

SAVREMENI OBRADNI SISTEMI - OBRADA VODENIM MLAZOM SA DODATKOM ABRAZIVNIH ČESTICA

Milan Stefanović¹ Dr Slobodan Stefanović² Msc Aleksandar Jovanović³

Rezime: Rezanje vodenim mlazom pod visokim pritiskom je proces erozije. Velika brzina vodenog mlaze stvorena je puštanjem vode kroz mali otvor iz rezervoara pod pritiskom pri čemu dolazi do udara mlaza u površinu obradka. Tokom tog procesa kinetička energija se pretvara u pritisnu energiju što uzrokuje oštećenje materijala i stvaranje mikropukotina koje se šire pod dinamičkim opterećenjem mlaza. Širenju mikropukotina doprinosi i turbulentno strujanje tečnosti u pukotinama kao i kavitaciono delovanje nastalih vazdušnih mehurića tako da delovanjem vode dolazi do odvajanja i odnošenja materijala. Rezanje vodenim mlazom bez abraziva je pogodno za rezanje mekših materijala (npr. papir, drvo, koža, sunder, PVC, najlon). Ukoliko je dodat abraziv vodenom mlazu mogu se obrađivati tvrdi materijali.

Ključne reči: : Obrada vodenim mlazom, abrazija, rezanje.

WATER JET PROCESSING WITH THE ADDITION OF ABRASIVE PARTICLES

Abstract: High-pressure waterjet cutting is an erosion process. The high speed of the water jet is created by releasing water through a small opening from the tank under pressure, during which the jet hits the surface of the workpiece. During this process, kinetic energy is converted into pressure energy, which causes damage to the material and the creation of microcracks that expand under the dynamic load of the jet. The expansion of microcracks is also contributed by the turbulent flow of liquid in the cracks, as well as the cavitation effect of the resulting air bubbles, so that the separation and removal of material occurs due to the action of water. Waterjet cutting without abrasives is suitable for cutting softer materials (eg paper, wood, leather, sponge, PVC, nylon). If an abrasive is added to the water jet, harder materials can be processed.

Key words: Water jet processing, abrasion, cutting.

1. UVOD

Novi nekonvencionalni postupci obrade su postupci, kod kojih se uklanjanje viška materijala, izmena oblika, dimenzija i strukture materijala ostvaruje korišćenjem električne, hemijske, svetlosne, magnetne, nuklearne i drugih oblika energije, dovedenih neposredno u proces - zonu rezanja. Izbor jednog od postupaka vrši se pomoću višekriterijumskog odlučivanja uzimajući u obzir ograničenja u materijalima i postojećoj tehnologiji. Jedna od nekonvencionalnih metoda obrade materijala je upotreba vode kao sredstva za obradu. Rezanje vodenim mlazom moguće je rezati metal, legirani metal (do debljine 150 mm), staklo, kamen, plastiku, gumu, drvo itd. Rezanje vodenim mlazom ne zagreva materijal što je posebno važno kod rezanja čelika koji su namenjeni za termičku obradu i kod materijala kod kojih izlaganje visokim temperaturama može promeniti svojstva. Mala širina reza omogućuje bolje iskorišćenje sirovine. Vodeno rezanje ne ostavlja nazubljene delove ni oštre rubove koji iziskuju dodatnu ručnu ili mašinsku obradu.

2. OSNOVE PROCESA OBRADNE VODENIM MLAZOM

Osnovu procesa predstavlja vodeni mlaz sastavljen od vode i abrazivnog materijala veoma malog prečnika (0,2 do 1 mm), koji se pod velikim pritiskom od oko 3.000 bar sudara sa površinom radnog predmeta. Voda, abraziv i mehurići vazduha kreću se supersoničnom brzinom i u kontaktu sa površinom radnog predmeta odvajaju komadiće materijal. Presudan uticaj na rezultat rezanja ima pritisak vode u instalaciji i prečnik mlaznice koji određuju snagu vodenog mlaza.

