezna glava

VRIJEME: $t_r = 0,05 \text{ min}$

Zahvat 1 operacije 10 je prikazan na slici 6.3.



Slika 6.3 Operacija 10, zahvat 1

Zahvat 2: Bušenje

ALAT:

-Držač: 880-D2400C4-03

-Obodna pločica: 880-05 03 W08H-P-GR 4344

-Centralna pločica: 880-05 03 05H-C-LM 1044

Držač „880-D2500I25-05“, obodna pločica „880-05 03 W08H-P-GR 4344“ i centralna pločica „880-05 03 05H-C-LM 1044“ su prikazani na slici 6.4.



Slika 6.4 Držač, obodna i centralna pločica za bušenje

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 24 \text{ mm}$
- brzina reznja: $v_c = 175 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje:
$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{D \cdot \pi} = \frac{1000 \cdot 175}{24 \cdot \pi} = 2321 \text{ 1/min}$$
- posmak: $s = 0,132 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,132 \cdot 2321 = 306,37 \text{ mm/min}$
- broj prolaza alata: $i = 4$
- duljina obrade: $L = 1 + L_1 = 1 + 107,3 = 108,3 \text{ mm}$
- strojno vrijeme:
$$t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{4 \cdot 108,3}{306,37} = 1,41 \text{ min}$$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,05 \text{ min}$

6.2. Operacija 20

Naziv operacije: Unutarnje tokarenje

Stroj: CNC tokarsko – glodači obradni centar

Zahvat 1: Fino unutarnje tokarenje $\varnothing 25$ i skošenje $1/30^\circ$

ALAT:

- Držač: A12M-SDXCR 07-R
- Pločica: DCMT 07 02 08-UM 4425

Držač „A12M-SDXCR 07-R“ i pločica „DCMT 07 02 08-UM 4425“ su prikazani na slici 6.5.



Slika 6.5 Držač „A12M-SDXCR 07-R“ i pločica „DCMT 07 02 08-UM 4425“

REŽIMI OBRADE

- promjer obrade: $D = 25$ mm
- brzina rezanja: $v_c = 314$ m/min

- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{314 \cdot 1000}{\pi \cdot 25} = 4000 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,282 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,282 \cdot 4000 = 1128 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 0,5 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 1$
- duljina obrade: $L = 1 + L_1 + L_2 = 1 + 13 + 1 = 15 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{1 \cdot 15}{1128} = 0,013 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,05 \text{ min}$

Zahvat 2: Grubo unutarje tokarenje $\varnothing 31,6$

ALAT:

-Adapter: 570-SVUCL-20-11X-E

-Pločica: VCMT 11 03 04-PM 4335

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 31,6 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 301 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{301 \cdot 1000}{\pi \cdot 31,6} = 3034 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,11 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,11 \cdot 3034 = 333,74 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 2,2 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 3$
- duljina obrade: $L = L_1 = 93,8 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{3 \cdot 93,8}{333,74} = 0,84 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,05 \text{ min}$

Zahvat 3: Fino unutarnje tokarenje $\varnothing 33$

ALAT:

-Adapter: 570-SDUCR-20-07-EX

-Pločica: DCMT 07 02 04-PF 4415

Adapter „570-SDUCR-20-07-EX“ i pločica „DCMT 07 02 04-PF 4415“ su prikazani na slici 6.6.



Slika 6.6 Adapter 570-SDUCR-20-07-EX i pločica DCMT 07 02 04-PF 4415

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 33 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 450 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{450 \cdot 1000}{\pi \cdot 33} = 4341 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,08 \text{ mm/okr}$

- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,08 \cdot 4341 = 347,28 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 0,7 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 1$
- duljina obrade: $L = L_1 = 87,8 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{1 \cdot 87,8}{347,28} = 0,25 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,05 \text{ min}$

6.3. Operacija 30

Naziv operacije: Vanjsko tokarenje konture

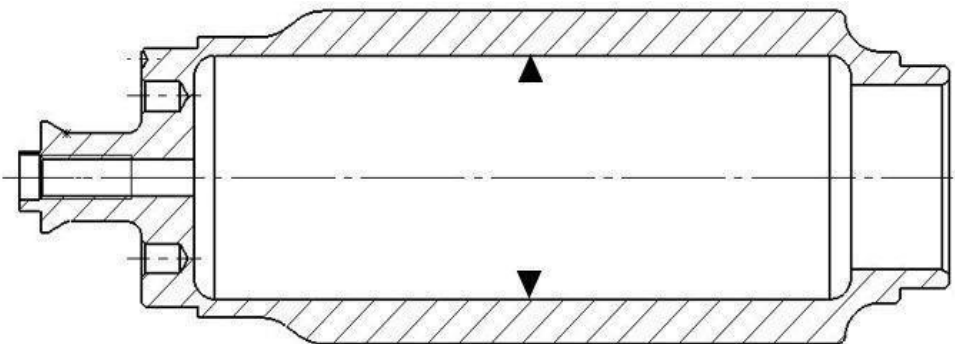
Stroj: CNC tokarsko – glodači obradni centar

Zahvat 1: Stezanje

ALAT: stezna glava

VRIJEME: $t_r = 0,05 \text{ min}$

Zahvat 1 operacije 30 je prikazan na slici 6.7.



Slika 6.7 Operacija 30, zahvat 1

Zahvat 2: Grubo vanjsko tokarenje $\varnothing 46$

ALAT:

-Držač: 570-DVUNL-40-16

-Pločica: VNMG 16 04 08-MM 1125

Držač „570-DVUNL-40-16“ i pločica „VNMG 16 04 08-MM 1125“ su prikazani na slici 6.8.



Slika 6.8 Držač „570-DVUNL-40-16“ i pločica „VNMG 16 04 08-MM 1125“

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 46 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 145 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{145 \cdot 1000}{\pi \cdot 46} = 1003 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,25 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,25 \cdot 1003 = 250,75 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 1 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 2$

- duljina obrade: $L = 1 + L_1 + 1 = 1 + 133,8 + 1 = 135,8 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{2 \cdot 135,8}{250,75} = 1,08 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,05 \text{ min}$

Zahvat 3: Grubo vanjsko tokarenje Ø39

ALAT:

-Držać: 570-DVUNL-40-16

-Pločica: VNMG 16 04 08-MM 1125

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 39 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 165 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{165 \cdot 1000}{\pi \cdot 39} = 1347 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,35 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,35 \cdot 1347 = 471,45 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 1,5 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 3$
- duljina obrade: $L = 1 + L_1 + 1 = 1 + 45,5 + 1 = 47,5 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{3 \cdot 47,5}{471,45} = 0,3 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,04 \text{ min}$

Zahvat 4: Grubo vanjsko tokarenje Ø36

ALAT:

-Držać: 570-DVUNL-40-16

-Pločica: VNMG 16 04 08-MM 1125

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 36 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 130 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{130 \cdot 1000}{\pi \cdot 36} = 1149 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,3 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,3 \cdot 1149 = 344,7 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 1,2 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 2$
- duljina obrade: $L = 1 + L_1 + 1 = 1 + 34,5 + 1 = 36,5 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{2 \cdot 36,5}{344,7} = 0,21 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,04 \text{ min}$

Zahvat 5: Grubo vanjsko tokarenje Ø31

ALAT:

-Držać: 570-DVUNL-40-16

-Pločica: VNMG 16 04 08-MM 1125

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 31 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 140 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{140 \cdot 1000}{\pi \cdot 31} = 1438 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,3 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,3 \cdot 1438 = 431,4 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 2 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 2$

- duljina obrade: $L = 1 + L_1 + 1 = 1 + 6,5 + 1 = 8,5 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{2 \cdot 8,5}{431,4} = 0,04 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,04 \text{ min}$

Zahvat 6: Grubo vanjsko tokarenje Ø16

ALAT:

-Držać: 570-DVUNL-40-16

-Pločica: VNMG 16 04 08-MM 1125

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 16 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 195 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{195 \cdot 1000}{\pi \cdot 16} = 3879 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,3 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,3 \cdot 3879 = 1163,7 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 2 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 5$
- duljina obrade: $L = L_1 + 1 = 17,5 + 1 = 18,5 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{5 \cdot 18,5}{1163,7} = 0,08 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,04 \text{ min}$

Zahvat 7: Grubo vanjsko tokarenje Ø13

ALAT:

-Držać: 570-DVUNL-40-16

-Pločica: VNMG 16 04 08-MM 1125

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 13 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 145 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{145 \cdot 1000}{\pi \cdot 13} = 3550 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,2 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,2 \cdot 3550 = 710 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 1,1 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 2$
- duljina obrade: $L = 1 + L_1 = 1 + 14,35 = 15,35 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{2 \cdot 15,35}{710} = 0,04 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,04 \text{ min}$

Zahvat 8: Fino tokarenje Ø45

ALAT:

-Držać: 570-DVUNL-40-16

-Pločica: VNMG 16 04 04-QM 4325

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 45 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 330 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{330 \cdot 1000}{\pi \cdot 45} = 2334 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,2 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,2 \cdot 2334 = 466,8 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 0,5 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 1$

- duljina obrade: $L = 1 + L_1 + 1 = 1 + 74 + 1 = 76 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{1 \cdot 76}{466,8} = 0,16 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,04 \text{ min}$

Držač „570-DVUNR-40-16“ i pločica „VNMG 16 04 04-QM 4325“ su prikazani na slici 6.9.



Slika 6.9 Držač „570-DVUNL-40-16“ i pločica „VNMG 16 04 04-QM 4325“

Zahvat 9: Fino tokarenje Ø34

ALAT:

-Držač: 570-DVUNL-40-16

-Pločica: VNMG 16 04 04-QM 4325

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 34 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 310 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{310 \cdot 1000}{\pi \cdot 34} = 2902 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,2 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,2 \cdot 2902 = 580,4 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 1 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 1$
- duljina obrade: $L = 1 + L_1 = 1 + 2,5 = 3,5 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{1 \cdot 3,5}{580,4} = 0,006 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,04 \text{ min}$

Zahvat 10: Fino tokarenje Ø30

ALAT:

-Držać: 570-DVUNL-40-16

-Pločica: VNMG 16 04 04-QM 4325

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 30 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 315 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{315 \cdot 1000}{\pi \cdot 30} = 3342 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,2 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,2 \cdot 3342 = 668,4 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 0,5 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 1$
- duljina obrade: $L = 1 + L_1 = 1 + 6,5 = 7,5 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{1 \cdot 7,5}{668,4} = 0,01 \text{ min}$

- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,04 \text{ min}$

Zahvat 11: Fino tokarenje Ø38

ALAT:

-Držač: 570-DVUNL-40-16

-Pločica: VNMG 16 04 04-QM 4325

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 38 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 320 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{320 \cdot 1000}{\pi \cdot 38} = 2681 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,2 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,2 \cdot 2681 = 536,2 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 0,5 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 1$
- duljina obrade: $L = 1 + L_1 = 1 + 9,1 = 10,1 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{1 \cdot 10,1}{536,2} = 0,02 \text{ min}$

pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,04 \text{ min}$

Zahvat 12: Fino tokarenje Ø35

ALAT:

-Držač: 570-DTFNL-32-16-L

-Pločica: TNMG 16 04 04-MF 4415

Pločica „TNMG 16 04 04-MF 4415“ je prikazana na slici 6.10.



Slika 6.10 Pločica „TNMG 16 04 04-MF 4415“ [7]

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 35 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 350 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{350 \cdot 1000}{\pi \cdot 35} = 3183 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,25 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,25 \cdot 3183 = 795,75 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 0,5 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 1$
- duljina obrade: $L = 1 + L_1 = 1 + 8 = 9 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{1 \cdot 9}{795,75} = 0,01 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,1 \text{ min}$

Zahvat 13: Fino tokarenje Ø15

ALAT:

-Držać: 570-DTFNL-32-16-L

-Pločica: TNMG 16 04 04-MF 4415

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 15 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 345 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{345 \cdot 1000}{\pi \cdot 15} = 7321 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,2 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,2 \cdot 7321 = 1464,2 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 0,5 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 1$
- duljina obrade: $L = 1 + L_1 = 1 + 3,15 = 4,15 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{1 \cdot 4,15}{1462,2} = 0,003 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,04 \text{ min}$

Zahvat 14: Fino tokarenje Ø12

ALAT:

-Držać: 570-DTFNL-32-16-L

-Pločica: TNMG 16 04 04-MF 4415

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 12 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 345 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{345 \cdot 1000}{\pi \cdot 12} = 9151 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,3 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 0,3 \cdot 9151 = 2745,3 \text{ mm/min}$
- dubina rezanja: $a_p = 0,5 \text{ mm}$
- broj prolaza alata: $i = 1$
- duljina obrade: $L = 1 + L_1 = 1 + 10,752 = 11,752 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{1 \cdot 11,752}{2745,3} = 0,004 \text{ min}$

pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,04 \text{ min}$

6.4. Operacija 40

Naziv operacije: Bušenje provrta i urezivanje navoja

Stroj: CNC tokarsko – glodači obradni centar

Zahvat 1: Bušenje prolaznog provrta Ø5

ALAT:

-Svrđlo sa ravnim vrhom ($\varphi = 0, C = 0$)

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 5 \text{ mm}$
- dubina obrade: $d = 25,5 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 100 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{100 \cdot 1000}{\pi \cdot 5} = 6366 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,15 \text{ mm/okr}$
- broj prolaza alata: $i = 1$
- duljina obrade: $L = 2 + L_1 + 2 = 2 + 25,5 + 2 = 29,5 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{n \cdot s} = \frac{1 \cdot 29,5}{6366 \cdot 0,15} = 0,03 \text{ min}$
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,05 \text{ min}$

Svrđlo „C-12842 G3“ prikazano je na slici 6.11.



Slika 6.11 Svrđlo „C-12842 G3“

Zahvat 2: urezivanje navoja M6

ALAT: T300-PM100DA-M6 P1PM

Alat „T300-PM100DA-M6 P1PM“ je prikazan na slici 6.12.

REŽIMI OBRADE:

- promjer obrade: $D = 6 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 12 \text{ m/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{12 \cdot 1000}{\pi \cdot 6} = 637 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 1 \text{ mm/okr}$
- posmična brzina: $s' = s \cdot n = 1 \cdot 637 = 637 \text{ mm/min}$
- broj prolaza alata: $i = 1$
- duljina obrade: $L = 2 + L_1 + 2 = 2 + 16 + 2 = 20 \text{ mm}$
- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{s'} = \frac{1 \cdot 20}{637} = 0,03 \text{ min}$

- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,04 \text{ min}$



Slika 6.12 Alat „T300-PM100DA-M6 P1PM“ [7]

6.5. Operacija 50

Naziv operacije: Bušenje provrta

Stroj: CNC tokarsko – glodači obradni centar

Zahvat 1: Bušenje slijepih provrta $6 \times \varnothing 4$

ALAT: Svrđlo sa ravnim vrhom ($\varphi = 0$, $C = 0$)

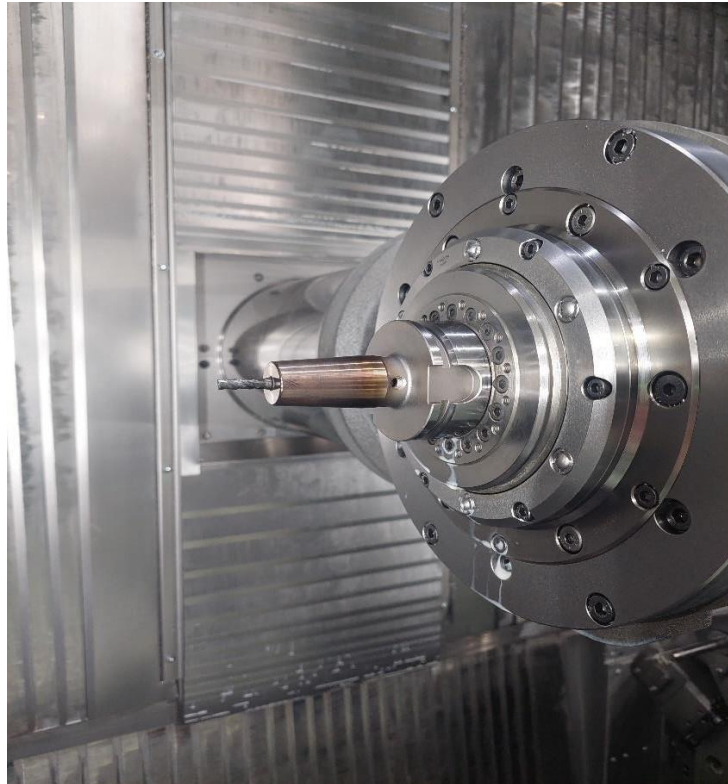
REŽIMI OBRADE:

promjer obrade: $D = 4 \text{ mm}$

- dubina obrade: $d = 5,5 \text{ mm}$
- brzina rezanja: $v_c = 15 \text{ mm/min}$
- brzina vrtnje: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{15 \cdot 1000}{\pi \cdot 4} = 1194 \text{ 1/min}$
- posmak: $s = 0,1 \text{ mm/okr}$
- broj prolaza alata: $i = 1$
- duljina obrade: $L = 2 + L_1 = 2 + 5,5 = 7,5 \text{ mm}$

- strojno vrijeme: $t_s = \frac{i \cdot L}{n \cdot s} = \frac{1 \cdot 7,5}{1194 \cdot 0,1} = 0,06 \text{ min}$ za jedan provrt
- pomoćno strojno vrijeme: $t_{sp} = 0,05 \text{ min}$

Svrdlo „C-13350 G3“ je prikazano na slici 6.13.



