

PREDGOVOR

Do početka XIX veka i otkrića parne mašine uticaj ljudi na prirodu bio je gotovo zanemarljiv. Potom je nastala povećana potrošnja drveta, fosilnih goriva i ostalih prirodnih rezervi, a početkom XX veka i masovnija proizvodnja sintetičkih hemikalija. Ovo iscrpljivanje Zemljinih rezervi i njihovim korišćenjem dovelo je do remećenja prirodnih geohemijskih ciklusa osnovnih elemenata, na primer ugljenika i azota, na način na koji priroda ne može da odgovori dovoljno brzo da bi ih opet dovela u ravnotežu. Zato imamo efekat pregrevanja atmosfere, razaranja ozonskog omotača i druge. Čovek se dugo ponašao prema prirodi tako da je uzimao od nje ono što mu je bilo korisno, uništavajući ono što mu je smetalo.

Zahuktala industrijalizacija pored stvaranja društva doprinela je ekstremnoj degradaciji životne sredine kao i ekološke ravnoteže. Trenutni nivo iscrpljivanja prirodnih rezervi i sa tim povezano, štetnog uticaja na životnu sredinu nisu u saglasnosti sa principima održivog razvoja. U mnogim oblastima, nepovoljan uticaj na životnu sredinu, zdravlje ljudi i kvalitet života ljudi je u stalnom porastu.

Jedna od mogućnosti kako da se taj trend uspori je investiranje u razvoj i primenu ekološki "čistih" tehnologija.

1. OSNOVI PROIZVODNIH TEHNOLOGIJA

Tehnologija (od grčkih reči *tehnos* - zanat, *logos* - nauka) je nauka koja proučava procese i postupke prerade sirovina (ruda i sl.) u polufabrikate i gotove proizvode. Ona obuhvata materijalne i nematerijalne procese i deli se na:

- neproizvodnu ili nematerijalnu i
- proizvodnu ili materijalnu tehnologiju.

Neproizvodne tehnologije proučavaju problematiku transformacije ili prerade energije i informacija, transporta i organizacije transporta, skladištenja, čuvanja i ispitivanja materijala i proizvoda i sl.

Proizvodne tehnologije su tehnologije prerade sirovina i izrade polufabrikata i proizvoda različitih tipova i namena (alatnih mašina, automobila, aviona, brodova ...). To su tehnologije kojima se menja:

- suština materije (dobijanje gvožđa, čelika, bakra i drugih metala, granulata za izradu sinterovanih delova i delova od plastike, drobljenje, mlevenje i rastvaranje sirovina...),
- oblik, dimenzije i karakteristike delova i proizvoda i
- struktura materijala i estetski izgled proizvoda (termička i hemijsko-termička obrada, površinska zaštita, tehnologija modifikovanja površina ...).

Razvoj tehnologija je inicirao veliki broj postupaka izrade proizvoda u različitim oblastima života, tako da se prema nameni proizvodne tehnologije dele na:

- tehnologije mašinogradnje,
- tehnologije prerade plastičnih masa,
- tehnologije prerade drveta,
- tehnologije prerade papira,
- tehnologije prehrambene industrije,
- tehnologije dobijanja cementa itd.

Prerada materijala (metala i nemetala) i oblikovanje različitih delova (vratila, zavrtnjeva, navrtki, zupčanika i sl.), podsklopova i sklopova (spojnica, kućišta, menjača, prenosnika ...) i proizvoda (alatnih mašina, automobila itd.) se ostvaruje primenom različitih **tehnologija mašinogradnje**. Izučava osobine metala, nemetala i legura i postupke njihove prerade u poluproizvode ili proizvode.

Postoji šest osnovnih tehnologija, to su tehnologije:

1. **materijala** - proučava postupke prerade sirovina, problematiku dobijanja materijala, osobine, namenu, sisteme označavanja i metode ispitivanja materijala.

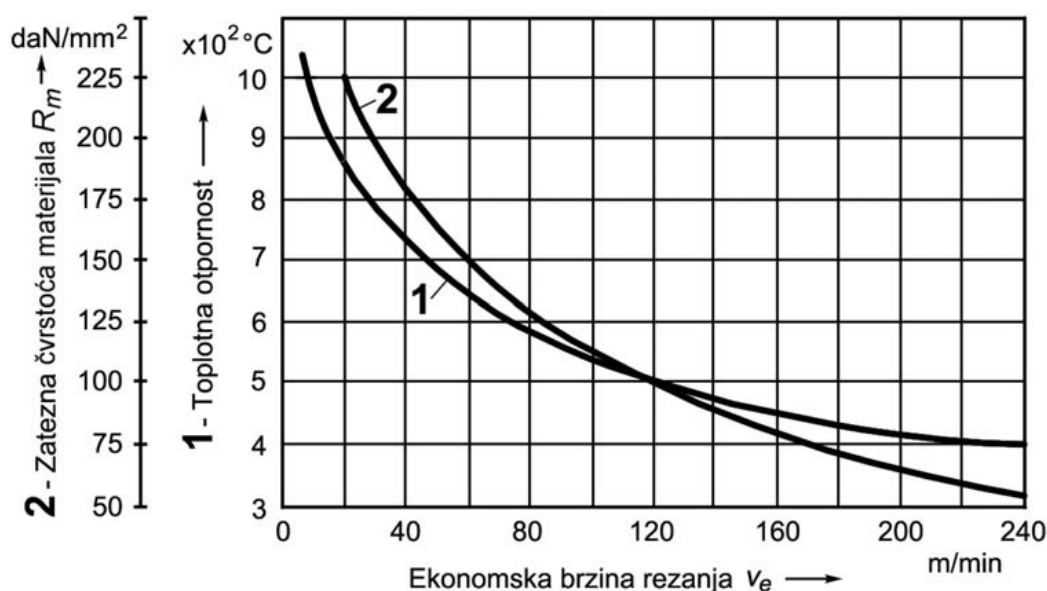
2. **obrade** - proučava postupke izrade i obrade (oblikovanja) mašinskih delova željenog oblika i dimenzija od polufabrikata, dobijenih livenjem, kovanjem, valjanjem i sl.
3. **termičke i hemijsko-termičke obrade** - (žarenje, kaljenje, poboljšanje, normalizacija, otpuštanje...) obuhvata postupke promene strukture, hemijskog sastava i mehaničkih osobina (tvrdoća, čvrstoća, žilavost itd.) materijala, a hemijsko-termičkom obradom (cementacija, nitiranje, cijanizacija...) menjaju se karakteristike površinskog sloja obrađenih delova.
4. **montaže** – ovim postupcima se od delova formiraju podsklopovi, sklopovi i proizvodi različite funkcionalnosti i namene.
5. **površinske zaštite** – obezbeđuje se zaštita metalnih delova i konstrukcija od štetnog dejstva različitih hemijskih uticaja okoline (kiselina, baza, soli, gasova, kiseonika iz vazduha itd.)
6. **modifikovanje površina** – obezbeđuje se poboljšanje karakteristika površinskih slojeva, veka trajanja i pouzdanosti mašinskih delova i tehničkih sistema. Poznate su pod nazivom *i površinske tehnologije*. Dve osnovne tehnologije su tehnologije nanošenja prevlaka i modifikovanja površinskih slojeva.

Tehnologija obrade proučava problematiku izrade i oblikovanja gotovih delova. Zavisno od osnovnih principa uklanjanja viška materijala i oblikovanja gotovih delova (korišćenjem mehaničke ili drugih vidova energije) tehnologije obrade se dele na:

1. **Tehnologija mehaničke obrade** proučava problematiku izrade i oblikovanja gotovih delova mehaničim putem (delovanjem alata na predmet obrade). Postupci mehaničke obrade se dele na postupke:
 - 1.1. *sa uklanjanjem viška materijala (sa skidanjem strugotine)* i to su:
 - 1.1.1. bravarski radovi - ručna obrada (sečenje, turpijanje ...) i
 - 1.1.2. obrada metala rezanjem.
 - 1.2. *bez uklanjanja viška materijala (bez skidanja strugotine)* i to su postupci:
 - 1.2.1. obrade livenjem,
 - 1.2.2. obrade deformisanjem,
 - 1.2.3. obrade spajanjem...
2. **Nekonvencionalne postupke obrade**

2. NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADE

Veoma brz razvitak avionske, raketne i nuklearne industrije neposredno posle drugog svetskog rata, nametnuo je potrebu korišćenja novih materijala specifičnih osobina. U ovom periodu proizveden je niz novih legura koje se odlikuju velikom zateznom čvrstoćom, toplotnom otpornošću i tvrdoćom, koje su, osim u navedenim, našle primenu i u drugim granama industrije, naročito pri izradi određenih vrsta alata. Danas se široko primenjuju legirani čelici za izradu delova koji su u radnim uslovima izloženi temperaturi do 1000°C , legure na bazi nikla do 1350°C , a legure na bazi kobalta do 1450°C . Teško topive legure na bazi molibdena i niobiuma zadržavaju svoja mehanička svojstva na temperaturi do 1800°C , a na bazi volframa i do 2300°C .



Slika 2.1. Promena ekonomske brzine rezanja u zavisnosti od toplotne otpornosti (1) i zatezne čvrstoće materijala (2)

Obrada delova od ovakvih materijala konvencionalnim postupcima obrade je veoma teška pa čak i nemoguća. Opšte uzevši, ekonomična obrada rezanjem različitih materijala, od onih najmekših do najtvrdih, ostvaruje se različitim brzinama rezanja, koje su tako određene da predstavljaju ekonomske brzine rezanja. Povećanjem mehaničkih svojstava materijala obratka opada ekonomska brzina rezanja, koja kod vrlo tvrdih metala ima veoma malu vrednost, što se vidi i sa dijagrama na slici 2.1. Razlog za ovo leži prvenstveno u tome što je u današnjim uslovima teško naći materijal reznog alata koji bi imao dovoljnu tvrdoću i čvrstoću i mogao da reže sa relativno visokim ekonomskim brzinama rezanja pri obradi delova od tvrdih, žilavih i toplotno otpornih legura. Sa druge strane obrada malim brzinama rezanja traje veoma dugo i u celini je neekonomična.

Zbog napred rečenog, uporedo sa razvojem novih visokootpornih materijala, ulagani su značajni naponi u razvoju odgovarajućih postupaka obrade. Pri tom su vršena paralelna istraživanja na usavršavanju konvencionalnih postupaka obrade i iznalaženju novih kvalitetnijih reznih alata, kao i iznalaženju novih postupaka obrade koji rade na sasvim novim principima u odnosu na rezanje.

S obzirom da se kod ovih postupaka obrade skidanje materijala obratka ostvaruje na sasvim drugim principima u odnosu na **Konvencionalne postupke obrade rezanjem (KPOR)**, to su isti dobili naziv **Nekonvencionalni postupci obrade (NPO)**. Kako je već rečeno, KPOR ne mogu da zadovolje sve zahteve savremene tehnologije obrade svih vrsta materijala, zbog čega se sve više proširuje primena NPO. Njihova primena opravdana je ne samo pri obradi teškoobradljivih materijala, već i pri obradi delova složenog geometrijskog oblika, od inače dobro obradljivih materijala, zbog znatno jednostavnije tehnologije i kinematike alata za obradu.

2.1. Podela nekonvencionalnih postupaka obrade

Do sada je razvijen veliki broj nekonvencionalnih postupaka obrade, koji se međusobno bitno razlikuju kako po vrsti energije koju koriste tako i po načinu skidanja materijala sa obratka.

Nekonvencionalni postupci obrade se mogu podeliti primenom različitih kriterijuma. Tako npr. **prema vrsti energije** koju koriste razlikuju se:

- mehanički postupci
- termoelektrični postupci
- elektrohemijski postupci i
- hemijski postupci.

Prema osnovnom mehanizmu kojim se ostvaruje skidanje materijala obratka razlikuju se sledeći:

- postupci erozije,
- postupci rastapanja ili isparavanja i
- postupci elektrohemijskog i hemijskog rastapanja

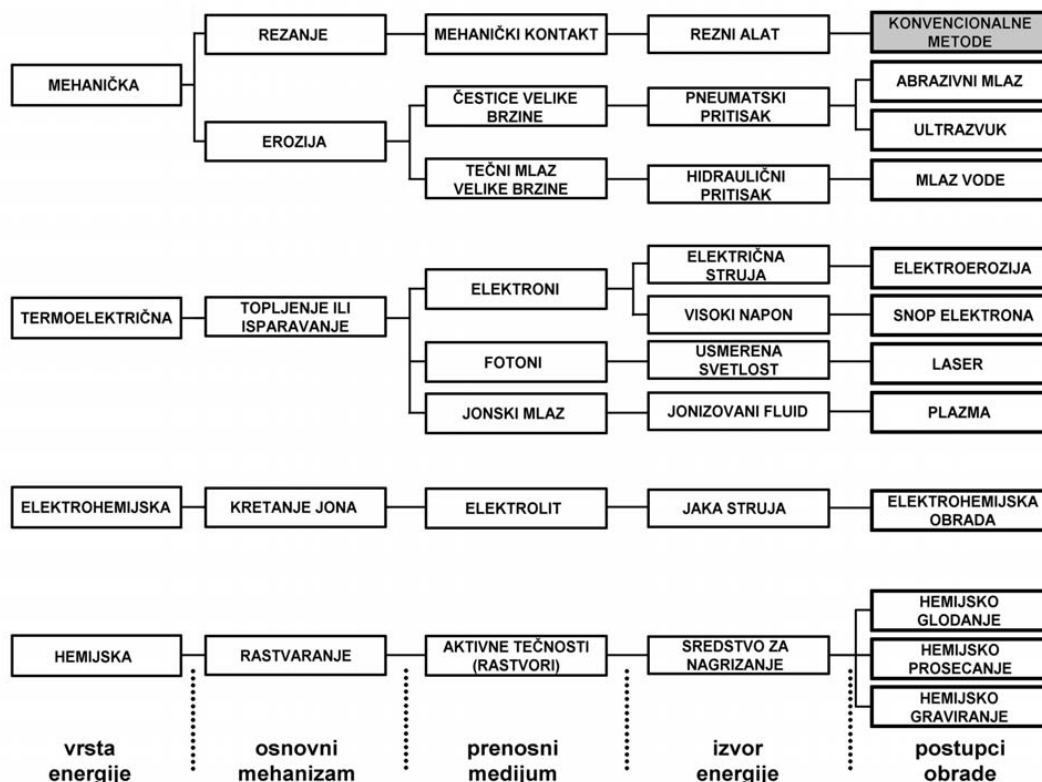
Prema vrsti medijuma kojima se prenosi energija potrebna za skidanje materijala, razlikuju se postupci koji koriste:

- čestice visoke brzine,
- elektrolit,
- snop elektrona,
- fotonski snop,
- plazmu i dr.

Na slici 2.2 šematski je prikazana klasifikacija postupaka obrade skidanjem materijala primenom prethodno navedenih kriterijuma.

Mehanički postupci, kako se vidi sa slike 2.2, mogu se grubo podeliti u dve grupe: postupci kojima se materijal obratka odstranjuje **rezanjem** i postupci kod kojih se to ostvaruje **erozijom**.

U **prvu grupu** spadaju svi konvencionalni postupci obrade rezanjem alatima sa definisanom geometrijom sečiva (struganje, bušenje, glodanje, rendisanje, provlačenje i dr.), kao i alatima sa nedefinisanom geometrijom sečiva (brušenje, honovanje, lepovanje i dr.).



Slika 2.2. Šematski prikaz klasifikacije svih postupaka obrade skidanjem materijala

U **drugu grupu** spadaju nekonvencionalni postupci obrade i to:

- obrada abrazivnim mlazom – AJM (Abrasive Jet Machining),
- obrada ultrazvukom – USM (Ultrasonic Machining) i
- obrada mlazom vode – WJM (Water Jet Machining).

Termoelektrični postupci predstavljaju danas najznačajniju grupu nekonvencionalnih postupaka obrade. Skidanje materijala obratka kod ovih postupaka u osnovi se vrši lokalnim rastapanjem, isparavanjem i sagorevanjem materijala koncentracijom toplotne energije na vrlo maloj zapremini materijala. U ovu grupu spadaju:

- elektroerozivna obrada – EDM (Electric Discharge Machining),
- obrada snopom elektrona – EBM (Electron Beam Machining),
- obrada jonskim snopom – IBM (Ion Beam Machining),

- obrada laserom – LBM (Laser Beam Machining) i
- obrada plazmom – PAM (Plasma Arc Machining).

U ovu grupu postupaka ubraja se i obrada koncentrisanim zrakom sunčeve svetlosti SBM (Solar Beam Machining) koja spada u vrlo stare postupke topljenja metala koji je na neki način prethodio pojavi lasera. Međutim, kako je intenzitet sunčeve svetlosti vezan za klimatske uslove pojedinih regiona na Zemlji, to je i značaj ove metode različit. U svakom slučaju pojava snažnih lasera potpuno je marginalizovao značaj ovog postupka za obradu skidanjem materijala, te ga zbog toga ovde samo pominjemo.

Elektrohemijski i hemijski postupci, naročito elektrohemijski, imaju danas veoma široku primenu. I ako postoje različite varijante ovih postupaka u ovu grupu uglavnom spadaju:

- elektrohemijska obrada – ECM (Electrochemical Machining) i
- hemijska obrada – CHM (Chemical Machining).

U cilju povećanja efikasnosti ove grupe postupaka često se koriste i drugi vidovi energije ili se pak iste kombinuju sa drugim postupcima obrade. Tako su od niza mogućih kombinacija sa drugim postupcima obrade poznati sledeći postupci:

- elektrohemijsko brušenje – ECG (Electrochemical Grinding),
- elektrohemijsko honovanje – ECH (Electrochemical Honing),
- elektrohemijsko-elektroerozivna obrada – ECDM (Electrochemical-Discharge Machining) i dr.

2.2. Opšte karakteristike nekonvencionalnih postupaka obrade

Većina prethodno nabrojanih NPO je znatno kasnije razvijena i uvedena u proizvodnu praksu u odnosu na KPOR koji imaju veoma dug period razvoja i primene. I pored toga, danas su mnogi NPO dostigli visok stepen razvoja, koji čak ni malo ne zaostaje za najrazvijenijim KPOR, a u nekim slučajevima ih i prevazilaze. Zbog toga se slobodno može reći da NPO u nekim područjima primene sve više potiskuju KPOR zbog toga što su ekonomičniji ili što daju mnogo bolje rezultate obrade (npr. tačnost i kvalitet). Ovakav trend razvoja i uvođenja NPO posledica je pre svega sledećih zahteva:

- porast konstrukcijskih zahteva mašinskih delova ka povećanju udela teško obradljivih materijala za njihovu izradu,
- povećani zahtevi ka složenosti oblika alata za različite namene: alati za obradu oblikovanjem (plastično deformisanje i livenje pod pritiskom), alati za preradu stakla, plastičnih masa, gume i sl. materijala,
- povećani zahtevi ka složenosti reznih alata od brzoreznog čelika i tvrdog materijala (npr. profilni noževi, profilna glodala, provlakači i dr.),
- povećani zahtevi za kompleksnošću izrade alata za obradu oblikovanjem, prouzrokovane potpuno novim konstruktivnim shvatanjem proizvoda,
- povećani zahtevi pri izradi minijaturnih delova povećane tačnosti,

- povećani zahtevi u pogledu produktivnosti i stvaranja pretpostavke za uvođenje automatizacije i automatizovanih proizvodnih sistema u gore navedene specifične oblasti proizvodnje,
- pretpostavke za vrlo dobru integraciju ovih proizvodnih metoda sa NU-upravljanjem i sistemima CAD/CAM i CIM.

Pri vrednovanju NPO treba imati u vidu i neke njihove zajedničke karakteristike koje se uglavnom mogu rezimirati u sledećim tačkama:

- Nezavisnost brzine obrade, kvaliteta obrađene površine i proizvodnosti od mehaničkih svojstava materijala obratka (tvrdoće, jačine na kidanje, žilavosti i dr.). Međutim, ovo ne znači da je obradljivost svih materijala ovim postupcima obrade ista. Razlike u obradljivosti postoje, ali su one uslovljene fizičkim i hemijskim osobinama materijala obratka, kao što su toplotna i električna provodljivost, sklonost ka rastvaranju u pojedinim sredinama i dr, a ne mehaničkim svojstvima.
- Odsustvo potrebe za postojanjem alata veće tvrdoće od tvrdoće materijala obratka, što je kod KPOR osnovni preduslov. U skoro svim NPO pritisak alata na obradak je vrlo mali ili je jednak nuli. Ovo jedino nije slučaj kod nekih vrsta ultrazvučne obrade u kojima je potrebno ostvariti određeni pritisak alata na obradak. Kod nekih NPO alat čak i ne postoji, a kod velikog broja neophodno je ostvariti određeni zazor između alata i obratka da bi se proces uklanjanja skinutog materijala mogao nesmetano odvijati.
- Značajno smanjenje odstranjenog dela materijala u odnosu na isti koji nastaje primenom KPOR. Ova karakteristika ima poseban značaj pri obradi skupih materijala kao što su: dijamant, rubin, germanijum i drugi mono kristalni materijali. NPO moguće je, npr. pri sečenju ostvariti vrlo tanke rezove tako da je otpadak materijala vrlo mali, čime se u značajnoj meri povećava ekonomičnost obrade.
- Visoka tačnost obrade, naročito u onim slučajevima kada je obrada KPOR nemoguća ili vrlo teška. U mašinogradnji je često potrebno obraditi delove sa visokom tačnošću, reda veličine $2\div 5\text{ }\mu\text{m}$ pa i manje. Ova tačnost teško se ostvaruje KPOR, naročito kada su u pitanju delovi malih dimenzija ili ako se obrada izvodi na teško pristupačnim mestima. Primenom odgovarajućih NPO ovi zadaci se takođe uspešno rešavaju.
- Pogodnost za obavljanje niza proizvodnih operacija koje se KPOR ne mogu izvesti ili se izvode veoma teško. Ovo se prvenstveno odnosi na obradu površina složenog geometrijskog oblika, obradu teško pristupačnih površina do kojih klasičan rezni alat teško dopire i sl. Ova karakteristika NPO posledica je relativno jednostavne tehnologije i kinematike obrade.
- Mogućnost delimične obrade predmeta velikih dimenzija bez korišćenja proizvodnih mašina takođe velikih dimenzija. Naime, neki NPO imaju mobilnu opremu koja se bez ikakvih poteškoća može postaviti na predmete velikih dimenzija, izvršiti potrebna obrada, a zatim ukloniti (primer zavarivanja velikih rezervoara snopom elektrona).
- Mogućnost potpune automatizacije i mehanizacije procesa obrade koji se izvodi nekonvencionalnim postupcima. Istina takve mogućnosti postoje i kod KPOR, ali je

razlika u tome što se, zbog prirode procesa skidanja materijala, samo kod neznatnog broja NPO može primeniti niži stepen automatizacije.

