

# Sveučilište Sjever

Završni rad br. 236/PS/2017

## **ANALIZA TROŠENJA ALATA KOD OBRADJE GLODANJEM**

**Dario Slatki, 2176/601**

Varaždin rujan 2017. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

PRISTUPNIK Dario Slatki

MATIČNI BROJ 2176/601

DATUM 27.09.2017.

KOLEGIJ Tehnologija I

NASLOV RADA Analiza trošenja alata kod obrade glodanjem

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Analysis of tool wear in milling operation

MENTOR mr. sc. Zlatko Botak

ZVANJE viši predavač

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. Marko Horvat, dipl.ing., predavač
2. mr. sc. Zlatko Botak viši predavač
3. Katarina PISAČIĆ, dipl.ing., predavač
4. Veljko Kondić, mag.ing.meh, predavač
- 5.

## Zadatak završnog rada

BROJ 236/PS/2017

OPIS

Glodanje spada u postupak obrade odvajanjem čestica, koji se najčešće koristi nakon tokarenja. Njime se mogu obrađivati ravne površine, žljebovi i utori, te površine složenijeg geometrijskog oblika. Prilikom glodanja glavno gibanje izvodi alat cilindričnog oblika s više reznih oštrica, određenom brzinom rezanja i posmakom. Izbor optimalnih režima obrade može bitno utjecati na kvalitetu površine obrađivanog komada i brzinu trošenja alata. Veličine parametara obrade mogu se odabrati iz kataloga prema preporukama proizvođača alata, ili ih je moguće odrediti pokusima.

U radu je potrebno:

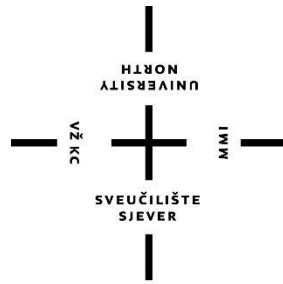
- Opisati općenito obradu odvajanjem čestica-glodanje.
- Opisati alate i parametre obrade koji se koriste kod obrade glodanjem.
- Izvesti eksperimentalni dio rada u kojem treba odrediti utjecaj promjene parametara obrade na veličinu vibracija na stroju i kvalitetu obrađene površine materijala.
- Analizirati rezultate eksperimenta te izvesti odgovarajući zaključak.

ZADATAK URUČEN

29.09.2017.



Botak



# Sveučilište Sjever

**Proizvodno strojarstvo**

**Završni rad br. 236/PS/2017**

## **ANALIZA TROŠENJA ALATA KOD OBRADJE GLODANJEM**

**Student**

Dario Slatki, 2176/601

**Mentor**

mr.sc. Zlatko Botak

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. Zlatku Botaku na pruženoj stručnoj pomoći, savjetima tijekom izrade ovog završnog rada i preporučenoj literaturi.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na velikoj potpori i razumijevanju tijekom dosadašnjeg dijela studija.

Dario Slatki

## Sažetak

U završnom radu predstavljene su osnovne definicije i vizualizacije glavnih komponenti geometrije reznih alata za strojnu obradu.

Razmatrane su vrste i karakteristike alata, budući da svojstva definiraju i ograničavaju mogućnosti upotrebe alata. Razmatraju se također kriteriji i brzine trošenja alata kod određenih parametara obrade, te mogućnost optimalne upotrebe alata s obzirom na vremena obrade i postojanost.

S obzirom na veliki utjecaj površinskog trošenja oštice alata na troškove obrade, ali i kvalitetu konačnog proizvoda, potrebno je što više smanjiti intenzitet trošenja. Da bi se to ostvarilo, potrebno je poznavati procese trošenja koji nastaju unutar tribo sustava oštice alata i obratka, te ostale faktore koji utječu na postojanost alata. U ovom radu navedene su tribološke mjere kojima se postiže manji intenzitet trošenja, tj. veća postojanost alata za obradu odvajanjem čestica.

U eksperimentalnom dijelu završnog rada izabrao se materijal za obradu, a prema njemu vrsta glodala za obradu, te režimi obrade koji su se mijenjali. Također su se analizirali različiti procesi, kvaliteta obrađene površine i vibracije pod opterećenjem.

Ključne riječi: glodanje, trošenje alata, parametri obrade.

## **Popis korištenih kratica**

<b>CAD</b>	računalno potpomognuto dizajniranje
<b>CAM</b>	računalno potpomognuta proizvodnja
<b>CBN</b>	Cubic Boron Nitride (CBN), alati koji se koriste za tvrde obrade
<b>PCD</b>	alati za glodanje koji su otporni kao prirodni dijamantni
<b>CVD</b>	kemijsko nanošenje iz parne faze, za brzorezne čelike
<b>PVD</b>	fizikalno nanošenje iz parne faze, za tvrde metale
<b>EP</b>	aditivi koji poboljšavaju fizička svojstva maziva

# SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1-2
2.	GLODANJE.....	3
2.1.	Proces glodanja .....	4-5
2.2.	Dinamičko glodanje .....	5-6
2.3.	Geometrija kružnog završnog glodanja.....	6-7
2.4.	Parametri obrade .....	8-10
3.	ALATI ZA GLODANJE .....	11
3.1.	Geometrija alata .....	12-13
3.2.	Materijali alata.....	13-16
3.3.	Trošenje alata .....	16
3.3.1	Mehanizmi i procesi trošenja .....	16-17
3.3.2	Trošenje alata za obradu odvajanjem čestica .....	17-20
3.4.	Mjere za smanjenje trošenja alata za obradu odvajanjem čestica .....	21-23
4.	PLANIRANJE TESTIRANJA.....	24
4.1.	Uvod u testiranje .....	24
4.2.	Regresijska analiza .....	25-28
4.3.	Obradni centar .....	29
4.4.	Alat .....	30
4.5.	Uređaj za mjerenje hrapavosti.....	31
4.6.	Vibracije Grms .....	32-34
4.7.	Hrapavost .....	35-37
5.	IZVOĐENJE EKSPERIMENTA .....	38-40
5.	ANALIZA TESTIRANJA .....	41-43
6.	ZAKLJUČAK .....	44
	LITERATURA .....	45-46
	POPIS SLIKA .....	47-48
	POPIS OZNAKA .....	49

# 1. UVOD

Glodanje je operacija obrade odvajanjem čestica, koja se često izvodi u industrijskim procesima, na strojevima velikih brzina i preciznosti. Glodanjem se proizvode trodimenzionalni oblici, pomoću rotirajućeg alata za rezanje s više reznih oštrica. Putanja alata za rezanje može se programirati tako da se kreće prema nepomičnom izratku u gotovo bilo kojem smjeru. Alati za glodanje uklanjaju materijal sa obratka svojim gibanjem, a izgled završne površine ovisi i o njihovom obliku. Osnovni oblik reznog alata je oštrica u obliku klina, čija je zadaća razdvajanje i odvajanje čestica materijala.

Tehnologija obrade odvajanjem čestica je tehnologija u kojoj se sirovcu skida sloj po sloj materijala, s ciljem dobivanja obratka određenih dimenzija, oblika i kvalitete površine. Obrada materijala odvajanjem čestica ima danas vrlo veliko značenje, kako po broju samih postupaka i alatnih strojeva, tako i po njihovoj raznovrsnosti u primjeni, jer se tim postupcima, iako ponekad nisu najekonomičniji, mogu postići najveće točnosti i najbolja kvaliteta obrađene površine. Ujedno se i osnovna podjela alatnih strojeva u užem smislu vrši prema postupcima obrade odvajanjem čestica, bez obzira na stupanj automatizacije istih.

Najbitnije veličine kod obrade odvajanjem čestica:

- Alati za rezanje izloženi su visokoj snazi i temperaturu te temperaturnoj razlici.
- Životni vijek alata
- Dva aspekta dizajna
  - Materijali alata
  - Geometrija alata
- Rashladne tekućine

Danas je u proizvodnom strojarstvu gotovo nezamislivo ne koristiti postupke obrade odvajanjem čestica, jer svaki od tih postupaka ima velike prednosti, ali i neke nedostatke u odnosu na ostale postupke obrade.



**Glavne prednosti postupka obrade odvajanjem čestica:**

- Postizanje točnosti, uskih tolerancija i dobre kvalitete obrađene površine
- Najbolji način za formiranje oštih rubova, ravnih površina, te unutarnjih i vanjskih profila
- Tehnologija je primjenjiva gotovo kod svih poznatih materijala
- Najbolji način za obradu kaljenih i tvrdih materijala
- Ekonomičnost i produktivnost kod maloserijske i pojedinačne proizvodnje

**Nedostaci postupka obrade odvajanjem čestica:**

- Generiranje odvojene čestice
- Za obradu jednog komada ponekad je potrebno upotrijebiti više strojeva i različitih postupaka obrade odvajanjem
- Alatni strojevi zahtijevaju veliki prostor
- Mikroklima je pod jakim utjecajima obradnih procesa
- Veliki udio pomoćnih i pripremnih vremena

## **2. GLODANJE**

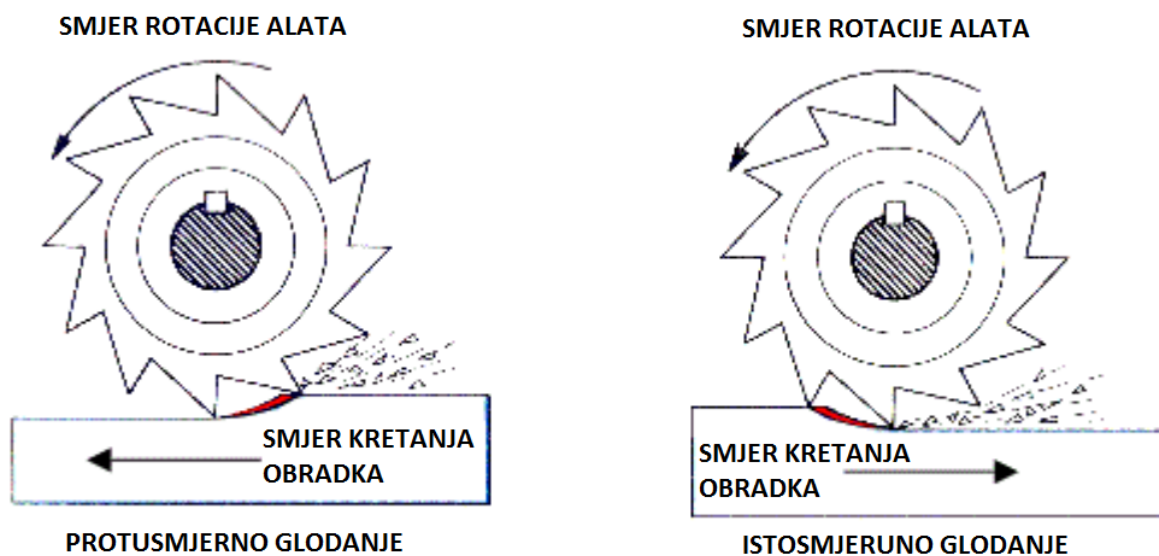
### **2.1. Podjela postupaka glodanja**

Postupci obrade odvajanjem čestica glodanjem mogu se podijeliti prema nekoliko različitih kriterija kao što su:

1. Prema proizvedenoj kvaliteti obrađene površine
  - Grubo glodanje
  - Završno glodanje
  - Fino glodanje
2. Prema kinematici postupka
  - Istosmjerno
  - Protusmjerno
3. Prema položaju reznih oštrica na glodalu
  - Obodno
  - Čeono
4. Prema obliku obrađene površine
  - Linearno
  - Kružno
  - Profilno (utori i profili)
  - Odvalno (zupčanici)
  - Oblikovano (kopirno i 3D)
  - Dinamično

## 2.2. Proces glodanja

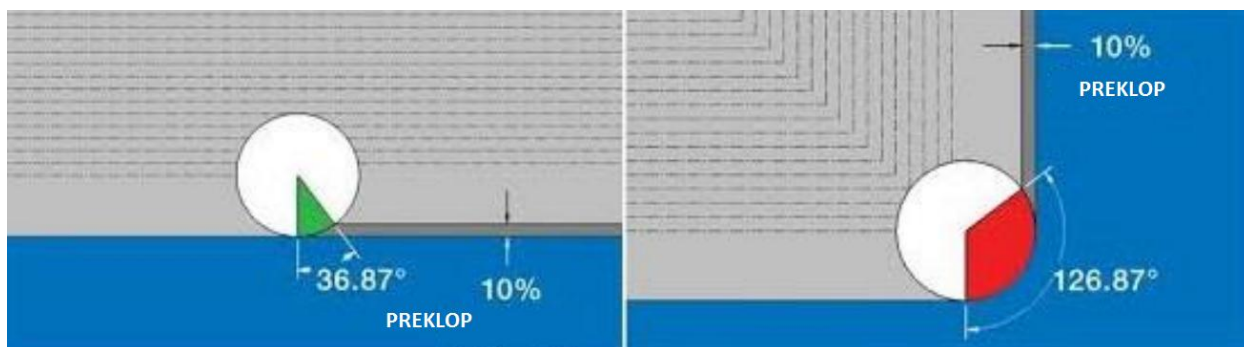
Glodanje se naširoko koristi u izradi dijelova za sve vrste strojeva, obradi kalupa, kao i raznih komponenti zrakoplova. Kako bi se osigurala kvaliteta glodanja, produljenje vijeka trajanja alata i produktivnost, točna analiza procesa glodanjem neophodna je za unaprijed planiranje procesa i prilagođavanja upravljanja. Tijekom čitavog procesa glodanja, sila rezanja jedan je od najvažnijih faktora, pa je učinkovit i precizan model sile za rezanje ključan za odabir parametara strojne obrade, kao što su brzina posmaka i broj okretaja vretena. Kod protusmjernog glodanja radni komad kreće se kontra rotacije alata, što rezultira malom debljinom strugotine na početku zahvata, koja se zatim povećava do izlaska zuba glodala iz zahvata.



Slika. 2.1 Protusmjerno i istosmjerno glodanje [19]

Visoke sile za rezanje kod protusmjernog glodanja nastoje podići komad obrade, koji se može odvojiti od stezne naprave na stolu stroja. Stoga je važno pažljivo pričvrstiti radni komad. Kod istosmjernog glodanja, radni komad kreće se u istom smjeru kao i rotacija alata. U početku zahvata je debljina strugotine najveća i smanjuje se izlaskom zuba glodala iz zahvata. Zbog toga učinak pritiskanja koji se javlja kod protusmjernog glodanja nije isti kao i kod istosmjernog glodanja. Sile rezanja kod istosmjernog glodanja nastoje povući radni komad prema glodalu koje je u stegnuto u prihvat. Kod istosmjernog glodanja obično se postiže bolja površinska obrada zbog manjeg sloja rezanja na kraju. Kod protusmjernog glodanja glodalo na kraju zahvata skida najdeblji dio i baca strugotinu ispred sebe, pa može doći do odbijanja alata prema komadu, lošoj obradi, a također i lomu alata.

