

# Utjecaj parametara obrade na hrapavost pri glodanju aluminijske legure EN AW 6082

---

Tepoš, Fran

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:407046>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





# Sveučilište Sjever

Završni rad br. 435/PS/2024

## Utjecaj parametara obrade na hrapavost pri glodanju aluminijeve legure EN AW 6082

Fran Tepeš, 0336042678

Varaždin, rujan 2024. godine





# Sveučilište Sjever

Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 435/PS/2024

## Utjecaj parametara obrade na hrapavost pri glodanju aluminijeve legure EN AW 6082

**Student**

Fran Tepeš, 0336042678

**Mentor**

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

Varaždin, rujan 2024. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Fran Tepeš

MATIČNI BROJ 0336042678

DATUM 11.09.2024.

KOLEGIJ CNC obradni sustavi

NASLOV RADA Utjecaja parametara obrade na hrapavost pri glodanju aluminijske legure EN AW 6082

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Influence of processing parameters on surface roughness in milling of aluminum alloy EN AW 6082

MENTOR dr.sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc. dr.sc. Boris Jalušić predsjednik povjerenstva
2. doc. dr.sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
3. doc. dr. sc. Zlatko Botak, član povjerenstva
4. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, rezervni član povjerenstva
- 5.

## Zadatak završnog rada

BROJ 435/PS/2024

OPIS

U završnom radu pristupnik treba na temelju literaturnih podataka proučiti i opisati način rada glodačkih alatnih strojeva. Posebno detaljno obraditi vrste i mogućnosti CNC glodalica. Usporediti i preporučiti odabir parametara obrade za obradu odvajanjem čestica aluminijskih legura iz grupe 6xxx. Proučiti način rada stolne CNC glodalice Haas Desktop Mill te opisati ugrađeno programsko sučelje. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je korištenjem programskog predloška izraditi program za čeono glodanje prema zadanoj skici. Izabrati parametre obrade i odabrati alat za obradu aluminijske legure EN AW 6082. Izvesti obradu prema izrađenom programu te ocijeniti uspješnost obrade. Izmjeriti hrapavost na obrađenim površinama. Donijeti vlastiti zaključak o rezultatima provedenog eksperimenta. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

12-09-2024

POTPIS MENTORA

M. Bušić



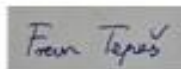


## IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički 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, **Fran Tepoš** (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom **Utjecaj parametara obrade na hrapavost pri glodanju aluminijske legure EN AW 6082** (*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 članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.

## **Predgovor**

Ovim putem želio bih se zahvaliti svojim roditeljima i djevojci na podršci tijekom pisanja ovog završnog rada, kao i za vrijeme cijelog studija. Posebno se želim zahvaliti svojem mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću, na utrošenom vremenu, pruženoj pomoći, kritikama i savjetima koji su mi pomogli oblikovati ovaj završni rad. Također veliko hvala svim nastavnicima Sveučilišta Sjever na pruženom znanju tijekom studija.

## Sažetak

U ovom završnom radu opisan je postupak obrade odvajanjem čestica s fokusom na CNC strojnu obradu glodanjem. U uvodu se ukratko definira obrada materijala, alati, proizvodnja te zahtjevi i trendovi koje današnja industrijska proizvodnja iznosi. Definirani su alati koji se koriste u obradi odvajanjem čestica, materijali iz kojih su izrađeni, gibanja alata te njihovo trošenje. Navedene su vrste strugotina koje nastaju tijekom obrade kao i sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Poblje su opisani CNC obradni sustavi te izgradnja i sintaksa programskog koda. Izvedeno je glodanje aluminijske legure EN AW 6082, na HAAS desktop mill stroju, te su izneseni zaključci o kvaliteti obrađene površine, odnosno njenoj hrapavosti u ovisnosti o posmičnim brzinama.

**Ključne riječi:** obrada odvajanjem čestica, obradak, alat, glodanje, programiranje, kod, CNC stroj

## Summary

In this final thesis, the chip removal process is described, with focus on CNC milling. The introduction briefly outlines material processing, tools, production as well as requirements and trends which today's industrial production defines. Tools which are used in chip removal process, the material from which they are made, tool movement and tool wear is described. The types of chips that are produced during processing, as well as means for cooling, rinsing and lubrication are listed. CNC machining systems, the construction and syntax of the program code are described in more detail. Milling of aluminum alloy EN AW 6082 was performed on a HAAS desktop mill machine and conclusions were made about the quality of the processed surface, i.e. its roughness in dependence with feedrate.

**Key words:** chip removal process, workpiece, tool, milling, programming, code, CNC machine



## Popis korištenih kratica

|             |  |
|-------------|--|
| <b>CNC</b>  | Computer Numerical Control<br>Računalno numeričko upravljanje  |
| <b>JIT</b>  | Just in time<br>Na vrijeme   |
| <b>HSS</b>  | High-speed steel<br>Brzorezni čelici   |
| <b>SHIP</b> | Sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje   |
| <b>NC</b>   | Numerical Control<br>Numeričko upravljanje   |
| <b>MIT</b>  | Massachusetts Institute of Technology  |
| <b>DNC</b>  | Direct Numerical Control, Distributed Numerical Control<br>Direktno numeričko upravljanje, Distribuirano numeričko upravljanje |
| <b>CAM</b>  | Computer-aided manufacturing<br>Kompjuterski potpomognuta proizvodnja  |
| <b>CAD</b>  | Computer-aided design<br>Računalno potpomognuto projektiranje  |
| <b>VPS</b>  | Visual Programming System<br>Sistem za vizualno programiranje  |
| <b>MDI</b>  | Manual Data Input<br>Ručno unošenje podataka   |

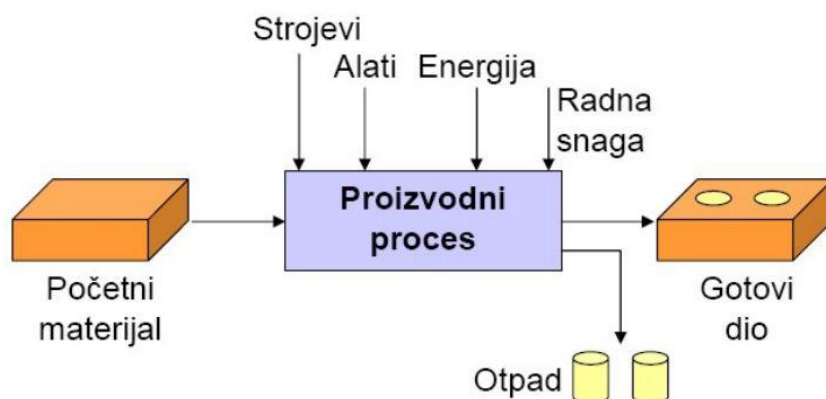
## Sadržaj

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | Uvod.....   | 1  |
| 2.     | Obrada odvajanjem čestica .....                             | 3  |
| 2.1.   | Gibanja kod obrade odvajanjem čestica .....                 | 4  |
| 2.2.   | Rezni alati.....  | 5  |
| 2.2.1. | <i>Materijali za izradu alata</i> .....                     | 6  |
| 2.2.2. | <i>Trošenje alata</i> .....                                 | 7  |
| 2.3.   | Sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP) ..... | 10 |
| 2.4.   | Strugotina (odvojena čestica) .....                         | 11 |
| 3.     | CNC obradni sustavi .....                                   | 12 |
| 3.1.   | CNC programiranje .....                                     | 14 |
| 3.1.1. | <i>Koordinatni sustavi i nul-točke</i> .....                | 15 |
| 3.1.2. | <i>Gradnja i sintaksa programa</i> .....                    | 17 |
| 4.     | Glodanje aluminija na HAAS glodalici .....                  | 20 |
| 4.1.   | Upravljačka jedinica.....                                   | 22 |
| 4.2.   | Stezanje sirovca i određivanje nul-točke.....               | 24 |
| 4.3.   | VPS (Visual Programming System) .....                       | 26 |
| 4.4.   | Programski kod .....  | 28 |
| 4.5.   | Hrapavost .....   | 32 |
| 5.     | Zaključak.....  | 34 |
|        | Popis slika .....   | 35 |
|        | Popis tablica.....  | 36 |
|        | Literatura.....   | 37 |

# 1. Uvod

Kroz cijelu svoju povijest, čovjek je nastojao okolinu prilagoditi svojim potrebama raznim tvorevinama i inovacijama kako bi si olakšao život. Kako bi se došlo do tih inovacija, prvo se trebalo naučiti kako iskoristiti sirove materijale koji su se uzimali iz prirode, a zatim te materijale obraditi kako bi se mogli koristiti za ljudske potrebe. Alati i načini obrade mijenjali su se i usavršavali s ciljem dobivanja što kvalitetnijeg proizvoda. Danas nije problem izraditi proizvod, no potrebno ga je izraditi što kvalitetnije, jeftinije i u što kraćem vremenu.

Proizvodnja je pretvaranje sirovog materijala u koristan proizvod za kupca ili tržište. Gotovo uvijek se izvodi kao slijed operacija, uključujući i montažu. [1] Na slici 1 je jednostavan prikaz proizvodnog procesa u kojem materijal ulazi kao sirovina, a zatim prolazi kroz sam proizvodni proces u kojem se koristi neka vrsta obrade, alati, ulaže se energija i radna snaga. Iz proizvodnog procesa izlazi gotov proizvod koji se prodaje. Otpad je neizbježan u proizvodnom procesu, no korištenjem optimalne obrade, može se smanjiti. Općenito, bitno je poznavati tehnologiju obrade kako bi se postigle zadovoljavajuće karakteristike i ispunili zahtjevi kupca.



**Slika 1.** Proizvodni proces [1]

Obrada materijala je promjena oblika, dimenzija ili svojstava materijala kako bi se prilagodio daljnjoj upotrebi. Mogu biti ručne i strojne, s ili bez odvajanja čestica. [2] U ovom radu fokus će biti na obradi odvajanjem čestica. Alati su sredstva kojima se vrši obrada materijala te su u direktnom dodiru s predmetom obrade. U obradi materijala često se koriste i dodatne naprave koje služe kao pomoćna sredstva tijekom proizvodnje.

Obrada odvajanjem čestica je jedna od najvažnijih grupa proizvodnih metoda koja objedinjuje različite postupke uslijed kojih se dobije željeni oblik metodom odvajanja. Može se podijeliti na: obradu rezanjem, obradu odvajanjem strugotine i obradu odstranjivanjem viška materijala. [3]

U današnje vrijeme postoje zahtjevi i trendovi u industrijskoj proizvodnji kojima bi svaki proizvođač trebao težiti. Neki od njih su:

- što kraći ciklus usvajanja novih proizvoda
- JIT (*Just in time*, na vrijeme) proizvodnja
- proizvodnja bez zaliha sirovaca i gotovih proizvoda
- minimalni troškovi uz maksimalni dobitak
- najveća kvaliteta od početka do kraja proizvodnog procesa
- visoka produktivnost
- evaluacija novih postignuća u razvoju materijala, proizvodnih metoda i integriranja računala. [1]

Kao što je prije navedeno, potrebno je poznavati tehnologije obrade kako bi se mogao izabrati pravilan postupak proizvodnje. Neki od kriterija koje treba uzeti u obzir prilikom izbora postupka obrade su:

- oblik poluproizvoda i gotovog dijela
- minimalne i maksimalne dimenzije izratka
- kompleksnost oblika
- koje su dozvoljene tolerancije i hrapavost površine
- količina i troškovi proizvodnje. [1]

Razvojem računalne tehnologije razvili su se i strojevi upravljani s pomoću računala, tzv. CNC strojevi (računalno numeričko upravljanje). Ovi strojevi upravljaju se s pomoću posebnih kodiranih naredbi, tzv. G-naredbe, koje se učitavaju na upravljačkom računalu. Moguće je izvršiti izmjenu računalnog programa na samom stroju, ali i tijekom strojne obrade. Iz tog razloga ovi strojevi pružaju izrazitu fleksibilnost u radu te uštedu vremena, što je uveliko pridonijelo raširenosti upotrebe CNC strojeva. Moguće je obrađivati obratke raznih dimenzija i materijala, pa tako i aluminijski koji se koristio u zadanom eksperimentu.

