



Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 510/2013

Марија В. Миловановић

Тачност обраде абразивним воденим млазом

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др Богдан Недић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Војноиндустријско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Наоружање**

Име и презиме: **Марија Миловановић**

Број индекса: **510/2013**

ПРИЈАВА ДИПЛОМСКОГ РАДА

Тема рада: **Тачност обраде абразивним воденим млазом**

Задатак: У оквиру дипломског рада потребно је да кандидат изврши прикупљање и систематизацију података за обраду абразивним воденим млазом (АВМ). Потребно је навести предности и недостатке обраде, могућности примене као и описати машине и опрему за ову обраду. Посебан акценат дати анализи грешака и тачности ове обраде. У раду детаљно описати утицајне факторе на тачност обраде абразивним воденим млазом.

Дипломски рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Анализа процеса обраде абразивним воденим млазом,
3. Маchine за обраду абразивним воденим млазом,
4. Систематизација грешака при обради абразивним воденим млазом
5. Закључци,
6. Литература.

Ментор: _____

Др. Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 04.04.2019.

Резиме: Овај рад је посвећен упознавању са технологијом квалитета обраде абразивним воденим млазом. Дати су основни принципи рада, утицај параметара на процес обраде као и карактеристике обрађене површине воденим абразивним млазом. Обрада абразивним воденим млазом је дефинисана бројним утицајним факторима, који одређују количину одвојеног материјала, као и квалитет реза. Знатни напори уложени су у разумевање утицаја појединих фактора на процес сечења абразивним воденим млазом, као што су: пречници отвора водене и абразивне млазнице, притисак воде, врста, величина и проток абразива, растојање резне главе од обратка, брзина сечења и др. У раду је дат опис и изглед машине за ову обраду, као и систематизација грешака обраде абразивним воденим млазом. Извршена је процена грешака обраде абразивним воденим млазом, као и кључни параметри који карактеришу грешке у профилу резног жљеба.

Кључне речи: сечење абразивним воденим млазом, квалитет резања, радни параметри.

Abstract: The subject of this work is quality technology of processing using water abrasive jet. It presents basic operating principles, impact of parameters on processing, and characteristics of surface processed with water abrasive jet. Abrasive water jet processing is defined by a number of influencing factors, which determine the amount of separated material, as well as the quality of the cut. Significant efforts have been made to understand the influence of certain factors on the abrasive water jet cutting process, such as: the diameter of the aquatic and abrasive nozzles, the water pressure, the type, the size and the flow of the abrasive, the distance of the cutting head from the workpiece, the cutting speed, The paper presents the description and appearance of the machine for this processing, as well as the systematization of the abrasive water jet processing errors. An assessment of the abrasive water jet processing errors, as well as key parameters characterized by faults in the cutting profile profile, was performed.

Key words: cutting using abrasive water jet, quality of cutting , operating parameters.

САДРЖАЈ

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	2
2. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ	4
2.1 Принцип обраде.....	4
2.2 Процес резања абразивним воденим млазом	6
2.3. Утицај параметара на процес обраде.....	11
2.4 Могућност примене технологије	15
3. МАШИНЕ ЗА ОБРАДУ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ	20
4. СИСТЕМАТИЗАЦИЈА ГРЕШАКА ПРИ ОБРАДИ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ	27
4.1 Процена грешака при резању.....	27
4.2 Кључни параметар који карактерише грешке у профилу резног жљеба код обраде абразивним воденим млазом	30
4.3 Утицаји параметара процеса на геометријску грешку.....	36
4.4 Утицај параметара обраде на геометријску грешку делова у абразивном OFFSET- моду обраде воденим млазом	40
4.4.1 Анализа експеримената из литературе	41
4.4.2 Резултати и дискусије.....	43
4.5 Методологија корекције грешака примењене на резање абразивним воденим млазом	44
4.6 Експериментално истраживање квалитета реза	52
5. Закључак	56
6. Литература	57

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Технологија обраде воденим млазом је почела да се развија крајем шездесетих година прошлог века. У то време почиње развој нових неконвенционалних технологија за обраду и резање нових материјала, посебно материјала од композита и керамичких материјала који се користе у авио и војној индустрији, јер конвенционални поступци обраде нису давали задовољавајуће резултате при обради ових материјала. Основни циљ је био повећање квалитета, смањење трошкова израде производа и остваривање велике тачности кроз мања инвестицијска улагања.

Обрада абразивним воденим млазом (Abrasive Water Jet) је релативно нова неконвенционална технологија обраде одвајањем честица, која је за кратко време нашла примену у различитим гранама индустријске производње, као што су: грађевинска индустрија, хемијска индустрија, електро индустрија, индустрија неметала (стакло, азбест), итд. Неке од производних операција које се спроводе абразивним воденим млазом су: бушење, сечење, чишћење површина, полирање површина, површинско ојачање, итд, [1].

Захтеви који се постављају пред индустријске процесе сечења су задњих година значајно порасли. Не тражи се само већа продуктивност, већ и могућност израде комплексних делова високог квалитета израде. Разлог наглог ширења примене технологије сечења абразивним воденим млазом је тај што омогућује сечење широког опсега врста материјала и дебљина, као и то што је: брза, прецизна и једноставна за примену. Процес стварања абразивног воденог млаза је истовремено једноставан, али и изузетно комплексан задатак. У самој основи, вода под високим притиском се доводи од пумпе до резне главе, где се претвара у узани млаз велике кинетичке енергије коме се додају честице абразива. Честице абразива, високо убрзане струјом воденог млаза, великом брзином ударају у обрадак одвајајући честице материјала обратка. Одвојени материјал, из зоне реза, односи водени млаз у облику микроструготине. Једноставно за објашњење и коришћење, међутим, сам процес обраде обједињује изузетно сложену технологију одвајања материјала резањем и деформисањем и захтева висококвалитетне елементе обрадног система као што су: пумпа високог притиска и резна глава. Технологија сечења абразивним воденим млазом је комплексан процес интеракције абразивног воденог млаза и материјала обратка. Ефикасност процеса сечења абразивним воденим млазом, као основа његове успешне примене, зависи од избора утицајних фактора. Први корак ка том циљу је идентификација и разумевање фактора који утичу на процес сечења. Процес је дефинисан бројним факторима, који одређују ефикасност, економичност, тачност и квалитет обраде. Квалитет обраде је комплексан показатељ и функција је квалитета конструкције дела, израде и обраде, обрадног система, обрадног процеса, припремка и сл. Квалитет израде је један од услова за постизање високог нивоа квалитета производа и обухвата: тачност обраде и

квалитет обрађених површина. Ова два комплексна показатеља квалитета обраде су у међусобној зависности, различито за сваки обрадни систем, и функције су великог броја утицајних фактора.

Тачност обраде је степен подударности (блискости) обрађених делова и модела дефинисаног конструктивно-технолошком документацијом. Условљена је захтевима конструктивне документације (облик, димензије, класа тачности, одступања и сл.), функционалност, заменљивост делова, итд. Грешке обраде су случајног карактера, ретко систематског, и не могу се унапред предвидети. Међутим, правилним избором технологија и параметара обраде могу се свести на минимум, у границе дозвољених одступања. При обради резањем се јављају грешке у микроструктури - површинском слоју и геометријске грешке обраде.

Предност обраде абразивним воденим млазом је у томе што се овим поступком могу сећи скоро све врсте материјала, смањени су трошкови алата, као и то да у зони обраде не долази до значајног пораста температуре. Због минималних сила резања (5 до 130 N) није потребно стезање обрадка као ни означавање. Тако обрађена површина нема заосталих напрезања и деформација. Обрађивање различитих материјала се врши без мењања опреме и алата, а квалитет реза је исти за све слојеве материјала. Губитци при обради су веома мали као и сама дебљина реза.

Недостаци карактеристични за ову обраду су бразде које настају на обрађеној површини, заостајање млаза као и храпавост површине.

У првом поглављу овог рада приказане су основне карактеристике обраде абразивним воденим млазом, развијање обраде кроз историју као и предности и недостаци сечења абразивним млазом у складу са другим примењеним процесима.

У другом поглављу дате су информације о анализи процеса обраде абразивним воденим млазом. Описан је принцип обраде, утицајни параметри на процес обраде као и могућности примене ове технологије.

Треће поглавље обухвата детаљан опис машине за ову обраду, укључујући и делове машине као и њихову опрему. Детаљно су објашњени намена, принципи рада сваког дела, исто тако је и приказана скица за сваки део посебно.

У четвртном поглављу су анализиране систематизације грешака при обради абразивним воденим млазом. Приказана су одређена експериментална истраживања везана за квалитет реза, тачност и прецизност, облик и величину абразива, геометријске грешке предмета обраде и др. Такође су анализирани утицајни параметри процеса на геометријску грешку делова. Посебан акценат је стављен на изглед и квалитет реза, тачност израде машине за обраду абразивним млазом и тачност позиционирања машине, као и утицајни фактори на толеранцију.

Осим поменутог, коментарисани су и могући дефекти, грешке и деформације, са узроцима њихове појаве. Посебно су коментарисане грешке које су узроковане стезањем предмета обраде.

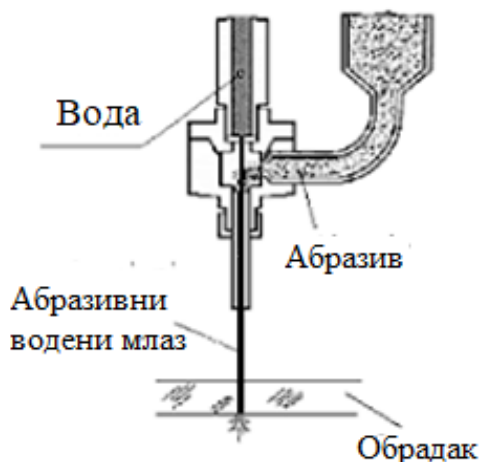
2. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

Обрада абразивним воденим млазом је релативно нова неконвенционална технологија обраде, код које се принцип рада заснива на коришћењу млаза воде под високим хидрауличним притиском, којем се додају абразивна зрна као алат за резање.

2.1 Принцип обраде

Употреба технологије резања воденим млазом и њена широка примена у многим гранама привреде довела је до тога да се поједина радна места веома разликују. Основна разлика се огледа у врсти производње која се примењује на тим местима, уређајима за руковање као и врсти процеса обраде (са или без абразива).

Основна карактеристика ове технологије је коришћење воде под високим притиском за резање материјала. Сама технологија је настала у цињу да се искombинују добре особине обраде абразивним воденим млазом (AWJ) и обраде воденим млазом (WJ), тј. да се добије технологија обраде којом ће моћи да се обрађује велики број материјала, релативно великом брзином, а да притом у зони контакта не дође до термичких промена.



Слика 2.1. Обрада абразивним воденим млазом [2]

Поступак обраде воденим млазом као један од неконвенционалних поступака обраде заснива се на коришћењу кинетичке енергије воденог млаза која се добија услед јако велике брзине струјања воде (до 1000 m/s). За коришћење кинетичке енергије неопходно је да на површину предмета обраде делује високи притисак. Деловање оптерећења на површину предмета обраде изазива настанак унутрашњег оптерећења које узрокује раздвајање кристалне решетке у правцу деловања млаза. Након настанка

почетног реза неопходно је утврдити вредност релевантних параметара ради постизања резултата процеса обраде као што су: прецизност, закошење ивица или квалитет обрађене површине. Најпоузданији параметри за постизање високе тачности као и високог квалитета обрађене површине су [1]:

- кинетичка енергија абразивног воденог млаза;
- кретање абразивног воденог млаза.

Класификација поступака обраде може се извршити према следећим критеријумима [2]:

а) Према начину извођења операција, на поступке:

- резање танких и лиснатих материјала,
- израде жлебова, бушење отвора, контурног исецања,
- површинске обраде материјала (чишћење и полирање спољашњих и унутрашњих површина, израда сложених профила на тешко приступачним местима, израда гравура и сл.), итд.

б) Према врсти обрађиваног материјала, на поступке обраде:

- меких материјала (катрон, тканина, дрво, гума и сл.),
- пластичних маса и
- тешко обрадивих материјала (тврде легуре и сл.).

в) Према врсти радног флуида, на поступке обраде:

- чистим воденим млазом,
- воденим раствором уља, глицерина или полимера,
- воденим абразивним млазом и
- ваздушним абразивним млазом.

г) Према начину дејства млаза на материјал, на поступке обраде:

- непрекидним млазом течности константног притиска,
- вибрирајућим млазом,
- пулзирајућим млазом,
- импулсним млазом.

д) Према смеру дејства млаза на материјал, на поступке обраде:

- ударним,
- косим и
- клизним млазом.

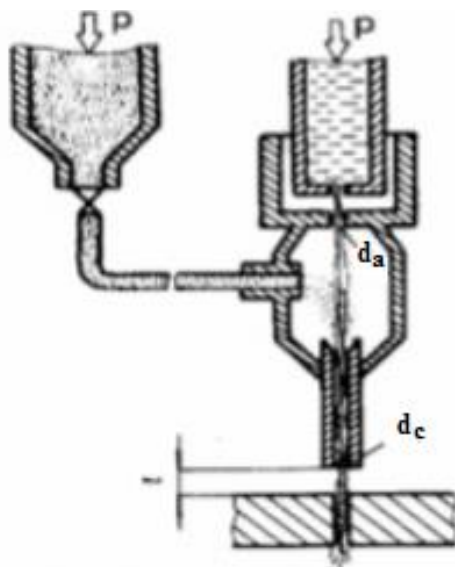
Механизам обраде се заснива на ерозији. Алат је абразивни водени млаз, тј. узани млаз воде велике брзине, настао истицањем воде кроз млазницу малог пречника, коме су додате честице абразива. Водени млаз преноси кинетичку енергију на честице абразива дајући им брзину, при чему честице врше обраду сличну брушењу.

Најчешће операције које се овом врстом обраде могу изводити су: сечење, полирање површина, чишћење површина, итд.

Савремене инсталације за обраду абразивним воденим млазом раде са притиском воде и преко 4000 bar, при чему водени млаз достиже брзине и до 900 m/s.

2.2 Процес резања абразивним воденим млазом

При обради абразивним воденим млазом се користи специјално конструисана радна глава. Вода под високим притиском пролази кроз млазницу чији је отвор d_a (слика 2.2.) и улази у комору за мешање.

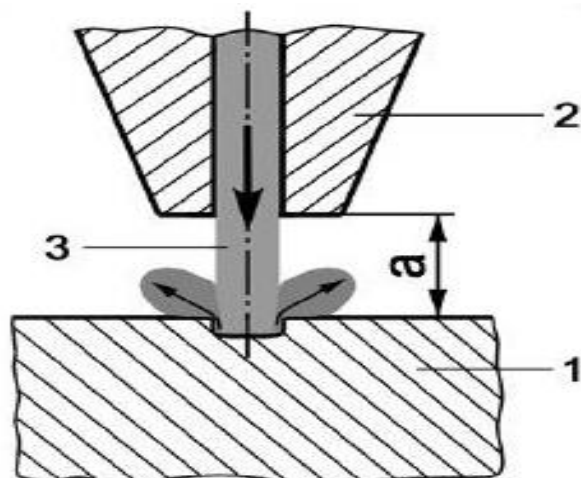


Слика 2.2. Шема протока и мешање воде и абразива [2]

У комору за мешање се дозира и абразивни прах који се меша са водом. Овако добијена абразивна мешавина пролази кроз млазницу чији је отвор d_c , и ствара абразивни водени млаз који се сужава и усмерава на обрадак тзв. абразивном млазницом од тврдог метала чији је пречник отвора од 0,72 до 1,2 mm. Захваљујући додатом абразиву резултат сечења абразивним воденим млазом је доста већи од резултата који се добија сечењем чистим воденим млазом. Дизне комора за мешање воде и абразива морају бити отпорне на хабање, па се због тога производе од квалитних материјала као што су: волфрамкарбид, боркарбид или бор нитрид.

При обради абразивним воденим млазом скидање материјала обратка остварује се непрекидним „бомбардовањем“ површине која се, ношена гасном струјом, крећу врло великом брзином, што је приказано на слици 2.3. Високо убрзање абразивних зрна у гасној струји 3 остварује се помоћу млазника 2 са малим отвором који се налази на одређеном растојању а од обрађене површине. На тај начин се остварује кинетичка енергија абразивних зрна која се при судару са материјалом обратка претвара у механички рад и тако остварује интензивно скидање материјала оштрим ивицама абразива. Скинути

материјал и затупљена зрнца абразива одстрањују се са места обраде гасном струјом, а даље се скупљају у радној комори или се усисавају помоћу усисивача.



Слика 2.3. Шема абразивним млазом [3]

За разлику од обраде „ваздушним“ млазом са абразивом, обрада абразивним воденим млазом користи знатно ситнија зрнца абразива у виду праха, а поседује и бољу контролу млаза абразива. Док се обрада „ваздушним“ млазом користи углавном за чишћење одливака, кородираних делова машина и лимова, обрада абразивним млазом се користи за обраду скидањем материјала, фино чишћење, полирање и скидање оштрих ивица и то на предметима од кртих материјала као што су: стакло, керамика, кварц, графит и други слични материјали.

Обрада водом се користи брзинама три пута већим од брзине звука- 1000 m/s. Притисак којим се млаз истискује пење се до 6000 бара, док се просечан притисак у водоводним цевима градског водовода креће око 6 бара. Пречници млазница су од 0.1-0.5 mm, али се може смањивати или повећавати што зависи од материјала који се обрађује, квалитета реза и препоруци произвођача. Дебљина код резања водом је од 1-50 mm зависно од врсте материјала који се обрађује. Додавањем абразива у млаз дебљина реза се за мекше материјале повећава изнад 500 mm.

Абразивна зрна се не крећу истим брзинама у поређењу са носећим флуидом. При судару са предметом обраде имају мању брзину од флуида. Убрзавање честица абразивног млаза зависи од врста флуида, величине зрна и концентрације абразива. Абразивна зрна ношена воденим млазом, при истом пређеном путу, достижу брзину $V_a = 0.96 V_f$, при чему је V_f брзина флуида.

Кад абразивна зрна достигну максималну брзину, која зависи од притиска и врсте флуида, почиње њихово успоравање. Крупнија зрна (зрна веће масе) имају већу инерцију, те је стога и њихово убразање мање. Разуме се да, ако абразивна зрна ударају о предмет обраде већом брзином, повећава се кинетичка енергија, а самим тим се постиже и већи учинак обраде.