- Visoka proizvodnost i ekonomičnost u odnosu na KPOR. Ove karakteristike najviše dolaze do izražaja pri obradi delova sa složenim površinama, kao i pri obradi materijala visoke cene koštanja.
- Poboljšanje uslova rada sa stanovišta zdravstvene ugroženosti radnika. Naime, primenom većine NPO poboljšavaju se uslovi rada na proizvodnim radnim mestima, jer je radnik u procesu obrade relativno kratko vreme u kontaktu sa mašinom zbog visoke automatizacije procesa. Prema tome, proces obrade se može kontrolisati sa bezbednog mesta, a kod nekih čak i to nije potrebno; kad se mašina podesi ona nesmetano radi sve dok se obrada ne završi. To je naročito interesantno kod nekih relativno sporih postupaka obrade koji se mogu samostalno izvršavati u trećoj smeni, za vreme vikenda ili državnih praznika bez ikakvog prisustva radnika, što znatno pojeftinjuje proizvodnju.

Međutim, ne može se govoriti samo o dobrim stranama NPO, već se moraju navesti i njihovi nedostaci. Osnovni nedostatak nekih NPO je relativno mala proizvodnost u odnosu na KPOR i visok utrošak energije po jedinici zapremine, što se može videti iz tabele 2.1.

Proizvodnost i utrošak energije po jedinici skinute zapremine materijala su pre svega posledica fizičkih principa na kojima se zasnivaju pojedini NPO i ne moraju uvek biti jedini kriterijum za vrednovanje nekog postupka obrade. Zbog toga se moraju posmatrati i druge uštede u radu i troškovima proizvodnje, pogotovo kad se radi o teško obradljivim materijalima, delovima malih dimenzija i složenog geometrijskog oblika, koji ponekad dostižu i stotine procenata.

Tablica 2.1. Uporedni pregled efekata obrade nekih KPOR i NPO

VRSTA OBRADE	PROIZODNOST (mm ³ /min)	UTROŠAK ENERGIJE (J/mm ³)*	SNAGA MAŠINE (kW)	HRAPAVOST OBRADENE POVRŠINE Ra (μm)
struganje i glodanje	do 1000000	1÷10	5÷50	1,6÷12,5
bušenje	5000÷100000	5÷200	5÷150	0,2÷3,2
elektroerozija	5000	100÷1000	10	3,2÷12,5
obrada plazmom	100000	500÷1000	50÷150	6,3÷12,5
obrada snopom elek- trona	10	1500	100	0,8÷6,3
obrada laserom	5	do 30000	5÷15	0,8÷6,3
elektrohemijska obrada	15000÷25000	10÷100	200	0,4÷6,3
obrada ultrazvukom	10000	1000÷3000	1÷5	0,3÷0,8
obrada vodenim mlazom	do 30000	200÷400	10÷70	0,4÷12,5

*) Jedinичni rad (resp. energija) utrošen na topljenje čelika sa temperature od 20 °C iznosi približno 10 J/mm³.

Najveću prepreku većeg korišćenja NPO, bar za sada, čini visoka cena mašina, odnosno kompletnih postrojenja za obradu. No i ona ima tendenciju opadanja, s obzirom da se u njihovoj proizvodnji sve više koriste ekonomičnije metode, da autorska prava polako ističu, kao i da konkurencija na tržištu čini svoje.

3. OBRADA MLAZOM VODE

Sečenje predstavlja postupak kojim se, pomoću alata ili opreme za sečenje, jedan deo, definisan svojim oblikom i konturom, odvaja od ostatka materijala.

Obrada vodenim mlazom potiče od hidrauličkog iskopavanja kamenog uglja u SSSR-u i na Novom Zelandu. Voda je sakupljena iz rečica i usmeravana da ispira raznete stene, odnoseći pri tom ugalj i komadiće stene. Metod iskopavanja vodenim mlazom je kasnije primenjen u Južnoafričkim rudnicima zlata.

U Rusiji je prvi patentirao upotrebu vodenog mlaza Peter Tupitsyn davne 1936. godine, radeći u Ukrajinskom zavodu za rudarstvo u gradu Donetsk. Vodeni mlaz je primenio kao metodu za bušenje rudarskog okna, dok se kasnijih godina ista metoda upotrebljavala za bušenje velikih podzemnih rezervoara u kojima je smeštan gas, nafta itd. Zbog velike potrebe za rudom uranijuma 1950.-1960. godine, a znajući da je radioaktivan, ova tehnologija je primenjivana u postupku daljinskog bušenja i otkopavanja rude.

Prvi čovek koji se bavio izučavanjem primene vrlo visokih pritisaka bio je Dr. Norman Franz, zastupajući ideju, mogućnost da se od vode vrlo velikog pritiska napravi rezni alat. Došao je do ideje da rezanje drvene građe iz stabala velikih prečnika vrši primenom vodenog mlaza pod velikim pritiskom. Prvi je upotrebio mlaznicu sa malim otvorom i dokazao moć vodenog mlaza, odnosno ogromnu snagu za sečenje i obradu rezanjem.

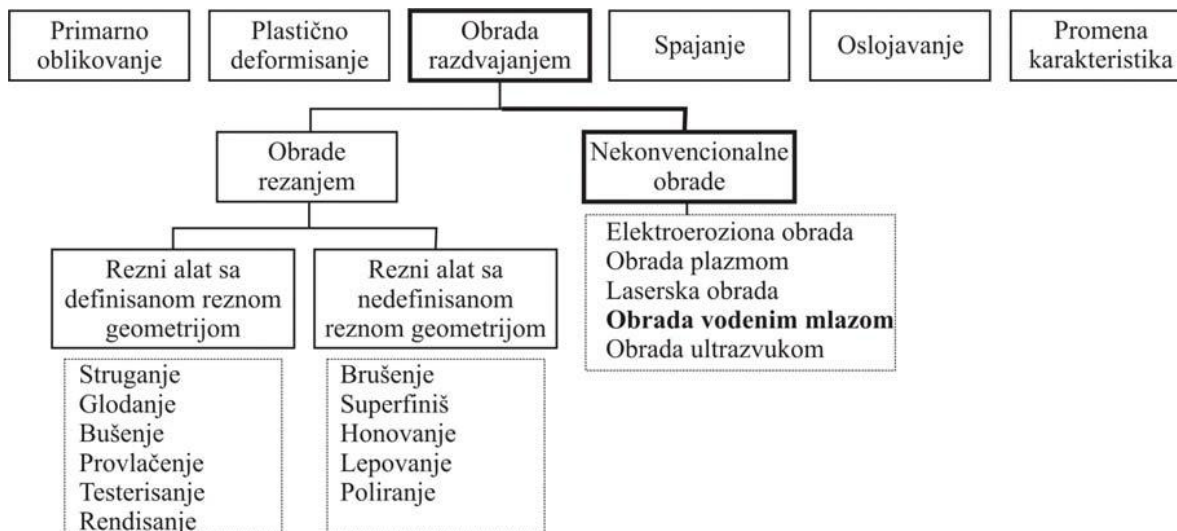
U Americi je 1970. razvijena tehnologija stvaranja pritiska od 40000 bara. 1972. prof. Robert Franz iz Mičigena radio je sa kompanijom "Mc Cartney Manufacturing Company" na instaliranju prvog postupka industrijskog sečenja vodenim mlazom. Oprema je instalirana u kompaniji "Alton Boxboard"-u. Kompanija "Flow Industries" je dodala pesak u postojeću instalaciju za čišćenje pod pritiskom, radi dobijanja završne bele boje metala.

Sečenje vodenim mlazom (Water Jet Machining – WJM) počinje da biva poznato u širim svetskim krugovima od 1980. godine. Godine 1990. Dr. John Olsen kao jedan od osnivača "OMAX" korporacije istražuje koncepciju sečenja abrazivnim vodenim mlazom (AWJM), uporedo razvijajući i softverska rešenja za programiranje i vođenje operacije sečenja.

Kasnije (nakon 1983) ova tehnologija je modifikovana mnogo intenzivnijim procesom tečnog mlaza sa dodatkom abraziva, radi rezanja tvrdih materijala. Prvi takav uređaj je napravljen u BOEING-u. Nakon tog prvog razvojnog perioda primena ove tehnologije (visokoenegetski tečni mlaz) se porširila i počela je da se primenjuje u industriji aviona i svemirskih letilica, a još masovnija upotreba počela je nakon 1987. kad je ona počela da se koristi i u civilnim sferama, kao i da se izvozi.

Sečenje vodenim mlazom je prema DIN 8580 (slika 3.1.) svrstano u glavnu grupu razdvajanje i podgrupu obrada tzv. nekonvencionalnim postupcima obrade. Prema DIN 8200

sečenje mlazom se definiše kao postupak obrade, pri kome se neka materija ubrzava i u vidu mlaza šalje na površinu obratka. Materija koja čini mlaz, najčešće je sastavljen od čestica, ali može biti i fluid, na primer voda.



Slika 3.1. Klasifikacija postupaka razdvajanja po DIN 8580

3.1. Osnovi procesa obrade

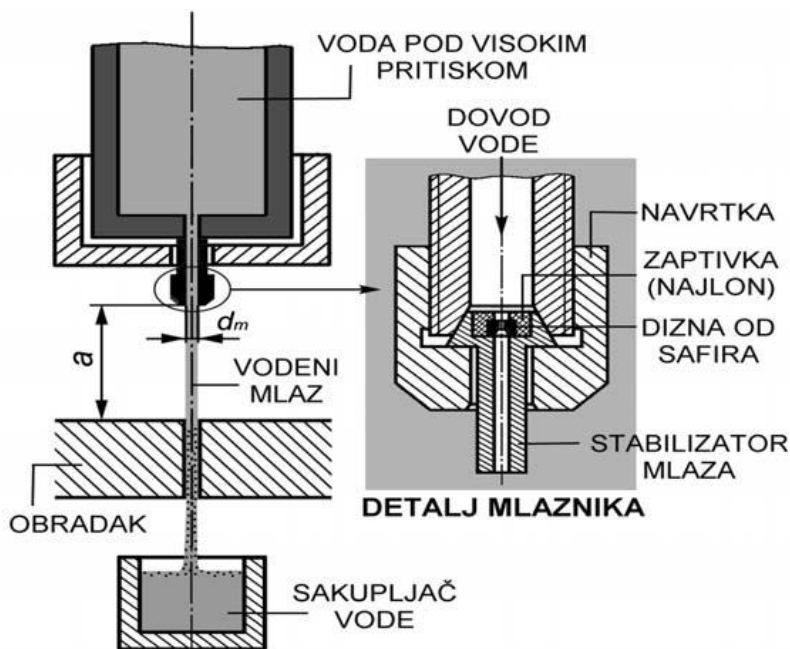
Tehnologija obrade vodenim mlazom, skraćeno WJM (Water Jet Machining), u osnovi koristi eroziono delovanje vodenog mlaza visokog pritiska za skidanje materijala, prvenstveno za sečenje skoro svih vrsta metalnih i nemetalnih materijala.

Obrada vodenim mlazom je našla svoju primenu u mnogim industrijskim granama kao što su: mašingradnja, rudarstvo, hemijska industrija, prehrambena industrija, elektroindustrija, građevinarstvo, metalurgija, industrija gume i plastike, papirna industrija i konfekcija, industrija nemetala (stakla, azbesta i dr.), pa čak i u medicini za određene vrste operativnih zahvata.

Pri obradi vodenim mlazom u osnovi se koriste dva načina rezanja: sa **čistim vodenim mlazom** (VM) i sa **abrazivnim vodenim mlazom** (AVM). Njihovo korišćenje zavisi od osobina materijala, zahtevane obrade i uslova pri samoj obradi.

3.2. Obrada čistim vodenim mlazom - Water Jet Machining – WJM

Pri ovoj obradi se kao alat za skidanje materijala koristi vodeni mlaz. On nastaje isticanjem tečnosti pod visokim pritiskom kroz diznu vrlo malog prečnika, pa se tako ostvaruje brzina kretanja čestica mlaza koja je dva do četiri puta veća od brzine prostiranja zvuka. Zbog toga se, sa energetskog stanovišta, vodeni mlaz može posmatrati kao „kruto telo” koje deluje na materijal obratka i vrši njegovo rezanje, slično kao i svaki drugi alat tog tipa.



Slika 3.2. Principijelna šema rezanja vodenim mlazom

Pri udaru tečnosti u obradak dolazi do stvaranja visokog pritiska na maloj površini obradka, usled čega na materijalu nastaju oštećenja, a bočni udarni talasi dovode do brzog razaranja materijala na granicama kristalnih zrna i pojave mikropukotina. Zbog dinamičkog opterećenja koje izaziva delovanje mlaza, mikropukotine se brzo šire što dovodi do trenutnog lokalnog razaranja materijala obradka. Razaranje materijala nastaje i dejstvom turbulentnog strujanja tečnosti u pukotinama, kao i kavitacionog delovanja gasnih mehurića.

Sam proces rezanja vodenim mlazom se odvija tako što prvo nastaje udubljenje pod dejstvom visokog pritiska tečnosti koje se postepeno pretvara u otvor, a pomeranjem obradka dolazi do proširivanja tog otvora i stvaranja reznog procepa.

Potreban pritisak obezbeđuje pumpa visokog pritiska. Danas se u komercijalnoj upotrebi koriste pritisci do 400 MPa. Voda pod visokim pritiskom se visokopritisnim cevima dovodi do rezne glave, u kojoj se nalazi mlaznica prečnika otvora od 0,08 do 0,4 mm. Pri isticanju iz mlaznice, voda formira tanak mlaz velike brzine, do 1000 m/s, trostruko veće od brzine zvuka.

Sečenje čistim vodenim mlazom nalazi primenu za sečenje nemetala i hrane. Primenjuje se u procesima proizvodnje peleni, papira, u automobilske industriji za sečenja delova unutrašnje dekoracije, delova od gume i plastike itd.

Sečenje čistim vodenim mlazom, pri pritisku vode od 400 MPa, nije pogodno za obradu metala zbog nedovoljne energije mlaza. Sečenje metala čistim vodenim mlazom bilo bi moguće primenom vode pritiska od 700 do 1000 MPa. Sa sada raspoloživim materijalima i tehnologijom, za te vrednosti pritiska nije moguće napraviti pumpu i komponente sistema visokog pritiska, koje bi zadovoljavale sve zahteve potrebne za industrijsku primenu. Iz tih razloga čistim vodenim mlazom se vrši sečenje samo mekih materijala, kao što su: hartija, karton, hrana, guma, sušer, folije i sl.

3.2.1. Čist vodeni mlaz

Obradni sistemi sa čistim vodenim mlazom koriste energetska svojstva vode koja ističe pod visokim pritiskom. Pri tome se koristi voda iz vodovoda, s tim što se iz nje eventualno odstrani talog, tzv. čestice tvrde vode. Da bi se izbeglo oštećenje dizne na mlazniku, vrši se i omekšavanje ili dejonizacija vode. Ovaj način se primenjuje pri rezanju materijala manje čvrstoće kao što su: papir, plastika, guma, tekstil, drvo, smrznuta hrana, čokolada, lekovi i sl. Za neke od tih materijala osnovni parametri rezanja su navedeni u tablici 3.1.

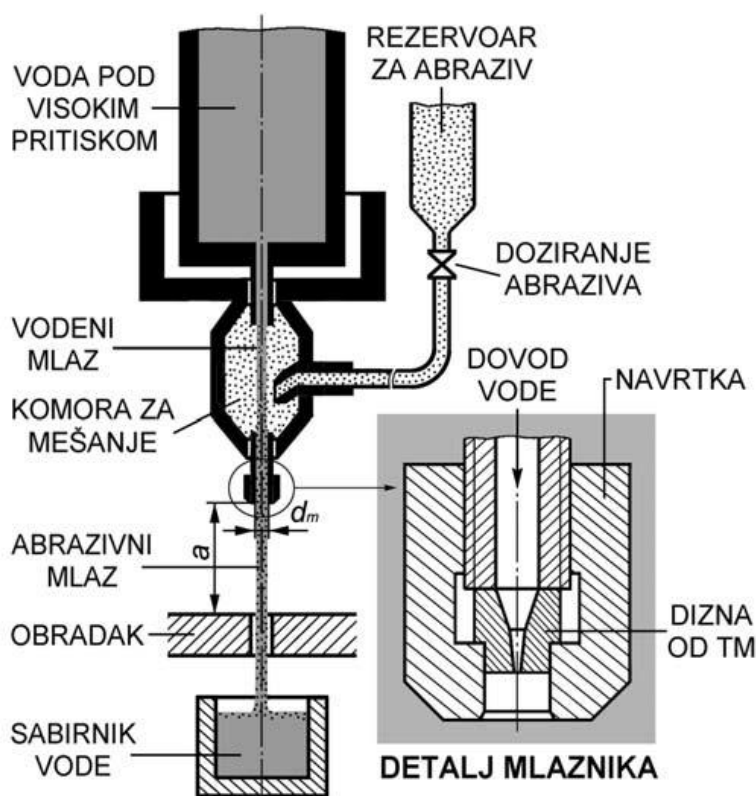
MATERIJAL	Debljina materijala (mm)	Prečnik dizne (mm)	Radni pritisak (MPa)	Protok vode (l/min)	Brzina pomoćnog kretanja (m/min)
talasasta lepenka	7	0,2	260	1,1	200
presovana lepenka	3	0,2	300	1,2	5
tepisi	4	0,2	300	1,2	3
file	22	0,2	100	0,7	200
stakleni vlaknasti materijali	1,4	0,2	400	1,4	2
koža	7	0,2	400	1,4	15
guma	50	0,2	400	1,4	0,5
	12	0,2	400	1,4	0,5
azbestno–cementne ploče	6	0,2	300	1,2	10
poliakril, fiber	30	0,2	400	1,4	6

Tablica 3.1. Osnovni parametri rezanja čistim vodenim mlazom nemetalnih materijala
(izvor: Sugino, Japan)

3.3. *Princip sečenja abrazivnim vodenim mlazom - Abrasive Water Jet Machining – AWJM*

Za sečenje metala i drugih tvrdih materijala koristi se tehnologija obrade abrazivnim vodenim mlazom. Vodenom mlazu se, u komori za mešanje rezne glave, dodaju čestice abraziva pri čemu nastaje abrazivni vodeni mlaz. Abrazivni vodeni mlaz se sužava i usmerava na obradak abrazivnom mlaznicom čiji je prečnik od 0,75 do 1,2 mm. Zadatak mlaza vode je da prenese kinetičku energiju na čestice abraziva i usmeri ih ka obratku. Time postupak obrade postaje potpuno različit u odnosu na sečenje čistim vodenim mlazom. Sam proces obrade abrazivnim vodenim mlazom je sličan brušenju s tom razlikom da abrazivna zrna nisu ugrađena u točilo već se nalaze u mlazu vode.

Princip obrade abrazivnim vodenim mlazom zasnovan je, pre svega, na rezanju. Čestice abrazivnog materijala, visoko ubrzane strujom vodenog mlaza, odnose materijal obratka iz zone reza skidanjem strugotine.



Slika 3.3. Principijelna šema rezanja abrazivnim vodenim mlazom

Sečenje abrazivnim vodenim mlazom se primenjuje za sečenje tvrdih materijala kao što su: metali, kamen, keramika, staklo, kompozitni materijali itd. Zahvaljujući dodavanju zrna abraziva koja povećavaju snagu sečenja, učinak sečenja abrazivnim vodenim mlazom je više stotina puta veći od učinka sečenja čistim vodenim mlazom.

3.3.1. Abrazivni vodeni mlaz

Abrazivni vodeni mlaz je vodeni mlaz kome su dodate čestice abraziva. Svaka od komponenti abrazivnog vodenog mlaza, voda i abraziv, imaju svoju posebnu i zajedničku ulogu. Osnovna uloga abraziva je da obezbedi proces obrade. Osnovna uloga vodenog mlaza je da ubrza abrazivna zrna do brzine koja omogućava da pri udaru u material obave svoju funkciju odvajanja čestica materijala obratka ("mikrostrugotine"). Dodatni zadatak vode je odnošenje abrazivnog materijala i "strugotine" iz zone reza, kako bi proces mogao da se nesmetano nastavi.

U tablici 3.2 prikazani su osnovni parametri rezanja nekih metalnih i nemetalnih materijala abrazivnim vodenim mlazom i postignute brzine rezanja.

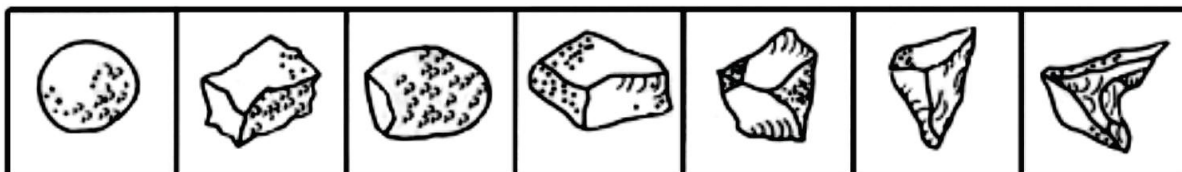
MATERIJAL		Debljina materijala (mm)	Prečnik dizne (mm)	Radni pritisak (MPa)	Protok vode (l/min)	Brzina pomoćnog kretanja (m/min)
građevinski materijal	malter	220	0,8	200	13,7	0,2
	beton	160	0,8	200	13,7	0,2
	gvožđe+beton	100	0,8	200	13,7	0,1
metali	meki čelik	35	0,8	200	13,7	0,15
	nerđajući čelik	30	0,8	200	13,7	0,15
	aluminijum	40	0,8	200	13,7	0,15

Tablica 3.2. Osnovni parametri rezanja materijala abrazivnim vodenim mlazom

Mešanje vode i abraziva vrši se uz pomoć vazduha pod pritiskom koji pokreće zrnca abraziva. Ovo mešanje mora biti efektivno, jer dobar abrazivni materijal koji nije sasvim pomešan sa vodenim mlazom, strujaće smanjenom brzinom po površini mlaza čime se znatno snižava učinak rezanja. Mešanjem vode i abraziva povećava se ukupna brzina kretanja mlaza, odnosno poboljšavaju se energetska svojstva mlaza.