Kada glodalo prolazi, kut angažmana alata se povećava, kao i opterećenje glodala. Duži zahvat alata povećava vrijeme koje alat provede u dodiru s obradkom, pa je time i vrijeme koje na raspolaganju ima alat da oslobodi toplinu smanjeno. Na slici 2.2 je prikaz kako se kod obrade u kutu, angažman alata drastično povećava.



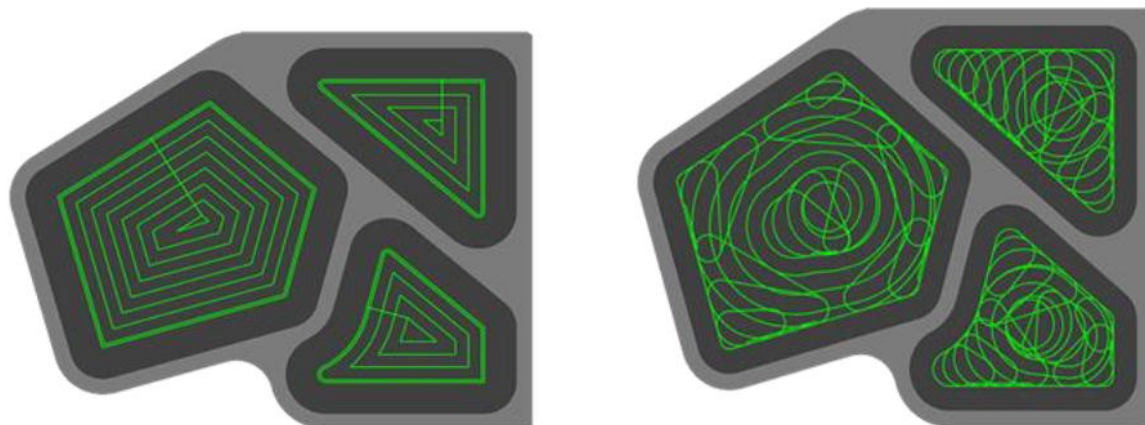
*Slika 2.2. Kut angažmana glodala drastično se povećava pri glodanju u kutu na tradicionalan način [19]*

### 2.3. Dinamično glodanje

Tradicionalna istraživanja modela sile glodanja obično se usredotočuju na linearni način glodanja. Izračun dubine, kao i koeficijenti sile glodanja također se analiziraju posebno za simulaciju linearne sile glodanja. Ti pristupi ne ispunjavaju uvijek druge uvjete rezanja, osobito kod kružnog glodanja. Stanje konstrukcije neovisnih sila i koeficijenata snage uvedeno je u modeliranje sile glodanja, međutim, ovoj metodi potrebni su precizni podaci o trenutnoj debljini strugotine i faktorima kuta, kako bi se dobili željeni trenutni koeficijenti sile rezanja. Veličina strugotine i ostale značajke tijekom procesa mogu na kraju utjecati na rezultate simulacije. Stoga je potreban poseban model za kružno glodanje kako bi se zadovoljili praktični zahtjevi.

Dinamična opterećenja prilikom glodanja imaju širok aspekt utjecaja za obradu, te se uvelo dinamično glodanje, kod kojeg se kombiniraju dubine glodanja, različite radijalne dubine i optimizira put prolaza alata kroz cijeli proces, slika 2.3. CAD-CAM proizvođači imaju različite nazive programa za dinamično glodanje, kao što su npr. Imachining, VoluMill i TRUEMill. Ovisno o proizvođaču, te metode mogu raditi različiti putanje. Neke metode nastoje stvoriti putanju alata koji potpuno izbjegava naglo zakretanje, kako bi se stalno jednoliko angažiralo glodalo, uz konstantno opterećenje. Pri tome optimiziraju dubinu glodanja i druge parametre obrade da se ne prekorači granica izdržljivosti alata.

Mala radijalna dubina i optimizirani putevi alata omogućuju da se obrađuje pri većim brzinama i posmacima nego što ih preporučuju proizvođači alata. Pod određenim okolnostima, takvi načini glodanja mogu drastično povećati brzinu uklanjanja materijala, te smanjiti trošenje alata.



*Slika 2.3 Na lijevoj strani je prikazano klasično glodanje, a desno dinamično. [19]*

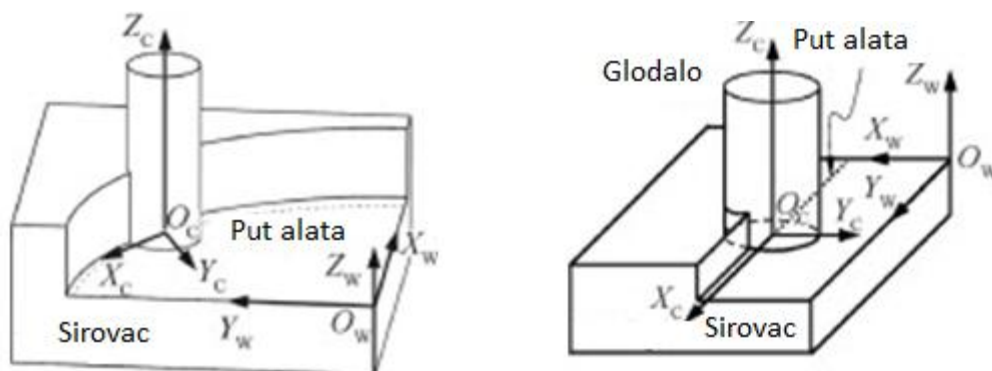
Zhang al predložio je pristup predviđanju sila rezanja u završnom glodanju pravokutnih kružnih kutnih profila, diskretiziranjem kuta u seriju procesa rezanja u stacionarnom stanju, svaki s različitom radijalnom dubinom rezanja. Yang et razvio je metodu za modeliranje sile koja se odnosi na periferno glodanje zakrivljenih površina, uključujući posljedicu odstupanja glodala. Za glodanje zakrivljenih površina, Rao sa suradnicima predstavio je niz postignuća, uključujući geometriju procesa, učinak zakrivljenosti, sile rezanja, površinsku pogrešku i tako dalje.

Na zakrivljenom obratku, brzina posmaka duž promjera alata za glodanje neće ostati ista kao i centar alata, a to je važna razlika od postupka linearnog glodanja. Prilikom uspostave modela sile rezanja, jedan od ključnih problema je izračun trenutne debljine reza, koji ovisi o brzini posmaka. U ovom pogledu učinjeno je obilje istraživanja [3, 4, 21]. U članku se razmatraju učinci kretanja, kretanja zuba, kao i odstupanja alata na debljini rezanja. Primijećeno je da kod proučavanja sila u glodanju kružnim kretanjem alata, bitnu ulogu igra neobrađena debljina. Zapravo ključni elementi uključeni u model sile, brzina posmaka i debljina rezanja, odstupaju od normalnih vrijednosti tijekom kružnog glodanja.

## **2.4. Geometrija kružnog završnog glodanja**

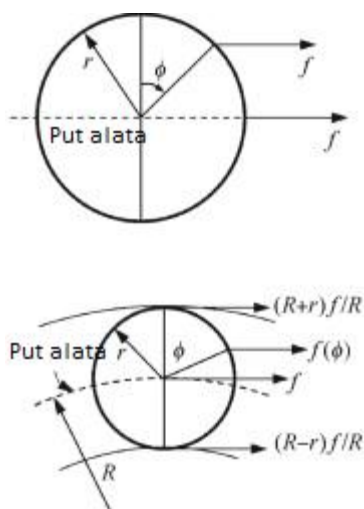
Da bi se analizirala geometrija kružnog procesa glodanja, najprije se definira niz ravninskih koordinatnih sustava. Kao što je prikazano na slici 2.4, na radni komad pozicioniran je ravninski koordinatni sustav  $O_w X_w Y_w Z_w$ . Za postupak glodanja koordinatno ishodište  $O_w$  je u kutu

komada, a smjerovi osi  $X_w$  i  $Y_w$  ovise u kojem smjeru djeluju sile rezanja. Koordinatni sustav  $O_c X_c Y_c Z_c$  fiksiran je s centrom glodala i ima sinkroni pomak u  $X_w Y_w$  ravnini, koja odgovara kretanju glodala duž linije alata. Njena  $X_c$  os uvijek je orijentirana u trenutačnom smjeru napajanja, položaj  $Y_c$  nalazi se na liniji sredine glodala, a  $Z_c$  se podudara s osi glodala.



Slika 2.4 Kružno i linearno glodanje.

Kao što je prikazano na slici 2.5, tijekom postupka linearnog glodanja, ako je put alata ravna linija, brzina posmaka svake točke rezanja duž promjera glodala ostaje konstantna i jednaka normalnoj brzini posmaka ( $f$ ). Ovdje se  $f$  odnosi na posmak po zubu, no tijekom kružnog procesa sredina glodala je na kružnici i trenutačni posmak glodanja je u točki glodanja. Na glodalu je posmak  $f$  koji se nalazi samo na centralnom  $R$ , kao što je prikazano na slici 2.5. Na slici se  $R$  odnosi na radijus putanje alata,  $r$  je polumjer glodala,  $\phi$  je trenutni kut položaja alata. Stupnjevi punjenja ostalih točaka duž promjera glodala mijenjaju se prema radijusu alata i udaljenosti od centra glodala.



Slika 2.5 Linearno i kružno glodanje

## 2.5. Parametri obrade

Različiti parametri koji kontroliraju proces glodanja nazivaju se režimi obrade. Oni sadrže nekoliko definicija koje treba objasniti za dublje razumijevanje kako pojedini režimi utječu na obradu, te se teži najboljem omjeru brzine, kvalitete obrade i trajanju alata.

Tablica 2.1 Oznake i jedinice kod CNC i klasičnog glodanja

OZNAKA ZA CNC	OZNAKA KLASIČNO	NAZIV	MJERNA JEDINICA
$a_p$	$a$	dubina rezanja	mm
$f$	$s$	posmak	mm/o
$f_z$	$s_z$	posmak po zubu(glodala)	mm/zubu
$v_f$	$s, v_s$	posmična brzina (brzina posmaka)	mm/min
$i$	$i$	broj prolaza alata	-
$v_c$	$v$	brzina rezanja	m/min, m/s
$n$	$n$	broj okretaja	o/min, o/s
$l$	$l$	hod alata	mm

### Brzina glodanja (posmak), $v_c$

- je obodna brzina kojom oštrica odvaja česticu
- daje glavno gibanje
- ima je alat
- mjerna jedinica je m/min ili m/s

### Pravilan izbor brzine rezanja ovisi o:

- materijalu obratka i alata
- kvaliteti obrade (tolerancijama)
- hlađenju i podmazivanju
- vrsti obrade
- snazi stroja
- aksijalnoj dubini ( $a_p$ ) i radijalnoj dubini ( $a_e$ )

Formule za izračun brzine rezanja i broja okretaja su:

$$v_c = \frac{D_a \cdot \pi \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

gdje je:

$v_c$  - brzina rezanja, m/min

$D_a$  - promjer alata, mm

$n$  - broj okretaja alata,  $\text{min}^{-1}$

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{D_a \cdot \pi} \quad (2.2)$$

Brzina rezanja izabere se iz tablica (kataloga alata) prema gore navedenim kriterijima. Izračuna se potrebni broj okretaja i izabere prvi manji dostupni na stroju.

**Posmak,  $f(s)$**

- je ona veličina za koju se alat pomakne za jedan okretaj glavnog vretena
- je pomoćno gibanje
- daje širinu strugotine
- ovisi o vrsti obrade i kvaliteti obrađene površine
- posmična brzina:  $v_f = s_z \cdot n$ , mm/min
- posmak kod glodanja:  $f = f_z \cdot z$ , gdje je  $s_z$  - posmak po zubu, a  $z$  - broj zuba glodala

Određivanje vrijednosti parametra obrade može se temeljiti na:

- **iskustvu tehnologa**
  - brzi izbor, ali nosi rizik
- **priručnicima i katalogima proizvođača alata**
  - potrebno je prepoznati specifičnosti obrade konkretnog obratka, te u tom smislu izvršiti korekciju preporučenih vrijednosti iz kataloga (npr. veća tvrdoća materijala obratka, loše stezanje i sl.)
- **računalskim sustavima za određivanje parametara obrade (dinamičko glodanje)**
  - može koristiti baze podataka i matematičke modele sustava obrade
  - pouzdanija metoda, ali traži posjedovanje odgovarajućeg računalnog sustava.



### Optimalna brzina glodanja, $v_c$

pri njezinom izboru mora se voditi računa o:

- vrsti materijala koji se obrađuje tj. rastezljivosti materijala
  - materijali s većim otporom za glodanje razvit će više topline, a time će temperatura i trošenje alata biti veći
- vrsti materijala alata, tj. sposobnosti alata da izdrži toplinu bez gubitaka reznih karakteristika
- vrsti obrade (grubo ili fino)
- ekonomičnosti životnog vijeka alata (postojanosti alata)
- trošku oštrenja ili nabavke novog alata s obzirom na količinu proizvedenih

proizvoda

Materijali koji se koriste za izradu alata imaju neku graničnu temperaturu nakon koje oštrica brzo zatupljuje, tablica 2.2.

Tablica 2.2 Temperaturna postojanost materijala alata

MATERIJAL ALATA	GRANIČNA TEMPERATURA (°C)
Visokouglični čelik	150
Brzorezni čelik	600
Legure	700
Volframovi i titanovi karbidi (tvrđi metali)	870
Oksidne keramike (rezná keramika)	1150

Pri gruboj obradi optimalna brzina glodanja ograničena je dodatkom za obradu i snagom stroja, a povezana je s brzinom rezanja i posmakom. Što je veća dubina rezanja, broj prolaza biti će manji, a vrijeme izrade kraće. Pri finoj obradi  $a_p$  je manja, kako bi se dobila dobra kvaliteta obrade:  $0,2 < a_p < 0,5$  mm. Nakon definiranja parametara  $n$ ,  $f$  i  $a$  može se izračunati količina odvojenog materijala  $Q$ :

$$Q = a_p \cdot f \cdot v_c, [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (2.3)$$

### 3. ALATI ZA GLODANJE

Alat za glodanje je glodalo definirane geometrije reznog dijela, s više glavnih reznih oštrica koje se nalaze na zubima glodala i mogu biti smještene na obodnoj ili na čeonj plohi glodala. Budući da glodalo služi za raznoliku upotrebu obrade materijala odvajanjem čestica i obrađuju se različite vrste površina, tako je i oblik glodala raznolik.

Glodala se mogu izrađivati cijela iz jednog komada, imati umetnute rezne oštrice i pločice iz tvrdog metala, koje se pričvrste na držač glodala.