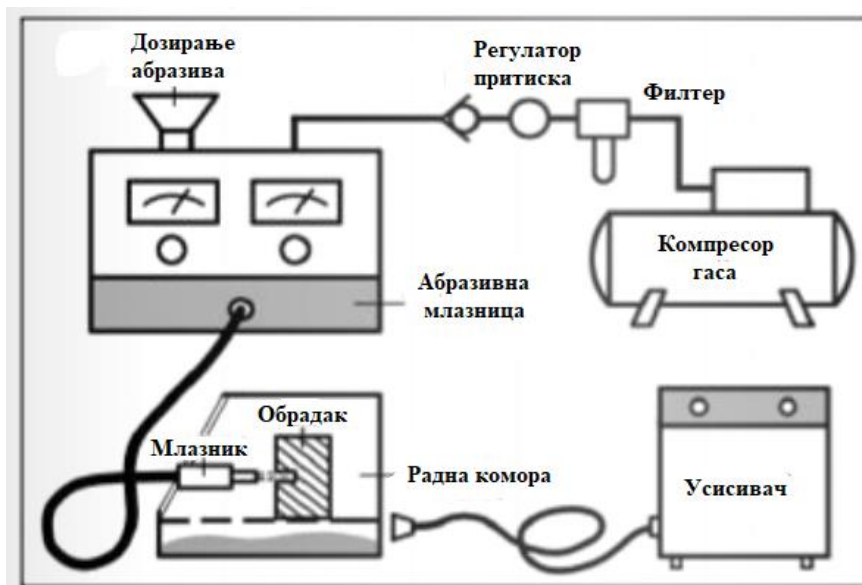
Брзина резања је важан параметар обраде, јер утиче на квалитет реза али и на трошак обраде. Она зависи од дебљине, тврдоће и врсте материјала који се обрађују.

Неке од предности сечења воденим млазом у односу на сечење ласером или плазмом:

- веома прецизно сечење млазом чији је пречник мањи од 1 mm а тачност резања ± 0.1 mm;
- рез је хладан и не долази до термичких напрезања материјала;
- могућност резања и тврдых и меких материјала;
- мања ограничења и дебљине материјала;
- нема прашине, штетних гасова и прашине код резања;
- резна површина је глатка и чиста.

У зависности од тога шта се користи као радни медијум, водени млаз се може поделити на чист водени млаз и абразивни водени млаз. Чист водени млаз се користи за обраду мекших материјала, као што су дрво, папир, кожа. За обраду тврдых материјала није довољна енергија чистог воденог млаза, па се у њега додаје абразив у виду праха. На тај начин настаје абразивни водени млаз.

На слици 2.4. приказана је принципијелна шема инсталације за обраду абразивним млазом са јединицом за мешање гаса и абразива и радном комором за сакупљање прашине. На контролној табли абразивне јединице врши се дозирање гаса, који се преко филтера и регулатора притиска доводи из компресора и абразивног средства у виду праха, које се у јединицу доводи преко вибрационог левка. У затвореној радној комори налази се сто са клизачима и прибором за прихватање и стезање обрадака. Уколико се ради без затворене радне коморе, онда се за сакупљање прашине из радног простора користи усисивач.



Слика 2.4. Принципијелна шема инсталације за обраду абразивним воденим млазом [3]

Инсталације за обраду абразивним воденим млазом могу имати и филтере за одстрањивање влаге и масноће из гасног флуида, као и уређаје за брзо испирање млазника кад се овај зачепи.

Абразивна обрада воденим млазом омогућава разноврсност обраде али се његова примена проширује на тврде и пуно чвршће материјале.

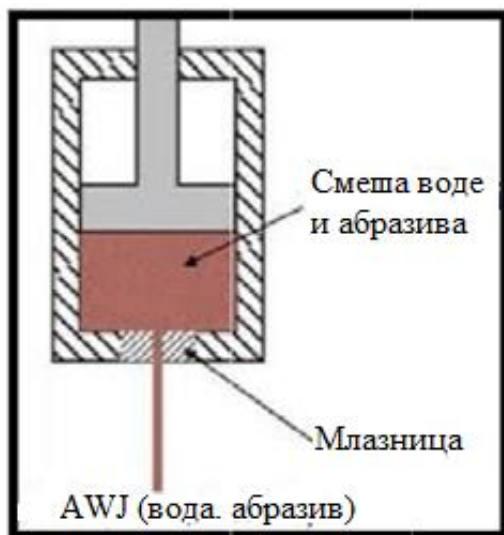
Овом обрадом могуће је резање скоро свих материјала као што су: сви метали укључујући и легуре на бази титана и никла, камен, техничка керамика, бетон, пластичне масе, композитни материјали, као и стакло које се због својих површинских напона разбије на ситне комадиће.

За поступак обраде абразивним воденим млазом потребно је имати висок притисак воде, абразивно средство као и одговарајуће параметре обраде.

Воденом млазу се у комори за мешање резне главе додају честице абразива, при чему настаје абразивни водени млаз. Абразивни водени млаз се сужава и усмерава на обарадак абразивном млазницом чији је пречник отвора од 0.5 до 1.2 mm. Честице абразива се крећу турбулентно у цевчици, ударају у зидове све док не добију довољну брзину да их понесе водени млаз. Задатак млаза воде је да пренесе кинетичку енергију на честице абразива и усмери их ка обратку. Тиме поступак обраде постаје потпуно различит у односу на сечење чистим воденим млазом. Сам процес обраде абразивним воденим млазом је сличан брушењу, са том разликом да абразивна зрна нису уграђена у тоцило, већ се налазе у млазу воде.

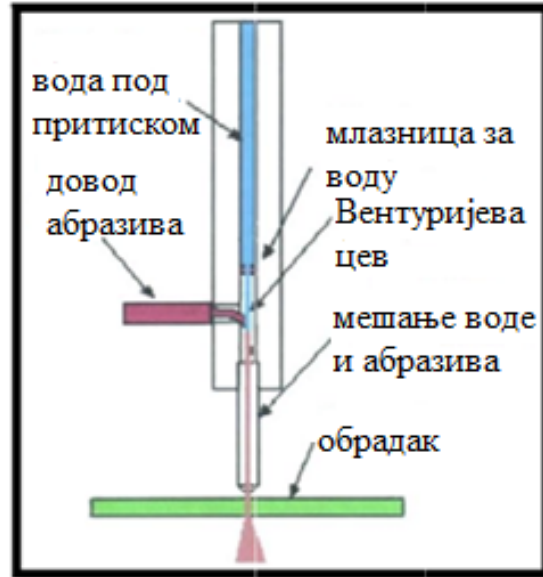
Код овог поступка постоје два начина стварања млаза:

- 1) Претходно створен млаз. То је суспензијски млаз који настаје тако што сам водени млаз усисава абразивно средство и меша га са водом. Притисак мешавине је максимално до 700 bara. Користи се за резање бетона до 1 m дебљине и 3 mm ширине реза.



Слика 2.5. Суспензијски водени млаз [5]

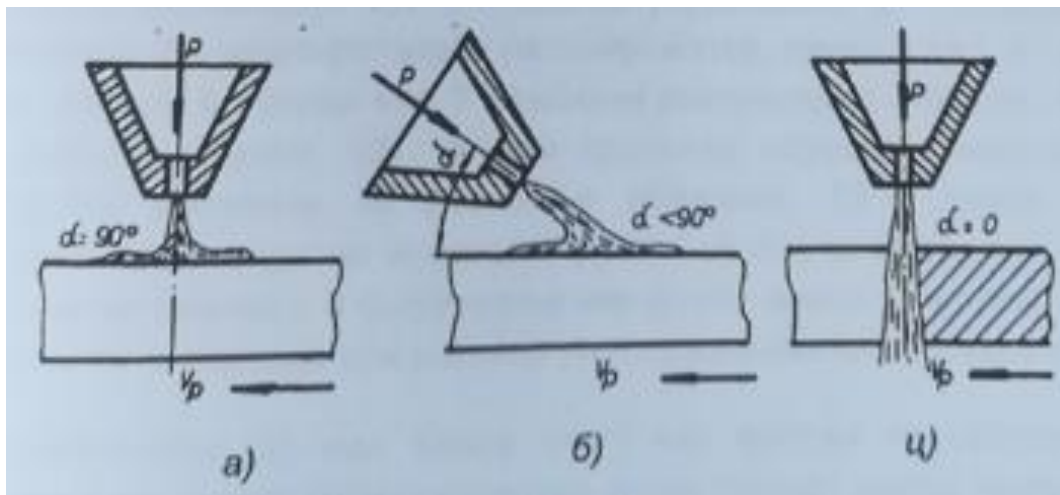
- 2) Инјекцијски млаз, који је бољи за примену код технологије обраде. Састоји се од 10% воде, 1% абразивног средства и остало је ваздух. Млаз је танак, дебљина реза је око 1 mm. Притисак воде је 3000 до 3500 bara.



Слика 2.6. Инјекцијски млаз [5]

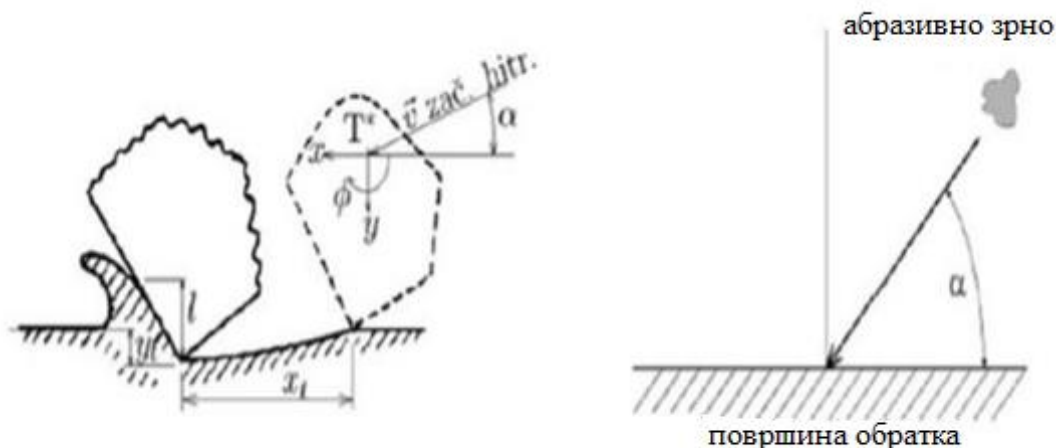
Приликом резања абразивним воденим млазом јако је важно да су млазница и цев за мешање добро центриране, јер од тога зависи изглед абразивног воденог млаза, а самим тим и квалитет обраде. Резне способности и карактер изведених операција (слика 2.7.) зависе од низа фактора као што су: материјал предмета обраде, састав радне течности, притисак и брзина струјања течности, начин и правац дејства струје течности на предмет обраде итд.

Количина одношења материјала при обради абразивним воденим млазом зависи од брзине абразивног зрна, угла уласка зрна у материјал, тврдоће абразивног зрна, тврдоће материјала обраде као и од облика абразивног зрна



Слика 2.7. Облици абразивног воденог млаза. Обрада ударним а), косим б) и клизним правим млазом в) [4]

На слици 2.8. је приказан принцип одношења материјала абразивним воденим млазом.



Слика 2.8. Принцип одношења материјала [6]

Брзина резања је веома важан параметар који утиче на квалитет реза али и на трошкове обраде. Зависи од дебљине, тврдоће и врсте материјала који се обрађује. Брзина резања представља брзину релативног померања резне главе у односу на обрадак у правцу резања, док је правац помоћног кретања резне главе вертикалан на правац струјања млаза. Подешавање брзине резања врши се да би се оптимизовали резултати процеса резања за различите дебљине обрадка а тиме се остварује и жељени квалитет реза при задатим вредностима притиска воде и масеног протока абразива.

2.3. Утицај параметара на процес обраде

Технологија резања абразивним воденим млазом је комплексан процес интеракције абразивног воденог млаза и материјала који се обрађује. Карактеришу је четири основна параметра резања која су кључна за реализацију основних резултата резања изражених кроз дубину резања и квалитета површина:

- Радни притисак;
- Проток абразива и воде;
- Брзина резања (брзина кретања резне главе);
- Удаљеност дизне од површине радног комада.

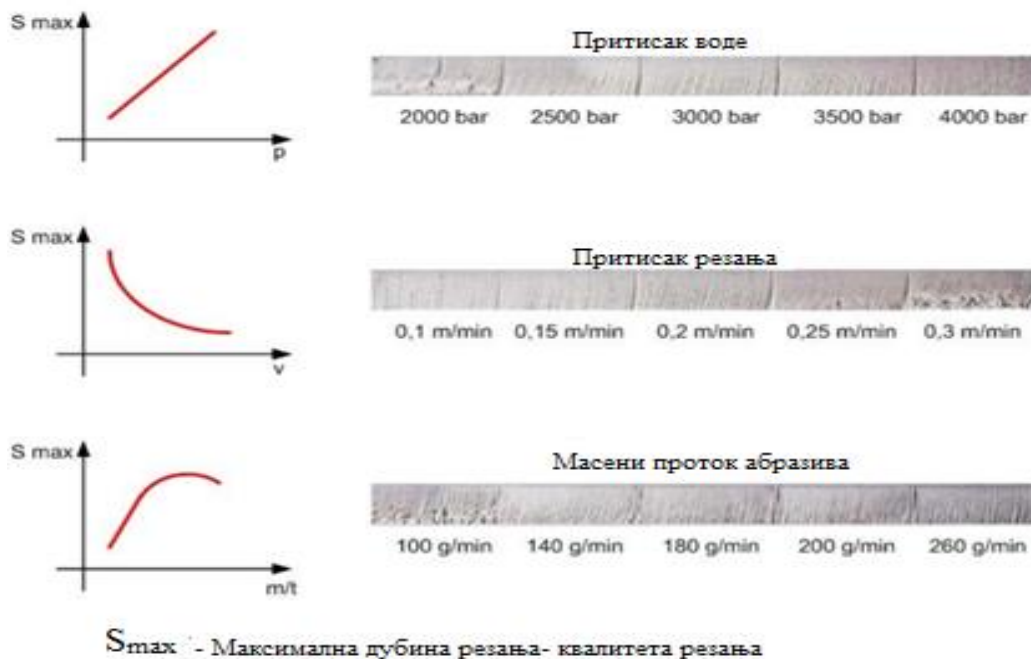
Брзина резања је такође јако важан параметар обраде, јер утиче на квалитет реза али и на трошење обраде. Брзина резања зависи од дебљине, тврдоће и врсте материјала који се обрађује (табела 1). Она представља брзину релативног померања резне главе у односу на обрадак у правцу резања (правац помоћног кретања резне главе је вертикалан на правац струјања млаза).

Брзина резања, mm					Дебљина материјала (mm)	Параметри обраде		
Короз. отпоран челик	Угљен. челик	Бакар	Алуминијум	Месинг		Притисак воде	Колич. додатог абразива (kg/min)	Пром. Млазнице (mm)
762	1270	1020	2030	762	1.6	3100	0.23	0.23
610	762	559	1270	457	3.2			
486	508	305	762	254	6.4	2400	0.68	0.33
254	305	152	457	102	12.7			
152	203	75	305	25	19	2400	0.91	0.46
102	152	38	203	13	25.4			
57	75	15	152	8	50.8	2400	1.46	0.56
25	25	3	102	3	100			

Табела 1. Препоручене брзине резања

Да би се побољшали резултати процеса резања за различите дебљине обратка, врши се подешавање брзине резања. Тиме се остварује жељени квалитет реза при задатим вредностима притиска воде и масеног протока абразива (слика 2.9).

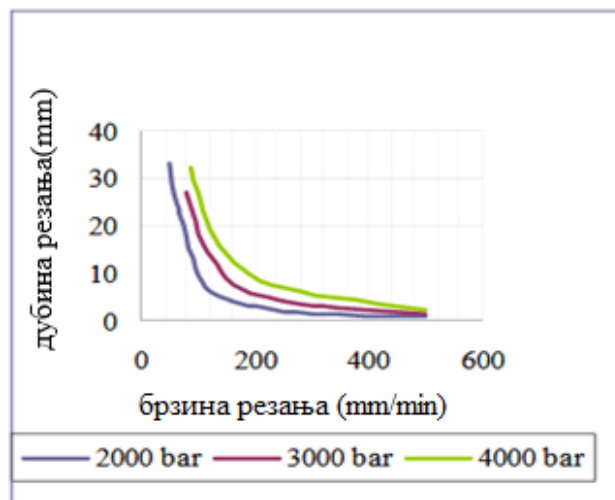
Остали фактори који карактеришу технологију резања воденим абразивним млазом су: конструкција агрегата високог притиска, конструкција материјала и обрада унутрашњег профила дизне, врста материјала који се обрађује, угао удара млаза, утицај влажности обратка, температура резања, ширина реза, итд.



Увођење ове технологије доноси огромне економске уштеде, не само при самом процесу резања, већ и услед изазваних ефеката, као што су: велике уштеде класичног

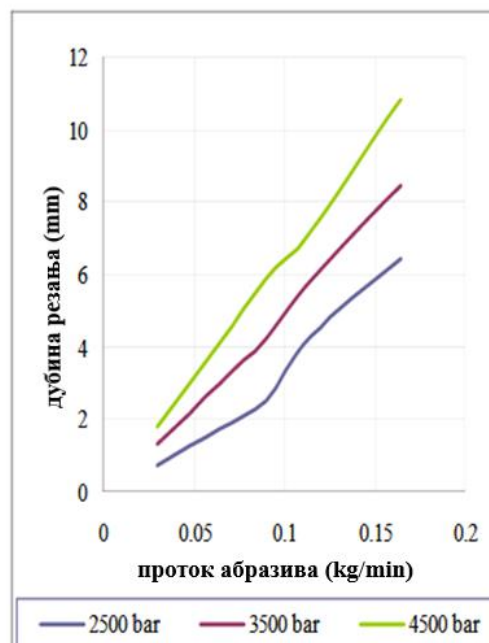
резног алата, уштеде везане за манипулацију, механичке и топлотне обраде при коришћењу класичних метода, уштеде у материјалу и енергији, као и побољшавање радне и животне средине. Међутим, приликом избора параметара који дефинишу обраду абразивним воденим млазом треба обратити пажњу и на производност, односно на економичност примене изабраних режима.

Максимална дубина реза коју је могуће постићи зависи пре свега од радног притиска и протока смеше воде и абразивних зрна. Зависност дубине реза од брзине резања при различитим радним притисцима смеше дата је на слици 2.10.



Слика 2.10. Дијаграм зависности дубине реза од брзине резања и радног притиска [4]

Са дијаграма зависности дубине реза од брзине резања може да се уочи да се при већем радном притиску остварују дубља продирења у материјал. Брзина резања негативно утиче на дубину реза за било који радни притисак.

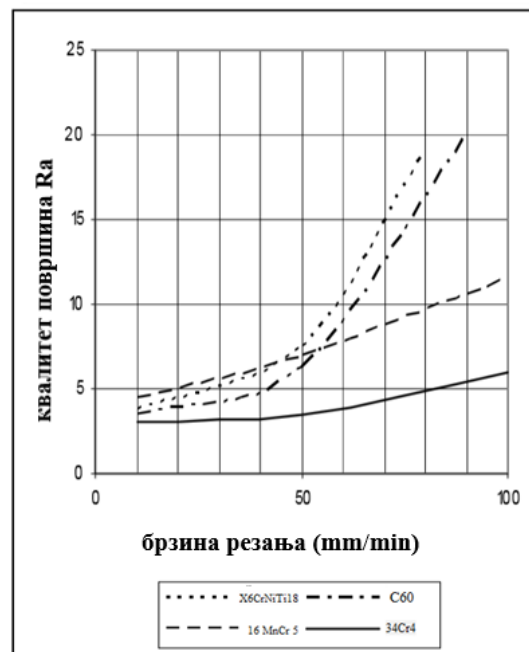


Слика 2.11. Дијаграм зависности дубине реза од протока абразива и радног притиска [4]

Зависност дубине реза од протока смеше са абразивом за три радна притиска дата је на слици 2.11. Са дијаграма се јасно види да повећање протока смеше, а самим тим и абразива омогућава дубље продирање у материјал.

