

# Visokobrzinska obrada glodanjem

---

Šaronja, Valentino

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:188528>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-18**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





# Sveučilište Sjever

**Završni rad br. 403/PS/2022**

## **Visokobrzinska obrada glodanjem**

**Valentino Šaronja, 4195/336**

Varaždin, listopad 2022. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za strojarstvo

Završni rad br. 403/PS/2022

## Visokobrzinska obrada glodanjem

**Student**

Valentino Šaronja, 4195/336

**Mentor**

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

Varaždin, listopad 2022. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo		
PRISTUPNIK	Valentino Šaronja	JMBAG	4195/336
DATUM	17.10.2022.	KOLEGIJ	CNC obradni sustavi
NASLOV RADA	Visokobrzinska obrada glodanjem		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	High speed milling		
MENTOR	dr. sc. Matija Bušić	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc. dr. sc. Jasna Leder Horina, predsjednica povjerenstva		
	2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva		
	3. doc. dr. sc. Zlatko Botak, član povjerenstva		
	4. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, zamjenski član povjerenstva		
	5. _____		

## Zadatak završnog rada

BROJ	403/PS/2022
OPIS	

U završnom radu potrebno je, na temelju dostupne literature, definirati visokobrzinsku obradu odvajanjem čestica. U uvodnom dijelu rada potrebno je navesti i opisati utjecajne faktore u obradi odvajanjem čestica o kojima ovisi produktivnost samog postupka. Zatim je potrebno prikazati povijesni razvoj visokobrzinske obrade. Nadalje je potrebno razjasniti što je viskobrzinska obrada za postupke glodanja i tokarenja. Na temelju dostupnih podataka proizvođača potrebno je opisati i dati primjere alata i strojeva koji se koriste za visokobrzinsku obradu. Na kraju rada donijeti zaključak o obrađenoj temi. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu te eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

18.10.2022



M. Bušić

# **Predgovor**

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na pomoći i na korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na strpljenju i pruženoj podršci tijekom studiranja

## Sažetak

Obrada odvajanjem čestica ima veliku ulogu u modernoj tehnologiji. Jedna od modernijih tehnologija obrade je i visokobrzinska obrada. Najpogodniji postupak visokobrzinske obrade je glodanje. Zbog visokih brzina rotacije dio koji se rotira mora biti u savršenom balansu kako bi se spriječile vibracije koje pak utječu na konačnu kvalitetu proizvoda. Iz tog razloga glodanje je najpovoljniji postupak visokobrzinske obrade jer kod glodanja glavno kretanje izvodi alat čija je masa konstantna dok naprimjer kod tokarenja to nije slučaj. Visokobrzinskom obradom glodanjem također se smanjuju vrijeme i troškovi obrade što u konačnici povećava profit tvrtkama koje primjenjuju ovu tehnologiju obrade. Važnu ulogu imaju i alatni strojevi kao i rezni alati. Bez modernog alatnog stroja ukomponiranog s odgovarajućim reznim alatom nema ni očekivane produktivnosti.

**Ključne riječi:** visokobrzinska obrada, glodanje, rezni alati, alatni strojevi.

## Summary

Processing by separating particles plays a major role in modern technology. One of the modern working technologies is also high-speed cutting. The most optimal high-speed cutting procedure is milling. Because of high rotation speed, the rotating part must be in perfect balance to prevent vibrations which affect on final product quality. For that reason milling is the most optimal high-speed cutting procedure because in milling, the main movement is performed by the tool whose mass is constant while, for example, this is not the case with turning. By high-speed milling time and costs are also reduced which ultimately increases the profits of companies that apply this technology. Machine tools and cutting tools also play an important role. Without a modern machine tool combined with an appropriate cutting tool, there is none expected productivity.

**Keywords:** high-speed cutting, milling, cutting tools, machine tools.

## Popis korištenih kratica

<b>OOČ</b>	Obrada odvajanjem čestica
<b>VBO</b>	Visokobrzinska obrada
<b>NC</b>	Numeričko upravljanje (eng. Numerical Control)
<b>CNC</b>	Računalno numeričko upravljanje (eng. Computer Numerical Control)
<b>CAM</b>	Računalno potpomognuta proizvodnja (eng. Computer aided manufacturing)
<b>CAD</b>	Računalno potpomognuto dizajniranje (eng. Computer aided design)
<b>HSC</b>	Visokobrzinska obrada (eng. High-speed cutting)
<b>SHIP</b>	Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje
<b>CBN</b>	Kubični borov nitrid
<b>HV</b>	Tvrdoća po vickersu
<b>PCD</b>	Polikristalni dijamant
<b>PDC</b>	polikristalni dijamantni kompozit

## Popis fizikalnih veličina

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$v_c$	m/min	brzina rezanja
$n$	min <sup>-1</sup>	brzina glavnog vretena
$v_f$	mm/min	brzina posmaka alata
$Q$	mm <sup>3</sup> /min	stopa skidanja materijala
$D$	mm	promjer alata
$f$	mm	posmak
$z$	-	broj zuba glodala
$f_z$	mm	posmak po zubu glodala
$a_p$	mm	aksijalna dubina rezanja
$a_e$	mm	radijalna dubina rezanja
$P$	W	snaga alatnog stroja
$\eta$	%	stupanj iskorištenja alatnog stroja
$k$	N/mm <sup>2</sup>	specifični otpor rezanja



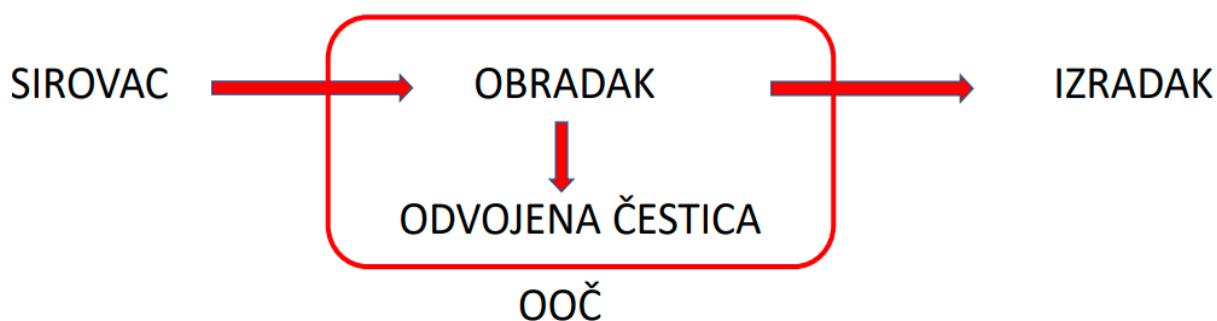
# Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Povijesni razvoj.....	3
2.1.	Povijesni razvoj OOČ.....	3
2.2.	Povijesni razvoj VBO.....	4
3.	Osnovno o VBO.....	7
3.1.	Prednosti visokobrzinske obrade.....	9
3.2.	Nedostatci visokobrzinske obrade.....	10
4.	Glodanje.....	12
4.1.	Konvencionalno glodanje u odnosu na visokobrzinsku obradu.....	19
4.2.	Dinamično glodanje.....	20
4.3.	Trohoidna obrada.....	21
4.4.	Alati za VBO.....	22
4.5.	Alatni strojevi za VBO.....	27
5.	Zaključak.....	32
6.	Literatura.....	33

# 1. Uvod

Zbog povećanja zahtjeva prema konačnim proizvodima ili poluproizvodima počinju se primjenjivati neke nove tehnologije obrade. Najzastupljeniji način obrade je obrada odvajanjem čestica. Pred obradu odvajanjem čestica stavljaju se sve veći zahtjevi prema kvaliteti obrađene površine i brzini same obrade. Da bi se što uspješnije udovoljilo tim zahtjevima, a pritom se povećala produktivnost, preciznost, a u krajnju ruku i profit, razvijaju se i neke nove tehnologije obrade. Jedna od tih tehnologija je i visokobrzinska obrada glodanjem što je i tema ovog rada.

Obrada odvajanjem čestica se na najjednostavniji način može objasniti kroz sliku 1. Komad prije obrade može biti cijev, šipka, ploča, odljevak i slično, a taj komad naziva se sirovac. Sirovac koji se za vrijeme obrade nalazi na alatnom stroju naziva se obradak. Nakon završene obrade element koji se dobije naziva se izradak. Izradak može biti neki proizvod ili poluproizvod.

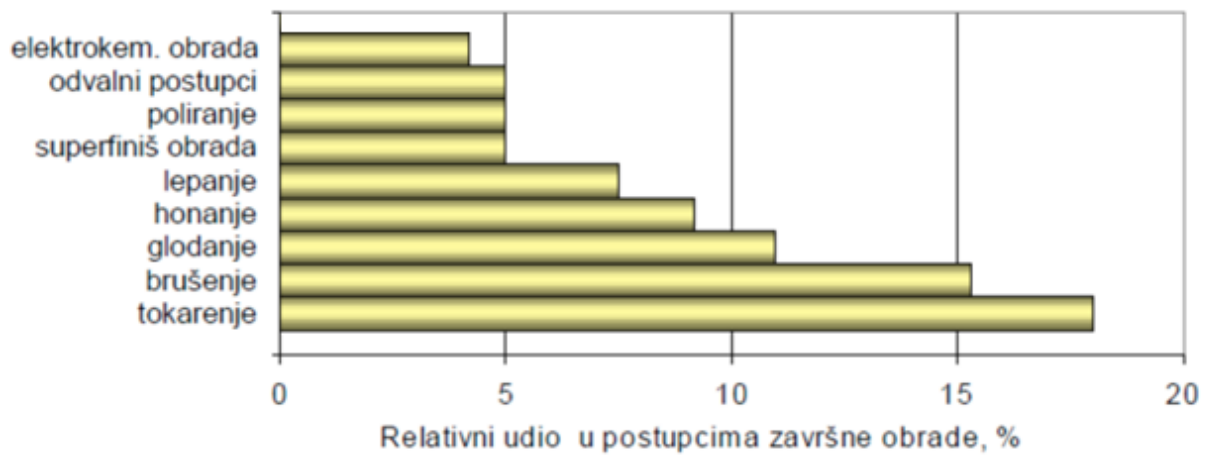


Slika 1. Postupak obrade odvajanjem čestica [1]

Za što efikasniju izradu proizvoda potrebni su i što suvremeniji obradni sustavi. Suvremeni obradni sustav podrazumijeva suvremeni rezni alat i suvremen alatni stroj. Ako se upotrebljava suvremeni rezni alat na starijim alatnim strojevima ili obrnuto ne može se očekivati da će izradak biti zahtijevane kvalitete. Zbog toga je potrebno pratiti trend razvoja reznih alata kao i alatnih strojeva te se u skladu s trendovima modernizirati. Jedino s takvim načinom poslovanja je moguće ostati konkurentan na tržištu.

Postoji mnogo postupaka obrade odvajanjem čestica. Najčešće korištene i najpoznatije tehnologije obrade odvajanjem čestica su glodanje i tokarenje. Postupkom tokarenja dobivaju se valjkaste plohe, ako je riječ o uzdužnom tokarenju ili ravne plohe ako je riječ o čeonom tokarenju. Kod postupka tokarenja materijal izvodi glavno gibanje dok je kod glodanja obrnuto. Glodanjem se mogu dobiti ravne i zakrivljene plohe, odnosno plohe proizvoljnih oblika. Kao što je već spomenuto kod glodanja glavno gibanje izvodi alat, a pomoćno gibanje koje izvodi obradak može

biti kontinuirane i proizvoljne putanje. Osim ta dva spomenuta postupka u praksi se često koriste i neki drugi što je prikazano na slici 2 gdje se vidi relativan udio u postupcima završne obrade.