Glodala se mogu podijeliti:

- Prema obliku zubi
  - glodala sa ravnim zubima
  - glodala sa spiralnim zubima
  - glodala sa križnim zubima
- Prema obliku tijela
  - valjkasta glodala
  - valjkasto glodalo za ozubljenje
  - valjkasto glodalo za navoje
  - pločasta (plosnata) glodala
  - pilasta glodala
  - profilna glodala
  - modulna (prstasta) glodala
  - vretenasta glodala
  - konusna glodala

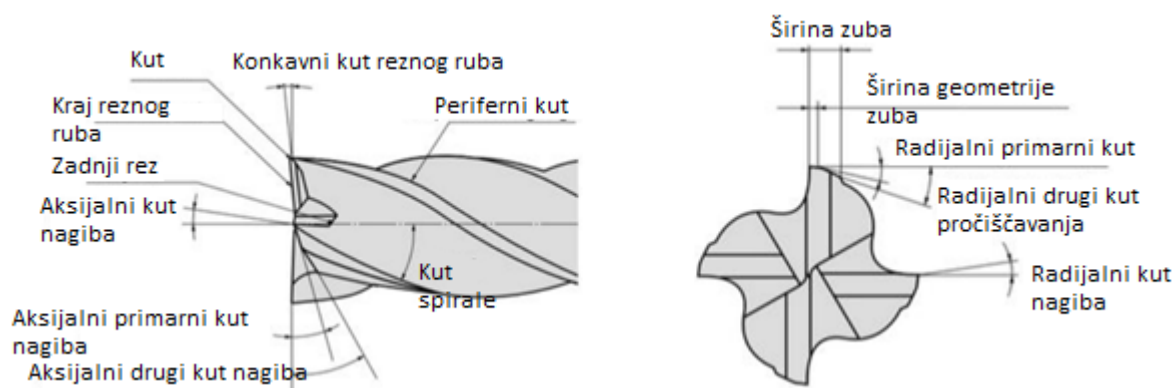
Rezni dio glodala izrađuje se od materijala znatno veće tvrdoće od obrađivanog materijala, a najčešće se koriste brzorezni čelici, tvrdi metali, cermet, keramika te kubni nitrid bora. Od brzoreznog čelika izrađuje se cijelo glodalo.



*Slika 3.1. Različiti oblici glodala*

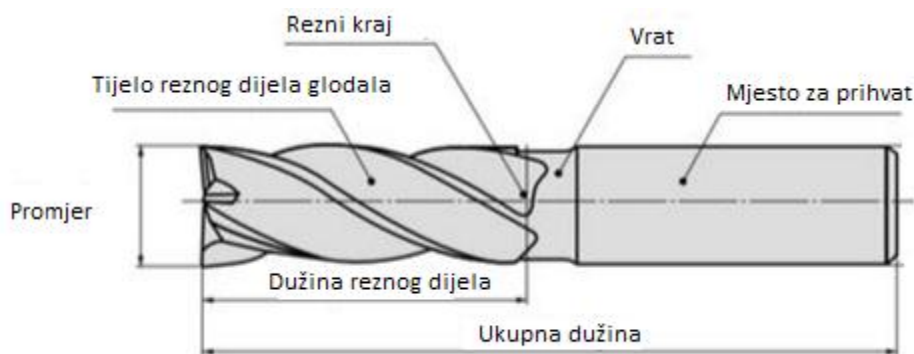
### 3.1. Geometrija alata

Alati, potrebni za obradu odvajanjem čestica, imaju u većini slučajeva zajednički geometrijski oblik, što znači da im se osnovni elementi (površine, kutovi, oštrica) pojavljuju kod svih vrsta obrade odvajanjem čestica, bez obzira koliko reznih dijelova imaju. Osnovni oblik svih alata sa čvrstim oštricama je zub. Kutovi alata su neophodni za određivanje položaja rezne oštrice te prednje i stražnje površine reznog dijela alata. Kutovi se uvijek odnose na određenu točku na reznoj oštrici. Kada su rezna oštrica, prednja i stražnja površina zakrivljene, za određivanje kuteva su mjerodavne tangente, odnosno tangencijalne ravnine kroz odabranu točku.



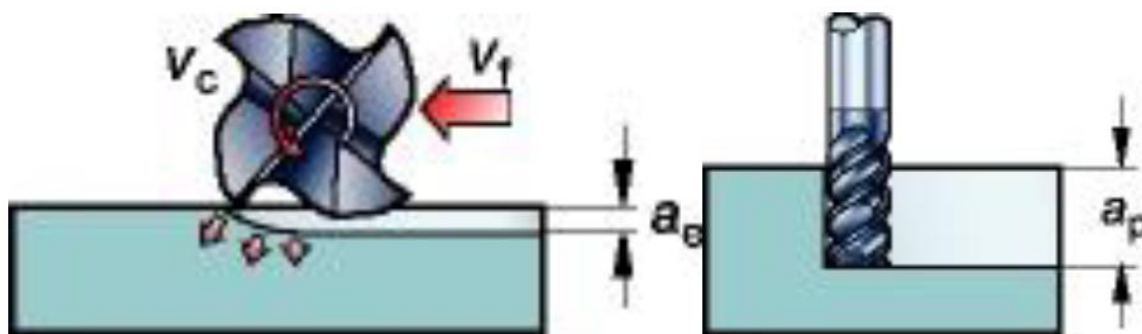
Slika 3.2 Geometrija glodala.[19.]

Krajnji rubovi glodala imaju mnogo različitih geometrija, koje utječu na proces rezanja.



Slika 3.3 Dijelovi glodala [19.]

Različiti parametri koji kontroliraju proces glodanja nazivaju se režimi obrade. Oni sadrže nekoliko definicija koje treba objasniti za dublje razumijevanje kako utječu na obradu, te se teži najboljem omjeru brzine, kvalitete obrade i trajanju alata.



Slika 3.4 Aksijalna i radijalna dubina rezanja [19.]

Ovisno o materijalu koji treba obraditi, poželjni su određeni kutovi na alatu. Za rastezljive materijale kut zuba (radijalni i aksijalni) treba biti pozitivan i veliki. Za krhke materijale, poželjni je manji kut vrha zuba. Za oblikovanje i smjer strujanja strugotine kutovi vrha zuba postaju važan čimbenik. Veći kut vrha zuba pridonosi boljem odvođenju strugotine, koja daje bolji angažman reznih rubova. Negativan kut vrha zuba vodi strugotinu prema materijalu, povećava potrebne snage rezanja, a u nekim slučajevima i trenje. S povećanjem negativnog kuta, zub alata postaje postaje čvršći, čime se povećava snaga rezne oštrice. Za mekše materijale često se izabiru veći reljefni kutovi (aksijalni i radijalni). S povećanjem reljefnog kuta, trošenje donjeg ruba je sporije, ali se potrebna snaga rezanja smanjuje.

### 3.2. Materijal alata

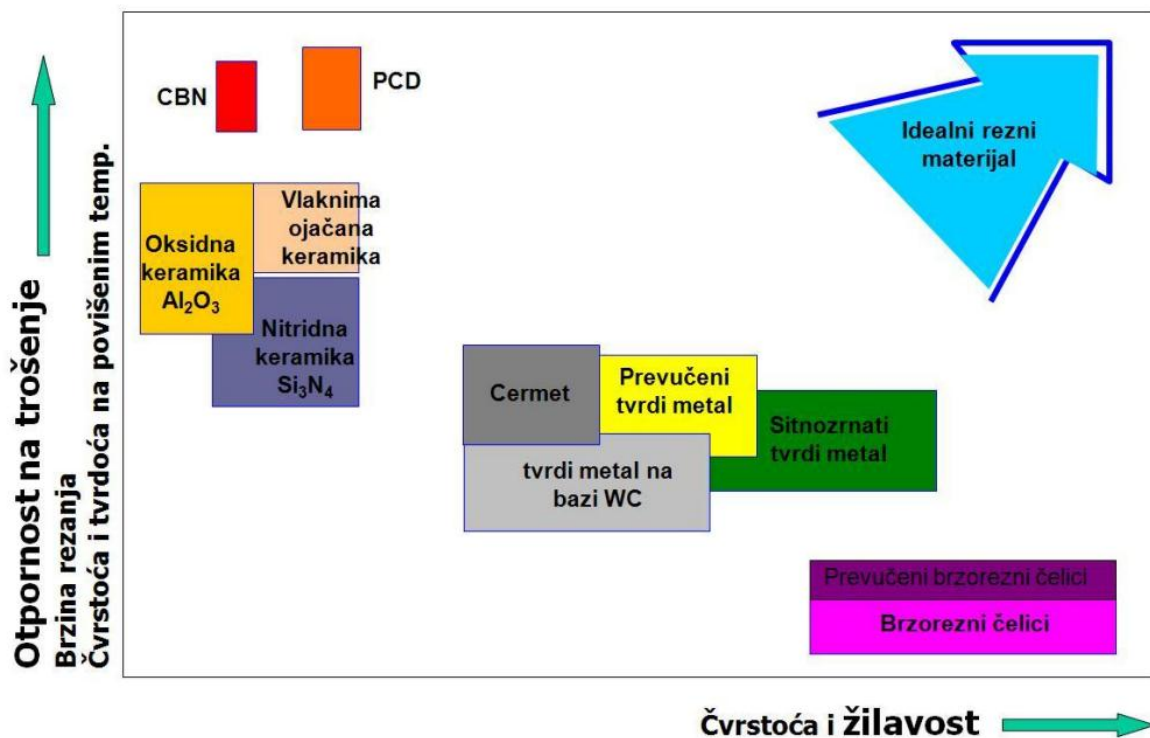
Vrsta materijala reznog alata određuje se prema potrebi proizvodnosti, vrsti materijala za obradu, režimima obrade, svojstvima svakog oblika alata i uvjetima rada.

Najbitnije karakteristike alata su:

- Otpornost prema trošenju
- Žilavost
- Otpornost pri povišenim temperaturama

Otpornost prema trošenju proporcionalna je tvrdoći materijala reznog alata, no jako je teško napraviti alat koji će imati jako veliku tvrdoću, a istovremeno i visoku žilavost. Zbog toga se sve više pokušavaju razviti novi materijali i postupci, pomoću kojih bi takva svojstva bila što više približena. Na slici 3.5 je vidljivo da se kao najtvrdi materijali pokazuju keramika, CBN i PCD,

koji se puno rjeđe koriste nego tvrdi metali, koji daju dobar odnos tvrdoće i žilavosti, ali i dobru otpornost prema visokim temperaturama, čime su bitno utjecali na razvoj tehnologije obrade odvajanjem čestica.



Slika 3.5 Karakteristike materijala za alate [18.]

Alati za obradu odvajanjem čestica pod utjecajem su:

- mehaničkih opterećenja (zahtjevi visoke tvrdoće i dobre žilavosti);
- toplinska opterećenja (zahtjevi temperaturne stabilnosti);
- kemijskih reakcija (što niža sklonost difuziji i oksidaciji).

Visoke tvrdoće alata prikladne su kada je otpor rezanja konstantan. Kada postoje udarna opterećenja prilikom obrade, potrebna je visoka žilavost materijala. Kako su tvrdoća i žilavost obrnuto proporcionalna svojstva materijala, ne postoji idealni materijal za sve vrste obrade odvajanjem čestica. Materijal je potrebno odabrati ovisno o eksploatacijskim uvjetima.

Brzorezni čelici koriste se kada je potrebna visoka žilavost. Imaju tvrdoću od 65 HRC-a ispod temperature od 600 °C. Na dodirnom mjestu alata i obratka temperatura je najčešće veća od 600 °C, pa je potrebno koristiti sredstva za hlađenje i podmazivanje. Postoji nekoliko vrsta brzoreznih čelika. Razlikuju se prema legirnim elementima. Uobičajeni legirani elementi su:

- volfram (poboljšava temperaturnu stabilnost)
- vanadij (formira tvrde karbide i povoljno djeluje na nastajanje sitno zrnate strukture);
- molibden (povećava žilavost i poboljšava temperaturnu stabilnost);
- kobalt (poboljšava temperaturnu stabilnost).

Brzorezni čelici često se koriste za obradu odvajanjem čestica u procesima glodanja, bušenja, provlačenja, odvalnog glodanja i urezivanja navoja. U procesima kao što su tokarenje i čeono glodanje obično se koriste tvrdi metali. Tvrdi metali sastoje se od volframovih karbida, titana i kobalta kao vezivnog sredstva. Karbidi imaju visoku tvrdoću i prema tome visoku otpornost prema trošenju. Povećanjem sadržaja vezivnog materijala, povećava se žilavost koja je potrebna prilikom udarnih opterećenja, ali se u isto vrijeme smanjuje otpornost prema trošenju. Tijekom rezanja na povišenim temperaturama promjena tvrdoće je zanemariva, pa se proces često izvodi bez sredstva za hlađenje. U procesu obrade s konstantnim otporom rezanja tvrdi metali sastoje se od oko 95% karbida i 5% vezivnog sredstva. U procesima sa češćim udarnim opterećenjima tvrdi metali imaju više vezivnog materijala, do 30%.

Poboljšanje svojstva materijala može se postići modifikacijom površine ili primjenom zaštitnog sloja na površini. Površinski sloj nanosi se CVD postupkom (kemijsko nanošenje iz parne faze, za brzorezne čelike) ili PVD postupkom (fizikalno nanošenje iz parne faze, za tvrde metale). Najčešće nanošeni slojevi su:

- TiN (titanov nitrid);  
Svijetla, zlatna, keramička prevlaka. Ima visoku tvrdoću (oko 2300 HV), mali koeficijent trenja i srednju otpornost oksidaciji. Nanosi se PVD postupkom na rezne alate i alate za obradu deformiranjem, te se najčešće koristi.
- CrN (kromov nitrid);  
Svijetla srebrno-siva keramička prevlaka koja se nanosi PVD postupkom. Ima veliku tvrdoću (oko 2000 HV), veliku žilavost te veliku otpornost oksidaciji. Otporan na adhezijsko trošenje, posebno kod obrade neželjeznih metala. Kod obrade bakra, aluminija ili titana nadmašuje TiN, ali ima veći koeficijent trenja od TiN-a.

- TiCN (titanov karbonitrid);  
Tvrdoće 3000 HV, razvijen za zahtjevnije uvjete (tvrdoća TiN-a je 2500 HV). Nanosi se CVD postupkom na rezne alate za prekidne obrade i za obrade čelika visoke čvrstoće.
- TiAlN (titanov aluminij nitrid)  
Plavo-crna keramička prevlaka debljine do 4  $\mu\text{m}$ , koja se nanosi PVD postupkom, a primjenjuje se kod „suhih“ obrada i obrada kaljenih materijala. Velike je tvrdoće (oko 3500 HV) i malog koeficijenta trenja. Otporna je na oksidaciju do temperature od 800  $^{\circ}\text{C}$ . Prevlaka je glatka i ima izvrsnu otpornost na abrazijsko i adhezijsko trošenje. Moguće je nanijeti više zaštitnih slojeva, ali ukupna debljina je obično oko 10  $\mu\text{m}$ .

