

**УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА**

**Мр Јелена Баралић**

**ЕНЕРГИЈА И КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ  
АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ**

**Докторска дисертација**

**Крагујевац, 2014.**



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА



**Мр Јелена Баралић**

**ЕНЕРГИЈА И КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ  
АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ**

Докторска дисертација

Ментор,  
Др Богдан Недић, ред. проф.

Крагујевац, 2014.

<i>I Аутор</i>	
Име и презиме:	Јелена Баралић
Датум и место рођења:	05.11.1970., Горњи Милановац
Садашње запослење:	Асистент Факултета техничких наука Чачак
<i>II Докторска дисертација</i>	
Наслов:	Енергија и квалитет обраде абразивним воденим млазом
Број страница:	158
Број слика:	157
Број библиографских података:	104
Установа и место где је рад израђен:	Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Научна област (УДК):	[621.91+621.9.048](043.3)
Ментор:	Др Богдан Недић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
<i>III Оцена и одбрана</i>	
Датум пријаве теме:	17.12.2008.
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације:	01-1/904-3 од 26.03.2009.год. Машински факултет, Универзитет у Крагујевцу
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Др Мирослав Радовановић, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Нишу</li> <li>2. Др Снежана Радоњић, редовни професор, Факултет техничких наука Чачак, Универзитет у Крагујевцу</li> <li>3. Др Миодраг Лазић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу</li> <li>4. Др Бранко Тадић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу</li> <li>5. Др Богдан Недић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу</li> </ol>
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Др Мирослав Радовановић, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Нишу</li> <li>2. Др Предраг Јанковић, доцент, Машински факултет, Универзитет у Нишу</li> <li>3. Др Радомир Славковић, редовни професор, Факултет техничких наука Чачак, Универзитет у Крагујевцу</li> <li>4. Др Миодраг Лазић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу</li> <li>5. Др Богдан Недић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу</li> </ol>
Датум одбране дисертације:	

## САДРЖАЈ

САДРЖАЈ.....	1
РЕЗИМЕ.....	1
SUMMARY .....	2
1. УВОД .....	3
2. ОБРАДА АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ.....	6
2.1. ВОДЕНИ МЛАЗ .....	6
2.2. КАРАКТЕРИСТИКЕ ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ .....	7
2.3. ПОРЕЂЕЊЕ ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ СА ОСТАЛИМ КОМПАРАТИВНИМ ТЕХНОЛОГИЈАМА.....	8
2.4. ОБРАДНИ СИСТЕМИ ЗА ОБРАДУ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ .....	10
2.4.1. Систем за припрему воде.....	12
2.4.2. Погонски део.....	13
2.4.3. Појачавач притиска .....	14
2.4.4. Акумулатор притиска.....	15
2.4.5. Магацин абразива са системом за довод абразива.....	17
2.4.6. Резна глава.....	18
2.4.7. Радни сто .....	19
2.4.8. Инсталација високог притиска.....	19
2.5. АБРАЗИВНИ МАТЕРИЈАЛ.....	19
2.6. ПАРАМЕТРИ КОЈИ УТИЧУ НА ПРОЦЕС ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ.....	21
2.7. УТИЦАЈ ПОЈЕДИНИХ ПАРАМЕТАРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА КВАЛИТЕТ РЕЗА И ОТПОРЕ РЕЗАЊА .....	23
2.8. ХАБАЊЕ АБРАЗИВНЕ МЛАЗНИЦЕ.....	27
3. МЕХАНИЗАМ ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ.....	30
3.1. МЕХАНИЗАМ ЕРОЗИЈЕ ПРИ ОБРАДИ ПЛАСТИЧНИХ МАТЕРИЈАЛА АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ .....	31
3.2. МЕХАНИЗАМ ЕРОЗИЈЕ ПРИ ОБРАДИ КРТИХ МАТЕРИЈАЛА АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ .....	32
3.3. ТОПОГРАФИЈА ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ .....	33
4. МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ.....	36
4.1. ПРЕГЛЕД МАТЕМАТИЧКИХ МОДЕЛА .....	36
4.2. МОДЕЛИ ЗАСНОВАНИ НА КОЛИЧИНИ ЕРОДИРАНОГ МАТЕРИЈАЛА .....	37



4.2.1. Модели за одређивање максималне дубине резања.....	40
4.2.2. Модели за дефинисање квалитета обрађене површине.....	44
4.3. МОДЕЛИ ЗАСНОВАНИ НА ЗАКОНУ ОЧУВАЊА ЕНЕРГИЈЕ.....	45
4.4. РЕГРЕСИОНИ МОДЕЛИ.....	46
4.5. МОДЕЛИ ЗА ДЕФИНИСАЊЕ ГЕОМЕТРИЈЕ РЕЗА ПРИ ОБРАДИ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ.....	47
4.5.1. Геометрија предње стране реза.....	47
4.5.2. Моделирање геометрије обрађене површине.....	48
4.5.3. Дводимензионални мобилни аутоматски (cellular automata–CA) приступ.....	49
4.6. НУМЕРИЧКЕ СИМУЛАЦИЈЕ ПРОЦЕСА ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ.....	52
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ.....	59
5.1. ПРЕДМЕТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	59
5.2. ЦИЉ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	61
5.3. МАШИНА НА КОЈОЈ СУ ВРШЕНА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА .....	65
5.4. МАТЕРИЈАЛ ПРЕДМЕТА ОБРАДЕ.....	69
5.5. РЕАЛИЗАЦИЈА ЕКСПЕРИМЕНТА.....	70
5.6. МЕРНЕ ВЕЛИЧИНЕ И МЕРНА ОПРЕМА.....	71
5.7. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	76
5.7.1. Предња линија реза.....	76
5.7.2. Храпавост обрађене површине.....	81
5.7.3. Хабање абразивне млазнице.....	93
5.7.4. Геометрија реза.....	95
5.7.5. Отпори резања при обради абразивним воденим млазом.....	107
6. УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА ИЗЛАЗНЕ ФАКТОРЕ.....	113
6.1. УТИЦАЈ РАДНОГ ПРИТИСКА НА ХРАПАВОСТ ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ.....	113
6.2. УТИЦАЈ БРЗИНЕ КРЕТАЊА РЕЗНЕ ГЛАВЕ НА ХРАПАВОСТ ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ.....	115
6.3. УТИЦАЈ ПРОТОКА АБРАЗИВА НА ХРАПАВОСТ ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ .....	117
6.4. УТИЦАЈ РАДНОГ ПРИТИСКА НА ГЕОМЕТРИЈУ РЕЗА.....	119
6.5. УТИЦАЈ БРЗИНЕ КРЕТАЊА РЕЗНЕ ГЛАВЕ НА ГЕОМЕТРИЈУ РЕЗА.....	121
6.6. УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА ОБЛИК ПРЕДЊЕ ЛИНИЈЕ РЕЗА.....	124
6.7. УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА ОТПОР РЕЗАЊА.....	128
7. МОДЕЛ ПРОРАЧУНА ЕНЕРГИЈЕ АБРАЗИВНОГ ВОДЕНОГ МЛАЗА.....	131
7.1. ПРОРАЧУН СПЕЦИФИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ.....	132

7.2. РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА ПРОРАЧУН ОТПОРА РЕЗАЊА .....	134
8. ЗАКЉУЧАК .....	149
9. ЛИТЕРАТУРА .....	153

Списак коришћених ознака

- $\alpha$  – угао нагиба реза
- $\alpha_v$  – коефицијент преноса енергије на абразивне честице
- $\alpha_l$  – нападни угао
- $\alpha_e$  – угао скретања млаза на изласку из материјала предмета обраде
- $\gamma$  – енергија потребна за стварање пукотине између зрна по јединици запремине
- $\gamma_c$  – енергија потребна за лом елементарне честице материјала
- $\beta$  – функција Poisson–овог коефицијента за материјал предмета обраде
- $\eta$  – степен искоришћења импулса
- $\eta_h$  – параметар који зависи од више карактеристика материјала и параметара процеса обраде
- $\varphi$  – коефицијент искоришћења млазнице
- $\varepsilon_b$  – фактор деформационог хабања (добива се експериментално)
- $\varepsilon_c$  – енергија потребна да се уклони јединична запремина материјала
- $\varepsilon_M$  – специфична енергија ерозије
- $\rho_p$  – густина абразивних честица
- $\rho_w$  – густина воде
- $\sigma$  – тврдоћа по Кноор–у за материјал који се обрађује
- $\sigma_f$  – граница течења
- $\varphi_c$  – фактор хабања за материјал који се обрађује (добива се експериментално)
- $\psi$  – однос дужине контакта честице и материјала и дужине резања
- $\nu$  – Poisson–овкоефицијент материјала који се обрађује
- $A_{ulj}$  – површина клипа на коју делује хидраулично уље
- $A_{vod}$  – површина клипа на који делује вода
- $C$  – константа која узима у обзир и абразивне честице које ударају једна у другу и леме се приликом обраде
- $C', C_1, C_2$  – константе

- $C_f$  – коефицијент трења на обрађеној површини
- $C_k$  – коефицијент који зависи од брзине
- $C_v$  – коефицијент ефикасности млазнице
- $C_y$  – коефицијент компресије
- $d$  – средња вредност димензија абразивних честица
- $dE_a$  – кинетичка енергија абразивних честица
- $d_f$  – пречник абразивне млазнице
- $d_j$  – пречник абразивног млаза
- $d_o$  – пречник водене млазнице
- $dV_M$  – количина материјала који се еродира са предмета обраде у току процеса обраде абразивним воденим млазом
- $E$  – модул еластичности материјала предмета обраде
- $E_{awj}$  – кинетичка енергија абразивног воденог млаза
- $E_c$  – специфична енергија
- $E_{pot}$  – енергија абразивног воденог млаза која је потребна за сечење материјала одређене дебљине
- $F$  – сила резања
- $F_1, F_2$  и  $F_3$  – отпори резања
- $f_f$  – коефицијент односа потребне и уложене енергије за стварање пукотине
- $F_v, F_h$  – компоненте силе резања
- $f_w$  – однос напона и енергије
- $g_1(\alpha_e), g_2(\alpha_e)$  – функције од  $\alpha_e$
- $h$  – дубина резања
- $h_1$  и  $h_2$  – висине испред и иза водене млазнице
- $h_c$  – дубина примарне зоне резања – зона резања
- $h_d$  – дубина секундарне зоне резања – зона деформисања
- $H_d$  – динамичка тврдоћа материјала
- $H_m$  – тврдоћа материјала предмета обраде
- $K$  – однос радијуса предње линије реза и максималне дубине резања, добијен емпиријски

- $k$  – однос вертикалне и хоризонталне компоненте силе
- $K_I$  – однос границе еластичности материјала који се обрађује и густине абразивних честица
- $K_c$  – жилавост материјала предмета обраде
- $L$  – дужина на којој сила делује
- $l$  – пут који резна глава пређе у једној секунди
- $l_t$  – пут који резна глава пређе за време које је потребно замишљеном резном клину да пређе пут  $L$
- $m$  – маса абразивне честице
- $M$  – укупна маса абразивних честица које врше обраду
- $m_a$  – масени проток абразива
- $M_{awj}$  – маса абразивног воденог млаза који протекне кроз абразивну млазницу у неком временском интервалу
- $m_{awj}$  – масени проток абразивног воденог млаза
- $m_w$  – масени проток воде
- $p$  – радни притисак
- $p_I$  – напон течења обрађиваног материјала
- $p_{ulj}$  – притисак хидрауличног уља у појачивачу притиска
- $p_{vod}$  – притисак воде у појачивачу притиска
- $R$  – радијус абразивне честице
- $R_a$  – средње аритметичко одступање профила од средње линије
- $R_e$  – отпорност на ерозију
- $R_f$  – фактор кружности абразивних честица
- $R_w$  – валовитост обрађене површине
- $s$  – дебљина предмета обраде
- $t_r$  – однос протока абразива и протока воде
- $u$  – нагиб реза
- $V$  – запремина уклоњеног материјала
- $v$  – брзина абразивне честице
- $v_{awj}$  – брзина абразивног воденог млаза на уласку абразивног воденог млаза у предмет обраде

- $v_c$  – брзина кретања резне главе
- $v_{el}$  – гранична вредност брзине абразивних честица при којој настаје пластична деформација материјала који се обрађује
- $v_{kr}$  – критична брзина при којој почиње стварање пукотина
- $v_{w1}$  – брзина млаза на изласаку из водене млазнице
- $v_{w2}$  – брзина воде на уласку у водену млазницу
- $W$  – запремина материјала еродираниог једном абразивном честицом.
- $W_C$  – запремина еродираниог материјала резањем
- $W_d$  – ширина реза на мерном месту 2 (где абразивни водени млаз излази из материјала предмета обраде)
- $W_D$  – запремина еродираниог материјала при пластичној деформацији
- $W_g$  – ширина реза на мерном месту 1 (где абразивни водени млаз улази у материјал предмета обраде)
- $W_{sr}$  – средња ширина реза
- $x_0$  – растојање резне главе од предмета обраде
- $Y_{lag}$  – скретање млаза

## РЕЗИМЕ

Обрада абразивним воденим млазом је једна од недавно развијених неконвенционалних производних технологија. Данас се све више користи у индустрији захваљујући својим многобројним предностима над осталим технологијама резања. Међутим, да би обрада абразивним воденим млазом нашла што ширу примену у индустрији и да би се унапредиле њене перформансе, неопходно је разумевање бројних улазних и излазних параметара ове обраде, као и утицај улазних параметара на излазне параметре.

