

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Индустијски инжењеринг

Предмет: Неконвенционални поступци обраде

Број индекса: 348/2011

Катарина М. Радовић

Обрада абразивним воденим млазом у "ТРЗ"

Чачак

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др. Богдан Недић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру мастер рада кандидат треба да прикупи и систематизује податке везане за обраду абразивним воденим млазом. Посебан акценат дати машинама и опреми за ову обраду. У раду описати машину за обраду абразивним воденим млазом којом располаже "ТРЗ" Чачак и поступак обраде. У складу са могућностима извршити обраду већег броја узорака и мерења тачности обраде и параметара топографије добијених површина.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања
2. Анализа процеса обраде WJM
3. Машине и опрема за WJM
4. Карактеристике машине WJ 2040 – 1Z – SJ –S
5. Експериментална испитивања и резултати
6. Закључак
7. Литература

Препоручена литература:

- [1] Лазић, М., Неконвенционални поступци обраде, Научна књига, Београд, 1990.
- [2] Миликић, Д., Неконвенционални поступци обраде, Факултет техничких наука, Нови Сад 2002.
- [3] Лазаревић, Д., Радовановић, М., Неконвенционалне методе, Машински факултет, Ниш, 1994

Крагујевац, новембар 2013.

ментор:

Проф. Др. Богдан Недић

Резиме: Мастер рад је посвећен упознавању са технологијом квалитета обраде воденим абразивним млазом, као и експериментално утврђивање зависности квалитета обраде од радних параметара WJM машине. Дати су основни принципи рада, утицај параметара на процес обраде као и карактеристике обрађене површине воденим абразивним млазом. Описано је постројење за обраду воденим абразивним млазом, дат је преглед WJM машина са различитим карактеристикама. Такође је дат опис WJM машине WJ 2040 1Z – SJ – S, основне карактеристике машине, као и техничка и економска ефикасност. На крају су приказана експериментална испитивања која су имала за циљ да се утврди утицај параметара обраде на квалитет резања код WJM сечења.

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

Abstract: The subject of master thesis is quality technology of processing using water abrasive jet, as well as experimental determination of dependence of processing quality from operating parameters of WJM machine. It presents basic operating principles, impact of parameters on processing, and characteristics of surface processed with water abrasive jet. The plant for processing using water abrasive jet is described, and overview of WJM machines with different characteristics is provided. The description of WJM machine WJ 2040 1Z – SJ – S is also provided, along with its basic characteristics and both technical and economic efficiency. Finally, the paper presents experimental tests for determining impact of processing parameters on quality of WJM cutting.

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

САДРЖАЈ

1.УВОДНА РАЗМАТРАЊА.....	6
2.АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ WJM.....	8
2.1. Принцип обраде.....	8
2.2 Процес резања воденим абразивним млазом.....	11
2.3 Утицај параметара на процес обраде.....	12
2.4 Карактеристике обрађене површине абразивним воденим млазом	15
3.МАШИНЕ И ОПРЕМА ЗА WJM.....	17
3.1 Постројење за обраду абразивним воденим млазом	17
3.2 Преглед WJM машина са различитим карактеристикама	20
3.3. Примери примене	24
4.КАРАКТЕРИСТИКЕ МАШИНЕ WJ2040 - 1Z – SJ - S.....	27
3.2.1 Основне карактеристике машине.....	27
3.2.2 Управљачки систем машине Cnc886/Win	31
5.ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА И РЕЗУЛТАТИ.....	33
5.1 План испитивања.....	34
5.1.1. Експеримент - 1:	37
5.1.2. Експеримент - 2	39
5.1.3. Експеримент - 3	41
5.1.4. Експеримент - 4	43
6.ЗАКЉУЧАК	46
7.ЛИТЕРАТУРА	48
Прилог	49

1

УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Савремени технолошки развој у свету карактерише проналазак великог броја нових материјала, који налазе примену у различитим областима људске делатности. Код већине ових материјала обрада конвенционалним технологијама представља велики проблем због лома и хабања алата, неекономичности или чак, немогућности обраде. То је условило појаву нових неконвенционалних технологија обраде, код којих се обрада изводи без уобичајених ограничења у односу на својство обрадивости материјала.

У раду је посебна пажња посвећена поступку сечења абразивним воденим млазом, која се може означити као “еколошка” или “чиста” технологија.

Обрада абразивним воденим млазом (Abrasive Water Jet Cutting) је релативно нова неконвенционална технологија обраде одвајањем честица, која је за кратко време нашла своје место у различитим гранама индустријске производње.

Први човек који се бавио изучавањем промене врло високих притисака био је Др. Норман Франз, заступајући идеју, могућност да се од воде врло високог притиска направи резни алат. Дошао је до идеје да резање дрвене грађе из стабла великих пречника врши применом воденог млаза под великом притиском. Први је употребио млазницу са малим отвором и доказао моћ воденог млаза, односно огромну снагу за сечење и обраду резањем.

Коришћење абразивног воденог млаза за обраду материјала почело је раних осамдесетих година XX века. Године 1980. абразивни водени млаз је употребљен за сечење челика, стакла и бетона, а 1983. је продата прва комерцијална машина за обраду аутомобилског стакла. Нова техника сечења најпре је прихваћена у аутомобилској и авио индустрији, где је коришћена за обраду материјала као што су: нерђајући челик, титан и композити ојачани угљеничним влакнима. Од тада је обрада воденим абразивним млазом прихваћена и у осталим индустријама, као што су: металопрерађивачка, индустрија стакла, грађевинарство, бродоградња итд.

Године 1990. Др, Јохн Олсен као један од оснивача "OMAX" корпорације истражује концепцију сечења абразивним воденим млазом (AWJM), упоредо развијајући и софтверска решења за програмирање и вођење операције сечења. Убрзо патентира комерцијалне AWJM машине и уводи кроз ланац специјализованих продавница у слободну продају.

Сечење абразивним воденим млазом је интересантна због свог малог утицаја на животну средину. При сечењу овим поступком користе се, у природи два најзаступљенија материјала, вода и камен (песак).

Циљ овог рада је упознавање са технологијом квалитета обраде воденим абразивним млазом као и експериментално утврђивање зависности квалитета обраде од радних параметара WJM машине.

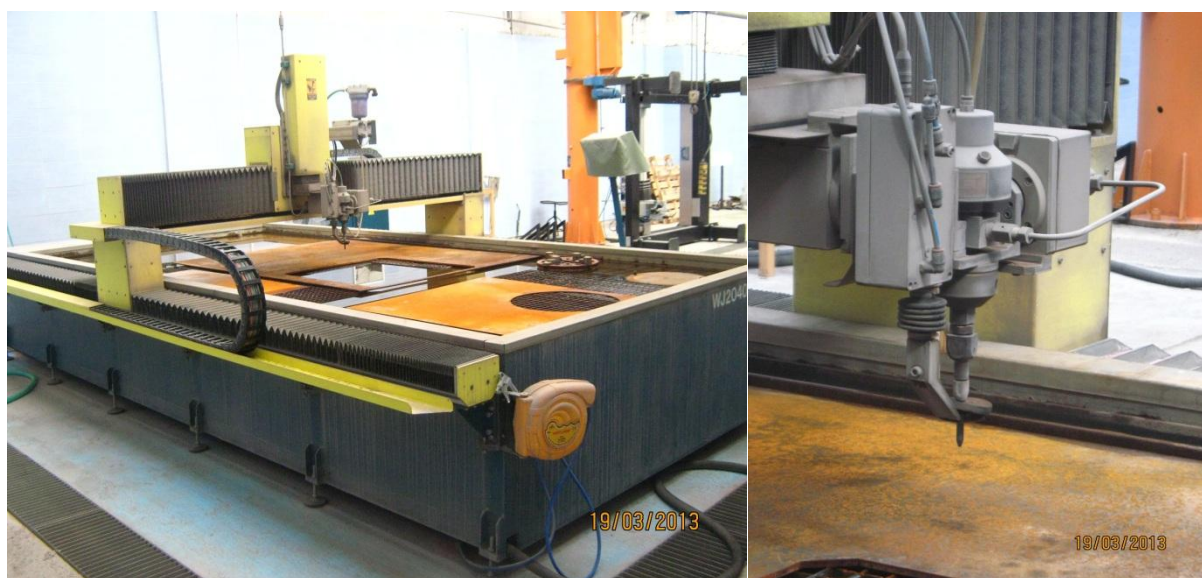
У првом поглављу је дат историјат и развој Water – Jet машине.

У другом поглављу су дати основни принципи рада, утицај параметара на процес обраде, као и карактеристике обрађене површине воденим абразивним млазом.

У трећем поглављу описано је постројење за обраду воденим млазом, дат је преглед WJM машина са различитим карактеристикама и примери примене WJM машине.

У четвртом поглављу је описана WJM машина WJ2040 1Z – SJ - S, основне карактеристике машине, као и техничка и економска ефикасност.

У петом поглављу су приказана експериментална испитивања која су имала за циљ да се утврди утицај параметара обраде на квалитет резања код WJM сечења.



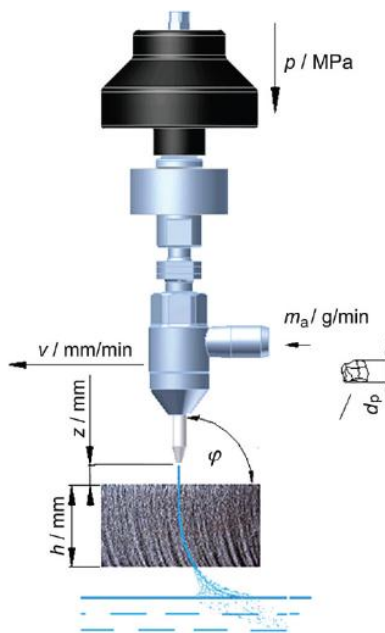
Слика 1. Инсталација за обраду абразивним воденим млазом и млазница

2

АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ WJM**2.1. Принцип обраде**

Проблем сечења тешко обрадљивих материјала (материјала високе тврдоће или насупрот томе меканих и еластичних материјала), нарочито у космичкој индустрији, авио индустрији и аутомобилској индустрији, довео је до развоја и примене данас најатрактивније технологије за контурно сечење материјала – сечење воденим абразивним млазом (AWJC Abrasive Water Jet Cutting).

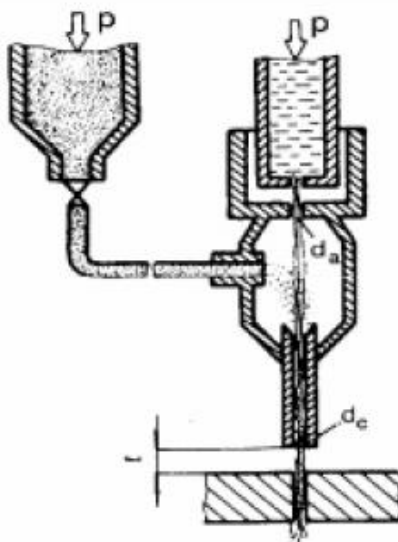
Сечење воденим млазом је нова, мало изучена и распрострањена, врло ефикасна метода контурног сечења материјала. Заснована је на ерозионом дејству узаног млаза воде велике брзине струјања помешаног са абразивом. Абразивни водени млаз се усмерава на обрадак млазницом чији је пречник од 0,75 до 2,5 mm. Задатак млаза воде је да пренесе кинетичку енергију на честице абразива и усмери их ка обратку. Принцип обраде абразивним воденим млазом, заснован је, пре свега, на резању. 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. Температура у зони резања не прелази 70 °C. Честице абразивног материјала, високо убрзане струјом воденог млаза, односе материјал обратка из зоне реза скидањем струготине. [1]



Слика 2. *Обрада абразивним воденим млазом [6]*

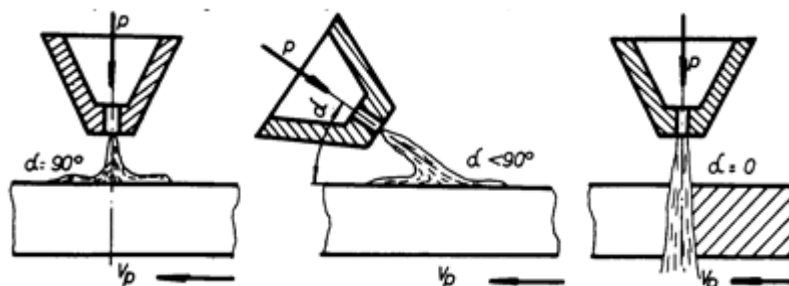
На слици 2. приказани су неки од параметара обраде воденим млазом:
 p – притисак воде (Мра); v – брзина кретања млазнице (mm/min); z – удаљеност дизне од површине радног комада (mm); φ – улазни угао на млазници; m_a – износ коришћених абразива (g/min); h – дебљина радног комада (mm).

На слици 3. приказан је принцип рада AWJC методе. При обради абразивним воденим млазом користи се специјално конструисана радна глава. Вода под високим притиском пролази кроз млазницу чији је отвор d_a и улази у комору за мешање. 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. Цев за довод абразива се прави од волфрам карбида, унутрашњег пречника од 0,8 до 1,6 mm и дужине 50 до 80 mm. Честице абразива се крећу турбулентно у цевчици, ударају у зидове све док не добију довољну брзину да их понесе водени млаз. Млазнице за обраду абразивним млазом су једноставне конструкције. Могу се јавити проблеми, као што су кратак век трајања појединих делова млазнице, као и због појаве нечистоћа повремено блокирање отвора на излазу из коморе за мешање.



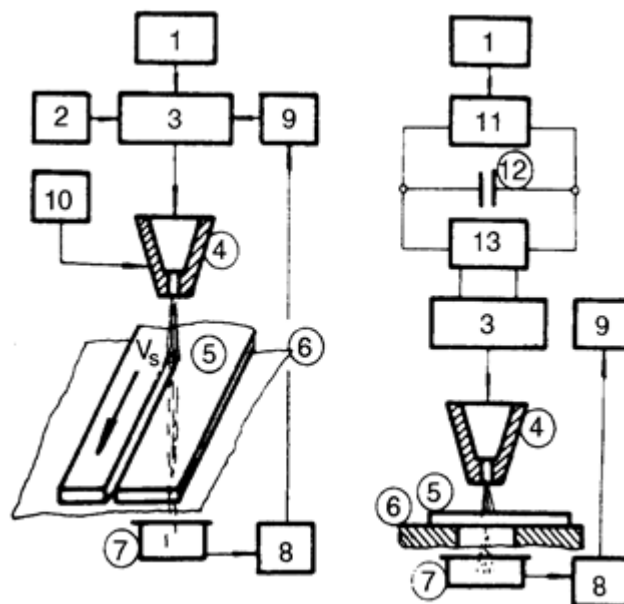
Слика 3. Принципу рада AWJC методе [1]

Резне способности и карактер изведених производних операција (слика 4.) 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 и тд.



Слика 4. Шема дејства млаза течности на површину предмета обраде:
 обрада ударним а), косим б) и клизним ц) правим млазом [1]

На слици 5. приказана је шема инсталације за обраду воденим млазом.

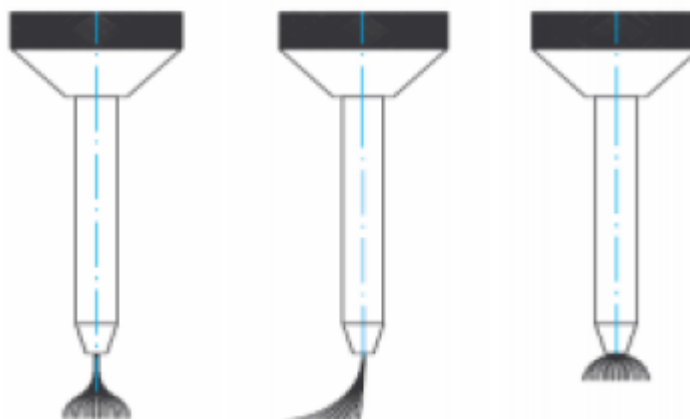


Слика 5. Шема инсталације за обраду воденим млазом [1]

Елементи инсталације су: 1 - систем управљања, 2 - погонски систем хидропретварача, 3 - хидропретварач (мултипликатор, пумпа и сл.), 4 - млазница, 5 - предмет обраде, 6 - радни сто, 7 - сабирни резервоар, 8 - филтер, 9 - систем напајања хидропретварача, 10 - систем припреме абразивне мешавине, 11 - додатни уређај млазнице за дозирање абразива, 12 - извор напајања кондензатора и 13 - импулсни кондензатор, 14 - уређај за пражњење (служи за пражњење унутар течности и формирање импулсног млаза течности).

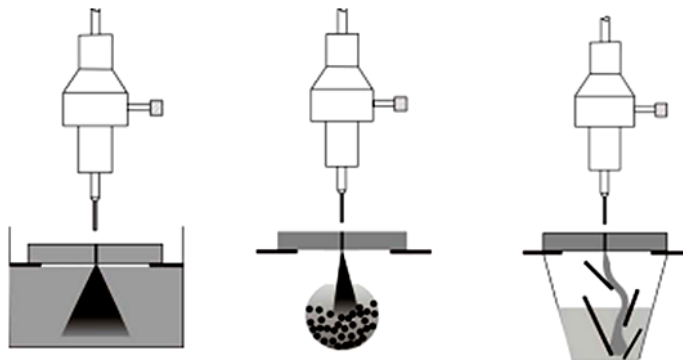
Као абразив најчешће се користе: гарнет, силицијумски песак, силицијум карбид, ситни опиљци гвожђа и др. У зависности од облика абразивног млаза он може да буде добар слика 6. а) или лош слика 6. б) и ц).

У новије време користе се абразиви који не загађују и постоји могућност поновне употребе. Истраживања у овој области доводе до залеђеног млаза где течни азот замењује воду, а кристали сувог леда абразив.



Слика 6. Облици абразивног млаза
добар а); б) и ц) лош [5]

Хватачи млаза се користе да обуздају енергију коју поседује водени млаз како се не би оштетио неки део машине или околина. Хватач служи да апсорбује енергију воденог млаза и да је распрши. На слици 7. су приказана 3 типа хватача.



Слика 7. Типови хватача: а) тип воденог базена, б) потопљене челичне кугле, ц) тип плоче [4]

Највећу примену имају хватачи типа воденог стола. После одређеног времена решетке – носачи радних предмета морају да се мењају због оштећења услед дејства воденог млаза.

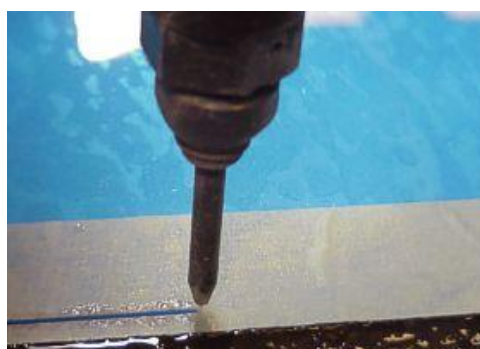
2.2 Процес резања воденим абразивним млазом

Процес резања воденим млазом је веома сложен и састоји се од: резања, ерозије, пластичних деформација и променљивог напонског стања. Млаз воде високог притиска и абразива удара у површину материјала, разара материјал, односи честице и сече га.

Процес резања воденим абразивним млазом чине:

- Резање материјала обратка у виду ситне струготине деловањем високо убрзаних честица абразивног материјала,
- Пластично деформисање, одвајање и одношење материјала обратка у зони реза услед ударног дејства абразивних честица и воденог млаза и
- Испирање продуката резања и разарања воденим млазом. [1]

На слици 8. приказан је AWJ поступак резања.



Слика 8. AWJ поступак резања

Најзначајнија особина резања воденим млазом је хладно резање које термички не утиче на материјал. Током резања не долази ни до какве промене у структури материјала, па самим тим не постоји никакво оштећење материјала на местима реза. Рез воденог млаза је веома узак, што је посебно погодно при резању производа компликованих облика, али и обраде скупих полупроизвода.

Најважније карактеристике абразивног воденог млаза дате су кроз следеће закључке:

- Нема никаквог термичког утицаја на материјал;
- Минималан утицај снаге млаза на материјал који се обрађује;
- У површини реза се не јављају никакви заостали напони и микропукотине;
- Правилном применом процеса рада ствара се минимална количина прашине приликом резања материјала;
- Нема штетног загађења атмосфере;
- Нема никаквог хемијског деловања на материјал;
- Могу се резати материјали који су осетљиви на оксидацију: титан, кобалт, никл и њихове легуре;
- Може се резати без ограничења у свим смеровима, положајима, облицима контуре и угловима нагиба;
- Мали губитак материјала због врло уског реза;
- Могу се резати слојевити материјали са различитим физичким особинама;
- Један агрегат високог притиска може да напаја и до пет абразивних резних глава;
- Универзалност ове технологије омогућује да се са једним уређајем обради скоро читав спектар материјала [1]

2.3 Утицај параметара на процес обраде

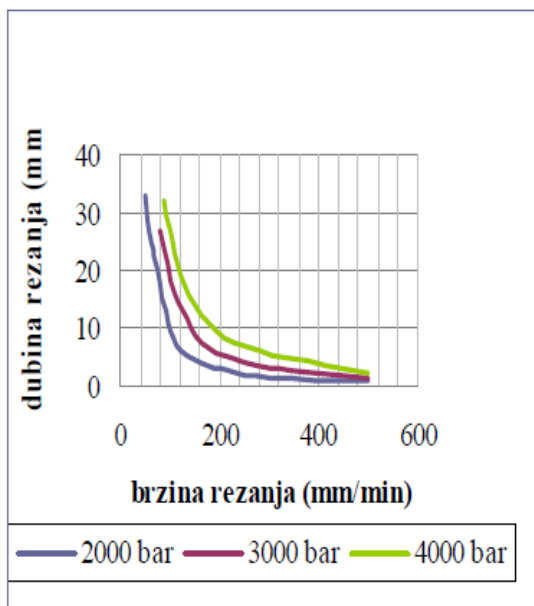
Технологија резања абразивним воденим млазом је комплексан процес интеракције абразивног воденог млаза и материјала који се обрађује. Карактеришу је четири основна параметра резања кључна за реализацију основних резултата резања изражених кроз дубину резања и квалитет површине:

- радни притисак,
- проток абразива и воде,
- брзина резања,
- удаљеност дизне од површине радног комада. [7]

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.