### 3.3. Trošenje alata

#### 3.3.1. Mehanizmi i procesi trošenja

Uzrok površinskog trošenja materijala može biti dinamički dodir s površinom drugog krutog tijela, s tekućinom ili raznim drugim česticama. Svaki proces trošenja materijala sastoji se od dva ili više osnovnih mehanizama trošenja, ovisno o vrsti tribo sustava.

- Abrazija;  
Abrazija je mikro-rezanje na površini materijala s tvrdim materijalom. Primjer abrazijskog trošenja na kućištu ležaja, slika 3.6.



Slika 3.6 Abrazijsko trošenje [20.]



Slika 3.7 Adhezijsko trošenje [20.]

- Adhezija;

Ako su adhezijske sile na dodirnim područjima između površina dvaju materijala jače nego kohezijske sile unutar materijala, dolazi do odvajanja čestica na dodirnim mjestima. Na slici 3.7 prikazan je primjer adhezijskog trošenja matrice od čelika prekrivenog zaštitnim slojem AlCrN nakon 120,00 ciklusa opterećenja.



Slika 3.8 Zamor površine [20.]



Slika 3.9 Tribokorozija [20.]

- Zamor površine;  
Na površini materijala dolazi do odvajanja materijala kao posljedice dugoročnog periodičkog promjenjivog opterećenja. Na slici 3.8 prikazano je oštećenje bandaže po obodu željezničkog kotača nastalog zamorom površine.
- Tribokorozija;  
Zbog utjecaja okoline tj. oksidacije, nastaju reakcijski produkti na površini koji su slabo povezani s površinom, te se prilikom dodira sa susjednim površinama lako uklanjaju. Ponavljanje ovog procesa predstavlja štetno korozijsko djelovanje na materijal. Na slici 3.9 prikazana je površina osovine oštećena tribokorozijom.

### 3.3.2. Trošenje alata za obradu odvajanjem čestica

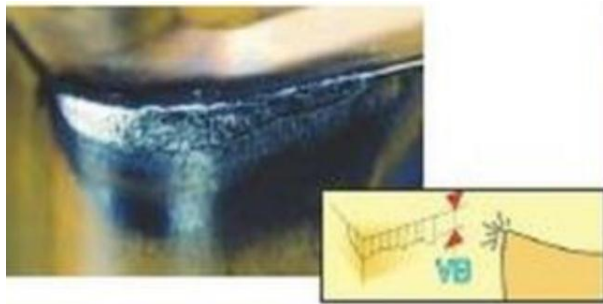
Prilikom kontakta s drugim materijalom, alati za obradu odvajanjem čestica izloženi su ekstremnom trenju. Razvijaju se sile visokog iznosa (nekad više od 15 kN) i visoke temperature (do 1000°C). Kao rezultat, trošenje oštrice alata je neizbježno. Trošenje se očituje postupnim gubitkom materijala alata i promjenom oblika alata tijekom procesa obrade odvajanjem čestica, što ima za posljedicu promjenu reznih svojstava alata. Proces rezanja ovisi o nizu ulaznih



veličina (materijal alata, geometrija alata i obratka, parametri obrade) koje direkto utječu na izlazne veličine (dimenzije obratka, hrapavost površine, sile rezanja, buka, temperatura, trošenje alata). Alat za obradu odvajanjem čestica izložen je mehaničkim, toplinskim i kemijskim opterećenjima, koja razvijaju različite vrste trošenja:

**- mehaničko trošenje;**

Sastoji se od abrazijskog i adhezijskog trošenja. Abrazijsko trošenje nastupa kada tvrde čestice odvojene s obratka režu površinu alata, slika 3.10. Adhezijsko trošenje nastaje zbog adhezijske veze između alata i obratka na prednjoj i stražnoj površini alata, slika 3.10.



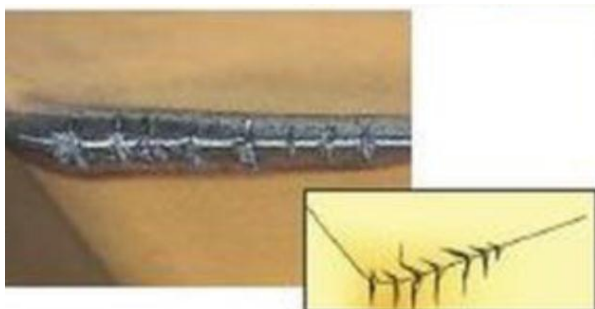
Slika 3.10 Abrazijsko trošenje [20.]



Slika 3.11 Adhezijsko trošenje [20.]

**- termo-mehaničko trošenje;**

Glavni mehanizam je trošenje zamorom površine. Dolazi do malih pukotina zbog promjene temperature i periodički promjenjivog naprezanja, slika 3.12. Pukotine se šire dok se komadići alata ne odvoje.



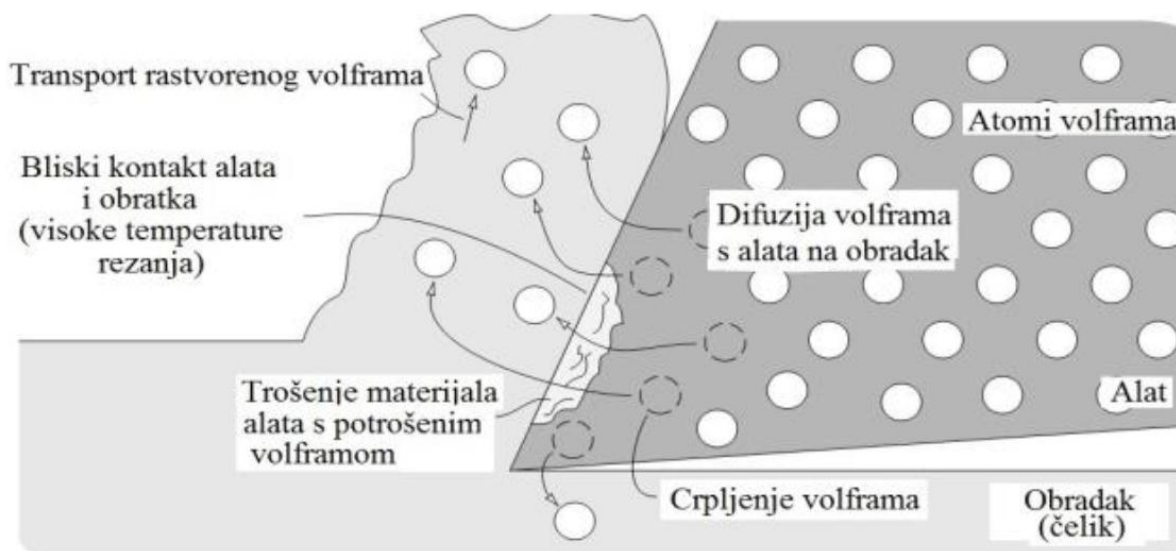
Slika 3.12 Pukotine na površini [20.]



Slika 3.13 Difuzijsko trošenje [20.]

### - termo-kemijsko trošenje;

Uslijed visokih kontaktnih naprezanja i visokih temperatura dolazi difuzijom do prelaska atoma iz područja više koncentracije u područja niže koncentracije. Brzina difuzije eksponencijalno se povećava s temperaturom. Difuzija atoma s površine alata uzrokuje krhki sloj sa smanjenom čvrstoćom, slika 3.13. Mehanizam difuzijskog trošenja prikazan je shematski na slici 3.14 na primjeru volframovog karbida.



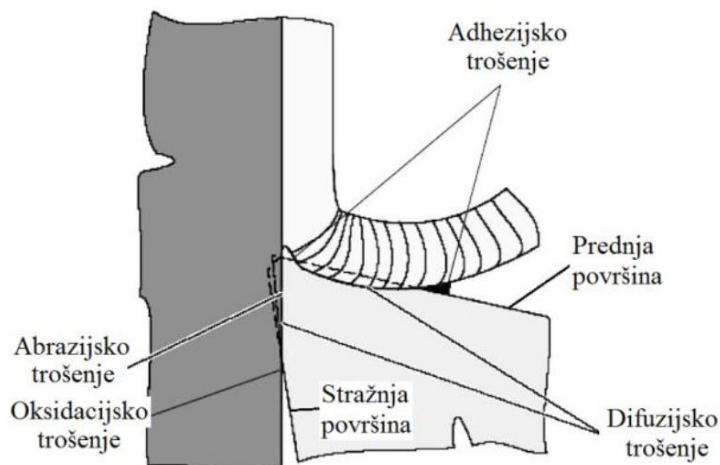
Slika 3.14 Mehanizam difuzijskog trošenja na primjeru alata iz volframovog karbida. [20.]

### - elektrokemijsko trošenje.

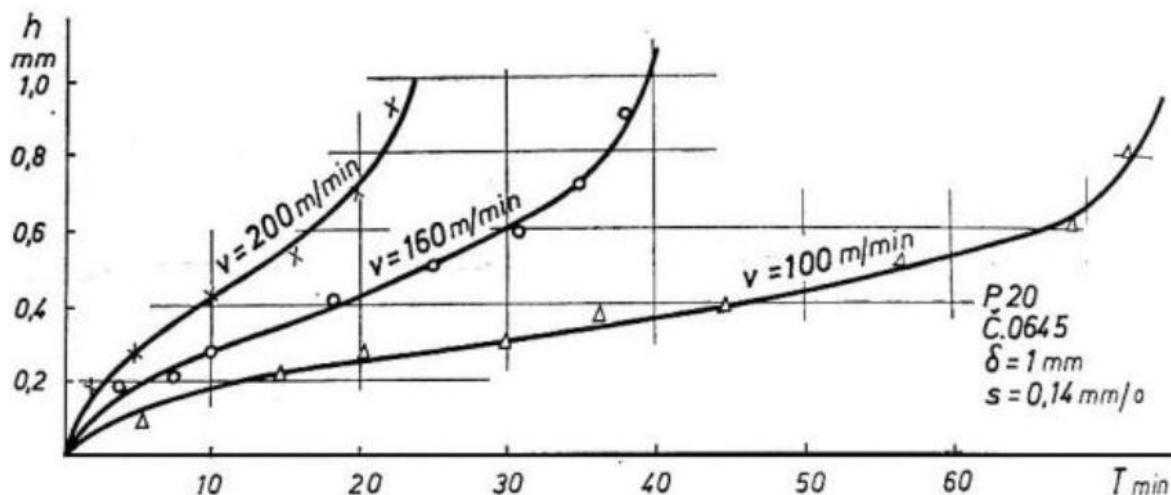
Glavni mehanizam trošenja je tribokorozija. Pod utjecajem visokih temperatura i kisika formira se krhki oksidacijski sloj. Njegovo periodičko formiranje i uništavanje ima za posljedicu trošenje materijala. Karakteristična područja adhezijskog, abrazivnog, difuzijskog i oksidacijskog trošenja alata kod tokarenja prikazana su na slici 3.15.

Sposobnost obrade alata najviše se smanjuje zbog trošenja stražnje površine, pa se širina pojasa trošenja na stražnjoj površini često koristi kao kriterij trošenja. Kada širina pojasa trošenja dosegne određene dimenzije, potrebno je zamijeniti alat. Npr. kod obrade tokarenjem, potrebno je zamijeniti alat kada pojas trošenja dosegne 0,2 do 1 mm, ovisno o traženoj hrapavosti površine. Niz faktora utječe na iznos trošenja kao što su parametri obrade, materijal obratka, sredstva za hlađenje i podmazivanje, geometrija i materijal alata. Trošenje je intenzivno u početnom periodu obrade odvajanjem čestica. Kada se formira pojas trošenja određene širine,

iznos trošenja je nizak, sve dok ne počne period trošenja u kojem iznos trošenja jako brzo raste. Ovakav tijek trošenja prikazan je na slici 3.16 na primjeru alata za tokarenje.



Slika 3.15 Karakteristična područja trošenja na alatu za tokarenje. [20.]



Slika 3.16 Trošenje stražnje površine alata za tokarenje ( $h$ ) u ovisnosti o vremenu obrade ( $T$ ) za različite brzine rezanja. [20.]

Trošenje alata kod većine procesa obrade odvajanjem čestica (tokarenje, bušenje, glodanje itd.) može se prikazati krivuljama trošenja prema slici 3.16. Iznos trošenja se u početnom periodu kao funkcija vremena mijenja približno po zakonu parabole, te najviše ovisi o materijalu obratka, materijalu alata, parametrima rezanja i kvaliteti sredstva za hlađenje i podmazivanje. Nakon toga slijedi period u kojem je promjena iznosa trošenja približno konstantna, sve do perioda kada se iznos trošenja naglo poveća, te je alat potrebno zamijeniti.

### 3.4. Mjere za smanjenje trošenje alata za obradu odvajanjem čestica

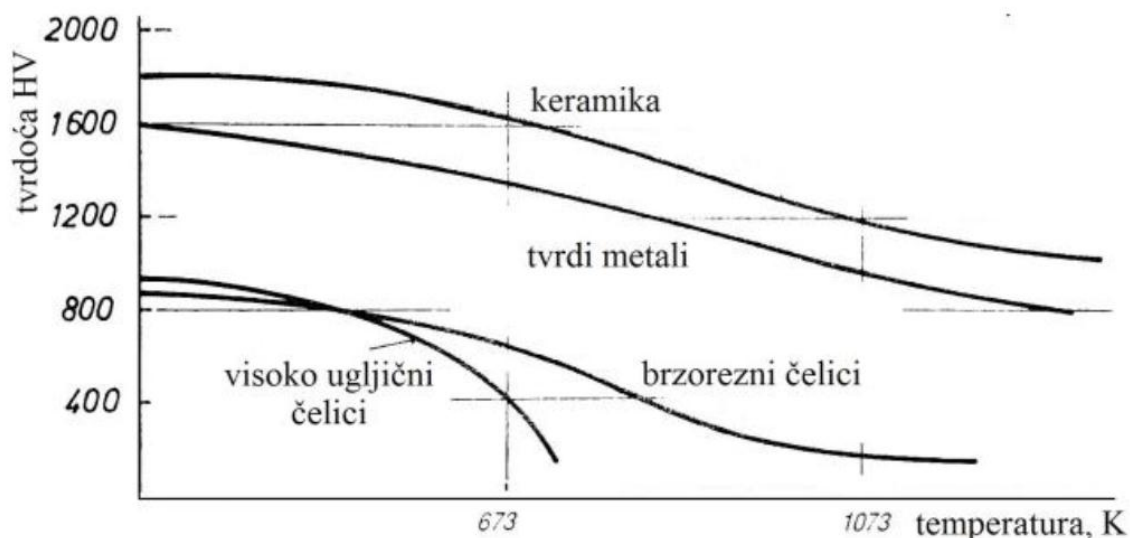
Općenito, intenzitet trošenja može se odrediti tijekom procesa obrade mjerljivim veličinama kao što su sila trenja, buka, vibracije i temperatura, ili se može mjeriti spektrografskom analizom ulja, magnetskim detektorom čestica, radioaktivnim metodama ili ferografijom. Glavne mjere za smanjenje trošenja su:

- konstrukcijske mjere;
- pravilan izbor materijala tribosustava (izbor materijala ovisno o mehanizmu trošenja);
- zaštita površine materijala (promjena strukture površine da bi se povećala otpornost određenom mehanizmu trošenja);
- period uhodavanja (period prilagođavanja dodirnih površina);
- podmazivanje (smanjivanje trenja i trošenja nanoseći sredstva za podmazivanje)

Gore navedene tribološke mjere koriste se kako bi se snizilo trošenje alata za obradu odvajanjem čestica. Faktori koji najviše utječu na vijek trajanja alata su materijal alata, zaštitni sloj površine, hlađenje i podmazivanje.