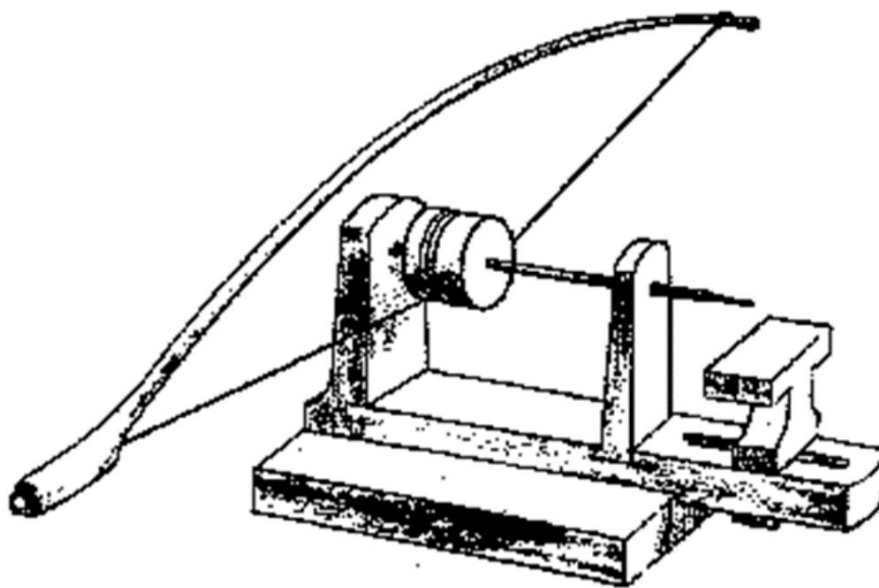


Slika 2. Relativni udio postupaka obrade odvajanjem čestica [2]

Visokobrzinska obrada moderna je tehnologija. Primjenom ovog postupka obrade postiže se veća učinkovitost, veća kvaliteta izradaka i točnost. Također smanjuju se i troškovi obrade kao i vrijeme potrebno za obradu. Ovaj postupak obrade počeo se primjenjivati tek s pojavom modernih alata i alatnih strojeva iako se s istraživanjem tehnologije visokobrzinske obrade krenulo 30-ih godina prošlog stoljeća.

## 2. Povijesni razvoj

Razvojem čovječanstva razvijaju se i neki novi alati, strojevi i tehnike obrade. Izumom parnog stroja i njegovom eksploatacijom dolazi do većeg zamaha u industriji i do sve bržeg razvoja industrije i novih tehnologija obrade. Pred obradu materijala postavljaju se novi sve stroži zahtjevi što za posljedicu ima razvoj novih alata, strojeva i tehnologija obrade. Razvojem računala i početkom primjene računala, razvoj tehnologija se dodatno ubrzava te se puno lakše zadovoljavaju zahtjevi koji se stavljaju pre određene proizvode.



Slika 3. Lučna bušilica [1]

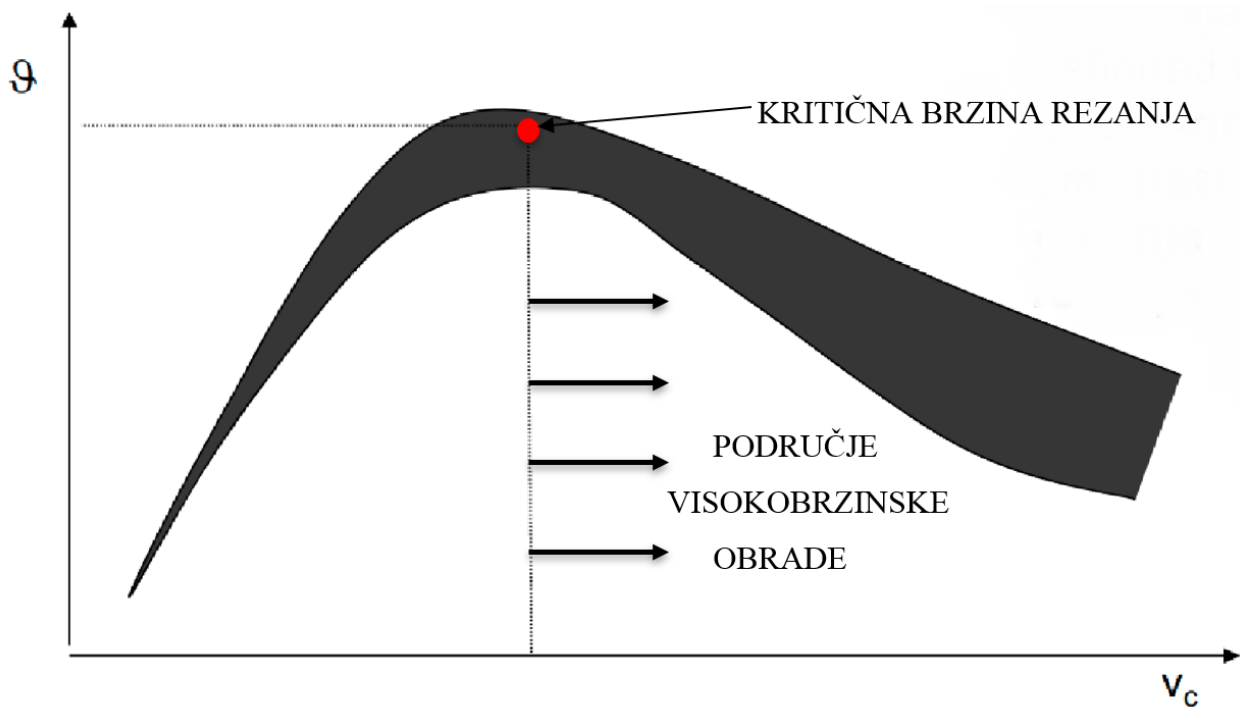
### 2.1. Povijesni razvoj OČ

Obrada odvajanjem čestica jedan je od glavnih načina obrade materijala. Materijal se prije industrijske revolucije obrađivao ručno (primjer lučne bušilice prikazan je na slici 3) ili uz pomoć jednostavnih strojeva koje je pogonila vodena energija. Parni stroj omogućio je razvoj alatnih strojeva jer je bio siguran izvor energije potrebne za pokretanje alatnih strojeva. Kasnije se za pogon počinju koristiti elektromotori. Većina osnovnih alatnih strojeva konstruirana je u 18. i 19. stoljeću. Zahvaljujući alatnim strojevima moguća je masovna proizvodnja što pokreće ubrzan razvoj industrije. Razvoj industrije zahtijeva i razvoj alatnih strojeva. Tako se u 20. stoljeću alatnim strojevima poboljšava točnost, povećava proizvodnost i uvodi se elektroničko upravljanje te automatizacija proizvodnje. Počinje se s razvojem nekih novih nekonvencionalnih postupaka

obrade. Od velike je važnosti razvoj visokodinamičkih alata kao i visokobrzinske obrade jer skraćuju vrijeme obrade 5 do 10 puta. S automatizacijom alatnih strojeva krenulo se vrlo rano. U početku su to bila upravljanja brzinom rezanja, posmakom i izmjenjivanjem različitih vrsta alata. Rješenja su bila mehanička. Pedesetih i šezdesetih godina prošlog stoljeća počeli su se razvijati numerički upravljani alatni strojevi, takozvani NC alatni strojevi. Strojovima se upravljalo uz pomoć bušenih vrpca, kartica ili magnetskim vrpcama. 1970 godine za upravljanje alatnim strojovima počinju se koristiti računala. Takvi strojevi nazivaju se CNC alatni strojevi. Njihova upotreba je jednostavnija i promjenom programa se vrlo lako mogu prilagoditi različitim radnjama čime se štedi mnogo vremena i izbjegavaju se pogreške koje se događaju kad se strojem upravlja ručno. Zahvaljujući većoj preciznosti količine otpada su smanjene jer je manje proizvoda s greškom. Održavanje i popravljavanje CNC strojeva je dosta skuplje u odnosu na univerzalne alatne strojeve. Iako je kod CNC strojeva mogućnost pogreške manja, ne može se jamčiti potpuno otklanjanje pogrešaka jer se stroj može nepravilno programirati ili se s njime nepravilno upravlja. Zbog svoje visoke cijene neisplativi su za radove manjeg opsega.

## **2.2. Povijesni razvoj VBO**

Početak 1920-ih dogodili su se prvi pokušaji strojne obrade velikom brzinom. Desetak godina kasnije, točnije 1931. godine Carl J. Salomon predložio je definiciju za visokobrzinsku obradu u kojoj je tvrdio da na određenoj brzini rezanja koja je 5 do 10 puta veća od konvencionalnih brzina rezanja, temperatura na mjestu dodira odvojene čestice i alata počeo će se smanjivati. Tu svoju tvrdnju potkrijepio je podacima koje je objavio nakon provedenog ispitivanja rezanja metala pri visokim brzinama. Ispitivanja je provodio na čeliku, bronci, bakru i aluminiju. Čelik je rezao brzinom od 440 m/min, broncu brzinom 1600 m/min, bakar 2840 m/min dok je aluminij rezao brzinom od 16500 m/min. Uz pomoć dobivenih rezultata izradio je grafikon koji je postao sinonim za učenje o visokobrzinskoj obradi te prikazuje ono što je poznatije kao Salomonova krivulja (slika 4.). Salomonova krivulja prikazuje ovisnost temperature o brzini rezanja. Spoznaja da se temperatura obrade ne povećava proporcionalno s povećanjem brzine rezanja ključni je trenutak za razvoj visokobrzinske obrade. Zahvaljujući njegovim istraživanjima izrađen je dijagram ovisnosti temperature o brzini rezanja. Na dijagramu je prikazana kritična brzina poslije koje temperatura rezanja počinje opadati te tada započinje postupak visokobrzinske obrade.

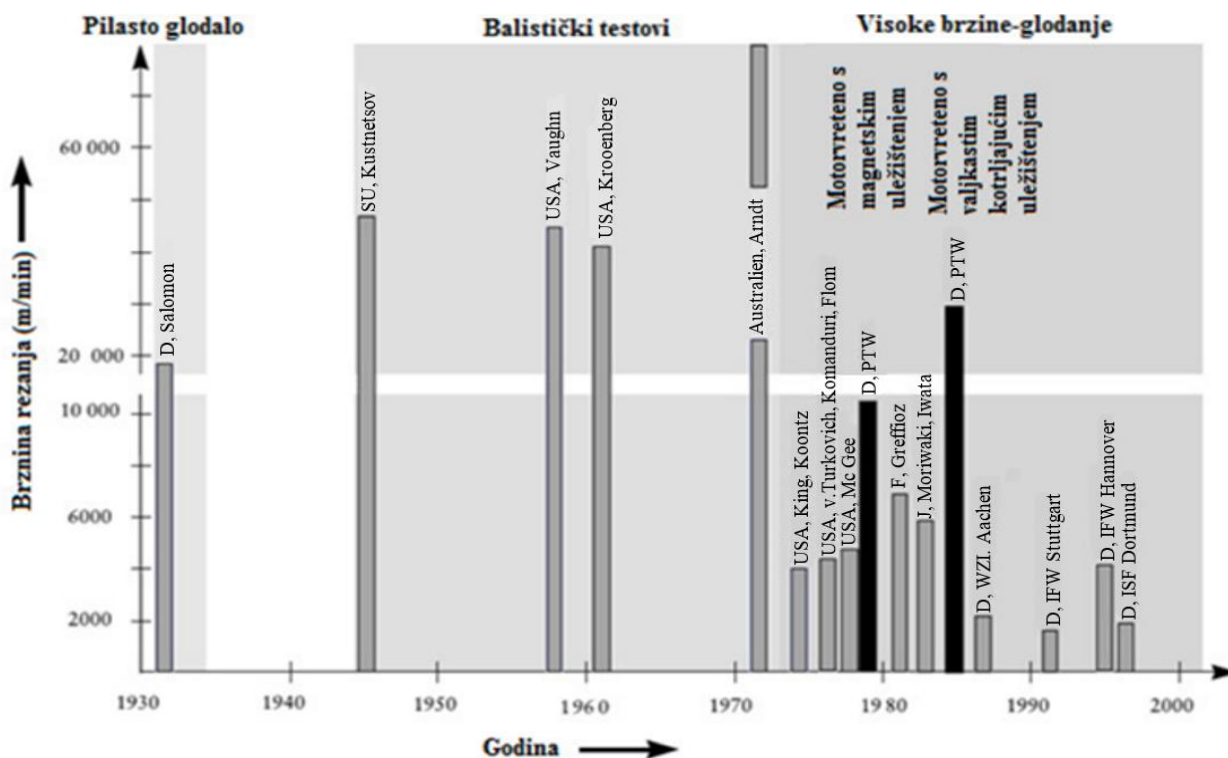


Slika 4. Ovisnost temperature o brzini rezanja [6]

Zbog nedostatka alata s odgovarajućim svojstvima za visoke brzine obrade i nemogućnosti postizanja tako visokih brzina rezanja istraživanja je provodio uz pomoć oštrica kružnih pila. Istraživanje je proveo tako što je povećao promjer kružnih pila i tako postigao velike brzine rezanja. Problemi s kojima se i on sam susreo tijekom istraživanja su nepostojanje materijala otpornih na visoke temperature i strojevi ograničene sposobnosti (male brzine rotacije vretena), zaustavilo je daljnji razvoj te je primjena visokobrzinske obrade počela tek 30 godina kasnije, točnije početkom 1960-ih godina.

