

UTJECAJ REŽIMA OBRADJE NA KVALITETU OBRADENE POVRŠINE KOD OBRADJE VODENIM MLAZOM

Buturajac, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:627059>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-07**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Ivan Buturajac

UTJECAJ REŽIMA OBRADNE NA KVALITETU
OBRADENE POVRŠINE KOD OBRADNE
VODENIM MLAZOM

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2023

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Ivan Buturajac

UTJECAJ REŽIMA OBRADNE NA KVALITETU
OBRADENE POVRŠINE KOD OBRADNE
VODENIM MLAZOM

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Dr.sc. Srđan Medić

KARLOVAC, 2023

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom studija i potrebnom literaturom.

Također se zahvaljujem obitelji i prijateljima na podršci tijekom studija.

Karlovac, 31.08.2023.

Naslov: Utjecaj režima obrade na kvalitetu obrađene površine kod obrade vodenim mlazom

SAŽETAK

Završni rad se sastoji od dva dijela: teorijskog i praktičnog. U teorijskom dijelu su vrste vodenog mlaza i princip funkcioniranja vodenog mlaza. Uz to je još objašnjen pojam hrapavosti površine te kako režimi i brzina rezanja vodenim mlazom utječu na hrapavost površine.

U praktičnom dijelu su izvršena mjerenja hrapavosti na tri različita materijala rezana abrazivnim vodenim mlazom. Materijali su različitih debljina rezani istom brzinom adekvatnom za rezani material.

Ključne riječi: vodeni mlaz, abrazivni vodeni mlaz, brzina rezanja, hrapavost površine

Title: The Impact of Processing Regimes on the Quality of Waterjet Machined Surfaces

SUMMARY

The thesis consists of two parts: theoretical and practical. The theoretical part covers the types of water jet and the operating principles of waterjet systems. Additionally, the concept of surface roughness is explained, as well as how processing regimes and cutting speeds of waterjet affect surface roughness.

In the practical part, roughness measurements were conducted on three different materials cut with an abrasive waterjet. The materials had varying thicknesses and were cut at the same appropriate cutting speed for each material.

Keywords: water jet, abrasive water jet, cutting speed, surface roughness

SADRŽAJ

ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA	4
1. UVOD.....	1
2. RAZVOJ VODENOG MLAZA KROZ POVIJEST.....	2
3. TEHNOLOGIJE VODENOG MLAZA.....	5
3.1. Obrada uz pomoć čistog vodenog mlaza	5
3.2. Postupak rezanja čistim vodenim mlazom	7
4. OBRADA VODENIM MLAZOM UZ DODATAK ABRAZIVA	8
4.1. Abrazivni vodeni mlaz	8
4.2. Vrste abrazivnog vodenog mlaza	9
4.3. Prednosti i nedostaci obrade abrazivnim vodenim mlazom	11
4.4. Abrazivna sredstva	12
4.5. Rezanje abrazivnim vodenim mlazom.....	13
4.6. Područja primjene i upotreba vodenog mlaza	15
4.7. Dodatni primjeri upotrebe vodenog mlaza	16
5. HRAPAVOST TEHNIČKIH POVRŠINA.....	17
5.1. Određivanje hrapavosti površine	18
5.2. Označavanje hrapavosti na tehničkom crtežu.....	19
5.3. Stupnjevi površinske hrapavosti Ra kod različitih obrada	21
5.4. Karakteristike površine prilikom obrade abrazivnim vodenim mlazom	23
6. PRAKTIČNI DIO	29
6.1. Sastavni dijelovi sustava vodenog mlaza (niskotlačni dio)	30
6.2. Sastavni dijelovi sustava vodenog mlaza (visokotlačni dio)	31
6.3. Sustav za dodavanje abraziva.....	32
6.4. Uređaj za provjeru hrapavosti materijala.....	33
6.4.1. Princip rada	34
6.4.2. Radne karakteristike uređaja	35
6.5. Praktični primjeri rezanja abrazivnim vodenim mlazom	38
6.5.1. Rezanje bakra	38
8.6. Analiza rezultata.....	48
7. ZAKLJUČAK	50
LITERATURA.....	51

POPIS SLIKA

<i>Slika 1.</i>	<i>Patentni crtež za vodeni mlaz s dovodom abrazivnog sredstva [2]</i>	2
<i>Slika 2.</i>	<i>Patentni crtež za unaprijeđenu vodenu mlaznicu s dovodom abraziva [2]</i>	3
<i>Slika 3.</i>	<i>Pojednostavljeni presjek vodene mlaznice s dovodom abraziva [2]</i>	4
<i>Slika 4.</i>	<i>Poprečni presjek dovoda vode pod tlakom i mlaznice [3]</i>	5
<i>Slika 5.</i>	<i>Ilustrativni prikaz povećanja brzine vode kroz mlaznicu [4]</i>	6
<i>Slika 6.</i>	<i>Struktura vodenog mlaza [5]</i>	7
<i>Slika 7.</i>	<i>Obrada čistim vodenim mlazom [5]</i>	7
<i>Slika 8.</i>	<i>Shematski prikaz abrazivnog vodenog mlaza [5]</i>	8
<i>Slika 9.</i>	<i>Abrazivni vodeni mlaz [5]</i>	9
<i>Slika 10.</i>	<i>Injekcijski vodeni mlaz [5]</i>	10
<i>Slika 11.</i>	<i>Injekcijski vodeni mlaz [5]</i>	10
<i>Slika 12.</i>	<i>Različiti oblici abrazivnih sredstava [5]</i>	12
<i>Slika 13.</i>	<i>Različiti oblici abrazivnog vodenog mlaza [5]</i>	13
<i>Slika 14.</i>	<i>Udarac abrazivnog zrna pod kutem u rezu površinu [5]</i>	14
<i>Slika 15.</i>	<i>Udar i odnošenje materijala uz pomoć abraziva [5]</i>	15
<i>Slika 16.</i>	<i>Raspodjela postupaka obrade vodenim mlazom</i>	16
<i>Slika 17.</i>	<i>Mikroskopski prikaz hrapavosti površina [6]</i>	17
<i>Slika 18.</i>	<i>Prikaz srednjeg aritmetičkog odstupanja Ra [7]</i>	18
<i>Slika 19.</i>	<i>Prikaz srednje visine neravnina Rz [7]</i>	18
<i>Slika 20.</i>	<i>Prikaz najveće udaljenosti neravnina Rt [7]</i>	19
<i>Slika 21.</i>	<i>Oznake hrapavosti za različite zahtjeve obrade [8]</i>	20
<i>Slika 22.</i>	<i>Potpuni grafički simbol [8]</i>	20
<i>Slika 23.</i>	<i>Simboli za smjer obrade [8]</i>	21
<i>Slika 24.</i>	<i>Površina obrađena vodenim mlazom (uvećani prikaz) [10]</i>	23
<i>Slika 25.</i>	<i>Prilikom male brzine kretanja dolazi do visoke kvalitete rezanja, ali je produktivnost malena [11]</i>	23
<i>Slika 26.</i>	<i>Sa povećanjem brzine kretanja kvaliteta i hrapavost obrađene površine se povećava, ali je produktivnost rezanja također veća.[11]</i>	24
<i>Slika 27.</i>	<i>Ovisnost hrapavosti površine o dubini rez ai udaljenosti mlaznice [12]</i>	24
<i>Slika 28.</i>	<i>Ovisnost površinske hrapavosti o dubini rezanja [13]</i>	25
<i>Slika 29.</i>	<i>Različite hrapavosti površine nakon obrade vodenim mlazom [12]</i>	25
<i>Slika 30.</i>	<i>Ovisnost hrapavosti površine o udaljenosti mlaznice [12]</i>	26
<i>Slika 31.</i>	<i>Utjecaj brzine kretanja obratka na hrapavost površine [12]</i>	27
<i>Slika 32.</i>	<i>Utjecaj pritiska vodenog mlaza na hrapavost površine [12]</i>	27
<i>Slika 33.</i>	<i>Utjecaj kuta rezanja na dubinu rezanja [12]</i>	28
<i>Slika 34.</i>	<i>Radni stol, mlaznica i upravljačka jedinica</i>	29
<i>Slika 35.</i>	<i>Kućište sustava niskog i visokog tlaka vode</i>	29
<i>Slika 36.</i>	<i>. Interni pregled komponenata niskotlačnog dijela sustava [14]</i>	30
<i>Slika 37.</i>	<i>Komponente sustava visokog tlaka [14]</i>	31
<i>Slika 38.</i>	<i>Uređaj za kontinuirano dovođenje abraziva</i>	32

<i>Slika 39.</i>	<i>Dimenzije uređaja Surtronic Duo [15]</i>	33
<i>Slika 40.</i>	<i>Surtronic Duo koristi infracrvenu (IrDA) vezu između gornje i donje jedinice kako bi omogućio bežično, udaljeno upravljanje na udaljenost do jednog metra, bez potrebe za kablovima. [15]</i>	34
<i>Slika 41.</i>	<i>Shematski prikaz mjerenja [15]</i>	36
<i>Slika 42.</i>	<i>Podешenje radnog režima na upravljačkoj jedinici vodenog mlaza za bakar debljine 4 mm</i>	39
<i>Slika 43.</i>	<i>Bakreni izradak debljine 3 mm s točkama mjerenja</i>	39
<i>Slika 44.</i>	<i>Bakreni izradak debljine 4 mm s točkama mjerenja</i>	40
<i>Slika 45.</i>	<i>Bakreni izradak debljine 12 mm s točkama mjerenja</i>	41
<i>Slika 46.</i>	<i>Bakreni izradak debljine 20 mm s točkama mjerenja</i>	42
<i>Slika 47.</i>	<i>Izabrani radni režim za polimerni materijal</i>	43
<i>Slika 48.</i>	<i>Slika 49. Izradak debljine 10 mm od PET polimera s točkama mjerenja</i>	44
<i>Slika 49.</i>	<i>Izradak debljine 20 mm od PET polimera s točkama mjerenja</i>	45
<i>Slika 50.</i>	<i>Podешenje radnog režima na upravljačkoj jedinici vodenog mlaza za konstrukcijski čelik debljine 5 mm</i>	46
<i>Slika 51.</i>	<i>Izradak od konstrukcijskog čelika debljine 5 mm</i>	47

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1. Područja primjene vodenog mlaza</i>	15
<i>Tablica 2. Područja primjene abrazivnog vodenog mlaza</i>	15
<i>Tablica 1. Standardne veličine oznaka [8]</i>	20
<i>Tablica 4. Orijentacijske vrijednosti Ra koje se postižu određenim obradama</i>	22
<i>Tablica 5. Radne karakteristike uređaja Surtronic duo [15]</i>	35
<i>Tablica 6. Hrapavost za bakar debljine 3 mm</i>	40
<i>Tablica 7. Hrapavost za bakar debljine 4 mm</i>	41
<i>Tablica 8. Hrapavost za bakar debljine 12 mm</i>	42
<i>Tablica 9. Hrapavost za bakar debljine 20 mm</i>	43
<i>Tablica 10. Hrapavost za PET polimer debljine 10 mm</i>	44
<i>Tablica 11. Hrapavost za PET polimer debljine 20 mm</i>	45
<i>Tablica 12. Hrapavost za konstrukcijskog čelik debljine 5 mm</i>	47
<i>Tablica 13. Usporedba aritmetičkih sredina za bakar</i>	48
<i>Tablica 14. Usporedba aritmetičkih sredina za PET materijal</i>	48
<i>Tablica 15. Aritmetička sredina za konstrukcijski čelik Č.0461</i>	49

1. UVOD

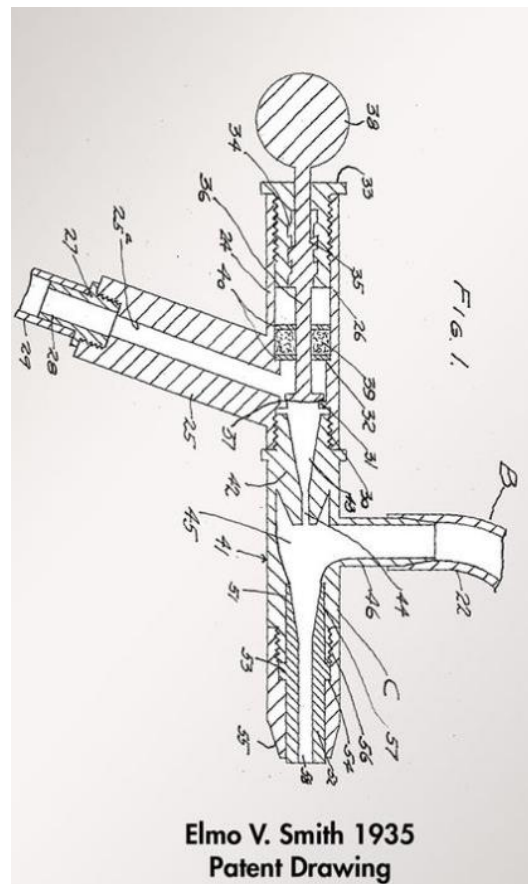
Voda, jedan od osnovnih resursa na planeti i pokretača života, ali ujedno i nositelj promjena ovisno o okruženju kojim teče. Od nositelja minerala koji se nakupljaju i stvaraju nove slojeve taloženjem do dugotrajnog procesa ispiranja materijala i stvaranja puta tečenja kroz put najmanjeg otpora, do sile razaranja koja je u stanju uništiti sve pred sobom.

Od samih početaka čovjek je ovisio o vodi, kao i sva ostala živa bića, kao oslonac života, no od svih vrsta koje su do sada bile na zemlji, mi je jedini koristimo na inovativne načine. Sami je preusmjeravamo kako bi uzgojili hranu, sami je preusmjeravamo kako bi radila umjesto nas, prenijeli njenu energiju i pretvorili je u rad, te u konačnici, sami joj dodajemo snagu kako bi usmjereno razarala umjesto nas.

U ovom završnom radu će se obraditi tema rezanja različitih materijala različitih debljina te utjecaj na kvalitetu površine ovisno o brzini rezanja uz prethodni pregled tehnologije rezanja vodenim mlazom i upotrebljenih strojeva i mjernog alata.

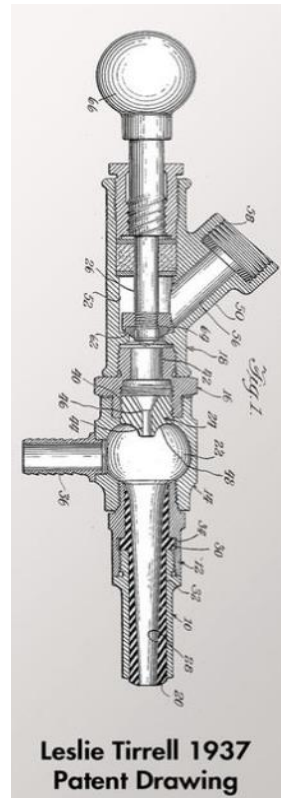
2. RAZVOJ VODENOG MLAZA KROZ POVIJEST

Korištenje visokotlačne vode za eroziju seže od sredine 19. stoljeća s hidrauličnim rudarenjem, no tek je 1930-ih počeo razvoj uskih mlaznica vode kao industrijskog uređaja za rezanje. Godine 1933., tvrtka Paper Patents Company u Wisconsinu razvila je stroj za mjerenje, rezanje i namatanje papira koji je koristio dijagonalno pokretnu mlaznicu vode za rezanje horizontalno pokretnog lista neprekidnog papira. [1]



Slika 1. Patentni crtež za vodeni mlaz s dovodom abrazivnog sredstva [2]

Rani primjeri primjene bili su na niskom tlaku i ograničeni na mekane materijale poput papira. Tehnologija vodenog mlaza se razvijala u poratnom razdoblju dok su istraživači diljem svijeta tražili nove metode učinkovitih sustava za rezanje.



