

Povećanje produktivnosti proizvodnje primjenom tvrdog tokarenja

Jurčević, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:736720>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**POVEĆANJE PRODUKTIVNOSTI PROIZVODNJE PRIMJENOM
TVRDOG TOKARENJA**

Rijeka, rujan 2023.

Luka Jurčević

0035212492

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**POVEĆANJE PRODUKTIVNOSTI PROIZVODNJE PRIMJENOM
TVRDOG TOKARENJA**

Mentor: Prof. dr. sc. Goran Cukor

Rijeka, rujan 2023.

Luka Jurčević

0035212492

Rijeka, 10. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za industrijsko inženjerstvo i menadžment**
Predmet: **Obrada odvajanjem čestica**
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Luka Jurčević (0035212492)**
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**
Modul: **Industrijsko i proizvodno inženjerstvo**

Zadatak: **Povećanje produktivnosti proizvodnje primjenom tvrdog tokarenja /
Increasing production productivity by applying hard turning**

Opis zadatka:

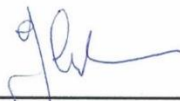
Tradicionalno, završna obrada površina dijelova od zakaljenih materijala približne tvrdoće od 55 do 68 HRC je brušenje, ali u zadnje vrijeme postupci tvrde obrade (engl. Hard Machining) alatima s geometrijski definiranom reznom oštricom postaju sve konkurentniji brušenju postižući usporedivu hrapavost obrađene površine i kvalitetu tolerancije. U uvodnom dijelu treba dati kratki opis tvrdog tokarenja. U eksperimentalnom dijelu treba za odabrane držače i rezne pločice, parametre rezanja te hlađenje emulzijom ili bez hlađenja pripremiti plan pokusa i na temelju rezultata pokusa utvrditi moguću uštedu u vremenu u slučaju zamjene operacije brušenja tvrdim tokarenjem.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Luka J.

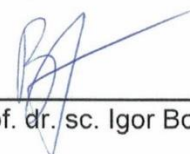
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Goran Cukor

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADBI RADA

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom preddiplomskog i diplomskog studija strojarstva i navedenu literaturu pod mentorstvom prof. dr. sc. Gorana Cukora.

Luka Jurčević

0035212492

ZAHVALA

Zahvaljujem se prije svega svojoj obitelji na pruženoj podršci tijekom studiranja. Veliko hvala mentoru na pruženoj stručnoj pomoći i mogućnosti odabira teme. Zahvaljujem se i doc. dr. sc. Gracielu Šterpin Valić, doc. dr. sc. M. Fonoviću, izv. prof. dr. sc. D. Iljkiću te laborantu B. Badurini na trudu i vremenu utrošenom tijekom izvođenja praktičnog dijela rada. Također se zahvaljujem poduzeću HSTec d.o.o na odabiru teme i pruženim informacijama.

SADRŽAJ

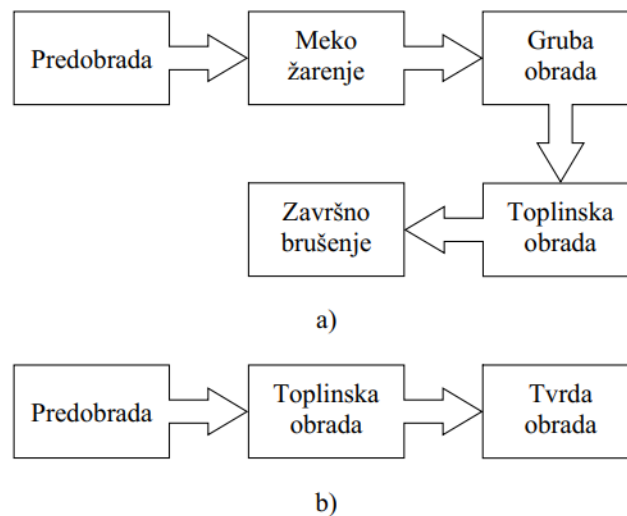
1.	UVOD	1
2.	TOKARENJE	3
2.1.	Geometrija alata	3
2.2.	Parametri obrade	6
2.3.	Mehanizmi i parametri trošenja reznog alata	8
2.4.	Materijali reznog dijela alata	11
2.5.	Prevlačenje reznih alata	15
2.5.1.	Kemijsko nanošenje parne faze (CVD).....	16
2.5.2.	Fizikalno nanošenje parne faze (PVD)	17
3.	BRUSNI STROJEVI ZA OBRADU CENTRA	19
3.1.	Analiza konstrukcije i principa rada.....	20
4.	TEHNOLOGIJA PROIZVODNJE VRETENA	24
4.1.	SK i HSK sustavi stezanja alata.....	24
4.2.	Tehnološka analiza vretena.....	26
4.2.1.	Tolerancije oblika	27
4.2.2.	Tolerancije položaja.....	28
4.2.3.	Tolerancije netočnosti okretanja.....	30
4.3.	Operacijski list osovine HSK-C160	31
4.4.	Operacijski list vretena HSK C160.....	34
4.5.	Analiza materijala ulaznog poluproizvoda	35
5.	TVRDO TOKARENJE.....	37
5.1.	Utjecajne veličine tvrdog tokarenja na hrapavost obrađene površine.....	37
5.2.	Utjecajne veličine postupka tvrdog tokarenja na sile rezanja.....	38
5.3.	Utjecajne veličine tvrdog tokarenja na trošenje reznog alata	39
6.	EKSPERIMENTALNA ANALIZA	42
6.1.	CNC tokarilica	43
6.2.	Alat	44
6.2.1.	Držač rezne pločice.....	44
6.2.2.	Rezna pločica s CBN umetkom	45
6.3.	Izbor matematičkog modela i plana pokusa	46
6.4.	Provedba i rezultati eksperimentalnog ispitivanja	48
6.5.	Utjecaj parametara rezanja na površinsku hrapavost.....	50

6.6. Mjerenje trošenja reznog alata	53
6.7. Povećanje produktivnosti.....	58
7. ZAKLJUČAK.....	61
LITERATURA.....	62
POPIS SLIKA	65
POPIS TABLICA.....	67
SAŽETAK.....	68
SUMMARY	69
DODATAK A	70
DODATAK B.....	71
DODATAK C.....	73

1. UVOD

Razvoj metalurgije prati porast potreba brojnih industrija za uporabom očvrnutih metalurških proizvoda kako bi došlo do porasta čvrstoće, otpornosti na trošenje, otpornosti na zamor materijala, ali i dimenzijske stabilnosti vitalnih dijelova proizvoda. Tako je unutar vojne industrije uvijek prisutna potreba za povećanjem robusnosti vitalnih dijelova vatrenog oružja, oklopnih vozila i zrakoplova. Automobilaska industrija koristi očvrsnute dijelove poput zupčanika, osovina, vratila, ležajeva, opruga i kočnica dok se unutar metaloprerađivačke industrije očvršćuju geometrijski definirani rezni alati, naprave za stezanje obradaka, kalupi te svi vitalni dijelovi proizvodnih strojeva čime se omogućuje povećanje preciznosti i krutosti takvih obradnih sustava.

Tradicionalno se kao završna obrada površina očvrnutih materijala približne tvrdoće 55 – 68 HRC koristi postupak brušenja, ali u novije vrijeme postupci tvrde obrade (engl. *Hard Machining*) s geometrijski definiranom reznom oštricom sve više konkuriraju brušenju pri čemu je moguće postići usporedivu hrapavost obrađene površine (moguća veličina $R_z = 0,1 \mu\text{m}$ u visoko preciznom tokarenju CBN alatima) te kvalitetu tolerancije IT3 [1]. Najveći utjecaj primjene tvrde obrade pa tako i tvrdog tokarenja je onaj koji dovodi do značajnog skraćivanja tradicionalnog tehnološkog lanca pri čemu je moguće eliminirati određene korake kao što je to prikazano slikom 1.1.



Slika 1.1. Usporedba tehnološkog lanca tvrde obrade tradicionalnog (a) proizvodnog procesa i proizvodnog procesa s tvrdom obradom (b) [1].

Tvrdo tokarenje je po samoj prirodi ekonomičniji postupak od brušenja obzirom da je tokarski stroj u pravilu jeftiniji od stroja za brušenje te sama cijena pogonskih troškova u pravilu košta manje. Postupak brušenja zahtijeva primjenu znatne količine sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (*SHIP*) čime se ugrožava zdravstvena sigurnost proizvodnih radnika te je potrebno izdvajati financijske resurse za kupnju, skladištenje i zbrinjavanje *SHIP*-a. S druge strane, obrada tvrdog tokarenja je često suha pri čemu se ponegdje javlja primjena minimalne količine sredstva za podmazivanje (engl. *MQL*) čiji je glavni zadatak smanjiti trenje kako bi većina proizvedene topline rezanja bila uzrokovana plastičnom deformacijom rezanja i sabijanja strugotine. Autor [2] navodi kako se pri proizvodnji kompleksnih dijelova uporabom tvrdog tokarenja umjesto brušenja proizvodni trošak može smanjiti i do 70%.

Osim financijskih resursa, postupak tvrdog tokarenja nudi veću fleksibilnost od brušenja ponajviše u slučaju kada se zahtijeva obrada u kojoj nastaje proizvod kompleksne geometrije. Tvrdo tokarenje u odnosu na postupak brušenja omogućuje povećanje produktivnosti što se očituje u smanjenju pripremno-završnog vremena te povećanju brzine rezanja materijala. Također, nastalu strugotinu u postupku tvrdog tokarenja moguće je relativno jednostavno reciklirati upravo zbog eliminacije *SHIP*-a te same veličine strugotine dok se kod postupka brušenja kako zbog znatne količine *SHIP*-a tako i zbog vrlo sitne strugotine i odvojenih brusnih zrnaca ne vrši recikliranje strugotine, već se mora zbrinuti shodno regulacijama koje postaju sve strože [2].

Postupak tvrdog tokarenja prirodno posjeduje i određene nedostatke naspram postupka brušenja. Primjerice, zbog visokih temperatura i tlakova se prilikom tvrdog tokarenja može na obrađenoj površini pojaviti bijeli sloj povećane tvrdoće, često popraćen vlačnim zaostalim naprezanjima, koji negativno utječe na tribološka svojstva, zamornu čvrstoću materijala te otpornost na koroziju [1]. Također, vrlo uske tolerancije položaja i radijalne netočnosti okretanja poput onih prikazanih u 4. poglavlju zahtijevaju najkruće tokarske strojeve uz visoku točnost obrade tehnoloških baza koja često zahtijeva kupovinu specijalnih strojeva poput onih za obradu šiljastih provrta opisanih u 3. poglavlju.

Rezni alati kod tvrdog tokarenja zbog zahtijevane čvrstoće koriste vršne kutove većih iznosa pri čemu je prednji kut alata često negativnog iznosa. Učestalo korišteni rezni alati za očvrstnute metale na bazi željeza su kubni bor-nitrid (engl. *CBN*) te keramika dok u novije vrijeme sve više raste i udio karbidnih reznih alata prevučenih s titan-nitridom (*TiN*) ili primjerice s titan-aluminij-nitridom (*TiAlN*).

2. TOKARENJE

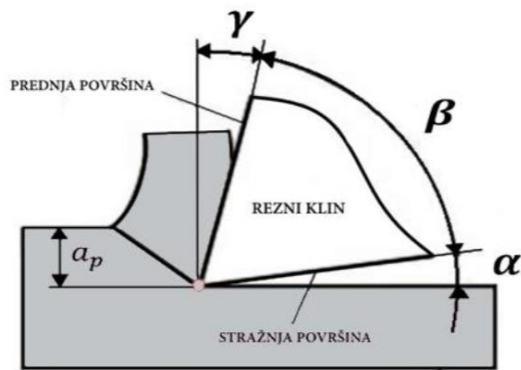
2.1. Geometrija alata

Alat za tokarenje se u osnovi sastoji od reznog dijela koji služi procesu skidanja strugotine i držača čija je uloga prihvaćanje reznog dijela i prijenos sila na alatni stroj. Učestala podjela alata je shodna načinu pričvršćivanja rezne pločice s držačem gdje su zbog sve većih zahtjeva u pogledu krutosti obradnog sustava dominantni alati s mehanički pričvršćenom reznom pločicom. Sa druge strane, pričvršćivanje lemljenjem se zbog niza nedostataka koristi sve manje pri čemu se za obradu tvrdih materijala ne koriste. Tokarski alat od brzoreznog (eng. HSS) čelika je jednodijelan te stoga nema potrebu za pričvršćivanjem rezne pločice. Tri glavna tipa tokarskog alata su prikazana slikom 2.1.1.



Slika 2.1.1. Tokarski alat s mehanički pričvršćenom reznom pločicom (lijevo), od brzoreznog čelika (sredina) i sa zalemljenom reznom pločicom (desno) [3].

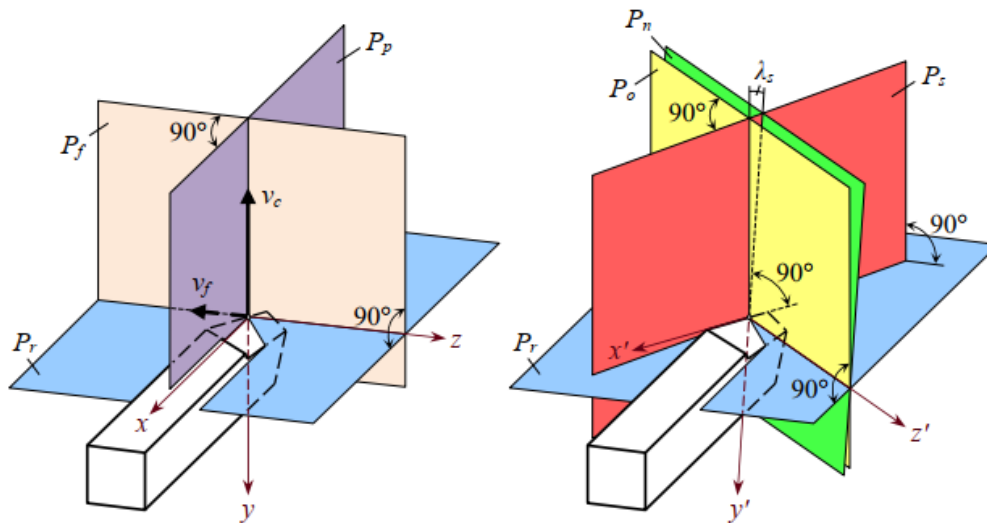
Zajednički oblik svih geometrijski definiranih alata za obradu odvajanjem čestica je rezni klin čiji je kut istovjetan kutu između prednje i stražnje površine reznog dijela. Prednja površina je ona po kojoj kliže strugotina dok je stražnja površina okrenuta prema obrađenoj površini. Glavnu oštricu alata predstavlja sjecište prednje i stražnje površine dok se pomoćna oštrica definira kao sjecište prednje i odgovarajuće stražnje pomoćne površine. Vrh alata može biti oštar, zarubljen (engl. *wiper*) i zaobljen s određenim radijusom, a formiraju ga glavna i pomoćna oštrica. Govoreći o površinama obratka razlikuju se tri glavne površine. Obradivana površina je ona koja se obradom uklanja. Površina rezanja je ona koja nastaje tijekom djelovanja reznog klina alata i relativnog gibanja alata i obratka. Obradena površina je sva ona površina koja je nastala kao rezultat obrade. Prethodno navedeni pojmovi prikazani su slikom 2.1.2.



Slika 2.1.2. Rezni klin alata, površine i oštrice alata [1].

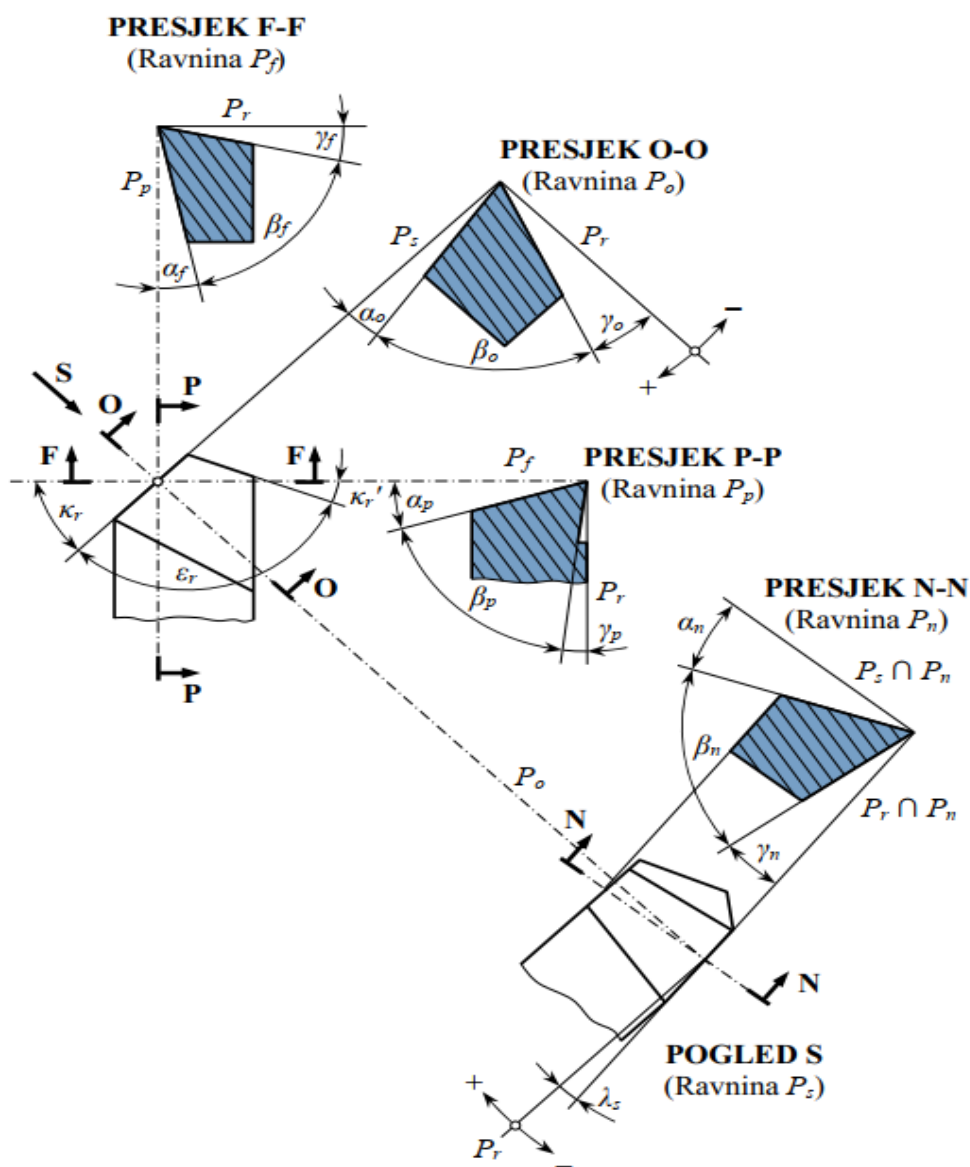
Prilikom određivanja statičke geometrije alata koriste se ravnine tehnološkog koordinatnog sustava propisane normama ISO 3002 i ISO 13399 koje su redom vezane za alatni stroj te za glavnu oštricu alata [1]. Prethodno spomenute ravnine promatrane u točki glavne oštrice alata su prikazane slikom 2.1.3. dok je njihova definicija kako slijedi:

- Referentna ravnina P_r je okomita na pravac glavnog gibanja.
- Kinematička ravnina P_f je okomita na referentnu i paralelna s pravcem posmičnog gibanja.
- Natražna ravnina P_p je okomita na referentnu i kinematičku ravninu.
- Ravnina rezanja P_s je okomita na referentnu i paralelna s tangentom glavne oštrice alata.
- Ortogonalna ravnina P_o je okomita na referentnu ravninu i ravninu rezanja
- Normalna ravnina glavne oštrice alata P_n je okomita na glavnu oštricu i ravninu rezanja.



Slika 2.1.3. Tehnološki koordinatni sustav prema ISO 3002 (lijevo) i ISO 13399 (desno) [1].

Statička geometrija definira kutove reznog alata koji su neophodni za projektiranje, izradu, oštrenje i kontrolu alata. Prilikom projektiranja i izrade alata koriste se prave veličine prednjeg (γ_n) i stražnjeg (α_n) kuta mjerene u normalnoj ravnini glavne oštrice alata koje se shodno prilažu u radioničkoj dokumentaciji alata. Međutim, prilikom korištenja strojeva za oštrenje ili kontrolu alata nije moguće očitavati prave vrijednosti spomenutih kutova već samo njihove projekcije u kinematičkoj i natražnoj ravnini koje se pomoću transformacijskih izraza detaljno objašnjenih u [1] pretvaraju u odgovarajući kut. Projekcije reznog dijela na tehnološke ravnine koordinatnog sustava dane su slikom 2.1.4.



Slika 2.1.4. Statički (tehnološki) kutovi tokarskog noža [1].

Definicije tehnoloških kutova za sve postupke rezanja su sljedeće [1]:

- *Stražnji kutovi* $\alpha_p, \alpha_f, \alpha_o, \alpha_n$ su kutovi inklinacije stražnje površine alata u smjeru normale referentne ravnine mjereni u indeksiranim ravninama.
- *Kutovi klina* $\beta_p, \beta_f, \beta_o, \beta_n$ su kutovi između prednje i stražnje površine reznog dijela alata mjereni u indeksiranim ravninama.
- *Prednji kutovi* $\gamma_p, \gamma_f, \gamma_o, \gamma_n$ su kutovi inklinacije prednje površine alata prema referentnoj ravnini mjereni u indeksiranim ravninama.

- Vrijedi:

$$\alpha_i + \beta_i + \gamma_i = 90^\circ, \quad i = p, f, o, n \quad (2.1.1)$$

- *Kut vrha alata* ε_r se mjeri u referentnoj ravnini između projekcija glavne i pomoćne oštrice.
- *Prisloni kut (kut namještanja) glavne oštrice* κ_r se mjeri u referentnoj ravnini između ravnine rezanja i kinematičke ravnine.
- *Kut namještanja pomoćne oštrice* κ_r' se mjeri u referentnoj ravnini između projekcije pomoćne oštrice alata i kinematičke ravnine.

- Vrijedi:

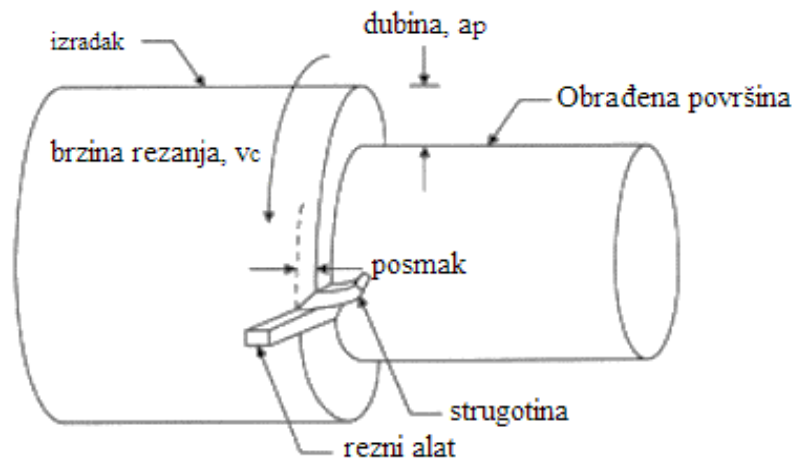
$$\kappa_r + \beta_i + \kappa_r' = 180^\circ \quad (2.1.2)$$

- *Kut inklinacije glavne oštrice alata* λ_s se mjeri u ravnini rezanja između glavne oštrice i referentne ravnine. Ukoliko je navedeni kut pozitivan vrh alata je najviša točka reznog dijela alata te nastala strugotina ima tendenciju gibanja od obrađene površine. Međutim, ukoliko je kut inklinacije negativan vrh alata postaje najniža točka reznog dijela te će tada strugotina imati tendenciju kretanja prema obrađenoj površini.

2.2. Parametri obrade

Unutar procesa obrade rezanjem postoji veliki broj parametara povezanih određenim funkcijskim zavisnostima. Određene utjecajne veličine koje limitiraju proces rezanja proizlaze iz tehničkih specifikacija obradnog sustava dok neki drugi limiti proizlaze iz svojstava obrađivanog materijala te korištenog reznog alata. Obzirom na kompleksnost obrade rezanjem potrebno je temeljito shvaćanje i zavisnosti parametara, a sve u cilju pravilnog optimiziranja procesa rezanja u skladu s danom svrhom obradnog sustava bilo da se radi o ekonomičnosti ili maksimiziranju produktivnosti obrade. Prilikom obrade rezanjem nakon poznavanja radnog mjesta, materijala izratka i odabira reznog alata preostaje

određivanje tri glavna parametra obrade, a to su brzina rezanja (v_c), posmak (f) i dubinu rezanja (a_p) koji su prikazani slikom 2.2.1.