## 2. Obrada odvajanjem čestica

Obrada odvajanjem čestica je skup konvencionalnih i nekonvencionalnih postupaka odstranjivanja materijala, čime se na metalnom obratku postiže željeni oblik i određena kvaliteta obrađene površine. [1] Sitni dijelovi materijala koji su odvojeni pri ovom postupku, nazivaju se strugotine.

Postupci obrade odvajanjem čestica mogu se podijeliti na dvije osnovne skupine.

U prvu skupinu spadaju alatni strojevi gdje alati imaju čvrste oštrice (konvencionalni postupci), a do odvajanja čestica dolazi utjecajem mehaničke sile na obradak (rezanje, skidanje strugotine). Neki od postupaka u kojima oštrica ima definiranu geometriju su: tokarenje, glodanje, blanjanje, bušenje, piljenje. Postupci kod kojih rezna oštrica nema jasno definiranu geometriju su: brušenje, superfiniš, honanje, lepanje.

U drugu skupinu spadaju alatni strojevi gdje alati nemaju čvrste oštrice, odnosno, ne dolazi od dodira s obratkom (nekonvencionalni postupci). Takvi postupci dijele se na:

- mehaničke postupke: obrada ultrazvukom, obrada vodenim i abrazivnim mlazom
- kemijske postupke: kemijska obrada, termokemijska obrada
- elektrokemijske postupke: elektrokemijska obrada, elektrokemijsko brušenje
- toplinske postupke: elektroerozijska obrada, obrada laserskim snopom i dr.

Neke od prednosti obrade odvajanjem čestica su:

- ovim postupkom postiže se najbolja točnost i kvaliteta obrađene površine u usporedbi s ostalim postupcima
- moguće je obrađivati najsloženije oblike površina
- može se primijeniti kod gotovo svih poznatih materijala
- moguća obrada širokog raspona dimenzija.

Neki nedostaci obrade odvajanjem čestica su:

- relativno velika potrošnja energije
- opasne tvari za okolinu koje se koriste u obradi (otpadna ulja, emulzije)
- velik udio pomoćnih i pripremnih vremena
- rijetko je dovoljan samo jedan postupak obrade koji bi doveo do gotovog proizvoda.

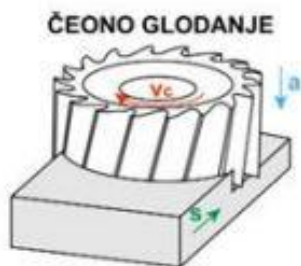
## 2.1. Gibanja kod obrade odvajanjem čestica

Kako bi uopće došlo do obrade odvajanjem čestica, alatni stroj mora osigurati određena gibanja alata i obratka. Ta gibanja se dijele na glavno i pomoćna gibanja. Iz tih gibanja izlaze režimi obrade koji izravno utječu na hrapavost površine, produktivnost i ekonomičnost izrade. Najvažniji parametri su brzina rezanja, posmak i dubina rezanja. [2]

Gibanja potrebna za obradu odvajanjem čestica su:

1. Glavno gibanje – brzina rezanja  $v$  ili  $v_c$ , m/min
  - iz njega proizlazi duljina strugotine, odvaja se čestica
  - može biti kružno ili pravocrtno
  - bira se iz tablica (kataloga), a ovisi o materijalu alata i sirovca, kvaliteti obrade, snazi stroja
2. Pomoćna gibanja – posmično, dostavno i povratno
  - posmično gibanje – posmak  $s$  ili  $f$ , mm/o
    - daje širinu strugotine, služi za održavanje kontakta između alata i obratka
    - posmična brzina  $v_f$ , mm/min
  - dostavno gibanje – dubina rezanja  $a$ , mm
    - daje dubinu rezanja
    - kod grube obrade veličina dubine rezanja je veća, a kod završne obrade mala
  - povratno gibanje. [2]

Slika 2 prikazuje gibanja kod čeonog glodanja. Glavno gibanje ( $v_c$ ) kod čeonog glodanja obavlja alat i ono je kružno. Alat također ima i dostavno gibanje ( $a$ ), odnosno zauzima dubinu glodanja. Obradak ima posmično gibanje ( $s$ ) koje je pravocrtno.



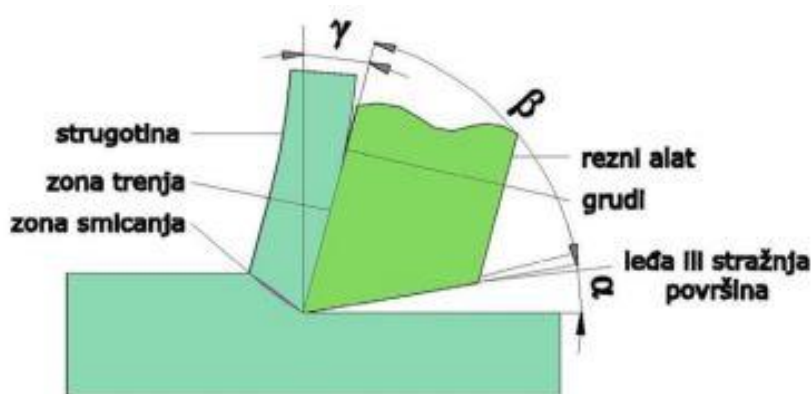
**Slika 2.** Gibanja pri čeonom glodanju [2]

## 2.2. Rezni alati

Rezni alati su sredstva koja dolaze u neposredni dodir s materijalom koji oblikuju i utječu na njegovu konačnu formu. Rezni alati mogu biti s jednom ili više oštrica. Neki od reznih alata su noževi, glodala, svrdla i dr. [2] Svaki rezni alat mora se sastojati od dva osnovna dijela: radni, odnosno rezni dio s oštricom (glava noža) i prihvatni dio (držač alata). Ujedno, alati moraju biti izvedeni tako da imaju odgovarajuću geometriju. Oštrica mora imati oblik klina da bi odvajala čestice.

Materijali za izradu alata moraju imati određena svojstva koja omogućavaju visoku točnost geometrijskog oblika obratka te kvalitetu obrađene površine. Mehanička svojstva koja materijal mora imati su što veća savojna i tlačna čvrstoća, tvrdoća i žilavost. Također je bitna i mala sklonost difuziji. Postojanost materijala prema povišenim temperaturama jedan je od bitnih zahtjeva budući da temperature na oštrici rastu uslijed sile trenja, tvrdoća na povišenim temperaturama. Ujedno je bitno i dobro provođenje topline, odnosno sprečavanje akumuliranja topline. Materijali za izradu alata su: brzorezni čelik, tvrdi (sinterirani) metali, rezna keramika, dijamant i cermet. Cermet je keramičko metalni kompozit (titanijev karbid i nitrid). [2]

Slika 1 prikazuje tokarski nož u odnosu s materijalom koji obrađuje. Na slici se vidi kako po prednjoj površini noža klizi odvojena čestica. Između strugotine i prednje površine pojavljuje se zona trenja, zbog koje može doći do navarivanja strugotine na površinu oštrice. Iz tog razloga koriste se emulzije (rashladne tekućine). Slovo  $\gamma$  označava kut između prednje površine alata i okomice na površinu koja se obrađuje. Nož iza sebe ostavlja obrađenu površinu, a kut koji se nalazi između te površine i stražnje površine oštrice označen je slovom  $\alpha$ . Kad tog otklona alata od površine ne bi bilo, oštrica bi zapinjala za obrađenu površinu, a posljedica bi bila loša kvaliteta površine i oštećen alat. Kut između prednje i stražnje površine naziva se kut klina  $\beta$ . [2] Kut  $\alpha$  i  $\beta$  zajedno tvore kut rezanja.



Slika 3. Obrada tokarskim nožem [2]

### 2.2.1. Materijali za izradu alata

Brzorezni čelik (HSS, *high-speed steel*) je vrsta legiranog alatnog čelika. Sadrži do 18 % volframa (W) uz dodatke kobalta (Co), kroma (Cr), molibdena (Mo) i vanadija (V). Karbidi mu daju tvrdoću, a kobalt temperaturnu postojanost. Karakterizira ga mogućnost podnošenja izrazito visokih temperatura, pri čemu zadržava svoju izdržljivost, tvrdoću i otpornost na trošenje, čak i kad se koristi pri visokim brzinama. Koristi se za izradu industrijskih reznih alata. [4] Upotrebljiv je do 600 °C, a brzine rezanja su do 70 m/min, što je oko tri do četiri puta brže od visokougljičnih čelika.

Tvrđi metali dobivaju se postupkom sinteriranja. To je postupak okrupnjivanja sitnozrnih ruda i koncentrata zagrijavanjem do temperature površinskog taljenja (temperature sinteriranja) na kojoj se zrna sljepljuju u čvrste, ali porozne aglomerate. [5] Osnovne komponente su karbidi: volframov karbid (WC), titanijev karbid (TiC), tantalov karbid (TaC), niobijev karbid (NbC), titanijev nitrid (TiN), kobalt (Co) i nikal (Ni). Karbidi mu daju tvrdoću, veću postojanost i krhkost. Tvrđi metali su pogodni za velike brzine rezanja kod kontinuirane strugotine. [6]

Rezna keramika također se dobiva postupkom sinteriranja. Sastavljena je od aluminijeva oksida ( $Al_2O_3$ ), a može biti: čista oksidna keramika (bijela), miješana keramika (crna), keramika ojačana silicijevim karbidom (SiC) i neoksidna keramika ( $Si_3N_4$ ). Posjeduje veliku tvrdoću, malu toplinsku provodljivost, dobru postojanost i dostižu se velike brzine. [6]

Dijamant je najtvrđi rezni materijal, a sastoji se od čistog ugljika. Ne upotrebljava se za obradu željeznih i čeličnih materijala, zbog interakcije ugljika i željeza. Koristi se za finu obradu aluminijskih (Al), bakra (Cu), tvrdih elastomera i polimera. Obradene površine imaju visok sjaj. [6]

Cermet je tvrdi metal na osnovi titanijevog karbida i nitrida te veziva kobalta. Ime reflektira karakteristike materijala koje su mješavina karakteristika keramika i metala. Dobiva se postupkom sinteriranja. Materijal ima malu toplinsku vodljivost, a većina topline odlazi sa strugotinom. Cermet ima veliku tvrdoću te nema sklonost difuzijskom i adhezijskom trošenju. [6]



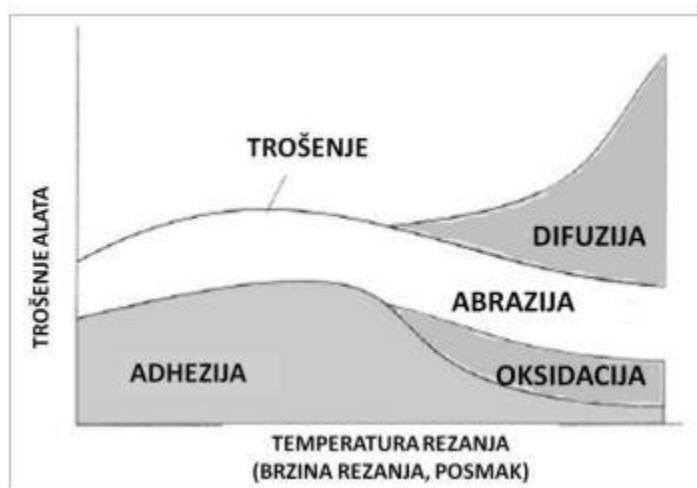
### 2.2.2. Trošenje alata

Kako su alati za obradu odvajanjem čestica konstantno izloženi velikim silama, udarcima te toplinskim i mehaničkim naprezanjima, neizbježna posljedica je njihovo trošenje. Kako bi se izbjegle nepravilnosti tijekom obrade, bilo kakvo trošenje, oštećenja ili puknuća potrebno je na vrijeme uočiti. Uz to se smanjuju i troškovi proizvodnje zbog zamjene alata i smanjivanja brzine obrade. Znakovi istrošenosti alata često se vide tek kada se istrošenost očituje na samom predmetu obrade, a mogu biti: gubitak rezne sposobnosti alata, geometrijska netočnost i nezadovoljavajuća kvaliteta površine obratka, porast sile rezanja, pojačane vibracije i temperature rezanja. [7]

