

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA**

**Mladen Kurić**

**ISPITIVANJE PARAMETARA OBRADNE DUBOKOG  
BUŠENJA MATERIJALA X6CrNi18-10**

**Završni rad**

**Karlovac, 2018.**

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA**

**Mladen Kurić**

**ISPITIVANJE PARAMETARA OBRADJE DUBOKOG  
BUŠENJA MATERIJALA X6CrNi18-10**

**Završni rad**

**Mentor:  
mag.ing.mech. Josip Groš**

**Karlovac, 2018.**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J.Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: Strojarsva

Usmjerenje: Proizvodno Strojarsvo

Karlovac, 05.06.2018

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Mladen Kurić

Matični broj: 0110608067

Naslov: **ISPITIVANJE PARAMETARA OBRADNE DUBOKOG BUŠENJA  
MATERIJALA X6CrNi18-10**

Opis zadatka:

Duboko bušenje kod obrade odvajanjem čestica od uvijek je predstavljalo zahtjev za visokom tehnološkošću procesa bušenja. Budući da proizvođači alata parametre obrade postavljaju za određenu skupinu materijala potrebno je ispitati parametre obrade dubokog bušenja za svaki pojedini materijal kako bi se optimizirao proces.

Student treba u radu objasniti:

1. Vrstu obrade odvajanjem čestice prema vrsti oštrice
2. Materijale od kojih su izrađeni alati za obradu odvajanjem čestica
3. Parametre trošenja i postojanosti alata
4. Ispitati parametre dubokog bušenja za materijal X6CrNi18-10

Zadatak zadan:  
19.02.2018

Rok predaje rada:  
28.05.2018

Predviđeni datum obrane:  
05.06.2018

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija, kroz praktičnu nastavu i navedenu literaturu.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se profesorima, predavačima i svom ostalom nastavnom i nenastavnom osoblju Veleučilišta u Karlovcu koji su mi pomogli tijekom pisanja ovog rada i tijekom studiranja.

Zahvalio bih se svojem mentoru mag.ing.mech. Groš Josipu na velikoj pomoći i prilikom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem se dipl. ing. Deak Sandri koja mi je bila velika podrška tijekom studiranja, kao i tijekom izrade ovog završnog rada. Uvijek je imala razumijevanja, te mi je pružila podršku kad mi je najviše trebalo.

Zahvalio bih se i svim ostalima na pruženoj pomoći i podršci prilikom izrade ovog završnog rada.

Mladen Kurić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	III
POPIS SLIKA .....	V
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VIII
POPIS OZNAKA .....	IX
SAŽETAK .....	X
1. UVOD.....	1
2. OPĆI DIO.....	2
2.1. Obrada odvajanjem s geometrijski definiranom reznom oštricom.....	4
2.1.1. Tokarenje.....	4
2.1.2. Glodanje .....	5
2.1.3. Bušenje .....	6
2.1.3.1 Bušenje s jednom oštricom .....	13
2.1.3.2 Ejektorsko bušenje .....	14
2.1.3.3 STS bušenje.....	15
2.1.3.4 Duboko bušenje spiralnim svrdlom .....	16
2.2. Obrada odvajanjem s geometrijski nedefiniranom reznom oštricom.....	16
2.3. Rezni materijali.....	17
2.3.1. Brzorezni čelik.....	18
2.3.2. Tvrdi metal.....	18
2.3.3. Kermet .....	19
2.3.4. Rezna keramika.....	19
2.3.5. CBN .....	19
2.3.6. PKD .....	20
2.4. Trošenje alata i postojanost .....	20
2.4.1. Krivulja trošenja.....	22
2.5. Obradni centri .....	24
3. POSTAVA ZADATKA .....	27
4. RAZRADA ZADATKA .....	28
4.1 Materijal izratka .....	28
4.2 Oprema za izvođenje istraživanja .....	29
4.3 Izračun režima obrade .....	32

5.	ANALIZA REZULTATA MJERENJA POSTOJANOSTI ALATA .....	35
5.1	Bušenje.....	35
6.	ZAKLJUČCI.....	41
7.	PRILOZI .....	42
8.	LITERATURA.....	43

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Podjela gibanja [1] .....	2
Slika 2.	Podjela reznih alata [1] .....	3
Slika 3.	Primjer tokarenja [4] .....	4
Slika 4.	Čeono glodanje [4] .....	5
Slika 5.	Primjeri glodala i primjene [4] .....	6
Slika 6.	Režimi obrade kod bušenja [4] .....	7
Slika 7.	Promjenjiva brzina rezanja kod spiralnog svrdla [4] .....	8
Slika 8.	Posmična sila rezanja, moment vrtnje i snaga obrade kod bušenja .....	8
Slika 9.	Dijagram dužine alata u odnosu na promjer [4] .....	9
Slika 10.	Klasično spiralno svrdlo s cilindričnim prihvatom [10] .....	10
Slika 11.	Osnovna geometrija spiralnog svrdla [10] .....	10
Slika 12.	Osnovna razlika HSS i TM [4] .....	11
Slika 13.	Bočne oštrice spiralnog svrdla [3] .....	12
Slika 14.	Oblici odvojene čestice [5] .....	13
Slika 15.	„Topovsko“ svrdlo [4] .....	14
Slika 16.	Shematski prikaz ejektorskog bušenja [13] .....	15
Slika 17.	Prikaz „STS“ bušenja [4] .....	15
Slika 18.	Duboko bušenje spiralnim svrdlom [10] .....	16
Slika 19.	Geometrijski nedefinirana rezna oštrica [5] .....	16
Slika 20.	Rezni materijali [12] .....	17
Slika 21.	Temperatura u reznom klinu [4] .....	20
Slika 22.	Tipovi trošenja [4] .....	21
Slika 23.	Slika krivulje trošenja alata .....	22
Slika 24.	Horizontalni obradni centar [8] .....	24
Slika 25.	Brusački obradni centar [10] .....	24
Slika 26.	5x obradni centar [8] .....	25
Slika 27.	Slika 3D ticala [2] .....	26
Slika 28.	Nacrt izratka .....	27
Slika 29.	Glavna podjela nehrđajućih čelika u ISO grupe [14] .....	28
Slika 30.	Dijagram obradivosti nehrđajućih čelika [4] .....	29
Slika 31.	Svrdlo promjera 13 mm .....	30
Slika 32.	Termoskupljajući prihvati 14 mm [18] .....	30



Slika 33.	Koraci u dubokom bušenju [10].....	31
Slika 34.	Mikrometar za provrte .....	32
Slika 35.	Faktori korekcije brzine rezanja ovisno o vremenu obrade [14].....	32
Slika 36.	Faktori korekcije brzine rezanja ovisno o tvrdoći materijala [14] .....	33
Slika 38.	Stanje rezne oštrice nakon prvog provrta.....	35
Slika 39.	Odvojena čestica prvog provrta.....	36
Slika 40.	Oštećenje poprečne rezne oštrice .....	36
Slika 41.	Rezna oštrica nakon 11 provrta .....	37
Slika 42.	Bočni dio svrdla nakon 11 provrta .....	37
Slika 43.	Odvojena čestica nakon 11. provrta .....	38
Slika 44.	Namotana odvojena čestica .....	38
Slika 45.	Usporedba krivulja trošenja.....	39

## POPIS TABLICA

Tablica 1.  Kemijski sastav materijala X6CrNi18-10.....	28
---	----

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

1. Nacrt broj: 19060583

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$V_c$	$m/min$	Brzina rezanja
$V_f$	$mm/min$	Posmična brzina
$F_c$	$N$	Glavna sila rezanja
$F_f$	$N$	Posmična sila rezanja
$P_c$	$kW$	Snaga rezanja
$M_c$	$N/m$	Moment vrtnje
$f_n$	$mm$	Posmak
$f_z$	$mm$	Posmak po oštrici
$d$	$mm$	Promjer
$\pi$		Konstanta
$n$	$min^{-1}$	Broj okretaja
$z$		Broj oštrica
$\kappa$	$^\circ$	Kut nagiba rezne oštrice
$A$	$mm^2$	Površina poprečnog presjeka oštrice
$k_{c1.1}$	$N/mm^2$	Specifična sila rezanja
$m_c$		Koeficijent
$t_1$	$min$	Tehnološko vrijeme obrade
$T$	$min$	Postojanost alata
$L$	$mm$	Put rezanja

## SAŽETAK

Bušenje je tehnologija obrade odvajanjem čestica koja je u stalnom razvoju. Kako napreduje razvoj reznih materijala, strojeva za preoblikovanje reznih oštrica i proizvodnja reznog alata, tako napreduje i razvoj reznih alata, samim time i reznog alata za izradu provrta, svrdla. Krajem prošlog stoljeća nije bilo tehnologije kojom bi se izradilo spiralno svrdlo od tvrdog metala za izradu provrta 50 puta dužine od nazivnog promjera za promjere do 16 mm. Danas većina vodećih proizvođača alata ima u ponudi takva svrdla za duboko bušenje.

U projektiranju tehnološkog procesa i definiranju reznog alata za obradu provrta potrebno je:

- poznavati tehniku rezanja, obradu odvajanjem čestica
- razumjeti kinematiku alatnog stroja, obradnog centra
- poznavati principe stezanja alata u prihvat alata
- pravilno odrediti stezanje obratka na alatnom stroju
- osigurati dobro odvođenje odvojene čestice
- odvoditi toplinu s vrha reznog klina, zrakom, SHIP-om, odvojenom česticom
- definirati rezne parametre
- ispitati postojanost rezne oštrice te osigurati dovoljnu količinu reznog alata.

U eksperimentalnom dijelu je ispitano trošenje rezne oštrice u industrijskoj eksploataciji pri bušenju provrta promjera 13 mm dubine 245 mm spiralnim svrdlom od tvrdog metala u materijalu X6CrNi18-10 austenitnog nehrđajućeg čelika.

Budući da se radi o provrtu dubine 18 puta većem od nazivnog promjera, ovaj tehnološki postupak karakterističan je za tehnologiju bušenja dubokih provrta.

Izmjereni rezultati uspoređeni su s računskim rezultatima. Početni parametri obrade su definirani prema deklariranim parametrima od strane proizvođača alata, koji je vršio ispitivanja u svojim laboratorijima.

## 1. UVOD

Proizvodnja obradom odvajanja čestica, naročito tokarenje, glodanje i bušenje, je vrlo zastupljeno u proizvodnim procesima. Proizvodnja sa značajnim udjelom ručnog rada postaje skupa, pa se takva proizvodnja i takve tehnologije automatiziraju. Kod visokoserijske i masovne proizvodnje već dugo postoje rješenja koja osiguravaju minimalne proizvodne troškove, ali je njihov udio u ukupnoj proizvodnji mali. Problemi nastaju kod maloserijske i pojedinačne proizvodnje, koja iznosi oko 50% cjelokupne proizvodnje u strojogradnji, a s obzirom na stanje na tržištu i tendenciji, može se očekivati da njen udio bude sve veći. Kod ovih načina proizvodnje klasična automatizacija ne rješava proizvodnost niti kakvoću, već je to moguće rješavati samo fleksibilnom automatizacijom i računalom podržanom proizvodnjom, te inteligentnim proizvodnim sustavima. [7]

Kako bi osigurali optimalnu iskoristivost obradnih centara potrebno je prilikom izrade programa raspolagati točnim parametrima obrade za svaku operaciju. Kod lakše obradivih materijala to ne predstavlja problem, jer su parametri propisani od strane proizvođača u većini slučajeva dovoljni i točni.

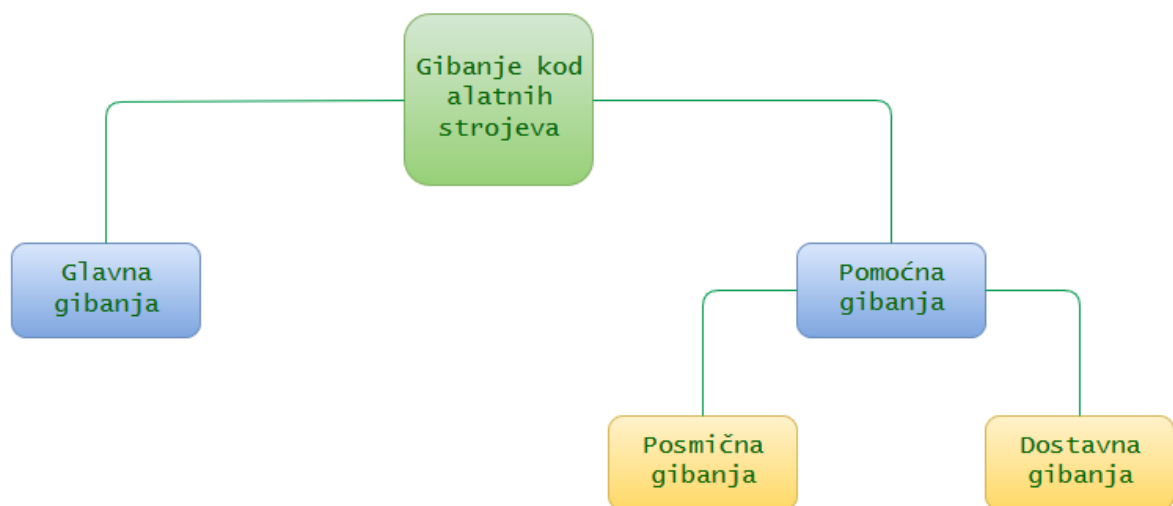
Problem se pojavljuje kod teže obradivih materijala gdje proizvođači alata nisu ispitati parametre obrade za svaki materijal ili zbog specifičnosti operacije ne mogu preporučiti parametre obrade. Tada je potrebno ispitati parametre obrade za točnu zadanu operaciju.