Slika 2.2.1. Parametri obrade kod tokarenja.

Brzina rezanja v_c [m/min] definirana je brzinom reznog alata relativno na obrađenu površinu, a ovisi o promjeru izratka u točki rezanja te o broju okretaja. Zavisnost brzine od promjera i broja okretaja dana je izrazom (2.2.1.). Međutim, u praksi će operator često zbog poznavanja željene brzine rezanja podešavati broj okretaja te je stoga izraz (2.2.2.) prigodniji. Optimiranje brzine rezanja se često svodi na balansiranje produktivnosti rezanja i životnog vijeka reznog alata. Postoji velik broj referenci za odabir odgovarajuće brzine rezanja ovisno o izboru reznog alata i materijala obratka. Međutim, preporuke proizvođača su u pravilu glavne smjernice tijekom postupka optimiranja.

$$v_c = D \cdot \pi \cdot n \quad (2.2.1.)$$

$$n = \frac{v_c}{D \cdot \pi} \quad (2.2.2.)$$

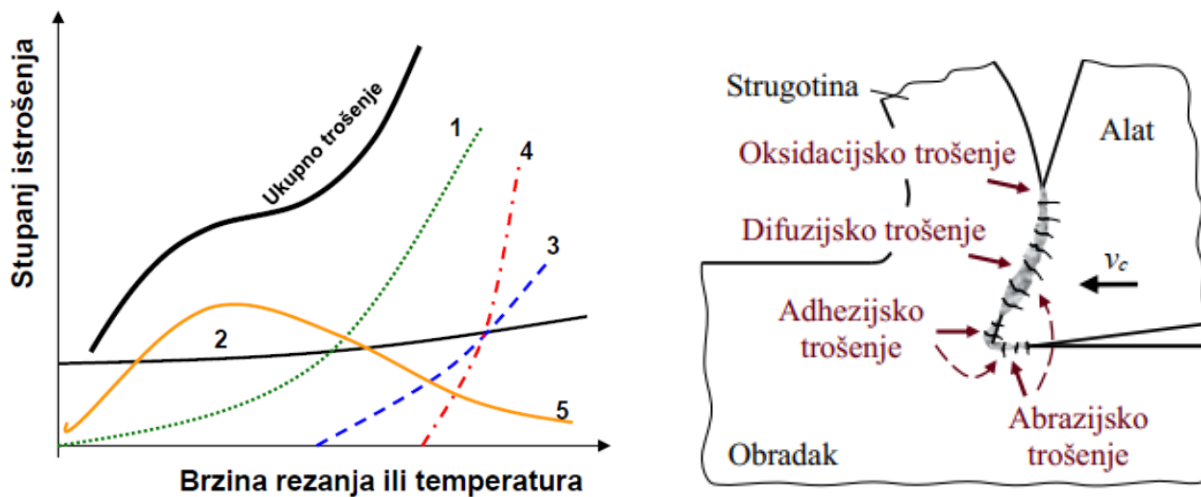
Posmak f [mm/okr] definira se kao brzina gibanja (prodiranja) reznog alata u materijal obratka koja je okomita na brzinu rezanja v_c . Općenito govoreći, veličina posmaka ovisi o materijalu i dimenzijama obratka, dubini rezanja, alatu, zahtijevanom stanju obrađene površine. Prilikom finih obrada glavna determinanta posmaka je zahtijevano stanje površine.

Dubina rezanja a_p [mm] se mjeri okomito na obrađenu površinu te se ostvaruje dostavnim gibanjem reznog alata. Brzina dostavnog gibanja ovisi o posmaku reznog alata [4].

2.3. Mehanizmi i parametri trošenja reznog alata

Proces rezanja pripada najtežoj kategoriji (5. grupa) triboloških parova za koju je svojstveno trošenje isključivo samo jednog elementa tribološkog para, u konkretnom slučaju reznog alata [1]. Pokretači trošenja su opterećenja (mehanička, toplinska i kemijska) kojima je alat izložen tijekom obrade. Rezni alat se tijekom procesa rezanja istovremeno podvrgava utjecaju višebrojnih mehanizama trošenja od kojih su glavni prikazani slikom 2.3.1.:

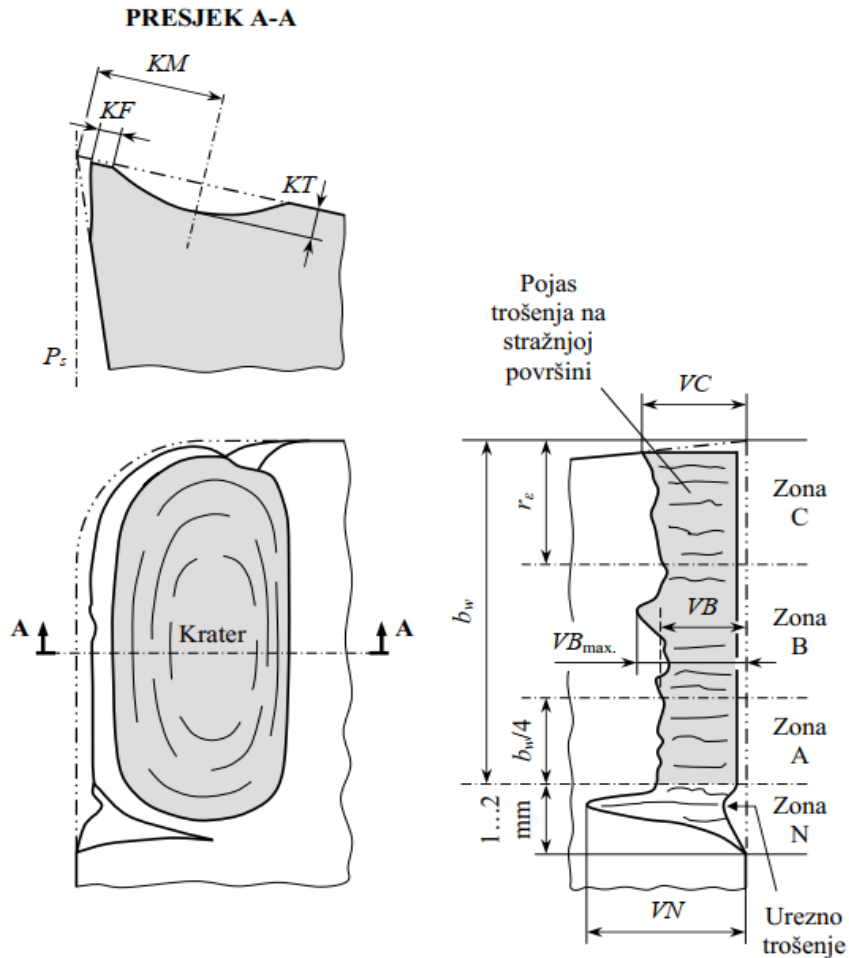
- Abrazijsko trošenje (1)
- Adhezijsko trošenje (2)
- Oksidacijsko trošenje (3)
- Difuzijsko trošenje (4)
- Skidanja zavarenih čestica (5)



Slika 2.3.1. Glavni mehanizmi trošenja reznog alata [1,4].

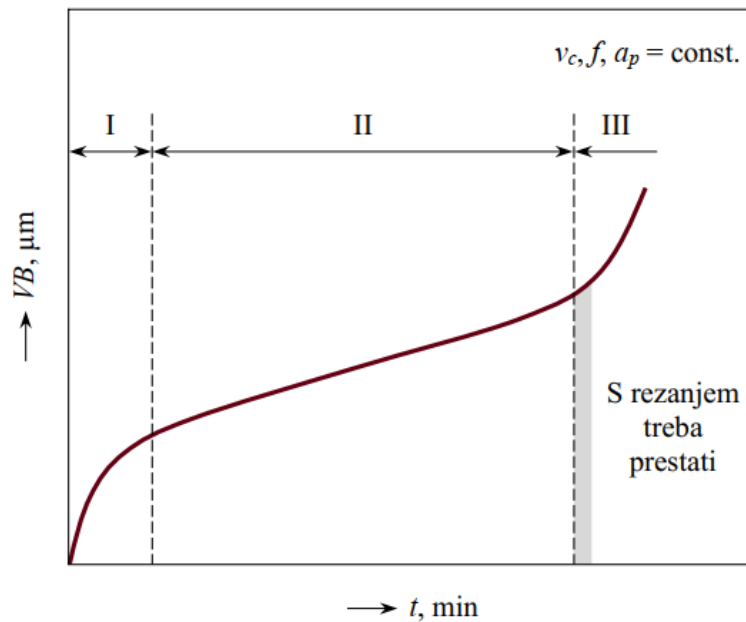
Kao što je na prethodnoj slici vidljivo, abrazijsko i adhezijsko trošenje kao i trošenje zbog skidanja zavarenih čestica su neizbježni mehanizmi trošenja. Sa druge strane, oksidacijsko i difuzijsko trošenje reznog alata nastupa tek nakon razvijanja određene temperature. Glavne determinante mehanizama trošenja reznog alata su fizikalno-kemijska svojstva te geometrijska obilježja alata i obratka te parametri obrade. Među najutjecajnije čimbenike ubrajaju se tvrdoća, čvrstoća i žilavost dok bi preostali bili; kemijska stabilnost, toplinska provodljivost, toplinska dilatacija, inertnost površine i mikrostruktura. Govoreći o parametrima obrade najviše pažnje se pridaje brzini i temperaturi rezanja.

Ukupno stanje istrošenosti alata se opisuje pomoću raznih linearnih, površinskih, volumnih i masenih parametara pri čemu se u praksi najviše koriste parametri propisani normom ISO 3685 [1] prikazani slikom 2.3.2.



Slika 2.3.2. Parametri trošenja prednje i stražnje površine reznog alata prema normi ISO 3685 [1]. KM je udaljenost središta kratera od početne glavne oštrice, KF je udaljenost prednjeg rubnog dijela kratera od trenutne glavne oštrice, KT je dubina kratera na prednjoj površini, b_w je potrošena duljina glavne oštrice. VC je širina pojasa trošenja pri vrhu alata u zoni C dok je VB srednja širina pojasa trošenja pri vrhu alata u zoni B.

Praćenjem prethodno spomenutih parametara trošenja kroz određeni vremenski period moguće je grafički prikazati zavisnost istih o vremenu što u biti predstavlja krivulja trošenja prikazana slikom 2.3.3. Karakteristično svim parametrima trošenja su 3 glavne faze trošenja, a to su faza uhodavanja, stacionarnog trošenja i naglog (katastrofalnog) trošenja koje u praksi treba izbjeći pravovremenom zamjenom alata.



Slika 2.3.3. Krivulja trošenja alata (VB) pri konstantnoj brzini i dubini rezanja te posmaku [1].

Posljedice trošenja alata su brojne no kao glavne se izdvajaju:

- povećanje sile rezanja uz mogućnost pojave vibracija;
- porast temperature rezanja;
- smanjenje kvalitete obrađene površine i dimenzijske točnosti;
- pad učinkovitosti proizvodnje uz povećanje troškova.

Ovisno o potrebama tehnološkog procesa nekada je racionalno uvesti određenu vrstu nadzora stanja reznog alata. Postoje razne metode koje se općenito dijele na direktne i indirektne. Direktne metode se koriste kod potreba za visokim stupnjem točnosti no njihova instalacija je kompleksna te često kapitalno intenzivna.

Indirektne metode koriste razne senzore za prikupljanje podataka (sile rezanja, momenta, snage, temperature, vibracija, akustične emisije...) pomoću kojih se putem određene korelacije procjenjuju parametri trošenja reznog alata. Dakle, indirektne metode procjenjuju stanje alata zbog čega postižu manju točnost, no takav sustav nadzora alata zahtijeva relativno nisku investiciju iako se ovisno o kompleksnosti korelacija mogu zahtijevati relativno velike računalne sposobnosti procesora.

2.4. Materijali reznog dijela alata

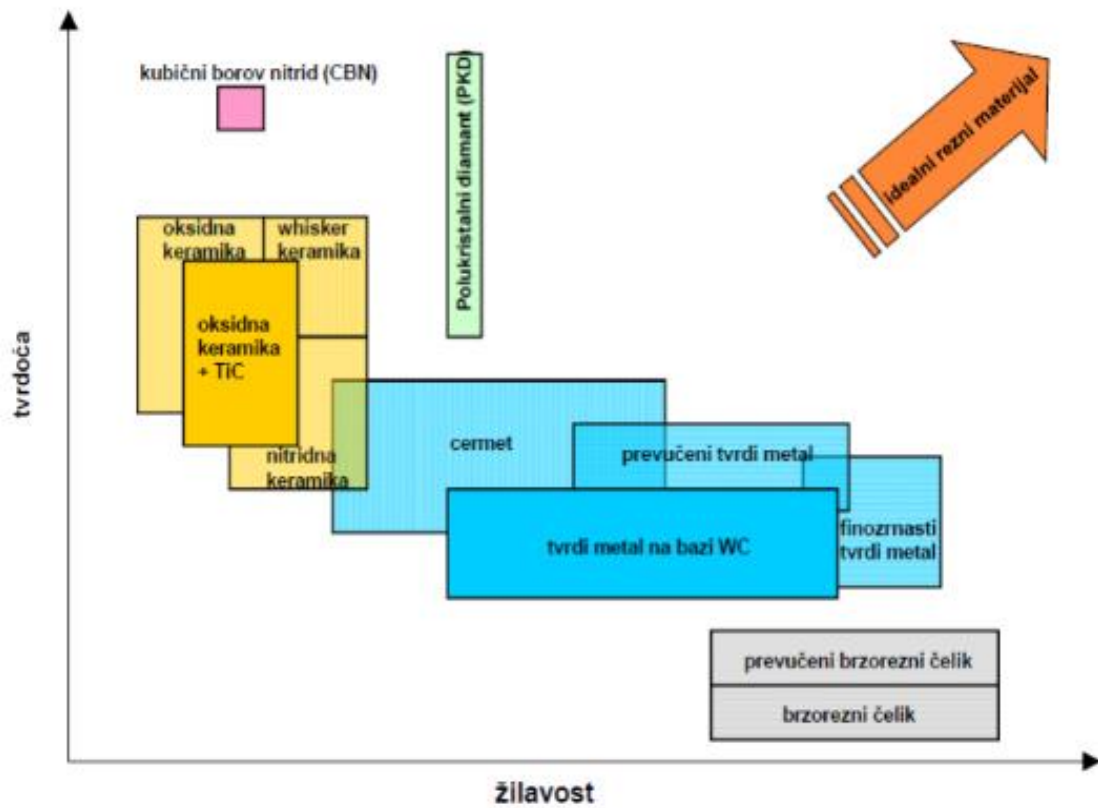
Do sada je razvijeno mnoštvo reznih materijala počevši od najzastupljenijih poput tvrdog metala (engl. *HM*) i brzoreznog čelika (engl. *HSS*), zatim super-tvrdih materijala poput dijamanta, polikristalnog dijamanta (engl. *PCD*) i kubnog bor-nitrida (engl. *CBN*) pa sve do rezne keramike, cermeta, čelika i u konačnici danas veoma rijetko korištenih alatnih ugljičnih čelika koji pretežito služe za ručne alate koji se koriste pri malim brzinama rezanja.

Neovisno o vrsti materijala reznih alata na iste se postavljaju sljedeći zahtjevi [5]:

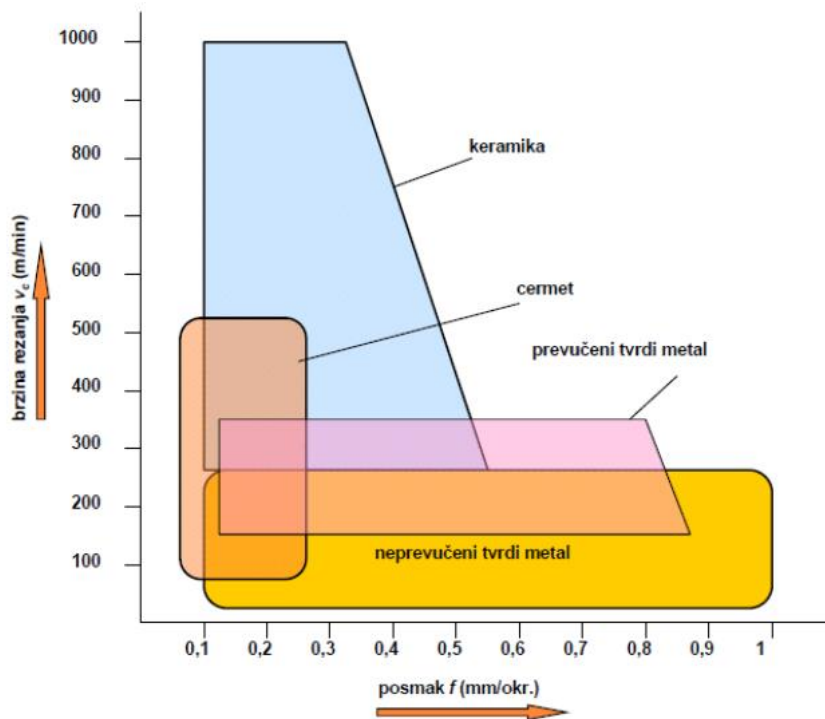
- Visoka tvrdoća pri čemu je iskustvom pokazano kako bi tvrdoća reznog alata trebala biti barem 20 HRC-a veća od tvrdoće materijala koji se obrađuje.
- Velika otpornost na trošenje što osim produljenja životnog vijeka za posljedicu ima i povećanje sposobnosti postizanja uskih tolerancija, posebice prilikom obrade većih izradaka.
- Velika toplinska postojanost (otpornost) obzirom da kod manje postojanih vrsta materijala dolazi do bržeg pada tvrdoće te veće toplinske deformacije.
- Minimalni koeficijent trenja i dobra toplinska obradivost.
- Visoka žilavost te čvrstoća na savijanje i vlak koji također ovise o temperaturi.
- Poželjne tehnološke karakteristike (npr. obradivost alata prilikom oštrenja).

Idealni materijal reznog alata bi, shodno slici 2.4.1., ujedno posjedovao visoku tvrdoću i žilavost što se u praksi pokazalo iznimno izazovnim pothvatom. Kroz povijest je razvoju alata prethodio razvoj materijala. Shodno činjenici da je tijekom povijesti metalurgije raznovrsnost obrađivanih materijala rasla, postepeno su se razvijale prethodno spomenute vrste reznih alata (*HSS*, *TM*, *CBN*...) s obzirom da određena vrsta reznog materijala treba biti pomno prilagođena obrađivanom materijalu i parametrima obrade. Primjerice, dijamantni rezni alat pri povišenoj temperaturi ima veliku sklonost grafitizaciji te oksidaciji s obrađivanim materijalima na bazi željeza (*Fe*) dok se *CBN* može koristiti za obradu materijala na bazi željeza poput alatnih čelika i sivog lijeva.

Dakle, glavni utjecajni parametri procesa odabira vrste reznog materijala su: vrsta materijala obratka, parametri obrade, radni uvjeti alata te u konačnici i zahtijevana produktivnost. Primjer utjecaja parametara obrade na odabir reznog materijala, konkretno brzine rezanja i posmaka, prikazan je slikom 2.4.2.



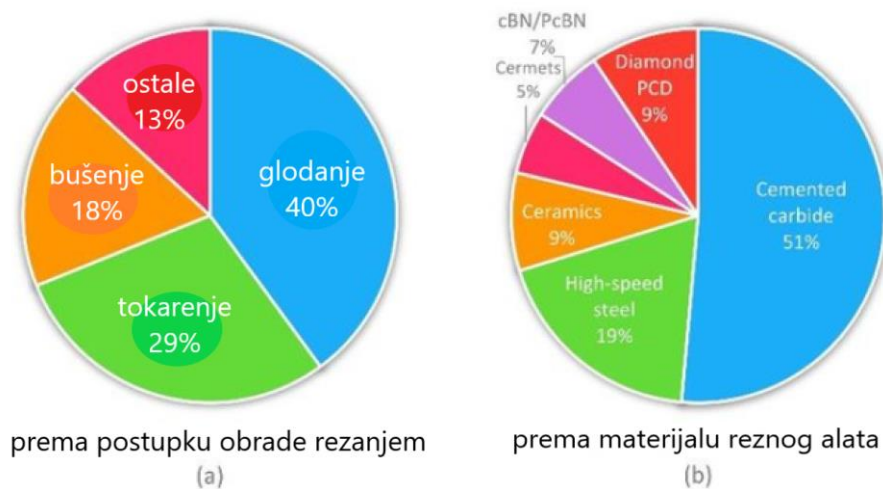
Slika 2.4.1. Usporedba materijala reznih alata ovisno o njihovoj tvrdoći i žilavosti [4].



Slika 2.4.2. Preporučene brzine rezanja i posmaci za navedene materijale [4].

Slikom 2.4.3. prikazani su jedni od rezultata istraživanja [6] gdje se jasno vidi dominantnost postupaka tokarenja, glodanja i bušenja nad preostalim obradama rezanjem. Prema podjeli s desne strane slike vidi se da udio brzoreznog čelika iznosi 19% pri čemu se isti kao rezni alat koristi pretežito za postupke obrade koje karakterizira prekidni rez obzirom da se tada zahtijeva visoka izdržljivost. Autori [5] navode da su vrijednosti žilavosti na savijanje mikro-granuliranog neobloženog HSS-a (dobivenog metalurgijom praha) između 2500 i 6000 MPa ovisno o udjelu legirajućih elemenata dok su vrijednosti za cementirani karbid između 1250 i 2250 MPa. Suvremene tehnologije metalurške proizvodnje, poput metalurgije praha kojom je moguće postići mikro granule promjera 1 μm do 3 μm su značajno unaprijedile karakteristike HSS-a obzirom da se takvom tehnologijom relativno klasičnoj proizvodnji HSS-a iz komada čelika postižu sitni kristali ravnomjernijeg rasporeda čime se povećava žilavost, poboljšava obradivost pri brušenju te smanjuje utjecaj grešaka nakon toplinske obrade poput deformacija, naprslina i sl. [5].

Raspodjela globalnog tržišta u 2018.



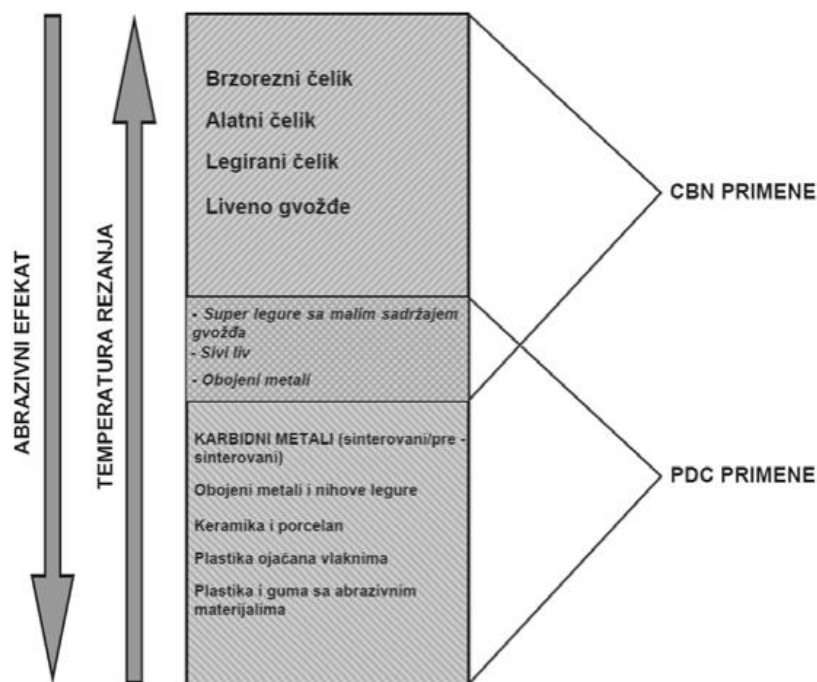
Slika 2.4.3. Udio postupaka obrade odvajanjem čestica (lijevo) i udio pojedinih vrsta reznih materijala (desno) u globalnom tržištu za 2018. [6].