У докторској дисертацији: “Енергија и квалитет обраде абразивним воденим млазом“ предложени су нови модели који дефинишу утицај улазних параметара обраде абразивним воденим млазом (радног притиска, брзине кретања резне главе, протока абразива и растојања резне главе од предмета обраде) на излазне параметре као што су ширина реза, нагиб реза, храпавост обрађене површине. Предложени модели су добијени на основу опсежних експерименталних истраживања. Такође, дат је нов приступ дефинисању геометрије предње линије реза у зависности од појединих, најзначајнијих улазних параметара. На основу енергије абразивног воденог млаза и запремине уклоњеног материјала предмета обраде, одређена је специфична енергија обраде за испитивани материјал. На основу формираних модела за дефинисање путање абразивног воденог млаза кроз материјал предмета обраде, односно предње линије реза, енергије абразивног воденог млаза и специфичне енергије обраде абразивним воденим млазом, добијен је модел за одређивање силе резања и отпора резања при обради абразивним воденим млазом. Резултати добијени помоћу модела су упоређени са експериментално добијеним резултатима. Модел је показао доста добро поклапање са спроведеним експериментом.

Сва сазнања, до којих се дошло током израде докторске дисертације, указују на чињеницу да од енергије абразивног воденог млаза и специфичне енергије обраде зависе излазни параметри који су анализирани. Ова чињеница може послужити као основа за будућа истраживања у области обраде абразивним воденим млазом.

Напомена: Ова докторска дисертација настала је као резултат рада на пројекту ТР 35034 "Истраживање примене савремених неконвенционалних технологија у производним предузећима са циљем повећања ефикасности коришћења, квалитета производа, смањења трошкова и уштеде енергије и материјала", под руководством проф. др Мирослава Радовановића, финансираном од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Србије.

## **SUMMARY**

Abrasive water jet machining is one of the recently developed non-conventional production technologies. Due to its many advantages over other cutting technologies it is often used in industry. However, in order to find a wider application of the abrasive water jet machining in industry and improve its performance, it is necessary to perceive a number of input and output parameters of the abrasive water jet machining process, and the impact of the input parameters on the output parameters.

This doctoral dissertation, "The energy and quality of abrasive water jet machining", proposes new models for defining the influence of the input parameters of the abrasive water jet machining (operating pressure, traverse speed of cutting head, abrasive flow rate and distance of the cutting head of the workpiece) on the output parameters, such as the width of cut, cut taper, surface roughness. These models are based on extensive experimental investigations. The doctoral dissertation, also, gives insight into the new model for defining the geometry of the front - line of cut, depending on the most important input parameters. Based on the energy of the abrasive water jet and the volume of the removed material of the workpiece, specific energy of the abrasive water jet machining for the tested material is determined. According to developed model for defining the trajectory of the abrasive water jet through the workpiece, and the model for defining the front line of cutting, abrasive water jet energy and specific energy of the abrasive water jet machining, a model for determining the cutting reaction force for the abrasive water jet machining has been developed. The results obtained by the model were compared with the experimental results. The model showed quite good agreement with the conducted experiments.

Entire knowledge, achieved while drafting of this doctoral dissertation, indicates that the energy of the abrasive water jet and specific energy of the abrasive water jet machining affect the output parameters which were analyzed in this doctoral dissertation. This fact can be used as a basis for future research in the field of abrasive water jet machining.

Note: This doctoral dissertation is the result of work on the project TR 35034 "The research of modern non-conventional technologies application in manufacturing companies with the aim of increase efficiency of use, product quality, reduce of costs and save energy and materials", under the direction of prof. dr Miroslav Radovanovic, funded by the Ministry of Education, Science and Technological Development of Serbia.



## 1. УВОД

Са развојем савремених материјала упоредо се јавила и потреба за развојем нових поступака обраде јер конвенционални поступци обраде нису давали задовољавајуће резултате при обради ових материјала. Под неконвенционалним поступцима обраде материјала подразумевају се поступци који се одвијају при великој концентрацији енергије настале хемијским, физичким, термичким или ерозионим процесима. Развој авио, космичке, војне, нуклеарне и процесне индустрије је, такође, условио развој неконвенционалних поступака обраде. Од свих неконвенционалних поступака обраде најширу примену имају обраде електроерозијом, плазмом и ласером.

Обрада абразивним воденим млазом је неконвенционални поступак обраде новијег датума, који је за сада мало истражен, али има све већу примену у индустрији. Обрада абразивним воденим млазом је веома ефикасна метода за контурно сечење различитих врста материјала. Континуални развој обраде воденим млазом високог притиска почиње у првој декади двадесетог века. У САД ова врста обраде је прво коришћена у рудницима на ископавању злата. Отприлике у исто време је започето коришћење ове методе у Русији, такође у рудницима, на ископавању угља. Крајем 60-тих година прошлог века *R. Franz* са Универзитета у Мичигену, започео је испитивање сечења дрвета воденим млазом велике брзине. Идеју је добио када је посматрао начин детектовања цурења паре из котлова. До прве комерцијалне употребе воденог млаза дошло је 1972. године. Произвођач прве машине за обраду воденим млазом је била *Mc Cartney Manufacturing Company* и инсталирана је у *Alto Voxboard*. Од тада се водени млаз високог притиска све више користи за обраду меких материјала као што су дрво и кожа.

Даља истраживања су довела до открића абразивног воденог млаза 1980. године и његове прве комерцијалне примене 1983. године. Додатком абразива у водени млаз знатно се проширио спектар материјала који се могу на овај начин обрађивати. Такође је омогућена и већа брзина обраде, већа тачност обраде и бољи квалитет обрађене површине.

Раних 1990-тих, *John Olsen* је започео истраживање концепта обраде воденим млазом и обраде абразивним воденим млазом. Највећу пажњу је посветио конструисању, унапређењу и производњи пумпи високог притиска за потребе обраде абразивним воденим млазом. Такође, *Olsen* је развио и први специјализовани софтвер за контролу процеса обраде абразивним воденим млазом.

Најчешће производне операције које се овом врстом обраде могу изводити су: сечење, полирање површина, чишћење површина итд. У свим случајевима механизам обраде се заснива на ерозији. Обрада абразивним воденим млазом је нарочито погодна за обраду кртих материјала (стакло, керамика, камен итд.) и композитних материјала.

Обрада абразивним воденим млазом је супериорна у односу на сличне поступке обраде када је у питању израда делова који имају сложену дводимензионалну форму. Ова предност још више долази до изражаја када је у питању обрада танких лимова и фолија, као и то да се овим поступком практично могу сећи скоро све врсте материјала без обзира да ли се ради о кртим или жилавим материјалима. Велика предност овог

поступка обраде је чињеница да у зони обраде не долази до значајног пораста температуре, и да су силе резања веома мале [62].

Од почетка комерцијалне употребе поступка обраде абразивним воденим млазом, до данас, извршен је велики број истраживања која су имала за циљ да објасне поступак обраде абразивним воденим млазом [70]. Међутим још увек постоје многи аспекти ове технологије који нису објашњени. Један од веома мало истраживаних аспеката је енергија абразивног воденог малаза, као и отпори и силе резања које се јављају при обради абразивним воденим млазом. Из ове обалсти је вршено веома мало истраживања, углавном у лабораторијским условима, тако да резултати који су добијени важе само у одређеним условима. Такође, велики недостатак већег дела истраживања је тај што су експерименти вршени у циљу одређивања максималне дубине продирања абразивног воденог млаза, при чему се резна глава машине није кретала. Када је квалитет обрађене површине (храпавост обрађене површине и геометрија реза) у питању, истраживања у овој области су значајнија, али се опет мали број истраживања бавио дефинисањем утицаја режима обраде на квалитет обраде.

Имајући у виду наведене чињенице, у овој докторској дисертацији су представљена експериментална истраживања утицаја режима обраде на квалитет обраде абразивним млазом, као и експериментална и теоријска истраживања енергетског аспекта обраде абразивним воденим млазом. Циљ докторске дисертације „Енергија и квалитет обраде абразивним воденим млазом“ је да се применом савремених научних метода истраже и дефинишу зависности најутицајнијих технолошких параметара процеса обраде и излазних параметара обраде, формирање теоријског модела прорачуна отпора резања и специфичне енергије при обради. Да би се ово остварило, дефинисани су технолошки параметари процеса обраде абразивним воденим млазом и излазни параметари процеса, као и систематизација теоријских знања о њиховој међузависности, дефинисан је мерни ланац а затим је експериментално одређена зависности између технолошких параметара процеса обраде и излазних параметара. На основу систематизованих података развијен је теоријски модел за прорачун специфичне енергије и отпора резања при обради абразивним воденим млазом.

Основне претпоставке од којих се пошло при изради дисертације су да параметри процеса обраде абразивним воденим млазом директно утичу на излазне параметре процеса обраде, да специфична енергија обраде представља карактеристику материјала и у зависности је од параметара процеса обраде воденим абразивним млазом и да се енергија обраде абразивним воденим млазом може упоредити са специфичном енергијом резања потребном за обраду материјала другим поступцима обраде (као што су обрада ласером, обрада плазмом, сечење брусном плочом, сечење тестерастим глодалом и др.).

За боље разумевање утицаја појединих параметара процеса обраде абразивним воденим млазом на излазне параметре овог процеса, као што су квалитет реза и отпори резања, неопходно је разумевање принципа процеса обраде. Због тога је у докторској дисертацији објашњен основни механизам обраде, како на микро, тако и на макро плану. Такође су дефинисане и појаве на обрађеној површини, које су последица механизма обраде. У докторској дисертацији је детаљно објашњен принцип обраде абразивним воденим млазом. Истакнуте су главне карактеристике ове обраде и извршено је поређење обраде абразивним воденим млазом са другим сличним обрадама, које као „алат“ користе млаз велике густине енергије. Такође је објашњена структура и принцип рада машина за обраду абразивним воденим млазом, као и принцип рада основних компоненти машина.

Да би се установила актуелност истраживања која су вршена, дат је и детаљан преглед досадашњих истраживања у свету и код нас. Прегледом литературе, закључено је да не постоје детаљнија истраживања из области изучавања енергије абразивног воденог млаза. Наиме, сва досадашња истраживања из области енергије абразивног воденог млаза се заснивају на моделима које су пре петнаест година поставили *Momber* и *Kovačević* [70]. Уочено је и да се до сада аутори нису бавили повезивањем теоријских модела које важе код конвенционалне обраде резањем са моделима који описују поступак обраде абразивним воденим млазом.

Пре него што се приступило експерименталним истраживањима извршено је планирање експерименталних истраживања. Дефинисани су режими обраде, односно параметри процеса обраде абразивним воденим млазом који ће се варирати као и излазни параметри чије промене ће се пратити. Експерименти су вршени са циљем да се установи утицај улазних параметара процеса обраде абразивним воденим млазом, као што су радни притисак, брзина кретања резне главе, проток абразива, растојање резне главе од предмета обраде, дебљина предмета обраде као и материјал предмета обраде на квалитет реза, односно ширину и нагиб реза, храпавост обрађене површине и отпоре резања. На основу резултата добијених експерименталним истраживањима, дефинисана је зависност геометрије реза и храпавости обрађене површине од наведених улазних параметара процеса обраде абразивним воденим млазом.