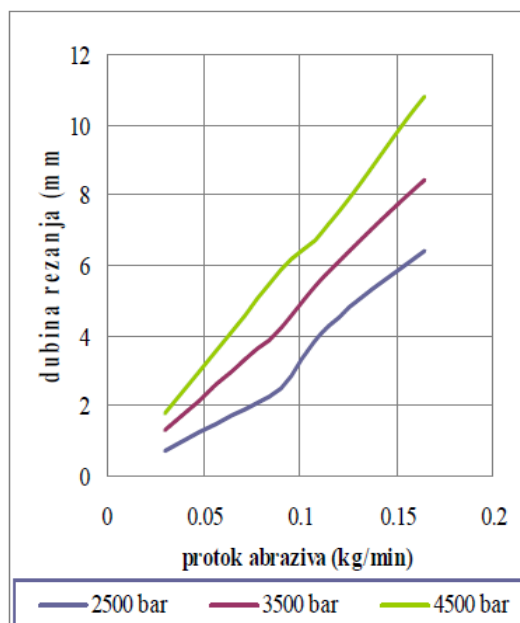
Максимална дубина реза коју је могуће постићи зависи пре свега од радног притиска и протока смеше воде и абразива. Зависност дубине реза од брзине резања при различитим радним притисцима смеше дата је на слици 9. Са дијаграма зависности

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



Слика 9. Дијаграм зависности дубине реза од брзине резања и радног притиска [7]

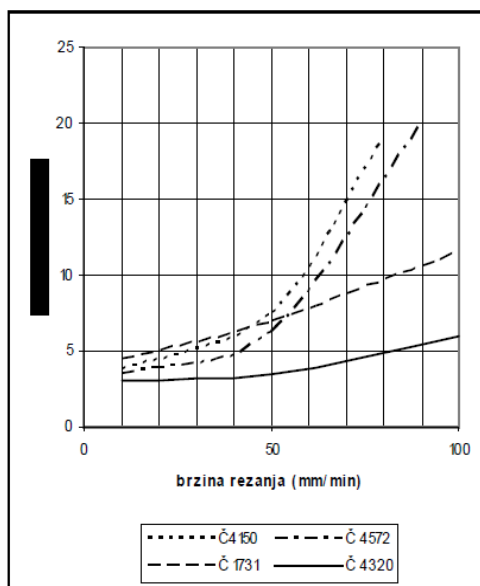
Зависност дубине реза од протока смеше са абразивом за три радна притиска дата је на слици 10. Са дијаграма се јасно види да повећање протока смеше, а самим тим и абразива омогућава дубље продирање у материјал.



Слика 10. Дијаграм зависности дубине реза од протока абразива и радног притиска [7]

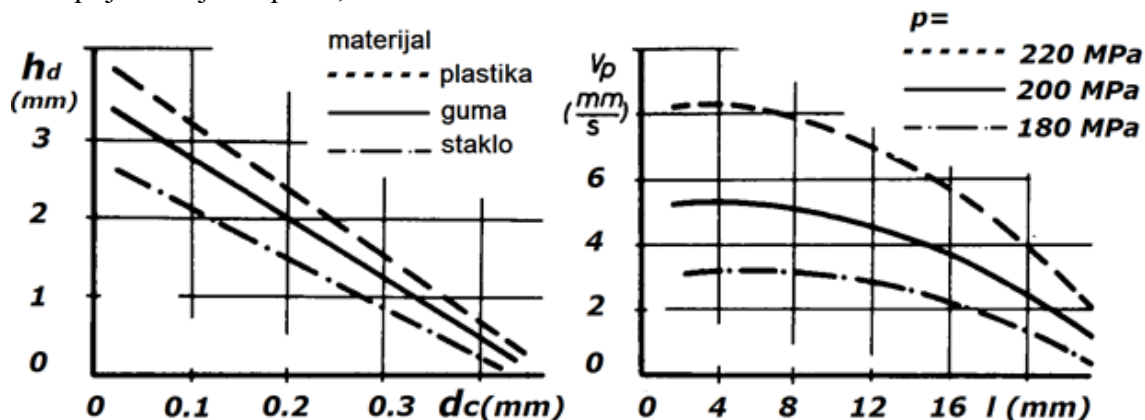
Храпавост добијене површине реза представља кључни фактор за сваку реализацију технолошке обраде резања материјала. На слици 11. је наведена зависност храпавости површине радног комада од брзине резања за различите врсте метала. Код

свих испитиваних врста челика при брзинама резања од 60 mm/min практично се не мења квалитет површине Ra . Преко те брзине се квалитет површине Ra погоршава и то утолико више ако челик садржи више легирајућих елемената карбида, тј. никла, титана, хрома, ванадијума, молибдена и волфрама.



Слика 11. Дијаграм зависности квалитета површине Ra (μm) од материјала и брзине резања [7]

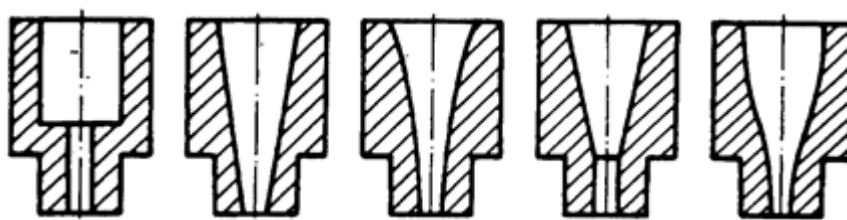
Повећањем растојања дизне од површине предмета обраде смањује се брзина помоћног кретања предмета обраде (брзина уклањања вишка материјала). Повећањем пречника отвора дизне смањује се дубина продирања млаза течности, односно дебљина материјала који се реже, слика 12.



Слика 12. Утицај пречника отвора дизне (d_c) на дубину продирања (h_d) и растојања дизне од површине предмета обраде (l) на брзину помоћног кретања – брзину уклањања вишка материјала (V_p) [1]

Конструктивно решење млазнице и дизне, као један од најзначајнијих елемената конструкције млазнице утиче на производност, тачност и квалитет обрађене површине.

На слици 13. приказани су могући конструктивни облици унутрашњих површина дизни.



Слика 13. Конструктивни облици дизни: а) цилиндрична, б) конусна, ц) конвексна, д) комбинована, е) конкавна [1]

Дизна је критични елемент млазнице. Има мали отвор, кроз који вода излази у млазу, заједно са зрнцима абразива. На дизни може да дође до напрслина и наслага. Уколико дође до већих нагомилавања наслага, може да проузрокује зачепљење дизне. Проблем се отклања филтрирањем воде.

2.4 Карактеристике обрађене површине абразивним воденим млазом

Како би се добиле тачне вредности карактеристика потребно је да се избегну грешке које се јављају у току процеса обраде. Ако се одступања стварних карактеристика крећу у границама толеранције, предмет је у технолошком смислу исправан. Постизање захтеваних толеранција израде предмета обраде зависи у првом реду од квалитета израде и монтаже делова инсталације, брзине сечења, гранулације абразива, чврстоће и дебљине материјала предмета обраде, начина и прецизности вођења млазнице, тачности постављања радног стола, радног притиска и сл.

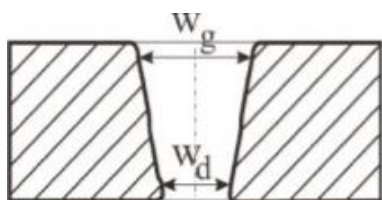
Алатна машина велике тачности не значи да ће истовремено израдак бити тачних димензија. Највеће грешке су последица самог процеса обраде. Тачност позиционирања радног стола машине је у већини случајева 0,01 mm. Међутим, тачност обраде је обично између $\pm 0,07$ и $\pm 0,4$ mm када је дебљина материјала мања од 25 mm, односно, тачност је између 0,5 и 1,5 mm, када је дебљина материјала већа од 25 mm. [5]

Предмет обраде се дефинише одређеним карактеристикама:

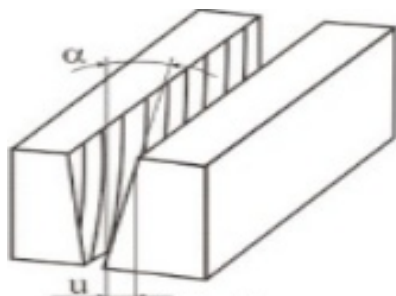
- геометријским (димензије, облик и положај површина),
- механичким (материјал, чврстоћа, тврдоћа) и
- технолошким (дозвољена одступања облика и положаја, квалитет обрађене површине).

Основне карактеристике површине обрађене абразивним млазом су:

- ширина реза (W_g – горе и W_g – доле),
- коничност реза (α),
- хрпаваост обрађене површине (R_z – средња висина неравнина и R_A – средње аритметичко одступање профила. [5]



у горњем, него у доњем делу.



(α) за који је површина стране реза нагнута у односу на вертикалну раван.



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 воденим абразивним млазом рез је обично шири

Конусност реза се јавља, јер дубином сечења енергија млаза опада. Од интереса је јер пружа представу о могућности налагања предмета преко површине реза, тј. да ли је потребна накнадна обрада. Конусност реза 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

Храпавост површине реза 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 њих постоје и макронеравнине, које могу бити периодично променљиве (огреботине, јамице, напрслине) и последица су случајних грешака.

3

МАШИНЕ И ОПРЕМА ЗА WJM

3.1 Постројење за обраду абразивним воденим млазом

AWJC постројење у основи се састоји из два дела: уређаја за прихватање млазника и обратка (машина у ужем смислу) и хидрауличног уређаја за генерисање воденог млаза високог притиска.

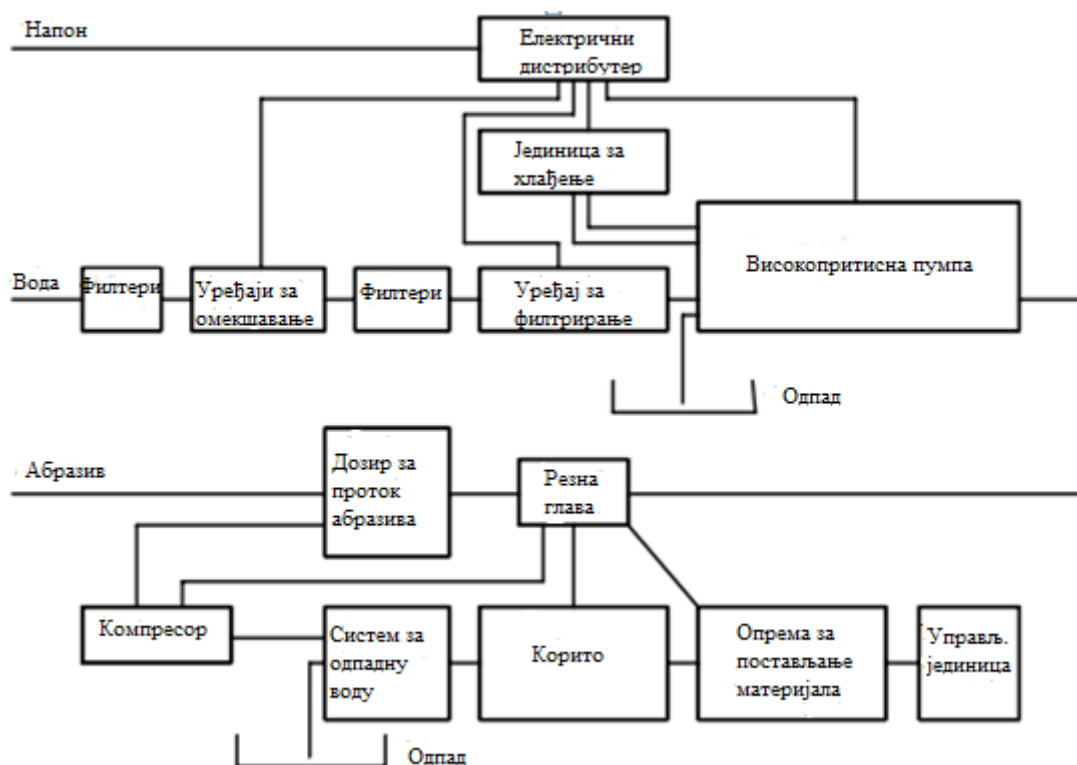
Широка примена технологије абразивним воденим млазом учинила је да се појединачна радна места разликују. Међутим, поједине групе опреме су сличне за све типове употребе. Главна карактеристика технологије је употреба воде под високим притиском за резање материјала. Стога је високопритисна пумпа која компресује воду до жељеног притиска срце комплетног система.

Цео систем чине следеће јединице:

- високопритисна пумпа,
- периферна помоћна опрема за НР пумпу,
- високопритисни разводник,
- уређај за обраду,
- абразивна обрада,
- корито за сакупљање садржаја млаза,
- систем за одстрањивање одпада.

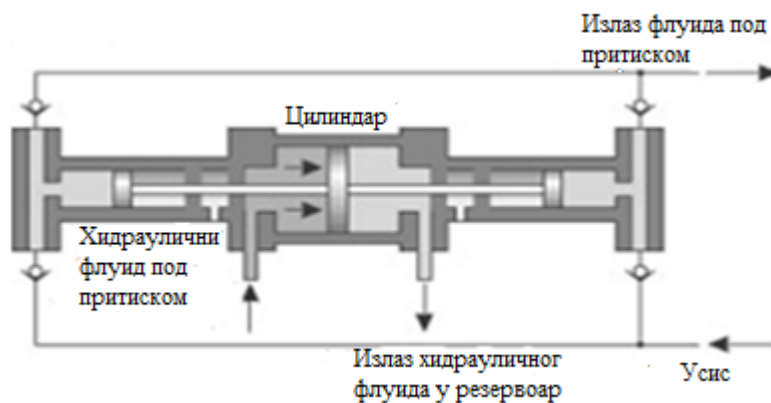
Слика 14. приказује типичан садржај радног места високопритисног млаза са абразивом. Високопритисна пумпа, која служи као хидраулична управљачка јединица је погоњена електромотором. Пумпа допрема хидраулично уље регулисаног притиска до 215 bar до примарног круга мултипликатора. За напајање водом за резање, неопходно је коришћење чисте, филтриране воде, по могућству воде за пиће из водовода, која је сабијена на притисак реда од 3,5 до 6 bar. Затим се доведе до секундарног круга мултипликатора који повећава притисак воде помоћу притиска хидрауличног уља до максималног притиска (на захтевани притисак резања). Пре него што вода изађе из пумпе и крене ка обрадној глави пролази кроз ублажавач удараца како би варијације притиска биле у границама од 2,5 %. То је велики суд који осигурава конзистентан притисак у обрадној глави.

Без њега би вода визуелно и звучно пулсирала, остављајући трагове на материјалу. Затим се течност разводи преко нерђајућих високопритисних цеви до резне главе.



Слика 14. Шема система за резање абразивним воденим млазом

Дозира се и абразив из херметички затворене коморе у којој влада одређени притисак. На излазу воде и абразива из система је смештена флуидна дизна, која има тачно дефинисан облик. Испод млаза који пролази кроз материјал поставља се такозвани хватач мешавине воде и абразива чиме се обезбеђује сигурност при раду и смањење буке.



Слика 15. Шематски приказ рада појачивача притиска

Цело постројење је креирано за дуготрајну употребу, а омогућује и безбедан прекид рада. Ако дође до поремећаја у раду, на посебно одређеним местима појављују се капи течности, који упозоравају да је потребно одржавање система. Такође постоје и сензори за упозоравање када нешто није у реду.



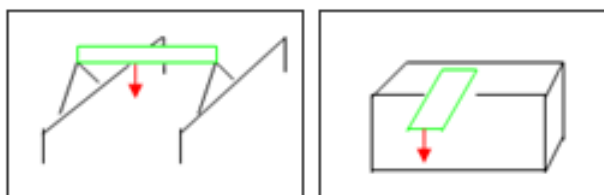
Слика 16. Инсталација за обраду абразивним воденим млазом

Најважнији елемент машине је радни сто са укрштеним X–Y клизачем који најчешће поседује CNC управљање.

Основне компоненте X–Y машина су:

- контрола преко CNC уређаја,
- серво мотори који поседују тачно позиционирање и устаљену брзину,
- основне јединице са линеарним кретањем,
- порталне јединице су такође са линеарним кретањем,
- резервоар за материјал

Постоји више облика машина, али доминирају портални и конзолни. На шеми, слика 17. виде се основна кретања порталне и конзолне машине. Мост (обележен зелено) се креће у једном правцу, а обрадна глава у другом (црвена стрелица). Све машине имају могућност подешавања положаја обрадне главе по висини.



Слика 17. Шема кретања порталне и конзолне машине

Многи производи имају више површина које треба обрадити. Водени млаз се лако адаптира за 3D сечење. Мале силе резања пружају могућности које немају стандардне машине за обраду резањем. Многи производи имају више површина које треба обрадити. Напредак у 3D обради метала и композитних материјала указује на све већу потребу за обраду елемената који нису потпуно и само равни. Тродимензионална обрада воденим млазом се у новије време примењује за израду жлебова. При изради жлеба једним пролазом добија се неравно дно, а услед одбијања млаза од дна, неравне стране. За заобљавање оштрих ивица воденим абразивним млазом користе се ниски радни притисци до 4 бара, при брзини млаза од 30 m/s. Заобљавање оштрих ивица врши се и воденим млазом при радном притиску 700 – 1000 бара.

Савремени Water Jet системи се могу у потпуности програмирати. Преко специјалног, наменског софтвера, програмер у канцеларији креира путању алата, а затим програм пребаци у контролни систем машине, који тада сече материјал. Софтвер омогућује већу брзину сечења и већу тачност, јер врши оптимизацију брзине сечења (посебно на угловима).

3.2 Преглед WJM машина са различитим карактеристикама

Машина NC 3015 EB поседује савремену CNC технологију која омогућава резање разних облика великом прецизношћу, (слика 18). Вода достиже притисак од 3800 бара, а проток воде је 7,6 l/min. Овај систем омогућава резање скоро свих материјала (изузев каљеног стакла) као на пример: сви метали, стакло, керамика, каљени материјали, гума, пластика, гранит, мермер, дрво, плексиглас, композитни материјали и др. Приликом сечења растојање између делова је веома мало од 1,8 до 2 mm, што је веома битно код скувих материјала, као што су инокс, бакар, месинг.



Слика 18. Water jet NC 3015 [8]

Поседује 4 резне главе од чега: 2 главе за абразивно + 2 главе за резање чистом водом (могућа је надоградња за абразивно резање), као и 2 дозатора за песак. Посуда са притиском за абразив је од 200 kg. Основна компонента је пумпа која ради на уљно – хидраулични погон.

Таблица 1: Машински подаци Water jet NC 3015

Радни сто величине /XxY/	3200 × 1750 mm
Резна површина	3100 × 1510 mm
X – оса покрети	2270 mm
Y – оса покрети	1510 mm
Z – оса /висина/	175 mm
Позициона прецизност	+/- 0,05 mm на 1000 mm
Прецизност понављања	+/-0,025 mm
Брзина напајања водом у X и Y оси	10 000 mm/min
Напајање у Z - оси	4 000 mm/min
Мин. растојање резних глава	90 mm
Макс. растојање резних глава	1500 mm

Машина ZX – 2043 је водећи модел са флексибилношћу да се смањи утрошак материјала, (слика 19).



Слика 19. Water jet ZX – 2043 [9]

Поседује 5 резних глава које су намењене за сечење, бушење, резање навоја и тд. Може да сече 1.5m × 3m; 2m × 4m; 3m и шире (неограничена дужина) и 4m и шире (неограничена дужина). Све WARD waterjet машине су конструисане тако да неограничена дужина лимова или делова пролази кроз предњу или задњу страну waterjet-а.

Таблица 2: Машински подаци Water jet ZX - 2043

Радни сто величине /XxY/	5380 × 2690mm
Софтвер	CAD/CAM инсталиран на личном рачунару
Притисак воде	6205 бара
Посуда са притиском за абразив	498 kg
Позициона прецизност	± 0,08 mm
Прецизност понављања	± 0,03 mm

WARD water jet поседује два управљачка система, односно два екрана осетљива на додир. Неке од функција које су доступне су интернет конекција на управљачком систему за аутоматско ажурирање, директна комуникација са техничком подршком, дупли екран осетљив на додир, 5 резних глава и могућност компензација.



Слика 20. Управљачки систем [9]

Машина OMAX 2626 је веома прецизна waterjet машина за израду мањих делова. Овај модел сече сложене делове разних материјала као што су: метал, пластика, стакло, керамика и композит директно из CAD цртежа. Пумпа машине има веома ефикасан погон пумпе са притисцима од 3800 бара.



