

Slika 6. Injekcijski abrazivni vodeni mlaz [6]

Na slici 6. prikazan je postupak dobivanja injekcijskog abrazivnog vodeni mlaza. Voda pod visokim tlakom (2000 - 4000 bara), prolazi kroz mlaznicu (tvrđi metal, dijamant ili safir), malog promjera (0,1 mm do 0,4 mm). Na ovaj način stvara se vodeni mlaz velike brzine (≈ 900 m/s), koji zatim prolazi kroz Venturijevu cijev. U cijevi se usred Venturijevega 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.

4.1. Zadaci i vrste abraziva

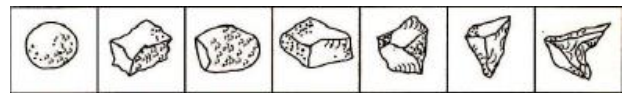
Abraziv se dodaje vodi zbog povećanja učinkovitost mlaza. Zato se abrazivni vodeni mlaz koristi za rezanje tvrdih materijala kao što je čelik, kamen... Pri rezanju mekših materijala papira, kože... može se upotrebljavati čisti vodeni mlaz.

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 granat jer je tvrd, težak i ekonomski najisplativiji. Za obradu površina može se dodatno upotrijebiti zdrobljena troska ili čelične i staklene kuglice [7]. Na slici 7. prikazane su neke vrste abraziva.



Slika 7. Abrazivi [7]

Svojstva pojedinog abraziva, kao što su njegova struktura, tvrdoća i čvrstoća, oblik i veličina zrna (slika 8.), utječu na obradu materijala.



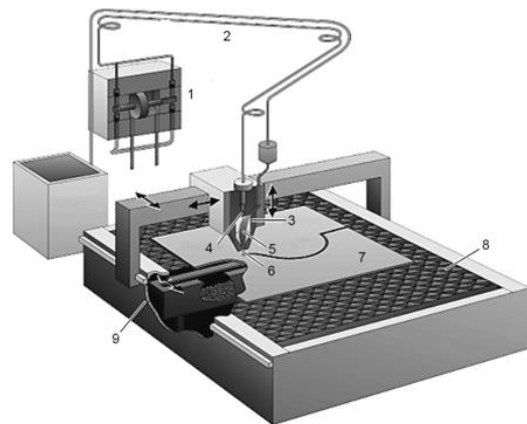
Slika 8. Oblici abrazivnog sredstva [7]

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) [8].

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 sa 50.

5. STROJ ZA OBRADU VODENIM MLAZOM

Stroj koji vrši obradu materijala vodenim mlazom složeni je obradni sustav, koji predstavlja suvremeni proizvod vrhunske tehnologije (slika 9.). Namijenjen je za precizna konturna rezanja, najčešće ravnih (2D) dijelova.

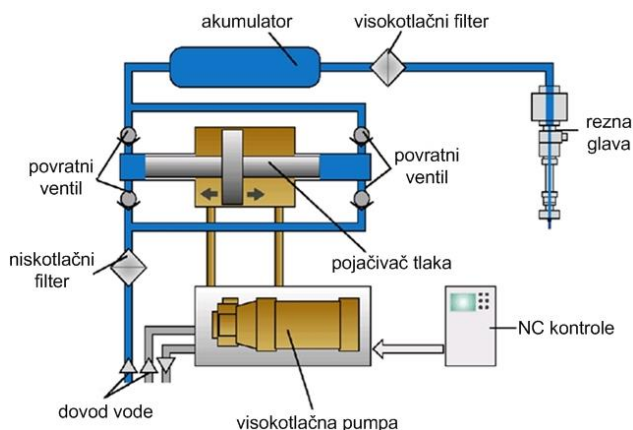


Slika 9. Stroj za rezanje vodenim mlazom [6]

Dijelovi stroja:

1. Visokotlačna pumpa,
2. Dovod vode
3. Dovod abraziva
4. Mlaznica za vodu
5. Mješalica vode i abraziva
6. Vodeni mlaz
7. Obradak
8. Rešetkasti stol za obradu
9. Spremnik za vodu nakon obrade

Na slici 10. prikazan shematski je prikaz sistema za rezanje vodenim mlazom i njegovi pojedini dijelovi.



Slika 10. Shematski prikaz rezanja vodenim mlazom [9]

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 cilindara, tj. poprečnih presjeka cilindara. 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.

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 nacrtava 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).

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.