3.3.2. Abraziv

Kao abraziv se najčešće koriste: silicijumski pesak, silicijumkarbid, sitni opiljci gvožđa i dr.



Slika 3.4. Tipični oblici garnetnog abraziva korišćenog za AWJM obradu

Abraziv u obliku sitnih čestica je sastavni deo abrazivnog vodenog mlaza. Abrazivne čestice su od različitog materijala, različite veličine i oblika, zavisno od primene.

Svaka čestica abraziva se ponaša kao rezni alat. Sa stotinama i hiljadama čestica koje dejstvuju na površinu obratka može se proizvesti značajan učinak. Krupnije čestice se koriste kod grubog reza, kada je potrebno skidanje veće količine materijala. Sitnije čestice se koriste kod finog reza, radi postizanja boljeg kvaliteta površine.

Materijal abraziva koji se koristi pri sečenju abrazivnim vodenim mlazom je najčešće garnet ($\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$). Različiti minerali garneta se upotrebljavaju u slučajevima kada se zahtevaju različite efikasnosti obrade. Kao jeftiniji, ali i mekši abrazivni materijal koji je često u upotrebi je mineral olivin ($[\text{MgFe}]_2\text{SiO}_4$). Korišćenje mekšeg abraziva dovodi do manje efikasnosti sečenja, jer je jedan od parametara koji definiše performanse rezanja baš tvrdoća abrazivnih zrna. Olivin, kao abrazivni materijal, se koristi onda kada su važniji troškovi obrade nego visoka proizvodnost. Abrazivi, koji se još koriste, aluminijum oksid (Al_2O_3) ili silicijum karbid (SiC) su veštački materijali. Oni su veoma oštri i tvrdi, čime obezbeđuju visoku efikasnost sečenja. Međutim, sa druge strane, ta njihova visoka mehanička svojstva izazivaju ubrzano habanje abrazivne mlaznice.

Najčešće korišćen abrazivni materijal, u obradi abrazivnim vodenim mlazom, je garnet. To je tvrd, čvrst i jeftin mineral ružičaste boje. U zavisnosti od namene, proizvodi se u različitim veličinama: broj otvora u situ 120, odnosno srednji prečnik zrna od $150\ \mu\text{m}$ - za rez finog kvaliteta, broj otvora u situ 80, odnosno srednji prečnik zrna od $180\ \mu\text{m}$ – najviše korišćen i za opštu upotrebu, za rez srednjeg kvaliteta i broj otvora u situ 50, odnosno srednji prečnik zrna od $210\ \mu\text{m}$ - za rez grubog kvaliteta, ali se postiže veća brzina sečenja.

Najpoznatiji proizvođači garneta za industrijsku primenu su kompanije iz Sjedinjenih Američkih Država (Barton Mines), Australije (GMA Garnet), Kine (Dragon Abrasives) i Indije (Stain Stones), a to su i zemlje koje izvoze značajne količine garneta. Rusija i Turska takođe proizvode industrijski garnet u velikim količinama, ali ne izvoze značajnije količine ovog materijala.



Slika 3.5. Postrojenje za dobijanje garneta kompanije GMA Garnet - Australija

Za primenu kod mašina za sečenje abrazivnim vodenim mlazom abraziv se, najčešće, isporučuje u pakovanjima od po 25 kg, slika 3.6.

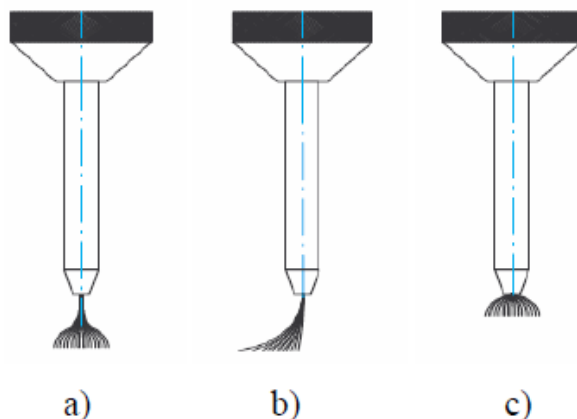


Slika 3.6. Pakovanje garneta kompanije GMA Garnet – Australija

Cena varira u zavisnosti od proizvođača i veličine abrazivnih čestica i kreće se od 70 do preko 300 dolara po toni. U slučaju da se teži najvećoj brzini sečenja, bira se krupnije abrazivno zrno, kao što je otvor sita 60 ili 80. Ako želimo da postignemo finiju površinu reza izabraćemo sitnije abrazivno zrno, kao što je otvor sita 100, 120 ili čak 150. Treba konsultovati i proizvođača abrazivne mlaznice. Abraziv, čija veličina zrna odgovara otvoru sita 80, je veoma popularan, ali je i najskuplji.

3.4. Vrste vodenog mlaza po načinu delovanja

Slika 3.7. Oblici abrazivnog mlaza: (a) dobar ili (b) i (c) loš.



Prema načinu delovanja, razlikuju se tri vrste vodenog mlaza koje se koriste pri obradi, to su:

- *Kontinualni vodeni mlaz*

Osnovna karakteristika kontinualnog vodenog mlaza je konstantan energetska nivo tokom rezanja. Za dobijanje visokih pritisaka vode koriste se multiplikatori. Za izjednačavanje i stabilizaciju pritiska, kod povratnog kretanja multiplikatora, u sistem je ugrađen akumulator pritiska. To je ustvari komora visokog pritiska koja eliminiše variranje pritiska, elastičnost zidova posude i sabijenost tečnosti.

Postupak koji koristi kontinualni mlaz je najrašireniji postupak rezanja materijala. Na osnovu njega je razvijeno odgovarajuće industrijsko postrojenje. Kontinualni vodeni mlaz se koristi kod rezanja praktično svih vrsta materijala, uključujući tu rude i metale.

- *Pulzirajući vodeni mlaz*

Pulzirajući vodeni mlaz karakteriše ponavljanje kratkotrajnih impulsa mlaza. Trajanje impulsa se može regulisati u širokom dijapazonu od 3 do 200 ms. Metoda pulzirajućeg vodenog mlaza za sada se pokazala kao vrlo korisna za bušenje, sečenje, izradu žljebova, kao i za lomljenje i sitnjenje ruda. Ova vrsta mlaza se najviše koristi za radove u rudnicima, čime se zamenjuju klasični načini rada koji mogu da prouzrokuju podzemne nesreće (paljenje metana od iskri iz mašina i sl.).

- *Kavitacioni vodeni mlaz*

Kavitacioni vodeni mlaz je u suštini kontinualni mlaz koji sadrži kavitacione mehuriće koji mogu da nastanu na razne načine, npr. pomoću središnjeg klina postavljen na izlazu iz dizne ili drugim telima koja mogu još i indukcijom da rotiraju. Mehurići koji nastaju u mlazu ne smeju imati veći prečnik od 1 mm, a temperatura se mora održavati u optimalnom rasponu od 26,7°C do 37,8°C za vodu. Osim toga potrebno je da se udaljenost materijala od dizne održava tako da mehurići ne splasnu pre udara mlaza o

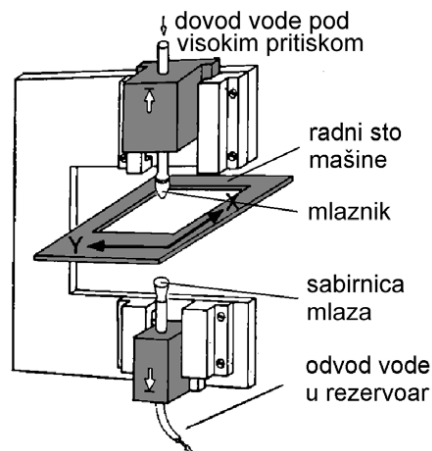
materijal obratka. Kod ove vrste vodenog mlaza se koristi poznata pojava lokalnog razaranja materijala pod dejstvom sila kavitacionih mehurića.

Kavitacioni vodeni mlaz sa rotacionim telima se uglavnom koristi pri drobljenju ruda pri čemu se postiže učinak koji je 190% učinka kontinualnog vodenog mlaza.

3.5. *Sistem za obradu čistim vodenim mlazom*

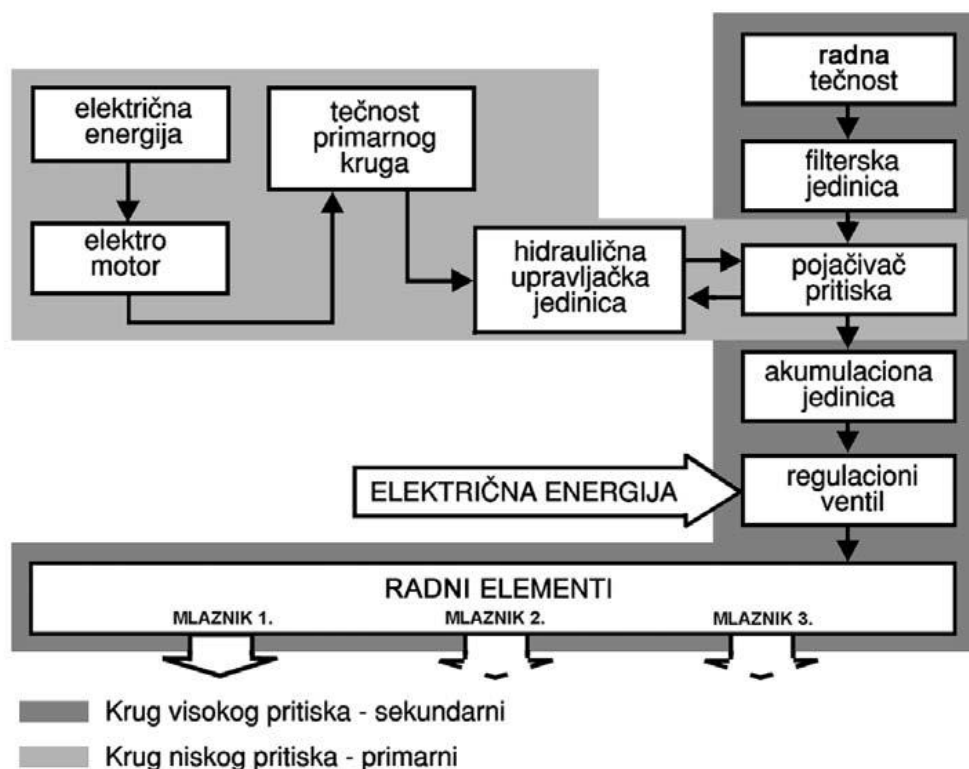
Postrojenje se u osnovi sastoji iz dva dela: uređaja za prihvatanje mlaznika i obratka (mašina u užem smislu) i hidrauličnog uređaja za generisanje vodenog mlaza visokog pritiska.

Izvođenje mašine zavisi od namene WJM-postrojenja, tako da se, npr. u slučaju sečenja tehničkih materijala ona principijelno izvodi kao na slici 3.8. Njen najvažniji element svakako je radni sto sa ukrštenim X–Y klizačem koji najčešće poseduje CNC–upravljanje.



Slika 3.8. Principijelna šema mašine za sečenje vodenim mlazom

Hidraulični uređaj za generisanje vodenog mlaza visokog pritiska, odnosno velike brzine isticanja tečnosti, predstavlja „srce i krvotok” WJM-postrojenja. On se sastoji iz kruga niskog pritiska i kruga visokog pritiska, slika 3.9, bez obzira kakva je namena postrojenja.



Slika 3.9. Principijelna šema hidraulične instalacije za obradu mlazom tečnosti

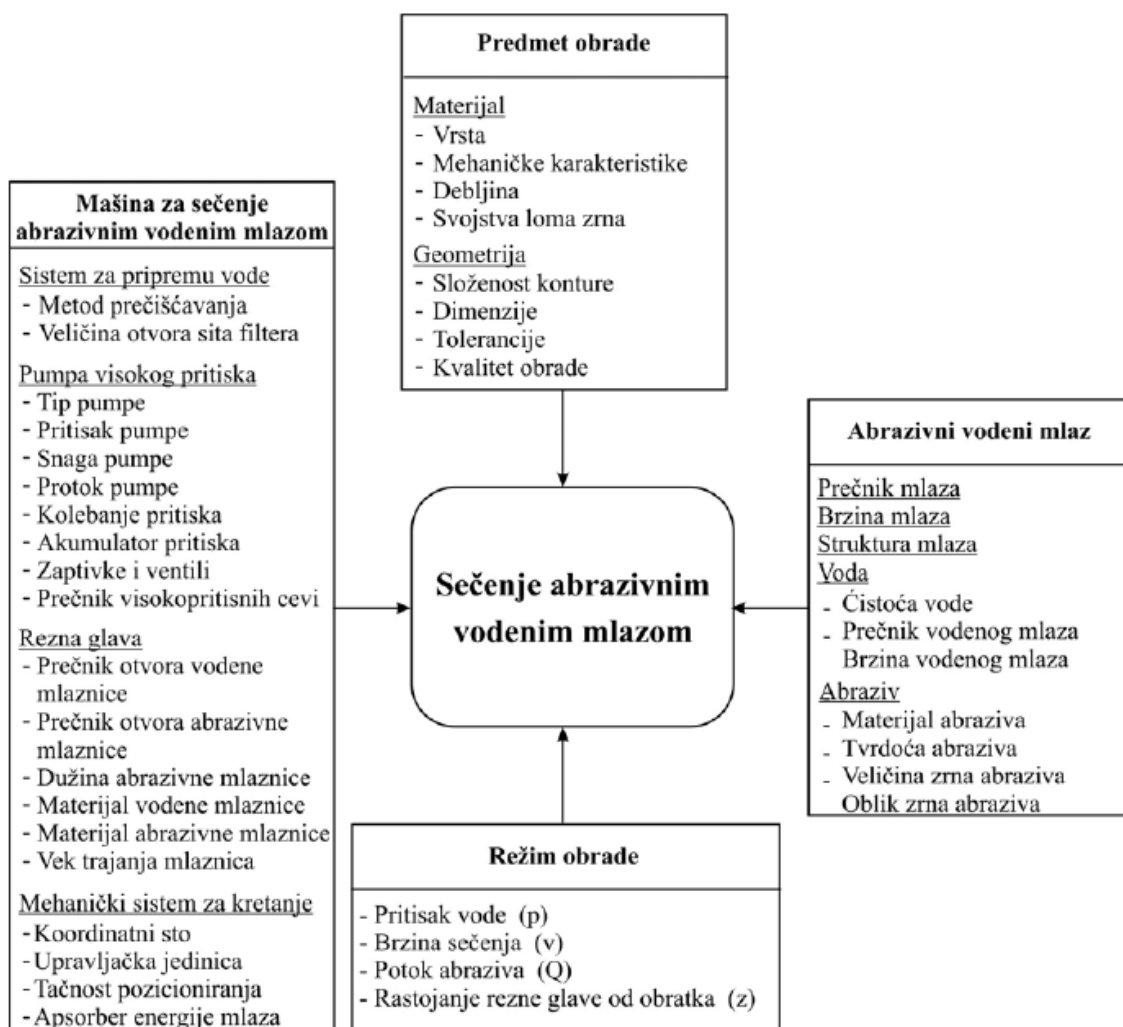
Osnovni elementi kruga visokog pritiska, prikazani na slici 3.9, su:

- Izvor radne tečnosti,
- Jedinica za filtriranje – nalazi se iza izvora radne tečnosti i filtrira tečnost odvajanjem nečistoća veličine preko 5 μm ,
- Pojačivač pritiska – uređaj koji ima funkciju pojačanja pritiska tečnosti,
- Akumulaciona jedinica – sud visokog pritiska koji prigušuje udare u radnoj tečnosti zbog varijacija pritiska,
- Regulacioni ventil – omogućuje kratkotrajni prekid protoka tečnosti, čime se ostvaruje upravljanje režimom rezanja,
- Razvodni elementi – obezbeđuju prenos tečnosti do mesta obrade pomoću creva, cevovoda i sl. elemenata,
- Izlazna dizna – sa stanovišta osobina mlaza tečnosti ovo je najvažniji deo uređaja visokog pritiska. Direktno utiče na kvalitet mlaza, a time i na kvalitet reza.

Krugom visokog pritiska se u jednom njegovom delu upravlja tečnošću iz kruga niskog pritiska stvorene hidrauličnom upravljačkom jedinicom.

3.6. Sistem za obradu abrazivnim vodenim mlazom

Mašina za sečenje abrazivnim vodenim mlazom je složen obradni sistem čije komponente predstavljaju proizvod vrhunske tehnologije. Namenjena je za precizna konturna sečenja, najčešće ravnih (2D) predmeta. U praksi se danas sreću različite vrste i konstrukcije mašina za sečenje abrazivnim vodenim mlazom.



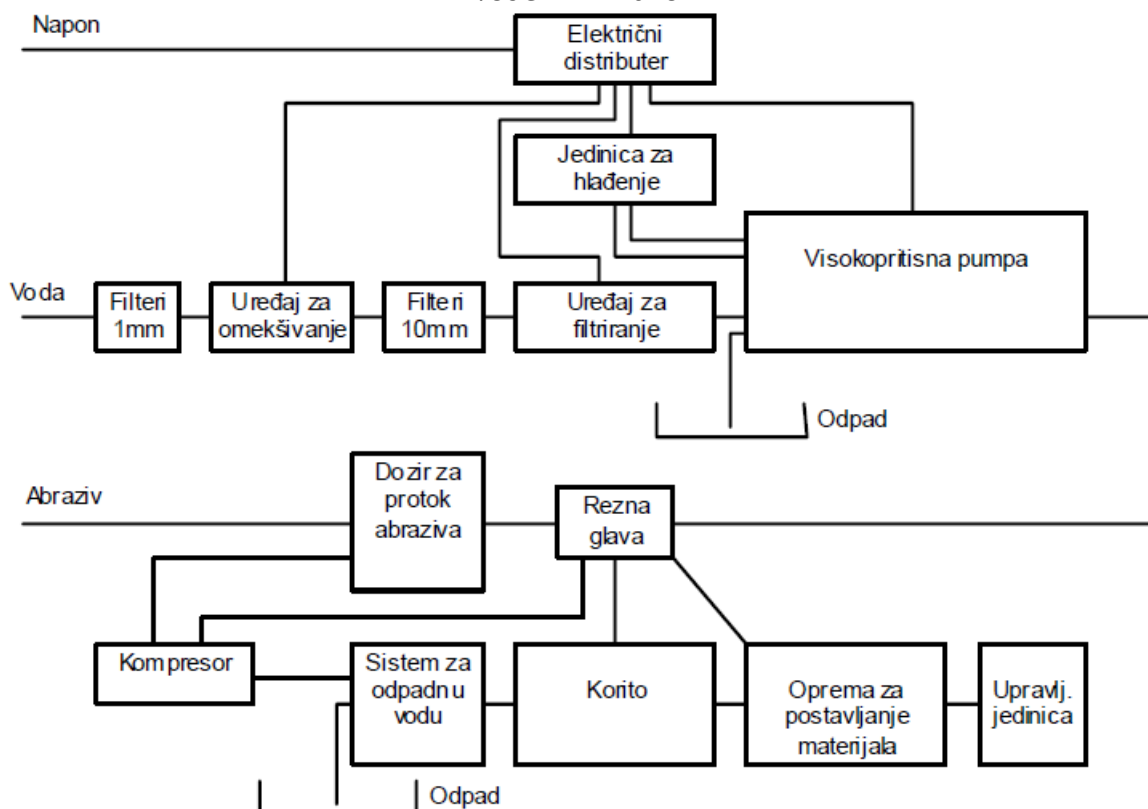
Slika 3.10. Faktori koji utiču na proces sečenja abrazivnim vodenim mlazom dati su na

Glavni delovi mašine za sečenje abrazivnim vodenim mlazom su: sistem za pripremu vode, pumpa visokog pritiska i instalacija visokog pritiska, magacin abraziva, rezna glava, mehanički sistem za kretanje i upravljačka jedinica.

3.7. Delovi sistema za obradu mlazom vode

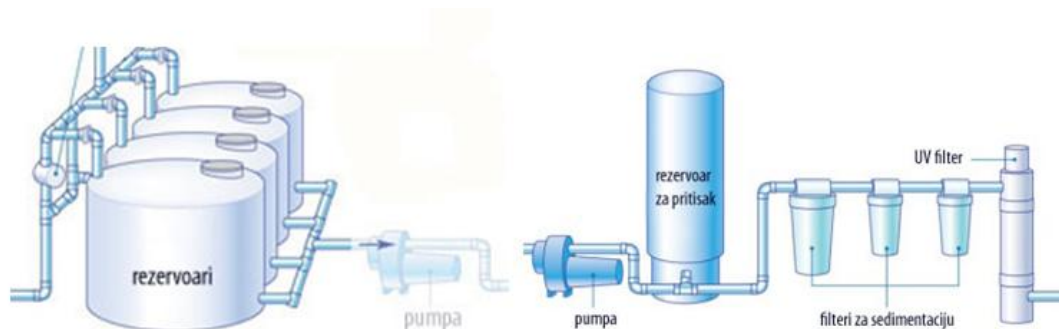
Korišćenje tehnologije rezanja vodenim mlazom i njena široka primena u mnogim granama privrede učinila je da se pojedinačna radna mesta veoma razlikuju. Međutim, pojedine grupe opreme su slične za sve tipove upotrebe. Ona se uglavnom razlikuju po vrsti proizvodnje, uređajima za rukovanje i tipu procesa (sa ili bez abraziva).