Слика 21. Water jet OMAX 2626 [10]

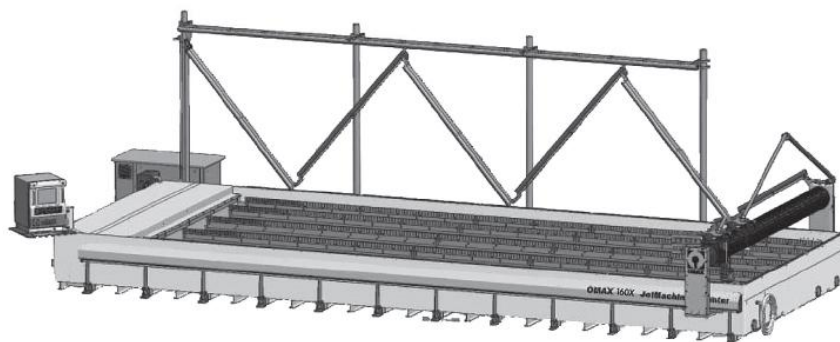
Машина је идеална за брзу обраду делова, правовремену производњу, постављање алата и развој прототипова. Резервоар за абразив може да се налази чак 20 m од машине. Систем користи компримовани ваздух за аутоматски транспорт граната. Такође систем даје визуелно упозорење пола сата пре него што остане без абразивних зрна, како би се допунио пре него што потпуно нестане.

Таблица 3: Машински подаци Water jet OMAX 2626

Радни сто величине /XxY/	1168 × 787 mm
Резна површина	737 × 660 mm
Софтвер	CAD/CAM инсталиран на личном рачунару
Прецизност понављања	±0,033mm
Позициона прецизност	±0,08mm

Управљачки систем – систем контроле кретања аутоматизује већину програмирања и подешавање алата, практично елиминишући потребу за широку обуку оператора.

Машина OMAX 160X – 3 је једна од највећих OMAX – ових машина. Фабрички има 5 млазница и служи за сечење већих делова или више пројеката различитих материјала. Пумпа је на располагању са притисцима до 4135 бара.



Слика 22. Water jet OMAX 160 – X [10]

Утоварни капацитет материјала је 195 kg/m². Јачина буке на радном месту износи 80 DbA.

Таблица 4: Машински подаци Water jet OMAX 160X - 3

Радни сто величине /XxY/	14783 × 4496 mm
Резна површина	14224 × 4064 mm
Прецизност понављања	± 0,051 mm
Правост	0,25 mm/m

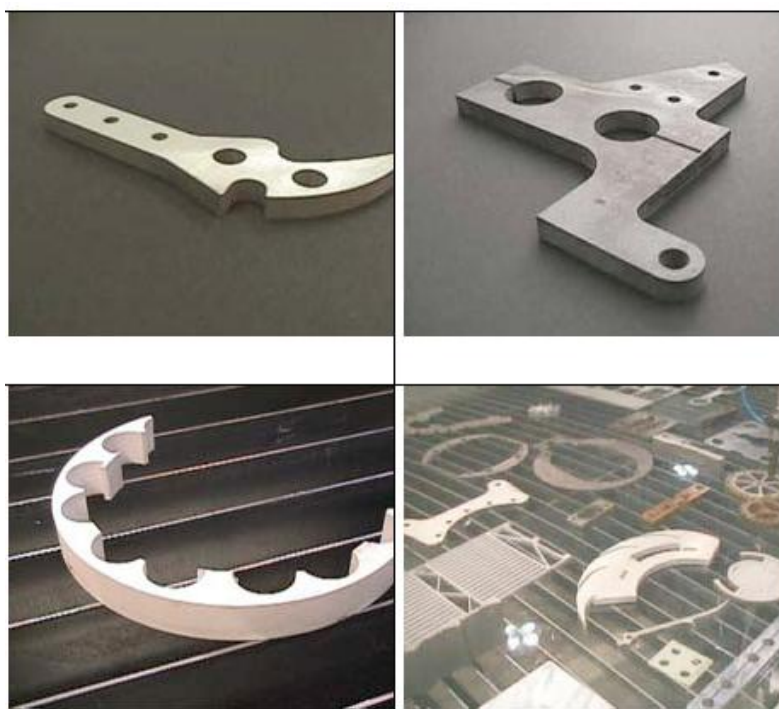
Са оваквим карактеристикама машине могу се сећи делови сложене геометрије са великом ефикасношћу и брзином.

3.3. Примери примене

Сечење абразивним воденим млазом стекло је популарност 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.

Пре свега се примењује за сечење тврдих материјала, као што су метали, камен, керамика, стакло, композитни материјали и тд.

Материјали као што су нерђајући челик, легирани челик, титан и тврде легуре, добро се секу и то без штетног утицаја на метал.



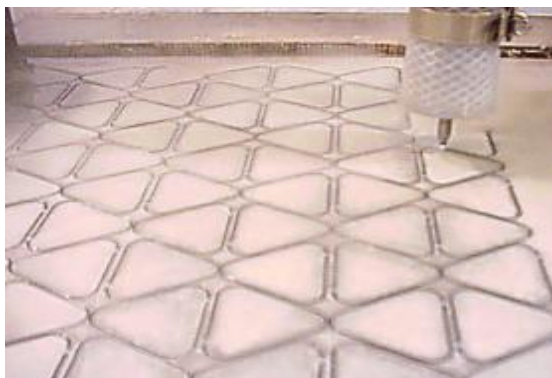
Слика 23. Делови израђени обрадом AWJC [4]

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

Друге индустријске гране које користе ову технологију су: хемијска индустрија, медицина и здравство, прехранбена индустрија.

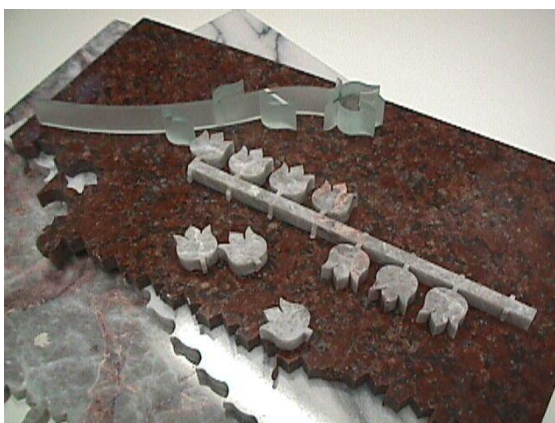
У електротехничкој и електронској индустрији се користи за чишћење површинских контаката и сечење материјала, као што су: каптон, ферит, електро изолациони материјали, керамика и др.

Машинска индустрија користи ову технологију за резање титана, волфрама, молибдена, кобалта, никла, титана, урана, врло чврстих челика, тврдих и тешко обрадљивих материјала и др.



Слика 24. Исецање делова из плоче (легуре никла, хрома и гвожђа) [4]

Обрада воденим абразивним млазом има највећу примену за резање композитних материјала (стакло, пластика и сл.) и танких металних лимова за заобљавање оштрих ивица. Могу се сећи стакла дебљине до 200 mm.



Слика 25. AWJ поступак обликовања стакла [4]

У индустрији обуће и галантерије секу се природне и вештачке коже, гуме, пластичне масе свих врста и др.

Грађевинска индустрија користи ову технологију за сечење различитих врста материјала, као што су изолациони материјали: полиуретан, стиропор, стаклена влакна, стаклена вуна, бетон; азбестно – цементни материјали: камен, малтер, асфалтни производи, керамика и др.

Даља примена технологије абразивним воденим млазом води ка развоју нових варијанти система са следећим наменама:

- резање материјала у грађевинарству и рударству,
- бушење у рударским окнима,
- подземно бушење ради полагања кабловских водовода. [4]

Могућност исецања вишеслојних материјала AWJ поступком приказана је на слици 26.



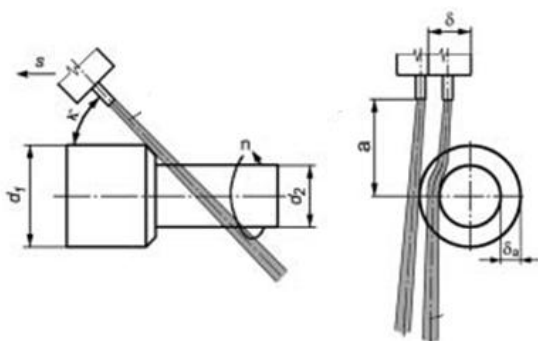
Слика 26. Могућност исецања трослојног материјала (гума – тефлон – тефлон) [4]

Могућност обраде шупљикавог дела од алуминијума приказана је на слици 27.



Слика 27. Обрада шупљикавог дела од алуминијума (дебљине 10 mm) [4]

Створене су и претпоставке за коришћење ове технологије за обраду делова ротационог облика, чија је принципијална шема обраде приказана на слици 28. Основна технолошка претпоставка за ову обраду је да главно обртно кретање на машини изводи обрадак, а помоћно праволинијско кретање млазник. Пошто при овој обради настаје грубо обрађена површина, после ње следи завршна обрада помоћу неке друге обраде. Веома је битно да при овој обради у површинском слоју не настају никакве промене микроструктуре или тврдоће, што је веома важно код стругања епрувета које се користе за испитивање материјала затезањем.



Слика 28. Шема обраде делова ротационог облика абразивним воденим млазом [2]

4

КАРАКТЕРИСТИКЕ МАШИНЕ WJ2040 - 1Z – SJ - S

У потрази за смањењем трошкова производње, инжењери и произвођачи машина за обраду стално проналазе нове и усавршавају постојеће начине обраде. Употреба машина за обраду воденим млазом доживљава најбржи раст на свету. Waterjet је потпуно прилагодљив, продуктиван хладни процес обраде.

Waterjet је у могућности да уради посао који друге технологије не могу. Скоро сви материјали могу бити обрађени. Потрошња материјала је сведена на минимум. Могуће је сећи у скоро свим правцима и извести било коју контуру.

Технологија високопритисног воденог млаза не ствара никакве хигијенски нездраве отпадне продукте који би озбиљно могли да угрозе околину. Постоје посебне безбедносне мере које се односе на ток млаза воде под високим притиском.

3.2.1 Основне карактеристике машине

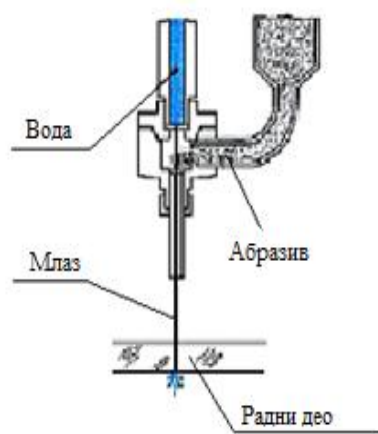
Waterjet машина WJ2040 - 1Z – SJ – S се налази у предузећу „Технички ремонтни завод Чачак“ – Чачак, слика 29.



Слика 29. WJM машина Технички ремонтни завод „Чачак“

Технологија сечења воденим абразивним млазом је комплексан процес интеракције абразивног воденог млаза и материјала који се обрађује.

Ова метода ради тако што систем под веома великим притиском испушта воду која се меша са абразивом користећи систем за дозирање и формира се млаз веома велике брзине, слика 30.



Слика 30. Шема мазнице и изглед мазнице на машини

Абразив

Као абразив најчешће се користе: гранат, силицијумски песак, силицијум карбид, ситни опиљци гвожђа и др. Ова машина користи гранат као абразив чији је произвођач Australia, GMA - 80 mesh. Гранулација 80 – 0,188 mm спада у фине класификационе величине ситног песка. Тврдоћа по Mohsu износи 7,5. Специфична тежина износи $4,1 \text{ g/cm}^3$.

Основни параметри и технички опис машине:

Уз помоћ мултипликатора вода достиже притисак од максималних 4137 бара, а проток воде је 8 l/min. Опсег радне брзине се креће од 1 – 12000 mm/min. Дебљина материјала за сечење може да буде од 1 до 200 mm. Утоварни капацитет је 150 kg/m^2 . Јачина буке на радном месту износи 83 db (A).

Резни сто носи технолошке главе са високопритисним воденим, абразивним млазом. То омогућава резање материјала типа плоча. Могу се резати разне врсте материјала, различите дебљине. Оперативни систем омогућава континуалне аутоматске покрете резних глава у распону X – Y нивоа, а такође омогућава и ручно покретање у Z – оси.

Корито и решетке

Корито служи за прихватање отпадне енергије мазнице. То је резервоар за воду

који се налази испод решетке. На стационарну решетку оператор поставља материјал. Оператери морају сами да товаре полупроизводе за резање и да уклањају делове као и отпатке материјала са простора за утовар резних решетки. Решетке су направљене од обичног конструкционог челика, префарбаног заштитном фарбом, због њиховог ограниченог века трајања.

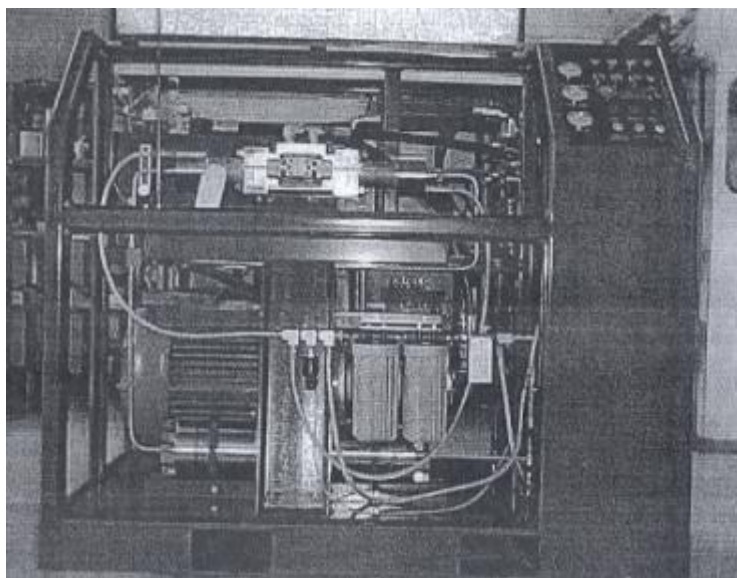
Покретни делови

Механизам стола је конструисан помоћу две осовине постављене у облику слова Н. На паралелним Х – осовинама налазе се путујући вагонети који носе портал Y - осовине. Осовине су покривене штитницима против прашине и воде. Z - осе су постављене на вагонетима Х - оса. Високопритисне цеви за дозирање абразива су монтиране на Z – осе.

Високопритисна пумпа JETS – 3.8/60

Пумпа је срце waterjet система. Она повећава притисак воде и континуално је испоручује обрадној глави. Пумпа JETS – 3.8/60 се поставља у посебну просторију ради превенције буке на радном месту, чистоће при одржавању и сервисирању и безбедности при раду. На слици 31. приказана је шема пумпе JETS – 3.8/60.

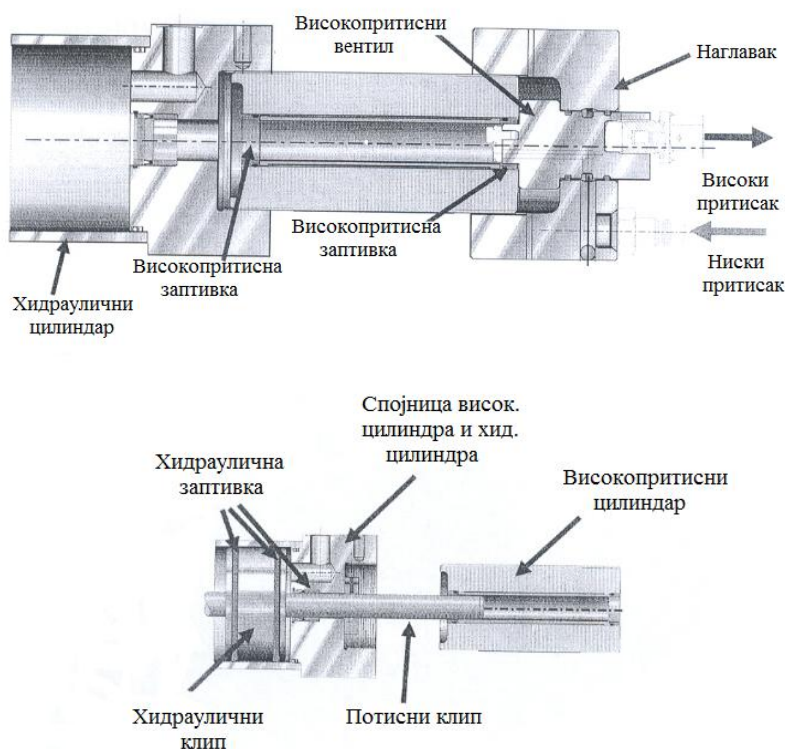
Неопходно је коришћење чисте, филтриране воде, по могућству воде из водовода. Максимални утрошак је 4,0 l/min. Максимални притисак у улазном прикључку за воду је 6 бара, а минимални 3,5 бара.



Слика 31. Високопритисна пумпа

Мултипликатор повећава притисак воде помоћу притиска хидрауличног уља (215 бара у погону) до максималног притиска од 4100 бара (када се користи мултипликатор типа 60К). Уређај користи један мултипликатор. Број циклуса (ресетовања) мултипликатора је 80 – 100/min у зависности од дизне млазнице.

На слици 32. приказана је шема мултипликатора.



Слика 32. Шема мултипликатора

Високопритисни мултипликатор састоји се од хидрауличног цилиндра са двоструким ходом, преносног вентилног склопа, радног вентилног блока и два високопритисна цилиндра за воду опремљеним са вентилима за затварање на излазном и улазном делу.

Процедура стављања машине у погон:

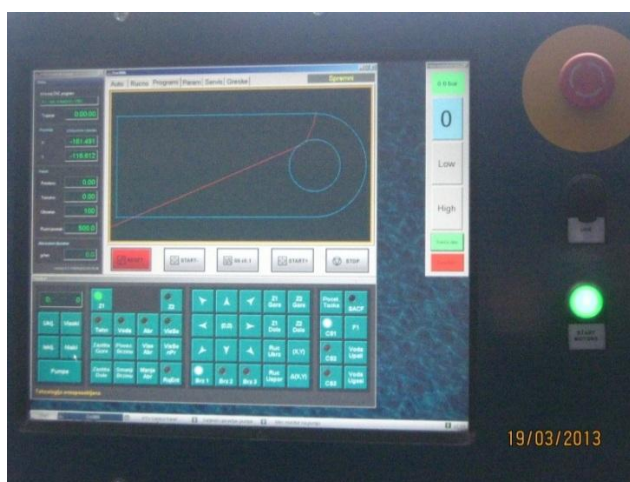
1. Отворити довод воде у одељак за филтрирање и проверити податке на манометрима да ли је притисак воде довољан (3 – 6 бара).
2. Прегледати оба довода воде у мултипликатор да негде не цуре .
3. Затворити високопритисни вентил на високопритисном доводу до радне површине сечења.
4. Окренути потенциометар регулатора хидрауличног уља на лево све до краја (најнижи притисак).
5. Укључити главни прекидач на главном разводнику.
6. Притиснути дугме START.
7. Сачекати док се рад машине не стабилизује, а онда прегледати читаву машину.
8. Подесити притисак уља на радну вредност од 205 бара лаганим окретањем потенциометра регулатора притиска уља на десно.
9. Пустити високопритисну воду у високопритисне цеви уз полако отварање високопритисних вентила на излазном делу мултипликатора.
10. Прегледати читаву машину и затворити све поклопце.

3.2.2 Управљачки систем машине Cnc886/Win

Управљачки систем подржава Windows – систем и има могућност комбиновања са другим програмима у циљу управљања производњом, као што су нпр. CAD/CAM системи. Фајл са цртежом који се програмира у WRYKRYС програму се пребацује на хард диск управљачког система Cnc886/Win који се налази засебно од waterjet машине, слика 33.

Под програмирањем се подразумева дефинисање технологије сечења. У програм се убацују димензије припремка. Дефинишу се тачке пробијања, приступних улазних и излазних.

Управљачки систем омогућује максималну брзину и прецизност при обради делова.



Слика 33. Управљачи систем

Cnc886/Win има свој стандардизовани интерфејс. Опремљен је „touchscreen“ – ом (екраном на додир). Једина мана овог екрана је да он не омогућује операције које се активирају кликом на десни тастер миша. Из тог разлога, као и због учитавања бројева, обраде података и других операција се користе миш и тастатура.



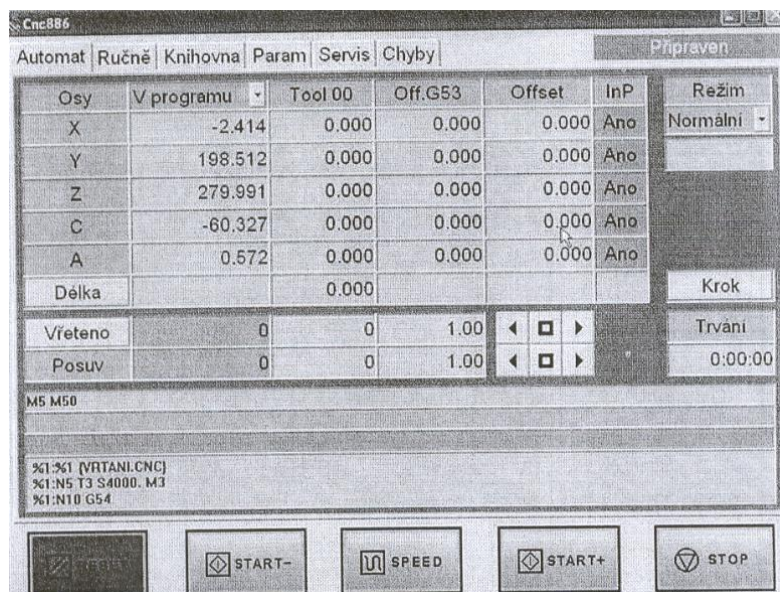
Слика 34. Управљачки систем

Оператер поставља припремак на радни сто машине. После позиционирања дизне машине, довођењем ручним командама преко управљачког система, на истом се дефинишу следећи елементи:

- Конфигурација материјала који се обрађује
- Дебљина материјала
- Врста пробијања
- Време трајања пробијања
- Притисак пробијања
- Проток абразива код пробијања
- Притисак резања
- Проток абразива код резања

Сви ови елементи утичу на процес сечења, тако што одређују ефикасност, економичност и квалитет процеса. Одређује се квалитет реза, као и количина одвојеног материјала.