Tek u kasnim pedesetim godinama istraživanja vezana uz VBO su se intenzivirala. Nakon Solomona neki američki studiji priključuju se istraživanju na polju visokobrzinske obrade. Tako su 1958. godine Vaughn & Peterson, a Recht 1964. godine tvrdili da ako se riješe problemi vibracija na alatnom stroju i prekomjernog trošenja alata da će zahvaljujući tom načinu obrade produktivnost silovito rasti i da je zbog toga moguće očekivati značajan pad cijena proizvoda. Zahvaljujući njihovim studijama ideje visokobrzinske obrade raširila se svijetom. Počela su sve intenzivnija istraživanja. Tako su u Japanu krajem šezdesetih godina krenuli s istraživanjem mehanizma nastajanja odvojene čestice. Istraživanje nisu mogli provesti u potpunosti jer u to vrijeme još uvijek nije postojalo vreteno prikladno za visoke brzine rotacije. Razvojem visokobrzinskih vretena osamdesetih godina krenulo se s daljnjim istraživanjem visokobrzinske obrade. Daljnjim istraživanjima primijetilo se da se porastom brzine rezanja povećava i kvaliteta obrađene površine te da toplina koja se generira u procesu rezanja odlazi s odvojenom česticom.

Dobiveni podaci od velikog su značaja za visokobrzinsku obradu, što za kvalitetu obrade, što za vijek trajanja alata kao i stroja. Pošto su se već svi veći instituti priključili istraživanju visokobrzinske obrade 1979. godine osnovan je i prvi europski centar na Tehnološkom sveučilištu u Darmstadtu (PTW). Posvetili su se razvijanju visokobrzinskih vretena koja su bila uležištena u aktivne magnetske ležajeve. Zahvaljujući kontinuiranim istraživanjima institut u Darmstadtu danas je jedan od najnaprednijih na području visokobrzinske obrade. Brzine koje su se postizale prilikom određenih istraživanja prikazane su na slici 5.



Slika 5. Istraživanja VBO kroz povijest [5]

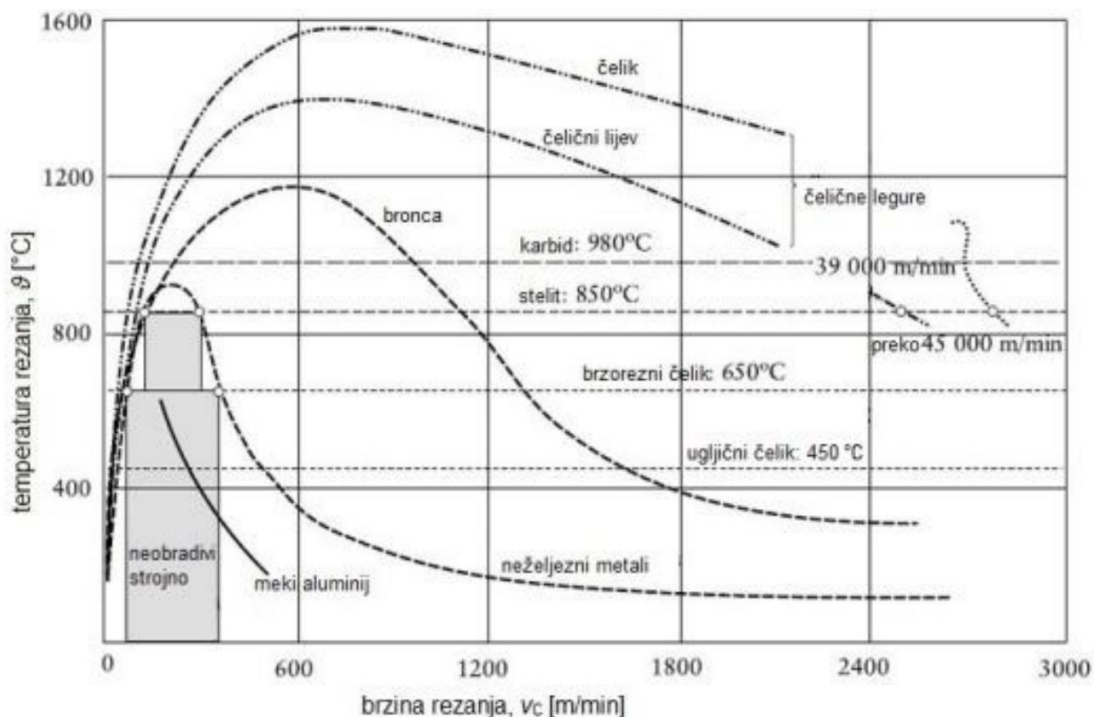
Visokobrzinska obrada prvi put je korištena u zrakoplovnoj industriji za proizvodnju laganih komponenti. U osamdesetim godinama prošlog stoljeća Lockheed je među prvima usvojio visokobrzinsku obradu. Njegov primjer su zatim slijedili i drugi u zrakoplovnoj proizvodnji. U tom trenutku visokobrzinska obrada postala je izvediva suprotnost konvencionalnoj strojnoj obradi. Danas je visokobrzinska obrada sve popularnija i sve se češće primjenjuje. Mnogo je čimbenika koji su utjecali na sporo usvajanje visokobrzinske obrade. Sama industrija bila je oprezna prema konceptu visokobrzinske obrade, ali ono što je nedvojbeno najveći čimbenik bilo je stanje proizvodnih pogona. Mnogim proizvodnim pogonima nedostajala je odgovarajuća tehnologija potrebna za uspješnu implementaciju tehnika visokobrzinske obrade. Danas se sve rjeđe nailazi na taj problem jer su CNC strojevi i CAM sustavi dizajnirani za veliku brzinu strojne obrade.

### 3. Osnovno o VBO

Iako poznata dugi niz godina visokobrzinska obrada se počela primjenjivati tek u novije vrijeme. Razvojem novijih alatnih strojeva i njihovih modula počinje sve veća primjena tog načina obrade. Primjenom ove tehnologije povećava se produktivnost što za posljedicu ima povećanje profita te se iz tog razloga ova tehnologija sve češće primjenjuje u praksi. Visokobrzinska obrada, posebno glodanje, ima iste varijable kao i tradicionalno glodanje. Postoje brzine, posmaci i dubine rezanja koje treba postaviti. Kod visokobrzinske obrade niska brzina rezanja zamijenjena je visokom brzinom rezanja. Definirati visokobrzinsku obradu je teško jer to može biti jedna od mnogih operacija ili kombinacija više operacija. Može se definirati kao:

- Obrada velikom brzinom rezanja ( $v_c$ )
- Obrada velikom brzinom rotacije vretena ( $n$ )
- Obrada s velikim posmakom ( $v_f$ )
- Strojna obrada s visokom stopom skidanja ( $Q$ )

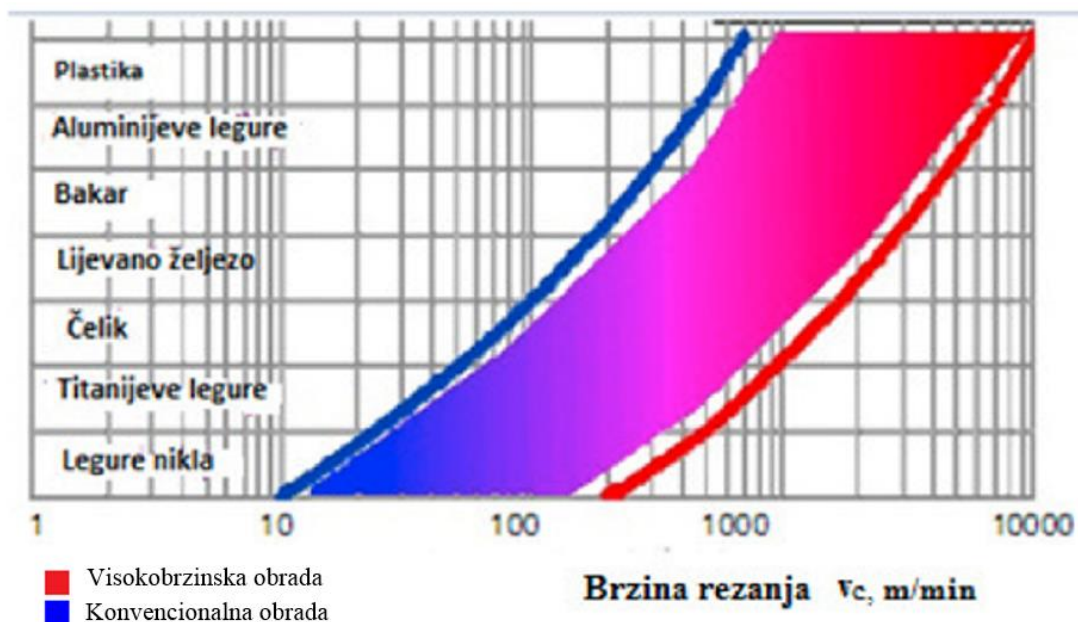
Visokobrzinska obrada definirana je kao brzina obrade kod koje se pojavljuje početak padanja temperature rezanja. Temperatura rezanja pada jer toplina koja je nastala prelazi u odvojenu česticu. Pošto se čestica odvaja velikom brzinom nema prijelaza topline s odvojene čestice na obradak jer za to nema vremena. Kritična brzina rezanja (brzina poslije koje temperatura rezanja opada) je drugačija za svaki materijal. Ovisnost temperature i brzine rezanja kod glodanja pojedinih materijala prikazana je na dijagramu na slici 6.



Slika 6. Ovisnost temperature i brzine rezanja kod glodanja [6]

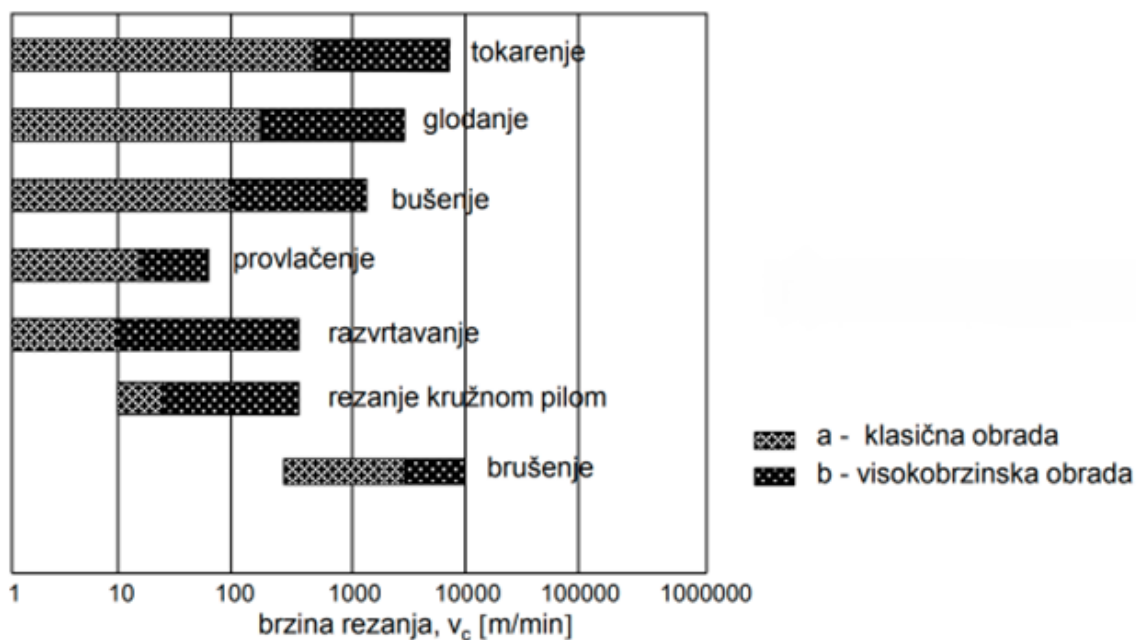


Visokobrzinska obrada obično se povezuje s bilo kojom brzinom vretena iznad 15 tisuća okretaja u minuti što je puno više od brzine vrtnje vretena na klasičnom alatnom stroju. Ne zahtijevaju svi materijali istu brzinu obrade. Ovisno o materijalu različite su i brzine obrade. Na slici 7 prikazane su uobičajene brzine rezanja kod visokobrzinske i konvencionalne obrade ovisno o materijalu obratka. Plavom bojom prikazane su konvencionalne brzine rezanja, a crvenom bojom prikazane su brzine rezanja kod visokobrzinske obrade.