При обради абразивним воденим млазом се као алат користи водени млаз са додатком абразива, који под великим притиском истиче кроз отвор малог пречника, при чему достиже брзину неколико пута већу од брзине простирања звука. Због тако велике брзине, абразивни водени млаз поседује велику енергију. Са енергетског становишта, абразивни водени млаз се може посматрати као „круто тело“, односно као и сваки други резни алат у конвенционалним поступцима обраде. Ипак, процес обраде абразивним воденим млазом је веома специфичан и потребно је добро познавање механизма дејства воденог абразивног млаза на материјал предмета обраде да би се ефекти примене ове технологије у потпуности остварили.

Да би се законитости које важе за конвенционалну обраду резањем примениле на процес обраде абразивним воденим млазом, извршена је дискретизација процеса обраде. Процес обраде абразивним воденим млазом је представљен као обрада многосечним резним алатом, код кога резни клин има путању која се поклапа са предњом линијом реза. Код овако замишљене обраде брзина резања, корак и дубина резања су дефинисани на основу брзине абразивног воденог млаза и брзине кретања резне главе. Овакав приступ процесу обраде абразивним воденим млазом је омогућио да се прорачун силе резања и отпора резања који важе за конвенционалне поступке обраде примени и на овај поступак обраде.

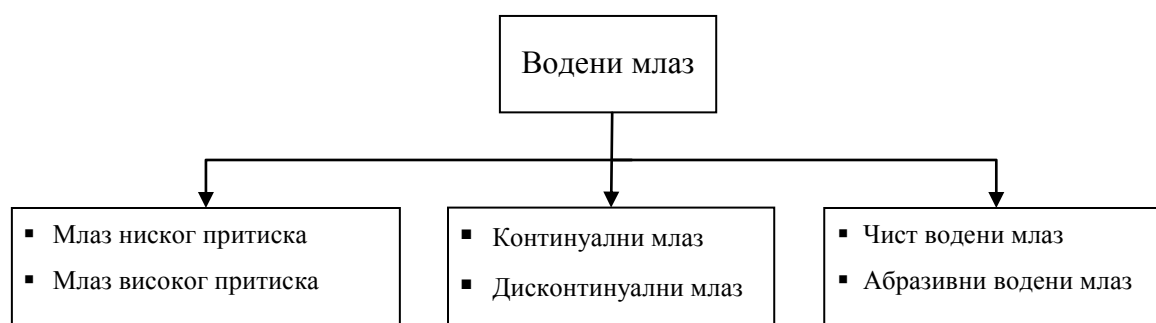
На овај начин је развијен нов, математичко теоријски модел за прорачун отпора резања код обраде абразивним воденим млазом. Резултати добијени помоћу овог модела су упоређени са експериментално добијеним вредностима, и показало се да се резултати добијени на основу модела и експеримента доста добро поклапају.

На крају докторске дисертације су истакнута најважнија сазнања до којих се дошло на основу реализованих истраживања, дати су закључци који обухватају анализу резултата експерименталних истраживања, смернице будућих истраживања и преглед коришћене литературе.

## 2. ОБРАДА АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

### 2.1. ВОДЕНИ МЛАЗ

Појам водени млаз обухвата више различитих врста млаза. Најобухватнија подела је приказана на слици 2.1.



Слика 2.1. Врсте воденог млаза [70]

Прва подела је начињена на основу вредности радног притиска. Тачна вредност радног притиска, која би била постављена као граница која раздваја водени млаз на млаз ниског и млаз високог притиска није тачно одређена. Ова подела је начињена на основу пумпе која се користи у инсталацији за обраду абразивним воденим млазом. Већина машина за обраду абразивним воденим млазом има радни притисак воде око 400 МПа (4000 bar). Зупчaste и завојне пумпе се нису показале као погодне за стварање тако високог притиска. За вредности притиска изнад 70 МПа се користе клипне пумпе. Клипне пумпе високог притиска могу бити:

- пумпе са директним погоном и
- пумпе са појачивачем притиска.

Уколико се у инсталацији за обраду воденим млазом за генерисање радног притиска користи клипна пумпа са директним погоном, онда је то инсталација са млазом ниског притиска. Радни притисак у овим инсталацијама је око 280 МПа. Уколико се у инсталацији за обраду воденим млазом за генерисање радног притиска користи пумпа са појачивачем притиска, онда је то инсталација са млазом високог притиска. Радни притисак у оваквим инсталацијама је око 400 МПа.

Такође, водени млаз се може поделити на континуални и дисконтинуални млаз. Због начина на који настаје водени млаз високог притиска и осцилација у вредности притиска у току времена, јавља се незнатан дисконтинуитет у воденом млазу. Овај дисконтинуитет се занемарује па се као дисконтинуални водени млаз сматра водени

млаз који има дисконтинуитет у протоку и притиску, а који је намерно изазван неким спољним механичким уређајем.

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 тврдих материјала није довољна енергија чистог воденог млаза, па се у њега додаје абразив у виду праха. На тај начин настаје абразивни водени млаз.

## **2.2. КАРАКТЕРИСТИКЕ ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ**

Обрада абразивним воденим млазом се данас све више користи у индустрији јер има доста предности у односу на конвенционалне поступке обраде [15, 39, 41, 54, 98, 103, 104]. Предности обраде абразивним воденим млазом су следеће:

- Нема утицаја топлоте на обрађену површину. Топлота која се генерише, у зони обраде, при самом процесу обраде се одмах неутралише млазом воде. Због тога не долази до пораста температуре на предмету који се обрађује. Ово је веома битно код обраде термоосетљивих материјала и материјала код којих пораст температуре доводи до промена у структури материјала,
- Могућност резања по задатој контури. Обрада абразивним воденим млазом се показала као изузетно добра за 2D контурно резање. Са овим поступком обраде је могуће вршити резање изузетно сложених контура,
- Велика разноврсност обрађиваних материјала. Абразивним воденим млазом се могу обрађивати готово сви материјали. Овај поступак обраде је веома погодан за обраду веома тврдих и кртих материјал (каљени челик, легуре титанијума, стакло, керамика),
- Мале силе резања. Силе резања при обради абразивним воденим млазом су веома мале, тако да у великом броју случајева није потребно причвршћивање материјала који се обрађује на радни сто машине,
- Веома брза припрема за рад. Све врсте обраде се обављају са истом резном главом, тако да, у том смислу, није потребно посебно подешавање машине,
- При обради абразивним воденим млазом долази до појаве минималне пукне, уређаји за обраду абразивним воденим млазом се лако интегришу са механичким манипулаторима, потрошни материјал при овој обради (вода и абразивни материјал) су лако доступни и јефтине и
- Веома низак ниво загађења околине.

Поред свих наведених предности обраде абразивним воденим млазом, постоје и недостаци и ограничења у широј примени. Ове недостаци су:

- Промена у квалитету реза по дубини реза. Обрада абразивним воденим млазом је обрада млазом концентрисане енергије. Са продирањем у материјал долази до губитка енергије и скретања млаза, што доводи до промене услова обраде. То доводи до промена у квалитету реза,
- Мала искоришћеност енергије. Уклањање материјала из зоне резања врши само део абразивних честица које се налазе у воденом млазу. Кинетичка енергија ових честица је мања од 10% укупне енергије абразивног воденог млаза,
- Веома кратак животни век абразивне млазнице,
- Велика почетна улагања (висока цена машине за обраду абразивним воденим млазом, опреме и резервних делова),
- Велика бука при обради абразивним воденим млазом (до 100 db),

- Обрађена површина је увек мат и
- Машина мора бити смештена у посебној просторији, јер при обради долази до стварања веома fine магле воде. Магла се мора усисавати јер изазива корозију опреме која се налази у непосредној близини.

На основу наведених чињеница, може се рећи да, када је у питању обрада абразивним воденим млазом, много је више предности него недостатака. Због тога се данас све чешће у индустрији сусреће ова врста обраде.

### 2.3. ПОРЕЂЕЊЕ ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ СА ОСТАЛИМ КОМПАРАТИВНИМ ТЕХНОЛОГИЈАМА

Обрада абразивним воденим млазом се најчешће користи за контурно сечење различитих материјала. Због тога је најпогодније овај поступак обраде поредити са технологијама које се такође користе за овакву обраду. То су најчешће обрада ласером, обрада плазмом и електроерозиона обрада са жичаном електродом. Због боље прегледности, поређење је дато у табели 2.1. Поређене су само основне карактеристике, као што су максимална дебелина предмета обраде, квалитет реза, тачност обраде и слично.



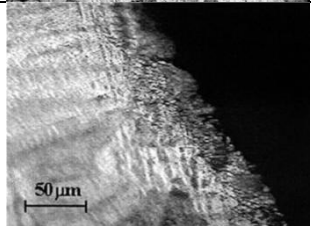
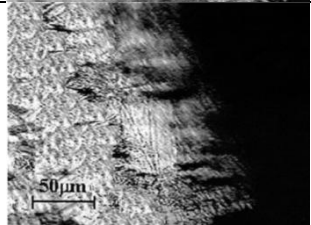
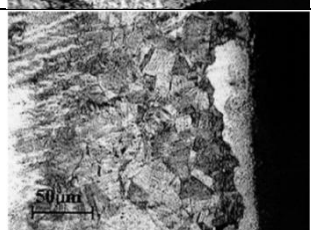
Табела 2.1. Поређење обраде абразивним воденим млазом

Карактеристика	Обрада абразивним воденим млазом	Обрада ласером	Обрада плазмом	Електроерозиона обрада са жичаном електродом
Материјал предмета обраде	Сви материјали	Читав спектар материјала осим рефлектујућих материјала и добрих проводника топлоте	Електропроводни материјали (угљенични и легирани челик, Al i Ni легуре)	Електропроводни материјали
Температура реза	Хладан рез	Топао рез	Врућ рез	Топао рез
Дебелина предмета обраде	до 280 mm	до 20 mm (за ласер од 3 KW)	до 40 mm	до 100 mm
Тачност обраде	0.05 mm	0.015 mm	0.25 mm	0.001 mm
Нагиб реза	0 ÷ 2°	0 ÷ 0.5°	0 ÷ 8°	0°
Ширина реза	0.8 mm	0.5 mm	1.8 mm	0.2 mm
Квалитет површине реза	N8 (Ra=3.2 µm)	N7 (Ra=1.6 µm)	N10 (Ra=12.5 µm)	N6 (Ra=0.8 µm)
Обрада сложених контура	Могућа	Могућа	Могућа	Могућа

На основу поређења може се закључити да је основна предност обраде абразивним воденим млазом могућност сечења свих материјала великих дебелина и одсуство појаве топлоте у зони резања. У табели 2.2. је приказана микроструктура челика X5CrNi 18–10 без обраде и у зони резања након обраде абразивним воденим

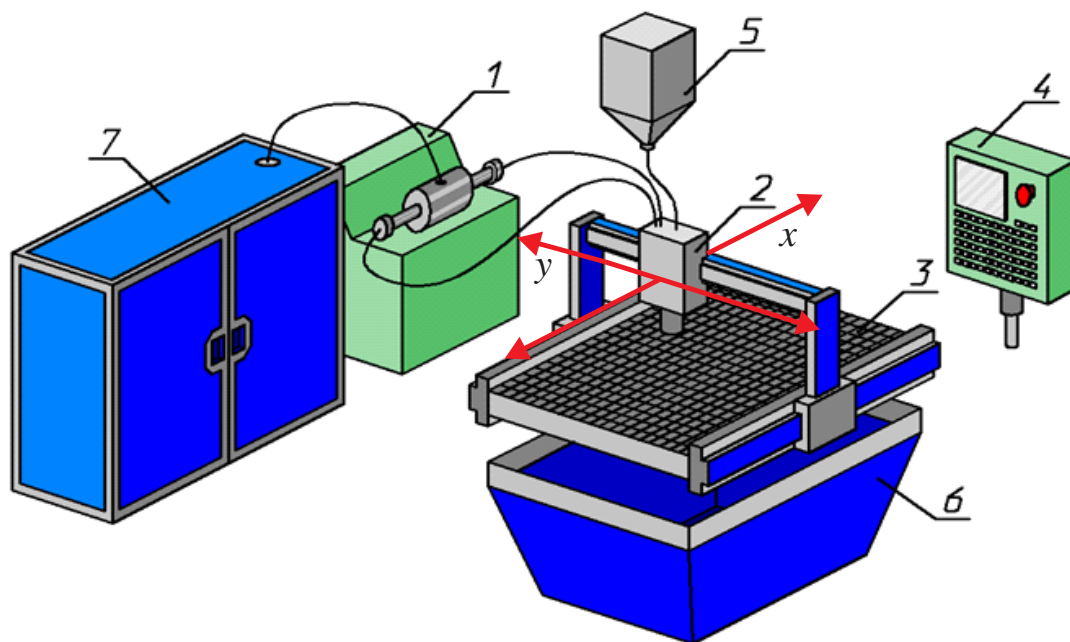
малзом, обраде ласером, плазмом и електроерозионе обраде са жичаном електроодом (WEDM).