6. UPOTREBA VODENOG MLAZA

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. Tehnologija obrade vodenim mlazom upotrebljava se u različite svrhe. Na slici 11. prikazani su postupci obrade materijala vodenim mlazom.



Slika 11. Postupci obrade materijala vodenim mlazom

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 oštrih 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.

6.1. Rezanje čistim vodenim mlazom

Vodenim mlazom bez dodataka abrazivnih sredstava mogu se rezati razni organski i anorganski materijali (slika 12.), a najčešće se koristi kod rezanja mekših materijala kao što je papir, tekstil, koža, guma..



Slika 12. Rezanje anorganskih i organskih materijala vodenim mlazom [7]

Tlak vode, promjer mlaznice i brzina mlaza su prevladavajući faktori, koji utječu na učinkovitost i kvalitetu rezultata obrade mlazom vode.

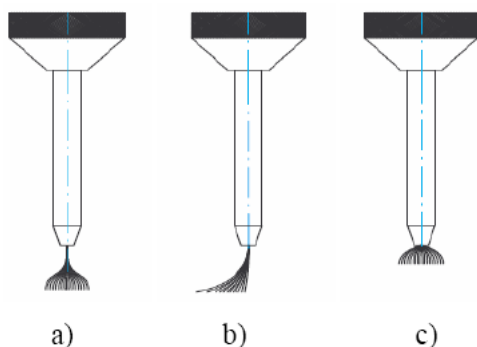
Volumen i tlak od toka mlaza vode imaju drugačiji učinak na rezanje. Povećanjem tlaka i smanjenjem promjera mlaznice postiže se veća dubina reza kod istog volumnog protoka vode.

Rezanje metala čistim vodenim mlazom pri tlaku vode od 400 MPa nije moguće, zbog nedovoljne energije mlaza. Rezanje metala bilo bi moguće primjenom vode tlaka od 700 MPa do 1000 MPa. Sa sada raspoloživim materijalima i tehnologijom, za te vrijednosti tlaka nije moguće napraviti pumpu i komponente sustava visokog tlaka, koje bi zadovoljavale sve zahtjeve potrebne za industrijsku primjenu [5].

6.2. Rezanje abrazivnim vodenim mlazom

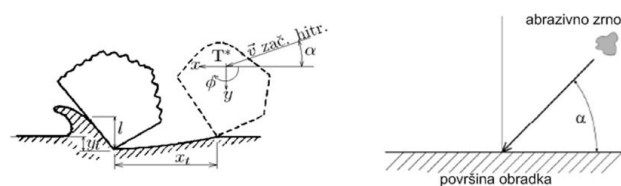
Rezanje materijala vodenim mlazom s dodatkom abraziva koristi se za rezanje krutih materijala (staklo, keramika, kamen ...) i kompozitnih materijala.

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 (slika 13.), a samim time i kvaliteta obrade.



Slika 13. Oblici abrazivnog vodenog mlaza a) dobar, b) i c) loš [10]

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 14).

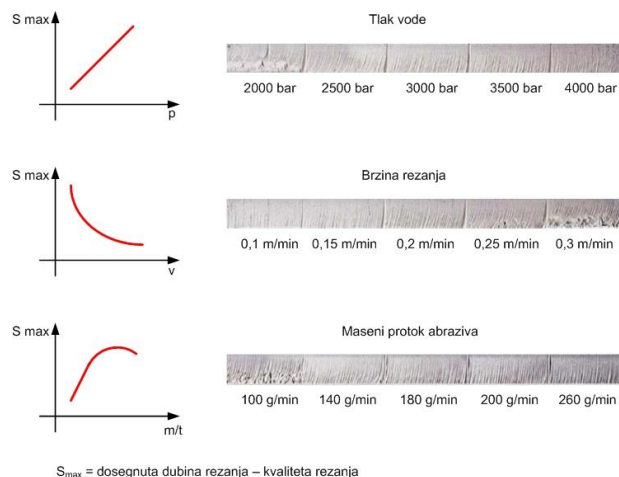


Slika 14. Princip odnošenja materijala abrazivnim vodenim mlazom [8]

Na proces rezanja abrazivnim vodenim mlazom utječe veliki broj faktora. Na kvalitetu reza (geometriju i hrapavost površine) utječu faktori procesa rezanja kao što su: brzina rezanja, tlak vode, vrsta abraziva, količina čestice abraziva, maseni protok abraziva, promjer mlaznice, razmak između rezne glave i obradka, debljina obradka.