Slika 6.13 Svrdlo „C-13350 G3“

7. Karakteristike stroja

Posljednjih godina, industrija je doživjela porast zahtjeva za točnošću, preciznošću i povećanom produktivnošću strojno obrađenih komponenti. Kako bi se to postiglo potrebna je preciznost stroja, a proizvođač alatnih strojeva bi trebao identificirati najznačajnije karakteristike koje definiraju performanse stroja i primijeniti multi-varijabne tehnike optimizacije tijekom procesa projektiranja. Krutost, sposobnost mehaničkog sustava da izdrži opterećenja bez prekomjerne promjene njegove geometrije (deformacije), je jedan od najvažnijih kriterija pri projektiranju. Krutost stroja ima izravan utjecaj na točnost položaja i predstavlja jedan od ključnih parametara koji se koriste za usporedbu alatnih strojeva. Premala krutost, kao i nedovoljno prigušivanje vibracija ima mnoge negativne posljedice, od kojih su najvažnije sljedeće: dodatno trošenje reznih rubova i nekontrolirani, nepredvidivi obrasci trošenja koji ugrožavaju pouzdanost obrade jedan su od problema. Nadalje, dobiva se degradirana završna obrada površine i povećan broj otpadnih ili prerađenih radnih komada. Dakle, vibracije ugrožavaju sustav obrade i mogu dovesti do problema s vremenom isporuke i sigurnošću isporuke. Prethodna dva učinka vibracija također imaju negativan učinak na ekonomičnost obrade. Budući da vibracija zahtijeva energiju, ona također troši energiju i dovodi u pitanje profesionalizam operatera strojne obrade



Slika 7.1 Tokarsko-glodači obradni centar INDEX G420 [11]

Proizvođači nude razne strojeve za različite zadatke. Prije donošenja odluke o stroju koji će obavljati posao, mora se uzeti u obzir vrsta posla koja se obavlja i je li potreban stroj uopće dostupan. Parametri koje treba uzeti u obzir pri odabiru stroja su: stanje stroja (o tome uvelike

ovisi efikasnost stroja, η), dostupna snaga koja se računa prema jednadžbi 1., horizontalni / vertikalni stroj, vrsta i veličina vretena, broj osi/konfiguracija, stezanje obratka itd.

$$P_c = \frac{v_c \cdot f \cdot a_p \cdot k_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta} \quad (1)$$

Ugrubo vrijednosti specifičnih sila za obradu aluminija iznose 800N, za čelike 2500 do 3000 N, a za lijevano željezo 1500 N. Stroj na kojem će se vršiti obrada zadanog komada je tokarsko – glodači obradni centar Index G420 koji je prikazan na slici 7.1. Radni prostor koji nudi INDEKS G420 dovoljan je za obradu bilo koje vrste izradaka. Radno područje može primiti dijelove do duljine od 1600 mm / 2300 mm. Maksimalna brzina glavnog vretena je 4000 min^{-1} , a promjer stezne glave je 400mm. U radno područje obradnog centra mogu se integrirati do 3 nosača alata (slika 7.2) sa do 139 alata. Dostupni su stabilni oslonci za obradu dugih dijelova. Naravno, INDEX G420 je također sposoban za istovremenu obradu u pet osi. Sve relevantne komponente lako su dostupne osoblju za rad i održavanje. Opcionalno, može se koristiti integrirani 2-osni sustav rukovanja izratkom usklađen s procesima obrade. Integrirana jedinica za rukovanje radnim komadima prikladna je za dijelove težine do 25 kg i promjera do 120 mm.



Slika 7.2 Nosači alata [11]

8. Odabir alata

Obrada metala rezanjem pruža najveću točnost i fleksibilnost, jer omogućava brzi prijelaz iz obrade dijelova jednog oblika i dimenzije na obradu drugog oblika i dimenzije. Alati za rezanje omogućuju skidanje određenog sloja materijala, oblikovanje poluproizvoda i formiranje dijelova potrebnog oblika i dimenzija. No, da bi ispunili svoju ulogu, alati za rezanje moraju biti izrađeni od prikladnih materijala i imati odgovarajući oblik i svojstva koja pružaju oblikovanje predmeta obrade. Zbog toga je odabir alata, kao podfunkcije planiranja procesa, složen zadatak koji zahtijeva znatno iskustvo i znanje. Elementi koji utječu na odluku o odabiru alata su: materijal izratka, tj. kemijsko i metalurško stanje, karakteristike dijela, tj. geometrija, točnost, završna obrada i integritet površine, karakteristike alatnih strojeva uključujući steznu glavu, broj alata u spremniku alata i dimenziju držača alata i karakteristike samog alata za rezanje. Pri svakom odabiru alata potrebno je odrediti i nekoliko drugih čimbenika kao što je držač alata (sustav stezanja, vrsta,), pločica (ako se radi o takvom konstrukcijskom rješenju) i njen oblik, veličinu, razred te radijus vrha pločice, nadalje je potrebno odrediti i uvjete obrade (posmak, brzina i dubina rezanja), vrstu hlađenja (ako je potrebno) i ukupne troškove obrade komada. Tehnološki gledano razlikuju se tri grupe alata: alati za obradu, alati za pozicioniranje i stezanje te alati za mjerenje i kontrolu. Pored toga alati se mogu podijeliti i na standardne i nestandardne. Standardni alati imaju univerzalnu primjenu te se nabavljaju preko kataloga, dok je za nestandardni alat potrebno opisno definirati zahtjev za njegovu konstrukciju i izradu. Dakle, nestandardni alat se specijalno priprema za predmet i samim time njegova izrada je puno skuplja. Alati za obradu biraju se prema zahtjevu kvalitete, točnosti, snazi i stabilnosti stroja, dodatku za obradu, obrađivanom materijalu itd. Određivanje alata usko je povezano sa određivanjem režima obrade, ali prije toga potrebno je obaviti izbor samog oblika alata. Prema vrsti konstrukcijskog rješenja odnosno s obzirom na odnos tijela alata i rezne oštrice danas postoje alati čija je oštrica izrađena iz istog materijala kao i tijelo (slika 8.1), i alati sa zalemljenom oštricom uz tijelo koji predstavljaju prijelaz na alate sa mehanički učvršćenom oštricom uz tijelo – alati sa zamjenjivom oštricom (slika 8.1). Industrija zahtijeva obje vrste alata za rezanje, ovisno o tehnološkim procesima. Glavna prednost alata iz jednog komada je njegova visoka preciznost: u prosjeku za jednu ocjenu kvalitete viša od one kod rezača čije se rezne pločice se mogu mijenjati. Kod alata iz jednog komada rezna oštrica se ne može zamijeniti, ali je prikladna za ponovno brušenje. Međutim, ova vrsta alata zahtijeva znatno više alatnog materijala i potrebno je više vremena i znanja za izradu takvog alata brušenjem. Ova ograničenja dovode do znatno veće cijene alata.



Slika 8.1 Alati iz jednog komada od brzoreznog čelika (lijevo) i alati sa zamjenjivim reznim pločicama [12]

Čvrsti rezači često dakle daju povoljnije rezultate u smislu stabilnosti i točnosti, ali ta razlika može biti zanemariva s obzirom na uštede troškova i svestranost sustava rezanja sa zamjenjivim reznim pločicama. Prednost ovakvih alata je ta da je potreban samo mali umetak materijala za rezanje kako bi se osigurala sposobnost rezanja. Mala veličina čini izradu umetka lakšom od izrade alata od istog materijala. To također smanjuje troškove jer držač alata može biti izrađen od jeftinijeg i čvršćeg materijala. Osim toga istrošen rub rezne oštrice se često se samo zarotira na neistrošeni rub, bez narušavanja cjelokupne geometrije. To štedi vrijeme u proizvodnji dopuštajući povremeno predstavljanje svježih reznih rubova bez potrebe za brušenjem alata, promjenama postavki ili unosom novih vrijednosti u NC program. U nekim je situacijama alat sa zamjenjivom pločicom bolji jer kombinira žilavost držača alata s tvrdoćom umetka. U drugim situacijama to je manje optimalno, jer spoj između držača alata i umetka smanjuje krutost. Za teške rezove (obično grube ili poluhrapave), sa značajnom silom rezanja i potrošnjom energije, poželjno je rješenje alat sa zamjenjivom pločicom. Ako operacija uključuje lagane rezove i zahtijeva visoku točnost i završnu obradu, potreban je čvrst alat i u tom slučaju koristimo alate iz jednog komada. Alati za mjerenje i kontrolu se koriste za provjeru zauzetih pozicija alata pri obradi kao i kontrolu točnosti obavljenih zahvata ili operacija.

8.1. Oblik pločice

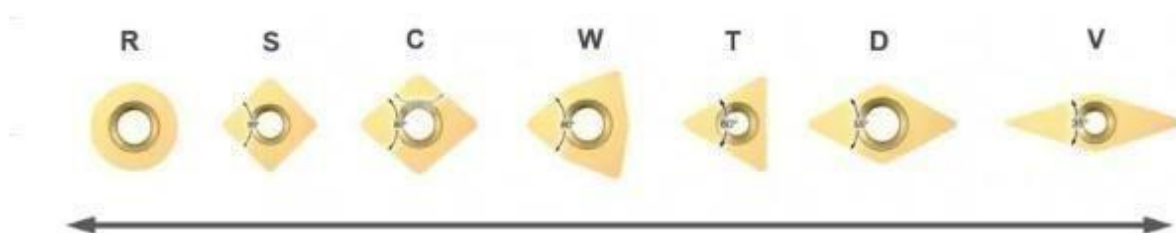
Oblik umetka treba odabrati u odnosu na pristup ulaznom kutu koji se zahtijeva od alata (slika 8.2). Kako bi se osigurala čvrstoća i pouzdanost umetka bira se što veći kut umetka. Međutim, to se mora uskladiti s varijacijama rezova koje je potrebno izvesti. Veliki kut nosa je čvršći, ali zahtijeva više snage stroja i ima veću sklonost vibracijama. Mali kut nosa je slabiji i

ima mali zahvat oštrice, što ga može učiniti osjetljivijim na učinke topline. C i W umetci za tokarenje često se koriste za grubu obradu zbog njihovog većeg kuta vrha, što ih čini krutijima, a samim time i pogodnijima za grubu obradu prilikom koje se javljaju povećane sile rezanja i vibracije. Umetci s manjim radijusom, kao što su D i V, često se koriste za završnu obradu jer iako imaju manju snagu, manji kut može doseći više detalja dijela.

vanjska obrada	80°	55°	-	90°	60°	80°	35°	55°
								
	●●	●	●	●	●	●		●
		●●	●		●		●	●
	●	●	●	●●	●	●		●
			●●		●			
								

Slika 8.2 Odabir oblika pločice u ovisnosti o vrsti obrade [6]

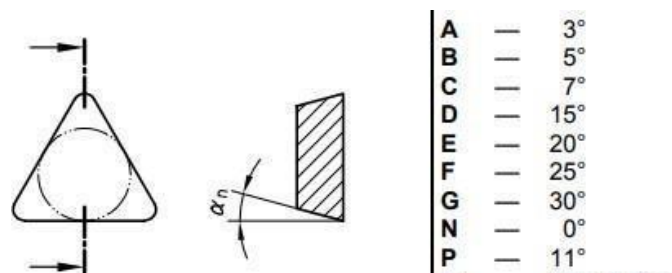
Na slici 8.3 je prikazan raspon između dvije krajnosti (reznice oštrice s najvećim i najmanji kutem). Približavajući se lijevoj strani, odnosno reznoj oštrici s najvećim kutom (360°) tako rezne oštrice postaju prikladnije za obradu pri velikim silama i vibracijama. S druge strane približavajući se oštrici V oblika rezni rub slabi i smanjuje se sila rezanja koju ta pločica može podnijeti.



Slika 8.3 Odnos veličine kuta i jakosti oštrice [13]

8.2. Stražnji kut pločice

Stražnji kut je u osnovi definiran kao nagib bočne površine ili zračne površine alata za rezanje metala u odnosu na obrađenu ili gotovu površinu. Stražnji kut nikada ne može biti negativan (slika 8.4). Premali kut rezultirat će intenzivnim trenjem, a time i lošom kvalitetom površine i kraćim vijekom trajanja alata jer je alat uslijed veće kontaktne dužine izložen većoj toplini koja može prouzrokovati plastičnu deformaciju. Previsok zazorni kut učinit će vrh alata manje jakim i može uzrokovati katastrofalan kvar alata. Stoga je optimalna vrijednost stražnjeg kuta poželjna.



Slika 8.4 Stražnji kutevi pločice i pripadajuće oznake [2]

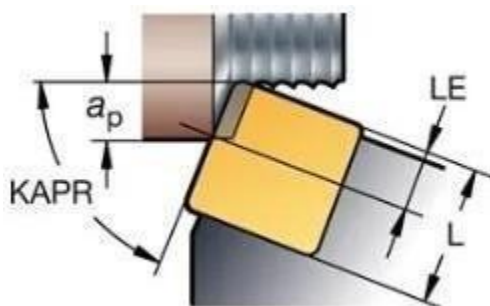
8.3. Lomljenje strugotine

Pločice se razlikuju i prema tome sadrže li jednostrani, dvostrani ili uopće ne sadrže sustav za lomljenje strugotine. Ne tako davno, umetci nisu imali sustave za lomljenje strugotine u sklopu rezne pločice. Svi umetci su radili, pod uvjetom da su bili ravni. Funkcija „razbijača“ strugotine je poboljšati kontrolu strugotine i smanjiti otpor pri rezanju te tako povećati performanse strojne obrade. Ako se strugotina može razlomiti na prikladne duljine neće doći do omotavanja oko obratka, vibracije će se smanjiti i alati se neće tako lako oštetiti. Još jedna značajka koju pruža gravura za lomljenje strugotine je njezina sposobnost da zadrži toplinu strugotine izvan umetka. S umetkom s ravnim vrhom vruća strugotina bi klizila po prednjoj strani umetka, a toplina iz strugotine bi se prenijela u umetak, skraćujući vijek trajanja alata. Kod razbijača strugotine, mala „jednostavna izbočina“ ili žlijeb smanjila bi količinu kontakta strugotine s umetkom i time smanjila količinu topline koja se prenosi u umetak, produžavajući vijek trajanja alata.