Slika 7. Brzine rezanja ovisno o materijalu obratka [6]

Također brzina obrade ovisi i o postupku kojim obrađujemo. Na slici 8 prikazana je detaljnija podjela po Icksu. Područje visokobrzinske obrade uvelike ovisi o načinu obrade zatim o materijalu obratka i o reznom alatu. Uzmemo li u obzir sve te zahtjeve postiže se optimalna vrijednost trošenja alata ovisno o posmaku i brzini rezanja. Iz tog razloga najpogodniji postupci visokobrzinske obrade su bušenje i glodanje. Glavni razlog tome je što alat koji rotira ima konstantu masu. Kod glodanja glavno gibanje je rotacija i izvodi ga alat. Masa rotacijskog objekta, odnosno reznog alata se ne mijenja pa se rezni alat nalazi u stalnoj ravnoteži i zbog toga ne dolazi do vibracija koje imaju negativan utjecaj na kvalitetu obrade. Kod tokarenja to nije slučaj. U postupku tokarenja obradak rotira visokim brzinama dok se nožem skida višak materijala. Skidanjem materijala mijenja se masa obratka i dolazi do disbalansa što uzrokuje vibracije prilikom obrade. Također javljaju se i centrifugalne sile koje djeluju na stezne čeljusti tako što ih pokušavaju otvoriti. Iz tog razloga, ako postoji mogućnost, obradak se kod tokarenja mora stegnuti s unutarnje strane.



Slika 8. Podjela područja brzine rezanja čelika po Icksu [6]

### 3.1. Prednosti visokobrzinske obrade

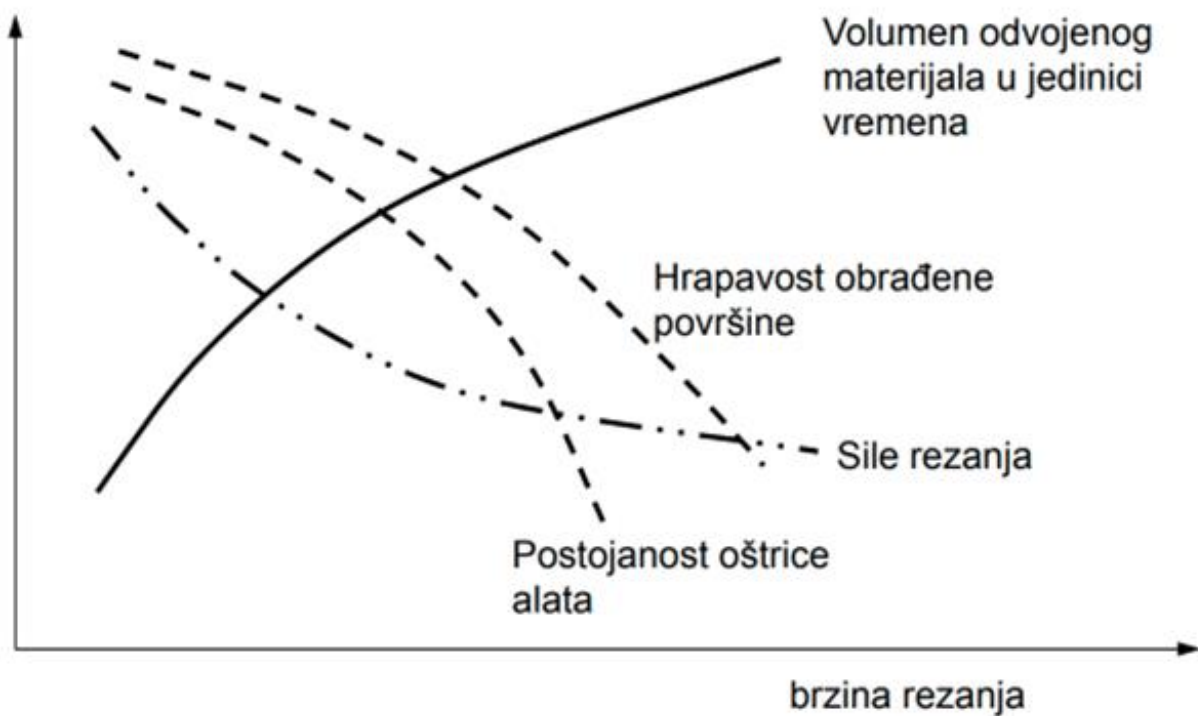
Jedna od glavnih prednosti visokobrzinske obrade je mogućnost obrade tvrdih materijala primjerice zakaljenih čelika. Završna obrada takvih materijala ranije se izvodila korištenjem elektroerozijske obrade ili brušenjem. U početku je visokobrzinska obrada bila usmjereno na industriju kalupa dok je danas postala mnogo raširenija i prisutna je u svim granam industrije. Tehnologija se pokazala vrlo učinkovitom i za strojnu obradu tankostjenih dijelova zbog učinkovitog uklanjanja velikih količina materijala. Ova tehnologija je također povoljna za obradu materijala osjetljivih na toplinu zbog manjih temperatura rezanja. Ovom tehnologijom dobiva se i dobra kvaliteta površine što je prikazano na slici 9 gdje se vidi obradak visokog sjaja nakon glodanja i glodalo kojim se vršio postupak glodanja. To je također jedan od glavnih razloga sve veće primjene ove tehnologije obrade. Prednosti visokobrzinske obrade su i mnogo kraća vremena proizvodnje, a istovremeno i veća kvaliteta obrade. Pri velikim posmacima također se postiže izvrsna kvaliteta obrađene površine. Što je veća brzina rezanja to je potrebna manja sila rezanja. Na isti način optimalno se koristi snaga vretena. Toplina nastala tijekom obrade u velikoj se mjeri odvodi s odvojenom česticom što pozitivno utječe na točnost oblika jer se izradak ne deformira. Također s povećanjem brzine rezanja povećava se i volumen odvojenih čestica.



Slika 9. Kvaliteta obrađene površine [7]

### 3.2. Nedostatci visokobrzinske obrade

Veliki problem ove tehnologije je postojanost oštrice alata što je prikazano na dijagramu na slici 10. Povećanjem brzine rezanja postojanost oštrice alata opada.



Slika 10. Opća svojstva visokobrzinske obrade [6]

Postojanost oštrice alata opada jer se povećanjem brzine rezanja povećava i temperatura na dodiru oštrice alata i odvojene čestice te se temperatura vrha oštrice približava temperaturi taljenja

materijala. Rezni alat ima smanjen vijek trajanja jer radi na visokim temperaturama. Iz tog razloga primjena SHIP-a je otežana. Temperature alata mogu dostići i preko 1000°C te kada bi SHIP došao blizu zone rezanja u trenutku bi se pretvorio u paru i ne bi postojao nikakav efekt hlađenja. Zbog toga se krenulo u razvoj alata koji bolje rade u suhim uvjetima i ne trebaju primjenu SHIP-a. Neki od tih alata su keramika, karbidi, dijamant i CBN. Primjena tih alata ima i određene prednosti. Smanjuju se troškovi proizvodnje jer nema potreba za nabavom SHIP-a i njegovog zbrinjavanja, nema održavanja sustava za SHIP i pozitivno utječe na zdravlje radnika.

## 4. Glodanje

Glodanje je postupak obrade materijala odvajanjem čestica. Alatni strojevi na kojima se izvodi glodanje nazivaju se glodalice. Kod glodanja glavno gibanje je kontinuirano i izvodi ga alat dok posmično gibanje najčešće izvodi obradak i ono ima proizvoljnu putanju i smjer. Alat kojim se vrši obrada naziva se glodalo. Alat se sastoji od više reznih oštrica s definiranom geometrijom reznog dijela. Proces je inherentno isprekidan što znači da svaki zub alata reže samo do polovice okretaja rezača. Oštrice alata periodično ulaze u zahvat s radnim komadom za razliku od kontinuirane strojne obrade poput brušenja i tokarenja gdje su oštrice alata u konstantnom zahvatu s obratkom. Zbog toga se od reznih alata za glodanje zahtijeva visoka otpornost na dinamička opterećenja.

### Parametri obrade

Parametri obrade kod glodanja su brzina rezanja, dubina rezanja i posmak. Određuju se u odnosu na alat i materijal obratka, postojanost oštrice, kvalitetu površine koja je obrađena, okretaje stroja (broj okretaja). Kod fine obrade koriste se veće brzine, a manje dubine rezanja i posmaci dok je kod grube obrade obrnuto. [26]

**Brzina rezanja** je brzina kojom rezna oštrica odvaja čestice.

Formula za brzinu rezanja je:

$$v_c = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1000} \text{ (m/min, m/s)} \quad (1)$$

Gdje je :

$v_c$  – brzina rezanja (m/min)

$D$  – promjer alata (mm)

$n$  – broj okretaja alata ( $\text{min}^{-1}$ )

**Posmak** je ona dužina za koju se glodalo pomakne u jednom okretaju. Povećanjem posmaka po zubu glodala povećava se odvojena čestica, sile na zubu i hrapavost površine. Brzina posmaka ovisi o zahtijevanoj kvaliteti površine i o vrsti obrade. Ako je posmak veći vrijeme izrade je kraće što posmak čini jednim od glavnih čimbenika koji indirektno utječu na cijenu proizvoda. Brzina posmaka kod koje je najveća količina odvojene čestice, a da ne dolazi do loma reznog alata ili zaustavljanja vretena je optimalna brzina posmaka. Kod glodanja možemo definirati tri veličine

za posmak. Te veličine su posmična brzina ( $v_f$ ), posmak po zubu glodala ( $f_z$ ), posmak po jednom okretu glodala ( $f$ ).

$$f = z \cdot f_z \text{ (mm)} \quad (2)$$

$$v_f = n \cdot f = n \cdot z \cdot f_z \text{ (mm/min)} \quad (3)$$

Gdje je:

$f$  – posmak (mm)

$z$  – broj zuba glodala

$f_z$  – posmak po zubu glodala (mm)

$v_f$  – posmična brzina (mm/min)

**Dubina rezanja** je definirana kao veličina odvojenog sloja od radnog komada. Određena je razmakom između obrađene i obrađivane površine (slika 11.). Cilj je odvajanje što je moguće više čestica uz zadržavanje zahtijevane kvalitete površine i točnosti. Zbog toga se obrada najčešće vrši pomoću više prolaza. Za završnu obradu radi se rez s minimalnom dubinom.

$$a_p = \frac{P \cdot \eta}{f \cdot v_c \cdot k} \text{ (mm)} \quad (4)$$

Gdje je:

$a_p$  – dubina rezanja (mm)

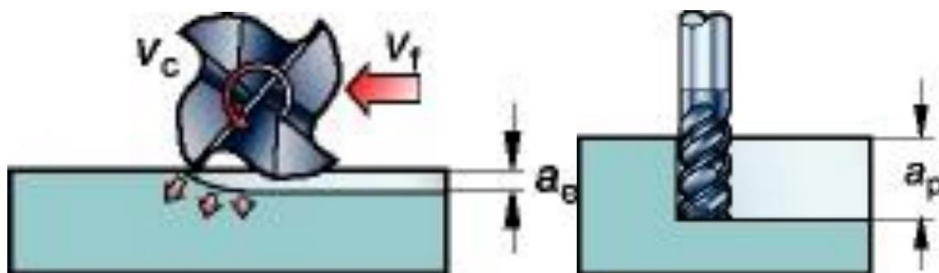
$P$  – snaga alatnog stroja (W)