Табела 2.2. Микроструктура челика X5CrNi 18–10 пре обраде и након обраде абразивним воденим млазом, обраде ласером, плазмом и електроерозионе обраде са жичаном електроодом [1]

<p>Микроструктура челика X5CrNi 18–10 пре обраде</p>	
<p>Микроструктура челика X5CrNi 18–10 након обраде абразивним воденим млазом</p>	
<p>Микроструктура челика X5CrNi 18–10 након обраде ласером</p>	
<p>Микроструктура челика X5CrNi 18–10 након обраде плазмом</p>	
<p>Микроструктура челика X5CrNi 18–10 након електроерозионе обраде са жичаном електроодом</p>	

## 2.4. ОБРАДНИ СИСТЕМИ ЗА ОБРАДУ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

Машина за обраду абразивним воденим млазом је веома сложен систем и производ је савремене, врхунске технологије. У индустрији се могу видети различити облици и конструкције машина за обраду абразивним воденим млазом, али је најчешћи облик и основне компоненте машине упрошћено приказан на слици 2.2.



Слика 2.2. Скица машине за обраду абразивним воденим млазом [66]

Машина за обраду абразивним воденим млазом се састоји од следећих основних компоненти:

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

Савремене машине за обраду абразивним воденим млазом раде са притиском воде преко 400 МПа (4000 bar), при чему водени млаз достиже брзине и до 1000 m/s. Састоје се од погонског дела, извршног дела и помоћних компоненти. Погонски део је јединица у којој се ствара вода под високим притиском, док извршни део представља резна глава. Резна глава се креће брзином  $v_c$  (брзина кретања резне главе) дуж  $x$  и  $y$  осе. У помоћне компоненте спадају систем за припрему воде, инсталација високог притиска, магацин абразива са системом за довод абразива и координатни радни сто са апсорбером неискоришћене енергије абразивног воденог млаза. На слици 2.4. су приказани различити савремени типови машина за обраду абразивним воденим млазом: 1) машина са једном резном главом без могућности закретања, 2) машина са једном резном главом са могућношћу закретања, 3) машина са две резне главе, од којих једна има могућност закретања, 4) машина са три резне главе са могућношћу закретања и



окретања предмета обраде и 5) машина за обраду абразивним воденим млазом на која је коришћена за експериментална истраживања, са две резне главе од којих једна има могућност закретања (компензација нагиба реза) а друга не.



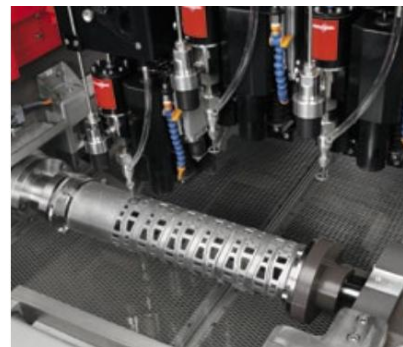
1)



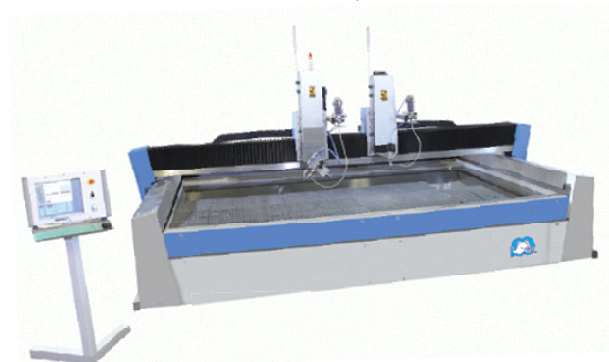
2)



3)



4)



5)

Слика 2.3. Различити типови машина за обраду абразивним воденим млазом

### 2.4.1. Систем за припрему воде

Вода која се користи за обраду абразивним воденим млазом се најчешће узима из локалног водовода. Оваква вода у себи садржи доста растворених минерала и соли који имају штетан утицај на машину за обраду абразивним воденим млазом. Због тога, пре уласка у пумпу, вода мора бити третирана, да би њене карактеристике биле у складу са спецификацијом произвођача машине.

Чврсте материје се из воде уклањају филтрирањем. У систему за напајање водом најчешће постоји низ филтера (од 20  $\mu\text{m}$  до 0.5  $\mu\text{m}$ ). Соли које су растворене у води се могу отклањати на три начина: омекшавањем воде, применом обратне осмозе или применом јонског измењивача.

Како ће изгледати систем за припрему воде, и какав третман воде ће се примењивати, зависи од квалитета воде на улазу у машину за обраду абразивним воденим млазом. У табели 2.3. су приказане карактеристике воде које се контролишу и њихове препоручене вредности.

Табела 2.3. Вредности параметара квалитета воде [44]

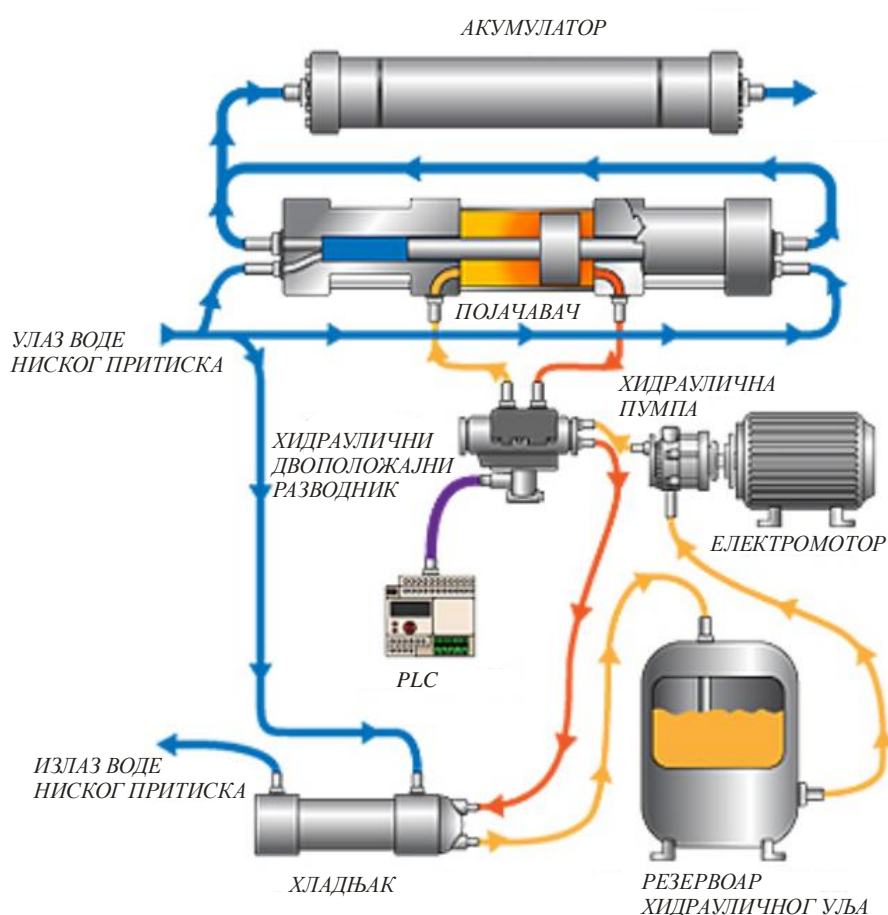
Параметар квалитета воде	Минимални захтев	Оптимални услов
pH	6.5÷7.5	7.0
Укупни садржај чврстих растворених елемената	10÷75 ppm*	15 ppm
Гвожђе + манган	испод 0.1 mg/l	0
Алкалност (CaCO <sub>3</sub> )	испод 0.2 mg/l	0
Силицијум + силикати	испод 0.15 mg/l	0
Хлор	0	испод 1 mg/l код обратне осмозе, иначе 0
Калцијум + магнезијум	испод 0.17 mg/l	0
Бактерије	испод 100 col.**	0 col.

\* ppm – милионити део

\*\* col. – број колонија

### 2.4.2. Погонски део

Погонски део је „срце“ машине за обраду абразивним воденим млазом. Његов задатак је да обезбеди довољан проток воде високог притиска, и да ту воду кроз цевовод високог притиска допреми до извршног дела машине. На слици 2.4. је дат шематски приказ најчешће примењиваног облика погонског дела инсталације за обраду абразивним воденим млазом.



Слика 2.4. Погонски део инсталације за обраду абразивним воденим млазом, шематски приказ и изглед [42]

Погонски део се састоји од следећих компоненти:

- Електромотор,
- Хидраулична пумпа са хидрауличним разводником,
- Пумпа високог притиска – Појачавач (мултипликатор) притиска,
- Акумулатор притиска,
- Резервоар хидрауличног уља и
- 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. У

савременим обрадним системима се чешће користи појачавач притиска јер се са њим постижу знатно већи радни притисци воде.

### 2.4.3. Појачавач притиска

Појачавачи се често још називају и мултипликатори јер појачавају, односно умножавају радни притисак. Принцип рада појачавача притиска је доста једноставан и приказан је на слици 2.5. 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.

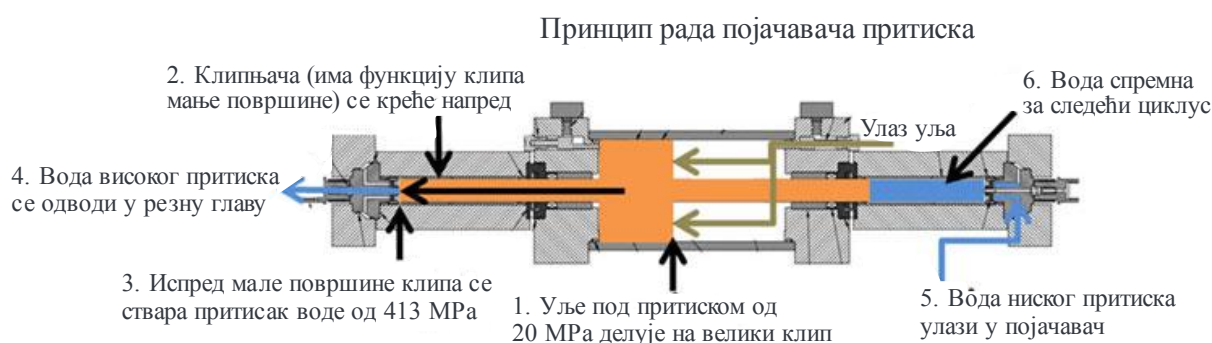


Слика 2.5. Однос површина одређује степен појачавања притиска [42]

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

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

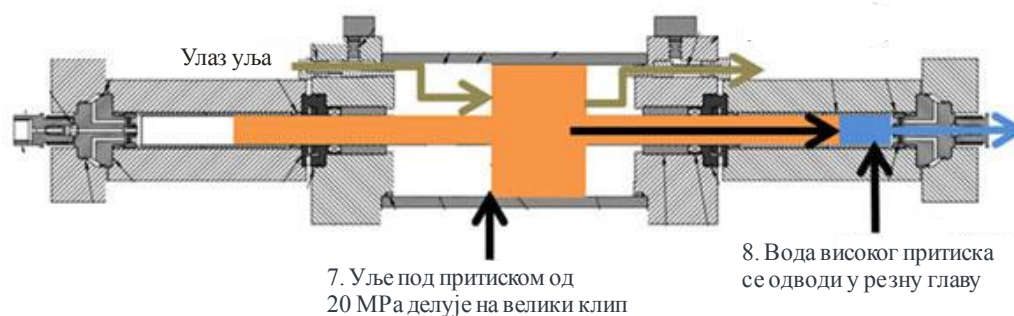
Из ових формула се види да притисак воде директно зависи од односа површина великог и малог клипа. Што је овај однос већи и притисак је већи. Однос површина најчешће није већи од двадесет. Принцип рада појачавача притиска и процес добијања високог притиска је приказан на сликама 2.6. и 2.7.