Slika 3.11. prikazuje šemu bazičnih komponenti za rezanje visokoenergetskim abrazivnim vodenim mlazom



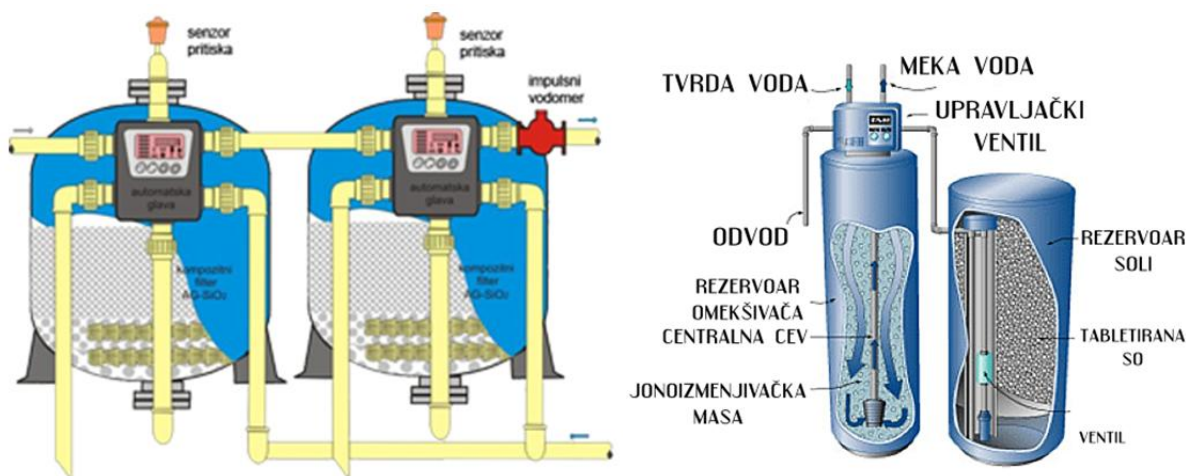
3.7.1. Sistem za skladištenje i pripremu vode

Voda, koja se koristi prilikom obrade, uzima se iz lokalnog vodovoda. Ova voda sadrži dosta rastvorenih minerala u sebi, najčešće kalcijuma i magnezijuma. Da bi se smanjilo habanje, voda koja se upotrebljava mora da se očisti od čvrstih materija i soli.



Slika 3.12. Šematski prikaz rezervoara sa dodatnom instalacijom

Sistem za pripremu vode (uređaj za filtriranje) služi da se voda koja se koristi u procesu obrade očisti od mehaničkih i hemijskih nečistoća kako bi se smanjilo habanje elemenata pumpe visokog pritiska, zaptivki i mlaznice. Prema kvalitetu vode koja se upotrebljava projektuje se uređaj za pripremu vode. Čvrste materije se odstranjuju filtriranjem kroz niz filtera, postepeno počevši od sita sa otvorima od 20, 10, 5, 1 μm , pa sve do najfinijeg, koje ima veličinu otvora 0,5 μm . Rastvorene soli se mogu odstraniti na više različitih načina od kojih je najjednostavniji omekšavanje vode.



Slika 3.13. Uređaj za filtriranje i omekšavanje vode

Drugi način je primenom obratne osmoze, pri čemu se voda filtrira kroz veoma fine membrane koje uklanjaju nečistoće na molekularnom nivou. Treći način je primena jonskog izmenjivača.

Kompanija Jet Edge (www.jetedge.com) iz SAD razvila je kompletan sistem za hlađenje, filtriranje i omekšavanje vode iz vodovoda sa rezervoarima sa prečišćenom i neprečišćenom vodom, koji poseduje i kompletnu upravljačku jedinicu.



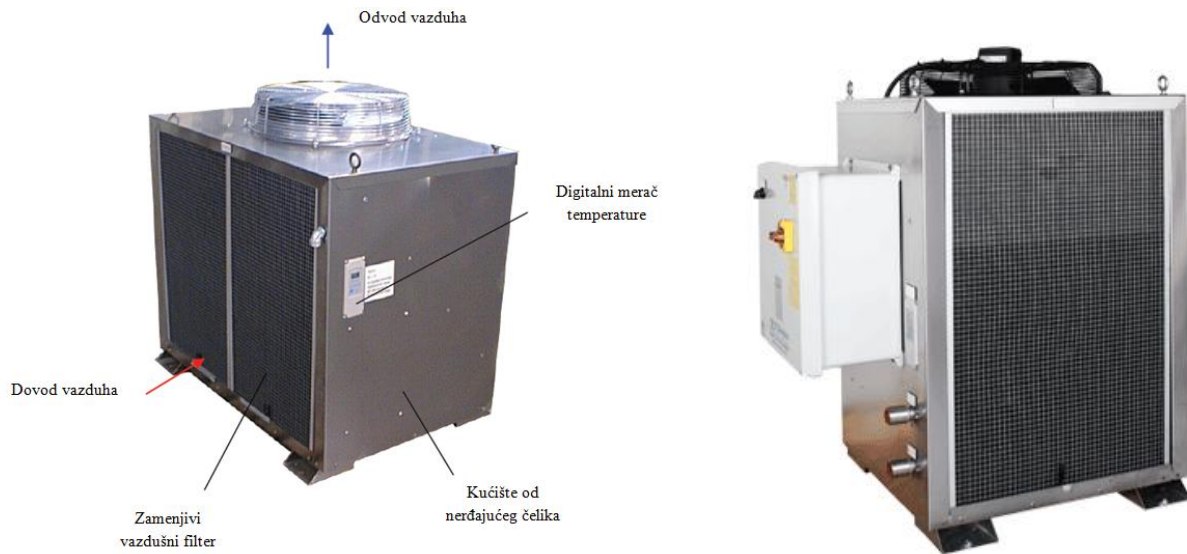
Slika 3.14. Sistem za pripremu vode sa rezervoarima kompanije JetEdge

3.7.2. Sistemi za generisanje vodenog mlaza u obradi mlazom vode

Pumpa visokog pritiska je najvažniji element, tj. "srce" mašine za sečenje vodenim mlazom i abrazivnim vodenim mlazom. Ona stvara potreban radni pritisak i snabdeva mašinu potrebnom količinom vode.

Renomirani proizvođači mašina za sečenje abrazivnim vodenim mlazom razvijaju i sopstvene pumpe visokog pritiska (Flow Corporation, Omax, Bystronic), dok se većina proizvođača odlučuje na korišćenje opreme specijalizovanih proizvođača, kao što su: Ingersoll-Rand, KMT Waterjet, RESATO, Jet Edge i drugi.

Međutim, da bi se produžio radni vek pumpe, potrebno je u nekim slučajevima rashladiti radnu tečnost, odnosno vodu. To se postiže sistemom za rashlađivanje čija je uloga da u nekim slučajevima smanji temperature radne tečnosti i time obezbedi nesmetan rad sistema. Ovaj sistem može smanjiti temperaturu radne tečnosti od 10°C do 20°C, a zatim tako rashlađenu radnu tečnost vraća nazad u pumpu.



Slika 3.15. Sistem za hlađenje kompanije JetEdge (levo) i sistem za hlađenje kompanije OMAX (desno)

Za generisanje vodenog mlaza visokog pritiska danas se uglavnom koriste tri vrste uređaja:

- uređaj sa multiplikatorom – njegov korisnik i propagator je američka firma Flow Systems,
- uređaj sa tripleks plunžerom – njegov korisnik i propagator je japanska firma Sugino Ltd Company,
- uređaj sa direktnim pogonom – njegov korisnik i propagator je američka firma OMAX.

U industrijskoj primeni se koriste pumpe visokog pritiska snage od 18 do 75 kW, koje obezbeđuju protok vode od 2 do 7,6 l/min. Maksimalni pritisak vode koji se koristi je do 413MPa.

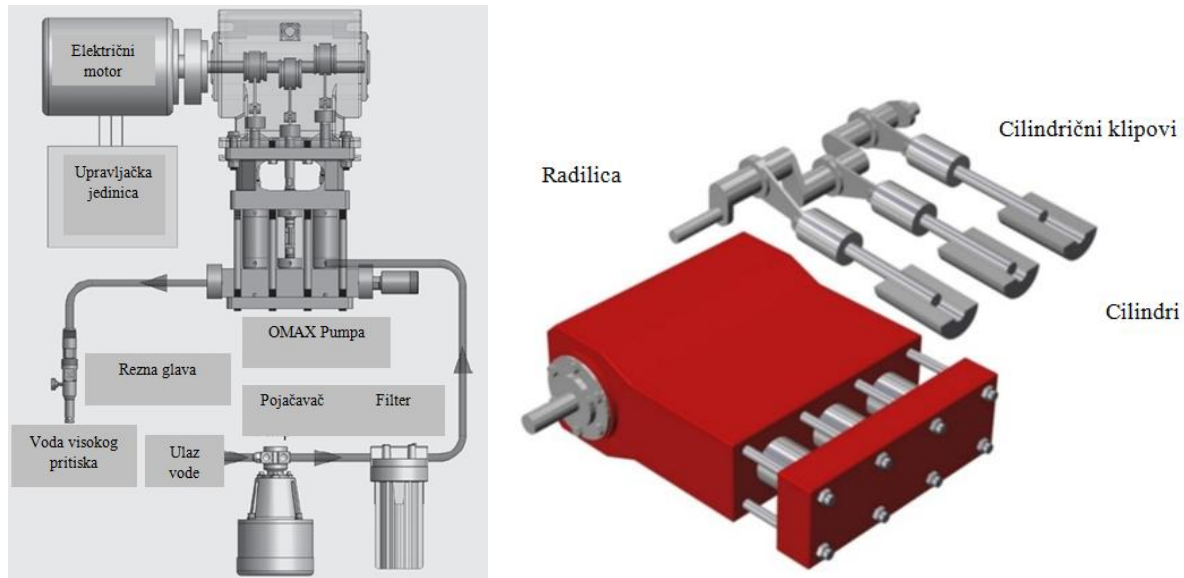
3.7.2.1. Pumpe sa direktnim pogonom

Karakteristike:

- Veoma niska cena izrade u odnosu na druge tipove pumpi,
- Niski zahtevi u pogledu rashlađivanja sistema,
- Može da upotrebi i do 20% više radne tečnosti u odnosu na pojačavač pumpe,
- Obezbeđuje tih rad sistema.

Nedostatci:

- Veliki zahtevi u pogledu održavanja, koji uključuju i veliku cenu i duži period reparacije,
- Komponente mogu otkazati bez ikakvih upozorenja, jer ne postoji sistem koji će to da signalizira i samim tim može doći do velikog oštećenja sistema i prekida procesa obrade na duži period zbog saniranja štete.



Slika 3.16. Šematski prikaz pumpe sa direktnim pogonom

Dizajn tripleks radilica, odnosno pumpi na direktan pogon, koristi naizmenične klipove za kompresovanje vode do približno 3800bar. Pritisak i protok na izlazu zavise od veličine klipa kao i od broja obrtaja radilice.

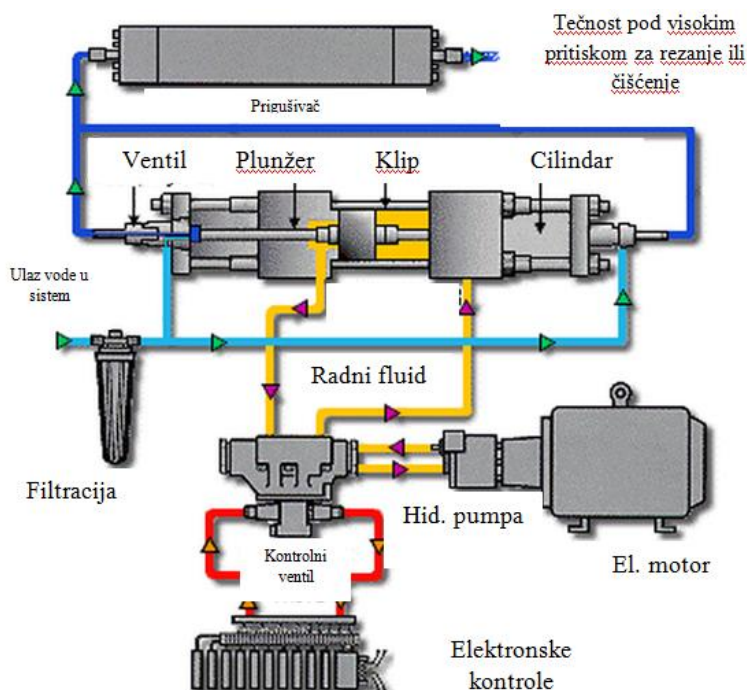


Slika 3.17. Spoljašnji izgled pumpe sa direktnim pogonom kompanije OMAX

Kao i pumpe sa hidrauličnim pojačavačima i pumpe sa direktnim pogonom koriste ventile za regulisanje protoka i pritiska u sistemu, ali zato za razliku od hidrauličnih pumpi sa pojačavačima, pumpe sa direktnim pogonom ne sadrže prigušni sistem.

3.7.2.2. Pumpe sa plunžerom

Pumpa prevodi energiju fluida uljnog cilindra niskog pritiska (20 MPa) u visok pritisak vode (400 MPa). Pumpa ima dva cilindra sa različitim unutrašnjim prečnicima i u njima se nalaze klipovi koji su međusobno spojeni. Klip većeg prečnika je pogonjen uljem pritiska od 20 MPa od uljne pumpe. Ulje pod pritiskom se naizmenično dovodi sa jedne ili druge strane klipa posredstvom 4/2 razvodnog ventila. Klip koji se nalazi u cilindru manjeg prečnika je "plunžerskog" tipa i služi za sabijanje vode na visoki pritisak.



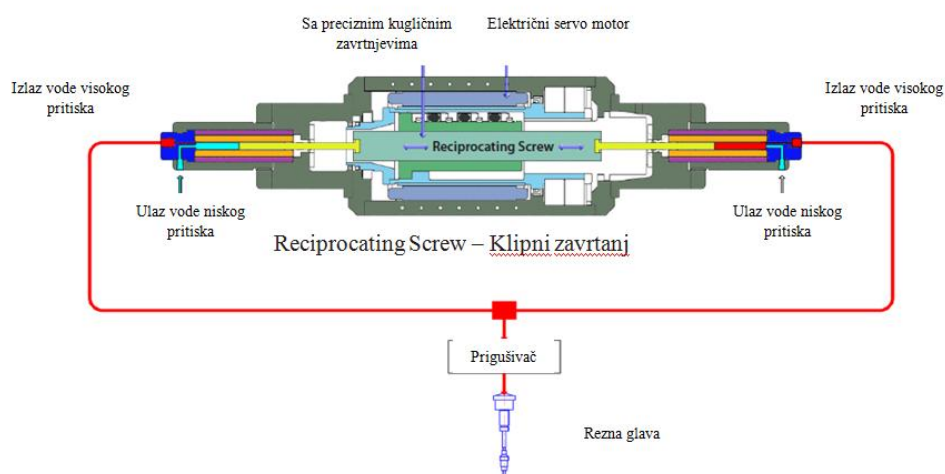
Slika 3.18. Šematski prikaz komponenata pumpe sa plunžerom

Sa čeonih strana malog cilindra nalaze se ulazni i izlazni nepovratni ventili koji omogućuju protok vode samo u jednom smeru. Odnos površina klipova je obično 1:20 što omogućava da se u manjem cilindru dobije pritisak vode koji odgovara odnosu površina velikog i malog klipa i za potrebe sečenja abrazivnim vodenim mlazom iznosi najčešće oko 400 MPa (1:20=20:400).



Slika 3.19. Pumpa sa tripleks plunžerom kompanije Sugino Ltd Company

Kompanija techniwaterjet razvila je revolucionaran sistem sa električnom servo pumpom tzv. Quantum ESP.



Slika 3.20. Sistem električne servo pumpe

Karakteristike:

- stepen efikasnosti se kreće više od 60% u odnosu na hidraulične pojačavače radne tečnosti,
- zahteva čak do 75% manje rashadenu radnu tečnost nego pumpe sa hidrauličnim pojačavačima,
- uključujući sve operacije prouzrokuje manje od 68dBA tokom rada,
- izuzetno dug radni vek opreme i creva u odnosu na broj zamenjenih reznih glava tokom procesa obrade,
- znatno manja potrošnja energije i vode, kao i ulja u odnosu na hidraulične sisteme.



Slika 3.21. Spoljašnji izgled električne servo pumpe Quantum ESP

3.7.2.3. Pumpe sa multiplikatorom (pojačavačem pritiska) – Intesifier pumps

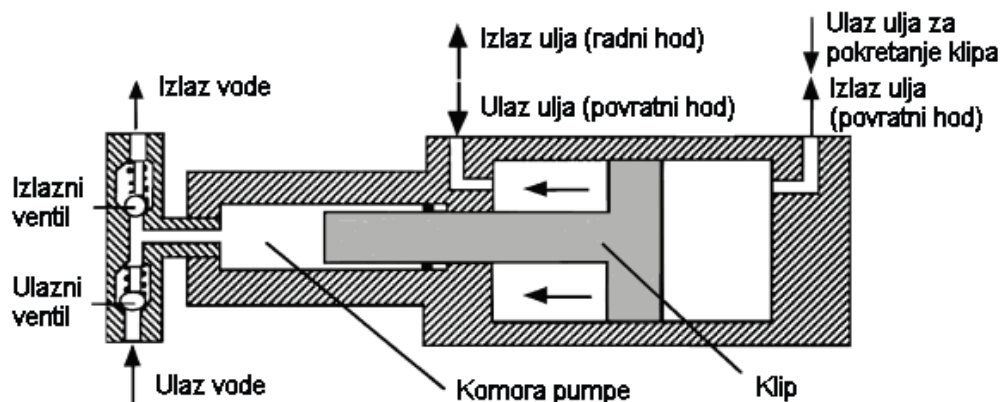
Pumpa ima zadatak da obezbedi željeni pritisak vode i odgovarajući protok. Pumpe kojima se ostvaravaju pritisci vode od 380 do 400 MPa, najčešće, su klipne pumpe.

Radikalna klipna pumpa, služi kao hidraulična upravljačka jedinica u primarnom krugu prenosa energije koja je po pravilu pogonjena elektromotorom (snaga elektromotora je prema tipu pumpe 19 do 70 KW). Ova pumpa doprema hidraulično ulje stalno regulisanog pritiska u granicama od 40 do 200 bar do primarnog kruga dvostrukog hidrauličnog multiplikatora.

Multiplikator je konstruisan sa odnosom površina klipova 20:1, 13:1, a od proizvoda ovih prečnika i dovedenog pritiska ulja upravljačke pumpe zavisi pritisak tečnosti u sekundarnom krugu multiplikatora. Radna tečnost, koja je u većini mašinskih aplikacija obična voda iz vodovoda (može da bude i voda za tehnološko korišćenje), prolazi najpre kroz jedinicu za filtriranje u kojoj se oslobađa svih mehaničkih nečistoća većih od 0,5 mikrometra i sabijena na pritisak reda 4 do 6 bar. Zatim se dovede do sekundarnog kruga multiplikatora (radni klip) i u njemu dolazi do sabijanja tečnosti na zahtevani pritisak rezanja. Tako sabijena tečnost se dovodi do specijalnog visokopritisnog akumulatora, u kome se kompenzuju udarni pritisci nastali nepoželjnim pulsirajućim tokom tečnosti s obzirom na direktan povratni ciklus multiplikatora.

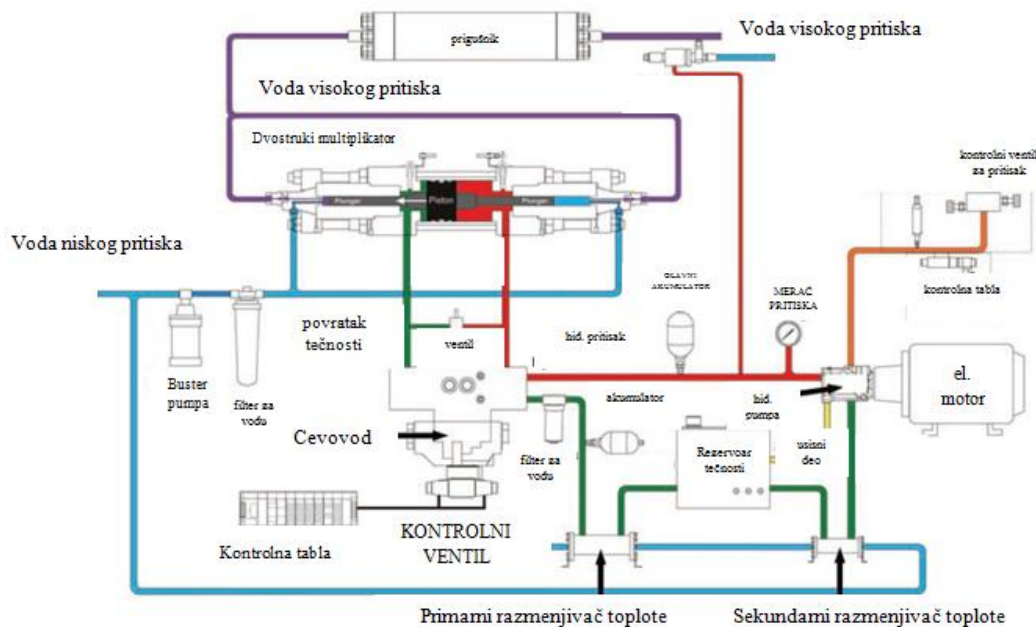
Multiplikatori su tipovi pumpi koji se najčešće koriste kod savremenih mašina za obradu vodenim mlazom, bez obzira o kom tipu obrade se radi (obrada čistim vodenim mlazom ili obrada abrazivnim vodenim mlazom). On se obično sastoji od dva cilindra sa različitim unutrašnjim prečnikom. Cilindar sa većim prečnikom obično pogoni hidraulično ulje pod

pritiskom od 50435bar. Pritisak u drugom cilindru zavisi od razlike u prečnicima cilindra, odnosno od odnosa poprečnih preseka cilindra. Ovaj odnos se obično kreće u granicama od 1:10 do 1:25. Zbog ovakvog odnosa poprečnih preseka cilindra, pritisak vode u drugom cilindru dostiže vrednosti od 4000 bar i više.