## 2. OPĆI DIO

Obrada odvajanjem čestica po definiciji je promjena oblika predmeta mehaničkim odvajanjem čestica osnovnog materijala. Može se izvoditi s ručnim alatima ili strojno na alatnim strojevima. Zajedničko svim postupcima obrade odvajanjem čestica je da se pomoću alata s jednom ili više reznih oštrica u obliku reznog klina s obratka odvajaju čestice materijala. Alat i obradak moraju pritom, uz primjenu energije, imati određena gibanja koja omogućuju proces obrade odvajanjem. [7]

Gibanja možemo podijeliti na glavna i pomoćna, Slika 1. Glavna gibanja su uglavnom kružna i ona su vezana za brzinu rezanja. Glavno gibanje troši najveći dio snage alatnog stroja ili obradnog centra, obično ga vrši glavno vreteno. [1]

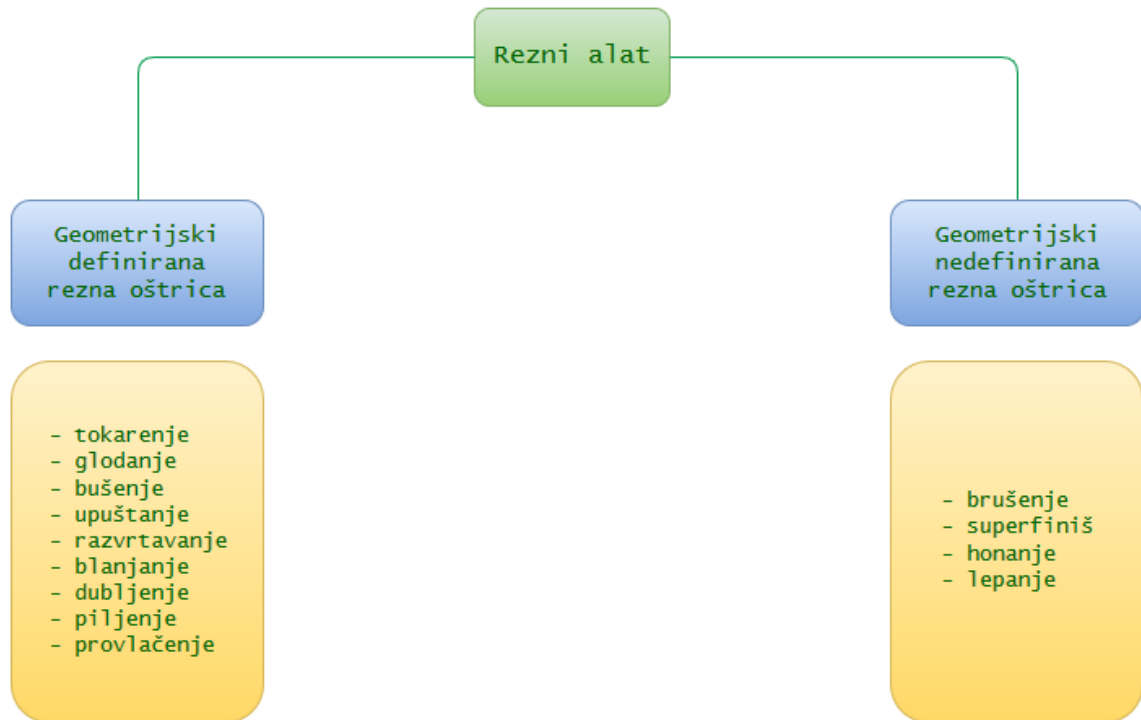
Pomoćna dijelimo na posmična i dostavna gibanja. Posmična su uglavnom pravocrtna i vezana su za posmak, odnosno posmičnu brzinu pri obradi izradaka, dok su pomoćna dostavna gibanja vezana za gibanje obratka dok alat nije u zahvatu. [1]



Slika 1. Podjela gibanja [1]

Rezne alate s oštricom dijelimo u dvije glavne kategorije, Slika 2:

- Obrada odvajanjem s geometrijski definiranom reznom oštricom
- Obrada odvajanjem s geometrijski nedefiniranom reznom oštricom



Slika 2. Podjela reznih alata [1]

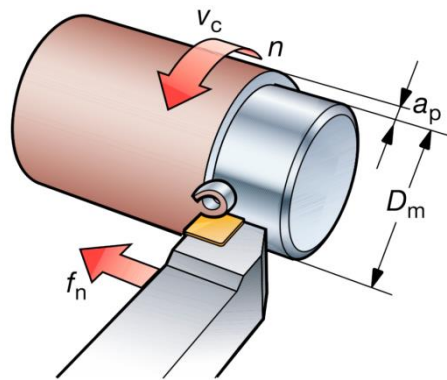


## 2.1. Obrada odvajanjem s geometrijski definiranom reznom oštricom

### 2.1.1. Tokarenje

Tokarenje je postupak obrade s geometrijski definiranom reznom oštricom, glavni parametri obrade su brzina rezanja, posmak po okretu, dubina rezanja i posmična brzina. [5]

Na Sliku 3. Primjer tokarenja [4] dan je primjer tokarenja gdje je vidljivo da obradak vrši glavno rotacijsko gibanje, dok alat vrši pomoćno posmično, linearno gibanje.



Slika 3. Primjer tokarenja [4]

Brzinu rezanja  $V_c$  definiramo prema izrazu (1), gdje je  $d$  promjer obratka [5]:

$$V_c = \frac{d \times \pi \times n}{1000} [m/min] \quad (1)$$

Broj okretaja  $n$  (2) slijedi iz izraza (1) za brzinu rezanja [5]:

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times d} [okr/min] \quad (2)$$

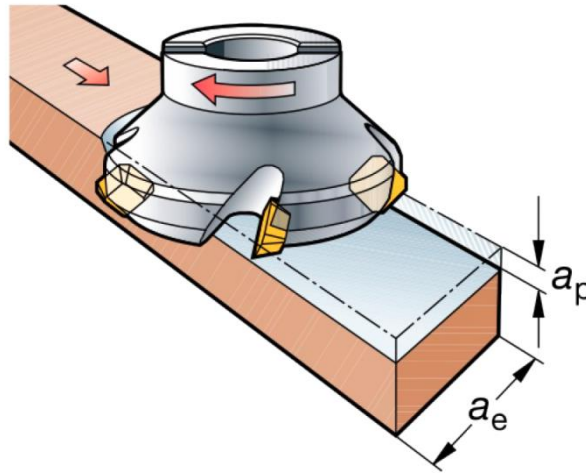
Posmičnu brzinu  $V_f$  kod tokarenja (3) definiramo prema posmaku i broju okretaja (2) dobivenog iz brzine rezanja [5]:

$$V_f = f_n \times n [mm/min] \quad (3)$$

Na modernijim tokarskim obradnim centrima je moguće obrađivati tokarenjem, bušenjem i glodanjem u jednom stezanju. Prednost za takvu obradu na tokarskom obradnom centru imaju obradci koji su rotaciono simetrični te na sebi imaju određene stvari koje treba izraditi glodanjem, bušenjem ili razvrtavanjem.

### 2.1.2. Glodanje

Glodanje je postupak obrade koji se vrši reznim alatom glodalom, glodalo je alat s geometrijski definiranom reznom oštricom, najčešće je više oštrica na glodalu. Uglavnom se koriste glodaće glave s izmjenjivim reznim oštricama, Slika 4. Čeono glodanje [4]. [5]



Slika 4. Čeono glodanje [4]

Parametri obrade su slični kao kod tokarenja, samo kod glodanja glavno gibanje vrši alat, a ne obradak.

Brzinu rezanja  $V_c$  definiramo iz izraza (4), gdje je  $d$  promjer glodala:

$$V_c = \frac{d \times \pi \times n}{1000} [m/min] \quad (4)$$

Broj okretaja glodala  $n$  (5) slijedi iz izraza (4) za brzinu rezanja:

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times d} [okr/min] \quad (5)$$

Posmičnu brzinu  $V_f$  (6) definiramo prema broju okretaja glodala (5), gdje je  $f_z$  posmak po reznoj oštrici, a  $z$  broj reznih oštrica:

$$V_f = f_z \times z \times n [mm/min] \quad (6)$$

Pri izradi složenih geometrijskih oblika i formi, pomoćno gibanje može biti vrlo složeno, ako se radi o konturnom glodanju tada se dvije osi glodaćeg obradnog centra pomiču istovremeno. Ako se obrađuje izradak gdje je potrebna troosna obrada, tada se sve tri osi kreću simultano.

Četveroosna obrada i peteroosna obrada su danas najzastupljenija te se izvode tako da se pomoćno gibanje kreće u tri translacijske i dvije rotacijske osi. Takva gibanja su vrlo složena za izračunati te ih računa računalo. Pri takvom gibanju u G-kodu svaka linija ima pet adresa koje se mijenjaju iz bloka u blok. Zbog tako puno informacija potrebno je stalno unaprjeđivati upravljačke jedinice i računala za upravljanje pomoćnim gibanjima alatnog stroja.



Slika 5. Primjeri glodala i primjene [4]

Na Slika 5 dan je primjer raznih glodala za obradu prizmatičnih izradaka, čeonu glodanje, kopirno glodanje, glodanje utora, glodanje otvora i džepova, glodalima s izmjenjivim pločicama od tvrdog metala kao i monolitnim glodalima.

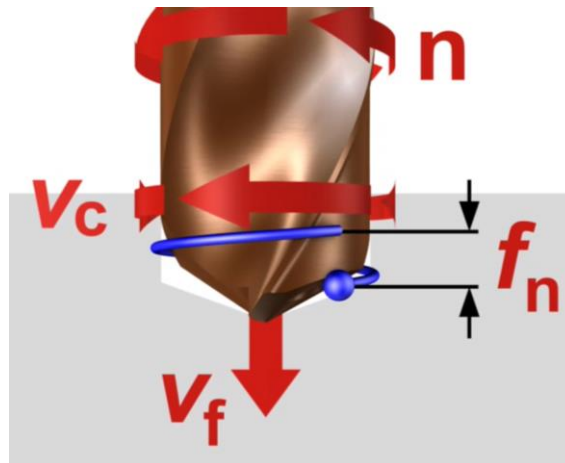
### 2.1.3. Bušenje

Bušenje je postupak obrade koji služi za obradu provrta. Najčešće se izvodi sa spiralnim svrdlom. Alat izvodi glavno i pomoćno gibanje u pravcu osi vrtnje. Bušenje spada u najprimjenjiviji postupak obrade do 25% u odnosu na ostale postupke obrade [5].

Bušenje spiralnim svrdlom može biti: bušenje u izradak, bušenje već izbušenog provrta, bušenje prolaznog provrta i bušenje slijepog provrta. [7]

Bušenje se vrši na raznim alatnim strojevima, npr. stolna bušilica, stupna bušilica, radijalna bušilica, koordinatna bušilica, tokarski obradni centar, glodaći obradni centar, specijalne bušilice za duboka bušenja. [5]

Na Sliku 6 prikazani su parametri obrade kod bušenja spiralnim svrdlom.



Slika 6. Režimi obrade kod bušenja [4]

Brzina rezanja  $V_c$  definirana je izrazom (7), s tim da je promjer koji koristimo za izračun promjer svrdla:

$$V_c = \frac{d \times \pi \times n}{1000} [m/min] \quad (7)$$

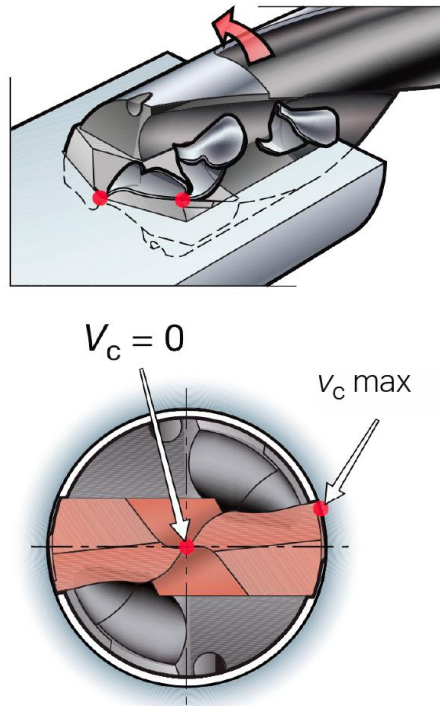
Broj okretaja svrdla  $n$  (8) slijedi iz izraza (7) za brzinu rezanja:

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times d} [okr/min] \quad (8)$$

Posmična brzina  $V_f$  je umnožak posmaka po okretu i broja okretaja:

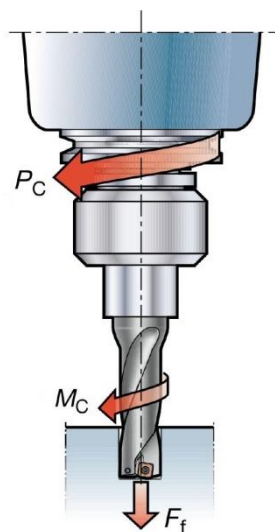
$$V_f = f_n \times n [mm/min] \quad (9)$$

Slika 7 prikazuje promjenjivu brzinu rezanja kod spiralnog svrdla. Promjer alata u osi jednak je nuli, a prema izrazu (7) tada je i brzina rezanja u osi alata jednaka nula.