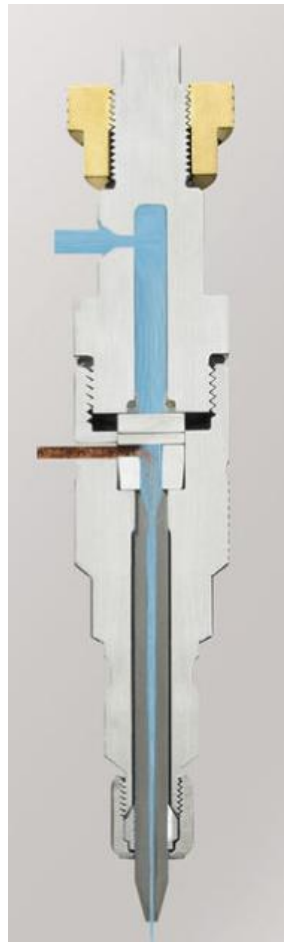
Slika 2. Patentni crtež za unaprijeđenu vodenu mlaznicu s dovodom abraziva [2]

Godine 1956., Carl Johnson iz tvrtke Durox International u Luksemburgu razvio je metodu za rezanje plastičnih oblika koristeći tanki mlaz visokotlačne vode, ali ti materijali, poput papira, bili su mekani materijali. Godine 1958., Billie Schwacha iz tvrtke North American Aviation razvio je sustav koji koristi visokotlačnu tekućinu za rezanje tvrdih materijala. Taj sustav je koristio pumpu s tlakom od 690 MPa za isporuku hipersoničnog tekućeg mlaza koji je mogao rezati legure visoke čvrstoće poput nehrđajućeg čelika PH15-7-MO.

Korišten za rezanje laminata sa sačastom strukturom za zrakoplov North American XB-70 Valkyrie brzine Mach 3, ovaj način rezanja rezultirao je delaminacijom pri visokim brzinama, što je zahtijevalo promjene u proizvodnom procesu. Iako nije bio učinkovit za projekt XB-70, koncept je bio valjan te se nastavilo daljnje istraživanje vodenog mlaza za rezanje.

Godine 1962., Philip Rice iz tvrtke Union Carbide istraživao je korištenje pulsirajućeg vodenog mlaza pod tlakom do 340 MPa za rezanje metala, kamena i drugih materijala. Istraživanje S.J. Leach-a i G.L. Walkera sredinom 1960-ih proširilo je tradicionalno rezanje ugljenom uz pomoć vodenog mlaza kako bi se odredila idealna oblika mlaznice za rezanje kamena pod visokim tlakom vode,[8] dok je Norman Franz kasnih 1960-ih usredotočio se na rezanje mekih materijala vodenim mlazom otapanjem polimera dugog lanca u vodi kako bi poboljšao

koheziju mlaza. Početkom 1970-ih, želja za poboljšanjem trajnosti mlaznice za vodeni mlaz potaknula je Raya Chadwicka, Michaela Kurka i Josepha Corriveaua iz tvrtke Bendix Corporation da dođu na ideju korištenja kristala korunda za oblikovanje mlaznice za vodeni mlaz, dok je Norman Franz dalje razvio mlaznicu za vodeni mlaz s otvorom veličine svega 0,051 mm koja je radila pri tlakovima 480 MPa. John Olsen, zajedno s Georgeom Hurlburtom i Louisom Kapsandyjem u tvrtki Flow Research (kasnije Flow Industries), dodatno je poboljšao komercijalni potencijal vodenog mlaza pokazavši da tretiranje vode prije uporabe može povećati radni vijek mlaznice. [1]

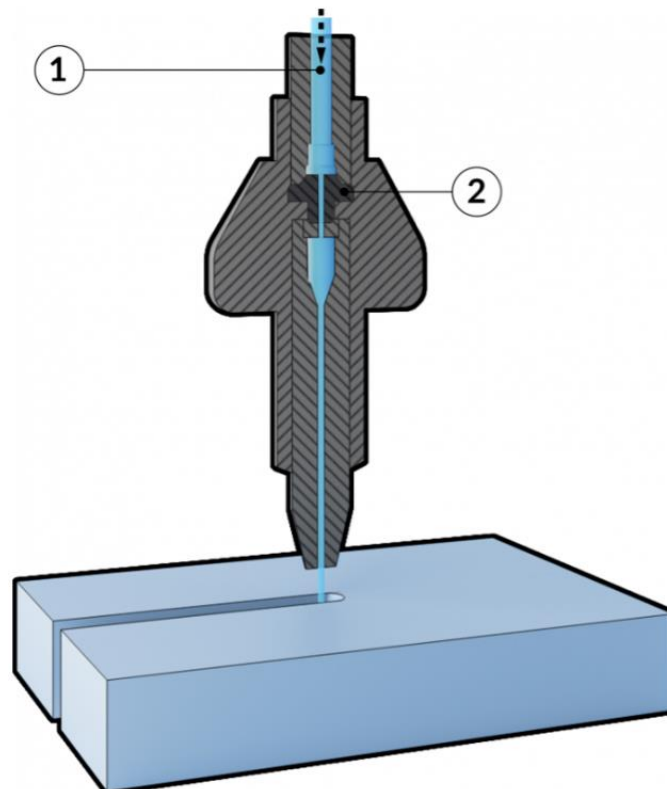


Slika 3. Pojednostavljeni presjek vodene mlaznice s dovodom abraziva [2]

3. TEHNOLOGIJE VODENOG MLAZA

3.1. Obrada uz pomoć čistog vodenog mlaza

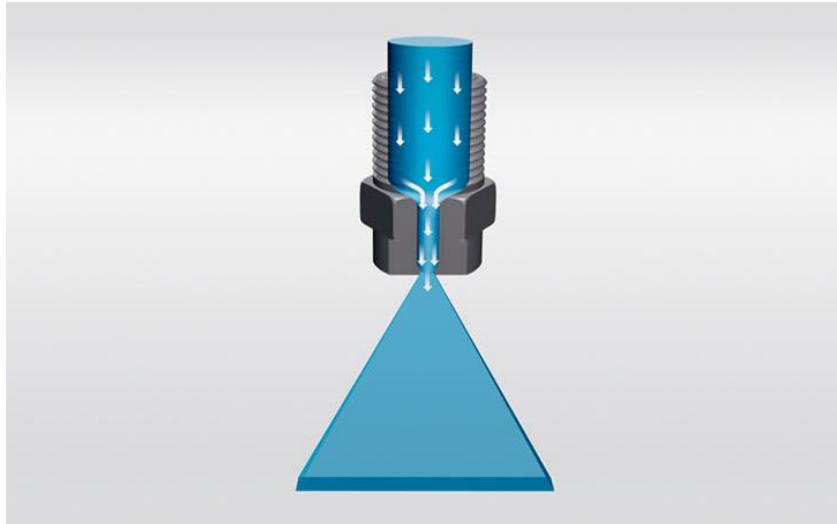
Obrada materijala čistim vodenim mlazom pripada u mehaničke postupke obrade, a temelji se na korištenju kinetičke energije vodenog mlaza usred velike brzine strujanja do 1000 m/s. Za usporedbu vodeni mlaz koji se koristi za industrijsko rezanje je oko 30 puta jači od komercijalno dostupnih vodenih mlazova namijenjenih čišćenju.



Slika 4. Poprečni presjek dovoda vode pod tlakom i mlaznice [3]

1. Cijev za dovod vode
2. Mlaznica

Osnovni princip je veoma jednostavan te se sastoji od prolaska vode kroz regulator protoka i reznu cijev koja u promjeru iznosi od 0,1 mm do 0,4 mm pod visokim tlakovima u iznosu od 2000 do 4000 bara ovisno o namjeni. U ovom slučaju upotrebljava se samo energija vodenog mlaza. Kako bi se postigla velika brzina i kinetička energija vode, voda koja prolazi kroz mlaznicu, koja je često napravljena od sintetičkog dijamanta ili safira, mora biti velike čistoće kako bi se izbjegla oštećenja u sustavu i mlaznici te zbog toga prolazi kroz seriju grubih i finih filtera. Pri prolasku vode iz mlaznice formira se uzak vodeni mlaz koji se giba velikom brzinom.



Slika 5. Ilustrativni prikaz povećanja brzine vode kroz mlaznicu [4]

Prednosti obrane čistim vodenim mlazom su sljedeće:

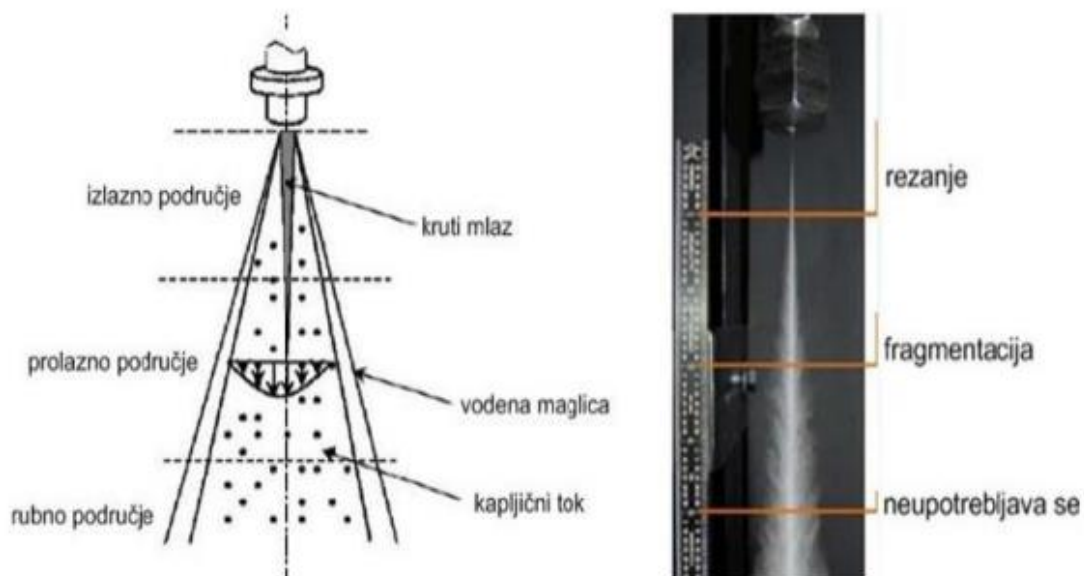
- U zoni obrade ne dolazi do zagrijavanja materijala,
- Posmične sile za vrijeme obrade su male,
- Po završetku rezanja nema oštih rubova, te se time negira potreba za naknadnom obradom,
- Brza priprema i stavljanje stroja u rad,
- Točnost obrade,
- Postupak je ekološki prihvatljiv,
- Postupak je lako automatizirati,
- Nema potrebe za naknadnom izmjenom alata,
- Ne dolazi do strukturnih promjena u materijalu,
- Ne nastaju čestice koje dolaze u radno okruženje.

Nedostatci prilikom obrade čistim vodenim mlazom:

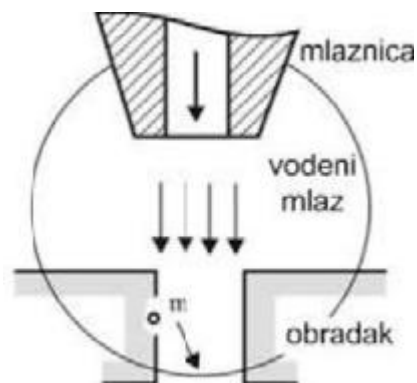
- Izuzetno teška, pa čak i nemoguća obrada izuzetno čvrstih i krutih materijala,
- Debljina materijala koja se može rezati je ograničena,
- Velika buka prilikom rada (100 dB),
- Postoji mogućnost pojave korozije na rezanim materijalima, te postoji potreba za njihovom zaštitom nakon rezanja,
- Ekonomska isplativost rezanja određenih materijala.

3.2. Postupak rezanja čistim vodenim mlazom

Rezanje vodenim mlazom bez dodataka koristi se za anorganske i organske materijale, najčešće se koristi prilikom rezanja polimera, drveta, papira, različitih kompozitnih materijala ili materijala koji su lijepljeni. Promjer mlaznice, pritisak u sustavu i brzina kretanja mlaza su determinirajući faktori koji utječu na učinkovitost procesa rezanja i kvalitetu obrade. Prilikom rezanja volumen protoka vode i tlak imaju jasno definirani odnos. To se najbolje vidi na primjeru da se povećanjem tlaka i smanjenjem promjera mlaznice može postići veća dubina rezanja prilikom istog volumnog protoka vode.



Slika 6. Struktura vodenog mlaza [5]



Slika 7. Obrada čistim vodenim mlazom [5]

4. OBRADA VODENIM MLAZOM UZ DODATAK ABRAZIVA

4.1. Abrazivni vodeni mlaz

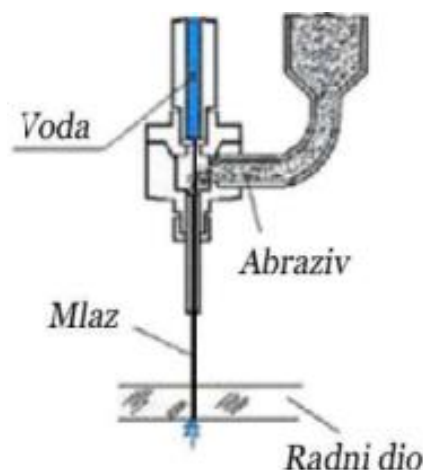
Obrada abrazivnim vodenim mlazom je postupak veoma sličan postupku obrade čistim vodenim mlazom, ali postupak kojega se u vodeni mlaz specijaliziranim sustavom dovoda dodaju čestice abrazivnog sredstva, koje skupa sa vodenim mlazom velikom brzinom izlaze iz mlaznice i udaraju u obradak.

Abrazivni vodeni mlaz je mješavina vode i abrazivnog sredstva koji pod visokim tlakom udara u materijal koji obrađujemo postupkom erozije odnosi material te tako nastaje rez.

Za obradbeni postupak potrebna je voda pod visokim pritiskom, odgovarajući obradbeni parametri i abrazivno sredstvo. Obradbeni postupak rezanja vodenim mlazom bazira se na izbacivanju abrazivnih čestica iz mlaznice u mlazu vode velikom brzinom u obradak (materijal koji želimo ukloniti). Abraziv tada udara u obradak velikom brzinom te time izaziva mikro pukotine u materijalu u koje zatim ulazi voda i postupno ih širi te istovremeno odnosi odvojeni material.

Sastavni dijelovi za rezanje abrazivnim vodenim mlazom su:

- Računalna upravljačka jedinica kojom se definira put rezne glave,
- Rezna glava s dovodom ili spremnikom abrazivnog sredstva,
- Sustav za tlačenje vodenog mlaza,
- Dovod tehnološke vode s filtracijskim sustavom.

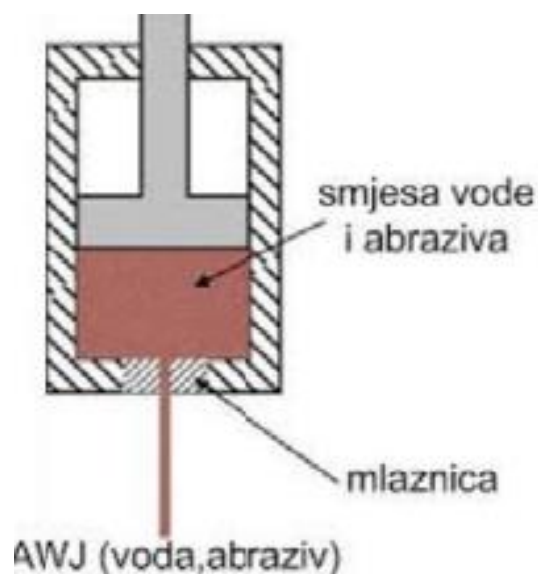


Slika 8. Shematski prikaz abrazivnog vodenog mlaza [5]

4.2. Vrste abrazivnog vodenog mlaza

Abrazivni vodeni mlaz sa suspenzijom

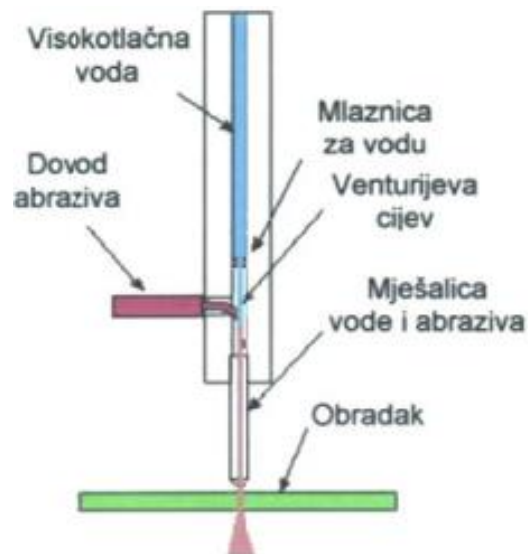
Pri rezanju s navedenom tehnikom stvara se suspenzija (tekuća smjesa) vode i abrazivnih čestica koja se kasnije dovodi pod pritisak. Ta pritisnuta suspenzija prolazi kroz fokusnu mlaznicu (glavu za rezanje) koja pruža rezanje. Značajna razlika između rezanja tehnikom sa suspenzijom i rezanja injekcijskim vodenim mlazom je odsutnost zraka u suspenzijskoj tehnici. Zbog odsutnosti zraka, pritisnuti mlaz vode s abrazivnim zrnima ne širi se tijekom rezanja, rezultirajući manjom širinom reza i rezanjem veće preciznosti. Stoga, alat za rezanje abrazivnim vodenim mlazom može stvarati brže rezove ili učinkovito rezati deblje materijale. Rezanje sa suspenzijskom mješavinom se također često koristi za rezanje pod vodom, poput instalacija na moru ili za neutralizaciju bombi. Pritisnuti mlaz vode koji izlazi iz glave za rezanje je dvokomponentni mlaz za rezanje koji koristi visokotlačnu vodu i abrazivne čestice.