¹ Student Fakulteta Primenjenih nauka, Niš; email: milanstefanovic0705@gmail.com

² Akademija tehničko – vaspitačkih strukovnih studija, Niš; email: slobodanstef@gmail.com

³ Visoka tehnička škola strukovnih studija, Beograd,

Prednosti ovakvog načina obrade materijala je u tome što su smanjeni troškovi alata. Zbog minimalnih sila rezanja (5 do 130 N) nije potrebno stezanje obradka kao ni označavanje i markiranje. Tako obrađena površina nema zaostalih naprezanja i deformacija. Obrada različitih materijala vrši se bez menjanja opreme i alata, a kvalitet reza je isti za sve slojeve materijala. Gubici materijala su vrlo mali kao i sama debljina reza. Moguće je rezanje gotovo svih vrsta materijala osim kaljenog stakla zbog njegovog površinskog napona zbog čega će pri rezanju da dođe do lomljenja na sitne komadiće. Kod rezanja vodenim mlazom ne postoje zone uticaja toplote (ZUT) pa se obrađuje bez očvršćavanja materijala, stvaranja otrovnih gasova i savijanja. Takođe mogu da se obrađuju elementi koji su prethodno bili termički tretirani. Upravljanje mašinom je relativno jednostavno uprkos velikoj snazi mašine koja može da reže gotovo sve, a postupak je siguran za operatera jer nije potrebno izlagati ruke u blizini rezne glave koja obrađuje. Kod ove obrade je zahvalno to što je ekološki prihvatljiva. Abraziv se reciklira pa ga je moguće ponovno iskoristiti dok se voda, ukoliko se obrađuju opasniji materijali, reciklira na propisani način. Zbog uskog reza materijala koji iznosi otprilike 0,5 mm nema velikih gubitaka materijala što je sa finansijskog aspekta velika prednost kada se obrađuju skuplji materijali poput titana. Kvalitet obrađene površine najvećim delom zavisi od parametrima obrade koji su određeni programski.



Slika 1 – Sečenje vodenim mlazom⁴

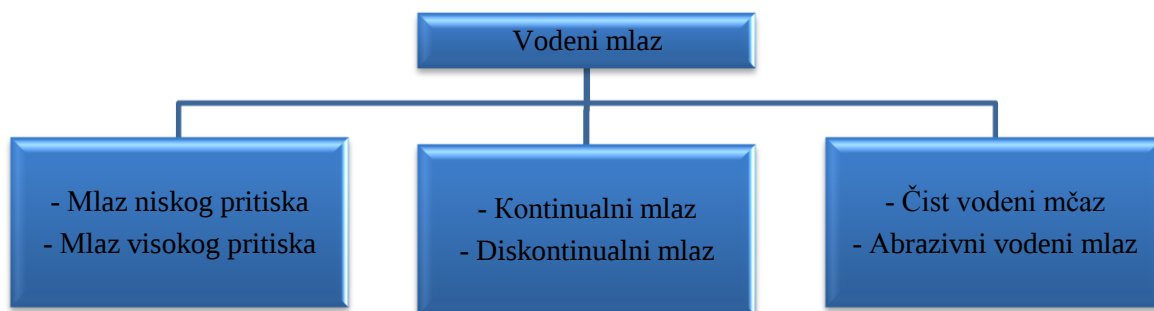
Glavni parametri su:

- pritisak vode,
- brzina mlaza,
- protok abraziva,
- prečnik vodene mlaznice,
- prečnik abrazivne mlaznice,
- debljina obrađivanog materijala i
- vrsta obrađivanog materijala.

3. OBRAĐA ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM

Abrazivni vodeni mlaz obuhvata više različitih vrsta mlaza. Najobuhvatnija podela je prikazana na slici 2.

⁴ ALMING D.O.O. Užice



Slika 2 – Vrste abrazivnog vodenog mlaza⁵

Prva podela je načinjena na osnovu vrednosti radnog pritiska. Tačna vrednost radnog pritiska, koja bi bila postavljena kao granica koja razdvaja vodeni mlaz na mlaz niskog i mlaz visokog pritiska nije tačno određena. Ova podela je načinjena na osnovu pumpe koja se koristi u instalaciji za obradu abrazivnim vodenim mlazom. Većina mašina za obradu abrazivnim vodenim mlazom ima radni pritisak vode oko 400 MPa (4000 bar). Zupčaste i zavojne pumpe se nisu pokazale kao pogodne za stvaranje tako visokog pritiska. Za vrednosti pritiska iznad 70 MPa se koriste klipne pumpe.

Klipne pumpe visokog pritiska mogu biti:

- pumpe sa direktnim pogonom i
- pumpe sa pojačivačem pritiska.