Slika 7. Promjenjiva brzina rezanja kod spiralnog svrdla [4]

Kod bušenja glavna sila rezanja  $F_c$  približno je jednaka posmičnoj sili rezanja  $F_f$ . Pritom udio posmične sile zbog gnječenja na poprečnoj oštrici iznosi 25% - 50% i zbog toga se vrši izoštravanje vrha spiralnog svrdla [5]. Na Slika 8 dan je prikaz posmične sile rezanja, momenta vrtnje i snaga obrade.



Slika 8. Posmična sila rezanja, moment vrtnje i snaga obrade kod bušenja

Izraz (10) za posmičnu silu rezanja glasi:

$$F_f = A \times k_c = \frac{f_z \times d}{2} \times k_c [N] \quad (10)$$

Specifična sila rezanja  $k_c$  (11) iznosi:

$$k_c = k_{c1} \times (f_z \times \sin \kappa)^{-m_0} [N] \quad (11)$$

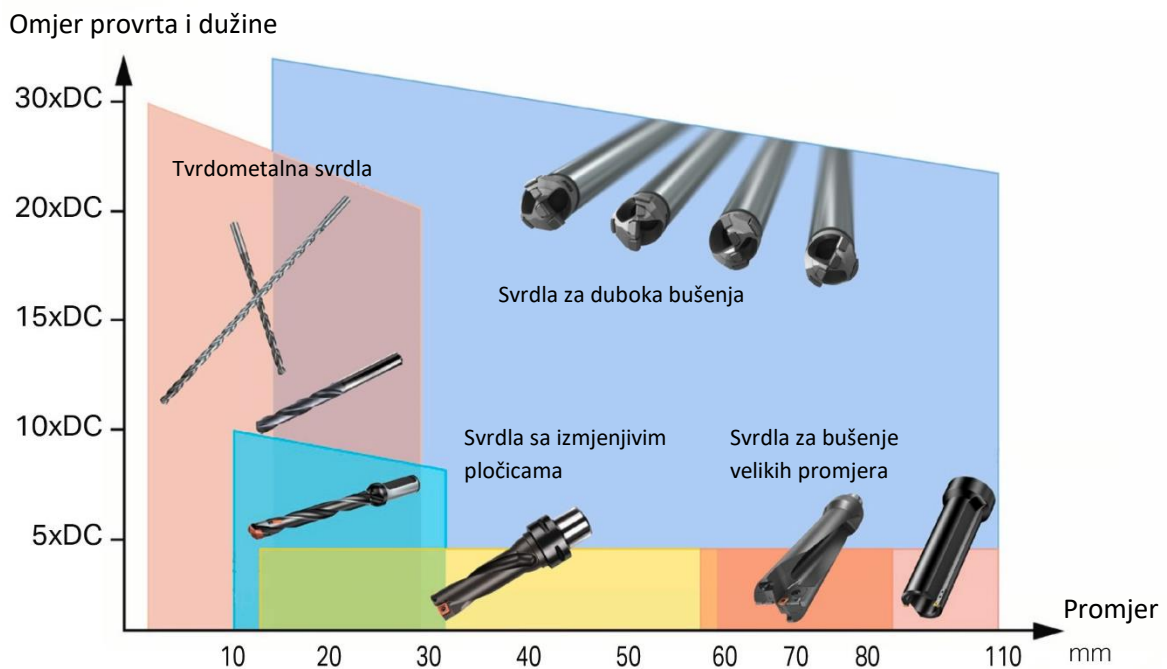
Izrazom (12) određen je moment vrtnje:

$$M_t = F_f \times \frac{D}{2000} [Nm] \quad (12)$$

Izrazom (13) određena je neto snaga stroja potrebna za obradu:

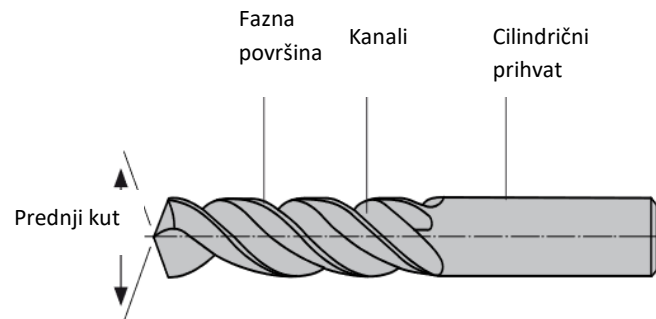
$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{1000 \times 60} [kW] \quad (13)$$

Na tokarskim obradnim centrima i glodaćim obradnim centrima bušenje je vrlo česta operacija. Koriste se visokoučinkovita svrdla od tvrdog metala s hlađenjem kroz vreteno što omogućuje veliku brzinu rezanja kao i posmičnu brzinu, a hlađenje kroz vreteno osigurava dobru odvodnju odvojene čestice i hlađenje rezne oštrice. Sve veća potražnja za obradom dubljih provrta na obradnim centrima je dovela do razvoja produženih spiralnih svrdala od tvrdog metala s hlađenjem kroz vreteno, Slika 9.



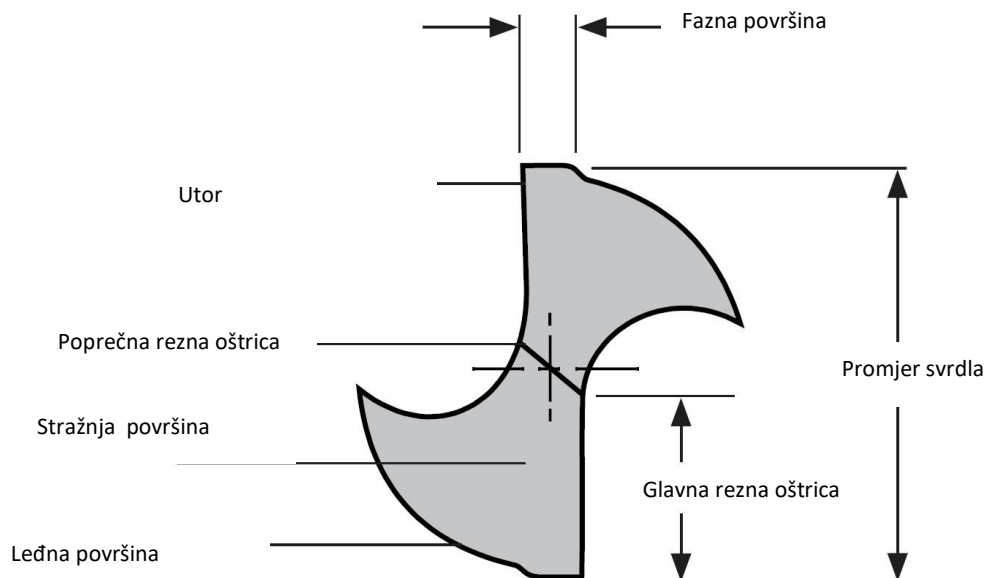
Slika 9. Dijagram dužine alata u odnosu na promjer [4]

Alati za bušenje su svrdla, svrdla mogu biti izrađena od brzoreznog čelika, od tvrdog metala ili kombiniranjem alatnog čelika s izmjenjivim reznim pločicama od tvrdog metala. Rezne pločice od tvrdog metala mogu biti pričvršćene lemljenjem ili vijčanim spojem. Svrdla s lemljenim pločicama su sve rjeđa u primjeni, osim kod specijalnih svrdala za duboka bušenja, kao na primjer „topovsko“ svrdlo.



Slika 10. Klasično spiralno svrdlo s cilindričnim prihvatom [10]

Na Slika 10 prikazano je spiralno svrdlo, koje se sastoji od cilindričnog dijela koji se steže u prihvata steznog alata, spiralnog dijela za odvajanje odvojene čestice i reznog dijela s kutom svrdla.

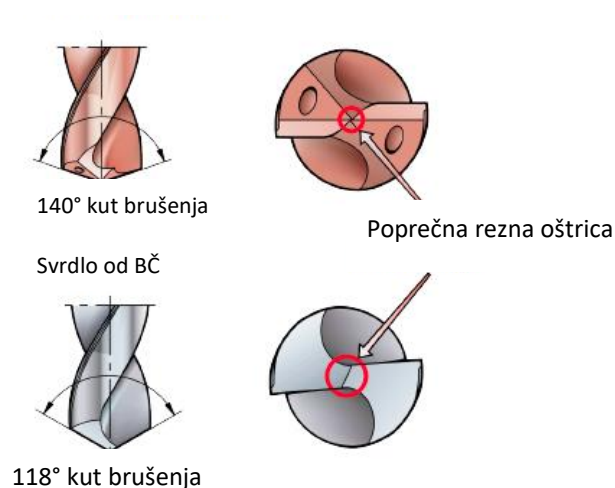


Slika 11. Osnovna geometrija spiralnog svrdla [10]

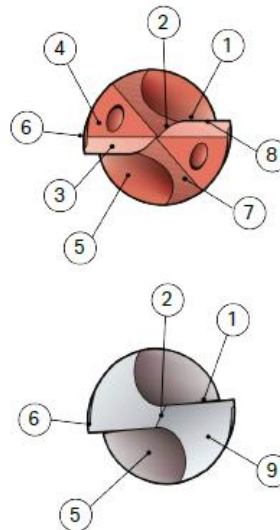
Osnovna geometrija spiralnog svrdla, vidljiva na Slika 11, sastoji se od poprečne rezne oštrice, glavne rezne oštrice, leđne površine, stražnje površine i fazne površine.

Na Slika 12 vidi se osnovna razlika u geometriji alata klasičnog svrdla od brzoreznog čelika i klasičnog svrdla od tvrdog metala. Osim što je kut namještanja povećan sa  $118^\circ$  na  $140^\circ$ , značajna promjena je i na poprečnoj reznoj oštrici koja izvedena tako da je gotovo ni nema. Smanjenjem poprečne rezne oštrice smanjuje se posmična sila rezanja, a samim time se pospješuje rezanje u blizini osi alata.

Tvrdometalno svrdlo



1. Glavna rezna oštrica
2. Poprečna rezna oštrica
3. Prva fazna površina
4. Druga fazna površina
5. Kanal za odvojenu česticu
6. Bočna rezna oštrica, fazna oštrica
7. Leđna površina
8. Skošenje rezne oštrice
9. Leđna površina



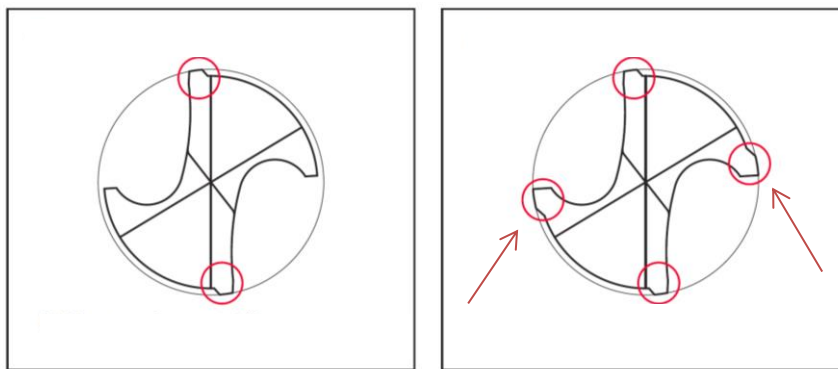
Slika 12. Osnovna razlika HSS i TM [4]



Primjenom svrdala izrađenih od tvrdog metala, operacija zabušivanja i proširivanja je postala u većini slučajeva nepotrebna, a za provrte do pet do osam puta veće od nazivnog promjera predbušenje nije potrebno. Proširivanje nije preporučljivo vršiti zato što je alat vrlo krut te je su velike šanse da se ošteti rezna oštrica i da dođe do loma alata. Smanjenjem poprečne rezne oštrice aksijalna sila rezanja se uvelike smanjila te se provrti većih promjera rade bez proširivanja. Budući da je brzina rezanja u sredini svrdla jednaka nuli, izvedba poprečne rezne oštrice na tvrdometalnim svrdlima uvelike olakšava i pospješuje bušenje.

Spiralna svrdla od tvrdog metala u promjerima od 0,3 mm do 18 mm izrađuju provrt u toleranciji od H8 do H9. Takva svrdla imaju veliku postojanost iz dodatnog razloga što kanali za hlađenje ispiranje i podmazivanje dolaze direktno na zadnji dio rezne oštrice te ju konstantno hlade, podmazuju i ispiru odvojenu česticu.