На слици 2.12. је наведена зависност храпавости површине радног комада од брзине резања за различите врсте метала.

Храпавост добијене површине реза представља кључни фактор за сваку реализацију технолошке обраде резања материјала. Код свих испитиваних врста челика при брзинама резања од 60 mm/min практично се не мења квалитет површине R_a . Преко те брзине се квалитет површине R_a погоршава и то утолико више ако челик садржи више легирајућих елемената карбида, тј. никла, титана, хрома, ванадијума, молибдена и волфрама.



Слика 2.12. Дијаграм зависности квалитета површине R_a (μm) од материјала и брзине резања [4]

На основу приказаног, може се закључити да је квалитет обрађене површине различит по дубини реза и да на то највећи утицај има брзина помоћног кретања, односно брзина кретања предмета обраде.

Такође се уочава да повећање удаљености млазнице од површине предмета обраде доводи до повећања храпавости обрађене површине, с тим да његовим смањењем испод одређених вредности може доћи до раста висина неравнина, односно до погоршања квалитета обрађене површине.

Са повећањем радног притиска воде долази до фрагментације кристала абразива на мање делове, при чему се добија и финија обрада. Због тога се са повећањем радног притиска воде добија бољи квалитет обрађене површине, односно мања храпавост.

2.4 Могућност примене технологије

Технологија обраде воденим млазом први пут је индустријски примењена 1974. године у фирми BOEING (SAD) за сечење керамичких материјала који су се користили за топлотну изолацију космичких летелица.

Највећу популарност, ова обрада је стекла због могућности сечења великог броја различитих материјала и широког опсега дебљина. Материјали који су рефлектни, осетљиви на топлоту или имају велики коефицијент провођења топлоте, такође је могуће сећи абразивним воденим млазом. На слици 2.13. су приказани неки од делова који су добијени сечењем абразивним воденим млазом.



Слика 2.13. Делови израђени обрадом AWJ

Обрада абразивним воденим млазом се примењује за обраду делова од кртих материјала који су осетљиви на ударе (стакло, керамика, графит и сл.), обраду и дотеривање полупроводничких елемената и чишћење контактних површина у електронској индустрији, површинску фину обраду и обарање оштрих ивица, гравирање у електроници, оптици и другим подручјима.

Овим поступком обраде могу се сећи врло танки и ломљиви делови, дебљине од око 0,1 mm, без опасности од механичких или техничких оштећења, с обзиром да су силе и температуре при обради занемарљиво мале.

На слици 2.14. приказана је обрада стакла абразивним воденим млазом. У низу слика испод, приказано је како се бицикл прво исеца у стакленој плочи, а онда се исти облик исеца из метала.

При томе је веома битно да је бицикл пажљиво пројектован као једна непрекидна путања алата, што значи да постоји само један прорез на стаклу. AWJ постиже тако високу прецизност да се метални облик бицикла прецизно уклапа у стакло.



Слика 2.14. Обрада стакла абразивним воденим млазом [15]

Технологија ултра-високог притиска нуди практична решења за многе уобичајене проблеме у прехранбеној индустрији, везана за традиционалне методе резања као што је приказано на слици 2.15. Отпад производа, уска грла производње због ограничења опреме и ручна обрада, застоји у одржавању ножа, пренос бактерија и унакрсна контаминација су смањени или елиминисани.

Водени млазови су такође одлична алтернатива за резање меких материјала који су склони разбијању када се режу традиционалним уређајима за сечење.

Сви прерађивачи воћа, поврћа, кондиторских производа и месних производа тренутно користе технологију одвајања воденим млазом "Clean blade", за производњу воденог млаза и за производњу здравих прехранбених производа без патогена.



Слика 2.15. Примена абразивног воденог млаза у прехранбеној индустрији [14]

AWJ резање кривуље турбинских мотора (слика 2.16.) представља способност машине за обраду сложених комада са екстремним вештинама, што нам омогућава да пружимо додатну вредност и уштеду трошкова. Циљ ове обраде био је да се користи водени млазни процес како би се уклонило, што је могуће више материјала из сваке од 78 рупа овог комада и 30 периметарских капица како би се минимизирао завршни процес обраде.

Водени млаз сече уским прорезом, тако да делови могу бити чврсто груписани, чиме се максимизира употреба материјала. Компактна, лагана резна глава је дизајнирана за поузданост у високом циклусу.

У комбинацији са Jet Edge системом за контролу покрета, резање воденим млазом пружа изузетно прецизне резове са високим степеном поновљивости у широком распону материјала и облика.

Резање водом повећава стопе производње на папирним производима, тканим или нетканим текстилима и сличним материјалима без уситњавања или оштећења повезаних са конвенционалним методама обраде. Водени млаз брзо и прецизно реже флексибилне материјале и превазилази изобличења до којих долази услед компресије током конвенционалног резања.

У аутомобилској индустрији се широко примењују роботи за сечење тродимензионалних делова од пластичне масе, као што су: резервоари, браници, фелне за точкове од лакних легура, наслони за главу и за руке и др.



Слика 2.16. Турбина мотора [13]

У електронској индустрији се обрада абразивним воденим млазом користи за дораду отпорника, израду штампаних кола на подлози од тврдог материјала, обраду полупроводника и чишћење контактних површина од тврдых оксида и електро отпорних наслага. Овим поступком се може вршити прецизно дотеривање отпорника контролисаним скидањем материјала. Абразивним млазом се могу обављати различите операције обраде и означавања полупроводника од силицијума, арсенида и др. и то веома брзо и ефикасно.

У индустрији медицинских инструмената као и у механици, овај поступак обраде се користи за полирање и обарање оштрих ивица што се обично изводи ручним померањем млазника.

Абразивним воденим млазом се може вршити гравирање стакла доста брже и економичније него нагризањем киселинама или брушењем. Предност овог поступка обраде у односу на брушење је што је процес потпуно хладан, тако да не долази до структурних промена у предмету обраде и нема прогревања материјала, као и то што се одвија без удара. Међутим, при обради воденим и водено- абразивним млазом, због извесне девијације млаза (посебно при обради са већим померањима), долази до механичких оштећења предмета обраде у близини реза. Нехомогеност материјала проузрукује појаву механичких оштећења. Периферни делови млаза, који не врше резање,

разарају меке компоненте на радној површини, остављајући оштећену површину на одређеном растојању од радне зоне.

Нека од подручја у којима се примењује технологија резања воденим и абразивно-воденим млазом су приказана у табели 2. Обрада воденим и абразивним млазом данас има највећу примену за резање композитних материјала (стакло, пластика и сл.) и танких металних лимова, за заобљавање оштрих ивица (посебно на тешко приступачним местима), за резање штампаних електричних кола у електронској индустрији, у прехранбеној и дрвно-прерађивачкој индустрији, за резање алатних челика и слично.

<i>Примена воденог млаза</i>	<i>Подручје примене</i>
1. Резање пластике 2. Резање папира и целулозе 3. Резање влакна и текстила 4. Резање гуме и коже 5. Резање хране 6. Резање дрвета и шперплоче 7. Резање крутог горива и леда	1. Пластична индустрија 2. Индустрија папира 3. Текстил и одећа, спортска опрема 4. Индустрија гуме, производња обуће, кожна индустрија 5. Прехранбена индустрија, кондиторска индустрија 6. Шумарство 7. Шумарство, украсна индустрија
<i>Примена абразивног воденог млаза</i>	<i>Подручје примене</i>
1. Резање титана, алуминијума, инокса, челика високе чврстоће, легура 2. Резање стакла, армирано стакло, ламинарно стакло 3. Резање композитних материјала, керамике, магнетских материјала 4. Завод за грађевинске материјале, бетон 5. Резање истрошеног горива (шипке), графитне	1. Ваздухопловство, аутомобилска индустрија, бродоградња, производња мостова и сл. 2. Ваздухопловство, аутомобилска индустрија, керамика, електроничка индустрија 3. Грађевинска индустрија 4. Нуклеарне електране..
<i>Примена у другим подручјима</i>	<i>Подручје примене</i>
1. Резање бетона и цемента 2. За резање камена 3. За резање отпада 4. Резање малих тунела	1. Цементна индустрија, грађевинарство, демонтажа 2. Рударство 3. Обрада камена 4. Грађевинарство

Табела 2. Подручје примене воденог и абразивно- воденог млаза [7]

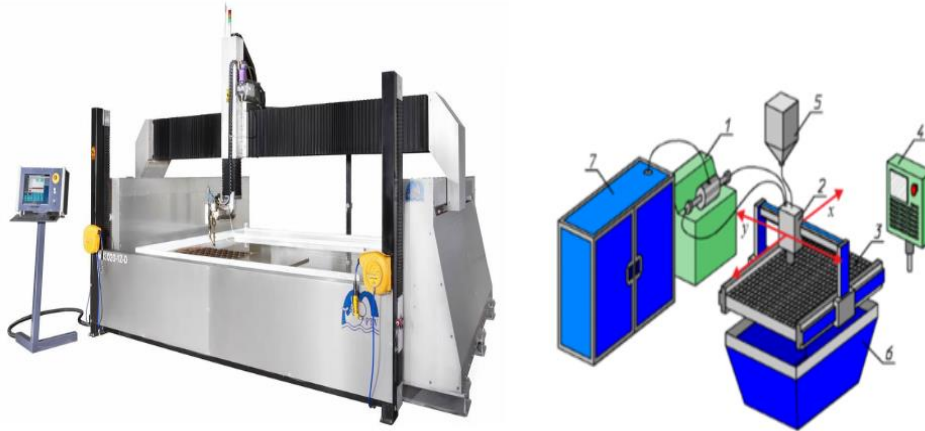
Резање композитних материјала (фибер пластика ојачана стакленим, најлонским, текстилним или другим влакнима) тешко се изводи како конвенционалним, тако и неконвенционалним методама заснованим на термичком дејству. Обрада воденим и водено- абразивним млазом је хладан процес тако да не долази до структурних промена у предмету обраде и нема прогоревања материјала. Међутим, при обради воденим и водено-абразивним млазом, због извесне девијације млаза (посебно при обради са већим

померањима), долази до механичких оштећења предмета обраде у близини реза. Нехомогеност материјала проузрукује појаву механичких оштећења. Периферни делови млаза, који не врше резање, разарају меке компоненте на радној површини, остављајући оштећену површину на одређеном растојању од радне зоне

Повећање пречника отвора дизне, незнатно утиче на смањење ширине оштећене површине. Веома је важно одржавати константну вредност притиска (преко 3000 бара). Пораст притиска доводи до повећања брзине померања, која значајно утиче на ширину оштећене површине. Са порастом брзине, ширина нагло расте.

3. МАШИНЕ ЗА ОБРАДУ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

Машина за обраду абразивним воденим млазом је сложен обрадни систем чије компоненте представљају производ врхунске технологије. Намењена је за прецизна контурна сечења, најчешће равних (2D) предмета. У пракси се данас срећу различите врсте и конструкције машина за сечење абразивним воденим млазом. На слици 3.1 је приказана стандардна конфигурација машине за сечење абразивним воденим млазом.



Слика 3.1. Изглед и делови машине за обраду абразивним воденим млазом [2]

Машина за обраду абразивним воденим млазом се састоји од следећих основних компоненти (слика 3.1):

1. Погонски део- појачавач притиска;
2. Извршни део- резна глава;
3. Координатни радни сто;
4. Управљачка јединица (CNC);
5. Магацин абразива са системом за довод абразива;
6. Апсорбер- хватач неискоришћене енергије абразивног воденог млаза;
7. Систем за припрему воде.

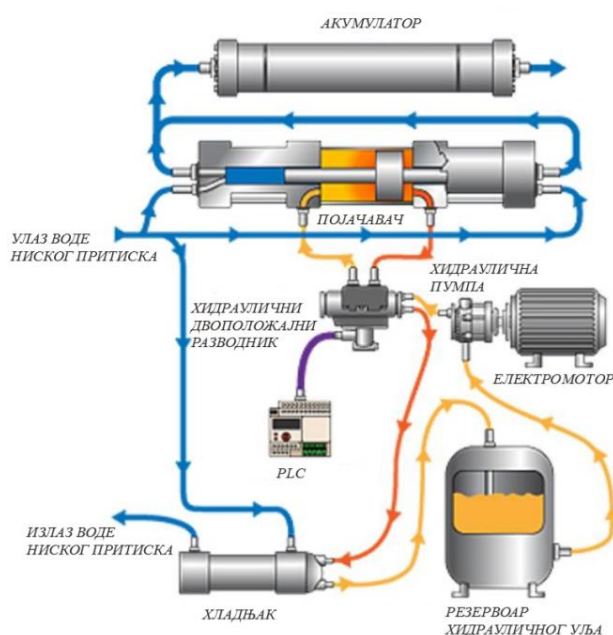
Систем за припрему воде

Систем за припрему воде служи да се вода која се користи у процесу обраде очисти од механичких и хемијских нечистоћа како би се смањило хабање елемената пумпе високог притиска, заптивки и млазнице. Према квалитету воде која се употребљава пројектује се уређај за припрему воде. Чврсте материје се одстрањују филтрирањем кроз низ филтера, постепено почевши од сита са отворима од 20 μm , па све до најфинијег које има величину отвора 0.5 μm . Растворене соли се могу одстранити на више различитих начина, од којих је најједноставнији омекшавање воде.

Други начин је применом обрaтне осмозе, при чему се вода филтрира кроз веома fine мембране које уклањају нечистоће на молекуларном нивоу. Трећи начин је примена јонског измењивача.

Погонски део

Погонски део је најважнији елемент, тј. „срце“ машине за сечење абразивним воденим млазом. Она ствара потребан радни притисак и снабдева машину потребном количином воде. Његов задатак је да обезбеди жељени притисак воде и одговарајући проток, и да ту воду кроз цевовод високог притиска допреми до извршног дела машине. На слици 3.2. је приказана шема најчешће примењиваног облика погонског дела инсталације за обраду абразивним воденим млазом.



Слика 323. Погонски део инсталације за обраду абразивним воденим млазом, шематски приказ и изглед [2]

Погонски део се састоји из следећих компоненти:

- Електромотор;
- Хидраулична пумпа са хидрауличним разводником;
- Пумпа високог притиска- појачавач (мултипликатор) притиска;
- Акумулатор притиска;
- Резервоар хидрауличног уља;
- Хладњак.

Најважнији део погонског дела је пумпа високог притиска. У обрадним системима за обраду абразивним воденим млазом се могу користити два типа пумпи високог притиска: клипна пумпа са директним погоном и појачавач притиска.

Појачавач притиска

Појачивачи се често називају и мултипликатори јер појачавају, односно умножавају радни притисак. Принцип рада појачавача притиска је доста једноставан и приказан је на слици 3.3. Притисак који делује на велику површину клипа се на малој површини клипњаче, која служи као клип, увећава онолико пута колики је однос површине великог и малог клипа. На површину великог клипа делује хидраулично уље, док се испред малог клипа налази вода.

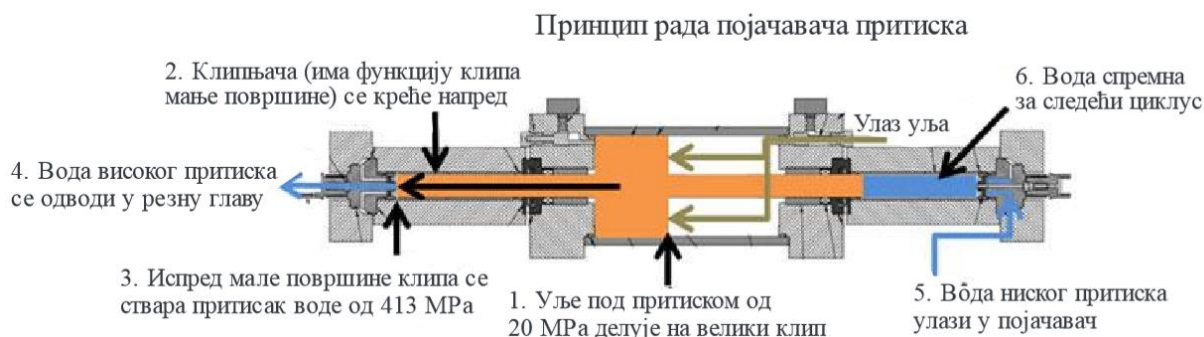


Слика 3.3. Однос површина одређује степен појачавања притиска [2]

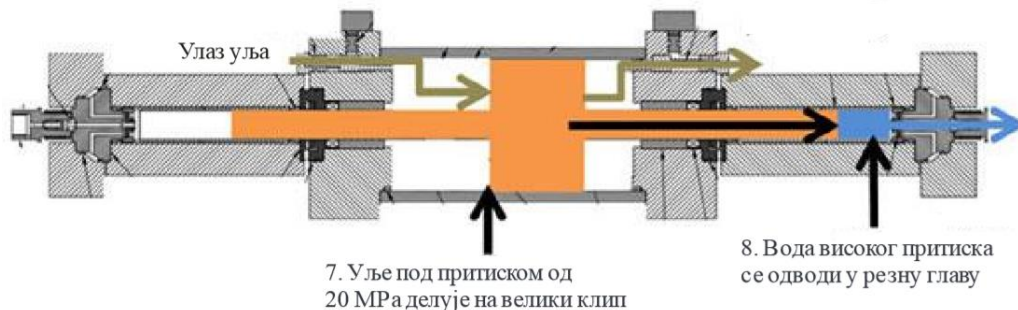
$$P_{ulj} \cdot A_{ulj} = P_{vod} \cdot A_{vod}$$

$$P_{vod} = P_{ulj} \cdot \frac{A_{ulj}}{A_{vod}}$$

Из ових формула се види да притисак воде директно зависи од односа површина великог и малог клипа. Што је овај однос већи и притисак је већи. Однос површина најчешће није већи од 20. Принцип рада појачавача притиска и процес добијања високог притиска је приказан на сликама 3.4. и 3.5.