Ukoliko se u instalaciji za obradu vodenim mlazom za generisanje radnog pritiska koristi klipna pumpa sa direktnim pogonom, onda se radi o instalacija sa mlazom niskog pritiska. Radni pritisak u ovim instalacijama se kreću oko 280 MPa. Ukoliko se u instalaciji za obradu vodenim mlazom za generisanje radnog pritiska koristi pumpa sa pojačivačem pritiska, onda je to instalacija sa mlazom visokog pritiska. Radni pritisak u ovakvim instalacijama je oko 400 MPa. Takođe, vodeni mlaz se može podeliti na kontinualni i diskontinualni mlaz. Zbog načina na koji nastaje vodeni mlaz visokog pritiska i oscilacija u vrednosti pritiska u toku vremena, javlja se neznatan diskontinuitet u vodenom mlazu. Ovaj diskontinuitet se zanemaruje pa se kao diskontinualni vodeni mlaz smatra vodeni mlaz koji ima diskontinuitet u protoku i pritisku, a koji je namerno izazvan nekim spoljnim mehaničkim uređajem. U zavisnosti od toga šta se koristi kao radni medijum, vodeni mlaz se može podeliti na čist vodeni mlaz i abrazivni vodeni mlaz. Čist vodeni mlaz se koristi za obradu mekših materijala, kao što su drvo, papir, koža. Za obradu tvrdih materijala nije dovoljna energija čistog vodenog mlaza, pa se u njega dodaje abraziv u vidu praha. Na taj način nastaje abrazivni vodeni mlaz.

3.1. Karakteristike obrade abrazivnim vodenim mlazom

Obrada abrazivnim vodenim mlazom se danas sve više koristi u industriji jer ima dosta prednosti u odnosu na konvencionalne postupke obrade.

Abrazivni vodeni mlaz obuhvata više različitih vrsta mlaza.

Najobuhvatnija podela je prikazana na slici 2.

Prednosti obrade abrazivnim vodenim mlazom su sledeće:

- Nema uticaja toplote na obrađenu površinu. Toplota koja se generiše, u zoni obrade, pri samom procesu obrade se odmah neutrališe mlazom vode. Zbog toga ne dolazi do porasta temperature na predmetu koji se obrađuje. Ovo je veoma bitno kod obrade termoosetljivih materijala i materijala kod kojih porast temperature dovodi do promena u strukturi materijala,

⁵ Momber, A.W., Kovačević, R., "Principles of abrasive water jet machining", Springer, London, 1998.

- Mogućnost rezanja po zadatoj konturi. Obrada abrazivnim vodenim mlazom se pokazala kao izuzetno dobra za 2D konturno rezanje. Sa ovim postupkom obrade je moguće vršiti rezanje izuzetno složenih kontura,
- Velika raznovrsnost obrađivanih materijala. Abrazivnim vodenim mlazom se mogu obrađivati gotovo svi materijali. Ovaj postupak obrade je veoma pogodan za obradu veoma tvrdih i krutih materijal (kaljeni čelik, legure titanijuma, staklo, keramika),
- Male sile rezanja. Sile rezanja pri obradi abrazivnim vodenim mlazom su veoma male, tako da u velikom broju slučajeva nije potrebno pričvršćivanje materijala koji se obrađuje na radni sto mašine,
- Veoma brza priprema za rad. Sve vrste obrade se obavljaju sa istom reznom glavom, tako da, u tom smislu, nije potrebno posebno podešavanje mašine,
- Pri obradi abrazivnim vodenim mlazom dolazi do pojave minimalne pucne, uređaji za obradu abrazivnim vodenim mlazom se lako integrišu sa mehaničkim manipulatorima, potrošni materijal pri ovoj obradi (voda i abrazivni materijal) su lako dostupni i jeftini i
- Veoma nizak nivo zagađenja okoline.
- Pored svih navedenih prednosti obrade abrazivnim vodenim mlazom, postoje i nedostaci i ograničenja u široj primeni.