Kako je prethodno spomenuto, dominantno korišteni materijali reznog alata dolaze iz skupine tvrdih metala. Matrica tvrdih metala se u najvećoj mjeri tvori od karbida volframa popraćenog karbidima titana (TiC), tantala (TaC) i niobija (NbC) skupno povezanih vezivnim elementima poput kobalta (Co) i nikla (Ni). Karbidi su nositelji tvrdoće i otpornosti na trošenje dok na žilavost utječe količina vezivnih elemenata. Rezni alati od tvrdog metala proizvode se metalurgijom praha čiji se tehnološki proces odvija u 3 glavne faze. Prvi korak je miješanje osnovnih elemenata u vidu praškaste smjese

kojom se ispunjava kalup na strojnoj preši te se vrši prešanje smjese nakon čega se dobiva ekstremno krhki poluproizvod. Takav poluproizvod ulazi u fazu sinteriranja koja se odvija u industrijskoj peći na vrlo visokim temperaturama tijekom dugih vremenskih intervala pri čemu se poluproizvod volumno stisne za otprilike 50%. Unatoč velikom sakupljanju sam poluproizvod ima relativno mala odstupanja od konačnog oblika te stoga preostaje završna faza tehnološkog procesa koja se sastoji od iterativnih procesa kontrole kvalitete i procesa brušenja najčešće dijamantnim brusom.

Keramički rezni alati su privukli industrijsku pozornost tijekom 1. polovice 20. stoljeća zbog velike sposobnosti održavanja tvrdoće pri visokim temperaturama i visoke kemijske inertnosti prilikom obrade feritnih materijala čime se stvorio preduvjet za daljnje povećanje brzine rezanja, odnosno same produktivnosti. Međutim, problem keramike je niska žilavost te niska otpornost na mehanički i toplinski šok. Miješanjem keramičkih i metalnih elemenata dobiven je prvi cermet pod imenom Sialon koji se sastoji od silicija, aluminijske, kisika i dušika. Cermeti imaju veću otpornost na toplinski šok te veću izdržljivost u odnosu na keramiku pri čemu se sama izdržljivost suvremenih cermeta nalazi u neposrednoj blizini one tvrdih metala pri istim vrijednostima tvrdoće uspoređivanih reznih materijala.

Dijamant, polikristalni dijamant te kubni bor-nitrid spadaju u kategoriju najtvrdih (super-tvrdih) reznih materijala te se primjenjuju kada se postavljaju najstroži zahtjevi na točnost i kvalitetu obrade što je slučaj kod završnih, finih obrada. Dijamant i kubni bor-nitrid redom imaju najveće toplinske provodljivosti te se tvore od strukturalno iste atomske kubične strukture osnovnih kristala. Međutim, svojstva CBN-a i dijamanta su bitno različita što u konačnici dovodi do njihove industrijske komplementarnosti prikazane slikom 2.4.4. Prethodno je spomenuto kako se dijamant i polikristalni dijamant ne koriste pri obradi materijala na bazi željeza obzirom da pri velikom tlaku i visokoj temperaturi dolazi do prelaska kubne rešetke u onu grafita koja se zatim otapa u željezu te na taj način ubrzava trošenje reznog alata. Također, dijamantni rezni alati su vrlo podložni i toplinskom šoku. Dijamant, kao i kamen posjeduje određene ravnine po kojima lako dolazi do njegova pucanja uslijed mehaničkog opterećenja zbog čega je tijekom obrade rezanjem dijamantni alat potrebno na odgovarajući način postaviti u držač alata kako bi se smanjio negativni utjecaj navedenog svojstva. Dijamant i CBN spadaju pod kategoriju materijala relativno niske izdržljivosti stoga je njihova primjena ograničena na obrade neprekidnog rezanja. Osim područja primjene navedenih slikom 2.4.4. dijamant je vrlo popularan pri obradi nemetalnih materijala poput kamena i granita.



Slika 2.4.4. Područje primjene kubnog bor-nitrida (CBN) i polikristalnog dijamanta (PCD) [5].

2.5. Prevlačenje reznih alata

Inženjerstvo površina je brzo rastući dio proizvodnog strojarstva, a bavi se modificiranjem svojstava materijala pa tako i njegovim zaštitnim prevlakama. U današnje vrijeme rijetko koji proizvod nije prošao kroz određeni proces prevlačenja bilo da se radi o dijelovima mehaničkih sustava, elektroničkim dijelovima, konstrukcijskim materijalima civilnog inženjerstva, raznim pakiranjima i spremnicima, dijelovima zrakoplovne i svemirske industrije, medicinskoj opremi, kućanskim aparatima ili namještaju. Shodno iznimno širokom području uporabe razvili su se i brojni načini nanošenja prevlaka poput kemijskog, elektro-kemijskog, toplinsko-kemijskog, toplinskog, mehaničkog i nanošenja parne faze [7]. Za ovaj je rad važan postupak nanošenja parne faze, bilo da se radi o fizikalnom (engl. *PVD*) ili kemijskom (engl. *CVD*) nanošenju. Prevlake omogućuju poboljšanje procesa rezanja i raznih zahtjeva koji se postavljaju na sam alat, neovisno da li se radi o njegovom životnom vijeku, povećanju sposobnosti postizanja uskih tolerancija, tvrdoći, otpornosti na trošenje, toplinskoj stabilnosti ili primjerice poboljšanju triboloških svojstava poput smanjivanja trenja. Sama veličina zrna nanesenog materijala može varirati od svega nekoliko nanometara do preko

10 mikrometara pri čemu većinu današnjih prevlaka karakterizira veličina od 1 μm do 3 μm. Prevlaka je mnogo među kojima svakako treba spomenuti:

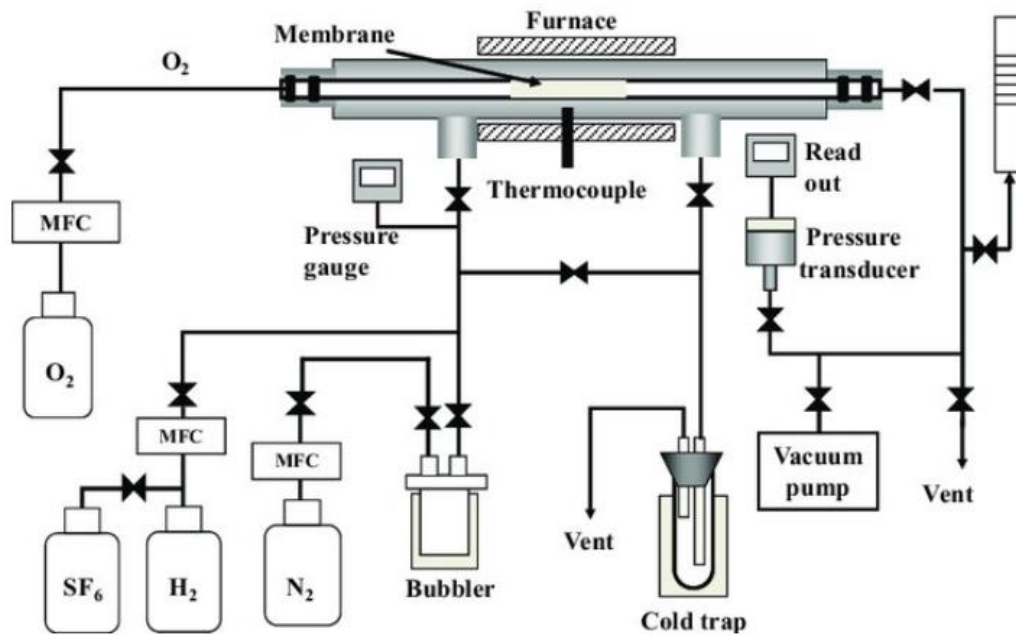
- Titanov nitrid (TiN). Prvi materijal nanesen PVD postupkom koji globalno dobro zadovoljava zahtjeve reznih alata [8]. Prepoznatljiv je po refleksiji zlatne boje.
- Titanov karbid (TiC). Prvi materijal nanesen CVD postupkom.
- Aluminijev oksid (Al₂O₃). Karakterizira ga izvrsna inertnost prema kemijskom trošenju. Zbog niske toplinske vodljivosti djeluje kao toplinska izolacija čime se smanjuje utjecaj plastične deformacije reznog alata i povećava otpornost na kratersko trošenje [8].
- Aluminijev titan nitrid (AlTiN). Imaju široku primjenu koja je posebno izražena u visoko-brzinskoj obradi (VBO). Karakterizira ga relativno visoka tvrdoća, izvrsna toplinska otpornost i nisko trenje.
- Moderni titanovi karbonitridi (MT-Ti(N,C), MT-CVD) koji kombiniraju titan, ugljik i dušik te moderne CVD prevlake koje kombiniraju MT-TiCN, Al₂O₃ i TiN.

2.5.1. Kemijsko nanošenje parne faze (CVD)

CVD (engl. *chemical vapour deposition*) je proces koji se često odvija na temperaturama od 700 do 1050 °C [8]. Izvorni plinovi uskladišteni u spremnicima se dovode do reakcijske komore, najčešće pod vakuumom. Unutar komore se nalazi zagrijani izradak na čiju površinu naliježu plinovite molekule pri čemu se metalni dio molekula difuzijom i kemijskom (metalnom) vezom spaja s izratkom dok se preostali plinovi odvede iz komore. Takvi plinovi su u pravilu opasni, često i vrlo toksični zbog čega se stvara potreba za kvalificiranijom radnom snagom (naspram PVD-a) glede manipuliranja i skladištenja plinova. Primjer jedne takve reakcije bilo bi pocinčavanje: $ZnCl_2 + H_2 \rightarrow Zn + 2HCl + E$. Primjer konfiguracije procesa dan je slikom 2.5.1.1. gdje su pokazani potrebni dijelovi stroja potrebni za ispravnu provedbu kemijskog nanošenja parne faze. Postoji mnogo različitih CVD metoda poput: plazmom poboljšano (PE-CVD), mikro valovi poduprti plazmom (MP-CVD), metalno organska (MO-CVD), aerosolom potpomognuto (AA-CVD) i ultra visoki vakuum (UH-CVD).

Potencijal adhezije, odnosno povezanost prevlake i matrice, je zahvaljujući nastanku kemijske veze i difuzije neusporedivo veća od one povezanosti dobivene PVD postupkom [7]. CVD postupkom se u pravilu postižu prevlake najvećih čistoća. Također, uniformnost prevlake je superiorna PVD

prevlakama obzirom da je porast prevlake nanosene CVD kolinearan sa smjerom normale diferencijalnog elementa na kojeg se ista nanosi. Sama brzina nanošenja slojeva je još jedna stvar u kojoj CVD prednjači nad PVD postupkom što je između ostalog i jedan od razloga zašto je CVD postupak u pravilu pogodniji za masovnu proizvodnju. Neke od negativnih strana CVD postupka, uz prethodno spomenutu učestalu volatilitnost i toksičnost, su mogući nastanak oštećenja i omekšanja izratka uz pad njegove čvrstoće na savijanje [7].



Slika 2.5.1.1. Konfiguracija procesa kemijskog nanošenja parne faze (CVD) [9].

2.5.2. Fizikalno nanošenje parne faze (PVD)

PVD (eng. *physical vapour deposition*) je proces kod kojega se prevlačenje u pravilu odvija na temperaturama od 400 do 600 °C [8]. Odmah se može zamijetiti kako se PVD postupkom mogu prevući materijali koji zbog svoje toplinske osjetljivosti nisu u mogućnosti uspješno koristiti CVD postupak. Treba napomenuti kako upravo zbog takve niske temperature PVD proces u pravilu ima veće gubitke materijala koji se nanosi na pogrešna mjesta no što je to slučaj kod CVD postupka.

Sam tijek procesa je vrlo sličan CVD-u s razlikom u tome što je izvorni materijal prevlake u krutom stanju. Dakle, za PVD je potreban i uređaj pomoću kojega će se atomi izbaciti iz krutine što se ostvaruje pomoću izvora energije velike gustoće poput one elektronskog ili ionskog snopa [7].

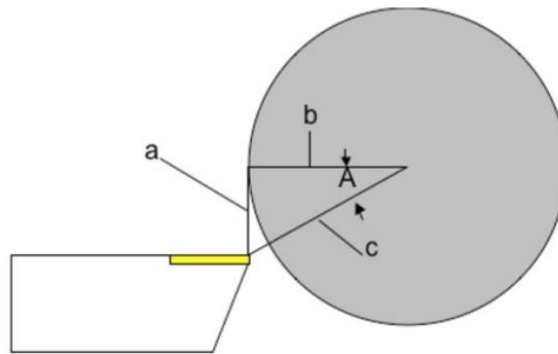
Krutina se često postavlja iznad ili oko izratka te se zatim pomoću određenog izvora energije visoke koncentracije atomi iz krutine izbacuju te bombardiraju površinu izratka gdje često reagiraju s dodatnim plinom te ostvaruju fizikalnu vezu s izratkom. Primjerice, titanovi atomi se izbacuju, reagiraju s dušikom te u konačnici tvore prethodno spomenutu TiN prevlaku. Sam proces je bezopasan za okoliš te je rukovanje i skladištenje materijala uvelike lakše i sigurnije od onoga CVD postupka. Sam proces nanošenja je pravolinijski zbog čega se u pravilu nanose prevlake nižeg stupnja uniformnosti nego što je slučaj kod CVD-a, posebice kod izratka kompleksnog oblika.

PVD karakterizira i epitaksija molekularnim snopom (eng. MBE) što omogućuje izvrsnu kontrolu kemijske strukture na atomskoj razini, izvrsnu kontrolu debljine nanosene prevlake i oštine prijelaznih rubova kao što je to slučaj kod glavne i pomoćne rezne oštrice alata [7]. Zbog tlačnih zaostalih naprezanja dodatno se povećava kako čvrstoća rezne oštrice tako i njena otpornost na kratersko trošenje dok se zbog visoke tvrdoće prevlake povećava otpornost na ukupno trošenje čime se u konačnici skupno utječe na povećavanje pouzdanosti reznog alata [8].

Nadalje, zbog niske temperature u pravilu ne bi smjelo doći do oštećenja izratka te njegova čvrstoća na savijanje ne opada nakon prevlačenja kao što je to slučaj kod CVD postupka [7]. PVD postupak se češće koristi kod prevlačenja reznih alata. Međutim, PVD postupak ima manji potencijal za masovnom proizvodnjom djelomično zbog činjenice da je brzina nanošenja prevlake bitno manja od one CVD postupka te je sam trošak kupovine opreme kao i onaj izvođenja procesa u pravilu intenzivniji. Unatoč većim ekonomskim zahtjevima PVD postupka isti se pretežito koristi u industriji prevlačenja reznih alata.

3. BRUSNI STROJEVI ZA OBRADU CENTRA

Greške stezanja izratka prilikom tokarenja uvelike utječu na sam proces rezanja. Primjerice, ukoliko se kod stezanja pomoću 2 konjića jedan od njih pomakne za veličinu δ , na strani 2. konjića dogoditi će se ekstrem manjka ili viška materijala u iznosu od 2δ ovisno o smjeru pomaka 1. konjića. Slična situacija se stvara i kada, unatoč pravilno postavljenim konjićima, sam konusni provrt za šiljak nije u centru poprečnog presjeka izratka. Prethodni problemi slični su onom kada se sam rezni alat vertikalno pomakne od centra za određeni iznos a kao što je to prikazano slikom 3.1.

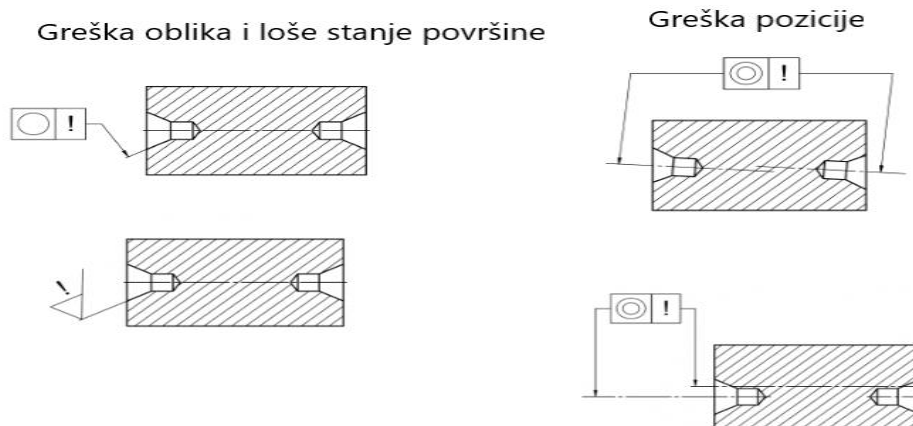


Slika 3.1. Vertikalni pomak reznog alata uz idealne preostale uvjete [10].

Dužina b predstavlja vrijednost zahtijevanog odnosno programiranog radijusa. Međutim, zbog pomaka alata stvarno postignut radijus izratka iskazan je duljinom c . Bitno je uočiti kako se za isti pomak alata s porastom tokarenog promjera duljina c sve više približava duljini b , odnosno smanjuje se kut A . Dakle, za isti pomak alata veća greška relativnog odstupanja dimenzije biti će zabilježena na izratku manjeg promjera. Spomenuti nepoželjni slučajevi pomaka konjića i netočne izrade šiljastog provrta mogu se povezati s pomakom alata na način da se zamisli pomak alata koji nije konstantan već se mijenja duž aksijalne osi izratka.

Na greške alatnog stroja utječe se ispitivanjem točnosti i funkcionalnosti istog provedbom Schlesingerove norme te analize točnosti i pouzdanosti pozicioniranja pri čemu se u konačnici vrši i ispitivanje tehnološke točnosti kao potvrda kvalitete provedbe prethodnih ispitivanja i kalibriranja. Međutim, osim o stanju alatnog stroja, točnost stezanja pa tako i izrade ovisi i o stanju izratka.

Primjerice, izrada šiljastog provrta osovine se u tehnološkom procesu vrši prije no što se ista cementira i kali. Nakon očvrnuća osovine šiljasti provrti nisu poravnati niti su ovalni dok je sama površina gruba s ljuskastim izgledom. Dakle, događaju se nepoželjne deformacije provrta od kojih su neke prikazane slikom 3.2. Zbog opisanog problema te često postavljenih strogih zahtjeva na točnost izrade stvorila se potreba za posebnim strojevima čija je uloga obnoviti šiljasti provrt izratka.



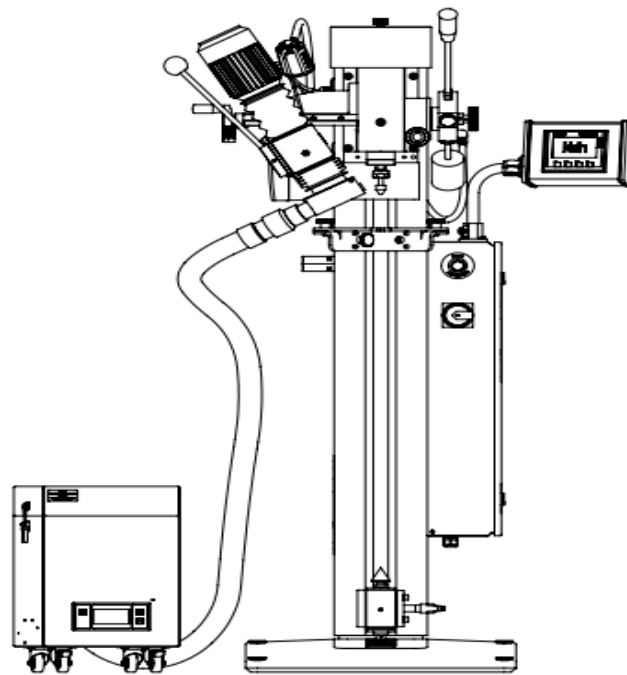
Slika 3.2. Greške šiljastih provrta [11].

Dakle, primjenom strojeva za obradu centra uvelike se povećava točnost izrade prilikom tokarenja dok su za većinu postupaka brušenja isti praktički neophodni. Dakle, cilj navedenih strojeva je pripremiti, odnosno optimizirati strojni dio za nasljedne procese poput onih cilindričnog brušenja, tvrdog tokarenja, kontrole kvalitete i sl. na način da se poboljša pravocrtnost, koaksijalnost i kružnost šiljaka uz zadovoljavajuću kvalitetu površine čime se povećava stabilnost procesa i točnost izrade što posljedično smanjuje potrebni dodatak za obradu kao i stopu škarta.

3.1. Analiza konstrukcije i principa rada

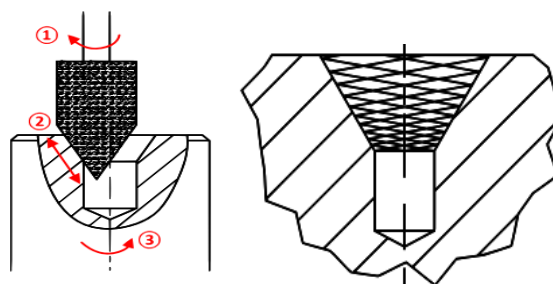
Brusni strojevi za obradu centra su u pravilu vertikalne izvedbe iako se na tržištu nude i horizontalne izvedbe. Primjer horizontalne izvedbe bio bi model ZS 2000 tvrtke Henninger koji je pogodan za izratke velikih masa (preko 1 t) i duljina (preko 2 m). Prednost takve izvedbe je i činjenica da se šiljasti provrt može istovremeno obrađivati s obje strane. Spomenuta tvrtka nudi i horizontalnu izvedbu ZS 250 koja se na određeni način montira na tokarski obradni centar te se tada otvara široka mogućnost primjene koja je ponajviše limitirana samim obradnim centrom. Dakle, moguće je obrađivati izratke

velikih dimenzija poput turbina ili stroja za bušenje tunela [11]. Nadalje će se posvetiti pažnja konfiguraciji i radu vertikalnih strojeva pri čemu je jedna inačica prikazana slikom 3.1.1.



Slika 3.1.1. Vertikalni stroj za brušenje centra s fiksnim izratkom [12].

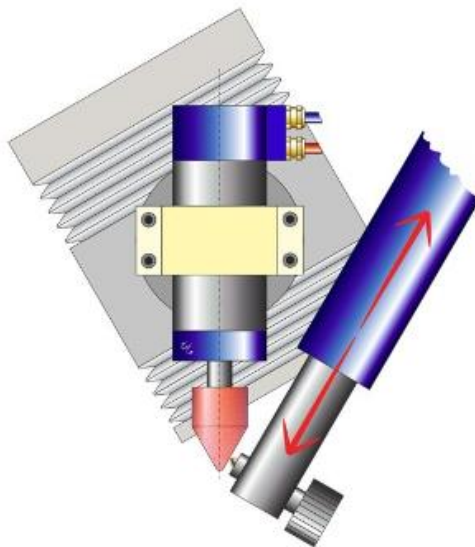
Vertikalne strojeve za obradu centra karakterizira 3 različita gibanja prikazana slikom 3.1.2., a to su rotacija radnog vretena brusnog alata (1), linearno taktno gibanje (titranje) pod određenim kutom (2) te u konačnici rotacija oko aksijalne osi izratka ili neke druge njoj kolinearne osi (3). Gibanje (3) se može vršiti gibanjem brusnog alata ili pomoću rotacije izratka. Rezultat navedenih gibanja očituje se površinom s mnoštvom kanalića izvrsne sposobnosti zadržavanja maziva što je naročito bitno kod stezanja nepokretnim šiljkom zbog drastičnog smanjenja razvijanja topline.



Slika 3.1.2. Gibanja obrade (lijevo) i uzorak površine kao rezultat navedenih gibanja (desno) [12].

Ukoliko se koristi stroj koji vrši rotaciju izratka treba biti svjestan da će se nepravilnosti vanjskog promjera (na mjestu stezanja), koji se praktički uvijek brusi nakon izrade centra, u određenoj mjeri zasigurno odraziti na točnost izrade samog centra. Nadalje, rotacijom izratka se povećavaju potrebni dijelovi opreme te se komplicira posao stezanja i skidanja što otežava potencijalnu automatizaciju stroja. S druge strane, ukoliko je izradak fiksiran stvara se mogućnost mijenjanja pozicije samog centra te lakšeg vršenja potencijalne automatizacije odnosno pripremno-završnog vremena. Samo stezanje izratka se u pravilu vrši pomoću linete s 3 podesive izbočine što je najbolji izbor ukoliko se na stroju obrađuju osovine raznih promjera. Međutim, kada se na stroju obrađuju osovine istog promjera te vrlo sličnog stanja površine poželjno je koristiti steznu napravu od 2 dijela: fiksnog V nakovnja te pomične izbočine koja priteže izradak. Razlog tome je smanjenje pripremno završnog vremena te olakšana automatizacija relativno slučaju rotirajućeg izratka.