На слици 35. приказано је стандардно радно окружење корисника Cnc886/Win управљачког система:



Слика 35. Радно окружење управљачког система Cnc886/Win

Статусни прозор у горњем десном углу показује уколико постоје грешке у извршењу било које операције. Пет тастера који се налазе дуж доње ивице екрана монитора имају различите функције.

RESET има функцију да заустави неку операцију која је у току (светли црвено када је активиран). START - има функцију да стартује ручно померање по осовинама према назад (светли жуто када је активиран). SPEED тастер редукује брзину позиционирања супорта (дугме је бело када је редуковање брзине тражено). START + служи за стартовање програма (светли жуто у току кретања). STOP служи за заустављање програма (светли црвено уколико је програм заустављен).

5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА И РЕЗУЛТАТИ

Експериментална испитивања имала су за циљ да се утврди утицај параметара режима обраде на квалитет обрађене површине.

Испитивања су вршена на машини Water jet WJ2040-1Z-SJ-S и TRZ Čačak.

Материјал предмета обраде је S235JRG2 (Č0361), његове карактеристике су приказане у табели 5.1.

Врста материјала	Хемијски састав		Тврдоћа	Затезна чврстоћа
	S (%)	P (%)	HB	(N/mm ²)
S235JRG2 (Č0361)	0,06	0.06	105-125	370 - 390

Табела 5.1 Карактеристике материјала

Основни параметри и фактори утицаја, који се дефинишу приликом припреме WJM су:

- потрошња воде (l/min)
- повишење радног притиска (bar)
- проток воде (l/min)
- брзина излаза воде из млазнице (m/s)
- температура на предмету резања (°C)
- потрошња струје у току рада (V)
- проток коришћених абразива (g/min)
- коришћен абразив и његова тврдоћа
- пречник абразива на излазу из млазнице (mm)
- пречник клипа на пумпи (mm)
- повишење притиска за улазни притисак воде (bar)
- улазни пречник воде у млазници (mm)

- улазни пречник абразивне млазнице у млазници (mm)
- удаљеност млазнице (mm)
- притисак воде у случају пражњења (MPa)
- улазни угао на млазници
- потрошња енергије (kwh)
- брзина кретања млазнице V (mm/min) (у даљем делу текста: брзина)
- бука

5.1 План испитивања

Током експеримента спроведено је испитивање које се односи на квалитет резања код WJM сечења материјала S235JRG2 (Č0361) дебљине 15 mm при варирању параметара обраде. Варира један параметар тако што се узима препоручена вредност док остали параметри имају оптималне вредности препоручене од стране произвођача WJM машине за дати материјал дебљине 15 mm. Испитивање је вршено са три различита режима и то при промени протока абразива, промени удаљености млазнице и промени брзине.

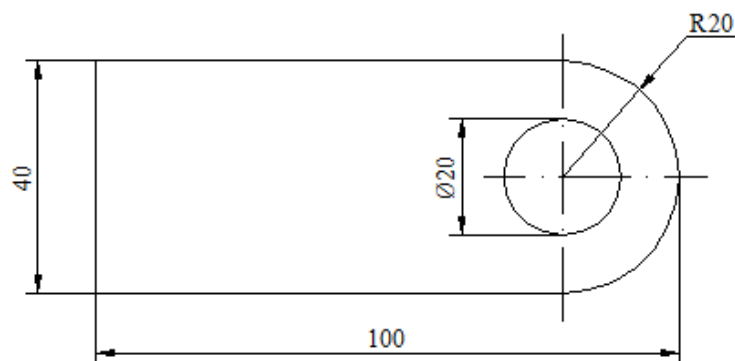
Испитивање је извршено варирањем параметара у распону:

- Брзина (mm/min): $35 \div 182$
- Проток абразива (g/min): $300 - 400$
- Удаљеност млазнице (mm): $3 - 7$

Оптималне вредности ових параметара, препоручене од стране произвођача, за челик дебљине 15 mm су:

- Брзина (mm/min): 63
- Проток абразива (g/min): 350
- Удаљеност млазнице (mm): 3

Испитивање садржи четири експеримента. За сваки експеримент исечен је одређени број узорак од угљеничног челика S235JRG2 (Č0361), облика и димензија приказаних на слици 36.



Слика 36: Димензије узорка

Карактеристике експеримената:

1. Експеримент са променљивим протоком абразива, и константној брзини сечења, константном притиску и удаљености млазнице 3 мм (узорци 1 и 2),
2. Експеримент са променљивим удаљењем млазнице, са константном брзином сечења, константном притиску и протоку абразива (узорци 3 и 4).
3. Експеримент са променљивим брзинама сечења, при константном протоку абразива, удаљености млазнице и притиску (узорци 5 и 6).
4. Експеримент са променљивим брзинама сечења где су вредности препоручене од стране произвођача машине за WJM за дати материјал, и то као пример лошег, средњег и најбољег режима обраде (Узорци 7, 8 и 9).

Испитивање микрогеометрије површине реза вршено је на мерном уређају "Talysurf-6" (слика 37).



Слика 37: Мерни уређај "Talysurf -6"

Уређај је компјутеризован и има широк спектар могућности као што су:

- мерење основних и допунских параметара храпавости и валовитости,
- статистичка обрада резултата мерења параметара храпавости,
- приказивање резултата на екрану, њихово меморисање, штампање и цртање,
- просторно скенирање површине.

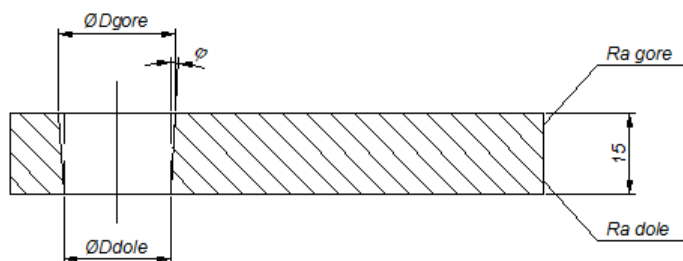
Мерни уређај је повезан са рачунаром помоћу кога се врши меморисање и обрада резултата мерења.

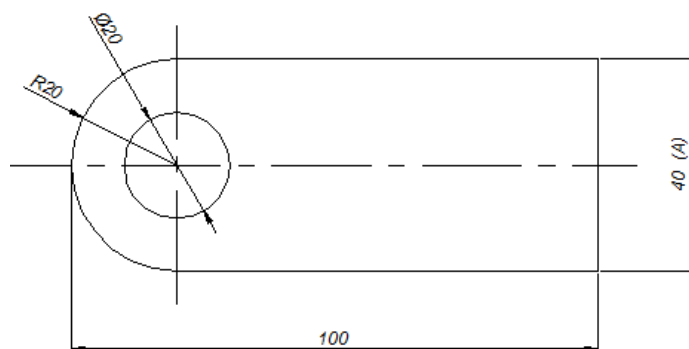
У табели 5.2. приказани су параметри топографије површине који су се мерили помоћу мерног уређаја Talysurf-6. У прилогу су дати комплетни резултати мерења.

$Ra, \mu m$	Средње аритметичко одступање профила на дужини оцењивања
$Rq, \mu m$	Средње квадратно одступање профила на дужини оцењивања
$Ry, \mu m$	Максимална висина профила, максимална Rti вредност
$Rtm, \mu m$	Средња Rti вредност
$Rv, \mu m$	Највећа дубина удубљења профила
$Rp, \mu m$	Највећа висина испупчења профила
$Sm, \mu m$	Средњи корак испупчења профила
$\Delta q, ^\circ$	Средњи квадратни угао нагиба профила
Rsk	Коефицијент асиметрије профила, мера симетрије криве расподеле амплитуда
Rku	Куртосис, мера заострености криве расподеле амплитуда
$S, \mu m$	Средњи корак локалних испупчења профила
$R3z, \mu m$	Средња вредност растојања трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини профила
$Rpm, \mu m$	Средња вредност Rpi одређених на референтним дужинама
$R3y, \mu m$	Највеће растојање трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини

Табела 5.2 Параметри топографије површине који се мере коришћењем Talysurf-6

На слици 38. приказане су димензије узорка, означене димензије (D_{gore} , D_{dole} , A и угао ϕ) који су посебно мерени. У табели 5.3 су дате измерене вредности. Напомена да је димензија „ A “ мерена на средини висине предмета.





Слика 38: Контролисане димензије узорка

У табели 5.3 приказани су режими сечења, параметри храпавости, измерене димензије узорка као и израчунат угао коничности отвора.

Узорак	Q g/min	Vp mm/min	Z mm	Ra _{горе} μm	Ra _{доле} μm	A mm	D _{горе} mm	D _{доле} mm	φ ⁰
1	400	66.8	3	3	5.2	39.32	20.93	20.83	0.143
2	300	60	3	3.4	4.3	39.41	20.90	20.76	0.20
3	400	63.8	5	4.1	5	39.24	20.98	20.71	7.76
4	400	66	7	4.6	5.1	39.08	21.35	21.0	10.08
5	400	120	3	4.6	12.1	39.60	20.83	20.63	5.74
6	400	35	3	3.1	3.8	38.84	21.27	21.25	0.57
7	350	63.4	3	3.9	4.5	39.18	21.23	21.02	6.03
8	350	114.1	3	5.5	12.2	39.41	21.30	21.17	3.73
9	350	181.9	3	5.6	11.8	39.77	21.28	20.97	8.92

Табела 5.3 Вредности режима обрада, параметара храпавости, контролисаних димензија

На наредним дијаграмима приказане су промене Ra_{доле} у зависности од режима. Вредности параметара храпавости Ra_{горе} нису приказане јер на њих режими сечења немају значајнији утицај.

5.1.1. Експеримент - 1:

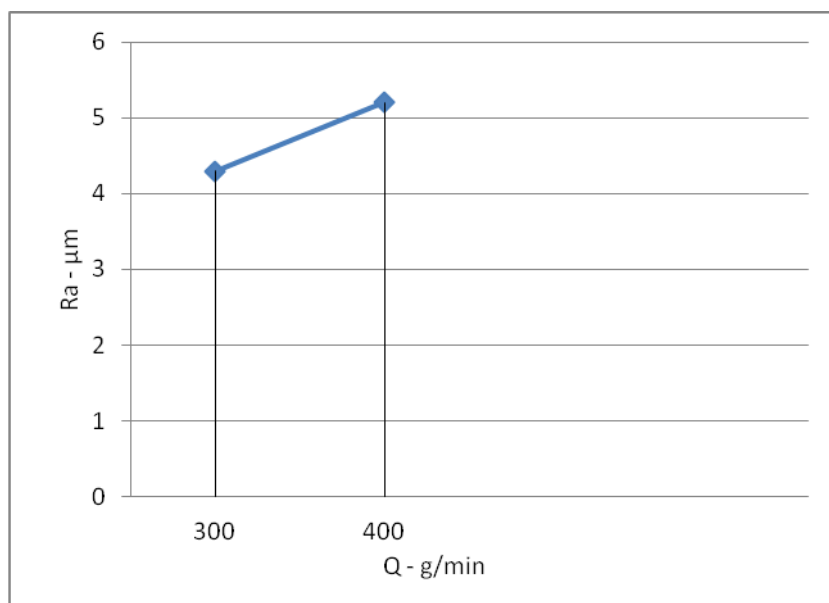
Променљиви проток абразива, константна брзина сечења, константни притисак и удаљеност млазнице

У приказаном експерименту извршено је сечење абразивним воденим млазом са различитим протоцима абразива, при константној брзини сечења, притиску и удаљености млазнице. Направљена су два узорка, сечен је плочасти материјал дебљине 15 mm, са притиском од 4130 бара, брзини сечења приближно 60-66 mm/min и протоцима абразива приказаним у табели 5.3. Удаљеност млазнице од узорка је била 3 mm.

На основу вредности из табеле 5.3 и међусобним поређењем истих за прва два испитивана узорка, може се извести закључак да су квалитети обрађених површина

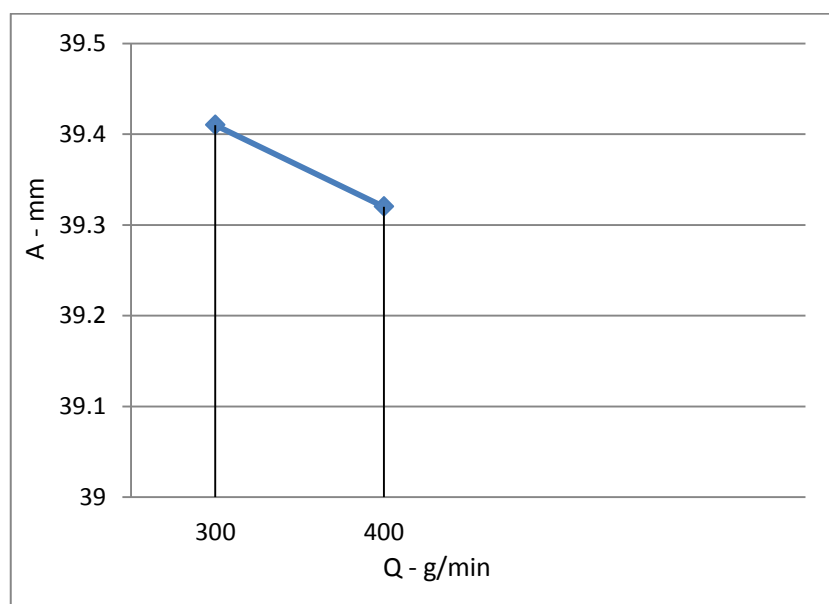
приближно исти, односно да при осталим истим параметрима режима сечења, количина протока абразива нема утицаја. Димензиона тачност отвора је незнатно лошија код првог узорка, као и вредност димензије A , док је угао ϕ мањи код првог узорка.

На дијаграму 1 приказана је промена вредности параметара хrapавости $Ra_{\text{доле}}$ у зависности од протока абразива Q . Са дијаграма се може уочити да при повећању протока абразива при брзини од 4130 бара квалитет обрађене површине се незнатно смањује.



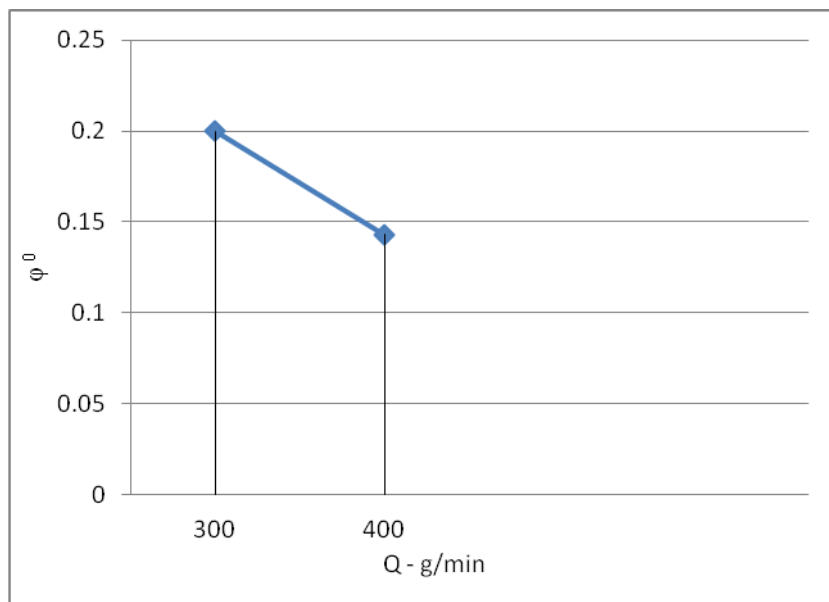
Дијаграм 1 – Промена вредности параметара хrapавости $Ra_{\text{доле}}$ у зависности од количине абразива Q

На дијаграму 2 приказана је промена вредности мерене димензије A у зависности од протока абразива Q . Са дијаграма се може уочити да је мања вредност дужине A при већем протоку абразива.



Дијаграм 2 – Промена вредности димензије A у зависности од количине абразива Q

На дијаграму 3 приказана је промена вредности угла коничности отвора ϕ^0 у зависности од протока абразива Q . Дијаграм 3 говори да је при мереним условима сечења закошење отвора је веома мало, а да са повећањем протока абразива угао коничности отвора се незнатно смањује.



Дијаграм 3 – Промена вредности угла коничности отвора ϕ^0 у зависности од количине абразива Q

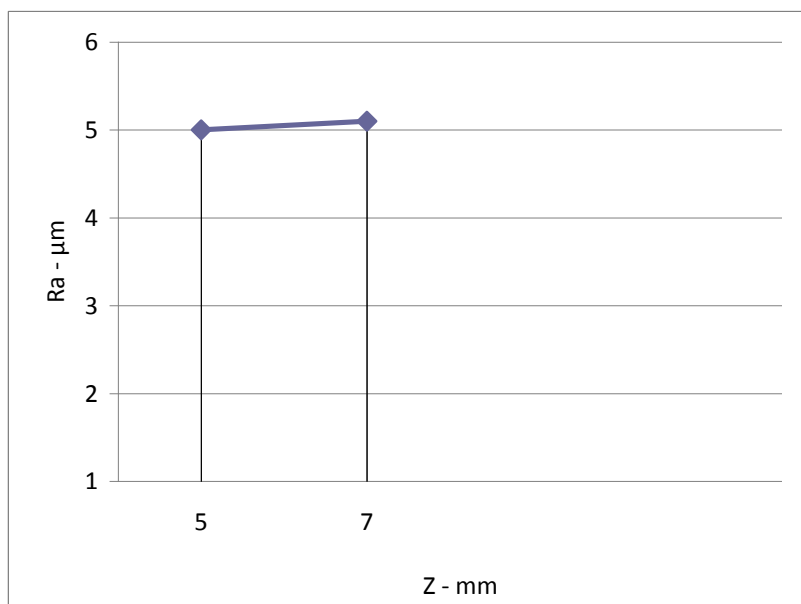
5.1.2. Експеримент - 2

Променљива удаљеност млазнице, константна брзина сечења, константан притисак и проток абразива

У следећем експерименту извршено је сечење абразивним воденим млазом са различитим удаљеностима млазнице од радног предмета, са једном брзином сечења, при константном притиску и протоку абразива. Направљена су два узорка, сечена од плочастог материјала дебљине 15 mm, са притиском од 4130 бара, протоком абразива 400 g/min и при брзини сечења 64-66 mm/min . Удаљеност млазнице код првог узорка је 5 mm, а код другог 7 mm.

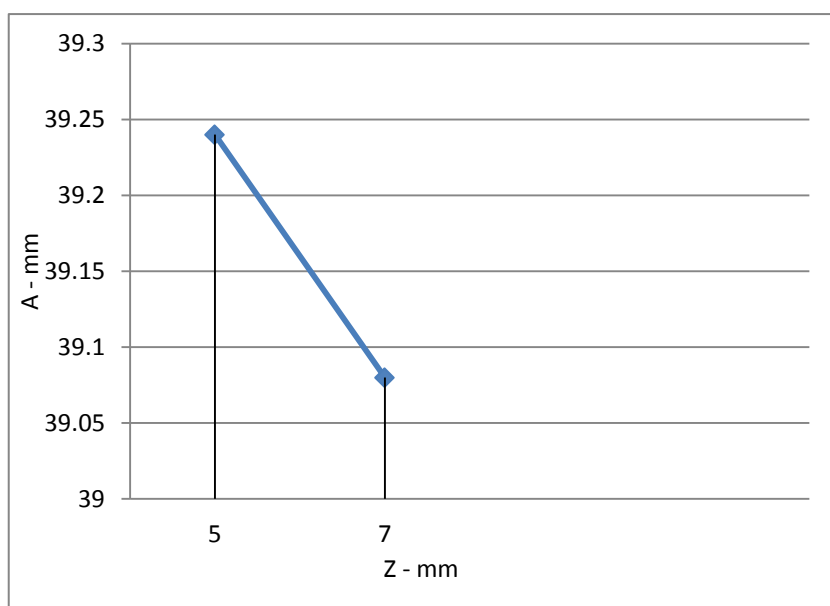
На основу вредности из табеле 5.3, долази се до закључка да од два испитивана узорка незнатно бољи квалитет површине реза, као и димензиону тачност отвора и мањи угао коничности отвора има узорак под редним бројем 3, односно узорак добијен са мањим растојањем млазнице од предмета који се сече.

На дијаграму 4 приказана је промена вредности параметара храпавости $Ra_{\text{доле}}$ у зависности од удаљености млазнице Z . Са дијаграма се може уочити да удаљеност млазнице скоро и не утиче на квалитет обрађене површине.