Ovi nedostaci su:

- Promena u kvalitetu reza po dubini reza. Obrada abrazivnim vodenim mlazom je obrada mlazom koncentrisane energije. Sa prodiranjem u materijal dolazi do gubitka energije i skretanja mlaza, što dovodi do promene uslova obrade. To dovodi do promena u kvalitetu reza,
- Mala iskorišćenost energije. Uklanjanje materijala iz zone rezanja vrši samo deo abrazivnih čestica koje se nalaze u vodenom mlazu. Kinetička energija ovih čestica je manja od 10% ukupne energije abrazivnog vodenog mlaza,
- Veoma kratak životni vek abrazivne mlaznice,
- Velika početna ulaganja (visoka cena mašine za obradu abrazivnim vodenim mlazom, opreme i rezervnih delova),
- Velika buka pri obradi abrazivnim vodenim mlazom (do 100 db).
- Obradena površina je uvek mat,
- Mašina mora biti smeštena u posebnoj prostoriji, jer pri obradi dolazi do stvaranja veoma fine magle vode. Magla se mora usisavati jer izaziva koroziju opreme koja se nalazi u neposrednoj blizini.

Na osnovu navedenih činjenica, može se reći da, kada je u pitanju obrada abrazivnim vodenim mlazom, mnogo je više prednosti nego nedostataka. Zbog toga se danas sve češće u industriji susreće ova vrsta obrade.

3.2. Poređenje obrade abrazivnim vodenim mlazom sa ostalim komparativnim obradama

Obrada abrazivnim vodenim mlazom se najčešće koristi za konturno sečenje različitih materijala. Zbog toga je najpogodnije ovaj postupak obrade porediti sa tehnologijama koje se takođe koriste za ovakvu obradu. To su najčešće obrada laserom, obrada plazmom i elektroeroziona obrada sa žičanom elektrodom. Zbog bolje preglednosti, poređenje je dato u tabeli 2. Poređene su samo osnovne karakteristike, kao što su maksimalna debljina predmeta obrade, kvalitet reza, tačnost obrade i slično.

Na osnovu poređenja može se zaključiti da je osnovna prednost obrade abrazivnim vodenim mlazom mogućnost sečenja svih materijala velikih debljina i odsustvo pojave toplote u zoni rezanja. Na slici 3. je prikazana mikrostruktura čelika X5CrNi 18–10 bez obrade i u zoni rezanja nakon obrade abrazivnim vodenim mlazom, obrade laserom, plazmom i elektroeroziona obrade sa žičanom elektrodom (WEDM).

U tabeli 1. data su poređenja samo sa nekonvencionalnim postupcima obrade jer su samo oni komparativni sa obradom materijala abrazivnim vodenim mlazom, poređenje sa konvencionalnim metodama obrade nema smisla.

Tabela 1. – Poređenje obrade abrazivnim vodenim mlazom sa ostalim komparativnim obradama⁶

Karakteristika	Obrada abrazivnim vodenim mlazom	Obrada laserom	Obrada plazmom	Elektroeroziona obrada sa žičanom elektrodom
Materijal predmeta obrade	Svi materijali	Čitav spektar materijala osim reflektujućih materijala i dobrih provodnika toplote	Elektroprovodni Materijali (ugljenični i legirani čelik, i legure)	Elektroprovodni materijali
Temperatura reza	Hladni rez	Topao rez	Vruć rez	Topao rez
Debljina predmeta obrade	do 280 mm	do 20 mm (za laser od 3 kW)	do 40 mm	do 100 mm
Tačnost obrade	0,05 mm	0,015 mm	0,25 mm	0,001 mm
Nagib reza	0 – 2°	0 – 0,5°	0 - 8°	0°
Širina reza	0,8 mm	0,5 mm	1,8 mm	0,2 mm
Kvalitet površine reza	N8 (Ra = 3,2 μm)	N7 (Ra = 1,6 μm)	N10 (Ra = 12,5 μm)	N6 (Ra = 0,8 μm)
Obrada složenih kontura	Moguća	Moguća	Moguća	Moguća

3.3. Načini stvaranja i oblici abrazivnog vodenog mlaza

Kod ovog postupka obrade postoje dva načina stvaranja mlaza a to su:

- Prethodno stvoren mlaz, to je suspenzijski mlaz (slika 4.a) koji nastaje na principu injektora, tako što sam vodeni mlaz usisava abrazivno sredstvo i meša ga sa vodom, a zatim se takav mlaz fokusira u mlaznici. Pritisak u sistemu je do max. 700 bara. Koristi se za rezanje betona do 1 m debljine i 3 mm širine reza.
- Injektorski mlaz (slika 4.b), bolji je za primenu kod tehnologije obrade. Sastoji se od 10% vode, 1% abrazivnog sredstva i ostalo je vazduh. Mlaz je tanak, debljina reza je oko 1 mm. Pritisak vode je 3000 do 3500 bar, potrošnja vode je 2 do 4 l/min i abrazivnog sredstva 0,2 do 1 kg/m.

