

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Maja Miletić

OBRADA VODENIM MLAZOM

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2016.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Maja Miletić

OBRADA VODENIM MLAZOM

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Viši predavač
Marijan Brozović, dipl.ing

KARLOVAC, 2016.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: **Strojarstva**
Usmjerenje: **Proizvodno strojarstvo**

Karlovac, 10.05.2016.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Maja Miletić**

Matični broj: 0110613114

Naslov:

OBRADA VODENIM MLAZOM

Opis zadatka:

Rezanje vodenim mlazom spada među nekonvencionalne postupke obrade metala, koje se temelje na postupku mehaničkog odnošenja materijala. Abrazivni vodeni mlaz je tanak mlaz mješavine vode i kremenog pijeska pod visokim tlakom, koji djeluje na radni komad koji se obrađuje i erozijom odnosi osnovni materijal, te tako radi rez.

U ovom završnom radu potrebno je dati literaturni pregled i karakteristike obrade čistim i abrazivnim vodenim mlazom, navesti prednosti i nedostatke obrada, praktično prikazati izrezivanje prirubnica abrazivnim vodenim mlazom, objasniti princip rada stroja za obradu vodenim mlazom, područje primjene vodenog mlaza i upotreba.

Zadatak izraditi i opremiti sukladno Pravilniku o Završnom ispitu VUK-a.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

10.05.2015.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Marijan Brozović dipl. ing. v.p.

IZJAVA

Završni rad sam izradila samostalno služeći se znanjem stečenim za vrijeme studija i pomoću navedene literature.

Zahvaljujem se voditelju i mentoru profesoru Marijanu Brozoviću, dipl. ing. na stručnim smjericama i korisnim savjetima pri izradi.

Posebno se zahvaljujem svojoj cijeloj obitelji, a posebno suprugu Miletić Goranu, ocu Mihalić Branku, te tetku Stjepanek Zlatku na pruženoj potpori i pomoći tijekom studija.

SAŽETAK

Postupak obrade materijala vodenim mlazom spada među mehaničke postupke obrade, kao i obrada abrazivnim vodenim mlazom, pri kojem čestice abraziva velikom brzinom napuštaju mlaznicu u reznoj glavi i udaraju u obradak. Obrada čistim vodenim i abrazivnim vodenim mlazom idealna je za rezanje različitih materijala, tako da sve više zamjenjuje obrade plazmom i laserom, s tim da ima širu primjenu, jer se sa vodenim abrazivnim mlazom mogu obrađivati gotovo svi metalni i nemetalni materijali, male i velike tvrdoće.

Ključne riječi: obrada vodenim mlazom, obrada vodenim abrazivnim mlazom, kvaliteta obrađene površine

SUMMARY

The method of processing materials waterjet is among the mechanical processing operations as well as processing abrasive waterjet in which abrasive particles rapidly leave the nozzle in the cutting head and hitting the workpiece. Waterjet cutting with pure water and the abrassive waterjet system is an ideal machine for the cutting of various materials and is extremely versatile compared to alternative machinery such as lasers and plasmas, because with abrasive waterjet you can cut steel and non-steel materials.

Key words: waterjet processing, processing of abrasive waterjet, surface quality

Sadržaj

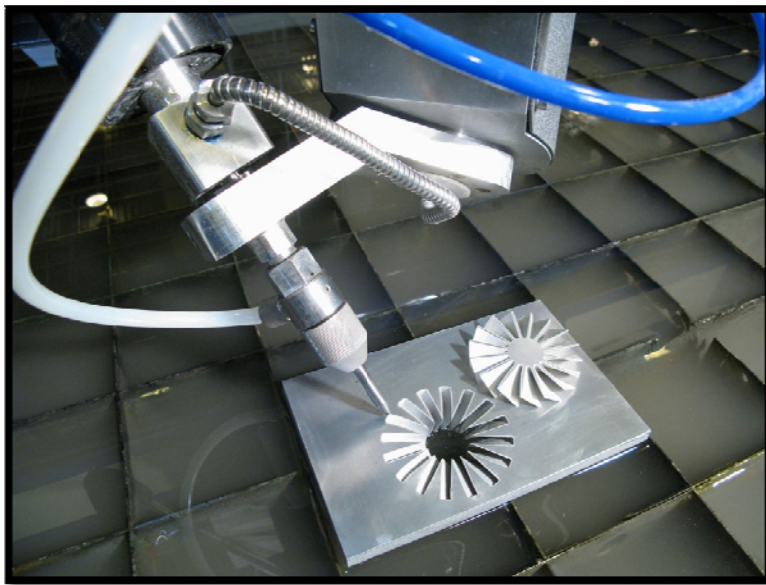
1. UVOD.....	1
2. POVIJESNI RAZVOJ VODENOG MLAZA	2
3. OBRADA ČISTIM VODENIM MLAZOM	3
3.1. Rezanje čistim vodenim mlazom	5
4. OBRADA ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM	6
4.1. Abrazivna sredstva	9
4.2. Rezanje abrazivnim vodenim mlazom	11
5. PODRUČJE PRIMJENE I UPOTREBA VODENOG MLAZA	13
6. POVRŠINA OBRADU.....	15
6.1. Utjecaj parametara obrade abrazivnim vodenim mlazom na kvalitetu obrađene površine	18
7. MICRO JET REZANJE	21
8. STROJ ZA OBRADU VODENIM MLAZOM.....	22
8.1. Visoko tlačna pumpa	23
8.2. Rezna glava	26
8.3. Sustav za upravljanje pomoću računala	28
9. PRAKTIČNI RAD – IZREZIVANJE PRIRUBNICA	29
10. ZAKLJUČAK.....	33
11. LITERATURA	34
12. PRILOZI.....	35
12.1. Popis slika	35
12.2. Popis tablica	37

1. UVOD

Sveukupni tehnološki razvoj u drugoj polovici prošlog stoljeća u velikoj mjeri odnosio se na usavršavanje postojećih i razvoj novih tehnologija. Osnovni cilj je bio povećanje kvalitete, smanjenje troškova izrade proizvoda i ostvarivanje velike točnosti kroz manja investicijska ulaganja, te kraće vrijeme izrade. U procesu obrade materijala može se reći da postoje dvije metode obrade: konvencionalni i nekonvencionalni postupci obrade. Kod konvencionalne obrade materijala najčešći problemi su lom i trošenje alata, neekonomičnost ili nemogućnost obrade. Iz tih razloga počeli su se razvijati nekonvencionalni postupci obrade.

Nekonvencionalni postupak obrade uklanjanja viška materijala, izmjene oblika, dimenzije i strukture materijala ostvaruje korištenjem raznih oblika energije (kemijske, električne, magnetske...) koje su dovedene u proces. Svaka od postojećih nekonvencionalnih metoda obrade materijala može se izjednačiti sa strojnom obradom materijala uzimajući u obzir sve kriterije.

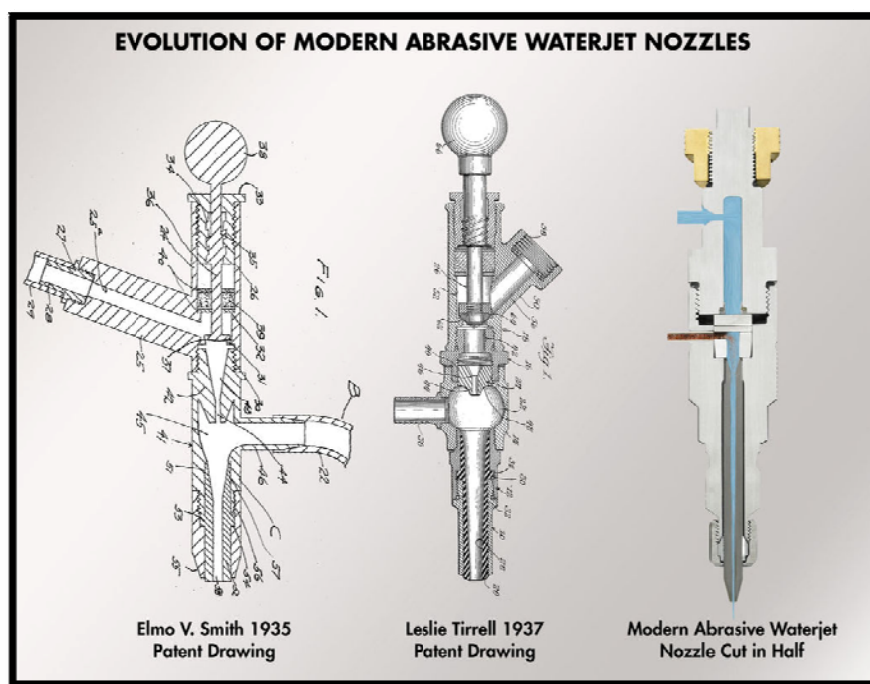
Jedna relativno mlada tehnologija i predmet brojnih istraživanja, a spada u nekonvencionalne postupke obrade je obrada vodenim mlazom. Karakterizira ju niz prednosti u odnosu na konvencionalne postupke obrade pri čemu veliku primjenu pronalazi kod obrade tanjih materijala, kompleksnijeg izgleda.



Slika 1.1. Rezanje vodenim mlazom [3]

2. POVIJESNI RAZVOJ VODENOG MLAZA

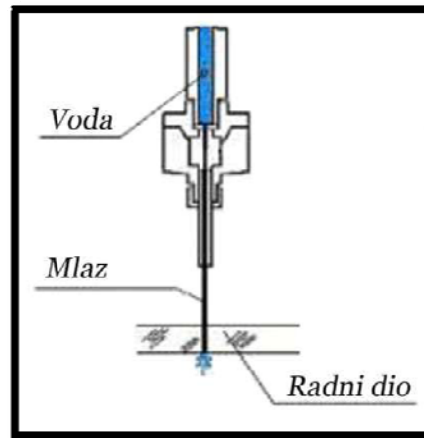
Prva upotreba mlaznica vode pod tlakom zabilježena je 1852. godine za iskop zlata. Nakon toga mlaznice vode upotrebljavale su se za čišćenja. SSSR je počeo koristiti vodeni mlaz za čišćenje rudnika u Ukrajini, a nakon toga za kopanje rupa za postavljanje eksploziva u stijenama unutar rudnika. Šumarski inženjer Norman Franz pedesetih godina prošlog stoljeća upotrijebio je vodeni mlaz za rezanje drveta, ali ti prvi pokušaji nisu našli širu tržišnu primjenu. Prva pumpa za rezanje vodenim mlazom počela se proizvoditi u SAD-u 1971. godine. U početku su se mlazom vode rezali samo kompozitni materijali. Ali tek 80-tih godina prošlog stoljeća počela je šira primjena vodenog mlaza zbog dodavanja abrazivnih čestica, te se postupak nazvao rezanje abrazivnim vodenim mlazom. Danas postupak rezanja vodenim mlazom nalazi sve veću primjenu.