8.4. Veličina pločice

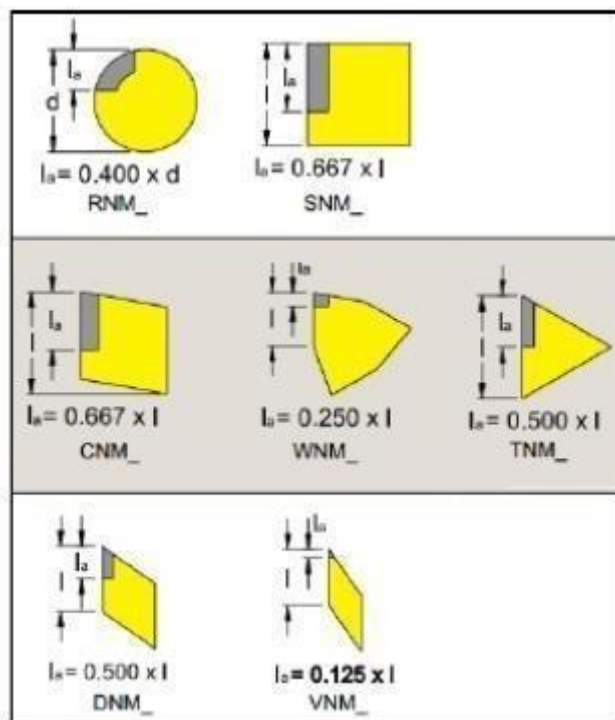
Veličina pločice odabire se ovisno o zahtjevima primjene i prostoru koji rezni alat ima na raspolaganju. S većom pločicom odnosno duljom reznom oštricom, stabilnost je bolja. Pri

odabiru veličine pločice treba voditi računa da minimalna efektivna veličina dubine rezanja LE nije manja od $2/3 r$. Najmanja efektivna dubina rezanja LE može se odrediti ovisno o dubini rezanja (a_p) i kutu $KAPR$, slika 8.5



Slika 8.5 Prikaz efektivne dubine rezanja i veličine pločice [10]

Na osnovi odabrane dubine rezanja i kuta očita se efektivna dubina rezanja, te se na osnovi oblika pločice prema slici 8.6 izračuna minimalna veličina pločice L .

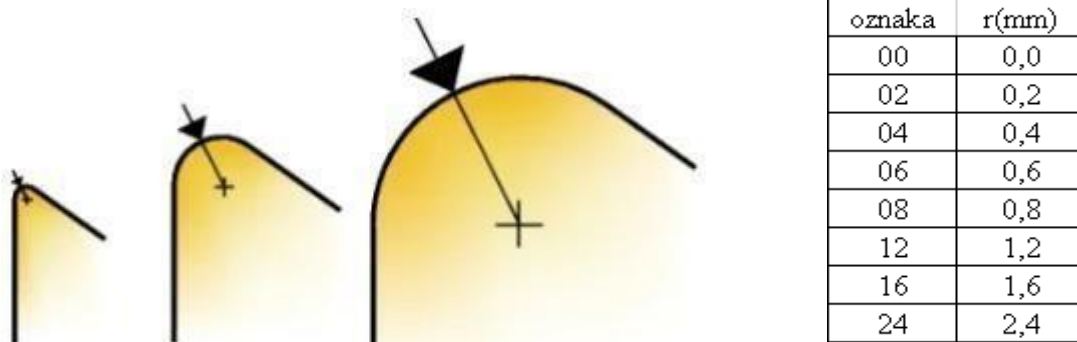


Slika 8.6 Formule za izračunavanje veličine pločice, L u ovisnosti o obliku pločice [6]

S dobivenom veličinom pločice, i u ovisnosti o obliku pločice mogu se dobiti različite hrapavosti površina (općenito manje veličine daju kvalitetniju površinu).

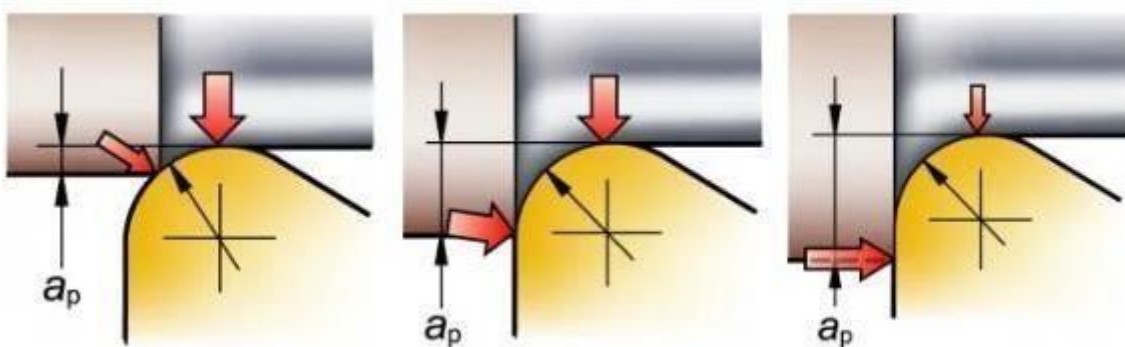
8.5. Radijus vrha pločice

Umetci su dostupni s nekoliko veličina radijusa nosa (slika 8.7). Odabir ovisi o dubini rezanja i posmaku, te utječe na završnu obradu površine, lomljenje strugotine i čvrstoću umetka.



Slika 8.7 Veličine radijusa nosa [10]

Mali radijus nosa idealan je za manje dubine rezanja, smanjuje vibracije, ima slabu oštricu i generalno bolje lomi strugotinu. Dok je veliki radijus nosa oštrice pogodan za velike posmake i velike dubine rezanja. Odnos između radijusa nosa i dubine rezanja utječe na tendenciju vibracija (slika 8.8). Radijalne sile koje guraju umetak od površine rezanja postaju sve više aksijalne kako se dubina rezanja povećava. Poželjno je imati više aksijalnih sila nego radijalnih. Velike radijalne sile mogu negativno utjecati na djelovanje rezanja što može dovesti do vibracija i loše obrade površine. Kao opće pravilo, odabire se polumjer nosa koji je jednak ili manji od dubine reza.



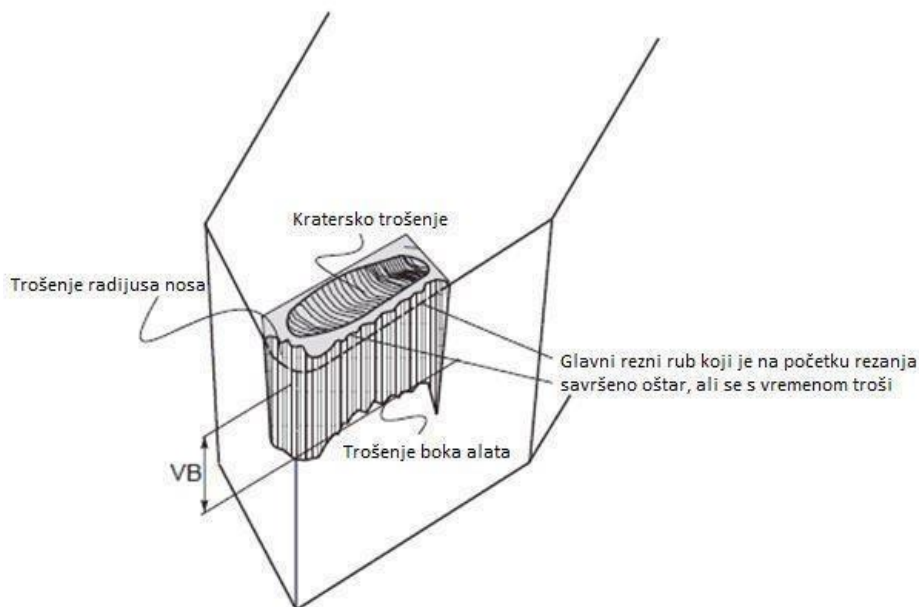
Slika 8.8 Stvaranje sila u ovisnosti o radijusu nosa i dubini rezanja [10]

9. Čimbenici koji utječu na vijek trajanja reznih alata

Stanje reznog alata važan je čimbenik u svakom procesu rezanja metala zbog dodatnih troškova otpadnih komponenti, samog loma alata stroja i neplaniranih zastoja koji su rezultat korištenja istrošenog alata. Općenito, kvar i trošenje reznih alata ovise o materijalu i geometriji alata, materijalu obratka, parametrima rezanja (brzina rezanja, posmaka i dubina rezanja), tekućinama za hlađenje i podmazivanje, karakteristikama alatnih strojeva i vještinama operatera. Pod odgovarajućim uvjetima rezanja, kumulativni učinak različitih mehanizama trošenja uzrokuje postupnu degradaciju reznog ruba s vremenom rezanja. Dakle, istrošenost alata neizbježan je uzrok kvara alata u procesu obrade. Opseg istrošenosti alata ima snažan utjecaj na točnost dimenzija i dobivenu završnu obradu površine. Sljedeći znakovi ukazuju da je vijek trajanja alata gotov: loša obrada površine, greške u dimenzioniranju, pregrijavanje radnog dijela - sučelja alata zbog trenja, naglo povećanje potrošnje energije itd.

9.1. Mehanizmi trošenja

Mehanizme trošenja alata koji su identificirani i općenito prihvaćeni uključuju adheziju, abraziju, difuziju, kemijsku reakciju i oksidaciju. Pri malim brzinama rezanja, obično su dominantni adhezija i abrazija, a difuzija, kemijska reakcija i oksidacija važniji su pri rezanju velikim brzinama. Uobičajeni način kategorizacije trošenja alata je fokusiranje na regije reznog alata gdje se mogu pojaviti. Svi ti mehanizmi trošenja alata događaju se na tri glavna mjesta reznog alata kao što je prikazano na slici 9.1.



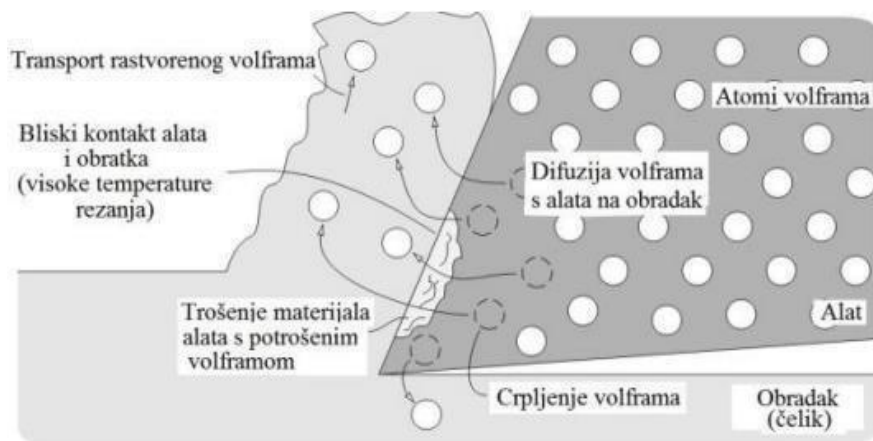
Slika 9.1 Vrste zona habanja alata [14]

Abrazivno trošenje nastaje kao rezultat interakcije između lica alata i obratka te nastaje zbog različitosti tvrdoće dva materijala koji su u kontaktu. Karakterizira ga gubitak reljefa na boku alata, a najpoznatije takvo trošenje se događa uslijed povećanja brzine rezanja koje izaziva toplinsko omekšavanje alata na bočnoj strani. Adhezivno trošenje je općenito najvažnija vrsta trošenja za većinu čistih nepodmazanih pokretnih dijelova ili pokretnih dijelova koji rade u djelomično podmazanim uvjetima. Javlja se kada sile u materijalu nisu tako jake kao interakcijske sile s obratkom. Pri visokoj temperaturi i pritisku na reznom rubu, sučelje alat-strugotina stvara metalnu vezu u obliku točkastih zavora. Točkasti zavar rezultira nepravilnim strujanjem strugotine preko površine alata i formira nagomilane rubove. Adhezivno trošenje potiče sklonost materijala da međusobno tvore čvrste otopine ili intermetalne spojeve. Dakle, kombinacije materijala različite kristalne strukture i kemijskih svojstava obično imaju nižu adheziju. Slika 9.2 ilustrira sklonost metalnih parova da se međusobno prijanjaju.

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sn	Pb
In				2	3				4	3	3	4	4	1	3	4	4	4	4
Pb	2	2	1	1	1	1	1	4	4	4	1	2	3	1	1	3	3	4	
Sn	3		1	3	3	2	3	4	3	4	3	4	4	2	3	2	4		
Cd			3	3	2	2		4	4	3	3	4	4	1	4	4			
Mg		3		3	2	2	2		4	2	4	4	4	4	4	3			
Zn		3	4	4	4	4	2	4	2	3	4	4	4	4	4				
Al	4	3	4	3	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4					
Ag	1	2	1	1	1	1	2	4	3	4	3	4							
Au	4	3	4	3	4	4		4	4	3	4								
Cu	2	1	1	4	4	3	2	4	4	3									
Ti	4	4	4	3	4	4	4	4	4										
Zr	3	4	3	4	3	2	4	3											
Pt	4	4	4	4	4	4	4												
Nb	4	4	4	4	4	4													
Fe	4	4	4	4	4														
Ni	4	4	4	4															
Co	4	4	4																
Cr	4	4																	
Mo	4																		

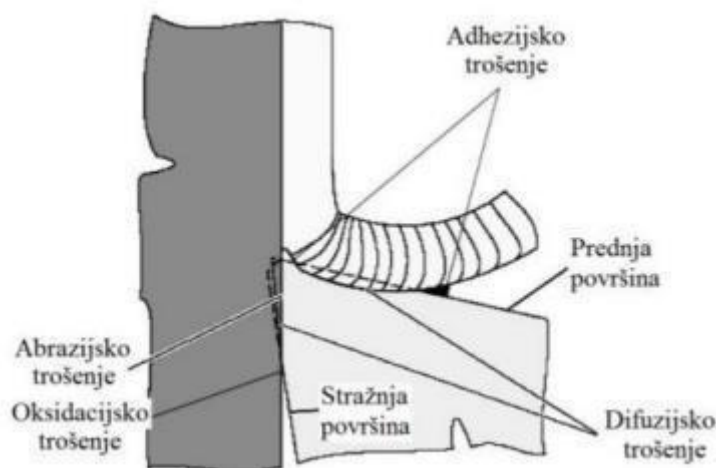
Slika 9.2 Sklonost metalnih parova da se drže zajedno (1 predstavlja najveći otpor, a 4 predstavlja najmanji otpor, a time i najgoru kombinaciju) [15]

Difuzijsko trošenje obično je uzrokovano atomskim prijenosom između materijala koji su u kontaktu pod visokim tlakom i temperaturnim uvjetima. Ovaj fenomen počinje na sučelju strugotina-alat. Pri tako povišenim temperaturama neke čestice materijala alata difundiraju u materijal strugotine (slika 9.3). Također se može dogoditi da neke čestice radnog materijala difundiraju i u materijale alata. Ova izmjena čestica mijenja svojstva materijala alata i uzrokuje trošenje.