Brusna glava je montirana na vertikalnu vodilicu i spojena na pogone za ostvarenje potrebnih gibanja. Grubi posmak se često vrši pomoću običnog ručnog kola dok se fini posmak često vrši pomoću pužnog vijka i reduktora. Usko vezana za brusno kolo je i njegova jedinica za popravljjanje forme (engl. *dressing unit*), prikazana slikom 3.1.3., koja često koristi monokristalni dijamantni (engl. *SCD*) rezni alat obzirom da se njime postiže najveća kvaliteta obrađene površine, tj. najmanja hrapavost. Prilikom samog popravljjanja forme brusa potrebno je spriječiti planetarno gibanje.



Slika 3.1.3. Jedinica za popravljjanje forme brusnog kola [13].

Unatoč velikom broju okretaja brusnog vretena zbog malih radijalnih dimenzija brusa pojavljuje se problem niskih brzina rezanja što je maksimalno izraženo u samom centru rotacije. Navedeni problem rješava se na način da jedinica za popravljavanje forme nije fiksna, već oscilira u smjeru okomitom na os brusnog konusa pri čemu treba istaknuti da brzina oscilacije uvelike utječe na kvalitetu obrađene površine [14]. Većina proizvođača strojeva za obradu centra postiže kružnost centra s odstupanjima od 1 μm i manje. Tvrtka Technica technology gmbh navodi da njihovi strojevi postižu paralelnosti centara s odstupanjima manjim od 10 μm .

Strojevi za obradu centra su u pravilu otvorenog tipa te je stoga potrebno ugraditi i uređaj za usisavanje strugotine obzirom da se ista vrlo lako i brzo raspršuje po proizvodnoj okolini što nikako nije dobro za ostatak proizvodne opreme, a kamoli za proizvodne djelatnike. Podmazivanje brusnog vretena kao i mehanizma prijenosa planetarnog gibanja se u pravilu vrši samo prilikom prvotne montaže stroja čime se eliminira greška ponovne montaže dijelova. Preostale površine, poput vertikalne klizne staze, se podmazuju redovito. Konačno, potrebno je osigurati zaštitu na radu te minimizirati trošenje pokretnih površina što se često ostvaruje materijalima poput pleksiglasa, neoprena (sintetičke gume) i metala.

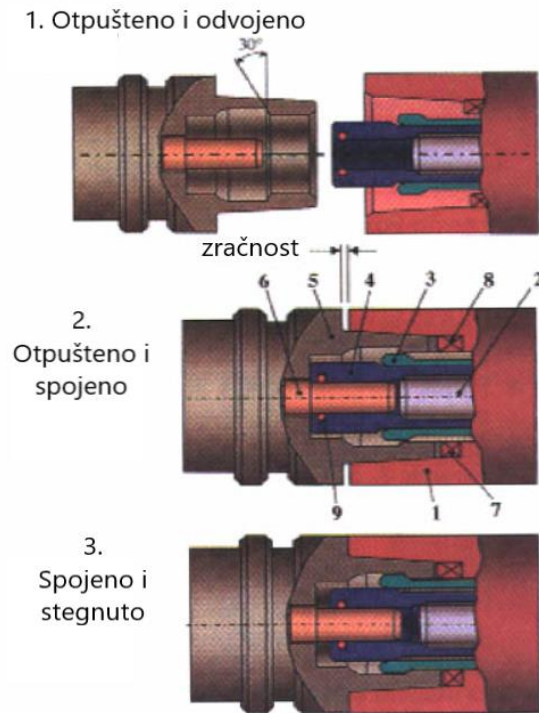
4. TEHNOLOGIJA PROIZVODNJE VRETENA

4.1. SK i HSK sustavi stezanja alata

SK sustav prihvata držača alata u radno vreteno stroja karakterizira primarno univerzalnost prihvata radnog vretena zbog čega se na istom vretenu mogu koristiti brojne izvedbe držača alata. Kontakt steznih površina se ostvarivao na vanjskoj površini držača alata dok se kod HSK sustava primarni kontakt ostvaruje unutar držača alata. Upravo zbog toga se kod SK sustava pri okretajima radnog vretena većim od 8000 okr/min javljao problem dodatnog uvlačenja držača u radno vreteno izazvanog bržom radijalnom deformacijom vretena u odnosu na radijalnu deformaciju stijenke držača alata. Posljedica takvih deformacija je gubljenje pozicije alata po z-osi te povećanje sila stezanja nakon prestanka vrtnje što je otežavalo posao demontaže prihvata. U nastavku ovoga rada će se pažnja posvetiti HSK sustavu prihvata s obzirom da je isti relevantan za tehnologiju proizvodnje vretena.

Prva HSK norma objavljena je 1993. od strane Njemačkog instituta za normizaciju kao rezultat petogodišnjeg rada članova akademske zajednice, Udruge njemačkih proizvođača alata, grupe internacionalnih firmi i krajnjih korisnika. HSK prihvati definiran je pomoću norme DIN 69063 vezane za dio vretena koji prihvaća držač alata te norme DIN 69893 vezane za držač alata [15]. U vrijeme razvijanja HSK norme na tržištu su se ubrzano stvarale nove inačice prihvata na vretenu i držaču alata što je i dio razloga zašto je HSK norma razvijena za stacionarnu i rotacijsku primjenu. Glavni kriteriji razvijanja sustava bili su: povećanje krutosti, minimiziranje mase te povećanje radijalne i aksijalne točnosti uz ispunjenje tada naglo rastuće potrebe za visoko-brzinskom obradom.

Kao rezultat takvih kriterija stvoreno je 6 HSK tipova označenih slovima od A do F koji se primjenjuju ovisno o radnom momentu, brzini rezanja te načinu stezanja i otpuštanja (ručno ili automatski) HSK spoja. Tipovi E i F konstruirani su za strojeve s automatskom izmjenom alata (eng. ATC) te rad s malim momentima i vrlo visokom brzinom vrtnje vretena [15]. Tipovi A i C se koriste pri srednjim, umjerenim vrijednostima brzine i momenta vrtnje pri čemu se samo A koristi kod automatske izmjene alata. Tipovi B i D koriste se za najveće momente te za raspon od umjerenih do visokih brzina vrtnje vretena pri čemu se samo B koristi u slučaju automatske izmjene alata. Slikom 4.1. prikazan je postupak stezanja HSK sustava.



Slika 4.1. Prikaz načina stezanja HSK sustava [16].

U 1. koraku se mehanizam nalazi u otpuštenom stanju. Povlačni vijak (2) koji se nalazi u vretenu (1) je kruto spojen s rukavcem (4) te je u otpuštenom stanju. Upravo takvo otpušteno stanje povlačnog vijka dozvoljava povlačnim prstima (3) skupljanje prema udubinama na rukavcu. Nadalje se u 2. fazi umeće držač alata te se pogonski ključevi (7) i (8), čija je uloga prenositi moment, uparuju s utorima na držaču alata. Obzirom da je promjer držača malo veći od provrta prihвата na vretenu, isti ne može potpuno ući u vreteno zbog čega se javlja zračnost. Konačno, u 3. fazi se aktivira mehanizam stezanja odnosno aktivira se povlačni vijak (2) koji uvlači rukavac (4) zbog čega se izaziva radijalno širenje povlačnih prstiju (3) koji pritišću stijenku držača (5) i stijenku vretena (1). Zatezanje povlačnog vijka eliminira zračnost 2. koraka te izaziva elastičnu deformaciju stjenke držača alata zbog čega se ostvaruje iznimna preciznost pozicioniranja kao i ponovljivost stezanja bilo da se radi o njihovoj aksijalnoj ili radijalnoj komponenti [16].

Konstrukcija HSK prihвата je takva da je porast centrifugalnog dijela stezanja na diferencijalnom elementu proporcionalan porastu mase, radijusa i kvadrata broja okretaja [16] čime se otvara mogućnost korištenja HSK sustava i za puno veće brzine vrtnje no što je to bio slučaj prilikom njegova konstruiranja tijekom 90-ih godina. Također, zbog centrifugalne sile se relativno tanka stjenka držača

alata brže deformira u radijalnom smjeru no što je to slučaj kod stjenke vretena čime se ostvaruje vrlo siguran stezni spoj koji ne utječe na aksijalnu točnost zbog fizičkog kontakta nalegne površine prihvata držača i vretena. Zanimljivo je kako u slučaju kolizije držača alata s drugim dijelovima obradnog sustava poput izratka ili amerikanera, HSK sustav upija puno više energije te često i puca zbog čega se manja količina energije prenosi na radno vreteno no što je to slučaj kod SK prihvata. Obzirom da je popravak radnog vretena naspram popravka ili zamjene HSK prihvata nemjerljivo kapitalno i vremenski intenzivniji, HSK sustavom se smanjuje rizik od zastoja.

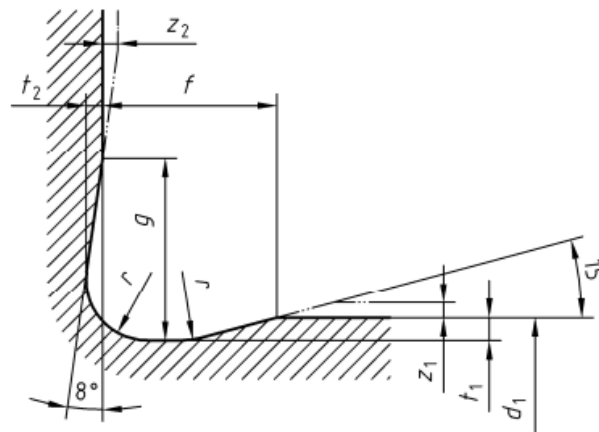
HSK sustav, djelomično zbog kraće duljine i manje mase, karakterizira manji utrošak vremena stezanja relativno SK sustavima te se ostvaruje veća sposobnost ponovljivosti. Nadalje, zbog fizičkog kontakta prstenaste nalegne površine se eliminira razlika između vretena za prednamještanje alata i radnog vretena stroja čime se ostvaruje konstantna pozicija vrha alata [15] što nije slučaj kod SK prihvata. Kanali rashladnog sredstva kao i rashladni fluid mogu uzrokovati probleme pri visokim brzinama vrtnje. Konačno bi trebalo napomenuti da su HSK sustavi zbog minimalnih odstupanja izrade osjetljiviji na mehaničko trošenje naspram SK sustava te zahtijevaju sposobnije mjerne uređaje uz veću čistoću funkcionalnih površina.

4.2. Tehnološka analiza vretena

Polazna tehnološka dokumentacija je konstrukcijski nacrt prikazan unutar dodatka A te operacijski list osovine HSK-C160 (dodatak B). Proizvođač HSTec se u pravilu bavi projektnom te malo-serijskom proizvodnjom širokog asortimana. Trenutna količina spomenutog vretena odgovara upravo takvoj malo-serijskoj proizvodnji. Daljnje riječi o operacijskom listu slijede u potpoglavlju 4.3.

Uvidom u konstrukcijski nacrt vidljivo je da je isti potpuno definiran. Materijal sirovca je nisko-legirani čelik 20MnCr5 (DIN) koji je detaljnije razrađen u potpoglavlju 5.1. Shodno normiranom znaku opća površina se obrađuje postupcima odvajanja čestica pri čemu se zahtijeva srednje aritmetičko odstupanje (Ra) u iznosu od 3,2 μm što odgovara razredu hrapavosti IT 9 (stara oznaka N8). Zahtijevana lokalna stanja (površina HSK prihvata, površina na koju se nabija rotor i sl.) iznimno bitna za funkcionalnost izratka su prikazana nacrtom pri čemu njihovo srednje aritmetičko odstupanje iznosi: 1,6 μm , 0,8 μm te 0,4 μm , odnosno razred kvalitete je IT 8, IT 7 te IT 6.

U radijalnom smjeru vretena je na istom promjeru potrebno izraditi 48 navoja M5 dubine 10 mm. S druge strane se u aksijalnom smjeru vretena zahtijeva navoj M 150x2 duljine 23 mm te 6 komada navoja M5 duljine 10 mm. Unutar HSK prihvata na vretenu je potrebno ostvariti tolerirani provrt $\Phi 8$ unutar kojega se postavlja rasječeni zatik. Na određenim lokacijama između stupnjeva vretena zahtijeva se prijelazni oblik površine tip F definiran preko DIN 509 [17], a prikazan je slikom 4.2.1.

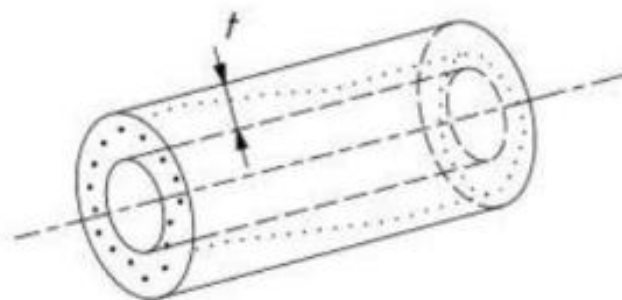


Slika 4.2.1. Prikaz prijelaznog oblika F shodno DIN 509 [17].

Prvi broj oznake govori o polumjeru zaobljenja dok drugi označava dubinu rezanja relativno promjeru na kojem se nalazi. Veličine f i g označavaju aksijalnu i radijalnu širinu reza. Veličina t označava pripadnu dubinu reza dok veličina z označava dodatak za obradu. Potrebno je izraditi 2 prijelaza F 0,6x0,3 ($\Phi 35$ H7, $\Phi 150$) te 3 prijelaza F 0,4x0,2 ($\Phi 40$ g7, $\Phi 80$, $\Phi 94$).

4.2.1. Tolerancije oblika

Od tolerancija oblika potrebno je ostvariti cilindričnost i oblik plohe označenih elemenata vretena. Oblik plohe kao i preostale tolerancije oblika ne koriste bazu kao referencu. Cilindričnost se može opisati kao istovremena provjera kružnosti i ravnosti duž aksijalne osi cilindra. Stvarni element zadovoljava kriterij cilindričnosti ukoliko se sve točke njegova oplošja nalaze unutar prostora između dva koaksijalna cilindra pri čemu tolerirano odstupanje predstavlja razliku polumjera takvih cilindara. Vizualni prikaz navedenog prostora dan je slikom 4.2.1. pri čemu t predstavlja toleriranu razliku polumjera.



Slika 4.2.1.1. Prikaz toleriranog prostora cilindričnosti elementa [18].

Tolerancija oblika površine je sveobuhvatna tolerancija oblika s obzirom da se propisuje odstupanje od nacrtom zadanog idealnog elementa koji može poprimiti razne oblike. S obzirom na postojanje propisanih tolerancija oblika poput pravocrtnosti, ravnosti, kružnosti i cilindričnosti tolerancije oblika linije i površine se koriste za kontrolu kompleksnijih elemenata. Referentna baza nije potrebna, ali se može koristiti. Zahtjev tolerancije oblika površine je ispunjen ukoliko se svaka točka obrađene površine nalazi unutar prostora između 2 paralelne ravnine razmaknute za toleriranu vrijednost, a koje prate konturu nacrtom zadane površine. Popis tolerancija oblika elemenata vretena dan je tablicom 4.2.1.1.

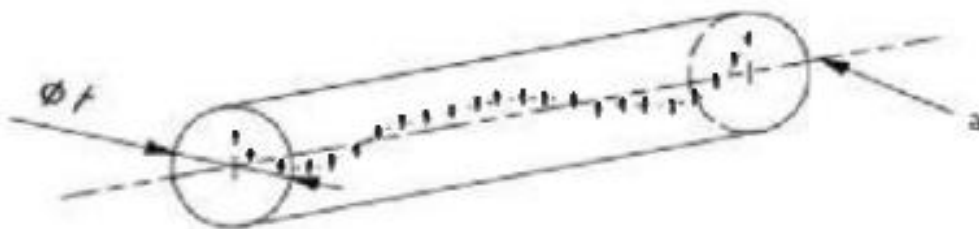
Tablica 4.2.1.1. Popis tolerancija oblika vretena.

Tolerancija	Značajka	Simbol	Vrijednost [mm]	Količina
Oblik	Cilindričnost	ϕ	0,002	2
	Oblik površine	\ominus	0,0035	1

4.2.2. Tolerancije položaja

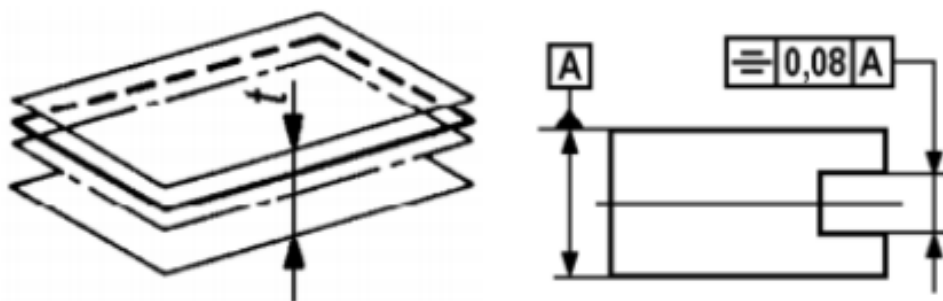
Tolerancije položaja određenog elementa dijela, osim tolerancije lokacije, moraju biti određene u odnosu na neki 2. element istog dijela. Takav referentni element se naziva baza (engl. *datum*). Kao bazni element svih tolerancija položaja vretena uzeta je bazna površina A koja predstavlja oplošje stupnja vretena promjera $\Phi 150$ odnosno njegovu aksijalnu os. Od zahtijevanih tolerancija položaja prisutne su tolerancija koaksijalnosti te tolerancija simetričnosti.

Tolerancija koaksijalnosti (koncentričnosti) predstavlja prostornu zonu oblika cilindra, prikazanu slikom 4.2.1., čiji je promjer predstavljen vrijednošću tolerancije (Φt). Ispred tolerancijske vrijednosti se postavlja oznaka Φ upravo iz razloga što većina vrijednosti preostalih tolerancija poput one cilindričnosti predstavljaju polumjer, a ne promjer. Zahtjev tolerancije koaksijalnosti je ispunjen ukoliko se sve centralne točke toleriranog elementa nalaze unutar prostora cilindra čija je aksijalna os istovjetna aksijalnoj osi baznog elementa (A).





Slika 4.2.2.1. Prikaz tolerancijskog područja koaksijalnosti [18].

Tolerancija simetričnosti predstavlja prostor između dvije paralelne ravnine jednako udaljene od centralne ravnine baznog elementa te međusobno razmaknute za toleriranu vrijednost. Tolerirani prostor je prikazan slikom 4.2.2.2. Zahtjev za tolerancijom simetričnosti je ispunjen ukoliko se centralna točka svakog od nasuprotnog para točaka profila nalazi između 2 ravnine razmaknute za toleriranu vrijednost. Kada bi se razmislilo o samom postupku mjerenja putem kojega se provjerava da li je ispunjen zahtjev koaksijalnosti ili simetričnosti brzo se dobiva uvid u kompleksnost mjerenja pri čemu rezultati zbog same prirode procesa mogu biti nepouzdana. Popis tolerancija položaja elemenata vretena dan je tablicom 4.2.1.1.



Slika 4.2.2.2. Prikaz tolerancijskog područja simetričnosti [18].

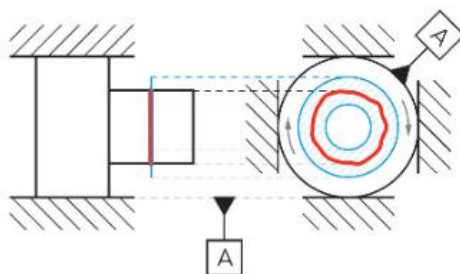
Tablica 4.2.2.1. Popis tolerancija položaja vretena.

Tolerancija	Značajka	Simbol	Vrijednost [mm]	Količina
Položaj	Koaksijalnost		0,05	3
			0,01	1
			0,002	1
	Simetričnost		0,0035	1

4.2.3. Tolerancije netočnosti okretanja

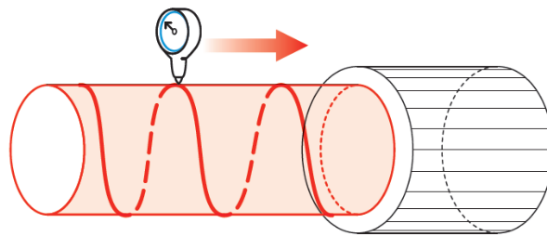
Od tolerancija netočnosti okretanja potrebno je ostvariti radijalnu netočnost okretanja te ukupnu netočnost okretanja. Bazni elementi navedenih tolerancija su prethodno spomenuti element A te element B koji je predstavljen preko oplošja stupnja vretena promjera $\Phi 80$ odnosno njegove aksijalne osi. Navedene tolerancije su učestale u konstrukcijskim nacrtima rotacijskih dijelova poput osovina, vratila, zupčanika pri čemu su posebno bitne za dijelove podvrgnute visokim brzinama vrtnje jer za cilj imaju ostvariti potrebnu balansiranost dijela.

Radijalna netočnost okretanja se može iskazati kao istovremena provjera kružnosti toleriranog elementa te njegove koaksijalnosti s referentnom bazom. Dakle, postupak provjere radijalne netočnosti okretanja se izvršava na način da se dio aksijalno fiksira nakon čega se na tolerirani element u ravnini okomitoj na aksijalnu os baznog elementa postavlja komparator koji provjerava navedenu toleranciju. Zahtjev tolerancije je ispunjen ukoliko je maksimalno odstupanje na komparatoru manje od tolerirane vrijednosti (slika 4.2.3.1.). Radijalna netočnost okretanja je 2D tolerancija.



Slika 4.2.3.1. Prikaz tolerancijskog područja radijalne netočnosti okretanja [19].

Ukupna netočnost okretanja je 3D tolerancija koja istovremeno regulira dozvoljena odstupanja toleriranog elementa u radijalnom smjeru te dozvoljena odstupanja u aksijalnom smjeru. Provjera odstupanja toleriranog elementa vrši se slično kao provjera radijalne netočnosti okretanja s time da se u konkretnom slučaju komparator aksijalno putuje (slika 4.2.3.2.). Popis zahtijevanih tolerancija netočnosti okretanja prikazan je tablicom 4.2.3.1.



Slika 4.2.3.2. Prikaz mjerenja ukupne netočnosti okretanja [19].

Tablica 4.2.3.1. Popis tolerancija netočnosti okretanja vretena.

Tolerancija	Simbol	Vrijednost [mm]	Baza	Količina
Radijalna netočnost okretanja		0,01	A	1
		0,01	A,B	1
Ukupna netočnost okretanja		0,02	A,B	1
		0,01	A,B	1
		0,002	A,B	1
		0,002	A	2

4.3. Operacijski list osovine HSK-C160

Temeljne aktivnosti pripreme proizvodnje su: izrada tehnološkog procesa, konstruiranje alata te planiranje potreba za alatima, planiranje proizvodnje i potrebnih materijalnih resursa, izrada i lansiranje operativne dokumentacije te praćenje proizvodnje [20]. Operacijski list je temeljni

dokument pripreme proizvodnje čiji je glavni zadatak prikazati sastavnicu te redosljedno popisati i opisati potrebne proizvodne operacije uz dodjelu adekvatnih radnih mjesta (plan operacija). Popis operacija je detaljniji dokument od operacijskog lista. Međutim, takvi dokumenti nisu standardizirani već ih poslovna poduzeća prilagođavaju vlastitim potrebama. Dodatkom B je predložen operacijski list osovine HSK-C160 prije uvođenja tvrdog tokarenja i obrade centra (šiljastog provrta).

Priprema proizvodnje je stavljena kao 1. operacija (10) obzirom da je ona ishodište preostalih aktivnosti. Praćenje proizvodnje je potrebno vršiti nakon same pripreme, odnosno nakon lansiranja proizvodnje te se stoga navedena aktivnost postavlja kao 2. operacija (20). Operacija 25 je 1. operacija strojne obrade koja se odvija na strojnoj pili gdje se kao sirovac uzima nisko-legirana čelična (20MnCr5) okrugla šipka $\Phi 220$ koja se reže na duljinu od 860 mm. Time se ostvaruje minimalni radijalni dodatak za obradu od 4 mm te čeonu dodatak od 5 mm sa svake strane.

Nakon strojne pile se obradak transportira do horizontalnog CNC obradnog centra 2 HAAS na kojem se odvija operacija 30. Prvo se minimalno tokari vanjski promjer na dužini od 50 mm nakon čega se na suprotnoj strani poravnava čelo i buši centar (šiljasti provrt za konjić). Minimalno obijeljeni vanjski promjer i izbušeni šiljak će se koristiti kao tehnološka baza za iduću operaciju. Operacija 60 se odvija na tokarskom stroju SEIGER SLZ-570Ex2000, a sastoji se od grube obrade pri čemu se na svakoj strani ostavlja 2 mm dodatka zbog operacije 70, odnosno toplinske obrade žarenja koji se odvija kao vanjska usluga čiji je cilj ukloniti zaostala unutarnja naprezanja.