Слика 2.6. Принципиј рада појачавача притиска [42]

Поступак добијања високог притиска, који је приказан на сликама 2.5. и 2.6. 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 неповратни 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.



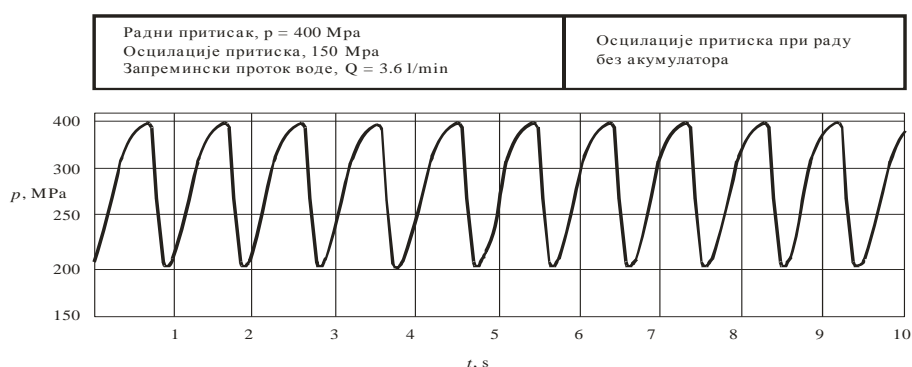
Слика 2.7. Принциј рада појачавача притиска [42]

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.
8. Мањи клип делује на воду која се налази испред њега. Услед овога притисак у води расте до максималне вредности. Вода под високим притиском одлази даље у цевовод, а цилиндар стиже у крајњи десни положај. Након овога се цео циклус понавља из почетка.

Појачавачи притиска остваре 50 до 60 циклуса у минути, уколико се ради са пуним капацитетом.

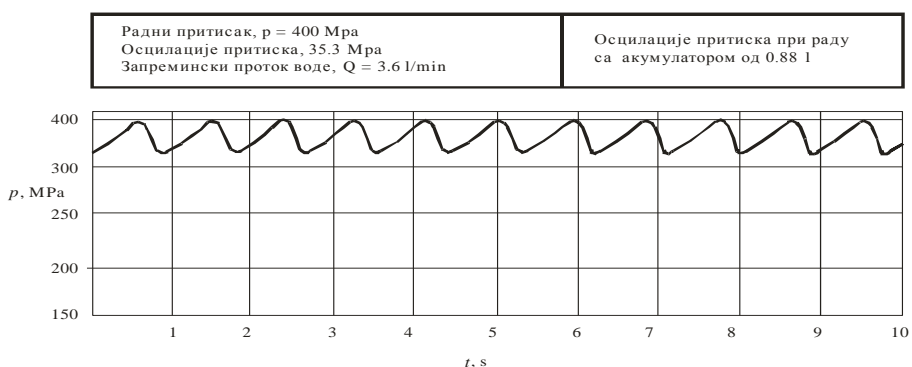
#### 2.4.4. Акумулатор притиска

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 сабити 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 2.8.

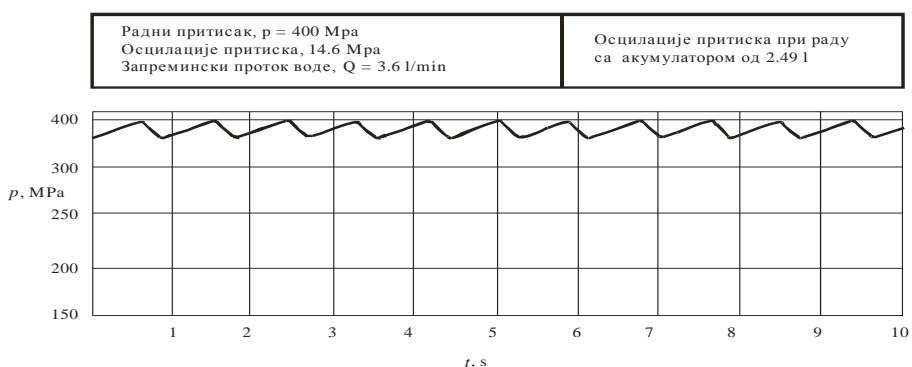


Слика 2.8. Осцилације радног притиска [95]

На сликама 2.9. и 2.10. су приказане осцилације притиска када се користе акумулатори притиска.



Слика 2.9. Осцилације радног притиска са акумулатором притиска од 0.88 l [95]



Слика 2.10. Осцилације радног притиска са акумулатором притиска од 2.49 l [95]

Као што се види са слика, коришћењем акумулатора од 0.88 l осцилације притиска су смањене са 150 МПа на 35 МПа, слика 2.8., док коришћењем акумулатора од 2.49 l осцилације притиска су смањене на 15 МПа, слика 2.9. Уколико су вредности осцилација притиска велике, то се значајно одражава на квалитет обрађене површине. Свака промена у притиску доводи до промене у брзини абразивног воденог млаза, што доводи и до промене енергије абразивног воденог млаза. То даље доводи до промена у

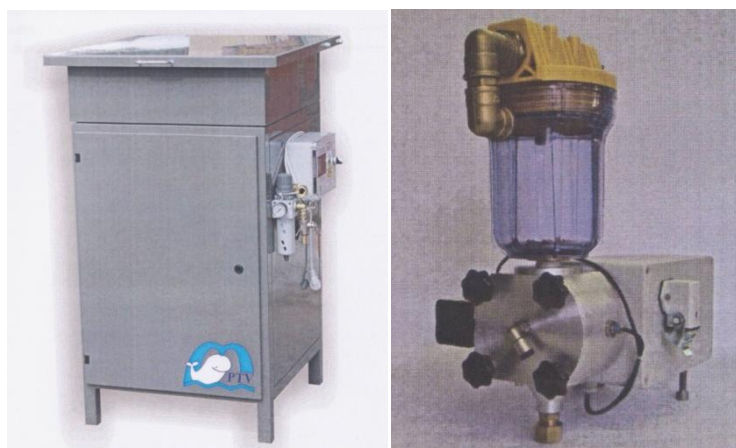
квалитету обрађене површине. Због тога је од великог значаја примена правилно одабраног акумулатора притиска.

#### 2.4.5. Магацин абразива са системом за довод абразива

Да би систем почео да ради неопходно је магацин напунити 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 2.11.

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

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

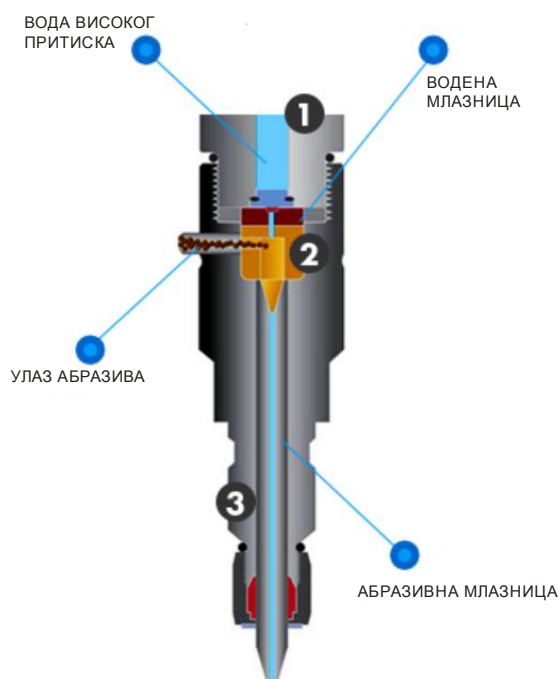


Слика 2.11. Магацин абразива са системом за довод абразива



#### 2.4.6. Резна глава

Извршни део представља резна глава. То је део где се вода високог притиска меша са абразивом и где настаје абразивни водени млаз. Шематски приказ резне главе је дат на слици 2.12.



Слика 2.12. Резна глава, шематски приказ [42]

Резна глава се састоји из три основна дела:

- 1 – водене (дијамантске) млазнице,
- 2 – коморе за мешање и
- 3 – абразивне млазнице (цеви за усмеравање млаза).

Вода која долази у резну главу је најчешће под притиском од  $130 \div 400$  МПа и пролази кроз водену млазницу. Пречник отвора водене млазнице се креће у границама од  $0.08 \div 0.4$  mm. Због овако малог пречника млазнице, водени млаз достиже веома велике брзине, чак и до 1000 m/s. Овај млаз даље стиже у комору за мешање која је најчешће пречника 6 mm и дужине 10 mm. У овој комори се воденом млазу додају честице абразива и врши њихово мешање. Водени млаз убрзава честице абразива и заједно са њима пролази кроз дугачку цилиндричну абразивну млазницу. Мешавина воде и абразивних честица као абразивни водени млаз излази из абразивне млазнице као кохерентни млаз и врши обраду. Веома је битно да водена млазница и абразивна млазница буду добро центриране, јер од тога зависи изглед абразивног воденог млаза, а самим тим и квалитет обраде.



#### 2.4.7. 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.

#### 2.4.8. 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. Спољни пречници су најчешће 0.25“, 0.313“, 0.375“ и 0.563“, док су унутрашњи пречници у распону од 0.062“ до 0.312“, слика 2.13. 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.



Слика 2.13. Цеви високог притиска [42]

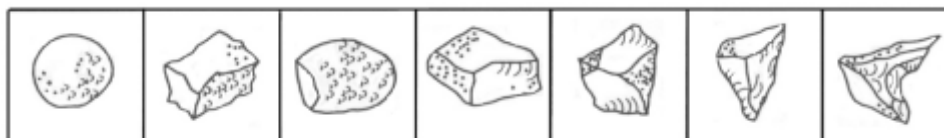
### 2.5. АБРАЗИВНИ МАТЕРИЈАЛ

Постоји више врста абразивног материјала који се данас користи за обраду абразивним воденим млазом. Неки од њих су: гарнет (у највећем броју случајева), оливин, алуминијум оксид, кварцни песак итд. Сви ови абразивни материјали се могу сврстати у две велике групе: оксиде и силикате. Како се у скоро 90% случајева користи гарнет, у табели 2.4. су приказане његове карактеристике.

Табела 2.4. Карактеристике абразивног материјала – гарнета

Опис	Коментар
Хемијски састав	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Силицијум диоксид (<math>\text{SiO}_2</math>) – 41,34%</li> <li>– Магнетит (<math>\text{FeO}</math>) – 9,72%</li> <li>– Хематит (<math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math>) – 12,55%</li> <li>– Алуминијум оксид (<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>) – 20,36%</li> <li>– Калцијумоксид (<math>\text{CaO}</math>) – 2,97%</li> <li>– Магнезијум оксид (<math>\text{MgO}</math>) – 12,35%</li> <li>– Манган оксид (<math>\text{MnO}</math>) – 0,85%</li> </ul>
Тврдоћа	8÷9 Моhс–ове скале
Боја	Црвена до љубичасте
Специфична тежина	3,9÷4,1g/cm <sup>3</sup>
Тачка топљења	1315°C
Апсорпција влаге	Није хигроскопан – инертан
Штетни утицаји на околину	Нема

Обраду абразивним воденим млазом у ствари врше абразивна зрна, тако да је за процес обраде поред механичких особина абразивног материјала, веома важан и облик и величина ових зрна. На слици 2.14. су дати могући облици абразивних зрна.



Слика 2.14. Могући облици абразивних зрна [70]

Увећан изглед абразивних зрна гарнета је дат на слици 2.15.



Слика 2.15. Изглед абразивних зрна гарнета

За постизање најбољег квалитета обраде, неопходно је правилно комбиновање абразивне млазнице, водене млазнице и абразива одговарајуће финоће. Правилан избор комбинација је дат у табели 2.5.

Табела 2.5. Правилан избор абразивне млазнице, водене млазнице и абразива

	Финоћа абразивних зрна	Пречник абразивне млазнице	Пречник водене млазнице
Стандардна конфигурација (најчешће примењивана у индустрији)	80 mesh 300 – 150 $\mu\text{m}$	0.762 – 1.02 mm	0.330 – 0.356 mm
Резање са великим брзинама	60 mesh 400 – 200 $\mu\text{m}$	1.02 mm	0.356 – 0.381 mm
	50 mesh 600 – 200 $\mu\text{m}$	1.27 mm	0.407 – 0.457 mm
Прецизно резање	80 mesh 300 – 150 $\mu\text{m}$	0.762 – 1.02 mm	0.330 – 0.356 mm
Веома прецизно резање	120 mesh 200 – 100 $\mu\text{m}$	0.508 – 0.762 mm	0.178 – 0.330 mm
Веома висока прецизност резања	200 mesh 50 – 150 $\mu\text{m}$	0.508 – 0.762 mm	0.178 – 0.330 mm

## 2.6. ФАКТОРИ КОЈИ УТИЧУ НА ПРОЦЕС ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

На процес обраде абразивним воденим млазом утичу бројни фактори. Ови фактори се могу сврстати у четири карактеристичне групе:

- фактори машине за обраду абразивним воденим млазом,
- фактори предмета обраде,
- фактори абразивног воденог млаза,
- фактори процеса обраде.