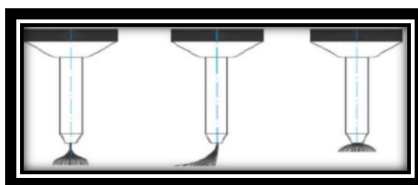
Prilikom rezanja abrazivnim vodenim mlazom jako važno da su mlaznica i cev za mešanje dobro centrirane, jer od toga zavisi izgled abrazivnog vodenog mlaza, a samim tim i kvalitet obrade.

⁶http://nardus.mpn.gov.rs/bitstream/handle/123456789/3640/Jelena_baralic.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Na slici 4. pod a) je prikazan dobar izgled mlaza koji je fokusiran u svom reznom području, dok pod b) i c) prikazana je izgled lošeg mlaza.



Slika 3 - Mikrostruktura čelika X5CrNi18-10 pre i nakon obrade abrazivnim vodenim mlazom, obrade laserom, plazmom i elektroerozijske obrade žičanom elektrodom⁷



Slika 4 - Oblici abrazivnog vodenog mlaza⁸

Količina odnošenja materijala pri obradi abrazivnim vodenim mlazom zavisna je od brzine abrazivnog zrna, ugla ulaska zrna u materijal, tvrdoće abrazivnog zrna, tvrdoće materijala obrade i obliku abrazivnog zrna.

Na slici 5. je prikazan princip odnošenja materijala abrazivnim vodenim mlazom.

⁷ http://nardus.mpn.gov.rs/bitstream/handle/123456789/3640/Jelena_baralic.pdf?sequence=2&isAllowed=y

⁸ <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A735/datastream/PDF/view>

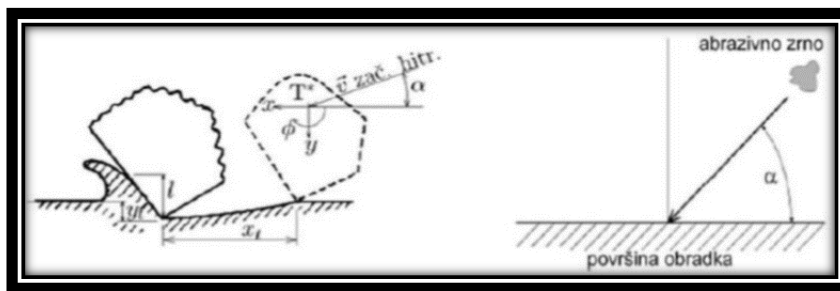


Figure 5 - Principle of Material Removal

Na proces rezanja abrazivnim vodenim mlazom utiče veliki broj faktora. Kvalitet reza koju opisuje geometrija i hrapavost površine zavisi od faktora procesa rezanja kao što su:

- brzina rezanja,
- pritisak vode,
- vrsta abraziva,
- količina čestice abraziva,
- maseni protok abraziva,
- prečnik mlaznice,
- razmak između rezne glave i obradka, kao i od
- debljine obratka.

Brzina rezanja važan je parametar obrade, jer utiče na kvalitet reza, ali i na trošak obrade. Ona zavisi od debljine, tvrdoće i vrste materijala koji se obrađuje. Brzina rezanja predstavlja brzinu relativnog pomeranja rezne glave u odnosu na obradak u pravcu rezanja dok je pravac pomoćnog kretanja rezne glave normalan na pravac strujanja mlaza. Podešavanje brzine rezanja vrši se da bi se optimizirali rezultati procesa rezanja za različite debljine obradka a time se i ostvaruje željen kvalitet reza pri zadatim vrednostima pritiska vode i masenog protoka abraziva.

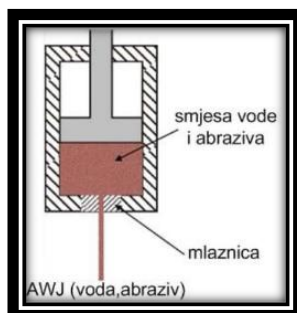


Figure 6 - Suspension Abrasive Waterjet

Na slici 6. prikazan je postupak dobijanja injekcijskog abrazivnog vodenog mlaza. Voda pod visokim pritiskom (2000 - 4000 bar), prolazi kroz mlaznicu (tvrdi metal, dijamant ili safir), malog prečnika (0,1 mm do 0,4 mm). Na ovaj način stvara se vodeni mlaz velike brzine (≈ 900 m/s), koji zatim prolazi kroz Venturijevu cev. U cevi se usled 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 cev za mešanje. Mešavina vode i abrazivnih čestica izlazi iz cevi za mešanje kao koherentni mlaz i vrši obradu.