Nakon žarenja se poluproizvod vraća na tokarski stroj SIEGER kako bi se obavila operacija (100) CNC tokarenja nakon koje na većini elemenata vretena ostaje prigodan dodatak za brušenje. Toleriranim promjerima $\Phi 200$ g5, $\Phi 150$, $\Phi 94$, $\Phi 80$ te $\Phi 40$ g7 se ostavlja 0,4 - 0,5 mm dodatka dok se unutarnji promjer $\Phi 35$ H7 radi s dodatkom 0,4 - 0,5 mm. Konusu (1:10) HSK prihvata se ostavlja 0,6 - 0,7 mm dodatka. Element na kojem će se izraditi navoj M150x2 treba raditi s dodatkom od 2 mm. Dužinske kote 850, 505, 100, 82 i 20 se rade s dodatkom od 0,1 mm. Preostali elementi se tokare na mjeru.

Za operaciju 110 je poluproizvod potrebno vratiti na horizontalni CNC obradni centar 2 HAAS gdje se pomoću glodanja vrši obrada HSK profila i čeone bušne slike. Tolerirani provrt $\Phi 8$ čija je uloga

tijekom montaže držača alata zaprimiti zasječeni zatik radi se s dodatkom od 0,3 mm. Nadalje, operacija 120 se vrši na vertikalnom CNC obradnom centru LERINC PRO.E4 koji obrađuje obodnu bušnu sliku na mjeru.

Unutar operacije 140 obavlja se posao čišćenja pozicija i predmontaže. Potrebno je izraditi skošenja na oštrim rubovima (oboriti oštro) te pročistiti navojna mjesta. Nadalje se u operaciji 150 vrši kontrola poluproizvoda pri čemu se mjere određeni elementi i shodno nakon mjerenja se zapisuju tolerirane mjere. Operacija 160 se odvija kao vanjska usluga, a riječ je o toplinskoj obradi cementacije i kaljenja za koju je potrebno pripremiti poluproizvod. Drugim riječima, mjesta poput vanjskog navoja koja se ne želi toplinski obraditi potrebno je zaštititi pastom dok se primjerice urezani navoji štite pomoću vijaka.

Nakon toplinske obrade slijedi operacija 170 koja se odvija na klasičnom tokarskom stroju gdje se skida dodatak s vanjskog navoja te se čisti izlazni kanal navoja. Operacijom 210 se izvodi fina obrada na CNC brusilici za okruglo brušenje čiji je zadatak brusiti $\Phi 94$ u preklopu od 0,03 mm relativno rotoru. Ostale površine je potrebno minimalno obijeliti. Nakon brušenja se poluproizvod ponovno vraća na tokarski stroj gdje se izrađuje navoj M150x2. Operacija 220 je posljednja planirana operacija čiji je zadatak izvršiti završnu kontrolu.

Najveća ušteda u vremenu proizvodnje se može ostvariti zamjenom operacije brušenja s operacijom tvrdog tokarenja pri čemu treba napomenuti kako je sat rada na tokarskom stroju u pravilu ekonomičniji od sata rada na stroju za brušenje. Međutim, kako bi se postigle stroge tolerancije poput radijalne netočnosti okretanja iznosa 0,002 mm potrebno je kupiti stroj za obradu centra (3. poglavlje) koji omogućuje povećanje kvalitete obrade šiljastog provrta čime se za isto opterećenje povećava krutost stezanja i smanjuje utjecaj greške stezanja.

Dakle, trenutni operacijski list je moguće izmijeniti na način da nakon toplinske obrade cementacije i kaljenja slijedi prvo operacija obrade šiljastog provrta na stroju za brušenje centra nakon čega se sav preostali posao može obaviti na tokarskom stroju. Međutim, potrebno je investirati u novi tokarski stroj koji će biti dovoljno krut i precizan.

4.4. Operacijski list vretena HSK C160

Uvidom u sastavnicu operacijskog lista (Dodatak C) vidljivi su potrebni resursi za proizvodnju vretena HSK C160. Potrebno je na raspolaganju imati 1 osovinu HSK C-160, 2 balansna prstena te 1 magnetni rotor. Priprema proizvodnje je stavljena kao 1. operacija (10) obzirom da je ona ishodište preostalih proizvodnih aktivnosti. Praćenje proizvodnje je potrebno vršiti nakon same pripreme, odnosno nakon lansiranja proizvodnje te se stoga navedena aktivnost postavlja kao 2. operacija (20).

Operacija 30 se izvršava na klasičnom tokarskom stroju. Potrebno je obostrano čeono tokarenje rotora kako bi se u konačnici postigla dužina rotora u iznosu 328 mm. Nadalje je potrebno vršiti unutrašnje tokarenje provrta na predmjeru za brušenje odnosno u minusu 0,3 mm u odnosu na pobrušeni rotor.

Operacija 40 se odvija na CNC brusnom stroju za okruglo brušenje gdje se unutarnji promjer rotora brusi na završnu mjeru.

Operacija 50 se izvodi unutar odijela za kontrolu i kvalitetu. Takva prostorija se održava na konzistentnim uvjetima temperature i relativne vlažnosti zraka. Nakon operacije 40 poluproizvod treba provesti određeno vrijeme unutar odijela za kontrolu i kvalitetu odnosno sve dok se temperatura poluproizvoda ne dovede do one prostorne. Zadatak operacije 50 je mjerenje preklopa između balansnih prstena i osovine te preklopa između magnetnog rotora i osovine uz zapisivanje izmjerenih rezultata.

Unutar odjela za montažu se vrši operacija 60 čiji je cilj montirati 2 balansna prstena i rotor na osovinu HSK C-160. Nabijanje rotora na osovinu se ne može vršiti pomoću intenzivnog zagrijavanja rotora obzirom da rast temperature iznad one optimalne dovodi do slabljenja magnetskog polja pri čemu uz dovoljno visoko povećanje temperature može dovesti do trajnog oštećenja magnetskih svojstava.

Dakle, potrebni temperaturni gradijent između rotora i osovine se u pravilu većinskim dijelom ostvaruje pomoću intenzivnog hlađenja osovine gdje se često raspoložuje vrlo malim vremenskim intervalom unutar kojega je potrebno montirati magnetni rotor.

Nakon montaže balansnih prstena i magnetnog rotora poluproizvod se vraća do odjela za kontrolu i kvalitetu gdje je opet potreban određeni interval stajanja poluproizvoda u prostornim uvjetima odjela kako bi se isti aklimatizirao. Nadalje se vrši operacija 70 čija je uloga mjeriti sve bitne dužinske kote i zapisati ih s ciljem lakšeg odvijanja iduće operacije.

Operacija 80 se odvija na preciznoj brusilici za okruglo brušenje gdje je potrebno izvesti završno brušenje $\Phi 200$ g5, $\Phi 150$, $\Phi 144,2$ h6, $\Phi 80$, $\Phi 40$ g7, konusni element HSK prihвата, $\Phi 35$ H7 te dužinske kote.

Zadnja operacija je provjera kvalitete rada koja se ponovno vrši u odjelu za kontrolu i kvalitetu. Ukoliko su sve operacije odrađene unutar tolerancijskih polja proizvedeno je vreteno HSK C-160. U protivnom je potrebno isti doraditi ili ako je navedeno nemoguće nastaje škart.

4.5. Analiza materijala ulaznog poluproizvoda

Materijal vretena je nisko-legirani čelik za cementiranje oznake 20MnCr5 (DIN), tj. Č.4321 (HRN). Cementacija je metalurški postupak toplinske obrade koji se sastoji od faze ubacivanja ugljika ili ponekad ugljika i dušika, zatim od faze kaljenja koju slijedi faza nisko-temperaturnog popuštanja. Zadatak cementiranja je povećati tvrdoću površinskih slojeva kako bi se povećala otpornost na abrazivno trošenje pri čemu se zadržava žilavost jezgre koja je odgovorna za otpornost na udarna opterećenja.

Autor [21] navodi kako je materijal posebice zanimljiv kod izrade dijelova koji se toplinski poboljšavaju zbog visoke postojanosti oblika i dimenzija što uvelike olakšava naknadnu, ali i prethodnu obradu. Prethodno je vidljivo obzirom da se navedeni materijal koristi ponajviše u izradi zupčanika, osovina, bregastih osovina, vratila, koljenastih vratila te dijelova građevinskih i poljoprivrednih strojeva koji su izloženi teškim radnim uvjetima. Jedini legirajući element je krom (Cr) pri čemu je kemijski sastav materijala prikazan tablicom 4.5.1.

Tablica 4.5.1. Kemijski sastav 20MnCr5 (DIN) [21]

Ugljik (C)	Krom (Cr)	Mangan (Mn)	Silicij (Si)	Fosfor (P)	Sumpor (S)
0,17 – 0,22	1 – 1,3	1,1 – 1,4	max. 0,4	max. 0,035	max. 0,035

Vlačna čvrstoća (R_m), ovisno o proizvođaču, iznosi 1000 – 1300 N/mm². Modul elastičnosti (E) kao kod preostalih čelika iznosi $2,1 \cdot 10^5$ N/mm². Specifični toplinski kapacitet se nalazi u rasponu od 460 – 480 J/kgK dok se koeficijent toplinske provodljivosti pri sobnoj temperaturi nalazi u rasponu 40 – 45 W/mK.

5. TVRDO TOKARENJE

U uvodnom dijelu je okarakteriziran postupak tvrdog tokarenja uz smještaj istog u šire područje struke. Nadalje je dana usporedba tvrdog tokarenja i brušenja pri čemu su jasno vidljive prednosti i nedostaci upotrebe postupka tvrdog tokarenja pri obradi očvrnutih materijala nad tradicionalnim postupkom brušenja. Unutar ovoga poglavlja predstaviti će se rezultati raznih istraživanja znanstvene zajednice kako bi čitatelj mogao dobiti uvid u prirodu postupka tvrdog tokarenja.

5.1. Utjecajne veličine tvrdog tokarenja na hrapavost obrađene površine

Površinska hrapavost obrađene površine je jedan od ključnih faktora koji utječu na kvalitetu pa samim time i na funkcionalnost obrađivanog elementa ili sklopa u koji se isti ugrađuje. Sve utjecajne veličine postupka tvrdog tokarenja utječu na kvalitetu obrađene površine u različitim omjerima među kojima su najutjecajnije veličine posmaka, brzine rezanja i polumjera vrha reznog alata.

Zadatak eksperimentalnog rada autora [22] bio je utvrditi utjecaj različitih polumjera vrha alata uz variranje brzine rezanja i posmične brzine. Zaključak navedenog rada je takav da se hrapavost obrađene površine smanjuje ukoliko dolazi do povećanja polumjera vrha alata, povećanja brzine rezanja te smanjenja posmične brzine što odgovara tradicionalnim spoznajama o postupku tokarenja.

K. Bouacha et al. [23] su proveli eksperiment tvrdog tokarenja koristeći CBN kao rezni materijal nad AISI 52100 (102Cr6) nisko-legirajućim čelikom za ležajeve, prethodno očvrnutog na 64 HRC-a, uz variranje 3 parametra rezanja na 3 razine. Brzina rezanja se varirala u intervalu od 125 do 246 m/min, posmak od 0,08 do 0,16 mm/okr dok se dubina rezanja varirala od 0,15 do 0,45 mm. Analiza podataka totalnog plana pokusa provedena je pomoću metode odzivne površine (engl. *RSM*) čime su došli do zaključka da posmak ima najveći utjecaj na promjenu hrapavosti obrađene površine. Nadalje je pokazano kako dubina rezanja ima marginalni utjecaj na hrapavost površine te da se povećanjem brzine rezanja smanjuje hrapavost obrađene površine.

H. Aouici et al. [24] su proveli eksperiment kako bi se utvrdio utjecaj brzine rezanja, posmaka, dubine rezanja i tvrdoće obratka na veličinu hrapavosti obrađene površine. Materijal obrade je bio AISI H11 (DIN 1.2343) čelik, koji se koristi za strukturne dijelove koji se izlažu visokim opterećenjima, pri čemu su autori koristili 3 razine tvrdoće, tj. 40, 45 i 50 HRC-a. Rezni alat (CBN 7020) proizveden od strane Sandvik Coromant tvrtke sastojao se od 57% CBN-a te 35% TiCN. Sami parametri rezanja su se varirali na 3 razine: brzina rezanja od 120 – 240 m/min, posmak od 0,08 – 0,16 mm/okr te dubina rezanja od 0,15 – 0,45 mm. Srednje aritmetičko odstupanje profila obrađene površine (R_a) se za sve pokuse nalazilo u intervalu od 0,34 – 0,83 μm . Rezultati su pokazali da posmak i tvrdoća obratka imaju značajan utjecaj na hrapavost obrađene površine. Nadalje, 2-faktorske interakcije posmaka i dubine rezanja, brzine rezanja i tvrdoće, brzine rezanja i posmaka, posmaka i tvrdoće također imaju značajan utjecaj na veličinu hrapavosti obrađene površine.

J. Rech i A. Moisan [25] su proveli istraživanje čiji je cilj bio saznati kako variranje posmaka, brzine rezanja i trošenja alata utječe na hrapavost površine pri suhoj obradi. Eksperimentom se obrađivao nisko-legirajući čelik 27MnCr5 koji je cementiranjem pomoću dušika postigao tvrdoću od 850 HV0.3. ISO oznaka reznog alata je TNGA 160408 S pri čemu se isti sastoji od 60% CBN-a, 35% TiCN-a dok se ostatak masenog udjela tvori od aluminijskog (Al), wolframa (W) i kobalta (Co). Brzina rezanja se varirala u rasponu od 50 – 250 m/min, posmak se varirao od 0,05 – 0,2 mm/okr dok je dubina rezanja bila konstantna u iznosu od 0,15 mm. Rezultati eksperimenta su pokazali kako posmak i potrošenost alata znatno utječu (relativno brzini rezanja) na veličinu hrapavosti površine. Međutim, pri brzinama rezanja od 200 – 250 m/min primjećuje se značajan porast veličine hrapavosti površine za što autori navode kako je uzrok tome naglo trošenje alata pri navedenom intervalu.

5.2. Utjecajne veličine postupka tvrdog tokarenja na sile rezanja.

Tijekom obrade kod postupka tvrdog tokarenja javljaju se sile u radijalnom (F_r), aksijalnom (F_a) te u smjeru rezanja (F_c). Potrebna snaga rezanja, odnosno potrošnja energije, je proporcionalna sili rezanja. Također, s povećanjem sile rezanja rastu i zahtjevi u pogledu krutosti stroja te potrebne čvrstoće reznog alata. Nadalje, s povećanjem sile rezanja potrebno je ostvariti veću krutost stezanja te sam element obrade teorijski mora biti veće krutosti čime se smanjuje fleksibilnost obrade.

Prethodno spomenuti K. Bouacha et al. [23] su također promatrali utjecaj variranja parametara rezanja na veličinu sile rezanja. Rezultati su pokazali kako porastom dubine rezanja i posmaka dolazi do povećanja sile rezanja pri čemu porastom brzine rezanja dolazi do smanjenja sile rezanja. Parametar koji ima najveći utjecaj na promjenu sile rezanja je dubina rezanja. Naveden je i zaključak kako je veličina natražne (radijalne) sile rezanja, pri svim režimima obrade, najveća te da na nju ima najveći utjecaj tvrdoća materijala, negativan prednji kut alata i razvoj trošenja alata.

Prethodno spomenuti autori [24] navode kako dubina rezanja ima znatan utjecaj na aksijalnu silu (F_a) i radijalna sila (F_r) dok na spomenute sile brzina rezanja ima vrlo marginalan utjecaj (0,14%).

Bartarya i Choudhury [26] su proveli istraživanje o utjecaju brzine i dubine rezanje te posmaka na veličinu sile rezanja prilikom obrade, pomoću CBN reznog alata, AISIS 52100 nisko-legirajućeg čelika čija je tvrdoća nakon očvrsnuća iznosila 60 ± 2 HRC-a. Parametri su se varirali na 3 razine: brzina rezanja (167, 204 i 261 m/min), posmak (0,075, 0,113 i 0,15 mm/okr) i dubina rezanja (0,1, 0,15 i 0,2 mm). Rezultati su pokazali kako dubina rezanja značajnije utječe na sve 3 komponente sile rezanja od posmične brzine. Također je pokazano kako brzina rezanja ima vrlo mali utjecaj na radijalnu i aksijalnu komponentu sile rezanja.

Liu et al.[27] su proveli istraživanje o utjecaju polumjera vrha CBN reznog alata prilikom suhe obrade JIS -SUI2 (102Cr6) materijala. Tijekom eksperimenta se održavala konstantna brzina rezanja u iznosu od 120 m/min te konstantni posmak u iznosu od 0,1 mm/okr dok je dubina rezanja iznosila 0,1 i 0,2 mm. Rezultati su pokazali da povećanje polumjera vrha reznog alata posljedično uzrokuje povećanje natražne (aksijalne) sile.

5.3. Utjecajne veličine tvrdog tokarenja na trošenje reznog alata

Veličina trošenja alata je mjera otkazivanja alata. Unutar same proizvodnje se često postavlja maksimalna dozvoljena veličina istrošenosti alata, najčešće trošenje stražnje površine (VB), nakon koje se isti mijenja. Brzina trošenja alata dolazi do izražaja kod završnih obrada posebice u slučajevima kada je potrebno postići uske tolerancije nad relativno dugim elementima obratka.

Prethodno spomenuti Liu et al. [27] su također objavili rezultate o utjecaju polumjera vrha CBN reznog alata, pri suhom tvrdom tokarenju 102Cr6 materijala, na veličinu trošenja stražnje površine alata (VB). Porast polumjera vrha reznog alata uzrokuje povećanje natražne sile. Autori su zaključili kako razvijeno trenje na mjestu dodira reznog alata i obratka znatno utječe na veličinu trošenja stražnje površine alata pa samim time i na njegov životni vijek. Također je objavljeno kako veličina trenja raste s porastom veličine trošenja stražnje površine (VB) što posljedično uzrokuje povećanje sile rezanja (F_c) i natražne sile (F_a). Također je spomenuto kako trošenje stražnje površine uvelike utječe na porast zaostalih vlačnih naprezanja obrađene površine.

J. Zhou et al. [28] su objavili istraživanje o utjecaju skošenja rezne oštrice na veličinu trošenja stražnje površine. Vršila se završna obrada nad materijalom obrade 100Cr6, tvrdoće 60 – 62 HRC-a, koristeći CBN rezni alat. Parametri rezanja su bili konstantni: brzina rezanja u iznosu od 160 m/min, posmak u iznosu od 0,05 mm/okr i dubina rezanja od 0,5 mm. Tijekom eksperimenta su korišteni razni alati čija su se skošenja kretala u intervalu od 0° – 30° pri čemu su svi rezni alati imali konstantni polumjer rezne oštrice u iznosu od 0,01 mm te konstantnu duljinu skošenja u iznosu od 0,1 mm. Autori [28] zamjećuju kako životni vijek alata raste s porastom kuta skošenja od 0° – 15° pri čemu se maksimalna vrijednost životnog vijeka reznog alata postiže upravo pri kutu skošenja od 15° .

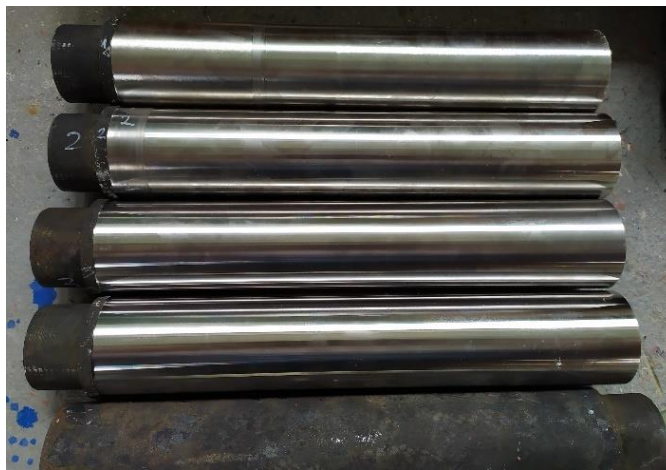
Kishawy i Elbestawi [29] su proveli istraživanje o utjecaju trošenja stražnje površine reznog alata na hrapavost obrađene površine tijekom obrade EN X153CrMoV12 materijala očvrstnutog na 62 HRC-a. Parametri rezanja su varirali u sljedećim intervalima: brzina rezanja od 140 – 500 m/min, posmak od 0,05 – 0,2 mm/okr te dubina rezanja od 0,2 – 0,6 mm. Kao materijal reznih alata je korišten CBN pri čemu su sami rezni alati imali izbrušeni vrh reznog alata polumjera 0,0125 mm ili skošenje od 20° duljine 0,1 mm. Autori su zaključili kako brzina trošenja alata raste s porastom brzine rezanja iznad 350 m/min. Također je objavljeno kako je 2-faktorska interakcija posmaka i brzine rezanja glavni uzrok nastanka mikro pukotina i šupljina. Nadalje se ističe kako pri povišenim temperaturama s porastom trošenja alata raste i debljina bijelog sloja posebice u slučaju korištenja reznih alata sa skošenjem. Autori [29] u konačnici navode kako su nepoželjna vlačna zaostala naprezanja imala minimalne veličine pri visokim brzinama rezanja i velikim dubinama rezanja.

Y. Sahin [30] je proveo istraživanje s ciljem usporedbe životnog vijeka CBN reznih alata s keramičkim reznim alatima prilikom obrade očvrnutih čelika za ležajeve. CBN alati su pokazali razumno bolje obradne karakteristike. Unatoč višestruko manjoj cijeni reznih alata od keramike, uzimajući u obzir višestruko duži životni vijek i bolje proizvodne karakteristike razumno je odabrati CBN rezne alate, pogotovo što se isti moraju rjeđe mijenjati zbog trošenja čime se povećava raspoloživost radnog mjesta. Sahin [30] je također proveo istraživanje utjecaja brzine rezanja, posmaka te tvrdoće reznog alata na njegov životni vijek. Plan pokusa je složen u L9 ortogonalnoj matrici Taguchijeve metode. Dobiveni rezultati pokusa su se koristili za razvijanje eksponencijalnog modela. Tijekom analize rezultata se koristila analiza varijance (engl. *ANOVA*) s razinom pouzdanosti od 90%. Brzina rezanja ima dominantni utjecaj na trošenje reznog alata (41,63%). Porastom tvrdoće (32,68%) reznog alata se produljuje njegov životni vijek dok se s porastom posmaka (25,22%) životni vijek reznog alata skraćuje.

6. EKSPERIMENTALNA ANALIZA

Svrha eksperimenta koji slijedi je ispitati utjecaj parametara rezanja postupka tvrdog tokarenja na površinsku hrapavost i trošenje reznog alata tijekom obrade nisko-legirajućeg čelika za poboljšanje 20MnCr5 (DIN 1.7147). Materijal obrade su šipke prethodno očvrsnute u Laboratoriju za toplinsku obradu i inženjerstvo površina Tehničkog fakulteta u Rijeci, gdje se u Laboratoriju za ispitivanje materijala utvrdila tvrdoća površine u rasponu od 68 – 70 HRC-a te prosječna prokaljivost u iznosu od 1 mm. Obrađivane šipke su prikazane slikom 6.1., pri čemu je prosječna obrađivana duljina iznosila 310 mm.

Parametri rezanja su bili takvi da se brzina rezanja varirala u rasponu 69 – 211 m/min, posmak u rasponu 0,06 – 0,34 mm/okr dok je dubina rezanja bila konstantna u iznosu od 0,3 mm te se izvodila suha obrada. Svaka šipka je obrađena u 3 prolaza pri čemu se nakon svakog prolaza rezni alat skidao s držača zbog potreba mjerenja njegovog trošenja.



Slika 6.1. *Ulazni materijal eksperimenta uz prikaz već obrađenih šipki.*

6.1. CNC tokarilica

CNC istraživačka tokarilica TU360 proizvedena je od strane poduzeća Prvomajska. Izvorno je namijenjena za serijsku obradu rotacijski simetričnih dijelova. Revolver glava tokarilice može pohraniti 12 alata.