### Фактори машине за обраду абразивним воденим млазом

Фактори машине за обраду абразивним воденим млазом су у ствари радни фактори машине и дефинисани су самим избором машине. У ове факторе спадају:

- тип пумпе високог притиска,
- тип резне главе и
- систем за обезбеђење основних кретања и управљачка јединица.

### Фактори предмета обраде

У ове факторе спадају:

- механичке карактеристике материјала предмета обраде,
- дебљина материјала и
- сложеност, тачност и квалитет обрађене површине.

### Фактори абразивног воденог млаза

Фактори абразивног воденог млаза су:

- квалитет воде и њена чистоћа,
- пречник абразивног воденог млаза,
- структура абразивног воденог млаза (удео воде, абразива и ваздуха) и
- брзина абразивног воденог млаза.

### Фактори процеса обраде

Фактори процеса обраде су фактори на које се најлакше може утицати. У ове факторе спадају:

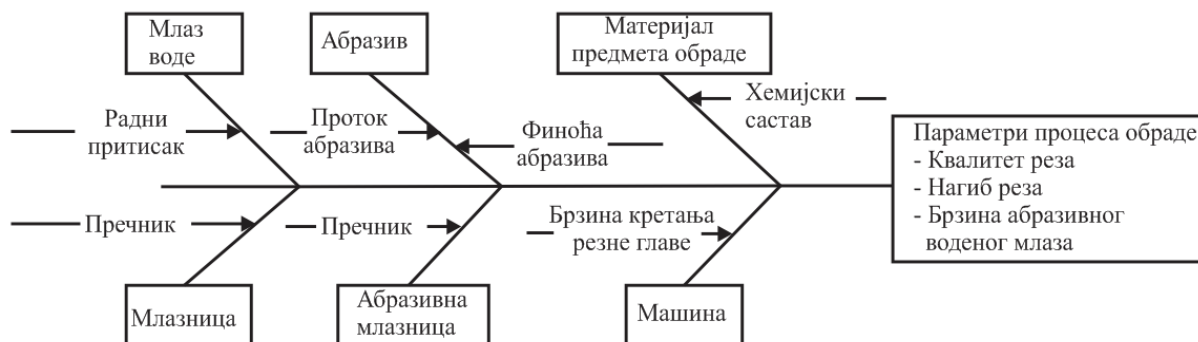
- радни притисак (притисак воде),
- брзина кретања резне главе,
- проток абразива,
- пречник абразивне млазнице и
- растојање резне главе од предмета обраде.

На слици 2.16. су прегледно приказани фактори који утичу на процес обраде абразивним воденим млазом.



Слика 2.16. Фактори процеса обраде абразивним воденим млазом

На слици 2.17. је дат пример *Ishikawa* дијаграма процеса обраде абразивним воденим млазом. Овај дијаграм се још назива и дијаграм узрока и последица, јер на сликовит начин показује како промене појединих улазних параметара процеса утичу на излазне параметре процеса обраде, односно које су последице промене улазних параметара.

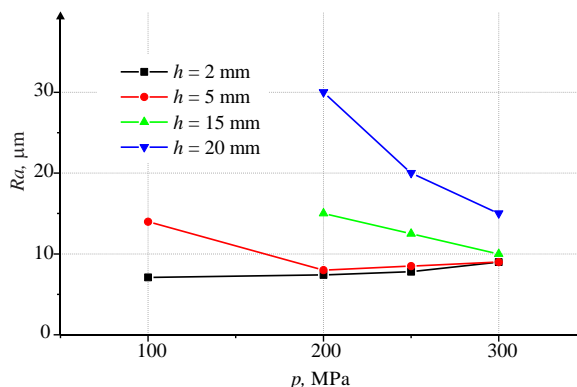


Слика 2.17. *Ishikawa* дијаграм процеса обраде абразивним воденим млазом

## 2.7. УТИЦАЈ ПОЈЕДИНИХ ПАРАМЕТАРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА КВАЛИТЕТ РЕЗА И ОТПОРЕ РЕЗАЊА

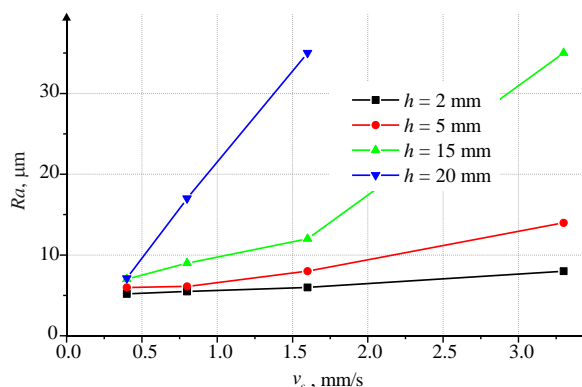
Појам квалитет реза је веома сложен и представља скуп више параметара. Параметри који се најчешће користе за оцену квалитета реза су: храпавост обрађене површине реза – параметар  $R_a$ ,  $\mu\text{m}$ , угао нагиба реза –  $\alpha$ ,  $^\circ$  и ширина реза на месту где абразивни водени млаз улази у предмет обраде –  $W_g$ ,  $\text{mm}$  и ширина реза на месту где абразивни водени млаз излази из предмета обраде –  $W_d$ ,  $\text{mm}$ . Утицај појединих параметара процеса обраде на квалитет реза је приказан на дијаграмима 2.18. до 2.23. Испитивања су вршена за материјал  $\text{AlZnMgCu1.5}$ . Параметри чији је утицај на параметар храпавости обрађене површине  $R_a$  анализиран при овим испитивањима су: радни притисак  $p$ , брзина кретања резне главе  $v_c$  и проток абразива  $m_a$  [31].

Утицај радног притиска на храпавост обрађене површине је приказан на слици 2.18. Са слике се види да са порастом радног притиска долази до смањења храпавости обрађене површине јер са порастом радног притиска долази и до пораста енергије абразивног воденог млаза. Такође се може уочити да са порастом дубине резања долази до израженијег утицаја радног притиска на храпавост обрађене површине.



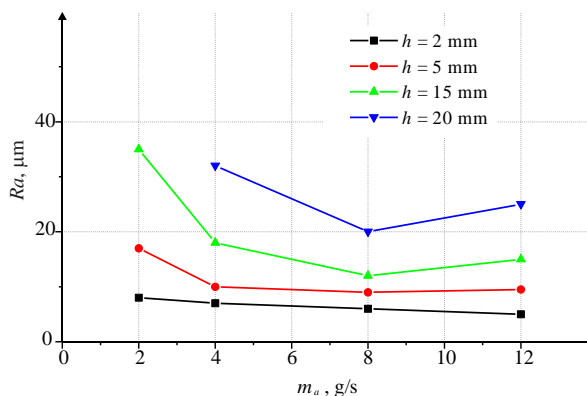
Слика 2.18. Утицај радног притиска на  $R_a$  [31]

Слика 2.19. показује утицај брзине резне главе на храпавост обрађене површине. Очигледно је да са порастом брзине резне главе долази до пораста храпавости обрађене површине. До значајног повећања храпавости обрађене површине долази при већим вредностима брзине резне главе (преко 200 mm/min). При малим брзинама резне главе (око 10 mm/min) храпавост обрађене површине има скоро исту вредност на свим дубинама реза (како на дубини од 2 mm, тако и на дубини од 20 mm).



Слика 2.19. Утицај брзине кретања резне главе на  $Ra$  [31]

Обрада абразивним воденим млазом са малим протоком абразива као последицу има високе вредности храпавости обрађене површине. Обрадом са све већим протоком абразива долази до смањења храпавости обрађене површине, али само до једне одређене границе. Након тога долази до поновног пораста храпавости обрађене површине, слика 2.20.

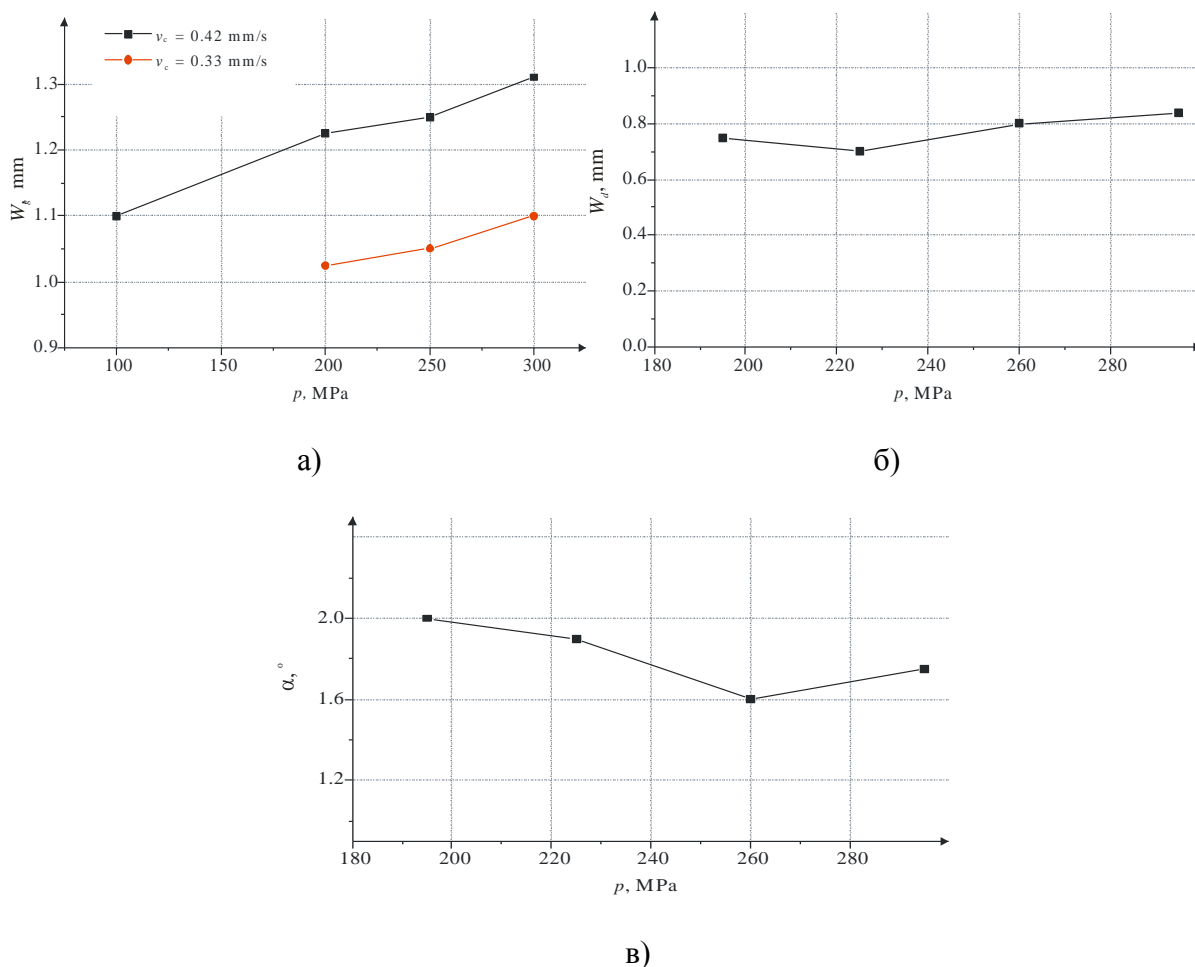


Слика 2.20. Утицај протока абразива на  $Ra$  [14]

Утицај радног притиска, брзине кретања резне главе и протока абразива на геометрију реза: ширину реза на месту где абразивни водени млаз улази у предмет обраде –  $W_g$ , mm и ширина реза на месту где абразивни водени млаз излази из предмета обраде –  $W_d$ , mm, као и на угао нагиба реза –  $\alpha$ , °, је приказан на сликама 2.21., 2.22. и 2.23.

