

Optimizacija parametara obrade na stroju za okruglo brušenje

Jeličić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:394034>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-07**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Jeličić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

OPTIMIZACIJA PARAMETARA OBRADE NA STROJU ZA OKRUGLO BRUŠENJE

Mentor:

Doc. dr. sc. Miho Klaić

Student:

Luka Jeličić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svojem najboljem prijatelju Mati te kolegama i prijateljima Borni i Mateju na pomoći i savjetima oko pojedinih poglavlja u izradi diplomskog rada. Isto tako zahvaljujem se inženjeru Stipi Kardumu, operateru Josipu Smiljaniću i tvrtki HSTec na pruženoj prilici za izradu diplomskog rada u njihovom pogonu. Također, zahvaljujem se svojoj obitelji na konstantnoj podršci i razumijevanju, posebice majci i konačno mentoru Mihi Klaiću na strpljenju i dostupnosti prilikom izrade diplomskog zadatka.

"If you hang around the barbershop long enough, sooner or later you're going to get a haircut"
- Denzel Washington.

Luka Jeličić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602 – 04 / 23 – 6 / 1
Ur. broj:	15 - 1703 - 23 -

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA JELIČIĆ**

Mat. br.: 0035212835

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija parametara obrade na stroju za okruglo brušenje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of cutting parameters on the circular grinding machine**

Opis zadatka:

Proces okruglog brušenja uvelike je zastupljen u završnoj strojnoj obradi cilindričnih obradaka s ciljem iznalaženja uskih tolerancija obrađivanog dijela. U različitim industrijama postoji široka upotreba procesa okruglog brušenja neovisno o tome radi li se o završnoj obradi šipki, klipova, osovina, vratila, ležajeva ili drugih sličnih vrsta dijelova. Okruglo brušenje kao takvo, najčešće se koristi s ciljem postizanja visokog stupnja preciznosti, dobre kvalitete površine te ponovljivosti obrade. Nedavno je u prostoru tvrtke CHIRON Croatia d.o.o. instaliran novi brusni obradni centar kojeg je potrebno uvesti u svakodnevnu proizvodnju. Shodno navedenom, cilj ovog rada je optimizacija parametara obrade stroja za okruglo brušenje različitih oblika obradaka kao i različitih vrsta materijala.

U radu je potrebno:

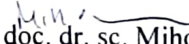
1. Navesti podjelu postupaka obrade odvajanjem čestica.
2. Objasniti proces okruglog brušenja i navesti njegovu primjenu.
3. Dati opću podjelu i navesti vrste brusnih ploča.
4. Napraviti pregled različitih vrsta kvaliteta obrađenih površina prilikom upotrebe različitih vrsta abrazivnih ploča.
5. Prikazati korelaciju između parametara obrade za različite stupnjeve kvalitete obrađene površine.


U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
19. siječnja 2023.

Rok predaje rada:
23. ožujka 2023.

Predvideni datum obrane:
27. ožujka do 31. ožujka 2023.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Miho Klaić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Obrada odvajanjem čestica	2
1.2. Brušenje kroz povijest.....	3
1.3. Osnovno o brušenju	5
2. PODJELA POSTUPAKA BRUŠENJA	6
2.1. Vanjsko okruglo brušenje	7
2.1.1. Okruglo vanjsko uzdužno brušenje.....	8
2.1.1. Radijalno vanjsko okruglo brušenje.....	9
2.1.2. Vanjsko okruglo brušenje bez šiljaka	9
2.2. Prednosti vanjskog okruglog brušenja	10
2.3. Ograničenja vanjskog okruglog brušenja.....	10
2.4. Unutarnje okruglo brušenje.....	11
2.4.1. Unutarnje okruglo uzdužno brušenje	11
2.4.2. Unutarnje okruglo poprečno brušenje.....	11
2.4.3. Unutarnje okruglo brušenje bez šiljaka.....	11
2.4.4. Planetarno brušenje	11
2.5. Problemi unutarnjeg okruglog brušenja	12
2.6. Primjena unutarnjeg i vanjskog okruglog brušenja.....	14
2.7. Brušenje ravnih površina	15
2.7.1. Obodno ravno brušenje	15
2.7.2. Ravno čeono brušenje	16
2.8. Kružno brušenje ekscentričnih oblika.....	16
2.9. Profilno brušenje	16
3. SILE REZANJA PRI OKRUGLOM BRUŠENJU.....	17
4. BRUSNE PLOČE.....	20
4.1. Abrazivi.....	21
4.2. Zrnatost i tvrdoća brusa.....	23
4.3. Poroznost i struktura brusa.....	25
4.4. Vezivo	26
4.5. Načini obrade rezne površine brusa	27
5. TEMPERATURE KOD OKRUGLOG BRUŠENJA.....	28
5.1. Mjerenje temperatura tijekom procesa brušenja	29
5.2. Eksperimentalno mjerenje temperature	30
6. KVALITETA OBRAĐENE POVRŠINE	32

6.1. Osnovni pojmovi.....	33
6.2. Stupnjevi i razredi hrapavosti površina.....	35
6.3. Metode mjerenja površinske hrapavosti	36
6.4. Tolerancije oblika	37
7. OPTIMIZACIJA STROJA ZA OKRUGLO BRUŠENJE	38
7.1. Poslovna kompanija HSTec	40
7.2. Problematika i ciljevi optimizacije	40
7.3. Osnovni parametri procesa.....	41
7.4. Pomoćne formule	42
7.5. Pristup problemu	43
7.6. Modeliranje sintakse	45
7.7. Generirani grafovi	49
7.8. Eksperimentalni dio	52
7.9. Rezultati ispitivanja.....	54
8. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	57
PRILOZI.....	60

POPIS SLIKA

Slika 1-1 Podjela obradnih procesa [2]	2
Slika 1-2 Podjela gibanja [2]	3
Slika 1-3 Primitivna brusilica [3]	3
Slika 1-4 Razvoj brušenja kroz povijest [5]	4
Slika 1-5 Shematski prikaz brušenja [7]	5
Slika 2-1 Postupci brušenja [2]	7
Slika 2-2 Vanjsko okruglo brušenje [9]	8
Slika 2-3 Okruglo vanjsko uzdužno brušenje [7]	8
Slika 2-4 Vanjsko okruglo brušenje bez šiljaka [12]	9
Slika 2-5 Konična površina [15]	13
Slika 2-6 Primjena cilindričnog brušenja [31]	14
Slika 2-7 Obodno brušenje [7]	15
Slika 2-8 Čeono brušenje pod kutem (lijevo) i okomito (desno) [7]	16
Slika 2-9 Profilno brušenje [20]	16
Slika 3-1 Sile brušenja 2D [21]	17
Slika 3-2 Prikaz sila brušenja pri obodnom klasičnom brušenju [19]	18
Slika 4-1 Sadržaj brusa [21]	20
Slika 4-2 Oblici brusnih ploča [32]	20
Slika 4-3 Općenita primjena abraziva [23]	21
Slika 4-4 Usporedna tvrdoća karbida i brusnih sirovina [19]	24
Slika 4-5 Stupanj tvrdoće [21]	24
Slika 4-6 Prikaz struktura brusa [19]	25
Slika 4-7 Struktura brusa [21]	25
Slika 4-8 Vrste veziva [21]	26
Slika 4-9 Načini obrade rezne površine brusa [21]	27
Slika 5-1 Obradak sa shemom mjernog postupka [26]	30
Slika 5-2 Temperaturni profil obratka [26]	31
Slika 6-1 Prijenosne karakteristike profila hrapavosti i valovitosti [29]	33
Slika 6-2 Razlučivanje P, W i R karakteristika profila [29]	33
Slika 6-3 Element profil površine [29]	34
Slika 6-4 Maksimalne vrijednosti na profilu hrapavosti [29]	34
Slika 6-5 Stupnjevi i razredi hrapavosti površina [29]	35
Slika 6-6 Tolerancije oblika [29]	37
Slika 7-1 Optimizacija procesa strojne obrade [1]	39
Slika 7-2 Preklopni faktor [23]	42
Slika 7-3 Matlab 1. dio koda	45
Slika 7-4 Matlab 2. dio koda	46
Slika 7-5 Matlab 3. dio koda	47
Slika 7-6 Matlab 4. dio koda	48
Slika 7-7 Brzina vrtnje brusnog kotača-unutarnje brušenje	49
Slika 7-8 Brzina vrtnje obratka-unutarnje brušenje	50
Slika 7-9 Brzine posmaka-unutarnje grubo brušenje	51
Slika 7-10 Brzine posmaka-unutarnje fino brušenje	51
Slika 7-11 Proces unutarnjeg okruglog brušenja	52
Slika 7-12 Ispitivanje kvalitete obrađivane površine	53

Slika 7-13 Rezultati ispitivanja	54
Slika 7-14 Provjera kvalitete obrađene površine.....	55
Slika 7-15 Trajektorija ticala.....	55

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

23032023 Prirubnica

POPIS TABLICA

Tablica 1 Zrnatost brusa [19]	23
Tablica 2 Vrijednosti posmaka [23]	43
Tablica 3 Omjer brzina [23]	43
Tablica 4 Režimi obrade	44
Tablica 5 Izlazni parametri.....	44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
v_c	ms^{-1}	Brzina rezanja
D_b	m	Promjer brusne ploče
n_b	s^{-1}	Frekvencija vrtnje brusne ploče
v_b	ms^{-1}	Brzina brušenja
v_o	ms^{-1}	Obodna brzina obratka
a_p	mm	Brzina brušenja
CNC		Computer numerical control
PCD		Polikristalni dijamant
CBN		Kubični bornitrid
HRC		Tvrdoća prema Rockwellu

SAŽETAK

Površinska hrapavost predstavlja vrlo važan aspekt u izradi i funkcionalnosti strojnih dijelova. Jedan od postupaka pomoću kojih se utječe na stupanj hrapavosti obrađivane površine je proces okruglog brušenja koji podrazumijeva odvajanje čestice s obratka korištenjem abrazivnih zrnaca. Cilj okruglog brušenja je povećanje nosivosti površine uz postizanje visokih razina geometrijske i dimenzijske točnosti u kvaliteti obrađivane površine. Adekvatno obrađena površina može poboljšati izgled proizvoda, njegovu otpornost na trošenje, smanjiti trenje i otpor te omogućiti bolje prijanjanje premaza ili maziva.

Cilj ovog rada je optimizacija režima obrade brusnog obradnog centra za okruglo brušenje naziva Kellenberger 1000 te olakšani odabir režima obrade za različite vrste materijala kako bi se udovoljili strogi zahtjevi na kvalitetu obrađivanih dijelova i njihove tolerancije oblika.

Ključne riječi: Površinska hrapavost, okruglo brušenje, optimizacija

SUMMARY

Surface roughness is a very important aspect in the production and functionality of machine parts. One of the processes used to influence the degree of roughness of the treated surface is the process of cylindrical grinding, which implies the separation of the particle from the workpiece by abrasive grains. The goal of cylindrical grinding is to increase the load capacity of the surface while achieving a high level of geometric and dimensional accuracy in the quality of the treated surface. An adequately processed surface can improve the appearance of the product, its resistance to wear, reduce friction and resistance, and enable better adhesion of coatings or lubricants.

The aim of this work is to optimize the processing parameters of the Kellenberger 1000 grinding machining center for cylindrical grinding and facilitate the selection of processing parameters for different types of materials in order to meet the stricter requirements on the quality of the processed parts and their shape tolerance.

Key words: Surface roughness, cylindrical grinding, optimization

1. UVOD

Postupci obrade odvajanjem čestica spadaju u industrijske procese u kojima se obradci oblikuju uklanjanjem neželjenog materijala čime se dolazi do gotovog stanja proizvoda. Tradicionalni procesi obrade nastajanjem odvojene čestice jesu tokarenje, glodanje, bušenje te piljenje. U ovim procesima čestica se odstranjuje kao posljedica plastične deformacije, a jedinstvena fizikalna analiza može se objasniti korištenjem osnovnog modela ortogonalnog rezanja. Povezani procesi obrade odvajanjem čestica uključuju i abrazivne procese poput brušenja i honanja, ali i moderne nekonvencionalne metode poput elektroerozije, elektrokemijske obrade te obrade laserom ili vodenim mlazom. U abrazivnim procesima, metal se odstranjuje u obliku malih čestica nastalih kombinacijom mehanizama rezanja i trenja. Abrazivna površina pritišće površinu obratka što u konačnici rezultira odvajanjem čestica i s radnog komada i s pripadajućeg abraziva. Brušenje kao takvo, spada u iznimno korištene procese u industriji, a temeljna svrha mu je izrada dijelova koji imaju uske tolerancije na kvalitetu obrađene površine u završnoj fazi izrade proizvoda.

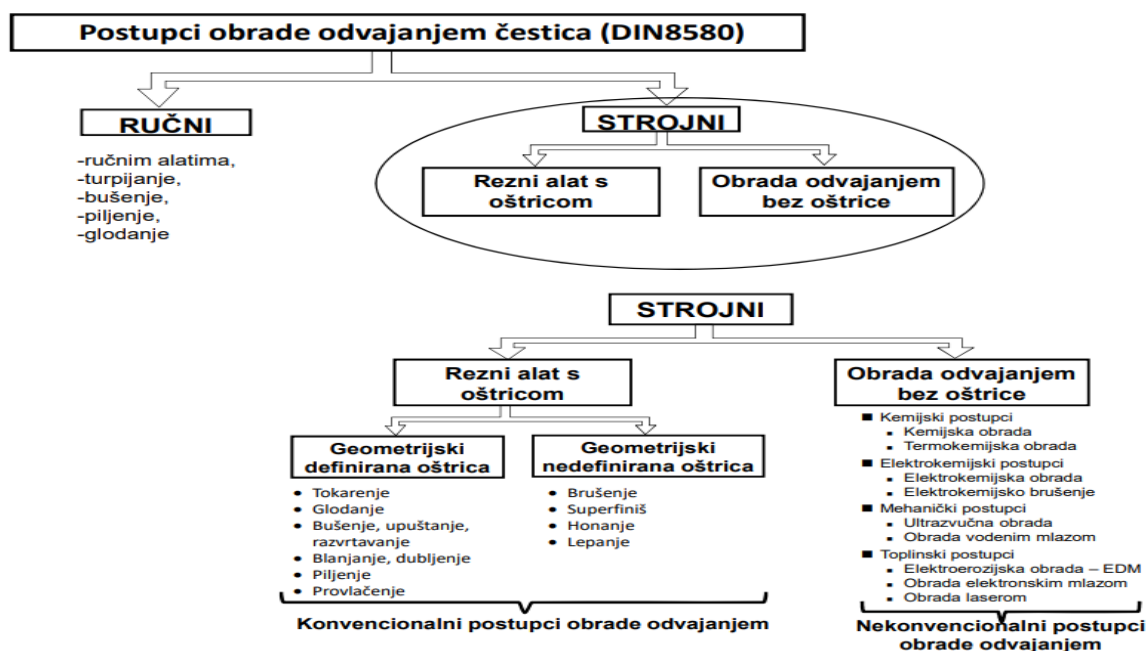
Glavna razlika između tradicionalnih metoda strojne obrade gdje nastaje odvojena čestica kao rezultat procesa te brušenja leži u karakteristikama reznog materijala, odnosno u njegovoj geometriji. Tradicionalne metode podrazumijevaju rezne oštrice definirane geometrije, dok brušenje karakterizira nedefinirana geometrija reznog materijala gdje su zrna nepravilnog oblika (povezana pripadajućim vezivom) na abrazivnoj površini raspoređena nasumično i bez reda. Također, brzina rezanja je vrlo visoka dok je posmak malen u usporedbi s procesima gdje je rezna oštrica geometrijski definirana. Odvajanje materijala pri brušenju događa se na manjoj razini nego što se to događa u konvencionalnim postupcima.

Okruglo brušenje koje je tema ovog projekta, skida materijal s vanjskih i unutarnjih cilindričnih površina rotacijom radnog komada i brusne ploče u suprotnim smjerovima pri čemu je obradak najčešće stegnut u središtima svoje osi. Postupak se najčešće koristi u radu s materijalima koji su tvrdi, lomljivi ili zahtijevaju visoki stupanj kvalitete obrađene površine. Brusna ploča tada rotira pri znatno većim brzinama u odnosu na radni komad [1]. U nastavku će se поблише objasniti sam proces okruglog brušenja te će se dati na uvid njegova široka primjena u industriji.

1.1. Obrada odvajanjem čestica

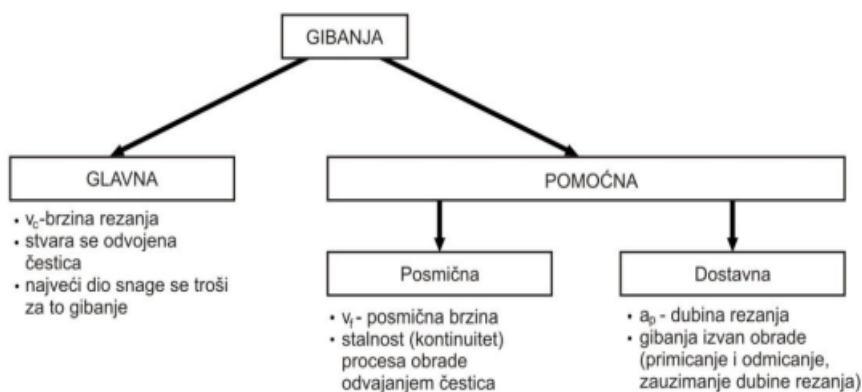
Procesi obrade odvajanjem čestica spadaju u najraširenije i najprimjenjenije postupke oblikovanja materijala u industriji. Baziraju se na ideji uzrokovanja malih lomova na materijalu koji se obrađuje s ciljem oblikovanja konačnog svrsishodnog proizvoda. Uobičajeni procesi obrade odvajanjem čestica su tokarenje, glodanje, blanjanje, piljenje, provlačenje, bušenje i brušenje. Iako stvarni strojevi, alati i procesi rezanja izgledaju vrlo različiti jedan od drugog, osnovni mehanizam za izazivanje loma može se objasniti kroz jednostavnim modelom ortogonalnog rezanja. U svim procesima strojne obrade veličina radnog komada je ona veličina koja će biti dostatna za dobivanje finalnog proizvoda nakon završetka strojne obrade. Osnovni cilj je skinuti višak materijala te u konačnici dobiti gotov funkcionalan proizvod. Postupak skidanja materijala odvajanjem čestica najčešće se odvija u nekoliko koraka, a u svakom koraku radni komad se pričvršćuje na radni stol ili dio alatnog stroja te ovisno o postupku rotira ili miruje dok se stegnutom komadu prilazi alatom s reznom oštricom. Uobičajeni dijelovi strojeva podrazumijevaju dijelove poput škripaca, stezaljki, stezne glave s 3 ili 4 čeljusti itd. Ovisno o tipu stroja s kojim se radi, obrađivani komad ako nema numerički upravljanu os kojom bi se mogao zakretati, zahtijeva više operacija stezanja kako bi se mogao dovesti u finalno stanje. Svi prethodno nabrojani dijelovi čine sustav koji je potreban kako bi se mogao odvititi pojedini postupak obrade odvajanjem čestica.

Prema normi DIN8580 postupci obrade odvajanjem čestica u grupe koja prikazuje slika 1-1.



Slika 1-1 Podjela obradnih procesa [2]

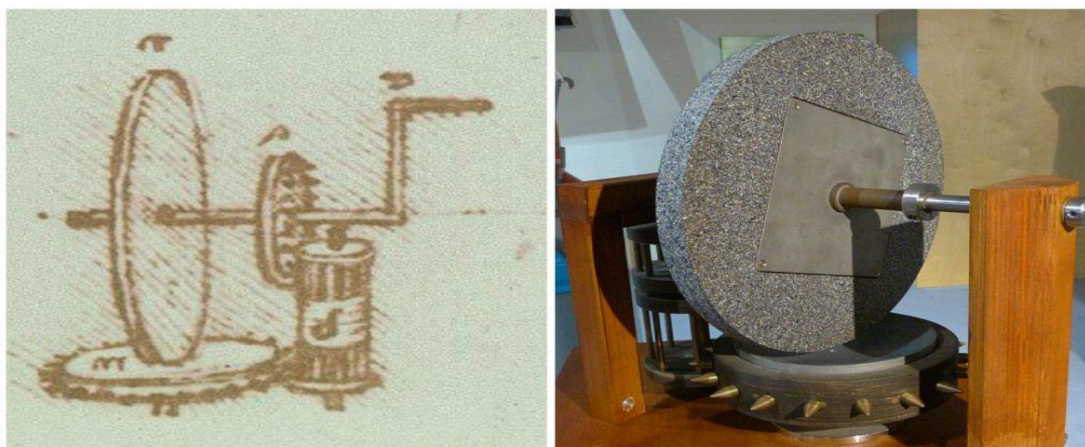
Isto tako, kada se govori o obradi odvajanjem čestica vrlo je važno spomenuti vrste gibanja na obradnom stroju pomoću kojih se definiraju parametri obrade. Slika 1-2 daje zoran prikaz različitih vrsta gibanja i parametara koji proizlaze iz njih.



Slika 1-2 Podjela gibanja [2]

1.2. Brušenje kroz povijest

Brušenje posjeduje dugu povijest koja seže čak do 15. stoljeća, vremena kada je brušenje bilo ručni rad koji se izvodio s prirodnim pijeskom. Neki dokumenti ukazuju na to da je i sam Leonardo Da Vinci radio na razradi tehnologije za brušenje. Da Vincijeva primitivna brusilica, prikazana na slici 1-3, izrodila se zbog njegove potrebe za fino brušenim konveksnim lećama koje bi se kasnije ugradile kao standardni dio njegovog teleskopa čiji se izum ipak pripisuje drugom velikom renesansnom izumitelju, Galileo Galileiu [3].