3.4. Vrste i zadaci abraziva

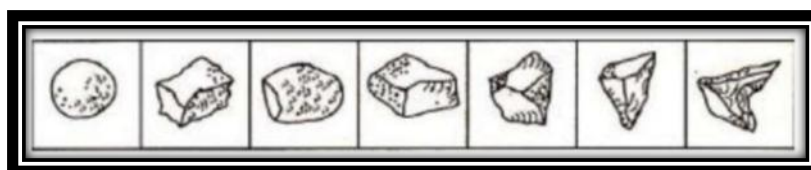
Abraziv se dodaje vodi zbog povećanja efikasnosti mlaza. Zato se abrazivni vodeni mlaz koristi za rezanje tvrdih materijala kao što je čelik, kamen... Pri rezanju mekših materijala papira, kože... može se upotrebljavati čisti vodeni mlaz.

Abrazivne pesove ili minerale delimo na okside (korund ili aluminijumov oksid, kvarcni pesak ili silicijumov oksid) i minerale (granit, olivin, cirkonijumov silikat). Najčešće upotrebljavan abraziv je granit jer je tvrd, težak i ekonomski najisplativiji. Za obradu površina može se dodatno upotrebiti zdrobljena troska ili čelične i staklene kuglice. Na slici 7. prikazane su neke vrste abraziva.



Slika 7 - Abrazivi⁹

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



Slika 8 - Oblici abrazivnog zrna¹⁰

S obzirom na način dobijanja abrazivnih sredstava upotrebljavaju se dve vrste abraziva. Jedna vrsta je pesak dobijen drobljenjem velikih stena. Druga vrsta abraziva dobija se prosejavanjem morskog peska. Drobljeni pesak ima više šiljaste ivice, te je tako pogodan za grubo rezanje, dok je prosejani morski pesak pogodniji za finiju obradu zbog zaobljenog oblika ivica. Prema veličini abrazivne čestice, abraziv se deli na abraziv za grubo rezanje (veće čestice) i abraziv za fino rezanje (manje čestice).

Granulacija abraziva je različita, a zavisi od vrste primene. Granulacija označena sa 120 upotrebljava se tamo gde je potreban obradak sa glatkijom površinom. U opšte svrhe najčešće se koristi granulacija označena sa 80. Za obradke sa grubljom površinom dovoljna je granulacija označena sa 50.



Slika 9 - Uvećan prikaz abrazivnih čestica¹¹

U reznoj glavi, odnosno u cevi za mešanje, dolazi do mešanja vode koja je pod visokim pritiskom i abrazivnih čestica koje se iz posebnog spremnika dovode do rezne glave. Proces mešanja je dosta složen s obzirom na turbulentnu prirodu mlaza. Kako na vodu deluje veliki pritisak, zbog čega se vodeni mlaz kreće velikom brzinom, a samim tim sa sobom nosi i veliku količinu kinetičke energije. Voda u cevi za mešanje zahvata abrazivne čestice i ubrzava ih, tj. predaje im deo kinetičke energije. Drugi deo energije se gubi. S obzirom na to da voda pri velikoj brzini zahvata abrazivne čestice, tu

⁹ http://lab.fs.uni-lj.si/lat/nekProc/AVC_Uvod-2.pdf

¹⁰ http://lab.fs.uni-lj.si/lat/nekProc/AVC_Uvod-2.pdf

¹¹ www.mf.ucg.ac.me/materijal/1382468944Water_Jet.pdf

dolazi do njihovog lomljenja na koje se troši određena količina energije. Gubici energije se javljaju i usled udara čestica o zidove cevi koji dovodi do daljnjeg loma čestica. Dolazi i do međusobnog sudara čestica, tako da već pri samom formiranju mlaza deo čestica biva toliko usitnjen da predstavlja otpad. Čestice u mlazu rotiraju ogromnim brzinama koje se kreću od nekoliko hiljada do 5 miliona obrtaja u sekundi. Od abrazivnih čestica se zahteva da su otporne na raslojavanje i da su tvrde.