Slika 2.1. Povijesni razvoj raspršivača [9]

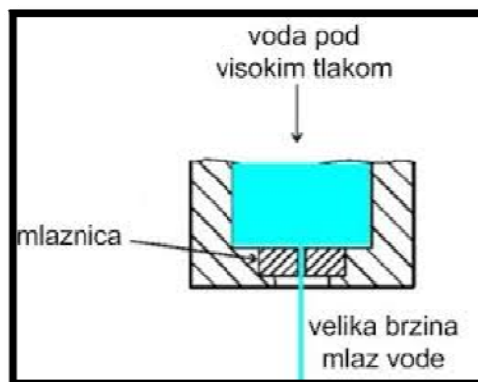
3. OBRADA ČISTIM VODENIM MLAZOM

Postupak obrade materijala čistim vodenim mlazom spada među mehaničke postupke obrade, koji se temelji na korištenju kinetičke energije mlaza dobivene uslijed jako velike brzine strujanja vode (do 1000 m/s). Vodeni mlaz koji se koristi za industrijsko rezanje je oko 30 puta jači nego mlazovi koji se koriste za automatsko pranje automobila, a tri puta brži od brzine zvuka.



Slika 3.1. Rezanje čistim mlazom vode [12]

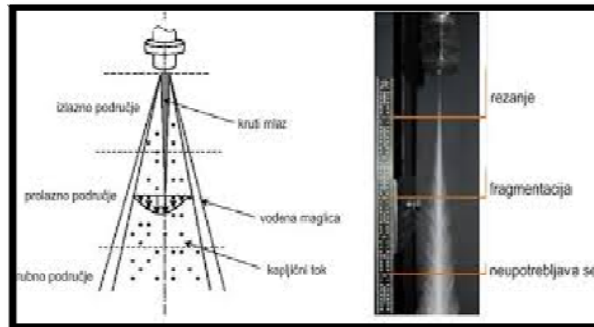
Princip rada je vrlo jednostavan i zasniva se na prolazu vode kroz uski regulator protoka vode i rezu cijev (0,1 mm do 0,4 mm) pod ekstremno visokim tlakom (2000 - 4000 bara). Koristi se samo energija vodenog mlaza. Zbog svoje velike brzine, voda koja prolazi kroz vodenu mlaznicu (dijamant, safir), mora biti čista te zbog toga prolazi kroz grube i fine filtere, da ne dođe do oštećenja mlaznice. Pri istjecanju vode iz mlaznice formira se uzak mlaz vode velike brzine (slika 3.2.).



Slika 3.2. Nastanak vodenog mlaza [4]

Na slici 3.3. prikazan je trenutak kada vodeni mlaz stupa u zračnu atmosferu te se dijeli na:

- IZLAZNO PODRUČJE – stvara se kruti mlaz koji služi za rezanje
- PROLAZNO PRODRUČJE – stvara se vodena maglica koja služi za fragmentaciju
- RUBNO PODRUČJE – stvara se kapljični tok koje se ne upotrebljava



Slika 3.3. Struktura vodenog mlaza [4]

Prednosti obrade čistim vodenim mlazom:

- ne dolazi do zagrijavanja materijala u zoni obrade
- ne stvara se prašina i čestice koje predstavljaju opasnost za disanje
- nema promjene strukture materijala
- za rezanje se koristi samo jedan alat
- jednostavna automatizacija postupka
- ekološki prihvatljiv postupak, ne očišćuje okolinu
- brza priprema stroja
- točnost obrade
- nema oštih rubova nakon rezanja
- male posmične sile za vrijeme obrade

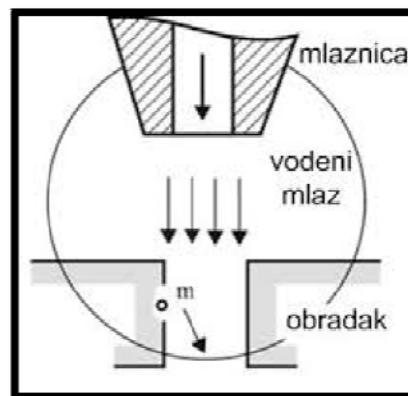
Nedostaci obrade čistim vodenim mlazom:

- ograničen je broj materijala koji mogu biti ekonomično rezani (jedan od glavnih nedostataka)
- postoji opasnost od korozije kod materijala sklonih tome, te se nakon obrade moraju zaštititi od korozije

- za vrijeme rezanja stvara se velika buka (do 100db)
- ne mogu se rezati deblji materijali
- obrada vrlo tvrdih materijala je vrlo teška ili gotovo nemoguća

3.1. Rezanje čistim vodenim mlazom

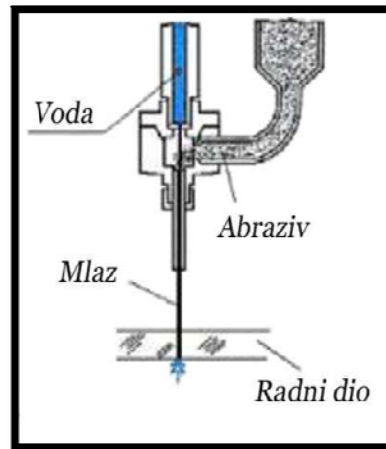
Rezanje čistim vodenim mlazom se koristi za organske i anorganske materijale, a najčešće se koristi kod rezanja papira, gume, tekstila, kože, drva, plastike, u proizvodnji pelena itd. Tlak vode, promjer mlaznice i brzina mlaza su prevladavajući faktori, koji utječu na učinkovitost i kvalitetu obrade rezultata obrade mlazom vode. Volumen i tlak od toka mlaza vode imaju drugačiji učinak na rezanje. Povećanjem tlaka i smanjenjem promjera mlaznice postiže se veća dubina reza kod istog volumnog protoka vode.



Slika 3.4. Obrada čistim vodenim mlazom [1]

4. OBRADA ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM

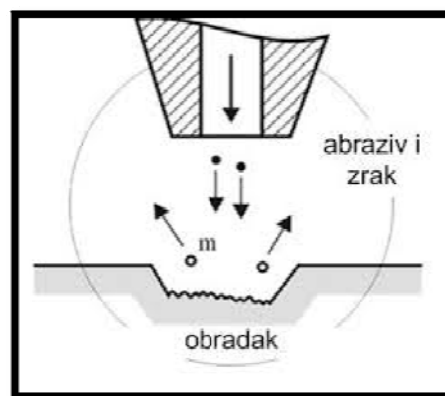
Postupak obrade materijala abrazivnim vodenim mlazom je mehanički postupak obrade, pri kojem čestice abraziva velikom brzinom napuštaju mlaznicu u reznoj glavi i udaraju o obradak.



Slika 4.1. Abrazivni vodeni mlaz [12]

Abrazivni vodeni mlaz je tanak mlaz mješavine vode i abrazivnog sredstva pod visokim tlakom koji djeluje na materijal koji se obrađuje i erozijom odnosi osnovni materijal te tako radi rez.

Za postupak obrade potrebno je imati vrlo visok tlak vode, abrazivno sredstvo, te odgovarajuće parametre obrade. Abrazivne čestice pri izlazu iz mlaznice, zbog svoje velike brzine i tvrdoće udaraju u obradak te izazivaju pukotine, a voda dodatno širi pukotine i odnosi materijal, kako je prikazao na slici 4.2.



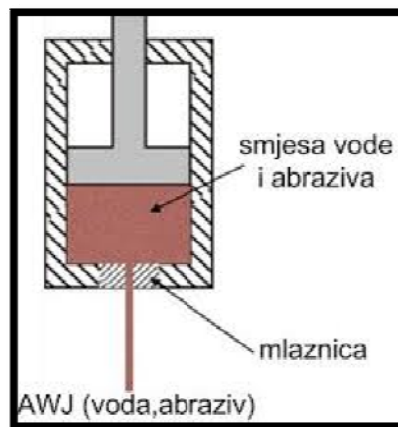
Slika 4.2. Obrada abrazivnim vodenim mlazom [1]

Osnovni dijelovi sustava za rezanje abrazivnim vodenim mlazom su:

- dovod vode
- sustav za dobivanje visokog tlaka vodenog mlaza
- rezna glava sa spremnikom abrazivnih sredstava
- sustav za upravljanje pomoću računala kojim se definira putanja rezne glave

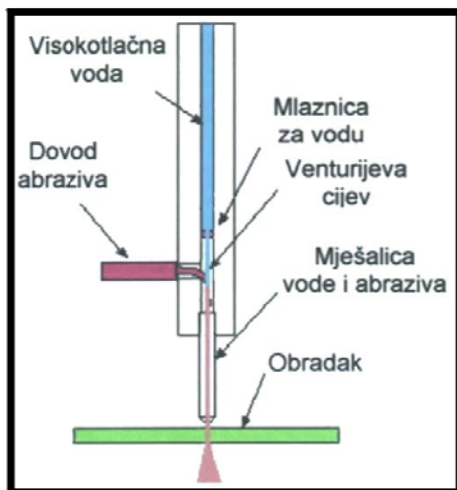
Postoje dvije vrste abrazivnog vodenog mlaza:

- SUSPENZIJSKI VODENI MLAZ- nastaje kada se kroz mlaznicu istiskuje već pripremljena smjesa vode i abraziva (slika 4.3.)