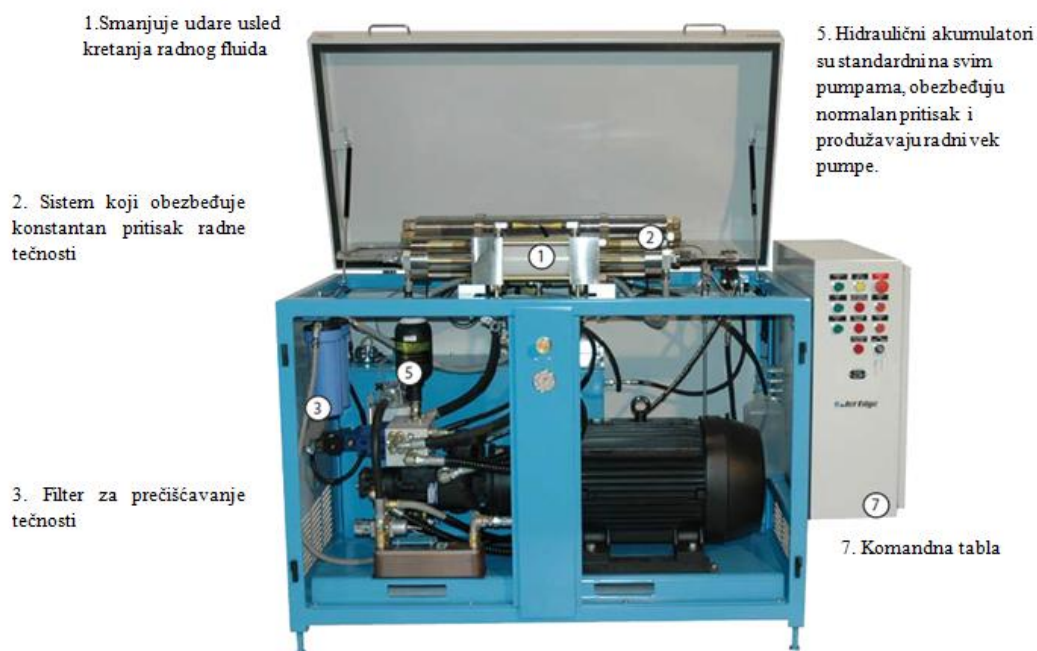
Slika 3.22. Uprošćen prikaz multiplikatora

Da bi se ostvario kvazi-kontinualni rad obično se koriste dva povezana multiplikatora. Kod ovakvog tipa multiplikatora (multiplikatori dvostrukog dejstva) jedinice su direktno povezane i rade naizmjenično. Dok jedna jedinica isporučuje vodu pod pritiskom u sistem druga se puni. Zbog stišljivosti vode prvih 15% hoda klipa se koristi za sabijanje vode, i u tom periodu nema isporuke vode pod pritiskom u sistem. Zbog toga dolazi do oscilacija vrednosti pritiska u sistemu. Da bi se ova pojava ublažila koriste se multiplikatori sa akumulatorom.



Slika 3.23. Šematski prikaz visokopritisne pumpe sa dvostrukim multiplikatorom

Smeštanjem akumulatora u potisni cevovod se osim poboljšanja procesa rezanja, mnogostruko povećava trajnost visokopritisnog cevovoda i fluidnih dizni.



Slika 3.24. Pumpa visokog pritiska – unutrašnji izgled proizvođač JetEdge



Slika 3.25. Pumpa visokog pritiska – spoljašnji izgled proizvođač JetEdge

Kompanija Flow je postavila novi standard za brzinu rezanja, potrošnju abraziva i produktivnost i samim tim razijeni su sistemi pumpi sa hiper pritiskom.

S inovativnom HyperJet pumpom od 6.000 bara dobija se:

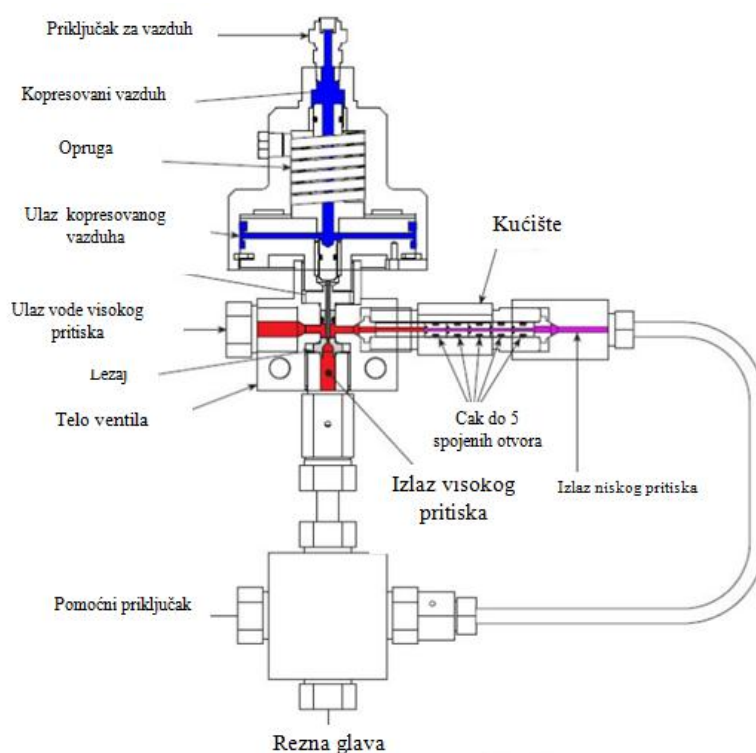
- 45% više pritiska u upotrebi s do sada poznatom tehnologijom
- do 50% veća brzina rezanja
- do 50% manja potrošnja abraziva
- do 30% manje troškova proizvodnje



**Slika 3.26. Pumpa visokog pritiska – spoljašnji izgled
(sistem zasnovan hiper pritiskom)**

3.7.3. Fluidna dizna – rezna glava

Od pumpe visokog pritiska voda se, specijalnim cevima, pod visokim pritiskom dovodi do rezne glave. U cevni sistem uključeni su: filter za vodu, manometar, ventil ispred ulaza vode u reznu glavu i drugi elementi regulacije.



Slika 3.27. Ventil ispred ulaza vode u reznu glavu – šematski prikaz

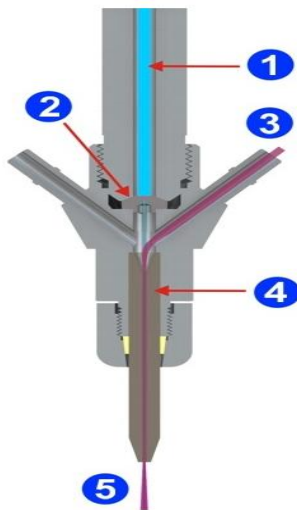
Kod mašina za sečenje abrazivnim vodenim mlazom posebna pažnja se posvećuje cevima visokog pritiska jer su izložene promenama pritiska i zahtevu da se ostvari kontinualni dovod vode do rezne glave.



Slika 3.28. Ventil ispred ulaza vode u reznu glavu

Visokopritisne cevi se izrađuju od nerđajućeg čelika. Cevi prečnika 1/4" se upotrebljavaju za dovod vode visokog pritiska do rezne glave. Ove cevi su savitljive i savijene su delimično u spirale i lukove, kako bi mogle da prate kretanje rezne glave. Cevi prečnika 9/16" se koriste za prenos vode na velika rastojanja. Postavljaju se između pumpe visokog pritiska i nepokretnog mesta na mašini odakle se dalje voda vodi do rezne glave. Ove cevi su krute.

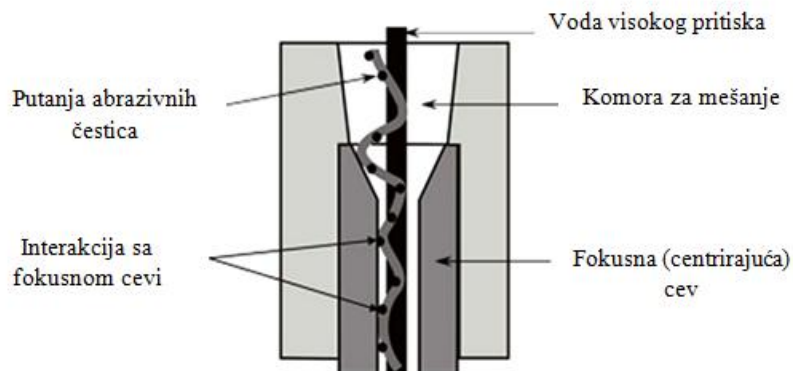
Fluidna dizna je osnovni tehnološki deo rezanja, koja stvara režući mlaz kod obeju postojećih metoda rezanja. Kvalitet dizni se ogleda u njihovoj trajnosti i dužini usmerenog fluidnog mlaza.



- 1) Ulaz vode visokog pritiska u reznu glavu
- 2) Otvor
- 3) Ulaz abraziva iz dozera u reznu glavu
- 4) Komora za mešanje abraziva i vode
- 5) Abrazivni vodeni mlaz

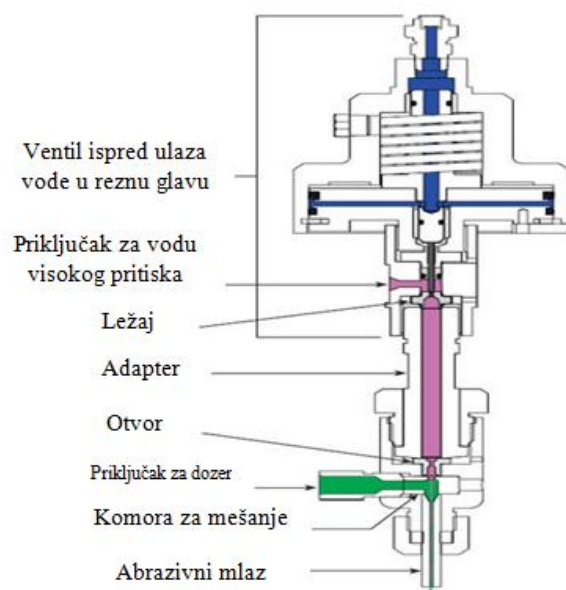
Slika 3.29. Šematski prikaz rezne glave za rezanje abrazivnim mlazom

Mešanje abraziva sa vodom znači postepeno uvođenje abrazivnih čestica u vodeni mlaz stvarajući tako na izlazu iz mlaznice abrazivni vodeni mlaz.



Slika 3.30. Šematski prikaz komore za mešanje

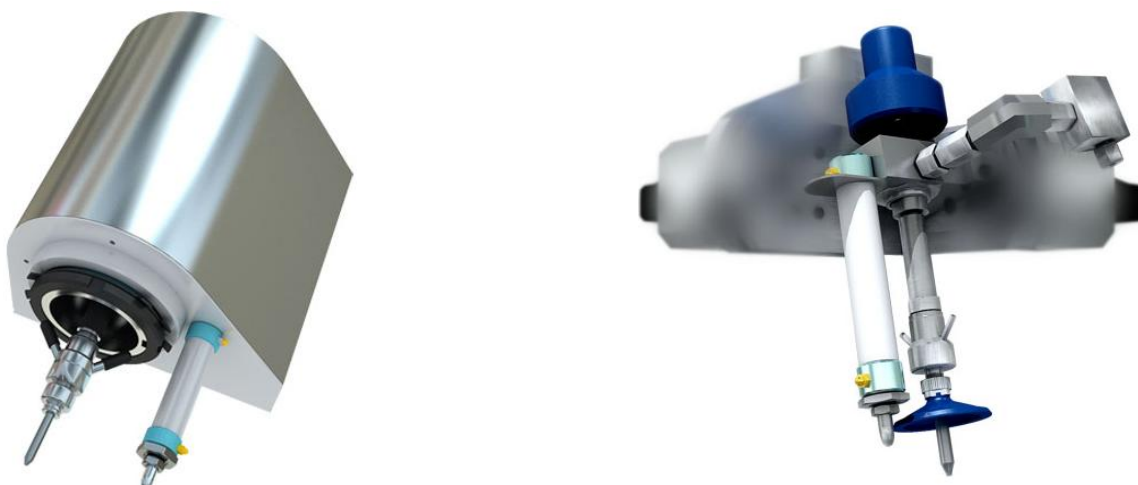
Uočava se da je cev za dovod abrasiva postavljena u komoru za mešanje na samom početku konusa fokusne cevi. Fokusna cev se pravi od volfram karbida unutrašnjeg prešnika od 0,8 do 1,6 mm i dužine 50 do 80 mm. Čestice abrasiva kreću se turbulentno u cevčici, udaraju o zidove sve dok ne dobiju dovoljnu brzinu da ih ponese vodeni mlaz.



Slika 3.31. Šematski prikaz rezne glave



Slika 3.32. Spoljašnji izgled rezne glave



Slika3.33. Rezne glave: 4 – osna (levo) i 5 – osna (desno)

Fluidna dizna je osnovni tehnološki deo rezanja, koja stvara režući mlaz kod obeju postojećih metoda rezanja. Kvalitet dizni se ogleda u njihovoj trajnosti i dužini usmerenog fluidnog mlaza.

	Radni vek, h	Primena	Napomena
Safir Rubin	50-100	WJM	Ako se primenjuje kod AVJMJ radni vek se skraćuje na pola
	50-100	AWJM	Nije pogodna za WJM
Dijamant	800-2000	WJM&AWJM	10-20 puta skuplja od safirne i rubinske

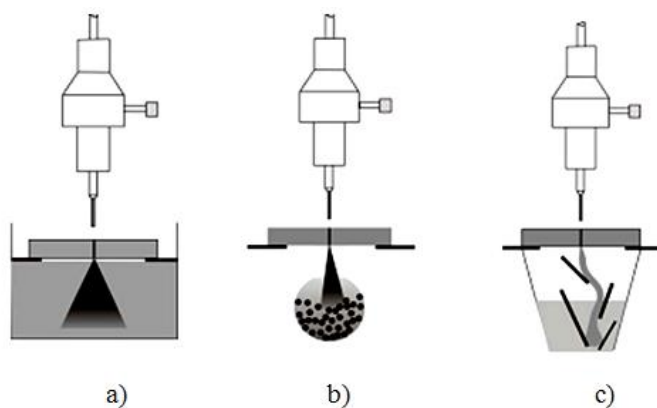
Tabela 3.3. Materijali za izradu mlaznica i njihov vek trajanja

WJM – Obrada čistim vodenim mlazom

AWJM – Obrada abrazivnim vodenim mlazom

Kada se abrazivni mlaz iskoristi za proces obrade, još uvek ima značajnu energiju koja zavisi od predmeta obrade. Energija koju poseduje vodeni mlaz mora se obuzdati pre nego što ošteti neki deo mašine ili okoline. U tu svrhu se koristi hvatač. Hvatač služi da apsorbuje energiju vodenog mlaza i da je rasprši. Na slici 3.33. su prikazana tri različita tipa hvatača:

- tip vodenog bazena,
- potopljene čelične kugle,
- TiB₂ ploče.



Slika 3.34. Tipovi hvatača mlaza

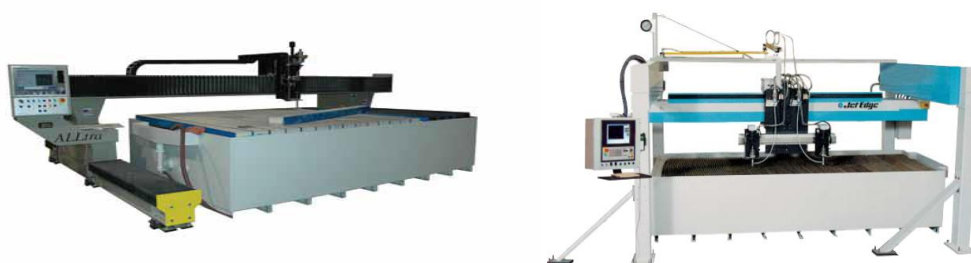


Slika 3.35. Rešetkasti hvatač mlaza

Ispod mlaza koji prolazi kroz materijal postavlja se tzv. hvatač vode ili izrađene mešavine vode i abraziva, čime se obezbeđuje sigurnost pri radu i smanjenje buke. Za te potrebe najčešće se koristi visoka posuda sa vodom otporna na habanje prečnika do 800 mm koja prigušuje struju vode sa zaostalim pritiskom i brzinom.

3.7.4. Mehanički sistemi za kretanje

Konstrukcija i dimenzije mehaničkog dela mašine za sečenje abrazivnim vodenim mlazom, koji obezbeđuje kretanje, određeni su veličinom predmeta obrade, kao i vrstom obrade i željenom tačnošću obrade. Da bi moglo da se izvrši sečenje po konturi, potrebno je ostvariti relativno kretanje između rezne glave i obratka. To se obezbeđuje mehaničkim sistemom za kretanje koji je numerički upravljan. Pri sečenju dvodimenzionalnih predmeta dovoljne su mašine sa 2½ osnim upravljanjem. To su dve ose za obradu konture (X, Y kretanje) i jedna osa po kojoj se vrši podešavanje rastojanja rezne glave od obratka. Pri sečenju trodimenzionalnih predmeta potrebne su mašine sa 5-osnim upravljanjem. U praksi preovlađuje korišćenje portalnih mašina za 2D obradu sa troosnim vođenjem (slika 3.35.). Ispod koordinatnih stolova je rezervoar apsorbera energije vodenog mlaza.



Slika 3.36. Portalna konstrukcija mašine za 2D obradu vodenim mlazom



Slika 3.37. Konstrukcija mašine za 2D obradu vodenim mlazom sa šest reznih glava

Pojedine kompanije razvile su sistem za postavljanje radnih premeta u okviru radnih stolova i time znatno ubrzaju i olakšaju proces obrade.

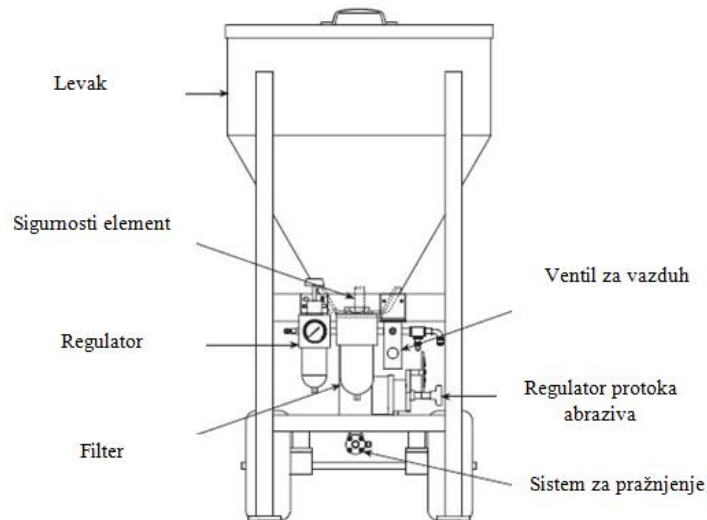


Slika 3.38. Stolovi sa hidrauličnim sistemom za postavljanje radnih predmeta

Ovakav sistem za postavljanje predmeta za obradu vodenim mlazom nudi mogućnost postavljanja predmeta i do 500kg težine.

3.7.5. Dozer – magacin abrazivnih čestica

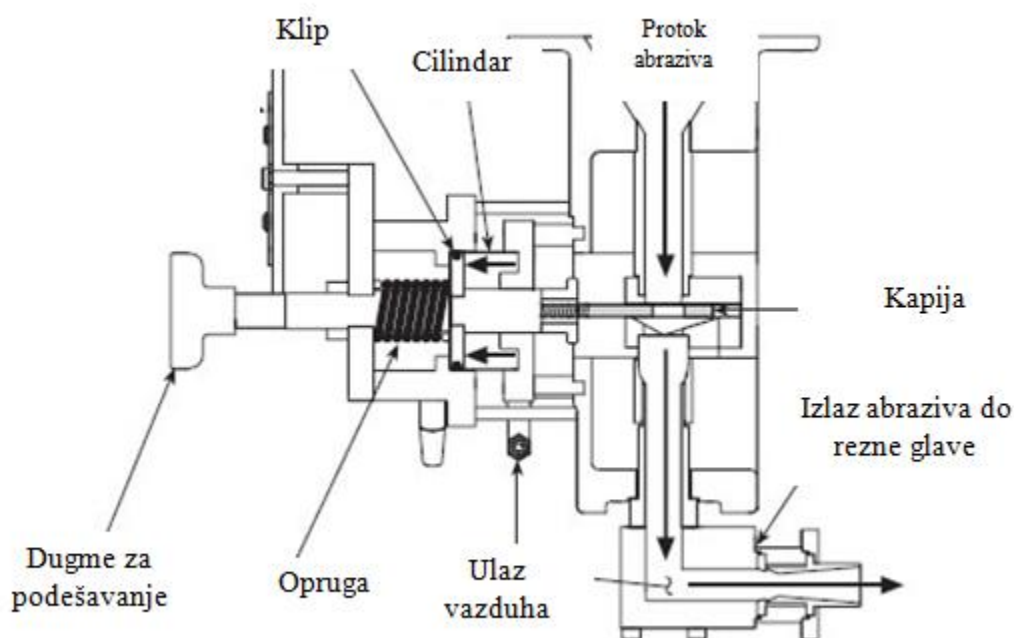
Uloga dozera, odnosno magacina abrazivnih čestica je skladištenje, doziranje, odnosno ravnomerno dodavanje abraziva u toku procesa obrade.



Slika 3.39. Šematski prikaz magacina abrazivnih čestica

Pod pritiskom vazduha, koji obezbeđuje kompresor radnog pritiska od 5,5bar do 6,2 bar, čestice abraziva se kreću kroz cevni sistem dolaze u reznu glavu gde se mešaju sa random tečnosti visokog pritiska.