Slika 9.3 Princip difuzijskog trošenja na alatu od WC [16]

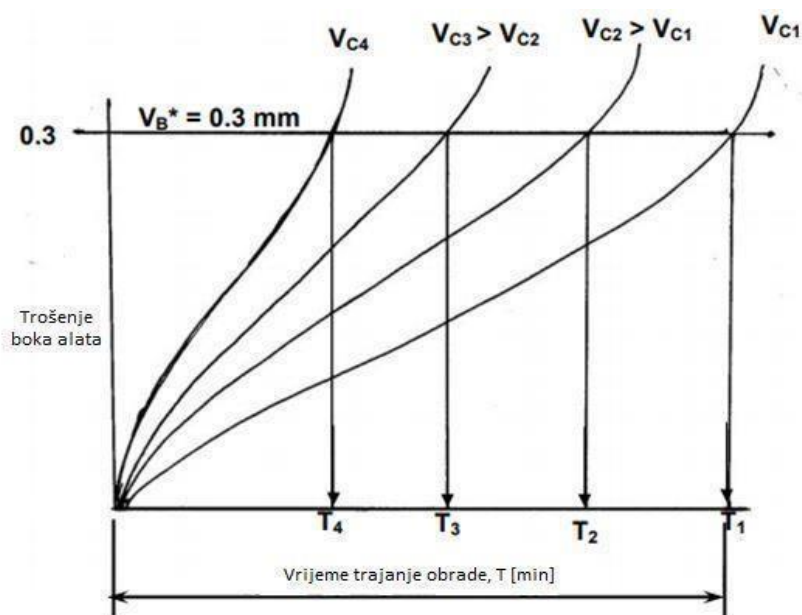
Strogo govoreći, kemijska reakcija nije mehanizam trošenja. Međutim, ako dođe do kemijske reakcije, to može značajno utjecati na trošenje alata kada materijal alata reagira s radnim materijalom ili drugim kemikalijama stvarajući spojeve koji se nose u struji strugotine ili u novo generiranoj površini obratka. Kemijsko trošenje postaje dominantno kako se brzina rezanja povećava kod strojne obrade visoko reaktivnih materijala kao što su legure titana. Oksidacija predstavlja jedan od mehanizama trošenja kemijske reakcije do kojeg dolazi kada materijal alata ili radni materijal reagira s atmosferskim kisikom. Često se opaža na područjima gdje je kontakt alata i strugotine izložen atmosferi (slika 9.4) i lako se prepoznaje po promjeni boje materijala alata na zoni utjecaja.



Slika 9.4 Karakteristična područja trošenja na alatu za tokarenje [14]

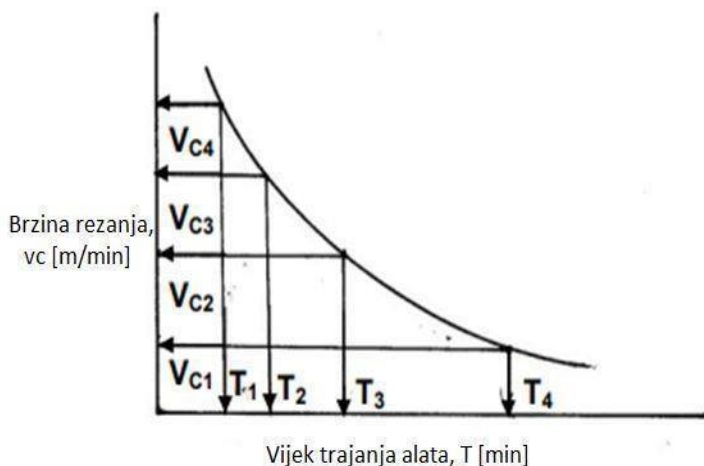
9.2. Parametri obrade

Istrošenost, a time i vijek trajanja alata bilo kojeg alata za bilo koji radni materijal ovisi uvelike o parametrima obrade, tj. brzini rezanja, posmaku i dubini rezanja. Uobičajeni obrazac rasta trošenja reznog alata, načelo ocjenjivanja vijeka trajanja alata i njegova ovisnost o brzini rezanja shematski su prikazani na slici 9.5



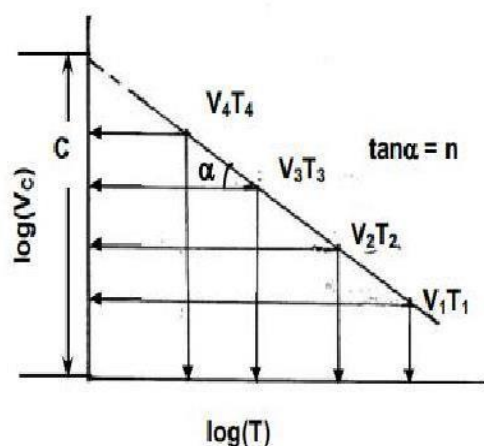
Slika 9.5 Trošenje boka alata u ovisnosti o brzini rezanja [17]

Vijek trajanja alata očito se smanjuje s povećanjem brzine rezanja zadržavajući ostale uvjete nepromijenjenim kao što je prikazano. Ako se vremena obrade T_1, T_2, T_3, T_4 ucrtaju u odnosu na odgovarajuće brzine rezanja, $v_{C1}, v_{C2}, v_{C3}, v_{C4}$ itd. kao što je prikazano na slici 9.6 pojavljuje se glatka krivulja.

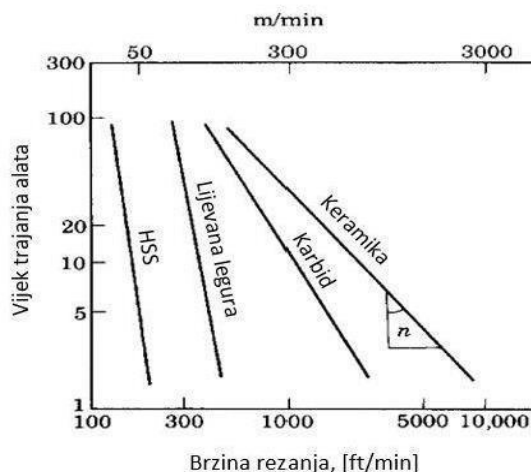


Slika 9.6 Odnos brzine rezanja i životnog vijeka alata [17]

Kada je F.W.Taylor nacrtao istu sliku uzimajući i brzinu rezanja i vijek trajanja alata u log-skali, pojavio se jasniji linearni odnos kao što je shematski prikazano na slici 9.7. U ovisnosti o vrsti materijala pojavljuju se različiti nagibi te krivulje (slika 9.8).



Slika 9.7 Odnos između brzine rezanja i vijeka trajanja alata na logaritamskoj skali [17]



Slika 9.8 Odnos između brzine rezanja i vijeka trajanja pojedinih alata [17]

S nagibom, n i presjekom, C , Taylor je izveo jednostavnu jednadžbu 2.

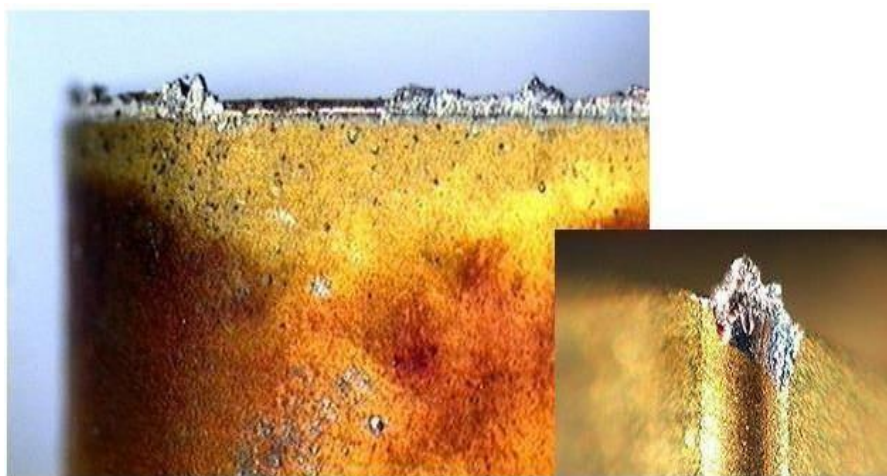
$$vT^n = C \quad (2)$$

Gdje je v brzina rezanja u metru po minuti, T vijek trajanja alata u minutama, n indeks koji se odnosi na materijal reznog alata i za alate od brzoreznog čelika n iznosi od 0,1 do 0,5, za alate od volframovog karbida, n je od 0,2 do 0,4, za keramičke alate, n je od 0,4 do 0,6. C predstavlja konstantu koja je brojčano jednaka brzini rezanja koju daje vijek trajanja alata od jedne minute i također ovisi o materijalu alata i samog izratka i okruženju rezanja (primjena SHIP-a). U Taylorovoj jednadžbi vijeka trajanja alata uzet je u obzir samo učinak varijacije brzine rezanja, v_c na vijek trajanja alata. Međutim, varijacije u posmaku i dubini rezanja također u određenoj mjeri igraju ulogu na vijek trajanja alata. Uzimajući u obzir učinke svih tih parametara, Taylorova jednadžba vijeka trajanja alata je modificirana kao jednadžba 3.

$$T = f(a_p, f, v, VB) = G \cdot a_p^a \cdot f^b \cdot v^c \cdot VB^d \quad (3)$$

Gdje je T vijek trajanja alata, f je posmak, v brzina rezanja, a_p dubina rezanja i VB je širina bočnog trošenja. G , a , b , c , d su prošireni koeficijenti Taylorove jednadžbe. Kriterij Taylorove jednadžbe nije praktičan u tvorničkom okruženju, stoga se koriste slijedeće zamjene koje su malo prikladnije u proizvodnji, a govore o istrošenosti alata: promjene u zvuku koji emitira rad,

degradacija završne obrade površine na radnom komadu, potpuni otkaz reznog ruba, smanjen broj obradaka, strugotina se namotava u obliku vrpce ili niza. Za najbolji vijek trajanja alata potrebno je smanjiti brzinu rezanja (za smanjenje topline), optimizirati posmak (za najkraće vrijeme rezanja) i optimizirati dubinu reza (za smanjenje broja rezova). Treba dakle pronaći idealnu brzinu rezanja jer s jedne strane preniska brzina uzrokuje ugrađeni rub (eng. built-up edge) koji je prikazan na slici 9.9 (s vremenom se izgrađeni rub lomi i sa sobom odnosi dijelove umetka, što dovodi do lomljenja i brzog trošenja bokova), otupljivanje rubova, neekonomičnost i lošu kvalitetu površine.



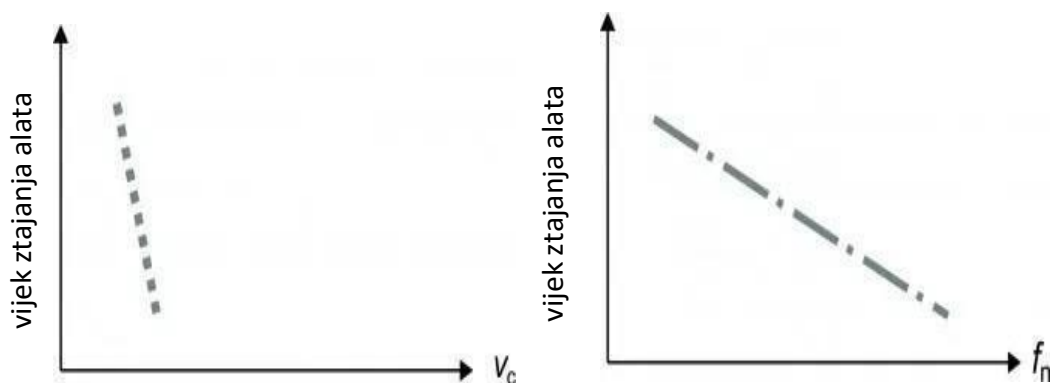
Slika 9.9 Ugrađeni rub uzrokovanom preniskom brzinom rezanja [18]

S druge strane ako je brzina rezanja previsoka dolazi do brzog trošenja bokova, loše završne obrade, brzog trošenja kratera i plastične deformacije (slika 9.10).

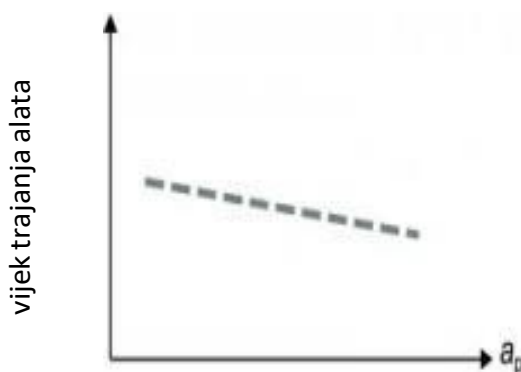


Slika 9.10 Oblici trošenja reznog alata u ovisnosti o brzini [17]

Utjecaj posmaka i dubine rezanja na vijek trajanja alata je manji nego utjecaj brzine rezanja kao što je to prikazano na slikama 9.11 i 9.12, ali je svejedno važno pronaći optimalne vrijednosti jer preniske ili previsoke vrijednosti mogu prouzrokovati određene probleme.



Slika 9.11 Utjecaj brzine i posmaka na vijek trajanja alata [17]

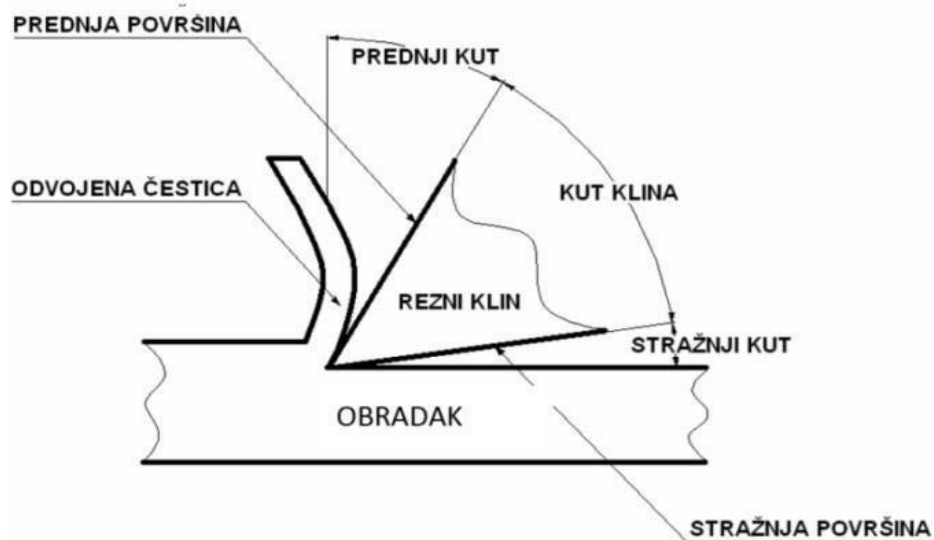


Slika 9.12 Dubina rezanja ima mali utjecaj na vijek trajanja alata [17]

Tako preniske vrijednosti posmaka dovode do trljanja alata od radni predmet umjesto rezanja, što može skratiti vijek trajanja alata jer dolazi do bržeg trošenje boka alata te se stvaraju tzv. BUE, a i takve vrijednosti jednostavno nisu ekonomične. S druge strane, ako je brzina posmaka previsoka, stvara se deblja strugotina, što u nekim slučajevima može rezultirati nagomilavanjem te iste strugotine koja se onda zabija u alat i na taj način ga oštećuje. Osim toga, potrebna je veća potrošnja energije za formiranje strugotine. Također je previsoka vrijednost posmaka jedna od uzroka „zavarivanja“ strugotine za dijelove alata. Male dubine rezanja rezultiraju trenjem pri čemu se skraćuje vijek trajanja alata. Također može doći do pojave vibracija i pretjerane topline. Uz preveliku dubinu rezanja dolazi do povećanja potrošnje energije i sila rezanja.

9.3. Kutovi na reznim rubovima

Pored nabrojenih režima obrade, kutovi na reznim rubovima alata također imaju važnu ulogu pri određivanju vijeka trajanja alata. Rezni klin sa pripadajućim kutovima prikazan je na slici 9.13.