Kod dužih verzija spiralnih svrdala od tvrdog metala ili kod svrdala za teže obradive materijale, svrdlo je konstruirano s dodatne dvije bočne rezne oštrice koje osiguravaju stabilnost svrdla prilikom obrade, smanjuje mogućnost da se odvojena čestica zaglavi između bočnog dijela svrdla i provrta, povećava točnost provrta. Slika 13 prikazuje usporedbu takvog svrdla (desno) i reznih oštrica kraćeg spiralnog svrdla ili svrdla za lakše obradive materijale (lijevo).



Slika 13. Bočne oštrice spiralnog svrdla [3]

Oblik odvojene čestice je geometrijski oblik koji je nastao kod obrade [5]. Prema Slika 14 postoji 10 oblika odvojenih čestica od kojih su 1, 2, 3 nepovoljni, 4 do 10 zadovoljavaju, 6, 7, 8, povoljan oblik [5].

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
duga-glatka	zgužvana	zavojna	zavojno cilindrična	cilindrična	kratka cilindrična	spiralno cilindrična	spiralna	krupno drobljena	sitno drobljena
ne zadovoljava				dobra					
ne zadovoljava				zadovoljava					

Slika 14. Oblici odvojene čestice [5]

U duboko bušenje spadaju bušenja gdje je dubina provrta deset puta duža od nazivnog promjera. Princip je isti kao i kod klasičnog bušenja provrta gdje glavno i posmično gibanje vrši alat, ali ne mora biti, jer postoje i alatni strojevi i obradni centri gdje obradak vrši glavno gibanje dok alat vrši posmično.

U oba slučaja najvažnije je pravilno odrediti režime obrade kako bi se odvojena čestica pravilno lomila i odvajala od rezne oštrice, alata i obratka. Uz to potrebno je osigurati kvalitetan dovod sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, jer su hlađenje reznih oštrica i uklanjanje odvojene čestice među najbitnijim faktorima pri dubokom bušenju. [5]

Tehnike dubokog bušenja mogu se podijeliti na četiri postupka [5]:

- Postupak s jednom oštricom
- Ejektorsko bušenje
- STS bušenje
- Duboko bušenje spiralnim svrdlom

### 2.1.3.1 Bušenje s jednom oštricom

Postupak bušenja dubokih provrta s jednom oštricom izvodi se „topovskim“ svrdlom (Slika 15), koje ima lemljenu pločicu od tvrdog metala kao glavnu reznu oštricu. Tijelo svrdla je od alatnog čelika i ima po cijeloj dužini provrt za SHIP. Utor za odvodnju odvojene čestice izveden je kao veliki V izrez. Područje primjene je od 0,8 mm do 40 mm, a dužine mogu biti i do 75 x D. Prema potrebi je moguće izraditi i specijalnu dužinu i promjer prema narudžbi.

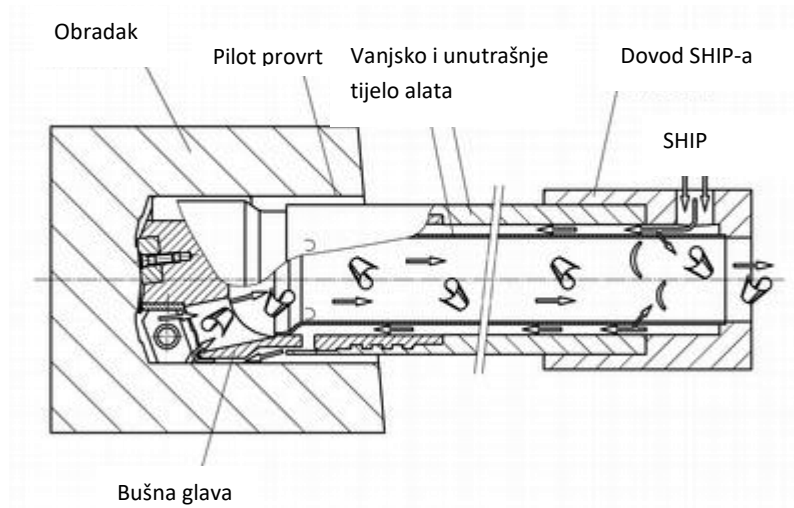
Svrđlo se može koristiti na bušilicama, obradnim centrima kao i na specijalnim strojevima za duboka bušenja.



Slika 15. „Topovsko“ svrdlo [4]

### 2.1.3.2 Ejektorsko bušenje

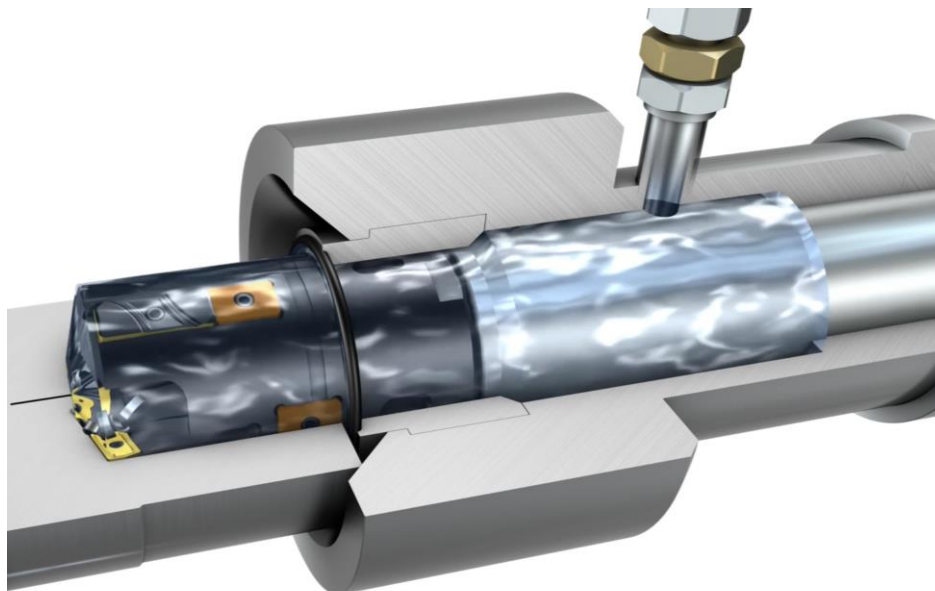
Ejektorsko bušenje je postupak bušenja koji se izvodi na horizontalnim alatnim strojevima uz primjenu specijalnog svrdla s dvije cijevi. Radi smanjenja vibracija koristi se specijalna lineta i prihvat alata koji ima ulaz za SHIP i izlaz za SHIP i odvojenu česticu. Svrđlo ima otvore za sapnice kroz koje se dovodi SHIP te odvodi odvojenu česticu kroz središnji dio alata (Slika 16). Primjenjuje se za bušenje provrta od 20 do 200 mm u dužinama do  $100 \times D$ , prema potrebi je moguće izraditi i specijalnu dužinu i promjer prema narudžbi.



Slika 16. Shematski prikaz ejektorskog bušenja [13]

### 2.1.3.3 STS bušenje

STS je skraćenica od „Single tube system“, u literaturi se još koristi i naziv BTA sistem, a odnosi se na princip bušenja svrdlima za duboko bušenje većih promjera kojem je tijelo cijev kroz koju se odvođe SHIP i odvojena čestica, dok se SHIP dovodi preko brtvenog prstena izvan svrdla (Slika 17). Ovo je postupak bušenja koji se izvodi na specijalnim alatnim strojevima za duboka bušenja. S ovakvim svrdlima je moguće izraditi u standardnim dimenzijama provrte do 350 mm i dužine preko  $100 \times D$ . Određeni proizvođači alata navode kako mogu proizvesti specijalni alat za obradu provrta od 700 mm.



Slika 17. Prikaz „STS“ bušenja [4]

#### 2.1.3.4 Duboko bušenje spiralnim svrdlom

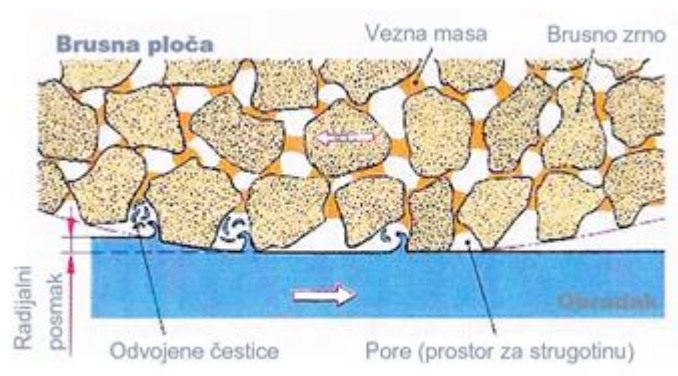
Duboko bušenje spiralnim svrdlima je doživjelo svoju primjenu na obradnim centrima koji su opremljeni visokotlačnim hlađenjem kroz glavno vreteno. Koriste se spiralna svrdla izrađena od tvrdog metala te im je područje primjene od 3 do 30 mm u dužinama do  $50 \times D$  (Slika 18). Ovaj postupak je uvelike olakšao izradu dubokih provrta u lakoj i srednjoj strojnoj obradi, pogotovo u maloserijskoj i serijskoj proizvodnji gdje se na obradnom centru uz ostalu obradu izrađuju i duboki provrti.



Slika 18. Duboko bušenje spiralnim svrdlom [10]

## 2.2. Obrada odvajanjem s geometrijski nedefiniranom reznom oštricom

Kod obrade geometrijski nedefiniranom reznom oštricom do odvajanja također dolazi reznim klinom. Glavni predstavnik obrade geometrijski nedefiniranom reznom oštricom je postupak brušenja. Kod brušenja količina reznih oštrica koje su u zahvatu nije definiran. Brusna zrna su izrađena od prirodnih ili sintetičkih brusnih sredstava, koja su povezana vezivnim sredstvom u brusnu ploču, Slika 19. [5]



Slika 19. Geometrijski nedefinirana rezna oštrica [5]

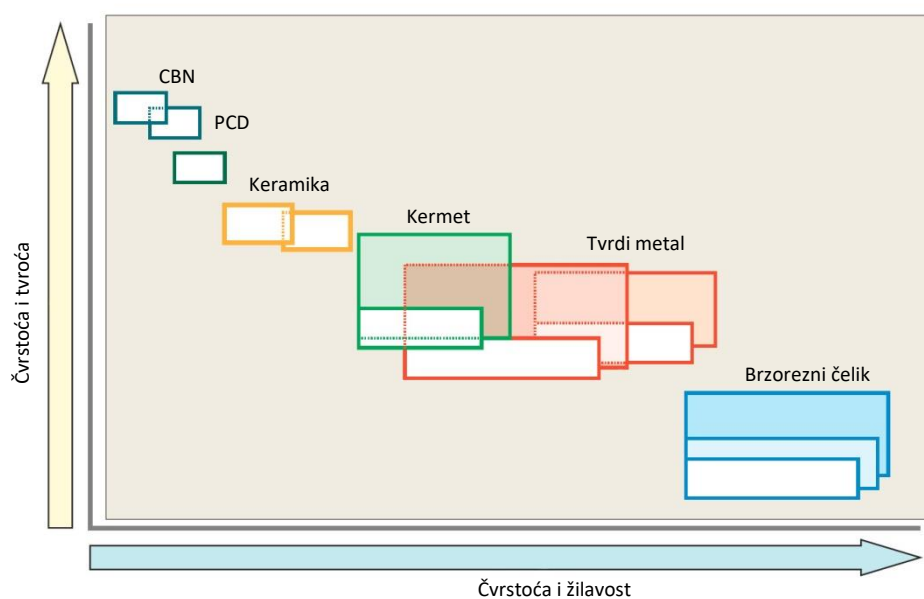
### 2.3. Rezni materijali

Rezni materijali su oni materijali koji se koriste za izradu reznog dijela alata. Glavne karakteristike takvih materijala su [5]:

- Tvrdoća i tlačna čvrstoća
- Savojna čvrstoća i žilavost
- Otpornost na trošenje i ponovljivost vrijednosti veličina trošenja
- Čvrstoća rezne oštrice
- Toplinska otpornost
- Otpornost na oksidaciju, difuziju, adheziju, abraziju, lijepljenje, interakciju s materijalom obratka, otpornost na temperaturnu dilataciju.

Na Sliku 20 prikazana je osnovna podjela reznih materijala:

- Brzorezni čelik
- Tvrđi metali
- Kermeti
- Rezna keramika
- Polikristalni kubični bornitrid
- Dijamant



Slika 20. Rezni materijali [12]

### 2.3.1. Brzorezni čelik

Brzorezni čelik ima otpornost na popuštanje osnovne strukture do cca 600°C, što je i najveća radna temperatura, tvrdoća mu je cca 65 HRC pri sobnoj temperaturi. Dobivanje brzoreznih čelika se dijeli u dvije grupe [5]:

- Klasično – taljenje, kovanje, valjanje
- Sinterovanje finoizrnatih praškova.

Područje primjene BČ je široko, prije svega za alate s oštrom reznom oštricom i manjim kutom reznog klina, kao npr. spiralna svrdla, alati za izradu navoja, razvrtači [5].