$\eta$  - stupanj iskorištenja stroja (%)

$f$  – posmak (mm)

$v_c$  – brzina rezanja (m/min)

$k$  – specifični otpor rezanja ( $\text{N/mm}^2$ )



Slika 11. Skica parametara obrade tijekom procesa [23]

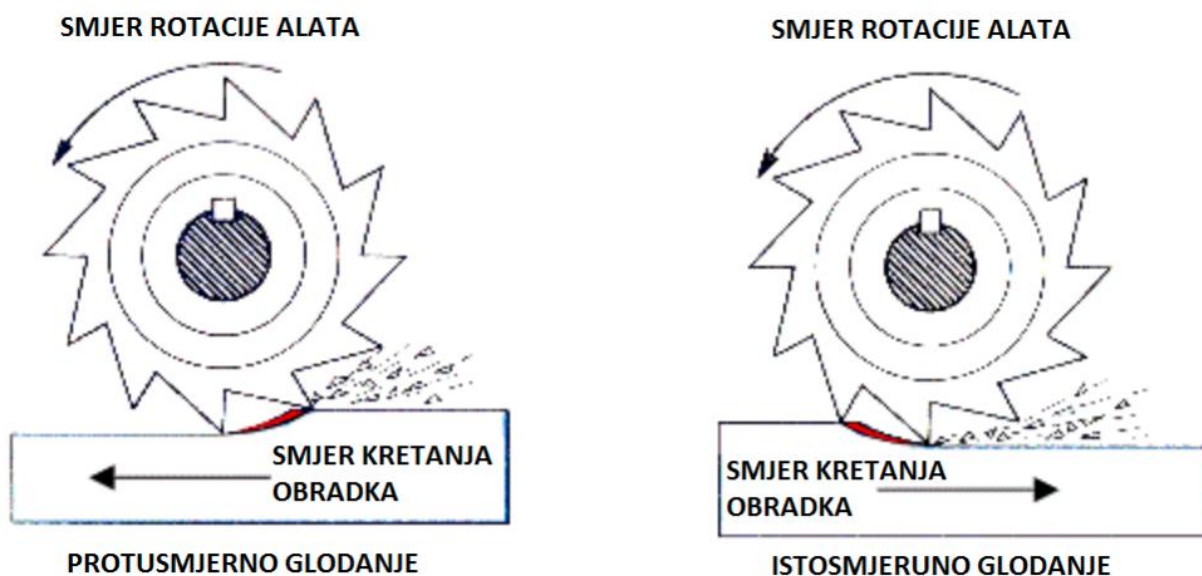
Glodanje se prema postupcima obrade može podijeliti na sljedeće načine:

Prema proizvedenoj kvaliteti površine

- Grubo glodanje
- Završno glodanje
- Fino glodanje

Prema kinematici postupka

- Istosmjerno
- Protusmjerno



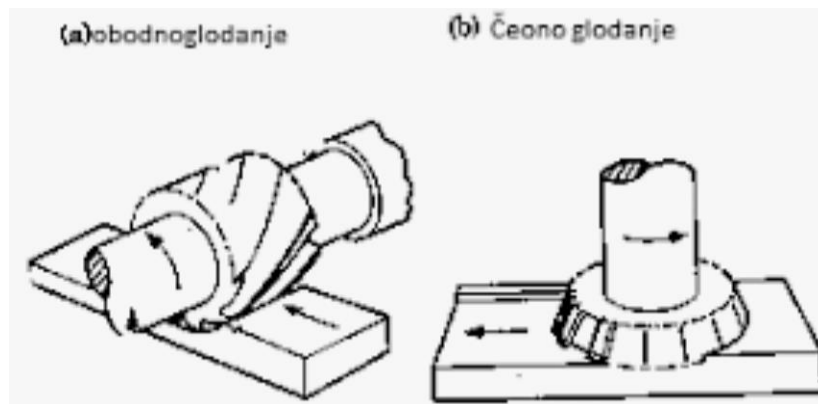
Slika 12. Istosmjerno i protusmjerno glodanje [9]

Kod protusmjernog glodanja obradak se kreće suprotno od smjera rotacije alata. Na početku zahvata debljina odvojene čestice je najmanja te se prema kraju zahvata zuba povećava. Sile prilikom rezanja djeluju tako da pokušavaju podići obradak sa stola alatnog stroja. Iz tog razloga je potrebno pažljivo pričvršćivanje radnog komada. Obradak se kod istosmjernog glodanja kreće u istom smjeru kao i rotacija reznog alata. Kod istosmjernog glodanja debljina odvojene čestice na početku zahvata je najveća, a kako zub izlazi iz zahvata se smanjuje. Kod istosmjernog glodanja sile rezanja nastoje obradak povući prema glodalu. Istosmjernim glodanjem postiže se bolja kvaliteta površine zbog toga što je na kraju zahvata manji sloj rezanja. Kod protusmjernog glodanja je obrnuto. Na kraju zahvata skida se najdeblji sloj te odvojenu česticu baca ispred sebe zbog čega može doći do odbijanja alata prema obratku što uzrokuje lošu kvalitetu obrade i mogućnost loma alata.



Prema položaju reznih oštrica na glodalu

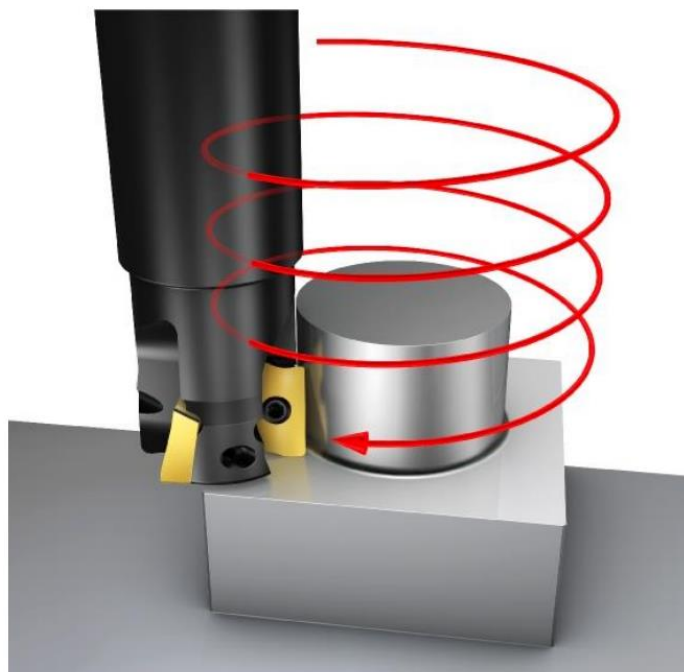
- Obodno
- Čeono



Slika 13. Obodno i čeono glodanje [10]

Prema obliku obrađene površine

- Linearno
- Kružno (slika 14.)
- Profilno (utori i profili)
- Odvalno (zupčanici)
- Oblikovano (kopirno i 3D) (slika 15.)
- Dinamično [8]



Slika 14. Kružno glodanje [11]





*Slika 15. Kopirno glodanje [11]*

Osim tradicionalne tehnike obrade postoji i numeričko upravljano glodanje poznatije kao CNC glodanje. CNC glodanje je proces obrade koji uklanja materijal s izratka pomoću računalnih kontrola i rotirajućeg cilindričnog alata (glodala). CNC glodanje kao i većina tradicionalnih mehaničkih CNC obradnih procesa koristi računalne kontrole za upravljanje i rukovanje alatnim strojevima koji režu i oblikuju osnovni materijal. Kao i kod svih CNC obradnih procesa postoje iste osnovne faze proizvodnje. Te faze su:

- Izrada CAD modela
- Izrada CNC programa iz CAD modela
- Konfiguriranje CNC glodalice
- Izvođenje operacije glodanja

Proces CNC glodanja počinje dizajnom 2D ili 3D CAD dijela. Izrađeni dizajn potom se „prevodi“ u kompatibilni format za CNC. Program CNC stroja koji potom diktira radnje stroja i pokrete alata po obratku. Prije pokretanja CNC programa operater prvo mora pripremiti CNC glodalicu, pričvrstiti obradak na radnu površinu stroja (radni stol ili škripac) i pričvrstiti alat za glodanje na vreteno stroja. Ovisno o zahtjevima za obradu i specifikacijama stroja glodanje se može izvesti kao horizontalno ili vertikalno. Alati koji se koriste za obradu također se prilagođavaju postavljenim zahtjevima. Kada je stroj spreman može započeti glodanje materijala. Također ovisno o namjeni proizvoda odabire se i optimalni materijal. Strojna obrada glodanjem može se izvesti na bilo kojem materijalu koji je dovoljno tvrd da stvara strugotine prilikom rezanja. Što su strugotine kraće to je lakše njihovo uklanjanje s radnog područja. Ako se strugotina dovoljno brzo ne odvoji od obratka moguće je da će se formirati u žicu koja se potom vrlo lako može omotati oko alata ili vretena i tako smanjiti kvalitetu obrade.

CNC glodalice zbog svoje brzine i preciznosti omogućuju učinkovitu proizvodnju složenih i specijaliziranih proizvoda. Jedna od glavnih prednosti CNC glodanja je ušteda troškova. Sve tvrtke traže način za smanjenje troškova uz zadržavanje kvalitete. Uz pomoć CNC glodalica poduzeća mogu poboljšati svoj konačan proizvod što uzrokuje značajne uštede. Sigurnost je također jedan od bitnijih prednosti. Kod CNC strojeva sigurnost je značajno poboljšana jer za rad na stroju nije potrebno saginjanje ili čučanje. Ergonomski uvjeti za radnike znatno su poboljšani što rezultira manjim brojem nezgoda i manjim umorom. CNC glodalice imaju i visoku učinkovitost jer imaju sposobnost kontinuiranog rada s eventualno manjim zastojevima. Poduzeća koja rade u tri smjene mogu raditi i 24 sata dnevno i tako sedam dana u tjednu. Visoka razina točnosti isto je jedna od prednosti CNC glodanja. Nakon što se program jednom napiše svaki dio će izaći isti kao i prethodni. Proces se može ponoviti koliko god puta je potrebno i svaki put će izradak biti jednake kvalitete.

Navedeni postupci glodanja mogu se izvesti i kod visokih brzina obrade popularnije nazvano visokobrzinskom obradom glodanjem. Visokobrzinsko glodanje koristi se gdje god je potrebna visoka učinkovitost rezanja s preciznošću i kvalitetom površine nakon strojne obrade. To se posebno odnosi na područje proizvodnje alata, kalupa, prednjih instrument ploča, medicinske tehnologije, nakita i satova. U izradi alata i kalupa prvenstveno se koristi za završnu obradu. Alati i kalupi obično su izrađeni od čelika visoke čvrstoće koji postavljaju povećane zahtjeve za obradu. Glodanje je i dalje najvažniji proces obrade. Kod glodanja alatnog čelika prvi korak je uklanjanje što je moguće više materijala što je brže moguće (slika 16.). To je takozvana gruba obrada. Potom slijedi završna obrada. Površina se obrađuje na potrebne dimenzije i u potrebnoj kvaliteti.