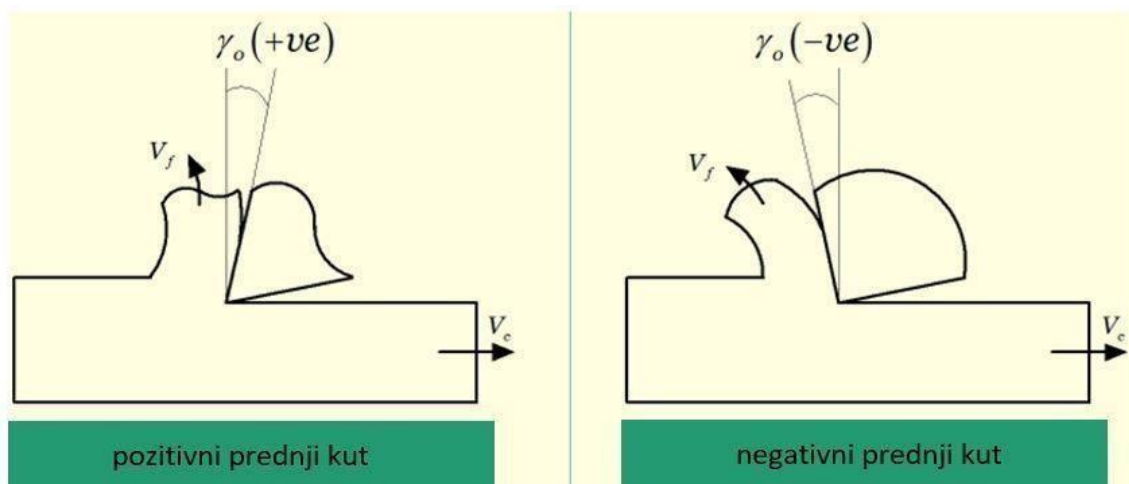


Slika 9.13 Rezni klin i pripadajući kutovi [14]

Njihova međusobna korelacija dana je jednačbom 4.

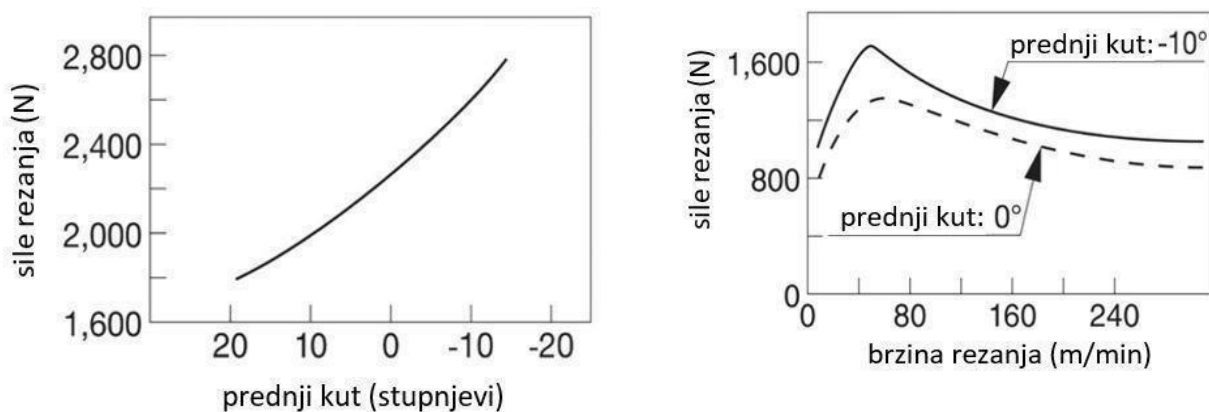
$$\alpha + \beta + \sigma = 90^\circ \quad (4)$$

Prednji kut (koji može biti pozitivan i negativni kao na slici 9.14) ima mješoviti učinak.



Slika 9.14 Prednji pozitivni (zbroy kuta klina i bočnog kuta je manji od 90°) i negativni kut (zbroy kuta klina i kuta boka je veći od 90°) [19]

Odnosno, ako se kut poveća u pozitivnom smjeru, kontakt između strugotine i prednje strane alata bit će manji. To zauzvrat smanjuje stvaranje topline i sile rezanja, što posljedično eliminira štetne učinke velike sile i produžuje vijek trajanja alata. S druge strane, ako je prednji kut prevelik, rub reznog alata je previše oslabljen. Pozitivni kut čini vrh alata relativno oštrijim smanjenjem kuta klina, a time se djelovanje smicanja odvija glatko tijekom obrade. Međutim, zbog nižeg kuta klina, snaga vrha alata se smanjuje i posljedično alat postaje ranjiv pod visokim temperaturama rezanja i udarnim opterećenjem. Negativni nagib osigurava čvršći rezni rub, ali u isto vrijeme sile rezanja i proizvedena toplina su maksimizirane (slika 9.15). Pozitivan prednji kut pridonosi smanjenju stvaranja topline tijekom obrade što štiti i alat od štetnih učinaka visoke temperature rezanja. Dakle, za učinkovit vijek trajanja alata postoji potreba uravnotežiti vrijednost između te dvije. Optimalna vrijednost prednjeg kuta je -5° do $+10^\circ$

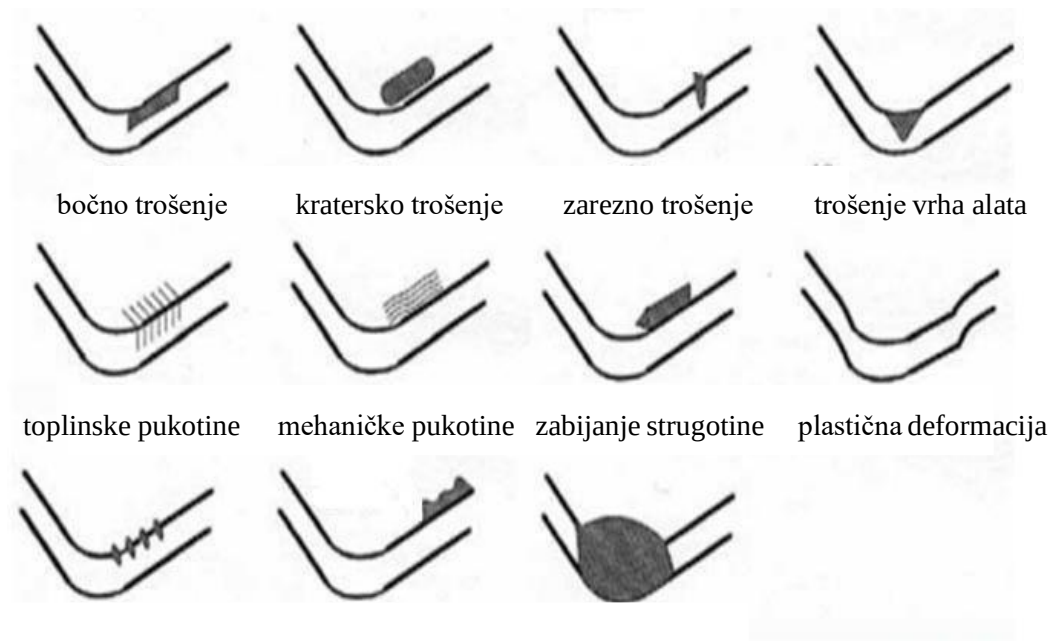


Slika 9.15 Ovisnost sile rezanja o veličini prednjeg kuta i brzine rezanja [20]

Drugi kut koji utječe na vijek trajanja alata je stražnji kut. Ako je taj kut smanjen, temperatura i habanje proizvedeno na bočnoj površini može se smanjiti. I time se poboljšava vijek trajanja alata. Međutim, ako je stražnji kut vrlo mali, tada će kontaktna duljina alata i radnog predmeta biti duža, pa će se dogoditi intenzivno trenje koje će stvoriti veliku toplinu u toj zoni (poznatoj kao zona tercijarne deformacije). Intenzivno trljanje također će povećati stopu trošenja alata (napose trošenje boka) i posljedično smanjiti vijek trajanja alata i točnost rezanja. Mali stražnji kut također čini alat sklonim plastičnoj deformaciji. S druge strane što je veći stražnji kut, manji je kut klina pri konstantnom nagibnom kutu, što dovodi do smanjenja stabilnosti vrha alata i povećanja temperature alata što u konačnici uzrokuje poremećaj ili gubitak tvrdoće alata. Optimalna vrijednost ovog kuta varira od 5° do 8° .

9.4. Oblici trošenja alata

Vrste trošenja koje se javljaju na reznom alatu prikazane su na slici 9.16.

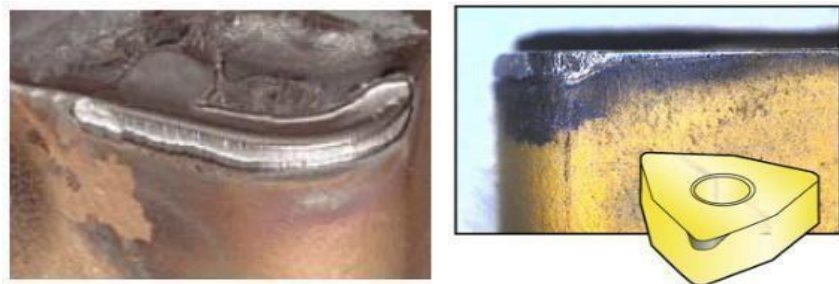


Slika 9.16 Oblici trošenja alata [15]

Ti oblici trošenja, s obzirom na uzrok nastajanja, mogu se podijeliti na trošenje uzrokovano kemijskim i toplinskim reakcijama (kratersko trošenje, plastična deformacija, toplinske pukotine, BUE) i trošenje uzrokovano mehaničkim faktorima (trošenje boka alata, zarezno trošenje, prijelom ruba).

9.4.1. Bočno trošenje

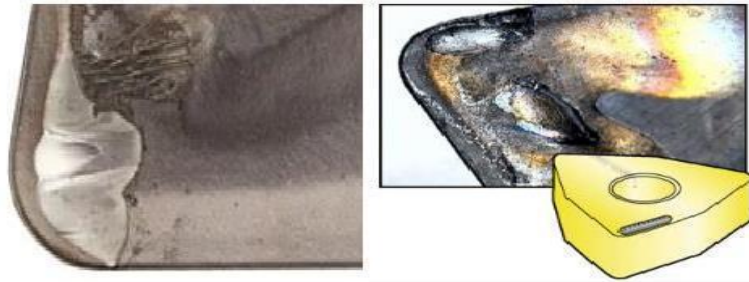
Najčešća vrsta trošenja, čiji je oblik prikazan na slici 9.17, nastaje zbog abrazije uzrokovane tvrdim česticama u materijalu izratka. Također se javlja pri prevelikim brzinama rezanja ili pri malom posmaku.



Slika 9.17 Bočno trošenje reznog alata [10]

9.4.2. Kratersko trošenje

Kratersko trošenje na alatu za rezanje lokalizirano je na prednjoj strani rezne oštrice (slika 9.18). Javlja se zbog kemijske reakcije između materijala izratka i alata za rezanje, i pojačava se s povećanjem brzine rezanja. Pretjerano trošenje kratera slabi oštricu i može dovesti do njenog loma.



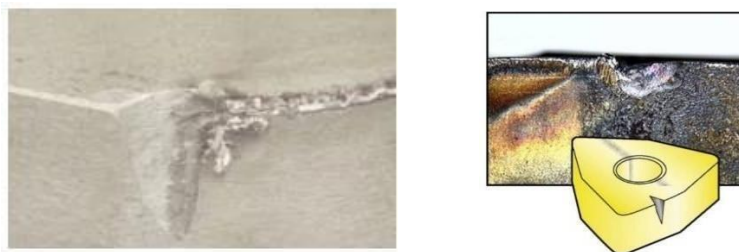
Slika 9.18 Izgled i položaj kraterskog trošenja [10]

9.4.3. BUE (izgrađeni rub)

Ova vrsta trošenja alata uzrokovana je tlačnim zavarivanjem strugotine na umetak. Materijal koji se obrađuje nakuplja se na oštrici i najčešći je kod obrade ljepljivih materijala, kao što su niskouglični čelik, nehrđajući čelik i aluminij. Mala brzina rezanja, preniske temperature rezanja i negativni prednji kut povećavaju mogućnost stvaranja nakupljenog ruba.

9.4.4. Zarežno trošenje

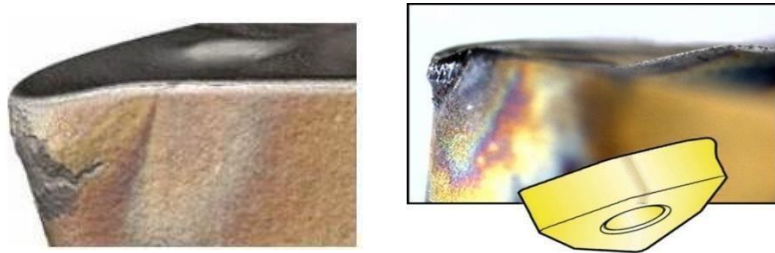
Zarežno trošenje (slika 9.19) događa se kada je površina obratka tvrđa ili abrazivnija od materijala koji ga obrađuje. To može biti uslijed otvrdnuća površine tijekom prethodnih rezova. Zbog toga se ova vrsta trošenja događa najčešće pri obradi nehrđajućeg čelika i superlegura koji su skloni ovom očvršćivanju. Također prevelika brzina obrade i premali prednji kut povoljno djeluju na razvoj ovog trošenja.



Slika 9.19 Zarežno trošenje [10]

9.4.5. Plastična deformacija

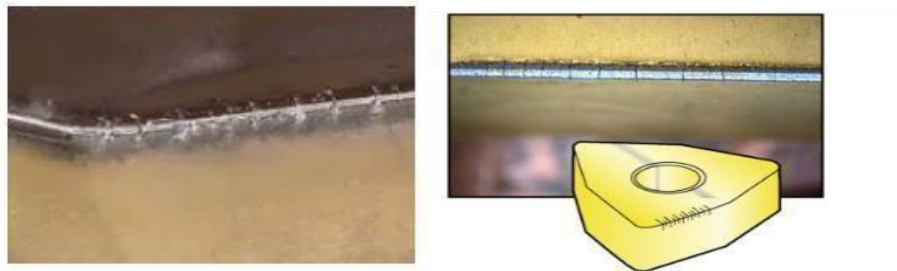
Plastična deformacija (slika 9.20) se odvija kada je materijal reznog alata omekšan. To se događa kada je temperatura rezanja previsoka za određeni stupanj. To može biti uzrokovano prevelikim brzinama rezanja, posmakom i dubinom rezanja ili nedostatkom rashladne tekućine. Općenito, tvrđe vrste i deblje prevlake poboljšavaju otpornost na trošenje plastičnom deformacijom.



Slika 9.20 Plastična deformacija [10]

9.4.6. Toplinske pukotine

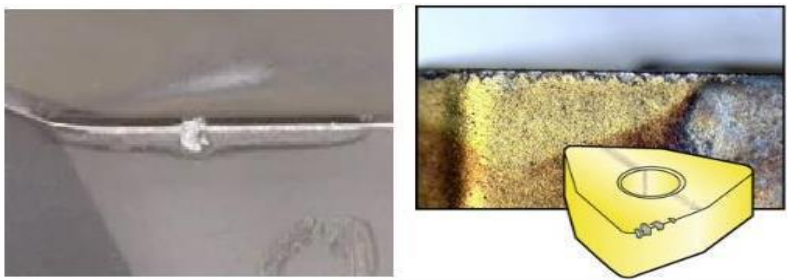
Kada se temperatura na oštrici brzo promijeni iz visoke u nisku, mogu se pojaviti pukotine okomite na oštricu (slika 9.21). Toplinske pukotine povezane su s isprekidanim rezovima, uobičajenim u operacijama glodanja, a pogoršavaju se upotrebom rashladnog sredstva.