Povećanje rezne sposobnosti alata postiže se prevlačenjem s tvrdim prevlakama kao TiN, TiCN, TiAlN, koje su otporne na trošenje. Prevlačenje se vrši postupkom PVD („Physical Vapor Deposition“), temperatura prevlačenja je od 450 do 550°C, što je ispod temperature popuštanja brzoreznog čelika i ne utječe na tvrdoću alata. [5]

Danas se gotovo 90 % alata od brzoreznog čelika prevlači što povećava postojanost alata i povećava brzinu rezanja.

### 2.3.2. Tvrđi metal

Tvrđi metali su sinterovani materijali koji se sastoje od dvije faze a to su [5]:

- Vezivna faza koja je metalna Co, Ni ili Mo i relativno je mekša
- Karbidna faza koju čine karbidi, tvrda zrnca WC, TiC, TaC, NbC i dr., koja su „usađena“ u vezivnu fazu.

Zadatak vezivne faze je vezanje tvrdih i krutih karbida u jedno čvrsto tijelo, odnosno u tvrdi metal koji, zahvaljujući tim tvrdim karbidima, ima visoku toplinsku tvrdoću i otpornost na trošenje. Prednosti tvrdog metala su [5]:

- Ravnomjerna struktura dobivena sinteriranjem
- Visoka tvrdoća
- Otpornost na pritisak
- Toplinska otpornost na trošenje, npr. tvrdoća TM na 1000°C jednaka je tvrdoći BČ na 20°C.

Tvrđi metal se kao i BČ prevlači PVD postupkom, ali može se prevući i CVD postupkom („Chemical Vapour Deposition“) koji se vrši na cca 950°C. [5]

Danas se gotovo 80 % operacija na obradnim centrima izvodi s prevučenim alatima od TM. Uvelike se ubrzao proces bušenja sa svrdlima od prevučenog tvrdog metala s hlađenjem kroz vreteno. Udio korištenja tvrdog metala u postupcima glodanja je znatno porastao, dok se brzorezni čelik gotovo ni ne koristi.

### 2.3.3. *Kermet*

Kermet je tvrdi metal koji ima tvrdi fazu od TiC i TiN, a vezivnu fazu od Ni i Co. Kermeti imaju visoku čvrstoću u rubovima i visoku otpornost na trošenje. Primjenjuje se za izradu alata koji su za finu i završnu obradu. [5]

### 2.3.4. *Rezna keramika*

Razlika između rezne keramike i tvrdog metala je to što rezna keramika nema metalnu vezivnu fazu. Rezna keramika je izrazito krta, što alat čini lako lomljivim. Rezna keramika je izuzetno pogodna za suhu obradu jer je vrlo osjetljiva na toplinsku promjenu. [5]

### 2.3.5. *CBN*

Termostalni oblik bornitrida je analogno ugljiku jedna mekana heksagonalna struktura kubni kristalni bornitrid CBN. Dobiva se pomoću procesa sinteze na temperaturi između 1500 i 2100°C, i tlaku između 6000 i 7000 MPa (60000 do 70000 bara). Proizveden je prvi put 1957.g. [5]

Kod proizvodnje sirovaca za rezne pločice uvodi se još jedna sinteza, putem koje se CBN zrnca pomoću katalizatora generiraju u polikristalni kubični bornitrid PCBN. Značajna svojstva PCBN su [5]:

- Visoka tvrdoća
- Viska provodljivost topline
- Dobra kemijska postojanost.



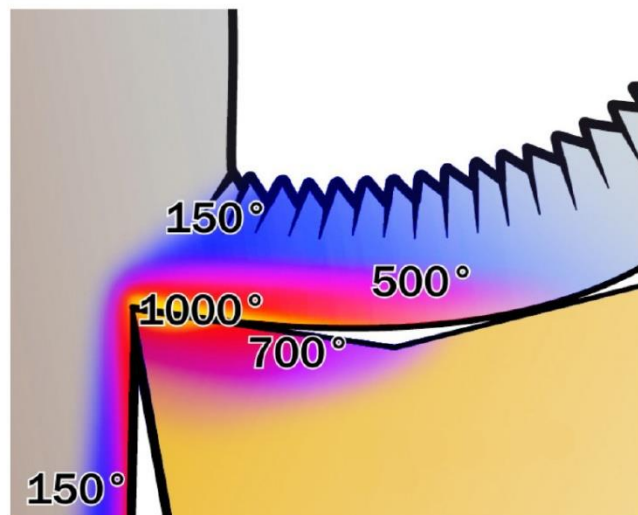
### 2.3.6. PKD

Dijamat može biti monokristalni MKD i polikristalni PKD. Prirodni dijamant je u monokristalnoj izvedbi i služi za izradu reznih alata s definiranom reznom geometrijom i on je anizotropan – mehanička svojstva mu nisu ovisna o orijentaciji kristala. Dijamant pripada grupi supertvrdih nemetalnih materijala i najtvrdi je od svih do sada poznatih materijala na svijetu. [5]

Glavno područje primjene PKD reznih alata je obrada neželjeznih metala, kao što su aluminij, bakar, mesing i bronca. [5]

### 2.4. Trošenje alata i postojanost

Kod obrade metala reznim alatom dolazi do trošenja alata, trošenje je pojava kojom se smanjuje postojanost rezne oštrice. Ona nastaje postepeno te ju je izuzetno bitno pratiti. Prilikom obrade odvajanjem prisutni su složeni i nepovoljni uvjeti za rezu oštricu, kao što su visoka temperatura, visoki tlak, trenje, vibracije, razne fizikalno kemijske pojave. Temperature kod reznog klina mogu biti i više od 1000°C [5]. (Slika 21)

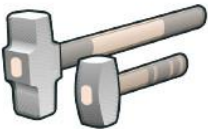
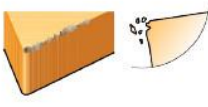
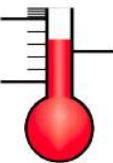
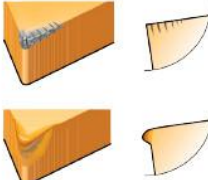





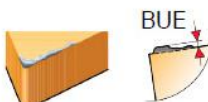


Slika 21. Temperatura u reznom klinu [4]

Trošenje alata je teoretski teško odrediti jer ima puno faktora koji utječu na trošenje alata, odnosno na postojanost rezne oštrice. U realnim uvjetima to ovisi od konstrukcije izratka, načina stezanja, alatnog stroja, steznog alata, materijala izratka i reznog alata, SHIP-a, režima obrade, stabilnosti alatnog stroja.

Oštećenja rezne oštrice možemo kategorizirati u pet glavnih grupa (Slika 22):

1. Mehanička oštećenja
2. Toplinska oštećenja
3. Kemijska oštećenja
4. Adhezivna oštećenja
5. Oštećenja uslijed naljepljivanja.

Tip oštećenja	Simbol	Shematski prikaz	Razlog
Mehaničko			Mehaničkim djelovanjem dolazi do loma oštrice
Toplinsko			Temperaturne razlike uzrokuju pukotine i plastičnu deformaciju rezne oštrice
Kemijsko			Kemijska reakcija rezne oštrice i obratka uzrokuje trošenje rezne oštrice
Abrazivno			Abrazivno djelovanje ne reznu oštricu
Lijepljenje			Naljepljivanje odvojenog materijala otežava rezanje te dovodi do oštećenja rezne oštrice

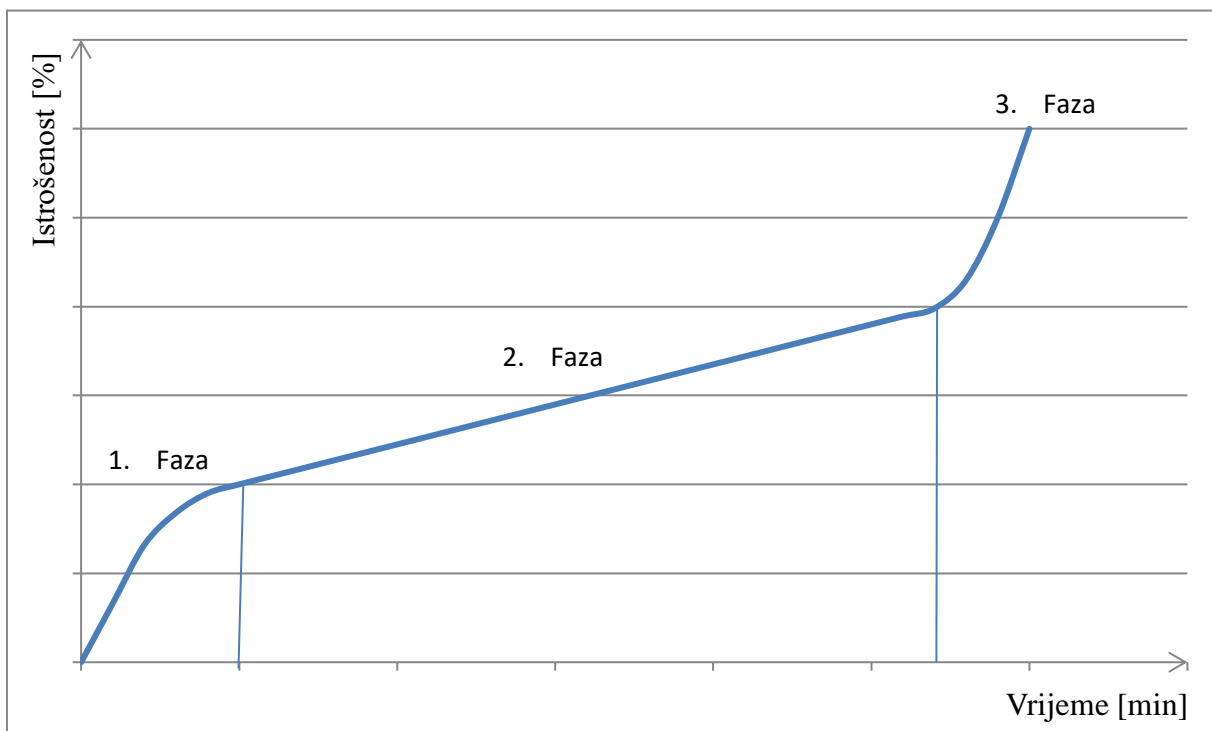
Slika 22. Tipovi trošenja [4]

Oštećenja koja se vide uslijed trošenja na reznom alatu čine zbroj svih trošenja koja su prouzročena različitim mehanizmima trošenja te je teško odrediti njihov pojedinačni udio. [5]

### 2.4.1. Krivulja trošenja

Trošenje reznog alata može se opisati krivuljom trošenja koja je već poznata u tribologiji. Praćenjem trošenja nekog parametra kod alata kroz vrijeme obrade uočavamo tri faze trošenja [5], prikazane na Slika 23:

1. Prva faza trošenja - početno trošenje alata, gdje se rezna oštrica prilagođava materijalu obratka i troši se dosta brzo
2. Druga faza trošenja – rezna oštrica se troši ravnomjerno, trošenje po zakonu pravca, puno sporije nego u prvoj fazi i to je vrijeme kvalitetne eksploatacije alata
3. Treća faza trošenja – naglo trošenje, alat više nije sposoban rezati te je velika mogućnost otkaza alata.



Slika 23. Slika krivulje trošenja alata

Stanje učinka obrade je sposobnost djelujućeg para alat – obradak da izvrši određeni proces obrade. Da bi se odredilo stanje učinka obrade potrebni su kriteriji stanja i veličine stanja. Stanje učinka karakterizira [5]:

- Rezna sposobnost alata je sposobnost određenog alata da po danim uvjetima izvrši obradu određenog materijala
- Rezljivost alata je sposobnost određenog alata da zadrži svoju reznu sposobnost za vrijeme obrade

- Obradivost materijala je svojstvo materijala obratka da se pod određenim uvjetima može obraditi.

Kriteriji stanja su granične vrijednosti neželjenih promjena [5]:

- Na alatu mjerljive veličine trošenja kao širina trošenja na stražnjoj površini VB, dubina kratera KT, udaljenje sredine kratera od rezne oštrice KM, radijalno trošenje VD
- Na obratku mjerljive veličine kao točnost mjere, hrapavost, integritet obrađene površine
- U procesu obrade mjerljive veličine kao sile rezanja, snaga, moment, vibracije, statička i dinamička krutost stroja.

Veličine stanja su [5]:

- Postojanost alata T
- Put rezanja L
- Količina obrađenih komada
- Skinuti volumen odvojene čestice koji rezna oštrica može odvojiti u svojoj postojanosti.