Slika 4.3. Suspenzijski vodeni mlaz [4]

- INJEKCIJSKI VODENI MLAZ – voda pod visokim tlakom prolazi kroz mlaznicu malog promjera i na taj način se stvara vodeni mlaz velike brzine koji zatim prolazi kroz Venturijevu cijev. U cijevi se uslijed Venturijevog efekta stvara vakuum, koji je dovoljan da usisa određenu količinu abraziva u nju. Vodeni mlaz ubrzava čestice abraziva i zajedno s njima prolazi kroz dugačku cilindričnu cijev za miješanje. Mješavina vode i abrazivnih čestica izlazi iz cijevi za miješanje kao koherentni mlaz i vrši obradu [8] (slika 4.4.)



Slika 4.4. Injekcijski vodeni mlaz [13]

Prednosti obrade abrazivnim vodenim mlazom:

- ne dolazi do zagrijavanja materijala u zoni obrade
- ne stvara se prašina i čestice koje predstavljaju opasnost za disanje
- nema promjene strukture materijala
- za rezanje se koristi samo jedan alat
- jednostavna automatizacija postupka
- ekološki prihvatljiv postupak, ne očičšćuje okolinu
- brza priprema stroja
- točnost obrade
- nema oštih rubova nakon rezanja
- male posmične sile za vrijeme obrade
- velika brzina rezanja materijala koja se ne može rezati drugim metodama
- mogućnost izrade prototipa ili velikih serija
- nema završnih radova na proizvodu, osim ako je potrebna vrlo visoka kvaliteta obrade
- visoka fleksibilnost primjene u svim industrijskim granama

Nedostaci obrade abrazivnim vodenim mlazom:

- postoji opasnost od korozije kod materijala sklonih tome, te se nakon obrade moraju zaštititi od korozije
- za vrijeme rezanja stvara se velika buka (do 100db)

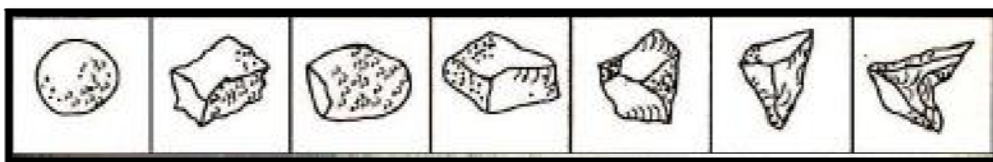
- visoka cijena opreme za rezanje
- gubitkom tlaka između pumpe i rezne glave smanjuje se brzina rezanja
- obrada vrlo tvrdih materijala je vrlo teška ili gotovo nemoguća
- izbrazdane površine obradom izazivaju smanjenje energije u dubini reza (rješenje je smanjenje brzine rezanja ili povećanje tlaka)
- brzim linearnim rezanjem dobiva se V profil
- kod brzog rezanja unutarnjih kutova mogu nastati urezi u materijalu

4.1. Abrazivna sredstva

Abraziv se dodaje vodi zbog povećanja učinkovitost mlaza. Zato se abrazivni vodeni mlaz koristi za rezanje tvrdih materijala kao što je čelik, kamen... Pri rezanju mekših materijala papira, kože... može se upotrebljavati čisti vodeni mlaz.

Abrazivne pijeske ili minerale dijelimo na okside (korund ili aluminijev oksid, kvarcni pijesak ili silicijev oksid) i minerale (granat, olivin, cirkonijev silikat). Najčešće upotrebljavan abraziv je granit jer je tvrd, težak i ekonomski najisplativiji. Za obradu površina može se dodatno upotrijebiti zdrobljena troska ili čelične i staklene kuglice [4].

S obzirom na način dobivanja abrazivnih sredstava upotrebljavaju se dvije vrste abraziva. Jedna vrsta je pijesak dobiven drobljenjem velikih stijena. Druga vrsta abraziva dobiva se prosijavanjem morskog pijeska. Drobljeni pijesak ima više šiljaste rubove, te je tako podoban za grubo rezanje, dok je prosijani morski pijesak pogodniji za finiju obradu zbog zaobljenog oblika rubova. Prema veličini abrazivne čestice, abraziv se dijeli na abraziv za grubo rezanje (veće čestice) i abraziv za fino rezanje (manje čestice) [2].



Slika 4.5. Oblici abrazivnog sredstva [4]

Granulacija abraziva je različita, a ovisi o vrsti primjene. Granulacija označena sa 120 upotrebljava se tamo gdje je potreban obradak sa glađom površinom. U opće svrhe najčešće

se koristi granulacija označena sa 80. Za obradke sa grubljom površinom dovoljna je granulacija označena s 50 [8].



Slika 4.6. Uvećan prikaz abrazivnih čestica [12]

U reznoj glavi, odnosno u cijevi za miješanje, dolazi do miješanja vode koja je pod visokim tlakom i abrazivnih čestica koje se iz posebnog spremnika dovode do rezne glave. Proces miješanja je dosta složen s obzirom na turbulentnu prirodu mlaza. Kako na vodu djeluje veliki pritisak, zbog čega se vodeni mlaz kreće velikom brzinom, a samim tim sa sobom nosi i veliku količinu kinetičke energije. Voda u cijevi za miješanje zahvaća abrazivne čestice i ubrzava ih, tj. predaje im dio kinetičke energije. Drugi dio energije se gubi. S obzirom na to da voda pri velikoj brzini zahvaća abrazivne čestice, tu dolazi do njihovog lomljenja na koje se troši određena količina energije. Gubici energije se javljaju i uslijed udara čestica o zidove cijevi koji dovodi do daljnjeg loma čestica. Dolazi i do međusobnog sudara čestica, tako da već pri samom formiranju mlaza dio čestica biva toliko usitnjen da predstavlja otpad. Čestice u mlazu rotiraju ogromnim brzinama koje se kreću od nekoliko tisuća do 5 milijuna okretaja u sekundi. Od abrazivnih čestica se zahtijeva da su otporne na raslojavanje i da su tvrde.

Dakle, abrazivne čestice i slomljene abrazivne čestice lokalno ometaju protok vode, tj. smanjuju ga. Mlaz potom izlazi kroz izlaznu cijev koja, osim što služi za fokusiranje mlaza, služi i za povećanje brzine istjecanja i kinetičke energije s obzirom na to da u njoj dolazi do konačne redukcije poprečnog presjeka mlaza. Zbog udara abrazivnih čestica o unutrašnje zidove cijevi za usmjeravanje dolazi do njenog trošenja koje je naročito izraženo u gornjem dijelu cijevi. Zbog trenja između abraziva i zidova cijevi, koje može utjecati na smanjenje brzine mlaza, preporučuje se da izlazna cijev (cijev za fokusiranje) ne bude dugačka, pri čemu joj promjer treba biti do pet puta veći od promjera abrazivnih čestica.

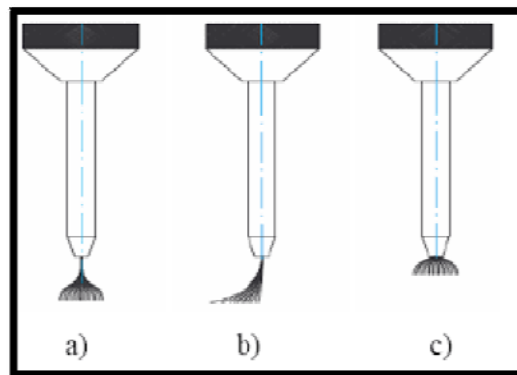
Iskorištena voda se, pomoću posebnih sustava, može reciklirati i ponovo koristiti za proces rezanja, mada je ponekad dovoljno izvršiti standardni proces filtriranja prethodno

korištene vode. Sistem za vodo – abrazivno rezanje troši svega do 4 litre vode u minuti. Najčešće se koriste Garnet abrazivna zrna. Njihova potrošnja se, obično, kreće u granicama od 0,25 do 0,68 kg/min, a mogu se i reciklirati.

Sustav za dovod abraziva do rezne glave je dosta složen, jer protok abraziva treba prilagoditi ostalim uvjetima. Ranije se protok abraziva prilagođavao vrsti i debljini obrađenog materijala. U posljednje vrijeme je taj sustav pojednostavljen time što se protok abraziva prilagođava samo protoku vode, dok se brzina kretanja mlaznice prilagođava vrsti i debljini materijala koji se reže.

4.2. Rezanje abrazivnim vodenim mlazom

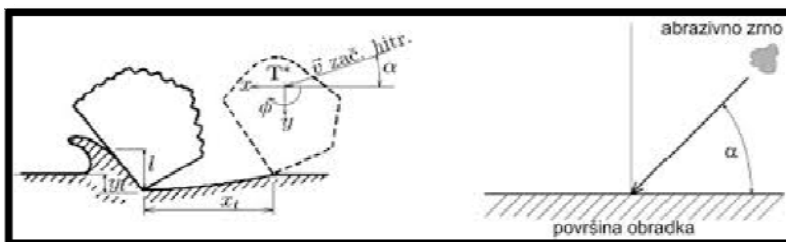
Prilikom rezanja abrazivnim vodenim mlazom jako je važno da mlaznica i cijev za miješanje budu dobro centrirane, jer o tome ovisi izgled abrazivnog vodenog mlaza, a samim time i kvaliteta obrade.