Slika 1-3 Primitivna brusilica [3]

Tek će se 1850-ih godina uvesti početni koncept stroja za brušenje, brusilice. Takav stroj je i dalje zahtijevao intenzivnu ljudsku uključenost predstavljajući tako poluautomatizirani

postupak. Uz sve veću potražnju za preciznim dijelovima, naročito od 1900. godine pa nadalje, višeosni strojevi su se počeli naglo razvijati s ciljem postizanja visoke točnosti izrađenih dijelova. Međutim, ubrzo se shvatilo kako se zamišljena obrada nije uvijek mogla osigurati zbog česte pojave površinskih pukotina uslijed čvrstog kontakta između krutih alata i obratka. Ovaj problem posebno je bio istaknut kod brušenja materijala poput stakla i keramike gdje je velika sila brušenja postupno deformirala stroj. Dolaskom industrijskih robotskih sustava prikazanih na slici 1-4, potpuna automatizacija na složenim dijelovima mogla se početi primjenjivati u praksi. Nažalost, degradacija površine obratka nastupala je kao rezultat korištenja krutih alata kao što su bile brusne ploče na strojevima niske krutosti. Za rješavanje ovakvih i sličnih problema pristupilo se učinkovitim rješenju konstruiranja sustava s pojedinim stupnjevima slobode umjesto potpuno ograničenih gibanja stroja.

Između ostalog, počeli su se primjenjivati elastični alati s dovoljnom popustljivošću usklađujući se tako s površinom složenih komponenti, izbjegavajući površinska oštećenja izazvana lokaliziranim tvrdim kontaktom. Brušenje osjetljivih geometrija počelo se ostvarivati kroz usklađenost abraziva i sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje [5][5]. Slika 1-4 prikazuje razvoj procesa brušenja kroz povijest.



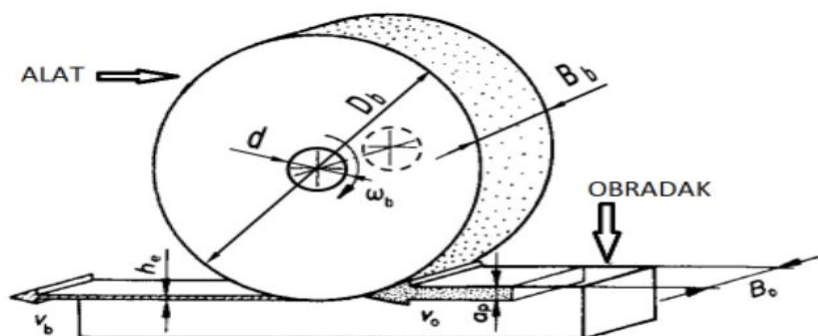
Slika 1-4 Razvoj brušenja kroz povijest [5]

Prema [6], moderna tehnika brušenja počinje Achensonovim pronalaskom silicijeva karbida 1891. godine. Time, a i proizvodnjom umjetnog korunda razvila se tehnika proizvodnje bruseva, a paralelno s tim i brusilica s elementima i sklopovima alatnih strojeva koji su do tada bili razvijeni. Koncept dubokog brušenja pod nazivom Creep-Feed Grinding razvijen je 1956. godine. Prvi njemački prototip brusilice na kojoj se primjenjivalo duboko brušenje prikazan je 1958. godine, a 1963. godine primjenjivale su se u industriji prve brusilice za duboko brušenje. Budući da je tada tehnološki proces dubokog brušenja bio gotovo nepoznat, postojala su različita mišljenja. Međutim, danas je proces dubokog brušenja tako poboljšan da predstavlja najbolje uvedeni postupak u izradi preciznih dijelova, kao što su lopatice turbina, rotor pumpi, dijelovi motornih vozila itd.

1.3. Osnovno o brušenju

Brušenje kao što je spomenuto u uvodu, spada u postupke obrade odvajanjem čestica s oštricom nedefinirane geometrije. Brus, kao alat za brušenje je višerezan, sastavljen od mnogo međusobno spojenih brusnih zrnaca od prirodnog ili umjetnog brusnog materijala. Brušenjem se odvajaju čestice veoma male debljine, jer se u zahvatu istovremeno nalazi mnogo oštrica. Ovisno o puno faktora koji uvjetuju proces brušenja, odvajanje čestica vrši se rezanjem i trenjem. Prednji kut kod brusa može često biti i negativnog iznosa, čak do vrijednosti od -80° .

Za razliku od ostalih postupaka odvajanja čestica, kod brušenja se primjenjuju veoma velike obodne brzine rezne površine brusa od 15 do 35 m/s, a u specijalnim slučajevima i sa specijalnim brusevima i do 230 m/s. Poboljšanje brušenja, brusilica i brusova ima ekonomski karakter, jer se ne traži samo visoka točnost i kvaliteta brušene površine, već i visoki učinak brušenja [6]. Brušenje se kao proces koristi u završnoj fazi izrade proizvoda s ciljem postizanja visoke kvalitete površine kao i visoke točnosti oblika i dimenzija obrađivanog komada. Brušenju su izložene tvrde površine ravnog, cilindričnog ili profilnog oblika s dodatkom materijala za završnu obradu od 0,1 do 0,2 mm. Slika 1-5 prikazuje shematski prikaz procesa brušenja kao i neke od parametara bitnih u definiranju samog procesa koji će se razraditi u narednim poglavljima. Glavno gibanje kod brušenja odnosi se na rotaciju alata gdje je brzina rezanja definirana formulom $v_c = D_b \cdot \pi \cdot n_b$ prema kojoj D_b predstavlja promjer brusne ploče, a n_b njenu brzinu vrtnje. Posmično gibanje se odnosi na obradak i ono može biti pravocrtno, kružno i kombinirano. Parametar a_p predstavlja dubinu brušenja [7]. Alatni strojevi na kojima se izvodi postupak brušenja nazivaju se brusilice pri čemu je, kao što je već spomenuto, glavno gibanje kružno, kontinuirano te pridruženo alatu, dok je posmično gibanje vezano uz obradak te ovisi o vrsti brušenja.



Slika 1-5 Shematski prikaz brušenja [7]

2. PODJELA POSTUPAKA BRUŠENJA

Najjednostavnija podjela procesa brušenja odnosi se na ručno i strojno brušenje pri čemu je ručno brušenje u većem dijelu zastupljeno kod sitnih popravaka strojnih dijelova za raznolike upotrebe, dok se strojno brušenje najviše koristi u industriji prilikom završne obrade strojnog dijela koji ima zahtjev na kvalitetu obrađene površine zbog svoje funkcionalnosti.

Nadalje, prema klasifikaciji postupaka brušenja razlikuje se brušenje [2]:

Ovisno od oblika površine koja se obrađuje:

- Brušenje okruglih vanjskih površina
- Brušenje okruglih unutarnjih površina
- Brušenje ravnih površina
- Brušenje složenih površina

Ovisno o položaju rezne površine brusa prema obratku:

- Obodno brušenje – brušenje obodom brusa
- Stranično ili čeonno brušenje – brušenje stranicom brusa
- Profilno brušenje – brušenje površinom složenog oblika

Prema pravcu pomoćnog gibanja:

- Uzdužno
- Poprečno

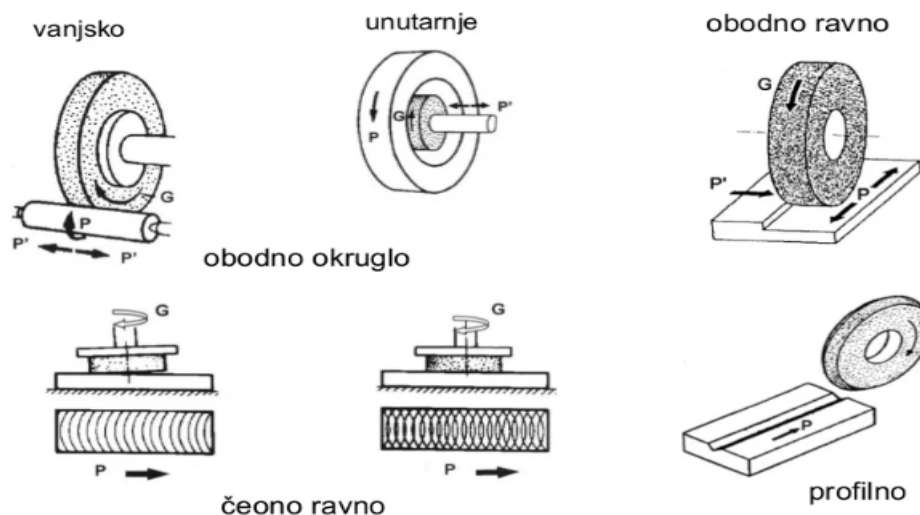
Prema kinematici postupka:

- Istosmjerno
- Protusmjerno

Prema učinu:

- Klasično ($v_b < 35 \text{ ms}^{-1}$, $v_o < 1,5 \text{ ms}^{-1}$, $a_p < 0,12 \text{ mm}$)
- Učinsko:
 - Duboko ($v_b < 35 \text{ ms}^{-1}$, $v_o < 0,05 \text{ ms}^{-1}$, $a_p < 30 \text{ mm}$)
 - Povećanim brzinama ($v_b < 120 \text{ ms}^{-1}$, $v_o < 2,5 \text{ ms}^{-1}$, $a_p < 0,2 \text{ mm}$)
- Visokoučinsko ($v_b < 120 \text{ ms}^{-1}$, $v_o < 0,03 \text{ ms}^{-1}$, $a_p < 30 \text{ mm}$) [6]

Slika 2-1 prikazuje shematske prikaze navedenih postupaka brušenja.



Slika 2-1 Postupci brušenja [2]

2.1. Vanjsko okruglo brušenje

Iako naziv sugerira da je jedini uvjet da se radi o brušenju kojemu je svrha oblikovanje samo vanjskog promjera obrađivanog dijela, to ovdje nije slučaj. Kao podvrsta kružnog brušenja, ono mora ispunjavati još jedan uvjet, tj. predmet koji se brusi mora imati središnju os rotacije. Pritom se razlikuju dvije vrste vanjskog okruglog brušenja, ono koje se odvija na obratku koji je sa svake strane uležišten u središtu rotacije te ono kod kojeg obradak nije stegnut između dva šiljka, već je samo postavljen na potpornu ploču i umetnut između dvije brusne ploče. Pritom valja istaknuti da središta nisu neke hipotetske točke na dijelu već su to krajnje točke koje drže predmet u geometrijskom središtu, pomiču ga u smjeru rotacije i na taj način omogućuju brušenje. Radni komad rotira oko te fiksne, prave središnje osi. U isto vrijeme, brusna ploča se okreće u istom smjeru kao i predmet. U trenutku kontakta, površine se kreću u suprotnim smjerovima. Na taj način omogućen je glatkiji rad koji istovremeno smanjuje mogućnost zaglavlivanja ploče i obratka.

Okruglo vanjsko brušenje najčešće se koristi za završnu obradu cilindričnih površina pri čemu se postižu visoke točnosti kvalitete obrađene površine. Pri tome je moguće postići tolerancije od $\pm 13 \mu\text{m}$ do $\pm 3 \mu\text{m}$ za promjer, tolerancije kružnosti od $\pm 2,5 \mu\text{m}$ do $\pm 0,25 \mu\text{m}$ i kvalitetu završne obrade od $8 \mu\text{m}$ do $32 \mu\text{m}$ iako svaka od ovih tolerancija može se razlikovati za različite vrste obrađivanog materijala [8]. Slika 2-2 prikazuje proces vanjskog okruglog brušenja.

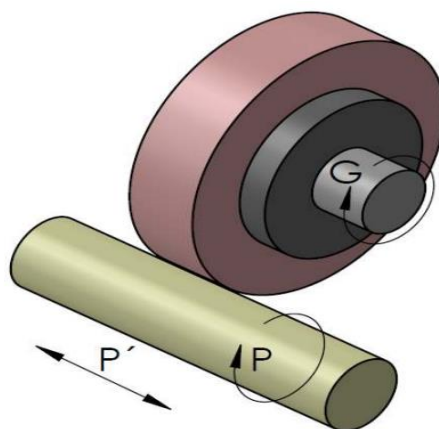


Slika 2-2 Vanjsko okruglo brušenje [9]

Vanjsko okruglo brušenje prema vrsti može biti uzdužno, radijalno (zasječno) i brušenje bez šiljaka. U nastavku će se objasniti glavna i posmična gibanja svakog od navedenih postupaka.

2.1.1. Okruglo vanjsko uzdužno brušenje

Kod ove vrste brušenja glavno kružno gibanje obavlja alat, dok se posmično gibanje sastoji od kružnog gibanja koje obavlja obradak te uzdužnog koje mogu obavljati ili alat ili obradak. Pri tome je alat kraći od obratka koji se brusi [7].



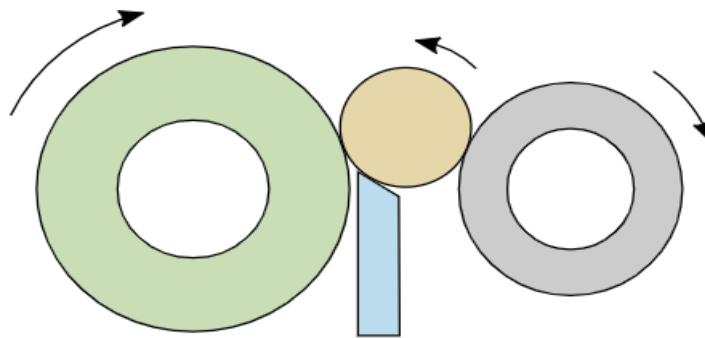
Slika 2-3 Okruglo vanjsko uzdužno brušenje [7]

2.1.1. Radijalno vanjsko okruglo brušenje

U ovom slučaju glavno i posmično gibanje obavlja alat. Pri tome je gibanje koje obavlja alat kružno, dok je posmično gibanje radijalno, tj. prema obratku. Cilj radijalnog vanjskog okruglog brušenja je uklanjanje materijala s vanjske površine izratka kako bi se postigla željena veličina, oblik i završna obrada površine.

2.1.2. Vanjsko okruglo brušenje bez šiljaka

Kod ove vrste okruglog brušenja obradak nije stegnut između šiljaka, već je postavljen na potpurnu ploču te umetnut između dvije brusne ploče. Jedna od tih ploča je glavna te ima veliku obodnu brzinu, dok je druga regulacijska. Regulacijska ploča ima malu obodnu brzinu i služi za kočenje i regulaciju brzine vrtnje obratka do željene brzine. Postupak može biti uzdužni i radijalni [7].



Slika 2-4 Vanjsko okruglo brušenje bez šiljaka [12]

2.2. Prednosti vanjskog okruglog brušenja

Za razliku od običnog kružnog brušenja kojemu obradak ne treba imati središnju os rotacije, vanjsko okruglo brušenje može ukloniti neprihvatljivu geometriju i vratiti obrađivanom dijelu inicijalno zahtijevanu kružnost čime je direktno objašnjena prednost ovog postupka, a to je mogućnost pronalaska osi objekta pomoću kojeg se obradom, lako dolazi do željene krutosti obratka. Obnavljanje ili stvaranje zaobljenosti, rješavanje problema kao što je ovalnost, nedostatak kružnosti te drugi problemi koji se tiču same kružnosti obrađivanog dijela jesu situacije u kojima se pristupa ovom procesu kao rješenje problema. Još jedna prednost ovog postupka leži u tehnici samog izvođenja i manifestira se tako da će se brusna ploča i obradak prije kontakta rotirati u istom smjeru, a nakon kontakta smjerovi vrtnje će biti suprotni. Time će se smanjiti mogućnost zaglavljivanja i omogućiti glatka rotacija oba predmeta što će u konačnici spriječiti da brusni kotač napravi značajnije rezove unutar materijala. Brusilice za vanjsko okruglo brušenje dolaze u nekoliko različitih konfiguracija kako bi se najbolje prilagodile potrebama pojedinog projekta. Na primjer, može se koristiti model računalno upravljanoj stroja kao i običnog ručnog stroja kojemu radnik zadaje sve potrebne koordinate. Klasične brusilice su nešto pristupačnije kod obrade pozicija koje su zahtjevnije i kod manjih serija obrade, dok se CNC brusilice koriste kod većih serija. Navedene prednosti za vanjsko okruglo brušenje vrijede isto tako i za unutarnje [10].

2.3. Ograničenja vanjskog okruglog brušenja

Kod vanjskog okruglog brušenja postoje ograničenja na veličinu obrađivanog obradka. Razlog tome leži u činjenici da je dijelovima manjima od 6.35 mm u promjeru iznimno teško pronaći os rotacije obratka. Upravo je problem pronalaska središta na vrlo malim dijelovima doveo do razvoja okruglog brušenja kao takvog [8]. Nadalje, brusilica za okruglo brušenje nema instrument koji bi osigurao preciznost relativnog položaja (koaksijalnost, okomitost, itd.) između površine za brušenje i površine koja se ne brusi. Idući problem koji se navodi u literaturi, a tiče se procesa okruglog brušenja jest promjena različitog pribora na stroju potrebnog za brušenje. Važno je promijeniti dubinu brušenja, duljinu brušenja te povezane granice ciklusa svaki put kad se zamijene obradci različitih širina. S time na umu, ovaj proces nije prikladan za male serije [11].

2.4. Unutarnje okruglo brušenje

Unutarnje okruglo brušenje se koristi kod dobivanja unutarnjih cilindričnih površina pritom koristeći brusne ploče malih promjera. Može se koristiti za izradu ravnih, suženih, slijepih ili prolaznih provrta, provrta s više promjera, kontura te ravnih presjeka [1]. Po vrsti može biti uzdužno, poprečno, planetarno i brušenje bez šiljaka[7]. Svi uvjeti ranije nabrojani kod vanjskog okruglog brušenja, moraju biti zadovoljeni i kod unutarnjeg okruglog brušenja.

2.4.1. Unutarnje okruglo uzdužno brušenje

Okruglo unutarnje uzdužno brušenje je postupak kod kojeg je glavno gibanje kružno kontinuirana rotacija brusa, dok posmično gibanje vrši i alat i obradak istvremeno. Pri tome je kombinacija posmičnih gibanja potrebna zbog postizanja geometrije obratka kao i zbog manje širine brusa od obratka kojeg se brusi.

2.4.2. Unutarnje okruglo poprečno brušenje

Kao i kod svih postupaka brušenja glavno gibanje je kružno kontinuirana rotacija brusa dok se kod posmičnog gibanja gibaju i alat i obradak. Ukoliko se javljaju veće dimenzije obradaka s potrebom poprečnog brušenja također se može primijeniti i postupak planetarnog brušenja.

2.4.3. Unutarnje okruglo brušenje bez šiljaka

Unutarnje okruglo brušenje bez šiljaka podrazumijeva postavljanje obratka između potpornih valjaka s brusnom pločom umetnutom unutar obratka. Glavno gibanje odvija se na brusnom kotaču, dok posmično gibanje može vršiti alat ili obradak. Svoju primjenu nailazi kod velikih i teških cilindričnih obradaka koje je nepraktično upeti u steznu čeljust.

2.4.4. Planetarno brušenje

Planetarno unutarnje brušenje koristi se kod obradaka većih dimenzija i mase. Postupak može biti radijalan ili aksijalan (poprečni ili uzdužni). Alat obavlja glavno kružno gibanje, ali uz glavno gibanje alatu je pridruženo i rotirajuće posmično gibanje odvijano po nekoj putanji. Opisanim postupkom obrađuju se obratci velikih dimenzija dok je velika prednost nepostojanje dodatnih gibanja obratka.

2.5. Problemi unutarnjeg okruglog brušenja

Navedeni postupak najčešće spada u najsloženije procese brušenja upravo zbog činjenice otežanog pristupa alata obrađivanom dijelu uslijed njegove zatvorene geometrije. Nadalje, razlozi za poteškoće u operacijama unutarnjeg brušenja su veliki kontaktni lukovi između brusne ploče i provrta izratka u području kontakta te ponašanje vibracija koje je teško kontrolirati, a uvelike utječu na kvalitetu obrađene unutarnje površine radnog komada [14].

Također, često se zna dogoditi da je unutrašnjost obrađivane površine hrapava, iako su tragovi brušenja duboki. Ovo se može dogoditi uslijed devijacije dugog vratila na kojem se nalazi brusna ploča jer je zračnost ležaja brusne glave prevelika, što u konačnici uzrokuje njihanje brusnog kotača tijekom procesa brušenja. Kao posljedica toga, brusna ploča nije okrugla i cilindrična što rezultira hrapavom površinom obratka. Rješenje kojime se može priskočiti ovom problemu jest rastavljanje vratila na kojem se nalazi brusna ploča, umetanje indikatora pomaka u otvor konusa vretena te zatim pomicanje istog rukom kako bi se provjerila točnost rotacije vretena prema odstupanju kazaljke indikatora. Ako postoji pomak, to će ukazati na problem zračnosti ležaja brusnog vratila. Idući problem do kojega može doći uslijed unutarnjeg okruglog brušenja jesu deformacije radnog komada koje se mogu podijeliti u dvije vrste. Jedna je da se obradak deformira prije uklanjanja sa stroja za brušenje nakon što je proces brušenja gotov, dok je druga da se obradak deformira nakon njegovog uklanjanja sa stroja za brušenje. Prve su uzrokovane velikim zazorom ležaja vretena na stroju za brušenje, tj. ležaj i površina vretena nisu dobro povezani, a središte rotacije ležaja se ne poklapa s osi rotacijom vretena. Među ostalim, treba uzeti u obzir je li stezanje obratka primjereno. Ovaj tip deformacija je u pravilu simetričan.