Kod većine postupaka obrade određuje se veličina stanja postojanosti alata T (min), a kod glodanja i bušenja koristi se veličina stanja: put alata u pravcu posmaka, a vrlo često i broj komada obradaka koji se može obraditi za vrijeme jedne postojanosti alata. [5]

## 2.5. Obradni centri

Obradni centar ili osnovna fleksibilna obradna jedinica, odnosno obradni modul, je numerički upravljani alatni stroj kojemu je dodana automatska izmjena alata, te u automatskom ciklusu i jednom stezanju obrađuje sve slobodne površine obratka. Obradni centri pogodni su za obradu složenih rotacijskih i prizmatičkih izradaka u malim i srednjim serijama, prvenstveno glodanjem, a moguće je bušenje, tokarenje i brušenje. [7]



Slika 24. Horizontalni obradni centar [8]

Postoji nekoliko podjela obradnih centara [7]:

Osnovna podjela je na:

- Glodaće obradne centre (Slika 24)
- Tokarske obradne centre
- Brusački obradni centri (Slika 25)



Slika 25. Brusački obradni centar [10]

Navedene skupine obradnih centara mogu se podijeliti prema položaju glavnog vretena:

- Horizontalne
- Vertikalne

Odnosno prema ostalim značajkama mogu se podijeliti i na:

- Jednovretene
- Dvovretene
- Viševretene

Prema broju numerički upravljanim osima:

- 3 osni obradni centar
- 4 osni obradni centar
- 5 osni obradni centar (Slika 26)



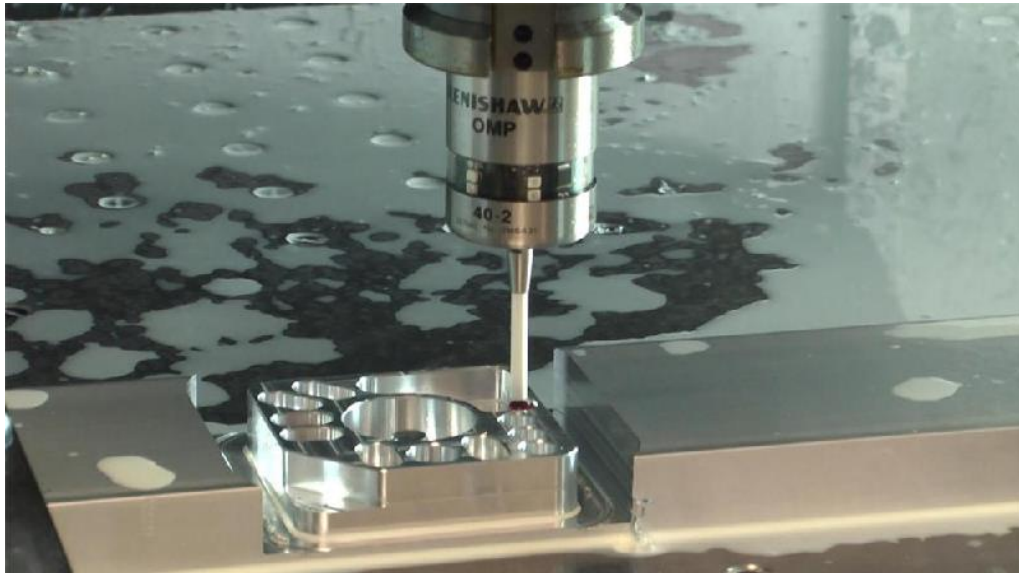
Slika 26. 5x obradni centar [8]

Obradnom centru osim obavezne automatske izmjene alata može biti dodana i automatska izmjena obradaka. Moguća je verzija s robotskom rukom ili izmjena paleta. Najčešća je paletizacija sustava, gdje svaka paleta ima svoju referentnu nultu točku te je prenošenje obratka na paleti s jednog na drugi obradni centar lako moguća bez određivanja nul-točke komada. Također je povoljno i za međufaznu kontrolu jer i mjerni uređaj može koristiti isti paletni prihvat. Tada je obradni centar osnovni modul fleksibilne obradne ćelije ili sustava. [7]

Fleksibilna obradna ćelija može raditi djelomično bez nazočnosti operatera, ponavlja ciklus te se može automatizirati da za svaku poziciju sam sustav provjerava nul-točku obratka, da

provjerava istrošenost alata, te prema tome obavještava operatera koji alat je potrebno zamijeniti. [7]

Obradni centar i fleksibilna obradna ćelija se mogu programirati da, nakon što je program obrade gotov, 3D ticalom izmjere tolerancije izrađene na obratku, te shodno tome korigiraju kompenzaciju alata te ponove dio koji je potreban (Slika 27).



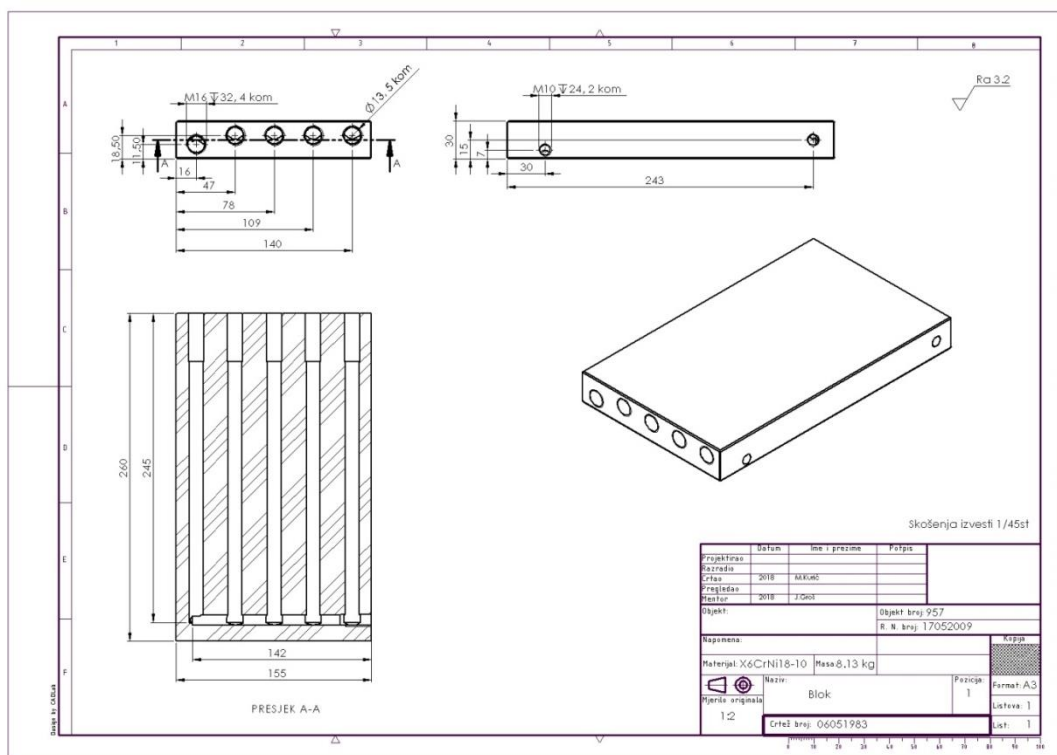
Slika 27. Slika 3D ticala [2]



### 3. POSTAVA ZADATKA

Pregledom postupaka obradom odvajanja čestica s geometrijski definiranom reznom oštricom, potrebno je istražiti postojanost raznog alata za izradu dubokih provrta u materijalu X6CrNi1810. Budući da se radi o austenitnom nehrđajućem čeliku koji je teško obradiv, bušenjem će se istražiti postojanost rezne oštrice kako bi se točno odredilo koliko je potrebno osigurati reznog alata za izradu 10 izradaka.

Na svakom izratku je potrebno izraditi 5 provrta promjera 13 mm i dubine 245 mm, kako je prikazano na Slika 28. U svrhu istraživanja postojanosti rezne oštrice vršit će se bušenje skoro do otkaza raznog alata. Nakon svakog izbušenog provrta kontrolirat će se rezna oštrica, promjer i oblik odvojene čestice. Kontrolirat će se opterećenje glavnog vretena jer ako dođe do drastičnog oštećenja rezne oštrice moment i rezna sila će se povećati, analogno tome će i opterećenje glavnog vretena porasti. Udio reznog ulja u SHIP-u treba iznositi minimalno 8 %.



Slika 28. Nacrt izratka

U sljedećoj fazi istraživanja izračunat će se režimi obrade, glavna sila rezanja, moment vrtnje te potrebna snaga za obradu provrta. Izračunate vrijednosti ćemo prikazati dijagramom postojanosti alata, te nakon istraživanja usporediti s rezultatima ispitivanja.



## 4. RAZRADA ZADATKA

### 4.1 Materijal izratka

Materijal izratka je X6CrNi18-10 austenitni nehrđajući čelik, teško obradiv. Tablica 1. prikazuje kemijski sastav materijala prema normi EN 10028-7-2007.

Tablica 1. Kemijski sastav materijala X6CrNi18-10

Element	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	N
%	0.04-0.08	max 1	max 2	8 - 11	max 0.035	max 0.015	17 - 19	max 0.1

Koeficijent  $m_c$  i specifičnu silu rezanja  $k_{c1}$ , potrebne za izračun sile rezanja, momenta i snage stroja koristimo prema Slika 29, iz priručnika za određivanje režima obrade.

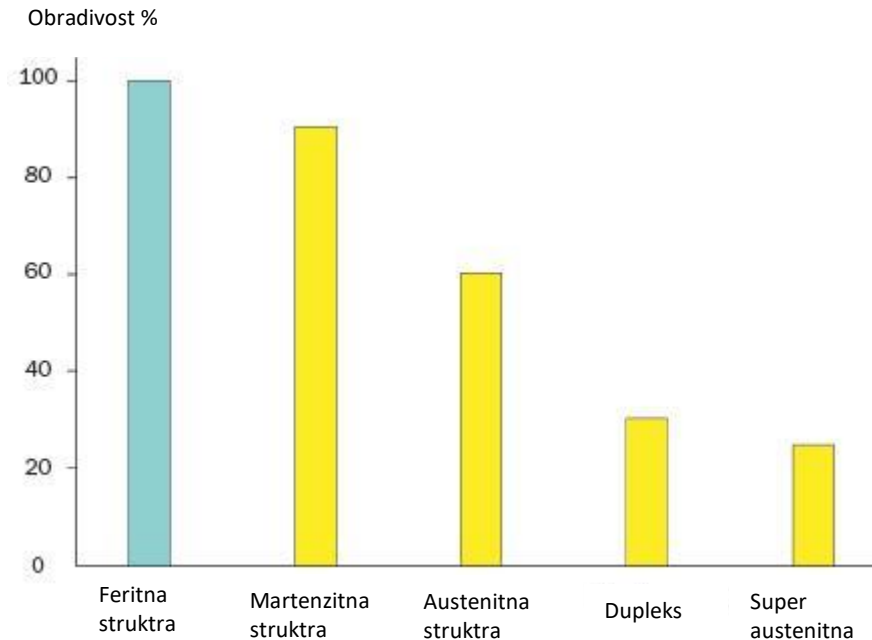
MC code	Material group	Material sub-group	Manufacturing process	Heat treatment	nom	Specific cutting force, $k_{c1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$m_c$				
P5.0.Z.AN	5	0	Z	AN	annealed	200 HB	1800	0.21			
P5.0.Z.HT					HT	hardened+tempered	330 HB	2300	0.21		
P5.0.Z.PH					PH	precipitation hardened	330 HB	2800	0.21		
P5.0.C.UT					C	cast	UT	untreated	250 HB	1900	0.25
P5.0.C.HT							HT	hardened+tempered	330 HB	2100	0.25
P5.1.Z.AN					5	1	Z	AN	annealed	200 HB	1650
M1.0.Z.AQ	1	0	Z	AQ	annealed/quenched or annealed	200 HB	2000	0.21			
M1.0.Z.PH	1	0	Z	PH	precipitation hardened	300 HB	2400	0.21			
M1.0.C.UT					C	cast	UT	untreated	200 HB	1800	0.25
M1.1.Z.AQ							1	machinability improved (as SANMAC)	Z	AQ	annealed/quenched or annealed
M1.1.Z.AQ		2	free cutting steel	Z	AQ	annealed/quenched or annealed	200 HB	1800	0.21		
M1.3.Z.AQ		3	Ti-stabilized	Z	AQ	annealed/quenched or annealed	200 HB	1800	0.21		
M1.3.C.AQ							C	cast	AQ	annealed/quenched or annealed	200 HB
M2.0.Z.AQ		2	0	Z	AQ	annealed/quenched or annealed	200 HB	2300	0.21		
M2.0.C.AQ							C	cast	AQ	annealed/quenched or annealed	200 HB
M3.1.Z.AQ		3	1	Z	AQ	annealed/quenched or annealed	230 HB	2000	0.21		
M3.1.C.AQ							C	cast	AQ	annealed/quenched or annealed	230 HB
M3.2.Z.AQ			2	<60% ferrite (rule of thumb N<0.10%)	Z		AQ	260 HB	2400	0.21	
M3.2.C.AQ								C	cast	AQ	annealed/quenched or annealed

Slika 29. Glavna podjela nehrđajućih čelika u ISO grupe [14]

Glavna karakteristika nehrđajućih čelika je uz željezo (Fe) kao osnovni element visoki udio kroma (Cr), više od 12%, niski udio ugljika (C) cca 0,05%, te dodatni legirni elementi kao što

su nikel (Ni), molibden (Mo), niobij (Nb), titan (Ti) koji mu daju otpornost na koroziju i čvrstoću pri povišenoj temperaturi.

Prema dijagramu relativne obradivosti u odnosu na strukturu nehrđajućeg čelika se vidi da je austenitni nehrđajući čelik dosta nepovoljan za obradu (Slika 30).