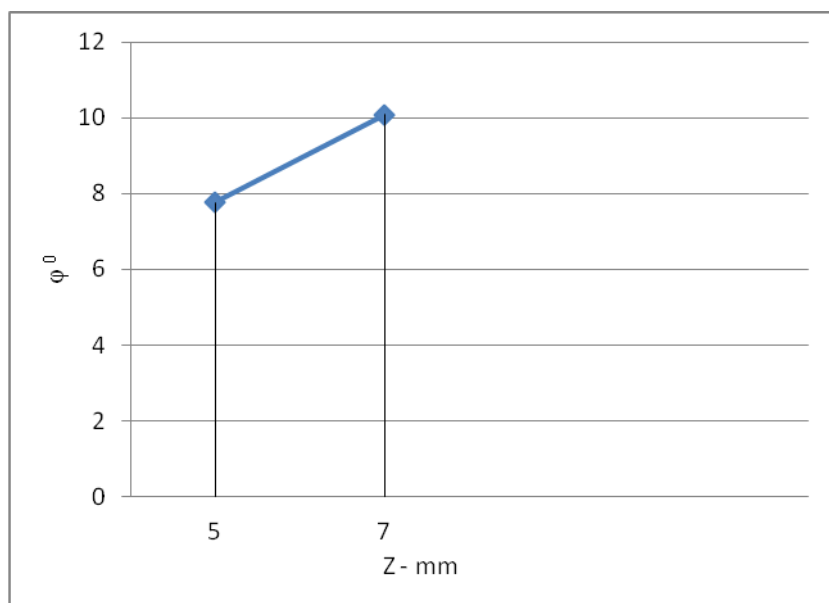
Дијаграм 4 – Промена вредности параметара хrapавости $Ra_{\text{доле}}$ у зависности од удаљености млазнице Z

На следећем дијаграму 5 приказана је промена вредности мерене димензије A у зависности од удаљености млазнице Z . Може се уочити да је мања дужина при већој удаљености млазнице.



Дијаграм 5 – Промена вредности димензије A у зависности од удаљености млазнице Z

На дијаграму 6 приказана је промена вредности угла коничности отвора у зависности од удаљености млазнице Z . Са дијаграма се може уочити да са повећањем удаљености млазнице расте и вредност угла коничности отвора.



Дијаграм 6 – Промена вредности угла коничности отвора ϕ^0 у зависности од удаљености млазнице Z

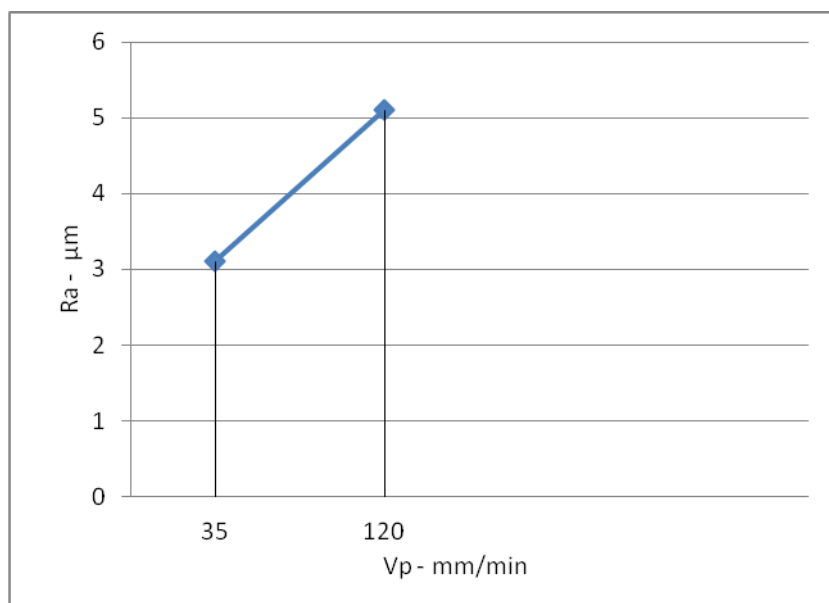
5.1.3. Експеримент - 3

Променљива брзина сечења, константан проток абразива, удаљеност млазнице и притисак

У приказаном експерименту извршено је сечење абразивним воденим млазом различитим брзинама сечења, при константном протоку абразива, константној удаљености млазнице и притиску. Направљено је два узорка, сечен је плочасти материјал дебљине 15 mm, са притиском од 4130 бара, протоком абразива 400 g/min, удаљеношћу млазнице 3 mm и брзинама сечења 35 и 120 mm/min, табела 5.3.

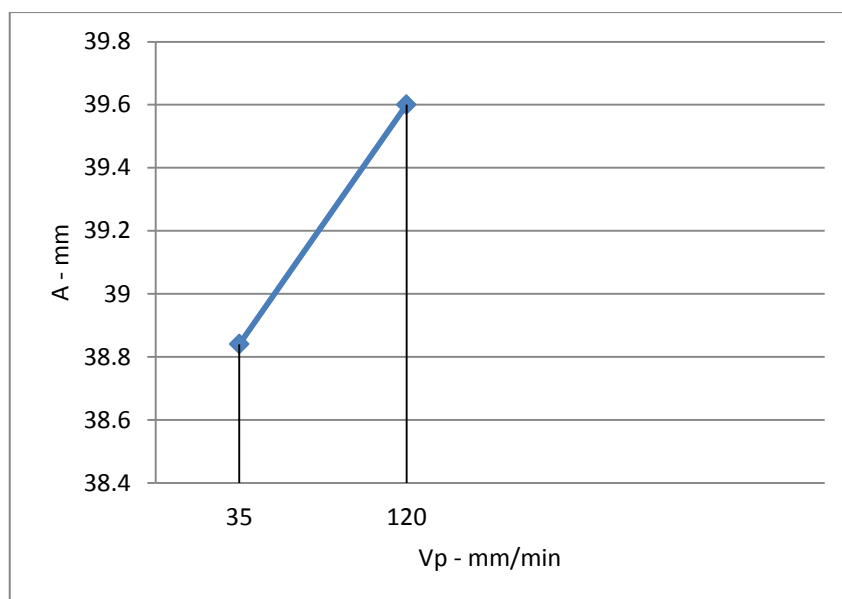
На основу вредности из табеле 5.3 може се извести закључак да узорак под редним бројем 6 (мања брзина сечења) има бољи квалитет обрађене површине, док је димензиона тачност отвора знатно лошија као и вредност димензије. Угао ϕ код другог узорка је готово занемарљив у односу на угао код првог.

На дијаграму 7 приказана је промена вредности параметара храпавости $Ra_{\text{доле}}$ у зависности од брзине сечења V_p . Може се уочити да са повећањем брзине сечења параметар $Ra_{\text{доле}}$ се повећава, а самим тим долази до знатног смањења квалитета обрађене површине.



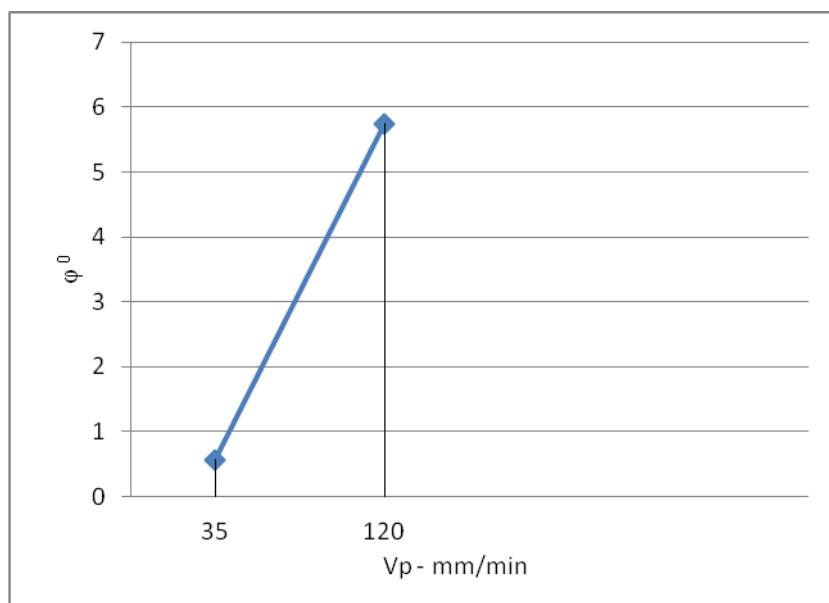
Дијаграм 7 – Промена вредности параметара храпавости $Ra_{доле}$ у зависности од брзине сечења

На дијаграму 8 приказана је промена вредности мерене димензије A у зависности од брзине сечења V . Са дијаграма се види да се добија већа димензија при већој брзини сечења.



Дијаграм 8 – Промена вредности димензије A у зависности од брзине сечења V_p

На следећем дијаграму 9 приказана је промена вредности угла коничности отвора φ^0 у зависности од брзине сечења V . Са дијаграма се може уочити да са повећањем брзине сечења угао коничности отвора се знатно повећава.



Дијаграм 9 – Промена вредности угла коничности отвора ϕ^0 у зависности од брзине сечења V_p

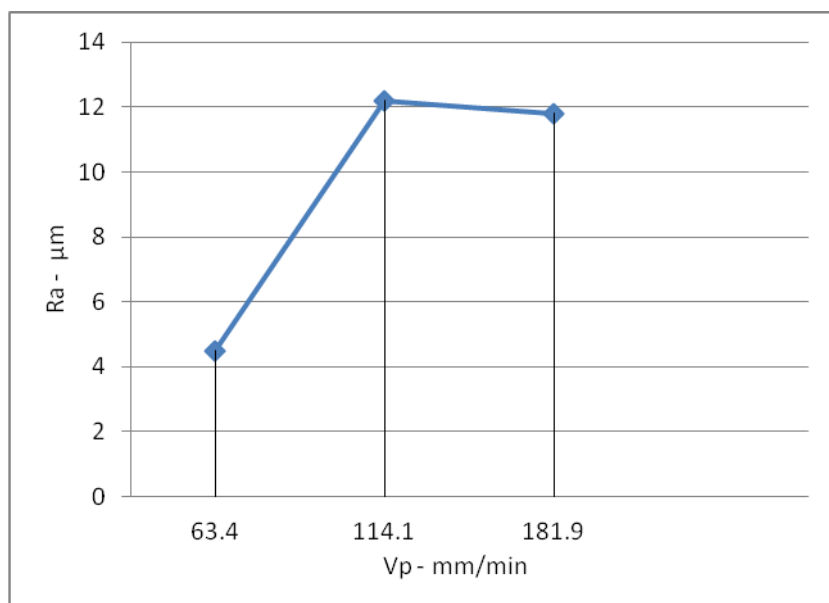
5.1.4. Експеримент - 4

Променљиве брзине сечења где су вредности препоручене од стране произвођача WJM за дати материјал кроз примере лошег, средњег и најбољег режима

У експерименту - 4 извршено је сечење абразивним воденим млазом са препорученим вредностима од стране произвођача WJM за дати материјал, при чему је као пример лошег режима дата брзина сечења од 181,9 mm/min, као пример средњег режима означена брзина сечења од 114,1 mm/min и најбољег режима обраде са брзином сечења од 63,4 mm/min. За сваки од режима направљен је по један узорак. Сечен је плочасти материјал дебљине 15 mm, са притиском од 4130 бара, протоком абразива 350 g/min и брзинама сечења приказаним у табели 5.3. Растојање млазнице је било 3 mm.

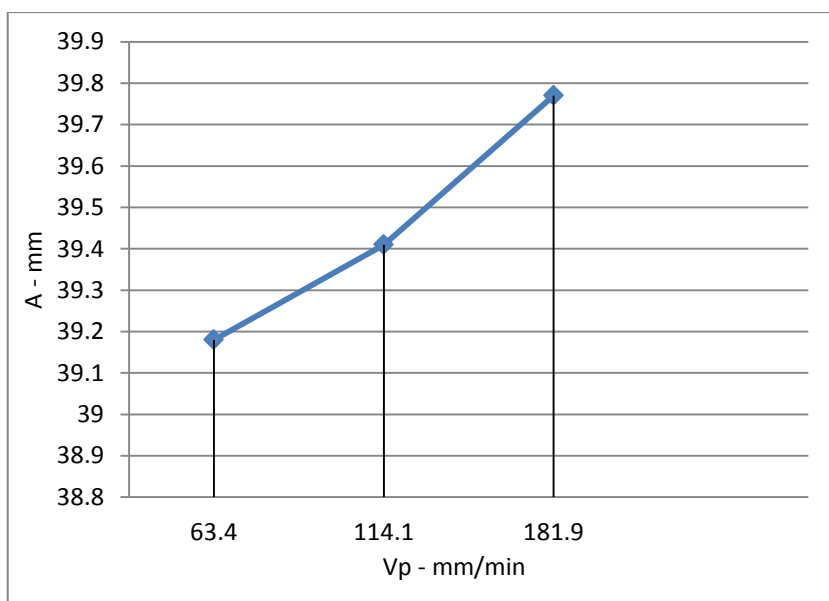
На основу вредности из табеле 5.3 и међусобним поређењем истих долази се до закључка да обрада са најбољим препорученим режимом има бољи квалитет обрађене површине од остала два режима, као и димензиону тачност отвора, док је вредност димензије најмања. Угао ϕ је најмањи код средњег режима обраде.

На дијаграму 10 приказана је промена вредности параметара храпавости $Ra_{\text{доле}}$ у зависности од брзине сечења V . Са дијаграма се уочава да је најбољи квалитет површине реза добијен за вредност најмање брзине сечења 63,4 mm/min.



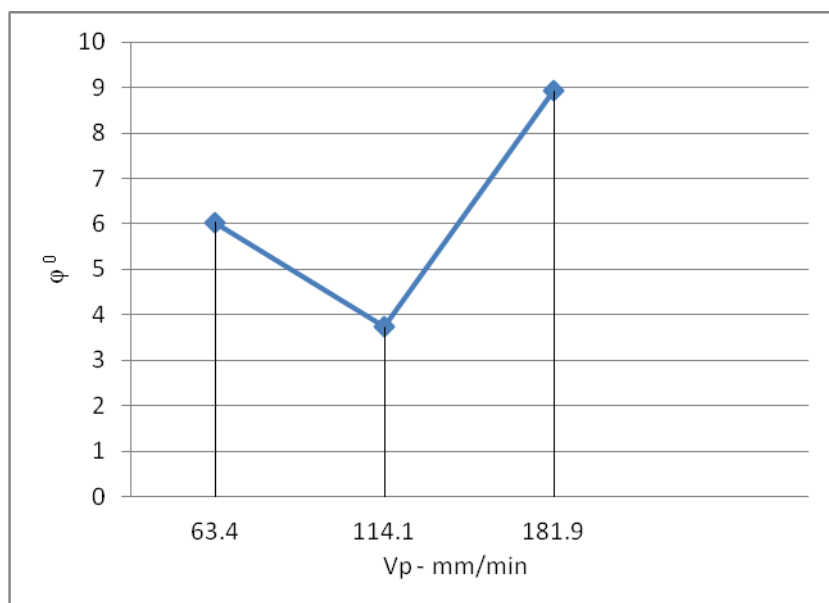
Дијаграм 10 – Промена вредности параметара храпавости $Ra_{доле}$ у зависности од брзине сечења V

На дијаграму 11 приказана је промена вредности мерене димензије A у зависности од брзине сечења V . Са дијаграма се може уочити да је најмање одступање од називне мере димензије A код највеће брзине сечења: 181, 9 mm/min.



Дијаграм 11 – Промена вредности димензије A у зависности од брзине сечења V_p кроз пример лошег, средњег и најбољег режима

На дијаграму 12 приказана је промена вредности угла коничности отвора ϕ^0 у зависности од брзине сечења V . Са дијаграма се може уочити да је најмања вредност угла коничности отвора при брзини са средњим режимом.



Дијаграм 12 – Промена вредности угла коничности отвора ϕ^0 у зависности од брзине сечења V_p кроз пример лошег, средњег и најбољег режима

6

ЗАКЉУЧАК

Неконвенционални поступци обраде нуде много већи спектар могућности од обликовања метала, најчешће без физичког контакта алата са материјалом који се обрађује. Они обраду чине много бржом, једноставнијом, безбеднијом и лакшом. Једина мана неконвенционалних поступака обраде у односу на конвенционалне поступке обраде резањем, јесте далеко већа цена набавке и одржавање машина.

Технологија резања материјала воденим абразивним млазом је високопрогресивна и модерна метода и може да се користи при сечењу практично свих до сада познатих материјала. Потпуну револуцију у сечењу материјала је донело сазнање, да је на једном радном месту (при коришћењу погодног манипулационог средства) могуће у великом броју случајева без накнадних завршних операција изградити сложен део (он је раније израђиван на неколико радних места, нпр. на тестери, бушилици..) и то без додатне топлотне обраде нужне за одстрањивање унутрашњих напона насталих при сечењу гориоником.

Поређење поступака обраде воденим абразивним млазом са другим поступцима долази се до интересантних закључака. Сечење материјала плазма поступком има предност у погледу брзине при сечењу дебљих материјала, који се не могу сећи ласером или који се воденим млазом секу спорије. Плазма поступак је ограничен на сечење електропроводних материјала. Када је реч о сечењу материјала дебљине мање од 10 mm ласер је незаменљив због финоће сечених површина и велике брзине резања. Међутим када је потребно сечење материјала осетљивих на топлотне утицаје или материјала веће од 300 mm који се не могу сећи плазмом, тада нема другог решења сем сечења водено абразивним млазом. При примени овог поступка нема појаве прашине или гасова, а уколико се сечење одвија под водом долази и до делимичног смањења буке.

Истраживања и експерименти у последњи низ година усмерени су у правцу испитивања врсте абразива, конструктивног побољшања млазнице, правилнијег постављања млазнице за постизање већег квалитета површине и сл.

Експериментална истраживања везана за квалитет обраде челика S235JRG2 (Ћ0361) показала су да повећање удаљености млазнице од радног предмета и повећање протока абразива при притиску од 4130 бара незнатно утиче на храпавост обрађене површине, док се бољи квалитет обрађене површине постиже смањењем брзине сечења материјала. Самим тим потребно је ускладити брзину сечења за дати материјал и може се закључити да се брзином од 35 mm/min добија најбољи квалитет сечења од свих испитиваних узорака.

Смањењем протока абразива и удаљености млазнице од радног предмета, а повећањем брзине сечења повећава се вредност димензије A . Док се при повећању протока абразива, а при смањењу удаљености млазнице од радног предмета и брзине сечења смањује угао коничности отвора.

Самим тим потребно је ускладити количину протока абразива и брзину сечења са смањењем удаљености млазнице од радног предмета.

7

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазић, М., Неконвенционални поступци обраде, Научна књига, Београд, 1990.
2. Миликић, Д., Неконвенционални поступци обраде, Факултет техничких наука, Нови Сад 2002.
3. Лазаревић, Д., Радовановић, М., Неконвенционалне методе, Машински факултет, Ниш, 1994
4. Радојевић, Н., Мастер рад: Квалитет обраде воденим млазом, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2011.

Подаци са интернета:

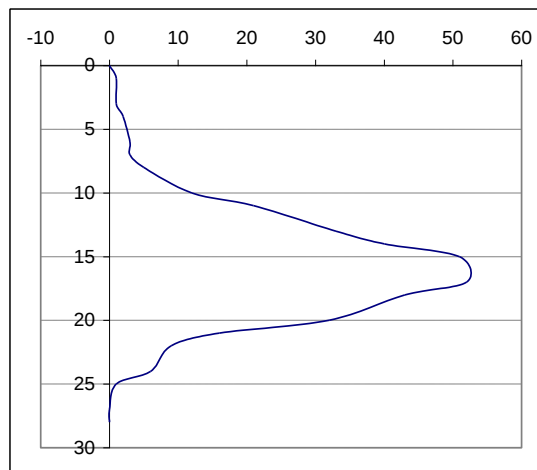
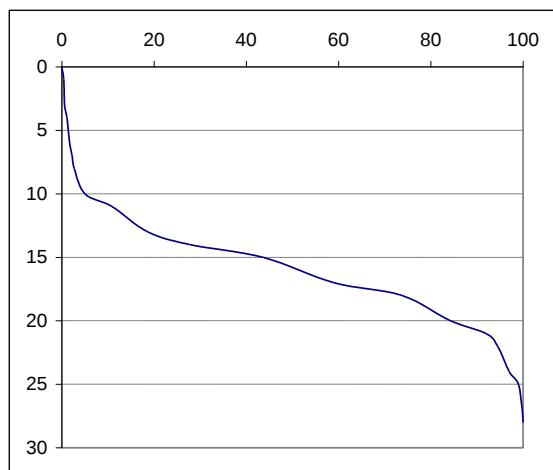
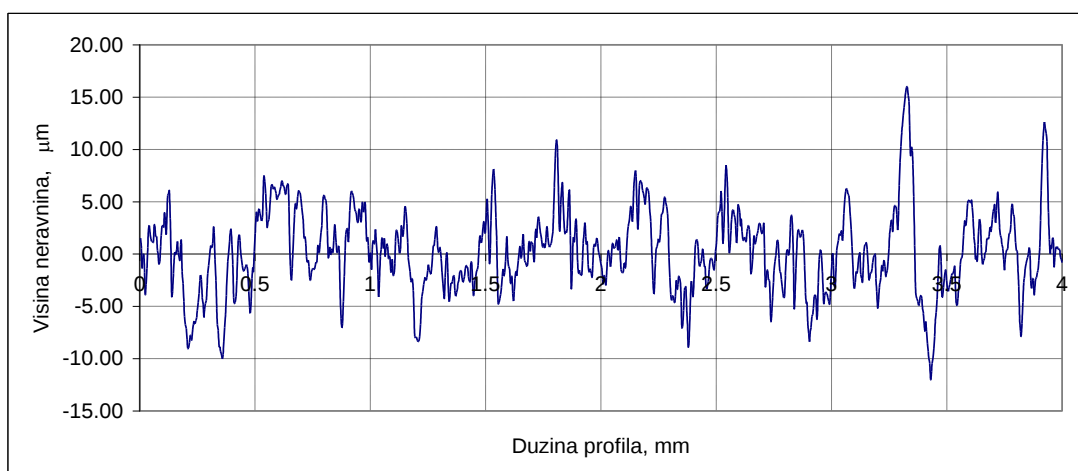
- [5] <http://tribolab.mas.bg.ac.rs/proceedings/2007/249-253.pdf>, посећено (мај 2013.)
- [6] <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcoursecontents/IIT%20Kharagpur/Manuf%20Proc%20II/pdf/LM-37.pdf>, посећено (мај 2013.)
- [7] <http://www.cqm.rs/2010/pdf/37/71.pdf>, посећено (јун 2013.)
- [8] <http://www.wjdido.com/index.php/2012-03-25-10-34-51/masina-trenutno-u-ponudi>, посећено (јун 2013.)
- [9] <http://www.wardjet.com/z2043.html> посећено (јун 2013.)
- [10] <http://www.omax.com/waterjet-cutting/machine/model/160X%20Series> посећено (јун 2013.)