*Slika 16. Gruba obrada glodanjem [8]*

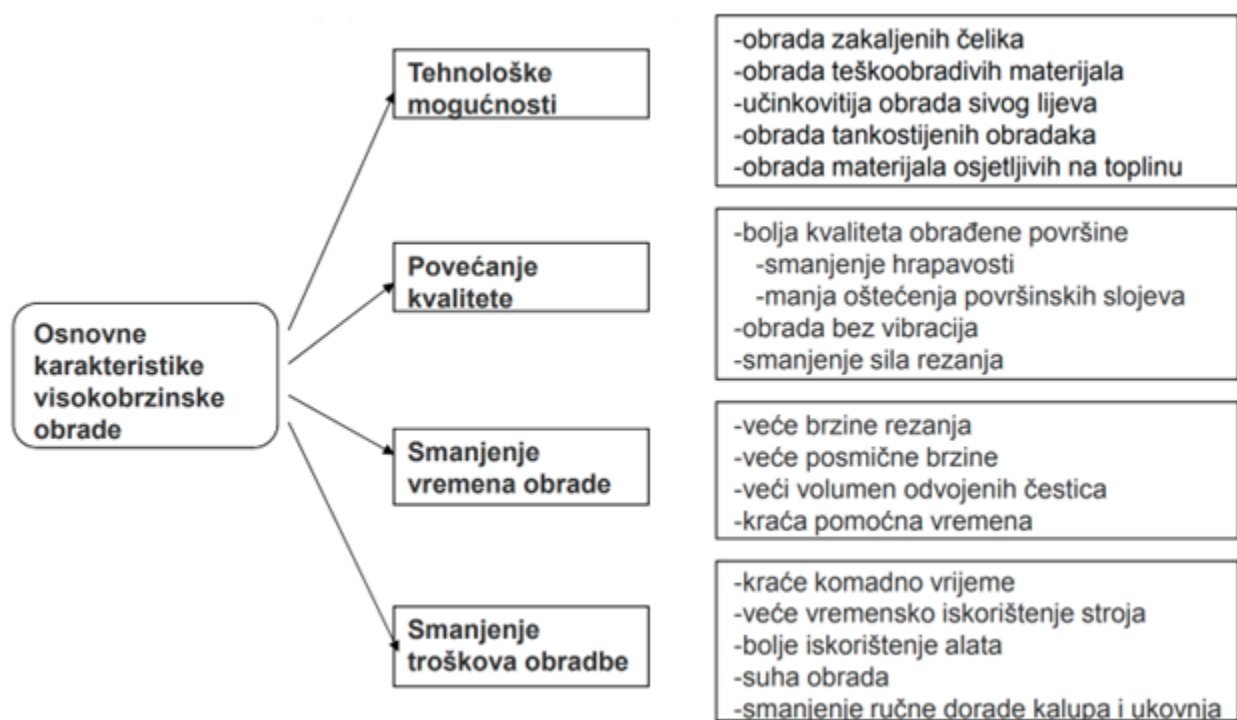
Osnovni zahtjevi za visokobrzinsko glodanje su odgovarajući alat koji je dizajniran za veliko opterećenje i stroj koji nudi visoke rotacijske frekvencije. Izrada preciznih slobodnih oblika obično je složenije od čeonog glodanja zbog duljeg trajanja procesa. Razlozi duljeg trajanja procesa su duže putanje glodanja i dulje podešavanja alata jer se površine obrađuju ili 3-osno s kugličnim glodalima ili 5-osno s torusnim glodalima. Da bi dobili rezultat, koji zahtjeva najmanju moguću preradu, linijski pomak mora biti što manji, a radijus rezača što veći.

Prednosti visokobrzinskog glodanja:

- Ekonomična obrada s visokom kvalitetom površine
- 5 do 10 puta veće brzine posmaka (do 30 m/min)
- Brzine rezanja između 1000 i 7000 m/min ovisno o materijalu
- Frekvencije vrtnje vretena do 100 000 okretaja u minuti
- Smanjenje sile rezanja kroz male posmake po zubu
- Moguća obrada tankostjenih obradaka, zakaljenih čelika, materijala osjetljivih na toplinu
- Moguća obrada materijala do 69 HRC [7]

Nedostatci visokobrzinskog glodanja:

- Povećana potrošnja energije
- Zbog većeg trošenja na visokim brzinama veći su i troškovi održavanja strojeva i alata
- Nije moguće vizualno praćenje procesa od strane operatera
- Prekid rada povećava troškove i smanjuje proizvodnost
- Za grublje obrade još je uvijek potreban SHIP

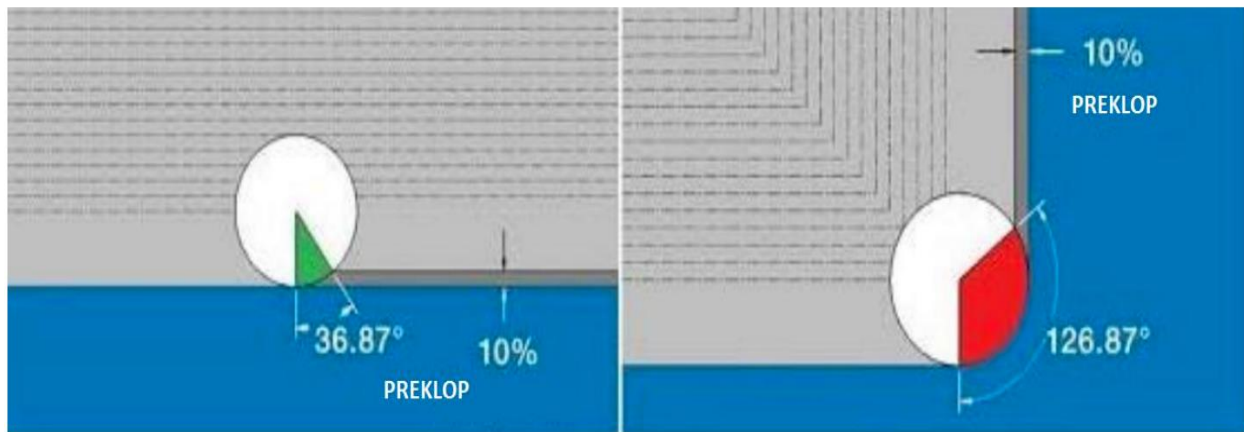


Slika 17. Osnovne karakteristike visokobrzinske obrade [6]

#### 4.1. Konvencionalno glodanje u odnosu na visokobrzinsku obradu

Konvencionalna strojna obrada u mnogim se aspektima uvelike razlikuje od brzog glodanja. Kod konvencionalnih tehnika obrade vrijeme kontakta između alata i komada je puno veće nego kod visokobrzinske obrade. Također kod konvencionalne obrade puno su veće sile rezanja. Konvencionalna strojna obrada obično će dovesti do lošije dimenzijske točnosti izratka i lošije završne obrade površine nego što bi se moglo postići visokobrzinskom obradom.

Jedna od većih razlika je stopa uklanjanja materijala koja je puno veća u korist visokobrzinske obrade. Tradicionalna putanja alata slijedi cjelokupni oblik elementa koji se obrađuje, a samom procesu nedostaju kontrolni parametri potrebni za povećanje učinka. Taj nedostatak kontrole znači da alat može naići na različite količine materijala posebno u kutovima (slika 18.), što će negativno utjecati na sposobnost alata da ide brže. Zbog povećanog naprezanja alata i povećanja linearnih sila moraju se smanjiti dubina rezanja, broj okretaja u minuti i brzina posmaka. Kako se pojavljuje dodatno trenje za uspješnu obradu potrebno je i rashladno sredstvo. Osim nakupljanja topline koje je uzrokovano povećanim trenjem, povremeno povećano naprezanje alata će uzrokovati ekstremno trošenje alata, dok će ukupni vijek trajanja alata biti mnogo manji nego kod visokobrzinske obrade.



Slika 18. Ilustracija zahvata materijala u kutu tradicionalnim načinom glodanja [9]

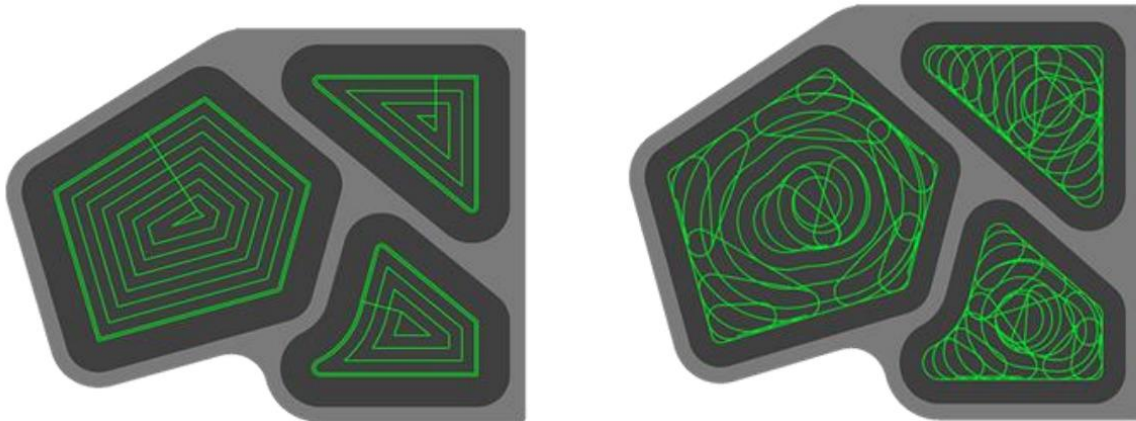
## 4.2. Dinamično glodanje

Dinamično glodanje je postupak obrade koji kombinira velike aksijalne i male radijalne dubine rezanja te optimiziranu putanju alata. Visoka brzina vretena nije jedini način kojim lakši obradni centri mogu produktivno obrađivati tvrde metale. Kod dinamičnog glodanja za uklanjanje visoke stope metala ne koristi se visoka brzina vretena već se određenom kombinacijom putanje alata (slika 19.) osigurava konstantno opterećenje alata što znači da je alat uvijek u istom zahvatu s radnim komadom. Glavna prednost dinamičnog glodanja je da se uz pravilnu putanju alata zahtjevne obrade mogu raditi i na manjim obradnim centrima. Zahvaljujući ovom postupku glodanja relativno jeftiniji strojevi, u kombinaciji s odgovarajućim alatom, u potpunosti su sposobni za obradu i najtvrdih materijala poput titana ili zrakoplovne legure Inconel 718.

Jedna od glavnih strategija koja se koristi u dinamičkom glodanju je radijalno stanjivanje odvojene čestice. Radijalno stanjivanje odvojene čestice postiže se kad zahvat alata padne ispod 50% promjera rezača. Prosječna debljina strugotine i dalje bi trebala zadovoljiti preporuku proizvođača alata jer u suprotnom ne povećavamo mogućnosti reznog alata. Također treba voditi računa o tome da odvojena čestica ne bude pre mala i da zbog toga na sebe ne može preuzeti toplinu proizvedenu rezanjem što za posljedicu ima da proizvedenu toplinu apsorbira rezni alat ili obradak, a to je nepoželjno.

Različiti CAM proizvođači također imaju i različite tehnike, odnosno putanje alata. Poznati programi za dinamično glodanje su Imachining, VoluMill i TRUEMill. Neke metode kreiraju putanju alata tako što izbjegavaju nagle zavoje ne bi li zadržali alata u konstantnom zahvatu i pod konstantnim opterećenjem. Druge metode umjesto kontroliranja kuta zahvaćanje prilagođavaju brzinu posmaka i druge parametre kako ne bi prekoračili preporučena opterećenja za rezni alat.

Dinamično glodanje vrlo je učinkovit način obrade koji nudi bolju sigurnost procesa. Za implementaciju ovog postupka obrade potrebni su strojevi sposobni za dinamično glodanje (moguće je obrađivati i na manjim obradnim centrima), softver koji može napisati odgovarajući kod i alati s odgovarajućim značajkama. Nakon uspješne implementacije ovog postupka stopa proizvodnje će rasti, dok će se troškovi proizvodnje i vremena ciklusa smanjiti.



*Slika 19. Putanja alata kod konvencionalnog glodanja (lijevo) i kod dinamičnog glodanja (desno)[23]*

### **4.3. Trohoidna obrada**

Trohoidno glodanje je metoda strojne obrade koja se koristi za stvaranje utora šireg od promjera reznog alata. To se postiže pomoću niza kružnih rezova poznatih kao trohoidna putanja alata koja je prikazana na slici 20. Kao oblik visokoučinkovitog glodanja, trohoidno glodanje koristi velike brzine rotacije vretena uz zadržavanje niske radijalne dubine i visoke aksijalne dubine rezanja. Trohoidno glodanje temelji se na teoriji radijalnog stanjivanja. Konvencionalna razmišljanja sugeriraju da rezni alati imaju optimalni posmak što određuje idealnu širinu i veličinu odvojene čestice (koliko oštrica može grabiti materijala). Način na koji se pokušava izbjeći stanjivanje strugotine je povećanje posmaka po zub u odnosu na optimalni. Tako se pokušava zadržati konstantna maksimalna debljina strugotine i poboljšati učinkovitost stroja.