Slika 9.21 Toplinske pukotine [10]

9.4.7. Krhotine

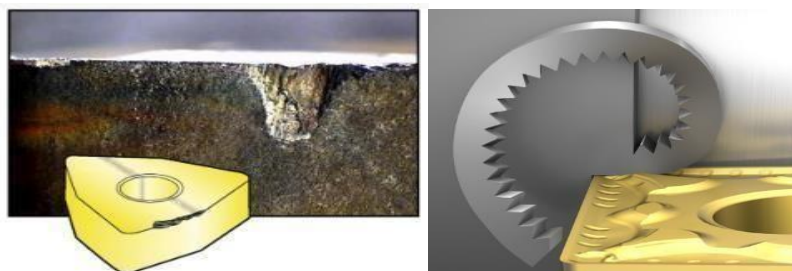
Krhotine ili lomovi rezultat su preopterećenja mehaničkim vlačnim naprezanjima. Ova naprezanja mogu biti uzrokovana brojnim razlozima, kao što je udar strugotine, previsoka dubina rezanja ili posmak, uključci pijeska u materijalu obratka, nakupljeni rubovi, vibracije ili prekomjerno trošenje umetka. Izgledaju poput malih komadića izbijenih iz oštrice (slika 9.22).



Slika 9.22 Krhotine [10]

9.4.8. Zabijanje strugotine

Zabijanje strugotine je pojava uzrokovana uvijanjem strugotine i udaranjem u dio oštrice s kojim se ne reže (slika 9.23). Rezultat tog udaranja je lomljenje oštrice (ili dijela oštrice). Rizik da se to dogodi veći je kod operacija koje uključuju velike posmake i velike dubine rezanja.



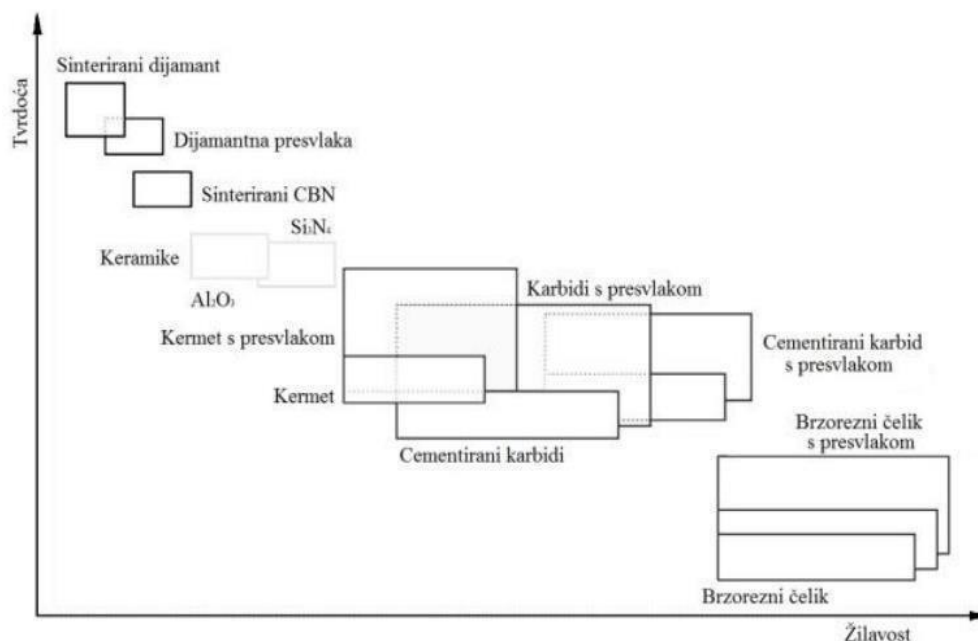
Slika 9.23 Udaranje strugotine u reznu oštricu [10]

9.4.9. Lom

Svaki pregled osnovnih oblika trošenja mora također uključivati i sam lom oštrice. Iako, lomljenje reznog ruba nije obrazac trošenja, već neželjena i opasna pojava uzrokovana nepravilnim korištenjem alata. Kada oštrica pukne, to znači da su odabrani uvjeti rezanja bili takvi da su mehanička opterećenja koja djeluju na oštricu toliko velika da ih ne može izdržati. Također bi moglo biti da se jedan od prethodno navedenih oblika trošenja toliko proširio i oslabio oštricu da više nije mogla izdržati opterećenja koja djeluju na nju. Preporučaju se niže vrijednosti uvjeta rezanja (uglavnom dubine rezanja i posmaka) ili odabir jače rezne oštrice (tvrđi karbid ili jača geometrija) za izbjegavanje loma.

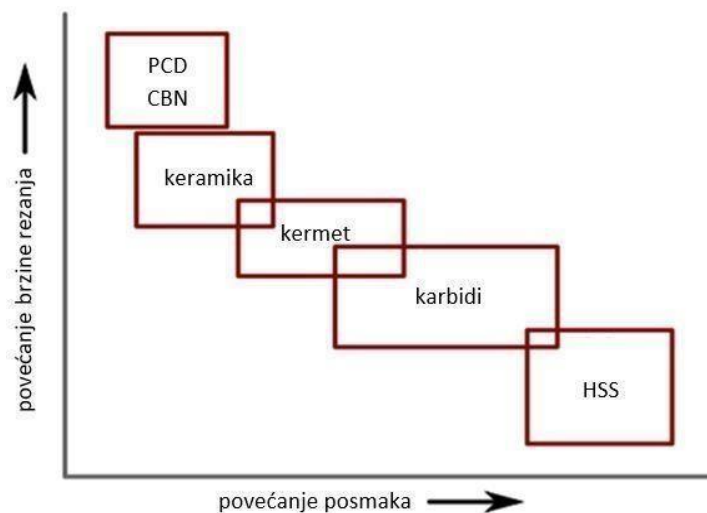
10. Materijal alata

Razuman izbor materijala alata važan je dio procesa rezanja koji u velikoj mjeri određuje razinu produktivnosti rezanja, trošenje alata i troškove obrade, veličinu točnosti obrade i kvalitetu površine. U industriji obrade metala koriste se različiti materijali za rezne alate koji su pod direktnim utjecajem razvoja materijala izratka jer svaki od tih materijala mora biti od 30 do 50 % tvrđi od materijala radnog komada kojeg obrađuje. Tijekom radnog procesa, rezni alat je podvrgnut velikom pritisku rezanja, trenju i sili udarca, što rezultira visokom temperaturom rezanja. Dakle, alat radi u okruženju visoke temperature, visokog tlaka i jakog trenja, a korištenjem neprikladnih materijala alat će se brzo istrošiti ili slomiti. Općenito, materijal reznog alata koji je uspješan u svojoj primjeni trebao bi zadovoljiti neke osnovne zahtjeve: tvrdoća (otpornost na bočno trošenje i deformaciju), čvrstoća (otpornost na lom pod velikim pritiskom, kao i udarima i vibracijama koje se javljaju), nereaktivnost s materijalom izratka, kemijska stabilnost (otpornost na oksidaciju i difuziju) te postojanost tvrdoće pri visokim temperaturama (eng. hot hardness) i dobra toplinska vodljivost. Otpornost alata na habanje proporcionalna je tvrdoći materijala. Visoka tvrdoća prikladna je za rezanje kada je otpor konstantan. Kada postoje udarna opterećenja tijekom rezanje, potrebna je visoka žilavost materijala. Tvrdoća i žilavost su obrnuto proporcionalna svojstva materijala tako da ne postoji idealan materijal za bilo koju vrstu procesa rezanja kao što se može vidjeti na slici 10.1, te se mora odabrati ovisno o zahtjevima eksploatacije [14].



Slika 10.1 Usporedba svojstava materijala alata za obradu odvajanjem čestica [14]

Materijali alata za obradu moraju se odabrati na temelju izratka koji se obrađuje i prirode procesa. Usklađivanje materijala reznog alata i predmeta obrade uglavnom se odnosi na usklađivanje mehaničkih svojstava, fizičkih svojstava i kemijskih svojstava za postizanje najduljeg vijeka trajanja alata i maksimalne produktivnosti obrade rezanja. Problem usklađivanja mehaničkih svojstava između alata za rezanje i obrađenog predmeta uglavnom se odnosi na parametre mehaničkih svojstava kao što su čvrstoća, žilavost i tvrdoća alata i materijala izratka. Materijali izratka visoke tvrdoće moraju se obraditi alatima veće tvrdoće. Općenito, tvrdoća alata treba biti iznad 60HRC. Što je veća tvrdoća materijala alata, to je bolja njegova otpornost na habanje. Na primjer, kada se poveća količina kobalta u tvrdom metalu, povećava se čvrstoća i žilavost, tvrdoća se smanjuje, te je pogodan za grubu obradu; kada se količina kobalta smanji, povećava se tvrdoća i otpornost na habanje, što je prikladno za završnu obradu. Alati s izvrsnim mehaničkim svojstvima pri visokim temperaturama posebno su prikladni za obradu velikom brzinom. Izvrsna učinkovitost keramičkih alata pri visokim temperaturama omogućuje im rezanje pri velikim brzinama, omogućujući da brzine rezanja budu 2 do 10 puta veće od tvrdog metala (slika 10.2).



Slika 10.2 Usporedba kompatibilnosti materijala pri različitim režimima obrade [21]

Alati se međusobno razlikuju i po fizičkim svojstvima, pa tako imamo alate kao što su alati od brzoreznog čelika s visokom toplinskom vodljivošću i niskom točkom taljenja, keramički alati s visokim talištem i niskim toplinskim širenjem, dijamantni alati s visokom toplinskom vodljivošću i niskim toplinskim širenjem. Prilikom obrade izratka s lošom toplinskom vodljivošću treba koristiti alatni materijal bolje toplinske vodljivosti kako bi se omogućilo brzo prenošenje topline rezanja i snižavanje temperature rezanja. Zbog visoke toplinske vodljivosti i

toplinske difuzije dijamanta, toplina rezanja se lako odvodi i ne uzrokuje velike toplinske deformacije, što je posebno važno za precizne alate za obradu s visokom dimenzionalnom točnošću. Temperatura otpornosti na toplinu različitih materijala alata iznosi: 700 ~ 800 ° C za dijamantne rezače; 1100~1200°C za keramičke rezače; 900~1100°C za tvrde metale na bazi TiC(N); za HSS je od 600 do 700 ° C. Slijed toplinske vodljivosti različitih alatnih materijala glasi: PCD> tvrdi metal na bazi WC> tvrdi metal na bazi TiC(N)> HSS> keramika na bazi Si₃N₄> keramika na bazi Al₂O₃. Redoslijed koeficijenta toplinske ekspanzije (što je veći ovaj koeficijent za materijal, to će se više širiti po stupnju povećanja temperature) različitih alatnih materijala: HSS> tvrdi metal na bazi WC> TiC(N)> keramika na bazi Al₂O₃>PCBN> keramika na bazi Si₃N₄> PCD. Redoslijed otpornosti na toplinske udare (sposobnost čvrste tvari da izdrži nagle promjene temperature bilo tijekom zagrijavanja ili hlađenja) različitih materijala alata: HSS> tvrdi metal na bazi WC> keramika na bazi Si₃N₄> PCD> tvrdi metal na bazi TiC(N)> keramika na bazi Al₂O₃. Usklađivanje kemijskih svojstava materijala reznog alata s predmetom obrade uglavnom se odnosi na usklađivanje kemijskih svojstava materijala alata s kemijskim afinitetom, kemijskom reakcijom, difuzijom i otapanjem materijala izratka. Trenutno postoje četiri kategorije široko korištenih materijala za rezne alate: brzorezni čelici (HSS), tvrdi metali (uključujući volfram karbid WC i titanijev karbid TiC), keramika (uključujući aluminij Al₂O₃ i silicij nitrid Si₃N₄) i supertvrđi materijali (npr. kubični bor-nitrid i dijamant). Idealni materijali reznog alata trebali bi istodobno imati visoku tvrdoću, čvrstoću, žilavost, otpornost na habanje, toplinsku stabilnost i kemijsku inertnost, ali zapravo idealna opcija ne postoji zbog suprotstavljenih kompromisa među svojstvima, kao što su tvrdoća i žilavost. Drugim riječima, svaka vrsta materijala reznog alata ima svoj specifični raspon obrade i može se koristiti samo za obradu određenih materijala izratka. Keramika, dijamant i kubični boron nitrid se koriste u ograničenim prilikama, dok su brzorezni čelik i tvrdi metal trenutno najčešće korišteni alatni materijali. Prije 1900., većina alata za strojnu obradu bila je izrađena od ugljičnog alatnog čelika jer se lako proizvodi i brusi, no ne preferira se u modernoj strojnoj obradi. Ugljični alatni čelik ima veliki nedostatak što ne može podnijeti više temperature tijekom procesa obrade jer kada dosegnu temperaturu iznad 200 °C, gube tvrdoću. Stoga se alati od ugljičnog čelika općenito koriste za operacije obrade pri malim brzinama, točnije koriste se za obradu pri brzini koja je približna polovici preporučene brzine za brzorezni čelik. Njihova je upotreba ograničena na rezanje mekih metala (npr. magnezija, aluminija, mesinga itd.) i drva te se prvenstveno koristi za izradu jeftinijih svrdla, ručnih ureznika i razvrtača. Ova vrsta materijala obuhvaća oko 10% svih proizvedenih alatnih čelika. Iako imaju velik udio nepovoljnih održali su jer su najjeftiniji alatni čelici, pokrivaju širok raspon dimenzija, jednostavno se toplinski obrađuju, lako se obrađuju

odvajanjem čestica, dobra zavarljivost, a kao najveća prednost se ističe njihova žilavost (izrada udarnih alata).

10.1. Brzorezni čelik (HSS)

Brzorezni čelik (HSS) je visokolegirani alatni čelik koji sadrži više legirajućih elemenata kao što su volfram (W), molibden (Mo), krom (Cr) i vanadij (V). Može izdržati temperaturu rezanja od 500-600 ° C bez gubitka svoje tvrdoće, otpornosti na habanje (koja je povezana sa sadržajem volframa i vanadija) i otpornosti na omekšavanje, zahvaljujući legirnim elementima i toplinskoj obradi, što omogućuje veće brzine rezanja. U usporedbi s ugljičnim alatnim čelikom i legiranim alatnim čelikom, brzina rezanja je povećana 1-3 puta, a trajnost alata je povećana za 10-40 puta, pa čak i više. Pored toga, proizvodni proces alata od brzoreznog čelika je relativno jednostavan, a rezni rub se lako naoštiri i može se kovati. To je vrlo važno za izradu alata složenih oblika pa brzorezni čelik zauzima važno mjesto u izradi alata kao što su svrdla, zupčasti alati, alati za narezivanje navoja, alati za provlačenje i slično.