Прилог**Резултати испитивања**

Промена протока абразива горњег дела површине реза 1А

Топографија:

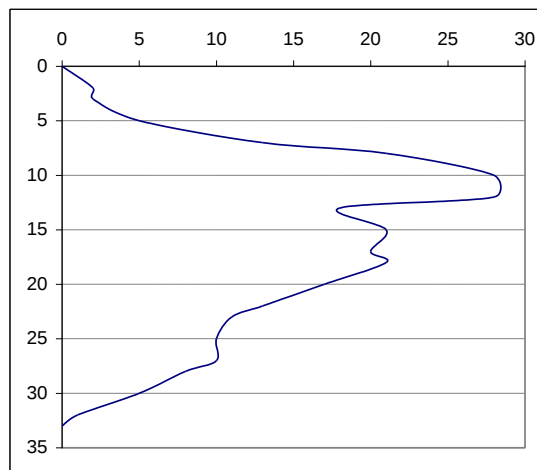
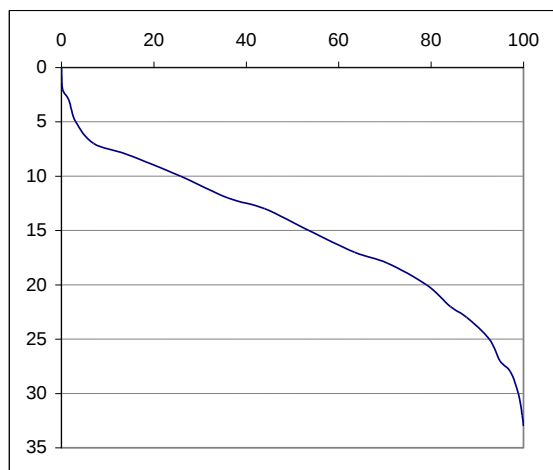
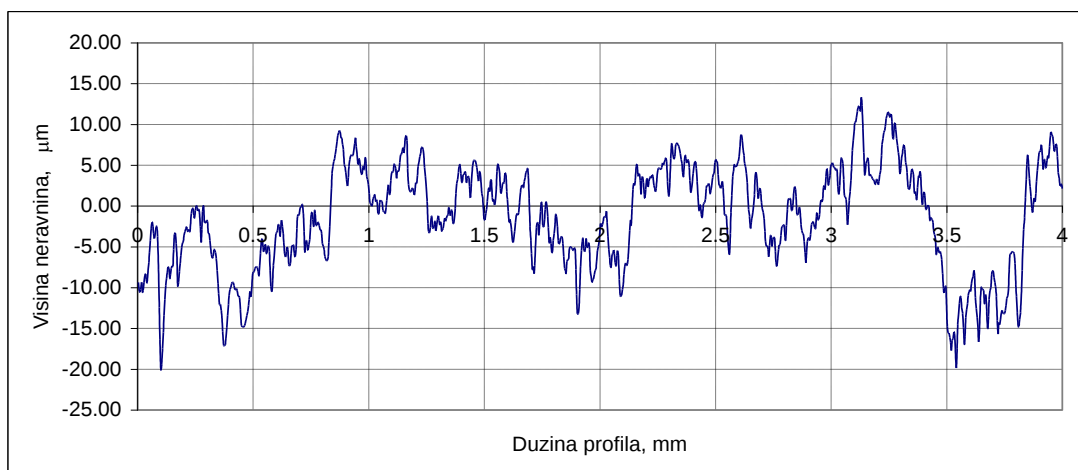
Rt1 =	17 μm	Ry =	28 μm	Sm =	73 μm
Rt2 =	16 μm	Rtm =	20 μm	S =	29 μm
Rt3 =	20 μm	Rv =	12 μm	DELQ =	18.9 deg
Rt4 =	17 μm	Rp =	16 μm	Rsk =	0.3
Rt5 =	28 μm	R3z =	13 μm	Rku =	4.1
Ra =	3 μm	Rpm =	10 μm		
Rq =	4 μm	R3y =	18 μm		



Промена протока абразива доњег дела површине реза 1Б

Топографија:

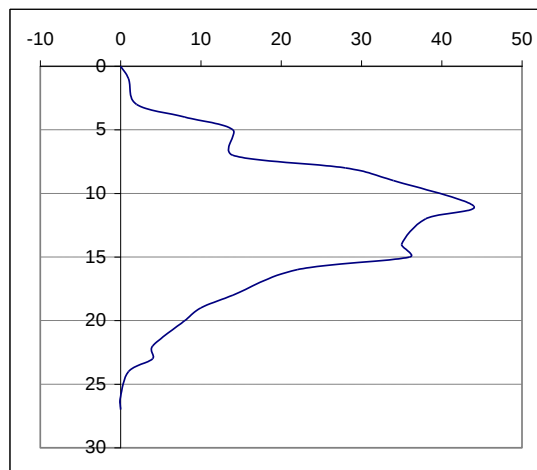
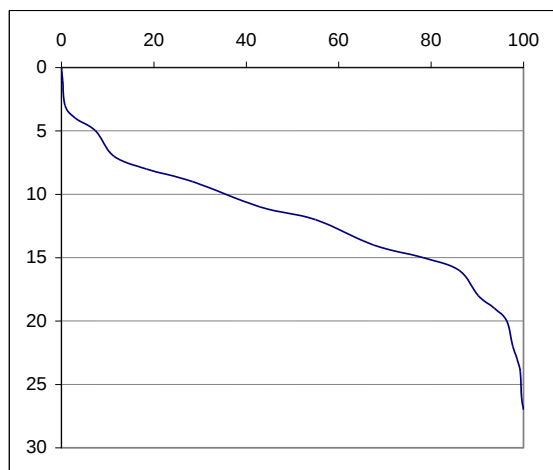
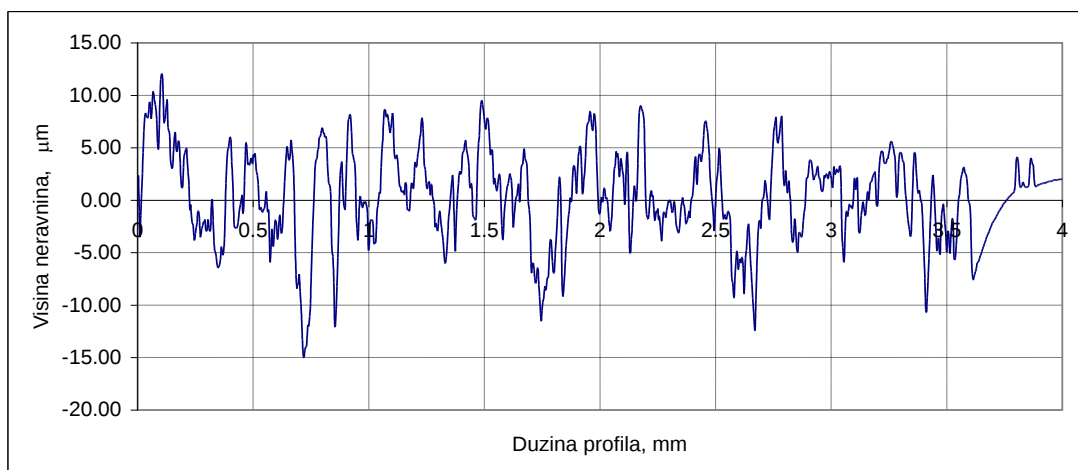
Rt1 =	20 μm	Ry =	31 μm	Sm =	172 μm
Rt2 =	16 μm	Rtm =	22 μm	S =	31 μm
Rt3 =	21 μm	Rv =	20 μm	DELQ =	17.3 deg
Rt4 =	21 μm	Rp =	14 μm	Rsk =	-0.4
Rt5 =	31 μm	R3z =	17 μm	Rku =	2.6
Ra =	5.2 μm	Rpm =	9 μm		
Rq =	6.4 μm	R3y =	27 μm		



Промена протока абразива горњег дела површине 2А

Топографија:

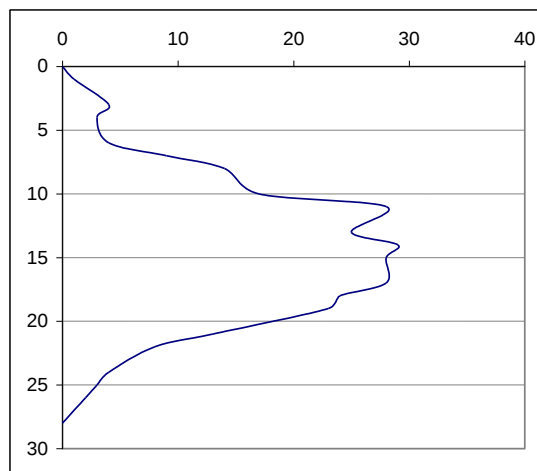
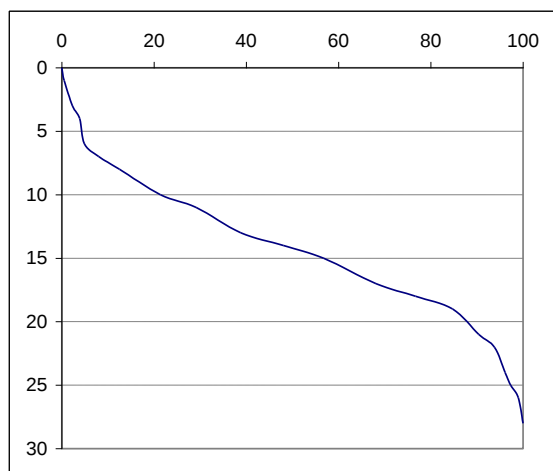
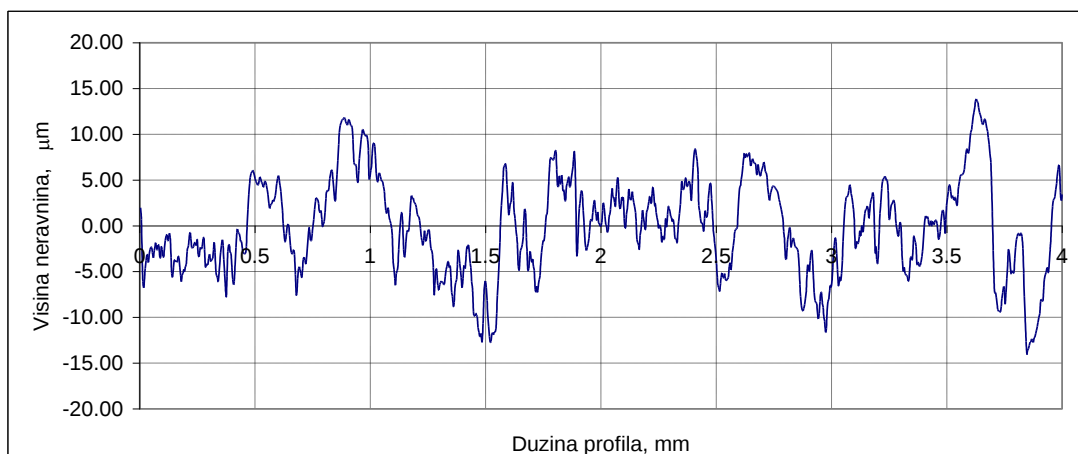
Rt1 =	27 μm	Ry =	27 μm	Sm =	104 μm
Rt2 =	22 μm	Rtm =	21 μm	S =	31 μm
Rt3 =	21 μm	Rv =	15 μm	DELQ =	18.2 deg
Rt4 =	20 μm	Rp =	12 μm	Rsk =	-0.4
Rt5 =	16 μm	R3z =	15 μm	Rku =	3.4
Ra =	3.4 μm	Rpm =	9 μm		
Rq =	4.4 μm	R3y =	17 μm		



Промена протока абразива доњег дела површине реза 2Б

Топографија:

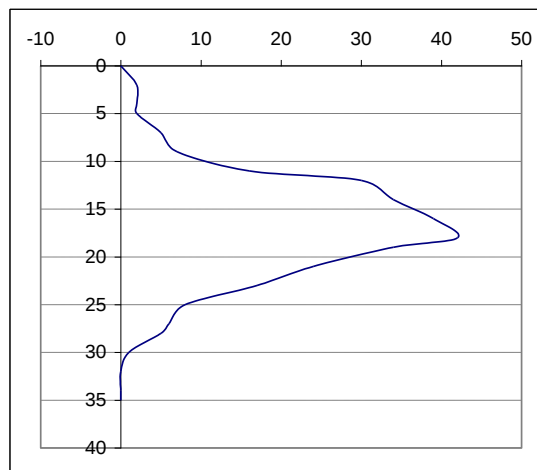
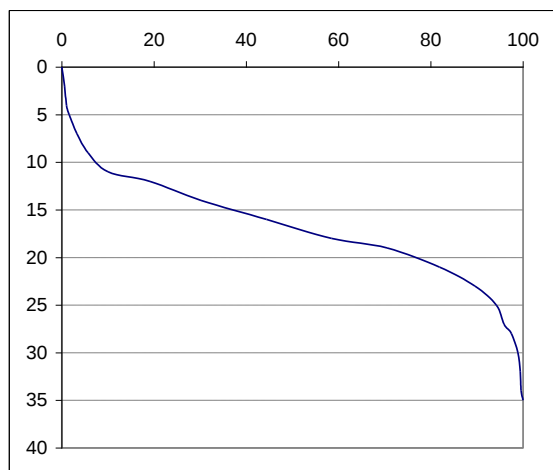
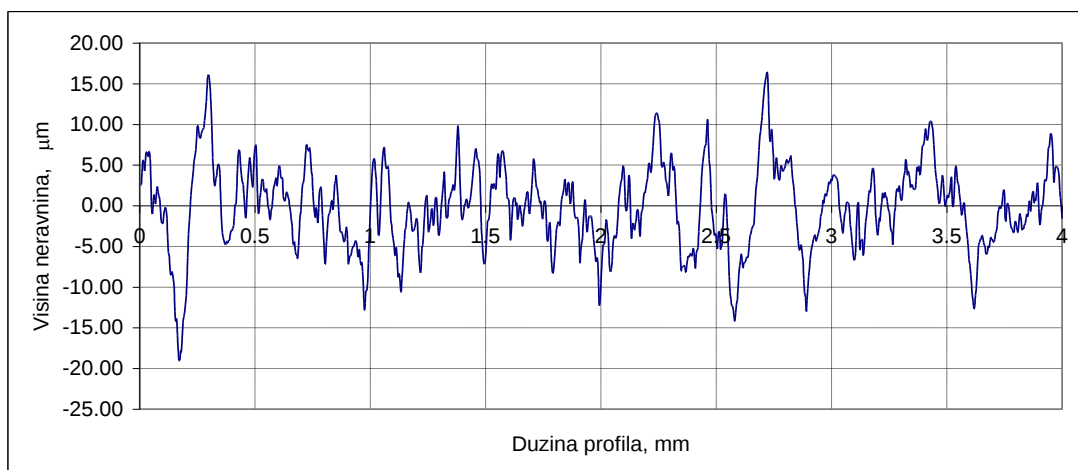
Rt1 =	14 μm	Ry =	28 μm	Sm =	139 μm
Rt2 =	25 μm	Rtm =	20 μm	S =	34 μm
Rt3 =	15 μm	Rv =	14 μm	DELQ =	15.3 deg
Rt4 =	20 μm	Rp =	14 μm	Rsk =	0
Rt5 =	28 μm	R3z =	16 μm	Rku =	2.8
Ra =	4.3 μm	Rpm =	10 μm		
Rq =	5.3 μm	R3y =	23 μm		



Промена удаљености млазнице горњег дела површине реза 3А

Топографија:

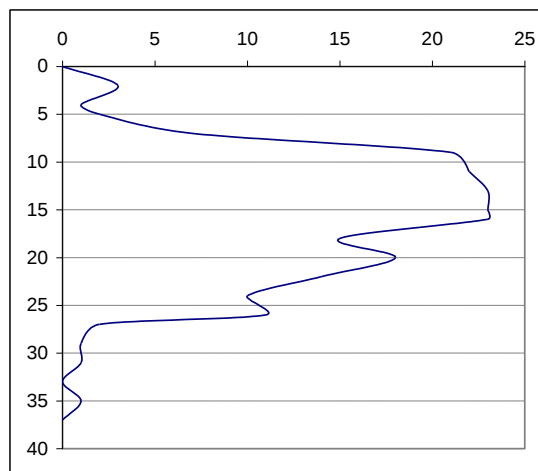
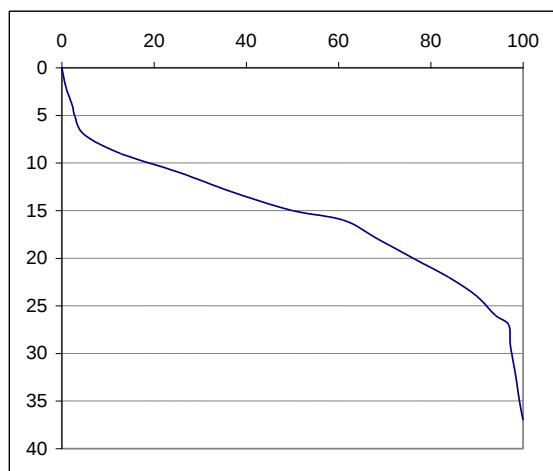
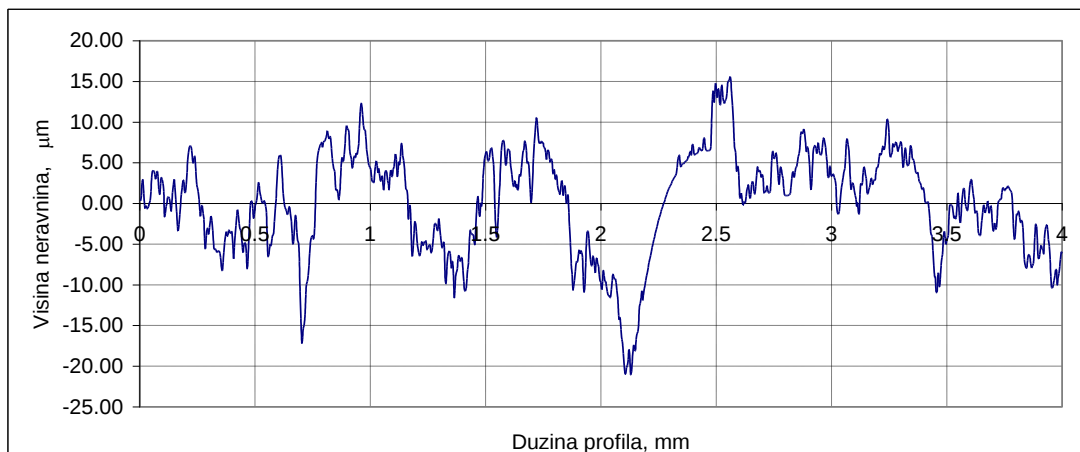
Rt1 =	35 μm	Ry =	35 μm	Sm =	90 μm
Rt2 =	22 μm	Rtm =	27 μm	S =	36 μm
Rt3 =	24 μm	Rv =	19 μm	DELQ =	19.1 deg
Rt4 =	31 μm	Rp =	17 μm	Rsk =	-0.1
Rt5 =	23 μm	R3z =	15 μm	Rku =	3.7
Ra =	4.1 μm	Rpm =	13 μm		
Rq =	5.3 μm	R3y =	17 μm		



Промена удаљености млазнице доњег дела површине реза 3Б

Топографија:

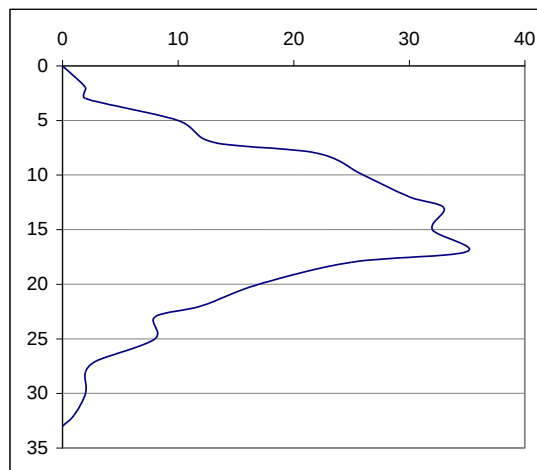
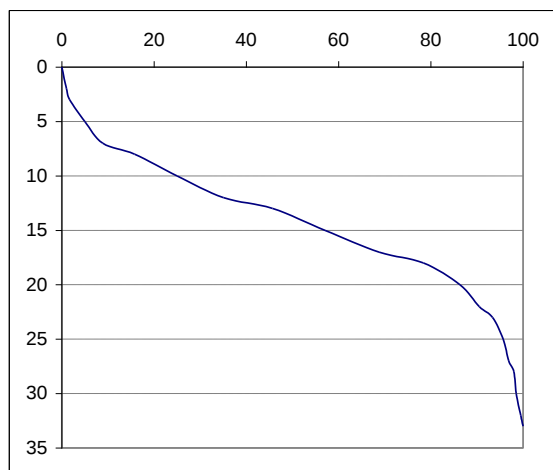
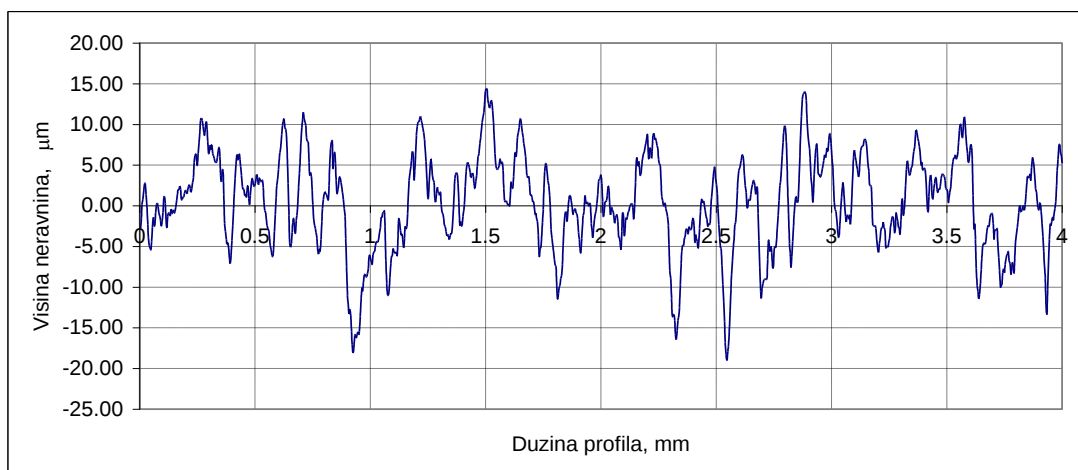
Rt1 =	25 μm	Ry =	32 μm	Sm =	219 μm
Rt2 =	24 μm	Rtm =	24 μm	S =	33 μm
Rt3 =	32 μm	Rv =	21 μm	DELQ =	16 deg
Rt4 =	17 μm	Rp =	15 μm	Rsk =	-0.6
Rt5 =	21 μm	R3z =	18 μm	Rku =	3.4
Ra =	5 μm	Rpm =	11 μm		
Rq =	6.3 μm	R3y =	25 μm		



Промена удаљености млазнице горњег дела површине реза 4А

Топографија:

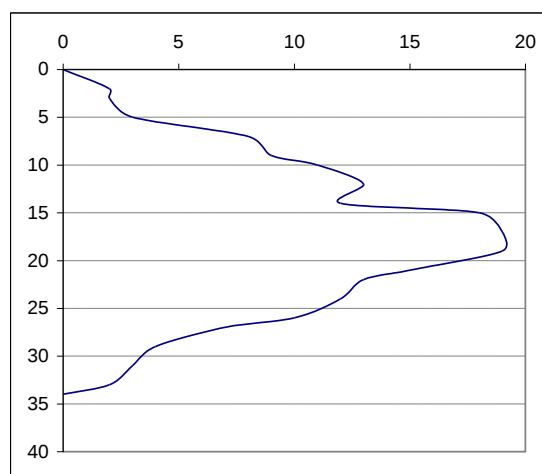
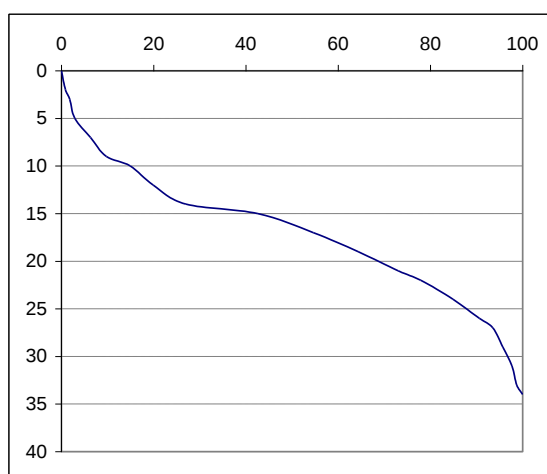
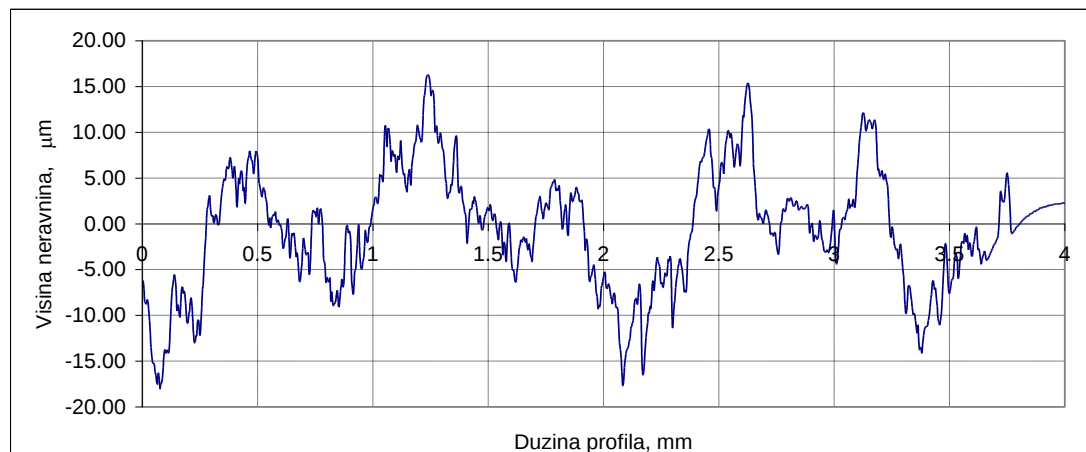
Rt1 =	19 μm	Ry =	33 μm	Sm =	124 μm
Rt2 =	32 μm	Rtm =	27 μm	S =	35 μm
Rt3 =	27 μm	Rv =	19 μm	DELQ =	19.1 deg
Rt4 =	33 μm	Rp =	14 μm	Rsk =	-0.4
Rt5 =	24 μm	R3z =	18 μm	Rku =	3.3
Ra =	4.6 μm	Rpm =	12 μm		
Rq =	5.8 μm	R3y =	24 μm		



Промена удаљености млазнице доњег дела површине реза 4Б

Топографија:

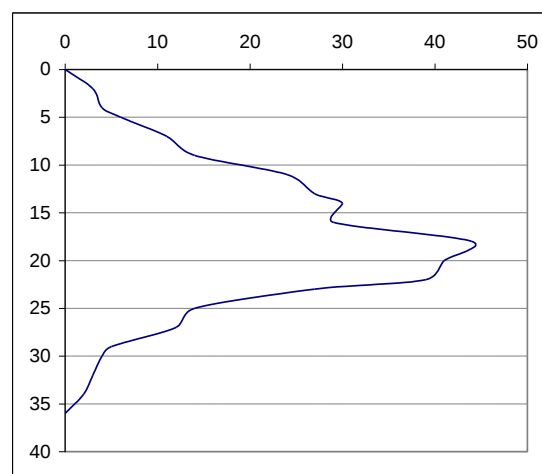
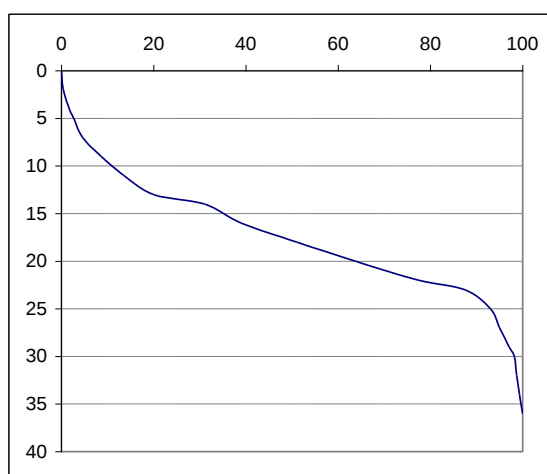
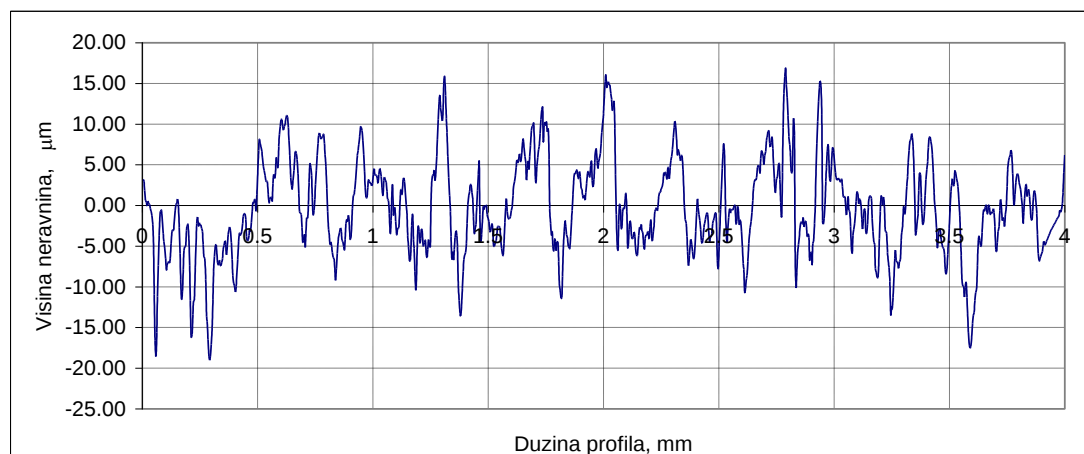
Rt1 =	26 μm	Ry =	26 μm	Sm =	185 μm
Rt2 =	25 μm	Rtm =	23 μm	S =	33 μm
Rt3 =	22 μm	Rv =	18 μm	DELQ =	14.3 deg
Rt4 =	20 μm	Rp =	16 μm	Rsk =	-0.1
Rt5 =	20 μm	R3z =	17 μm	Rku =	2.9
Ra =	5.1 μm	Rpm =	10 μm		
Rq =	6.5 μm	R3y =	20 μm		



Промена брзине сечења горњег дела површине реза 5А

Топографија:

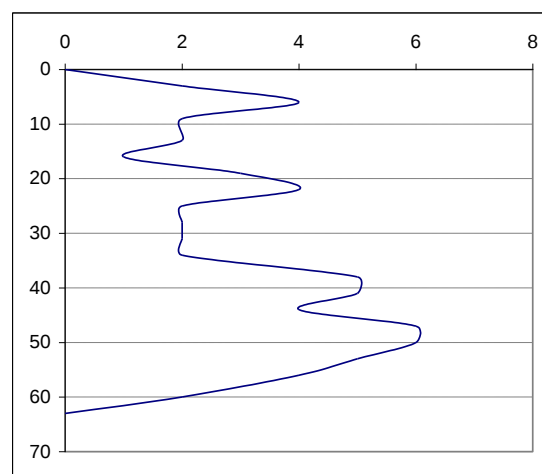
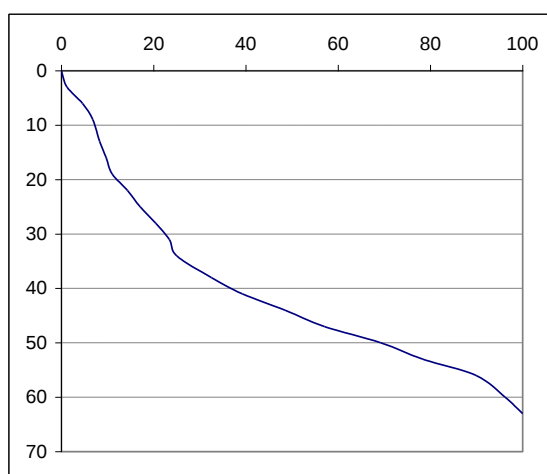
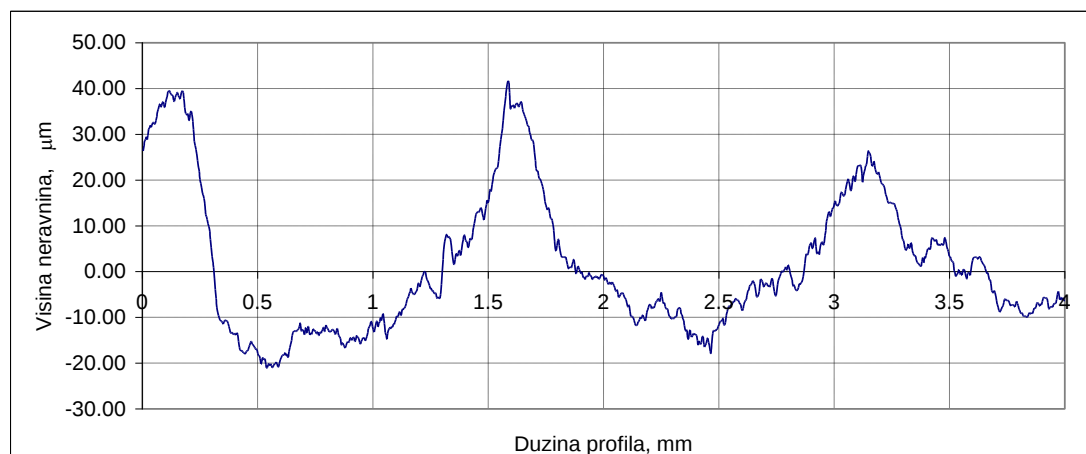
Rt1 =	30 μm	Ry =	30 μm	Sm =	117 μm
Rt2 =	29 μm	Rtm =	28 μm	S =	30 μm
Rt3 =	27 μm	Rv =	19 μm	DELQ =	25.3 deg
Rt4 =	27 μm	Rp =	17 μm	Rsk =	0.1
Rt5 =	26 μm	R3z =	20 μm	Rku =	3.3
Ra =	4.6 μm	Rpm =	13 μm		
Rq =	5.9 μm	R3y =	25 μm		



Промена брзине сечења доњег дела површине реза 5Б

Топографија:

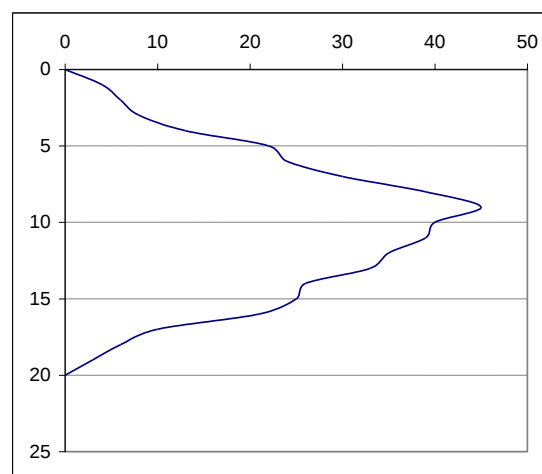
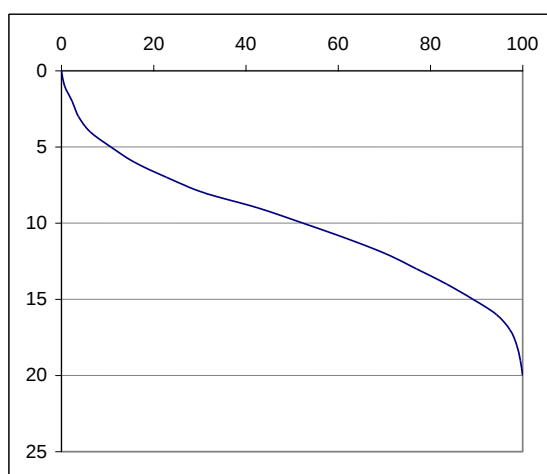
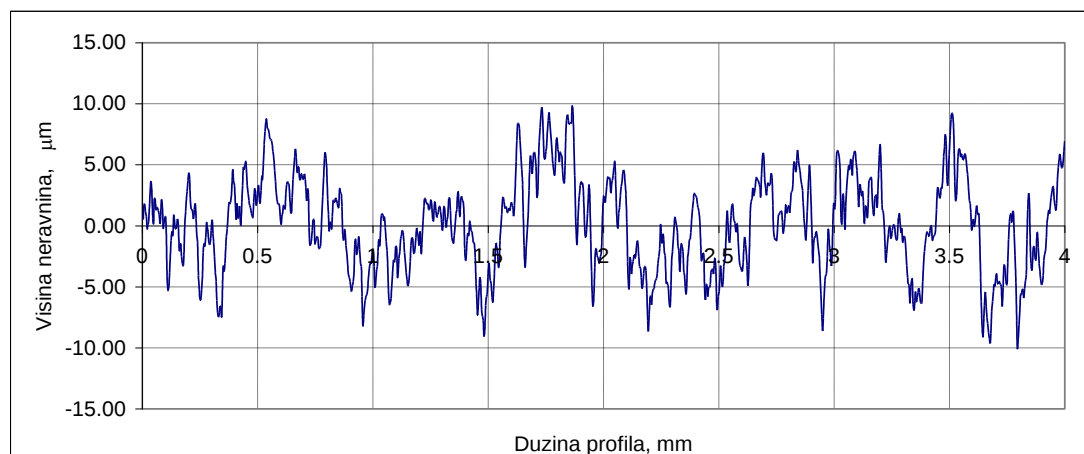
Rt1 =	60 μm	Ry =	60 μm	Sm =	573 μm
Rt2 =	58 μm	Rtm =	49 μm	S =	50 μm
Rt3 =	52 μm	Rv =	21 μm	DELQ =	11.6 deg
Rt4 =	44 μm	Rp =	41 μm	Rsk =	0.9
Rt5 =	29 μm	R3z =	31 μm	Rku =	3
Ra =	12.1 μm	Rpm =	32 μm		
Rq =	15.2 μm	R3y =	60 μm		



Промена брзине сечења горњег дела површине реза 6А

Топографија:

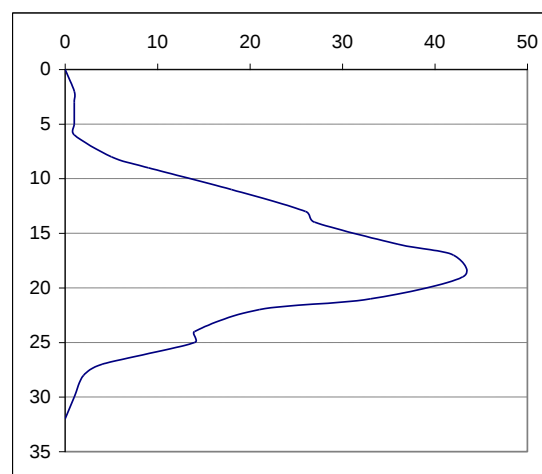
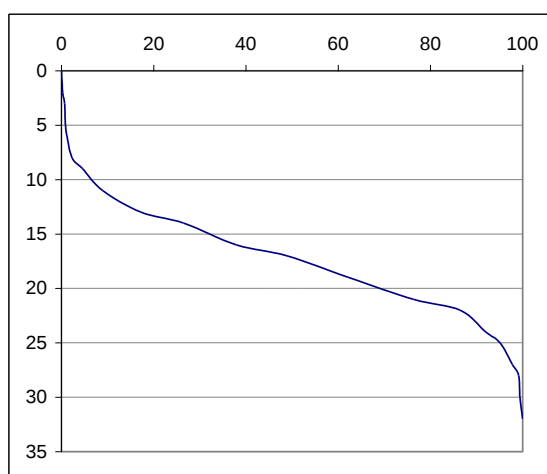
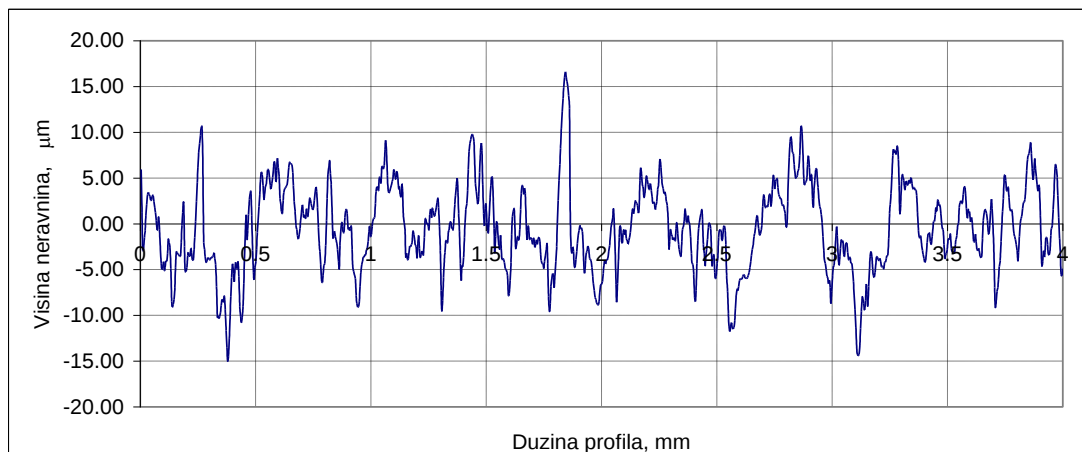
Rt1 =	16 μm	Ry =	19 μm	Sm =	97 μm
Rt2 =	12 μm	Rtm =	16 μm	S =	26 μm
Rt3 =	18 μm	Rv =	10 μm	DELQ =	16.5 deg
Rt4 =	15 μm	Rp =	9 μm	Rsk =	0
Rt5 =	19 μm	R3z =	13 μm	Rku =	2.6
Ra =	3.1 μm	Rpm =	7 μm		
Rq =	3.8 μm	R3y =	16 μm		