Slika 4.7. Oblici abrazivnog vodenog mlaza a) dobar, b) i c) loš [6]

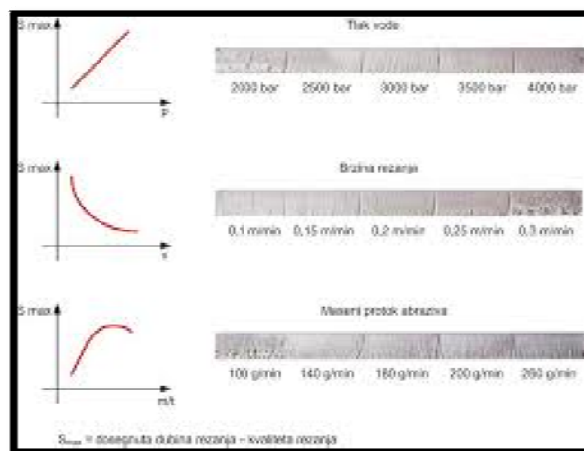
Nastali mlaz ima približno cilindrični oblik (slika 4.7.), a njegov oblik i dimenzije zavise od dimenzija mlaznice, oblika cijevi za fokusiranje, vrste abrazivnog materijala, masenog protoka abraziva, udaljenosti cijevi za fokusiranje od površine obrađenog materijala. Zbog utjecaja okoline, mlaz kontinuiran oblik zadržava samo na malom segmentu nakon napuštanja mlaznice, te je zbog toga poželjno da rezna glava bude što više primaknuta obrađenom komadu (od 1 mm do 3 mm). Mlaz gubi energiju i mijenja oblik u zavisnosti od smjera rezanja, brzine mlaza i tipa i debljine obratka.

Količina odnošenja materijala pri obradi abrazivnim vodenim mlazom ovisna je o brzini abrazivnog zrna, kutu ulaska zrna u materijal, tvrdoći abrazivnog zrna, tvrdoći materijala obrade, obliku abrazivnog zrna (slika 4.8.).



Slika 4.8. Princip odnošenja materijala abrazivnim vodenim mlazom [1]

Brzina rezanja jako je važan parametar obrade, jer utječe na kvalitetu reza, ali i na trošak obrade. Ona je ovisna o debljini, tvrdoći i vrsti materijala koji se obrađuje. Brzina rezanja predstavlja brzinu relativnog pomicanja rezne glave u odnosu na obradak u pravcu rezanja (pravac pomoćnog kretanja rezne glave je okomit na pravac strujanja mlaza). Da bi se optimizirali rezultati procesa rezanja za različite debljine obradka, vrši se podešavanje brzine rezanja. Time se ostvaruje željena kvaliteta reza pri zadanim vrijednostima tlaka vode i masenog protoka abraziva.



Slika 4.9. Utjecaj parametra abrazivnog vodenog mlaza na kvalitetu rezanja [1]

Moguća je obrada svih vrsta homogenih i nehomogenih materijala, toplinski vodljivih metala i reflektirajućih materijala, jedino nije moguće rezati kaljeno staklo zbog njegove velike površinske napetosti. Rezanje abrazivnim vodenim mlazom popularna je u zrakoplovnoj industriji (dijelovi od titanija, dijelovi motora, aluminijski dijelovi, dijelovi kabina), auto (branici) i elektro industriji (kablovi).

5. PODRUČJE PRIMJENE I UPOTREBA VODENOG MLAZA

Postoje brojni primjeri primjene vodenog i abrazivnog mlaza u praksi. Neka od područja primjene prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Područje primjene vodenog i abrazivnog mlaza [7]

Primjena vodenog mlaza	Područje primjene
1. Rezanje plastike	Plastična industrija
2. Rezanje papira i celuloze	Industrija papira
3. Rezanje vlakna i tekstila	Tekstil i odjeća, sportska oprema
4. Rezanje gume i kože	Industrija gume, proizvodnja obuće, kožna industrija
5. Rezanje hrane	Prehrambena industrija, konditorska industrija
6. Rezanje drveta i šperploče	Šumarstvo
7. Rezanje krutog goriva i leda	Šumarstvo, ukrasna industrija
Primjena abrazivnog mlaza	Područje primjene
1. Rezanje titana, aluminijske, inoxa, čelika visoke čvrstoće, legura	Zrakoplovstvo, automobilska industrija, brodogradnja, proizvodnja mostova i sl.
2. Rezanje stakla, armirano staklo, laminarno staklo	Staklarstvo, dekoracije, promotivni materijal
3. Rezanje kompozitnih materijala, keramike, magnetskih materijala	Zrakoplovstvo, automobilska industrija, keramika, elektronička industrija
4. Zavod za građevinske materijale, beton	Građevinska industrija
5. Rezanje istrošenog goriva (šipke), grafitne	Nuklearne elektrane
Primjena u drugim područjima	Područje primjene
1. Rezanje betona i cementa	Cementna industrija, građevinarstvo, demontaža
2. Za rezanje kamena	Rudarstvo
3. Za rezanje otpada	Obrada kamena
4. Rezanje malih tunela	Građevinarstvo

Jedan od osnovnih postupaka gdje se upotrebljava vodeni mlaz je čišćenje površine. Vodeni mlaz može se koristiti za fragmentaciju, npr. upotrebom vodenog mlaza lako se odstrani beton bez oštećenja armature. Vodenim mlazom lako se odstranjuju različiti premazi (prevlake i boje), npr. uklanjanje boje s brodova. Postupak rezanja vodenim mlazom je sve razvijeniji, lako se režu raznovrsni materijali od umjetnih do organskih, izrezuju se najzahtjevniji 2D likovi, a u zadnje vrijeme uvodi se i rezanje 3D oblika. Obradci izrezani vodenim mlazom imaju iznimno gladak rez, nema oštih rubova (srha). Vodeni mlaz koristi se pri površinskoj obradi za preoblikovanje površina, kao i za odstranjivanje srha s materijala. Koristi se i kao pomoć konvencionalnim tehnikama obrade u rudarstvu, kamenolomima i obradi metala. U novije vrijeme vodeni mlaz nalazi primjenu i u medicini, gdje se koristi za rezanje različitih tkiva ili kostiju, a kao abraziv upotrebljava se šećer ili sol, koji se poslije upotrebe rastope. Na području medicine vodeni mlaz ima veliku prednost pri upotrebi, jer prouzrokuje minimalno krvarenje, stvara lijep i točan rez, a u radu nudi preglednost zbog istovremenog ispiranja nastalih tekućina. [8]



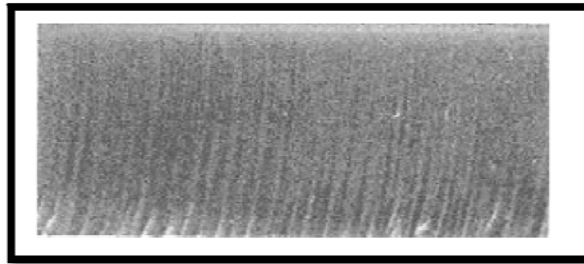
Slika 5.1. Postupci obrade materijala vodenim mlazom [8]

6. POVRŠINA OBRADNE

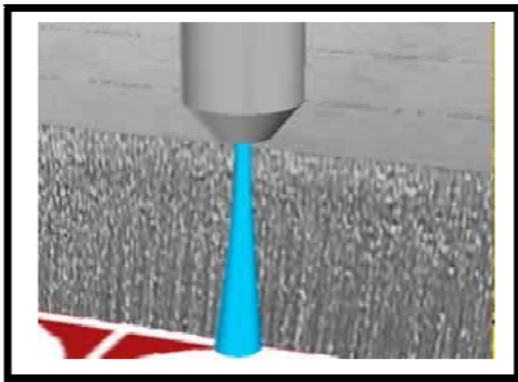
Osnovne karakteristike površine obrađene abrazivnim vodenim mlazom su:

- širina reza
- koničnost reza
- hrapavost obrađene površine

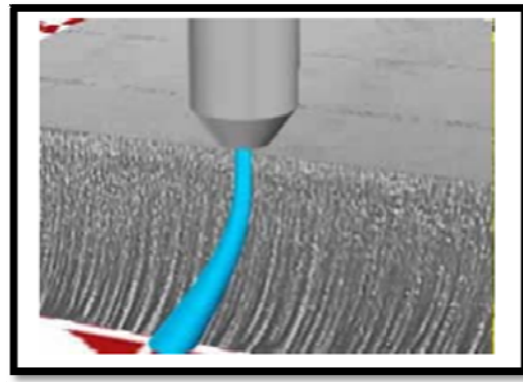
Karakterističan izgled površina obrađenih abrazivnim vodenim mlazom prikazan je na slici 6.1.



Slika 6.1. Izgled površine obrađene abrazivnim vodenim mlazom [6]



Slika 6.2. a) Visoka kvaliteta obrađene površine sa malom brzinom kretanja obradka i mala produktivnost rezanja [6]

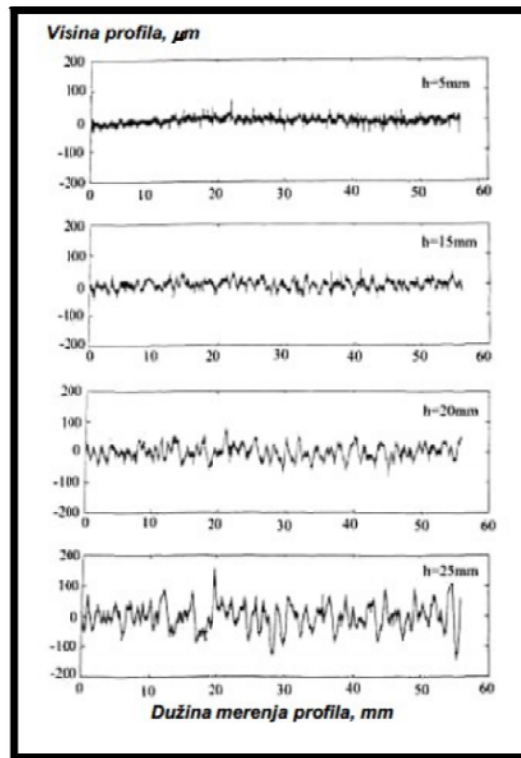


Slika 6.2. b) Niska kvaliteta obrađene površine na izlasku mlaza pri velikim brzinama kretanja obradka i velika produktivnost rezanja [6]

Slika 6.2. Utjecaj brzine kretanja predmeta obrade na kvalitetu obrađene površine [6]