Slika 30. Dijagram obradivosti nehrđajućih čelika [4]

Prema tome će i postojanost alata, pogotovo pri dubokom bušenju, biti znatno manja nego kod obrade drugim postupkom s geometrijski definiranom reznom oštricom.

#### 4.2 Oprema za izvođenje istraživanja

Bušenje će se izvoditi na vertikalnom obradnom centru koji u glavnom vretenu osigurava maksimalnu snagu od 20 kW i moment od 173 Nm. Prihvat alata u glavno vreteno definirano je standardom HSK63-A. Maksimalni broj okretaja glavnog vretena je 18000 okr/min. Posmična gibanja osiguravaju motori koji su u stanju savladati silu od 8500 N. Kroz vreteno je moguće hladiti alat visokotlačnom pumpom, koja pruža do 80 bara radnog pritiska i protoka do 30 l/min.

Odabrano svrdlo za izradu dubokog provrta je Alpha 4 A6685TFT promjera 13 mm dužine 18 x D, kompletno izrađenog od tvrdog metala (Slika 31). Glavna rezna oštrica je prevučena, a geometrija svrdla izrađena sa četiri margine za bočno vođenje, poliranim kanalima za

odvodnju odvojene čestice kako bi se smanjila mogućnost naljepljivanja materijala, te smanjila sila trenja.



Slika 31. Svrđlo promjera 13 mm

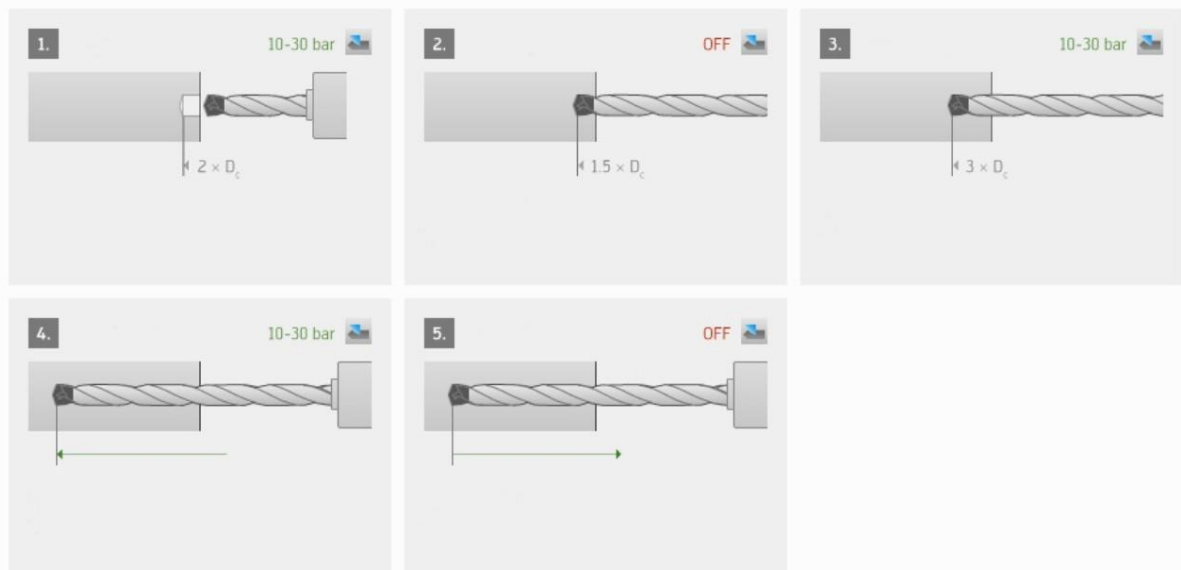
Spiralno svrdlo konstruirano je s cilindričnim prihvatom promjera 14 mm koji je stegnut u termoskupljajući prihvat (Slika 32).



Slika 32. Termoskupljajući prihvat 14 mm [18]

Strategija za duboko bušenje spiralnim svrdlom od tvrdog metala [10] je definirana sljedećim koracima (Slika 33):

1. Izbušiti pilot provrt  $2 \times D$  s pilot svrdlom
2. Prilaz u provrt bez SHIP-a, pri režimima obrade:
  - a.  $n = 500 \text{ okr/min}$
  - b.  $V_f = 1000 \text{ mm/min}$
3. Početak bušenja do  $3 \times D$  s uključenim SHIP-om pri režimima obrade:
  - a.  $V_c = 25 - 50\%$
  - b.  $V_f = 25 - 50\%$
4. Duboko bušenje, pri režimima obrade:
  - a.  $V_c = 100\%$
  - b.  $V_f = 100\%$
5. Izvlačenje svrdla iz provrta isključenim SHIP-om, pri režimima:
  - a.  $n = 500 \text{ okr/min}$
  - b.  $V_f = 1000 \text{ mm/min}$



Slika 33. Koraci u dubokom bušenju [10]

Za mjerenje provrta koristit će se mikrometar za provrte marke „Mitutoyo“, s produžetkom za mjerenje dubokih provrta (Slika 34).



Slika 34. Mikrometar za provrte

### 4.3 Izračun režima obrade

Glavna brzina rezanja prema kataloškim režimima je 60 m/min za postojanost od 15 minuta [10]. Brzina rezanja korigirana je za 0,84 radi dobivanja ekonomične postojanosti od 30 minuta (Slika 35).

Vrijeme [min]	10	15	20	25	30	45	60
Faktor korekcije	1.11	1.0	0.93	0.88	0.84	0.75	0.70

Slika 35. Faktori korekcije brzine rezanja ovisno o vremenu obrade [14]

Budući da je materijal tvrdoće 220 HB, a brzine rezanja su deklarirane za materijale tvrdoće 180 HB, radi se dodatna korekcija za faktor 0,84 (Slika 36).

ISO/ ANSI	MC(1)	HB(2)	Smanjenje tvrdoće ←				0	→ Povećanje tvrdoće			
			-60	-40	-20	+20		+40	+60	+80	+100
P	P2	HB 180	1.44	1.25	1.11	1.0	0.91	0.84	0.77	0.72	0.67
M	M1	HB 180	1.42	1.24	1.11	1.0	0.91	0.84	0.78	0.73	0.68
K	K2	HB 220	1.21	1.13	1.06	1.0	0.95	0.90	0.86	0.82	0.79
	K3	HB 250	1.33	1.21	1.09	1.0	0.91	0.84	0.75	0.70	0.65
N	N1	HB 75			1.05	1.0	0.95				
S	S2	HB 350			1.12	1.0	0.89				
H	H1	HRC(3) 60			1.07	1.0	0.97				

Slika 36. Faktori korekcije brzine rezanja ovisno o tvrdoći materijala [14]

Prema izrazu (7) brzina rezanja iznosi  $60 \text{ m/min}$ , što korigiramo za dva faktora prema priručniku za određivanje režima obrade [14], čime dobivamo:

$$V_c = 60 \times 0,84 \times 0,84 \approx 42 \text{ m/min} = 0,7 \text{ m/s} \quad (14)$$

Broj okretaja računamo prema izrazu (8):

$$n = \frac{42 \times 1000}{\pi \times 13} = 1030 \text{ okr/min} \quad (15)$$

Prema [10] za izračun koristimo posmak  $f = 0.126 \text{ mm/okr}$ . Uvrštavamo vrijednost u izraz (9) za posmičnu brzinu:

$$V_f = 0.126 \times 1030 = 130 \text{ mm/min} \quad (16)$$

Specifična sila rezanja  $k_c$  prema izrazu (11) iznosi:

$$k_c = 2000 \times (0.063 \times \sin 70)^{-0.21} = 3621 \text{ N} \quad (17)$$

Glavnu silu rezanja izračunamo iz izraza (10):

$$F_f = \frac{0.063 \times 13}{2} \times 3621 = 1483 \text{ N} \quad (18)$$

Moment vrtnje prema izrazu (12) iznosi:

$$M_t = 1483 \times \frac{13}{2000} = 9,64 \text{ Nm} \quad (19)$$

Neto snaga obrade prema izrazu (13) iznosi:

$$P_c = \frac{1483 \times 42}{1000 \times 60} = 1.04 \text{ kW} \quad (20)$$

Prema izračunima dobivene vrijednosti uspoređene su s propisanim vrijednostima proizvođača, vrijednostima obradnog centra te je jasno vidljivo da će obradni centar moći osigurati dovoljno snage i momenta za bušenje. Termoskupljajući prihvat će osigurati dovoljnu krutost u vezi alat – prihvat – glavno vreteno. Visokotlačna pumpa će moći osigurati dovoljno SHIP-a koje je potrebno za obradu provrta.

Za izradu jednog provrta dubine 245 mm, uz posmičnu brzinu  $V_f = 130 \text{ mm/min}$  (Izraz 16), potrebno je oko dvije minute (21), što prema deklariranoj postojanosti od 30 minuta osigurava 15 provrta po jednoj postojanosti rezne oštrice.

$$t_1 = \frac{l}{V_f} = \frac{245}{130} \approx 2 \text{ min} \quad (21)$$

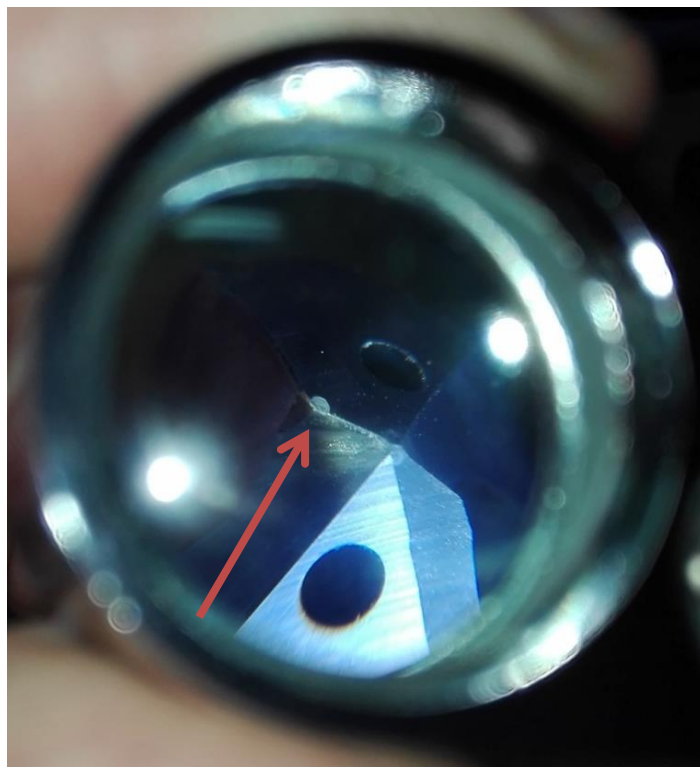


## 5. ANALIZA REZULTATA MJERENJA POSTOJANOSTI ALATA

### 5.1 Bušenje

Prilikom bušenja prvog provrta očitana vrijednost opterećenja na upravljačkoj jedinici iznosila je 18 – 20 %. Izračunata glavna sila rezanja iznosi 1483 N, što je 17,5 % maksimalnog opterećenja obradnog centra (8500 N).

Nakon prvog provrta vidi se manje oštećenje na stražnjoj površini rezne oštrice, Slika 37. Poprečna i glavna rezna oštrica nisu oštećene.



Slika 37. Stanje rezne oštrice nakon prvog provrta

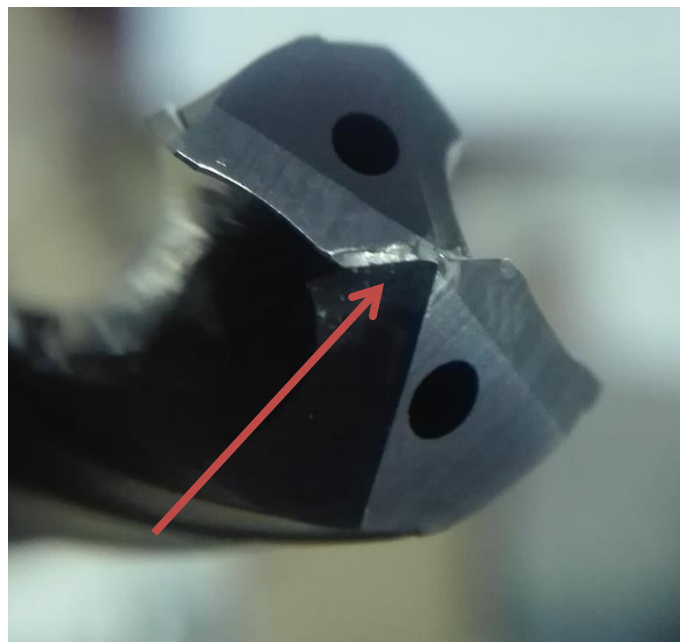
Odvojena čestica je oblika kratka cilindrična te zadovoljava zahtjeve, Slika 38. Promjer provrta izmjeren mikrometrom za provrte (Slika 34) na dubini od 100 mm je iznosio 13.03 mm, a na dubini od 200 mm je iznosio 13.02 mm. Promjer izrađenog provrta je u H9 toleranciji.