Druga vrsta deformacija je uglavnom uzrokovana elastičnom deformacijom kada se obradak otpusti iz stezne naprave. Kako bi se izbjegla takva vrsta deformacije, može se primijeniti metoda ojačanja debljine stijenke obratka kako bi se povećala krutost, tj. pričvršćivanje elastične brtve na cilindrični dio koji se u trenutku stezanja nalazi u neposrednom kontaktu s tri čeljusti. Na taj način se sila stezanja u tri točke može raspodijeliti po obodu izratka bez uzrokovanja neravnomjerne deformacije i naknadnog pojavljivanja elastične deformacije [15].

Idući problem koji se tiče okruglog unutarnjeg brušenja jest dobivanje koničnih površina.

Ovaj problem najčešće je rezultat neparalelnosti između središnje osi rotacije brusne ploče i longitudinalnog posmaka prigonskog stola na kojem se nalazi obradak.

Slika 2-5 zorno prikazuje problem konične površine u unutrašnjosti obratka dobivene procesom unutarnjeg okruglog brušenja. Kao rješenje ovog problema u literaturi se navodi ponovno namještanje postavki stroja koje se tiču njegovih koordinata položaja.



Slika 2-5 Konična površina [15]

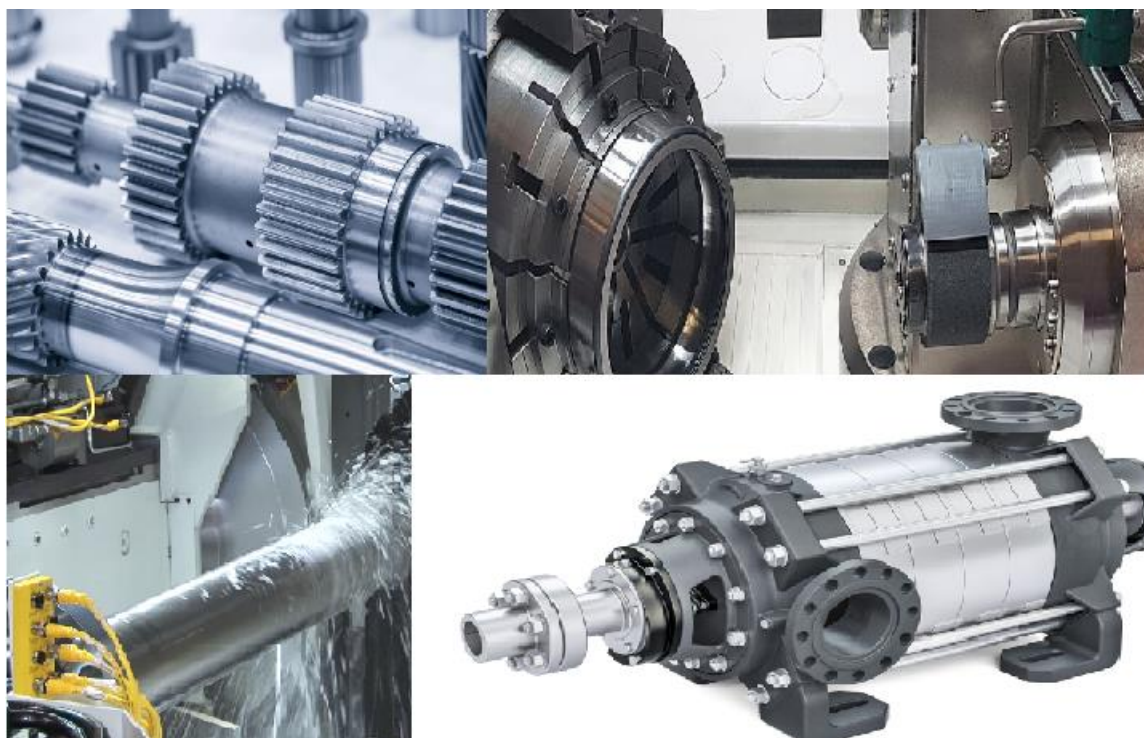
Konačno, kao zadnji od problema koji se mogu naći prilikom procesa unutarnjeg okruglog brušenja jest sklonost akumulaciji topline na vratilu na kojoj brusna ploča rotira, njena nefleksibilnost prilikom rotacije pa čak i mogućnost zaglavlivanja. Do ovog problema dolazi zbog pojave malih čestica i nečistoća u otvoru za brizganje ulja ili samom ležaju. Budući da sustav podmazivanja glave za brušenje zahtijeva dodatno sekundarno ulje za podmazivanje, prljavština sapnice kao i sitne čestice pijeska miješaju se s uljem koje je usmjereno prema ležaju, te često puta i dolaze u prostor između ležaja i brusne glave, što u konačnici za posljedicu ima akumulaciju topline, nefleksibilnu rotaciju ili u najgorem slučaju zaglavlivanje [15].

2.6. Primjena unutarnjeg i vanjskog okruglog brušenja

Upotreba procesa okruglog brušenja našla je svoju široku primjenu u područjima izrade dijelova za gotovo sve industrije. Bilo da se radi o motorvretenima, prirubnicama, ventilima, razdjelnicima, elektrohidrauličkim aktuatorima, lopaticama turbina, potrebna je brzina, preciznost i pouzdanost koja je omogućena postupkom cilindričnog brušenja.

Nadalje, prilikom brušenja dijelova za motore s unutarnjim izgaranjem, potrebna je visoka preciznost i maksimalna fleksibilnost. Postoje tri stvari koje su ključne za uspjeh pri brušenju dijelova za transmisiju i pogon: visoka točnost, maksimalna fleksibilnost i iznimna krutost. Projektirani za veće sile rezanja, strojevi za okruglo brušenje nude precizne i ponovljive rezultate s uskim tolerancijama na dimenzijsku točnost. Čvrstoća strojeva također osigurava najveću moguću stopu proizvodnje, s maksimalnim vremenom neprekidnog rada [31].

Sukladno svemu navedenom, proces okruglog brušenja u stanju je zadovoljiti najstrože norme na točnost izrade različitih obradaka primjerice izrade osovina za električna vozila koja će u budućnosti sve više ući u primjenu.



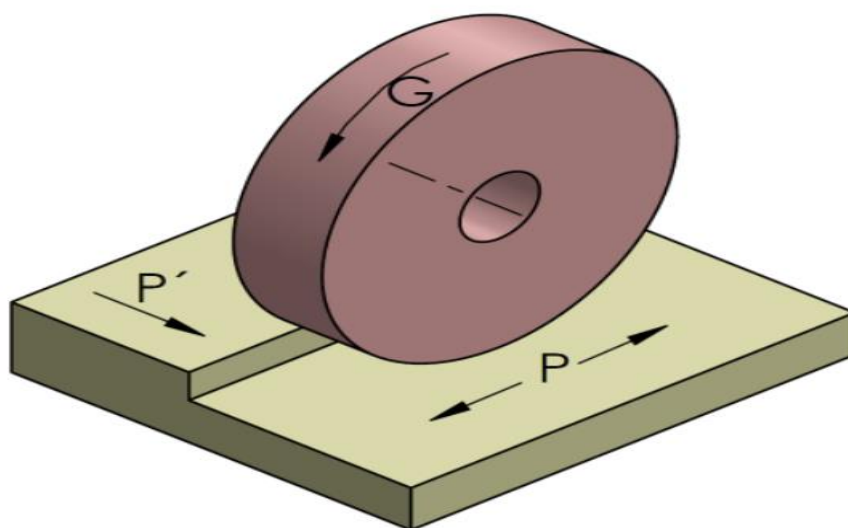
Slika 2-6 Primjena cilindričnog brušenja [31]

2.7. Brušenje ravnih površina

U engleskoj literaturi poznato pod nazivom *surface grinding* spomenuto se brušenje koristi za dobivanje finih kvaliteta obrade na ravnim površinama. Kao takvo, brušenje ravnih površina spada u najzastupljenije procese brušenja. U procesu se koristi rotirajuća abrazivna brusna ploča kako bi se izravnala površina metalnog ili nemetalnog materijala pri čemu se nečistoće i oksidni sloj uklanjaju s površine obradaka. Važno je napomenuti da se obradak kod ravnog brušenja može stegnuti na dva načina. Feromagnetski kod metala koja imaju magnetna svojstva ili pomoću vakuuma, mehaničkih naprava kada se govori o neferomagnetskim materijalima [16]. U našoj literaturi ova vrsta brušenja također se može naći pod nazivom plošno brušenje. Valja istaknuti kako glavno vreteno može biti pozicionirano i horizontalno i vertikalno te ono obavlja glavno gibanje, dok pomoćna gibanja obavlja radni stol i ono može biti pravocrtno ili kružno. Prema tome ravno brušenje može se podijeliti na brušenje obodom brusne ploče ili brušenje čelom brusne ploče [12].

2.7.1. Obodno ravno brušenje

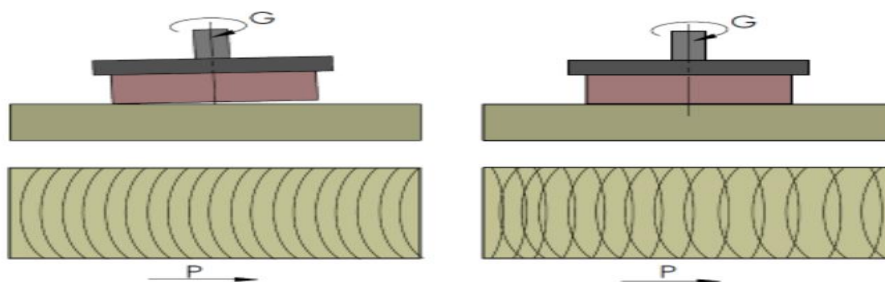
Glavno gibanje kod vanjskog ravnog brušenja izvodi brusna ploča dok obradak obavlja posmično gibanje relativno malim brzinama u odnosu na brusnu ploču.



Slika 2-7 Obodno brušenje [7]

2.7.2. Ravno čeono brušenje

Čeono brušenje koristi šuplju brusnu ploču te na taj način se izbjegavaju male brzine rezanja koje se pojavljuju u središtu alata i oko njega. Brusno kolo se može postaviti okomito na površinu obrade kao i pod nekim kutom o čemu ovise tragovi obrade. Posmična brzina uvjetuje razmak između tragova obrade kod čeonog brušenja.



Slika 2-8 Čeono brušenje pod kutem (lijevo) i okomito (desno) [7]

2.8. Kružno brušenje ekscentričnih oblika

Bregasta vratila i koljenaste osovine spadaju među ekscentrične izratke, koji zahtijevaju izrazitu preciznost u kvaliteti materijala i obrade. Brušenje ovakvih obradaka zahtjeva posebne uvjete brušenja. Putanja brusa mora biti jednaka krivulji površine obratka. Alat (brus) mora osim glavne rotacione brzine gibanja imati dostavno gibanje približavanja i udaljavanja prema obratku u ovisnosti o kutu zakreta obratka. (npr. krivuljne ploče ili model s ticalom). Moderni oblici strojeva, kod CNC upravljanja (engl. *Computer Numerical Control*), opremljeni su rotacijskom osci C koja je uvjet za ekscentrično brušenje na takvim strojevima.

2.9. Profilno brušenje

Profilno brušenje se koristi za brušenje složenih oblika različitih površina. Pri tome se najčešće oblik profila prenosi na brusnu ploču koja nakon profiliranja vrši obradu željenog obratka. U grupu profilnog brušenja spada i brušenja vratila, zupčanika, navoja itd.

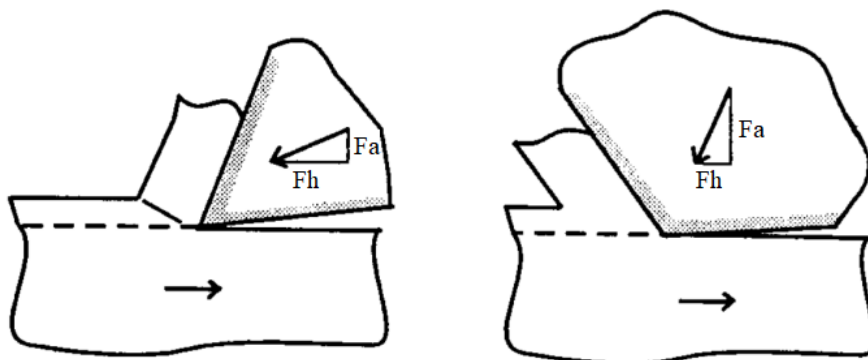


Slika 2-9 Profilno brušenje [20]

3. SILE REZANJA PRI OKRUGLOM BRUŠENJU

Sile brušenja ključni su elementi u procesu brušenja. One utječu na brzinu odvajanja materijala, kvalitetu obrađene površine, temperaturu i vibracije tokom procesa, kao i na daljnje trošenje brusne ploče. Nadalje, sile brušenja također su važan parametar koji se može koristiti za optimizaciju parametara obrade i strukture stroja za brušenje kako bi se potencijal brušenja mogao u potpunosti istražiti [17].

Općenito, sile brušenja se prema dvodimenzionalnom modelu mogu podijeliti na glavnu silu, F_h te na natražnu silu (odrivnu silu) brušenja F_a , kao što je prikazano na slici 3-1. Na lijevoj strani prikazan je slučaj u kojem je prednji kut rezne površine pozitivan ($F_h/F_a \approx 2$), dok je na desnoj strani prikazan slučaj u kojem je on negativan ($F_h/F_a \approx 0,3-0,6$), inače karakterističan za postupak brušenja.



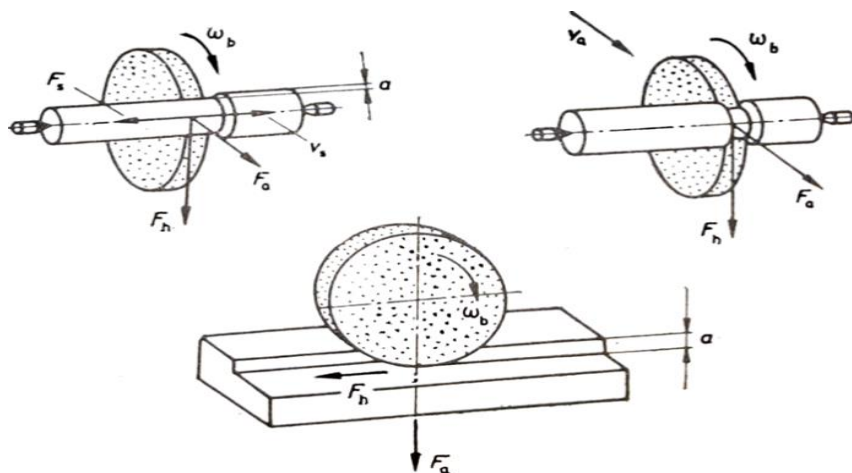
Slika 3-1 Sile brušenja 2D Error! Reference source not found.

Opće je poznato da proces brušenja podrazumijeva rezanje u više točaka koje utječe na točnost dimenzija obratka te životni vijek brusne ploče. Zbog raznolike morfologije brusnih ploča, nepravilne raspodjele zrnaca po površini brusa i nesigurnosti u broj efektivnih zrna, tradicionalnim metodama identifikacije teško je precizno, glatko i učinkovito izračunati silu rezanja brušenjem. Stoga, karakteristike reznog opterećenja brusa u procesu brušenja i model izračuna opterećenja na brus imaju važnu teoretsko istraživačku vrijednost za poboljšanje točnosti strojne obrade, učinkovitosti proizvodnje i povezane troškove [18].

Iako sile brušenja nisu tako velike kao kod ostalih procesa obrade odvajanjem čestice, svejedno uvelike utječu na normalan tok odvijanja samog procesa.

Rezultantna sila brušenja pri obodnom klasičnom brušenju se sastoji od sljedećih komponenti prikazanih na slici 3-1:

- Natražna (odrivna) ili normalna sila brušenja, F_a
- Glavna ili tangencijalna sila brušenja, F_h
- Posmična ili aksijalna sila brušenja, F_s



Slika 3-2 Prikaz sila brušenja pri obodnom klasičnom brušenju [19]

Komponente ukupne sile dobivene su iz:

$$F_h = \sum_1^{n_e} F_h \quad F_a = \sum_1^{n_e} F_a \quad F_s = \sum_1^{n_e} F_s$$

n_e – broj zrna koji sudjeluje u zahvatu, $n_e = n_z \cdot A_e$

n_z – gustoća zrna, zrna/m²

A_e – površina dodira brusne ploče i obratka, m²

Glavna reducirana sila rezanja F_{hr} (po jedinici širine brusnog kontakta) računa se prema izrazu:

$$F_{hr} = C \cdot v_b^{-p_1} \cdot v_0^{p_2} \cdot a^{p_3} \cdot N_s^{p_4} \quad [19]$$

C – konstanta

v_b – obodna brzina rezne površine brusa

v_0 – brzina obradne površine

a – dubina brušenja

N_s – statički broj oštrica

p_i – eksponenti

pri čemu su dane orijentacijske vrijednosti F_{hr} , kod $v_b=28$ do 35 m/s.

- Završno brušenje $F_{hr}=2,5-7,5$ N/mm
- Fino brušenje $F_{hr}=4-11$ N/mm
- Grubo brušenje $F_{hr}=7-18$ N/mm
- Duboko brušenje $F_{hr}=14-36$ N/mm
- Visokoučinsko brušenje $F_{hr}=30-140$ N/mm

Iz dostupne literature objavljeno je puno istraživanja vezanih uz sile rezanja prilikom brušenja, ustanovljeno je sljedeće:

- Sila rezanja brušenjem formira se kombinacijom sile „brušenja“ i sile „rezanja“, a njihovi omjeri su različiti.
- Sila brušenja nastaje istodobnim djelovanjem zrna, tj. svako se pojedinačno zrno može smatrati krutim poliedrom.
- Prosječna dubina brušenja jednog zrna u pravilu je izuzetno mala i međusobno se razlikuje od ostalih.
- Sila brušenja raste povećanjem duljine kontaktnog luka između zrna i obratka.
- Neka zrna sudjeluju u procesu brušenja, ali tek neposredno iznad brušene površine.

Iz svega navedenog, može se zaključiti da je postupak brušenja iznimno sofisticiran. Nadalje, prilikom optimizacije parametara u procesu brušenja važno je ne izostaviti karakteristike poput oblika ruba brusa, prosječne dubine brušenja, broja efektivnih zrnaca te duljinu kontaktnog luka između zrna i obratka [18].

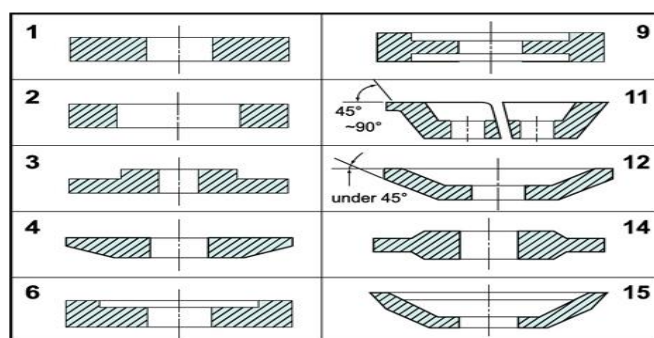
4. BRUSNE PLOČE

Brusne ploče se sastoje od abrazivnih zrnaca, u kojima su sadržane rezne oštrice potrebne za obradu materijala, vezivnog materijala koji ta ista zrna drži zajedno na okupu i stoga djeluje poput svojevrsnog držača alata i pora. Slika 4-1 prikazuje shematski prikaz konstituenata brusa.



Slika 4-1 Sadržaj brusa [21]

Faktori koje je potrebno uzeti u obzir prilikom odabira brusne ploče podrazumijevaju abraziv (vrsta, karakteristike, veličina zrna, njihova raspodjela i koncentracija po površini), vezivo (tvrdoća, krutost, porozitet i toplinska vodljivost) i konstrukciju brusa (oblik/veličina i materijal jezgre). Matrica brusne ploče ukazuje na poroznost, inače bitnu za efektivnost sredstva za hlađenje i podmazivanje te odvođenje odvojene čestice. Vrsta zrna, veličina, tvrdoća i krutost, ali i njegovo svojstvo oštrenja, uvelike utječu na brzinu proizvodnje te efikasnost brušenja. Brusne ploče moraju biti tvrde i čvrste kako bi izdržale brusne sile za vrijeme procesa, ali isto tako moraju biti konstruirane na način da se troše radijalno, odbacivanjem istrošenih reznih rubova i mogućnošću za stvaranjem novih kako bi se održala konzistentna efikasnost brušenja. Promjer brusnih ploča kreće se između 6 milimetra pa sve do 1 metra s pripadajućom debljinom od 1 do 525 milimetra. Neki od karakterističnih oblika brusnih ploča prikazani su na slici 4-1 ispod [1].