### 3.5. Hlađenje i podmazivanje

Tvrdoća alata smanjuje se na povišenim temperaturama (slika 3.17), što dovodi do bržeg razvoja triboloških procesa i kraćeg vijeka trajanja, što povećava troškove proizvodnje.



Slika 3.17 Tvrdoća alata za obradu odvajanjem čestica u ovisnosti o temperaturi. [20.]

Glavna svrha sredstava za hlađenje i podmazivanje je odvođenje topline razvijene u zoni rezanja i smanjenje trenja između alata i obratka. Sredstva za podmazivanje smanjuju trenje do 80%. Omogućuju visoke brzine rezanja i malu otpornost rezanju sa zadovoljavajućim vijekom trajanja alata i traženom kvalitetom površine.

Uljne emulzije su mješavine vode, mineralnog ulja i emulgatora. Emulzije s mnogo emulgatora prikladne su za obradu brušenjem, gdje je ulje raspoređeno u malim kapljicama. Uljne emulzije obično sadrže EP aditive (extreme pressure tj. ekstremni talkovi), koji sadrže produkte na bazi sumpora, klora i fosfora, koji omogućuju izvrsna podmazujuća svojstva.

Kemijska sredstva su mješavine vode i koncentrata s raznim aditivima odabranim ovisno o uvjetima eksploatacije. Nastala su iz interesa za razvojem sredstava koja ne sadrže mineralna ulja. Ovakvim sredstvima uglavnom se dodaju aditivi kako bi se smanjila površinska napetost vode, te se mogu dodati i aditivi na bazi sumpora, klora ili fosfora za poboljšavanje svojstava podmazivanja. Prema namjeni dijele se u dvije grupe:

#### **Sintetička sredstva za hlađenje i podmazivanje namijenjena brušenju;**

Sadrže aditive koji pružaju zaštitu od korozije. U slučaju brušenja s velikim presjekom odvojenih čestica koriste se i elementi koji daju i podmazujuća svojstva. Sredstva ostaju prozorna duže vrijeme što olakšava praćenje procesa obrade.

#### **Sintetička sredstva namijenjena tokarenju, glodanju, bušenju i sl.**

Imaju široku primjenu. Odnos vode i sintetičkih sredstava ovisi o vrsti proizvodne operacije i o vrsti materijala predmeta obrade (najčešće 20:1 i 40:1). Postoje i polukemijska sredstva, koja predstavljaju kombinaciju uljnih emulzija i kemijskih sredstava. Ovakva sredstva sadrže manju količinu ulja (10-45%) i veći sadržaj emulgatora sa ciljem smanjenja kapljica i poboljšanja eksploatacijskih karakteristika. Komponente koje se najčešće dodaju u proizvodnji uljnih emulzija i kemijskih sredstava su:

- emulgatori (omogućuju kvalitetno miješanje vode i ulja);
- antioksidanti i inhibitori korozije (sprječavaju oksidaciju i koroziju metalnih površina);
- antipjenušavci (sprječavaju nastanak pjene tijekom obrade);
- EP aditivi (poboljšanje podmazujućih svojstava);
- baktericidi (sprječavaju nastanak svih mikroorganizama štetnih za zdravlje radnika).

Emulzije i kemijska sredstva za hlađenje i podmazivanje koriste se kod proizvodnih operacija u kojima su brzine rezanja velike a pritisci na kontaktnim površinama mali. Kod ovakvih procesa razvija se velika količina topline, te je potrebno njezino brzo odvođenje. U proizvodnim operacijama u kojima se javljaju visoki pritisci na kontaktnim površinama između alata i obratka, te manja količina topline, više se koriste rezna ulja. Rezna ulja su mineralna ulja sa ili bez aditiva koja ne sadrže vodu.

U ovu grupu spadaju:

### **Mineralna ulja**

Naftni derivati bez aditiva pogodni za obradu mekog čelika, bakra i lakih legura. Mineralna ulja su antikorozivna i stabilna te ako se ne prljaju mogu se koristiti neograničeno. Preporučuju se na radnim mjestima na kojima ulje dolazi u dodir sa kožom radnika.

### **Masna ulja**

Najčešće sadrže životinjske masti i ulje od repice. Izvrsna podmazujuća svojstva ali su druge karakteristike skromne. Rijetko se upotrebljavaju zbog skupe proizvodnje. Neprijatan miris i stvaranje dima čine ih neupotrebljivim u suvremenoj proizvodnji.

### **Mješavine mineralnih ulja**

Mješavine mineralnih ulja s masnim uljima poboljšaju kvalitetu obrađenih površina obratka od mekog čelika, bakra, mjedi i aluminija. Posebno su pogodna pri obradi tvrde bronce. Mineralna ulja miješaju se i sa EP aditivima te se u kombinaciji masnim uljima postižu različita svojstva (uljni film s niskim naprežanjem na smicanje, pogodnost za obradu tvrdih metala, dobra svojstva podmazivanja, dug vijek trajanja alata i sl.).

## 4. PLANIRANJE TESTIRANJA

### 4.1. Uvod u testiranje

Mnogo je istraživanja izvedeno kako bi se postiglo bolje razumijevanje fenomena, koji se pojavljuju u procesu obrade prekinutim rezanjem koje svaki zub obavlja. Osim toga, mnogo je napora učinjeno kako bi se istražio odnos između brzine rezanja i trošenja alata. Kad brzina rezanja varira, mogu se pojaviti dva različita stanja.

Ako brzina rezanja varira proporcionalno s posmakom, posmak po zubu ostaje konstantan. Ako se brzine ne mijenju istodobno, tada se posmak po zubu smanjuje, dok se brzina rezanja povećava. Zato je potrebno provjeriti ima li brzina rezanja utjecaj na habanje alata i vijek trajanja alata neovisno o brzini posmaka. Osim toga, također je važno provjeriti kako svi ti parametri utječu na hrapavost površine obratka. Glavni cilj završnog rada je odgovoriti na ova pitanja. Za svaki dio testiranja će se koristiti novo glodalo, kako bi se točno mogao odrediti utjecaj. Karakteristike materijala koji će se koristiti za ispitivanje obrade dan je u tablici 4.1.

*Tablica 4.1 Materijal za test*

Vrsta čelika	EN standard	A-test standard	EN standard	DIN standard	Vrsta čelika	W.nr. standard
S235JR+AR	10025-2	10204 2.2/3.1	10029/10051	17100	St 37-2	1.0037

## 4.2. Regresijska analiza

Regresijska analiza je statistički postupak za procjenu odnosa među varijablama. Cilj istraživanja odnosa među varijablama je utvrditi statističku ovisnost i pokazatelje jakosti takve ovisnosti [3]. Odnosi među pojavama mogu biti funkcionalni (deterministički) i statistički (stohastički):

- Funkcionalni ili deterministički odnosi su postojani, izražavaju zakonitosti koje se iskazuju analitički (formulom, jednažbom). Svakoj vrijednosti jedne pojave odgovara točno određena vrijednost druge pojave.

$$Y = f(X) \quad (4.1)$$

- Statistički ili stohastički odnosi slabiji su od funkcionalnih. Jednoj vrijednosti jedne pojave odgovara više različitih vrijednosti druge pojave. Takva odstupanja su u praksi češća.

$$Y = f(X) + e \quad (4.2)$$

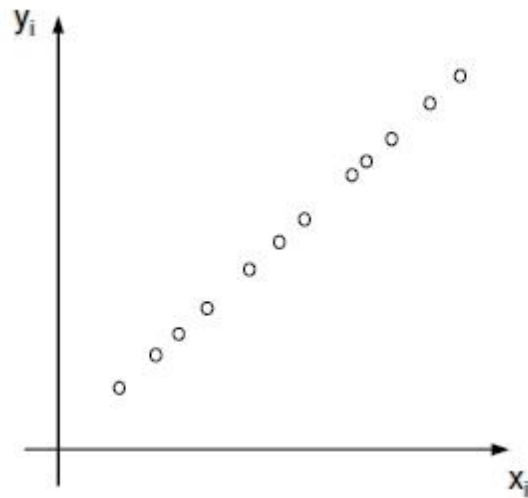
$f(X)$  - funkcionalna (deterministička) komponenta

$e$  - stohastička varijabla koja predodžuje nesistematske utjecaje na zavisnu varijablu.



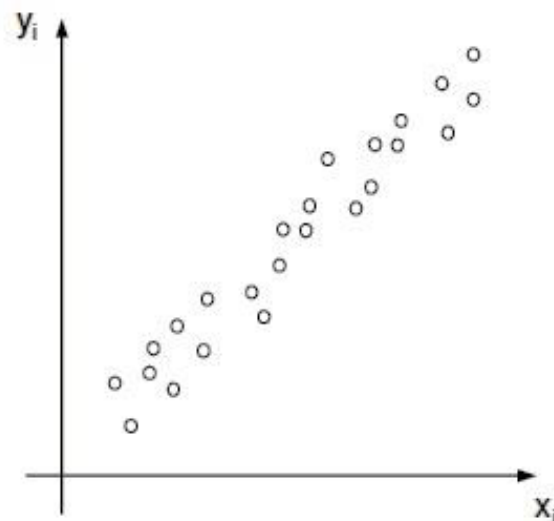
Dijagram rasipanja u pravokutnom koordinatnom sustavu točkama prikazuje parove vrijednosti dviju promatranih numeričkih varijabli. U sljedećim slikama prikazane su različite veze dviju promatranih numeričkih varijabli.

a) pozitivna funkcionalna veza



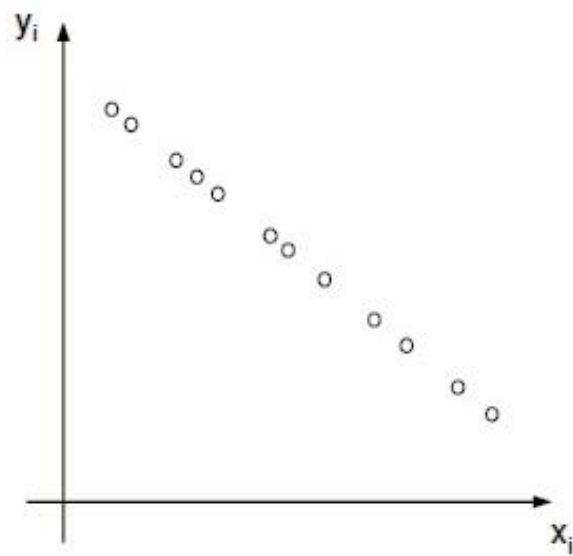
*Slika 4.1 Pozitivna funkcionalna veza [3.]*

b) Pozitivna statistička veza



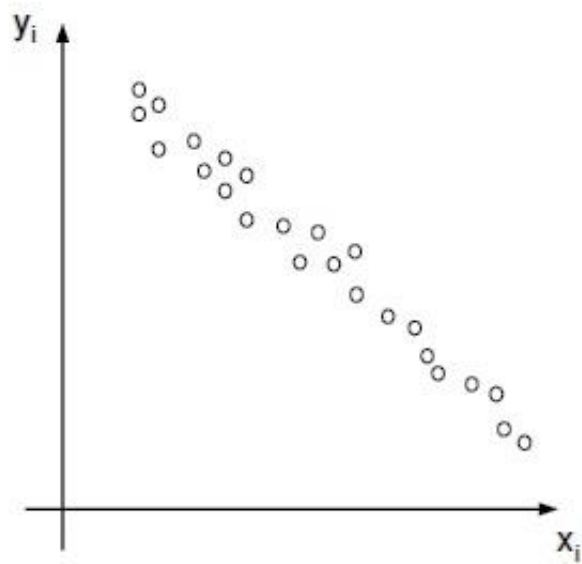
*Slika 4.2 Pozitivna statistička veza [3.]*

c) Negativna funkcionalna veza



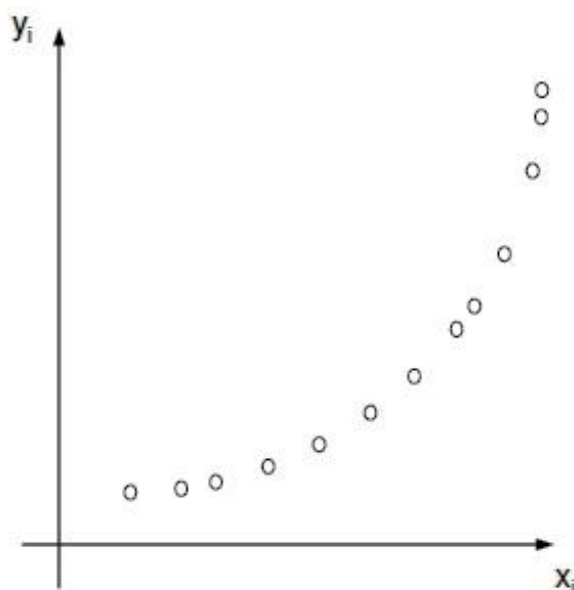
*Slika 4.3 Negativna funkcionalna veza [3.]*

d) Negativna statistička veza



*Slika 4.4 Negativna statistička veza [3.]*

e) Pozitivna funkcionalna krivolinijska veza



Slika 4.5 Pozitivna funkcionalna krivolinijska veza [3.]