Trošenje je definirano kao postupni gubitak materijala alata i promjenom oblika alata tijekom procesa obrade odvajanjem čestica. Mehanička, toplinska i kemijska naprezanja uzrokuju različite mehanizme trošenja, odnosno razvijanje triboloških procesa na reznoj oštrici alata. [7] Trošenja koja se javljaju s obzirom na mehanizam kojim nastaju mogu biti:

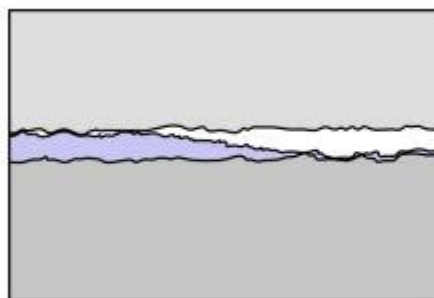
- adhezijsko trošenje
- abrazijsko trošenje
- trošenje uslijed zamora materijala
- difuzijsko trošenje
- oksidacijsko trošenje. [6]

Na slici 4 prikaz je ovisnosti karakterističnih mehanizama trošenja o parametrima obrade. Pri nižim temperaturama prevladavaju abrazija i adhezija, dok s porastom temperature raste utjecaj difuzije i oksidacije. [7]



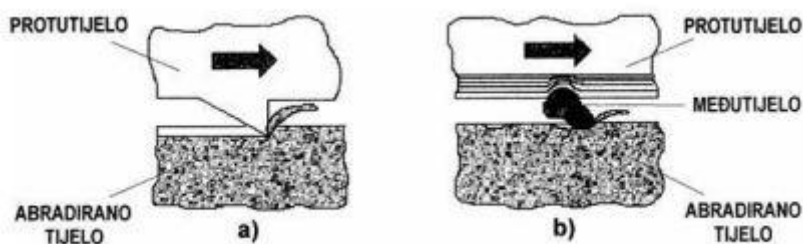
**Slika 4.** Mehanizmi trošenja reznih alata u ovisnosti o parametrima obrade [7]

Adhezijsko trošenje je odnošenje dijelova materijala alata nakon razaranja tzv. adhezijske veze. Ako su adhezijske sile na dodirnim područjima između površina dvaju materijala jače nego kohezijske, dolazi do odvajanja čestica na dodirnim mjestima. [8] Adhezijsko trošenje događa se između mikrozavara najviših vrhova neravnina strugotine i prednje površine alata nastalih uslijed visokih temperatura i pritisaka. Nastaje mehaničkim „lijepljenjem“, odnosno zavarivanjem malih komada netom prije odvojenih čestica, tvoreći tako naljepak na reznoj oštrici, slika 5. Nakon određenog perioda, dolazi do otkidanja naljepka, a samim tim i do mogućeg otkidanja dijela rezne oštrice. [9]



**Slika 5.** Adhezijsko trošenje [9]

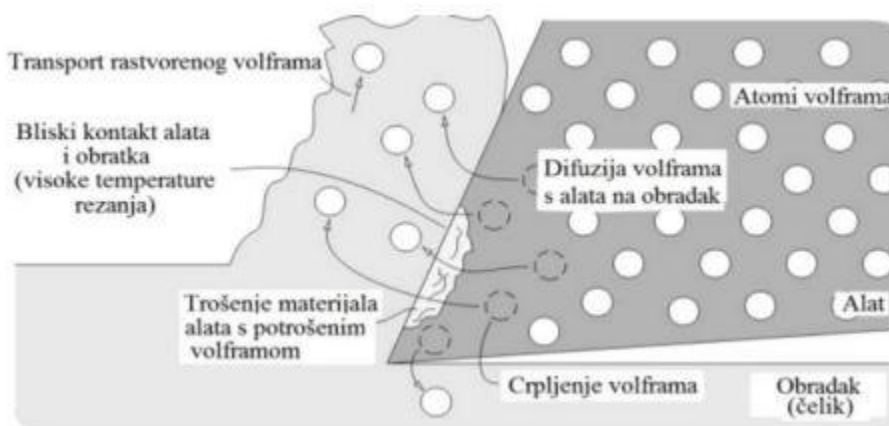
Abrazijsko trošenje nastaje kada tvrde čestice i uključci materijala obratka predstavljaju mikro-rezne klinove koji režu djele materijala alata u obliku mikro strugotine. [6] Abrazija se može podijeliti u dvije skupine, a to su abrazija u dodiru dva tijela i abrazija u kojoj postoji međutijelo između alata i obratka, slika 6. Slobodna tvrda čestica (međutijelo) djeluje kao mikro-rezni klin te oštećuje materijal alata valjanjem pod pritiskom. One mogu nastati kao posljedica adhezijskog trošenja i kao posljedica razaranja naljepka.



**Slika 6.** Abrazijsko trošenje: a) kod dodira dva tijela b) kod dodira s međutijelom [7]

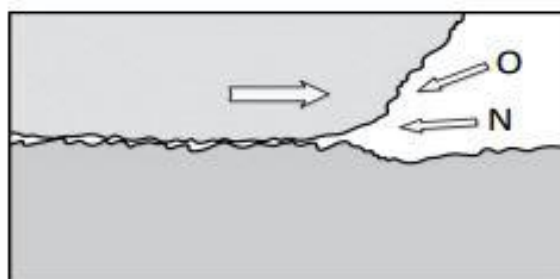
Trošenje uslijed zamora materijala pojavljuje se zbog promjene temperature i periodičnih promjena naprezanja u površinskom sloju materijala alata, što može dovesti do pukotina i konačnog loma oštrice alata.

Difuzijsko trošenje pojavljuje se zbog pojave difuzije na kontaktnim površinama materijala alata i materijala obratka. Prilikom visokih kontaktnih naprezanja i temperatura dolazi do prelaska atoma iz područja više koncentracije u područje niže koncentracije. [8] Brzina difuzije eksponencijalno raste s porastom temperature, a uvjet nastanka difuzijskog trošenja je metalurško spajanje dviju površina, prilikom čega se atomi mogu slobodni gibati unutar sučelja. Slika 7 prikazuje mehanizam difuzijskog trošenja na primjeru s alatom od volframova karbida. Pri visokoj temperaturi, atomi volframa pri kontaktu s materijalom obratka prelaze na obradak. Dolazi do pojave krhkog sloja na alatu sa smanjenom čvrstoćom te dolazi do krhkog loma na tom mjestu.



**Slika 7.** Difuzijsko trošenje na primjeru s alatom od volframova karbida [8]

Oksidacijsko trošenje (slika 8) je uzrokovano pojavom oksidacije, odnosno elektrokemijskog procesa koji nastaje pod utjecajem visokih temperatura i prisustva kisika. Formira se krhki oksidacijski sloj koji lako puca. Njegovo periodičko formiranje i uništavanje ima za posljedicu trošenje materijala. [8] Oksidacija najčešće nastaje na početku i na kraju dijela oštrice koji je u zahvatu s obrađivanim materijalom. [9]



**Slika 8.** Oksidacijsko trošenje [9]

### 2.3. Sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP)

Kao što je već rečeno, do trošenja alata dovode mehanički, toplinski i kemijski utjecaji. Intenzitet tih utjecaja može se smanjiti korištenjem sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP).

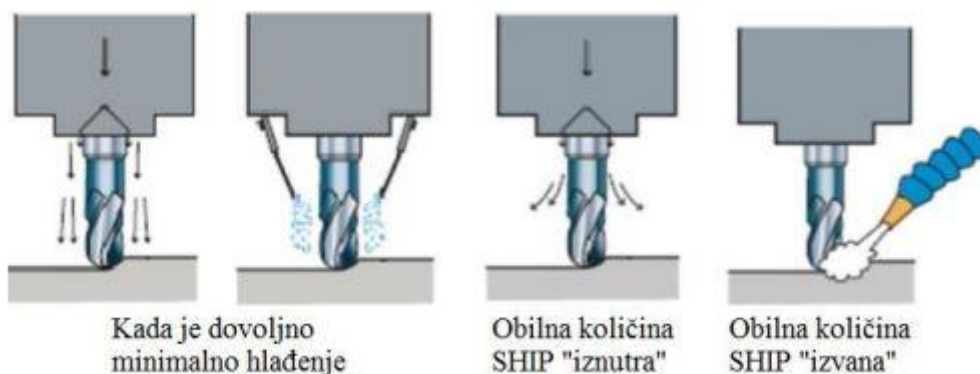
Svrha uporabe, odnosno funkcije SHIP-a su:

- podmazivanjem se smanjuje trenje između alata, strugotine i obratka
- odvođenje topline nastale u procesu rezanja
- sposobnost SHIP-a da tvori klizni sloj koji ispuni najsitnije pukotine, jer uslijed visokih tlakova u zoni rezanja (do 4000 Pa) ne može nastupiti hidrodinamičko podmazivanje
- odstranjivanje strugotine s mjesta nastanka, čime se smanjuje trošenje alata
- kemijska zaštita obrađene površine od djelovanja okoline (treba imati antikorozivna svojstva). [6]

Vodne emulzije predstavnik su skupine SHIP-a, koje ima primarno svojstvo hlađenja, a sekundarno (djelomično) podmazivanja. Mineralna, biljna, životinjska ulja i petrolej predstavnici su skupine SHIP-a, koje ima primarno svojstvo podmazivanja, a sekundarno hlađenja. [10] SHIP se mora na odgovarajući način zbrinuti. SHIP koji se na najčešće primjenjuje u proizvodnji je u obliku kapljevine, koji se zatim dijeli na onaj koji se miješa s vodom i koji se ne miješa s vodom. Kad je SHIP u plinskom obliku, najčešće se koristi komprimirani zrak, a kod kriogene obrade dušik i ugljikov dioksid.

Načini dovođenja SHIP-a (slika 9) su:

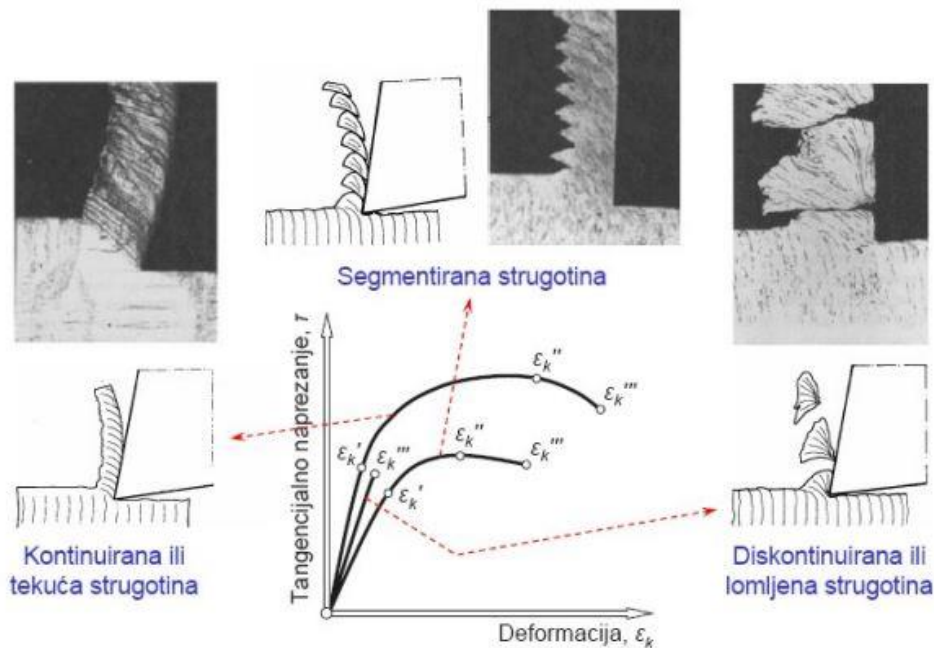
- slobodan mlaz
- pod niskim tlakom
- pod visokim tlakom (zahtjeva zaštitu radnog prostora)
- struje stlačenog zraka (sve češće). [10]



Slika 9. Primjer dovođenja i primjena SHIP-a [10]

## 2.4. Strugotina (odvojena čestica)

Strugotina je sitni odsječeni dio materijala koji nastaje kao posljedica obrade odvajanjem čestica. Prema strukturi strugotina može poprimiti tri oblika: kontinuirana (tekuća) strugotina, segmentirana strugotina i diskontinuirana (lomljena strugotina). Neki od tih oblika su povoljniji u proizvodnji, dok drugi otežavaju rad. Slika 10 prikazuje vrste strugotina i njihov raspored u dijagramu naprezanja.