Промена брзине сечења доњег дела површине реза 6Б

Топографија:

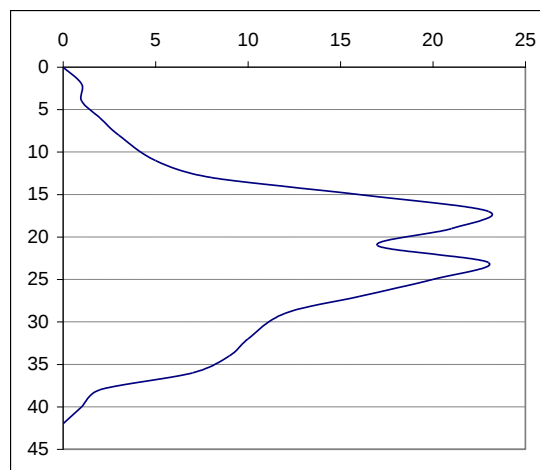
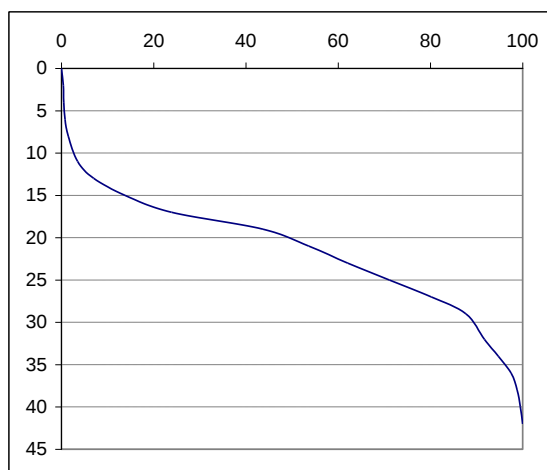
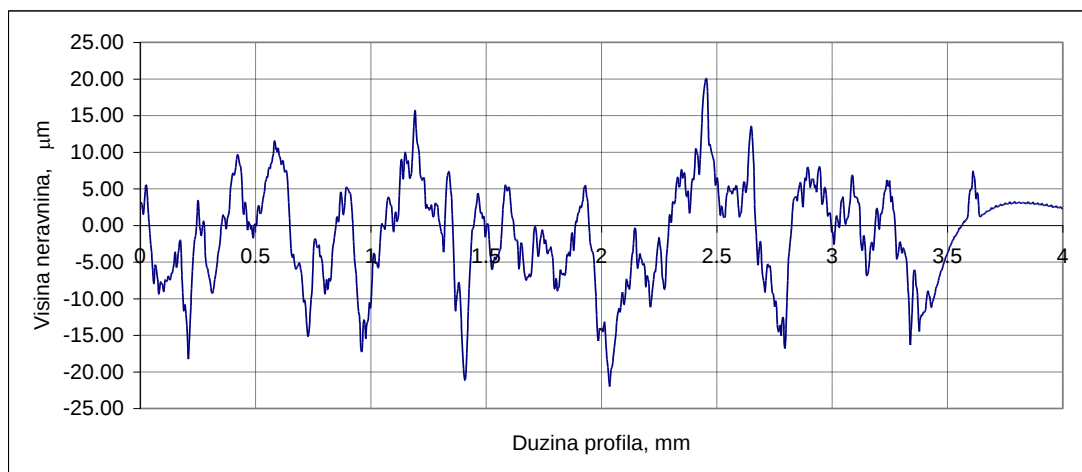
Rt1 =	26 μm	Ry =	26 μm	Sm =	96 μm
Rt2 =	19 μm	Rtm =	23 μm	S =	30 μm
Rt3 =	26 μm	Rv =	15 μm	DELQ =	20.1 deg
Rt4 =	25 μm	Rp =	17 μm	Rsk =	0.1
Rt5 =	18 μm	R3z =	16 μm	Rku =	3.4
Ra =	3.8 μm	Rpm =	12 μm		
Rq =	4.7 μm	R3y =	19 μm		



Промена брзине сечења кроз пример лошег режима обраде горњег дела површине реза 7А

Топографија:

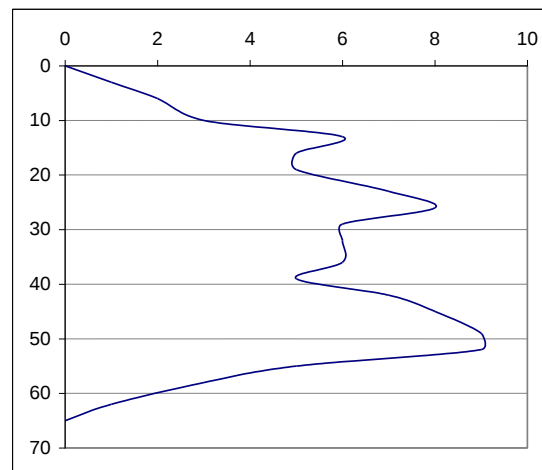
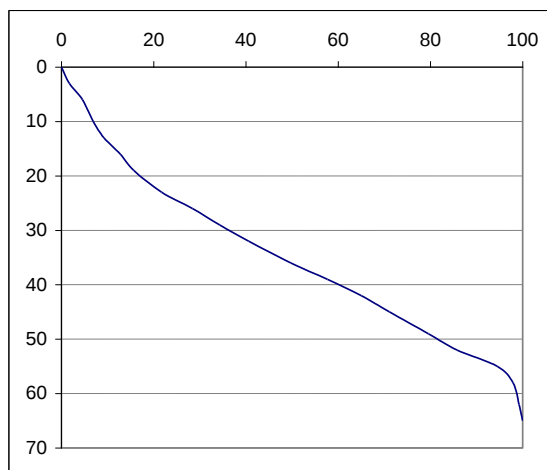
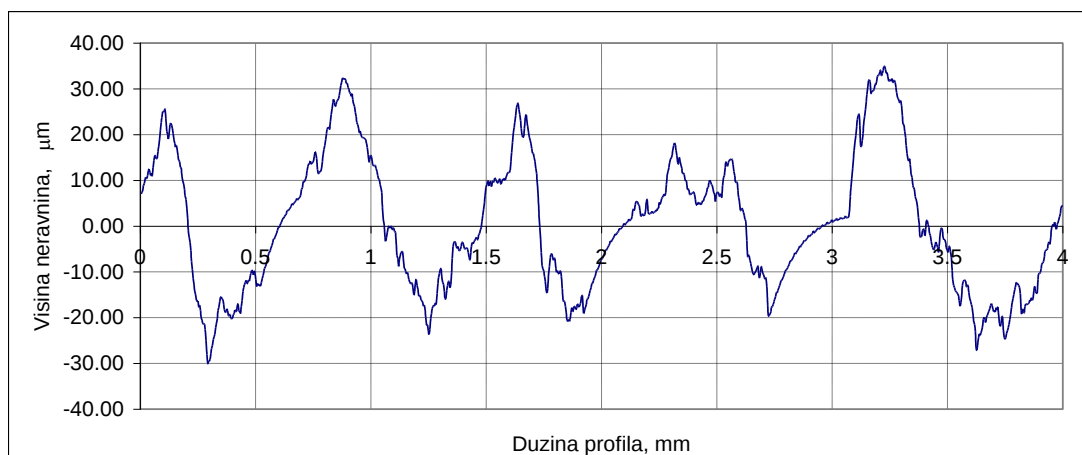
Rt1 =	30 μm	Ry =	37 μm	Sm =	184 μm
Rt2 =	37 μm	Rtm =	31 μm	S =	38 μm
Rt3 =	30 μm	Rv =	22 μm	DELQ =	18.5 deg
Rt4 =	37 μm	Rp =	20 μm	Rsk =	-0.3
Rt5 =	24 μm	R3z =	21 μm	Rku =	3
Ra =	5.5 μm	Rpm =	13 μm		
Rq =	6.8 μm	R3y =	24 μm		



Промена брзине сечења кроз пример лошег режима обраде доњег дела површине реза 7Б

Топографија:

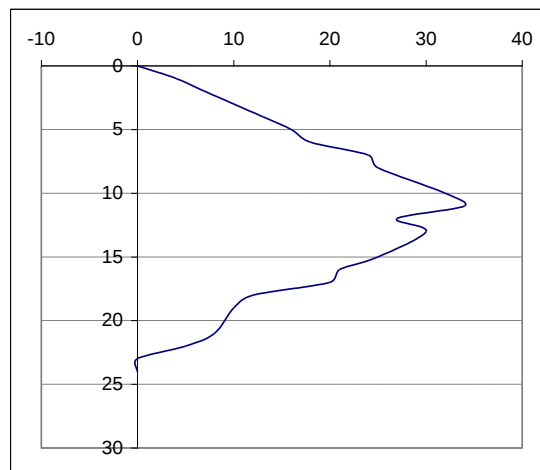
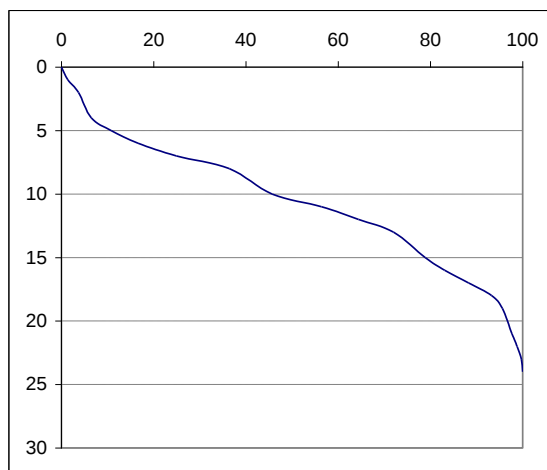
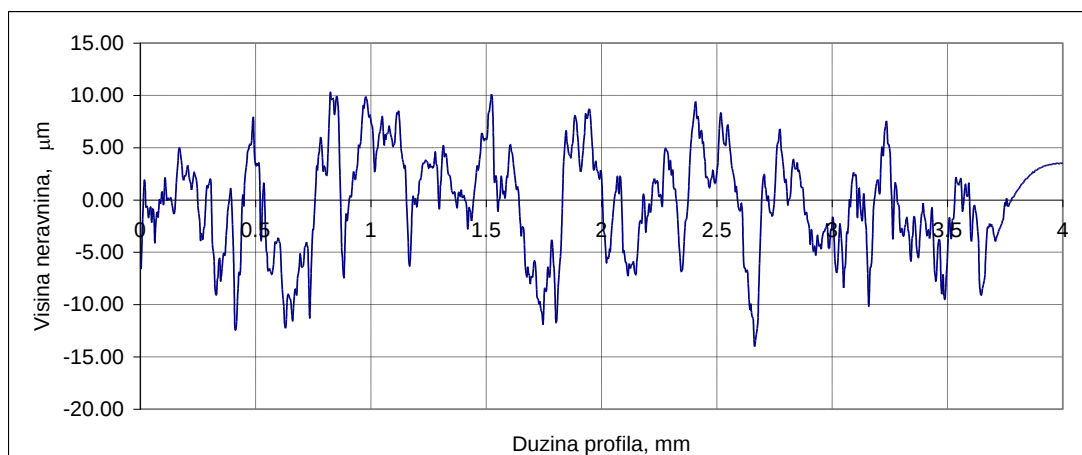
Rt1 =	56 μm	Ry =	62 μm	Sm =	561 μm
Rt2 =	56 μm	Rtm =	55 μm	S =	70 μm
Rt3 =	48 μm	Rv =	30 μm	DELQ =	16.1 deg
Rt4 =	53 μm	Rp =	35 μm	Rsk =	0.4
Rt5 =	62 μm	R3z =	28 μm	Rku =	2.3
Ra =	12.2 μm	Rpm =	30 μm		
Rq =	14.7 μm	R3y =	35 μm		



Промена брзине сечења кроз пример средњег режима обраде горњег дела површине реза 8А

Топографија:

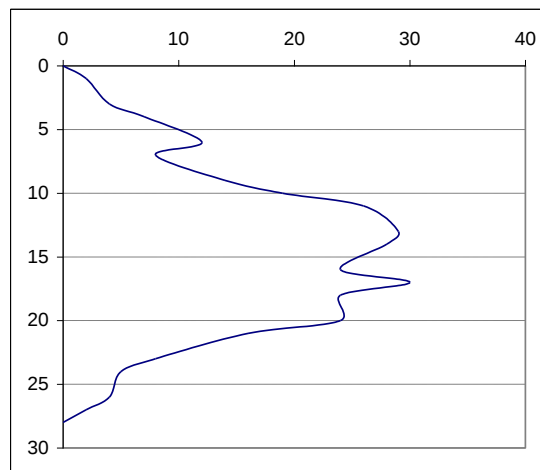
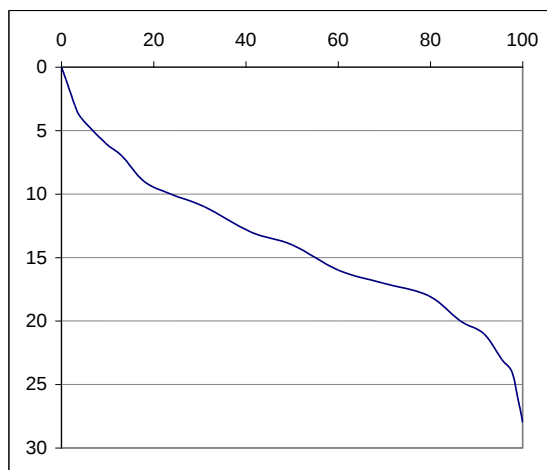
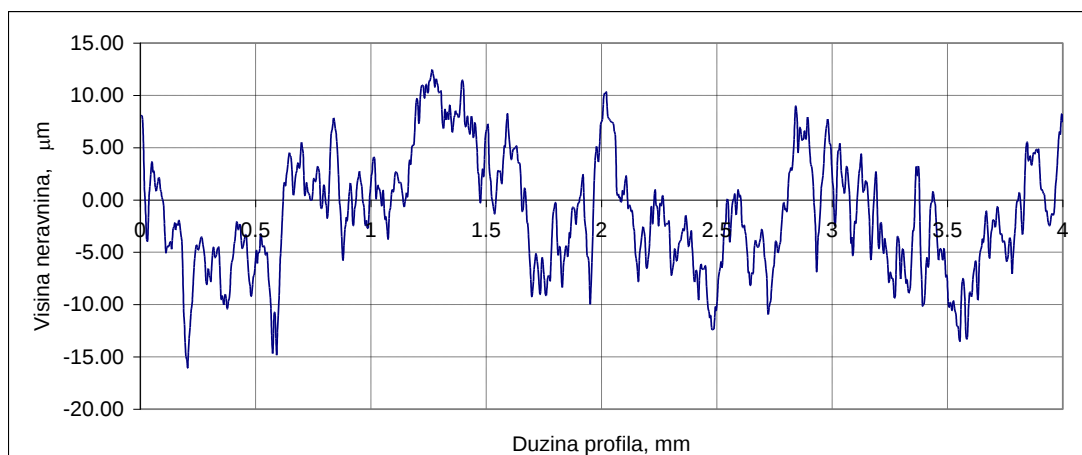
Rt1 =	20 μm	Ry =	23 μm	Sm =	102 μm
Rt2 =	18 μm	Rtm =	20 μm	S =	30 μm
Rt3 =	21 μm	Rv =	14 μm	DELQ =	16.8 deg
Rt4 =	23 μm	Rp =	10 μm	Rsk =	-0.3
Rt5 =	17 μm	R3z =	15 μm	Rku =	2.6
Ra =	3.9 μm	Rpm =	9 μm		
Rq =	4.8 μm	R3y =	18 μm		



Промена брзине сечења кроз пример средњег режима обраде доњег дела површине реза 8Б

Топографија:

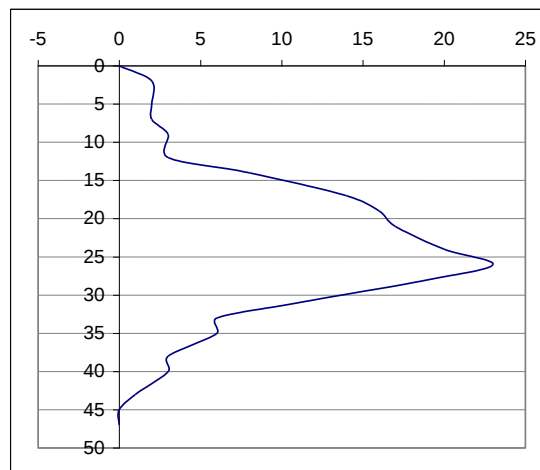
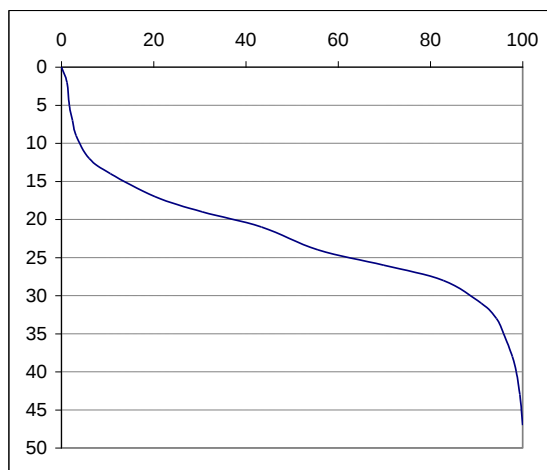
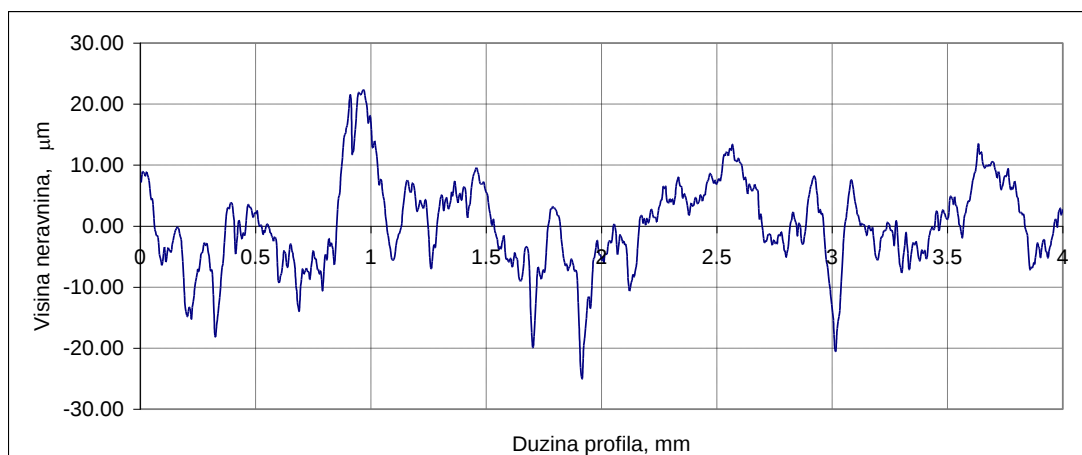
Rt1 =	24 μm	Ry =	24 μm	Sm =	146 μm
Rt2 =	18 μm	Rtm =	21 μm	S =	32 μm
Rt3 =	20 μm	Rv =	16 μm	DELQ =	17 deg
Rt4 =	21 μm	Rp =	13 μm	Rsk =	0.2
Rt5 =	22 μm	R3z =	16 μm	Rku =	2.6
Ra =	4.5 μm	Rpm =	10 μm		
Rq =	5.5 μm	R3y =	18 μm		



Промена брзине сечења кроз пример најбољег режима обраде горњег дела површине реза 9А

Топографија:

Rt1 =	27 μm	Ry =	34 μm	Sm =	200 μm
Rt2 =	29 μm	Rtm =	29 μm	S =	44 μm
Rt3 =	33 μm	Rv =	25 μm	DELQ =	16.9 deg
Rt4 =	34 μm	Rp =	22 μm	Rsk =	0.1
Rt5 =	21 μm	R3z =	18 μm	Rku =	3.8
Ra =	5.6 μm	Rpm =	13 μm		
Rq =	7.2 μm	R3y =	24 μm		



Промена брзине сечења кроз пример најбољег режима обраде доњег дела површине реза 9Б

Топографија:

Rt1 =	62 μm	Ry =	72 μm	Sm =	507 μm
Rt2 =	72 μm	Rtm =	52 μm	S =	73 μm
Rt3 =	40 μm	Rv =	36 μm	DELQ =	15.2 deg
Rt4 =	48 μm	Rp =	38 μm	Rsk =	0
Rt5 =	38 μm	R3z =	25 μm	Rku =	2.8
Ra =	11.8 μm	Rpm =	27 μm		
Rq =	14.9 μm	R3y =	53 μm		