Tehnički podaci navedene tokarilice su:

- Snaga pogonskog AC motora, maksimalni moment (tokarenja): 30,6 kW, 180 Nm.
- Raspon broja okretaja: 50 – 4000 okr/min.
- Maksimalna dužina i promjer tokarenja: 600 mm i $\phi 360$ mm.
- Maksimalni promjer tokarenja iznad suporta: $\phi 240$ mm.
- Upravljački modul: Phillips CNC 3580.
- Prihvat glavnog vretena DIN 55026 - A6.
- Prihvat nosača alata: DIN 69880 – $\phi 40$ mm.



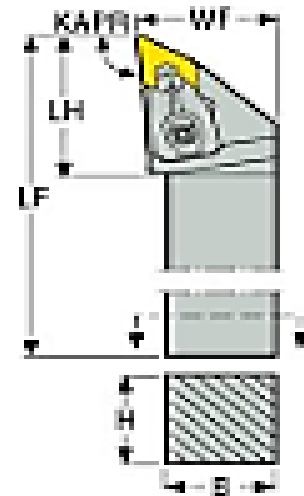
Slika 6.1.1. Tokarilica CNC TU 360.

6.2. Alat

6.2.1. Držač rezne pločice

Uloga držača rezne pločice je osigurati pravilan prijenos sila s reznog dijela alata na alatni stroj. Dakle, potrebno je osigurati dovoljnu krutost pri čemu sami držači često mogu biti slaba karika. Tijekom eksperimenta je korišten držač SECO DDJNL 2525M15-M čiji su tehnički podaci prikazani slikom 6.2.1.1. dok je slikom 6.2.1.2. prikazan izgled držača.

Name	Description	Value
B	Shank width	25.0 mm
Barcode	Product barcode	88150025000108
CDX	Cutting depth maximum	7.8 mm
CSP	Coolant supply property	0
CTMS	Connection text machine side	2525
CTWS	Connection text workpiece side	DN..1504-DN..1506*/DN..43-DN..44*
DCINN	Cutting diameter internal minimum	250.00 mm
DCINN3	Cutting diameter internal minimum 3	250.0 mm
GAMF	Rake angle radial	-6.0 deg
GAMD	Rake angle orthogonal	-6.0 deg
GAMP	Rake angle axial	-6.0 deg
H	Height of tool holder shank	25.0 mm
HAND	Direction of cutting	Left
HF	Functional height	25.0 mm
ICS	Insert clamping system	D
ItemNumber	Item Number	02588150
KAPR	Tool cutting edge angle	93.0 deg
KAPRC	Tool Cutting Edge Angle Code	J
LAMS	Inclination angle	-6.0 deg
LF	Functional length	150.00 mm
LS	Shank length	108.0 mm
RMPX	Ramping angle maximum	30.0 deg
SC	Insert shape code	D
Shanktype	Shanktype	Square shank
SSC	Insert seat size code	1506
Weight	Net weight	0.719 kg
VER	Version (Internal/External/Both)	External
WF	Functional width	32.0 mm



Slika 6.2.1.1. Tehnički podaci držača SECO DDJNL-2525M15-M [31]



Slika 6.2.1.2. Držač rezne pločice SECO DDJNL 2525M15-M.

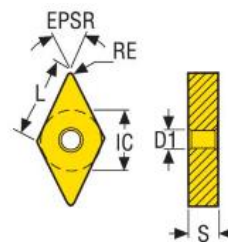
6.2.2. Rezna pločica s CBN umetkom

Korištena je rezna pločica oznake DNGA150604S-01020-L1-B CBN010 koja je zajedno s preporučenim područjem brzine rezanja i posmaka prikazana slikom 6.2.2.1.

Name	Description	Value
Barcode	Product barcode	43142028000206
CECC	Cutting edge condition code	S
CEDC	Cutting edge count	2
EPSR	Insert included angle	55.0 deg
Grade	Grade	CBN010
Gradetype	Gradetype	PCBN
IC	Inscribed circle diameter	12.70 mm
ItemNumber	Item Number	02843142
L	Theoretical cutting edge length	15.00 mm
LE	Cutting edge effective length	3.90 mm
RE	Corner radius	0.40 mm
S	Insert thickness	6.35 mm
SC	Insert shape code	D
SSC	Insert seat size code	15
Weight	Net weight	0.016 kg

DNGA150604S-01020-L1-B CBN010

GDG code A45 - TURNING CBN BRAZED
Item number 02843142



$a_p < 0,5 \text{ mm}$

SMG	CBN010	
	v_c	f
K1	—	—
K4	140 — 240	0,050 — 0,20
	460 — 780	0,00197 — 0,00787
S1	70 — 140	0,050 — 0,30
	230 — 450	0,00197 — 0,0118
S2	—	—
S3	100 — 240	0,050 — 0,25
	330 — 780	0,00197 — 0,0084
H3	80 — 200	0,050 — 0,35

Slika 6.2.2.1. Podaci o CBN reznom alatu [32]

Rezni umetak od CBN-a je zalemljen na matricu reznog alata. CBN010 gradacija se sastoji od 50% CBN-a s prosječnom veličinom zrna u iznosu 2 μm pri čemu se ostatak umetka sastoji od TiC veziva. Rezne oštrice alata su skošene pod kutom 20° na duljini 0,1 mm. Unatoč činjenici da je pločica negativna rezni CBN umetak se nalazi samo na jednoj strani. Preporučeno radno područje: brzina rezanja 80 – 200 m/min i posmak 0,05 – 0,35 mm/okr.

6.3. Izbor matematičkog modela i plana pokusa

Svrha eksperimenta je dana u uvodnom dijelu 6. poglavlja. Tijekom eksperimenta se mijenjala brzina rezanja i posmak. Dubina rezanja je konstantno iznosila 0,3 mm. Očvrsnute šipke su se obrađivale na suho. Svaka šipka je obrađena u 3 prolaza pri čemu je svaki prolaz imao maksimalnu duljinu od 310 mm ili manju u slučaju loma alata. Nakon svakog prolaza se mjerila površinska hrapavost (R_a) i trošenje (VB) stražnje površine reznog alata. Primjer G koda za obradu šipke:

%PM

N9001

N10 G56 T6063

N20 G99 X30 Z-320

N30 G96 D2000 S140 M4

N40 G0 X31 Z0

N50 G1 X29.8 F0.2

N60 G1 Z-315

N70 G1 X31

N80 G0 X150 Z-150

N90 M30

Izabrani matematički model na temelju kojeg će se regresijom analizirati utjecaj brzine rezanja (v_c) i posmaka (f) na površinsku hrapavost (R_a) je polinom 2. reda čiji je opći oblik dan jednadžbom (6.3.1.):

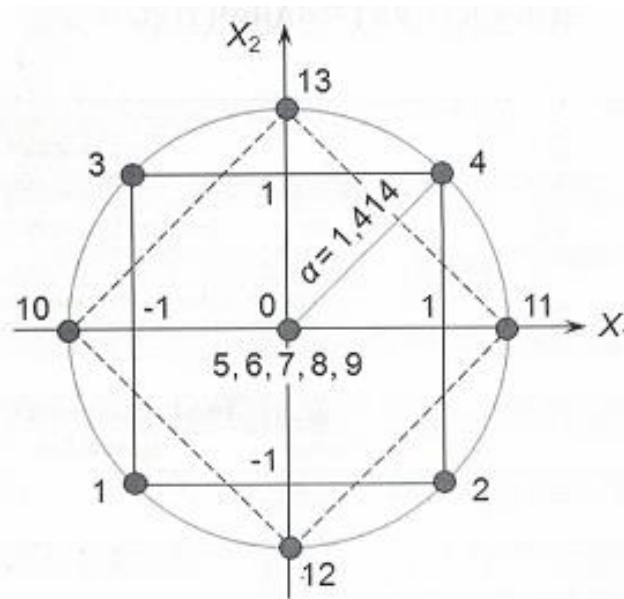
$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j}^k b_{ij} x_i x_j \quad (6.3.1.)$$

pri čemu je potrebno odrediti nepoznate parametre b_0 , b_i , b_{ii} i b_{ij} . Shodno formuli se vidi kako polinom 2. reda promatra linijski utjecaj predstavljen 1. sumacijskim članom, kvadratni utjecaj 2. sumacijskog člana te 2-faktorske interakcije sadržane unutar 3. sumacijskog člana. Nakon završetka provedbe eksperimentalnog ispitivanja vršit će se regresijska analiza unutar koje će se određeni članovi općeg modela polinoma 2. reda, čiji je utjecaj na površinsku hrapavost zanemariv, odbaciti.

Izabrani plan pokusa je opisani centralni kompozicijski plan (engl. *C-CCD*) pri čemu se variraju 2 utjecajna parametra na 2 razine kako bi se ispitalo od strane proizvođača preporučeno područje posmaka i brzine rezanja. Ukupni broj potrebnih eksperimenata se računa shodno jednadžbi (6.3.2.):

$$N = 2^k + n_0 + 2k \quad (6.3.2.)$$

pri čemu je k broj utjecajnih parametara variranih na 2 razine dok n_0 predstavlja broj eksperimentalnih točaka u središtu plana. Kako bi se osigurala okretljivost plana za konkretni eksperimentalni rad potrebno je odabrati 5 točaka u središtu plana te vrijednost koeficijenta α u iznosu od 1,414. Okretljivost plana osigurava da je raspodjela procijenjene varijance ujednačena u svim točkama koje su jednako udaljene od središta. Ukupno je odabrano 13 točaka eksperimentalnog prostora prikazanog slikom 6.3.1.



Slika 6.3.1. Eksperimentalne točke pokusa.

Ortogonalnost plana omogućuje međusobno nezavisnu procjenu pojedinačnih parametara i njihovih interakcija, a ostvaruje se pomoću kodiranja fizikalnih vrijednosti na način da je suma svih vrijednosti razina za pojedini parametar jednaka 0. Fizikalne vrijednosti x_i se kodiraju prema jednadžbi (6.3.3.):

$$X_i = 1 + 2 \cdot \frac{x_i - x_{imax}}{x_{imax} - x_{imin}} = \frac{2 \cdot (x_i - x_{i0})}{x_{imax} - x_{imin}}, \quad x_{i0} = \frac{x_{imax} + x_{imin}}{2} \quad (6.3.3.)$$

pri čemu vrijedi da se kodirana veličina $X_i = -1$ postiže za fizikalnu vrijednost x_{imin} , $X_i = 0$ postiže za fizikalnu vrijednost x_{i0} , a $X_i = 1$ postiže za fizikalnu vrijednost x_{imax} . Slikom 6.3.2. prikazane su kodirane vrijednosti utjecajnih parametara i plan pokusa pri konstantnoj dubini rezanja 0,3 mm.

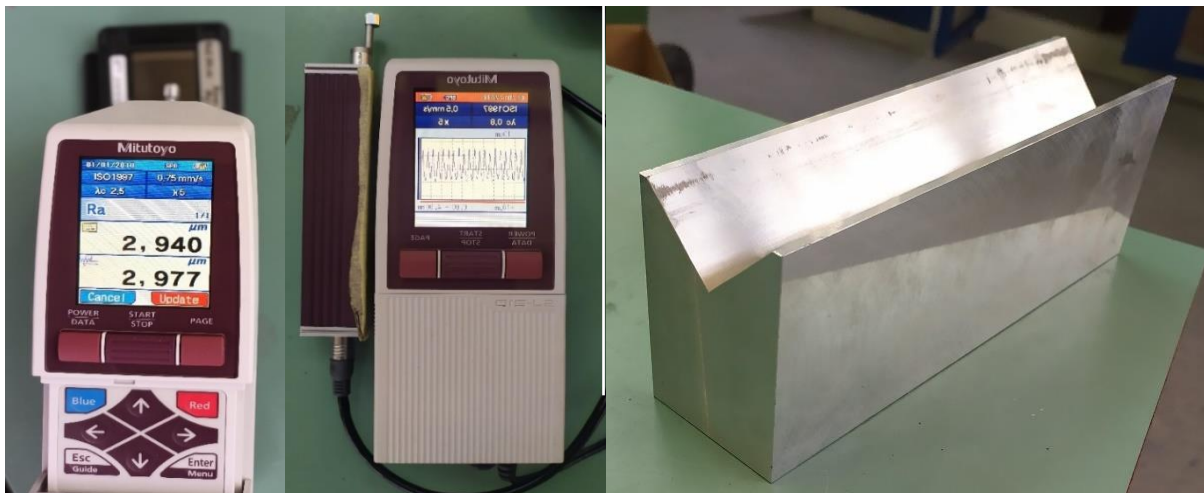
r.br. pokusa	Vc m/min	f mm/okr	X1 (vc)	X2 (f)	X1X1	X2X2	X1X2
1	90	0,1	-1	-1	1	1	1
2	190	0,1	1	-1	1	1	-1
3	90	0,3	-1	1	1	1	-1
4	190	0,3	1	1	1	1	1
5	140	0,2	0	0	0	0	0
6	140	0,2	0	0	0	0	0
7	140	0,2	0	0	0	0	0
8	140	0,2	0	0	0	0	0
9	140	0,2	0	0	0	0	0
10	69	0,2	-1,414	0	1,9994	0	0
11	211	0,2	1,414	0	1,9994	0	0
12	140	0,06	0	-1,414	0	1,9994	0
13	140	0,34	0	1,414	0	1,9994	0
Parametri			X-α	Xmin	X0	Xmax	Xα
Kodirana vrijednost			-1,414	-1	0	1	1,414
Brzina rezanja (X1) [m/min]			69	90	140	190	211
Posmak (X2) [mm/okr]			0,06	0,1	0,2	0,3	0,34

Slika 6.3.2. Plan pokusa i kodirane fizikalne vrijednosti pri konstantnoj dubini rezanja od 0,3 mm.

6.4. Provedba i rezultati eksperimentalnog ispitivanja

Eksperimenti su se odvijali shodno planu pokusa pri čemu se redoslijed izvođenja pokusa odvijao nasumičnim odabirom. Hrapavost površine se mjerila nakon svakog prolaza na 3 različite lokacije pomoću mobilnog uređaja SURFTEST SJ-210 japanskog proizvođača Mitutoyo. Prije samih mjerenja površinske hrapavosti izvršila se kalibracija mjernog uređaja pomoću pločice čija je hrapavost

površine poznata, odnosno dana od strane proizvođača. Slikom 6.4.1. prikazan je mjerni uređaj tijekom kalibriranja te korišteni V oslonac na koji se postavlja osovina tijekom mjerenja hrapavosti. Putem tablice 6.4.1. prikazani su rezultati eksperimentalnog ispitivanja hrapavosti.



Slika 6.4.1. Mjerni uređaj SURFTEST SJ-210 japanskog proizvođača Mitutoyo i V oslonac.

Tablica 6.4.1. Rezultati mjerenja hrapavosti obrađene površine.

Redosljed izvođenja	Pokus broj	Parametri		Hrapavost	Oznaka pločice
		v_c	f	R_a	
		[m/min]	[mm/okr]	[μm]	
8.	1	90	0,1	0,685	P4-1
1.	2	190	0,1	0,788	P3-2
10.	3	90	0,3	3,236	P5_2
4.	4	190	0,3	7,659	P6-2
12.	5	140	0,2	3,351	P2-1
2.	6	140	0,2	3,260	P7-1
6.	7	140	0,2	3,530	P2-2
9.	8	140	0,2	3,520	P1-2
7.	9	140	0,2	3,196	P1-1
5.	10	69	0,2	3,236	P4-2
13.	11	211	0,2	2,996	P5-1
3.	12	140	0,06	0,545	P3-1
11.	13	140	0,34	8,979	P6-1

6.5. Utjecaj parametara rezanja na površinsku hrapavost

Regresijska analiza utjecaja brzine rezanja i posmaka na hrapavost obrađene površine na razini pogreške prve vrste $\alpha = 0,05$ (tj. 5%) je izvedena pomoću programa Microsoft Excel. Rezultat za kodirani matematički model (6.3.1.) naveden je u tablici 6.5.1.

Tablica 6.5.1. Rezultati prve višestruke regresijske analize.

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>						
Multiple R	0,96263994	← koeficijent korelacije				
R Square	0,92667565	← koeficijent determinacije				
Adjusted R Square	0,87430111					
Standard Error	0,86768357					
Observations	13					

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	5	66,60399744	13,3208	17,69325	0,00075866
Residual	7	5,270123478	0,752875		
Total	12	71,87412092			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	3,37150234	0,388039883	8,688546	5,36E-05	2,45393382	4,289070857
Variable X1	0,52340903	0,306795633	1,706051	0,131764	-0,20204736	1,248865429
Variable X2	2,6688625	0,306795633	8,699154	5,32E-05	1,943406104	3,394318893
Variable X1*X1	-0,3396466	0,329048109	-1,03221	0,336312	-1,117721731	0,438428547
Variable X2*X2	0,48360203	0,329048109	1,4697	0,185102	-0,29447311	1,261677168
Variable X1*X2	1,08	0,433841786	2,489387	0,041634	0,05412719	2,10587281

U tablici 6.5.1. su crvenom bojom prikazane vrijednosti koje su veće od 0,05, a zelenom bojom one koje su manje od 0,05. Samo varijable s vrijednostima manjim od 0,05 su značajne za model i s njima je potrebno ponoviti regresiju. U ovom slučaju vrijednosti manje od 0,05 imaju kodirane varijable X_2 i $X_1 \cdot X_2$, odnosno posmak f i interakcija brzine rezanja $v_c \cdot f$. Rezultat ponovljene regresije sa statističkim značajnim varijablama naveden je u tablici 6.5.2.

Tablica 6.5.2. Rezultati ponovljene višestruke regresijske analize.

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0,9260697 ← koeficijent korelacije
R Square	0,85760509 ← koeficijent determinacije
Adjusted R Square	0,82912611
Standard Error	1,0116575
Observations	13

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	2	61,6396119	30,81981	30,11361	5,85426E-05
Residual	10	10,23450902	1,023451		
Total	12	71,87412092			

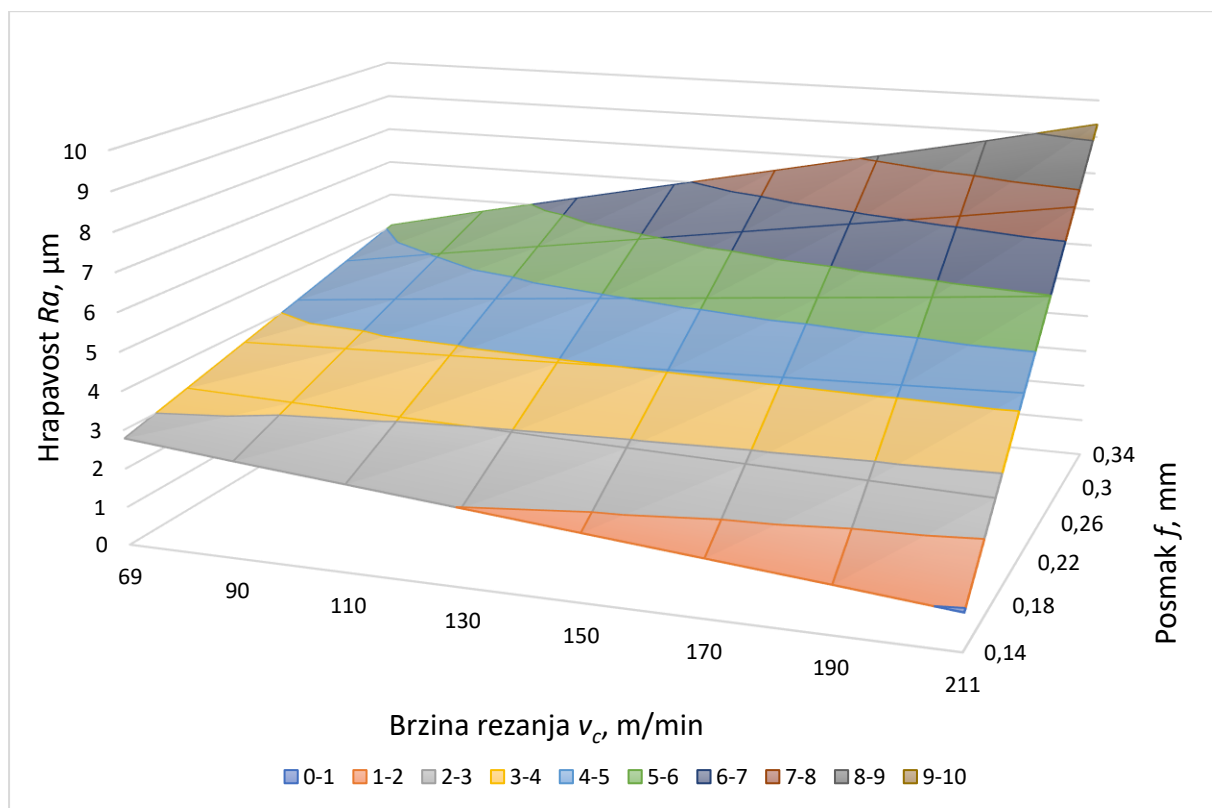
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	3,46007692	0,280583308	12,33173	2,26E-07	2,834898354	4,085255492
Variable X2	2,6688625	0,357701948	7,461135	2,16E-05	1,871852891	3,465872105
Variable X1*X2	1,08	0,505828751	2,13511	0,058515	-0,047056693	2,207056693

Vrijednost koeficijenta determinacije (*R Square*) u tablici 6.5.2. je visoka, a $F \gg \textit{Significance F}$, što znači da je proces dobro opisan dobivenim matematičkim modelom:

$$Ra = 3,46 + 2,669 X_2 + 1,08 X_1 X_2 \Rightarrow$$

$$Ra = 4,17 - 0,0432 v_c - 3,55 f + 0,216 v_c f \quad (6.5.1.)$$

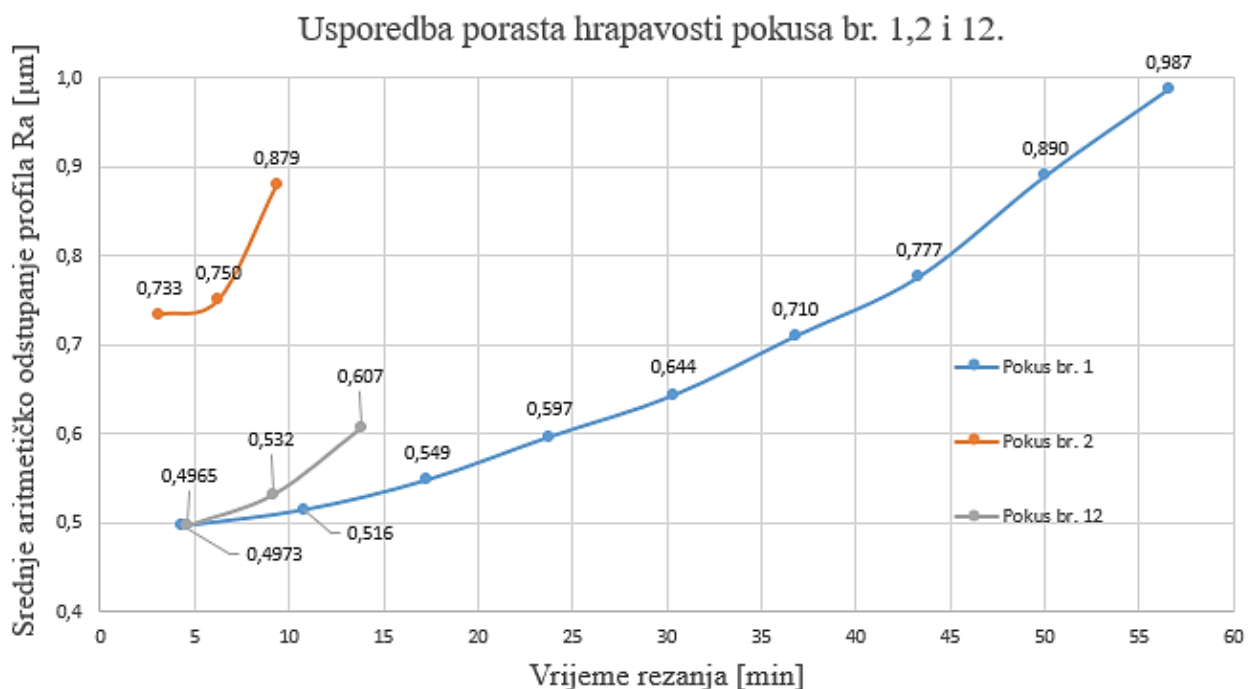
Na slici 6.5.1. dan je grafički prikaz gornjeg modela. Iz grafičkog je prikaza razvidno da se najmanja hrapavost obrađene površine postiže uz kombinaciju najmanjeg posmaka i najveće brzine rezanja. Ovaj je rezultat u suglasju sa zaključcima koje navode K. Bouacha et al. [23].