Regresijska analiza uključuje mnoge tehnike za modeliranje i analizu varijabli, gdje se fokus stavlja na odnosu između zavisne varijable i jedne ili više nezavisnih varijabli [15.]. Konkretnije, regresijska analiza pomaže razumjeti kako se mijenja vrijednost zavisne varijable kada bilo koja nezavisna varijabla varira, dok su ostale nezavisne varijable fiksne. Najčešće, regresijska analiza procjenjuje uvjetno očekivanje zavisne varijable s obzirom na nezavisne varijable - to jest, prosječnu vrijednost zavisne varijable kada su nezavisne varijable fiksne. Ciljana procjena je funkcija nezavisnih varijabli, odnosno regresijska funkcija. U regresijskoj analizi važno je karakterizirati varijacije zavisne varijable oko regresijske funkcije, a to se može opisati pomoću distribucije vjerojatnosti.

Regresijska analiza često se koristi za predviđanje i prognoziranje. Također se koristi za razumijevanje odnosa nezavisnih i zavisnih varijabli i istraživanje oblika tih odnosa. U određenim okolnostima, regresijska analiza može se koristiti za zaključivanje uzročnih odnosa između nezavisnih i zavisnih varijabli. Međutim, to može dovesti do pogrešnih ili lažnih odnosa iz razloga što korelacija ne podrazumijeva uzročnost, tako da je poželjan oprez.

Razvijene su mnoge tehnike regresijske analize kao što su jednostavna, višestruka, linearna i nelinearna. Najpoznatije metode su linearna regresija i metoda najmanjih kvadrata, gdje se regresijska funkcija definira preko konačnog broja nepoznatih parametara, koji se procjenjuju na temelju podataka.

### 4.3. Obradni centar

Za testiranje glodala koristio se obradni centar Haas VF 2SS (slika 4.6), sa karakteristikama prikazanim u tablici 4.2.

Tablica 4.2 Specifikacije obradnog centra [14.]

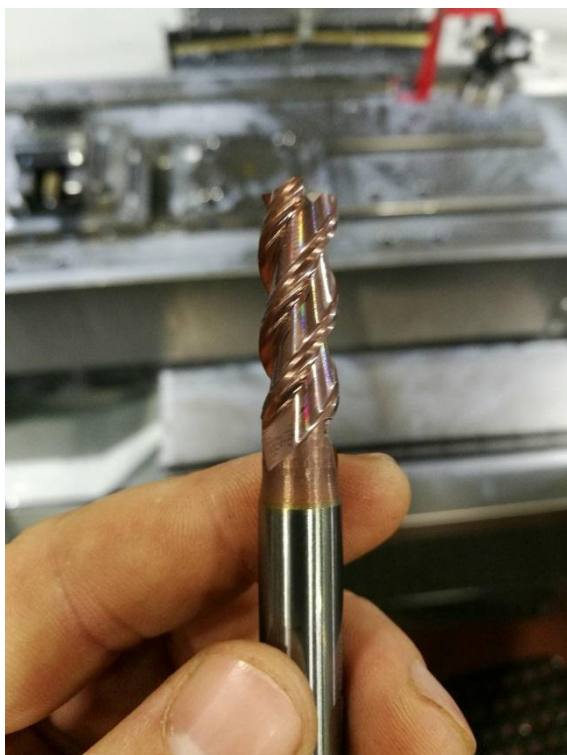
HOD	METRIC	RADNI STOL	METRIC	VRETENO	METRIC	POSMACI	METRIC	IZMJENJIVAC ALATA	METRIC
X Os	762 mm	Dužina	914 mm	Snaga vretena	22.4 kW	Posmak po X	35.6 m/min	Tip	SMTC
Y Os	406 mm	Širina	356 mm	Max brzina	12000 rpm	Posmak po Y	35.6 m/min	Kapacitet	24+1
Z Os	508 mm	Širina utora za alat	16 mm	Max moment	122 Nm @ 2000 rpm	Posmak po Z	35.6 m/min	Max promjer alata	127 mm
Udaljenost vretena od stola (~ max)	610 mm	Udaljenost centra od širine utora za alat	125.0 mm	Konus	CT or BT 40	Max radni	21.2 m/min	Max promjer alata (pun)	76 mm
Udaljenost vretena od stola (~ min)	102 mm	Maksimalna težina na stolu stroja	680 kg	Podmazivanje ležajeva	Air/Oil Injection			Max dužina alata	279 mm
				Hladenje	Hladenje tekućinom			Max težina alata	5 kg



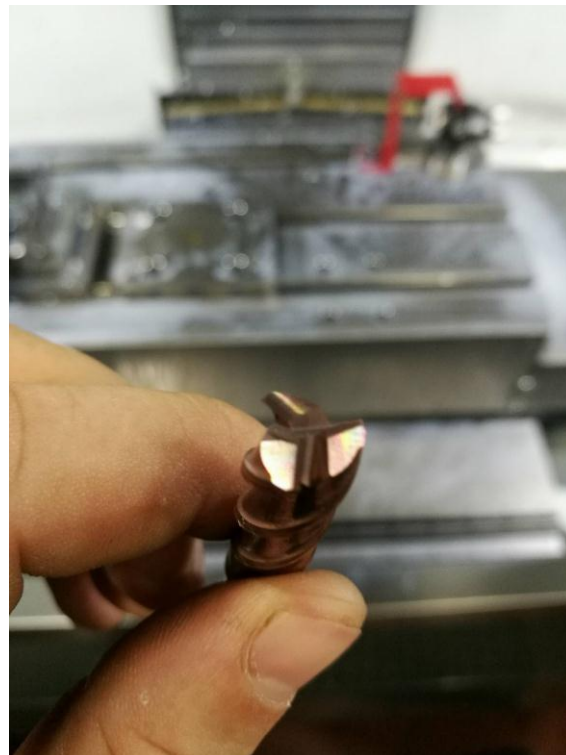
Slika 4.6 Obradni centar Haas VF2 SS [14.]

#### 4.4. Alat

Za testiranje se koristilo troperno glodalo  $\varnothing 10$  proizvođača OSAWA, koje je preporučeno za materijal koji se obrađuje. Glodalo je za visoke brzine i stope uklanjanja metala, dublje rezove i poboljšanu površinsku obradu. Prevlaka UH nano micrograin omogućuje visoke brzine suhe obrade kaljenog čelika, tvrdoće do 70 HRC.



*Slika 4.7 Troperno glodalo*



*Slika 4.8 Čeona strana glodala*

#### 4.5. Uređaj za mjerenje hrapavosti

Ovaj instrument služi za određivanje i dokumentiranje najčešćih parametara prema DIN EN ISO / AMSE / prEN 10049 ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  i  $R_{Pc}$ ) i prema JIS japanskom standardu ( $R_z$ ,  $R_a$ ). Uz minimalne tipke, Perthometer M1 karakterizira mnoštvo funkcija. Automatska funkcija omogućava prepoznavanje periodičkih i aperiodnih profila, a graničnik se postavlja prema standardima bez bilo kakvog testnog mjerenja, tako da se isključe nenamjerna nestandardna mjerenja.

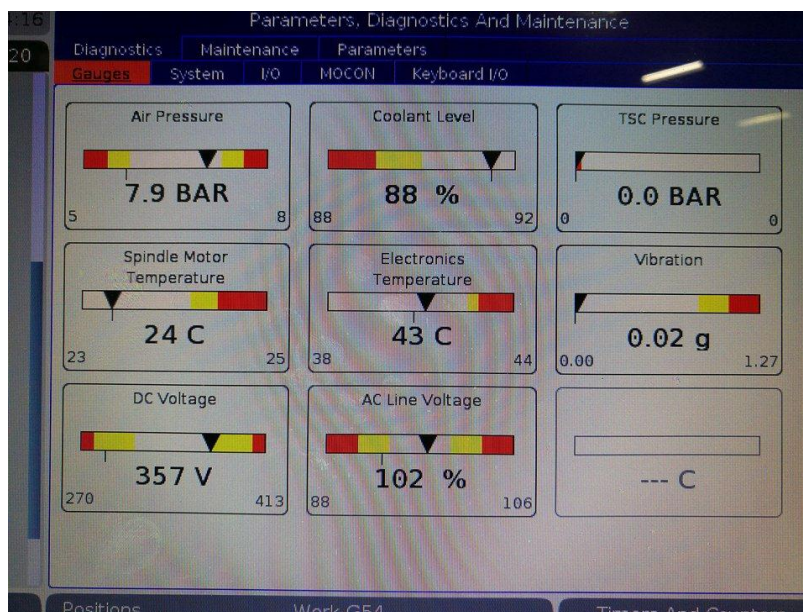
U mobilnoj se uporabi mjerni zapis može automatski izlaziti na ugrađenom termičkom pisaču ili jednostavno pritiskom na tipku. Stacionarni rad nudi mogućnost spajanja Perthometra izravno na računalo putem serijskog sučelja.



*Slika.4.9 Uređaj za mjerenje hrapavosti korišten u testiranju.*

## 4.6. Vibracije Grms

Obradni centar koji se koristio mjeri vibracije koje se kasnije koriste kao izlazni rezultat u testiranju glodala, a to su efektivne vrijednosti signala vibracija RMS.

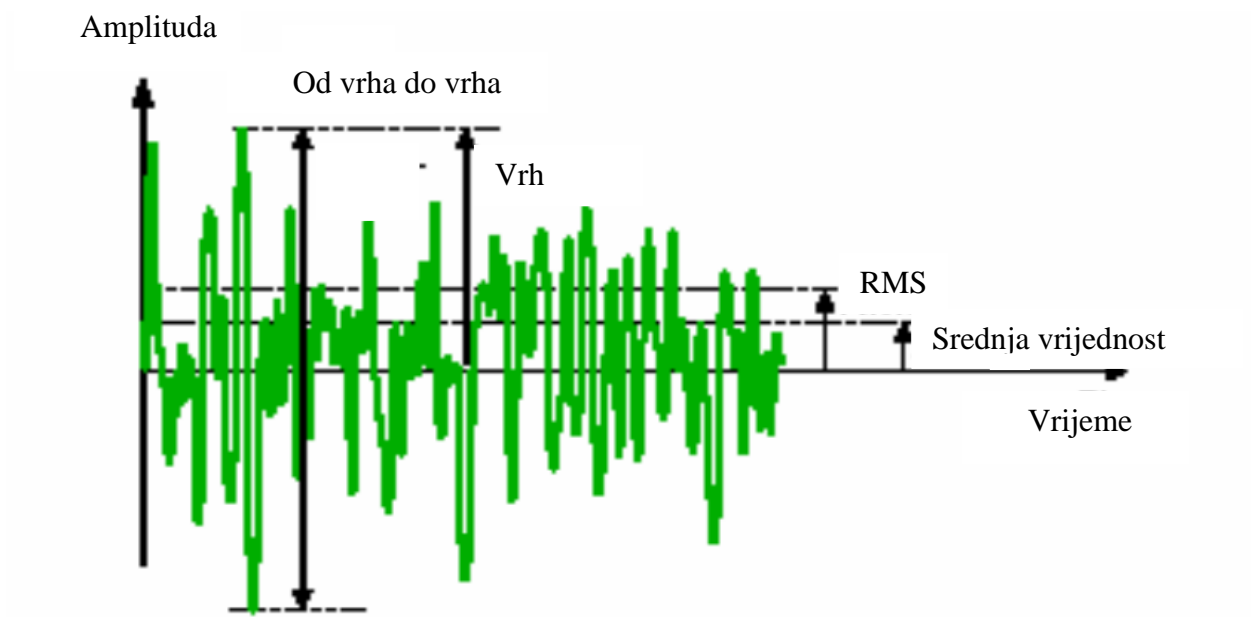


Slika 4.10 Sučelje obradnog centra

Amplituda pomaka ubrzanja je veličina koja ukazuje na ozbiljnost vibracije i može se iskazati različitim vrijednostima. Vrijednost amplitude od vrha do vrha indicira maksimalne amplitude signala koji opisuje vibraciju. Ovaj parametar je koristan u situacijama kada je vibracijsko pomicanje dijelova stroja značajno sa stanovišta maksimalnih naprezanja ili zamora materijala u mehaničkom sistemu. Najviša vrijednost amplitude ( $A_z$ ) je parametar naročito koristan za izražavanje nivoa kratkotrajnih udarnih vibracija. Ovaj parametar iskazuje samo maksimalnu vrijednost amplitude, dok u obzir ne uzima vremensku povijest signala. Srednja vrijednost ( $A_{sr}$ ) je parametar koji uzima u obzir vremensku povijest signala. Upotreba ovog parametra je ograničene praktične vrijednosti, jer nema direktne korelacije sa nekom fizičkom veličinom. Efektivna vrijednost signala  $A_{ef}$ , najvažnija je mjera amplitude vibracije zbog toga što uzima u obzir vremensku povijest signala. Na taj način ovaj parametar daje amplitudi signala vrijednost koja je direktno povezana sa energetske sadržajem signala, tj. destruktivnom sposobnosti date vibracije. Takav podatak ne pruža dovoljno mogućnosti za bilo kakvu dijagnostiku, za šta je potrebno mnogo više parametara, prije svega frekvencijski spektar. Za harmonijski periodični signal važe relacije:

$$A_{ef} = \frac{A_z}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} A_{sr} \quad (4.3)$$

Prikazane veličine koje opisuju vremenski signal ne odnose se samo na jednostavan sinusoidni signal, nego na sve uobičajene vibracijske signale koji se mogu dobiti na stroju, a koji su sastavljeni od mnogo sinusoidnih komponenata. Mjerenje gRMS-a obično se koristi za određivanje i usporedbu energije u učestalim visokim vibracijama. Važno je razumjeti kako se mjerenje izvelo, a i razumjeti njegova ograničenja, kako bi se mogao učinkovito iskoristiti.



Slika 4.11 Varijacije vibracija kroz vrijeme [3]

Što je gRMS?

Sustavi ponavljajućih udarnih vibracija (RS) proizvode kontinuirano promjenjivi pseudoslučajni široki spektar vibracija. Tipičan signal u realnom vremenu iz akcelerometra vidljiv na tablici RS prikazan je na slici 4.11. Korijen srednje vrijednosti kvadrata (RMS) ovog signala može se izračunati kvadratom veličine signala u svakoj točki, kao i utvrđivanje prosječne (srednje) vrijednosti kvadratne veličine, a zatim uzimanje kvadratnog korijena prosječne vrijednosti. Rezultantni broj je gRMS metrički.