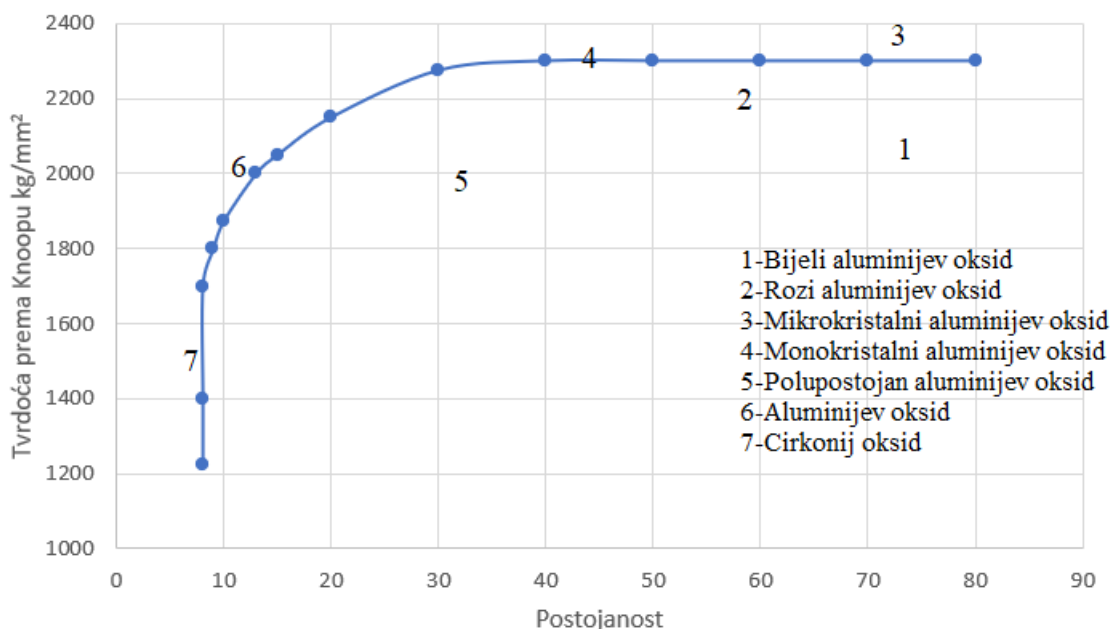
Slika 4-2 Oblici brusnih ploča [32]

4.1. Abrazivi

Važna svojstva abrazivnih zrna koja utječu na izdržljivost i otpornost na trošenje abraziva jesu tvrdoća, otpornost na abraziju, kristalna struktura te oblik/veličina. Svojstvo samooštřivosti kao takvo opisuje mogućnost loma abrazivnog zrna u određenim uvjetima brušenja i stvaranje novih oštřica. Indeks otpornosti na trošenje raste s tvrdoćom. Zrno s visokim stupnjem žilavosti može izdržati habanje i visoke pritiske prilikom brušenja, dok s druge strane može rezultirati u prekomjernom generiranju topline ili čak oštećenju brusnog kotača. Suprotno tome, zrna s malom otpornošću na trošenje sklona s vrlo brzom trošenju. Stoga je cilj odabrati zrna dovoljnog žilavošću koja nisu previše sklona trošenju.

S obzirom na rastuću tvrdoću, materijali od kojih su načinjena moguća abrazivna zrna jesu aluminijev oksid (Al_2O_3), silicijev karbid (SiC), aluminij cirkonij, kubični bornitrid (CBN) i polikristalični dijamant (PCD). Zadnja dva najčešće se u literaturi spominju kao superabrazivi, dok prva tri spadaju u grupu konvencionalnih abraziva.

Aluminijev oksid je najrašireniji abraziv koji se koristi za brušenje ugljičnog čelika, legiranih čelika, sivog lijeva i superlegura. Postoje različite varijante zrnaca aluminijevog oksida koje u sebi sadrže nečistoće (poput titanija, natrija i kroma), koje utječu na svojstvo samooštřivosti.



Slika 4-3 Općenita primjena abraziva [23]

Zrna od aluminij cirkonija (mješavina aluminijevog oksida i cirkonijevog oksida) koriste se za grubo brušenje, posebice magnetičnih metala. Silicijev karbid se koristi za brušenje za

materijala s niskom vlačnom čvrstoćom kao što su aluminij, bakar, bronca, sirovo željezo, sivi lijev, cementirani karbid, ali i za nemetalne materijale kao što su keramike.

Zrna silicijevog karbida u pravilu su crna, ali mogu biti i zelena u čistim oblicima, čija upotreba je najistaknutija pri obradi toplinski osjetljivih nemagnetičnih materijala poput keramike.

Ipak, silicijev karbid nije pravi materijal za brušenje čelika zbog visoke razine kemijske topljivosti ugljika u željezu što dovodi do ubrzanog trošenja brusa.

Kada se govori o superabrazivima, neka od svojstva koja ih odlikuju jesu iznimna tvrdoća, otpornost na abraziju, dobra toplinska vodljivost i visoka vlačna čvrstoća, što čini najboljim kandidatima za brušenje tvrdih metala, karbida, keramike i mnogih drugih tvrdih materijala, pogotovo pri većim brzinama brušenja. Brusne ploče od superabrazivnih čestica često dostižu brzine i od preko 150 m/s. Brzina uklanjanja materijala, je jedan do dva reda veličine veća u odnosu na konvencionalne abrazive, bez prekomjernog zagrijavanja obratka.

Polikristalni dijamant i kubični bornitrid mnogo su tvrđi od svih ostalih abraziva i mogu se koristiti pri visokobrzinskoj obradi široke palete materijala u odnosu na konvencionalne abrazive, s puno manjim brzinama trošenja alata.

Aluminijev oksid najčešće se zamjenjuje s CBN-om za obradu visokočvrstih čelika (>45 HRC), superlegura (nikal, kobalt, željezne s tvrdoćom većom od 35 HRC), visokobrzinskih čelika te ljevanog željeza. CBN je i do četiri puta otporniji na abraziju u odnosu na aluminijev oksid.

Njegova visoka toplinska vodljivost sprječava gomilanje topline te s njom povezane probleme poput otupljivanja brusa čime će biti spriječeno odvajanje čestica s površine materijala i metalurških oštećenja obratka.

Što se tiče polikristalnog dijamanta, on ima i do tri puta veću otpornost na abraziju od silicijevog karbida te se značajno koristi pri brušenju alata od cementiranog karbida, keramike i stakla.

Poput silicijevog karbida, PCD nije efektivan za obradu čelika zbog visoke kemijske topljivosti ugljika u željezu. Razlikujemo tri vrste PCD-ovih kristala: RVG, MBG i MBS. RVG, srednje drobitiv dijamant, koristi se kod brusova od smole i stakla, primarno za brušenje volframovog karbida. MBG se koristi kod brusova s metalnim vezivom, koji su čvršći i manje drobljivi od RVG brusnih ploča, dok se MBS kristal koristi za obradu stakla i keramičkih materijala.

4.2. Zrnatost i tvrdoća brusa

Prema [19], zrnatost brusa dana je brojem koji odgovara broju očica na duljini od 25,4 mm sita kroz koji su prošla brusna zrna u procesu separacije i zaustavila se na situ iduće veće gustoće. Zrnatost iznad 230 određuje se taloženjem.

Naziv područja zrnatosti i odgovarajuće veličine zrna dani su u tablici 1.

Tablica 1 Zrnatost brusa [19]

Zrnatost		Promjer zrna u mm
8	vrlo gruba	2,83 do 2,0
10		2,38 do 1,68
12		2,0 do 1,41
14		1,68 do 1,19
16	gruba	1,41 do 1,0
20		1,19 do 0,84
24		0,84 do 0,60
30		0,71 do 0,50
36		0,60 do 0,42
46	srednja	0,42 do 0,30
54		0,35 do 0,25
60		0,30 do 0,21
70		0,25 do 0,18
80		0,21 do 0,15
90	fina	0,18 do 0,13
100		0,15 do 0,11
120		0,13 do 0,09
150		0,11 do 0,06
180		0,09 do 0,05
220		0,075 do 0,045
240	vrlo fina	0,047 do 0,043
280		0,038 do 0,035
320		0,031 do 0,028
400		0,018 do 0,016
500		0,014 do 0,012
600		0,010 do 0,008
800		0,008 do 0,006
1000		0,005 do 0,004
1200	0,004 do 0,003	

Konvencionalne brusne ploče se razlikuju prema veličini njihovih zrna. Na primjer, brus 80 podrazumijeva da je prosječna veličina abrazivnih zrnaca aproksimativno 80 zrnaca na duljini od 25,4 milimetra. Gruba zrna u pravilu odnose više materijala u zahvatu u odnosu na fina.

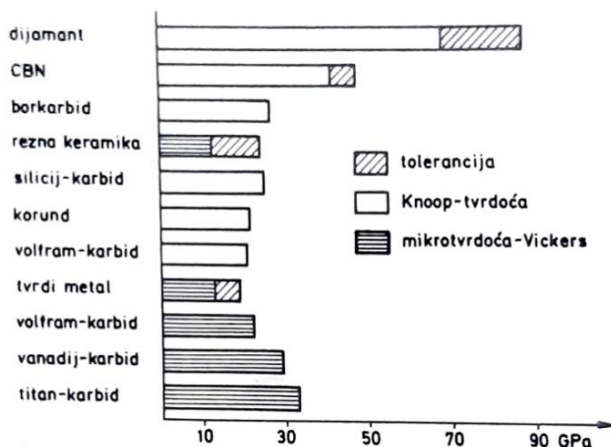
Međutim, postoje iznimke prilikom brušenja materijala s iznimnom tvrdoćom, kada su poželjnija srednja i fina zrna zato što pružaju više reznih oštrica na brusu.

Nadalje, gruba zrna znaju prouzročiti ogrebotine na površini obrađivanog materijala koja se nekad teško mogu ukloniti s finijim stupnjevima brusa u naknadnim obradama.

Maksimalna stopa uklanjanja materijala po jednom zahvatu primarno ovisi o karakteristikama brusne ploče, materijalu koji se obrađuje i sredstvu za podmazivanje i hlađenje. Parametri poput brzine vrtnje brusne ploče, izbora odgovarajuće metode obrade i sredstva za podmazivanje i hlađenje također utječu na mogućnosti brusne ploče, ali ipak u manjem obimu. Neko generalno pravilo je da je mokro brušenje preferabilne od suhog, pogotovo u situacijama gdje se stvaraju veće količine odvojene čestice [1].

Tvrdoća brusa nije jednoznačno određena. Razlike nastaju već kod proizvođača. Na djelovanje tvrdoće utječe mnogo faktora: brzina brušenja, zrnatost, poroznost, profiliranje odnosno obrada rezne površine brusa, veličina posmaka, uvjeti brušenja, promjer brusa, oblik obratka (posebno oštri rubovi), ekvivalentni promjer brusa itd [19].

Slika 4-3 prikazuje tvrdoće pojedinih brusnih materijala.



Slika 4-4 Usporedna tvrdoća karbida i brusnih sirovina [19]

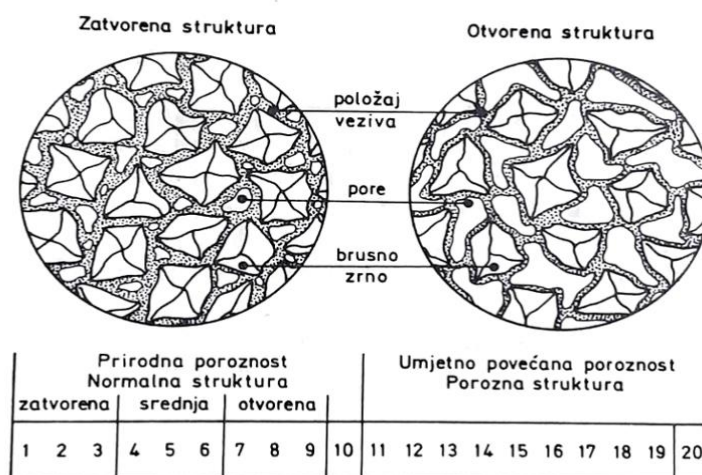
Slika 4-4 daje uvid u specifikaciju određenih stupnjeva tvrdoće brusa.

STUPANJ TVRDOĆE																									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
osobito mekani		vrlo mekani			mekani				srednji				tvrdi				vrlo tvrdi			osobito tvrdi					

Slika 4-5 Stupanj tvrdoće [21]

4.3. Poroznost i struktura brusa

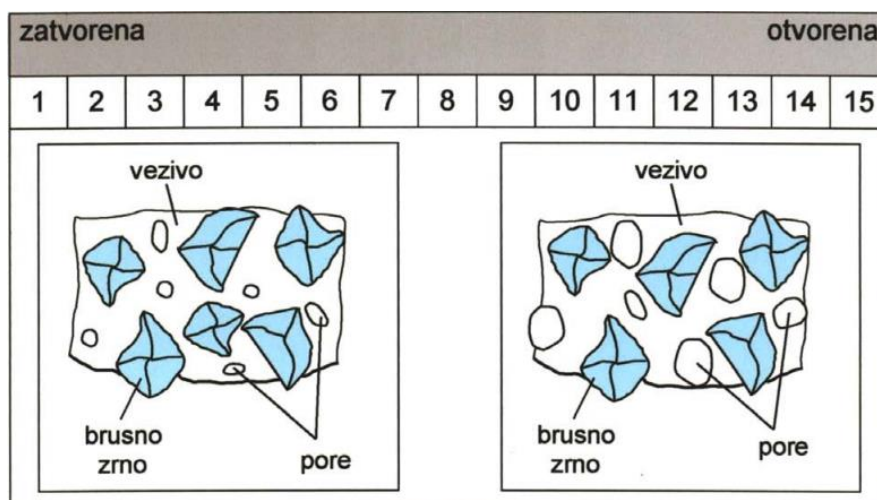
Poroznost kao svojstvo ima veliki utjecaj u procesu brušenja zbog mogućnosti prolaza sitnih čestica materijala koje se odvajaju obradom te uvelike pridonosi hlađenju brusa i obratka u procesu brušenja. Svaki brus je po svojoj prirodi porozan. Poroznost je označena brojkama od 1 do 9, kojima se označavaju standardne strukture. Što je brojka koja označava strukturu veća, tim je i brus porozniji. Prirodna poroznost može se umjetno povećati ako se mješavini doda specijalni dodatak koji stvara dopunske pore. Umjetno povećana poroznost izražava se strukturnim brojevima od 11 do 19 i naziva se poroznom strukturom, prikazano na slici 4-4.



Slika 4-6 Prikaz struktura brusa [19]

Ako je poroznost strukture brusa veća, lakše je odvojiti brusna zrna iz međusobno povezane cjeline brusa. Stoga se brusovi koji su porozniji ponašaju „mekše“ u procesu brušenja[19].

Struktura brusa pokazuje odnos udjela vezivne mase i mase brusnih zrna prema udjelu pora u cjelokupnom volumenu brusa [21].



Slika 4-7 Struktura brusa [21]

4.4. Vezivo

Veziva drže abrazivna zrnca zajedno na brusnom kotaču. Ona bi u pravilu trebala imati dovoljnu krutost i sposobnost održavanja oštih abrazivnih zrnaca tijekom procesa rezanja, a ipak otpuštati otupjela zrna. Vezivo mora biti u mogućnosti izdržati sile brušenja i visoke temperature te mora imati sposobnost odupiranja kemijskom napadu uslijed djelovanja sredstva za podmazivanje i hlađenje. Vrsta veziva također utječe na maksimalnu sigurnu brzinu vrtnje brusnog kotača. Postoje tri glavne vrste veziva: mineralna, organska i metalna. Mineralna veziva načinjena su od anorganskih materijala, tj. u najvećem broju slučajeva stakla ili silikata. Organska veziva podrazumijevaju smolu, šelak, gumu i oksiklorid. Organska veziva su fleksibilna na mikroskopskoj razini te omogućavaju zrcima da se transliraju i rotiraju uslijed brušenja. Metalna veziva su više toplinski postojana odnosu na organska te otpornija na udare u odnosu na mineralna. Bronca, nikal i željezo se koriste kao metalna veziva, a sinterirana bronca je najčešće korišten materijal.

Mineralna i organska najčešće se koriste kod konvencionalnih bruseva. Pritom se mineralna koriste za precizno brušenje, dok se organska veziva koriste u procesima s visokim stopama odvojene čestice pri svakom zahvatu te u suhim obradama zbog visoke otpornosti na temperaturni šok te zato što mogu izdržati visoke tlakove. Visokoporozne vezivne strukture mogu se koristiti za veće stope odvajanja materijala bez spaljivanja brusa zato što pore, kao što je već prethodno navedeno u poglavlju iznad, apsorbiraju sredstvo za hlađenje i podmazivanje te ga jednoliko raspršuju u zonu rezanja, tako poboljšavajući odvođenje topline te reduciraju začepljenje reznih oštrica s odvojenom česticom. Mineralna veziva imaju dugu praksu sigurnog korištenja na brzinama vrtnje do 2000 metara po minuti. Maksimalna sigurna brzina za smolna veziva je aproksimativno 3000 metara po minuti. Brzine između 4000 i 5000 metara po minuti postala su moguća s nedavnim napredcima kod veziva na bazi stakla i pojačanih veziva koja spajaju staklene i keramičke materijale [1].

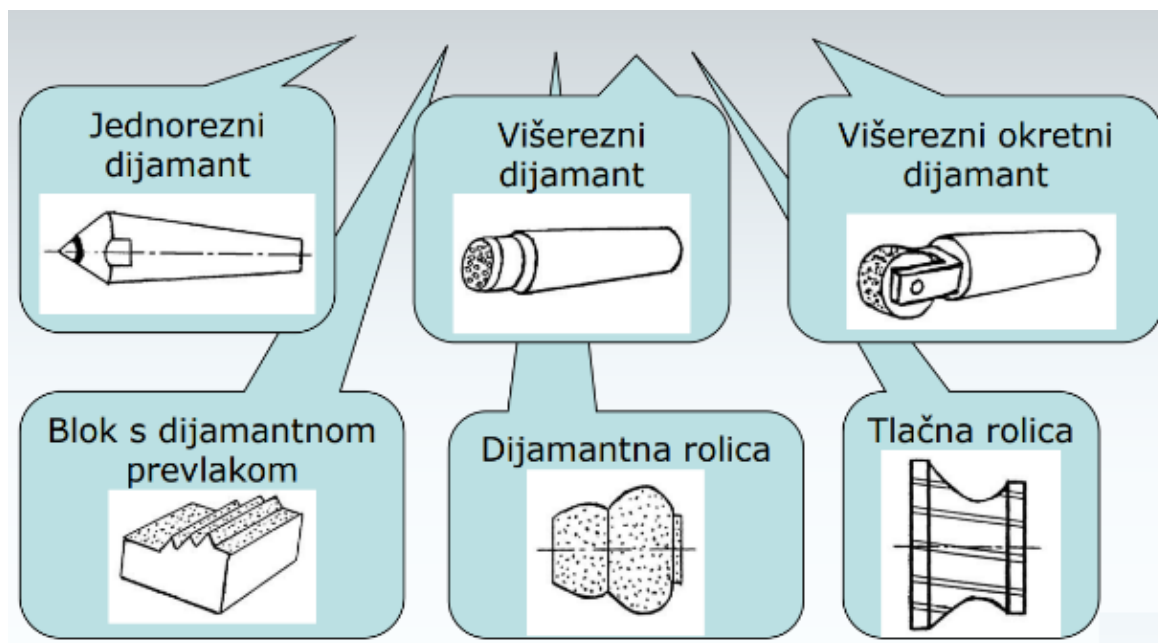
Oznake za različite vrste veziva prikazana su na slici 4-8.

V	- Keramičko
B	- Smolno
R	- Gumeno
E	- Šelakovo
BF	- Smolno ojačano s vlaknima
RF	- Gumeno ojačano s vlaknima

Slika 4-8 Vrste veziva [21]

4.5. Načini obrade rezne površine brusa

Prilikom procesa brušenja, nakon nekog vremena, dolazi do pojave otupljivanja zrnaca na površini brusa, unatoč činjenici da brusni kotači imaju svojstvo samooštrenja. Iako prethodna rečenica zvuči kontradiktorno, već u idućoj će se objasniti zašto je to ipak tako. Uslijed procesa brušenja dolazi do stvaranja odvojene čestice koja često ne uspijeva u cijelosti otići s površine brusa. Kao posljedica toga, porozna struktura brusa biva preopterećena, čime se ometa efikasnost brušenja. Odvojena čestica stvara sloj između abrazivnih zrna i obratka. Za regeneraciju oštrenje površine brusne ploče i uklanjanje opterećenja, potrebno je odstraniti česticu. To je razlog zašto je oštrenje brusa važan aspekt procesa brušenja. Tako se uklanjanju sve nečistoće s površine brusa te se omogućuje abrazivu učinkovito brušenje radnog komada [24]. Nadalje, s obzirom da bi svaka zamjena starog brusa novim nakon inicijalne pojave tupih zrnaca dugoročno bila neekonomična, oštrenje rezne površine brusa pruža jednostavno i učinkovito rješenje. Pritom se razlikuje nekoliko različitih načina oštrenja koji su prikazani na slici ispod.