**Slika 10.** Vrste strugotine i dijagram naprezanja [6]

Kontinuirana strugotina javlja se kod žilavih materijala obratka, visokim brzinama rezanja te malim posmacima i dubinama rezanja. Također, bitna je oštra oštrica te malo trenje između alata i strugotine. Kvaliteta obrađene površine je tipično dobra kod javljanja ovog oblika strugotine, no ona nije uvijek poželjna, osobito kod automatiziranih alatnih strojeva, jer se može zaplesti oko alata i obratka. U tim slučajevima kao rješenje koriste se lomači strugotine.

Diskontinuirana strugotina javlja se kod obratka krhkog materijala. Prouzrokuju je veliko trenje između alata i strugotine, veliki posmaci i dubine rezanja te mali prednji kut alata. Obično nastaje nepravilna obrađena površina zbog promjenjivih sila rezanja koje uzrokuju vibracije i podrhtavanje. Kako bi se spriječila, mora se povećati prednji kut alata, smanjiti dubina rezanja i trenje.

Segmentirana strugotina ima polukontinuirani, nazubljeni izgled. To je ciklički oblik strugotine s izmjeničnom visokom pa zatim niskom smičnom deformacijom. Ona se javlja kod teško obradivih materijala pri visokim brzinama rezanja.

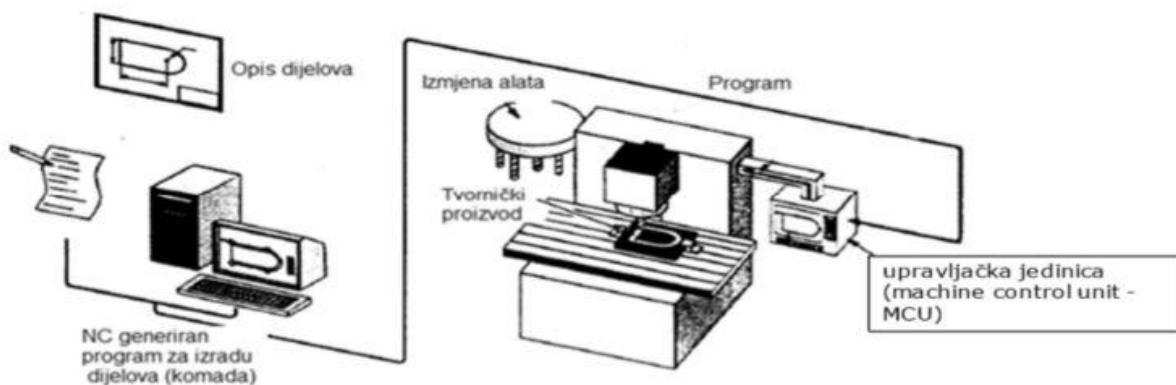
### 3. CNC obradni sustavi

Prvi NC (numerički upravljani) alatni stroj izumio je John T. Parson s MIT-a 1940. godine. Stroj je bio upravljan s pomoću računala koje je čitalo memoriju u obliku bušene papirnate trake. Direktno numeričko upravljanje (DNC) javlja se 1960. godine te omogućuje izravno slanje programa iz DNC računala u upravljačku jedinicu stroja. Tako više nije nužna bušena vrpca. Nakon toga, 1970.-tih godina, javljaju se prvi CNC alatni strojevi, a DNC dobiva novo značenje, distribuirano numeričko upravljanje. 1980.-tih godina pojavljuju se prvi CAM/CAD sustavi (*computer-aided manufacturing/computer-aided design*). [11]

NC upravljanje alatnim strojevima vrši se s pomoću posebno kodiranih naredbi, koje se učitavaju u upravljačku jedinicu stroja s pomoću bušene trake, kartice ili diskete. Kad se program učitava, provodi se obrada predmeta pri čemu operator na stroju nema mogućnost mijenjanja programa. To znači da se sve potrebne izmjene obavljaju izvan stroja te se ponovno učitavaju u upravljačku jedinicu stroja. Upravljanjem stroja se ostvaruje relativno gibanje alata i obratka, a pojedinom vrstom upravljanja ostvaruje se potrebna geometrija radnog komada. Postoje tri vrste upravljanja:

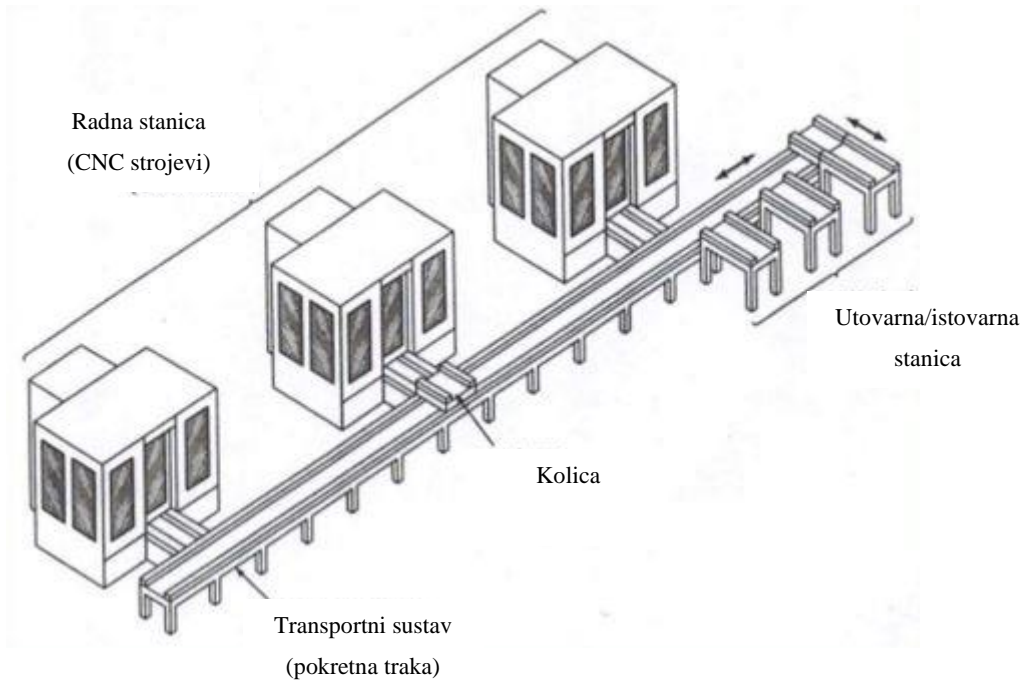
- točka-po-točka ili pozicioniranje
- po pravcu (pravocrtno ili linijsko upravljanje)
- konturno upravljanje. [11]

CNC upravljanje alatnim strojevima vrši se s pomoću posebnih kodiranih naredbi (instrukcija) koje se učitavaju ili upisuju u upravljačkom računalu. U CNC sustavu, mikroprocesor omogućuje izmjenu računalnog programa na samom stroju, a moguće je provesti izmjene i tijekom strojne obrade predmeta. Samim time, CNC strojevi imaju vrlo veliku fleksibilnost i uštedu vremena u radu, što je uvelike pridonijelo njihovoj raširenosti. Na slici 11 shematski je prikaz upravljanja CNC strojem. Program generiran na računalu šalje se u upravljačku jedinicu stroja (MCU) i izrađuje se tvornički proizvod.



Slika 11. Shematski prikaz upravljanja CNC strojem [11]

Fleksibilna obradna ćelija sastavljena je od 2 ili 3 CNC obradna centra, između kojih se obratci razmjenjuju s pomoću transportnog sustava također povezanog na utovarnu i istovarnu stanicu. Sve skupa upravljano je jednim vodećim DNC računalom. Slika 12 prikazuje jednu takvu fleksibilnu obradnu ćeliju. [11]



**Slika 12.** Fleksibilna obradna ćelija [11]

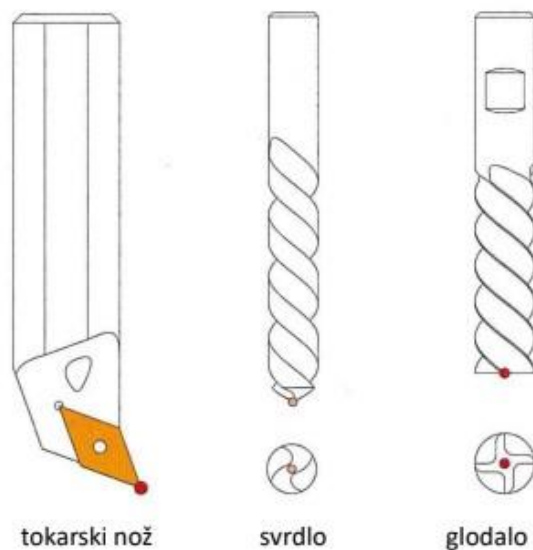
Upravljanje CNC obradnog sustava sastoji se od:

- razrade tehnologije i utvrđivanja redoslijeda zahvata, alata i režima rada
- pripreme alata
- programiranja
- pripreme stroja
- izrade prvog izratka (prvi komad u seriji). [11]

CNC operater je osoba koja upravlja upravljačkom jedinicom stroja, čita tehnološku dokumentaciju, učitava program te po potrebi modificira program (G-naredbe). CNC programer izrađuje program i definira tehnologiju i slijed zahvata, dok operater slijedi te upute, postavlja i steže izradak prema planu stezanja. Operater također mora pratiti istrošenost alata, te odrediti korekcije za pojedini alat. Gotov proizvod mora izmjeriti te utvrditi zadovoljava li zahtjeve postavljene u tehničkom crtežu.

### 3.1. CNC programiranje

Programiranje je postupak kodiranja uputa potrebnih za rad CNC alatnog stroja. Programirati znači odrediti putanju reznog alata odnosno položaj referentne točke na reznoj oštrici alata. Položaj referentne točke na alatu ovisi o vrsti reznog alata (slika 13). CNC programer je osoba odgovorna za pravilan odabir tehnologije obrade, alata i slijeda zahvata kao i za moguće probleme vezane za operacije izrade na CNC stroju. Odgovoran je za izradu tehnološke dokumentacije koja sadržava NC kod, listu potrebnih reznih alata, redoslijed stezanja i način stezanja sirovca. [11]



**Slika 13.** Položaj referentne točke na reznom alatu [11]

U program osim same putanje reznog alata također se upisuju i drugi parametri rada kao što su:

- brzina rotacije alata i obratka
- posmična brzina
- dubina rezanja
- vrijeme zastoja, odnosno pauze
- uključivanje i isključivanje SHIP-a i sl.