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 (tablica 1.). 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 15.).



S_{max} = dosegnuta dubina rezanja – kvaliteta rezanja

Slika 15. Utjecaj parametara abrazivnog vodenog mlaza na kvalitetu rezanja [8]

Tablica 1. Brzina rezanja [3]

Parametri obrade	Promj mlaznice (mm)	0,23	0,33	0,46	0,56				
	Količina dodatog abraziva (kg/min)	0,23	0,68	0,91	1,46				
	Tlak vode (bar)	3100	2400	2400	2400				
Brzina rezanja (mm/min)	Debljina materijala (mm)	1,6	3,2	6,4	12,7	19	25,4	50,8	100
	Mjed	762	457	254	102	25	13	8	3
	Aluminij	2030	1270	762	457	305	203	152	102
	Bakar	1020	559	305	152	75	38	15	3
	Ugljični čelik	1270	762	508	305	203	152	75	25
Korozivno otporan čelik	762	610	486	254	152	102	57	25	

Osnovne karakteristike površine obrađene abrazivnim vodenim mlazom su širina reza, koničnost reza i hrapavost obrađene površine. Kvaliteta obrađene

površine obično se izražava u srednjoj visini neravnine profila R_z mjenenog u deset točaka [3].

Najbolja površinska kvaliteta reza postiže se na gornjoj strani materijala. S donje strane materijala kvaliteta reza je nešto lošija zbog smanjenja tlaka vodenog mlaza i odstupanja pri većem posmaku.

6.2.1. Ubrzanje abrazivnih čestica

Ubrzanje abrazivnih čestica počinje zahvaćanjem abraziva vodom u komori za miješanje. Ubrzanje čestica ostvaruje se zbog razlike u brzini kretanja abraziva i brzini strujanja vodenog mlaza. Pretpostavlja se da čestice abraziva ubrzavaju između visokobrzinskog vodenog mlaza i cijevi za fokusiranje. Tijekom ubrzanja, abrazivne čestice i okrnjene abrazivne čestice lokalno ometaju protok vode i dolazi do smanjenja protoka vode. Korištenjem cijevi za fokusiranje veće duljine, može se ubrzati abraziv do najviših mogućih brzina (u prosjeku 50% brzine protoka vode). Gubitak kinetičke energije vode, uzrokovan lomom čestica na površini cijevi za fokusiranje, rezultira značajnim smanjenjem brzina abraziva, koje mogu biti preniske za učinkovito rezanje radnog komada. Tijekom kontakata abrazivnih čestica i unutarnje površine cijevi za fokusiranje, događa se dodatno usporavanje. Zaključuje se da proces ubrzanja počinje u konusnom dijelu cijevi za fokusiranje, gdje se abraziv skuplja [2].

Tijekom početne faze ubrzanja čestica i formiranja mlaza postoji tzv. konstantno klizanje mlaza kroz rezu glavu. Zbog visoke brzine mlaza vode koja protječe kroz komoru za miješanje, uslijed venturi efekta, zrak se uvlači u struju. Ustvari, u komori za miješanje postoji venturi efekt jer je zrak stlačen u mlazu vode. S jedne strane protok zraka prekida mlaz vode, stoga bi trebao biti minimiziran, a s druge strane zrak omogućava zahvat abraziva mlazom vode u komori za miješanje [2].

7. PREDNOSTI I NEDOSTATCI OBRADE VODENIM MLAZOM

Prednosti obrade vodenim mlazom [3] i [6]:

- Nema zagrijavanja materijala u zoni obrade (hladna obrada)
- Nema nastajanja čestica prašine koje predstavljaju opasnost za disanje
- Kratko vrijeme pripreme stroja
- Jednostavna automatizacija postupka
- Ekološki prihvatljiv postupak (koriste se prirodni materijali, voda i pijesak, te nema otpadnih nečistoća kao ulje i emulzija)
- Jedan alat koristi se za rezanje materijala različitog sastava i debljine (aluminij, čelik, staklo)
- Nema oštih rubova nakon rezanja
- Ograničen (minimalan) gubitak materijala zbog malog promjera vodenog mlaza
- Bolja iskoristivost energije
- Nije potreban početni provrt za obradu
- Male posmične sile za vrijeme obrade
- Mala potreba za stegama kod postavljanja i stezanja obratka

- Točnost obrade $\pm 0,1$ mm
- Debljina materijala obratka i do 100 mm
- Moguće je izraditi gotovo sve 2D oblike