Slika 38. Odvojena čestica prvog provrta

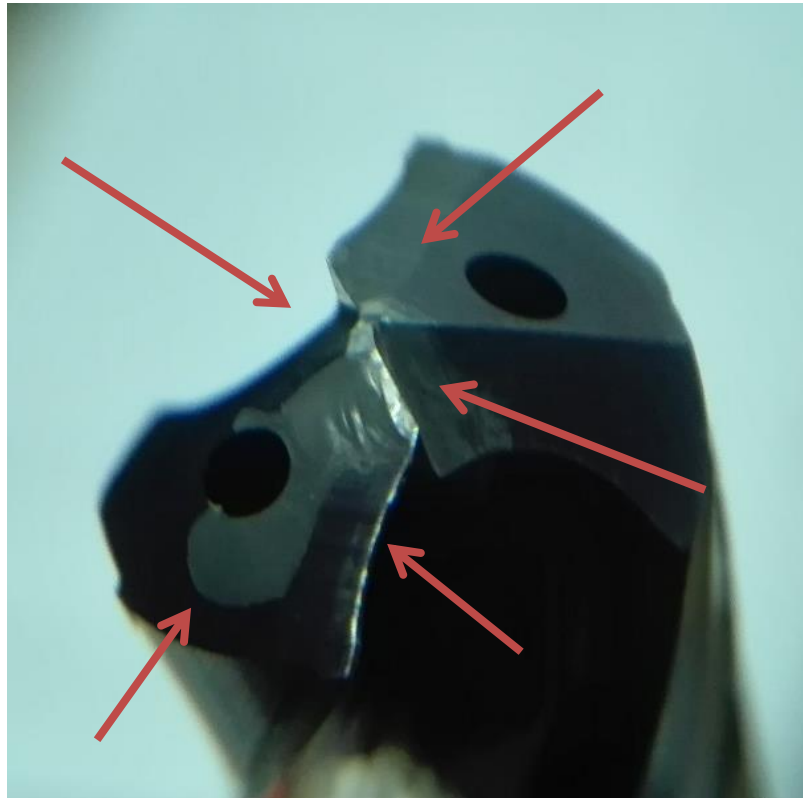
Nakon 6 izbušenih provrta pojavila su se oštećenja na poprečnoj reznoj oštrici, vidljivo na Slika 39. Svrdlo teže lomi odvojenu česticu te manju količinu namota u kanale za odvodnju. S obzirom na to da su kanali polirani, tako nakupljena odvojena čestica se vrlo lako makne s reznog alata pri izlazu alata iz provrta. Također se vidi kako je glavna rezna oštrica u jako dobrom stanju te na njoj nema većih oštećenja.



Slika 39. Oštećenje poprečne rezne oštrice

Izmjereno opterećenje stroja prilikom izrade šestog provrta iznosi 25 %, što znači da je glavna sila rezanja nešto veća od početne, zato što je rezna oštrica alata potrošena te pruža veći otpor pri rezanju.

Rezna oštrica nakon 11. provrta ima veća oštećenja na poprečnoj i glavnoj reznoj oštrici (Slika 40). Na stražnjoj površini odlomio se komad alata čime je nastalo oštećenje oštrice dimenzija 3 x 2 mm.



Slika 40. Rezna oštrica nakon 11 provrta

Na bočnim reznim oštricama vidljive su posljedice abrazivnog trošenja uslijed povišenih temperatura, Slika 41.



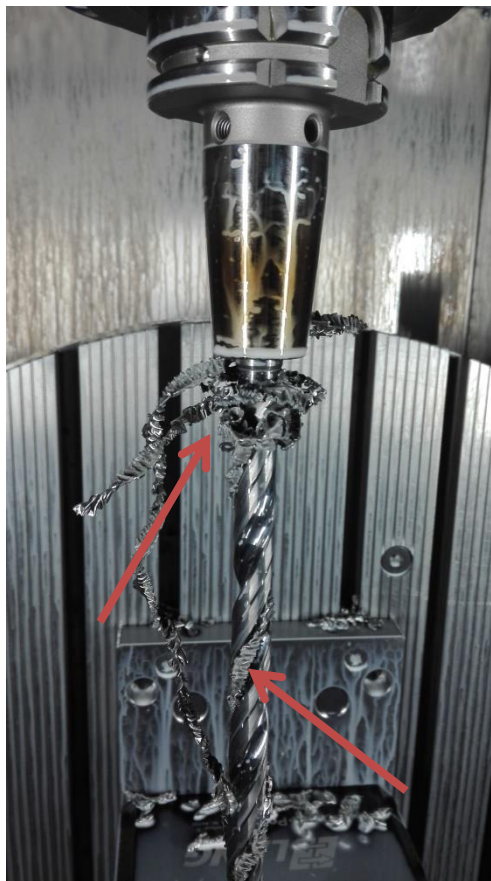
Slika 41. Bočni dio svrdla nakon 11 provrta

Zbog istrošenosti rezne oštrice formiranje odvojene čestice je otežano, jer takva oštrica ne može odrezati odvojenu česticu do kraja kako bi se formirala čestica zadovoljavajućeg oblika te nastaje odvojena čestica oblika duga trakasta (Slika 42).



Slika 42. Odvojena čestica nakon 11. provrta

Takva čestica ne može izaći iz kanala za odvodnju nego se zadržava u kanalima i namata na gornjem dijelu svrdla kod prihvata reznog alata (Slika 43).



Slika 43. Namotana odvojena čestica

Na plićim provrtima ovo ne bi predstavljalo veliki problem jer bi bilo dovoljno spirale koja bi mogla i ovako dugačku odvojenu česticu odvoditi, no kod dubokih provrta gdje gotovo

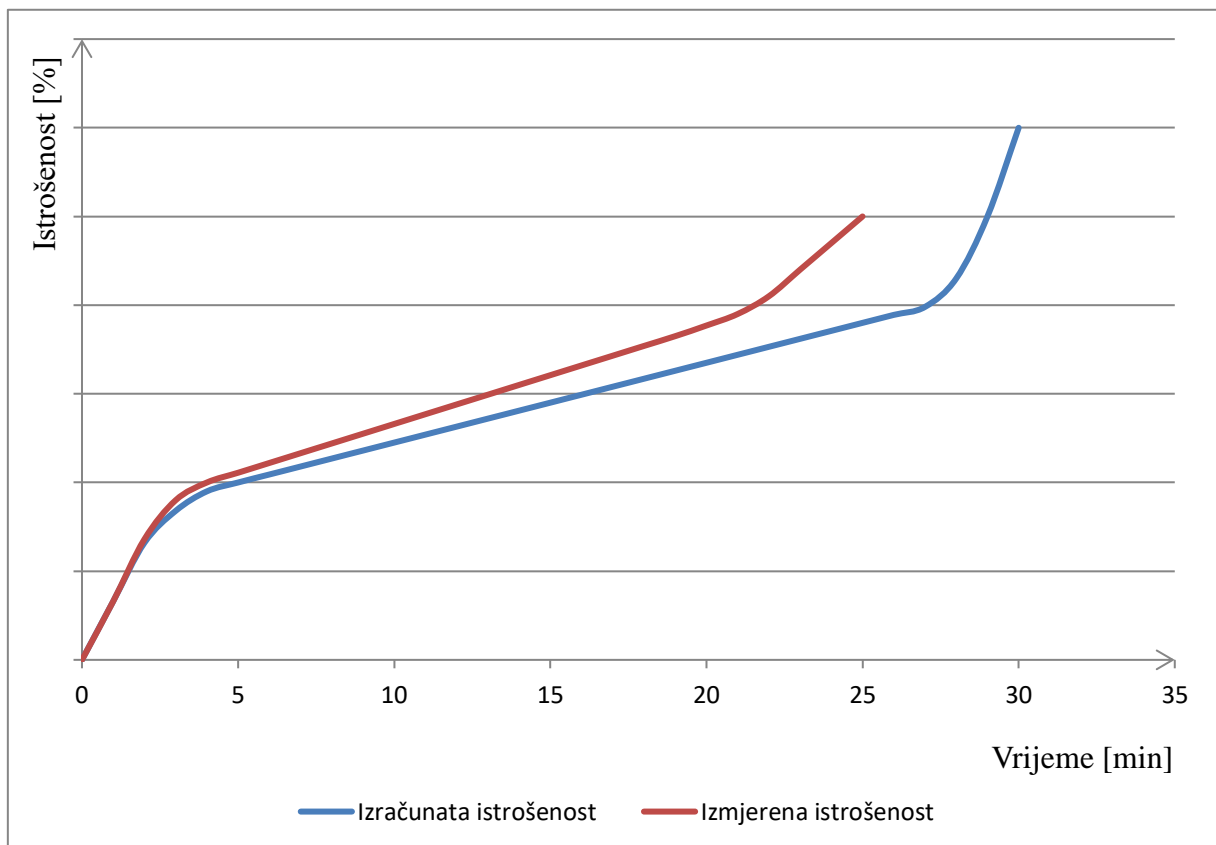
cijela spirala mora ući u provrt, ovakvo namatanje predstavlja problem. Namotana odvojena čestica sprječava odvodnju novonastalih odvojenih čestica, što može prouzročiti lom alata, te je vrlo rizično nastaviti iduće bušenje. Zbog toga prekidamo bušenje.

Nakon izbušenog 11. provrta na dubini od 100 mm mjerimo promjer 13,04 mm, dok na dubini od 200 mm mjerimo 13,05 mm. Na donjem dijelu provrt je malo iznad gornje mjere tolerancije provrta, što je posljedica potrošenosti alata i otežane odvodnje odvojene čestice.

Izmjereno opterećenje stroja prilikom izrade jedanaestog provrta je iznosilo 35 %, što je dvostruko veće opterećenje od početnog, odnosno od opterećenja prilikom bušenja prvog provrta dok još rezna oštrica nije bila potrošena.

Rezna oštrica je toliko oštećena da se više njome ne može bušiti nego svrdlo treba naoštriti za nastavak bušenja. Izmjerena postojanost je 11 provrta ili 22 minute po reznoj oštrici.

Rezultate istraživanja uspoređujemo s izračunatom postojanošću od 15 provrta ili 30 minuta. Vidljivo je odstupanje krivulje izmjerene postojanosti od krivulje izračunate postojanosti. (Slika 44)



Slika 44. Usporedba krivulja trošenja

U prvoj fazi obrade, do 5 minuta, brzo nastaju sitna oštećenja rezne oštrice, jer se ona formira prema materijalu obratka. Nakon prilagodbe trošenje je sporije te je iskoristivost rezne oštrice u drugoj fazi obrade, od 5 do 20 minuta, najveća. U trećoj fazi obrade, nakon 20 minuta, rezna oštrica se naglo troši i nastaju veća oštećenja zbog kojih rezni dio alata više nije geometrijski definiran.

## 6. ZAKLJUČCI

Eksperimentalnim istraživanjem, koje je provedeno na vertikalnom obradnom centru, izvršeno je duboko bušenje, te ispitana postojanost rezne oštrice pri dubokom bušenju u materijalu X6CrNi18-10.

Ispitana postojanost je manja za 18% od postojanosti koju je propisao proizvođač alata za grupu austenitnih nehrđajućih čelika.

Prilikom planiranja tehnološkog procesa potrebno je koristiti ispitane parametre obrade te na vrijeme zamijeniti istrošeni alat.

Postizanje veće postojanosti rezne oštrice spiralnog svrdla od tvrdog metala za duboko bušenje moglo bi se ostvariti korištenjem horizontalnog obradnog centra, jer se tada odvojena čestica lakše odvodi. Potrebno je na sličan način istražiti parametre obrade i postojanost reznog alata pri bušenju na horizontalno orijentiranom obradnom centru. Usporedbom s rezultatima istraživanja prikazanima u ovom završnom radu možemo zaključivati o postojanosti.

Ako se radi o velikoserijskoj proizvodnji tada operaciju bušenja treba vršiti na specijalnom alatnom stroju za duboko bušenje, koji koristi drugačiji tip svrdla u odnosu na spiralno svrdlo od tvrdog metala. Na takvom stroju je veća krutost stezanja, svrdla imaju naprave za vođenje, te se ostvaruje visoka učinkovitost uz veću postojanost alata.

## **7. PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

## 8. LITERATURA

- [1] S. Škorić, Autorizirana predavanja iz kolegija *Obrada odvajanjem čestica*, Fakultet Strojarstva i brodogradnje, Zagreb ak, god. 2016/2017.
- [2] Hedinehain, <https://www.heidenhain.com/>
- [3] Sumitomo, <http://www.sumitomotool.com/>
- [4] Sandvik, <https://www.sandvik.coromant.com>
- [5] A.Pavić, *Obrada odvajanjem čestica*, skripta, 2010.
- [6] A.Pavić, *Alati i naprave*, skripta 2010.
- [7] R.Cebalo, D. Ciglar, A. Stoić, *Obradni sustavi 2005*.
- [8] DMG Mori, <https://en.dmgmori.com/>
- [9] Grob, <http://www.grobgroup.com>
- [10] Walter, <http://www.walter-tools.com/>
- [11] Haimer, <http://www.haimer.biz>
- [12] Mitsubishi, <http://www.mitsubishicarbide.com/>
- [13] Botek, <http://www.botek.de/>
- [14] *Training Handbook, Metal cutting technology*, AB Sandvik Coromant, 2017.