Слика 3.4. Принцип рада појачавача притиска, крајњи леви положај



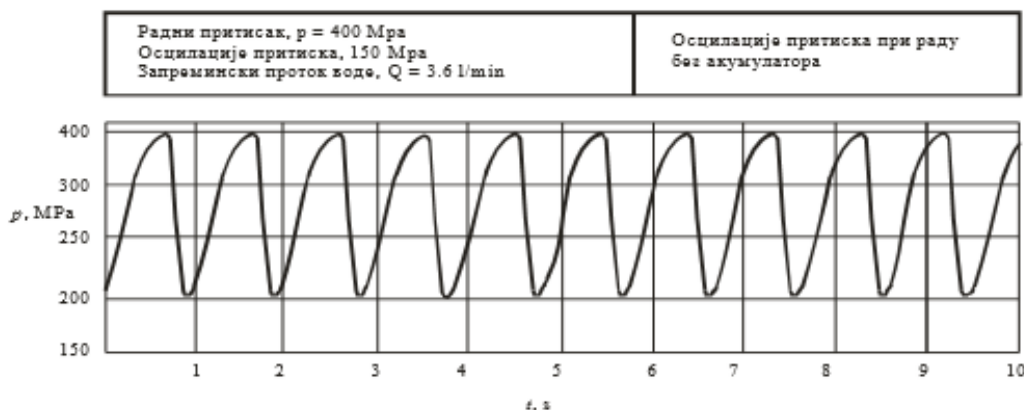
Слика 3.5. Принцип рада појачавача притиска, при кретању у десно [2]

Поступак добијања високог притиска, који је приказан на сликама 3.4. и 3.5. се може објаснити на следећи начин:

1. Уље под притиском делује на десну страну клипа.
2. Клип се под дејством уља помера на леву страну.
3. Мањи клип истом силом делује на воду која се налази испред њега, само на знатно мањој површини. Услед овога притисак у води расте до максималне вредности.
4. Када притисак у води расте, вода излази у цевовод кроз неповратан вентил.
5. Док се клип креће на леву страну, истовремено се на десној страни врши усисавање нове количине воде потребне за даљи процес.
6. Када се клип налази у крајњем левом положају, десна страна је спремна за нови циклус.
7. Хидраулични двоположајни разводник добија сигнал да се цилиндар налази у крајњем левом положају, мења свој положај и преусмерава уље. Уље сада делује на леву страну великог клипа и помера га на десну страну.

Акумулатор притиска

Акумулатор притиска служи да смањи осцилације у вредности радног притиска. До ових осцилација долази због самог принципа рада појачавача притиска. Наиме, када један цилиндар високог притиска заврши свој ход, други цилиндар високог притиска креће у радни ход и сабија воду испред себе до задатог притиска. Вода се на притиску од 400 МПа може сабијати за 12%, тако да се први део радног хода цилиндра високог притиска користи за сабијање воде, што значи да у том интервалу долази до пада притиска. Ове осцилације притиска се могу кретати и до 150 МПа, слика 3.6.



Слика 3.6. Осцилације радног притиска [2]

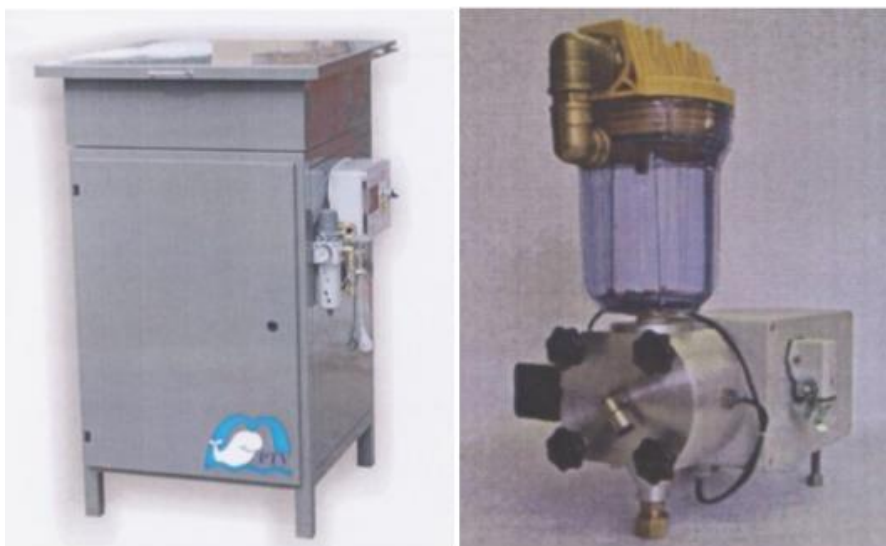
Магацин абразива са системом за довод абразива

Да би систем почео да ради неопходно је да се магацин напуни абразивом. У магацин абразива се преко електромагнетног вентила доводи ваздух под притиском.

Помоћу ваздуха се врши транспорт абразива. Начин на који је магацин повезан са остатком инсталације уређаја за дозирање абразива не омогућава континуалан доток абразива у систем. Да би се процес обраде абразивним воденим млазом неометано обављао потребно је обезбедити континуални доток константне количине абразива у водени млаз. То омогућава уређај за дозирање количине абразива, слика 3.7.

Овакав уређај омогућава прилагођавање протока абразива тренутним захтевима обраде, што обезбеђује:

- Смањење потрошње абразива,
- Смањење времена потребног за обраду,
- Смањење могућности загушивања абразивне млазнице при почетном процесу материјала,
- Повећање квалитета обрађене површине,
- Продужење века трајања абразивне млазнице.



Слика 3.7. Магацин абразива са системом за довод абразива [2]

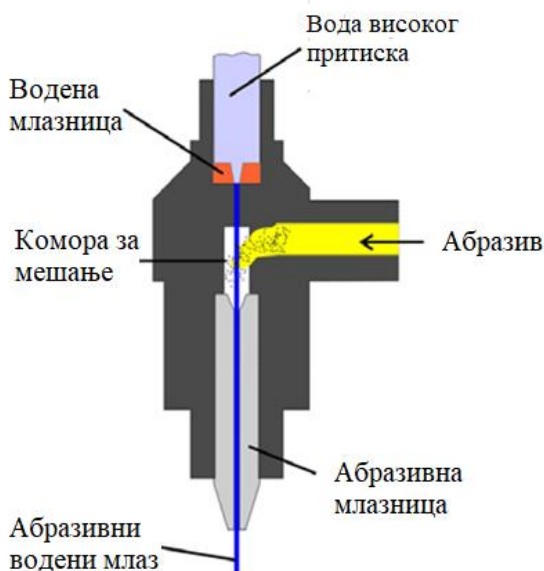
Резна глава

У резној глави се вода високог притиска претвара у узани млаз коме се затим додаје абразивни материјал како би формирали абразивни водени млаз. Конструкција и подешавање саставних делова склопа резне главе су од виталног значаја за ефикасност процеса сечења. Резна глава се састоји од: тела, цеви за довод воде под високим притиском, цеви за довод абразива, водене млазнице, коморе за мешање и цеви за фокусирање абразивне млазнице (слика 3.8).

Задатак водене млазнице је да потенцијалну енергију воде, сабијене на висок притисак, претвори у кинетичку енергију млаза. При притиску воде од 400 МПа постиже се брзина истицања воденог млаза од 900 m/s или 2.7 пута више од брзине звука. Пречник отвора водене млазнице износи од 0.1 до 0.4 mm.

При сечењу абразивним воденим млазом, иза водене млазнице, у резној глави се налази комора за мешање воде и абразива, на коју се надовезује цев за фокусирање абразивна млазница. Она има дужину приближно 70 до 75 mm и унутрашњи пречник од 0.8 до 1.2 mm.

Препорука је да се, у склопу резне главе, употреби абразивна млазница чији је пречник отвора 3 до 4 пута већи од пречника отвора млазнице.



Слика 3.8. Резна глава (шематски приказ) [2]

Радни сто

Димензије и конструкција радног стола машине за обраду абразивним воденим млазом зависе од димензија предмета обраде, врсте обраде и жељеног квалитета обраде. Да би се остварило резање по задатој контури, неопходно је остварити релативно кретање између резне главе и предмета обраде. Уколико су задате контуре дводимензионалне, довољне су машине са 2½ осним управљањем, док су за тродимензионалне контуре потребне машине са 5–осним управљањем. Најчешће су у примени порталне машине са троосним управљањем. Координатни столови су крути рамови испод којих се налазе апсорбери - хватачи енергије абразивног воденог млаза, преостале након обраде.

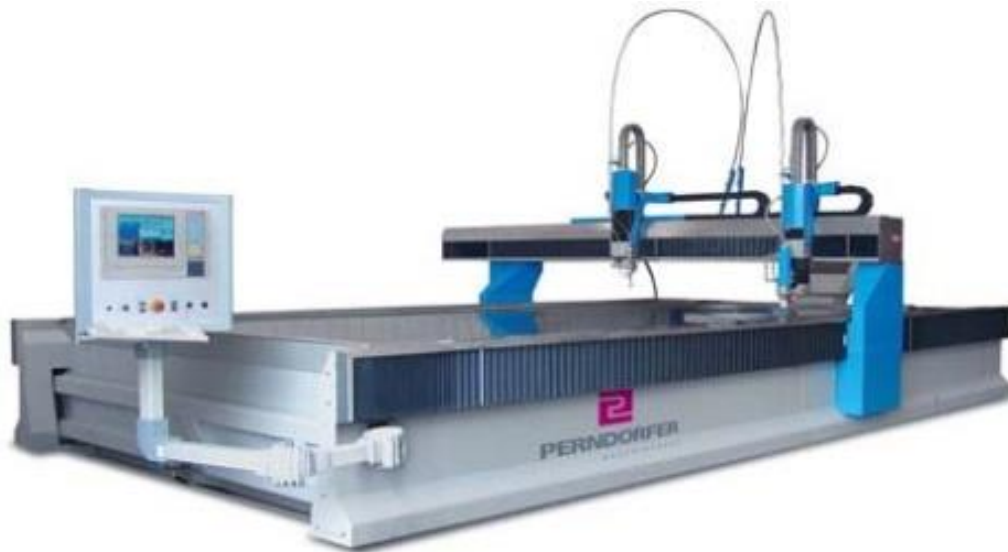
Инсталација високог притиска

Цеви које се користе у инсталацијама високог притиска на машинама за обраду абразивним воденим млазом су најчешће направљене од челика X5CrNi 18–10. Спољњи пречници су најчешће 0.25", 0.313", 0.375" и 0.563", док су унутрашњи пречници у распону од 0.062" до 0.312". Око цеви се обично ставља флексибилни заштитни омотач. Приликом прорачуна цевовода високог притиска на машинама за обраду абразивним воденим млазом се мора водити рачуна о дужини цевовода, броју савијања, рачвама и другим препрекама, јер свака препрека доводи до пада притиска у цевоводу.

Механички систем за кретање

Конструкција и димензије механичког дела машине за сечење абразивним воденим млазом, који обезбеђује кретање, одређени су величином предмета обраде, као и врстом обраде и жељеном тачношћу обраде.

Да би могло да се изврши сечење по контури, потребно је остварити релативно кретање између резне главе и обратка. То се постиже механичким системом за кретање који је нумерички управљан. При сечењу дводимензионалних предмета довољне су машине са $2^{1/2}$ осним управљањем. То су две осе за обраду контуре (X, Y кретање) и једна оса по којој се врши подешавање растојања резне главе од обратка. У пракси преовлађује коришћење порталних машина за 2D обраду са троосним вођењем (слика 3.9.). Испод координатних столова је резервоар апсорбера енергије воденог млаза.



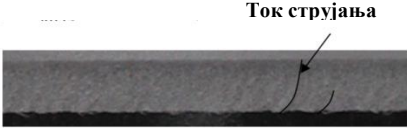
Слика 3.9. Портална конструкција машине за 2D обраду воденим млазом [2]

4. СИСТЕМАТИЗАЦИЈА ГРЕШАКА ПРИ ОБРАДИ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

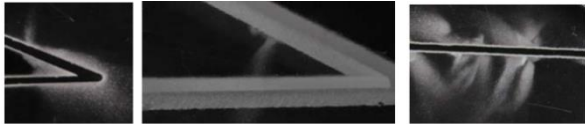
У овом поглављу је приказана систематизација грешака обраде абразивним воденим млазом. Објашњен је поступак обраде абразивним воденим млазом у OFFSET-моду као и утицајни параметри обраде на геометријску грешку делова. Приказана је анализа експеримената преузета из литературе као и кључни параметри који карактеришу грешке у профилу резног жљеба.

4.1 Процена грешака при резању

Да би се остварио захтевани квалитет обраде резањем, веома је значајна прецизност машине, као и одговарајући управљачки софтвер, јер се показало да добар софтвер може повећати брзину резања. Подручја толеранције која се могу постићи на машинама за резање воденим млазом су $+0,025 \text{ mm}$ до $-0,025 \text{ mm}$. Реалнији распон толеранције је $+0,05 \text{ mm}$ до $-0,05 \text{ mm}$. Неки резултати су приказани на слици 4.1. Динамички тестови тачности се спроводе или резањем делова или пак уређајем званим *Ballbar*. *Ballbar* поступак тестирања је укључен у низ стандарда за прецизност алатних машина, тј. ISO 230, ASME B5.54 и BS3800. Његова тачност је приближно $\pm 0,5$ микрона, или 20 микроинча на 20°C .

Грешка резања	Опис
Скретање млаза	Струја се повија уназад (у смеру супротном од смера кретања) када снага резања почиње да опада. Овај проблем узрокује: повећану коничност, грешке у угловима и брисање изван лукова. Приликом сечења при великом посмаку по луку или кружности, млаз заостаје, правећи конус. 
Коничност при резању	Конус у облику слова „V“ се јавља при великој брзини кретања млаза и великој дебљини материјала. 
Грешке унутар оштрих углова	Код пресецања оштрих углова великим посмаком, млаз може укопати комад, па чак и изаћи из контуре. 

Слика 4.1. Грешке резања при обради плексигласа [8]

Грешке стезања радног комада	Било да <i>waterjet</i> даје вертикалну силу од 200 Н када се изводи висококвалитетно сечење или силу од 2000 Н при грубом сечењу, правилно фиксирање (стежање) радног комада је неопходно за добијање жељене тачности. Због струјања честица и њене аберације, постоје оштећења и на доњој површини плоче. 
Нестабилност температуре радног комада	Неки материјали, као пластика, могу бити врло осетљиви на промену температуре. Ови материјали се могу ширити при загревању и скупљати при хлађењу. При резању воденим млазом материјал може доћи до извесног загревања материјала
Грешка додатка за обраду резањем	Кратке млазнице дају млаз који први рез ширине 0,5 mm, док дугачке млазнице дају рез ширине 0,076 mm. Додатак за обраду треба да увећа димензију радног комада узимајући у обзир ширину реза, тако да се после обраде добије тачна димензија комада. Препоручује се извођење пробног сечења, како би се што тачније израчунао додаток за обраду. 
Кинематске грешке	Има много аспеката перформанси кретања машине. Неки су: празан ход, поновљивост, прецизност позиције, правост, равност и паралелност. Осцилације између покретних делова система и предмета обраде резултираће веома лошим квалитетом обраде. 
Грешке неодговарајућег притиска при резању	Грешке високог притиска 
Грешке неодговарајућег притиска при бушењу отвора	Грешке високог притиска  Грешке ниског притиска (недовољна сила резања) 

Слика 4.1. Грешке резања при обради плексигласа [8] (наставка)

У оквиру овог завршног рада приказани су резултати истраживања и проба резања, рађена на уређају *OMAX water jet* са летећом главом. (слика 4.2) [8].



Слика 4.2. Систем за сечење који је коришћен у проби

Техника омогућава да чиста вода пролази кроз млазнице малог пречника, $0,18 \div 0,35$ mm, при врло високом притиску, обично $3000 \div 4000$ bar-а. Вода потом истиче брзином од $700 \div 850$ m/sec, носећи довољно кинетичке енергије да оствари сечење било ког материјала који се налази испод млаза. Као фактор који одражава енергију, брзина воде се може рачунати из Бернулијеве једначине:

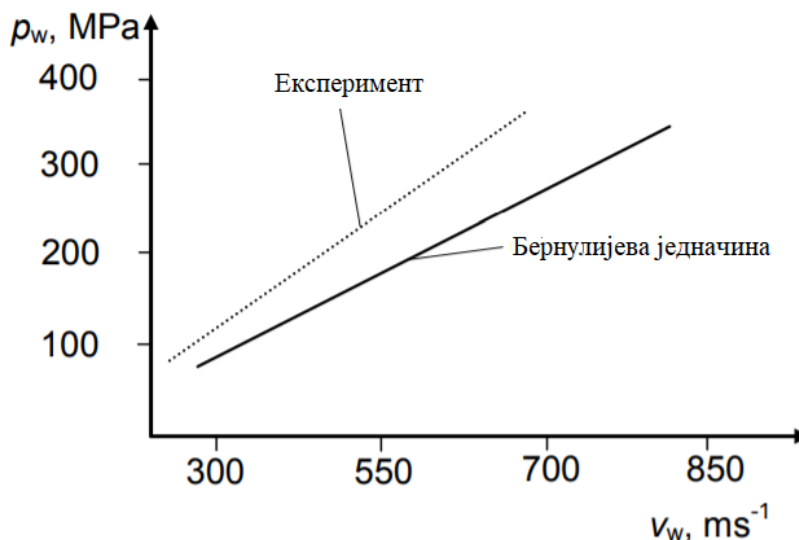
$$v = \left(2 * p * \frac{g}{\rho} \right)^{1/2}, \text{ где је:} \quad (1)$$

p - номинални излазни притисак [Pa],

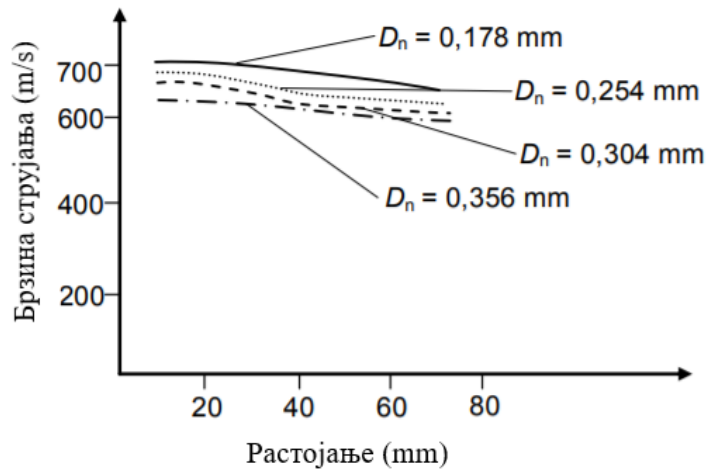
ρ - густина [kg/m^3],

g - гравитациона константа [m/s^2].

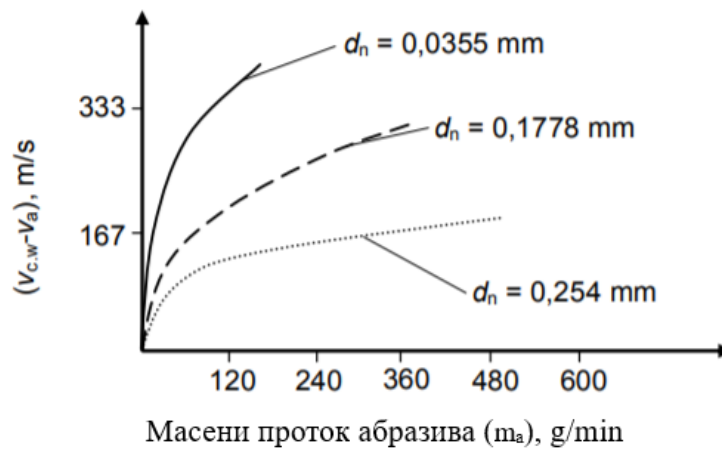
Слика 4.3. показује брзину водене струје израчунате из Бернулијеве једначине за различите притиске воде. Слика 4.4. показује утицај пречника млазнице и њене удаљености од предмета обраде на брзину воде, при притиску од 3250 bar. Један од већих трошкова при сечењу уз употребе абразива је цена абразива. Слика 4.5. приказује како маса абразивних честица утиче на брзину струје воде и абразива, за различите пречнике млазнице.