Programiranje CNC stroja obuhvaća definiranje podataka koji mogu biti geometrijski ili tehnološki, pa se za izradu NC programa koriste CAD i CAM sustavi. Prijenos geometrijskih podataka iz CAD-a obavlja se sučeljem za izmjenu podataka. Integracijom CAD/CAM sustava postigla se veza između tih sustava, odnosno integriran je postprocesor koji omogućuje prilagodbu NC koda upravljačkoj jedinici CNC stroja. Neki od tih sustava su CATI, Pro/ENGINEER, CADAM, CADTOOL, MASTERCAM i sl. [11]

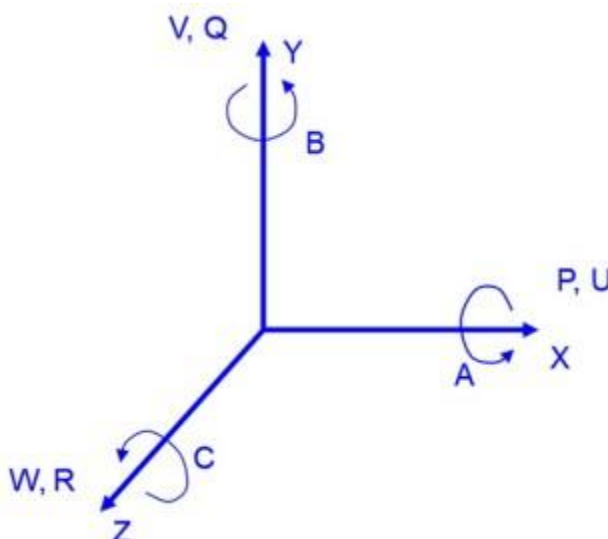


### 3.1.1. Koordinatni sustavi i nul-točke

Geometrijske informacije u programu definiraju međusobni položaj alata i obratka u radnom prostoru CNC stroja. Kako bi se u programu mogle zadati geometrijske informacije, potrebno je na stroj i obradak postaviti koordinatne sustave i odrediti neke referentne (nul) točke. Sve putanje alata na CNC alatnim strojevima programiraju se s pomoću koordinatnih sustava postavljenih na stroju. U primjeni je desni koordinatni sustav.

Na slici 14 prikazan je koordinatni sustav kod CNC strojeva. Glavne pravocrtne osi su obilježene slovima X, Y i Z. Glavne rotacijske osi su obilježene slovima A, B i C. Dopunske osi su:

- P i U u smjeru osi X
- Q i V u smjeru osi Y
- R i W u smjeru osi Z. [12]



**Slika 14.** Koordinatni sustav kod CNC strojeva [12]

Kod postavljanja koordinatnog sustava na CNC stroj polazi se od osi Z koja je kod strojeva s čvrstim glavnim vretenom usporedna ili se podudara s osi glavnog vretena. Os X uvijek je okomita na os Z, a smjer s utvrđuje s obzirom na rotira li se alat ili obradak.

Čovjek teško spoznaje trodimenzionalni prostor pa bi stoga takvo programiranje bilo vrlo komplicirano. Iz toga razloga putanje se programiraju u odgovarajućim koordinatnim ravninama. Dvije koordinatne osi koje se sijeku pod pravim kutom čine koordinatnu ravninu.

Za valjan opis geometrijskih informacija u koordinatnom sustavu treba definirati referentne točke ili nul-točke. Postoje: nul-točka stroja, referentna točka stroja i nul-točka obratka (slika 15, s lijeva na desno).

Nul-točka stroja je ishodište koordinatnog sustava stroja. Njen položaj određen je u fazi konstrukcije stroja te je stalan i nepromjenjiv izvan radnog područja stroja. Sva interna preračunavanja rade se u odnosu na ovu točku.

Referentna točka stroja je ishodište mjernog sustava stroja. Kao i kod nul-točke stroja, položaj je određen u fazi konstrukcije stroja. Ova točka obavezna je kod svih strojeva s inkrementalnim mjernim sustavom.

Nul-točka obratka je ishodište koordinatnog sustava obratka. Položaj ove točke određuje programer ili tehnolog. [12]



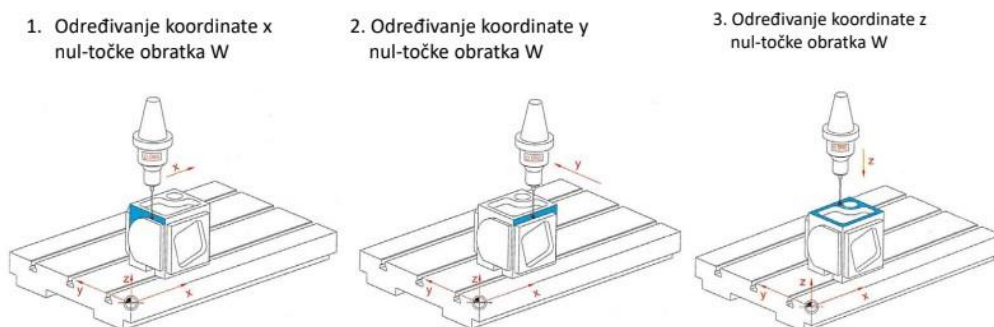
**Slika 15.** Referentne i nul-točke CNC stroja [12]

Nul-točka obratka određuje se na osnovi iskustva, tako da bi se olakšalo programiranje. Obično se pozicionira na najboljem mjestu na samom obratku ili na steznoj napravi za najjednostavnije i najbrže programiranje.

Položaj nul točke ovisi o geometriji obratka, ali postoje i neke standardne pozicije:

- donji lijevi ugao obratka na gornjoj plohi
- kod simetričnih obradaka u sredini na gornjoj plohi. [12]

Nul točka se također može odrediti analognim ili digitalnim 3D tasterom (mjernom urom) te 3D električnim ticalom. Određuje se tako da se ticalom prvo dotakne obradak u smjeru osi X za X koordinatu, zatim u smjeru osi Y za Y koordinatu te u smjeru osi Z za Z koordinatu. Postupak je prikazan na slici 16.



**Slika 16.** Određivanje nul-točke obratka [12]

### 3.1.2. Gradnja i sintaksa programa

NC program je logičan slijed naredbi koje upravljačka naprava izvodi jednu po jednu, odnosno korak po korak, a sastoji se od blokova. Svaki program ima svoj originalni naziv koji mu pridodaje autor na početku programiranja. Blok NC programa, prikazan u tablici 1, sadrži geometrijske informacije (putanja alata) i tehnološke informacije (parametri obrade). U geometrijske informacije spadaju uvjet puta, koordinate, interpolacijski parametri. U tehnološke informacije spadaju posmak, brzina vrtnje, oznaka alata, pomoćne funkcije.

Primjer bloka programa je: N20 G1 X14 Z66.5 F0.3 S150 T1212 M4.

**Tablica 1.** Blok NC programa [11]

| BLOK                            |                          |            |                           |                        |               |              |                  |
|---------------------------------|--------------------------|------------|---------------------------|------------------------|---------------|--------------|------------------|
| Broj bloka                      | Uvjet puta               | Koordinate | Interpolacijski parametri | Posmak                 | Brzina vrtnje | Oznaka alata | Pomoćne funkcije |
| N                               | G                        | X, Y, Z    | I, J, K                   | F                      | S             | T            | M, D             |
| Tehničko programske informacije | Geometrijske informacije |            |                           | Tehnološke informacije |               |              |                  |

Uz slova koja služe kao definicija adresa te znamenki kao numeričkih podataka, u izradi programa mogu se koristiti i posebni znakovi. Najčešći od njih su:

- „%“ - početak programa
- „:“ - znak za glavni blok (naredbu programa)
- „(“ i „)“ - znakovi za početak i kraj komentara
- „/“ - znak za uvjetno izvođenje bloka

G-kod je programski jezik numeričkog upravljanja, koji se koristi za programiranje CNC strojeva u proizvodnoj industriji. G-kod je razvio MIT krajem 1950.-ih godina, a razvijen je i standardiziran kao ograničeni jezik kojeg je jednostavno za naučiti i upravljati strojevima zbog nedostatka raznih petlji, uvjeta i sl. Naredbe u G-kodu dijele se u dvije skupine: G-naredbe i M-naredbe. [13]

G-naredbe (tablica 2) se nazivaju glavne naredbe, a definiraju sva radna (posmična) i sva pomoćna gibanja alata. G-naredbe mogu se podijeliti na: modalne, G-naredbe aktivne u samo jednom bloku i slobodne G-naredbe. Modalne G-naredbe ostaju aktivne sve dok se ne ponište nekom drugom G-naredbom iz iste skupine.

Pomoćne M-naredbe (tablica 3) služe za uključivanje ili isključivanje pojedinih uređaja stroja, npr. uključivanje emulzije, glavnog vretena, resetiranje ili zaustavljanje programa. [13]

**Tablica 2.** G-naredbe [12]

| G-naredbe          | Značenje   |
|--------------------|--|
| G0                 | Gibanje alata brzim hodom. Omogućuje gibanje alata najvišom brzinom koju stroj može razviti. Ne koristi se pri kontaktu alata i obratka!   |
| G1                 | Linearna interpolacija. Rezni alata se giba pravocrtno prilikom zauzimanja položaja ili prilikom obrade posmičnom brzinom $v_f$ , mm/min ili mm/okretaju.  |
| G54, G55, G56, G57 | Programirane nul-točke. Dostupnost dodatnih ovisi o mogućnostima upravljačke naprave.<br>D1 – referentna točka na vrhu alata<br>D0 – referentna točka u podnožju vreteništa stroja                                 |
| G94                | Posmak u mm/min (kod glodanja).  |
| G95                | Posmak u mm/okretaj (kod tokarenja).   |
| G96                | Konstantna brzina rezanja m/min (važno kod tokarenja).   |
| G97                | Broj okretaja u okretaj/min.   |
| G4                 | Vrijeme zastoja (odgode). Programira se vrijeme zastoja na određenom mjestu. Zaustavlja se posmično gibanje, ali vreteno i dalje rotira. Zastoj se može definirati u sekundama ili broju okretaja glavnog vretena. |
| G2                 | Kružna interpolacija u smjeru kazaljke na satu.  |
| G3                 | Kružna interpolacija u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu.  |
| G41, G42           | Kompenzacija (korekcija) radijusa alata.   |
| G40                | Obrada bez uključene kompenzacije radijusa alata. Uključena od prvog bloka NC programa.  |
| G9, G60            | Točno zaustavljanje alata. Obrada vanjskih konturnih bridova ili završne obrade unutarnjih bridova.  |
| G64                | Glodanje kontura uz konstantan posmak.   |
| G70                | Programiranje u inčima.  |
| G71                | Programiranje u milimetrima.   |
| G90                | Programiranje u apsolutnim dimenzijama.  |
| G91                | Programiranje u inkrementalnim dimenzijama.  |

**Tablica 3.** M-naredbe [12]

| <b>M-naredbe - standardne</b> | <b>Značenje</b>  |
|-------------------------------|--|
| M0                            | Programirani stop. Zaustavlja se rotacija vretena, posmak i dovođenje rashladnog sredstva. Koristi se kada se trebaju izvršiti neke dodatne operacije, za nastavak treba pritisnuti START (pokreni). |
| M1                            | Programirani uvjetni stop. Izvršava se kao i M0, ali se mora dodatno uključiti na upravljačkoj napravi.  |
| M2, M30                       | Kraj glavnog programa sa skokom na početak programa.   |
| M3                            | Uključivanje rotacije vretena u smjeru kazaljke na satu.   |
| M4                            | Uključivanje rotacije vretena u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu.   |
| M5                            | Zaustavljanje rotacije glavnog vretena. Primjenjuje se kada treba promijeniti smjer rotacije.  |
| M6                            | Izmjena alata. Uz naredbu stoji i broj alata.  |
| M7                            | Uključivanje rashladnog sredstva 2.  |
| M8                            | Uključivanje rashladnog sredstva 1.  |
| M9                            | Isključivanje rashladnog sredstva.   |
| M95                           | Zaustavljanje rotacije vretena i dovođenja rashladnog sredstva.  |
| <b>M-naredbe - dodatne</b>    |  |
| M17                           | Kraj potprograma.  |
| M19                           | Stop glavnog vretena u definiranom kutnom položaju.  |
| M41                           | Rad u području broja okretaja 1.   |
| M42                           | Rad u području broja okretaja 2.   |
| M43                           | Rad u području broja okretaja 3.   |
| M44                           | Rad u području broja okretaja 4.   |

## 4. Glodanje aluminija na HAAS glodalici

Zadatak u ovom eksperimentu bio je izglodati sirovac od aluminija, dimenzija 15 x 33 x 240 mm s obje strane, ali različitim posmacima kako bi se kasnije mogla izmjeriti hrapavost obrađenih površine te usporediti rezultati.