Slika 4-9 Načini obrade rezne površine brusa [21]

5. TEMPERATURE KOD OKRUGLOG BRUŠENJA

U konvencionalnim procesima brušenja, obradak na sebe prima veliki dio energije. Oštećenje uslijed visokog toplinskog opterećenja može se dogoditi na površini, kao i u podslojevima obratka. Nadalje, da bi se otkrila toplinska oštećenja, koriste se različito utvrđene metode mjerenja poput mjerenja buke prema Barkhausenu za feromagnetske materijale ili nerazornog ispitivanja penetrantskom mješavinom alkohola i dušika za ostale materijale. Redukcija rashladnih tekućina prilikom obrade metala s ciljem što većeg približavanja suhoj obradi, u zadnje vrijeme uzima sve veći zamah u industriji. Prema [25], otkriveno je da troškovi proizvodnje povezani uz sredstvo za hlađenje i podmazivanje, od 16 do 20% povećavaju ukupne troškove. Suha strojna obrada sama po sebi zahtijeva prilagodbu cijelog procesa i pripadajućih alata koji mogu dovesti do većeg trošenja alata i nižih procesnih parametara. Kod suhe obrade, ako se visoki tokovi energije prema obratku razvijeni u obliku topline, ne odvede s površine obratka, moguća je promjena mikrostrukture potpovršine obratka [26]. Temperature prilikom brušenja nastavljaju biti predmet interesa zato što uvelike utječu na učinkovitost obrade. Temperature u primarnoj zoni deformacije, gdje se odvija glavina deformacija uključenih u formiranje odvojene čestice, značajno utječu na mehanička svojstva obrađivanog materijala, a samim time i na sile rezanja. Iz ovog razloga većina kompletnijih analiza mehanike rezanja prilikom strojne obrade koriste temperaturno ovisne konstitutivne modele. Temperature na prednjoj površini rezne oštrice imaju snažan utjecaj na životni vijek alata. Kako se temperature u tom području povećavaju, tako i alat ili postupno omekšava, ili se pojačano troši uslijed abrazije. U najgorem slučaju dolazi do plastične deformacije alata. U nekim slučajevima konstitutivne čestice od kojih je alat napravljen difundiraju u odvojenu česticu ili kemijski reagiraju s rashladnom tekućinom. S obzirom da se temperature rezanja proporcionalno povećavaju s brzinom rezanja, temperaturno aktivirani mehanizmi trošenja alata ograničavaju maksimalne brzine rezanja za mnoge kombinacije alata i materijala [1].

5.1. Mjerenje temperatura tijekom procesa brušenja

Temperature tijekom obrade odvajanjem čestica mnogo je teže precizno mjeriti nego li sile rezanja. Rezultantna sila rezanja opisana je s tri komponente, dok je temperatura skalarno polje koje se mijenja kroz sustav i koje ne može biti jedinstveno opisano s vrijednostima u nekoliko točaka. Iz tog razloga, ne postoji jednostavna analogija koja bi preko sila rezanja došla do pripadajućih temperatura

rezanja; već su razvijene brojne tehnike temeljene na različitim fizikalnim principima.

Prema [27], metode koje se temelje na principu mjerenja termoelektrične snage:

- Metoda stranog elementa
- Metoda polu-stranih elemenata
- Metoda prirodnih elemenata

Metode temeljene na drugim načelima:

- Metoda termičke tinte
- Fotoelektrične metode (pirometri)

Jedna od suvremenih metoda mjerenja temperature je termovizijska metoda, mjerenje temperature pomoću termovizijske kamere. Mogu se predstaviti dvije primjene ove metode:

- Mjerenje temperature ravnina
- Mjerenje temperature cilindričnih površina, vanjskih i unutarnjih

Termovizijske kamere se uglavnom koriste za kvalitativna mjerenja (npr. identifikacija točaka u tehničkoj ili medicinskoj dijagnostici, traženje toplinskih mostova u studijama energetske učinkovitosti zgrada), ali i sve više za kvantitativna mjerenja gdje su potrebne precizne apsolutne vrijednosti temperature [27].

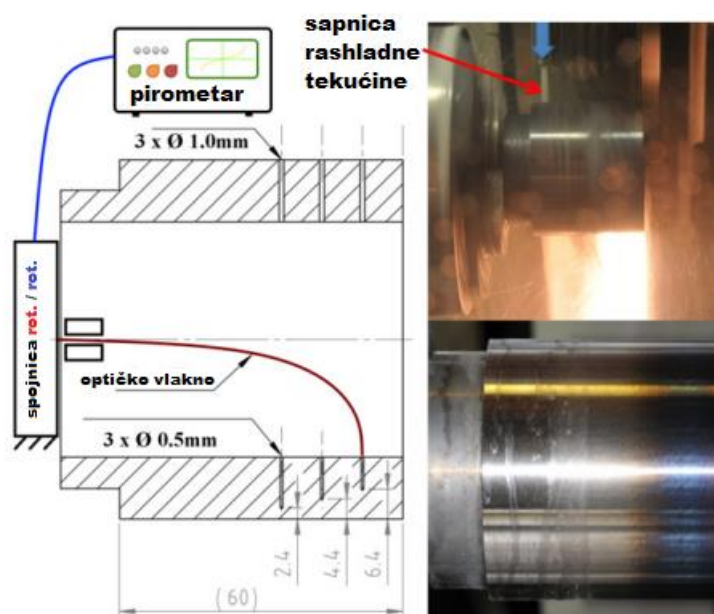
Senzori za mjerenje procesnih temperatura tijekom procesa brušenja obično se postavljaju ili u obradak ili u alat. Kod ravnog brušenja, obradak se pomiče linearno u definiranom rasponu. Još 1953. Littmann je koristio termoparove u obratku za određivanje temperaturnog gradijenta kaljenog čelika. Utvrđeno je da su temperature od oko 315°C bile dovoljne za promjenu tvrdoće u legiranom čeliku dok je temperatura površine premašila 1040°C. U okruglom brušenju, rotirajući obradak čini implementaciju senzora još kompleksnijom. Sustav za praćenje procesa na brusu s ciljem mjerenja temperature u rasporu brusa i obratka prvi puta je predstavljen od strane znanstvenika Brinksmeiera i suradnika. Sustav se sastoji od tankoslojnih termoparova i senzora sile u površini brusne ploče. U naprednijoj inačici sustava,

Brinksmeier je koristio optička vlakna smještena između abrazivnih zrnaca usmjerena iz brusne površine s infracrvenim sensorima i bežičnim prijenosom podataka [26].

Wang i suradnici utvrdili su da točno mjerenje temperature u zoni brušenja omogućuje smanjenje toplinskih oštećenja i kontrolu u procesu brušenja [28].

5.2. Eksperimentalno mjerenje temperature

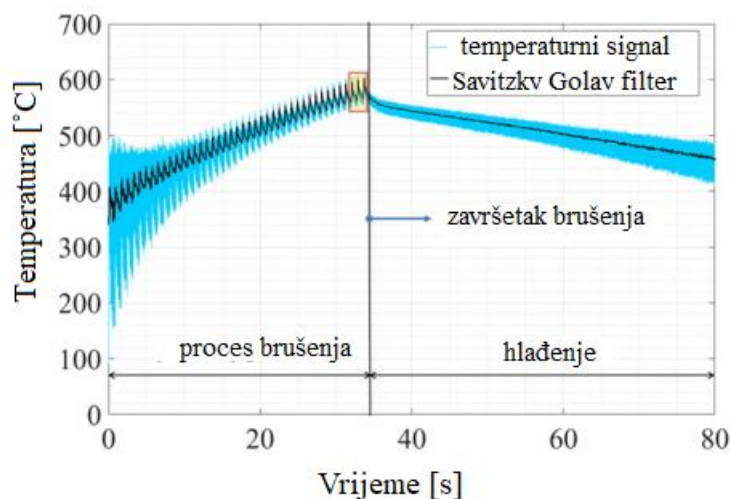
Kako bi se dao uvid u temperaturno mjerenje prilikom okruglog brušenja, prikazat će se rezultati jednog eksperimenta u kojem je iskorištena brusilica za okruglo brušenje, konstruirana za univerzalne primjene (Fritz Studer AG S31). Šuplji cilindrični obradci izrađeni od hladno oblikovanog alatnog čelika 1.2842 (90MnCrV8) promjera 76,3 mm i 60 mm širine prikazani su na slici ispod.



Slika 5-1 Obradak sa shemom mjernog postupka [26]

Za pokuse brušenja obradak je stegnut u steznu glavu s tri čeljusti. Jedan kraj optičkog vlakna postavljen je u provrt od 0,5 mm kao što je prikazano na slici iznad, dok se drugi nalazi u spojnici koja je povezana sa statičkim vlaknom pirometra. Brzina vrtnje obratka iznosi 75 o/min, dok brusna ploča od grubog aluminijevog oksida rotira pri brzinama jednakim 1910 o/min postizujući brzine rezanja od 50 m/s. Brzina posmaka postavljena je na 0,4 mm/min dok je volumni protok rashladne tekućine 0 ako se radi o suhom brušenju, tj. 1 l/min ako se radi o normalnom brušenju. Korištene mlaznice imaju kružni izlaz promjera 3 mm i smještene su okomito na visini od 70 mm iznad brušene površine. Eksperimenti se ponavljaju za svaku od 3 provrta u rasponu dubina od 2 mm. Užarene boje brušenog obratka odnose se na visoke

temperature i također su prikazane na slici gore. Pokus je izveden korištenjem definiranog i konstantnog izvora topline postavljenog ispred centriranog rotirajućeg vlakna i spojnice. Izmjerena standardna devijacija iznosi $12,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri prosječnoj temperaturi od $363,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ tijekom 10 sekundi mjerenja.



Slika 5-2 Temperaturni profil obratka [26]

Graf prikazuje progresivni rast temperatura od oko $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, dostizanje maksimuma te konačno hlađenje obratka. Cijeli proces prati se u vremenskom razmaku od 80 sekundi.

Zaključno, mjerenje temperature ispod površine obratka pomaže u razumijevanju toplinskog toka, raspodjeli i brzini zagrijavanja obratka. Nadalje, modeliranje procesa otvrdnjavanja brušenjem temelji se na toplinskoj simulaciji konačnih elemenata, koje je potrebno validirati. Uz dovoljnu prostornu i vremensku rezoluciju, mikrostrukturne promjene i njihov razvoj mogu se odrediti prema poznavanju brzina grijanja i hlađenja, ovisno o udaljenosti od površine.

Toplinsko opterećenje varira od 265 K/s pri dubini od $1,5\text{ mm}$ do 11300 K/s na $0,5\text{ mm}$ ispod površine za umjerene procesne parametre i nisku opskrbu rashladnim sredstvom. Uzimajući u obzir cijeli ciklus brušenja brzine zagrijavanja obratka su u rasponu od $5\text{--}11\text{ K/s}$. U ispitivanjima, temperature više od $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ koje su se zadržale neko vrijeme, izmjerene su na dubini od $1,5\text{ mm}$.

6. KVALITETA OBRAĐENE POVRŠINE

Mnogi dijelovi prilikom strojne obrade obrađuju se tako da je njihov završni oblik konzistentan prema dimenzijama i tolerancijama koje utječu na njihovu konačnu funkcionalnost. U mnogim slučajevima, pogotovo završnim operacijama, površinska ravnost i zahtjevi na finoću površine, ograničavaju raspon veličine alata, geometrije i posmične brzine koje se mogu koristiti. Štoviše, kako hrapavost površine postaje grublja i manje konzistentna s trošenjem alata, tako strogi zahtjevi na kvalitetu obrađivane površinu skraćuju životni vijek alata i na tako direktno utječu na proizvodnost samog postupka i njegove troškove.

Postoje dvije komponente kod završne strojne obrade. Prva je idealna tj. geometrijski završetak koji je definiran kao završna obrada koja bi rezultirala uslijed geometrije i kinematičkih gibanja alata. Idealna hrapavost može se izračunati iz parametara poput posmaka po zubu, radijusa zakrivljenosti vrha alata ali i njegovog kuta prednje površine.

Druga komponenta je tzv. prirodni finiše koji je rezultat potrošenosti alata, vibracija i dinamike procesa uslijed sila rezanja, efekata materijala u radnim uvjetima poput zaostalog naprezanja, nehomogenosti u strukturi, naljepaka i puknuća pri niskim brzinama rezanja [1].

Tehničke su površine sve one površine strojnih dijelova koje su dobivene nekom od obrada odvajanjem čestica ili nekom od obrada bez odvajanja čestica. One su tijekom obrade i eksploatacije strojnih dijelova izložene djelovanju različitih vrsta opterećenja, kao što su npr.: mehanička, toplinska, električna, kemijska ili biološka (moguće su i kombinacije). Najznačajnija su međutim mehanička i kemijska opterećenja, a njihova česta posljedica je habanje (trošenje) dijelova i korozija.

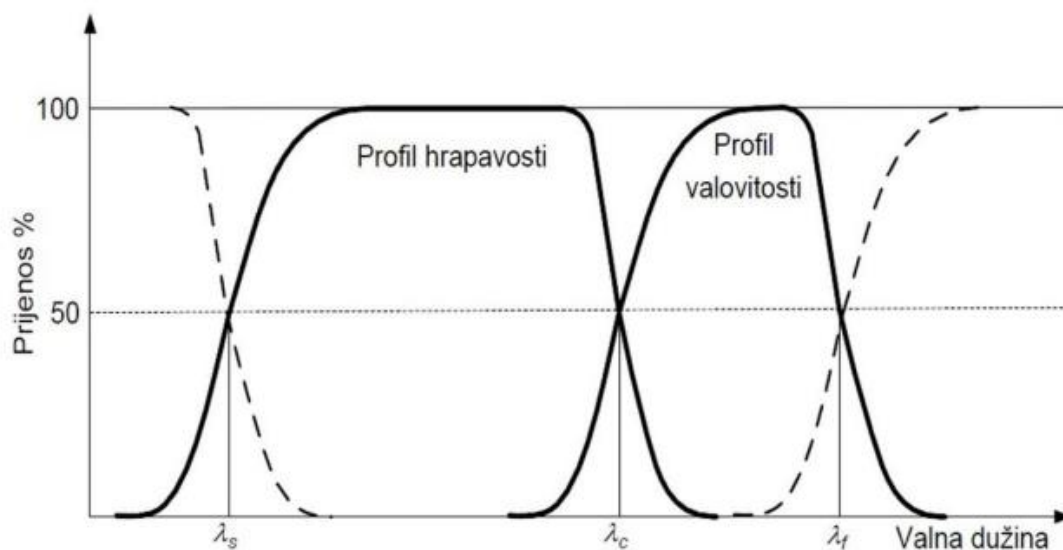
Tehničke površine nisu idealno glatke geometrijske plohe karakterizirane nizom neravnina različitih veličina, oblika i rasporeda. Posljedica tome jesu postupci obrade odvajanjem čestica ili postupci obrada bez odvajanja čestica. Veličina hrapavosti tehničkih površina može utjecati:

- na smanjenje dinamičke izdržljivosti (smanjenje čvrstoće oblika)
- na pojačano trenje i trošenje tarno (tribološki) opterećenih površina
- na smanjenje prijeklopa kod steznih spojeva, a time i smanjenje nosivosti steznog spoja
- na ubrzavanje korozije [29]

6.1. Osnovni pojmovi

Površinska hrapavost je sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta (koje su mnogo puta manje od površine cijelog predmeta), a prouzrokovane su postupkom obrade ili nekim drugim utjecajima.

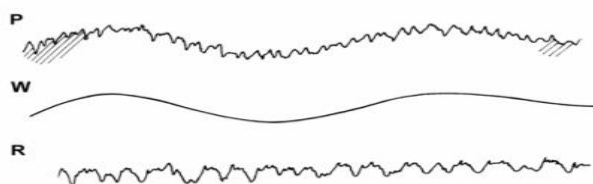
Profilni filter je filter koji razdvaja profile na dugovalne i kratkovalne komponente [ISO 11662]. Postoje tri filtra koji se koriste u uređajima kojima se mjeri hrapavost, valovitost i primarni profili (Slika 6-1). Svi imaju iste prijenosne značajke, definirane u ISO 11562, ali različite granične valne duljine. Sve pojave analiziraju se u pravokutnom koordinatnom sustavu u kojem su osi X i Y smještene u promatranu realnu površinu, a os Z usmjerena je na susjedni medij. Os X pritom je orijentirana u smjeru profila hrapavosti [29].



Slika 6-1 Prijenosne karakteristike profila hrapavosti i valovitosti [29]

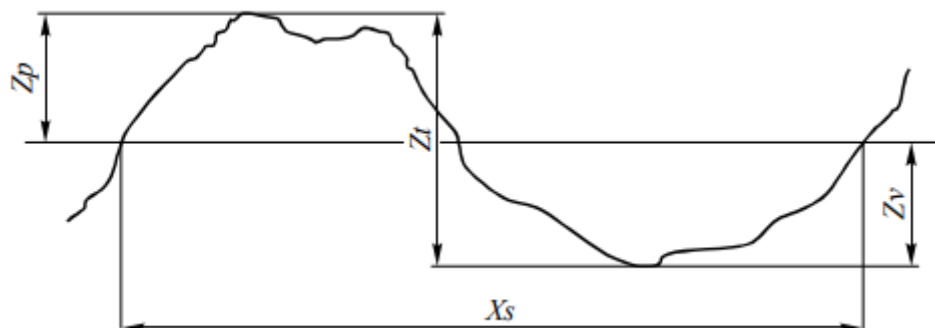
Profil hrapavosti (R) je profil koji se izvodi iz primarnog profila zanemarujući dugovalne komponente korištenjem profilnog filtra λ_c . Profil hrapavosti (R) osnova je za mjerenje parametara hrapavosti profila.

Profil valovitosti (W) je profil koji proizlazi iz primarnog profila (P) primjenom profilnih filtera λ_f i λ_c .



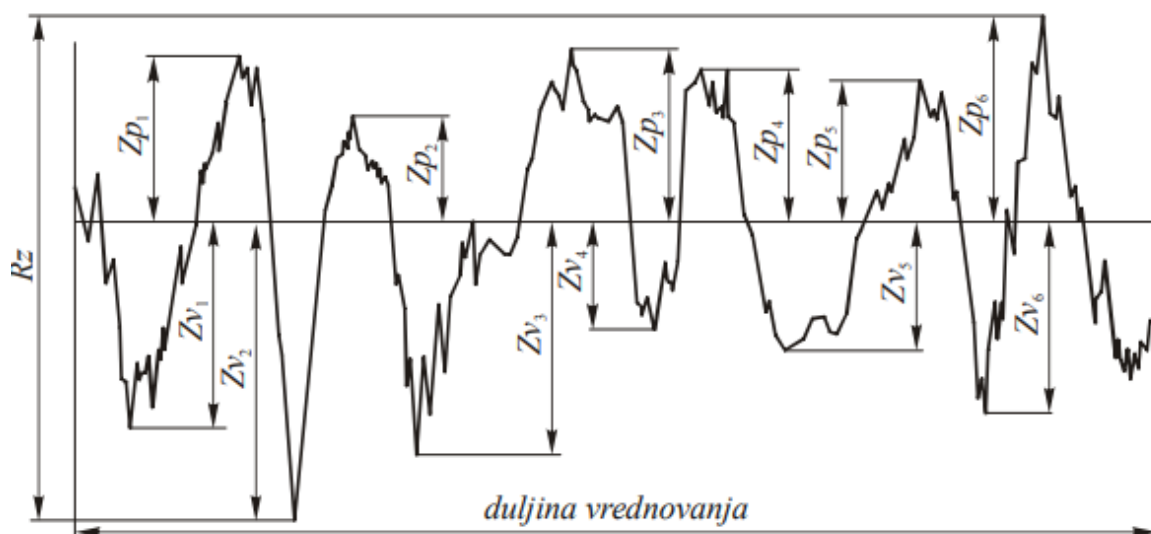
Slika 6-2 Razlučivanje P, W i R karakteristika profila [29]

Visina vrha profila Z_p je udaljenost između osi x i najviše točke vrha profila. Dubina dna profila Z_v je udaljenost između osi x i najniže točke dna profila kao što je prikazano na slici 6-3.



Slika 6-3 Element profil površine [29]

Maksimalna visina profila P_z , R_z ili W_z (slika 6-3) zbroj je najveće visine izbočine profila Z_p i najveće dubine udubine profila Z_v na duljini vrednovanja. ISO-norma iz 1984. godine koristi simbol R_z s drugačijom definicijom pa se mora paziti pri korištenju postojećih tehničkih crteža i dokumentacije jer razlike nisu uvijek zanemarivo male.



Slika 6-4 Maksimalne vrijednosti na profilu hrapavosti [29]

Srednje aritmetičko odstupanje mjenog profila P_a , R_a ili W_a aritmetički je prosjek apsolutne ordinatne vrijednosti $Z(x)$ na referentnoj duljini

$$P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

Pri tome je $l=l_p$, l_r ili l_w , ovisno o parametru.

6.2. Stupnjevi i razredi hrapavosti površina

Sljedeća slika zorno daje pregled stupnjeva i razreda hrapavosti površina strojnih dijelova pri različitim obradama.

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

Slika 6-5 Stupnjevi i razredi hrapavosti površina [29]

Brušenje se često koristi u završnim stadijima strojne obrade kako bi se dobile površine s uskim tolerancijama. Kao što je gore navedeno u tablici, raspon kvaliteta obrađenih površina jasno je definiran. Kada se brusni kotač redovito oštiri tako da potrošenost abraziva više ne predstavlja značajnu varijablu, površinska hrapavost primarno ovisi o režimima brušenja, brusu i metodi oštrenja brusu.

Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine u okruglom brušenju uobičajeno se mogu dobro procijeniti jednadžbom oblika [1]:

$$R_a = R_1 \left[\frac{n_o a_p}{n_b} \right]^x \quad (1)$$

gdje je n_o brzina vrtnje obratka, n_b brzina vrtnje brusnog kotača, a_p dubina brušenja, dok su R_I i x empirijski koeficijenti za odabrani tip brusa.

Eksponent x uobičajeno se kreće između vrijednosti 0,15 i 0,6. Dubina brušenja a odgovara dubini prilikom tzv. faze iskrenja kada se i dalje nastavlja uklanjati odvojena čestica, ali se njihova debljina smanjuje kako se događa plastična deformacija. Povećavanjem razdoblja iskrenja dolazi do generalnog poboljšanja kvalitete obrađene površine. Ako dođe do potpune pojave iskrenja, tako da je dubina brušenja smanjena na 0 prije nego što je brusni kotač povučen, konačna hrapavost se smanji za otprilike polovicu [1].