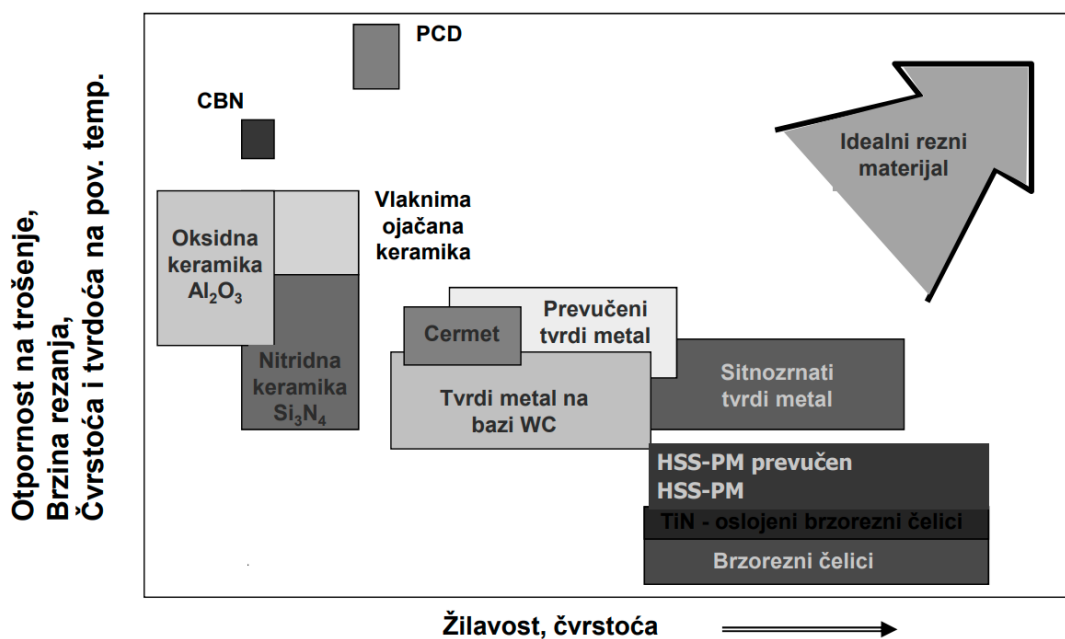




Slika 20. Trohoidno glodanje [4]

#### 4.4. Alati za VBO

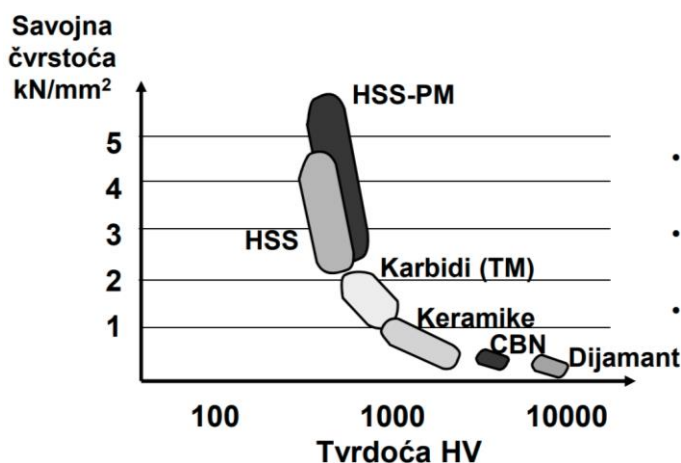
Važnu ulogu za uspješan postupak visokobrzinske obrade imaju i alati. Kod visokobrzinske obrade uz općenite značajke reznog alata kao što su geometrija, materijal i prevlake (slika 21.), pozornost treba obratiti i na prihvat kao i na balansiranje alata.



Slika 21. Materijali i prevlake reznih alata [6]

Na materijal reznog dijela alata za visokobrzinsku obradu postavljaju se mnogi zahtjevi. Svojstva materijala alata (slika 22.) pred koja se postavljaju zahtjevi su:

- Tvrdoaća i ovrstoća
- Źilavost
- Ovrstoća reznog brida
- Unutrašnja stabilnost strukture
- Temperaturna izdržljivost, oksidacijska postojanost
- Ne naginganje difuziji i stvaranju naljepka [5]



Slika 22. Svojstva materijala alata [6]

### Brzorezni oelici (HSS)

Kao što je vidljivo s dijagrama na slici 22, brzorezni oelici imaju vrlo visoku svojnu ovrstoću. To svojstvo im omogućuje veći posmak po zubu, a oštrica ima veću otpornost na krzanje. Brzorezni oelici imaju i mogućnost većih dubina rezanja što znači da je potrebno manje prolaza za izradu nekog elementa. Kako brzorezni oelici imaju visoku ovrstoću alati izrađeni iz tog materijala imaju vrlo šiljaste oštrice. Prednosti takvih oštrica je mnogo. Prva prednost je mogućnost obrade teško obradivih legura. Titanske legure se obrađuju laganije dok kod austenitnih oelika i legura nikla dolazi do manjeg otvrdnjavanja deformacijom. Šiljaste oštrice alata pridonose i boljoj kvaliteti obrađene površine. Za obradu su potrebne i manje sile rezanja što omogućuje obradu tankostjenih profila. Zahvaljujući manjim silama niža je i temperatura oštrice što pridonosi i većoj postojanosti oštrice. Još je jedna bitna prednost ovih alata, a to je ekonomičnost. Uporabom ovih alata smanjuje se potrošnja energije. Na slici 23 prikazano je HSS glodalo.





Slika 23. HSS glodalo [13]

### Tvrđi metali

Tvrđi metali poznati i pod nazivom Widia razvijeni su u Njemačkoj i imali su veliki utjecaj na razvoj tehnika obrade. U svojem sastavu imaju karbide koji su nositelji tvrdoće (WC, TiC, TaC, NbC), Co i kao veziva Mo i Ni. Zahvaljujući karbidima tvrdoća im je između 1300 i 1800 HV, a pri temperaturi 1000°C tvrdoća se snizi za samo 10%. Sinterirani metali s TiC su i kod 700°C tvrđi od brzoreznog čelika na sobnoj temperaturi. Imaju i dobru žilavost (od 800 do 2200 MPa) kao i veoma visoku tlačnu čvrstoću (od 4000 do 5900 MPa). Oblici reznih pločica prikazani su na slici 24.



Slika 24. Tvrđi metali [14]

### Rezna keramika

Postoje dvije vrste keramike, a to su oksidne i neoksidne. Bez obzira o kojoj se vrsti keramike radi materijal je anorganski i nemetalni. Materijal se oblikuje iz sirove mase kod sobne temperature, a pečenjem, točnije sinteriranjem pri visokim temperaturama, postiže svoja tipična svojstva. Slika 25 prikazuje oblike rezne pločice od keramike. Savojna čvrstoća rezne keramike kreće se između 300 i 7000 MPa, tlačna čvrstoća između 2500 i 4500 MPa, a tvrdoća od 1400 do 2400 HV 30. Oksidna (bijela) keramika sastoji se od  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (99,7%), a manjim udjelom MgO,  $\text{SiO}_2$

ili  $ZrO_2$ . Miješana (crna) keramika sadrži  $Al_2O_3$  i različite druge nitride i karbide poput TiC, TiN i WC. Spojevi bora, ugljika, dušika i silicija čine sastav neoksidne keramike. Silicijev nitrid  $Si_3N_4$  i silicijev karbid SiC predstavnici su neoksidne keramike.



*Slika 25. Rezne pločice od keramike [15]*

### **Cermet**

Rezni alati od cermeta zapravo su keramičko-metalni kompoziti. Visoku tvrdoću daju mu karbidi (WC, TiC, TaC) i nitridi (TiN). Osnovna razlika cermeta i rezne keramike je ta da cermet sadrži metalnu vezivnu fazu u koju su uložene keramičke komponente. Cermeti se većinom sastoje od titanova karbonitrida i nikla. Titan-karbid (TiC) povećava otpornost prema trošenju, a titan-nitrid smanjuje trenje i sprječava stvaranje naslaga na oštrici. U odnosu na tvrde metale, cermet je otporniji na trošenje, otporniji na visoke temperature, bolje je otporan na koroziju i oksidaciju i ima manje trenje. Alati izrađeni od cermeta (slika 26.) imaju duži vijek trajanja, veću produktivnost i veće brzine rezanja. Najčešće se koriste za dijelove na kojima je potrebno postići uske tolerancije.



*Slika 26. Oblici reznih pločica od cermeta [15]*

## **Kubični borov nitrid (CBN)**

Kubični borov nitrid najtvrđi je rezni materijal poslije dijamanta. Tvrdoća ovog materijala je 4500 HV 30. Odlikuje ga tlačna čvrstoća od 4000 MPa i savojna čvrstoća 600 MPa. Postojan je i na temperature do 1500°C. Uz pomoć alata izrađenih od ovog materijala mogu se obrađivati čelici visoke tvrdoće (od 54 do 68 HRC), brzorezni čelici i legure kobalta i nikla. Kubični borov nitrid najčešće se na reznom alatu upotrebljava kao tanki sloj na reznoj pločici izrađenoj od tvrdog metala. Takva pločica prikazana je na slici 27. Ovakva kombinacija ima prednosti u pogledu veće žilavosti reznog alat i manje cijene samog alata u odnosu na alate koji su cijeli izrađeni od CBN-a.



*Slika 27. Rezna pločica od CBN-a [15]*

## **Dijamant**

Dijamant je najtvrđi rezni alat i najotporniji na trošenje. Tvrdoća dijamanta je 7000 HV 30 što ga čini pet puta tvrđim od tvrdih metala. Savojna čvrstoća mu je 300 MPa. Nedostaci dijamanta su niska tlačna čvrstoća (3000 MPa) i osjetljivost na udarce. Do temperature od 600 °C je postojan, a iznad temperature 800°C izgara. Za obradu materijala koriste se prirodni monokristalni dijamant (za finu obradu), prirodni polikristalni dijamant i umjetni polikristalni dijamant (PCD). U početku se dijamant koristio za bušenje i erodiranje površina, a dijamantni alati su bili izrađeni tako da je dijamant bio mehanički pričvršćen ili ugrađen u šipke. Kasnije se razvila tehnologija kojom se dijamanti prah ugrađuje u metalne matrice. Rezne pločice od dijamanta izrađeni su na sličan način kao i pločice od CBN-a. Na reznoj pločici nalazi se samo tanak sloj dijamanta. Na slici 28 prikazani su neki oblici reznih pločica od polikristalnog dijamanta. Dijamantnim alatima mogu se obrađivati aluminij i aluminijske legure, zatim bakar i bakrene legure, umjetni materijali, tvrde gume, grafit, keramika, staklo, kamen, azbest, kositar, magnezij, cink, olovo, platina, zlato, srebro i slično.



*Slika 28. Rezne pločice od polikristalnog dijamanta [16]*

#### **4.5. Alatni strojevi za VBO**

Pred alatne strojeve stavljaju se sve veći zahtjevi. Od njih se traži što kraće vrijeme obrade, veći stupanj iskorištenja i veća produktivnost. Sve su veći zahtjevi i prema očuvanju okoliša, kao i prema povećanju točnosti i kvaliteti obrade. Razvojem strojeva pokušava se postići mogućnost obrade različitim postupcima na jednom alatnom stroju i jednim stezanjem. Cilj je u jednom stezanju potpuno obraditi izradak čime bi se skratila pomoćna vremena kao i vrijeme potrebno za izradu proizvoda.

Slika 29 prikazuje alatni stroj marke DMG MORI. Prikazan je model HSC 20 linear. Riječ je o kompaktnom i preciznom stroju. Može postići brzinu vrtnje vretena i do 60 000 o/min. Stroj je dostupan s prihvatom alata HSK-E32 i HSK-E40 s aktivnim hlađenjem. Linearni pogoni u X/Y/Z ubrzavaju i iznad 2 G. Dimenzije stola su 37.084 cm x 32.004 cm, a maksimalna težina obratka 100 kilograma. Stol je rotirajući s rasponom zakretanja od -15° do 130° u A-osi, a u C-osi 360° beskonačno. Maksimalna težina obratka ne smije prelaziti 100 kilograma. Ostale specifikacije stroja prikazane su u tablici 1.