Слика 4.3. Однос притиска и брзине воденог млаза [8]



Слика 4.4. Процењене вредности брзине водене струје при притиску од 325 МПа [8]



Слика 4.5. Утицај масеног протока абразива на $(V_{cw} - V_a)$, m/sec [8]

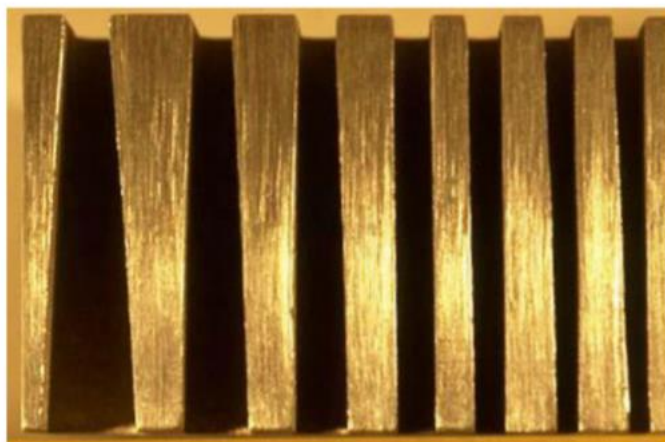
4.2 Кључни параметар који карактерише грешке у профилу резног жљеба код обраде абразивним воденим млазом

За разлику од традиционалних производних метода, у којима је профил реза фиксни и одговара облику алата, AWJ -ов профил сечења се мења када се промени било који параметар резања.

Многи истраживачи су уложили много напора да истраже профил AWJ-а. Већ 1990. године, Matsui et al. показали су да је профил реза функција брзине резања. Према Matsui et al., закривљеност профила сеже од конвексног до конкавног, како се брзина резања смањује.

У 2009. Zeng et al. навео је да је профил реза конвексан у танком радном комаду и конкаван у дебелом комаду. Као резултат тога, профили AWJ-а могу се појавити у различитим облицима. Неки од њих се појављују као позитиван трапезоид на попречном пресеку, а неки као обрнути трапезоид. Други се појављују као цев на попречном пресеку, итд., као што је приказано на слици 4.6. Како се било који од параметара резања мења,

профил може променити изглед. Стога је велики изазов добити прецизан профил сечења користећи AWJ као резни алат.



Слика 4.6. Промене профила реза у зависности од промене услова резања (брзина резања расте са лева на десно) [11]

Да би добили прецизно сечење, неки други истраживачи користили су конусну грешку као карактеристику профила резања, који је направио AWJ. Конусна грешка је дефинисана као пола разлике између горње и доње ширине реза. Угао конуса је дефинисан као аркустангенс грешке у конусу у односу на дебљину.

Hashish је 2007. године, објавио да се конус повећава са повећањем брзине резања. Према Maccarini et al. 2008. године је откривено да се конус повећава са повећањем тврдоће предмета обраде. Штавише, многи истраживачи су истраживали конус различитих материјала који су обрађивани AWJ поступком и открили односе између параметара конуса и резања, као што су брзина резања, притисак воде итд.

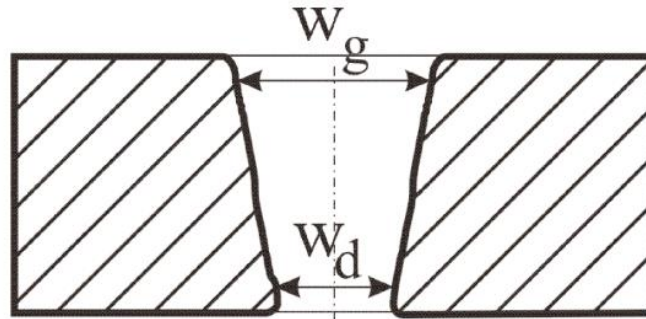
Осим тога, неки истраживачи су покушали да користе математичке моделе за карактеризацију конусне грешке. Године 1992, Chung et al. је извео једначину линеарне регресије која је показала да је конус у корелацији са пречником цеви за мешање, величином протока абразива, растојање између млазнице и предмета обраде, итд. Такође 1998. године, Groppetti et al. претпоставио је да улазна енергија опада дуж дебљине материјала, а затим је извео математички модел конусног сужења.

Године 2000, Annoni et al. изводи релативно једноставан конусни модел заснован на анализи вишеструке линеарне регресије. Након познавања фактора који утичу на конус, предложена је и примењена у AWJ поступку резања, метода која би могла да елиминисе конусну грешку. У овој методи, глава за сечење је нагнута малим углом дуж правца, који је управан на смер кретања главе за сечење, да би се компензовала конусна грешка. Од тада, овај метод се у великој мери користи у индустрији у циљу елиминисања конусне грешке. Међутим, ни једна грешка у конусу се не може потпуно елиминисати коришћењем горњег метода, јер се профил реза може појавити у различитим облицима под различитим условима сечења.

Основне карактеристике површине обрађене абразивним воденим млазом су:

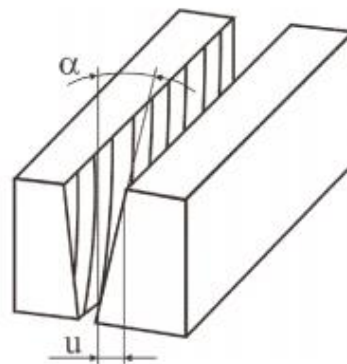
- Ширина реза;
- Коничност реза;
- Храпавост обрађене површине.

Ширина реза пружа представу о вредности најмањег унутрашњег радијуса који се може остварити у процесу сечења. Ширина реза, такође, утиче на путању алата како би се остварила тражена димензиона тачност. При сечењу абразивним воденим млазом рез је обично шири у горњем делу, него у доњем делу, што се може видети на слици 4.7.



Слика 4.7. Ширина реза [16]

Код обраде воденим млазом, конус се односи на разлику у ширини реза на врху реза и ширини резања на дну реза. Конусност реза (слика 4.8.) је од интереса јер пружа представу о могућности налегања предмета преко површине реза, тј. да ли је потребна накнадна обрада. Дефинисана је преко вредности одступања од управности (u) стране реза, која представља растојање између две паралелне линије које ограничавају горњу и доњу ивицу површине стране реза и нагиба реза који одговара углу за који је површина стране реза нагнута у односу на вертикалну раван.



Слика 4.8. Конусност реза [16]

Типичан облик реза воденог млаза има незнатно сужавање од горње ка доњој површини, а најчешћи тип је конус у облику слова V, као што је приказано на слици 4.9. Овај тип сужења се ствара зато што водени млаз губи део енергије за резање са дубином уласка у материјал. Нешто више материјала се скида на врху реза, где млаз улази у

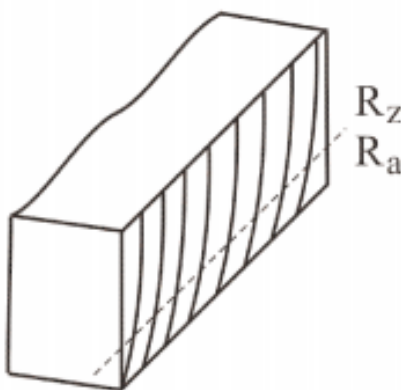
материјал, него на дну реза, где млаз излази. Конус у облику слова V обично се повезује са брзином резања. У принципу, што је већа брзина млазнице, то ће конус бити наглашенији. Мале брзине резања могу произвести обрнути конусни облик тамо где је ширина реза већа на дну реза него на врху. Ово је резултат струјања млаза који скида више материјала на дну реза него на његовом врху. Обрнути конус се може појавити и при резању веома меких материјала.

Трећи тип конуса је конус бачве, где је ширина резног жљеба највећа у средини. Овај тип сужења може настати приликом резања веома дебелих материјала. Постоје и други, мање уобичајени типови конуса који се могу појавити, али они су узроковани грешкама калибрације или подешавања параметара, а не природном физиком воде.



Слика 4.9. Типови конуса [12]

Храпавост површине реза (слика 4.10.) се користи за описивање површине странице реза и даје индикацију да ли је потребна накнадна машинска обрада. Дефинише се помоћу средње висине неравнина R_z или средњег аритметичког одступања профила R_a . Површина реза никада не може бити идеално глатка. Састоји се од микронеравнина у облику бразди, насталих у току процеса обраде. Поред микронеравнина, постоје и макронеравнине, које могу бити периодично поновљиве (валовитост), или се јављају само местимично (огреботине, напрсине, јамице) и последица су случајних грешака. Механизам стварања микронеравнина (бразди, стрија) на површини странице реза, при сечењу абразивним воденим млазом је још увек недовољно истражен.



Слика 4.10. Храпавост површине реза [16]

Предмет обраде је дефинисан, према конструкцијској документацији (радионичком цртежу) одређеним бројем карактеристика:

- Геометријских (облик и положај површина и димензија);
- Механичких (материјал, чврстоћа, тврдоћа) и
- Технолошких (дозвољена одступања облика и положаја, толеранције димензија, квалитет обрађене површине).

За оцену процеса сечења абразивним млазом, највећи утицај има група геометријских карактеристика, јер одређује геометријски изглед предмета. Групу геометријских карактеристика предмета чине:

- Тачност димензија;
- Тачност облика;
- Квалитет реза.

Постоји разлика између тачности издатка и тачности позиционирања алатне машине. Тачност алатне машине се не преноси директно на тачност издатка, Куповина тачне алатне машине не значи и то да ће изидак бити тачних димензија. Скупа, супер прецизна машина, не гарантује аутоматски тачност израде дела од ± 0.025 mm, већ на ту тачност утичу и други фактори. Тачност издатка је комбинација утицаја: процеса обраде, алатне машине, резне главе и стабилности обратка. Највеће грешке последица су самог процеса обраде. Тачност позиционирања координатног радног стола машине за сечење абразивним воденим млазом је уобичајено око 0.01 mm при праволинијском померању. Међутим, тачност обраде је између ± 0.07 и ± 0.4 mm када је дебљина материјала мања од 25 mm, односно, тачност је између 0.5 и 1.5 mm, када је дебљина материјала већа од 25 mm.

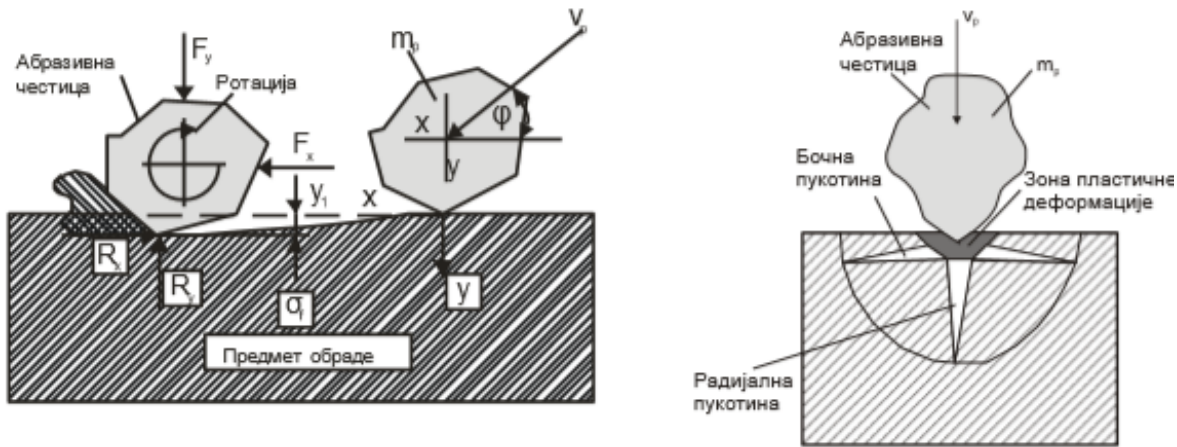
Тачност геометријских карактеристика реза је значајна за производњу, јер осигурава тачне толеранције израђеног дела и избегава се накнада обрада.

Површина обрађена абразивним воденим млазом има карактеристичан изглед и приказан је на слици 4.11.



Слика 4.11. Изглед површине обрађене абразивним воденим млазом

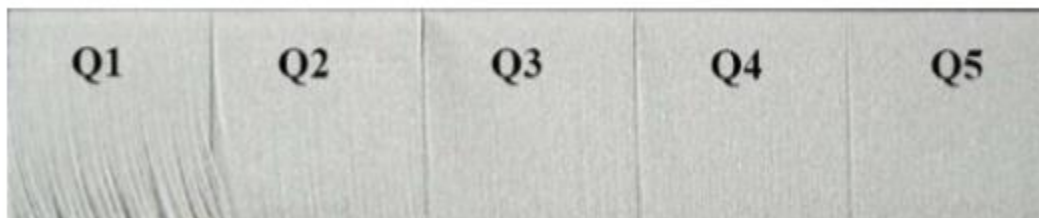
Када се обрађена површина посматра под микроскопом, на површини се може уочити појава различитих рупа и бразди, које су последица микропластичне деформације материјала и микрорезања материјала, слика 4.12.



Слика 4.12. Основни процеси који се јављају при ерозији материјала: а) микро-резање код пластичних материјала и б) лом материјала код кртих материјала

Као што се на слици види, микро-резање, слика 4.12. а), подразумева образовање бразди које су последица пластичне деформације материјала. Лом материјала, који се јавља при обради кртих материјала, је карактеристичан по томе што се у зони контакта материјала и абразивне честице јављају пластичне деформације са подповршинским бочним пукотинама и радијалним пукотинама које су управне на површину материјала, слика 4.12.б). Бочне пукотине су одговорне за уклањање вишка материјала, док се као последица појаве радијалних пукотина јавља смањење чврстоће материјала. Ове појаве се, углавном, не дешавају независно једне од других, већ се при обради јавља њихова комбинација. Која од ове две појаве ће бити заступљенија, односно доминантни механизам обраде зависи од карактеристика материјала који се обрађује. Код пластичних материјала се углавном јављају микро-пластичне деформације, док код кртих материјала основни механизам ерозије је појава микропукотина.

Што се тиче квалитета обрађене површине, најчешћа подела је у пет карактеристичних група, слика 4.13. Обрађена површина која је у квалитету Q1 је карактеристична за грубо одсецање са великим брзинама кретања резне главе. За раздвајање расечених делова је потребна додатна сила јер на појединим местима није дошло до потпуног расецања. За овако добијене делове је потребна додатна обрада.



Слика 4.13. Пет карактеристичних квалитета обрађене површине

Квалитет обрађене површине Q2 се добија при исецању делова (долази до потпуног раздвајања делова) и најчешће је потребна даља обрада. Квалитет обрађене површине Q3 је захтевнији од претходна два. Да би се добио овакав квалитет обрађене површине неопходно је ускладити брзину кретања резне главе, радни притисак и проток абразива. Са

оваквим режимима обраде могу се израђивати неки непокретни делови, односно у зависности од намене није неопходна њихова даља обрада. Квалитет обрађене површине Q4 је бољи од квалитета обрађене површине Q3. У овом квалитету могу бити израђени многи делови без додатне обраде. Квалитет обрађене површине Q5 је веома висок и примењује се за исецање високо прецизних делова. Овај квалитет обрађене површине се постиже са веома малим брзинама кретања резне главе, при чему време обраде није критеријум за избор режима обраде. Ширина реза при сечењу са оваквом брзином кретања резне главе је константна по целој висини реза.

4.3 Утицаји параметара процеса на геометријску грешку

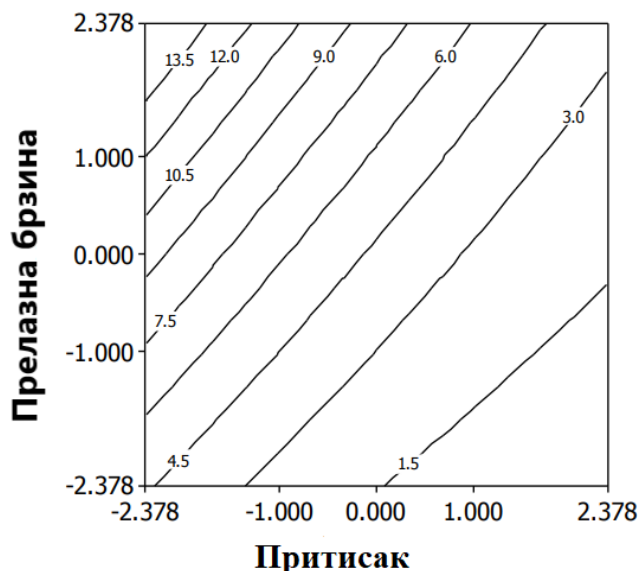
Проценат доприноса утицаја модела израчунат је из њихове секвенцијалне суме квадрата (Sek SS) и графички је приказан на слици 4.14. То илуструје да, између параметара процеса, притисак воде, брзина кретања резне главе и дубина резања су најутицајнији параметри у контроли геометријске грешке дела и масеног протока абразива као најмање утјецајног параметра с процентом доприноса мањим од 1%. Како брзина обртања радног предмета није имала значајан утицај на резултате AWJT у испитиваним опсезима, она је искључена из даљег разматрања у овом раду.



Слика 4.14. Процентуални допринос појединих утицаја на геометријску грешку [9]

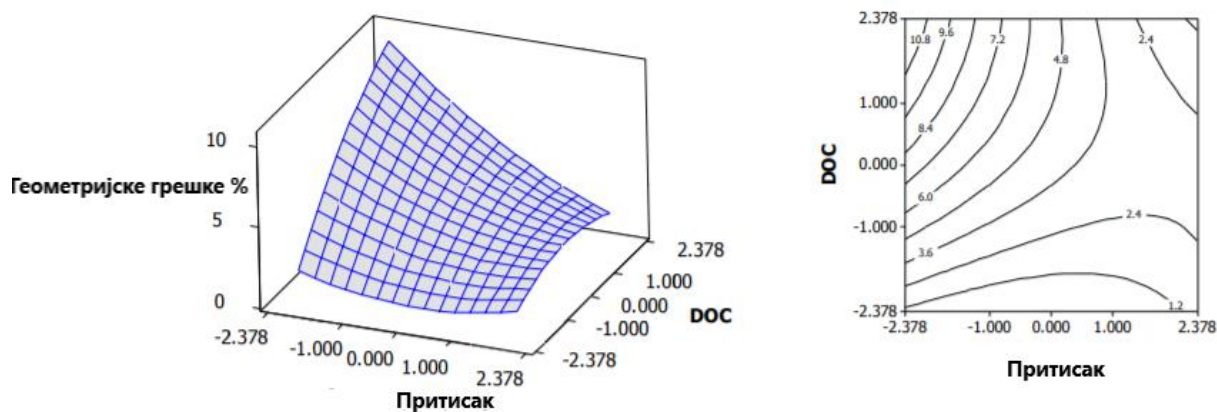
Слика контуре одзива је дата на бази одзива регресионе једначине у кодним факторима (једначина X). Анализирани су утицаји два најзначајнија фактора, док су остали фактори били задржани као константни, на њиховим средњим вредностима.