Nedostaci obrade vodenim mlazom [3] i [6]:

- Izbrzdane površine obradom vodenog mlaza izazivaju smanjenje energije u dubini reza (rješenje je smanjenje brzine rezanja ili podizanje tlaka)
- Brzim linearnim rezanjem dobiva se V profil
- Kod brzog rezanja unutarnjih kutova mogu nastati urezi u materijalu Pri brzom rezanju krugova i lukova može doći do odstupanja
- Materijali skloni koroziji moraju se nakon rezanja zaštititi od korozije
- Gubitkom tlaka između pumpe i rezne glave smanjuje se brzina rezanja
- Obrada vrlo tvrdih materijala je vrlo teška ili gotovo nemoguća
- Postoje ograničenja u obradi 3D oblika
- Buka koja se razvija prilikom obrade (do 100 db)

8. PODRUČJA PRIMJENE

Postoje brojni primjeri primjene vodenog i vodno-abrazivnog mlaza u praksi. Neka od područja primjene prikazana su u tablici 2.

Tablica 2. Područja primjene vodenog i vodno-abrazivnog mlaza [2]

Primjena vodenog mlaza	Područje primjene
1. Rezanje plastike	Plastična industrija
2. Rezanje papira i celuloze	Industrija papira
3. Rezanje vlakana 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 vodno-abrazivnog mlaza	Područje primjene
1. Rezanje titana, aluminija, 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, obrada kamena
3. Za rezanje otpada	Ekologija
4. Rezanje malih tunela	Građevinarstvo

9. ZAKLJUČAK

Vodeni mlaz je svestrano oruđe koje se upotrebljava pri raznim primjenjivim tehnologijama kao što su rezanje, bušenje, glodanje materijala, odstranjivanje boje, fragmentacija... 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. Zahtjevi za većom fleksibilnošću, izradom kompleksnijih oblika obradka, bržom obradom materijala dovelo je do porasta usvajanja tehnologije obrade materijala vodenim mlazom na tržištu. Postupak obrade materijala vodenim mlazom lako se primjenjuje s ili bez dodatka abraziva, ovisno o materijalu koji se obrađuje. Neprestana želja za razvojem tehnologije, svestranost postupka i ekološka prihvatljivost, razlozi su zbog kojih će opisana tehnologija u budućnosti imati sve veću primjenu na tržištu.

Sebastijan Kos (student)
seba.kos@hotmail.com

Jovica Lončar (student)
jloncar.bj@gmail.com

10. LITERATURA

- [1] Nedić, B.; Lazić, M.: Proizvodne tehnologije, Obrada metala rezanjem, Mašinski fakultet Kragujevac, 2007.
- [2] Hloch, S.; Valiček, J.; Stoić, A.; Kozak, D.; Samardžić, I.; Novak-Marcinčin, J.; Modrak, V.: Rezanje mlazom vode, Sveučilišni udžbenik, Slavonski Brod, 2011.
- [3] Botak, Z.; Kondić, Ž; Mađerić, D.: Obrada mlazom vode, Tehnički vjesnik, Vol. 16, No. 3, Rujan 2009, str. 97-101
- [4] Nedić, B.; Baralić, J.: Specifičnosti obrade abrazivnim vodenim mlazom, IMK – 14, Istraživanje i razvoj, Vol. 13, br. 1-2 (2007.), str. 113-120
- [5] Janković, P.; Radovanović, M.: Prilog istraživanju kvaliteta reza kod sečenja abrazivnim vodenim mlazom, IMK – 14, Istraživanje i razvoj, Vol. 15, br. 3-4 (2009.), str. 19-24
- [6] www.fsb.hr/kas/.../2Nekonvencionalne%20obrade%20ECM-EDM-WJ.pps (28.05.2014.)
- [7] http://lab.fs.uni-lj.si/lat/nekProc/AVC_Uvod-2.pdf (28.05.2014.)
- [8] <http://lab.fs.unilj.si/lat/nekProc/NP%20AVC%20rezanje.pdf> (28.05.2014.)
- [9] http://www.ssfs.si/download/Nekonvencionalni_procesi/Vsa%20predavanja.pdf (22.04.2010)
- [10] <http://tribolab.mas.bg.ac.rs/proceedings/2007/249-253.pdf>(28.05.2014.)

Kontakt autora:

Tihomir Glatki (student)
tglatki@gmail.com

Matija Lacković (student)
lackobasista93@gmail.com