Slika 29. DMG MORI HSC 20 linear [19]

<b>DMG MORI HSC 20 linear</b>	
<b>Maks. posmak osi X</b>	20.066 cm
<b>Maks. posmak osi Y</b>	22.098 cm
<b>Maks. posmak osi Z</b>	27.94 cm
<b>Maks. promjer obratka</b>	20.066 cm
<b>Maks. visina obratka</b>	20.066 cm
<b>Maks. težina obratka</b>	100 kg
<b>Ubrzanje posmičnog gibanja</b>	>2 G

Tablica 1. Specifikacije stroja DMG MORI 20 linear

Mikron MILL S 600 U (slika 30) alatni je stroj za visokobrzinsku obradu glodanjem. Brzina vretena uz prihvat alata HSK-E50 ide i do 36 000 okretaja u minuti. Ubrzanje posmičnog gibanja iznosi 1G. Maksimalno opterećenje na stolu je 120 kg. Također sadrži i automatsku izmjenu alata. Tablica 2 sadrži ostale specifikacije ovog alatnog stroja..



Slika 30. Mikron MILL S 600 U [20]

<b>Mikron MILL S 600 U</b>	
<b>Posmak X, Y, Z</b>	80 x 60 x 50 cm
<b>Zakretna os nagibna os</b>	+30/-110 / nx360 °
<b>Radno vreteno (40% ED, S6)</b>	36000 (HSK-E50) / 33 / 21 o/min / kW / Nm
<b>Brzi hod X, Y, Z</b>	61 m / min
<b>Brzi hod (okretanje, rotiranje)</b>	60 / 150 okretaja u minuti
<b>Stezna površina / Max. opterećenje</b>	120 kg
<b>Magazin alata</b>	18/36/68/168/308 (HSK-E40) // 15/30/60/120/170/220 (HSK-E50) komad
<b>Broj paleta za automatizaciju</b>	10 komada
<b>Automatizacija - Max. opterećenje (uključujući paletu)</b>	90 kg

Tablica 2. Specifikacije stroja Mikron MILL S 600 U

Datron C5 (slika 31) razvijen je za 5-osno glodanje malih dijelova. Snažni servo i momentni motori jamče visoku dinamiku i brzine glodanja. Sadrži precizno vreteno od 1,8 kW s držačem alata HSK-E25. Maksimalna vrtnja vretena je 48 000 o/min. Također ima i automatsku izmjenu alata (22 komada) i integrirani senzor duljine alata. Sustav hlađenja i podmazivanja programski je kontroliran. Ovaj alatni stroj može obrađivati materijale poput čelika, legure čelika, obojene metale, plastiku, cirkon i kompozite. U tablici 3. nalaze se ostale specifikacije stroja.



Slika 31. Datron C5 [21]

<b>Datron C5</b>	
Poprečna staza (XxYxZ)	153 mm x 100 mm x 100 mm
Veličine obratka (primjeri)	<b>Cilindrični:</b> Promjer 60 mm, visina 70 mm Promjer 100 mm, visina 30 mm <b>Kubični (XxYxZ):</b> 96mm x 75 mm x 20 mm 50 mm x 50 mm x 60 mm
Duljina alata	75 mm
Mjenjač alata	22 komada sa senzorom duljine alata
Vreteno	1,8 kW, do 48 000 o/min s HSK-E25 držačem alata

Tablica 3. Specifikacije stroja Datron C5

Sljedeći stroj za visokobrzinsku obradu je Sodick UH650L koji je prikazan na slici 32. Ovaj stroj za posmična gibanja koristi linearne motore čije ubrzanje iznosi 1G. Vreteno ima standardnu brzinu vrtnje od 1500 do 40 000 okretaja u minuti, a dostupna je i opcija držača alata HSK-E25 i tada je maksimalna brzina vrtnje vretena 60 000 okretaja u minuti. Veličina stola je 750 mm x 500 mm, a maksimalna težina na stolu iznosi 150 kg. Dimenzije stroja su 1825mm x 3200 mm x 2540 mm. Težina stroja iznosi 8000 kg.



*Slika 32. Sodick UH650L [22]*



## 5. Zaključak

Vrijeme izrade proizvoda pokušava se skratiti na razne načine. Uvođenjem novih tehnologija obrade pokušava se povećati produktivnost, što je i glavna prednost visokobrzinske obrade. Kod visokobrzinske obrade produktivnost se postiže tako da se obrada vrši visokim brzinama rezanja i visokim posmičnim brzinama. Sljedeća prednost visokobrzinske obrade je i visoka kvaliteta obrađene površine te iz tog razloga nema potrebe za primjenom završnih obrada poput brušenja što još dodatno skraćuje vrijeme potrebno za izradu određenog proizvoda. Još jedna od prednosti visokobrzinske obrade je i mogućnost obrade tankostjenih proizvoda što je konvencionalnim načinom obrade vrlo teško ili nemoguće. Od svih postupaka obrade odvajanjem čestica glodanje se pokazalo kao najprikladnije za visokobrzinsku obradu. Za visokobrzinsku obradu je zbog velikih brzina vrtnje jako važno da element koji se vrti bude u savršenom balansu kako bi se spriječile neželjene vibracije koje u konačnici imaju negativan utjecaj na samu kvalitetu proizvoda. Zato se prema reznom alatu postavljaju posebni zahtjevi za balansiranje i prihvat alata.

Visokobrzinsko glodanje je idealno za širok raspon složenih, visokokvalitetnih proizvodnih serija svih veličina. Strojevi za visokobrzinsku obradu također štede puno vremena i novca zbog svoje operativne učinkovitosti i nižih troškova rada. Da bi se mogli izrađivati kvalitetni proizvodi potrebno je da alatni strojevi budu kvalitetni i da se obrada vrši uz što manje vibracija. Važnu ulogu za kvalitetu proizvoda ima i izbor reznog alata. Na tržištu postoje mnoge vrste reznih alata za različite namjene i za različite strojeve te je potrebno uložiti znanje u izbor najbolje kombinacije alata i stroja. Primjenom modernih alatnih strojeva i reznih alata povećava se produktivnost i kvaliteta obrade, a to je od velike važnosti za opstanak i konkuriranje na tržištu.

## 6. Literatura

- [1] doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj. – predavanja iz kolegija alatni strojevi
- [2] <https://repository.ffri.uniri.hr/islandora/object/ffri%3A805/datastream/PDF/view> (8.9.2022)
- [3] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Alat#/media/Datoteka:Prehistoric\\_Tools\\_-\\_Les\\_Combarelles\\_-\\_Les\\_Eyzies\\_de\\_Tayac\\_-\\_MNP.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Alat#/media/Datoteka:Prehistoric_Tools_-_Les_Combarelles_-_Les_Eyzies_de_Tayac_-_MNP.jpg) (25.8.2022)
- [4] <https://www.peakedm.com/WhatIsHighSpeedMachining.html> (25.8.2022)
- [5] [http://repositorij.fsb.hr/2138/1/21\\_02\\_2013\\_Zavrzni\\_rad\\_-\\_Dario\\_Babic.pdf](http://repositorij.fsb.hr/2138/1/21_02_2013_Zavrzni_rad_-_Dario_Babic.pdf) (25.8.2022)
- [6] <http://titan.fsb.hr/~mklaic/Postupci%20obrade%20odvajanjem%202019%202020/Predavanje-HSC.pdf> (27.8.2022)
- [7] <https://www.form-werkzeug.de/a/grundlagenartikel/hsc-fraesen-high-speed-cutting-224040> (27.8.2022)
- [8] <https://www.grainger.com/know-how/industry/metalworking/kh-what-is-high-speed-machining> (29.8.2022)
- [9] <https://repositorij.unin.hr/islandora/object/unin%3A1623/datastream/PDF/view> (29.8.2022)
- [10] [http://www.ss-obrna-tehnicka-st.skole.hr/dokument?dm\\_document\\_id=236&dm\\_dnl=1](http://www.ss-obrna-tehnicka-st.skole.hr/dokument?dm_document_id=236&dm_dnl=1) (29.8.2022)
- [11] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka:91/preview> (31.8.2022)
- [12] <https://repositorij.iv.hr/islandora/object/politehnikapu%3A169/datastream/PDF/view> (31.8.2022)
- [13] <https://stiprodukt.hr/proizvod/vretenasto-glodalno-hss-co8-din-844-tip-n-4-pera-kratka-izvedba-promat/> (31.8.2022)
- [14] <http://www.alfatim.hr/proizvodni-program/tvrdi-metal/d6/> (5.9.2022)
- [15] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka:490/preview> (10.9.2022)
- [16] <https://www.indiamart.com/proddetail/pcd-inserts-3302340388.html> (7.9.2022)
- [17] <https://mechanicalnotes.com/nc-machine/> (8.9.2022)
- [18] doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj. – predavanja iz kolegija CNC obradni sustavi
- [19] <https://us.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling/hsc/hsc-20-linear> (12.9.2022)
- [20] <https://www.peakedm.com/m7/MILL%20S%20600%20U--mikron-mill-s-600-u.html> (12.9.2022)
- [21] <https://www.datron.de/products/cnc-milling-machines/datron-c5#c797> (12.9.2022)
- [22] <https://sodick.com/products/high-speed-milling/uh650l-high-speed-mill> (12.9.2022)
- [23] <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:823009/FULLTEXT02> (26.9.2022)
- [24] <https://www.mmsonline.com/articles/the-promise-of-high-cube-machining> (26.9.2022)
- [25] <https://www.practicalmachinist.com/cutting-tools/how-dynamic-milling-works/> (26.9.2022)
- [26] <http://sr.scribd.com/doc/64821380/GLODANJE> (26.9.2022)

## Popis slika

Slika 1. Postupak obrade odvajanjem čestica [1] .....	1
Slika 2. Relativni udio postupaka obrade odvajanjem čestica [2] .....	2
Slika 3. Lučna bušilica [1] .....	3
Slika 4. Ovisnost temperature o brzini rezanja [6] .....	5
Slika 5. Istraživanja VBO kroz povijest [5] .....	6
Slika 6. Ovisnost temperature i brzine rezanja kod glodanja [6].....	7
Slika 7. Brzine rezanja ovisno o materijalu obratka [6] .....	8
Slika 8. Podjela područja brzine rezanja čelika po Icksu [6].....	9
Slika 9. Kvaliteta obrađene površine [7] .....	10
Slika 10. Opća svojstva visokobrzinske obrade [6].....	10
Slika 11. Skica parametara obrade tijekom procesa [23] .....	13
Slika 12. Istosmjerno i protusmjerno glodanje [9] .....	14
Slika 13. Obodno i čeono glodanje [10] .....	15
Slika 14. Kružno glodanje [11].....	15
Slika 15. Kopirno glodanje [11] .....	16
Slika 16. Gruba obrada glodanjem [8].....	17
Slika 17. Osnovne karakteristike visokobrzinske obrade [6] .....	19
Slika 18. Ilustracija zahvata materijala u kutu tradicionalnim načinom glodanja [9] .....	20
Slika 19. Putanja alata kod konvencionalnog glodanja (lijevo) i kod dinamičnog glodanja (desno)[23].....	21
Slika 20. Trohoidno glodanje [4].....	22
Slika 21. Materijali i prevlake reznih alata [6] .....	22
Slika 22. Svojstva materijala alata [6] .....	23
Slika 23. HSS glodalo [13] .....	24
Slika 24. Tvrdi metali [14] .....	24
Slika 25. Rezne pločice od keramike [15] .....	25
Slika 26. Oblici reznih pločica od cermeta [15] .....	25
Slika 27. Rezna pločica od CBN-a [15] .....	26
Slika 28. Rezne pločice od polikristalnog dijamanta [16].....	27
Slika 29. DMG MORI HSC 20 linear [19].....	28
Slika 30. Mikron MILL S 600 U [20] .....	29
Slika 31. Datron C5 [21].....	30
Slika 32. Sodick UH650L [22] .....	31

## **Popis tablica**

Tablica 1. Specifikacije stroja DMG MORI 20 linear.....	28
Tablica 2. Specifikacije stroja Mikron MILL S 600 U.....	29
Tablica 3. Specifikacije stroja Datron C5.....	30



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, Valentino Šaronja pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom Visokobrzinska obrada glodanjem te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:

*Valentino Šaronja*

(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, Valentino Šaronja neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom Visokobrzinska obrada glodanjem čiji sam autor.

Student:

*Valentino Šaronja*

(vlastoručni potpis)