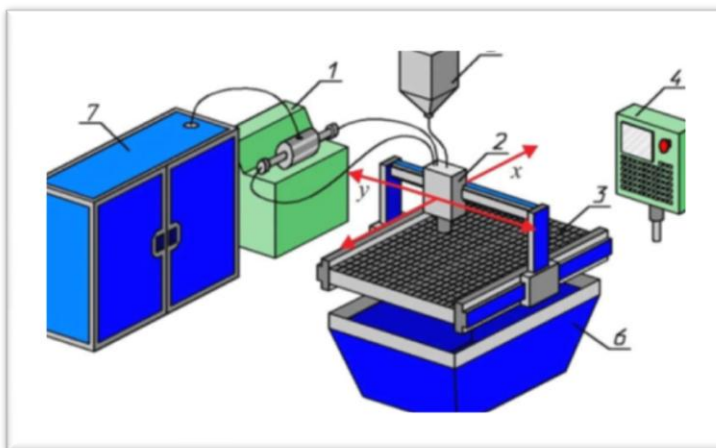
Dakle, abrazivne čestice i slomljene abrazivne čestice lokalno ometaju protok vode, tj. smanjuju ga. Mlaz potom izlazi kroz izlaznu cev koja, osim što služi za fokusiranje mlaza, služi i za povećanje brzine isticanja i kinetičke energije s obzirom na to da u njoj dolazi do konačne redukcije poprečnog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

Iskorišćena voda se, pomoću posebnih sistema, može reciklirati i ponovo koristiti za proces rezanja, mada je ponekad dovoljno izvršiti standardni proces filtriranja prethodno korišćene vode. Sistem 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.

Sistem za dovod abraziva do rezne glave je dosta složen, jer protok abraziva treba prilagoditi ostalim uslovima. Ranije se protok abraziva prilagođavao vrsti i debljini obrađenog materijala. U poslednje vreme je taj sistem pojednostavljen time što se protok abraziva prilagođava samo protoku vode, dok se brzina kretanja mlaznice prilagođava vrsti i debljini materijala koji se reže.

4. TEHNOLOGIJA REZANJA ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM

Mašina za obradu abrazivnim vodenim mlazom je veoma složen sistem i proizvod je savremene, vrhunske tehnologije. U industriji se mogu videti različiti oblici i konstrukcije mašina za obradu abrazivnim vodenim mlazom, ali je najčešći oblik i osnovne komponente mašine uprošćeno prikazan na slici 10.



Slika 10 - Skica mašine za obradu abrazivnim vodenim mlazom¹²

Mašina za obradu abrazivnim vodenim mlazom se sastoji od sledećih osnovnih komponenti (slika 11):

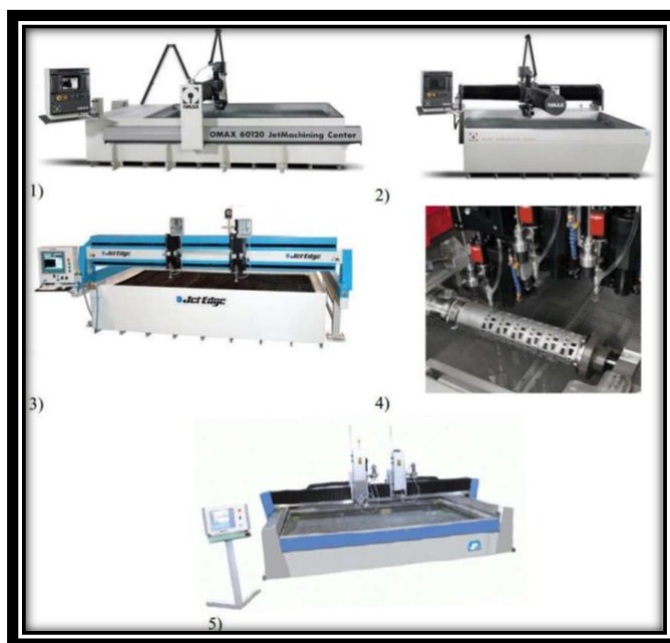
- 1) Pogonski deo – pojačavač pritiska,

¹² Mikov, I., N., Osipova, L., P., Gusenkov, E., N., Malamov, V., M., „Developments in the field of technology for cutting figures of decorative rock materials employing water jet cutting equipment“, *ANNUAL of the University of Mining and Geology —St. Ivan Rilski*, Mechanization, electrification and automation in mines, Vol. 49, 2006, pp. 21–25.