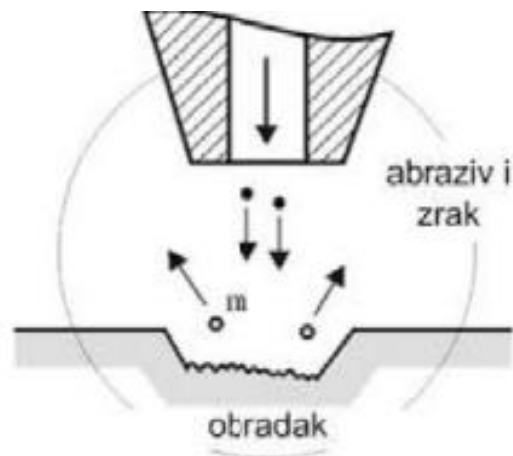
Slika 9. Abrazivni vodeni mlaz [5]

Injekcijski vodeni mlaz

Uz pomoć Venturijeve cijevi koja je smještena nakon mlaznice kroz koju prolazi voda pod visokim tlakom se uz pomoć Venturijevog efekta stvara vakuum koji povlači određenu količinu abraziva u nju. Zatim vodeni mlaz ubrzava abrazivne čestice te se s njima miješa u cijevi. Mješavina vode i abrazivnih čestica u konačnici izlazi kao koherentni mlaz kojim se vrši obrada.



Slika 10. Injekcijski vodeni mlaz [5]



Slika 11. Injekcijski vodeni mlaz [5]

4.3. Prednosti i nedostaci obrade abrazivnim vodenim mlazom

Prednosti obrade abrazivnim vodenim mlazom:

- Visoka fleksibilnost u primjeni u različitim industrijskim granama,
- Nema potrebe za naknadnom obradom, osim ako je potrebna visoka kvaliteta obrade,
- Izrada velikih serija ili pojedinačnih prototipa,
- Velika brzina rezanja materijala koji nisu podložni drugim metodama poput lasera ili plazme,
- Maleni iznosi posmičnih sila,
- Nema potrebe za uklanjanjem oštih rubova,
- Visoka točnost obrade (ovisno o brzini rezanja),
- Brza priprema i postavljanje stroja,
- Automatizacija postupka je jednostavna,
- Postupak je ekološki prihvatljiv, te ne onečišćuje okolinu,
- Nema potrebe za izmjenom alata,
- Ne dolazi do strukturalne promjene materijala,
- Ne dolazi do stvaranja štetnih čestica i prašine,
- Odsutnost zagrijavanja materijala u zoni obrade.

Nedostaci obrade abrazivnim vodenim mlazom:

- Visoka nabavna cijena opreme za rezanje,
- Postoji mogućnost nastanka korozije na mjestu obrade kod određenih materijala, te ih je potrebno zaštititi nakon obrade,
- Velika buka prilikom rada (100 dB),
- Ukoliko dođe do gubitka tlaka između pumpe i rezne glave dolazi do smanjenja brzine rezanja,
- Obrada tvrdih materijala je izuzetno teška.

4.4. Abrazivna sredstva

Kako bi se povećala učinkovitost vodenog mlaza istom se dodaju različita abrazivna sredstva. To omogućuje vodenom mlazu da se koristi u rezanju tvrdih materijala kao što su različiti čelici i legure, kamen. Za ostale mekše materijale obični vodeni mlaz je bolji jer je jeftinije rješenje koje zahtjeva manja ulaganja.

Abrazivne minerale dijelimo na sljedeće grupe:

- Minerale (cirkonijev silikat, olivine, granat),
- Okside (kvarcni pijesak, silicijev oksid, aluminijski oksid ili korund).

Za dodatnu površinsku obradu mogu se upotrijebiti i čelične kuglice (sačma), staklene kuglice ili zdrobljena troska.

Prema načinu dobivanja abrazivnih sredstava također ih možemo podijeliti na dvije grupe:

- Pijesak dobiven mehaničkim drobljenjem stijena,
- Prosijavanjem i ispiranjem morskog pijeska.

Pijesak koji je dobiven drobljenjem stijena je grublji i ima šiljaste rubove, te je pogodniji za grubo rezanje. Pijesak dobiven prosijavanjem prirodnog pijeska je zbog procesa prirodne erozije znatno finiji, te je zato preferabilni za finiju obradu.

Ovisno o namjeni, kao i kod brusnih sredstava, abrazivna sredstva još dijelimo i prema granulaciji, točnije veličini i finoći čestica:

- Za grublje površine obrade koristi se granulacija 50,
- Za opću namjenu se koristi granulacija 80.
- Granulacija 120 se koristi za finu i preciznu obradu.



Slika 12. Različiti oblici abrazivnih sredstava [5]

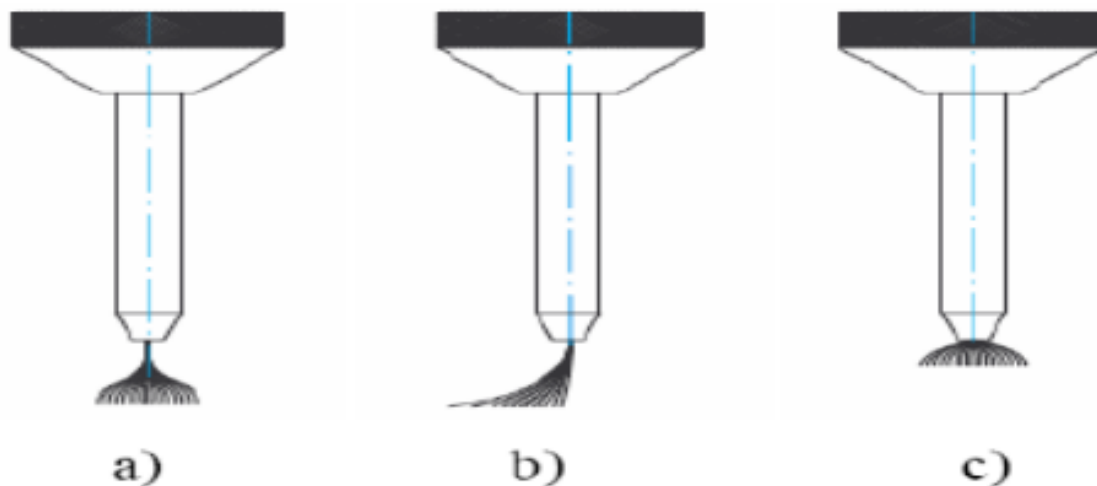
4.5. Rezanje abrazivnim vodenim mlazom

Za optimalno rezanje abrazivnim vodenim mlazom od presudne je važnosti da su mlaznica i cijev za rezanje u dobrom stanju te da su dobro centrirane, jer o tome ovisi izlazni oblik abrazivnog vodenog mlaza, što je jedan od presudnih faktora za kvalitetu obrade.

Mlaz ima cilindričan oblik, a njegov oblik ovisi o sljedećim faktorima:

- Udaljenosti cijevi za fokusiranje od površine obrađenoga materijala,
- Masenog protoka abrazivnog sredstva,
- Dimenzija mlaznice,
- Oblika cijevi za fokusiranje mlaza.

Zbog različitih okolinskih faktora, kontinuirani oblik mlaza moguće je zadržati samo na relativno maloj udaljenosti nakon napuštanja mlaznice, te je zbog toga reznju glavu potrebno držati na udaljenosti od 1 mm do 3 mm od obratka kako bi se održao optimalni oblik mlaza.



Slika 13. Različiti oblici abrazivnog vodenog mlaza [5]

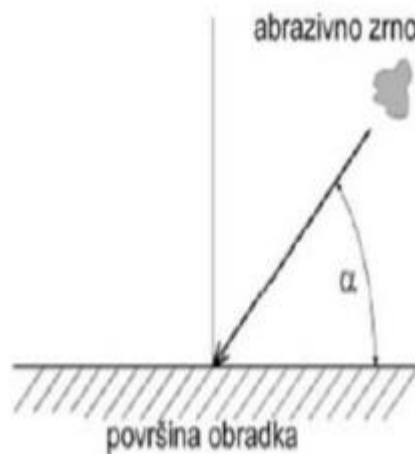
- dobar i pravilan izgled*
- neispravno istjecanje zbog nepravilnog oblika mlaznice*
- preslabi pritisak i prebrzo širenje mlaza*

Do promjene oblika i gubitka energije u abrazivnom vodenom mlazu dolazi zbog promjene brzine mlaza, debljine obratka i smjera rezanja. Ulogu također može imati i površinska hrapavost materijala kao i nehomogena unutarnja struktura materijala.

Količina uklonjenog materijala pri obradi s abrazivnim vodenim mlazom ovisi o sljedećim faktorima:

- Obliku abrazivnog zrna,
- Tvrdoći abrazivnog zrna,
- Tvrdoći obradbenog materijala,
- Žilavosti obradbenog materijala,
- Kutu udara zrna u material,
- Brzini abrazivnog zrna.

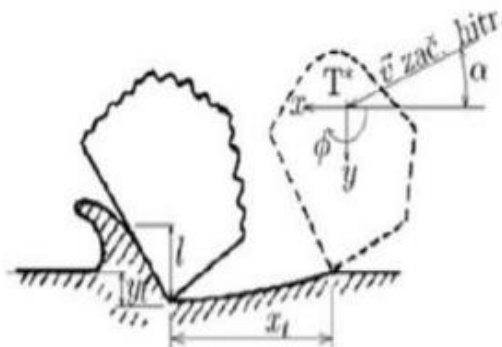
Brzina rezanja je jedan od najvažnijih parametara obrade, što će do posebnog izražaja doći u praktičnom dijelu ovog rada, gdje je za različite debljine materijala zadržana konstantna brzina rezanja, kako bi se vidio njen utjecaj na kvalitetu obrade.



Slika 14. Udarac abrazivnog zrna pod kutem u reznu površinu [5]

Brzina rezanja utječe na kvalitetu reza, ali i na čitavu ekonomiju troškova obrade. Ona je zavisna o vrsti, debljini i tvrdoći materijala. Brzina rezanja definira se kao brzina relativnog pomicanja rezne glave u odnosu na obradak u pravcu rezanja.

Kako bi se optimizirao proces rezanja za obratke različite debljine potrebno je izvršiti podešavanje brzine rezanja. Na taj način se ostvaruje željena kvaliteta reza materijala pri zadanim vrijednostima masenog protoka abraziva i tlaka vode.



Slika 15. Udar i odnošenje materijala uz pomoć abraziva [5]

Za razliku od drugih tehnika rezanja moguća je obrada širokog raspona homogenih i nehomogenih materijala, materijala velike toplinske provodljivosti i materijala s velikim površinskim faktorom refleksije (poput aluminija).

4.6. Područja primjene i upotreba vodenog mlaza

Možemo navesti brojne primjere primjene vodenog i abrazivnog mlaza u praksi. Neka od područja primjene vodenog mlaza prikazana su u tablici 1, a područja primjene abrazivnog vodenog mlaza prikazana su u tablici 2.

Tablica 1. Područja primjene vodenog mlaza

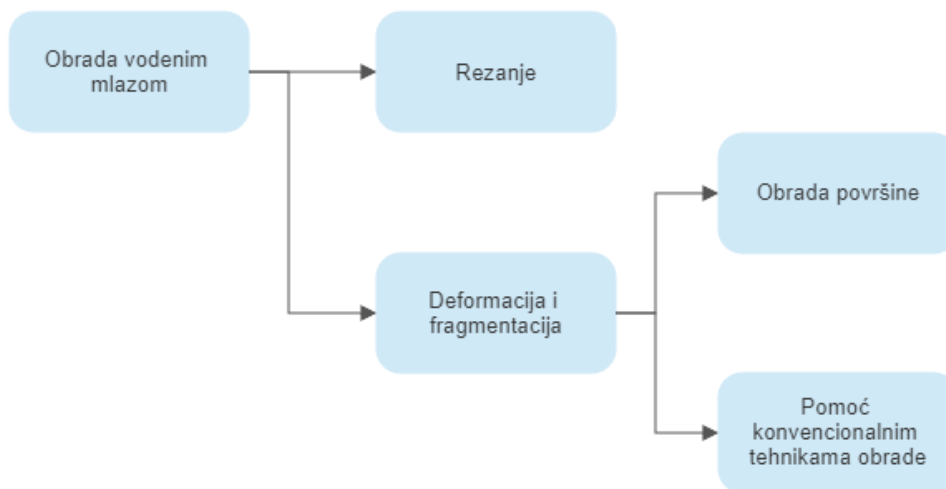
VODENI MLAŽ	
Primjena	Područje primjene
1. Rezanje polimera	Industrija plastike i gume
2. Rezanje celuloze i papira	Industrija papira
3. Rezanje tekstila	Industrija odjeće i tekstila
4. Rezanje hrane	Prehrambena industrija
5. Rezanje drvene građe	Šumarstvo i građevina
6. Rezanje krutih goriva	Rudarstvo i energetika
7. Rezanje leda	Dekorativna i prehrambena industrija

Tablica 2. Područja primjene abrazivnog vodenog mlaza

ABRAZIVNI VODENI MLAŽ	
Primjena	Područje primjene
1. Rezanje različitih legura, inoxa, aluminija, titana	Industrija zrakoplova, automobilska industrija, brodogradnja
2. Rezanje različitih vrsta stakla, zrcala	Dekorativna industrija, staklarstvo
3. Rezanje kompozitnih materijala i keramike	Industrija zrakoplova, elektronička industrija
4. Rezanje betona	Građevinska industrija

4.7. Dodatni primjeri upotrebe vodenog mlaza

Jedno od dodatnih područja primjene vodenog mlaza je i čišćenje različitih površina. To se najčešće koristi u postupku fragmentacije različitih materijala koji su u kontaktu jedni s drugima. To je posebno primjenjivo u građevini gdje uz pomoć vodenog mlaza može rezati beton bez daljnjeg oštećenja metalne armature. Vodenim mlazom, ovisno o njegovom obliku, možemo skidati različite površinske premaze, boje i prevlake, što je naročito pogodno za velike površine i ako želimo minimizirati zračno širenje potencijalno štetnih čestica.