6.3. Metode mjerenja površinske hrapavosti

Kvaliteta obrađenih površina najčešće se mjeri uređajima s profilom igle ili profilometrom, uređaj inače sličan fonografu koji pojačava vertikalno kretanje igle koja se kreće po površini. Izlazna varijabla profilometra je dvodimenzionalni profil izmjenjenog segmenta površine, pojačan u smjerovima normalno i uzduž površine kako bi se naglasile površinske konture i nesavršenosti. Hrapavost površina može se određivati se na osnovi nekoliko metoda:

- direktnim ili kontaktnim metodama
- tehnikama uspoređivanja
- beskontaktnim metodama
- metodama mjerenja profila

S obzirom da se u praktičnom dijelu ovoga rada koristila kontaktna metoda za provjeru hrapavosti površine, toj metodi će se dati naglasak i objašnjenje u nastavku.

Prema [30], kod instrumenata koji funkcioniraju na principu kontaktne metode, profil se dodiruje ticalom koje predstavlja jedini dio instrumenta koji je u kontaktu s mjerenim komadom. Pritom je važno da su dimenzije i oblik ticala izabrani na odgovarajući način kako bi se izbjegli negativni utjecaji na rezultate mjerenja. Idealno ticalo je konusnog oblika s kutem od 60 ili 90 stupnjeva i završava sa sfernim vrhom. Sferni vrh se bira prema dimenzijama 1,2,5 μm iz tablica. Sila mjerenja je 0,75 mN i obično ju preporučuje proizvođač prema normi ISO 3274:1996 i ne treba ju mijenjati za vrijeme mjerenja. Ticalo na rezultate mjerenja može utjecati na nekoliko načina:

- ticalo većeg promjera ne prodire u sva udubljenja i ne mjeri njihovu visinu
- sferno ticalo prelazi preko vrhova uzvišenja te se događa efekt zaokruživanja na vrhove uzvišenja

6.4. Tolerancije oblika

Kako bi se osigurala kvaliteta konačnog proizvoda nije dovoljno definirati samo tolerancije duljinskih izmjera. Potrebno je unutar granica tolerancija spriječiti i druge promjene koje se odražavaju na točnost geometrije strojnog dijela. Općenito (prema ISO 1101), ove se tolerancije zovu tolerancije oblika, orijentacije, smještaja i vrtnje, tj. geometrijske tolerancije. Prema karakteristikama koje se toleriraju i načinu na koji se definiraju, tolerirana područja mogu biti:

- površina unutar kružnice
- površina između dvije koncentrične kružnice
- površina između dvije ekvidistantne crte ili dva paralelna pravca
- prostor unutar valjka
- prostor između dva koaksijalna valjka
- prostor između dvije ekvidistantne ravnine ili dvije paralelne ravnine
- prostor unutar paralelepipeda [29]

Vrste značajki i tolerancija		Svojstvo	Simbol
Pojedinačne značajke	Tolerancije oblika	Pravocrtnost	
		Ravnost	
		Kružnost	
		Cilindričnost	
Pojedinačne i povezane značajke	Tolerancije oblika	Oblik crte	
		Oblik plohe	
Povezane značajke	Tolerancije orijentacije	Paralelnost	
		Okomitost	
		Kut (nagib)	
	Tolerancije smještaja	Položaj (pozicija)	
		Koncentričnost i koaksijalnost	
		Simetričnost	
	Tolerancije vrtnje	Kružnost vrtnje	
		Ravnost i kružnost vrtnje	

Slika 6-6 Tolerancije oblika [29]

7. OPTIMIZACIJA STROJA ZA OKRUGLO BRUŠENJE

Temeljna svrha ovog diplomskog rada bila je pomoć u razumijevanju i optimizaciji stroja za okruglo brušenje prilikom završne obrade cilindričnih strojnih dijelova. Pri tome, najveći problem u dotadašnjem procesu brušenja predstavljala je obrada sivog lijeva, kod kojeg je zbog njegove niske duktilnosti, bilo iznimno teško dobiti zahtijevanu kvalitetu obrađene površine. Nadalje, zbog niske žilavosti sivog lijeva dolazilo bi do zapunjivanja brusnog kotača odvojenim česticama materijala nakon čega bi se izgubilo svojstvo reznih oštrica abraziva te se daljnjim obrađivanjem materijal nije skidao s površine obratka.

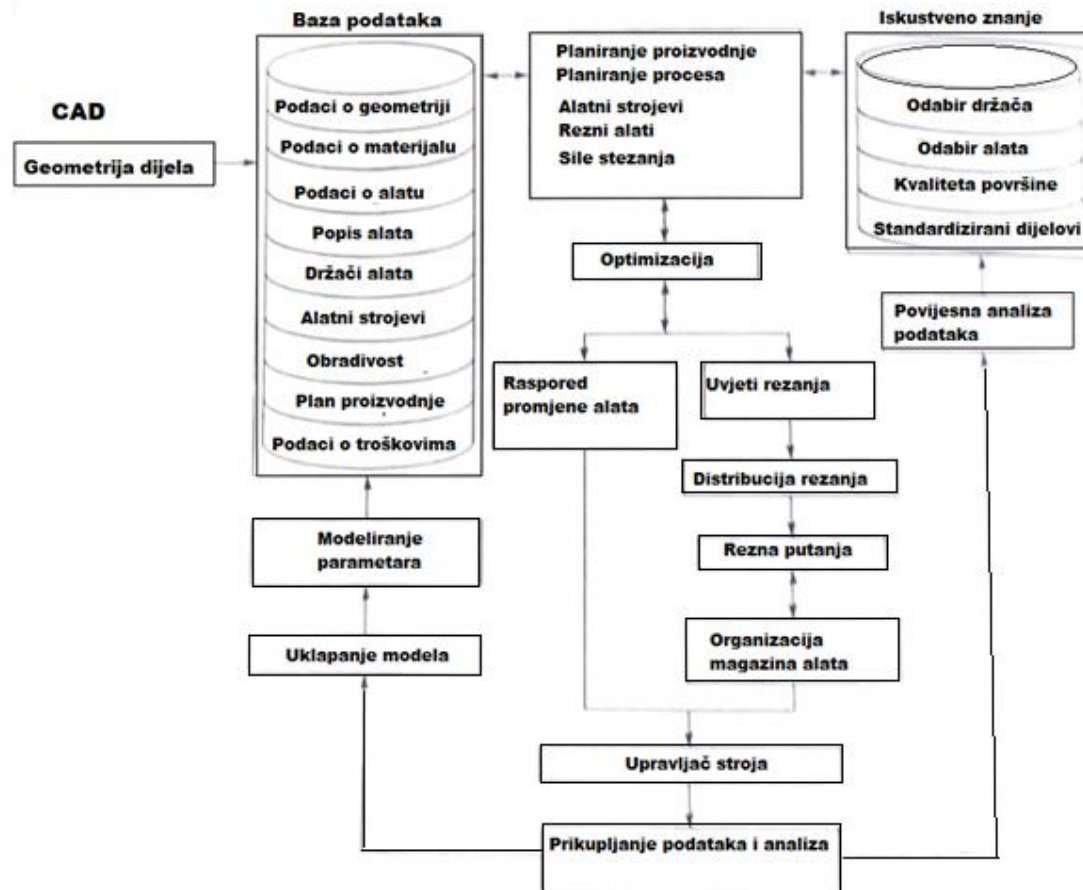
Također, važno je skrenuti pozornost i na ekonomsku korist prilikom optimizacije promatranog procesa, kako procesa okruglog brušenja tako i bilo kojeg drugog procesa. Alatni stroj, alat i tehnologije izrade u pripadajućoj aplikaciji u idealnom slučaju trebale bi rezultirati procesom koji kao izlaz daje zahtijevanu kvalitetu dijela koji se obrađuje s minimalnim troškovima proizvodnje koje ta kvaliteta zahtijeva. Tradicionalna metoda proizvodnje novih dijelova predodređena je prijašnjim iskustvima kod izrade sličnih dijelova ili preporukama iz priručnika. Ovakvi izvori pružaju uvjerljive polazišne točke, ali rijetko daju najučinkovitiji pristup. Nadalje, procesi rezanja obrade odvajanjem obuhvaćaju mnoštvo varijacija i poremećaja koji se samo djelomično mogu uzeti u obzir u fazi projektiranja.

U operacijama s velikim obujmom ponavljanja, promjene se kontinuirano rade kako se iskustvo s određenim dijelom procesa akumulira. To često zna biti naporan proces koji rezultira neučinkovitim praksama koje se koriste tijekom većeg dijela proizvodnog ciklusa.

U današnjem svijetu proizvodnje gdje se koriste visoko automatizirani i računalom upravljanim strojevima, postoji ekonomska potreba za upravljanjem istih na efikasniji način s ciljem postizanja maksimalne produktivnosti.

Odabir optimalnih procesnih parametara direktno utječu na produktivnost, troškove proizvodnje te kvalitetu proizvoda. Troškovi proizvodnje po napravljenom dijelu sačinjeni su od nekoliko komponenti, uključujući troškove strojne obrade, alata, izmjene alata, njegovog postavljanja kao i održavanja. Ovi troškovi značajno variraju s brzinom rezanja.

Pri pojedinim vrijednostima brzine rezanja, troškovi dostižu minimum, što odgovara optimalnoj brzini rezanja [1]. Slika 7-1 slikovito prikazuje optimizaciju procesa strojne obrade.



Slika 7-1 Optimizacija procesa strojne obrade [1]

Neki od osnovnih faktora koji utječu na proces optimizacije jesu materijal obratka i zahtijevana kvaliteta obrađivane površine, vrsta i struktura alatnog stroja, materijal i geometrija rezne oštrice, držač alata, sredstvo za podmazivanje i hlađenje te uvjeti rezanja.

Nadalje, parametri obrade poput brzine rezanja, posmične brzine i dubine brušenja također imaju veliki utjecaj na performanse strojne obrade. Navedeni parametri obrade pratit će se i nastojati optimizirati u eksperimentalnom dijelu ovog rada.

7.1. Poslovna kompanija HSTec

Još od 1997. HSTec razvija inovativna i prilagođena rješenja za razne industrijske primjene. Zahvaljujući njihovim glavnim načelima: vrhunskoj kvaliteti, iznimnoj preciznosti, prilagodljivosti i neprestanom usavršavanju postali su vodeći stručnjak u tehnologiji motorvretena i industrijskoj automatizaciji. Njihov se portfelj proizvoda, rješenja i usluga kreće od projektiranja i proizvodnje motorvretena do razvoja naprednih rješenja industrijske automatizacije, te usluga servisa i popravka vretena.

Početkom kolovoza 2022. HSTec se pridružuje CHIRON Grupi. CHIRON Grupa, sa sjedištem u Tuttlingenu, Njemačka, je specijalizirana za CNC-upravljanje, vertikalne obradne centre za obrade glodanjem i tokarenjem, te za prilagođena rješenja i automatizaciju, digitalne proizvode i usluge. HSTec nudi uslugu proizvodnje malih serija visoko preciznih pozicija izrađenih po narudžbi, proizvedenih u našem suvremenom pogonu opremljenom visoko preciznim horizontalnim i vertikalnim obradnim centrima, CNC tokarskim i glodaćim strojevima, strojevima za precizno cilindrično i površinsko brušenje te koordinatnim mjernim strojevima [13].

7.2. Problematika i ciljevi optimizacije

Prije zadavanja teme ovog diplomskog rada, radnici unutar proizvodnog pogona tvrtke bi se gotovo na dnevnoj bazi susretali s problemima pri brušenju različitih materijala različitim vrstama brusnih ploča. Zbog relativno velikog broja parametara koji su se trebali dovesti u korelaciju kako bi kvaliteta pojedine površine bila zadovoljena, često su se događale greške koje bi nerijetko rezultirale škartom. Pritom je najveći problem u procesu okruglog brušenja predstavljao materijal sivog lijeva zbog svojih svojstava niske žilavosti i smanjene duktilnosti. Kako bi se izbjeglo daljnje provođenje postupka brušenja na temelju iskustva radnika i njegove ispraksiranosti za stroj, pribjeglo se rješenju proučavanja priručnika proizvođača stroja za okruglo brušenje u kojoj je dan niz parametara i preporuke kojih bi se trebalo držati.

Nakon duljeg proučavanja priručnika i izraza danih u njemu, fokus se suzio na četiri glavna parametra izražena preko osnovnih formuli i iskustvenih vrijednosti, dok su ostali pomoćni parametri dobiveni preko dodatnih izraza stavljeni u drugi plan zbog nastalih razilaženja u vrijednostima prilikom modeliranja plana za glavni eksperiment. Nadalje, osnovna misao vodilja prilikom rješavanja problema optimizacije ovog procesa bila je jednoznačno očitavanje svih parametara za ulazne vrijednosti koje su unaprijed definirane kako bi se tvrtki

omogućila izrada svojevrsnog praktičnog priručnika s kojim bi se značajno uštedilo vrijeme i olakšao posao.

7.3. Osnovni parametri procesa

Kada se govori o osnovnim parametrima procesa okruglog brušenja, bilo da se radi o vanjskom ili unutarnjem, najprije se podrazumijeva učestalost vrtnje brusa dana izrazom iz priručnika [23]:

$$n_b = \frac{v_b \cdot 60 \cdot 1000}{d_b \cdot \pi} \quad (2)$$

gdje je:

n_b - učestalost vrtnje brusa, o/min

d_b - promjer brusa, mm

v_b - brzina na površini brusa, m/s.

Učestalost vrtnje obratka n_o , dana je izrazom [23]:

$$n_o = \frac{1000 \cdot v_o}{d_o \cdot \pi} \quad (3)$$

gdje je:

v_o - brzina na površini obratka, m/min,

d_o - promjer obratka, mm

v_f - brzina posmaka v_f , mm/min [23]:

$$v_f = n_o \cdot f \quad (4)$$

f – posmak, mm.

Konačno, dubina brušenja a_p , korištena je prema iskustvenim vrijednostima u dogovoru s inženjerom, inače voditeljem proizvodnog pogona i operatera stroja, ovisno o vrsti brušenja koja se provodila.

7.4. Pomoćne formule

Kako bi se odredile vrijednosti posmaka potrebne za izračun posmične brzine, pribjeglo se izrazu

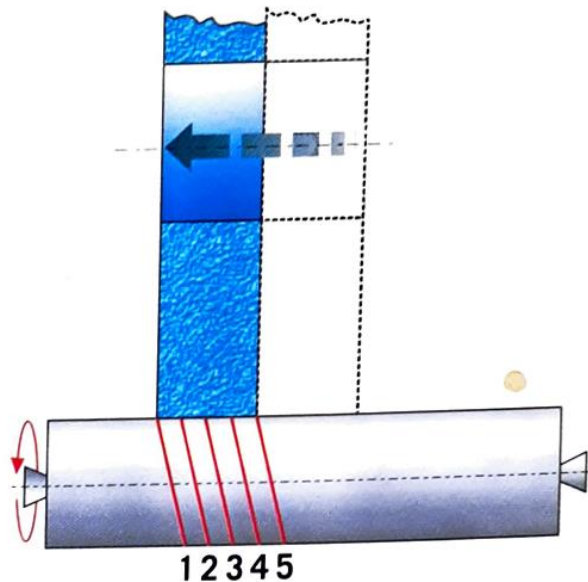
$$f = \frac{b}{u} \quad (5)$$

gdje je:

b - širina brusa, mm

u - broj okretaja obratka dok se brusni kotač ne pomakne uzdužno za dužinu koja odgovara njegovoj širini (prikazano na slici 7-2).

Vrijednosti parametra u kreću se u intervalu između 3 i 4 za grubo brušenje, dok za fino brušenje iznose između 5 i 6.



Slika 7-2 Preklopni faktor [23]

Kao što je već gore napomenuto, korištenje idućih izraza u nastavku s ciljem optimizacije cijelog procesa dovelo je do nepodudaranja između vrijednosti dobivenih preko osnovnih formula te vrijednosti dobivenih preko pomoćnih izraza.

Prvi takav parametar sadržan je u formuli za prosječnu debljinu odvojene čestice, h_p , mm i definiranoj prema:

$$h_{pr} = \frac{a_p \cdot v_o (m/min)}{v_b \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 60} \quad (6)$$

Nadalje, u priručniku su dane preporučene vrijednosti za posmak brusnog kotača u ovisnosti o njegovoj širini prikazane u tablici 2 preko kojeg se kasnije izračunom dolazi do posmične brzine.

Tablica 2 Vrijednosti posmaka [23]

Grubo	Srednje	Fino
2/3 do 3/4	1/4 do 1/3	1/10 do 1/5
širine brusnog kotača (b)		

Posljedni parametar koje je davao nepodudarne vrijednosti prilikom izračuna brzine vrtnje brusa je tzv. omjer brzina q:

$$q = 60 \times \frac{v_b \left(\frac{m}{s}\right)}{v_o \left(\frac{m}{\min}\right)} = \frac{n_b \cdot d_b}{n_o \cdot d_o} \quad (7)$$

Preporučene vrijednosti kreću se u intervalima navedenim u tablici 3.

Tablica 3 Omjer brzina [23]

	Grubo	Srednje	Fino
Vanjsko	60-90	90	90-120
Unutarnje	60-70	65-85	80-90

7.5. Pristup problemu

Pri dosada navedenom, optimizaciji procesa najprije se pristupilo egzaktno kako bi se dobile točne vrijednosti promatranih parametara. U Excel tablicu unesene su sve preporučene vrijednosti za materijal sivi lijev iz priručnika. Polazni parametri koji su unaprijed definirani za potrebe ispitivanja prilikom unutarnjeg okruglog brušenja jesu maksimalna vrtnja držača brusnog kotača koja iznosi 40 000 okretaja po minuti, unutarnji promjer obratka $d_o=80$ mm, promjer brusnog kotača $d_b=50$ mm kao i širina kotača koja iznosi $b=40$ mm.

Tablica 4 Režimi obrade

UVJETI/PARAMETRI OBRADE	GRUBO		SREDNJE		FINO	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Brzina obratka, v_o [m/min]	25,00	40,00	20,00	30,00	15,00	20,00
Brzina busa, v_o [m/s]	35,00	45,00	35,00	45,00	35,00	45,00
Omjer brzina, q	60,00	70,00	65,00	85,00	80,00	90,00
Prosječna debljina odvojene čestice, h_{pr} [mm]	0,00020	0,00050	0,00007	0,00010	0,00003	0,00007
Dubina brušenja, a_p [mm]	0,010	0,050	0,005	0,010	0,002	0,005
Posmak u ovisnosti o širini brusa f'	0,667	0,750	0,250	0,333	0,100	0,200
Posmak f' za danu širinu brusa b	26,667	30,000	10,000	13,333	4,000	8,000
Preklonni faktor u	3,00	4,00	3,75	4,25	5,00	6,00
Osnovne i pomoćne formule						
$a_p=f(h_{pr},v_o,v_o)=(h_{pr}*60*v_o/v_o)$ [mm]	0,0105	0,0540	0,0049	0,0135	0,0032	0,0126
$n_o=f(v_o,d_o)=(v_o*1000)/(d_o*3,14)$	99,5223	159,2357	79,6178	119,4268	59,7134	79,6178
$n_b=f(v_b,d_b)=(v_b*60*1000)/d_b*\pi$ [min ⁻¹]	13375,7962	17197,4522	13375,7962	17197,4522	13375,7962	17197,4522
$n_b=f(q,d_b,n_o,d_o)=((q*n_o*d_o)/d_b)$ [min ⁻¹]	9554,1401	17834,3949	8280,2548	16242,0382	7643,3121	11464,9682
Posmak po okretu [mm/rev], $f=f(b,u)=(b/u)$ [mm/rev]	13,3333	10,0000	10,6667	9,4118	8,0000	6,6667
Posmična brzina, $v_t=f(n_o,f)$, $v_t=n_o*f$, mm/min	1326,9639	1592,3567	849,2569	1124,0165	477,7070	530,7856
Posmična brzina, $v_t'=f(n_o,f)$, $v_t'=n_o*f'$, mm/min	2653,9278	4777,0701	796,1783	1592,3567	238,8535	636,9427

Nakon opetovane provjere naredbi u programu Excel zbog nastalih razlika u dobivenim rezultatima za iste parametre, odbacio se pomoćni izraz omjera brzina, a posmičnoj brzini dobivenoj preko faktora preklopa u , dala se prednost pred istom brzinom dobivenom preko preporučenih tabličnih vrijednosti u ovisnosti o širini brusa b . Dubina brušenja je skoro u svim slučajevima postigla podudaranje, osim u slučaju za fino brušenje, zbog čega se prednost ipak dala preporučenim tabličnim vrijednostima. Izlazni parametri prikazani su u tablici 5.

Tablica 5 Izlazni parametri

IZLAZNI PARAMETRI:	GRUBO		SREDNJE		FINO	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Brzina vrtnje brusnog kotača, n_b [min ⁻¹]	13376	17197	13376	16242	13376	11465
Brzina vrtnje obratka, n_o [min ⁻¹]	100	159	80	119	60	80
Dubina brušenja, a_p [mm]	0,0105	0,0500	0,0050	0,0100	0,0032	0,0050
Brzina posmaka, v_t [mm/min]	1327	1592	849	1124	478	531

S obzirom da je ovakav egzaktni pristup vrlo nepraktičan za primjenu u praksi, kao idući korak u procesu optimizacije pristupilo se modeliranju grafova u programu Matlab za praćenje pojedinih parametara u ovisnosti o promjeru brusa, promjeru obratka (obrađivanog provrta) te širini brusa.