Слика 4.15. приказује контурни приказ геометријског одзива у односу на притисак воде и брзину кретања предмета обраде на константним нивоима брзине обртања (400 o/min), масеног протока абразива (5,24 g / s) и дубине резања (3 mm). То илуструје да се смањење геометријске грешке обично може постићи смањењем брзине кретања предмета обраде и повећањем притиска воде. Повећање брзине кретања узрокује смањење времена излагања деловању млаза. Мање абразивне честице утичу на површину, а уклоњени волумен са периферије обрађеног предмета се смањује.



Слика 4.15. Утицај притиска и брзине кретања радног комада на геометријску грешку ($\dot{m}_a=5.24\text{ g/s}$, $\text{DOC}=3\text{ mm}$, $N=400\text{ o/min}$) [9]

Према Бернулијевом закону и преносу импулса из воде у абразиве, виши притисци производе више енергије и више убрзања абразивних честица. Ово стање доводи до веће брзине ерозије током ограниченог времена излагања и већег смањења пречника радног предмета.

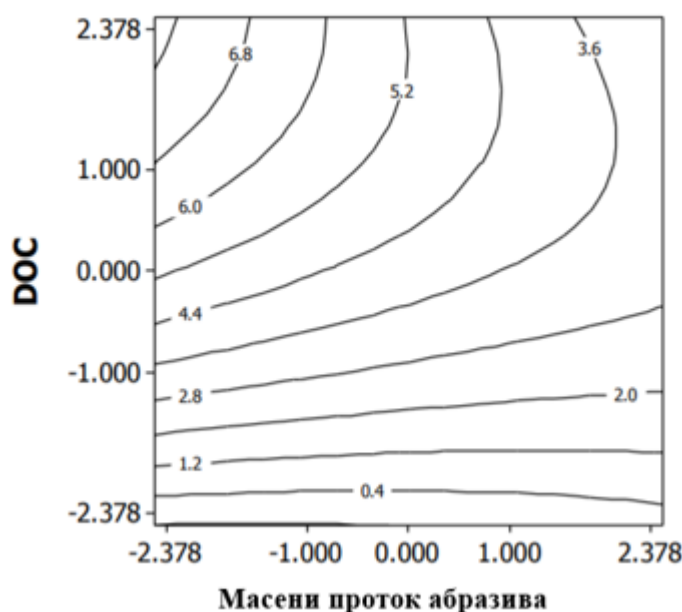


Слика 4.16. Утицај притиска и дубине резања на геометријске грешке ($\dot{m}_a=5.24\text{ g/sec}$, $u=5\text{ mm/min}$, $N=400\text{ o/min}$) [9]

Слика 4.16. приказује 3D површину и контурни приказ одзива геометријске грешке у односу на притисак воде и дубину резања, док се остали параметри одржавају константним на њиховим средњим нивоима. Супротан утицај дубине резања и притиска на геометријску грешку је уочљив у хиперболичкој параболоидној (седло) површини одзива. Већа дубина резања резултира већом геометријском грешком услед већег материјала за еродирање и нестабилности млаза.

Виши притисци смањују геометријску грешку како је приказано на слици 4.15. На седластом месту, утицај сваког параметра компензује супротан утицај оног другог. У овом стању, одржавање константног притиска воде и повећање или смањење дубине резања доводи до смањења геометријске грешке. Ово се дешава зато што се током обраде почетно подешавање DOC постепено смањује.

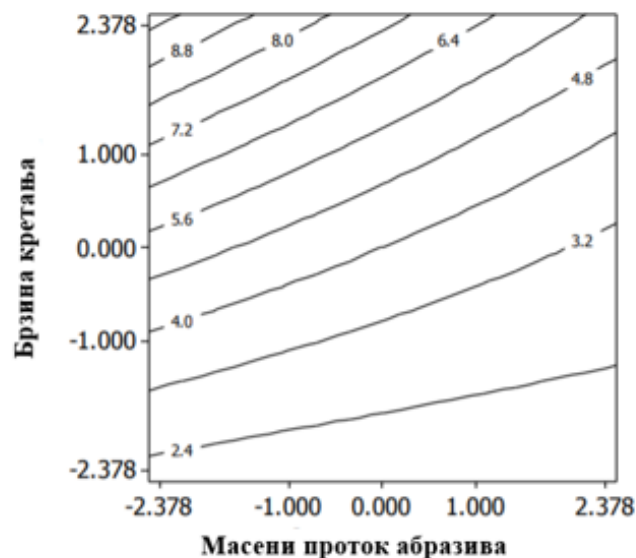
Код обраде са великим дубинама резања, ако је енергија млаза довољно висока (високи притисци), могуће је обрађивати радни комад док се не постигне слично стање обраде са малим дубинама резања. Тако произведени делови при високим и ниским дубинама резања могу да имају готово исту геометријску грешку. Уместо тога, ако се притисак воде смањи, то није довољно да ефикасно еродира целокупну запремину материјала. Дакле, повећање DOC при ниским притисцима повећава геометријску грешку.



Слика 4.17. Утицај масеног протока абразива и брзине кретања на геометријске грешке ($P=250 \text{ MPa}$, $\text{DOC}=3 \text{ mm}$, $N= 400 \text{ o/min}$) [9]

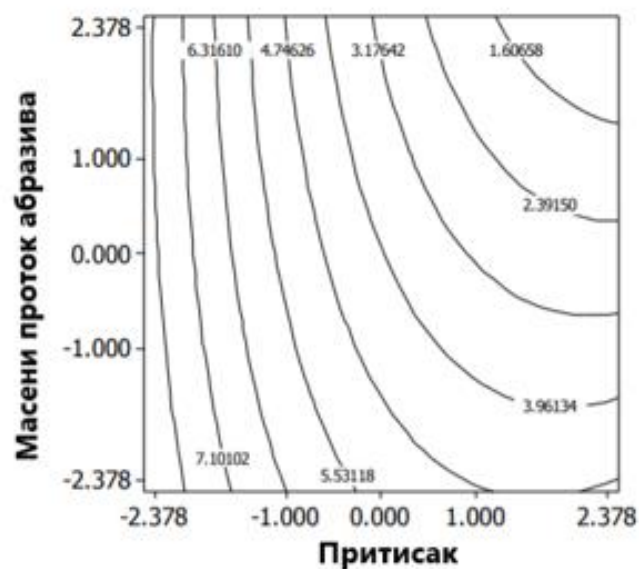
Утицај масеног протока абразива и брзине кретања на геометријску грешку приказани су као контурни дијаграм на слици 4.17. Закључено је да је мања геометријска грешка могућа при високим вредностима масеног протока абразива и ниским брзинама кретања. Поред тога, код великих брзина кретања, утицај масеног протока абразива на смањење геометријске грешке је већи него код обраде при малим брзинама кретања предмета обраде. Сличне резултате известио је и Ansari.

Истовремени утицаји масеног протока абразива и дубине резања приказани су на слици 4.18. У складу са претходним истраживањима Ansari, повећање масеног протока абразива и смањење дубине резања смањују геометријску грешку. Важно је напоменути да повећање масеног протока абразива током обраде са малим дубинама резања нема значајан утицај на геометријску грешку.



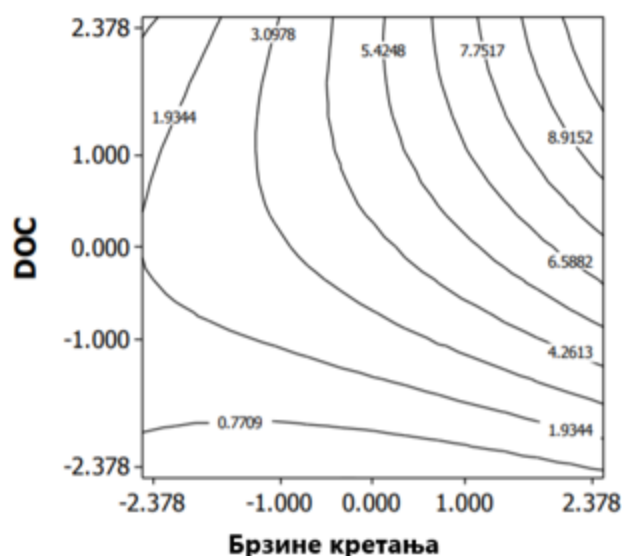
Слика 4.18. Утицај масеног протока абразива и дубине резања на геометријске грешке ($P=250 \text{ MPa}$, $\text{DOC}=3 \text{ mm}$, $N= 400 \text{ o/min}$) [9]

То значи да је количина материјала који мора бити еродиран довољно низак да се већи абразивни масени проток не може ефикасно користити у уклањању материјала.



Слика 4.19. Утицај притиска и масеног протока абразива на геометријску грешку ($P=250 \text{ MPa}$, $\text{DOC}=3 \text{ mm}$, $N= 400 \text{ o/min}$) [9]

Утицај притиска и масеног протока абразива на геометријску грешку, док су остали параметри константни, приказани су на слици 4.19. Повећање притиска и масеног протока абразива доводи до смањења геометријске грешке. На ниским притисцима, варијације масеног протока абразива готово да немају ефекта на геометријску грешку, док се код високих притисака абразивне честице убрзавају довољно да се део обрађује са малим толеранцијама.



Слика 4.20. Утицај брзине кретања и дубине резања на геометријску грешку ($P=250 \text{ MPa}$, $DOC=3 \text{ mm}$, $N= 400 \text{ o/min}$) [9]

Слика 4.20. приказује контурни приказ геометријског одговора на грешку у односу на брзину кретања и дубину сечења при константним нивоима притиска, абразивног масеног протока и брзине ротације. То илуструје да за веће дубине резања, смањење брзине кретања може значајно смањити геометријску грешку. Међутим, смањење брзине кретања повећава време обраде. У пракси, окретање делова на малој дубини сечења и велика брзина кретања у више пролаза може бити практичан начин за повећање ефикасности процеса.

4.4 Утицај параметара обраде на геометријску грешку делова у абразивном OFFSET- моду обраде воденим млазом

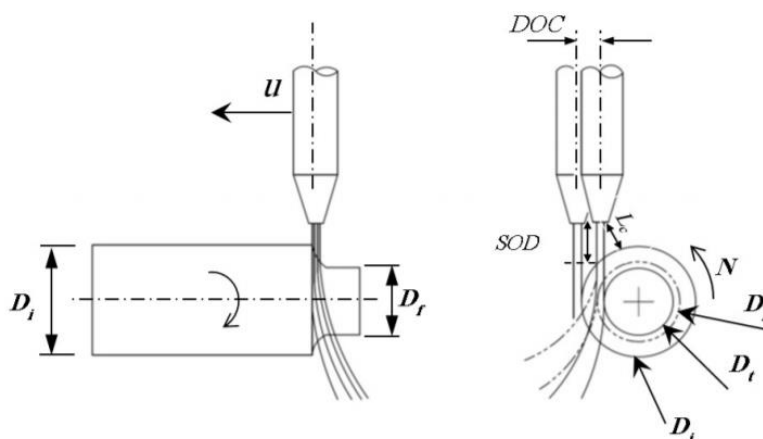
На основу релативног положаја млаза и предмета обраде, AWJT се може класификовати као радијални или offset- мод. Предности обраде у offset- моду у односу на радијални су способност контроле дубине резања и бољи квалитет површине.

Геометријска грешка на деловима који су обрађени абразивним воденим млазом је важан изазов за комерцијализацију процеса обраде абразивним воденим млазом. Још увек није урађено систематско истраживање да би се испитали ефекти процесних параметара на геометријску грешку у обради абразивним *water jet*-ом у *offset* режиму. У овом раду је спроведена свеобухватна студија да би се испитао утицај неколико параметара обраде на геометријску грешку (проценат грешке пречника дела) код обраде округлих шипки од легуре алуминијума AA2011-T4. Притисак воде, брзина кретања главе за сечење, брзина обртања предмета обраде, брзина абразивног масеног струјања и дубина сечења, сматрани су главним параметрима обраде у пет нивоа статистичког експерименталног пројекта. Изведена су укупно 52 експеримента заснована на бази централног композитног ротационог дизајна (CCRD). Анализирани су главни ефекти параметара као и интеракција међу њима, коришћењем технике анализе варијанце (ANOVA), а контуре одговора за

геометријску грешку дела су добијене коришћењем квадратног регресионог модела (тј. RSM).

Предвиђања модела су се добро слагала са експериментално добијеним подацима. Штавише, међу значајним параметрима, притисци, дубина резања и брзина кретања су најутицајнији, са учешћем од скоро 25% сваки. Масени проток абразивног материјала је најмањи утицајни параметар са процентом доприноса од 4%.

Дакле, AWJ offset-мод обраде је изабран за ову студију јер се чини да је погоднији за испуњавање индустријских захтева. Шема AWJ offset-мода је приказана на слици 4.21. У овом процесу, абразивни водени млаз се доводи у жељену позицију, која одређује номиналну дубину резања (DOC) и минималну удаљеност између врха цеви за фокусирање и површине предмета обраде (L_c). Радни комад се окреће угаоном брзином N , док се млаз креће дуж осе ротације предмета обраде брзином помака u и еродира површину предмета обраде у једном пролазу, до коначног пречника (D_f). У идеалном случају, на крају излагања дела млазу, млаз постаје тангентан на површину радног комада. Али, у пракси коначни пречник дела је већи од циљног пречника (D_t), што уводи геометријску грешку.



Слика 4.21. Шема поступка обраде AWJ offset модом [9]

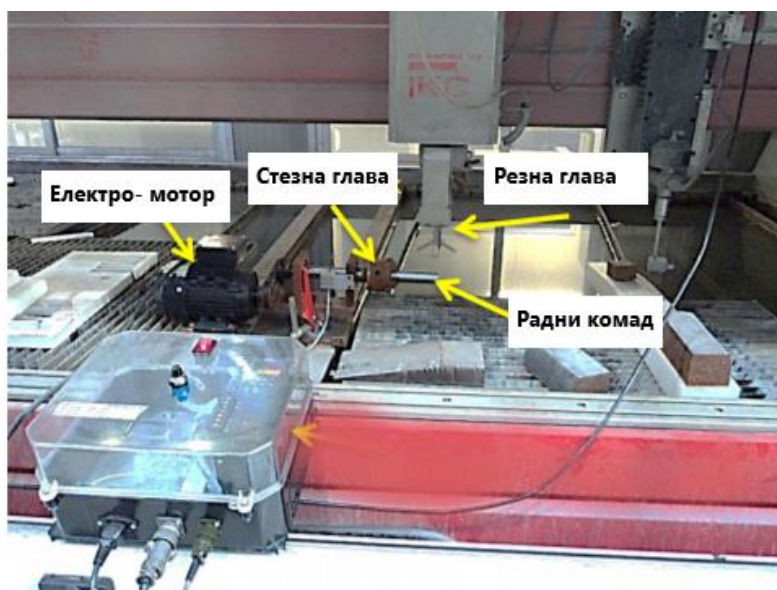
4.4.1 Анализа експеримената из литературе

За ову обраду су одабране кружне шипке AA2011-T4 пречника 30 mm. Сви делови су исечени на дужину од 10 cm и пажљиво очишћени етил алкохолом. Састав материјала AA2011-T4 дат је у табели 3.

	Алуминијум	Бизмут	Бакар	Гвожђе	Олово	Силикон	Цинк
1AA2011-T4	93,7%	0,2%	5%	0,5%	0,2%	0,2%	0,““%

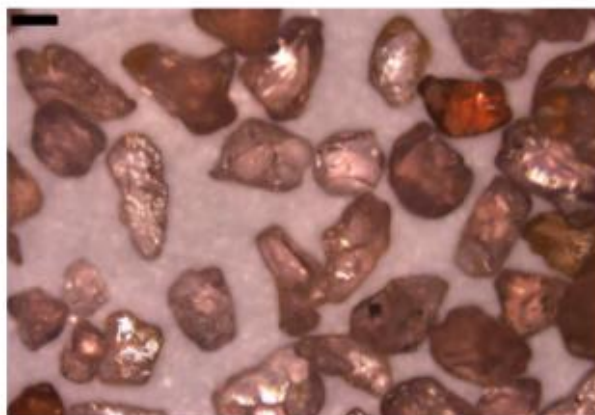
Табела 3. AA2011-T4 састав материјала [9]

AWJ експериментални апарат је припремљен применом AWJ машине (Тесnocut 5-осни управљачки систем са пумпом Flow 9КСВ-С 380 МПа) која је опремљена са стручно монтираним стругом, са максималном брзином ротације од 1000 о/min (слика 4.22) [9].



Слика 4.22. Експериментално подешавање за обраду абразивним воденим млазом [9]

На основу претходних истраживања Хлавца и других, могуће је претпоставити да се облик и величина абразива мењају услед њихове фрагментације током мешања и убрзавања у АWJT резној глави. Овај феномен зависи од неколико параметара као што су притисак, масени проток абразива, величина отвора млазнице, унутрашњи облик коморе за мешање и дужина цеви за фокусирање, као и њен унутрашњи пречник. Пошто су величина и облик абразива који су укључени у процес обраде константни на индустријском нивоу, њихови ефекти нису истраживани у овој студији. У свим експериментима је као абразив коришћен материјал аустралијски гранит # 80 GMA (Слика 4.23.). За све тестове је коришћена стандардна млазница са пречником од 0,3 mm и стандардна цев за фокусирање пречника 1,02 mm.



Слика 4.23. Мреже 80 GMA Аустралијски гранит коришћен за експерименте које је спровела Alicona InfiniteFocus® [9]

Да би се добила потребна геометрија предмета обраде, важно је тачно подесити DOC. Референтни систем који се примењује за подешавање DOC у сваком експерименталном циклусу, дефинисан је спровођењем прецизне процедуре поравнавања радног комада, која дозвољава да линија воденог млаза буде паралелна са осом и да млаз тангира површину предмета обраде. Током таквог поступка коришћен је низак притисак воде да би се добио веома танак и кохерентан млаз. Након подешавања DOC-а, растојање између врха цеви за фокусирање и површине радног комада (L_c) је подешено на 1 mm да би се избегао задор.