Slika 16. Raspodjela postupaka obrade vodenim mlazom

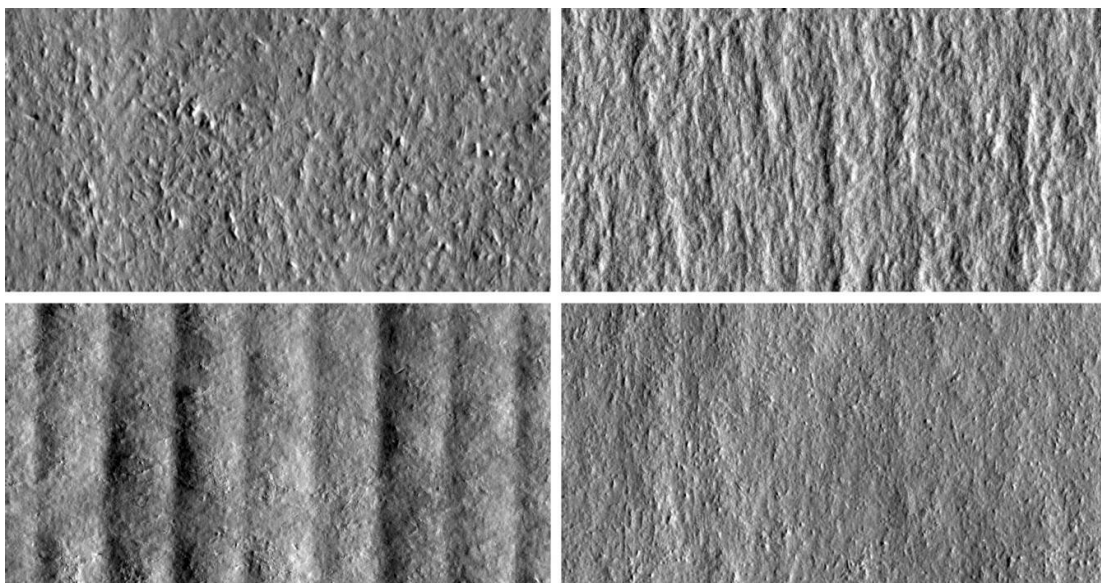
5. HRAPAVOST TEHNIČKIH POVRŠINA

Sve površine izrađenih dijelova koje su dobivene nekom od obrada (odvajanjem čestica ili bez odvajanja čestica) se nazivaju tehničke površine. Niti jedna tehnička površina nije idealno glatka, već se na njoj nalazi niz neravnina različitih dimenzija, rasporeda i oblika. Neravnine mogu biti prirodno na materijalu (tj. nisu posljedica neke obrade), a mogu doći kao posljedica obrađivanja površine nekom od obrada. Te neravnine se nazivaju hrapavost površine. Ukratko rečeno, hrapavost površine je mikro geometrijska nepravilnost površine. Hrapavost površine je određena standardom DIN 4762, te starijim standardima HRN M.A1.020 i 021 i DIN 4768.

Razina hrapavosti površine može utjecati na niz karakteristika materijala kao npr:

- smanjenje dinamičke izdržljivosti,
- pojačano trenje i trošenje opterećenih površina,
- na smanjenje prijeklopa kod steznih spojeva, čime dolazi do smanjenja nosivosti steznog spoja,
- na ubrzavanje korozije.

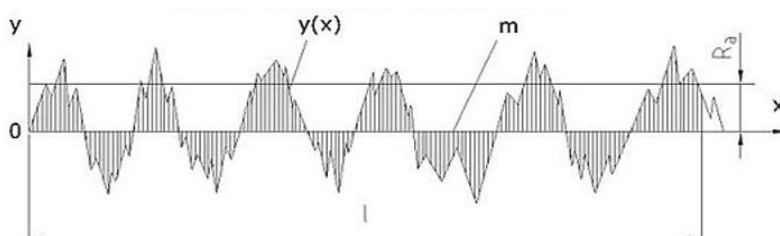
Strojni dijelovi s manjom hrapavošću površine imaju bolja gore navedena svojstva. S obzirom na to manji stupanj hrapavosti zahtjeva precizniji i skuplji postupak obrade, posljedica je povećanje cijene proizvoda.



Slika 17. Mikroskopski prikaz hrapavosti površina [6]

5.1. Određivanje hrapavosti površine

U strojarskoj praksi se za određivanje stupnja hrapavosti površine najčešće upotrebljava srednje aritmetičko odstupanje profila **Ra**. Ra označava srednju aritmetičku vrijednost visine profila neravnina na mjernoj duljini m .



Slika 18.. Prikaz srednjeg aritmetičkog odstupanja Ra [7]

Gdje su:

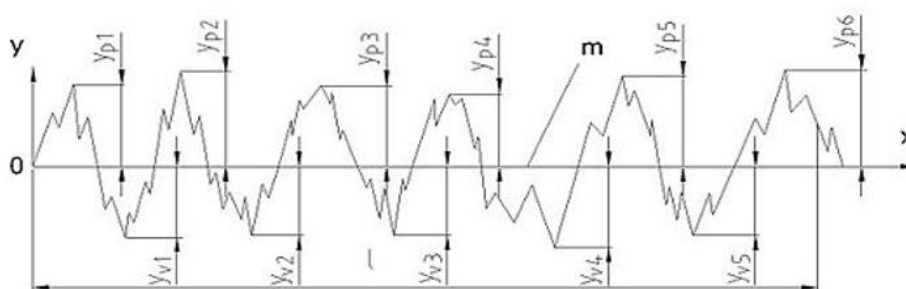
Ra [μm] – srednje aritmetičko odstupanje profila,

l [μm] – mjerna duljina hrapavosti,

$y(x)$ [μm] – visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu crtu,

m – srednja referentna crta profila neravnine.

Uz Ra parametar hrapavosti koji se još često upotrebljava je srednja visina neravnina **Rz**. Ona se određuje zbrojem aritmetičkih sredina apsolutne vrijednosti pet najviših vrhova i apsolutne vrijednosti pet najvećih dubina na mjernoj duljini l. Ta vrijednost je približno jednaka vrijednosti 4 puta većoj od srednjeg aritmetičkog odstupanja profila Ra.



Slika 19. Prikaz srednje visine neravnina Rz [7]

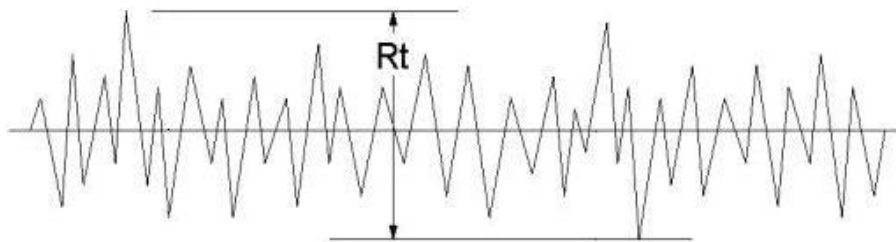
Gdje su:

Rz [μm] – srednja visina neravnina,

y_{pi} [μm] – visina najviših vrhova,

y_{vi} [μm] – dubina najdubljih udolina.

Treći, ne tako često upotrebljavan parametar hrapavosti je najveća visina **Rt**. To je okomita udaljenost između najvišeg vrha i najveće udoline unutar ukupne mjerne udaljenosti l.



Slika 20. Prikaz najveće udaljenosti neravnina R_t [7]

Uz sve stvarne vrijednosti hrapavosti postoji još i tzv. teorijska hrapavost. To je dobivena vrijednost hrapavosti neke površine do koje smo došli ne stvarnim mjerenjem površine nekom od metoda mjerenja hrapavosti, već je ona izračunata na temelju odgovarajućih formula.

Teoretska R_t hrapavost površine ili R_{tt} računa se formulom:

$$R_{tt} \approx \frac{f^2}{8r_\varepsilon} \quad (1)$$

Teoretska R_a hrapavost površine ili R_{at} računa se formulom:

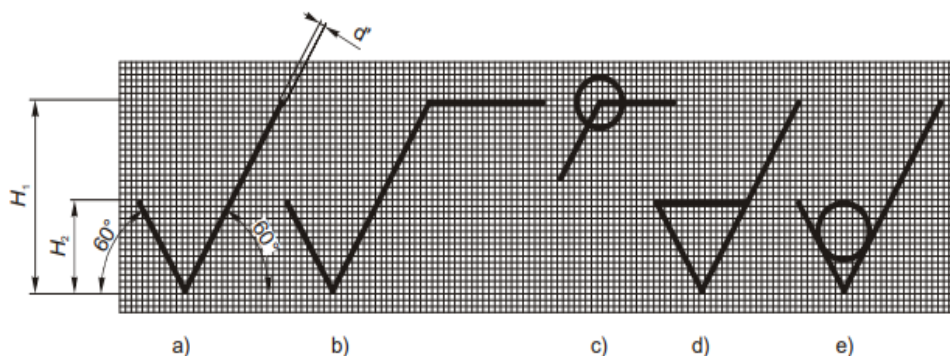
$$R_{at} \approx \frac{f^2}{18\sqrt{3}r_\varepsilon} \quad (2)$$

5.2. Označavanje hrapavosti na tehničkom crtežu

Ako je za neku površinu potrebno da ona zadovoljava neku traženu razinu hrapavosti, onda se ta hrapavost mora naznačiti na tehničkom crtežu. U tu svrhu postoje simboli koji označavaju zahtjeve za hrapavošću površina. Oznakom ili simbolom se na tehničkim crtežima označavaju površine kako bi se zadala potrebna hrapavost i potreban način obrade za njezino postizanje.

Osnovni grafički simbol (slika 21, a) je oblika slova V sa jednom crtom veće duljine od druge. One su nagnute pod kutom od 60° u odnosu na označenu površinu na crtežu. Iz tog osnovnog simbola izvedeni su ostali simboli koji se upotrebljavaju ovisno o traženim kriterijima. Drugi simbol (slika 21, b) predstavlja oznaku kod koje nije određeno kojim postupkom obrade

površina mora biti obrađena, već su svi postupci dozvoljeni. Treći simbol (slika 21, c) znači da se za sve površine na dijelu zahtjeva ista vrijednost hrapavosti površine. Četvrti simbol (slika 21, d) označava da navedena površina mora biti obrađena obradom odvajanjem čestica. Peti simbol (slika 21, e) označava da navedena površina mora biti obrađena nekom od obrada bez odvajanja čestica. Standardne dimenzije simbola, brojki i slova nalaze se u tablici 3.

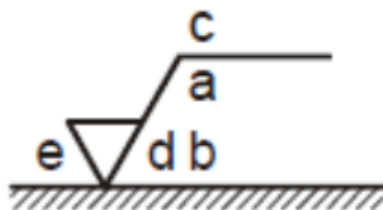


Slika 1. Oznake hrapavosti za različite zahtjeve obrade [8]

Tablica 2. Standardne veličine oznaka [8]

Visina brojki i slova	2,5	3,5	5	7	10	14	20
Debljina crte za simbole d'	0,25	0,35	0,5	0,7	1	1,4	2
Debljina crte slova	0,25	0,35	0,5	0,7	1	1,4	2
Visina H1	3,5	5	7	10	14	20	28
Visina H2	7,5	10,5	15	21	30	42	60

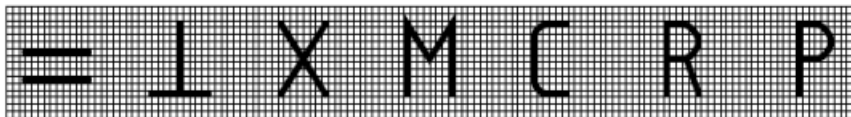
Često se uz sami stupanj hrapavost površine i njegov iznos još moraju navesti i dodatni zahtjevi. Na jednu površinu se može postaviti i nekoliko različitih zahtjeva u svrhu osiguranja funkcionalnosti. Tada se upotrebljava potpuni grafički simbol (slika 22.)



Slika 22. Potpuni grafički simbol [8]

Položaji na simbolu i njihovo značenje:

- a:** zahtjev za hrapavošću površine - prikazuje stupanj i vrstu hrapavosti (npr. Ra 3.2).
- b:** više zahtjeva za hrapavost površine – prvi zahtjev se stavlja na položaj a, a svaki dodatni zahtjev se stavlja na položaj b.
- c:** postupak obrade – prikazuje traženi postupak obrade (npr. tokareno, glodano...), način tretiranja površine ili druge zahtjeve na obradu (pocinčana, galvanizirana itd.)
- d:** smjer obrade – označava se simbol prostiranja tragova nastalih tijekom obrade (npr. tragovi alata). Prvi simbol označava paralelne tragove, drugi simbol označava okomite tragove, treći simbol označava križno tragove u dva pravca, četvrti simbol označava višesmjerne tragove, peti simbol označava približno kružne tragove prema središtu površine, šesti simbol označava približno radijalne tragove prema središtu površine, sedmi simbol označava tragove koji su zasebni i neusmjereni.



Slika 23. Simboli za smjer obrade [8]

- e:** dodatak za obradu - označava zahtjev za dodatkom na strojnu obradu. Označava se kao brojevana vrijednost u mm.

5.3. Stupnjevi površinske hrapavosti Ra kod različitih obrada

U tablici 4. su naznačene orijentacijske vrijednosti stupnja hrapavosti Ra za određene obrade. One služe kao simbolični prikaz da bi prikazali koji otprilike stupanj hrapavosti možemo postići s različitim obradama. Te vrijednosti u stvarnosti mogu malo varirati.

Tablica 4. Orijentacijske vrijednosti Ra koje se postižu određenim obradama [9]

Postupak obrade	Stupanj površinske hrapavosti Ra, μm															
	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	200	400	800
Ručna obrada																
-grubo turpijanje																
-fino turpijanje																
Lijevanje																
-u pijesak																
-u kokilu																
-tlačno lijevanje																
Kovanje																
-toplo, slobodno																
-toplo u ukovnju																
-hladno u ukovnju																
Valjanje																
-toplo																
-hladno																
Pjeskarenje																
Sačmarenje																
Plinsko rezanje																
Tokarenje																
-grubo																
-fino																
Blanjanje																
-grubo																
-fino																
Glodanje																
-grubo																
-fino																
Bušenje svrdlom																
Razvrtavanje																
Brušenje																
-grubo																
-fino																
Poliranje																
-mehaničko																
-električno																
Honanje, lepanje																
Superfinaš																
Obrada navoja																
-rezanje																
-brušenje, valjanje																
Obrada zubaca																
-blanjanje																
-glodanje																
-brušenje																

5.4. Karakteristike površine prilikom obrade abrazivnim vodenim mlazom

Osnovne karakteristike površine nakon obrade abrazivnim vodenim mlazom su:

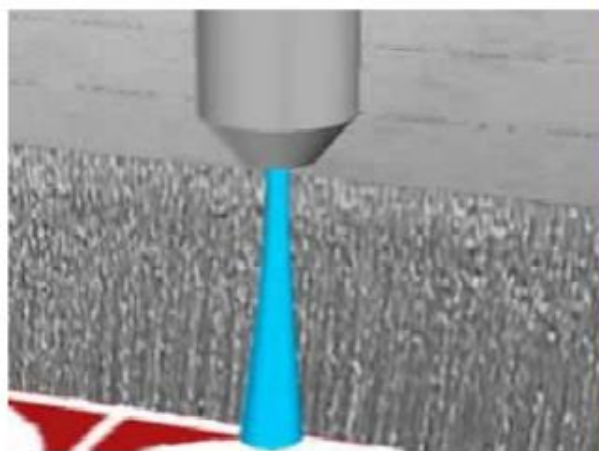
- Hrapavost obrađene površine,
- Širina reza (zavisno o mlaznici, tlaku rezanja, materijalu i brzini rezanja),
- Koničnost reza.

Karakteristični izgled površine srednjom brzinom rezanja abrazivnim vodenim mlazom prikazan je na sljedećoj slici.

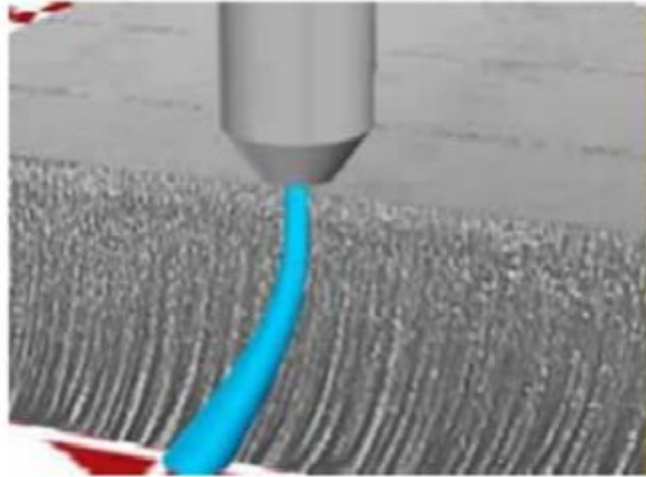


Slika 24. Površina obrađena vodenim mlazom (uvećani prikaz) [10]

Što je brzina rezanja veća ili je material deblji, a brzina ostaje nepromijenjena dolazi do sve većih razlika u visini neravnina, jer ovise o udaljenosti mlaznice od površine koja se obrađuje, odnosno, ovisi o dubini reza. Na manjim dubinama reza, hrapavost ili visina neravnina profila obično je znatno manja nego na većim dubinama reza. To znači da je veća kvaliteta obrade obično postignuta na ulasku mlaza u materijal nego na izlasku iz materijala.