7.6. Modeliranje sintakse

Na idućim slikama bit će prikazan kod unutar programa Matlab s ciljem generiranja potrebnih grafova koji će olakšati parametrizaciju i odabir režima obrade u budućim procesima.

```
1
2     dbvect=15:5:80; % vektor parametara
3     dbvect=dbvect'; % transponiranje
4     dovect=100:50:400; % nezavisna varijabla
5
6     n=length(dbvect);
7     m=length(dovect);
8
9     db=zeros(n,m);
10    do=zeros(n,m);
11    for i=1:m
12        db(:,i)=dbvect;
13    end
14
15    for i=1:n
16        do(i,:)=dovect;
17    end
18
19    b=50;
20    bvektor=20:5:50;
21
22    VoMIN=10;
23    VoMAX=40;
24    VbMIN=30;
25    VbMAX=45;
26    apMIN=0.01;
27    hprMIN=0.0002;
28    apMAX=0.05;
29    hprMAX=0.0005;
30    umin=3;
31    umax=4;
32    qmin=60;
33    qmax=70;
34
35    apMIN1=VbMIN*60*hprMIN/VoMAX; %skalar
```

Slika 7-3 Matlab 1. dio koda

```
36
37     apMINfinal=max(apMIN,apMIN1); %skalar
38
39     apMAX1=VbMAX*60*hprMAX/VoMIN; %skalar
40
41     apMAXfinal=min(apMAX,apMAX1); %skalar
42
43     nomin=VoMIN*1000./(do*3.14); % matrica, ovisi samo o do
44
45     nomax=VoMAX*1000./(do*3.14); % matrica, ovisi samo o do
46
47     nbmin=(VbMIN*60*1000)/(db*3.14); % matrica, ovisi samo o db
48
49     nbmin1=(qmin*nomin.*do)/(db);
50
51     nbMINfinal=max(nbmin, nbmin1); % matrica MAX
52
53     nbmax=(VbMAX*60*1000)/(db*3.14); % matrica, ovisi samo o db
54
55     nbmax1=(qmax*nomax.*do)/(db); % matrica, ovisi o db i do
56
57     nbMAXfinal=min(nbmax, nbmax1); % matrica MIN
58
59     fmin=b/umin; %skalar
60     fmax=b/umax; %skalar
61
62     vfmin=nomin*fmin; % matrica, ovisi samo o do
63     vfmax=nomax*fmax; % matrica, ovisi samo o do
64
65     %% grafovi - nb no ap vfa
66
67     % ap ne ovisi niti o do niti o db, graf bi bio točka
68
69     % vf - ovisi samo o do
70     subplot (2,2,1)
71     plot(do(1:).vfmin(1:))
```

Slika 7-4 Matlab 2. dio koda

```
72 hold on
73 plot(do(1,:),vfmax(1,:))
74 plot(do(1:), (vfmax(1:)+vfmin(1:))/2)
75 grid on
76 title ('Brzina posmaka vf za b=40 mm [mm/min]')
77 legend('min','max')
78 xlabel("promjer obratka do (mm)")
79 ylabel("brzina posmaka vf (mm/min)")
80
81 %nw - ovisi samo o do
82 subplot (2,2,2)
83 plot(do(1:),nomin(1:))
84 hold on
85 plot(do(1:),nomax(1:))
86 plot(do(1:), (nomax(1:)+nomin(1:))/2)
87 grid on
88 title ('Brzina vrtnje obratka no[okr/min]')
89 legend('min','max')
90 xlabel("promjer obratka do (mm)")
91 ylabel("brzina vrtnje obratka no (min-1)")
92
93 %nb - ovisi formalno i o do i o db, ali na kraju ispadne samo o do -vidi
94 %gore
95 subplot (2,2,3)
96 plot(db(:,1),nbMINfinal(:,1))
97 hold on
98 plot(db(:,1),nbMAXfinal(:,1))
99 plot(db(:,1), (nbMINfinal(:,1)+nbMAXfinal(:,1))/2)
100 grid on
101 title ('Brzina vrtnje brusnog kotača[okr/min]')
102 legend('min','max')
103 xlabel("promjer brusa db(mm)")
104 ylabel("brzina vrtnje brusnog kotača nb(min-1)")
105
106 sgtitle('Režimi rada')
107 hold off
```

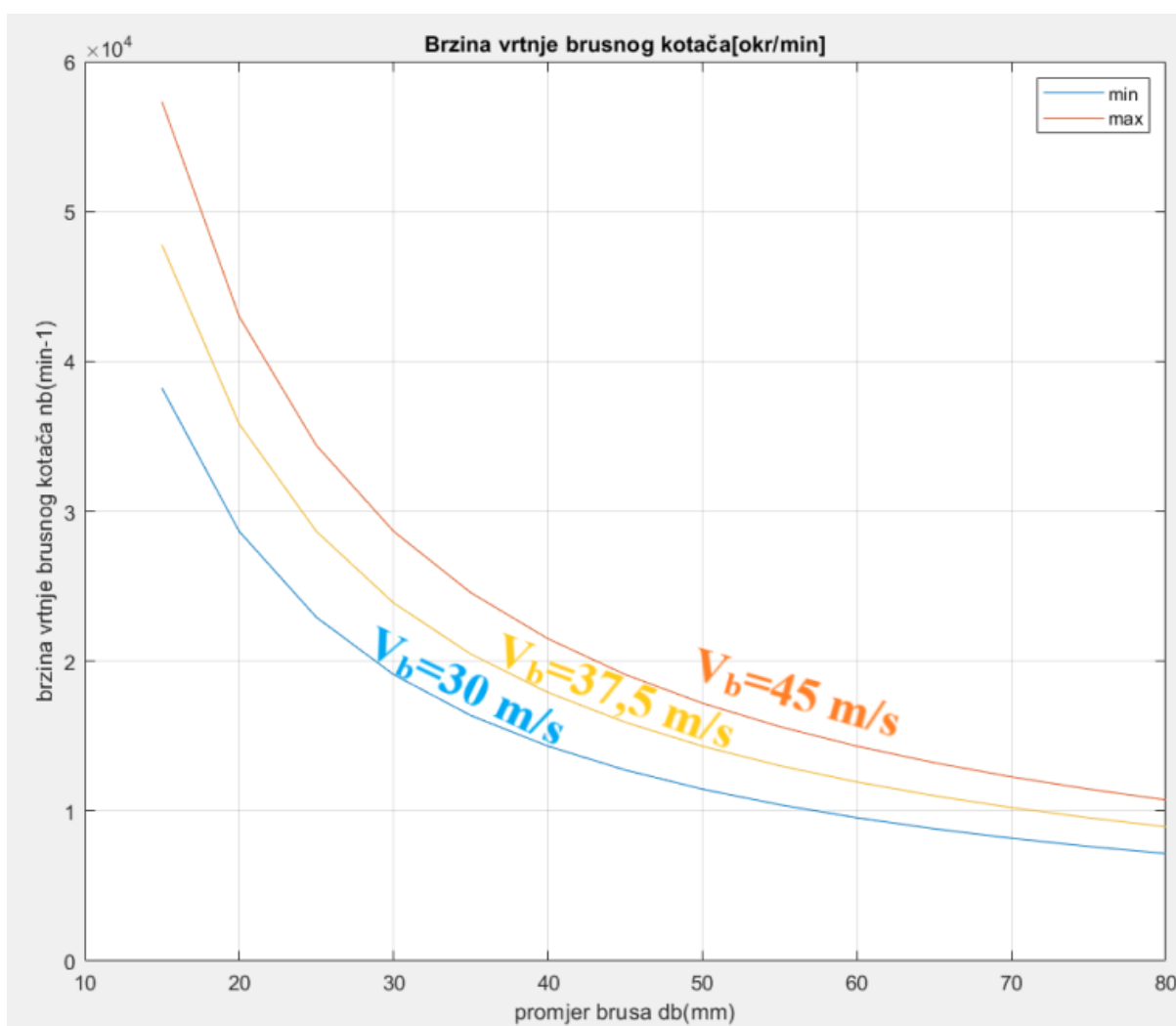
Slika 7-5 Matlab 3. dio koda

```
107 hold off|
108
109 %Druga slika
110 figure(2)
111 bvektor=20:5:50;
112 fmin2=bvektor/umin;
113 for i=1:7
114     vfmin2(i,:)=nomin(i,:)*fmin2(i);
115 end
116 fmax2=bvektor/umax;
117 for i=1:7
118     vfmax2(i,:)=nomin(i,:)*fmax2(i);
119 end
120 hold on
121 subplot (2,1,1)
122 for i=1:7
123     plot(do(1,:),vfmin2(i,:))
124     hold on
125 end
126 grid on
127 title ('Brzine posmaka prilikom grubog brušenja za različite širine brusa
128 xlabel("promjer obratka do(mm)")
129 ylabel("brzina posmaka vf(mm/min)")
130 legend('20mm','25mm','30mm','35mm','40mm','45mm','50mm','FontSize',14)
131 subplot (2,1,2)
132 for i=1:7
133     plot(do(1,:),vfmax2(i,:))
134     hold on
135 end
136 grid on
137 title ('Brzine posmaka prilikom finog brušenja za različite širine brusa
138 xlabel("promjer obratka do (mm)")
139 ylabel("brzina posmaka vf (mm/min)")
140 legend('20mm','25mm','30mm','35mm','40mm','45mm','50mm','FontSize',14)
141 sgtitle('Brzine posmaka prilikom različitih finoća brušenja')
```

Slika 7-6 Matlab 4. dio koda

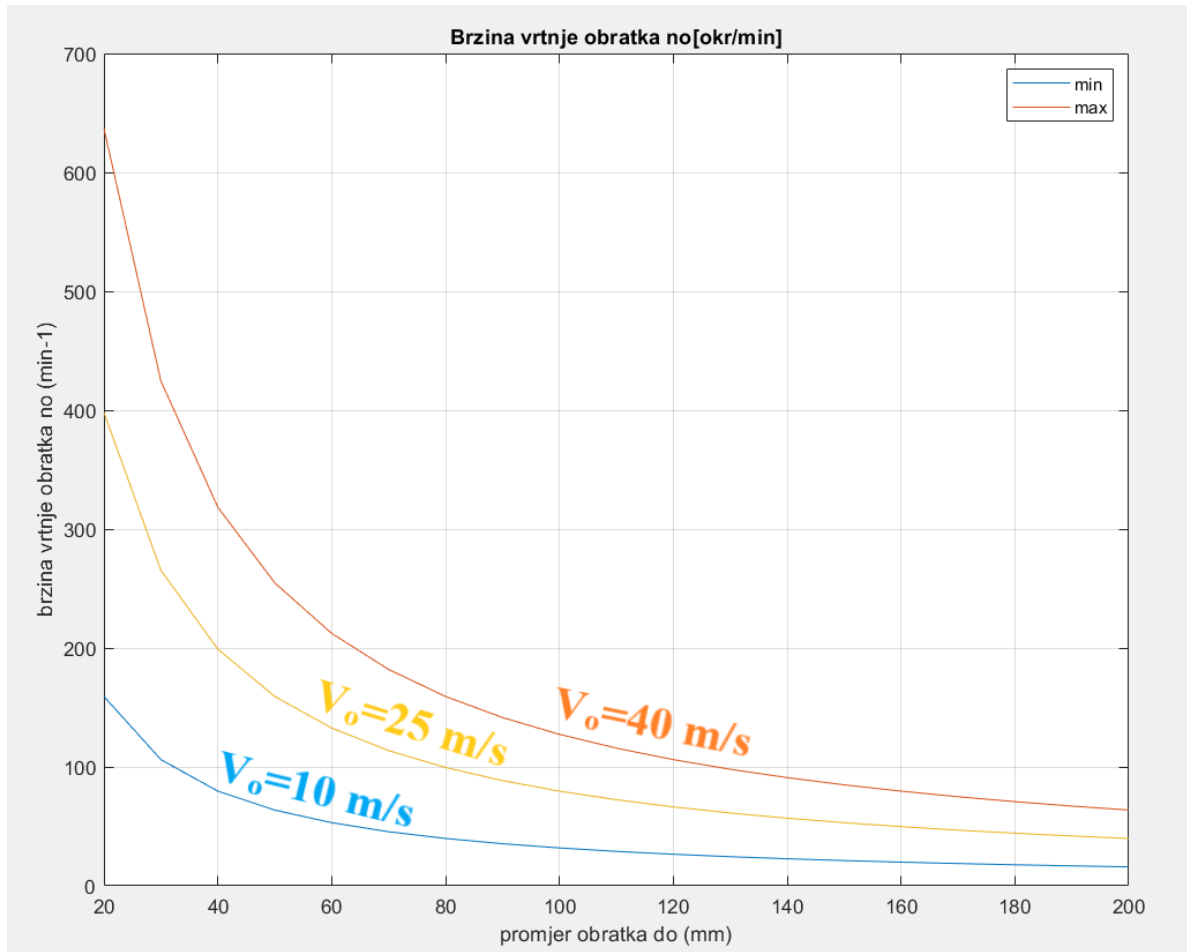
7.7. Generirani grafovi

Prema preporučenim vrijednostima za brzine rezanja brusa, generirani su sljedeći grafovi koji se odnose na unutarnje okruglo brušenje. Slika 7-7 prikazuje ovisnost brzine vrtnje brusa o promjeru brusa koji je pričvršćen na držač alata. Riječ je o matematičkoj krivulji hiperbole koja ima svojstvo da je apsolutna vrijednost razlike udaljenosti svake njezine točke od dva zadana fokusa konstantna. Krivulje su iscrtane za najčešće vrijednosti koje se mogu susresti u praksi, redom za maksimalnu i minimalnu brzinu rezanja u procesu brušenja, ovisno o kojem se materijalu i vrsti brušenja radi (Slika 7-7).



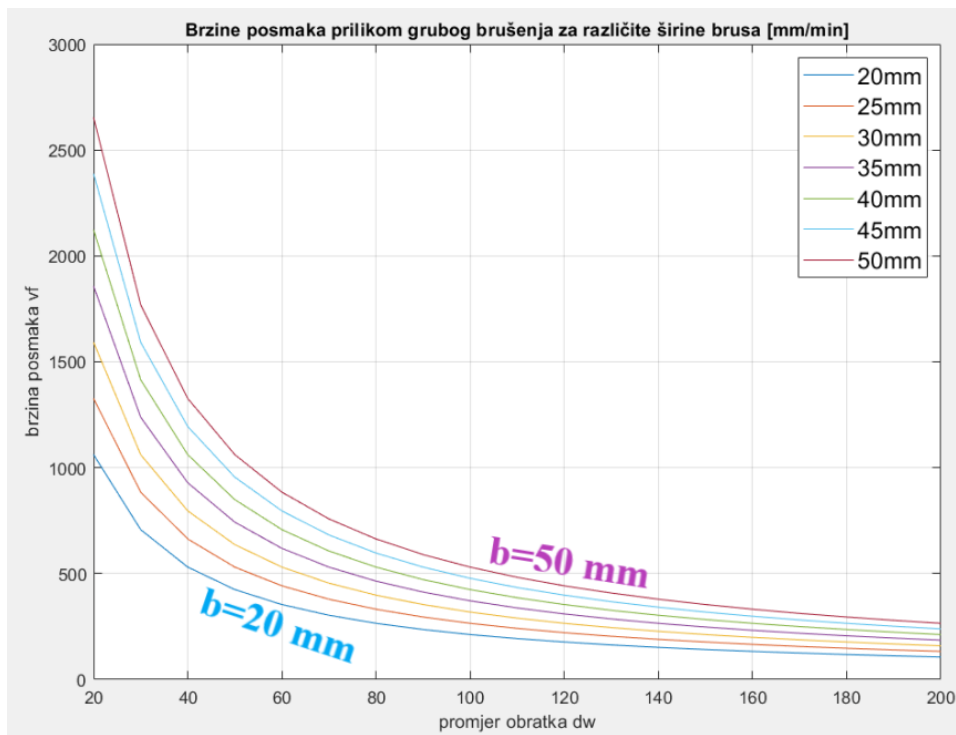
Slika 7-7 Brzina vrtnje brusnog kotača-unutarnje brušenje

Nakon određivanja brzine vrtnje brusa slijedi određivanje brzine vrtnje obratka koja ovisi o promjeru provrta koji će se obrađivati. Pritom su krivulje dane u ovisnosti o vektoru brzine obratka na promatranjoj površini, također za neke najčešće vrijednosti koje se najviše danas koriste u praksi.

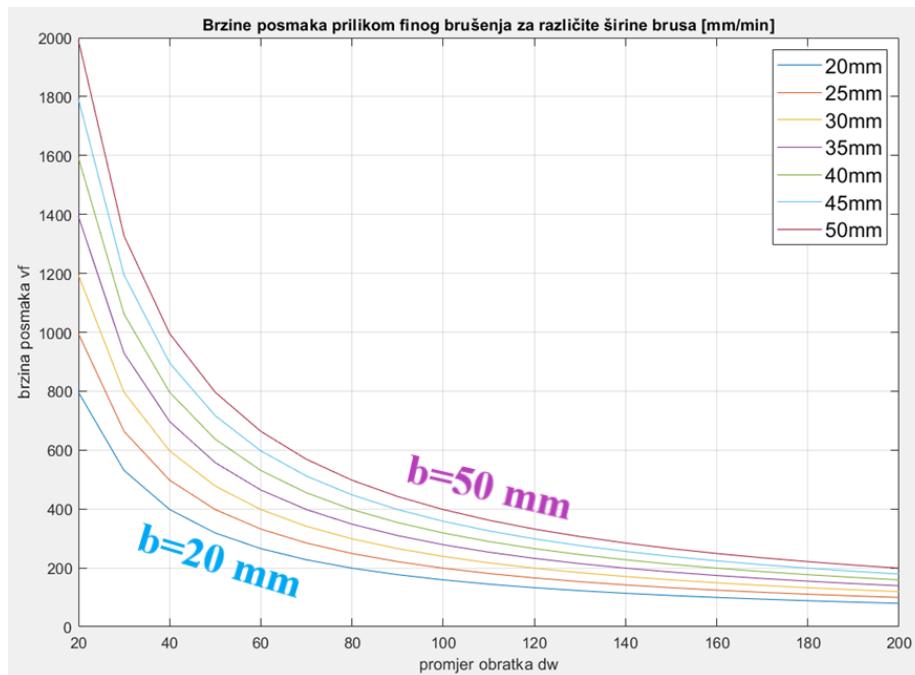


Slika 7-8 Brzina vrtnje obratka-unutarnje brušenje

Konačno, nakon što su određene brzina vrtnje brusa i obradka, u ovisnosti o širini brusa, određuje se posmična brzina uzduž obratka. Pritom su dani slučajevi za grubo i fino brušenje gdje se odmah može zamijetiti da se brzine posmaka za promatrane širine brusa smanjuju kako se približava fazi finog brušenja (slika 7-9, slika 7-10).



Slika 7-9 Brzine posmaka-unutarnje grubo brušenje



Slika 7-10 Brzine posmaka-unutarnje fino brušenje

Kao što je već ranije napomenuto, parametar dubine brušenja određivat će se prema iskustvenim vrijednostima zato što su preporučene vrijednosti u priručniku veće od onih korištenih u praksi za koje se utvrdilo da daju stabilniji tok procesa.

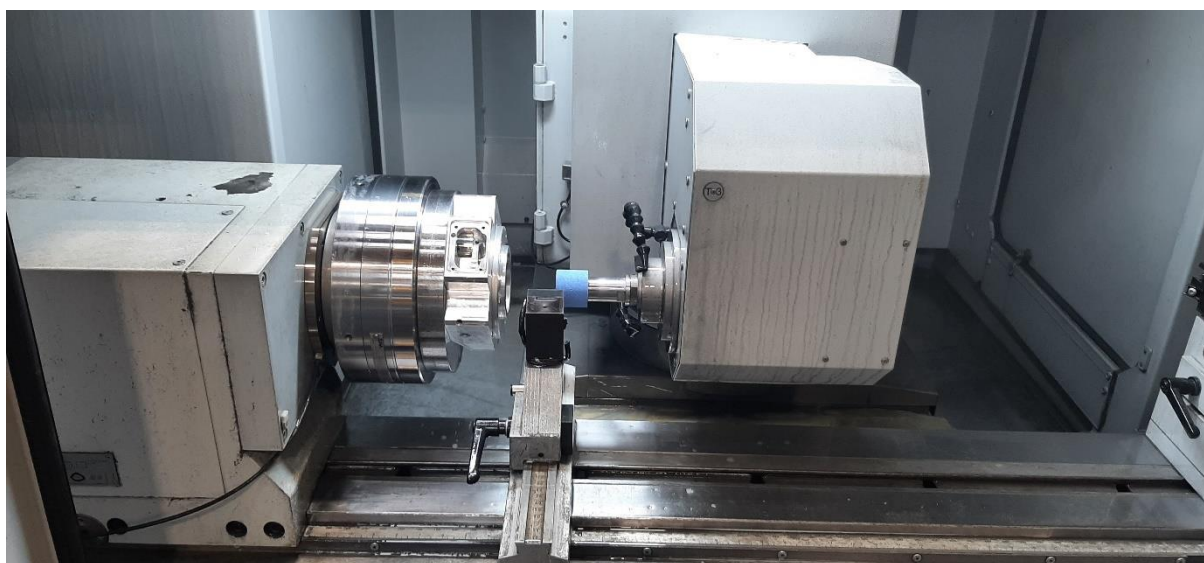
7.8. Eksperimentalni dio

Nakon generiranja potrebnih grafova, u dogovoru s voditeljem proizvodnje, inženjerom Stipom Kardumom, pristupilo se testiranju istih s ciljem praćenja toka procesa i njegove daljnje optimizacije. Alatni stroj za okruglo brušenje na kojem su se izvodila ispitivanja, Kellenberger 100, univerzalni je CNC brusni obradni centar za upotrebu u aplikacijama brušenja srednjih do velikih promjera. Nadalje, ispitivanja na obratku napravljena su iz dva različita materijala. Prvi materijal obratka na kojem su izvršena ispitivanja je poboljšani čelik 42CrMo4, čija se svojstva odgovarajuće granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i žilavosti dobivaju kaljenjem i visokim popuštanjem ($>500^{\circ}\text{C}$), dok je drugi materijal sivi lijev GG25, ranije spomenut kao problematičniji, zbog svojeg svojstva snižene duktilnosti i žilavosti. Zbog velikog obujma posla u datom trenutku unutar tvrtke kada su se ispitivanja trebala napraviti, pristupilo se samo ispitivanjima vezanim za unutarnje okruglo brušenje. Upravo okruglo unutarnje brušenje se pokazalo zahtjevnijim i kompleksnijim u odnosu na vanjsko okruglo brušenje unutar pogona, stoga je s timom dogovoreno da će se eksperiment izvršiti upravo na unutarnjem brušenju.