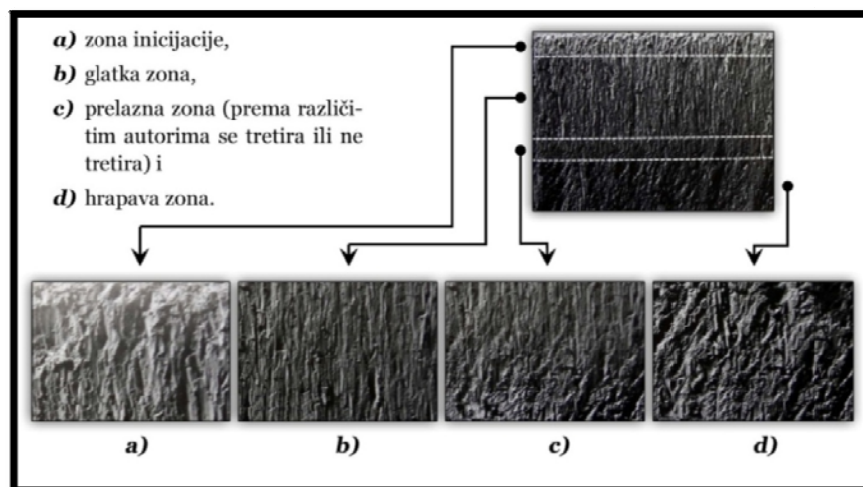
Na slikama 6.2. a) i b) jasno se vidi da se kvaliteta obrađene površine mijenja ovisno o brzini kretanja obradka. Sa slike 6.3. se može zaključiti da postoji velika razlika u visini neravnina, jer ovise o udaljenosti mlaznice od površine materijala koji se obrađuje, odnosno

dubini reza. Hrapavosti, tj. visine neravnina profila znatno su manje na manjim dubinama reza, odnosno veća kvaliteta obrade je na ulasku mlaza u materijal nego na većim dubinama reza, odnosno na izlasku iz materijala [6].



Slika 6.3. Primjeri obrađene površine u ovisnosti od dubine reza h [6]

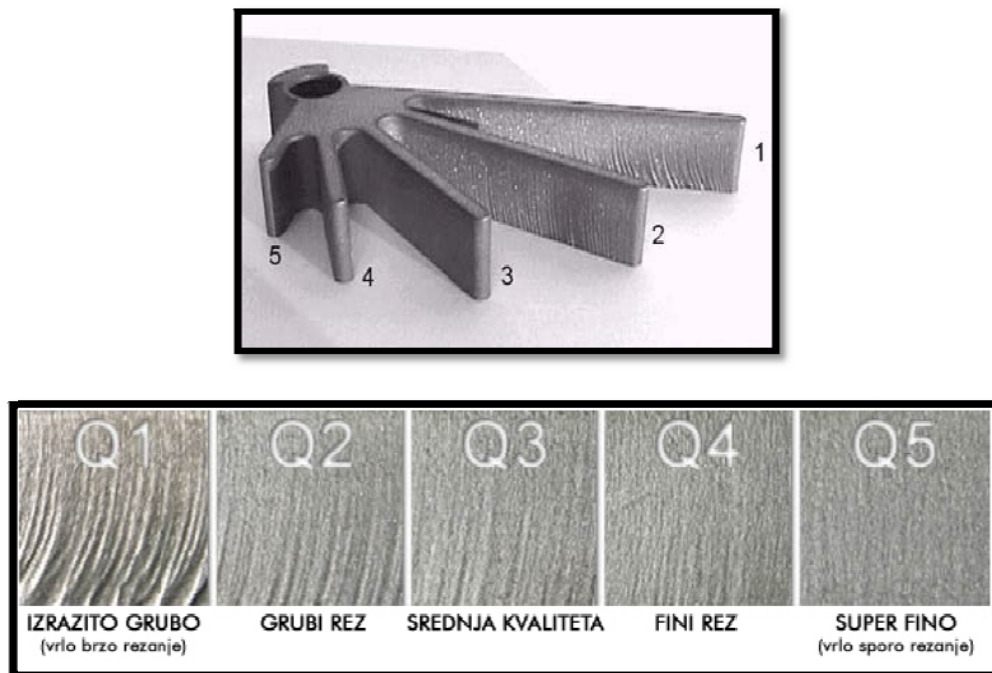
Mikro struktura rezne površine pokazala je da postoje sljedeće zone prikazane na slici 6.4.



Slika 6.4. Mikro struktura rezne površine [12]

Pri prvom udaru mlaza u materijal dolazi do stvaranja malog kratera (zona inicijacije), a zatim počinje rezanje. Zona inicijacije se odlikuje nešto većom hrapavošću zbog povećanog otpora rezanju materijala. Gornji dio rezne zone je gladak, dok je donji dio hrapaviji. Prijelaz između hrapave i glatke zone može biti postepen ili skokovit. [12].

Međutim, brzina kretanja obradka i dubina reza nisu jedini parametri koji utječu na karakteristike obrađene površine, već ovise od niza parametra kao što su radni pritisak vode, vrsta abraziva koji se koristi, udaljenost mlaznice od površine obradka, protok abraziva, materijal obradka itd. [6].



Slika 6.5. Različite kvalitete obrađene površine abrazivnim vodenim mlazom [6]

Na slici 6.5. prikazana je različita kvaliteta obrađene površine. Kada je potrebna velika brzina rezanja (velika produktivnost) dobiva se površina 1 (Q1) – izrazito gruba, uz malu kvalitetu i nisku točnost obrade. Također ova se vrsta površine može dobiti sa velikim promjerom mlaznice, malim ili nedovoljnim pritiskom vode ili starom (oštećenom) mlaznicom. Površina 2 (Q2) – grubi rez se također ostvaruje kada zahtjevi za tolerancijom rada i kvalitetom površine nisu dominantni. Kvaliteta površine 3 (Q3) – srednja kvaliteta je najčešće tražena. U ovom slučaju postignuto je usklađivanje brzine obradka, pritiska mlaza vode, protoka i količine abraziva. Kvaliteta površine 4 (Q4) - fini rez je bolja od kvalitete površine 3 (Q3) i dobivena je smanjenjem brzine kretanja obradka. Kvaliteta površine 5 (Q5)

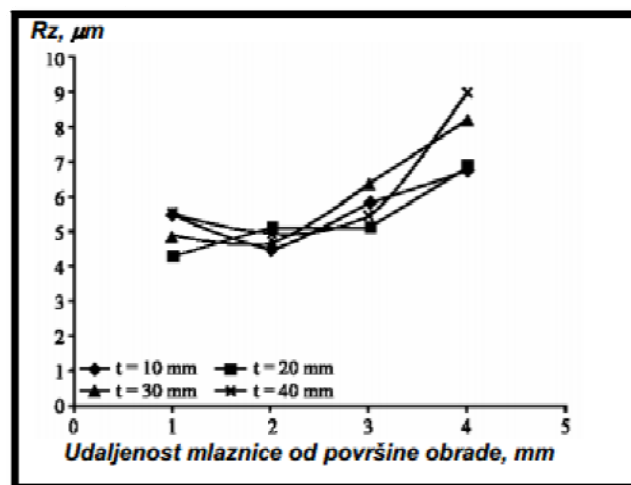
– super fino je vrlo visoka i postiže se kod vrlo visokih preciznih dijelova, ali sa vrlo malim brzinama obradka pri čemu vrijeme obrade nije kriterij za izbor režima obrade [6].

6.1. Utjecaj parametara obrade abrazivnim vodenim mlazom na kvalitetu obrađene površine

Utjecaj parametara obrade abrazivnim vodenim mlazom na kvalitetu obrađene površine ovisi o:

- udaljenosti mlaznice od obrađene površine
- pomoćne brzine (brzine kretanja obradka)
- radnog pritiska vode
- kut nagiba rezne glave

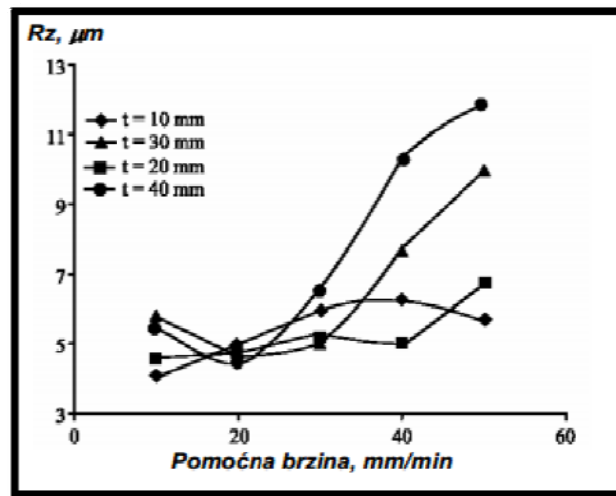
Na slici 6.6. prikazan je utjecaj udaljenosti mlaznice od površine obrade na hrapavost površine koja se obrađuje, na različitim dubinama reza. Može se uočiti da sa porastom udaljenosti mlaznice od površine obradka raste i parametar hrapavosti obrađene površine R_z . Isto tako se može vidjeti da R_z naglo raste kada se mlaznica udalji više od 3 mm od površine koja se obrađuje, tako da hrapavost postaje velika neovisno o dubini reza. Također, može se zaključiti da smanjivanje razmaka između mlaznice i obradka (manje od 2 mm) ne smanjuje hrapavost površine. Što znači da postoji optimalna udaljenost između mlaznice i obradka. [6]



Slika 6.6. Utjecaj udaljenosti mlaznice od površine obrade na hrapavost obrađene površine,

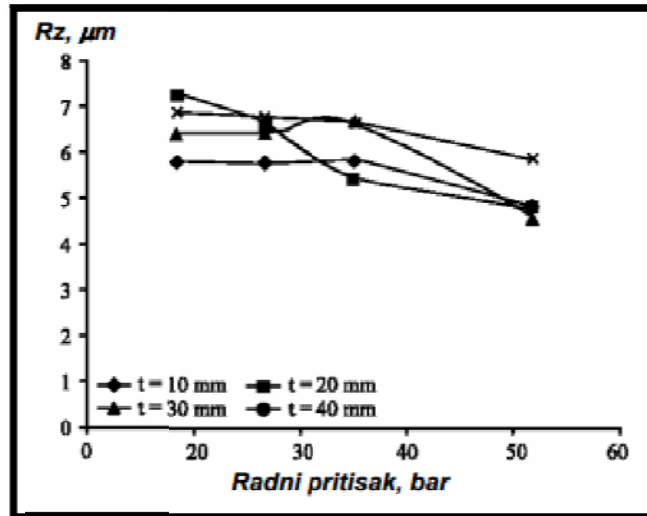
t = dubina reza [6]

Na slici 6.7. prikazan je utjecaj pomoćne brzine na parametar hrapavosti obrađene površine R_z , na različitim dubinama reza. Sa slike se vidi da se povećanjem pomoćne brzine povećava i R_z . Za vrijednosti pomoćne brzine od 10 mm/min, R_z je duplo manji nego za vrijednosti pomoćne brzine od 50 mm/min na istoj dubini reza. Može se zaključiti da hrapavost sa povećanjem pomoćne brzine na većim dubinama reza značajno raste, a da u područjima manjih brzina pomoćnog kretanja kvaliteta po dubini je približno konstantna. Također smanjenjem brzine pomoćnog kretanja ispod 20 mm/min, u ovom slučaju ne dovodi do povećanja kvalitete površine koja se obrađuje [6].