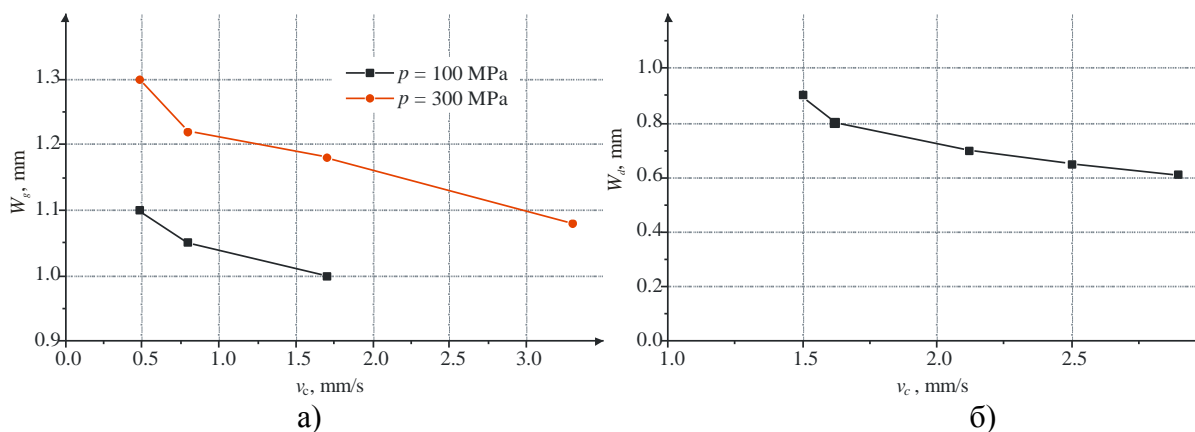
Са дијаграма датих на слици 2.21. се може уочити да раст радног притиска доводи до повећања ширине реза на месту где абразивни водени млаз улази у предмет обраде,  $W_g$ , док на ширину реза где абразивни водени млаз излази из предмета обраде,

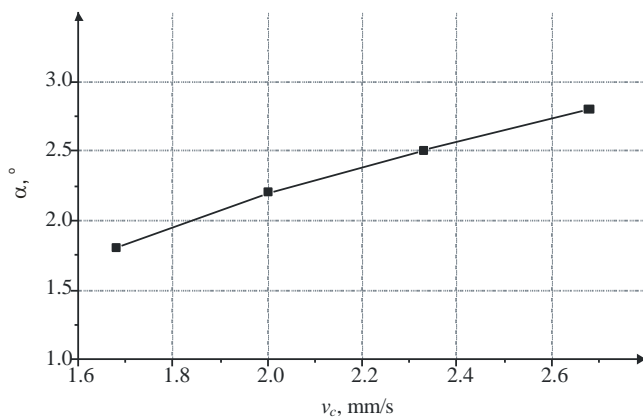
$W_d$ , раст радног притиска нема значајан утицај. Такође, са слике се може закључити да пораст радног притиска доводи до смањења угла нагиба реза.



Слика 2.21. Утицај радног притиска на ширину реза: а)  $W_g$ , б)  $W_d$  и в)  $\alpha$  [22]

Са повећањем брзине кретања резне главе долази до смањења ширине реза  $W_g$  као и  $W_d$ , стим да је смањење ширине  $W_d$  знатно израженије – брже. То за последицу има повећање угла нагиба реза до кога долази са повећањем брзине кретања резне главе, слика 2.22.

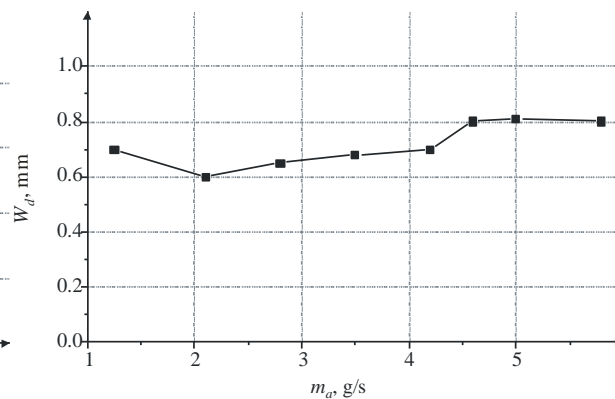
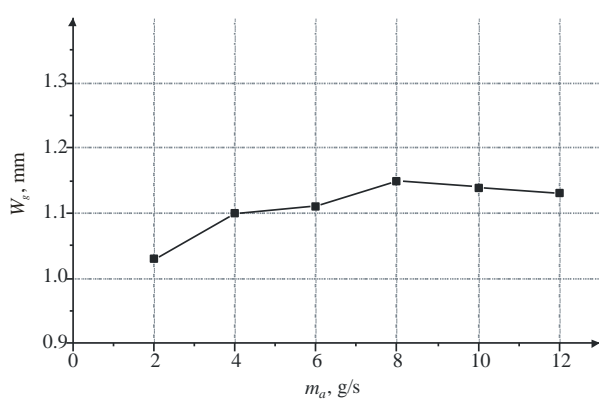




В)

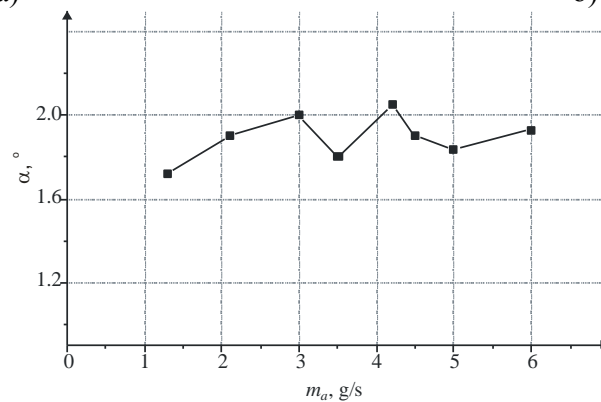
Слика 2.22. Утицај брзине кретања резне главе на ширину реза и угао нагиба реза: а)  $W_g$ , б)  $W_d$  и в)  $\alpha$  [22]

Пораст протока абразива доводи до незнатног пораста ширине реза на местима где абразивни водени млаз улази у предмет обраде и где излази из предмета обраде, док на угао нагиба реза, промена протока абразива нема значајан утицај, слика 2.23.



а)

б)



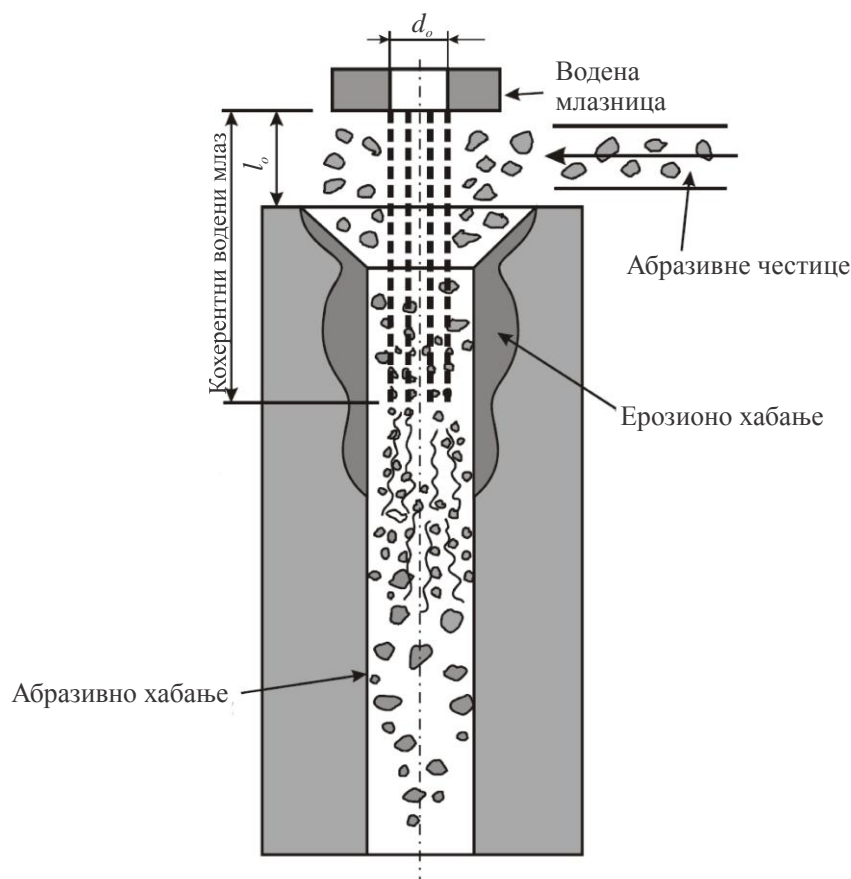
В)

Слика 2.23. Утицај протока абразива на: а)  $W_g$ , б)  $W_d$  и в)  $\alpha$  [22]



## 2.8. ХАБАЊЕ АБРАЗИВНЕ МЛАЗНИЦЕ

Хабање абразивне млазнице је веома комплексан процес. Абразивни водени млаз се креће веома великом брзином, и најчешће се састоји из три фазе: воде, абразива и ваздуха. Такође, постоји више механизма хабања абразивне млазнице. Основни су ерозионо хабање и абразивно хабање. Ерозионо хабање се јавља при већим угловима удара абразивних честица (већим од  $20^\circ$ ), док се код мањих углова јавља абразивно хабање у комбинацији са ерозионим хабањем, слика 2.24 [74].



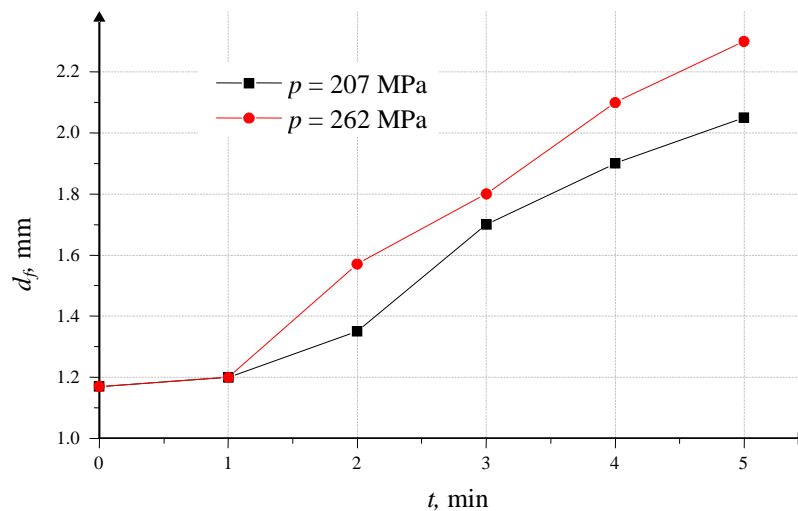
Слика 2.24. Хабање абразивне млазнице [74]

Под појмом хабања абразивне млазнице подразумева се више појава као што су:

- Губитак масе
- Стварање карактеристичних канала дуж унутрашњег отвора
- Промена геометрије излазног отвора
- Повећање излазног пречника.

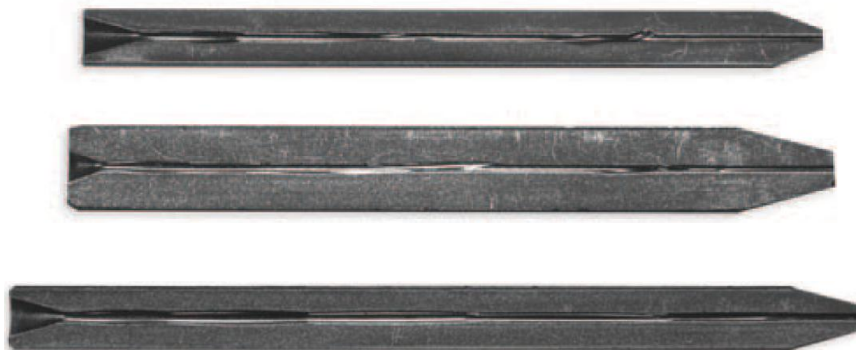
Почетно хабање абразивне млазнице се најлакше идентификује праћењем губитка масе. Млазница се мери пре почетка обраде и у одређеним интервалима током обраде. Губитак масе је последица ерозионог хабања унутрашњег зида абразивне млазнице. Услед ерозионог хабања долази и до појаве стварања карактеристичних канала дуж унутрашњег отвора млазнице. Током времена, долази и до промене геометрије излазног отвора абразивне млазнице, односно до појаве ексцентричности отвора. Ова ексцентричност се дефинише односом најмање и највеће димензије на излазном отвору.