10.2. Tvrdi metal

Tvrdi metal ili tvrda legura se upotrebljava za izradu visokokvalitetnih reznih alata, kod kojih se mogu primijeniti velike brzine rezanja i pri tome dobiti visoka kvaliteta površine koja se obrađuje. Zbog visokih temperatura koje se pri postupcima rezanja razvijaju ($> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$), zahtjev u svojstvima se prije svega odnosi na veliku tvrdoću, otpornost na trošenje i stabilnost osobina na povišenim temperaturama (puzanje). Rezni alati izrađeni od tvrdih metala imaju bolja svojstva od alata izrađenih od brzoreznih čelika, posebno bolja svojstva rezanja na povišenim temperaturama [22]. Tvrdi metali se ugrubo dijele u dvije skupine. Jedna grupa je tvrdi metal koji se sastoji od volfram karbida i kobalta (WC-Co), a druga je miješani tvrdi metal, koji se sastoji od volfram karbida, kobalta i titan karbida (WC-TiC-Co). Veličina WC zrna je jedan od najvažnijih parametara za podešavanje odnosa tvrdoća/žilavost kvalitete; finija veličina zrna znači veću tvrdoću pri danom sadržaju vezivne faze. Količina i sastav kobaltnih veziva kontroliraju žilavost i otpornost na plastičnu deformaciju. Pri jednakoj veličini zrna WC, povećana količina veziva rezultirat će čvršćim kvalitetom, koji je skloniji trošenju plastičnom deformacijom. Sadržaj kobalta koji je prenizak može rezultirati lomljivim materijalom. Tvrdi metali koji sadrže TiC imaju vrhunska svojstva otpornosti na toplinu i manje su osjetljivi na kratersko trošenje. Međutim, čvrstoća prijanjanja između TiC i Co niža je u usporedbi s čvrstoćom prijanjanja WC i Co. Stoga mješoviti tvrdi metali imaju manju otpornost na lom. Nedavni razvoj doveo je do upotrebe i TaC (tantal karbida), NbC (niobijev karbid), TiN

(titanijev nitrid), kao i TiC. Poboljšanje svojstava materijala može se postići modifikacijom površine ili primjenom zaštitnog sloja na površini. Površinski sloj nanosi se CVD postupkom ili PVD postupkom. CVD je kratica za kemijsko nanošenje iz parne faze (eng. chemical vapor deposition). CVD premaz nastaje kemijskim reakcijama na temperaturama od 700-1050°C. CVD premazi imaju visoku otpornost na trošenje i izvrsno prijanjanje na tvrde metale. Prevlake nastale fizikalnim taloženjem parom (PVD) nastaju pri relativno niskim temperaturama (400-600°C). Proces uključuje isparavanje metala koji reagira s, na primjer, dušikom kako bi se stvorio tvrdi sloj nitrda na površini alata za rezanje. PVD premazi osiguravaju otpornost na habanje zbog svoje tvrdoće, žilavost rubova i otpornost na pukotine. Obloženi tvrdi metali trenutno predstavlja 80-90% svih pločica za rezne alate. Njihov uspjeh kao materijal za rezne alate se temelji na jedinstvenoj kombinaciji otpornosti na habanje i žilavosti te sposobnosti da se oblikuje u složene oblike.

10.3. Keramika

Svi keramički alati za rezanje imaju izvrsnu otpornost na habanje pri velikim brzinama rezanja. Postoji niz vrsta keramike dostupnih za različite primjene. Oksidna keramika je na bazi aluminijevog oksida (Al_2O_3), s dodatkom cirkonija (ZrO_2) za inhibiciju pukotina. Time se stvara materijal koji je kemijski vrlo stabilan, ali nema otpornost na toplinski udar. Mješovita keramika je česticama ojačana dodatkom kubičnih karbida ili karbonitrda (TiC, $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$). To poboljšava žilavost i toplinsku vodljivost. Keramika ojačana viskerima koristi viskere od silicij-karbida (SiC) za drastično povećanje žilavosti i omogućavanje upotrebe rashladnog sredstva. Keramika ojačana viskerima idealna je za obradu legura na bazi nikla. Još jednu skupinu keramičkih materijala predstavlja silicijeva nitridna keramika (Si_3N_4). Njihovi izduženi kristali tvore samoojačani materijal visoke žilavosti. Vrste silicijevog nitrda uspješne su za rezanje sivog lijeva, ali nedostatak kemijske stabilnosti ograničava njihovu upotrebu u drugim materijalima izradaka. Sialon (SiAlON) keramika kombinira snagu samoojačane mreže silicijevog nitrda s poboljšanom kemijskom stabilnošću. Sialonske vrste su idealne za strojnu obradu super legura otpornih na toplinu (HRSA).

10.4. Polikristalni dijamant

PCD je kompozit dijamantnih čestica sinteriranih zajedno s metalnim vezivom. Dijamant je najtvrdi, a time i najotporniji na abraziju od svih materijala. Kao materijal alata za rezanje, ima dobru otpornost na trošenje, ali mu nedostaje kemijska stabilnost na visokim temperaturama i lako se otapa u željezu. PCD alati ograničeni su na materijale obojenih metala, kao što su

aluminij s visokim sadržajem silicija, kompoziti s metalnom matricom i plastika ojačana ugljičnim vlaknima (CFRP). PCD zajedno s tekućinom za hlađenje također se može koristiti u primjenama obrade titana.

10.5. Kubični bor nitrid

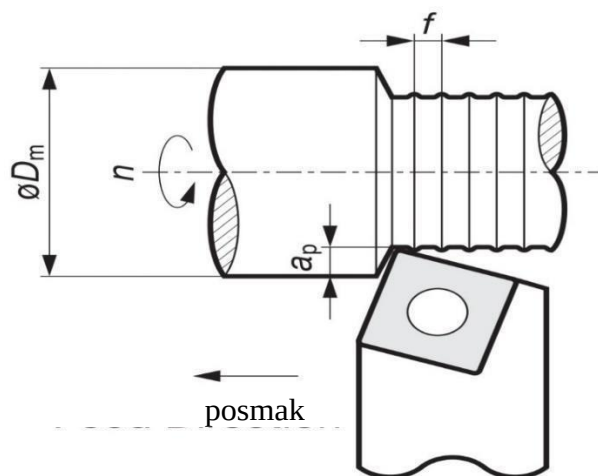
Polikristalni kubični borov nitrid, CBN, materijal je alata za rezanje s izvrsnom tvrdoćom u vrućem stanju koji se može koristiti pri vrlo velikim brzinama rezanja. Također pokazuje dobru žilavost i otpornost na toplinski udar. Moderni CBN alati su keramički kompoziti s udjelom CBN-a od 40-65%. Keramičko vezivo dodaje otpornost na habanje CBN-u, koji je inače sklon kemijskom habanju. Druga skupina razreda su CBN stupnjevi visokog sadržaja, s 85% do gotovo 100% CBN-a. Ove vrste mogu imati metalno vezivo za poboljšanje njihove žilavosti.

10.6. Kermet

Kermet je tvrdi metal s česticama na bazi titana. Naziv kermet spaja riječi keramika i metal. Izvorno je kermet bio kompozit TiC i nikla. Moderni kermeti ne sadrže nikal i imaju dizajniranu strukturu od titanijeve karbonitride $Ti(C,N)$ jezgre, drugu tvrdi fazu od $(Ti,Nb,W)(C,N)$ i kobaltno vezivo bogato W. $Ti(C,N)$ povećava otpornost na trošenje, druga tvrda faza povećava otpornost na plastičnu deformaciju, a količina kobalta kontrolira žilavost. U usporedbi s cementnim karbidom, kermet ima poboljšanu otpornost na trošenje i smanjenu tendenciju razmazivanja. S druge strane, također ima nižu tlačnu čvrstoću i slabiju otpornost na toplinski udar. Kermeti također mogu biti presvučeni PVD za bolju otpornost na habanje.

11. Režimi obrade

Osnovna namjena bilo koje konvencionalne operacije strojne obrade je postupno uklanjanje suvišnog sloja materijala kako bi se dobio osnovni oblik i veličina s razumno glatkom površinom. Za bilo koju operaciju strojne obrade ili skidanja materijala neophodna su tri relativna kretanja između obratka i reznog alata, koji su, zapravo, primarni parametri rezanja. Istodobno djelovanje sva tri parametra uzrokuje uklanjanje materijala u obliku strugotine s obratka. Ti parametri su brzina rezanja, posmak i dubina rezanja koji su prikazani na slici 11.1.



Slika 11.1 Shematski prikaz parametara obrade [22]

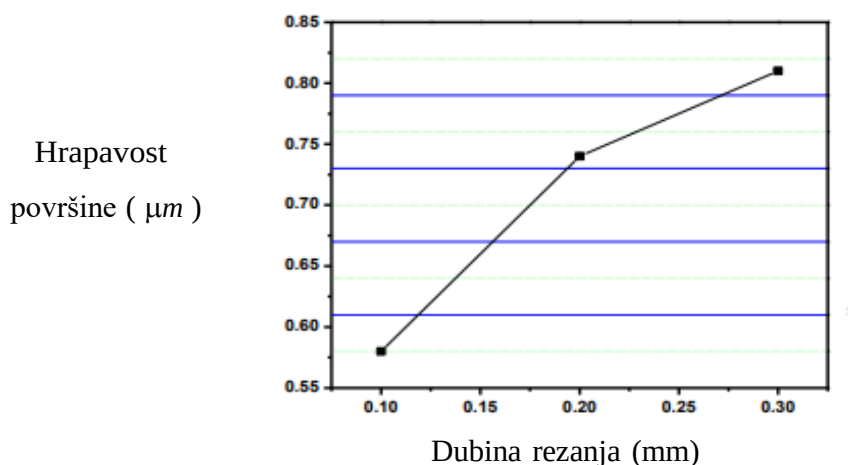
Određivanje vrijednosti parametara obrade može se temeljiti na: iskustvu tehnologa obrade odvajanjem čestica, priručnicima i katalozima proizvođača alata, računalnim sustavima za određivanje parametara obrade [6]. Prilikom određivanja režima obrade potrebno je u obzir uzeti slijedeće čimbenike: materijal predmeta obrade, njegovu obradivost, tvrdoću i stanje toplinske obrade (prirodan, popušten, žaren, kaljen). Nadalje, treba uzeti u obzir i materijal alata, njegove karakteristike i svojstva, žilavost, otpornost na trošenje, otpornost na rad pri visokim temperaturama, geometriju alata, oblik njegove oštrice (ako je dobro odabran s ciljem stvaranja manjih reznih sila), postojanost i vijek trajanja alata. Stroj i stanje njegove tehnološke ispravnosti, snaga i krutost s kojom raspolaže, mogući režimi na stroju. Pored krutosti stroja treba uzeti u obzir krutost držača alata i krutost same obrade, odnosno osigurava li stezanje radnog komada da izdrži sile rezanja. Povrh svega toga treba se vratiti na sam početak i svrhu planiranja proizvodnje i sagledati jesu li odabrani režimi unutar predviđenih troškova obrade i ekonomičnosti. Na kraju krajeva osigurava li se tražena kvaliteta obrade.

11.1. Određivanje dubine rezanja i broja prolaza

Dubina rezanja je ukupna količina uklonjenog metala po prolazu alata za rezanje koja se izražava se u mm. Dubina rezanja određena je dodatkom za obradu, a cilj je da se obrada obavi u jednom ili najmanjem broju prolaza (koji se određuje prema jednadžbi 5.) kako bi se postigla veća produktivnost. Budući da je vrijednost dubine rezanja važan parametar koji utječe na ukupnu izvedbu strojne obrade kao i na ekonomičnost, optimalna vrijednost se mora odabrati razborito nakon razmatranja niza relevantnih čimbenika.

$$i = \frac{D_m - d}{2 \cdot a_p} \quad (5)$$

Odabir vrijednosti dubine rezanja zahtijeva pozornost na sljedeće elemente. Zahtjev za produktivnost - povećanje dubine rezanja omogućuje značajnije smanjenje vremena obrade i poboljšanje produktivnosti, a da pri tome ne utječe značajno na vijek trajanja alata za razliku od brzine rezanja. Potrebna kvaliteta rezanja - u slučaju mnogih metala, u cilju ostvarivanja završne obrade, kojom se u obradi odvajanjem čestica postiže tražena točnost oblika, dimenzija i kvaliteta površine, uzimaju se male dubine rezanja. Dok se za grubu obradu može iskoristiti najveća vrijednost koju omogućava snaga stroja i geometrija alata kako bismo skratili vrijeme obrade. Profil hrapavosti koji ostvaruje rezni alat se povećava s dubinom rezanja (slika 11.2) jer je veći otpor radnog komada na stvaranje strugotine i veća je sila rezanja koja dovodi do preopterećenja interakcije između reznog alata i radnog komada i stvaranja slabije kvalitete površine.



Slika 11.2 Utjecaj dubine rezanja na hrapavost površine kod konvencionalnih alata [23]

Operacija strojne obrade - različite operacije strojne obrade imaju sposobnost rukovanja različitim rasponima dubine rezanja. Na primjer, operacija glodanja pomoću bočnog i čeonog

glodala može podnijeti veću dubinu rezanja; dok je njegova vrijednost ograničena u operaciji narezivanja. Čvrstoća materijala obratka - za obradu tvrdih i krhkih materijala preporuča se niža vrijednost dubine rezanja, inače sila može biti vrlo velika i rezni alat se može slomiti. Isto tako pri obradi nedovoljno krutih predmeta (tankostjena kućišta i sl.) ili tankih, a dugačkih (osovine, vratila) dubina rezanja je ograničena pojavom vibracija. Sposobnost alatnog stroja - budući da dubina rezanja povećava silu rezanja i vibracije, treba uzeti u obzir i sposobnost samog alatnog stroja.

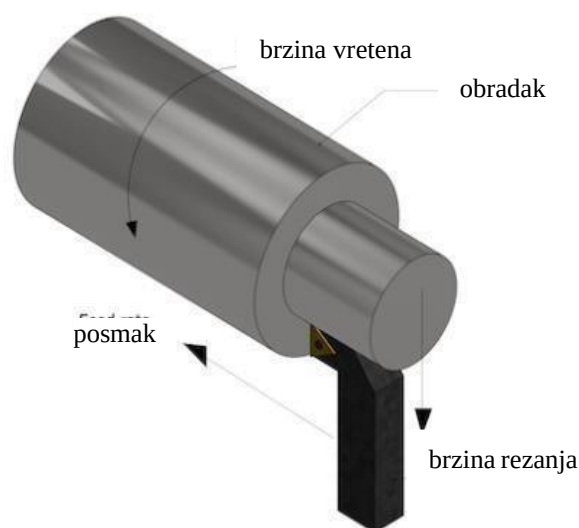
11.2. Određivanje posmaka

Posmak je jedan od parametara rezanja, koji je predviđen za pomicanje alata prema radnom komadu. Različite operacije obrade koriste različite jedinice kako bi izrazile posmak na najprikladniji način posebno za taj proces. Tako se pri tokarenju posmak izražava u mm/okretaj, a kod glodanja u mm/min. Kao i dubina rezanja, i vrijednost posmaka mora biti pažljivo odabrana jer posmak utječe na performanse strojne obrade na mnogo načina - od završne obrade površine do vijeka trajanja alata. Tako veći posmak označava veću brzinu uklanjanja materijala čime se produktivnost može poboljšati. Međutim, veća brzina posmaka rezultira lošom završnom obradom površine. Kako bi se dobila glatka površina, potrebno je koristiti nižu brzinu posmaka. Visoka brzina posmaka također ubrzava trošenje alata i time se smanjuje vijek trajanja alata, ali i dalje nema tako intenzivan utjecaj na vijek trajanja kao brzina rezanja. Pri gruboj obradi posmak je vezan uz geometriju pločice i dubinu rezanja. Posmak ne treba biti veći od polovice radijusa vrha pločice. Pri završnoj obradi posmak je određen zahtijevanom kvalitetom hrapavosti površinske obrade. Tipične vrijednosti za brzinu posmaka u nekoliko konvencionalnih operacija obrade dane su u nastavku. Brzina posmaka kod tokarenja iznosi 0,01 - 0,1 mm/okr za završnu obradu; 0,05 - 0,5 mm/okr. za grubu obradu. Brzina posmaka pri bušenju mora biti vrlo mala, inače bi se alat mogao slomiti zbog začepljenja strugotine. Tipična vrijednost je 0,01 - 0,05 mm/okr. Brzina posmaka pri glodanju obično iznosi 0,05 - 0,10 mm/min. Brzina posmaka kod rovašenja je 0,5 - 1,0 mm/okr.. Međutim, razmatranje svih mogućih čimbenika ponekad je teško i stoga se često njegova vrijednost obično bira iz praktičnog iskustva.