Slika 6.5.1. Grafički prikaz modela hrapavosti.

Nadalje, utjecaj vremena rezanja na površinsku hrapavost prikazan je za 3 različita pokusa putem slike 6.5.2. Može se uočiti kako parametri rezanja korišteni u pokusu br. 1 rezultiraju najboljom postojanošću alata. Karakteristično za sva 3 pokusa je trend povećanja srednjeg aritmetičkog odstupanja profila (Ra) obrađene površine tijekom prolaska vremena zbog trošenja reznog alata. Također se vidi kako pokus br. 1 bilježi najmanju stopu porasta hrapavosti obrađene površine. Rezni alat pokusa br. 12 unatoč manjem korištenom posmaku naspram pokusa br. 1 bilježi brži rast veličine hrapavosti obrađene površine dobrim dijelom zbog više od 2 puta veće korištene brzine rezanja koja je vrlo značajan parametar kada je riječ o postojanošću alata.

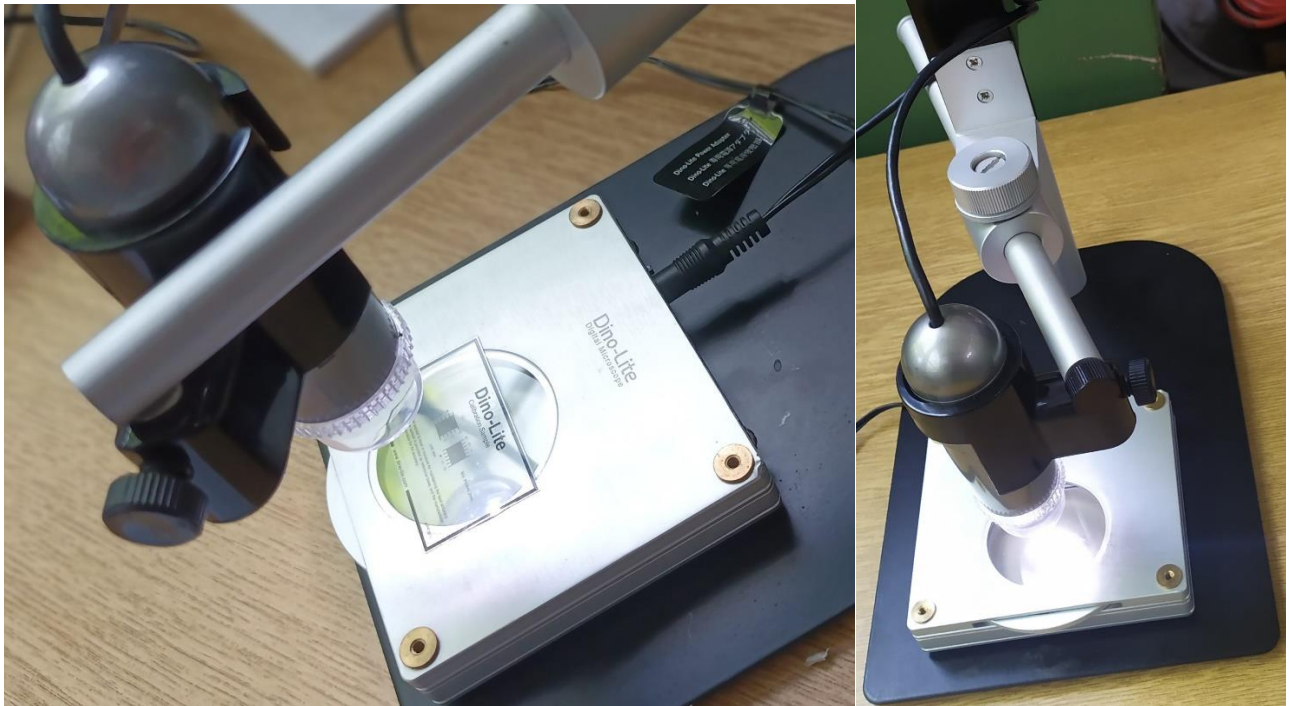
Uspoređujući pokuse br. 2 i 12 uočava se kako hrapavost obrađene površine naglije raste u slučaju pokusa br. 2 s obzirom da su njegovi parametri rezanja intenzivniji od onih u pokusu br. 12 što dovodi do ubrzanijeg trošenja reznog alata i smanjenja čvrstoće rezne oštrice. Istrošenje stražnje površine (VB) reznog alata korištenog u pokusu br. 1 je nakon ukupnog vremena obrade od 56,54 min iznosilo 0,046 mm. S druge strane, rezne oštrice korištene u pokusu br. 2 i 12 redosljedno su se slomile nakon 9,33 min odnosno 13,82 min.



Slika 6.5.2. Trend hrapavosti za; pokus br. 1 ($v_c = 90$ m/min, $f = 0,1$ mm/okr), pokus br. 2 ($v_c = 190$ m/min, $f = 0,1$ mm/okr) i pokus br. 12 ($v_c = 140$ m/min, $f = 0,06$ mm/okr).

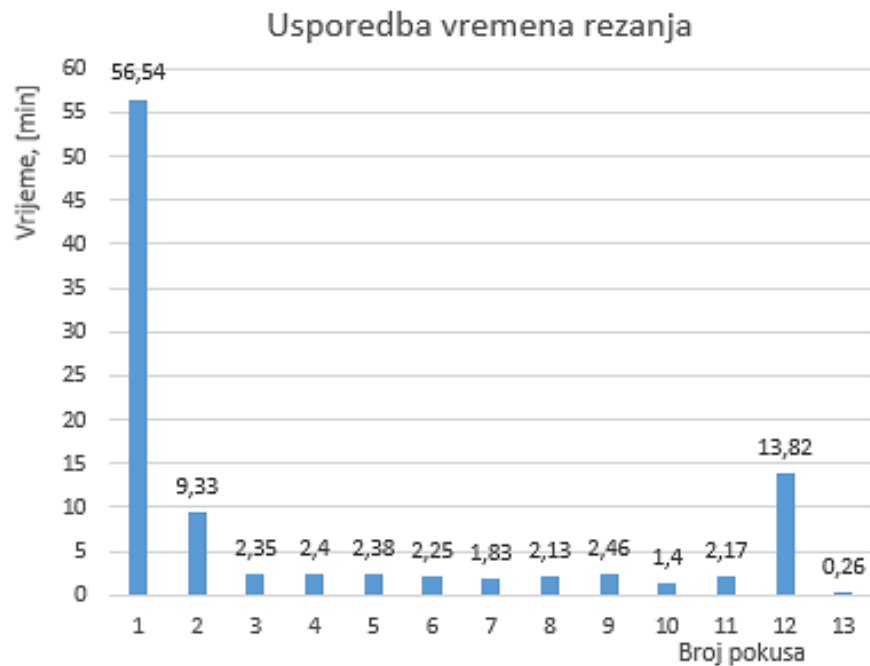
6.6. Mjerenje trošenja reznog alata

Trošenje reznog alata se mjerilo nakon svakog prolaza ili nakon uočenog loma. Mjerenje se vršilo pomoću uređaja Dino-Lite digitalnog mikroskopa koji funkcionira na način da se pomoću kamere koja se nalazi na vrhu uređaja snima vrh pločice pri čemu se u programu na računalu vrši slikanje te u konačnici i mjerenje trošenja alata. Nedostatak navedene metode je što je moguće mjeriti jedino dužine projekcija pri čemu se ne dobiva potpun uvid u stanje potrošenosti alata. Prije samog mjerenja uređaj se kalibrirao, kao što to prikazuje slika 6.6.1., pomoću kalibracijskog uzorka gdje je potrebno unijeti uvećanje digitalnog mikroskopa.



Slika 6.6.1. Kalibracija digitalnog mikroskopa Dino-Lite.

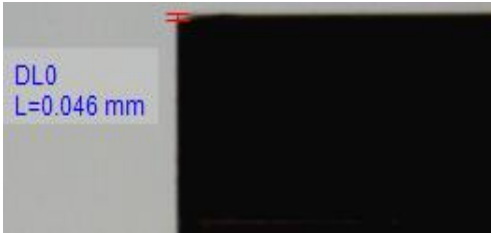
Od ukupno 13 reznih oštrica je njih 12 dovedeno do loma pri čemu je jedina anomalija rezna oštrica oznake P4-1 koja je pri dubini rezanja 0,3 mm, brzini rezanja 90 m/min i posmaku 0,1 mm/okr provela 56,54 min obrađujući šipku pri čemu je postignuto trošenje stražnje površine (*VB*) u iznosu od 0,046 mm. Slikom 6.6.2. prikazan je stupčasti dijagram koji dovodi u odnos redni broj pokusa i vrijeme prije loma s napomenom da u 1. pokusu nije došlo do loma.

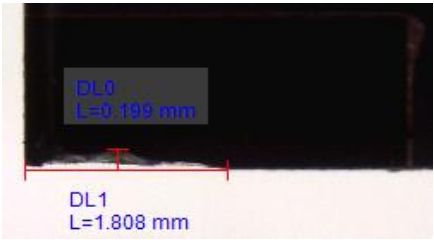
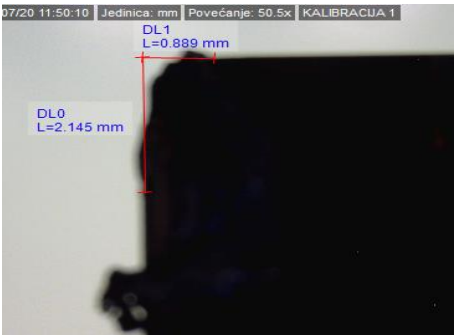
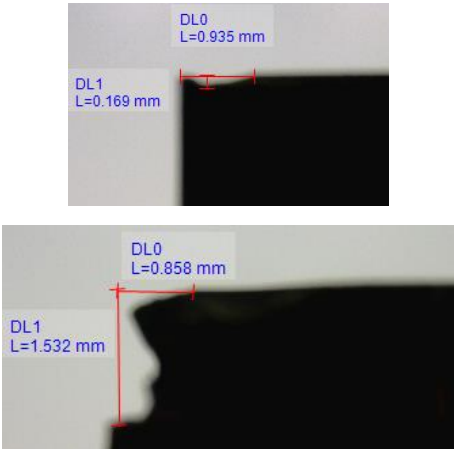
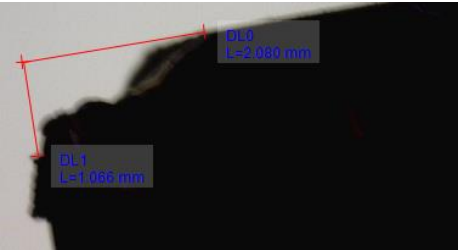



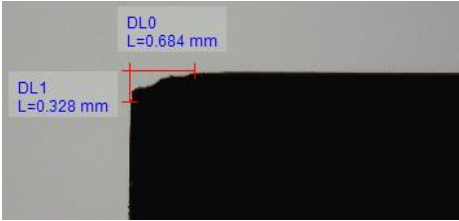
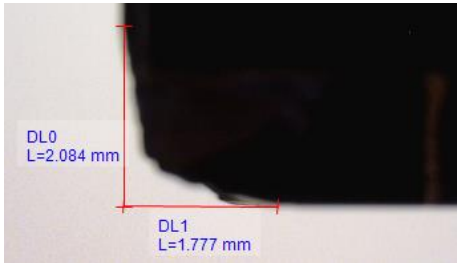
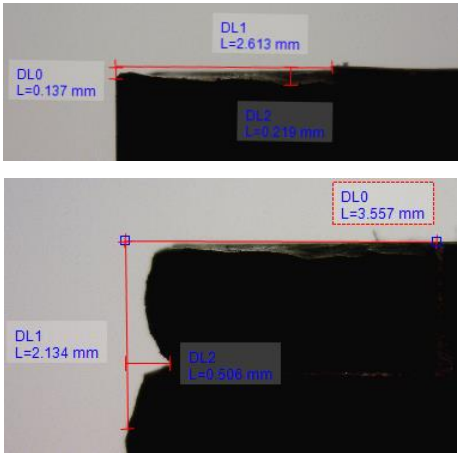
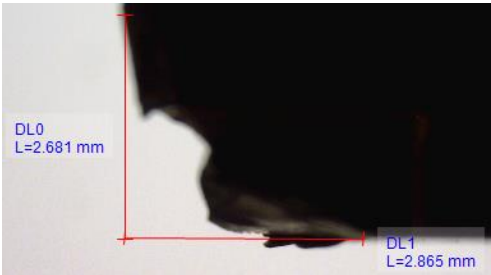
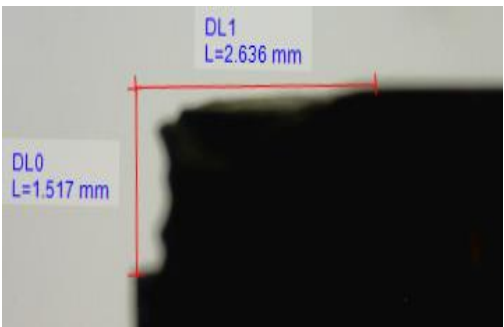
Slika 6.6.2. Usporedba ukupnog vremena rezanja do loma (iznimka pokus br. 1).

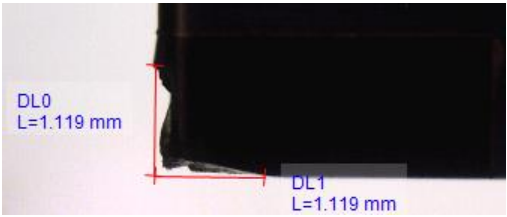
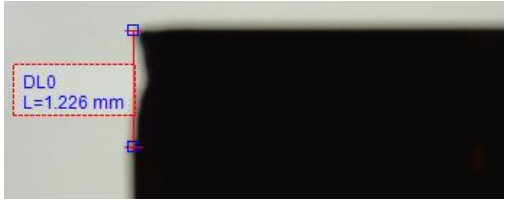
Rezna pločica od CBN-a ima oblik D kojeg karakterizira kut klina u iznosu od 55° . Porastom kuta klina se povećava čvrstoća rezne oštrice, ali se povećava i tendencija ka vibriranju te potrebna snaga rezanja. Također je bitno osigurati dovoljno krut sustav držača reznog alata s obzirom da je isti često najslabija karika u lancu krutosti obradnog stroja. Tablicom 6.6.1. prikazane su slike istrošenja reznog alata uz kratki opis.

Tablica 6.6.1. Slike trošenja i loma CBN reznih pločica pri dubini rezanja 0,3 mm.

Pokus broj	Slike trošenja alata	Opis
1		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 90 \text{ m/min}, f = 0,1 \text{ mm/okr}$</p> <p>Ukupno vrijeme rezanja: 56,54 min</p>

2		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 190 \text{ m/min}, f = 0,1 \text{ mm/okr}$</p> <p>Ukupno vrijeme rezanja: 9,33 min</p>
3		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 90 \text{ m/min}, f = 0,3 \text{ mm/okr}$</p> <p>Vrijeme do loma: 2,35 min</p> <p>Lom nastao zbog velikog posmaka.</p>
4		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 190 \text{ m/min}, f = 0,3 \text{ mm/okr}$</p> <p>Vrijeme do loma: 2,35 min</p> <p>Pojava kratera povećava prednji kut alata i smanjuje čvrstoću rezne oštrice [5].</p>
5		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 140 \text{ m/min}, f = 0,2 \text{ mm/okr}$</p> <p>Vrijeme do loma: 2,38 min</p>
6		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 140 \text{ m/min}, f = 0,2 \text{ mm/okr}$</p> <p>Vrijeme do loma: 2,25 min</p>

7		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 140 \text{ m/min}, f = 0,2 \text{ mm/okr}$</p> <p>Vrijeme do loma: 1,83 min</p>
8		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 140 \text{ m/min}, f = 0,2 \text{ mm/okr}$</p> <p>Vrijeme do loma: 2,13 min</p>
9		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 140 \text{ m/min}, f = 0,2 \text{ mm/okr}$</p> <p>Vrijeme do loma: 2,46 min</p> <p>Kombinirani utjecaj relativno visoke brzine rezanja i relativno velikog posmaka.</p>
10		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 69 \text{ m/min}, f = 0,2 \text{ mm/okr}$</p> <p>Vrijeme do loma: 1,4 min</p>
11		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 211 \text{ m/min}, f = 0,2 \text{ mm/okr}$</p> <p>Vrijeme do loma: 2,17 min</p> <p>Lom zbog velike brzine (kratersko trošenje) i velikog posmaka.</p>

12		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 140 \text{ m/min}, f = 0,06 \text{ mm/okr}$</p> <p>Vrijeme do loma: 13,82 min</p>
13		<p>Parametri obrade:</p> <p>$v_c = 140 \text{ m/min}, f = 0,34 \text{ mm/okr}$</p> <p>Vrijeme do loma: 0,26 min</p>

6.7. Povećanje produktivnosti

Unutar 4. poglavlja je tehnološki razrađena operacijska lista osovine HSK C-160. Operacijom 210 se izvodi fina obrada na CNC brusilici za okruglo brušenje čiji je zadatak brusiti $\Phi 94$ u preklopu od 0,03 mm relativno rotoru dok se preostalim vanjskim površinama ostavlja 0,1 mm dodatka po promjeru, a čela osovine je potrebno minimalno objeliniti. Trenutno, prema informacijama voditelja proizvodnje izvršenje operacije 210 zahtijeva otprilike 6 h rada te je cilj upravo na navedenoj operaciji povećati produktivnost uvođenjem tvrdog tokarenja.

Kako bi se izračunalo potrebno strojno vrijeme obrade potrebno je, iz konstrukcijskog nacrtu priloženog unutar dodatka C, odrediti put koji alat mora proći te njemu pripadajuću brzinu vrtnje. Parametri obrade tvrdog tokarenja biti će istovjetni onima u pokusu br. 1, odnosno; brzina rezanja u iznosu od 90 m/min i posmak od 0,1 mm/okr.

Zbog oblika pločice i držača je moguće operaciju 210 vršiti u jednom prolazu. Radi jednostavnosti izračuna pretpostavit će se korištenje konstantne kružne frekvencije, tj. broja okretaja u minuti, a time će strojno vrijeme biti duže no što bi to bio slučaj kada bi se održavala konstantna brzina rezanja. Međutim, upotrebom konstantne brzine rezanja se ostvaruju određene prednosti, istaknute u članku [33], poput optimiranja postojanosti alata ili produktivnosti te ostvarivanja konzistentnije kvalitete obrađene površine.

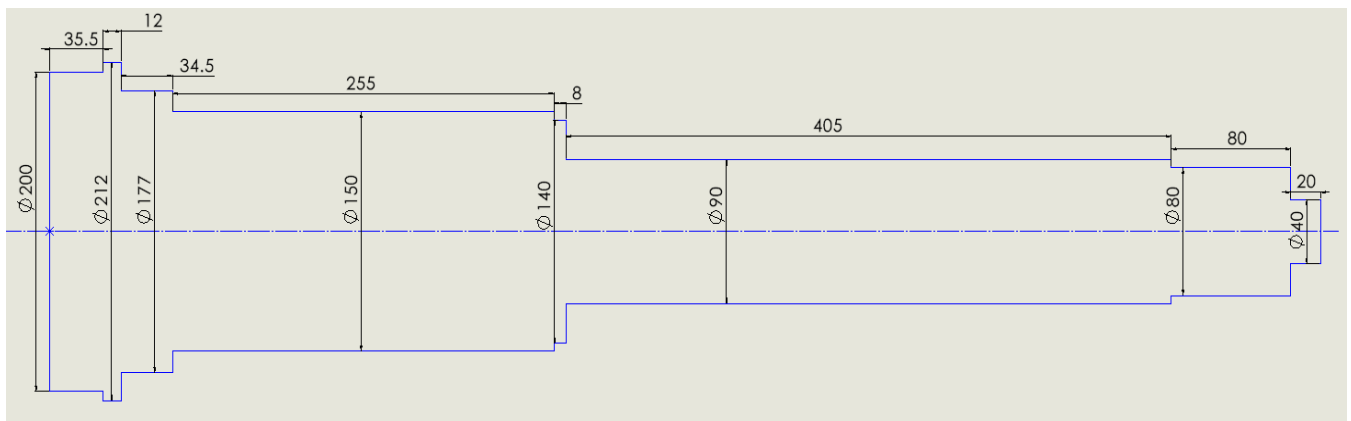
Ukupno strojno vrijeme obrade se sastoji od sume svih aksijalnih i sume svih radijalnih vremena. Strojno vrijeme prilikom aksijalnog (uzdužnog) tokarenja se računa prema jednadžbi (6.7.1.):

$$t_a = \frac{L \cdot i}{n \cdot f} = \frac{L \cdot D \cdot \pi \cdot i}{1000 \cdot v_c \cdot f} \quad [\text{min}] \quad (6.7.1.)$$

gdje je L uzdužni put alata [mm], i je broj prolaza alata, n je brzina vrtnje [okr/min], f je posmak [mm/okr] dok je v_c brzina rezanja [m/min]. Strojno vrijeme tijekom radijalnog (poprečnog) tokarenja se računa prema jednadžbi (6.7.2.):

$$t_r = \frac{L_r \cdot i}{n \cdot f} = \frac{D_{max} \cdot \pi \cdot (D_{max} - D_{min}) \cdot i}{2000 \cdot v_c \cdot f} \quad [\text{min}] \quad (6.7.2.)$$

pri čemu se brzina vrtnje n računa za brzinu rezanja 90 m/min i maksimalni promjer promatranog poprečnog tokarenja određenog segmenta D_{max} . Pojednostavljena skica konture koja se obrađuje prikazana je slikom 6.7.1.



Slika 6.7.1. Pojednostavljena skica konture tijekom operacije 210.

Strojno vrijeme obrade svih uzdužnih segmenata prikazane osovine iznosi:

$$t_a = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{n_i \cdot f} = \left(\frac{\pi}{1000 \cdot v_c \cdot f} \right) \cdot \sum_{i=1}^8 L_i \cdot D_i = \left(\frac{\pi}{1000 \cdot 90 \cdot 0,1} \right) \cdot$$

$$\cdot (20 \cdot 40 + 80 \cdot 80 + 405 \cdot 90 + 8 \cdot 140 + 255 \cdot 150 + 34,5 \cdot 177 + 12 \cdot 212 + 35,5 \cdot 200) = 34,477 \text{ min}$$

Strojno vrijeme obrade svih poprečnih segmenata prikazane osovine iznosi:

$$t_r = \sum_{i=1}^n \frac{D_{max} \cdot \pi \cdot (D_{max} - D_{min})}{2000 \cdot v_c \cdot f} = \left(\frac{\pi}{2000 \cdot v_c \cdot f} \right) \cdot \sum_{i=1}^9 D_{i,max} \cdot (D_{i,max} - D_{i,min})$$

$$t_r = \left(\frac{\pi}{2000 \cdot 90 \cdot 0,1} \right) \cdot$$

$$\cdot [40 \cdot (40 - 0) + 80 \cdot (80 - 40) + 90 \cdot (90 - 80) + 140 \cdot (140 - 90) + 150$$

$$\cdot (150 - 140) + 177 \cdot (177 - 150) + 212 \cdot (212 - 177) + 212 \cdot (212 - 200)$$

$$+ 200 \cdot (200 - 0)] = 12,033 \text{ min}$$

U konačnici se dobiva ukupno strojno vrijeme obrade:

$$t_{s,uk} = t_a + t_r = 34,477 + 12,033 = 46,51 \text{ min}$$

Unutar poduzeća HSTec d.o.o se trenutno na tjednoj bazi proizvodi 7 komada navedene osovine. Obzirom da operacija 210 trenutno zahtijeva otprilike 6 h rada, koristeći iznad navedene parametre rezanja i alat moguće je smanjiti obradno vrijeme za otprilike 5 h uvođenjem postupka tvrdog tokarenja. Dakle, na tjednoj bazi bi se oslobodilo 42 h rada na CNC brusilici za okruglo brušenje te bi se moralo zauzeti otprilike dodatnih 6 h rada na tokarilici za tvrdo tokarenje.

7. ZAKLJUČAK

Povećanje proizvodnosti je uvijek aktualni zahtjev svakog poduzeća koji se posebno ističe tijekom kriznih vremena kada je prisutan manjak proizvoda uzrokovan nestabilnošću tržišta. Tijekom povećanja proizvodnosti potrebno je pažljivo pratiti kvalitetu proizvoda. Unatoč povećanju proizvodnosti može se dogoditi da se poduzeće pronađe u lošijoj situaciji zbog znatnog pada kvalitete. Nakon prolaska kriznih vremena, veća proizvodnost i veća kvaliteta proizvodnje osiguravaju kompetitivnu prednost te olakšavaju ekonomski oporavak.