Glodala se aluminijska legura EN AW 6082, odnosno AlSi1MgMn. Ova legura je srednje čvrstoće s izvrsnom otpornošću na koroziju. Kad je u obliku ploče, ova legura je najviše korištena u strojnoj obradi. Ova relativno nova legura zamijenila je leguru 6061 u mnogim primjenama, a dodatak velike količine mangana (Mn) kontrolira strukturu zrna, što zauzvrat rezultira jačom legurom. Primjena: dizalice, mostovi, koristi se u uvjetima visokih opterećenja i sl. [14] U tablici 4 prikazan je sastav legure AlSi1MgMn. Gornji i donji brojevi znače granične vrijednosti udjela.

**Tablica 4.** Kemijski sastav aluminijske legure AlSi1MgMn [14]

| Oznaka<br>ISO | Maseni udio / % |     |     |     |     |     |      |     |
|---------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
|               | Al +            |     |     |     |     |     |      |     |
|               | Cu              | Mg  | Si  | Fe  | Zn  | Mn  | Cr   | Ti  |
| AlSi1MgMn     | -               | 0,6 | 0,7 | -   | -   | 0,4 | -    | -   |
|               | 0,10            | 1,2 | 1,3 | 0,5 | 0,2 | 1,0 | 0,25 | 0,1 |

Glodanje se odrađivalo na CNC HAAS desktop mill stroju (slika 17) koje posjeduje sveučilište. Eksperiment se sastojao od dva dijela, proučavanje uputa za rad na stroju i upravljanje istim te samog glodanja sirovca, odnosno programiranja. Na slici 18 prikazan je zadani tehnički crtež s vanjskim dimenzijama sirovca te stepenicama koje je bilo potrebno izglodati. Plan je bio izglodati dva milimetra u dubinu na rubovima sirovca, te 15 mm prema centru sirovca. U tablici 5 nalaze se parametri korišteni u obradi.

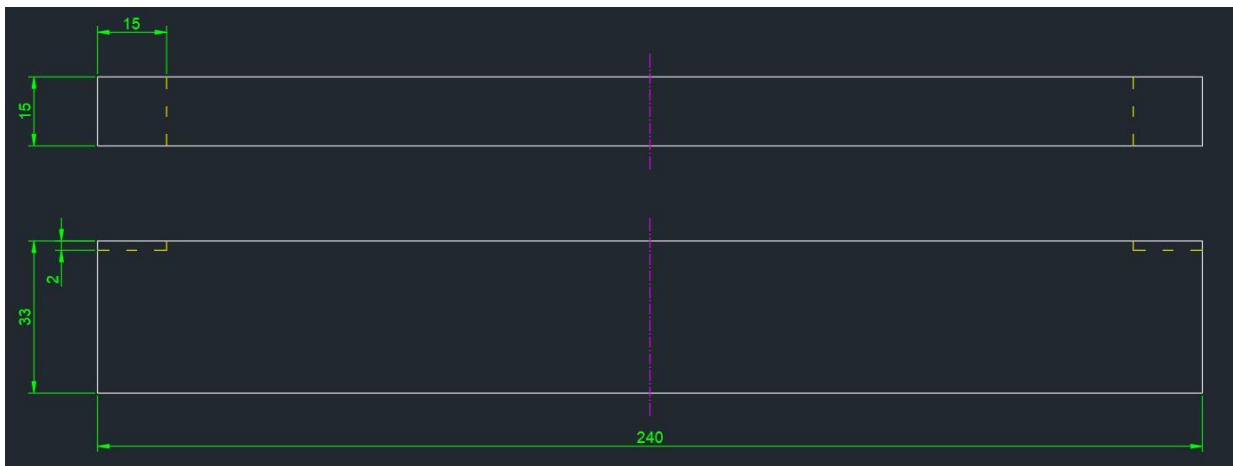
Na slici 19 prikazan je korišteni alat, glodalo promjera šest mm napravljeno od brzoreznog čelika.

**Tablica 5.** Parametri korišteni u obradi [18]

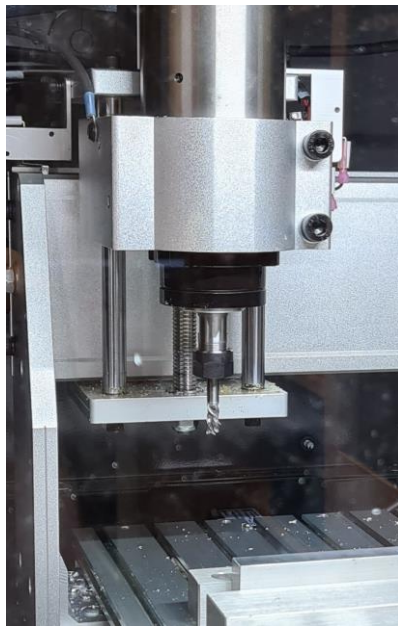
|                            |                   |
|----------------------------|-------------------|
| <b>Dubina rezanja</b>      | 2 mm              |
| <b>Broj prolaza</b>        | 11                |
| <b>Brzina vrtnje alata</b> | 4000 okretaja/min |
| <b>Posmak 1</b>            | 264 mm/min        |
| <b>Posmak 2</b>            | 360 mm/min        |



**Slika 17.** HAAS desktop mill stroj [18]



**Slika 18.** Tlocrt (gornji) i nacrt (donji) zadanog zadatka [18]



**Slika 19.** Korišteni alat (glodalo) [18]

## 4.1. Upravljačka jedinica

Upravljačka jedinica dio je svakog CNC stroja te služi za upravljanje samim strojem. Preko nje se može programirati ili pokretati programe CNC stroja. Na slici 20 nalazi se upravljačka jedinica HAAS stroja. Ona se sastoji od kontrola na prednjoj ploči, tipkovnice i zaslona. Tablica 6 pobliže objašnjava sve što spada u kontrole prednje ploče.



**Slika 20.** Upravljačka jedinica HAAS stroja [18]

**Tablica 6.** Kontrole na prednjoj ploči upravljačke jedinice [15]

| IME                   | SLIKA | FUNKCIJA  |
|-----------------------|-------|---|
| Uključi               |       | Uključuje stroj.  |
| Isključi              | ○     | Isključuje stroj.   |
| Zaustavljanje u nuždi |       | Potpuno zaustavlja sve kretnje unutar stroja: kretanje po osima, vrtnju vretena i izmjenjivač alata te isključuje dovod emulzije. |
| Ručka za pomicanje    |       | Koristi se za pomicanje alata po osima. Također se koristi i za kretanje kroz programski kod tijekom izmjena.                     |
| Pokretanje ciklusa    |       | Pokreće program. Također se koristi i za pokretanje simulacije programa u grafičkom načinu rada.                                  |
| Zaustavljanje osi     |       | Zaustavlja kretanje po osima, no svrdlo se nastavlja vrtjeti.   |



Tipkovnica upravljačke jedinice prikazana je na slici 21, a može se podijeliti na sljedeći način:

1. Funkcijske tipke – tipke koje upravljaju strojem te imaju različite funkcije ovisno o odabranom izborniku
2. Kursor tipke – služe za kretanje između blokova programa, listanje kroz programe i kretanje kroz izbornike
3. Tipke zaslona – njima se mijenja prozor na zaslonu, pokazuju se razne informacije i pomoći tijekom rada
4. Tipke načina rada – njima se mijenja radno stanje stroja, svaka strelica u obliku je strelice i pokazuje na red tipki povezanih s određenim načinom rada
5. Numeričke tipke
6. Slova
7. Tipke za kretanje po osima – ručno upravljanje kretanja po osima, pomicanje mlaznice emulzije i pomicanje sistema za odstranjivanje strugotine
8. *Override* (nadjačati) tipke – njima se privremeno može prilagoditi brzina i posmak u programu. [15]



Slika 21. Tipkovnica upravljačke jedinice stroja [15]

## 4.2. Stezanje sirovca i određivanje nul-točke

Prije početka programiranja trebalo je odraditi neke pripreme, kao što su: mjerenje sirovca, stezanje sirovca u stroj i određivanje nul-točke. Mjere sirovca bile su 15 x 33 x 240 mm.

Kod stezanja sirovca naišla su dva problema. Prvi problem bila je duljina sirovca koja je bila preduga za radni prostor stroja. Iz tog razloga bilo je nužno postaviti steznu napravu tako da je stroj bio ograničen u kretnji po osi Y, no to nije bio problem budući da je sirovac bio relativno tanak. Drugi problem nadovezao se na prvi, zbog predugog sirovca nije se moglo izvršiti glodanje obje strane u jednom pokretanju programa. To je značilo da po završetku glodanja jedne strane, sirovac morao biti izvađen, okrenut i ponovno stegnut. Kako bi se uštedjelo na vremenu i pojednostavio postupak određivanja nul-točke, koristilo se pomično mjerilo (slika 22) kao graničnik pri ponovnom stezanju sirovca (slika 23). Tako je sirovac bio na potpuno istom mjestu i moglo se glodati s istom nul-točkom te programom kao i za prvu izgledanu površinu.



**Slika 22.** Pomično mjerilo [18]



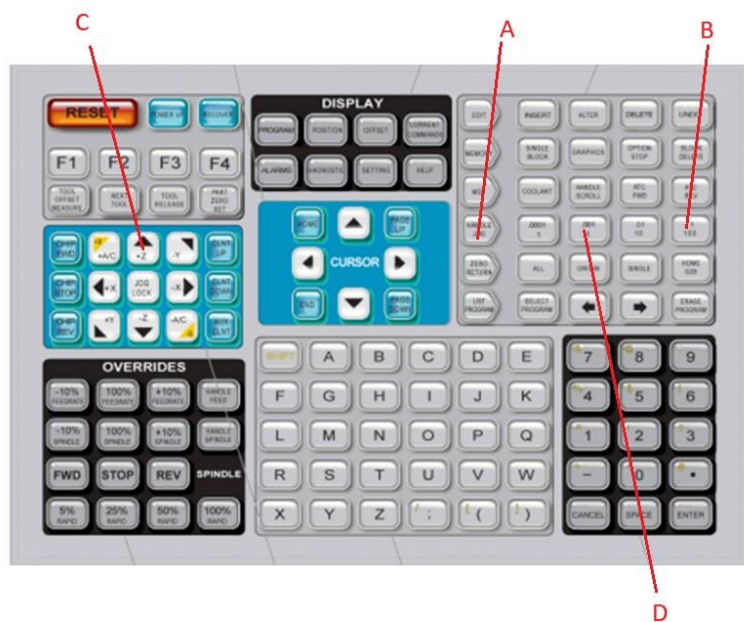
**Slika 23.** Pomično mjerilo kao graničnik [18]

Nakon što je sirovac stegnut (slika 24), krenulo se određivati nul-točku. Nul-točka je bitna iz razloga kako bi stroj uopće znao gdje se nalazi sirovaca u radnom prostoru.

Određuje se na sljedeći način (slika 25). Nakon stezanja sirovca, u steznu glavu na glavnom vretenu stavlja se alat ako već nije montiran. Zatim se pritišće „HANDLE JOG“ (A) što omogućuje pomicanje alata po osima. Pritisne se „1/100“ (B) tipka, sada se glodalo kreće većom brzinom kada se pomiče ručka. Nakon toga pritisne se „+Z“ (C) te se svrdlo približi na 2,5 cm iznad sirovca. Pritisne se „001/1“ (D), sada se glodalo kreće malom brzinom kada se ručka okreće. Svrdlo se spušta do sirovca, a između njih stavlja se papir. Kada se papir ne može više pomicati, spremi se očitana koordinata te se ponovi postupak za ostale osi. Ta nul-točka se kasnije učitava u program.