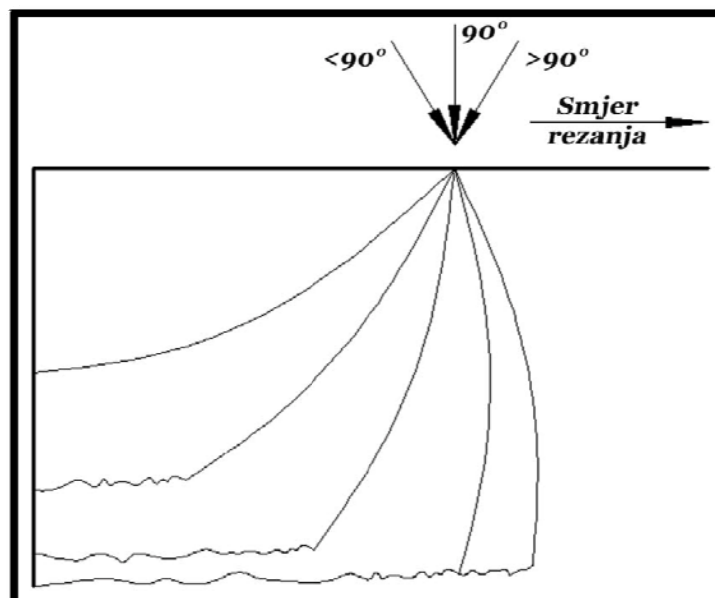
Slika 6.7. Utjecaj pomoćne brzine na hrapavost obrađene površine, t = dubina reza [6]

Na slici 6.8. je prikazan utjecaj radnog pritiska vode na parametar hrapavosti površine koja se obrađuje R_z . Može se vidjeti da za veće vrijednosti radnog pritiska vode, R_z ima manje vrijednosti odnosno, hrapavost površine koja se obrađuje je manja. Ova pojava je rezultat činjenice da se sa povećanjem pritiska vode kruti kristali abraziva lome na manje, finije kristale, a finiji kristali abraziva daju finiju obradu odnosno manju hrapavost površine koja se obrađuje. I na ovoj slici se primjećuje da je hrapavost obrađene površine veća na većim dubinama reza [6].



Slika 6.8. Utjecaj radnog pritiska vode na hrapavost obrađene površine [6]

Na slici 6.9. je prikazan utjecaj kuta nagiba rezne glave na izgled rezne površine. Najčešće se koristi pravi kut i tada je, uglavnom, najveći utjecaj mlaza vode na obradak. Različitim kutovima mogu se postići različite dubine rezanja i različite kvalitete obrađene površine. Eksperimentalno je utvrđeno da je za veće brzine posmaka pogodniji kut manji od 90° [12].



Slika 6.9. Utjecaj kuta nagiba rezne glave na dubinu rezanja [12]

7. MICRO JET REZANJE

Micro-jet rezanje je moguće ostvariti samo sa komponentama velike preciznosti ($\pm 0,01$ mm), gdje greška teži nuli. Kod rezanja mikro mlazom sa dodavanjem abraziva, danas se može proizvesti mlaz od 0,2 mm. Maksimalna debljina materijala koji se reže ovisi od cijevi za fokusiranje. Današnjom tehnologijom može se rezati materijal i do 40 mm. Ovaj postupak je naročito pogodan za komponente koje zahtijevaju veliku točnost gdje bi konvencionalni water jet dostigao odavno svoje granice.



Slika 7.1. Micro jet stroj [10]

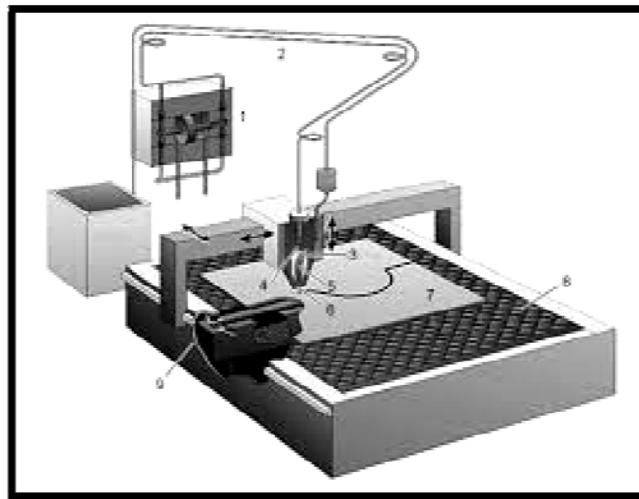


Slika 7.2. Micro jet rezanje [11]

8. STROJ ZA OBRADU VODENIM MLAZOM

Prema dosadašnjim iskustvima i upotrebom vodenog mlaza za obradu materijala, nekonvencionalna metoda vodenog mlaza postala je najbolja metoda za rezanje skoro svih vrsta materijala. Stroj služi za glatko rezanje, probijanje i graviranje većine materijala. Stroj radi upotrebom dvije vrste mlaza, a to su obični vodeni mlaz, te abrazivni vodeni mlaz. Upotrebom raznovrsnih abrazivskih čestica povećava se sama efikasnost i isplativost stroja, mogućnosti rezanja, te povećanje samih brzina rezanja. U ovom poglavlju se u što boljem pogledu želi opisati sam stroj, te njegovi sastavni dijelovi, vrste materijala koje može rezati, te usporedba same obrade vodenim mlazom na ostale nekonvencionalne metode.

Stroj koji vrši obradu materijala vodenim mlazom složeni je obradni sustav, koji predstavlja suvremeni proizvod vrhunske tehnologije (slika 8.1.) Namijenjen za precizna konturna rezanja, najčešće ravnih (2D) dijelova. [8]



Slika 8.1. Stroj za rezanje vodenim mlazom [13]

Dijelovi stroja:

1. Visokotlačna pumpa
2. Dovod vode
3. Dovod abraziva
4. Mlaznica za vodu
5. Miješalica vode i abraziva
6. Vodeni mlaz

7. Obradak
8. Rešetkasti stol za obradu
9. Spremnik za vodu nakon obrade

Centralni dio stroja za rezanje vodenim mlazom je visokotlačna pumpa, koja potiskuje hidrauličnu tekućinu (ulje) u pojačivač tlaka. Pojačivač tlaka obično se sastoji od dva cilindra sa različitim unutarnjim promjerom. Cilindar sa većim unutarnjim promjerom obično pogoni hidraulično ulje pod visokim tlakom. Tlak u drugom cilindru ovisi o razlici u promjerima cilindra, tj. poprečnih presjeka cilindra. Ovaj omjer najčešće se kreće u granicama 1:10 i 1:25. Zbog ovakvog omjera poprečnih presjeka, tlak vode u drugom cilindru doseže vrijednost od 4000 bar i više. [8]

Stroj može biti CNC navođen, što znači da računalo izračunava poziciju i putanju, vodeći alat u jednoj ili više osi, dok su noviji strojevi opremljeni robotskim rukama, koje vode alat u svih šest osi s 0.2 - 0.3 mm preciznosti i putanjom ponavljanja do približno $\pm 0,5$ mm. Željeni obradak nacrta se u 2D ili 3D obliku pomoću CAD programa, te prenese u kontrolnu kutiju stroja. Prije početka obrade neke vrste materijala, potrebno je unijeti podatke o debljini materijala kao i željenu preciznost, dok CNC izračunava ostale strojne parametre (brzinu rezanja). [8]

Virtualno svi geometrijski oblici mogu biti izrezani, jedino ograničenje predstavljaju mali provrti, čiji promjer treba biti veći od promjera vodenog mlaza. Stezanje materijala je relativno jednostavno, jer zbog male snage (u stroju su zajedno jedna ili dvije osi) dodatno stezanje nije potrebno. Kvaliteta strojne površine navedene kao hrapavost izrezane površine najviše ovisi o brzini rezanja, koja ovisi o tipu i debljini materijala. [8]

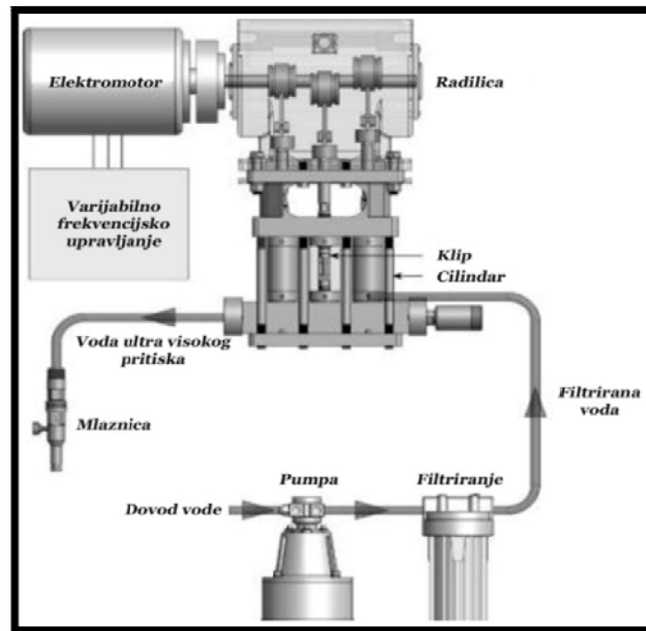
8.1. Visoko tlačna pumpa

Na ulazu u sustav za generiranje visokog tlaka postavlja se filter koji osigurava zahtijevanu kvalitetu vode. Osnovni dio sustava za generiranje visokog tlaka je hidraulična pumpa, pri čemu se najčešće koriste dvije vrste:

- hidraulična pumpa sa radilicom (slika 8.2.)
- hidraulična pumpa sa pojačivačem (slika 8.3.)