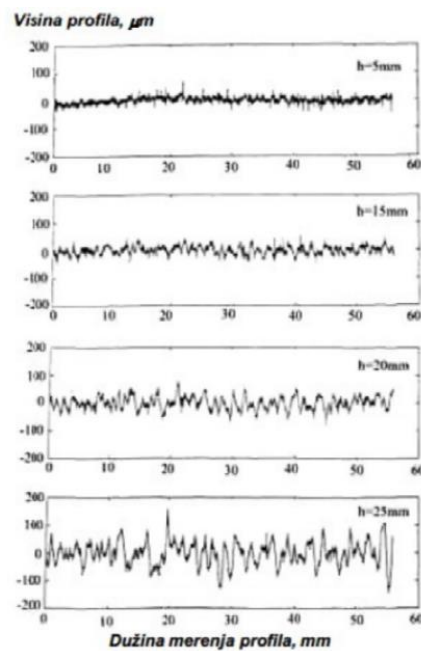


Slika 25. Prilikom male brzine kretanja dolazi do visoke kvalitete rezanja, ali je produktivnost malena [11]



Slika 26. Sa povećanjem brzine kretanja kvaliteta i hrapavost obrađene površine se povećava, ali je produktivnost rezanja također veća.[11]

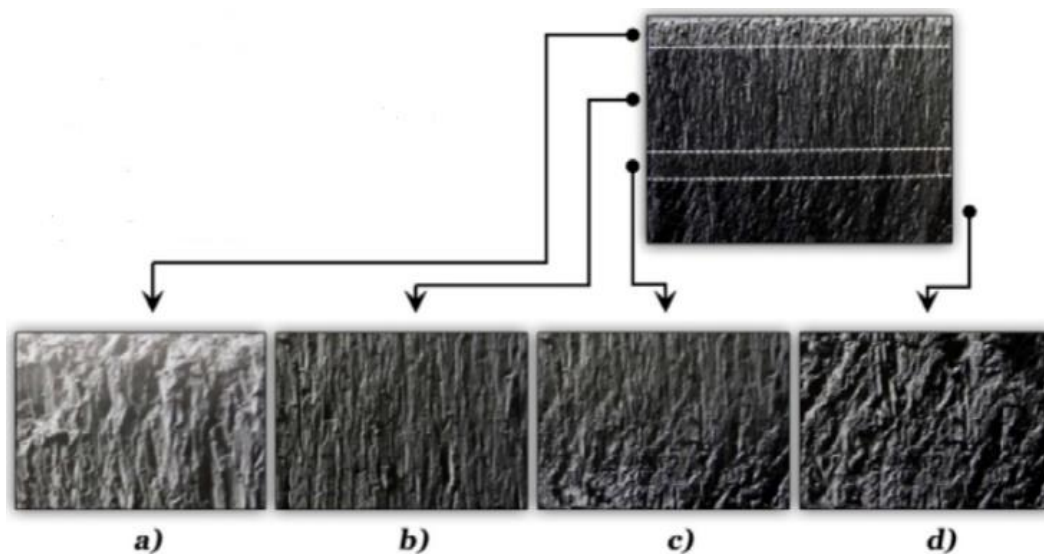
Prema prethodnim slikama se jasno vidi ovisnost hrapavosti površine o brzini kretanja vodenog mlaza preko obratka. U ovom završnom radu to je izraženo tako da se za praktični dio koristila ista brzina rezanja za različite debljine obradaka.



Slika 27. Ovisnost hrapavosti površine o dubini reza ai udaljenosti mlaznice [12]

Do velike razlike u hrapavosti površine dolazi ovisno o udaljenosti mlaznice od obratka, točnije o dubini reza. Hrapavost je znatno manja na manjim dubinama reza. Ili bolje rečeno, kvaliteta obrade je veća na ulasku mlaza u material nego na većim dubinama (izlasku mlaza iz materijala).

To se najbolje vidi na sljedećoj slici, u presjeku debljega materijala.



Slika 28. Ovisnost površinske hrapavosti o dubini rezanja [13]

- a) Zona inicijacije
- b) Glatka zona
- c) Prijelazna zona
- d) Hrapava zona

Prilikom prvog udara vodenog mlaza dolazi do pojave malog kratera u zoni inicijacije, te nakon toga započinje rezanje. Zona inicijacije ima nešto veću hrapavost zbog povećanog otpora pri ulazu mlaza u material. Hrapavost raste postupno od gornjeg dijela prema donjem. Prijelaz između glatke i hrapave zone može biti postepen ili može doći do naglog skoka.

No, brzina kretanja i dubina reza nisu isključivi parametri koji utječu na karakteristike hrapavosti površine, nego također utječu i vrsta korištenog abraziva, tlak vodenog mlaza, udaljenost mlaznice od površine obratka, material obratka i količina abraziva.



Slika 29. Različite hrapavosti površine nakon obrade vodenim mlazom [12]

- Q1-Najveća hrapavost
- Q2-Velika hrapavost
- Q3-Srednja hrapavost
- Q4-Fina hrapavost
- Q5-Super fina hrapavost

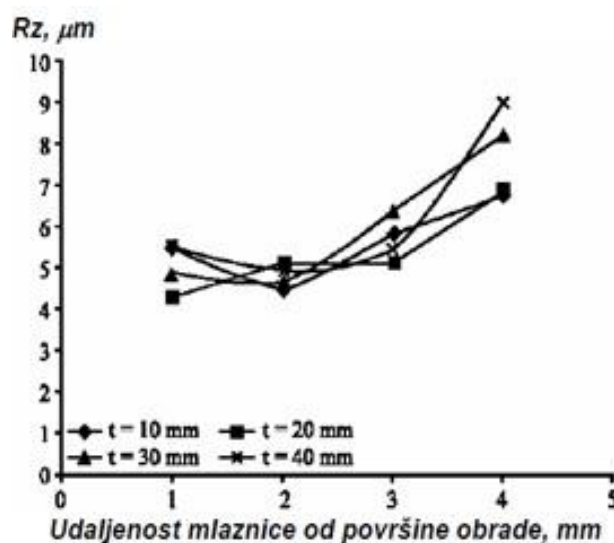
Ovisno o zahtjevima završne obrade, birati ćemo koja nam je poželjna razina hrapavosti. U slučaju da nam je potrebna visoka razina produktivnosti (velika brzina rezanja) moramo se zadovoljiti sa najvećom hrapavosti. No to ujedno znači i najmanju preciznost i kvalitetu obrade. Ovo može također biti posljedica premalog tlaka mlaza, prevelikog promjera mlaznice ili ako je ista oštećena. Srednjom hrapavosti ćemo se zadovoljiti u većini situacija jer pruža optimalni odnos brzine rezanja, hrapavosti, preciznosti i kvalitete obrađene površine. Te u konačnosti, najmanju hrapavost, za vrlo preciznu izradu za najtočnije i najkvalitetnije dijelove morati ćemo izabrati najsporiju brzinu rezanja.

6.5. Utjecaj različitih parametara na kvalitetu obrađene površine prilikom korištenja abrazivnog vodenog mlaza

Parametri obrade abrazivnim vodenim mlazom na kvalitetu površine koja se obrađuje ovise o:

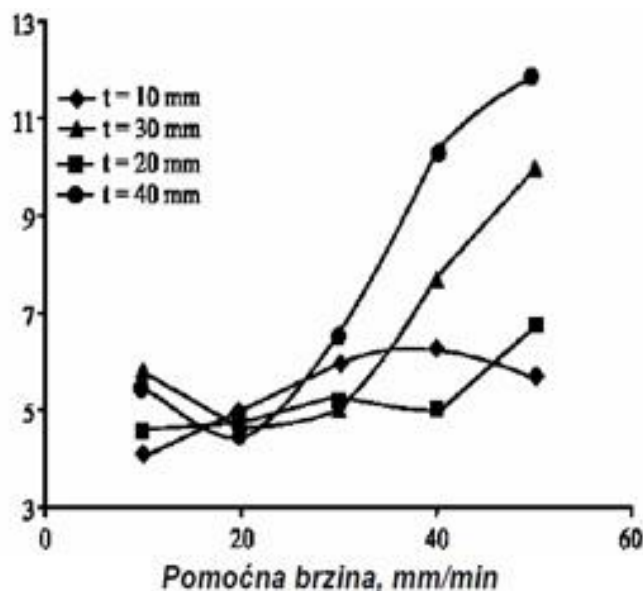
- Radnog pritiska vodenog mlaza,
- Kuta nagiba rezne glave,
- Udaljenosti mlaznice od obratka,
- Brzine kretanja obratka.

Postoji gotovo linearna povezanost udaljenosti mlaznice od površine obratka na hrapavost površine. Što je mlaz udaljeniji od površine, dolazi do smanjenja kohezije mlaza i povećava se grubost obratka.



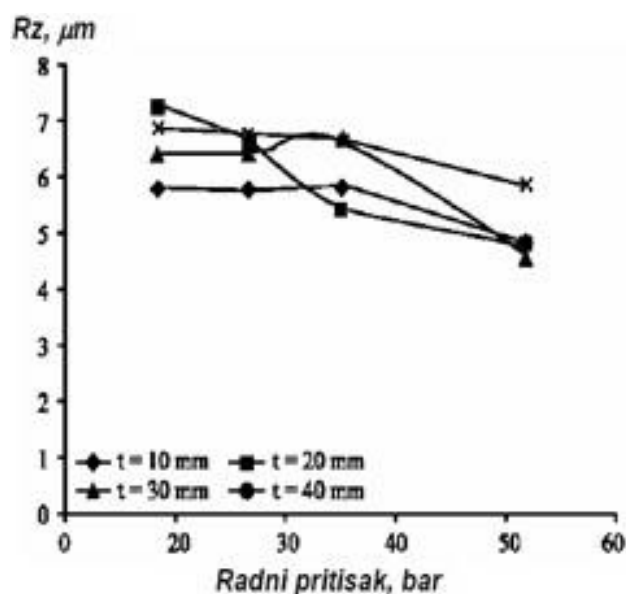
Slika 30. Ovisnost hrapavosti površine o udaljenosti mlaznice [12]

Hrapavost raste povećano s dubinom rezanja, te je to potrebno kompenzirati povećanim tlakom, približavanjem mlaznice površini obratka ili jednostavnim smanjenjem brzine rezanja kako bi se omogućilo dodatno vrijeme na koji bi vodeni mlaz i abraziv mogao izvršiti utjecaj na material koji se uklanja.



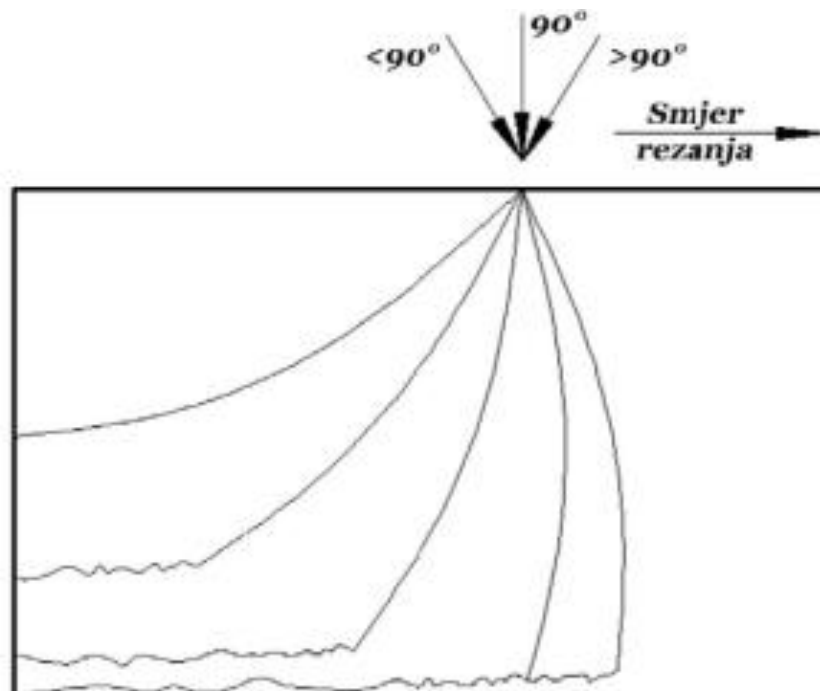
Slika 31. Utjecaj brzine kretanja obratka na hrapavost površine [12]

Radni pritisak ima jasni utjecaj na hrapavost materijala. Što je pritisak rezanja veći, to vodeni mlaz ima veću kinetičku energiju, a ukoliko je prisutan i abraziv, on se lomi na sitnije (finije) čestice, koje svojim udaranjem i odnošenjem materijala ostavljaju finiju površinsku hrapavost.



Slika 32. Utjecaj pritiska vodenog mlaza na hrapavost površine [12]

Prilikom obrade najčešće se koristi pravi kut, jer je tada utjecaj vodenog mlaza na obradak najveći. Varijacijama u kutu rezanja mogu se postići različite hrapavosti površine i dubine rezanja. Za veće brzine rezanja je pogodniji kut manji od 90° kako bi se kompenziralo za prebrzi prelazak preko obratka nedovoljno vrijeme utjecaja vodenog mlaza na isti.



Slika 33. Utjecaj kuta rezanja na dubinu rezanja [12]

6. PRAKTIČNI DIO

Za praktični dio ovog završnog rada korišten je uređaj za abrazivno vodeno rezanje KMT Waterjet Systems NEOLine NL-I40 (ovaj stroj se može upotrebljavati i u konfiguraciji za čisto vodeno rezanje). Karakteristike ovog stroja su pumpa snage 29 kW, radni tlak od 500 bara do 3800 bara i protok pri maksimalnom tlaku od 2,7 l/min. [14]



Slika 34. Radni stol, mlaznica i upravljačka jedinica



Slika 35. Kućište sustava niskog i visokog tlaka vode

6.1. Sastavni dijelovi sustava vodenog mlaza (niskotlačni dio)

Sustav niskog tlaka vode

Sustav niskog tlaka vode opskrbljuje protok vode za rezanje sustavu intenzifikacije.

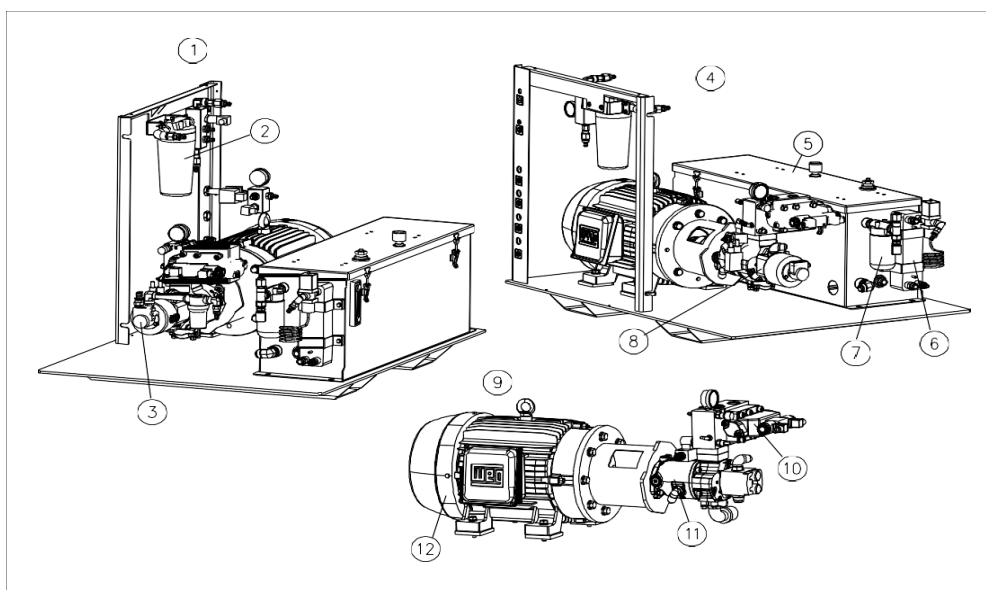
Komponente sustava uključuju pojačavajuću pumpu.

Sustav recirkulacije

Sustav recirkulacije je sustav hlađenja i filtracije koji osigurava ispravno kondicionirano ulje glavnom hidrauličkom sustavu. Glavne komponente sustava uključuju pumpu za recirkulaciju, izmjenjivač topline, sklop filtra ulja i rezervoar hidrauličkog ulja.