Rezultati eksperimentalne analize pokazuju kako je tijekom suhe obrade nisko-legirajućeg čelika za poboljšanje 20MnCr5 (DIN 1.7147) očvrstnutog na 68-70 HRC-a primjenom CBN reznog alata oznake P4-1 te parametara rezanja $v_c = 90$ m/min, $f = 0,1$ mm/okr i $a_p = 0,3$ mm, moguće postići srednje aritmetičko odstupanje profila Ra u rasponu od 0,497 – 0,987 μ m. Također je pokazano kako je isti alat nakon 56,54 min rezanja pri navedenim parametrima rezanja potrošio stražnju površinu (VB) u iznosu od 0,046 mm čime se ostvaruje izvrsna postojanost alata.

Izračun strojnog vremena obrade tijekom postupka tvrdog tokarenja s reznim alatom P4-1 pokazuje da je za priloženu osovinu potrebno vrijeme od 46,51 min u usporedbi s trenutnim postupkom brušenja za koje je potrebno uložiti 6 h rada. Dakle, dokazuje se višestruko povećanje proizvodnosti. Pripremno-završno vrijeme se također skraćuje u odnosu na ono postupka brušenja.

Osim povećanja proizvodnosti, postupak tvrdog tokarenja u usporedbi s brušenjem nudi smanjenje proizvodnih troškova zbog smanjenja potrošnje električne energije i eliminacije troškova zbrinjavanja SHIP-a. Time se poboljšava ekološka situacija i sigurnost radnika te se otvara mogućnost recikliranja strugotine što nije slučaj kod postupka brušenja. Nadalje, tvrdo tokarenje nudi veću fleksibilnost pa samim time i mogućnost automatizacije. Međutim, zbog visokog zahtjeva na krutost obradnog sustava i vrlo uskih tolerancija oblika, položaja i netočnosti okretanja potrebno je investirati u stroj za obradu šiljaka kako bi se osigurala dovoljna razina kvalitete tehnoloških baza.

LITERATURA

- [1] Cukor, Goran: "Obrada metala rezanjem", Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2021.
- [2] D. Patel, Vallabhbai: "Investigation of effect of cutting parameters and tool nose radius on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of AISI D2 steel with CBN tool", Gujarat technological university, 2018.
- [3] s interneta, <https://sandvik.coromant.com/>
- [4] Kelečić, Hrvoje: "Odabir reznih materijala za proces tokarenja", Diplomski rad, Tehnički fakultet, Rijeka, 2015.
- [5] Tadić, B.; Vukelić, Đ; Jurković, Z.: "Alati i pribori", Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2013.
- [6] Saurav, Goel, s interneta, https://www.researchgate.net/publication/340004650_The_Critical_Raw_Materials_in_Cutting_Tools_for_Machining_Applications_A_Review/figures?lo=1, 03.2023.
- [7] S. Pahade, Vishakha et al.: "A review paper on Vapour deposition coating", Internation Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol.3 – br.6, 2016.
- [8] s interneta, <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/materials/cutting-tool-materials>, 10.5.2023.
- [9] Nomura, Mikihiro et al.: "Preparation of thin Li₄SiO₄ membranes by using a CVD method", Shibaura Institute of Technology, Tokyo, 2013.
- [10] Korn, Derek: "Mind the tool center height when turning small diameters", s interneta, <https://www.mmsonline.com/articles/mind-the-tool-center-height-when-turning-small-diameters>, 19.2.2015.
- [11] s interneta, <https://henningerkg.de/what-is-centre-grinding-all-about-the-centre-grinding-technology?lang=en>, travanj 2023.
- [12] s interneta, https://zellerautomatik.ch/wp-content/uploads/2021/03/Flyer-Zentrumschleifmaschine-ZSM_En-1.pdf, ZSM-P-1000-SP150 letak, travanj 2023.

- [13] Walter Graf: "Center Hole Grinding", LinkedIn, 21.2.2022.
- [14] s interneta, <https://www.klein-zs.de/wp-content/uploads/2019/10/Katalog-Klein-2019-web.pdf>, travanj 2023.
- [15] Kocherovsky, Eugene: "HSK: Characteristics And Capabilites." Intelligent Concept, Michigan, 2005.
- [16] Travis: Bruce et. al.: "The Secrets of HSK", Cutting Tool Engineering, 1998.
- [17] Deutsches Institut fur Normung: "DIN 509 – Technical drawings – Undercuts – Types and dimensions", Berlin, prosinac 2006.
- [18] Marković: Ivan: "Sustav tolerancija oblika, orijentacije, položaja i netočnosti okretanja", FSB, Zagreb, 2017.
- [19] GDandT Basics, s interneta, <https://www.gdandtbasics.com/total-runout>, 13. prosinca 2014.
- [20] Mikac, Tonči: "Planiranje i upravljanje proizvodnjom", Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2016.
- [21] s interneta, <https://ambhe.com/20mncr5-steel/>, svibanj 2023.
- [22] P., Munoz-Escalona; Z., Cassier: "Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel", Wear, 218, 103-109, 15.06.1998.
- [23] K., Bouacha et al.: "Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool", International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 28, 349-361, 2010.
- [24] H., Aouici et al.: "Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization", Measurement, 45, 344-353, 2012.
- [25] J., Rech; A., Moisan: "Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43, 543-550, 2003.
- [26] G., Bartarya; S., Choudhury: "Effect of cutting parameters on cutting force and surface roughness during finish hard turning AISI52100 grade steel", Procedia CIRP, 1, 651-656, 2012.

- [27] M., Liu; J., Takagi; A. Tsukuda: “Effect of tool nose radius and tool wear on residual stress distribution in hard turning of bearing steel“, Journal of Materials Processing Technology, 150, 234-241, 2004.
- [28] J., Zhou; H., Walter; M., Andersson; J., Stahl: “Effect of chamfer angle on wear of PCBN cutting tool“, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43, 301-305, 2003.
- [29] H., Kishawy; M., Elbestawi: “Tool wear and surface integrity during high-speed turning of hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride tools“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 215, 755-767, 2001.
- [30] Y., Sahin: “Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels“, Journal of materials processing technology, 209, 3478-3489, 2009.
- [31] s interneta, https://www.secotools.com/article/p_02588150?language=en, rujan 2023.
- [32] s interneta, https://www.secotools.com/article/p_02825959?language=en, rujan 2023.
- [33] Isakov, Edmund: “Cutting time for facing“, s interneta, <https://www.ctemag.com/news/articles/cutting-time-facing>, rujan 2023.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. <i>Usporedba tehnološkog lanca tvrde obrade tradicionalnog (a) proizvodnog procesa i proizvodnog procesa s tvrdom obradom (b) [1].....</i>	1
Slika 2.1.1. <i>Tokarski alat s mehanički pričvršćenom reznom pločicom (lijevo), od brzoreznog čelika (sredina) i sa zalemljenom reznom pločicom (desno) [3].....</i>	3
Slika 2.1.2. <i>Rezni klin alata, površine i oštrice alata [1].....</i>	4
Slika 2.1.3. <i>Tehnološki koordinatni sustav prema ISO 3002 (lijevo) i ISO 13399 (desno) [1].....</i>	4
Slika 2.1.4. <i>Statički (tehnološki) kutovi tokarskog noža [1].....</i>	5
Slika 2.2.1. <i>Parametri obrade kod tokarenja.....</i>	7
Slika 2.3.1. <i>Glavni mehanizmi trošenja reznog alata [1,4].....</i>	8
Slika 2.3.2. <i>Parametri trošenja prednje i stražnje površine reznog alata prema normi ISO 3685 [1].....</i>	9
Slika 2.3.3. <i>Krivulja trošenja alata (VB) pri konstantnoj brzini i dubini rezanja te posmaku [1].....</i>	10
Slika 2.4.1. <i>Usporedba materijala reznih alata ovisno o njihovoj tvrdoći i žilavosti [4].....</i>	12
Slika 2.4.2. <i>Preporučene brzine rezanja i posmaci za navedene materijale [4].....</i>	12
Slika 2.4.3. <i>Udio postupaka obrade odvajanjem čestica (lijevo) i udio pojedinih vrsta reznih materijala (desno) u globalnom tržištu za 2018. [6].....</i>	13
Slika 2.4.4. <i>Područje primjene kubnog bor-nitrida (CBN) i polikristalnog dijamanta (PCD) [5]....</i>	15
Slika 2.5.1.1. <i>Konfiguracija procesa kemijskog nanošenja parne faze (CVD) [9].....</i>	17
Slika 3.1. <i>Vertikalni pomak reznog alata uz idealne preostale uvjete [10].....</i>	19
Slika 3.2. <i>Greške šiljastih provrta [11].....</i>	20
Slika 3.1.1. <i>Vertikalni stroj za brušenje centra s fiksnim izratkom [12].....</i>	21
Slika 3.1.2. <i>Gibanja obrade (lijevo) i uzorak površine kao rezultat navedenih gibanja (desno) [12]..</i>	21

Slika 3.1.3. <i>Jedinica za popravljanje forme brusnog kola [13]</i>	22
Slika 4.1. <i>Prikaz načina stezanja HSK sustava [16]</i>	25
Slika 4.2.1. <i>Prikaz prijelaznog oblika F shodno DIN 509 [17]</i>	27
Slika 4.2.1.1. <i>Prikaz toleriranog prostora cilindričnosti elementa [18]</i>	28
Slika 4.2.2.1. <i>Prikaz tolerancijskog područja koaksijalnosti [18]</i>	29
Slika 4.2.2.2. <i>Prikaz tolerancijskog područja simetričnosti [18]</i>	29
Slika 4.2.3.1. <i>Prikaz tolerancijskog područja radijalne netočnosti okretanja [19]</i>	30
Slika 4.2.3.2. <i>Prikaz mjerenja ukupne netočnosti okretanja [19]</i>	31
Slika 6.1. <i>Ulazni materijal eksperimenta uz prikaz već obrađenih šipki</i>	42
Slika 6.1.1. <i>Tokarilica CNC TU 360</i>	43
Slika 6.2.1.1. <i>Tehnički podaci držača SECO DDJNL-2525M15-M [31]</i>	44
Slika 6.2.1.2. <i>Držać rezne pločice SECO DDJNL 2525M15-M</i>	45
Slika 6.2.2.1. <i>Podaci o CBN reznom alatu [32]</i>	45
Slika 6.3.1. <i>Eksperimentalne točke pokusa</i>	47
Slika 6.3.2. <i>Plan pokusa i kodirane fizikalne vrijednosti pri konstantnoj dubini rezanja od 0,3 m</i>	48
Slika 6.4.1. <i>Mjerni uređaj SURFTEST SJ-210 japanskog proizvođača Mitutoyo i V oslonac</i>	49
Slika 6.5.1. <i>Grafički prikaz modela hrapavosti</i>	52
Slika 6.5.2. <i>Trend hrapavosti za; pokus br. 1 ($v_c = 90$ m/min, $f = 0,1$ mm/okr), pokus br. 2 ($v_c = 190$ m/min, $f = 0,1$ mm/okr) i pokus br. 12 ($v_c = 140$ m/min, $f = 0,06$ mm/okr)</i>	53
Slika 6.6.1. <i>Kalibracija digitalnog mikroskopa Dino-Lite</i>	54
Slika 6.6.2. <i>Usporedba ukupnog vremena rezanja do loma (iznimka pokus br. 1)</i>	55
Slika 6.7.1. <i>Pojednostavljena skica konture tijekom operacije 210</i>	59

POPIS TABLICA

Tablica 4.2.1.1. <i>Popis tolerancija oblika vretena.....</i>	28
Tablica 4.2.2.1. <i>Popis tolerancija položaja vretena.....</i>	30
Tablica 4.2.3.1. <i>Popis tolerancija netočnosti okretanja vretena.....</i>	31
Tablica 4.5.1. <i>Kemijski sastav 20MnCr5 (DIN) [21].....</i>	36
Tablica 6.4.1. <i>Rezultati mjerenja hrapavosti obrađene površine</i>	49
Tablica 6.5.1. <i>Rezultati prve višestruke regresijske analize</i>	50
Tablica 6.5.2. <i>Rezultati ponovljene višestruke regresijske analize</i>	51
Tablica 6.6.1. <i>Slike trošenja i loma CBN reznih pločica pri dubini rezanja 0,3 mm.....</i>	55

SAŽETAK

Ovaj se rad bavi problematikom postupka tvrdog tokarenja. Uvodno je opisan postupak tokarenja pri čemu je većina pažnje posvećena reznom alatu, odnosno materijalima reznog alata, prevlačenju reznih materijala i mehanizmima trošenja reznog alata. Nadalje su popisani rezultati raznih istraživanja koja opisuju utjecaj brojnih parametara na odzivne vrijednosti postupka tvrdog tokarenja poput kvalitete obrađene površine, sile rezanja i trošenja alata.

Svrha rada je razmotriti moguće povećanje proizvodnosti zamjenom tradicionalnog postupka brušenja s onim tvrdog tokarenja. Dana je tehnološka perspektiva trenutne proizvodnje vretena HSK C-160 pri čemu je objašnjena potreba za investicijom u specijalni stroj za obradu centra brušenjem. Također se izvršio eksperiment, na temelju opisanog centralnog kompozicijskog plana pokusa, mogućnosti obrade nisko-legirajućeg čelika za poboljšanje 20MnCr5 (DIN 1.7147) očvrnutog na 68-70 HRC-a pomoću CBN reznog alata.

Shodno rezultatima eksperimentalne analize pronađeni su parametri rezanja pri kojima je moguće povećati proizvodnost zamjenom postupka brušenja s onim tvrdog tokarenja. Utvrđeno je da bi se s tvrdim tokarenjem promatrana operacija mogla odvititi unutar 1 h pri čemu se trenutno na istu operaciju koja se izvodi brušenjem troši otprilike 6 h rada.

Ključne riječi: povećanje produktivnosti, tvrdo tokarenje, CBN, 20MnCr5, HSK, opisani centralni kompozicijski plan, srednje aritmetičko odstupanje profila, trošenje reznog alata.

SUMMARY

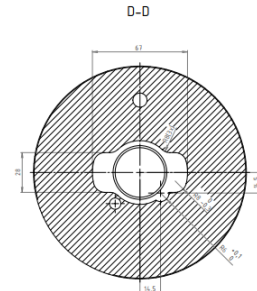
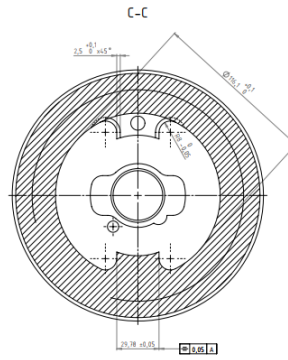
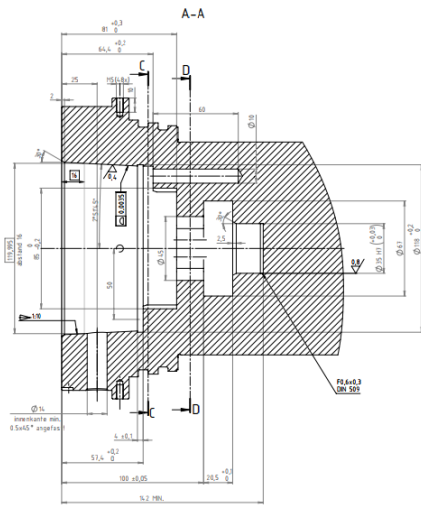
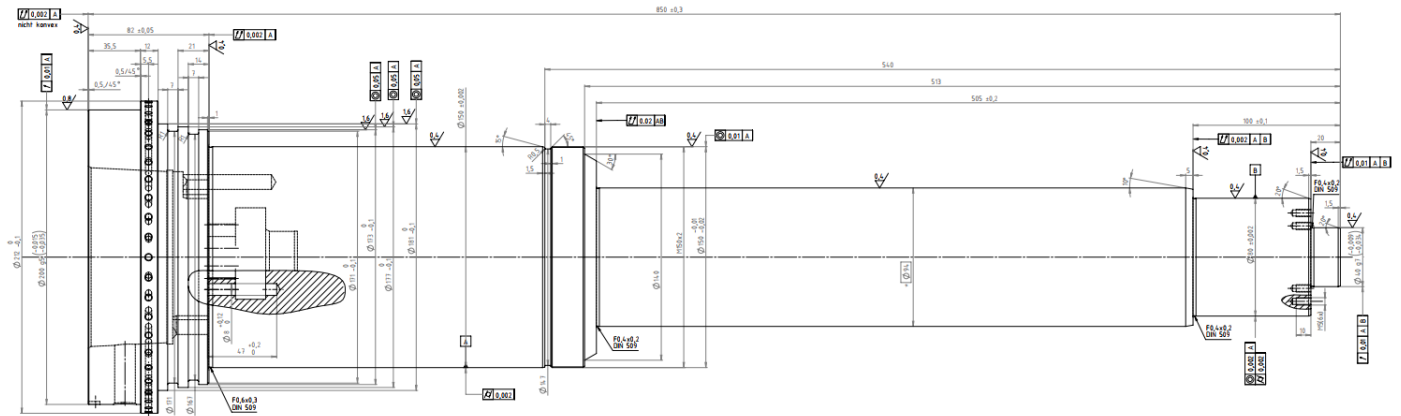
This master thesis is about the process of hard turning. Theoretical knowledge about the process of turning is given in introduction where the discussion was mostly about the cutting tool materials, deposition of coating on the cutting tool and mechanisms of wear induced on the cutting tool. Various results from many different experimental studies, whose goal was to find correlation between various cutting parameters and responses of the process of hard turning, are described.

Purpose of this thesis is to consider increasing of the production productivity by using the process of hard turning instead of traditional grinding. Technological perspective of HSK C-160 spindle is given alongside explanation of required investment into center-hole grinding machine. Experimental study of this thesis was conducted on the basis of circumscribed central composition design (C-CCD) in order to find the machinability of hard turning low-alloy steel (20MnCr5) hardened between 68 – 70 HRC with CBN cutting tool.

According to the results of experimental part of this thesis selection of cutting parameters that make the use of hard turning possible is given. Through the analysis of hard turning machining time in the given operation was concluded that it requires under 1 h. Considering that currently same operation requires 6 h of machining on CNC grinding machine, multiple increase of production productivity can be achieved.

Key words: increasing production productivity, hard turning, CBN, 20MnCr5, HSK, circumscribed central composite design, roughness average, cutting tool wear.

DODATAK A



Alle geschliffenen Flächen ausser der Rotoraufnahme Fläche, wurden nach dem Anziehen des Rotors und der Wuchtring bearbeitet

- * Wellendurchmesser soll 0,03mm grösser als der innere Rotordurchmesser, innere Wuchtrings und Wuchtring 94-142-28 durchmesser sein.

Gewinde weich
Einsatzgehärtet
HRC 62-63
Eht=0,4±0,2

3.2 (1.6 / 0.8 / 0.4)

Kanten gebrochen 0,2x45

27.04.2022

Rev.	Datum	Änderung	Entsch.	Datum	Urs.	File
1	14.01.2022	Neu				
2	27.04.2022	Änderung				

Werkstoff	16MnCr5	Datum	14.01.2022	Rechner		Geprüft		Normung	
Partikel	AD	Produkt		Welle	HSK-C160			Skizze	M 1:1
Programme		Zeichnungs-Nr.						Stücke	1
CAD	20017613				829721			Blatt	1

DODATAK B



OPERACIJSKI LIST

Prodajni nalog:

11780

1045629

SAP broj materijala:

20017613

Naziv:

Welle HSK-C160

Broj crteža:

829721

Količina:



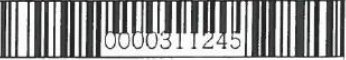



7 KOM

Sastavnica:











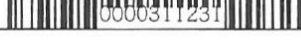
Redni broj:	SAP broj materijala:	Naziv:	Količina:	U oper.
0010	10006138	ČELIK ŠIPKA OKRUGLA 20MnCr5 FI220	1.784,93 KG	0010

Plan operacija:

0010	MR13000	Priprema proizvodnje	0000311234
Priprema proizvodnje			
0020	MR13001	Praćenje proizvodnje	0000311235
Praćenje proizvodnje			
0025	MR13100	Pila strojna	0000311236
Pila strojna Pilati sirovac 16MnCr5 Ø220x860 mm.			
0030	MR13404	Obradni centar CNC horizontalni 2 HAAS	0000311237
HAAS Minimalno objeliniti vanjski promjer na dužini 50 mm. Na suprotnoj strani poravnati čelo i zabušiti šiljak.			
0060	MR13204	Tokarski stroj SEIGER SLZ-570Ex2000	0000311238
CNC tokarenje Šropati za žarenje - dodatak 2 mm po strani.			
0070	MR13910	Žarenje - vanjska obrada	0000311239
Žarenje - vanjska usluga			
0100	MR13204	Tokarski stroj SEIGER SLZ-570Ex2000	0000311240
CNC tokarenje Tokariti s dodacima za brušenje. Toleriranim promjerima Ø200g5, Ø150, Ø94, Ø80 i Ø40g7 ostaviti 0,4-0,5 mm dodatka. Konus raditi u minusu 0,6-0,7 mm. Unutarnji promjer Ø35H7 raditi s 0,4-0,5 mm dodatka. Mjesta za navoje raditi s dodatkom 2 mm. Dužinske kote 850, 82, 505, 100 i 20 raditi s dodatkom 0,1 mm. Ostalo tokariti na mjeru.			
0110	MR13404	Obradni centar CNC horizontalni 2 HAAS	0000311241
HAAS Glodati HSK profi i čeonu bušnu sliku.			
0120	MR13407	Obradni centar CNC vert. LERINC PRO.E4	0000311242

Plan operacija:			
Lerinc Obodnu bušnu sliku raditi na mjeru.			
0140	MR13600	Čišćenje pozicija i predmontaža	 0000311245
Čišćenje pozicija i predmontaža Oboriti oštro, pročititi navoje.			
0150	MR13700	Kontrola	 0000311244
Kontrola Kontrolirati prije C+K. Zapisati tolerirane mjere.			
0160	MR13902	Cementacija+kaljenje - vanjska obrada	 0000311245
Cementacija i kaljenje - vanjska usluga Mjesta za navoje zaštititi pastom, urezane navoje zaštititi vijcima.			
0170	MR13200	Tokarski stroj klasičan	 0000311246
Tokarenje Skinuti dodatak s vanjskih navoja, očistiti izlaze navoja.			
0210	MR13503	Brusilica za okruglo brušenje CNC	 0000311247
Kružno brušenje Brusiti promjer Ø94 u preklopu 0,03 mm u odnosu na pobrušen rotor. Ostalo minimalno objeliti.			
0220	MR13701	Kontrola završna	 0000311248
Završna kontrola			

DODATAK C

		OPERACIJSKI LIST		Prodajni nalog: 11780	 1045628
SAP broj materijala: 20017612	Naziv: Rotor kpl	Broj crteža: 829720	Količina: 7 KOM		
Sastavnica:					
Redni broj:	SAP broj materijala:	Naziv:	Količina:	U oper.	
0010	20017613	Welle HSK-C160	7 KOM	0010	
0020	20017614	Wuchtring	14 KOM	0010	
0030	10023807	Rotor AC 200/310/8 (D555 0151 1_R1)	7 KOM	0010	
Plan operacija:					
0010	MR13000	Priprema proizvodnje	 0000311225		
Priprema proizvodnje					
0020	MR13001	Praćenje proizvodnje	 0000311226		
Praćenje proizvodnje					
0030	MR13200	Tokarski stroj klasičan	 0000311232		
Tokarenje rotora Obostrano tokariti rotor na dužinu 328. Tokariti unutarnju rupu na predmjeru za brušenje, u minusu 0,3 mm.					
0040	MR13503	Brusilica za okruglo brušenje CNC	 0000311233		
Okruglo brušenje Brusiti unutarnji promjer rotora na mjeru.					
0050	MR13700	Kontrola	 0000311227		
Kontrola Kontrolirati preklap između balansirnih prstena i rotora u odnosu na osovinu.					
0060	MR13601	Završna montaža	 0000311228		
Montaža Montirati balansirne prstene i rotor na osovinu.					
0070	MR13700	Kontrola	 0000311229		
Kontrola Kontrolirati dužinske mjere i zapisati ih.					
0080	MR13504	Brusilica za okr. brušenje precizna 1500	 0000311230		
Okruglo brušenje Završno brusiti Ø200g5, Ø150, Ø144,2 h6, Ø80, Ø40g7 te konus i Ø35H7 te dužinske kote.					
0090	MR13701	Kontrola završna	 0000311231		
Kontrola završna					