Regulator protoka abraziva kontroliše dodavanje abraziva koji se dodaje radnoj tečnosti visokog pritiska. Pomoću komandi određuje se koliko će se rešetke, kroz koje prolazi abraziv, otvoriti i koja će se količina abraziva pomešati sa tečnošću visokog pritiska u reznoj glavi. U zavisnosti od materijala koji se seče abrazivnim vodenim mlazom, zavisi i protok abraziva.



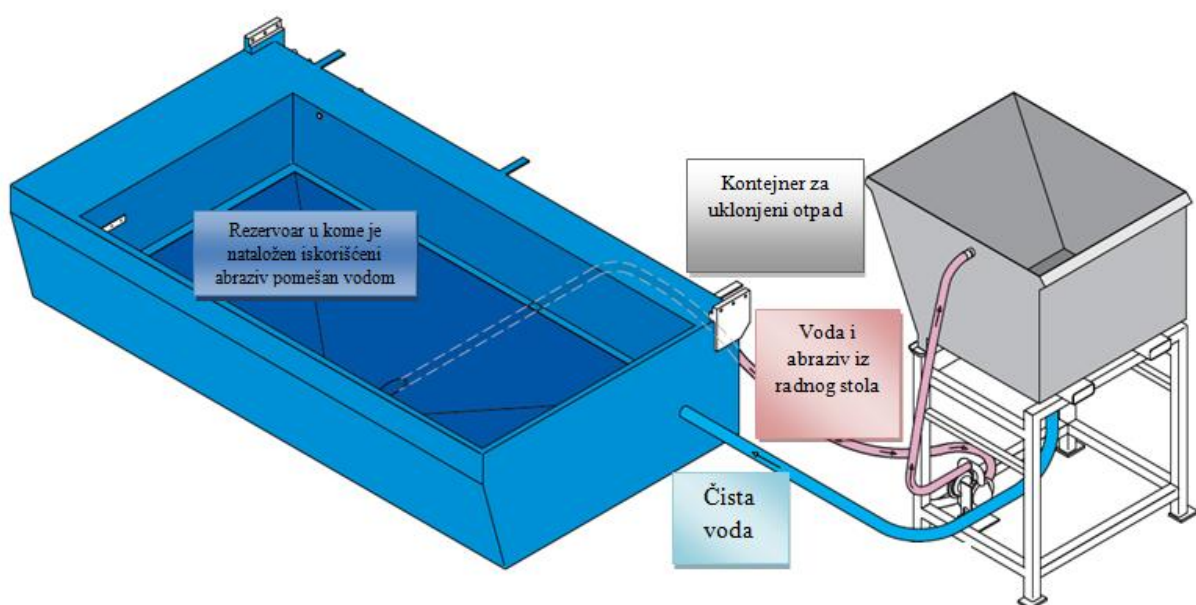
Slika 3.40. Šematski prikaz regulatora protoka abraziva

Dodavanje abraziva vrši se u rasponu $0,5 \div 3,5$ kg/min, s tim što se najdublji rezultati rezanja postižu dodavanjem $2,5 \div 3,0$ kg/min.

Postoje sistemi za dopremanje abraziva koji u isto vreme, različitim protokom, mogu dopreмати abraziv u više reznih glava. Svaka rezna glava može pojedinačno da se kontroliše i samim tim reguliše protok abraziva prilikom obrade sečenja.



Slika 3.41. Spoljašnji izgled magacina abrazivnih čestica



Slika 3.42. Sistem za uklanjanje otpada prilikom obrade abrazivnim vodenim mlazom

Prednosti sistema za uklanjanje otpada su:

- Ubrzava, olakšava i štedi vreme obrade abrazivnim vodenim mlazom,
- Smanjuje rizik od oštećenja sistema u toku procesa obrade.

3.7.6. Upravljačka jedinica postrojenja za obradu mlazom vode

Karakteristike:

- Potpuna kontrola procesa obrade mlazom vode
- Procesor upravlja svim funkcijama bez usporavanja procesa obrade mlazom
- Svi podaci se skladište u upravljačku jedinicu
- Mogućnost bežičnog praćenja procesa obrade i izdavanje komandi



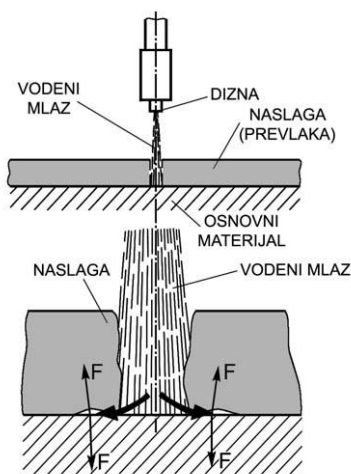
Slika 3.43. Upravljačke jedinice za obradu mlazom vode

Performanse:

- 1.5 - 1.8 GHz Intel® Pentium M Processor
- 40 - 160GB kapacitet hard diska
- 1GB DDR-RAM sa proširenjem do čak 2GB memorije
- 4 - 6 USB 2.0 dodatnih priključaka

3.8. Mobilni sistemi za čišćenje i sečenje mlazom vode

Čišćenja je vrlo široko rasprostranjena oblast primene. Ovaj postupak se može koristiti za pripremu sanacije velikih betonskih površina ili podova u industrijskim pogonima, skidanje starih oznaka na putevima, kod sanacije zgrada za skidanje starog maltera, čime se znatno smanjuje podizanje prašine, a sama zgrada nije opterećena dinamičkim udarima kao kod klasičnog mehaničkog postupka.

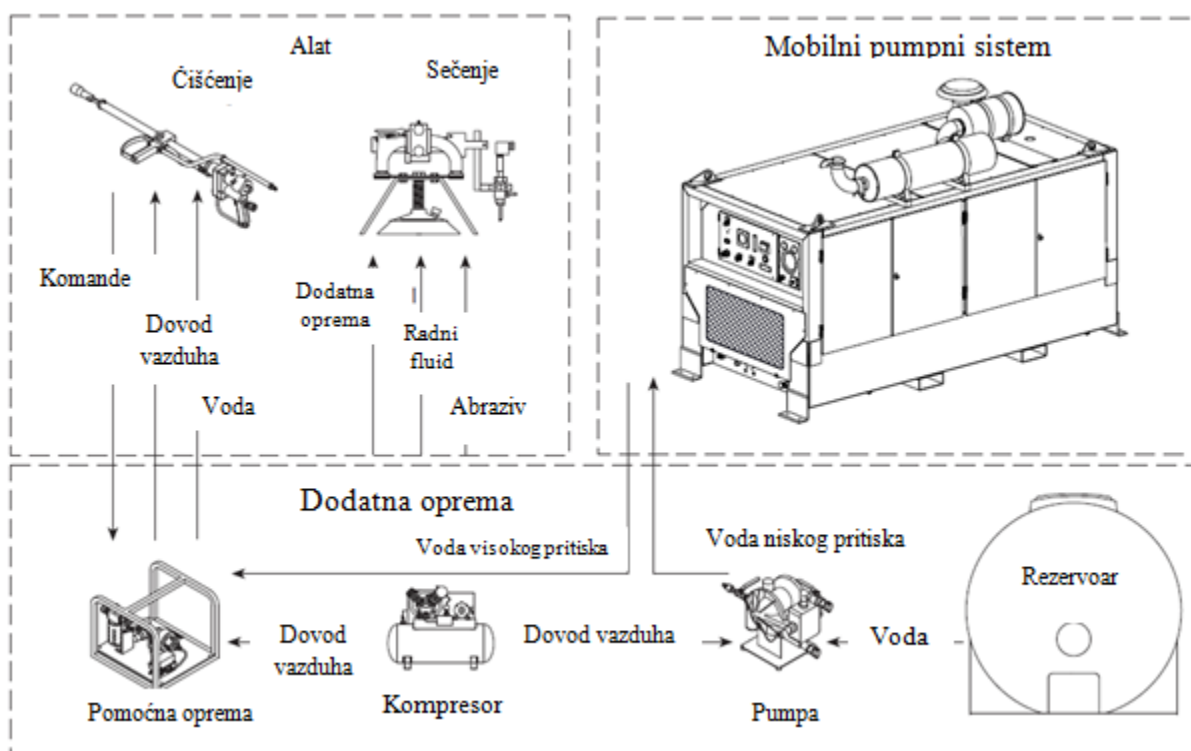


Slika 3.44. Princip čišćenja vodenim mlazom visokog pritiska (VMVP)

Princip čišćenja pomoću vodenog mlaza visokog pritiska (VMVP) se zasniva na svojstvima vodenog mlaza da pod visokim pritiskom preseca sloj nečistoće, a zatim između nečistoće i osnovnog materijala razvija dovoljan pritisak za odvajanje nečistoće, slika 3.44.

Dokazano je da i najtvrdi materijali, kao što su minerali, oksidi, slojevi boja, itd. ne mogu da odole dejstvu ovako snažnog vodenog mlaza. Kod vrlo kompleksnih slučajeva čišćenja, pritisak vodenog mlaza može biti iznad 100 MPa i može se regulisati tako da se ne oštete zidovi objekata koji se čiste. Treba napomenuti da je površina objekta koji se čisti opterećena čak manje nego pri korišćenju konvencionalnih načina mehaničkog ili hemijskog čišćenja. Takođe je potrebno napomenuti da i tamo gde se za odstranjivanje nečistoća ne mogu primeniti mehanički alati za čišćenje, može se primeniti vodeni mlaz. Čišćenje VMVP predstavlja tehnologiju koja ne samo što ne oštećuje objekte koji se čiste, već je i sa vremenskog stanovišta vrlo efikasna.

Uređaj za čišćenje VMVP radi sa običnom vodom bez ikakvih abrazivnih dodataka, što je naročito značajno kod prerade otpadnih voda. Pomoću VMVP moguće je čistiti i u eksplozivnim sredinama, gde se druge tehnologije čišćenja ne smeju koristiti.



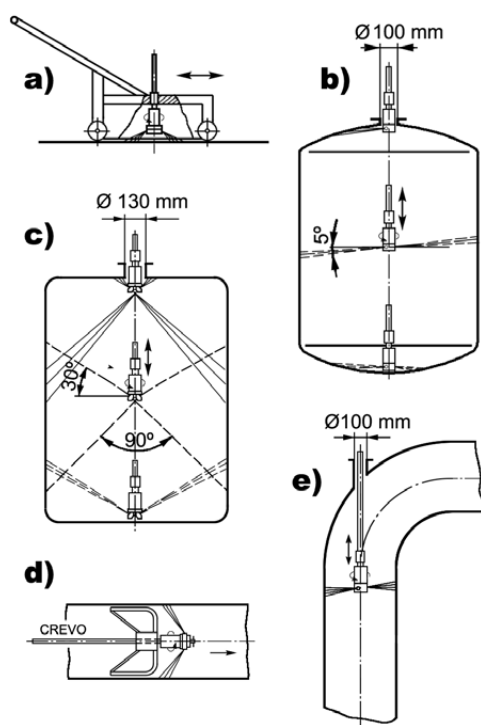
Slika 3.45. Šematski prikaz sistema za čišćenje i sečenje vodenim mlazom

Sa stanovišta potrebnih parametara, mogu se primenjivati uređaji za čišćenje VMVP koji generišu pritisak od 10 do 220 MPa i daju protok vode od 5 do 50 l/min. Uređaj za čišćenje VMVP se sastoji od pumpe visokog pritiska, motornog (dizel) ili električnog pogona, glave za čišćenje sa diznom, manipulacionog uređaja, delova za stezanje i dr. Prema nameni uređaji za čišćenje VMVP se prave kao stacionarni ili pokretni.



Slika 3.46. Pumpe visokog pritiska motornog (levo) i električnog (desno) pogona

Na slici 3.47. prikazane su principijelne šeme korišćenja vodenog mlaza visokog pritiska za aplikacije navedene u tablici 3.4.



a) čišćenje ravnih površina; b) čišćenje posuda pod pritiskom; c) čišćenje rezervoara (cisterni) železničkih vagona; d) čišćenje cevovoda; e) čišćenje lukova cevovoda.

OBLAST PRIMENE (OBJEKTI)	Radni pritisak (MPa)	OBLAST PRIMENE (OBJEKTI)	Radni pritisak (MPa)
POSUDE/REZERVOARI: ▪ autoklave ▪ cisterne ▪ tankeri – brodovi ▪ kontejneri, cisterne ▪ reaktori ▪ mešalice itd.	20÷90	RAZMENJIVAČI TOPLOTE: ▪ svežnji cevi ▪ kondenzatori itd.	80÷120
CEVI: ▪ cevne mreže ▪ cevi velikih dimenzija ▪ kanalizacione cevi ▪ cevne sušione itd.	40÷80	POJEDINAČNI OBJEKTI: ▪ kanali za provetravanje ▪ kokile ▪ filterske ploče ▪ podovi ▪ betonske površine (aerodromske piste i sl.) ▪ asfaltni putevi ▪ kipovi i statue ▪ mermerne podloge ▪ skele, armature itd.	5÷120

Tabela 3.4. Karakteristične oblasti primene čišćenja VMVP

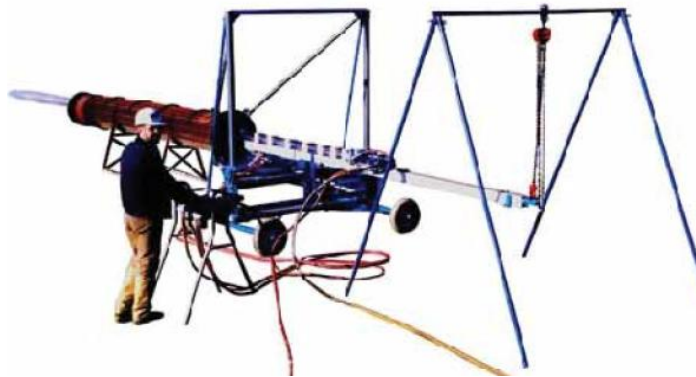
Veoma široka oblast primene čišćenja VMVP je čišćenje ravnih površina, slika 3.47/a. Vodenim mlazom visokog pritiska se mogu pripremati za sanaciju velike betonske površine ili podovi u industrijskim pogonima. Zavisno od vrste rezervoara (oblika, veličine, materijala i stepena zaprljanosti), glava za čišćenje sa okretnih diznoma se priključuje na crevo visokog pritiska, postavi u rezervoar i slobodno pokreće ili uz pomoć posebnog pogonskog uređaja, slika 3.47/b,c. Pomoću dizni koje se same kreću cevovodima, moguće je čistiti čitave mreže cevovoda, pa tako i probiti zapušena mesta u kanalizacionim sistemima, slika 3.47/d,e.



Slika 3.48. Oprema za čišćenje ravnih horizontalnih površina površina



Slika 3.49. Mobilni sistem za sečenje vertikalnih površina

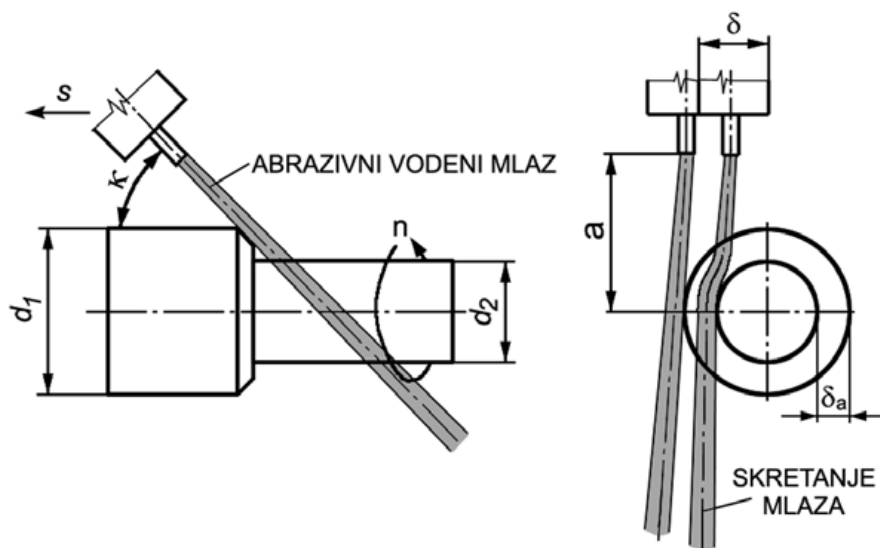


Slika 3.50. Sistem za čišćenje velikih cevovoda

3.9. Obrada delova rotacionog oblika vodenim mlazom

Iz prethodno izloženog proizilazi da se danas vodeni mlaz visokog pritiska uspešno koristi kod obrade širokog spektra delova nerotacionog oblika. Razvojem uređaja koji generišu vodeni mlaz, a naročito primena vodova visokog pritiska koji omogućuju široku pokretljivost mlaznika, stvorene su pretpostavke za korišćenje ove tehnologije i za obradu delova rotacionog oblika.

Osnovna tehnološka pretpostavka za ovu obradu je da glavno obrtno kretanje na mašini izvodi obradak, a pomoćno pravolinijsko kretanje mlaznik, slika 3.51, uz primenu odgovarajućih hidrauličnih parametara mlaza, parametra abraziva i njegovog mešanja sa vodom, parametara međusobnog kretanja mlaznika i obratka, kao i parametara samog obratka.



Slika 3.51. Principijelna šema obrade delova rotacionog oblika vodenim mlazom sa osnovnim parametrima

Prvi uređaj za obradu delova rotacionog oblika vodenim mlazom napravljen je 1987. godine u SAD u cilju sticanja prvih znanja o ovoj obradi i sadržao je sledeće osnovne elemente:

- Uređaj koji generiše abrazivni vodeni mlaz;
- Modifikovani strug;
- Manipulacioni uređaj sa mlaznikom;
- Sabirnica za prihvatanje iskorišćene energije mlaza.

Snaga uređaja koji proizvodi abrazivni vodeni mlaz iznosila je 56 kW, maksimalni pritisak vodenog mlaza 400 MPa, a protok vode 7,5 l/min uz dodavanje abraziva sa tačnošću od $\pm 0,01$ kg/min. Prenosnik za glavno kretanje struga razvijao je broj obrtaja do 3000 min. Kretanje mlaznika vršio je industrijski robot sa šest upravljačkih osa, brzinom do 0,42 m/s i tačnošću ponavljanja položaja $\pm 0,178$ mm. Radni prostor struga bio je zaštićen slojem karbida volftama. Pri ovim ispitivanjima su obrađivane tri vrste materijala: aluminijum, kompozitni materijal Mg/BC i silicijumsko staklo.

Na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja mogu se u vezi korišćenja vodenog mlaza za obradu delova rotacionog oblika formulisati sledeći zaključci:

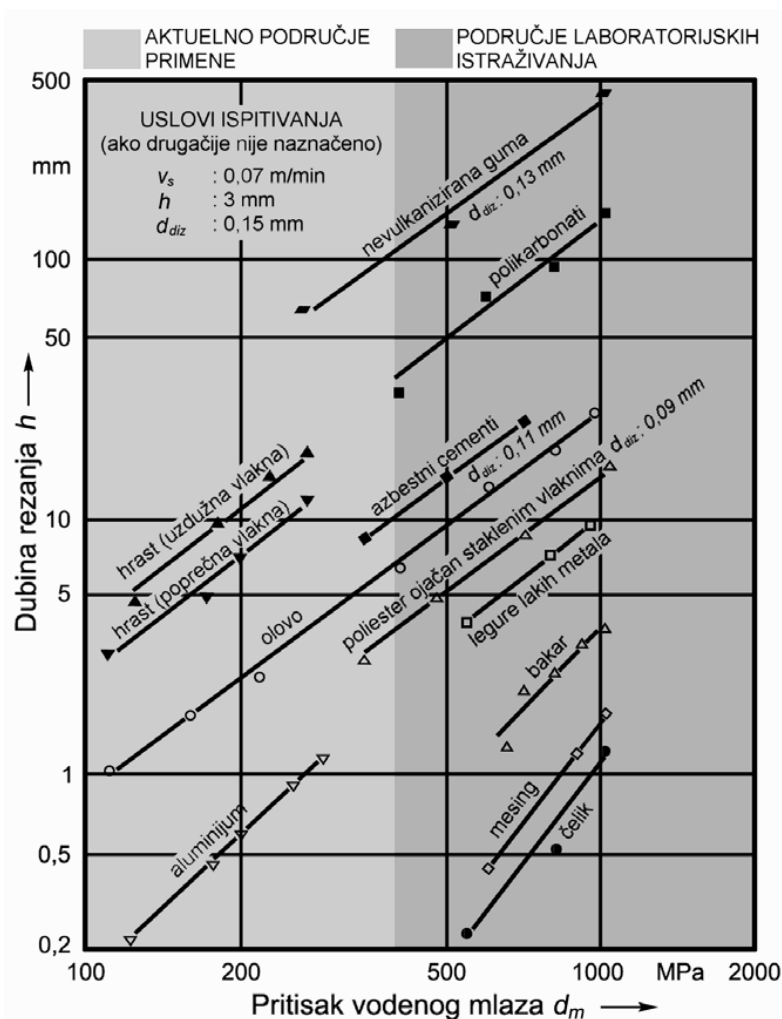
- U praksi je moguće koristiti vodeni mlaz za obradu delova rotacionog oblika, slika 3.51, naročito delova od teškoobradljivih materijala (kompoziti, staklo, keramika, itd.) i to sa velikim dubinama rezanja.
- Pošto pri obradi nastaje relativno gruba obrađena površina, to se ova obrada može koristiti samo za grubu obradu, posle koje bi trebalo da usledi završna obrada pomoću neke druge tehnologije obrade.

- Kvalitativni i kvantitativni pokazatelji WJM–obrade su manje osetljivi na vrstu materijala koji se obrađuje, nego kod drugih vrsta obrade.
- Povećanje tačnosti obrade i smanjenje valovitosti i hrapavosti obrađene površine zahteva pre svega dalju modernizaciju postrojenja i kombinovanje čistog vodenog mlaza sa abrazivom, kao i stabilizaciju parametara mlaza pogodnom konstrukcijom celog sistema.
- Veoma je bitno da pri ovoj obradi u površinskom sloju ne nastaju nikakve promene mikrostrukture ili tvrdoće, što je naročito važno kod struganja epruveta koje se koriste za ispitivanje materijala zatezanjem.