Slika 24. Stegnuti sirovac [18]

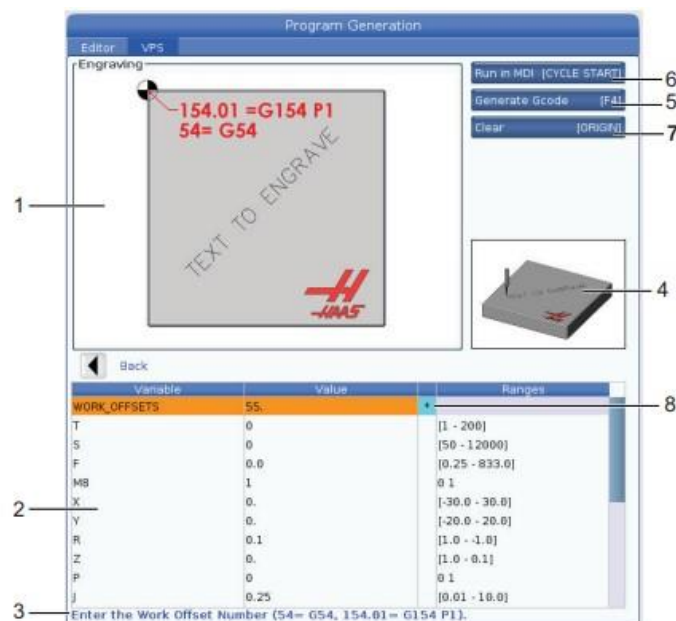


Slika 25. Određivanje nul-točke na HAAS stroju [15]

### 4.3. VPS (Visual Programming System)

Bitan dio izrade programa bilo je korištenje VPS (*Visual Programming System, Sistem za vizualno programiranje*) potprograma koji su uvelike olakšali izradu samog programa. VPS se koristi za brzu izradu programa iz programskih predložaka. Odabire se VPS predložak za obradu koja nam je potrebna, a to mogu biti čeono glodanje, izrada provrta, graviranje teksta i sl. U ovom primjeru koristilo se čeono glodanje. VPS se izrađuje tako da se otvori VPS meni, odabere se potrebni predložak i zatim se ispune traženi parametri. Nakon toga se pritiskuje pokretanje ciklusa (*cycle start*) kako bi se pokrenuo program u MDI ciklusu (*Manual Data Input*) ili se može pritisnuti F4 kako bi se generirao kod koji se zatim može ubaciti u program. MDI je način rada u kojem je moguće pokretati nespripremljene programe ili blokove direktno iz upravljačke jedinice, odnosno moguće je upravljati strojem bez konkretnog koda. [15] Na slici 26 prikazan je prozor VPS potprograma u kojem se upisuju parametri za izradu. Na prozoru se nalaze sljedeći elementi:

1. prikaz nul-točke na obratku
2. tablica s parametrima
3. opis odabranog parametra
4. vizualni prikaz odabrane „šablone“
5. generiranje G-koda
6. pokretanje MDI ciklusa
7. brisanje
8. oznaka da je zadana vrijednost promijenjena. [15]



Slika 26. VPS prozor [15]

Na slici 27 prikazani su vrijednosti parametara za VPS, za čeono glodanje, koji se koristio u izradi ovog eksperimenta. Svaki parametar ima svoju vrijednost te raspon (*range*), a oni su:

- WORK\_OFFSETS = 54 – nultočka korištena u VPS-u, prethodno određena i spremljena
- T = 1 – broj alata
- S = 4000 – brzina vrtnje vretena
- F = 120 – posmak u mm/min
- D = 6 – promjer glodala
- M8 = 0 – emulzija (0 je ugašena emulzija, 1 upaljena)
- X = -3 – početna pozicija na X osi
- Y = -3 – početna pozicija na Y osi
- C = 1 – smjer iz kojeg se alat primiče obratku
- L = 12 – duljina glodanja po X osi, uzeto je 12 zbog polumjera glodala (3 mm)
- STEP = 16 – broj prolaza u obradi
- E = 0,75 – opterećenje glodala, odnosno koliko je mm glodalo u zahvatu (promjer glodala je šest mm, od čega se bočno u materijal ulazi 0,75 mm)
- Z = -2 – ukupna dubina glodanja
- DEPTH = 11 – broj prolaza alata do ukupne dubine glodanja
- FIN = 0,1 – fina obrada na kraju
- Q = 0,182 – dubina koja se izgloda pri jednom prolazu alata
- END\_M\_CODE = 30 – završetak programa [15]

| Variable     | Value |   | Ranges           |
|--------------|-------|---|------------------|
| WORK_OFFSETS | 54.   |   |                  |
| T            | 1     |   | [1 - 200]        |
| S            | 4000  | * | [50 - 24000]     |
| F            | 120.  | * | [0.025 - 3600.]  |
| D            | 6.    | * | [0. - 152.4]     |
| M8           | 0     | * | 0 1              |
| X            | -3.   | * | [-152.4 - 152.4] |
| Y            | -3.   | * | [-254. - 254.]   |
| C            | 1     | * | 0 1 2 3          |
| L            | 12.   | * | [0. - 152.4]     |
| STEP         | 16    | * | [1 - 20]         |
| E            | 0.75  | * | [0. - 6.]        |
| R            | 0.    | * | [-75. - 75.]     |
| TOP          | 0.    |   | [-75. - 0.]      |
| Z            | -2.   | * | [-75. - 0.]      |
| DEPTH        | 11    | * | [1 - 20]         |
| FIN          | 0.1   | * | [0. - 0.182]     |
| Q            | 0.182 |   | [0.182 - 0.182]  |
| END_M_CODE   | 30    |   | 0 1 30           |

Enter the Work Offset Number (54= G54, 154.01= G154 P1).

Slika 27. Parametri VPS-a, čeono glodanje [18]

#### 4.4. Programski kod

Napravljen je programski kod kojim se izglodao traženi oblik predmeta. Program se izvodi tako da VPS potprogram obavlja čeono glodanje do dubine dva mm, te se ponavlja za svaki pomak osi X. Vrijednost posmaka u VPS parametrima zadana je 120 mm/min, te se zatim ručno povećala 2,2 puta na jednoj strani (rezultat je 264 mm/min) i 3,0 puta na drugoj strani (rezultat je 360 mm/min). Na početku koda nalaze se G-naredbe koje definiraju sljedeće:

- G00 – gibanje alata brzim hodom, gibanje alata najvišom brzinom koju stroj može razviti, koristi se kad nema kontakta alata i obratka
- G17 – definira XY ravninu kao radnu ravninu
- G40 – obrada bez uključene kompenzacije radijusa alata
- G49 – obrada bez uključene kompenzacije duljine alata
- G80 – osigurava da nema kretnji po osima, nakon nje mora se programirati G00 ili G01
- G90 – programiranje u apsolutnim dimenzijama.

```
000019 (xxxxx);
```

```
(Face Milling);
```

```
( FACING, STARTING FROM BACK RIGHT);
```

```
G00 G17 G40 G49 G80 G90;
```

```
T1 M06;
```

```
G00 G90 G54 X-0.75 Y0.6 S4000 M03;
```

```
G43 H01 Z0.;
```

```
G01 Z-0.08 F60.;
```

```
M97 P51;
```

```
;
```

```
G01 Z-0.262 F60.;
```

```
M97 P51;
```

```
;
```

```
G01 Z-0.444 F60.;
```

```
M97 P51;
```

```
G01 Z-0.626 F60.;
```

```
M97 P51;
```

```
G01 Z-0.808 F60.;
```

```
M97 P51;
```

G01 Z-0.99 F60.;;  
M97 P51;  
G01 Z-1.172 F60.;;  
M97 P51;  
G01 Z-1.354 F60.;;  
M97 P51;  
G01 Z-1.536 F60.;;  
M97 P51;  
G01 Z-1.718 F60.;;  
M97 P51;  
G01 Z-1.9 F60.;;  
M97 P51;  
G01 Z-2. F60.;;  
M97 P51;  
M99 P62 ( GO TO END );  
N51 ( FACING PASSES );  
Y-18.6 F120.;;  
G91 Z0.364 F60.;;  
G00 G90 Y0.6;  
X-1.5;  
G01 G91 Z-0.364 F60.;;  
G90 Y-18.6 F120.;;  
G91 Z0.364 F60.;;  
G00 G90 Y0.6;  
X-2.25;  
G01 G91 Z-0.364 F60.;;  
G90 Y-18.6 F120.;;  
G91 Z0.364 F60.;;  
X-3.;;  
G01 G91 Z-0.364 F60.;;  
G90 Y-18.6 F120.;;  
G91 Z0.364 F60.;;  
G00 G90 Y0.6;

X-3.75;

G01 G91 Z-0.364 F60.;

G90 Y-18.6 F120.;

G91 Z0.364 F60.;

G00 G90 Y0.6;

X-4.5;

G01 G91 Z-0.364 F60.;

G90 Y-18.6 F120.;

G91 Z0.364 F60.;

G00 G90 Y0.6;

X-5.25;

G01 G91 Z-0.364 F60.;

G90 Y-18.6 F120.;

G91 Z0.364 F60.;

G00 G90 Y0.6;

X-6.;

G01 G91 Z-0.364 F60.;

G90 Y-18.6 F120.;

G91 Z0.364 F60.;

G00 G90 Y0.6;

X-6.75;

G01 G91 Z-0.364 F60.;

G90 Y-18.6 F120.;

G91 Z0.364 F60.;

G00 G90 Y0.6;

X-7.5;

G01 G91 Z-0.364 F60.;

G90 Y-18.6 F120.;

G91 Z0.364 F60.;

G00 G90 Y0.6;

X-8.25;

G01 G91 Z-0.364 F60.;

G90 Y-18.6 F120.;

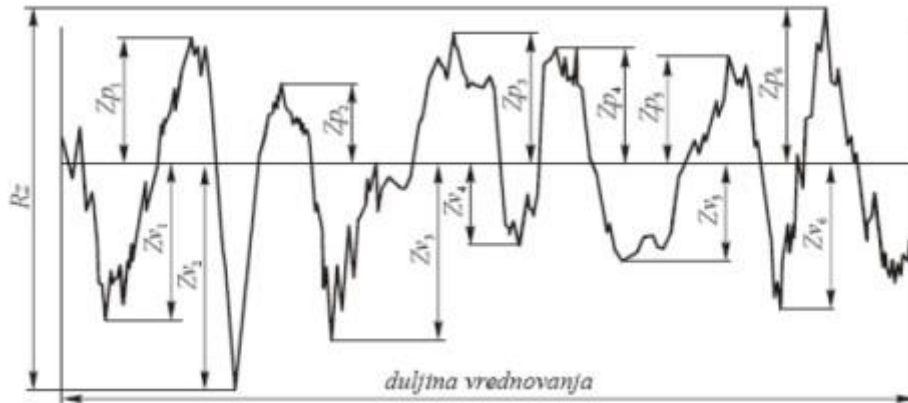


G91 Z0.364 F60.;;  
G00 G90 Y0.6;  
X-9;  
G01 G91 Z-0.364 F60.;;  
G90 Y-18.6 F120.;;  
G91 Z0.364 F60.;;  
G00 G90 Y0.6;  
X-9.75;  
G01 G91 Z-0.364 F60.;;  
G90 Y-18.6 F120.;;  
G91 Z0.364 F60.;;  
G00 G90 Y0.6;  
X-10.5;  
G01 G91 Z-0.364 F60.;;  
G90 Y-18.6 F120.;;  
G91 Z0.364 F60.;;  
G00 G90 Y0.6;  
X-11.25;  
G01 G91 Z-0.364 F60.;;  
G90 Y-18.6 F120.;;  
G91 Z0.364 F60.;;  
G00 G90 Y0.6;  
X-12;  
G01 G91 Z-0.364 F60.;;  
G90 Y-18.6 F120.;;  
G00 Z0.;;  
X-0.75 Y0.6;  
M99 (END OF FACING PASSES );  
N62 M09;  
G00 G90 G53 ZO M05;  
M30 (END VPS FACING );