- 2) Izvršni deo – rezna glava,
- 3) Koordinatni radni sto,
- 4) Upravljačka jedinica (CNC),
- 5) Magacin abraziva sa sistemom za dovod abraziva,
- 6) Apsorber - hvatač neiskorišćene energije abrazivnog vodenog mlaza,
- 7) Sistem za pripremu vode.

Savremene mašine za obradu abrazivnim vodenim mlazom rade sa pritiskom vode preko 400 MPa (4000 bar), pri čemu vodeni mlaz dostiže brzine i do 1000 m/s. Sastoje se od pogonskog dela, izvršnog dela i pomoćnih komponenti. Pogonski deo je jedinica u kojoj se stvara voda pod visokim pritiskom, dok izvršni deo predstavlja rezna glava. Rezna glava se kreće brzinom v_c (brzina kretanja rezne glave) duž x i y ose. U pomoćne komponente spadaju sistem za pripremu vode, instalacija visokog pritiska, magacin abraziva sa sistemom za dovod abraziva i koordinatni radni sto sa apsorberom neiskorišćene energije abrazivnog vodenog mlaza. Na slici 11. su prikazani različiti savremeni tipovi mašina za obradu abrazivnim vodenim mlazom:

- 1) mašina sa jednom reznom glavom bez mogućnosti zakretanja,
- 2) mašina sa jednom reznom glavom sa mogućnošću zakretanja,
- 3) mašina sa dve rezne glave, od kojih jedna ima mogućnost zakretanja,
- 4) mašina sa tri rezne glave sa mogućnošću zakretanja i okretanja predmeta obrade,
- 5) mašina za obradu abrazivnim vodenim mlazom koja je korišćena za eksperimentalna istraživanja, sa dve rezne glave od kojih jedna ima mogućnost zakretanja (kompenzacija nagiba reza) a druga ne.



Slika 11. Razni tipovi mašina za obradu abrazivnim vodenim mlazom¹³

5. ZAKLJUČAK

Vodeni mlaz je svestrano oruđe koje se upotrebljava pri raznim primenjivim tehnologijama kao što su rezanje, bušenje, glodanje materijala, odstranjivanje boje, fragmentacija... Postupak vodenog mlaza je konkurentan drugim tehnologijama budući da ga lako upotrebljavamo za obradu većine materijala, potrebna je minimalna energija, nema toplotne deformacije obrađivanog materijala i ekološki je prihvatljiv postupak. Zahtevi za većom fleksibilnošću, izradom kompleksnijih oblika

¹³ www.mf.ucg.ac.me/materijal/1382468944Water_Jet.pdf

obratka, bržom obradom materijala dovelo je do porasta usvajanja tehnologije obrade materijala vodenim mlazom na tržištu. Postupak obrade materijala vodenim mlazom lako se primenjuje sa ili bez dodatka abraziva, zavisno od materijala koji se obrađuje.

6. LITERATURA

- [1] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka:377/preview>
- [2] <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A735/datastream/PDF/view>
- [3] www.mf.ucg.ac.me/materijal/1382468944Water_Jet.pdf
- [4] http://www.ssfs.si/download/Nekonvencionalni_procesi/Vsa%20predavanja.pdf
- [5] http://lab.fs.uni-lj.si/lat/nekProc/AVC_Uvod-2.pdf
- [6] Momber, A.W., Kovačević, R.: "Principles of abrasive water jet machining", Springer, London, 1998.
- [7] http://nardus.mpn.gov.rs/bitstream/handle/123456789/3640/Jelena_baralic.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [8] <https://hrcak.srce.hr/file/191149>.
- [9] http://lab.fs.uni-lj.si/lat/nekProc/AVC_Uvod-2.pdf
- [10] Mikov, I., N., Osipova, L., P., Gusenkov, E., N., Malamov, V., M., "Developments in the field of technology for cutting figures of decorative rock materials employing water jet cutting equipment", ANNUAL of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Mechanization, electrification and automation in mines, Vol. 49, pp. 21–25, 2006,
- [11] Janković, P., "Modeling of the abrasive water jet cutting process and the development of a technological processor", doctoral dissertation, Niš, 2009.