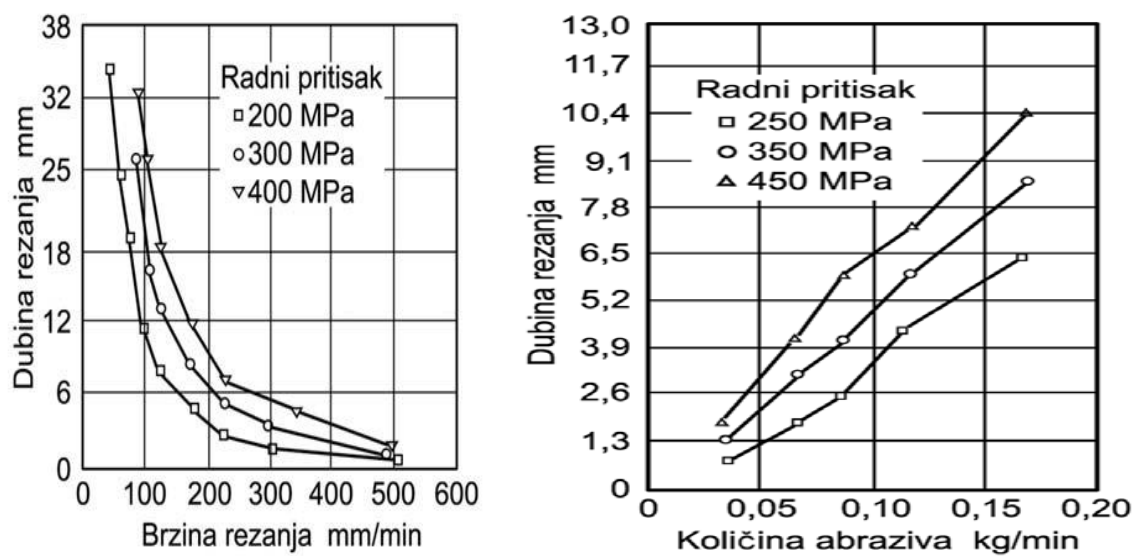
3.10. Tehnološki parametri obrade mlazom vode

Postoje mnogi faktori koji karakterišu proces rezanja mlazom tečnosti među kojima su najvažniji: vrsta tečnosti, konstrukcija agregata visokog pritiska, mlaznica–dizna (konstrukcija dizne, materijal i obrada unutrašnjeg profila dizne), kvalitet mlaza, vrsta materijala koji se obrađuje, mehanizam razdvajanja materijala, ugao udara mlaza, uticaj vlažnosti obratka, broj prolaza, temperatura rezanja, širina reza, debljina materijala, brzina pomoćnog kretanja i dr.

Uticaj pojedinih faktora na proizvodnost, tačnost i kvalitet obrade je različit i on se utvrđuje eksperimentalnim putem, najčešće od strane proizvođača ove vrste opreme. Tako npr. dubina reza koja nastaje pri udaru vodenog mlaza u površinu obratka zavisi od pritiska vode (ili brzine isticanja), od brzine pomoćnog kretanja i osobina materijala obratka. Na dijagramu 3.1. data je zavisnost dubine rezanja od pritiska pri rezanju kontinualnim vodenim mlazom, a na dijagramu 3.2. uticaj brzine obratka i protoka abraziva u mlazu tečnosti na dubinu rezanja čelika abrazivnim vodenim mlazom.



Dijagram 3.1. Zavisnost debljine obratka od pritiska pri rezanju kontinualnim vodenim mlazom



Dijagram 3.2. Uticaj brzine obratka i protoka abraziva u mlazu tečnosti na dubinu rezanja čelika abrazivnim vodenim mlazom.

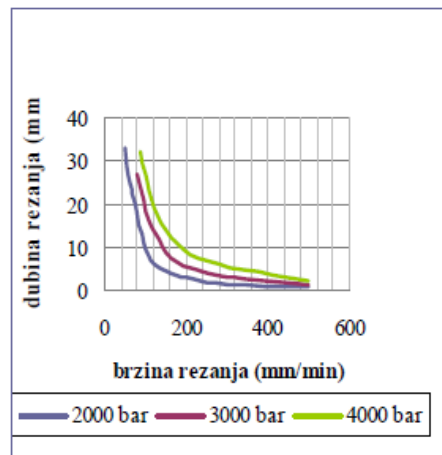
3.10.1. Kvalitet površina i parametri rezanja mlazom vode

Visokoenergetski fluidni mlaz se koristi pri sledećim tehnološkim operacijama: isecanju figura u ravni i prostoru, sečenju materijala, bušenju, razvrtanju, obaranju ivica, brušenju, peskarenju i pri uzimanju uzoraka materijala za ispitivanje. Moguće je obrađivati odlivke, odkivke, odpreske, zavarene delove, višeslojno lepljene delove. Praktično je moguće obrađivati sve metale i nemetale npr. legure titana, prohton, kaljene čelike, legure aluminijuma, beton, stakla, plastične mase, kevlar, grafit, azbest, konstruktivne čelike, drvo, papir, kožu, tekstil i slično.

Tehnologiju rezanja abrazivnim fluidnim mlazom, koja se koristi pri rezanju tvrdih i otpornih materijala, karakterišu četiri osnovna parametra rezanja ključna za realizaciju osnovnih rezultata rezanja izraženu kroz dubinu rezanja i kvalitet površine. Ti parametri su:

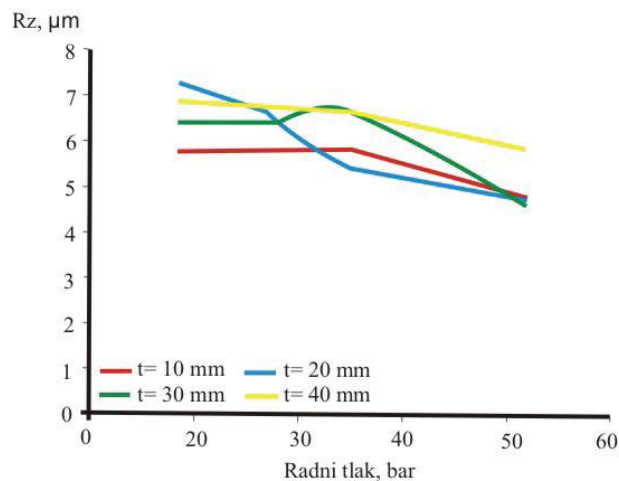
- radni pritisak

Maksimalna dubina reza koju je moguće postići zavisi pre svega od radnog pritiska i protoka smeše fluvide i abrazivnih zrna. Zavisnost dubine reza od brzine rezanja pri različitim radnim pritiscima smeše je data na dijagramu 3.3. Sa dijagrama zavisnosti dubine reza od brzine rezanja jasno može da se uoči da se pri većem radnom pritisku ostvaruju dublja prodiranja u materijal. Brzina rezanja negativno utiče na dubinu reza za bilo koji radni pritisak.



Dijagram 3.3. Dijagram zavisnosti dubine reza od brzine rezanja i radnog pritiska

Snagu rezanja možemo povećati povećanjem izlaznog pritiska.



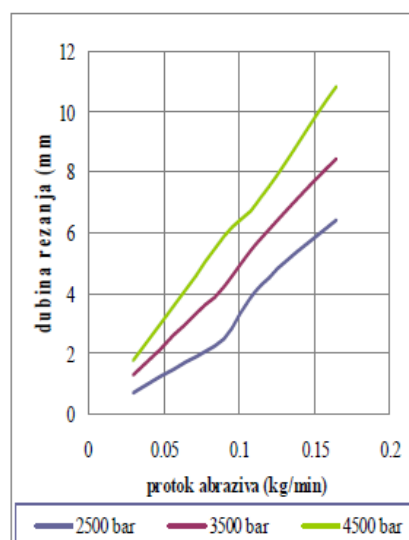
Dijagram 3.4. Uticaj pritiska rezanja na kvalitet obrađene površine

Povećanjem izlaznog (radnog) pritiska smanjuje se hrapavost obrađene površine (dijagram 3.4.).

Povećanjem radnog pritiska povećavamo izlaznu brzinu i krhke abrazivne čestice prilikom udara u obrađivani materijal se više lome nego kod manjih pritisaka te postaju manje što dovodi do toga da imao finiju obrađenu površinu. Vidimo da je kod debljih materijala tj. kod većih dubina obrade hrapavost značajnija.

- protok abraziva i vode

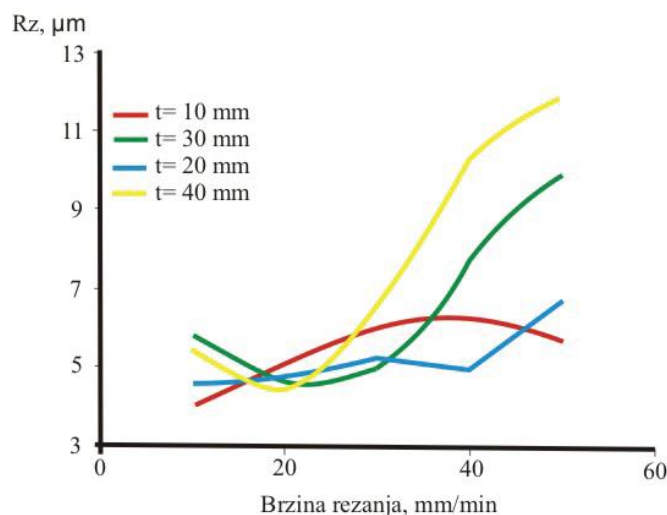
Zavisnost dubine reza od protoka smeše sa abrazivom za tri radna pritiska je data na dijagramu 3.5. Sa dijagrama se jasno vidi da povećanje protoka smeše, a samim time i abraziva omogućava dublje prodiranje u materijal.



Dijagram 3.5. Zavisnost dubine reza od od protoka smeše sa abrazivom za tri radna pritiska

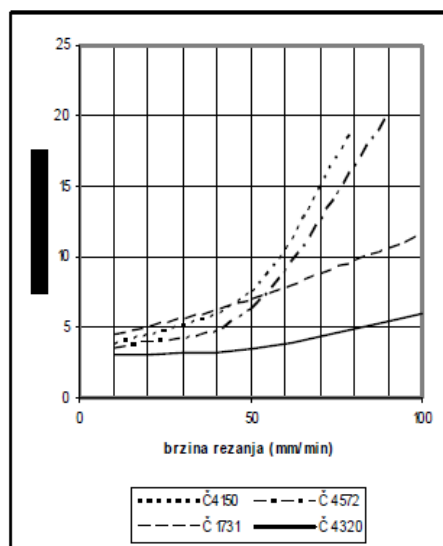
- brzina rezanja

Najlošiji kvalitet obrađene površine je pri najvećoj brzini i najvećoj dubini. Dok se kod brzine 20 mm/min ne vidi toliki uticaj dubine rezanja na kvalitet obrađene površine.



Dijagram 3.6. Uticaj brzine rezanja na kvalitet obrađene površine na raznim dubinama

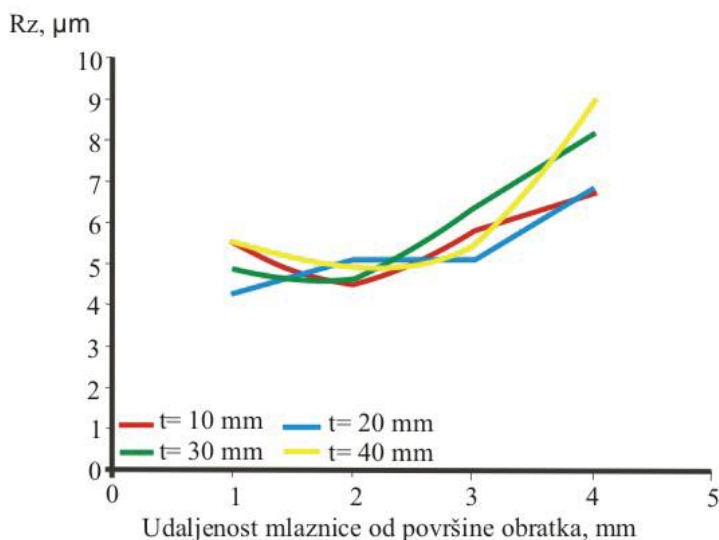
Hrapavost dobijene površine reza predstavlja ključni faktor za svaku realizaciju tehnološke obrade rezanja materijala. Na dijagramu 3.7. je navedena zavisnost hrapavosti površine radnog komada od brzine rezanja za različite vrste metala. Možemo uopšteno reći, da se kod svih ispitivanih vrsti čelika pri brzinama rezanja čak do 60mm/min praktično ne menja kvalitet površine Ra. Preko te brzine se kvalitet površine Ra pogoršava, i to utoliko više ukoliko čelik sadrži više legirajućih elemenata karbida, tj. nikla, titana, hroma, vanadijuma, molidbena i volframa.



Dijagram 3.7. Dijagram zavisnosti kvaliteta površine Ra (μm) od materijala i brzine rezanja

- udaljenost dizne od površine radnog komada

Na dijagramu 3.8. prikazan je uticaj udaljenosti mlaznice od površine obratka na hrapavost obrađene površine. Vidimo da postoji nekakva vrednost udaljenosti mlaznice od površine obratka koja nema toliki uticaj na kvalitet obrađene površine s obzirom na dubinu rezanja ta vrednost iznosi oko 2 mm. Odmicanjem mlaznice od površine obratka hrapavost obrađene površine značajno raste zato što mlaz više nije tako uzak (koncentriran) tj. rasipa se i izlazna snaga i brzina mlaza nije tako velika kako kod udaljenosti od 2 mm.



Dijagram 3.8. Uticaj udaljenosti mlaznice od površine obratka na hrapavost obrađene površine

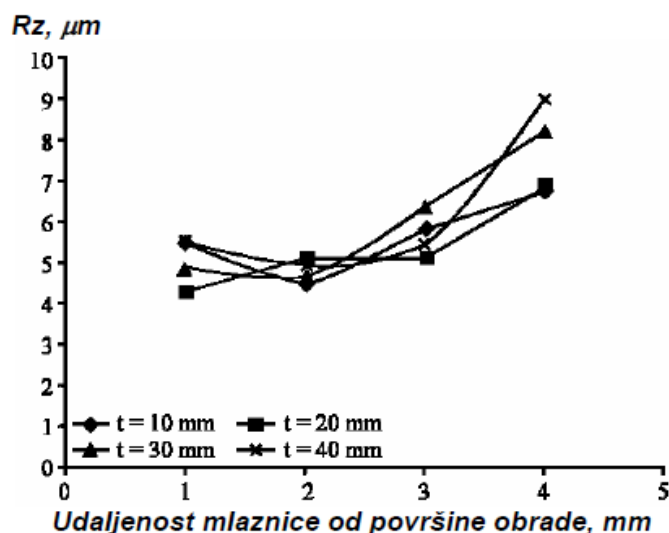
3.10.2. *Uticaj parametara obrade mlazom vode na kvalitet obrađene površine*

Materijal koji je korišćen za ispitivanje je aluminijum sa sledećim karakteristikama: zatezna čvrstoća 90 MPa; modul elastičnosti 69 GPa i gustina 2.71 g/cm³. Kao abrazivno sredstvo je korišćen aluminijum-silikat, finoće 80.

Uticaj parametara obrade abrazivnim vodenim mlazom na kvalitet obrađene površine je značajan i u okviru ovog rada razmatran je kroz ispitivanja uticaja:

- udaljenosti mlaznice od obrađivane površine

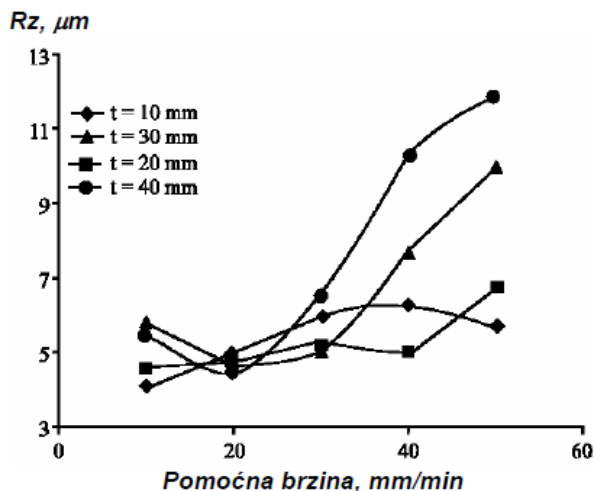
Na dijagramu 3.9. je prikazan uticaj udaljenosti mlaznice od površine obrade na hrapavost obrađene površine, na različitim dubinama reza. Uočava se da sa porastom udaljenosti mlaznice od površine predmeta obrade raste i parametar hrapavost obrađene površine R_z . Takođe uočava se da parametar R_z naglo raste kada se mlaznica udalji od obrađivane površine više od 3 mm, tako da hrapavost postaje velika nezavisno od dubine reza. Takođe, može se zaključiti da smanjivanje rastojanja mlaznice od površine predmeta ispod 2 mm ne dovodi do smanjenja hrapavosti. To znači da postoji optimalno rastojanje mlaznice od predmeta obrade, koje je u ovom slučaju oko 2 mm.



Dijagram 3.9. Uticaj udaljenosti mlaznice od površine obrade na hrapavost obrađivane površine, t - dubina reza

- pomoćne brzine (brzine kretanja predmeta obrade)

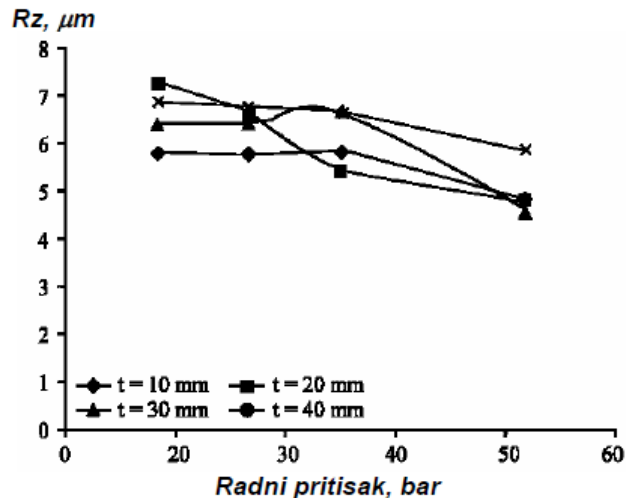
Na dijagramu 3.10. je prikazan uticaj pomoćne brzine na parametar hrapavosti obrađene površine Rz , na različitim dubinama reza. Sa dijagrama se vidi da se sa povećanjem pomoćne brzine povećava i Rz . Za vrednosti pomoćne brzine od 10 mm/min, Rz je duplo manje nego za vrednosti pomoćne brzine od 50 mm/min, na istoj dubini reza. Može se zaključiti da sa povećanjem pomoćne brzine hrapavost na većim dubinama reza značajno raste, a da u oblastima manjih brzina pomoćnog kretanja kvalitet po dubini reza je približno konstantan. Takođe, smanjenjem brzine pomoćnog kretanja ispod 20 mm/min, u ovom slučaju ne dovodi do povećanja kvaliteta obrađene površine.



Dijagram 3.10. Uticaj pomoćne brzine na hrapavost obrađivane površine, t - dubina reza

- radnog pritiska vode

Na dijagramu 3.11. je prikazan uticaj radnog pritiska vode na parametar hrapavosti obrađene površine Rz . Može se uočiti da za veće vrednosti radnog pritiska vode, parametar Rz ima manje vrednosti, odnosno, hrapavost obrađene površine je manja. Ova pojava je rezultat činjenice da se sa povećanjem pritiska vode krti kristali abraziva lome na manje, finije kristale, a finiji kristali abraziva daju finiju obradu odnosno manju hrapavost obrađene površine. I na ovom dijagramu se primećuje da je hrapavost obrađene površine veća na većim dubinama reza.



Dijagram 3.11. Uticaj radnog pritiska vode na hrapavost obrađivane površine, t - dubina reza

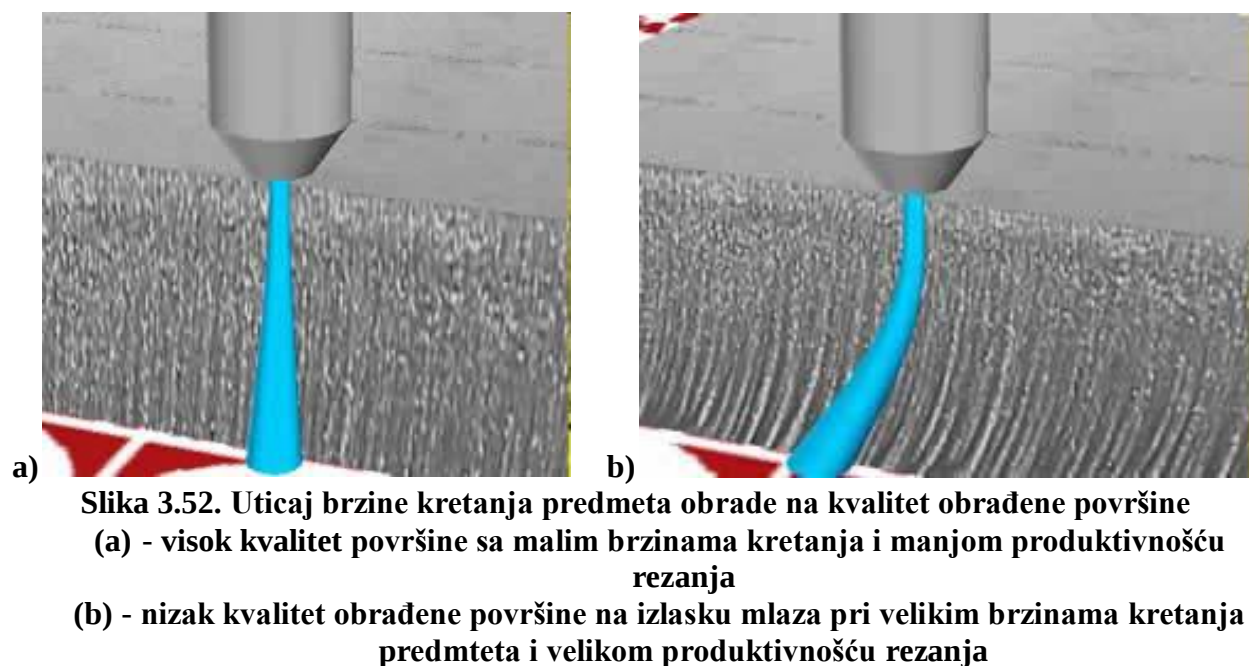
3.10.3. Karakteristike obrađene površine pri obradi mlazom vode

Sve ove karakteristike ukazuju na kvalitet obrađene površine. Kao glavni parametar za ocenu kvaliteta obrađene površine odabrana je srednja visina neravnina Rz , i praćena je promena vrednosti ovog parametra u zavisnosti od pojedinih parametara koji definišu obradu vodenim mlazom.