Hidraulična pumpa sa radilicom prikazana na slici 8.2. koristi se za srednje i niske tlakove (do 270 MPa). Na radilicu koja je vezana za elektromotor, povezana su tri ili više

klipa koji se kreću stalnom brzinom. Pomicanjem klipa u gornji položaj otvara se jednosmjerni ventil koji povlači određenu količinu vode u cilindar. Njegovim spuštanjem u donji položaj voda se dalje potiskuje i dolazi do sljedećeg cilindra. S obzirom na to da je neophodno osigurati konstantan i laminaran protok vode visokog tlaka, ova vrsta hidraulične pumpe nije preporučljiva za veće tlakove.

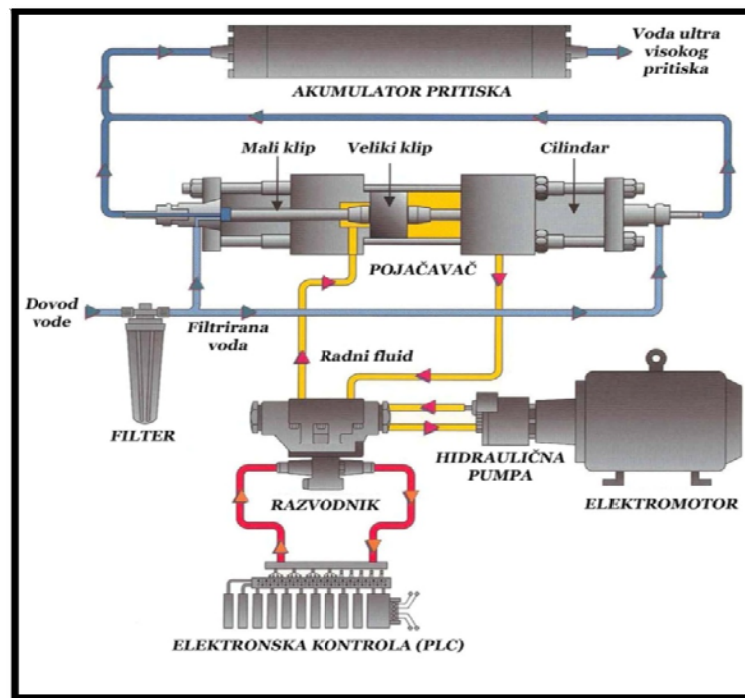


Slika 8.2. Hidraulična pumpa sa radilicom [7]

Ako je potrebno ostvariti i veće pritiske vode, tj. tlakove iznad 400 MPa koriste se pumpe sa jednim ili više pojačivača. Hidraulična pumpa, koja je pogonjena pomoću elektromotora (slika 8.3.) potiskuje radni fluid (ulje) kroz lijevu ili desnu stranu, tj. sa jedne ili druge strane velikog naizmjenično pokretanog klipa, u zavisnosti od položaja razvodnika koji se definira posredstvom programiranog logičkog kontrolora (PLC). Za veliki klip su pričvršćena i dva manja klipa, jedan u lijevom, a drugi u desnom cilindru. Ako se hidraulični fluid (ulje) kreće lijevom stranom, klipovi će biti potisnuti iz lijevog položaja prema desnom. Time će se otvoriti ventil u cilindru manjeg klipa, te voda iz lijeve ulazne strane ispunjava prostor unutar lijevog cilindra. Preusmjeravanjem razvodnika, tako da se radni fluid potiskuje desnom stranom, klipovi se pomiču u lijevu stranu. Tada će se voda iz lijevog cilindra potisnuti u lijevu izlaznu stranu, pri čemu će se na desnoj strani pojačivača, tj. u desnom cilindru, otvoriti ventil koji povlači vodu iz desne usisne strane. Proces se naizmjenično

ponavlja, a intenzitet pojačanja pojačivača proporcionalan je odnosu površina poprečnih presjeka velikog i malog klipa. [12]

Još jedan važan element pumpe sa pojačivačima je tzv. akumulator pritiska odnosno prigušivač. S obzirom na to da je neminovno naizmjenično pomicanje klipova dolazi do oscilacija u pritisku vode, tj. do njenog ritmičnog strujanja na izlazu iz mlaznice što može dovesti do grešaka pri rezanju, odnosno pojave vidljivih tragova na reznoj površini. S toga voda visokog pritiska, prije dolaska do rezne glave, prolazi kroz akumulator pritiska koji predstavlja posudu pod visokim pritiskom koja ima zadatak da ublaži fluktuacije pritiska koje proizvodi pojačivač i proslijedi konstantan i stabilan mlaz vode. Prigušivač nije neophodan kod pumpi sa radilicom, jer one daju gotovo konstantan pritisak. [12]

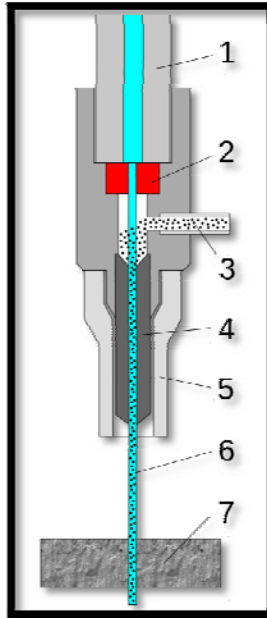


Slika 8.3. Hidraulična pumpa sa pojačivačem [7]

Hidraulične pumpe sa pojačivačima su skuplje, ali su im zato niži troškovi održavanja i imaju duži vijek trajanja, jer pumpa sa radilicom radi u više taktova pa je potrošnja ventila i brtvi znatno veća.

8.2. Rezna glava

Rezna glava je predmet stalnog usavršavanja, jer rezna glava može jako utjecati na efikasnost postupka rezanja mlazom vode, ali i izgled površine koja se obrađuje.



Slika 8.4. Rezna glava [12]

Dijelovi rezne glave (slika 8.4.):

1. Voda pod visokim tlakom
2. Dijamant ili rubin
3. Abraziv
4. Cijev u kojoj se miješa abraziv s vodom
5. Mlaznica
6. Mlaz
7. Materijal koji režemo

S obzirom da je promjer izlazne cijevi jako mali i da na vodu djeluje izuzetno visok tlak, mlazu vode koji izlazi iz mlaznice mora se u potpunosti omogućiti da bude centriran. U protivnom bi došlo do proširenja izlaznog promjera što bi utjecalo na daljnju kvalitetu obrade. Da bi zadovoljili ovaj uvjet koristi se sitan dio rubina ili dijamanta u kome je izuzetno precizno izrađen konusni otvor. Mlaz vode pod visokim tlakom kroz otvor u rubinu

ili dijamantu. Rubin ili dijamant su jako tvrdi materijali te nisu skloni deformacijama ili oštećenjima.

U reznoj glavi, odnosno u cijevi za miješanje, dolazi do miješanja vode pod visokim tlakom i abrazivnih čestica koje se iz posebnog rezervoara dovode do rezne glave. Proces miješanja je dosta složen s obzirom na turbulentnu prirodu mlaza. Na vodu djeluje visoki tlak, te se vodeni mlaz kreće velikom brzinom što rezultira velikom količinom kinetičke energije. Voda u cijevi za miješanje zahvaća abrazivne čestice i ubrzava ih, odnosno predaje im dio kinetičke energije. Drugi dio energije se gubi. S obzirom na to da voda pri velikoj brzini zahvaća abrazivne čestice, tu dolazi do njihovog lomljenja na koje se troši određena količina energije. Gubici energije se javljaju i uslijed udara čestica o zidove cijevi koji dovodi do daljnjeg loma čestica. Dolazi i do međusobnog sudara čestica, tako da već pri samom formiranju mlaza dio čestica bude toliko usitnjen da predstavlja otpad. Čestice u mlazu rotiraju ogromnim brzinama koje se kreću od nekoliko tisuća do 5 milijuna okretaja u sekundi. Od abrazivnih čestica se zahtijeva da su otporne na raslojavanje i da su tvrde.

Abrazivne čestice i slomljene abrazivne čestice lokalno ometaju protok vode, tj. smanjuju ga. Mlaz vode potom izlazi kroz izlaznu cijev koja, osim što služi za fokusiranje mlaza, služi i za povećanje brzine istjecanja i povećanje kinetičke energije s obzirom na to da u njoj dolazi do konačne redukcije poprečnog presjeka mlaza. Zbog udara abrazivnih čestica o unutrašnje zidove cijevi za usmjeravanje dolazi do njenog trošenja koje je naročito izraženo u gornjem dijelu cijevi. Zbog trenja između abraziva i zidova cijevi, koje može utjecati na smanjenje brzine mlaza, preporučuje se da izlazna cijev (cijev za fokusiranje) ne bude jako dugačka, pri čemu joj promjer treba biti do pet puta veći od promjera abrazivnih čestica.

Nastali mlaz ima približno cilindrični oblik, a njegov oblik i dimenzije ovise o: dimenziji mlaznice, obliku cijevi za fokusiranje, vrste abrazivnog materijala, masenog protoka abraziva, udaljenosti cijevi za fokusiranje od površine obradka. Zbog utjecaja okoline mlaz kontinuirani oblik zadržava samo na malom segmentu nakon napuštanja mlaznice, te je zbog toga poželjno da rezna glava bude što bliže obradku (1 - 3 mm). Mlaz gubi energiju i mijenja oblik u zavisnosti od smjera rezanja, brzine mlaza i tipa i debljine obratka.