Hidraulički sustav

Hidraulički sustav opskrbljuje intenzifikator hidrauličkim uljem potrebnim za stvaranje visokotlačne vode. Glavne komponente sustava uključuju električni motor, hidrauličnu pumpu i 4-smjerni kontrolni ventil montiran na hidrauličkom kolektoru. [14]



Slika 36. Interni pregled komponenata niskotlačnog dijela sustava [14]

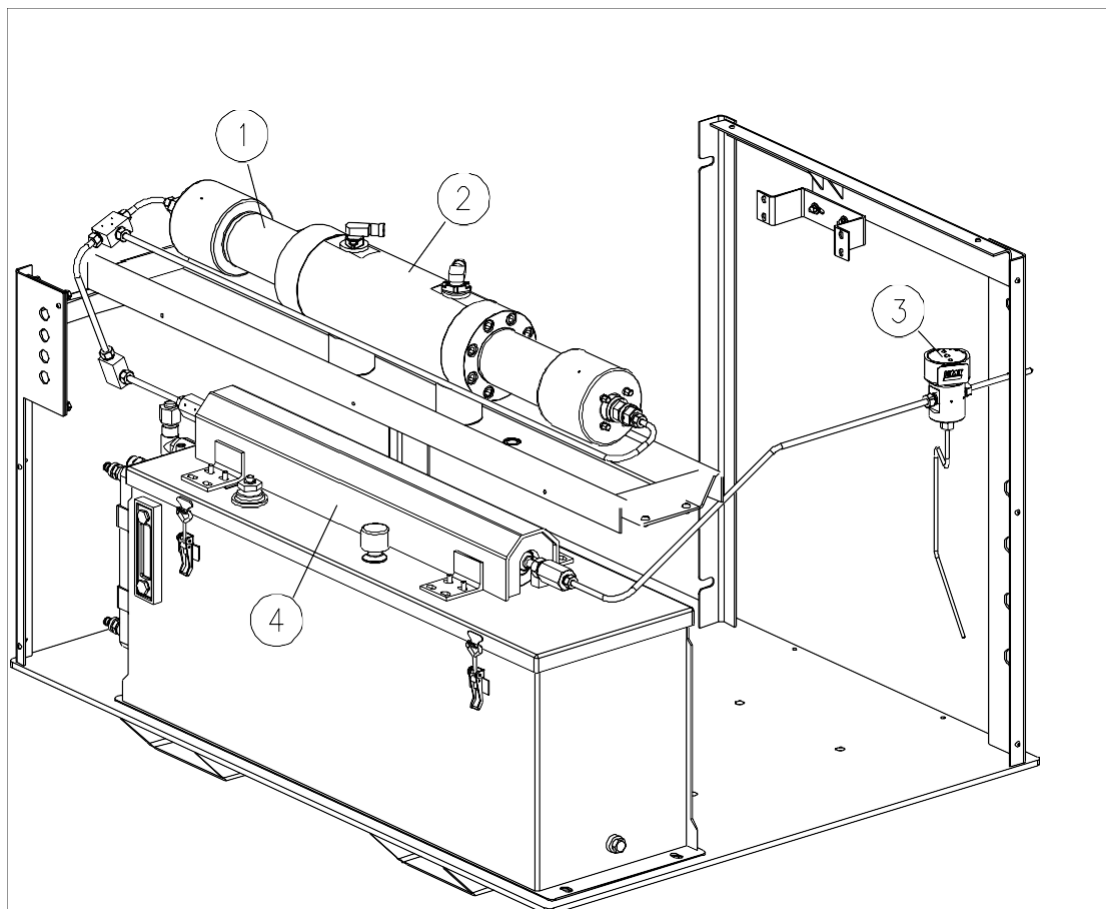
1. Sustav niskog tlaka vode
2. Sklop filtra niskog tlaka vode
3. Opcionalna pojačavajuća pumpa
4. Sustav recirkulacije
5. Rezervoar hidrauličkog ulja
6. Izmjenjivač topline
7. Sklop filtra ulja
8. Pumpe za recirkulaciju
9. Hidraulički sustav
10. Hidraulički kolektor
11. Hidraulički razvodnik
12. Električni motor

6.2. Sastavni dijelovi sustava vodenog mlaza (visokotlačni dio)

Sustav visokog tlaka vode

Sustav visokog tlaka vode je srce sustava vodenog mlaza. Voda se stlači i kontinuirano isporučuje u glavu za rezanje. Kada voda prolazi kroz malu rupu na mlaznici, tlak vode pretvara se u brzinu vode koja je sposobna rezati gotovo svaki materijal.

Glavne komponente uključuju sklopove cilindra visokog tlaka, hidraulički sklop cilindra, atenuator i sigurnosni ventil za istjecanje. Komponente sustava visokog tlaka prikazane su na slici 38. [14]



Slika 37. Komponente sustava visokog tlaka [14]

1. Sklop cilindra visokog tlaka
2. Hidraulički sklop cilindra
3. Sigurnosni ventil za istjecanje
4. Atenuator visokog tlaka

6.3. Sustav za dodavanje abraziva

KMT Abraline V je sustav kontinuiranog dovoda abraziva s dvostrukim spremnikom koji ima integrirani spremnik kapaciteta 400 kg povezan s dovodnim spremnikom za automatsko punjenje. Abraline V precizno prati dostupnost abraziva tijekom cijelog procesa rezanja, osiguravajući da proces rezanja nikada ne bude zaustavljen zbog nadopunjavanja granatnog pijeska.

Senzori razine na uređaju prate razinu abraziva u dovodnom spremniku pod tlakom i kada se spremnik približi praznom, uređaj automatski otpušta tlak i ponovno puni dovodni spremnik abrazivom iz spremnika za pohranu granatnog pijeska.

To će se kontinuirano događati sve dok se i spremnik za pohranu ne približi praznom stanju. Tada će sustav upozoriti operatora zvučnim alarmom.

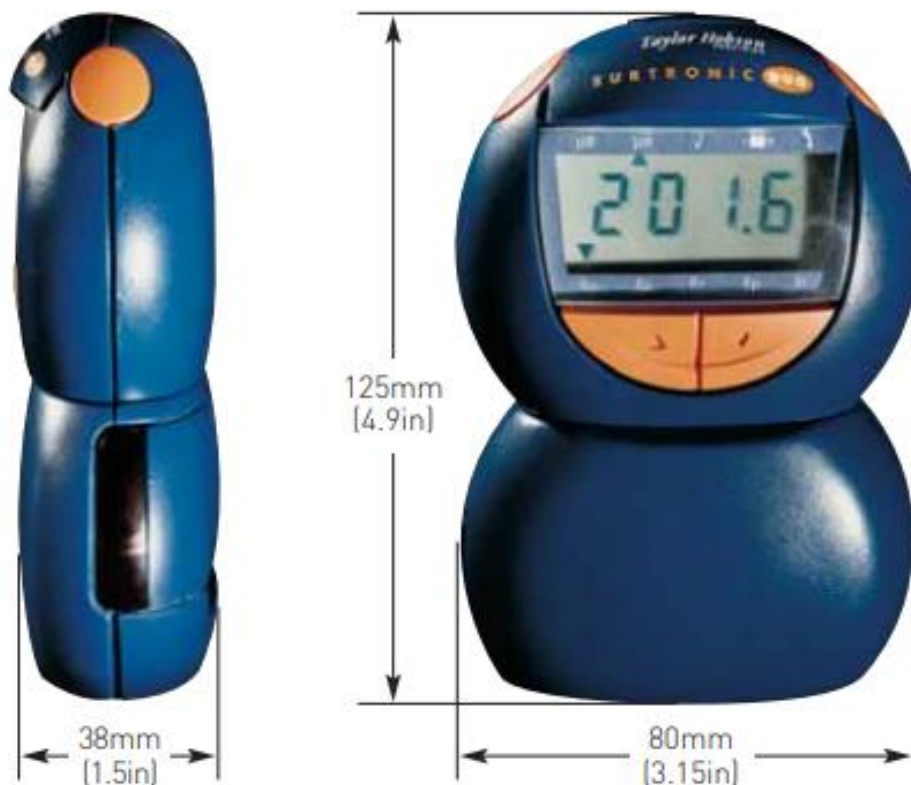


Slika 38. Uređaj za kontinuirano dovođenje abraziva

6.4. Uređaj za provjeru hrapavosti materijala

Uređaj koji se u nastavku završnog rada koristi za provjeru hrapavosti površinske obrade materijala je Surtronic Duo. Riječ je o prijenosnom uređaju s različitim modovima rada koji ticalom s dijamantnim vrhom ispituje hrapavost željene mjerne površine. U daljnjem tekstu će biti dan detaljan opis njegovih radnih karakteristika.

Prijenosni uređaj za provjeru površinske hrapavosti, Surtronic Duo mjeri Ra pritiskom na gumb i prikazuje rezultat na LCD ekranu. Vrijeme ciklusa je otprilike 5 sekundi, a rezultat se sprema sve dok se ne izvrši novo mjerenje. Dodatni parametri Rz, Rp, Rv i Rt mogu se prikazivati, a jedinice mjere mogu se prebacivati između inča i metričkog sustava bez ponovnog mjerenja dijela. Nema potrebe za postavljanjem ili programiranjem uređaja, spreman je za daljnju upotrebu. Obuka operatora nije potrebna te je dovoljno samo slijeđenje dobivenih uputstava. Trajanje baterije je minimalno 5000 mjerenja. [15]



Slika 39. Dimenzije uređaja Surtronic Duo [15]

6.4.1. Princip rada

Dijamantsko ticalo vuče se preko obrađene površine dijela. Motorizirani pogon za kretanje osigurava da se prijeđe ispravna horizontalna udaljenost. Vertikalno kretanje ticala dok putuje preko vrhova i dolina otkriva se pomoću piezo-električnog senzora koji pretvara mehaničko kretanje u električni signal. Električni signal se digitalizira i šalje mikroprocesoru, gdje se parametri trenutno izračunavaju koristeći standardizirane algoritme.

Surtronic Duo čini postupak jednostavnim. To je savršen alat za svakog korisnika koji želi provjeriti hrapavost bilo gdje, i to:

- Provjera serije proizvodnje prije otpreme,
- Kontrola procesa na proizvodnoj liniji,
- Kontrola kvalitete kao instrument na početnoj razini,
- Provjera velikih komponenti ili struktura.

Također, zbog olakšavanja pristupa korisnika, ovaj uređaj ima mogućnost razdvajanja na mjerni dio i daljinski upravljač. Donji dio sadrži mehanizam za kretanje i skupljanje stilusa. To se postavlja na površinu koja se mjeri. Ima široku bazu kako bi osigurala stabilnost. Gornji dio uključuje veliki LCD zaslon, gumb za pokretanje, gumbe za odabir načina rada i parametara. Ovo se udobno drži u ruci radi jednostavnog rukovanja i jasnog pregleda rezultata.



Slika 40. Surtronic Duo koristi infracrvenu (IrDA) vezu između gornje i donje jedinice kako bi omogućio bežično, udaljeno upravljanje na udaljenost do jednog metra, bez potrebe za kablovima. [15]

Surtronic Duo je konfiguriran za mjerenje prema najčešćim industrijskim postavkama:

- Duljina kretanja od 5 mm,
- Rezna vrijednost od 0,8 mm,
- 2CR filte,
- Dijamantski stilus s radijusom od 5 μm .

Unaprijed postavljanje ovih ključnih funkcija eliminira pogreške i osigurava usklađenost između više operatera.

Surtronic Duo koristi modernu elektroničko sklopovlje i komponente kako bi optimizirao performanse i produljio korisni radni vijek. Izvanredna pouzdanost i točnost od 5% očitavanja samo su neke od značajki koje se rijetko nalaze kod instrumenata u ovoj cjenovnoj kategoriji.

6.4.2. Radne karakteristike uređaja

Kao i svi mjerni uređaji tako i Surtronic Duo ima svoje radne karakteristike koje su date u tablici 5.

Tablica 5. Radne karakteristike uređaja Surtronic duo [15]

Dosegnuto područje mjerenja	200 μm
Točnost	5% očitavanja + 0,1 μm
Tip senzora	Piezoelektrični
Sila mjerenja	200 mg
Ticalo	Dijamantni, radijus 5 μm
Rezna vrijednost	0,8 mm \pm 15%
Filter	2CR
Duljina kretanja	5 mm
Brzina kretanja	2 mm/s
Jedinice prikaza	μm / μin
Trajanje baterije	Minimalno 5000 operacija

Surtronic Duo je uređaj s podvozjem. Vodicica vodi prikupljač duž radnog komada, pri čemu sam radni komad tvori osnovu za mjerenje. Ova metoda obično olakšava postavljanje smanjenjem potrebe za niveliranjem. Također smanjuje učinke vibracija zbog mnogo manje mjerne petlje. Vodicica je sastavni dio mjerača i ima dovoljno veliki radijus da spriječi kretanje unutar i izvan karakteristika hrapavosti površine. Ticalo i skid su neovisni u svojem kretanju

po visini (Z), ali se zajedno kreću u smjeru mjerenja. Površinska odstupanja se bilježe kao razlika između kretanja ticala i skida u smjeru Z-osovine.

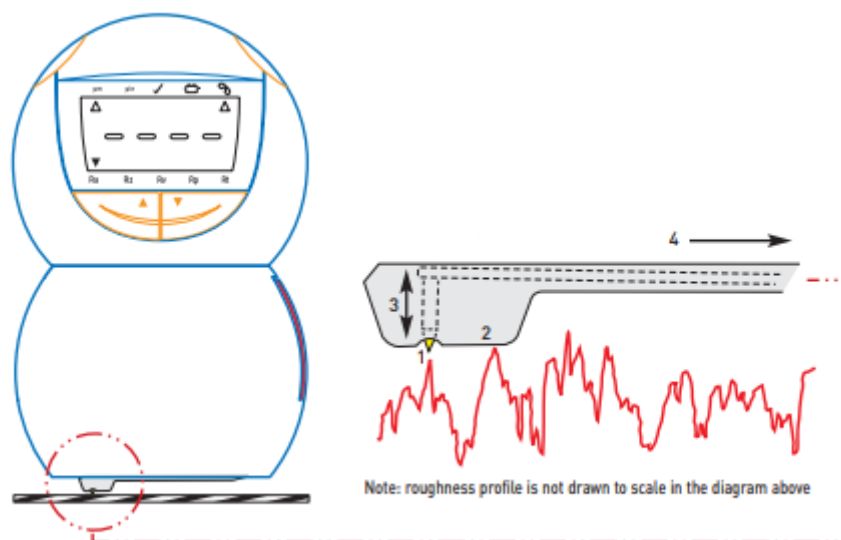
Skid će djelovati kao mehanički filter, uklanjajući veći dio opće forme komponente. Također, valne duljine veće od promjera skida neće biti registrirane.

Surtronic Duo koristi ticalo s radijusom vrha od 5 μm . Ovo odgovara svrsi Duo-a kao prijenosnom alatu za provjeru hrapavosti na tri načina:

Veliki radijus vrha ticala djeluje kao mehanički filter koji zanemaruje visokofrekventne površinske nedostatke koji se pouzdanije mjere u čistim prostorijama. Prilikom korištenja na radnom prostoru, vrh ticala se može zaprljati prljavštinom i uljem. Veći vrh ticala se lakše čisti periodičkim čišćenjem.

Veći vrh ticala je manje osjetljiv na nepravilno rukovanje i druge opasnosti koje se često nalaze na proizvodnim područjima. Drugi instrumenti Taylor Hobson koriste ticala s vrhom radijusa 2 μm . Ovaj manji radijus zajedno s induktivnom mjernom glavom koja ima nisku kontaktnu silu omogućuje analizu čak i najmanjih površinskih nesavršenosti.

Radijus vrha ticala je jedan od faktora koji mogu pridonijeti neusklađenosti između različitih instrumenata koji mjere istu površinu. [15]



Slika 41. Shematski prikaz mjerenja [15]

1. Vrh ticala
2. Skid (podvozje)
3. Pokret stilusa (Z-os)
4. Smjer mjerenja (X-os)

Surtronic Duo koristi ticalo s radijusom vrha od 5 μm . To odgovara namjeni Duo kao prijenosnog alata za provjeru hrapavosti na tri načina:

1. Veliki vrh stilusa djeluje kao mehanički filter za ignoriranje visokofrekventnih površinskih defekata koji se pouzdanije mjere u čistim prostorima.
2. Prilikom korištenja na radnom području, na vrhu ticala se skuplja prljavština i ulje. Veći vrh ticala olakšava periodično čišćenje.
3. Veći vrh je manje osjetljiv na nepravilno rukovanje i druge opasnosti koje se često javljaju na proizvodnim područjima.

Hrapavost, valovitost i forma su pojmovi koji opisuju različite aspekte karakteristika površine.