Za proces unutarnjeg brušenja korišteni su brusovi promjera 50 mm i širine 40 mm s temeljnom razlikom u vrstama brusa pojedinih proizvođača:

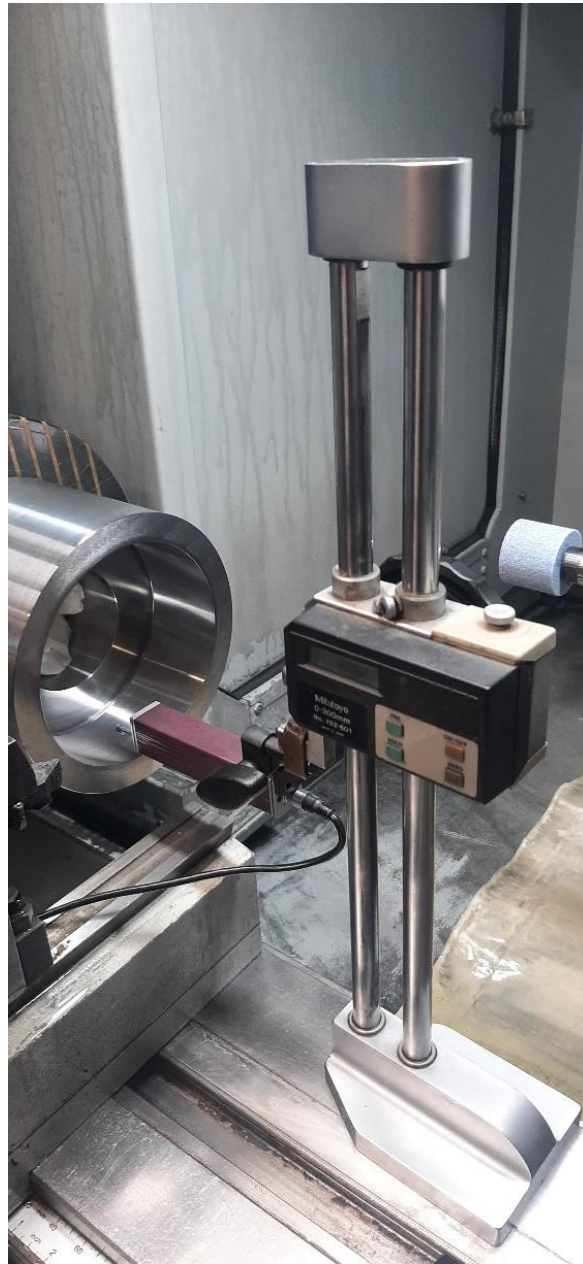
- 42CrMo4 – TYROLIT – AT60J6VCOL
- GG25 – WEILER – 82A60 / 3K7VZ12

Slika 7-12 prikazuje postavke stroja prije početka procesa unutarnjeg okruglog brušenja.



Slika 7-11 Proces unutarnjeg okruglog brušenja

Proces je podijeljen u tri dijela te shodno tome, režimi obrade su se definirali prema svakoj fazi procesa. Nakon svakog ciklusa, uređajem za ispitivanje hrapavosti površine, pratila se kvaliteta obrađene površine kao što je prikazano na slici



Slika 7-12 Ispitivanje kvalitete obrađivane površine

Također, vrijeme prilikom zauzimanja dubine brušenja iznosilo je 4 sekunde, dok je broj prolaza bez namještanja nove vrijednosti dubine brušenja iznosio 3 puta.

Isto tako, zbog inicijalnih vibracija na početku ispitivanja te sigurnijeg pristupa samoj optimizaciji procesa, parametri brzina posmaka i brzina vrtnji obratka umanjeni su za 20% od očitanih vrijednosti iz grafa.

7.9. Rezultati ispitivanja

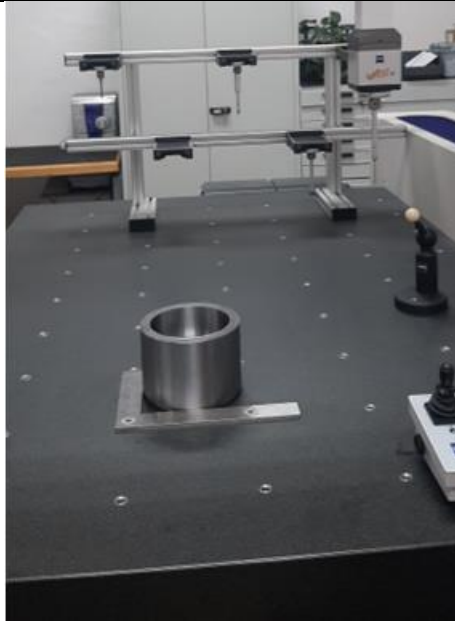
Vrsta materijala	Vrsta obrade	Promjer provrta d_o (mm)	Promjer brusnog kotača d_b (mm)	Duljina brusnog kotača b (mm)	Brzina rezanja brusnog kotača v_b (m/s)	Dubina brušenja a_p (μm)	Broj okretaja obratka n_o (min^{-1})	Posmišna brzina v_f (mm/min)	Interval između podoštavanja brusa (mm)	Cilindričnost (μm)	Površinska hrapavost R_a (μm)	Površinska hrapavost R_z (μm)	
		$\phi 80$	$\phi 140$	50	40	45	2	58	400	0,1	6	0,19	1,45
42CrMo4	FINO	$\phi 140$	50	40	45	4	34	220	0,1	5	0,21	1,61	
		$\phi 80$	50	40	45		100	470	0,1	5			
	SREDNJE	$\phi 140$	50	40	45	6	56	260	0,1	4	0,26	2,12	
		$\phi 80$	50	40	45		160	550	0,1	5			
	GRUBO	$\phi 140$	50	40	45	2	90	300	0,1	6	0,23	1,89	
		$\phi 80$	50	40	45		47	320	0,05	13			
	GG25	FINO	$\phi 140$	50	40	45	4	27	176	0,05	19	0,18	1,13
			$\phi 80$	50	40	45		80	376	0,05	15		
		SREDNJE	$\phi 140$	50	40	45	6	45	208	0,05	20	0,26	2,06
			$\phi 80$	50	40	45		128	440	0,05	19		
		GRUBO	$\phi 140$	50	40	45	2	72	240	0,05	20	0,23	1,89
			$\phi 80$	50	40	45		47	320	0,05	13		

Slika 7-13 Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici. Kao što je vidljivo, brzina rezanja brusa v_b , držala se konstantnom kroz cijeli proces za oba materijala, a stroj je u ovisnosti o brzini rezanja brušenja prilagođavao brzinu vrtnje brusa jer se promjer s vremenom smanjivao zbog trošenja. Brzina vrtnje obratka kontinuirano se smanjivala kako je proces išao prema finijoj obradi, a usporedno s njome i posmična brzina koja direktno ovisi o njoj. Za dubine brušenja redom su uzimane vrijednosti od 6 mikrometara za grubu obradu, 4 μm za srednju te 2 μm za finu, sukladno prijašnjim iskustvima operatera za strojem te voditelja proizvodnog pogona.

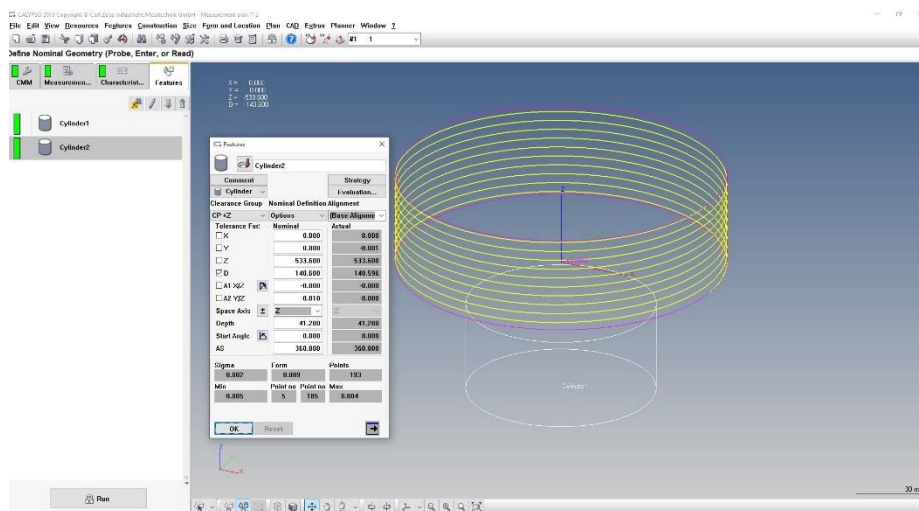
S obzirom da su Navedene vrijednosti uzete su s obzirom da su preporučene vrijednosti iz priručnika prema mišljenju tima bile prevelike. Površinska se hrapavost za materijal 42CrMo4 smanjivala približavanjem fazi finog brušenja, dok je za sivi lijev GG25 bila najbolja u slučaju za režime obrade pri srednjem brušenju.

Nakon završetka ispitivanja, obrađeni komadi poslani su u odjel za provjeru kvalitete (slika 7-14) kako bi se sa sigurnošću utvrdila provjerena odstupanja utvrđena u periodima između ciklusa.



Slika 7-14 Provjera kvalitete obrađene površine

Provjera površine napravljena je na uređaju CONTURA G2, njemačke tvrtke ZEISS, na način da se ticalo uređaja kontinuirano gibalo po spirali prikazanoj na slici 7-15 ispod. Na taj način omogućila se točnija i sigurnija provjera tolerancije oblika cilindričnosti, koja je prije optimizacije procesa pokazivala velika odstupanja od zahtijevanog.



Slika 7-15 Trajektorija ticala

Prema rezultatima iz odjela kontrole kvalitete, utvrđeno je da je tolerancija cilindričnosti za materijal poboljšanog čelika kroz sve faze procesa približno držala jednaku vrijednost od maksimalno 6 μm , dok su kod sivog lijeva, te vrijednosti bile nešto veće, upravo zbog ranije navedene slabije duktilnosti, pa je to odstupanje najmanje iznosilo kod faze finog brušenja provrta $\Phi 80$, gdje je iznosilo 13 μm .

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada od samog početka je bio praktične naravi, tj. da se inženjerskim pristupom problemu, pomogne poslovnoj kompaniji HSTec u optimizaciji procesa okruglog brušenja s tendencijom pokrivanja što većeg raspona brušenih provrta na različitim promjerima, pritom ne mijenjajući brus, čime bi se značajno uštedilo na vremenima obrade, iako je preporuka proizvođača, da se promjer brusa kreće u granicama između $\frac{2}{3}$ i $\frac{4}{5}$ promjera provrta koji se obrađuje. Prije adresiranja samog problema, radnici u proizvodnji su na dnevnoj bazi imali velikih problema u odabiru odgovarajućih režima obrade za različite promjere, pogotovo ako bi se u jednadžbu uzele i različite vrste materijala te relativno velik broj parametara na koje je potrebno obratiti pozornost prije samog početka procesa brušenja. Nakon inicijalnih odstupanja u vrijednostima za iste promatrane parametre prilikom pokušaja obuhvaćanja svih izraza u obzir kako bi se proces što više prilagodio idealnim uvjetima, problemu optimizacije pristupilo se na pragmatičan način.

Osnovni parametri procesa izraženi su preko svojih osnovnih izraza čime se povukla korelacija između ulaznih podataka koji uvjetuju proces i osnovnih parametara preko kojih se taj isti proces odvija. Na taj su se način preko promjera brusa, njegove širine i promjera provrta na radnom komadu koji se obrađuje, direktno mogli odrediti parametri poput brzine vrtnje brusnog kotača, obratka te posmična brzina kojom se brus giba uzdužno duž obratka. Nakon generiranja grafova osnovnih parametara u programu Matlab, pristupilo se ispitivanju radnih komada s ciljem dokazivanja korelacije između dobivenih režima obrade, ovisno o odabranoj vrsti brušenja, i kvalitete obrađivane površine. Ispitivanje je provedeno na prirubicama od kojih je jedna izrađena od poboljšanog čelika oznake 42CrMo4, a druga od sivog lijeva oznake GG25. U oba slučaja postignuta je kvaliteta obrađene površine Ra 0,2 μm na oba promjera koja su obrađivana, s time da su odstupanja od tolerancije cilindričnosti za materijal 42CrMo4 iznosila maksimalno 6 μm , dok je kod sivog lijeva to odstupanje bilo nešto veće i ono je iznosilo 20 μm u najgorem slučaju. Uzimajući u obzir prijašnje probleme prilikom okruglog brušenja, dobiveni rezultati ukazuju na veliki pomak u optimizaciji samog procesa, što se dalo zaključiti iz komentara cijelog tima. Uz sve navedeno može se doći do zaključka da je proces optimizacije parametara obrade kod postupka brušenja izvršen uspješno. U daljnjim istraživanjima svakako bi trebali proširiti granice režima obrade te isto napraviti i na postupku okruglog vanjskog brušenja.

LITERATURA

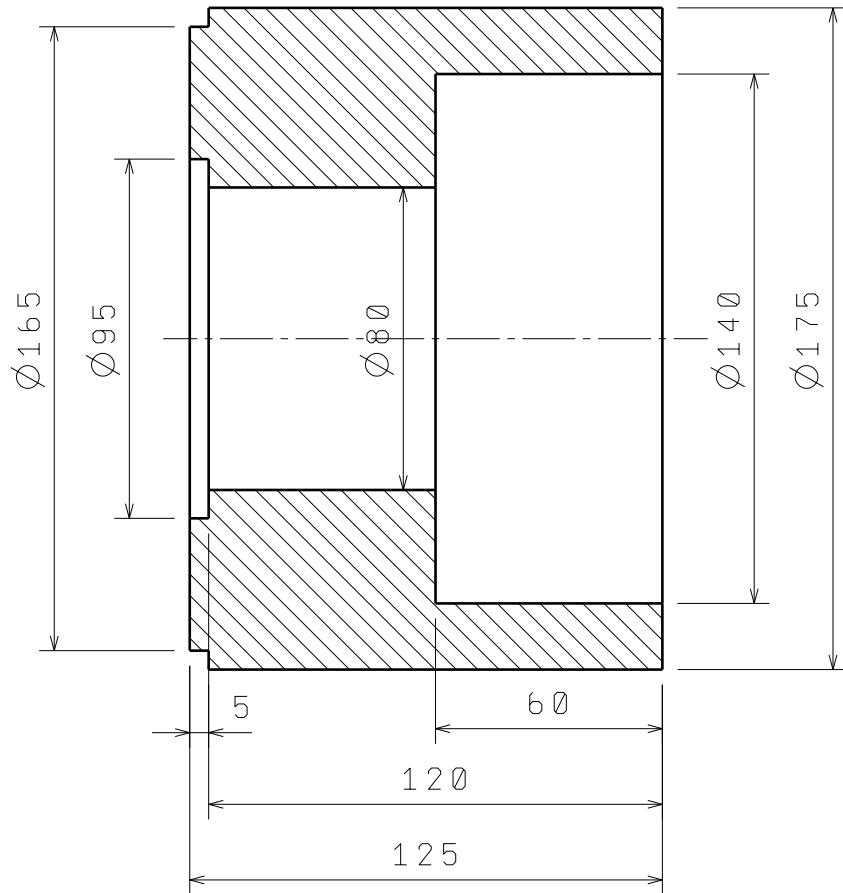
- [1] David A. Stephenson, John S. Agapiou, Metal Cutting Theory and Practice, Boca Raton, 2016.
- [2] Interna predavanja iz kolegija „Obradni strojevi“, Katedra za alatne strojeve
- [3] Konstruiranje stroja za brušenje konveksnih leća,
<https://www.leonardo-da-vinci.net/design-for-a-machine-for-grinding-convex-lenses/>
06.09.2022.
- [4] Slika primitivne brusilice,
<https://bianvn.com/leonardo-da-vinci-va-nhung-phat-minh-thay-doi-the-gioi-loai-nguoi>
06.09.2022.
- [5] Wule Zhu, Anthony Beaucamp, Compliant Grinding and Polishing: A Review
[\(PDF\) Compliant grinding and polishing: A review \(researchgate.net\)](#)
06.09.2022.
- [6] Roko Cebalo, Suvremena tehnologija brušenja, Zagreb, 1990.
- [7] Stipe Kardum, Diplomski rad, Zagreb 2013.
- [8] <https://metalcutting.com/knowledge-center/fundamentals-of-od-grinding/>
16.01.2023.
- [9] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.molemab.com%2Fen%2Fprodotti-cat%2Fwheels-for-cylindrical-grinding%2F&psig=AOvVaw1t9e6hawZWleyji3Xc3ybE&ust=1674071980558000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjhqxqFwoTCPjc_Zyz_wCFQAAAAAdAAAAABAE
17.01.2023.
- [10] <https://hcsplating.com/od-grinding-advantages/#:~:text=Benefits%20and%20Advantages%20of%20OD%20Grinding&text=OD%20grinding%20can%20also%20remove,time%20creating%20entirely%20new%20parts.>
20.01.2023.
- [11] <https://www.amonengineering.com.au/know-the-pros-and-cons-of-using-cnc-cylindrical-grinding-machines-in-precision-engineering/>
21.01.2023.

- [12] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Bru%C5%A1enje>
22.02.2023.
- [13] <https://www.hstec.hr/hr/o-nama>
15.03.2023.
- [14] <https://www.imts-exhibition.com/blog/cylindrical-grinding-machines-the-pros-and-cons-explained.html>
27.01.2023.
- [15] <https://www.superabrasivetools.com/internal-grinding-problems/>
28.01.2023.
- [16] <https://universalgrinding.com/more-about-surface-grinding/#:~:text=Surface%20grinding%20is%20used%20to,of%20it%20flat%20or%20smooth>
01.02.2023.
- [17] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020740316308268>
07.02.2023.
- [18] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6387041/#:~:text=The%20grinding%20cutting%20force%20is,grinding%20edge%20and%20a%20workpiece>
08.02.2023.
- [19] Roko Cebalo, Moderna tehnika brušenja, Zagreb 1991.
- [20] https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fcdn.emag.com%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2Fcontent%2Ftechnologies%2Fprofile-grinding_emag-su%2FProfile-Grinding-worms-rotors_GRX500H_007_ret_header.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.emag.com%2Findustries-solutions%2Ftechnologies%2Fprofile-grinding%2F&tbnid=rFJHVceeEhM_iM&vet=12ahUKEwj32L75u6z9AhWEpycCHd0IDkoQMygDegUIARDkAQ..i&docid=hrpzgIEHVbAgjM&w=1120&h=674&q=profile%20grinding&ved=2ahUKEwj32L75u6z9AhWEpycCHd0IDkoQMygDegUIARDkAQ
15.02.2023.
- [21] Damir Ciglar, autorizirana predavanja iz kolegija Obradni sustavi
- [22] https://www.allied-material.co.jp/en/products/diamond/knowledge/wheel-size_shape-display.html
19.02.2023.
- [23] Winterhur Technology Group, Handbook Cylindrical Grinding

- [24] <https://www.nortonabrasives.com/en-us/resources/expertise/grinding-wheels-self-sharpening-quality-explained>
27.02.2023.
- [25] Klocke F, Eisenblätter G. Dry Cutting. Annals of the CIRP 46/2; 1997, p. 519-526.
- [26] Christoph Baumgart, Viktor Heizer, Konrad Wegener, In-process workpiece based temperature measurement in cylindrical grinding
- [27] <https://www.extrica.com/article/21894>
05.03.2023.
- [28] Y. Wang, C. Li, B. Li, M. Yang, and X. Zhang, “Advances and recent patents in the field of grinding temperature measurement methods,” Recent Patents on Materials Science, Vol. 8, No. 1, pp. 55–68, Mar. 2015
- [29] Milan Kljajin, Milan Opalić, Inženjerska grafika, Slavonski Brod 2010.
- [30] <https://repositorij.unin.hr/islandora/object/unin%3A970/datastream/PDF/view>
10.03.2023.
- [31] <https://www.fivesgroup.com/high-precision-machines/applications/hydraulic-components>
15.03.2023.
- [32] https://www.allied-material.co.jp/en/products/diamond/knowledge/wheel-size_shape-display.html
22.02.2023.


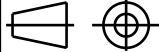
PRILOZI

I. Tehnička dokumentacija



NAPOMENA:

1. Bruse se promjeri $\varnothing 80$, $\varnothing 140$, $\varnothing 175$.
2. Tolerancije dimenzija, oblika i položaja nisu naznačene na nacrtu već će se njihove vrijednosti odrediti naknadno u eksperimentu.

	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao				
Razradio				
Crtao		Luka Jeličić		
Pregledao				
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena				Kopija
Materijal: 42CrMo4, GG25		Masa:		
	Naziv:		Pozicija:	Format:
Mjerilo originala	Prirubnica			Listova:
M1: 2	Crtež broj:		23032023	List: 1