11.3. Određivanje brzine rezanja

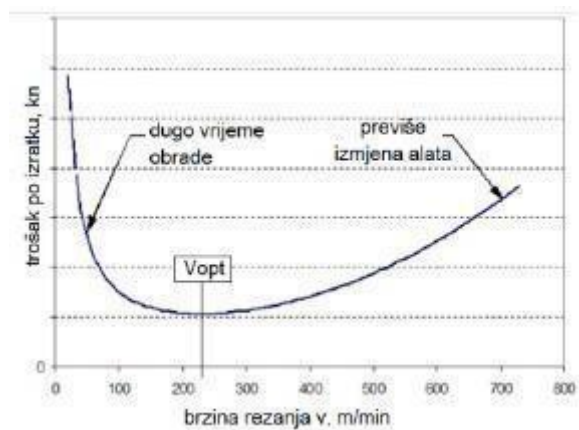
Brzina rezanja jedan je od najvažnijih elemenata režima obrade s najznačajnijim utjecajem na ukupno vrijeme. Predstavlja brzinu kojom se materijal (obradak) kreće u odnosu prema oštrici reznog alata prilikom rezanja. Brzina rezanja, koja se izražava u m/min, ne smije se brkati s brzinom vretena tokarilice, koja se izražava u min^{-1} (slika 11.3). Da bi se postigla ravnomjerna

brzina rezanja, vreteno tokarilice se mora okretati brže za radne komade malog promjera, a sporije za komade velikog promjera.



Slika 11.3 Prikaz odnosa brzine rezanja i brzine vretne [24]

Za određeni materijal i skup uvjeta rezanja postoji optimalna brzina rezanja. Kako bi se odredila optimalna brzina rezanja mora se uzeti u obzir: vrsta i stanje obrađivanog materijala (rezljivost); materijali s većim otporom za rezanje razvit će više topline čime će temperatura i alata i obratka biti veća, vrsta materijala alata, vrsta obrade (završna ili gruba obrada) i ekonomični vijek trajanja alata (trošak oštrenja ili nabavke novog alata s obzirom na količinu proizvedenih proizvoda), slika 11.4 [6].



Slika 11.4 Ekonomičnost izrade u ovisnosti o brzini rezanja [6]

Tvrđi materijali obratka zahtijevaju posebnu pozornost tijekom obrade jer mogu lako smanjiti radni vijek alata za rezanje. U pravilu, što je materijal obratka tvrdi, to je manja brzina rezanja koja se primjenjuje tijekom obrade. Na primjer, materijali poput titana će zahtijevati nižu brzinu

rezanja u usporedbi s čelikom. Velike brzine rezanja mogu se koristiti pri obradi s alatom za rezanje izrađenim od materijala visoke čvrstoće kao što su dijamant i ugljikov bor nitrid, dok alati izrađeni od brzoreznog čelika zahtijevaju manje brzine rezanja. Također prevelike brzine mogu dovesti i do pregrijavanja izratka te njegovog znatnijeg širenja. Nakon hlađenja takav obradak će imati manje dimenzije od potrebnih. Jednako tako, pregrijavanje nekih materijala može dovesti do promjena strukture u površinskom sloju, mijenjajući mu na taj način svojstva [6].

11.4. Preporuke proizvođača

Proizvođači alata u katalogima daju, između ostaloga i, opće preporuke za vrijednosti režima obrade. Pri čemu se podrazumijeva da su zadovoljeni optimalni uvjeti obrade (konstantno i adekvatno hlađenje, odgovarajuću krutost sustava, povoljnu strukturu materijala itd.). U tablici 3. su dane preporuke za neke od korištenih alata u izradi bubnja.

Tablica 3. Preporuke od strane proizvođača za režime obrade [10]

Oznaka alata	Brzina rezanja (m/min)	Posmak (mm/okr)	Dubina rezanja (mm)	Materijal obratka
VCMT 11 03 04-PM 4335 	355-260	0,06-0,18	0,3-2,2	P
VNMG 16 04 08-MM 1125 	85-205	0,1-0,45	0,5-4	M

880-05 03 W08H-P-LM 4334 	150-235	0,08-0,18	/	
	140-215	0,06-0,16		
	100-185	0,08-0,14		
VNMG 16 04 04-QM 4325 	310-355	0,18-0,3	1-4	
	200-225	0,18-0,26	1-4	

12. Zaključak

Nepotrebno je reći da su kvalitetna tehnologija i tehnološki procesi temelj na kojem se gradi profitabilna proizvodnja. Kako bi se uspostavio efikasan tehnološki proces obrade potrebno je posjedovati teorijska znanja i praktična iskustva po pitanju: tehnologije obrade, nauke metala, obradnih sistema, izbora alata, parametara obrade, pribora i mjernih instrumenata za zahtijevanu razinu kvalitete. Pored toga potrebno je odrediti i optimalan oblik, ali i vrstu polaznog materijala kako bi bili zadovoljeni tehno-ekonomski uvjeti. Provedbom analize tih uvjeta, za izradu bubnja, se kao optimalni oblik nameće profilni poluproizvod. Pri čemu je uzeta u obzir veličina serije (2000 komada) i sam oblik završnog proizvoda.

Nakon što je odabran polazni materijal izrađuje se detaljan nacrt prema koje se dalje definira tehnološki proces. Pri projektiranju i razvoju modernih tehnoloških procesa treba imati na umu da se raspolaže sa vrlo kratkim vremenskim periodom koji je predviđen za izradu, u ovom slučaju bubnja mjenjača. Kako bi se ostvario taj kratki period obrade često se poseže za većim brzinama rezanja ili većim posmakom jer direktno utječu na vrijeme obrade, pri čemu se režimi obrade kreću u intervalu koji je propisan od strane proizvođača svakog alata kako bi se izbjeglo prekomjerno trošenje alata, vibracije, netočnost obrade i slično. Iako se na bubnju pojavljuju zahtjevi za uskim tolerancijama, pri izradi se ostalo pri standardnim alatima jer trošak koji bi došao sa izradom specijalnih reznih alata nebi opravdao njihove bolje performanse koje se očituju u bržoj i preciznijoj obradi. Pri obradi se također težilo smanjenju manipulacije izratka, a s obzirom na složenu geometriju bubnja javio se problem kod vanjskog tokarenja jer se pojavila potreba za specijalnim čeljustim s kojima će se obradak stezati iznutra kako bi se u jednom stezanju obradile sve vanjske površine i time se broj operacija sveo na minimum.

Sve to dovelo je do nužnosti korištenja novih metoda kako u konstruiranju (CAD) od kojeg i polaze sve tehno- ekonomske karakteristike proizvodnje tako i programiranju i upravljanju procesom izrade (CAM) ili u ovom slučaju njihovom integriranju. Time je omogućeno izlazne parametre proizvoda, troškove pripreme i izrade, kvalitetu proizvoda, dizajni vrijeme pripreme proizvodnje dovesti na nivo optimalnosti.

13. Literatura

- [1] <http://www.howmotorcycleswork.com/>, pristupljeno dana 10.7.2022.
- [2] N. Majdandžić, S. Čuljak: Priprema proizvodnje I, Sveučilište u Osijeku, Slavonski Brod, 1991.
- [3] T. Filetin: Izbor materijala pri razvoju proizvoda, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2000.
- [4] V. Gačnik, F. Vodenik: Projektiranje tehnoloških procesa, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1990.
- [5] <https://lucefin.com/en/>, pristupljeno dana 4.4.2022.
- [6] Nastavne podloge: Priprema proizvodnje, Sveučilište u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 2016.
- [7] G. Šimunović: Aktivnosti pripreme proizvodnje, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2022.
- [8]] M. Oruč, F. Begovac, I. Vitez, R. Sunulahpašić: Čelik i čelični liv (podjela i označavanje), Fakultet za metalurgiju i metale, Zenica, 2008.
- [9] <https://www.machiningdoctor.com>, pristupljeno dana 8.4.2022.
- [10] <https://sandvik.coromant.com>, pristupljeno dana 8.4.2022.
- [11] <https://www.index-traub.com>, pristupljeno dana 22.4.2022.
- [12] <https://hr.birmiss.com>, pristupljeno dana 25.4.2022.
- [13] M. Jurković, Dž. Tufekčić: Tehnološki procesi: projektiranje i modeliranje, Fakultet u Tuzli, Tuzla, 2015.
- [14] Z. Dadić: Tribološki principi i mjere za smanjenje trošenja alata kod obrade odvajanjem čestica, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [15] M. Pradeep Kumar, M. Sunil Kumar: Study on Tool Life and its Failure Mechanisms, Kamala Institute of Technology and Science, Karimnagar, 2015.
- [16] M. Kesner: Sustav izravnog nadzora trošenja alata, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [17] J. Sheikh-Ahmad, J. P. Davim: Tool wear in machining processes, Green Hills Engineering College Solan, India, 2013.
- [18] <https://www.yourarticlelibrary.com>, pristupljeno dana 17.5.2022.
- [19] F.Al Hazza, Y.T.Adesta: The economic impact of using negative rake angle in high speed hard turning, Faculty of engineering – International Islamic University Malaysia, 2013.

- [20] K. Jarosz, P. Nieslony: The effect of changes in depth of cut and cutting speed of CNC toolpaths on turning process performance, Opole University of Technology, Poljska, 2018.
- [21] <http://hr.carbidemanufacturer.com/>, pristupljeno dana 2.6.2022.
- [22] <https://www.china-machining.com>, pristupljeno dana 2.6.2022.
- [23] <http://mitsubishicarbide.com/en>, pristupljeno dana 2.6.2022.
- [24] <https://www.sumitool.com/en>, pristupljeno dana 2.6.2022.

Popis slika

Slika 1.1 Shematski prikaz dijelova mehanizma rotacije bubnja [1]	2
Slika 1.2 Shematski prikaz pandže i pribadača na bubnju [1]	2
Slika 1.3 Mjenjač [1]	3
Slika 2.1 Aktivnosti pripreme proizvodnje [2]	5
Slika 4.1 Ulazni i izlazni rezultati projektiranja tehnološkog procesa [2]	7
Slika 4.2 Aktivnosti projektiranja tehnoloških procesa [2]	8
Slika 5.1 Kompatibilnost materijala i postupaka proizvodnje [4]	9
Slika 5.2 Ocjene primjenjivosti postupaka proizvodnje na pojedine karakteristike [4]	10
Slika 5.3 Iskorištenje materijala kod pojedinih postupaka obrade [6]	12
Slika 5.4 Konačne dimenzije proizvoda	13
Slika 5.5 Postupci obrade prema zahtijevanoj površinskoj hrapavosti [7]	13
Slika 5.6 Klasifikacija tvrdih metala za rezanje	14
Slika 5.7 Utjecaj legiranih elemenata na svojstva čelika [8]	14
Slika 5.8 Relativna obradivost nehrđajućih čelika [9]	16
Slika 5.9 Kompleksni proizvodi iz lijevanog željeza [10]	17
Slika 5.10 Usporedba obradivosti po različitim grupama metala [9]	17
Slika 5.11 Usporedba obradivosti između sivog lijeva (GG-25) i nodularnog [9]	17
Slika 6.1 Ovisnost procesa obrade o traženoj hrapavosti i obliku radnog predmeta [7]	20
Slika 6.2 Različiti oblici rezne pločice s različitim namjenama obrade [10]	20
Slika 6.3 Operacija 10, zahvat 1	23
Slika 6.4 Držač, obodna i centralna pločica za bušenje	24
Slika 6.5 Držač „A12M-SDXCR 07-R“ i pločica „DCMT 07 02 08-UM 4425“	25
Slika 6.6 Adapter 570-SDUCR-20-07-EX i pločica DCMT 07 02 04-PF 4415	27
Slika 6.7 Operacija 30, zahvat 1	28
Slika 6.8 Držač „570-DVUNL-40-16“ i pločica „VNMG 16 04 08-MM 1125“	29
Slika 6.9 Držač „570-DVUNL-40-16“ i pločica „VNMG 16 04 04-QM 4325“	34
Slika 6.10 Pločica „TNMG 16 04 04-MF 4415“ [7]	37
Slika 6.11 Svrđlo „C-12842 G3“	40
Slika 6.12 Alat „T300-PM100DA-M6 P1PM“ [7]	41
Slika 6.13 Svrđlo „C-13350 G3“	42
Slika 7.1 Tokarsko-glodači obradni centar INDEX G420 [11]	43
Slika 7.2 Nosači alata [11]	44
Slika 8.1 Alati iz jednog komada od brzoreznog čelika (lijevo) i alati sa zamjenjivim reznim pločicama [12]	46
Slika 8.2 Odabir oblika pločice u ovisnosti o vrsti obrade [6]	47
Slika 8.3 Odnos veličine kuta i jakosti oštice [13]	47
Slika 8.4 Stražnji kutevi pločice i pripadajuće oznake [2]	48
Slika 8.5 Prikaz efektivne dubine rezanja i veličine pločice [10]	49
Slika 8.6 Formule za izračunavanje veličine pločice, L u ovisnosti o obliku pločice [6]	49
Slika 8.7 Veličine radijusa nosa [10]	50
Slika 8.8 Stvaranje sila u ovisnosti o radijusu nosa i dubini rezanja [10]	50
Slika 9.1 Vrste zona habanja alata [14]	51
Slika 9.2 Sklonost metalnih parova da se drže zajedno (1 predstavlja najveći otpor, a 4 predstavlja najmanji otpor, a time i najgoru kombinaciju) [15]	52
Slika 9.3 Princip difuzijskog trošenja na alatu od WC [16]	53
Slika 9.4 Karakteristična područja trošenja na alatu za tokarenje [14]	53
Slika 9.5 Trošenje boka alata u ovisnosti o brzini rezanja [17]	54
Slika 9.6 Odnos brzine rezanja i životnog vijeka alata [17]	54
Slika 9.7 Odnos između brzine rezanja i vijeka trajanja alata na logaritamskoj skali [17]	55

Slika 9.8 Odnos između brzine rezanja i vijeka trajanja pojedinih alata [17].....	55
Slika 9.9 Ugrađeni rub uzrokovanom preniskom brzinom rezanja [18].....	56
Slika 9.10 Oblici trošenja reznog alata u ovisnosti o brzini [17].....	56
Slika 9.11 Utjecaj brzine i posmaka na vijek trajanja alata [17].....	57
Slika 9.12 Dubina rezanja ima mali utjecaj na vijek trajanja alata [17]	57
Slika 9.13 Rezni klin i pripadajući kutovi [14]	58
Slika 9.14 Prednji pozitivni (zbroy kuta klina i bočnog kuta je manji od 90°) i negativni kut (zbroy kuta klina i kuta boka je veći od 90°) [19].....	58
Slika 9.15 Ovisnost sile rezanja o veličini prednjeg kuta i brzine rezanja [20].....	59
Slika 9.16 Oblici trošenja alata [15].....	60
Slika 9.17 Bočno trošenje reznog alata [10]	60
Slika 9.18 Izgled i položaj kraterskog trošenja [10]	61
Slika 9.19 Zarezno trošenje [10].....	61
Slika 9.20 Plastična deformacija [10]	62
Slika 9.21 Toplinske pukotine [10].....	62
Slika 9.22 Krhotine [10]	63
Slika 9.23 Udaranje strugotine u rezu oštricu [10]	63
Slika 10.1 Usporedba svojstava materijala alata za obradu odvajanjem čestica [14].....	64
Slika 10.2 Usporedba kompatibilnosti materijala pri različitim režimima obrade [21]	65
Slika 11.1 Shematski prikaz parametara obrade [22]	70
Slika 11.2 Utjecaj dubine rezanja na hrapavost površine kod konvencionalnih alata [23]	71
Slika 11.3 Prikaz odnosa brzine rezanja i brzine vretne [24]	73
Slika 11.4 Ekonomičnost izrade u ovisnosti o brzini rezanja [6].....	73

Popis tablica

Tablica 1. Kemijski sastav polaznog materijala [5]	10
Tablica 2. Tehnološke operacije za izradu bubnja i pripadajući rezni alati	21
Tablica 3. Preporuke od strane proizvođača za režime obrade [10]	74