Hrapavost:

Hrapavost se odnosi na sitne nepravilnosti ili teksturu prisutnu na površini obratka. Predstavlja varijacije male skale u visini koje se javljaju zbog obrade, brušenja ili drugih proizvodnih procesa. Hrapavost se obično mjeri pomoću parametara kao što su Ra (prosječna hrapavost) ili Rz (srednja dubina hrapavosti).

Valovitost:

Valovitost se odnosi na šire, dulje valne varijacije u profilu površine. Predstavlja odstupanja od idealnog oblika površine na većoj udaljenosti. Valovitost često uzrokuju faktori poput vibracija alata, trošenja alata ili dinamičkih promjena u proizvodnom procesu. Parametri poput Wt (visina valovitosti) ili Wl (valna duljina) koriste se za kvantifikaciju valovitosti. [15]

Forma:

Forma, također poznata kao oblik ili kontura, odnosi se na općenite geometrijske karakteristike površine. Opisuje odstupanja od željenog ili nominalnog oblika obratka. Pogreške u formi mogu uključivati značajke poput ravnosti, kružnosti, pravocrtности ili cilindričnosti. Mjerenja forme obično se provode pomoću specijalizirane opreme poput koordinatnih mjernih strojeva (CMM) kako bi se zabilježile veće geometrijske varijacije. [15]

Ukratko, hrapavost se odnosi na teksturu površine male skale, valovitost bilježi odstupanja veće skale, a forma se odnosi na općenite geometrijske karakteristike površine. Svaki od ovih aspekata igra ulogu u procjeni kvalitete i funkcionalnosti obratka u različitim proizvodnim i inženjerskim aplikacijama. [15]

Mjerenje valovitosti i forme

Tipični instrument sastoji se od ticala, mjerača, promjenjive memorije i procesora. Za ispravno prikupljanje podataka, mjerač mora proći preko komponente u ravnoj liniji, pri čemu samo vrh ticala dolazi u kontakt s površinom koja se testira. Vertikalno kretanje ticala je u odnosu na promjenjivu memoriju, obično referentnu traku koja je brušena ili precizno obrađena s visokom tolerancijom pravocrtnosti. Mjerač detektira vertikalno kretanje stila, pretvara ga u signal i prenosi procesoru radi izračuna rezultata parametra i prikaza profilnog grafa. [15]

6.5. Praktični primjeri rezanja abrazivnim vodenim mlazom

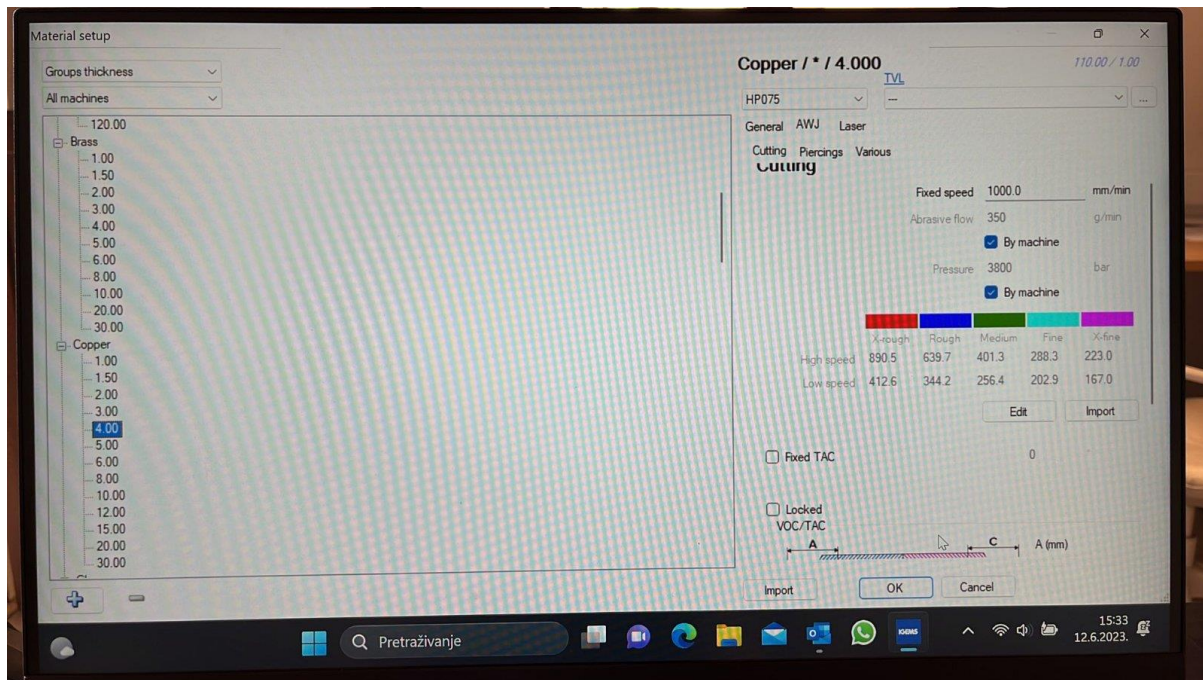
U ovom dijelu završnog rada vidjet ćemo utjecaj režima obrade i debljine materijala na hrapavost obrađene površine. Za primjere su uzeti obratci različitih debljina od bakra, PET polimera i konstrukcijskog čelika.

Kako bi se vidio potpuni utjecaj brzine rezanja ovisno o debljini izabranog materijala na stroju je izabrano podešenje s kojim se mogu rezati sve željene debljine.

Mjerenja su izvršena na originalnim uzorcima, a gdje nije bilo moguće vršiti mjerenje na originalnim uzorcima, mjerenja su izvršena na otpadnom dijelu materijala.

6.5.1. Rezanje bakra

Bakar, kao material koji je izrazito duktilan i izvrstan u provođenju topline, također je material koji je izuzetno pogodan za obradu vodenim mlazom, jer glavne prednosti rezanja vodenim mlazom dolaze najviše do izražaja pri njegovom rezanju.



Slika 42. Podešenje radnog režima na upravljačkoj jedinici vodenog mlaza za bakar debljine 4 mm

6.5.1.1 Rezanje bakra debljine 3 mm

Kao najtanja debljina bakra upotrebljena je ploča debljine 3 mm, iz priloženog mjerenja jasno je vidljivo da je hrapavost po liniji rezanja manja nego kod kontrolnog primjera od 4 mm.



Slika 43. Bakreni izradak debljine 3 mm s točkama mjerenja

Kod izrezivanja ove pozicije hrapavost nije bila toliko bitna, jer je pozicija rezana s dodatkom za naknadnu obradu glodanjem na konačne mjere. Zbog većih količina i teže obrade bakra glodanjem, predviđeno je prvo izrezivanje vodenim mlazom, a konačne dimenzije postignute su glodanjem.

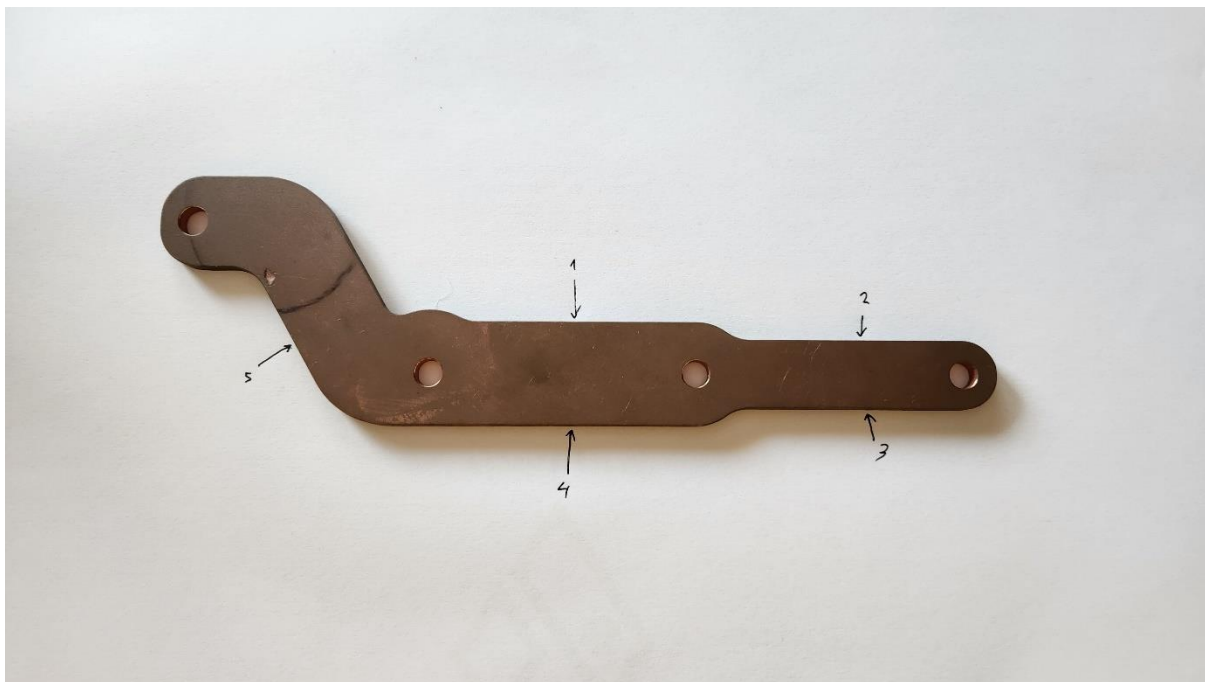
U sljedećoj tablici prikazani su rezultati mjerenja Ra u μm u svakoj pojedinoj točki i aritmetička sredina hrapavosti za bakar debljine 3 mm.

Tablica 6. Hrapavost za bakar debljine 3 mm

Mjerna točka	Hrapavost Ra u μm
1.	1,25
2.	1,36
3.	2,07
4.	0,95
5.	1,62
Aritmetička sredina	1,45

6.5.1.2 Rezanje bakra debljine 4 mm

Za sljedeću kontrolnu hrapavosti je uzeta pozicija od bakra debljine 4 mm pri srednjoj brzini rezanja od 401,3 mm/s, s kojom su rezane sve izabrane debljine.



Slika 44. Bakreni izradak debljine 4 mm s točkama mjerenja

U sljedećoj tablici prikazani su rezultati mjerenja Ra u μm u svakoj pojedinoj točki kao i aritmetička sredina hrapavosti za bakar debljine 4 mm.

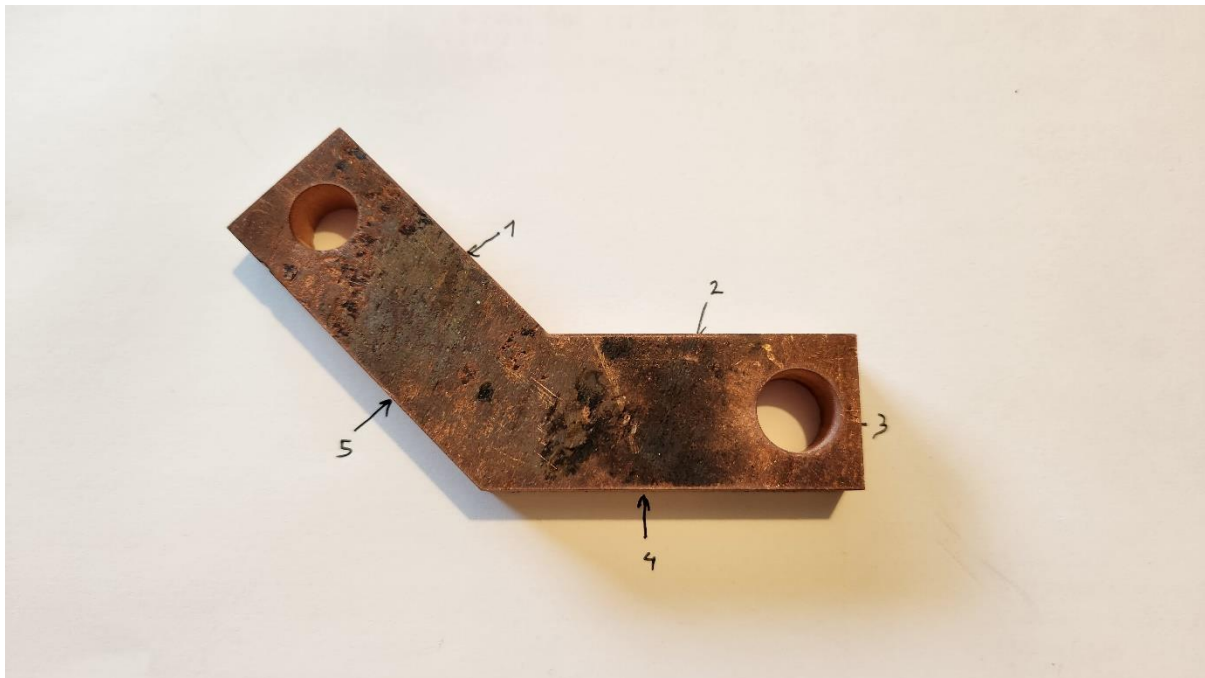
Tablica 7. Hrapavost za bakar debljine 4 mm

Mjerna točka	Hrapavost Ra u μm
1.	3,14
2.	3,59
3.	3,68
4.	4,09
5.	4,78
Aritmetička sredina	3,85

Izmjerena hrapavost Ra u pojedinim točkama i aritmetička sredina hrapavosti za bakar debljine 4 mm zadovoljava zahtjevima naručitelja.

6.5.1.3. Rezanje bakra debljine 12 mm

Rezanje bakra debljine 12 mm pokazuje porast u hrapavosti u mjerenim točkama, ali rast hrapavosti je zbog duktilnosti materijala ograničen.



Slika 45. Bakreni izradak debljine 12 mm s točkama mjerenja

U sljedećoj tablici prikazani su rezultati mjerenja Ra u μm u svakoj pojedinoj točki.

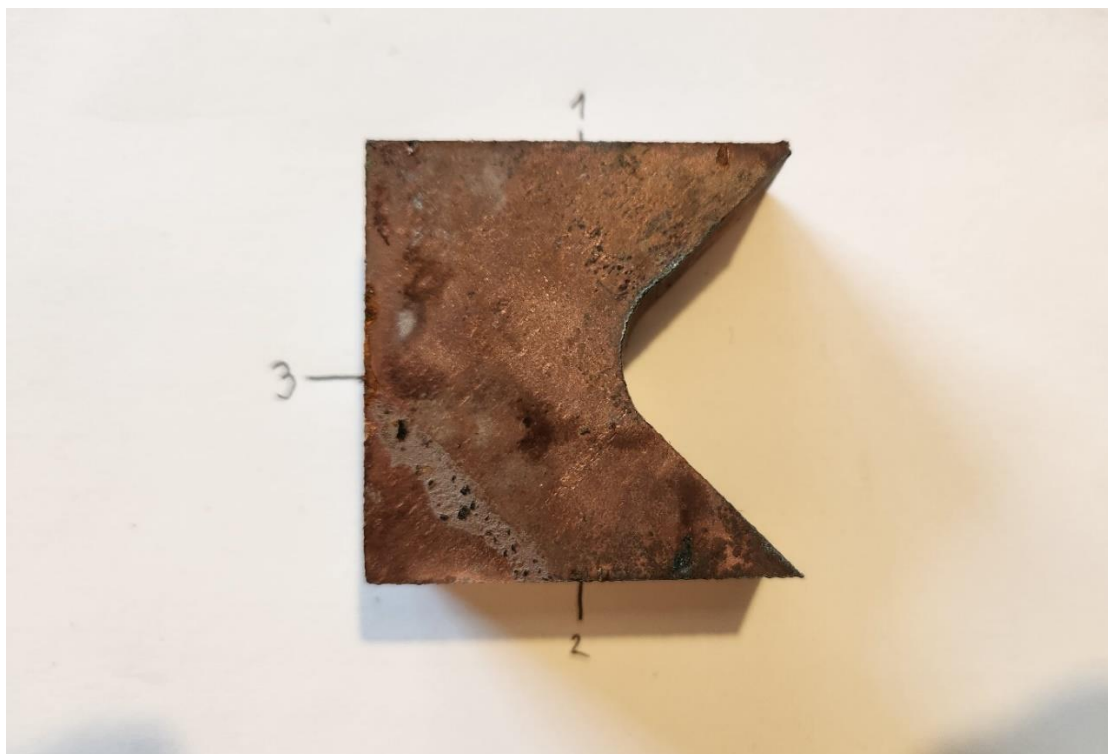
Tablica 8. Hrapavost za bakar debljine 12 mm

Mjerna točka	Hrapavost Ra u μm
1.	4,43
2.	5,00
3.	4,75
4.	5,24
5.	5,08
Aritmetička sredina	4,9

Izmjerena hrapavost Ra u pojedinim točkama i aritmetička sredina hrapavosti za bakar debljine 12 mm također zadovoljava zahtjevima naručitelja.