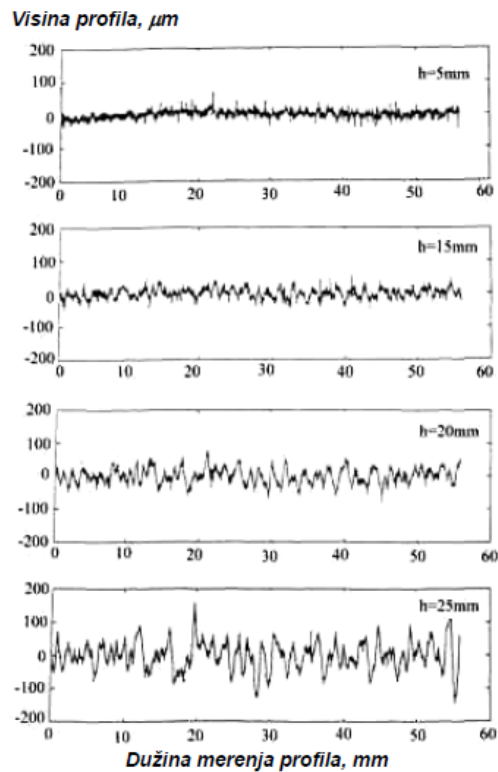
Osnovne karakteristike površine obrađene mlazom vode su :

- širina reza,
- koničnost reza i
- hrapavost obrađene površine

Karakterističan izgled površina obrađenih abrazivnim vodenim mlazom prikazan je na slici 3.52. i dijagramu 3.12.

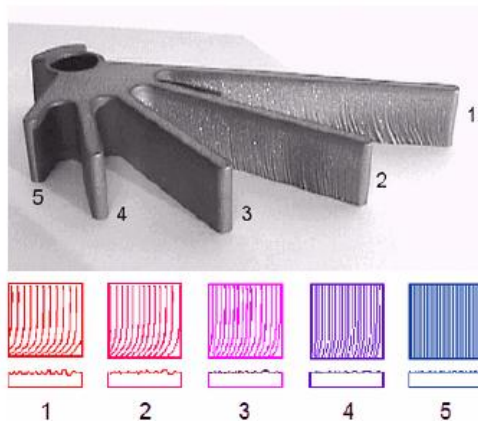


Sa slike 3.52. i dijagrama 3.12. se jasno vidi da se karakteristike obrađene površine menjaju u zavisnosti od brzine kretanja predmeta obrade, a sa slike se može zaključiti o postojanju velike razlike u visini neravnina u zavisnosti od udaljenosti od površine materijala koji se obrađuje, odnosno od dubine reza. Hrapavosti, odnosno visine neravnina profila su znatno manje na manjim dubinama reza, odnosno veći kvalitet obrade je na ulasku mlaza u materijal nego na većim dubine reza, odnosno na izlasku mlaza iz materijala.



Dijagram 3.12. Profil obrađene površine u zavisnosti od dubine reza – h

Na slici 3.53. prikazan je različit kvalitet obrađene površine. Površina 1 se dobija kada je potrebna velika brzina sečenja (velika produktivnost) i mali kvalitet i tačnost obrade. Takođe, ovakva površina se može dobiti sa velikim prečnikom mlaznice, malim ili nedovoljnim pritiskom vode ili starom (oštećenom) mlaznicom. Površina 2 se takođe dobija kada zahtevi za tolerancijom dela i kvalitetom površine nisu dominantni. U ovom slučaju kvalitet površine je određen samo brzinom većom brzinom kretanja predmeta obrade. Kvalitet površine 3 je najčešće zahtevan. U ovom slučaju postignuto je usklađivanje brzine predmeta obrade, pritiska mlaza vode, protoka i količine abraziva.



Slika 3.53. Različiti kvaliteti obrade vodenim mlazom

3.11. Poređenje tehnologije sečenja mlazom vode sa komparativnim tehnologijama konturnog sečenja

Sečenje abrazivnim vodenim mlazom ne zamenjuje postojeće postupke obrade, već je to postupak obrade komplementaran sa ostalim konvencionalnim i nekonvencionalnim postupcima obrade, kao što su glodanje, probijanje, lasersko sečenje, sečenje plazmom ili elektroeroziona obrada., a takođe se može koristiti kao dopuna postojećim postupcima i može se primenjivati sa, na primer, gasnim sečenjem, plazma sečenjem ili elektroerozionom obradom.

Obrada vodenim mlazom poredi se sa sledećim tehnikama sečenja: lasersko sečenje i plazma sečenjem.

3.11.1. *Poređenje sa laserskim sečenjem*

Laserskim sečenjem (LBM - Laser Beam Machining) se obrađuju materijali koji mogu da apsorbuju svetlost. Obrada je zasnovana na topljenju i isparavanju materijala iz zone reza. U osnovi, lasersko sečenje je pogodno za sečenje tankih limova od ugljeničnog čelika debljina od 0,5 do 12 mm, nerđajućeg čelika do 8 mm i aluminijuma do 5 mm. Najčešće se, koristi za sečenje limova od ugljeničnog čelika.

Sečenje abrazivnim vodenim mlazom i lasersko sečenje su dva postupka obrade koja se u polju primene delimično preklapaju, ali se ne mogu svuda međusobno zameniti.

Prednosti obrade abrazivnim vodenim mlazom u odnosu na lasersku obradu su sledeće:

- abrazivnim vodenim mlazom se mogu seći materijali koje laser ne može (reflektivni i visokoprovodni materijali),
- nehomogenost materijala nema uticaja na proces obrade,
- pri obradi abrazivnim vodenim mlazom ne dolazi do zagrevanja obratka, te nema termičkih deformacija i promene strukture materijala,
- pri obradi abrazivnim vodenim mlazom ne dolazi do isparavanja materijala i sagorevanja,
- održavanje mašine je jednostavnije, mada je češće.

3.11.2. *Poređenje sa plazma sečenjem*

Plazma sečenje (PAC - Plasma Arc Cutting) je termički proces kojim se obrađuju, pre svega, elektroprovodni materijali. Plazma je stanje gasa na visokim temperaturama, kada gas postaje jonizovan i elektroprovodan. Pri sečenju mlaz plazme, brzine približne brzini zvuka, napušta gorionik, koji predstavlja negativno naelektrisanu elektrodu. Obradak predstavlja pozitivno naelektrisanu elektrodu koju jonizovani gas seče. Drugim rečima, mlaz plazme temperature od 11000 do 25000 °C, termički seče materijal topeći i isparavajući ga.

U poređenju sa plazma sečenjem, obrada abrazivnim vodenim mlazom ima sledeće prednosti:

- ostvaruje se bolji kvalitet reza,
- ne dolazi do zagrevanja obratka,
- mogu se obrađivati sve vrste materijala,
- obrada vodenim mlazom je mnogo preciznija i
- obrada vodenim mlazom je zamena postupku sečenja plazmom u slučajevima kada se zahtevaju preciznost i kvalitet ili pri izradi delova kod kojih treba izbegavati zagrevanje materijala.

Karakteristika	Sečenje abrazivnim vodenim mlazom	Lasersko sečenje	Plazma sečenje
Materijal obratka	bilo koji materijal uz uslov da je materijal abraziva tvrdi od materijala obratka	visokoreflektujući i visoko provodni materijal teško se seku	elektroprovodni materijali (ugljenični i legirani čelik, aluminijumske i nikl legure, titan)
Debljina obratka	do 100 mm	do 20 mm (za snagu od 3kW)	do 40 mm
Količina toplote u zoni reza	nikakav uticaj toplote - hladan rez	umeren uticaj toplote	značajna veličina zone uticaja toplote dejstvom brzog zagrevanja od 1000 K/s
Povijene ivice reza	bez povijenih ivica	rez najčešće bez povijenih ivica	pojava troske
Stvaranje isparenja pri sečenju	nema isparenja	isparenje materijala pri sečenju	razvoj isparenja pri sečenju
Tačnost obrade	0,05 mm	0,01 mm	± 0,25 mm
Nagib reza	0 - 2°	0 - 0,5°	1 - 8°
Kvalitet površine reza	N8 (Ra = 3,2 μm)	N7 (Ra = 1,6 μm)	N10 (Ra = 12,5 μm)
Širina reza	≈ 0,8 mm	≈ 0,5 mm	≈ 1,8 mm
Mogućnost sečenja obradaka u paketu	moguća	ne postoji	ne postoji
Obrada složenih kontura	moguća	moguća	moguća

Tabela 3.5. Upoređenje karakteristika sečenja abrazivnim vodenim mlazom sa laserskim i plazma sečenjem

3.12. Primena obrade vodenim mlazom

Tehnologija obrade vodenim mlazom prvi put je industrijski primenjena 1974. godine u firmi BOEING (SAD) za sečenje keramičkih materijala koji su se koristili za toplotnu izolaciju kosmičkih letilica.

Najvažniji faktori koji su uticali na uvođenja ove tehnologije bili su:

- Rez je potpuno hladan i čist;
- Mlaz tečnosti predstavlja univerzalni alat i nema potrebe za primenu skupih alata;
- Pri korišćenju ove tehnologije ne nastaje prašina niti drugi produkti opasni po zdravlje;
- Postignute brzine sečenja su znatno veće u odnosu na klasičnu obradu rezanjem;
- Jedan hidraulični uređaj visokog pritiska može istovremeno da snabdeva više mlaznika koji se nalaze na jednom ili više postrojenja.

Uspešno korišćenje ove tehnologije bilo je uslovljeno i razvojem cevi visokog pritiska za razvođenje tečnosti koji su omogućavali dovođenje tečnosti pod vrlo visokim pritiskom na pomerljive X–Y stolove i industrijske robote.

U zavisnosti od područja primene, pri obradi vodenim mlazom pojedini parametri obrade variraju u sledećim granicama:

- *Sastav mlaza*: čista voda ili voda sa dodatkom 0,5÷3 kg/min abraziva;
- *Pritisak mlaza*: 100÷3500 bara;
- *Brzina rezanja*: 50÷2000 mm/min – zavisi od vrste i debljine materijala;
- *Vrsta mlaza*: kontinualni, impulsni, sa vremenima impulsa 3÷200 ms; ili kavitacioni;
- *Prečnik mlaznika*: 0,1÷2 mm;
- *Širina reza*: 2÷3 prečnika mlaznika,
- *Odstojanje mlaznika od obratka*: 0÷100 mm.

U **automobilskoj industriji** se široko primenjuju roboti za sečenje trodimenzionalnih delova od plastične mase, kao što su: rezervoari, branici, cele karoserije, komandne table, nasloni za glavu i ruke, tapacirung i materijali enterijera (poliuretani, folije, gumeni delovi, tepisi, krzna, koža, skaj i sl.), felne za točkove od lakih legura, keramički materijali, zaptivke i dr. Na slici 3.54. dat je primer delova od plastike za vozila Renault koji su izrezani pomoću vodenog mlaza visokog pritiska.

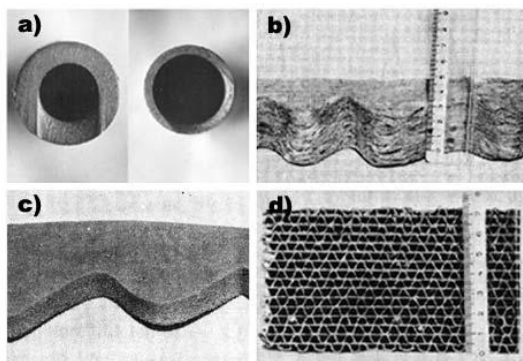


Slika 3.54. Primer delova od plastike za vozila Renault izrezanih vodenim mlazom

Druge industrijske grane koje takođe koriste ovu tehnologiju su:

- **Hemijska industrija** – obrada eksplozivnih materijala, plastičnih masa i teškoobradljivih materijala, kao što su: dinamit, čvrsta goriva za raketne motore, kompoziti i sl.
- **Medicina i zdravstvo** – operacije pankreasa, zuba i sl.
- **Prehrambena industrija** – veoma uspešno i čisto sečenje različitih vrsta prehrambenih proizvoda, kao što su: meso i ribe u sirovom i smrznutom stanju, voće i povrće u sirovom i suvom stanju, konditorski proizvodi (čokolada, ratluk, peciva i dr.), sve vrste sireva, duvan u sirovom i smrznutom stanju i mnogi drugi proizvodi.
- **Elektrotehnička i elektronska industrija** – čišćenje površinskih kontakata i sečenje materijala kao što su: kapton, ferit, permanentni materijali, elektro izolacioni materijali, sinterovani metali, staklo, keramika i dr.
- **Mašinska industrija** – za rezanje titana, volframa, molibdena, kobalta, nikla, tantala, urana, vrlo čvrstih čelika, legura sa različitom toplotnom provodljivošću, tvrdih i teškoobradljivih materijala i dr. Primer rezanja čeličnih cevi dat je na slici 3.55./a.
- **Staklarska industrija** – sečenje stakla svih vrsta do debljine od oko 200 mm.
- **Industrija obuće i galanterije** – sečenje prirodne i veštačke kože, gume, plastičnih masa svih vrsta i dr. materijala. Na slici 3.55./c dat je primer sečenja sunderaste poliuretanske gume, koja se drugim postupcima sečenja deformiše pa se dobija nepravilan oblik reza.
- **Papirna industrija** – sečenje papira, npr. lepenke, slika 3.55/d, folija, celuloze i dr. materijala za potrebe ove industrije.
- **Metalurška industrija** – čišćenje odlivaka, izrada metalografskih uzoraka, sečenje toplih i užarenih materijala i dr.

- **Građevinska industrija** – sečenje različitih vrsta materijala, kao što su: izolacioni materijali tipa poliuretana, stiropor, staklena vlakna, staklena vuna i dr, azbestno–cementni materijali za pokrivanje, beton, kamen (slika 3.55/b), malter, asfaltni proizvodi i sl, keramika i dr. vrste građevinskog materijala.
- **Industrija gume i plastike** – sečenje gume i plastičnih masa svih vrsta za ispitivanje i za proizvođače pneumatika.



Slika 3.55. Primeri sečenja vodenim mlazom:

a) čeličnih cevi; b) kamena debljine oko 40 mm; c) poliuretan–sunder. gume; d) lepenke debljine preko 70 mmsa: $p=3500$ bara; $ddiz=0,25$ mm; $vp=2$ m/min

3.13. Karakteristike tehnologije obrade mlazom vode

Najznačajnija osobina tehnologije vodenog rezanja je hladno rezanje koje termički ne utiče na material. Tokom rada ne dolazi ni do kakve promene u strukturi materijala, te stoga nema nikakvog oštećenja materijala na mestima reza kao što je to slučaj kod svih termalnih metoda razdvajanja konvencionalnim tehnologijama obrade i rezanja kroz stvaranje mikro pukotina ili mikro tenzije materijala. Ova metoda radi na principu visokopritisnog tečnog mlaza za sečenje materijala, sa kombinacijom pritiska vode i masivnog abrazivnog delovanja abrazivnih elemenata uvedenih u mlaznicu.

Rez vodenog mlaza je veoma uzak, što je posebno pogodno pri rezanju proizvoda komplikovanih oblika, ali u obrade skupih poluproizvoda.

Ova tehnologija omogućava visokokvalitetno razdvajanje nekih materijala koje ranije nije bilo moguće razdvajati na bilo koji način, a prizvodi od tih materijala morali su se praviti presovanjem, livenjem ili kovanjem. Takve procedure su veoma nepodobne za proizvodnju malih serija, pojedinačnih komada, kao i serija za testove, eksperimente i istraživanja.

Karakteristike tehnologije rezanja vodenim mlazom:

- Rezanje svih veštačkih masa i njihovih kombinacija;
- Rezanje slojevitih materijala sa različitim fizičkim osobinama;
- Rezanje eksplozivnih materija, kao i rezanje u eksplozivnim sredinama;
- Rezanje materijala koji su osetljivi na oksidaciju – titan, kobalt, nikl i njihove legure;
- Rezne ivice nisu deformisane usled mehaničkih i toplotnih uticaja;
- Energetsko iskorišćenje iznosi i do 80%, u odnosu npr. svega 10% kod primene lasera;
- Mogućnost da se praktično režu svi postojeći materijali – velika univerzalnost;
- Prilikom rezanja štampanih kola rez je električno neprovodljiv;
- U rezu se ne javljaju nikakve mikropukotine ili su one minimalne;
- U površini reza se ne javljaju nikakvi zaostali naponi;
- Mogućnost sečenja pod vodom;
- Može se rezati bez ograničenja u svim smerovima, položajima, oblicima konture i uglovima nagiba;
- Rezanje je bez prašine; nepotrebna je klimatizacija i odsisavanje, što je naročito važno za kancerogene i otrovne materije koje se oslobađaju kod mehaničkog ili toplotnog rezanja, npr. azbest i sl.;
- Vrlo dobra pogonska jednostavnost i pouzdanost postupka;
- Mala osetljivost na udaljenost dizne od materijala, tj. mogućnost sečenja talasastih materijala u X–Y ravni npr. eval, salonit i sl.;
- Mali gubitak materijala zbog vrlo uskog reza;
- Prečnik vodenog mlaza iznosi $0,1 \div 0,25$ mm;
- Prečnik abrazivnog mlaza je $0,8 \div 2$ mm;
- Za rad na uređaju je dovoljna niža stručna kvalifikacija radnika;
- Jedan agregat visokog pritiska može istovremeno da napaja i desetine reznih glava vodenog mlaza jednovremeno, a i do pet abrazivnih reznih glava;
- Hidraulični agregat može biti 100 m i više udaljen od radnih mesta, tj. potpuno izvan radnog prostora;
- Tehnologija vodenog i abrazivnog mlaza troši pri maksimalnoj proizvodnosti samo nekoliko litara čiste hemijski neobrađene vode u minuti, odnosno $0,1 \div 0,5$ kg min abraziva uz snagu elektromotora $20 \div 70$ kW;
- Brzom promenom radnog pritiska moguće je materijal koji se obrađuje prati, čistiti i rezati na istom uređaju;
- Trenutno puštanje i zaustavljanje mlaza (brzina reagovanja oko 100 milisekundi);
- Jednostavan razvod tečnosti pod visokim pritiskom koji ne zahteva posebno održavanje u toku celog veka eksploatacije;
- Materijal je moguće probušiti na bilo kom mestu, a započeti rez bilo gde završiti;
- Vrlo jednostavna instalacija ove tehnologije kod svih vrsta manipulatora od ručnih, pa do industrijskih robota;
- Kod sadašnjih malih cena dizni, filtera i abraziva, pogonski troškovi su mali;
- Mogućnost izgradnje pokretnih sistema na vozilima dovodi do znatnog proširenja oblasti primene ove tehnologije;

- Mogućnost korišćenja i drugih radnih medija u prehrambenoj industriji i zdravstvu, kao što su: ulje, maslac, kakao, masti, alkohol, mleko i dr.

Ekonomski efekti korišćenja tehnologije obrade mlazom tečnosti u praksi su naročito izraženi u kombinaciji sa numerički upravljanim X – Y stolovima, industrijskim robotima i fleksibilnim proizvodnim sistemima. Pri korišćenju ove tehnologije treba, osim smanjenja direktnih proizvodnih troškova (povećanje produktivnosti se kreće do 90%), imati u vidu i sledeće efekte koji se postižu pri obradi:

- Izrazito poboljšanje kvaliteta radne sredine i čistoće rada (mala buka uređaja);
- Velika ušteda alata i bolje korišćenje kapaciteta alatnice;
- Ušteda materijala i energije;
- Velika ušteda zbog odsustva naknadne dorade površina koje su bez toplotnih defekata;
- Energetska i investiciona ušteda na klimatizaciji i ventilaciji;
- Ušteda manipulacionog vremena zbog univerzalnosti sistema i mogućnost rezanja na jednoj mašini bilo kog materijala i bilo kog oblika konture.

Dalja primena tehnologije obrade vodenim i abrazivnim vodenim mlazom vodi ka razvoju novih varijanti sistema sa sledećim namenama:

- Rezanje materijala u građevinarstvu i rudarstvu;
- Bušenje u rudarskim oknima;
- Podzemno bušenje radi polaganja kablovskih vodova.

ZAKLJUČAK

Kao zaključak može se reći, da je tehnologija rezanja materijala vodenim mlazom visokoprogresivna i moderna metoda, koja može da se koristi pri sečenju praktično svih dosad poznatih materijala. Potpunu revoluciju u sečenju materijala je donelo saznanje, da je na jednom radnom mestu (pri korišćenju pogodnog manipulacionog sredstva) moguće u velikom broju slučajeva bez naknadnih završnih operacija izraditi složen deo (on je ranije izrađivan na nekoliko radnih mesta, npr. na testeri, bušilici, frez mašini) i to bez dodatne toplotne obrade nužne za odstranjivanje unutrašnjih napona nastalih pri sečenju gorionikom.

Kako industrija predstavlja jedan od značajnih izvora zagađenja razumljivi su naponi koji se - pogotovu u industrijskim razvijenim zemljama - čine kako bi se zagađenja i njihove posledice smanjili. Neki od činilaca koji predstavljaju podlogu ekologizacije proizvodnih tehnologija, prikazani su u ovom radu.