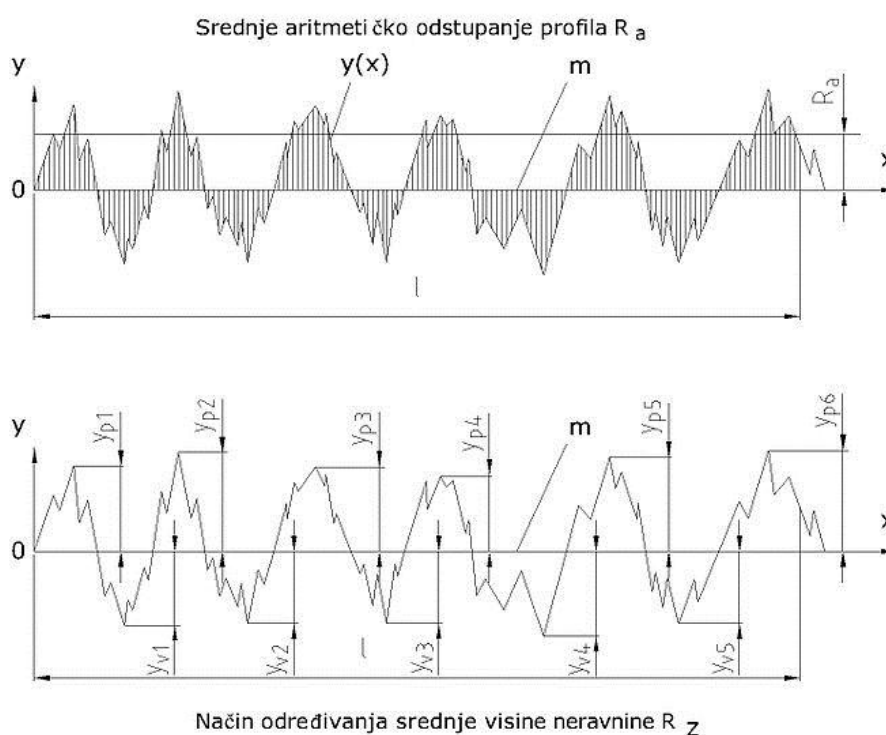
Kada se pogleda spektar snage tipičnog vibracijskog signala (slika 4.11.), jedna stvar koja može biti zbunjujuća su jedinice Y osi. Za spektar snage, jedinice su prikazane kao  $g^2/Hz$  ili češće  $gRMS^2/Hz$ . U ovom slučaju, "RMS" se ne odnosi na izračun RMS u gore opisanom vremenskom razdoblju. Umjesto toga, to je indikacija mjerenja koja se koristi za sinusoidalne komponente predstavljene u Fourierovoj transformaciji.

Fourierova transformacija signala pokazuje frekvenciju i amplitudu sinusnih valova koji bi, kada su zbrojeni, formirali signal vremenske domene. Ako se amplituda tih sinusnih valova mjeri kao vrijednost RMS, onda su rezultirajuće jedinice Y osovine za spektar snage u frekvencijskoj domeni  $gRMS^2/Hz$ . Definicija spektra snage zahtijeva da jedinice budu u ovom obliku. Neke analize spektra omogućuju odabir jedinica Y-osi koje uključuju  $gRMS^2/Hz$ ,  $gPEAK^2/Hz$  i sl. Jedine jedinice koje rezultiraju spektrom snage (i stoga se mogu koristiti za izravno izračunavanje gRMS kao što je gore opisano) su  $gRMS^2/Hz$ . [14.]

## 4.7. Hrapavost

Hrapavost površine je u općem smislu mikrogeometrijska nepravilnost površine, koja nastaje tijekom postupaka obrade ili drugih utjecaja. Hrapavost površine u određenim slučajevima bitno utječe na radna svojstva strojnih dijelova, posebno na mjestima međusobnog spoja pojedinih elemenata (trenje, zračnost, podmazivanje). Općenito, strojni dijelovi s manjom hrapavošću imaju veću dinamičku čvrstoću, veću otpornost na koroziju, veću sposobnost nalijeganja, bolje prenose toplinu itd. Kako je postizanje niskog stupnja hrapavosti uvijek povezano s duljim i skupljim postupcima obrade, ono ima za posljedicu povećanje cijene strojnog dijela.

Veličina hrapavosti obično se mjeri obzirom na srednju referentnu crtu profila neravnine  $m$ , koja dijeli profil tako, da je unutar mjerne duljine  $l$  veličina svih kvadrata odstupanja profila od te crte najmanja. Mjerna duljina  $l$  ovisna je o vrsti i kvaliteti obrade, te o metodi mjerenja. Parametri hrapavosti određeni su standardom DIN 4762, a neki od njih i starijim



### PROCJENJIVANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE

Slika 4.14 Procjenjivanje hrapavosti površine [17]

standardima HRN M.A1.020 i 021 i DIN 4768. Za procjenjivanje hrapavosti površine u strojarskoj praksi najčešće se upotrebljava srednje aritmetičko odstupanje profila  $R_a$ , koje je

jednako srednjoj aritmetičkoj vrijednosti apsolutnih vrijednosti visine profila neravnina na mjernoj duljini  $l$ .

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |y_i| \quad (4.5)$$

gdje je:  $R_a$ ,  $\mu\text{m}$  - srednje aritmetičko odstupanje profila,  $l, \mu\text{m}$  - mjerina duljina hrapavosti površine,  $y(x)$ ,  $y_i$ ,  $\mu\text{m}$  - visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu crtu,  $n$ -broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine.

Kao parametar hrapavosti često se upotrebljava srednja visina neravnina  $R_z$ , koja je jednaka zbroju aritmetičke sredine apsolutnih vrijednosti visine pet najviših vrhova i aritmetičke sredine apsolutnih vrijednosti pet najvećih dubina udolina na mjernoj duljini  $l$ .

$$R_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (4.6)$$

gdje je:  $R_z$ ,  $\mu\text{m}$  - srednja visina neravnina,  $y_i, \mu\text{m}$  - visina  $i$ -tog najvišeg vrha,  $n$  - broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine. Približno vrijedi  $R_z \sim 4 \cdot R_a$ .

Važan parametar hrapavosti jest i najveća visina profila  $R_y$ , koja je definirana kao udaljenost između dva pravca paralelna sa srednjom linijom profila, povučeni tako da u granicama mjerne duljine dodiruju najvišu, odnosno najnižu točku profila. Ovaj parametar jednak je parametru  $R_{\text{max}}$  (najveća visina neravnina) definiranom HRN standardom. Približno je  $R_{\text{max}} = 6,4 \cdot R_a$ .

Prema standardu HRN M.A0.065 i DIN ISO 1302, hrapavosti tehničkih površina su podijeljene u 12 stupnjeva, ovisno o najvećoj vrijednosti srednjeg aritmetičkog odstupanja  $R_a$  (tablica 4.3.). U istoj su tablici, radi mogućnosti usporedbe, navedeni su i razredi hrapavosti, koji se još mogu naći u starijoj literaturi i crtežima.

Tablica 4.3 Stupnjevi i razred hrapavosti površina strojnih dijelova pri različitim obradama.[17.]

Stupanj hrapavosti		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12		
Razred hrapavosti		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]		0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]		0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	200	400
Ručna obrada	grubo turpijanje														
	fino turpijanje														
Lijevanje	u pijesku														
	u kokili														
Kovanje	toplo, slobodno														
	toplo, u ukovnju														
	hladno, u ukovnju														
Valjanje	toplo														
	hladno														
Pjeskarenje															
Tokarenje	grubo														
	fino														
Blanjanje	grubo														
	fino														
Provlačenje	grubo														
	fino														
Glodanje	grubo														
	fino														
Bušenje															
Razvrtavanje															
Brušenje	grubo														
	fino														
Poliranje	mehaničko														
	električno														
Honanje, lepanje															
Superfinaš															

## 5. IZVOĐENJE EKSPERIMENTA

Za eksperiment trošenja alata koristilo se 8 različitih kombinacija parametara. Mijenjali su se posmak po zubu, brzina rezanja i dubina glodanja. Svaki od tih parametara korišten je četiri puta, tablica 5.1. Glodanje će se vršiti istosmjerno i linearno. Radijalna dubina ( $a_e$ ) u cijelom testiranju je 2 mm.

Tablica 5.1 Ulazni parametri

Redni br.	Ulazni parametri			n ( $\text{min}^{-1}$ )
	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/zub)	$a_p$ (mm)	
1	85	0.12	11	2706
2	115	0.12	11	3661
3	85	0.18	11	2706
4	115	0.18	11	3661
5	85	0.12	14	2706
6	115	0.12	14	3661
7	85	0.18	14	2706
8	115	0.18	14	3661

Korišteni ulazni parametri za test br. 1 alata su:  $v_c = 85$  m/min,  $f = 0.12$  mm/zub i  $a_p = 11$  mm. Rezultati testiranja prikazani su u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Izmjerene i očitane vrijednosti 1. testa

BR. PROLAZA	VIBRACIJE ( $\text{gRMS}^2/\text{Hz}$ )	HRAPAVOST BOČNO (Ra)	HRAPAVOST DNA (Ra)
2	0.09	0.544	1.694
4	0.09	0.973	
6	0.1	1.015	
8	0.11	1.238	
10	0.12	1.339	

Korišteni ulazni parametri za test br. 2 alata su:  $v_c = 115$  m/min,  $f = 0.12$  mm/zub,  $a_p = 11$  mm. Rezultati testiranja prikazani su u tablici 5.3.

Tablica 5.3 Izmjerene i očitane vrijednosti 2. testa

BR. PROLAZA	VIBRACIJE ( $\text{gRMS}^2/\text{Hz}$ )	HRAPAVOST BOČNO (Ra)	HRAPAVOST DNA (Ra)
2	0.03	1.060	1.699
4	0.03	1.257	
6	0.04	1.439	
8	0.04	1.501	
10	0.04	1.538	

Korišteni ulazni parametri za test br. 3 alata su:  $v_c = 85$  m/min ,  $f = 0.18$  mm/zub,  $a_p = 11$  mm.

Rezultati testiranja prikazani su u tablici 5.4.

*Tablica 5.4. Izmjerene i očitane vrijednosti 3. testa*

BR. PROLAZA	VIBRACIJE (gRMS <sup>2</sup> /Hz)	HRAPAVOST BOČNO (Ra)	HRAPAVOST DNA (Ra)
2	0.07	1.905	2.947
4	0.07	1.395	
6	0.07	1.488	
8	0.08	1.511	
10	0.08	1.827	

Korišteni ulazni parametri za test br. 4 alata su:  $v_c = 115$  m/min ,  $f = 0.18$  mm/zub,  $a_p = 11$  mm.

Rezultati testiranja prikazani su u tablici 5.5.

*Tablica 5.5. Izmjerene i očitane vrijednosti 4. testa*

BR. PROLAZA	VIBRACIJE (gRMS <sup>2</sup> /Hz)	HRAPAVOST BOČNO (Ra)	HRAPAVOST DNA (Ra)
2	0.07	2.032	2.947
4	0.07	1.974	
6	0.07	1.762	
8	0.08	1.369	
10	0.09	1.226	



*Slika 5.1 Sirovac na kojem je rađen test*

Kod mijenjanja dubine glodanja nije dolazilo do većih razlika kod mjerenja vibracija i hrapavosti završne površine. Za daljnju analizu koristile su se srednje izlazne vrijednosti, prikazane u tablici 5.6.

*Tablica 5.6 Ulazni parametri i srednje izlazne vrijednosti.*

ANALIZA BR.	Ulazni parametri			Srednje izlazne vrijednosti	
	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/zub)	$a_p$ (mm)	$R_a$	VIBRACIJE (gRMS <sup>2</sup> /Hz)
1	85	0,12	11	1,022	0,102
2	115	0,12	11	1,359	0,036
3	85	0,18	11	1,625	0,074
4	115	0,18	11	1,673	0,076
5	85	0,12	14	1,058	0,113
6	115	0,12	14	1,386	0,039
7	85	0,18	14	1,674	0,076
8	115	0,18	14	1,701	0,08

## 6. ANALIZA TESTIRANJA

Nekoliko eksperimentalnih glodanja provedeno je pod različitim režimima. U prvom dijelu eksperimenata, brzina rezanja mijenja se bez promjene brzine posmaka, što je uzrokovalo varijaciju posmaka po zubu. U drugoj fazi eksperimenata, brzina rezanja i brzina posmaka su varirale na takav način, da se posmak po zubu održava konstantnim. Pratila se brzina obrade, trošenje alata, vibracije na stroju, te površinska hrapavost obrađene površine. Tijekom testiranja zanemarena su oštećenja na glodalima nakon korištenja, jer ona nisu bila vidljiva.

Prvi dio testa pokazao je da su vibracije i hrapavost osjetno rasli, jer je hrapavost nakon 10 prolaza porasla više od 100%. Vibracije su bile osjetne tijekom cijelog testa.

U drugom dijelu se povećala brzina rezanja, s tim da je posmak po zubu ostao isti. Dakle, pri tome se dobila brža obrada, ali nekvalitetnija. Vibracije na stroju su se smanjile i bile su konstantne tijekom cijelog testa, ali je hrapavost bila veća, s tim da nije toliko narasla između prvog i zadnjeg mjerenja. Obrada po dnu je bila jednaka u prvom i drugom dijelu testa.

U trećem dijelu se povećao posmak po zubu glodala, a brzina rezanja je bila jednaka kao kod prvog testiranja. Kod prvog mjerenja uočena je najveća hrapavost. Kod prva dva prolaza vrhovi glodala su se trošili, te kad su došli do čvrstog dijela, glodalo je dalje obrađivalo s 30% manjom hrapavošću. Prema kraju testiranja hrapavost je lagano rasla.

U četvrtom dijelu povećala se brzina rezanja na onu jednaku kao u drugom dijelu testa. Rezultat vibracija je bio jednak kao i kod manje brzine rezanja, dok je hrapavost u početku bila najveća u svim mjerenjima, ali je postepeno padala sve do oko 40% manje hrapavosti od početne.

Kako bi olakšali izračun regresijskih koeficijenata, kao i kod primjera jednostavne linearne regresije izrađena je Excel tablica. Plavom bojom označene su varijable  $v_c$ ,  $f$  i  $a_p$ , koje se unose samostalno, dok su zelenom bojom označene vrijednosti izmjerene tijekom testiranja alata. U tablici 5.6 prikazani su svi potrebni podaci za višestruku linearnu regresijsku analizu.