6.5.1.4. Rezanje bakra debljine 20 mm

Debljina bakra 20 mm nakon rezanja pokazuje porast u hrapavosti u mjerenim točkama, te je zbog povećanja debljine materijala daleko najprimjetniji porast u hrapavosti rezanja. Ovaj izradak je mjeren samo u tri točke zbog fizičkog ograničenja mjernog uređaja.



Slika 46. Bakreni izradak debljine 20 mm s točkama mjerenja

U sljedećoj tablici prikazani su rezultati mjerenja Ra u μm u svakoj pojedinoj točki.

Tablica 9. Hrapavost za bakar debljine 20 mm

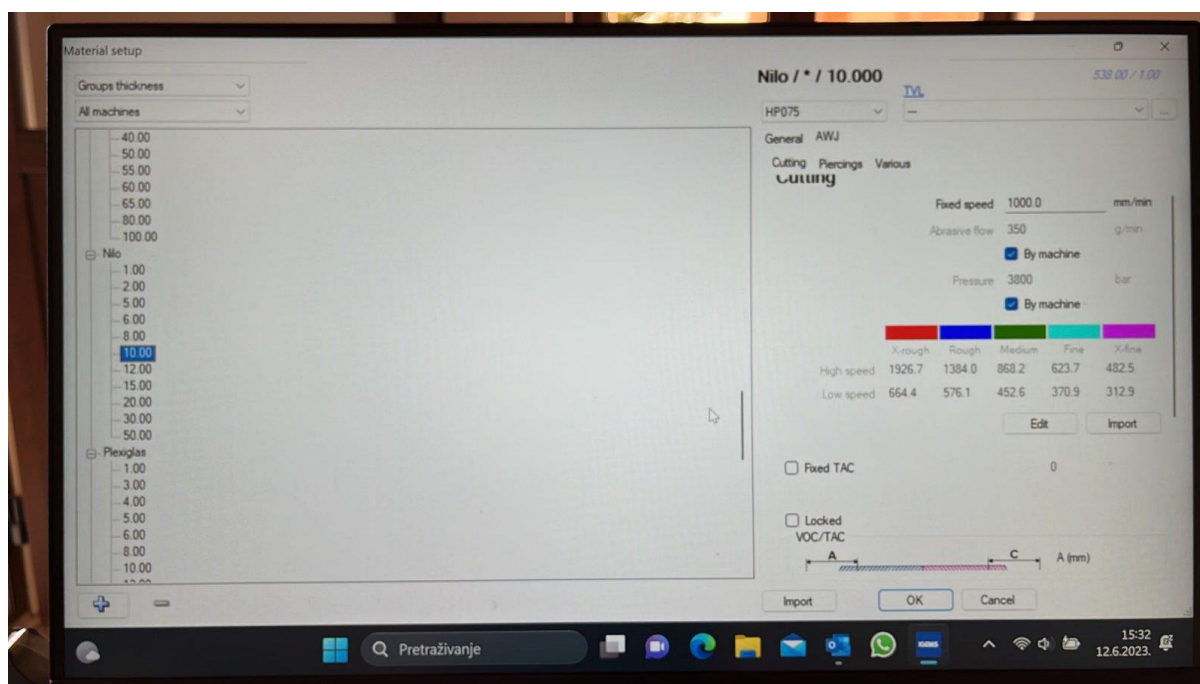
Mjerna točka	Hrapavost Ra u μm
1.	8.59
2.	5.26
3.	7.85
Aritmetička sredina	7.23

Izmjerena hrapavost u pojedinim točkama i aritmetička sredina hrapavosti za bakar debljine 20 mm zadovoljava zahtjevima naručitelja.

6.5.2. Rezanje PET polimera

Za razliku od bakra, PET polimer djeluje kao izolator i prilikom ostalih metoda obrade moglo bi doći do lokalnog nakupljanja topline, te s time do neželjene deformacije, promjene structure, pa čak i zapaljenja, topljenja i proizvodnja štetnih plinova i čestica. Tu opet do izražaja dolaze ranije navedene prednosti rezanja abrazivnim vodenim mlazom.

Na slici je prikazana izabrana brzina za rezanje PET polimera na stroju za abrazivno vodeno rezanje. Uzeta je srednja brzina rezanja za 10 mm debljine za polimerne izolator od 868,2 mm/s.



Slika 47. Izabrani radni režim za polimerni materijal

6.5.2.1. Rezanje PET polimera debljine 10 mm

U nastavku je mjerenje obavljeno na otpadnom dijelu polimernog materijala za dvije različite debljine.

Prvo je mjerena hrapavost Ra na otpadnom dijelu pozicije od PET polimera debljine 10 mm u naznačenim točkama prema slici 49.



Slika 48. Otpadni materijal od PET polimera debljine 10 mm s točkama mjerenja

Tablica 10. Hrapavost za PET polimer debljine 10 mm

Mjerna točka	Hrapavost Ra u μm
1.	9,45
2.	10,35
3.	6,72
4.	9,01
5.	7,2
Aritmetička sredina	8,54

Izmjerena hrapavost u pojedinim točkama i aritmetička sredina hrapavosti za PET polimer debljine 10 mm zadovoljava zahtjevima naručitelja.

6.5.2.2. Rezanje PET polimera debljine 20 mm

Potpuno očekivano, na otpadnom dijelu druge pozicije rezane iz PET polimera debljine 20 mm, rezultati mjerenja pokazuju veću hrapavos površine, uz istu brzinu rezanja kao i za polimer debljine 10 mm.



Slika 49. Otpadni materijal od PET polimera debljine 20 mm s točkama mjerenja

Tablica 11. Hrapavost za PET polimer debljine 20 mm

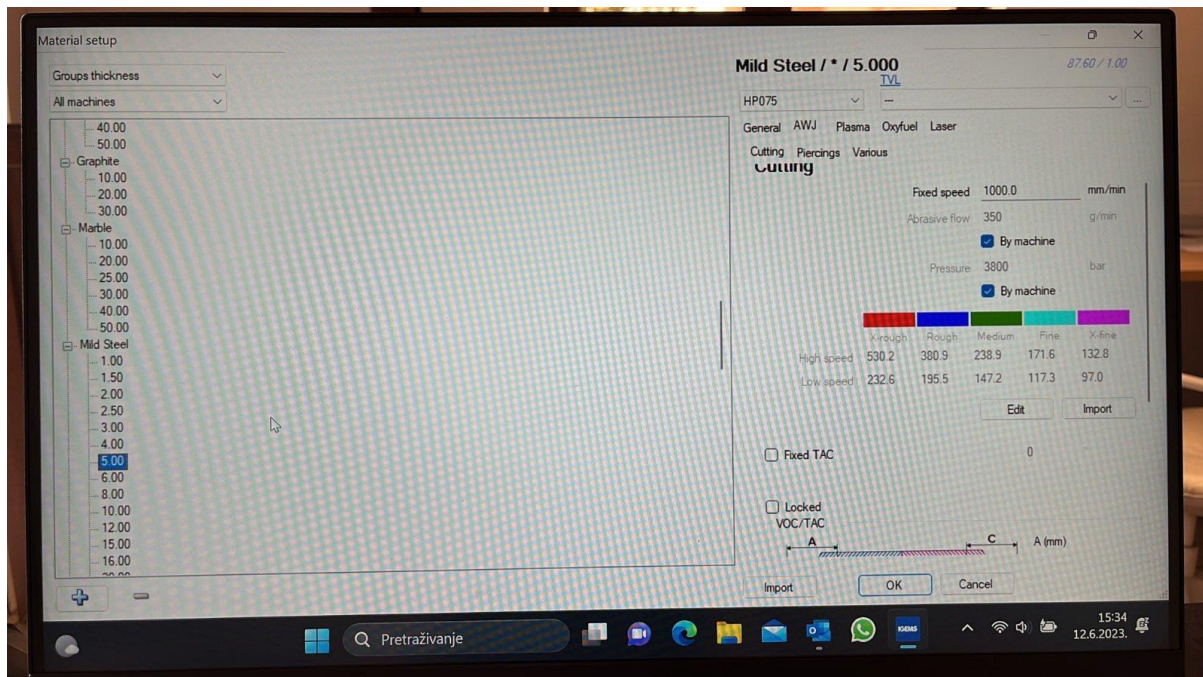
Mjerna točka	Hrapavost Ra u μm
1.	10,83
2.	10,79
3.	10,84
4.	12,33
5.	12,95
Aritmetička sredina	11,55

Izmjerena hrapavost Ra u pojedinim točkama i aritmetička sredina hrapavosti za PET polimer debljine 20 mm zadovoljava zahtjevima naručitelja.

6.5.3. Rezanje konstrukcijskog čelika

Kao završni test izrezan je jedan obradak od konstrukcijskog čelika Č.0461 debljine 5 mm identičnom brzinom.

Na slici je prikazana izabrana brzina za rezanje konstrukcijskog čelika na stroju za abrazivno vodeno rezanje. Uzeta je srednja brzina rezanja za 5 mm debljine za konstrukcijske čelike od 238,9 mm/s.



Slika 50. Podešenje radnog režima na upravljačkoj jedinici vodenog mlaza za konstrukcijski čelik Č.0461 debljine 5 mm

6.5.3.1. Rezanje konstrukcijskog čelika debljine 5 mm

Zbog geometrije izratka i ograničenja mjernog uređaja izabrane su 4 točke za mjerenje umjesto standardnih 5, ali raspon mjernih rezultata pokazuje očekivanu raspodjelu. Mjerenje je i ovdje izvršeno na otpadnom dijelu materijala.



Slika 51. Izradak od konstrukcijskog čelika debljine 5 mm

Tablica 12. Hrapavost za konstrukcijski čelik debljine 5 mm

Mjerna točka	Hrapavost Ra u μm
1.	5,34
2.	5,13
3.	5,68
4.	4,28
Aritmetička sredina	5,11

Izmjerena hrapavost u pojedinim točkama i aritmetička sredina hrapavosti za konstrukcijski čelik debljine 5 mm zadovoljava zahtjevima naručitelja.

8.6. Analiza rezultata

Nakon izvedenih mjerenja hrapavosti površine Ra na dijelovima ili na otpadnom dijelu materijala iz kojeg je izrađen obradak pri kojima smo iste parametre obrade koristili za različite debljine materijala možemo primijetiti razliku u kvaliteti obrađenih površina.

Mjerenjem hrapavosti Ra na rezanim pozicijama iz bakra ili otpadnog dijela za istu poziciju od bakra, možemo prema tablicama 5. do 8. zaključiti uspoređujući aritmetičke sredine, kako hrapavost površine raste s debljinom materijala. U tablici 13. prikazane su vrijednosti aritmetičkih sredina za izmjerene hrapavosti površina na pozicijama iz bakra s pripadajućim razredom hrapavosti N.

Tablica 13. Usporedba aritmetičkih sredina za bakar

Debljina bakra u mm	Aritmetička sredina Hrapavosti Ra u μm	Razred hrapavosti N
3	1,45	N4
4	3,85	N5
12	4,90	N6
20	7,23	N6

Analizirajući rezultate iz tablice 13. za bakar vidljivo je da s porastom debljine materijala raste i hrapavost površine Ra, ali kvalitete površina prema razredu hrapavosti spadaju u finu obradu. Prema ovim podacima, ukoliko bi bilo potrebno za pozicije iz bakra debljine 12 do 20 mm i deblje, povećanjem pritiska i smanjenjem brzine rezanja ostvarili bi još bolje rezultate hrapavosti površina Ra.

Jednaka usporedba napravljena je prema tablicama 9. i 10. za pozicije iz PET materijala i isto je prikazano u tablici 14.

Tablica 14. Usporedba aritmetičkih sredina za PET materijal

Debljina PET materijala u mm	Aritmetička sredina Hrapavosti Ra u μm	Razred hrapavosti N
10	8,54	N9
20	11,55	N9

Prema ovim podacima iz tablice 14. za PET materijale vrijedio bi isti zaključak kao i kod bakra. Porastom debljine materijala raste i hrapavost površine Ra, ali kvalitete površina prema razredu hrapavosti spadaju također u finu obradu gdje su zahtjevi za kvalitetu obrađene površine mali.

Kao i kod bakra ukoliko bi bilo potrebno za pozicije iz PET materijala debljine 10 do 20 mm i deblje, povećanjem pritiska i smanjenjem brzine rezanja ostvarili bi još bolje rezultate hrapavosti površina Ra.

U tablici 15. prikazan je rezultat mjerenja hrapavosti površine na poziciji iz konstrukcijskog čelika Č.0461.

Tablica 15. Aritmetička sredina za konstrukcijski čelik Č.0461

Debljina konstrukcijskog čelika u mm	Aritmetička sredina Hrapavosti Ra u μm	Razred hrapavosti N
5	5,11	N5

Analizirajući rezultat mjerenja na rezanoj površini konstrukcijskog čelika Č.0461 i svratavanjem aritmetičke sredine hrapavosti Ra u razred hrapavosti kvalitete obrađene površine, vidljivo je da je s odabranim režimima obrade za čelik postignuta fina kvaliteta obrađene površine.

Na osnovu predhodnih analiza za bakar i PET materijal možemo zaključiti da će se hrapavost površine Ra i kod čelika povećavati s debljinom materijala. U slučaju da kod većih debljina čelika moramo ostati u razredu hrapavosti fine obrade, morali bi mijenjati režime obrade, a to znači povećati pritisak i smanjivati brzinu rezanja. Naravno da uz sve to potrebno je sagledati i ekonomsku stranu.

7. ZAKLJUČAK

Obrada pomoću vodenog mlaza je jedna od istovremeno najsvestranijih i najprilagodljivijih tehnologija obrade koja je dostupna. Njena prilagodljivost širokom spektru materijala i gotovo beskonačna mogućnost prilagođavanja ovisno o potrebi omogućuje nam da dobijemo uvijek željenu kvalitetu obradaka.

Kao tehnologija koja je u posljednjih nekoliko desetljeća doživjela značajan razvoj i s time postepeno sve veću raširenost kroz različite industrijske grane, uz to sve više zamjenjuje druge oblike obrade poput lasera ili plazme zbog svojih širih područja primjene. Široki spektar materijala koji se njime mogu obraditi, uz željenu hrapavost površine je od iznimne važnosti u svim industrijskim granama. Vrlo je bitna činjenica da kod obrade metala nema promjene temperature prilikom obrade i svojstva materijala ostaju nepromijenjena.

Uz sve navedene prednosti, s obzirom na potrebu za postizanja sve veće održivosti i smanjenog utjecaja na okoliš, vodeni mlaz ima osiguranu budućnost u različitim industrijskim granama.

LITERATURA

1. http://www.waterjets.org/index.php?option=com_content&task=category§ionid=4&id=46&Itemid=53
2. <http://www.waterjetcuttingchiller.com/process-and-parts/>
3. <https://www.manufacturingguide.com/en/pure-water-jet-cutting-2d>
4. <https://flextek.pl/produkty/lechler-gmbh/dysze-przemyslowe-lechler/dysze-plaskostrumieniowe/>
5. <https://hrcak.srce.hr/file/191149>
6. <https://www.ri.se/en/what-we-do/services/surface-roughness-measurement-using-optitopo-technique>
7. https://www.sv-jme.eu/?ns_articles_pdf=/ns_articles/files/ojs/4526/public/4526-24727-1-PB.pdf&id=3388
8. <https://slidetodoc.com/wyklad-6-tolerancje-i-pasowania-w-prezentacji-wykorzystano/>
9. Nacrtna geometrija sa tehničkim crtanjem – predavanja, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 10.2013.
10. https://www.researchgate.net/figure/Cut-surface-generated-in-abrasive-water-jet-cutting-of-aluminium-alloy-The-cut-surfaces_fig3_270464309
11. <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/waterjetcutting/economic-considerations-when-purchasing-a-jet-cutting-machine>
12. Prof. Dr. Nedić B. i Mr. Baralić J. :“OBRADA ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM I KVALITET OBRAĐENE POVRŠINE“
13. www.fsb.hr/kas/.../2Nekonvencionalne%20obrade%20ECM-EDM-WJ.pp
14. Manual NL-I 40 Rev1
15. <http://idef.hr/nova/aploads/files/DUO.pdf>