Iskorištena voda se, pomoću posebnih sustava, može reciklirati i ponovo koristiti za proces rezanja, premda je ponekad dovoljno izvršiti standardni proces filtriranja prethodno korištene vode. Sustav za vodu – abrazivno rezanje troši svega do 4 litre vode u minuti. Najčešće se koriste Garnet abrazivna zrna. Njihova potrošnja se, obično, kreće u granicama od 0,25 do 0,68 kg/min, a mogu se i reciklirati.

Sustav za dovod abraziva do rezne glave je dosta složen, jer protok abraziva treba prilagoditi ostalim uvjetima. Ranije se protok abraziva prilagođavao vrsti i debljini obrađivanog materijala. U posljednje vrijeme je taj sustav pojednostavljen time što se protok abraziva prilagođava samo protoku vode, dok se brzina kretanja mlaznice prilagođava vrsti i debljini materijala koji se reže. [12]

8.3. Sustav za upravljanje pomoću računala

Veoma je poželjno upotrebljavati računalni sustav za upravljanje procesom rezanja mlazom vode. To pospješuje preciznost rezanja i otvara mogućnost automatizacije postupka, što je veoma bitno pri proizvodnji velikih serija, a ujedno pruža mogućnost jednostavne izrade komada bez prethodne izrade radioničkih crteža (ukoliko to vrsta i namjena komada dozvoljavaju). Računalni sustav za kontrolu nad procesom rezanja kompatibilan je sa CAD datotekama. To znači da u nekom CAD software-u možemo nacrtati element koji želimo izraditi, a potom dokument u kome je nacrtan element implementirati u adekvatan software i na osnovu crteža definirati putanju rezne glave. Software za upravljanje procesom rezanja razvijeni su do te mjere da se bez prethodnog znanja o programiranju, a za svega nekoliko sati, radnik može obučiti za rad u njemu. [12]



Slika 8.5. Računalni sustav stroja za vodeno rezanje

9. PRAKTIČNI RAD – IZREZIVANJE PRIRUBNICA

Na stroju za rezanje abrazivnim vodenim mlazom model NC 3015 EB zadano je izrezivanje prirubnica dimenzija 200 x 300 x 20 mm iz ploče dimenzija 2000 x 1000 mm. Širina reza je 1.5 mm. Na slikama 9.1., 9.2. i 9.3. se može vidjeti postupak izrezivanja prirubnica abrazivnim vodenim mlazom, gdje se između ostalog vodilo i računa o maksimalnoj iskoristivosti materijala.



Slika 9.1. Izrezivanje prirubnica na stroju NC 3015 EB



Slika 9.2. Izrezivanje prirubnica na stroju NC 3015 EB



Slika 9.3. Izrezivanje prirubnica na stroju NC 3015 EB



Slika 9.4. Stroj za rezanje vodenim mlazom NC 3015 EB

PODACI O STROJU:

MODEL NC 3015 EB

Proizvođač WJS - proizvodnja: 2007/08

Upravljačka jedinica: Fanuc 18i

Radni sati stroja: cca 5000 sati

Posuda sa tlakom za pijesak: 200 l

Program: IGEMS R8

Resato pumpa od 100 KS, 7.6 l/min, 3800 bara

4 x rezne glave od čega: 2 glave za abrazivno + 2 glave za rezanje čistom vodom (moguća nadogradnja za abrazivno rezanje)

2 x dozator za pijesak

Sustav za automatsko ispumpavanje pijeska, 1x sandpiper

Tablica 2 Tehnički podaci o stroju NC 3015 EB [14]

Radni stol veličine (X*Y)	3200 x 1750 mm
Rezna površina	3100 x 1510 mm
X os	2270 mm
Y os	1510 mm
Z os	175 mm
Pozicijska preciznost	+/-0,05 mm na 1000 mm
Preciznost ponavljanja	+/- 0,025 mm
Brzina napajanja vodom u X i Y osi	10 000 mm/min
Napajanje u Z osi	4000 mm/min
Min. udaljenost reznih glava	90 mm
Max. udaljenost reznih glava	1500 mm

10. ZAKLJUČAK

Tehnologija obrade materijala vodenim mlazom je u posljednjih nekoliko desetljeća doživjela veliki razvoj. Od prvih primjera upotrebe vodenog mlaza do danas takav oblik obrade materijala bilježi snažan rast. Postupak vodenog mlaza je konkurentan drugim tehnologijama budući ga lako upotrebljavamo za obradu većine materijala, potrebna je minimalna energija, nema toplinske deformacije obrađivanog materijala i ekološki je prihvatljiv postupak.

Tehnologija obrade vodenim mlazom upotrebljava se u različite svrhe, tako da sve više zamjenjuje obrade plazmom i laserom s tim da ima širu primjenu. Obrađuju se svi metalni i nemetalni materijali, male i velike tvrdoće. Najčešće operacije koje se koriste su rezanje, čišćenje površina, poliranje površina itd. U svim slučajevima mehanizam obrade se zasniva na erozijama.

Sve veća ekološka svjesnost, efikasnost, brzina rada i ekonomičnost su razlozi zbog kojih obrada vodenim mlazom ima odlične predispozicije u budućnosti za primjenu na tržištu.

11. LITERATURA

- [1] http://www.ssfs.si/download/Nekonvencionalni_procesi/Vsa%20predavanja.pdf
- [2] <http://lab.fs.unilj.si/lat/nekProc/NP%20AVC%20rezanje.pdf>
- [3] https://hr.wikipedia.org/wiki/Rezanje_vodenim_mlazom
- [4] http://lab.fs.uni-lj.si/lat/nekProc/AVC_Uvod-2.pdf
- [5] <http://www.aquarez.rs/waterjet.html>
- [6] Prof. Dr. Nedić B. i Mr. Baralić J. :“OBRADA ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM I KVALITET OBRAĐENE POVRŠINE“, str. 249-253
- [7] Hloch, S.; Valiček, J.; Stoić, A.; Kozak, D.; Samardžić, I.; Novak-Marcinčin, J.; Modrak, V.: Rezanje mlazom vode, Sveučilišni udžbenik, Slavonski Brod, 2011.
- [8] Tehnički glasnik 8, 3(2014), str. 245-251
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter
- [10] <http://www.incodema.com/processes/MicroCut-Cutting.aspx>
- [11] <http://www.waterjet.ch/en>
- [12] www.mf.ucg.ac.me/materijal/1382468944Water_Jet.pdf
- [13] www.fsb.hr/kas/.../2Nekonvencionalne%20obrade%20ECM-EDM-WJ.pps
- [14] <http://www.wjdido.com/index.php/2012-03-25-10-34-51/masina-trenutno-u-ponudi>

12. PRILOZI

12.1. Popis slika

Slika 1.1. – Rezanje vodenim mlazom.....	1
Slika 2.1. – Povijesni razvoj raspršivača.....	2
Slika 3.1. – Rezanje čistim vodenim mlazom.....	3
Slika 3.2. – Nastanak vodenog mlaza.....	3
Slika 3.3. – Struktura vodenog mlaza.....	4
Slika 3.4. – Obrada čistim vodenim mlazom.....	5
Slika 4.1. – Abrazivni vodeni mlaz	6
Slika 4.2. – Obrada abrazivnim vodenim mlazom	6
Slika 4.3. – Suspenzijski vodeni mlaz	7
Slika 4.4. – Injekcijski vodeni mlaz	8
Slika 4.5. – Oblici abrazivnog sredstva mlaz	9
Slika 4.6. – Uvećan prikaz abrazivnih čestica.....	10
Slika 4.7. – Oblici abrazivnog vodenog mlaza.....	11
Slika 4.8. – Princip odnošenja materijala abrazivnim vodenim mlazom.....	12
Slika 4.9. – Utjecaj parametara abrazivnog vodenog mlaza na kvalitetu rezanja.....	12
Slika 5.1. – Postupci obrade materijala vodenim mlazom.....	14
Slika 6.1. – Izgled površine obrađene abrazivnim vodenim mlazom.....	15
Slika 6.2. – Utjecaj brzine kretanja predmeta obrade na kvalitetu obrađene površine ..	15
Slika 6.3. – Primjeri obrađene površine u ovisnosti od dubine reza h.....	16
Slika 6.4. – Mikro struktura rezne površine.....	16
Slika 6.5. – Različite kvalitete obrađene površine abrazivnim vodenim mlazom.....	17

Slika 6.6. – Utjecaj udaljenosti mlaznice od površine obrade na hrapavost obrađene površine.....	18
Slika 6.7. – Utjecaj pomoćne brzine na hrapavost obrađene površine.....	19
Slika 6.8. – Utjecaj radnog pritiska vode na hrapavost obrađene površine.....	20
Slika 6.9. – Utjecaj kuta nagiba rezne glave na dubinu rezanja.....	20
Slika 7.1. – Micro jet stroj.....	21
Slika 7.2. – Micro jet rezanje.....	21
Slika 8.1. – Stroj za rezanje vodenim mlazom.....	22
Slika 8.2. – Hidraulična pumpa sa radilicom.....	24
Slika 8.3. – Hidraulična pumpa sa pojačivačem.....	25
Slika 8.4. – Rezna glava.....	26
Slika 8.5. – Računalni sustav stroja za rezanje.....	28
Slika 9.1. – Izrezivanje prirubnica na stroju NC 3015 EB.....	29
Slika 9.2. – Izrezivanje prirubnica na stroju NC 3015 EB.....	30
Slika 9.3. – Izrezivanje prirubnica na stroju NC 3015 EB.....	30
Slika 9.4. – Stroj za rezanje vodenim mlazom NC 3015 EB.....	31

12.2. Popis tablica

Tablica 1 - Područje primjene vodenog i abrazivnog mlaza.....	13
Tablica 2 - Tehnički podaci o stroju NC 3015 EB.....	32