4.4.2 Резултати и дискусије

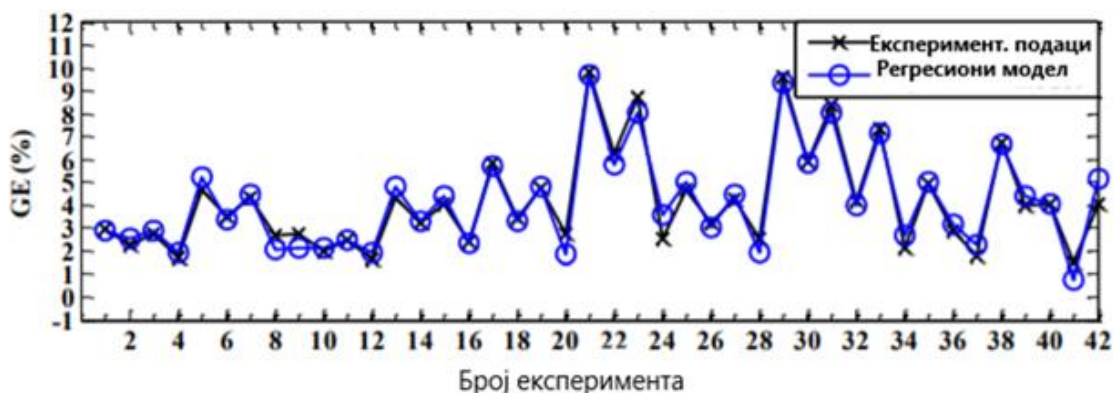
На слици 4.24. је приказано статистичко моделирање геометријске грешке делова обрађених абразивним воденим млазом, на деловима добијеним из планираних експеримената (тј. 32 угаоне тачке ($n_F = 32$), 10 централних тачака ($n_C = 10$) и 10 аксијалних тачака ($n_A = 10$)).



Слика 4.24. (а) Делови обрађени абразивним воденим млазом; (б) Мерење пречника комада после извршене обраде, на уређају Zeiss Prismo 5 HTG VAST CMM [9]

Утврђено је да су, утицаји улазних параметара процеса, (притисак воде, брзина кретања резне главе, величина масеног протока абразива и дубина резања) значајни, а утицај брзине ротације предмета обраде је незнатан. Поред тога, термини притиска воде (P_2) другог реда и дубине резања (DOC_2), интеракција између притиска воде и брзине кретања ($P \times u$), притиска воде и дубине резања ($P \times DOC$), масеног протока абразивног материјала и дубина резања ($m! \times DOC$) и између брзине кретања и дубине резања ($u \times DOC$) су значајне. Што је вредност p већа, параметар је мање значајан, дакле, ефект интеракције масеног протока абразива и дубине резања као последњи од значајних утицаја. За остале утицаје (p -вредност $> 0,05$) може се сматрати да су безначајни.

Као што је приказано на слици 4.25. добијени модел тачно одговара експерименталним подацима.



Слика 4.25. Предвиђене вредности у односу на експерименталне вредности [9]

4.5 Методологија корекције грешака примењене на резање абразивним воденим млазом

Концепт „Прво рачунања, касније померања“, за контролу кретања, први пут представљен у последњој деценији, оптимизовао је процес резања абразивним воденим млазом. Коришћењем модела за сечење који варира брзину резања око углова и дуж лукова, обезбеђен је већи степен тачности. Најновије иновације у стратегији резања углова омогућују резање спољних углова без жртвовања брзине или квалитета површине. Најновији развој хардвера и софтвера за контролу машина унапређује методологију корекције грешака у обради абразивним млазом за следећу генерацију. Млазница се аутоматски нагиње уз путању сечења, компензујући конусну грешку као и грешку кашњења на угловима. Механизам за нагињање алата омогућава брзу промену нагиба млазнице око улазне тачке материјала, без великих убрзања и вибрација.

Најчешће грешке и недостаци који се могу наћи на деловима који су обрађени абразивним воденим млазом:

1. Тракасти трагови дуж доње половине резне површине;
2. Грешке заостајања (повијања) млаза на угловима пута и на малим луковима;
3. Грешке конусног и буричастог облика;
4. Геометријска грешка у промени ширине реза;
5. Грешке у увођењу и извођењу млаза;
6. Заокруживање на врху резног жљеба;
7. Неравнине на дну резног жљеба.

Постоје различите фазе корекције грешака и свака од ових фаза има своје предности, а свака је прикладна за различите ситуације. Под фазама корекције грешака спадају:

- 1) Смањење геометријске и визуелне грешке;
- 2) Биланс брзине и квалитета;
- 3) Уклањање конуса.

1) Смањење геометријске и визуелне грешке

Код делова који су обрађени абразивним млазом, најдубље грешке су тракасти трагови и грешке заносења млаза млаза на угловима и луковима. Ове грешке често чине делове визуелно и димензионо неприхватљивим јер су изван захтева толеранције.

Модел је предвидео брзину резања за дати индекс квалитета, комбинован са другим процесним параметрима. Одабиром одговарајућег индекса квалитета у распону од 1-5, тракасти трагови дуж површине реза се делимично или потпуно елиминишу. Одабиром индекса квалитета „1“ ствара се рез за раздвајање, врло груб, без икакве бриге о квалитету површинске обраде. Одабир индекса квалитета „5“ ствара глатку површину без трагова.

Користећи сличну идеју, количина дозвољених грешака у лаганом кретању на угловима и луковима користи се за израчунавање ефективног индекса квалитета. Овај ефективни индекс квалитета зависи од оштрине угла и радијуса лукова. Резултат коришћења ефективног индекса квалитета на угловима и луковима је смањена брзина резања на овим локацијама. Користећи концепт „рачунај прво, помери касније“ и компјутерску инфраструктуру засновану на овом концепту, променом брзине резања на угловима и луковима може се практично обрадити у корацима од једног корака мотора. У практичном смислу, то значи да се брзина резања може мењати на сваких 12 микрона дуж путање. Променом брзине корачног мотора до једног корака у исто време представља велико побољшање у односу на традиционални CNC контролер - омогућава већи квалитет резања на угловима.

2) Биланс брзине и квалитета

Овакви напреси у технологији обраде абразивним воденим млазом доступни су од 1993. године. Од тада, технологија је побољшана још више - процес резања је бржи, а резови су прецизнији. Нека од најновијих побољшања укључују:

- а)** Аутоматско подешавање млаза на бази дужине и брзине, на основу модела продора, пружајући најбржи могући динамичан продор;
- б)** Нова стратегија обраде угла, која јединствено третира сваку могућу геометрију угла;
- в)** Аутоматско додавање „угаоног проласка“ базирано на математичком моделу резања уграђеном у софтвер, убрзавајући спољне углове где за то има простора.

а) Фаза 1. Продор

Постоји много начина за пробијање материјала. Материјал се може претходно механички бушити, пробушити стационарним абразивним млазом, пробушити помицањем млаза натраг и напред на фиксној удаљености („wiggle” piercing), или динамички пробушити окретањем абразивног млаза и затим полако прећи преко материјала.

Две најпопуларније методе су динамички продор и вибрациони продор, јер оне обично нуде најбржи продор са највише погодности за широк спектар апликација. Вибрациони продор је добар баланс између брзог пробијања, мале удаљености и лакоће програмирања. Обично је бржи од већине имплементација динамичког продора, а посебно је добар за пробијање дебелог материјала у малим просторима, као што је пробијање рупе дебљине 6 mm у челику дебљине 5 cm. Динамичко пробијање је ограничено тешкоћом у

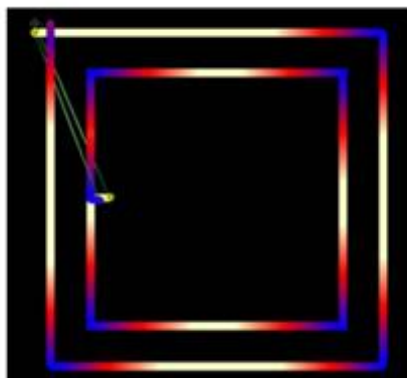
одређивању и подешавању идеалне дужине и брзине увођења за сваку тачку пробијања на путу. Ово је решено употребом динамичког модела за пробијање који посматра услове обраде и аутоматски подешава дужину и брзину пробијања на основу геометрије дела и подешавања пумпе и млазнице. Користећи овај модел, могуће је значајно убрзати перформансе продора без интервенције корисника или познавања процеса. Ако се пробуши сићушна рупа, тада ће се уводни део смањити, а брзина пробијања ће се смањити како би се надокнадио губитак простора. Ако је рупа већа, дужина бушења ће се повећати на оптималну дужину, а брзина ће се на одговарајући начин повећати. Ово чини динамично пробадање идеалним за већину примена, са изузетком малих рупа у дебелим материјалима, где је вибрационо бушење још увек пожељан избор.

б) Фаза 2. Корекције углова

Главни недостатак ранијих технологија контролера је био у томе што је контролер третирао спољне углове истим параметрима модела резања као и унутрашње углове. Регулатор је успорен више него што је потребно за спољне углове. Применом посебних модела резања на унутрашње и спољне углове, побољшавају се брзина и прецизност. Спољни углови се могу обрађивати много брже, а унутрашњи углови се могу обрађивати на прецизним брзинама и убрзањима која минимализују издувавање и повратни удар више него што је раније било могуће.

в) Фаза 3. Пролаз кроз углове

Пролаз кроз углове односи се на концепт прекорачења угаоног дела путање, повраћај абразивног млаза у назад, а затим наставак кретања дуж путање алата. Предности угаоног пролаза су да софтвер може да програмира угаоне пролазе аутоматски и да одреди најбољу геометрију коју треба користити, додајући угаона прекорачења само када и где је то потребно. Да би користили угао пролаза, софтвер прво израчунава колико ће временског залета бити у сваком спољашњем углу користећи уграђени модел за резање. Ако постоји простор за то, софтвер аутоматски додаје кратки елемент који је нешто дужи од дужине једног млазног заостатка иза угла. То омогућава контролеру да помера абразив у пуној брзини иза угла. Контролер затим убрзава назад до угла и наставља са резањем. Све ово кретање се одвија уз скоро пуну брзину резања, што омогућава драматично бржу обраду спољних углова.



Слика 4.26. Без оптимизације компензације других углова осим основног, време обраде је 17,1 min [10]

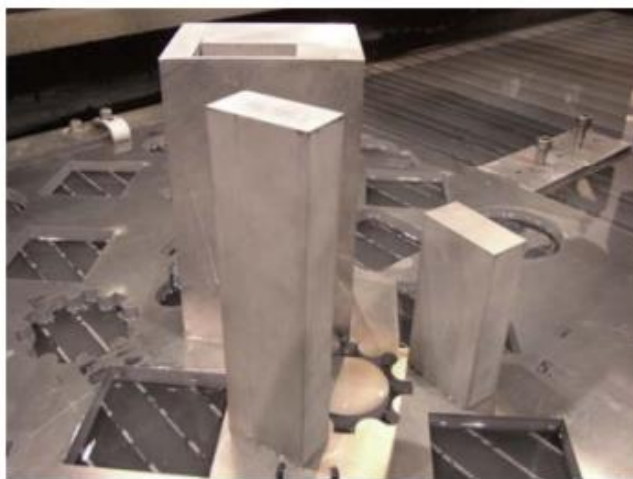
Слике 4.26. и 4.27. приказују исту путању алата израчунату за меки челик дебљине 2,5 cm. Светлије зоне показују најбрже кретање абразивним млазом, док је кретање спорије у тамнијим областима.

На слици 4.26. повећана је улазна дужина за динамичко бушење, спољашњи углови су третирани другачије него унутрашњи углови, а угаони пролаз омогућава још брже кретање млаза.



Слика 4.27. Са додатком компезације динамичког пробијања и угаоног пролаза, време обраде је 13,7 min [10]

Испитивања су показала да је за 150 различитих делова, од механички једноставних делова до сложених радова, постигнуто просечно повећање брзине од 128,4%. Један део је обрађен нешто спорије (98% од претходне брзине), 14 делова је обрађено више од 150% брже, а један део је повећао брзину обраде за више од 200%. Испитивања су извршена са неколико врста материјала и дебљине предмета обраде. Делови такође показују нешто већу толеранцију. Успоравањем млаза на спољним угловима, постоји мања могућност за повећање ширине резног жљеба. На слици 4.20. приказан је алуминијумски правоугаоник дебљине 20 cm, обрађен поступком „Угаоног пролаза“.



Слика 4.28. Алуминијумска призма дебљине 20 cm, обрађена методом „угаоног пролаза“, да би се побољшао квалитет обраде спољних углова, уз истовремено знатно повећање брзине резања [10]



Слика 4.29. Комад са уским толеранцијама, израђен од челика дебљине 1cm [10]

На слици 4.29. запажен је висок квалитет унутрашњих углова. Док углови нису савршени, количина испирања је сведена готово на нулу. Оштрина унутрашњег угла постаје примарна функција пречника млазнице. Угаони пролаз повећава толеранцију предмета обраде, успоравајући кретање млаза око спољних углова, спречавајући сувишни пораст ширине реза.

3) Уклањање конуса

Уклањање конуса обухвата следеће фазе исправљања грешака:

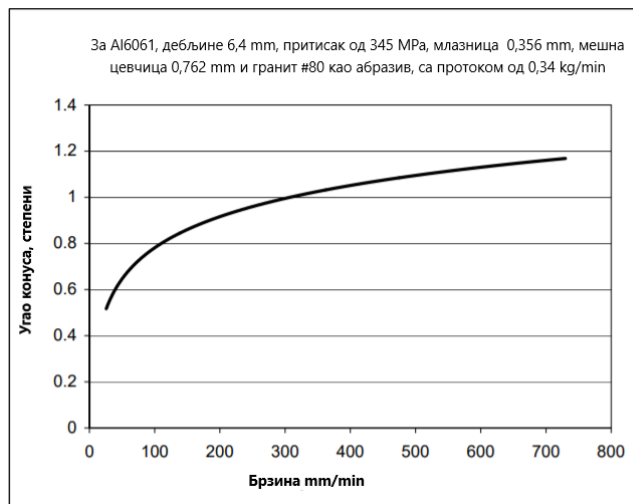
- а) Адаптивно сечење са нагнутом млазницом ;
- б) Механизам нагињања врха алата и
- в) Моделирање конуса.

а) Адаптивно сечење са нагнутом млазницом

Ова фаза исправљања грешака је најлакше разумљива, али најтежа за имплементацију. Млазница треба да буде нагнута за довољну величину да се уклони природни конус абразивног воденог млаза. Примена овог концепта захтева три ствари:

- Предвиђање количине конуса проузрокованог млазним млазом;
- Механизам за механичко нагињање млаза;
- Петоосни контролни систем који може да произведе захтевано координирано кретање.

Као што је већ речено, брзина млазнице се мора мењати дуж путање, како би се постигли оштри углови и прецизни радијуси. Као што је приказано на слици 4.30, облик конуса који производи млаз је функција брзине. Тако, млазница мора да се нагиње под различитим угловима дуж путање у складу са брзином кретања.

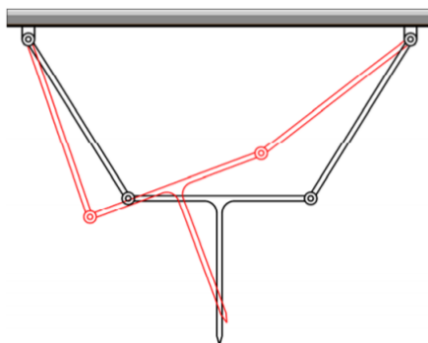


Слика 4.30. Угао конуса у функцији брзине [10]

б) Механизам нагињања врха алата

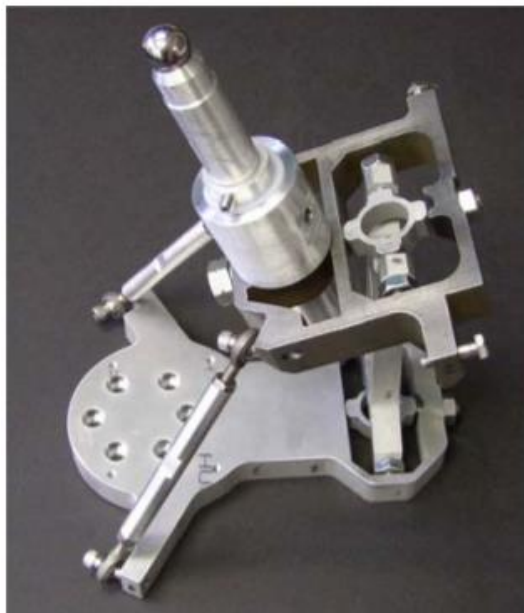
Механизам за нагињање млазнице мора омогућити брз одзив како би се пратио угао који је потребан за кретање по X-Y правцу. Типично, механизам за нагињање ће бити монтиран на великој X-Y табли која се користи за резање делова од плочастог материјала. Брзи покрети нагибне главе подразумевају велика убрзања X-Y механизма, осим ако се механизам за нагињање не закрене око врха млазнице. Недавно је поднета патентна пријава за механизам који приближно апроксимује кретање осовине врха млазнице и смањује убрзања која захтева X-Y механизам. Механизам је најлакше разумети ако прво размотримо дводимензионалну поједностављену верзију (слика 4.31).

Млазница је постављена на плочу, која је ослоњена преко на стационарну горњу плочу. Када се плоча помакне у страну, млазница се нагиње, док врх остаје готово непомичан. За мале углове потребне за уклањање конуса које ствара млаз, X-Y осе мо Ова идеја је затим проширена на тродимензионални механизам у којем се додаје трећи везни елемент и линије дефинисане трочланим сферичним зглобовима спајају се на врху млазнице. рају да се померају само неколико десетина микрона да би компензовале кретање врха.



Слика 4.31. Дводимензионални поједностављени приказ механизма за нагињање млазнице, у два положаја [10]

Механизам са три везе има још један степен слободе више од дводимензионалног примера на слици 4.31. Додавање овог степена слободе такође значи да покретна плоча може да се закреће око вертикалне осе. Да би уређај био користан, овај покрет мора бити контролисан. Померање је ограничено заменом једног од елемената везе погонским вратилом које има сферни зглоб на сваком крају. Фотографија прототипа овог механизма је приказана на слици 4.32, где је на место алата за тестирање стављена лопта.



Слика 4.32. Рани прототип механизма за нагињање млазнице [10]

Прототип приказан на слици 4.32. је вођен са два линеарна актуатора који померају нагибну плочу причвршћену на млазницу. После неких експеримената са моделом, постало је очигледно да би се једноставнији и компактнији механизам могао изградити покретањем јарма са сферним зглобовима са ротационим актуаторима. Слика 4.33. приказује солид модел коначног дизајна, који је сада у употреби.