Dobiveni rezultati mogu se usporediti sa rezultatima dobivenim pomoću programske naredbe „Data Analysis“ u programskom alatu Excel. Na slici 6.1 prikazani su rezultati s

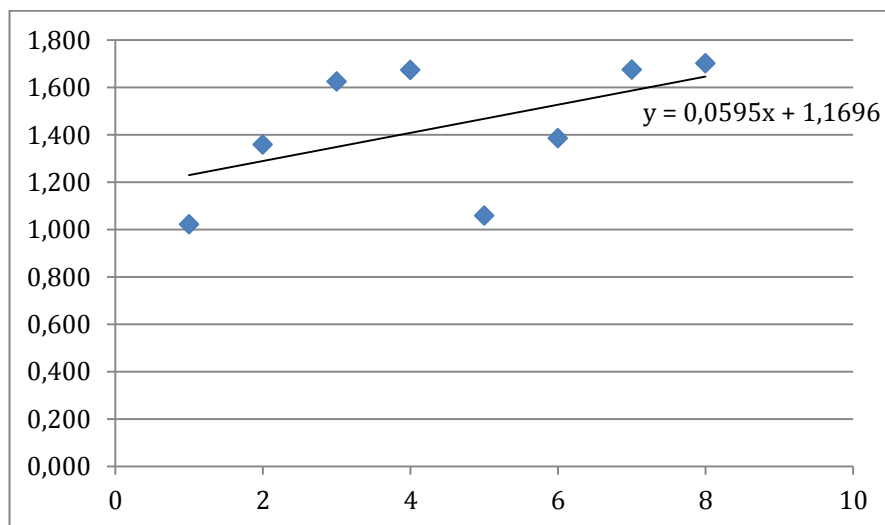


dobivenim vrijednostima hrapavosti ( $R_a$ ) pomoću programske naredbe „Data Analysis“ u programskom alatu Excel:

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0,9836							
R Square	0,9674							
Adjusted R Square	0,9430							
Standard Error	0,1916							
Observations	8							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3	4,3570	1,4523	39,5782	0,0020			
Residual	4	0,1468	0,0367					
Total	7	4,5038						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	-6,2123	0,8010	-7,7553	0,0015	-8,4363	-3,9882	-8,4363	-3,9882
vc (m/min)	0,0030	0,0045	0,6556	0,5479	-0,0096	0,0155	-0,0096	0,0155
f (mm/zub)	3,8800	2,2576	1,7187	0,1608	-2,3880	10,1480	-2,3880	10,1480
ap (mm)	0,4849	0,0452	10,7402	0,0004	0,3596	0,6103	0,3596	0,6103

*Slika 6.1 Rezultati hrapavosti ( $R_a$ ) višestruke linearne regresije dobiveni pomoću naredbe Data Analysis u programskom alatu Excel.*

Slijedeći korak u regresijskoj analizi je crtanje dijagrama rasipanja, grafičkog prikaza točaka  $T(x,y)$ . Na horizontalnoj osi ističe se dio aritmetičkog mjerila, koji obuhvaća vrijednosti varijable  $x$ , što je u našem slučaju broj glodala, a na vertikalnoj dio aritmetičkog mjerila koji obuhvaća opažene vrijednosti varijable  $y$ , u našem slučaju hrapavost.



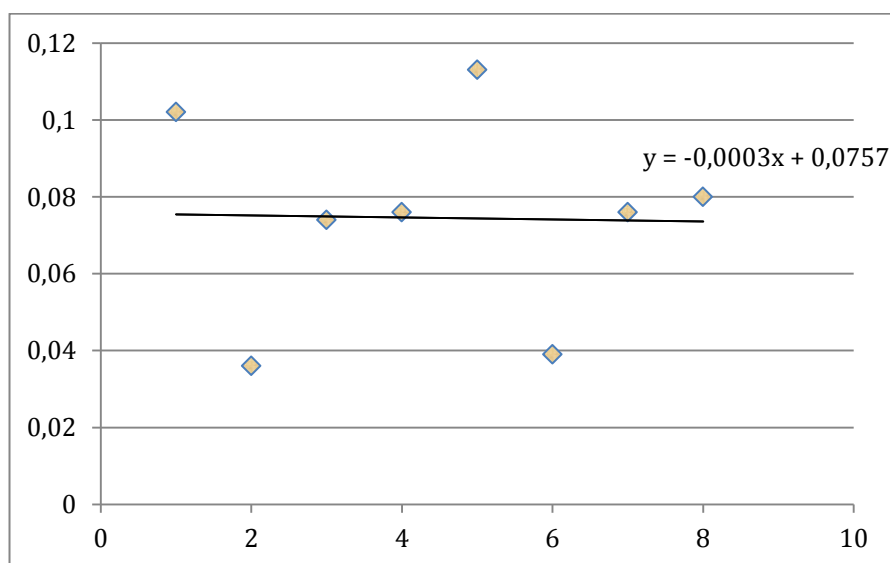
*Slika 6.2 Dijagram rasipanja kod hrapavosti.*

Na slici 6.3 prikazani su rezultati s dobivenim vrijednostima vibracija (Grms) stroja pomoću programske naredbe „Data Analysis“ u programskom alatu Excel:

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0,6810							
R Square	0,4638							
Adjusted R Square	0,0617							
Standard Error	0,0259							
Observations	8,0000							
<i>ANOVA</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	3,0000	0,0023	0,0008	1,1534	0,4301			
Residual	4,0000	0,0027	0,0007					
Total	7,0000	0,0050						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	0,1553	0,1084	1,4326	0,2253	-0,1457	0,4564	-0,1457	0,4564
vc (m/min)	-0,0011	0,0006	-1,8271	0,1417	-0,0028	0,0006	-0,0028	0,0006
f (mm/zub)	0,0667	0,3056	0,2182	0,8380	-0,7818	0,9151	-0,7818	0,9151
ap (mm)	0,0017	0,0061	0,2727	0,7986	-0,0153	0,0186	-0,0153	0,0186

Slika 6.3. Rezultati vibracija (gRMS) višestruke linearne regresije dobiveni pomoću naredbe Data Analysis u programskom alatu Excel.

Na horizontalnoj osi ističe se dio aritmetičkog mjerila koji obuhvaća vrijednosti varijable  $x$ , što je u ovom slučaju broj glodala, a na vertikalnoj dio aritmetičkog mjerila koji obuhvaća opažene vrijednosti varijable  $y$ , u našem slučaju vibracije.



Slika 6.4. Dijagram rasipanja kod vibracija.

## 7. ZAKLJUČAK

U završnom radu opisan je postupak obrade odvajanjem čestica glodanjem, te kao glavna tema ovog rada, izmjerene su visine neravnina i vibracije stroja kod određenih režima obrade, koji utječu na konačne izlazne rezultate, odnosno kvalitetu završne površine.

Na hrapavost na dnu najveći utjecaj je imao posmak po zubu glodala, te je ona kod manjeg posmaka bila manja, bez obzira na brzinu rezanja. Kod najmanje brzine rezanja i posmaka po zubu zabilježene su najveće vibracije na stroju, ali je obrada bila najbolja. Kod prve obrade je vrijeme glodanja bilo najduže. Kod svih testova obrada je bila zadovoljavajuća.

Najboljim se pokazao zadnji test, kod kojeg su usklađene kvaliteta i brzina obrade. Dakle, režimi obrade u zadnjem testu su najekonomičniji. Iz prikazanog je vidljivo da se do određene granice povećanjem brzine rezanja i posmaka po zubu glodala ne smanjuje kvaliteta obrade, ali ovisno o zahtjevima i izdržljivosti glodala kod većih serija režimi bi se trebali korigirati.

Moguća je izrada tablica i predložaka prema kojima bi se mogla približno odrediti kvaliteta površina za određeni proces obrade i sa određenim režimima obrade, bez da se prije toga moraju provoditi stvarni pokusi.

## LITERATURA

- [1.] Analog Devices, Application Note AN-256, "RMS to DC converters ease measurement tasks"
- [2.] Steinberg, Dave S., *Vibration Analysis for Electronic Equipment*, John Wiley & Sons, 1988
- [3.] Štambuk A., Biljan-August M.: *Regresijska i korelacijska analiza*, Rijeka, 2013
- [4.] W.A. Kline, R.E. Devor - *The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling*
- [5.] S. Spiewak - *An improved model of the chip thickness in milling*
- [6.] L. Zhang, L. Zheng *Prediction of cutting forces in end milling of pockets*
- [7.] Y. Yang, W.H. Zhang, M. Wan *Effect of cutter runout on process geometry and forces in peripheral milling of curved surfaces with variable curvature*
- [8.] Bjurstam, Peter. (2008). Linköping university, *Formelsamling i Produktionsteknik*. [www.iei.liu.se/indprod/grundutbildning/tmpt33/filer/1.99157/formelsamling.08.pdf](http://www.iei.liu.se/indprod/grundutbildning/tmpt33/filer/1.99157/formelsamling.08.pdf) [2015-05-11].
- [9.] Kalpakjian, Serope. (2006). *Manufacturing engineering and technology*. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall.
- [10.] Sandvik coromant, *Slicing methods*. [www.sandvik.coromant.com/engb/knowledge/milling/application\\_overview/holes\\_and\\_cavities/slicing\\_methods/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/engb/knowledge/milling/application_overview/holes_and_cavities/slicing_methods/pages/default.aspx) [2015-05-11].
- [11.] Sandvik Coromant. *Tool wear*. [www.sandvik.coromant.com/engb/knowledge/general\\_turning/troubleshooting-/tool-wear/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/engb/knowledge/general_turning/troubleshooting-/tool-wear/pages/default.aspx) [2015-05-09].
- [12.] Stephenson, David A, & Agapiou, John S. (2006). *Metal Cutting: Theory and Practice*. Estados Unidos: Taylor & Francis, pp. 504-508, 522-523.
- [13.] Bhatia, S. M.; Pandey, P. C. and Shaw, H. S., 1978, "Thermal Cracking of Carbide Tools During Intermittent Cutting, *Wear*", 51, 201-211.
- [14.] [http://int.haascnc.com/we\\_spec1.asp?intLanguageCode=1033&id=VF-2SS&sizeID=30\\_40inch\\_vmc](http://int.haascnc.com/we_spec1.asp?intLanguageCode=1033&id=VF-2SS&sizeID=30_40inch_vmc)
- [15.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Regression\\_analysis](http://en.wikipedia.org/wiki/Regression_analysis)
- [16.] <http://www.smithsonassociates.com/system/resources/W1siZiIsIjIwMTUvMDIvMDYvMjBfNDhfMTNfMTA3X0hBTFRfSEFTU19WaWJyYXRpb25fRGVteXN0aWZpZWRfU19WLnBkZiJdXQvHALT-HASS%20Vibration%20Demystified-S&V>

- [17.] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrapavost\\_povr%C5%A1ine](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrapavost_povr%C5%A1ine)
- [18.] [www.fsb.hr/kas/](http://www.fsb.hr/kas/) - obrada odvajanjem čestica
- [19.] <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:823009/FULLTEXT02>
- [20.] [https://bib.irb.hr/datoteka/651766.Zvonimir\\_Dadic\\_Triboloski\\_principi](https://bib.irb.hr/datoteka/651766.Zvonimir_Dadic_Triboloski_principi)

## POPIS SLIKA

Slika. 2.1 Protusmjerno i istosmjerno glodanje.....	4
Slika 2.2. Kut angažmana glodala drastično se povećava pri glodanju u kutu na tradicionalan način. ....	5
Slika 2.3 Na lijevoj strani je prikazano klasično glodanje, a desno dinamično. ....	6
Slika 2.4 Kružno i linearno glodanje.....	7
Slika 2.5 Linearno i kružno glodanje. ....	7
Slika 3.1. Različiti oblici glodala. ....	11
Slika 3.2 Geometrija glodala. ....	12
Slika 3.3 Dijelovi glodala.....	12
Slika 3.4 Aksijalna i radijalna dubina rezanja.....	13
Slika 3.5 Karakteristike materijala za alate.....	14
Slika 3.6 Abrazijsko trošenje. ....	16
Slika 3.7 Adhezijsko trošenje.....	16
Slika 3.8 Zamor površine. ....	17
Slika 3.9 Tribokorozija.....	17
Slika 3.10 Abrazijsko trošenje. ....	18
Slika 3.11 Adhezijsko trošenje.....	18
Slika 3.12 Pukotine na površini.....	18
Slika 3.13 Difuzijsko trošenje. ....	18
Slika 3.14 Mehanizam difuzijskog trošenja na primjeru alata od volframovog karbida. ....	19
Slika 3.15 Karakteristična područja trošenja na alatu za tokarenje.....	20
Slika 3.16 Trošenje stražnje površine alata za tokarenje (h) u ovisnosti o vremenu obrade (T) za različite brzine rezanja. ....	20
Slika 3.17 Tvrdoća alata za obradu odvajanjem čestica u ovisnosti o temperaturi.....	21
Slika 4.1 Pozitivna funkcionalna veza. ....	26
Slika 4.2 Pozitivna statička veza. ....	26
Slika 4.3 Negativna funkcionalna veza. ....	27
Slika 4.4 Negativna statička veza.....	27
Slika.4.5 Pozitivna funkcionalna krivolinijska veza. ....	28
Slika 4.6 Obradni centar Hass VF2 SS. ....	29
Slika 4.7 Troperno glodalo.....	30
Slika 4.8 Čeona strana glodala. ....	30
Slika 4.9 Uređaj za mjerenje hrapavosti korišten u testiranju.....	31
Slika 4.10 Sučelje obradnog centra. ....	32
Slika 4.11 Varijacije vibracija kroz vrijeme.....	33
Slika 4.12 Shema implicitne metode konverzije RMS-NA-DC. ....	34
Slika 4.14 Procjenjivanje hrapavosti površine. ....	35
Slika 5.1 Sirovac na kojem je rađen test. ....	39

Slika 6.1 Rezultati hrapavosti (Ra) višestruke linearne regresije dobivene pomoću naredbe Data Analysis u programskom alatu Excel.....	42
Slika 6.2 Dijagram rasipanja kod hrapavosti .....	42
Slika 6.3 Rezultati vibracija (gRMS) višestruke linearne regresije dobivene pomoću naredbe Data Analysis u programskom alatu Excel. ....	43
Slika 6.4 Dijagram rasipanje kod vibracija. ....	43

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$a_p$	[mm]	aksijalna dubina rezanja
$a_e$	[mm]	radijalna dubina rezanja
$d$	[mm]	promjer alata
$f$	[mm]	posmak
$f_z$	[mm/zub]	posmak po zubu
$n$	[o/min]	broj okretaja alata
$R$	[mm]	promjer glodala
$r$	[mm]	polumjer glodala
$v_f$	[mm/min]	posmična brzina
$v_c$	[m/min]	optimalna brzina glodanja
$l$	[mm]	mjerna duljina
$Q$	[mm <sup>3</sup> /min]	količina odvojenog materijala
$z$		broj zubi glodala
$e$		stohastička varijabla koja predočuje nesistematske utjecaje zavisnih varijabli
$A_z$		najviša vrijednost amplitude vibracije
$A_{sr}$		srednja vrijednost amplitude vibracije
$A_{ef}$		amplituda vibracije
$RS$		udarne vibracije
$gRMS$	gRMS <sup>2</sup> /Hz	spektar snage vibracija
$R_a$	[μm]	srednje aritmetičko odstupanje profila
$\varphi$	[°]	trenutni kut položaja alata





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 stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, DARIO SLATKI (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ANALIZA TROŠENJA ALATA KOD OBRADE GLODANJEM (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Slatki  
(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, DARIO SLATKI (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ANALIZA TROŠENJA ALATA KOD OBRADE GLODANJEM (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Slatki  
(vlastoručni potpis)