## 4.5. Hrapavost

Površinska hrapavost predstavlja sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta (koje su mnogo manje od površine cijelog predmeta), a uzrokovane su postupkom obrade ili nekim drugim utjecajima (npr. posmak). [16]

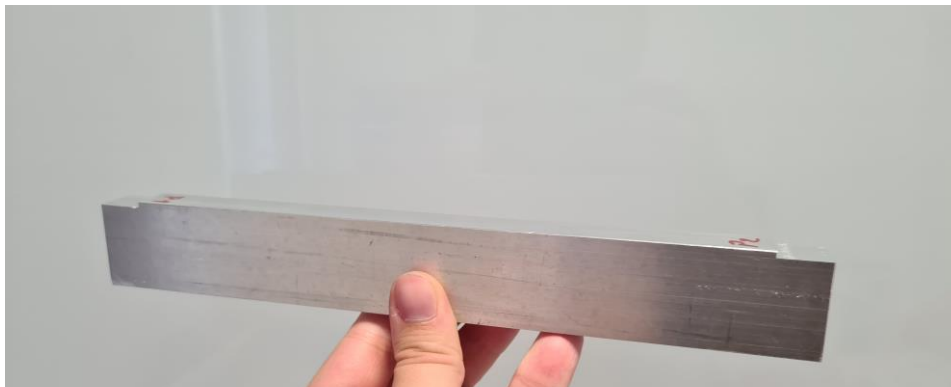
Bitna veličina koja opisuje hrapavost površine je maksimalna visina profila  $R_z$ . To je zbroj duljine najveće visina vrha profila  $Z_p$  i najveće dubine dna profila  $Z_v$  na određenoj dužini vrednovanja (slika 28). Što je ta razlika veća, površina je hrapavija. [16]



**Slika 28.** Maksimalna visina profila  $R_z$  [16]

Srednje aritmetičko odstupanje mjenog profila  $R_a$ , predstavlja aritmetički prosjek apsolutne vrijednosti  $Z(x)$  na dužini uzorka. Kod izračunavanja srednjeg aritmetičkog odstupanja profila  $R_a$ , potrebno je snimiti najveće visine profila  $Z_p$  i najveće dubine profila  $Z_v$  i potom odrediti srednju liniju hrapavosti. [16] Za grubo glodanje  $R_a$  iznosi između 3,2 i 25  $\mu\text{m}$ , a za završno glodanje između 0,4 i 3,2  $\mu\text{m}$ . [17]

Predmet koji je obrađen u eksperimentu (slika 29), s jedne strane obrađen je s posmakom od 264 mm/min, dok je s druge strane obrađen s posmakom od 360 mm/min. Cilj je bio utvrditi kakve će hrapavosti površine biti s obzirom na vrijednost posmaka.



**Slika 29.** Obađeni predmet nakon glodanja [18]

Nakon obrade uređajem za mjerenje hrapavosti površine (slika 30) izmjerena je hrapavost sa svake strane. Uređaj funkcionira tako da ticalo koje mjeri hrapavost prelazi preko obrađene površine te mjeri najveće visine i dubine, te na kraju izbacuje srednje aritmetičko odstupanje mjerenog profila,  $R_a$  (slika 31). Obavljeno je više mjerenja te su rezultati prikazani u tablici 7. Izmjereni rezultati pokazali su da je pri manjoj posmičnoj brzini  $R_a$  manji od onog pri većoj posmičnoj brzini. Prosječni  $R_a$  za manju posmičnu brzinu iznosio je  $0,392 \mu\text{m}$ , a za veću  $0,616 \mu\text{m}$ .

**Tablica 7.** Mjerenja hrapavosti površina [18]

|                                | Hrapavost površine, $R_a$ , $\mu\text{m}$ |                          |
|--------------------------------|---|--------------------------|
|                                | $f = 264 \text{ mm/min}$                  | $f = 360 \text{ mm/min}$ |
| 1. mjerenje                    | 0,36                                      | 0,50                     |
| 2. mjerenje                    | 0,44                                      | 0,56                     |
| 3. mjerenje                    | 0,44                                      | 0,84                     |
| 4. mjerenje                    | 0,32                                      | 0,68                     |
| 5. mjerenje                    | 0,40                                      | 0,50                     |
| Srednja (prosječna) vrijednost | 0,392                                     | 0,616                    |



**Slika 30.** Uređaj za mjerenje hrapavosti površine [18]



**Slika 31.** Prikaz mjerenja na zaslonu uređaja [18]

## 5. Zaključak

Cilj ovog završnog rada bio je opisati obradu odvajanjem čestica s fokusom na CNC glodanje, te prikaz obrade na primjeru u praksi. Obrada odvajanjem čestica koristi se u industriji u cijelom svijetu. Suvremena proizvodnja nametnula je razne zahtjeve i trendove u industrijskog proizvodnji od kojih je najbitniji napraviti što kvalitetniji proizvod, u što kraćem vremenu sa što manjim troškovima izrade i otpadom. Iz takvih zahtjeva proizašle su razne tehnologije obrade odvajanjem čestica, a možda najbitnija među njima je upravo CNC obrada. Ona je uvelike smanjila vrijeme obrade, pojavila se mogućnost automatizacije proizvodnje, a s CAM/CAD sustavima moguće je i vrlo jednostavno i brzo pisanje programa i generiranje G-koda.

U eksperimentalnom dijelu rada konkretno je prikazano CNC glodanje aluminija. Prikazan je HAAS stroj te njegovo upravljanje. Opisani su problemi na koje je moguće naići već u samoj pripremi sirovca za obradu. Može se primijetiti kako sami strojevi u sebi imaju ugrađen sistem koje preko vizualne interpretacije i parametara sam generira potprogram i tako dodatno skraćuje vrijeme pripreme za proizvodnju. Također, bitan zaključak može se donijeti iz testa hrapavosti obrađenih površina. Dobiveni rezultati mjerenja  $R_a$  poklapaju se s vrijednostima iz tablica u strojarskom priručniku za hrapavosti površine dobivene postupcima glodanja. Mjerenje je pokazalo kako je površina manje hrapava pri nižoj posmičnoj brzini, no ta obrada je trajala 21 minutu i 35 sekundi, dok je druga obrada trajala 14 minuta i četiri sekunde. Smanjenom posmičnom brzinom postignuta je bolja hrapavost pod cijenu duljeg vremena obrade, dok je veća posmična brzina rezultirala hrapavijom površinom pod cijenu kraćeg vremena obrade. Upravo s time je pokazano kako je u proizvodnji uvijek potrebno donositi neke kompromise, u ovom slučaju odluku što je bitnije proizvođaču, kratko vrijeme proizvodnje ili bolja kvaliteta proizvoda.

## Popis slika

- Slika 1.        Proizvodni proces [1]
- Slika 2.        Gibanja pri čeonom glodanju [2]
- Slika 3.        Obrada tokarskim nožem [2]
- Slika 4.        Mehanizmi trošenja reznih alata u ovisnosti o parametrima obrade [7]
- Slika 5.        Adhezijsko trošenje [9]
- Slika 6.        Abrazijsko trošenje: a) kod dodira dva tijela b) kod dodira s međutijelom [7]
- Slika 7.        Difuzijsko trošenje na primjeru s alatom od volframova karbida [8]
- Slika 8.        Oksidacijsko trošenje [9]
- Slika 9.        Primjer dovođenja i primjena SHIP-a [10]
- Slika 10.       Vrste strugotine i dijagram naprezanja [6]
- Slika 11.       Shematski prikaz upravljanja CNC strojem [11]
- Slika 12.       Fleksibilna obradna ćelija [11]
- Slika 13.       Položaj referentne točke na reznom alatu [11]
- Slika 14.       Koordinatni sustav kod CNC strojeva [12]
- Slika 15.       Referentne i nul-točke CNC stroja [12]
- Slika 16.       Određivanje nul-točke obratka [12]
- Slika 17.       HAAS desktop mill stroj [18]
- Slika 18.       Tlocrt (gornji) i nacrt (donji) zadanog zadatka [18]
- Slika 19.       Korišteni alat (glodalo) [18]
- Slika 20.       Upravljačka jedinica HAAS stroja [18]
- Slika 21.       Tipkovnica upravljačke jedinice stroja [15]
- Slika 22.       Pomično mjerilo [18]
- Slika 23.       Pomično mjerilo kao graničnik [18]
- Slika 24.       Stegnuti sirovac [18]
- Slika 25.       Određivanje nul-točke na HAAS stroju [15]
- Slika 26.       VPS prozor [15]
- Slika 27.       Parametri VPS-a, čeono glodanje [18]
- Slika 28.       Maksimalna visina profila Rz [16]
- Slika 29.       Obradeni predmet nakon glodanja [18]
- Slika 30.       Uređaj za mjerenje hrapavosti površine [18]
- Slika 31.       Prikaz mjerenja na zaslonu uređaja [18]

## **Popis tablica**

- Tablica 1. Blok NC programa [11]
- Tablica 2. G-naredbe [12]
- Tablica 3. M-naredbe [12]
- Tablica 4. Kemijski sastav aluminijske legure AlSi1MgMn [14]
- Tablica 5. Parametri korišteni u obradi [18]
- Tablica 6. Kontrole na prednjoj ploči upravljačke jedinice [15]
- Tablica 7. Mjerenja hrapavosti površina [18]

## Literatura

- [1] Z. Botak: Tehnologija I, Prezentacija: Uvodno predavanje Obrade odvajanjem čestica, Sveučilište Sjever
- [2] [https://edu.asoo.hr/wp-content/uploads/2024/03/130\\_Obrade-odvajanjem-%C4%8Destica\\_DORADA-1-FINAL.pdf](https://edu.asoo.hr/wp-content/uploads/2024/03/130_Obrade-odvajanjem-%C4%8Destica_DORADA-1-FINAL.pdf) dostupno 22.07.2024.
- [3] J. Kovčalića: Karakteristike obrade s odvajanjem čestica – glodanje, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2018.
- [4] <https://www.essentracomponents.com/en-us/news/solutions/access-hardware/what-is-high-speed-steel> dostupno 23.07.2024.
- [5] <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/sinteriranje.pdf> dostupno 23.07.2024.
- [6] Z. Botak: Tehnologija I, Prezentacija: Osnove obrade odvajanjem čestica, Sveučilište Sjever
- [7] N. Sirovec: Analiza karakterističnih mehanizama trošenja reznih alata, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [8] [http://bib.irb.hr/datoteka/651766.Zvonimir\\_Dadic\\_Triboloski\\_principi.pdf](http://bib.irb.hr/datoteka/651766.Zvonimir_Dadic_Triboloski_principi.pdf) dostupno 24.07.2024
- [9] M. Klaić: Indirektni nadzor istrošenosti alata i tvrdoće obratka kod bušenja kamena, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [10] D. Družinec: Sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje – utjecaj na sile rezanja kod bušenja kamena, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [11] M. Bušić: CNC obradni sustavi, Prezentacija: 1. predavanje, Sveučilište Sjever
- [12] M. Bušić: CNC obradni sustavi, Prezentacija: 2. predavanje, Sveučilište Sjever
- [13] <https://cnc.com.hr/g-kod/> dostupno 07.08.2024.
- [14] [https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy\\_6082-T6~T651\\_148.ashx](https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy_6082-T6~T651_148.ashx) dostupno 13.09.2024.
- [15] <https://www.haascnc.com/owners/Service/operators-manual.html> dostupno 08.08.2024.
- [16] V. Banožić: Utjecaj hrapavosti površine na Knoopovu tvrdoću Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> keramike, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [17] B. Kraut: Krautov strojarski priručnik, Zagreb, 2009.
- [18] Fran Tepeš – vlastita arhiva fotografija i podataka