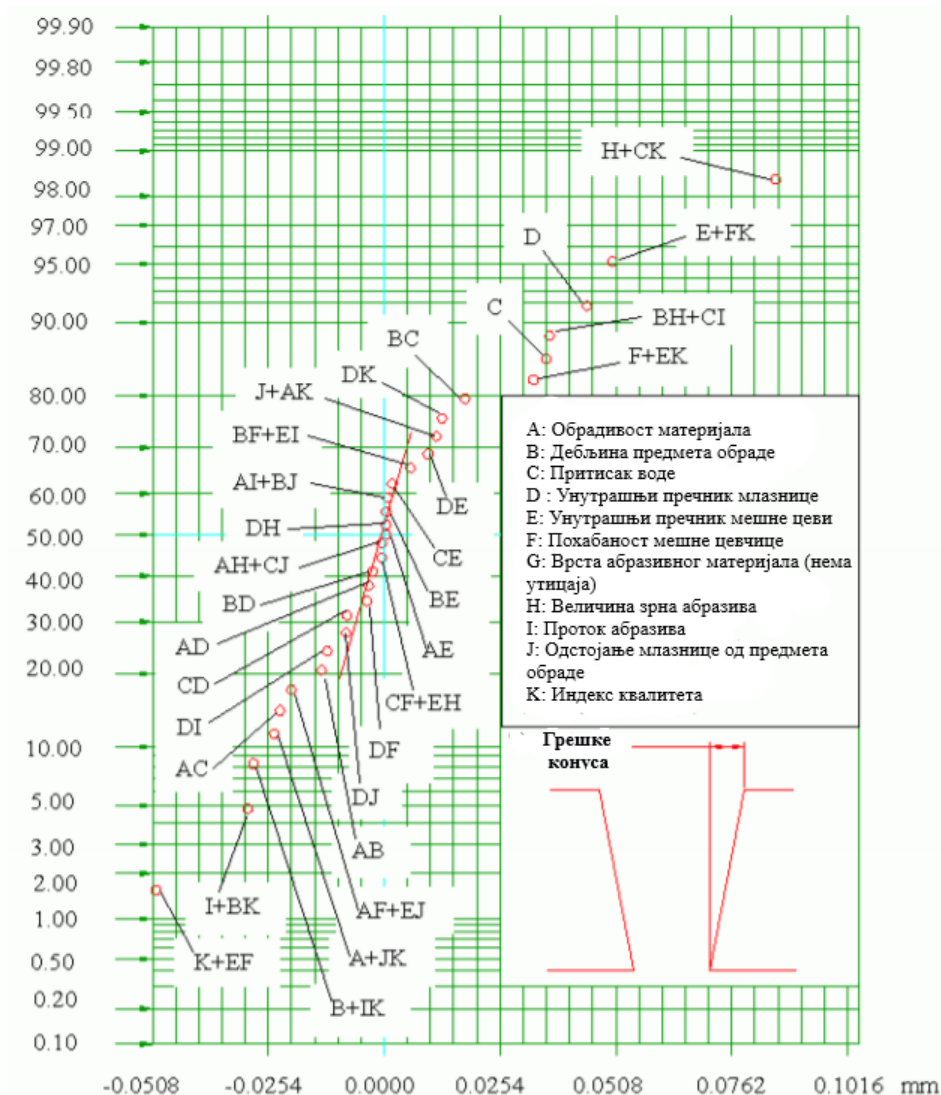


Слика 4.33. Солид модел коначног дизајна механизма за нагињање млазнице [10]

в) Моделирање конуса

Искуство показује да на појаву конуса утичу процесни параметри као што су дебљина материјала, врста материјала, величина млазнице и величина абразивних честица. Експериментална пилот студија о квантификацији конуса је направљена пре неколико година. Овај експеримент скрининга процењивао је 11 варијабли: обрадивост материјала, дебљину, притисак воде, пречник отвора млазнице, пречник цеви за мешање, стање хабања мешне цеви, абразивни материјал, величина зрна абразива, величина протока абразива, одстојање од предмета обраде и индекс квалитета.

На слици 4.34. су приказани резултати испитивања. Главни утицај сваке варијабле је приказан као једно слово, нпр., слово "D" означава главни утицај унутрашњег пречника отвора млазнице (ID).

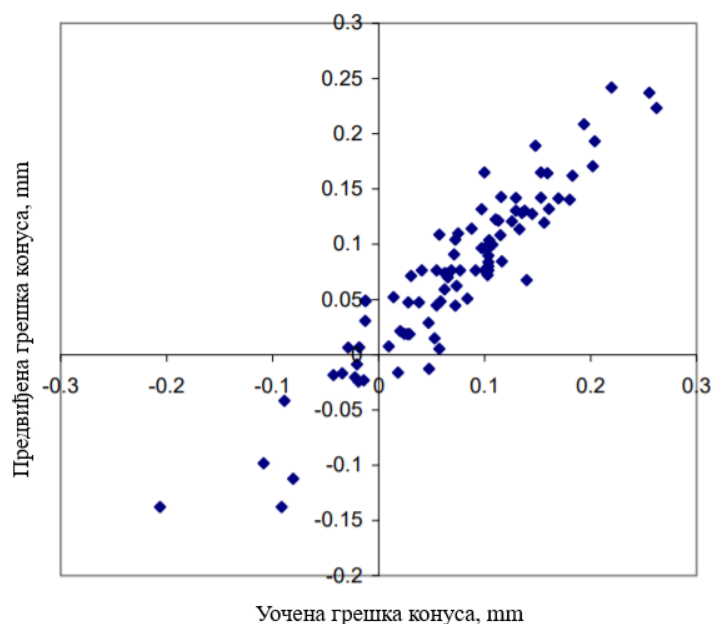


Слика 4.34. Утицај процесних параметара на грешку коничности [10]

Ефекат интеракције две варијабле је приказан као двословна реч, нпр. "AB" означава ефекат интеракције обрадивости и дебљине. У неким случајевима, главни ефекат

може бити збуњен са ефектом интеракције као што је "Н + СК". Пошто су ефекти интеракције обично мали у поређењу са главним ефектима, овај графикон је још увек користан као алат за решавање главних утицаја. Ти ефекти на правој линији или близу праве линије која пролази кроз "0.0000, 50.00" сматрају се буком и игноришу се. Они далеко од равне линије су важни ефекти. Пилот-студија је показала да је седам варијабли најважније у одређивању грешке конуса, те се стога може имплементирати експеримент са седам варијабли за развој конусног модела. Седам варијабли биле су величина абразива, унутрашњи пречник отвора, притисак воде, индекс квалитета, проток абразивног средства, дебљина предмета обраде и обрадивост. Иако унутрашњи пречник цеви за мешање има велики утицај на настајање конуса, он се не сматра варијаблом у овом експерименту због фиксног односа између унутрашњег пречника цеви за мешање и отвора млазнице. Резултирајући модел је квадратна функција главних утицаја и интеракција са укупно 28 термина.

Слика 4.35. приказује корелацију између модела и уочених конусних грешака, што показује да се предвиђања модела прилично добро слажу са посматраним вредностима.



Слика 4.35. Предвиђена грешка конуса у односу на уочену [10]

4.6 Експериментално истраживање квалитета реза

На квалитет реза утичу фактори процеса сечења абразивним воденим млазом, као што су: брзина сечења (v), притисак воде (p), врста абразива и величина честица абразива, проток абразива (Q), пречник водене (d_o) и абразивне млазнице (d_A), растојање резне главе од обратка (z) и дебљина обратка (s). Посебна пажња посвећује се одређеном броју главних и лако подесивих параметара процеса. У експерименталном истраживању, приказаном у овом раду, вршено је испитивање утицаја брзине сечења, дебљине обратка и протока абразива.

Брзина резања је веома важан параметар, јер утиче на квалитет реза и на трошкове обраде. Преставља брзину релативног померања резне главе у односу на обрадак у правцу сечења. Да би се оптимизовали резултати процеса сечења за разлчите дебљине обратка, врши се подешавање брзине сечења. Тиме се остварује жељени квалитет реза при задатим вредностима притиска воде и протока абразива.

Реализација експеримената је спроведена по унапред утврђеном плану и методологији истраживања и под непромењеним и контролисаним условима за све време трајања експеримента. Вредност притиска воде и протока абразива изабрана је у складу са уобичајеном производном праксом и ограничењима машине. Сви опити су обављени на истој машини и под истим условима. Узроци су припремљени у облику трака ширине 50 mm, различите дебљине. На растојању од 10 mm, прављени су резови одређене дужине. Токојм извођења експеримента, узорци су били приложени на радни сто машине и учвршћени са три стране како не би долазило до померања, иако се, због малих сила резања, при уобичајеном раду обрадак само поставља на радни сто без посебног причвршћивања.

Експериментално истраживање је изведено на машини за сечење абразивним воденим млазом тип Вујет 4022, производ фирме Bystronic AG из Швајцарске. Основне карактеристике коришћене машине су: довод воде 0-5 l/min, минимални притисак доводне воде 0.8 МПа, величина радног стола 4000*2250 mm, број резних глава 1-4, највећа брзина позиционирања 60000 mm/min, највећа брзина сечења 5 000 mm/min, толеранција позиционирања ± 0.05 mm, највећи радни притисак 400 МПа, снага пумпе 37 kW, укупна електрична снага 45 kW и укупна тежина 21 t.

Највећи притисак воде, који пумпа високог притиска може да оствари, износи 400 МПа. Управљање вентилом за отварање и затварање високог притиска, као и уређајем за дозирање абразива се остварује електричним путем, што обезбеђује веће могућности регулације и управљања. Абразив се допрема из магацина, који има капацитет 400 kg, помоћу уређаја за дозирање. Могућа је регулација протока абразива у опсегу од 0 до 600 g/min. Преостала енергија абразивног воденог млаза, након обраде се пригушује у резервоару са водом, који има димензије радног стола и дубину од 700 mm.

Материјал обратка је легура алуминијума EN AW-6060 (DIN ALMgSi0.5). Типична промена ове легуре укључује израду профила и делова за аутомобилску индустрију. Хемијски састав легуре алуминијума, према спецификацији произвођача, дат је у табели 4, док су механичке карактеристике, одређене у Лабораторији за испитивање машинских материјала Машинског факултета у Нишу, дате у табели 5.

Хемијски симбол	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
Минимални садржај [%]	0,3	0,1	-	-	0,35	-	-	-
Максимални садржај [%]	0,6	0,3	0,1	0,1	0,6	0,15	0,1	0,05

Табела 4. Хемијски састав легуре EN AW-6060

Затезна чврстоћа	Условна граница течења	Процентуално прекидно издужење	Тврдоћа по Бринелу
R_m [MPa]	R_p [MPa]	A [%]	[HB]
205	170	12	60

Табела 5. Механичке карактеристике легуре EN AW-6060

Главни параметри процеса, чије су вредности мењане, су брзина сечења и проток абразива. За две вредности протока абразива (300 и 400 g/min), коришћено је шест вредности брзине сечења (200, 300, 400, 500, 800 и 1000 mm/min), при вредности притиска воде од 380 MPa и нападном углом абразивног воденог млаза од 90°. У експерименту је коришћена водена млазница израђена од дијаманта, пречника отвора 0,30 mm, чији је радни век 1000 часова, и абразивна млазница тврдог метала, радног века 100 сати и пречника отвора 1,02 mm.

Након обављеног сечења на одговарајућем узорку, вршено је мерење ширине реза у горњем и доњем делу реза (местима улаза и излаза абразивног воденог млаза). Место мерења удаљено од горње и доње стране реза за вредност Δs . Код обрадака, код којих је дебљина мања од 2 mm, Δs износи један десети део дебљине. Ако је дебљина обратка већа од 2 mm, као што је био случај у овом истраживању, за Δs се узима 0,2 mm. За мерење геометрије реза, коришћен је оптички микроскоп, производ фирме „Konus Diamond“ из Италије. Мерене величине су са слике одређиване прецизношћу од $\pm 0,01$ mm. На слици 4.36. су приказане фотографије облика реза добијеног сечењем абразивним воденим млазом обратка дебљине 6 mm, при протоку абразива од 400 g/min и брзинама сечења 200, 500 и 800 mm/min.



Слика 4.36. Фотографије облика реза при различитим брзинама сечења [17]

Изглед реза су горње и доње стране обратка се мења у зависности од брзине резања. Рез на горњој страни, тј. на страни где улази абразивни водени млаз, има глатке ивице, док на доњој страни, на којој млаз излази, има храпаве ивице, што је последица изражених бразди у доњем делу реза (слика 4.37.).

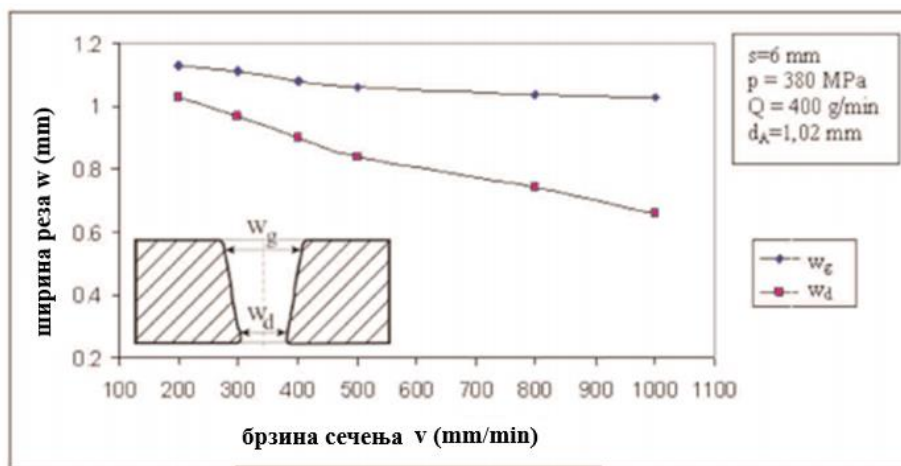
Мерења ширине реза у горњем делу показују да на ову вредност највећи утицај имају пречник абразивне млазнице (d_A) и одстојање резне главе од обратка (z), а да брзина сечења (v) има мали утицај, иако се повећањем брзине сечења долази до благог опадања

ширине реза. Зависно од брзине сечења и протока абразива, ширина реза у горњем делу креће се од 1,13 mm при брзини сечења од $v = 1000 \text{ mm/min}$.

Brzina sečenja	gornja strana reza	donja strana reza
$v=200 \text{ mm/min}$		
$v=500 \text{ mm/min}$		
$v=800 \text{ mm/min}$		

Слика 4.37. Изглед горње и доње стране реза [17]

Утицај брзине сечења је велики на вредност ширине реза у доњем делу реза. Са повећањем брзине сечења, ширина реза константно опада. Разлог томе је што, при већим брзинама сечења, мања количина абразива учествује у процесу сечења, при чему се производи ужи рез. Измерене вредности ширине реза у доњем делу, у зависности од брзине сечења, крећу се од 1,03 mm при 200 mm/min до 0,61 mm при 1000 mm/min. Ширина реза у горњем и доњем делу, у зависности од брзине сечења, престављена је на слици 4.38.



Слика 4.38. Утицај брзине сечења на ширину реза у горњем и доњем делу реза [17]

5. Закључак

У овом раду приказане су грешке резања које могу настати при коришћењу резања воденим млазом уз употребу абразивног средства. На почетку овог рада истакнути су предности и недостаци коришћења воденог млаза са абразивним честицама, али такође и проблеми са животним веком млазнице, као и грешке на обе површине материјала који се обрађује.

Експериментално истраживање је спроведено са циљем испитивања утицаја главних процесних параметара и њихова интеракција на геометријску грешку, у обради абразивним воденим млазом. Утврђено је да су једни од главних процесних параметара, притиска, масеног протока абразива, брзине помака и дубине резања од значајног утицаја, док брзина ротације предмета обраде нема тако значајан утицај на геометријску грешку код делова обрађених AWJ методом. Такође смо дошли до закључка да је тачност геометријских катактеристика реза значајна за производњу јер осигурава тачне толеранције израђеног дела и избегава се накнадна обрада.

Анализама дијаграма утицаја параметара резања воденим абразивним млазом на квалитет обрађене површине, може се закључити да је квалитет површине различит по дубини реза и да на то највећи утицај има брзина помоћног кретања, односно брзина кретања предмета обраде. Такође, уочава се да повећање удаљености млазнице од површине предмета обраде доводи до повећања храпавости обрађене површине, с тим да његово смањење испод одређених вредности може довести и до раста висина неравнина, односно до погоршања квалитета обрађене површине. Са повећањем радног притиска воде долази и до фрагментације кристала абразива на мање делове, при чему се добија и финија обрада. Због тога се са повећањем радног притиска воде добија бољи квалитет обрађене површине, односно мања храпавост. Међутим, приликом избора параметара који дефинишу обраду абразивним воденим млазом треба обратити пажњу и на производност, односно на економичност примене изабраних режима обраде, јер мала помоћна брзина резања и велики радни притисци воде не резултују економичност режима обраде.

Притисци, брзина кретања и дубина резања су детектовани као најзначајнији параметри са скоро истим процентом доприноса. Брзина ротације радног комада је најмање значајан параметар. Поред тога, интеракције између притиска и брзине кретања, притиска и дубине резања, масеног протока абразива и дубине резања, као и између брзине помака и дубине резања, су биле значајне. Поред тога, на основу квадратне регресије приказан је математички модел за однос између параметара процеса и одговора геометријске грешке. Модел би могао да успешно предвиди геометријску грешку делова обрађених AWJ поступком. Приказана студија активира потенцијал за побољшање прецизности воденог млаза са абразивним честицама. Ово захтева даље истраживање како би се испитале могућности смањења геометријске грешке у односу на повећање брзине скидања материјала и квалитета обрађене површине.

6. Литература

1. Лазић М., „Неконвенционални поступци обраде“, Научна књига, Београд, 1990.
2. Баралић Ј., Недић Б., Радовановић М., Јанковић П., „Обрадивост материјала резањем абразивним воденим млазом“, Крагујевац 2010.
3. Миликић Д., „Неконвенционални поступци обраде“, Факултет техничких наука, Нови Сад 2002.
4. Радовић К., Мастер рад: „Обрада абразивним воденим млазом у „ТРЗ“ Чачак“, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2013.
5. Милетић М. Завршни рад: „Обрада воденим млазом“, Машински факултет, Универзитет у Карловцу 2016.
6. Лончаревић Х., Завршни рад: „Резање материјала воденим млазом“, Машински факултет, Универзитет у Карловцу 2016.
7. Глатки Т., Лацковић М., Стручни чланак: „Обрада воденим и абразивним млазом“, Технички гласник 8, 3 (2014), 245-251.
8. https://bib.irb.hr/datoteka/300085.Stoic_CIM2007.pdf, посећено (фебруар 2019).
9. <https://core.ac.uk/download/pdf/55253674.pdf>, посећено (фебруар 2019).
10. <https://www.omax.com/sites/default/files/documents/advancederrorcorrectionmethodologyappliedtoabrasivewaterjetcutting.pdf>, посећено (фебруар 2019).
11. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-016-9402-x>, посећено (март 2019).
12. <https://www.omax.com/news/blog/controlling-taper>, посећено (март 2019).
13. <http://www.mainstreamwaterjet.com/water-jet-cutting-forged-turbine-engine-baffle.html>, посећено (март 2019).
14. <https://jetedge.com/learn/waterjet-applications>, посећено (април 2019).
15. https://waterjets.org/archive/parts-made-by-waterjets/materials/cutting-glass/#abrasive_and_water_delivery, посећено (април 2019).
16. https://www.slideshare.net/sasa_88/abrazivni-vodeni-mlaz1, посећено (април 2019).
17. П. Јанковић., М. Радовановић. „Прилог истраживању квалитета реза код сечења абразивним воденим млазом“, Часопис „ИМК-14“ Истраживање и развој, број 8-9, УДК 621, ИСНН 0354-6829, Институт ИМК „14. Октобар“, Крушевац, 2009, стр. 53-56.