Најчешће се степен похабаности абразивне млазнице одређује праћењем промене излазног пречника. На повећање излазног пречника абразивне млазнице утичу различити параметри процеса обраде, као што су радни притисак, величина абразивних зрна, дужина абразивне млазнице и тд. На слици 2.25. је приказана промена пречника излазног отвора абразивне млазнице током рада, као и утицај радног притиска на интензитет те промене. Са повећањем радног притиска, расте и интензитет хабања абразивне млазнице.



Слика 2.25. Утицај радног притиска на хабање абразивне млазнице [70]

На слици 2.26. је приказан карактеристичан изглед уздужног пресека похабаних абразивних млазница. Код прве две абразивне млазнице се уочава неправилно хабање по дужини млазнице, што се дешава у случају када водена млазница и абразивна млазница нису добро центриране. Тада долази до значајнијег хабања на улазном делу јер честице абразива ударају директно у зид абразивне млазнице. То доводи до бржег хабања млазнице и лошијег квалитета обрађене површине. На трећој абразивној млазници је приказано хабање абразивне млазнице када су водена и абразивна млазница добро центриране.



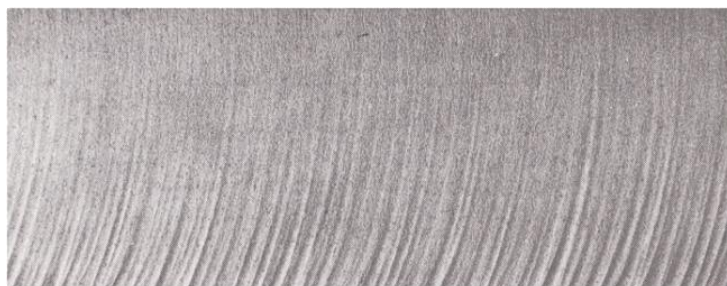
Слика 2.26. Уздужни пресек похабаних абразивних млазница [51]

Карактеристични облици хабања абразивне млазнице у уздужном пресеку могу бити класификовани у четири основне групе: дивергентно хабање, конвергентно хабање, валовито хабање и појава избочина (*bulging*). Дивергентно хабање је карактеристично по томе што, након дужег рада, унутрашњи отвор абразивне млазнице поприма облик млаза који се шири. Овај облик хабања се јавља када су абразивне честице знатно веће тврдоће од материјала абразивне млазнице, на пример када се као абразивни материјал користи гарнет, а абразивна млазница је од волфрам-карбида. Други пример је када се користи силикон-карбид као абразивни материјал, а абразивна млазница је од керамичких материјала или Rostec R-100. Код појаве конвергентног хабања, интензитет хабања абразивне млазнице је већи на улазу у млазницу, него на излазу. Овакво хабање се јавља код абразивних млазница које су узрађене од материјала који имају велику тврдоћу, а малу жилавост. Отпорност на ерозионо хабање оваквих материјала је веома мала. Таласи у уздужном пресеку абразивне млазнице (валовито хабање) се најчешће јављају када абразивни водени млаз има угаоно одступање и ексцентричан је у односу на унутрашњи отвор абразивне млазнице. У оваквим случајевима долази до интензивнијег ударања абразивних честица у зид абразивне млазнице и њиховог одбијања од зида. Овакво кретање абразивних честица проузрокује стварање таласа на уздужном пресеку абразивне млазнице. Иако ови таласи делују као неправилни, попречни пресек унутрашњег отвора абразивне млазнице веома мало одступа од кружнице. Појава избочина (булгинг) се најчешће јавља на абразивним млазницама које се користе у системима са директним убризгавањем абразивног воденог млаза. Код оваквих система, абразивне честице имају само аксијалну компоненту брзине. Разни поремећаји или дисконтинуитет (најчешће појава микропукотина) у материјалу абразивне млазнице могу да изазову вртлоге који доводе до оваквог хабања.

### 3. МЕХАНИЗАМ ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

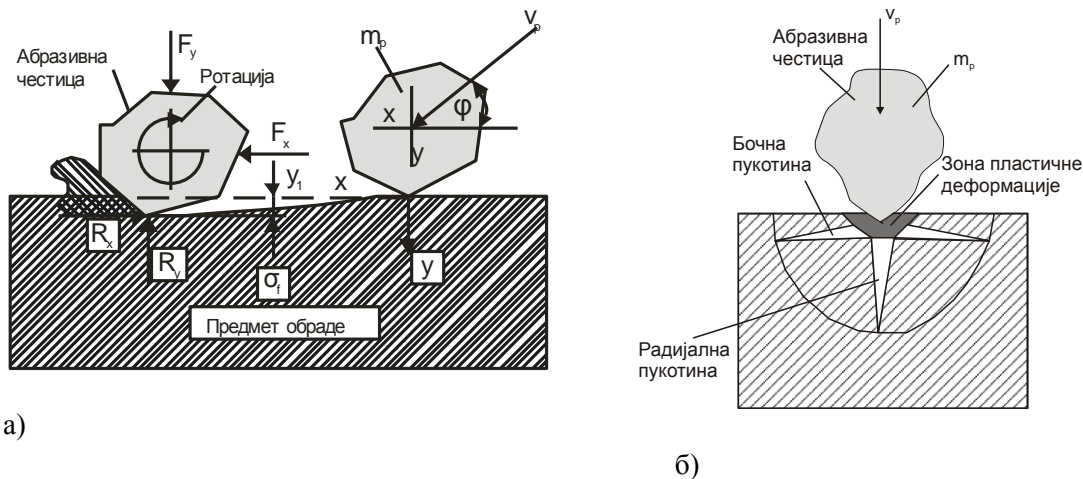
Принцип на којем се поступак обраде абразивним воденим млазом заснива је ерозија. Млаз воде са абразивним честицама велике брзине удара у предмет обраде и еродира га. Неки аутори процес ерозије објашњавају као врсту абразивног хабања, код ког се стално понављају удари абразивних честица и воденог млаза у неку површину, што резултира спирањем материјала са те површине, [70] и [4]. Количина материјала који се на тај начин однесе са неке површине је показатељ продуктивности система за обраду абразивним воденим млазом.

Површина обрађена абразивним воденим млазом има карактеристичан изглед и приказана је на слици 3.1. На обрађеној површини се уочавају карактеристичне закривљене линије. Ове закривљене линије у ствари осликавају кретање абразивног воденог млаза кроз материјал предмета обраде. Топографија обрађене површине и ове закривљене линије су најзначајније макроскопске карактеристике површине обрађене абразивним воденим млазом. На основу анализе ове две карактеристике може се доћи до значајних података о самом процесу обраде.



Слика 3.1. Изглед површине обрађене абразивним воденим млазом [32]

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 3.2.



Слика 3.2. Основни процеси који се јављају при ерозији материјала: а) микро-резање код пластичних материјала и б) лом материјала код крћих материјала [70]

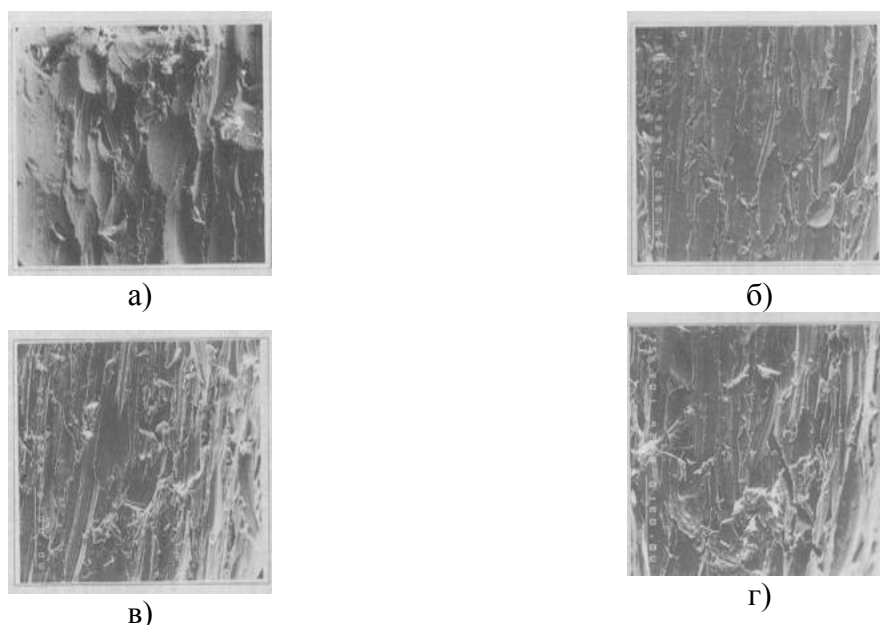
Као што се на слици види, микро-резање, слика 3.2.а), подразумева образовање бразди које су последица пластичне деформације материјала. Лом материјала, који се јавља при обради крћих материјала, је карактеристичан по томе што се у зони контакта материјала и абразивне честице јављају пластичне деформације са подповршинским бочним пукотинама и радијалним пукотинама које су управне на површину материјала, слика 3.2.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 крћих материјала основни механизам ерозије је појава микропукотина.

### 3.1. МЕХАНИЗАМ ЕРОЗИЈЕ ПРИ ОБРАДИ ПЛАСТИЧНИХ МАТЕРИЈАЛА АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

При продирању у материјал предмета обраде абразивни водени млаз губи енергију (брзина абразивних честица се смањује) и долази до његовог одбијања од обрађиване површине и скретања са почетне путање млаза. Овакве промене доводе и до промена унутар самог процеса ерозије обрађиваног материјала.

Ковачевић [55] је посматрао обрађену површину челика и уочио пластичне деформације у облику бразди и огреботина које су последица процеса микро-резања. Такође је приметио и рупе које су настале пластичним деформисањем материјала након удара абразивне честице. Димензије ових трагова зависе од димензија абразивних честица, али нису међусобно једнаке. Бразде су на горњој зони површине реза вертикалне, док се у доњој зони оне појављују под неким углом. Такође се може уочити да се са повећањем дубине реза дужина бразди смањује.



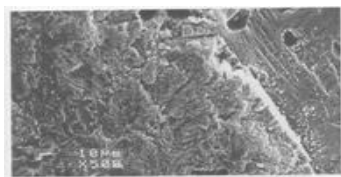
Слика 3.3. SEM фотографије површине реза на различитим дубинама  $h$  : а)  $h = 0 \text{ mm}$ , б)  $h = 5 \text{ mm}$ , в)  $h = 15 \text{ mm}$ , г)  $h = 25 \text{ mm}$  [55]

На слици 3.3. су приказане SEM фотографије површине реза. На самом врху обрађене површине (улаз абразивног воденог млаза), слика 3.3.а), на дубини 300÷400  $\mu\text{m}$ , бразде су сјајне, кратке и дубоке. На крајевима бразди се јавља нагомилан материјал као што је шематски приказано на слици 3.2.а). На слици 3.3.б) бразде су дуге и плиће, и показују униформну орјентацију у правцу продирања абразивног воденог млаза кроз материјал предмета обраде. При даљем продирању абразивног воденог млаза у материјал, слике 3.3.в) и 3.3.г), основни механизам обраде се не мења, али орјентација бразди постаје неправилна. И поред тога, микро–резање је и даље доминантан механизам обраде.

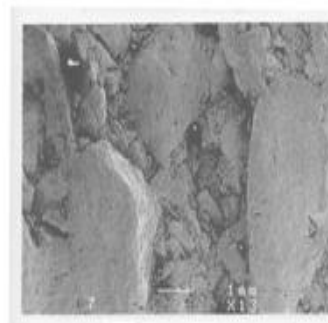
### 3.2. МЕХАНИЗАМ ЕРОЗИЈЕ ПРИ ОБРАДИ КРТИХ МАТЕРИЈАЛА АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

Код кртих материјала основни механизам обраде је лом материјала, који настаје као последица удара абразивне честице у материјал предмета обраде.

Momber [70] је проучавао механизам ерозије при обради керамичких материјала абразивним воденим млазом. На слици 3.4. су приказане SEM фотографије обрађене површине магнезијум хромида.



а – горња зона



б – доња зона

Слика 3.4. SEM фотографије површине реза узорка магнезијум хромида [70]

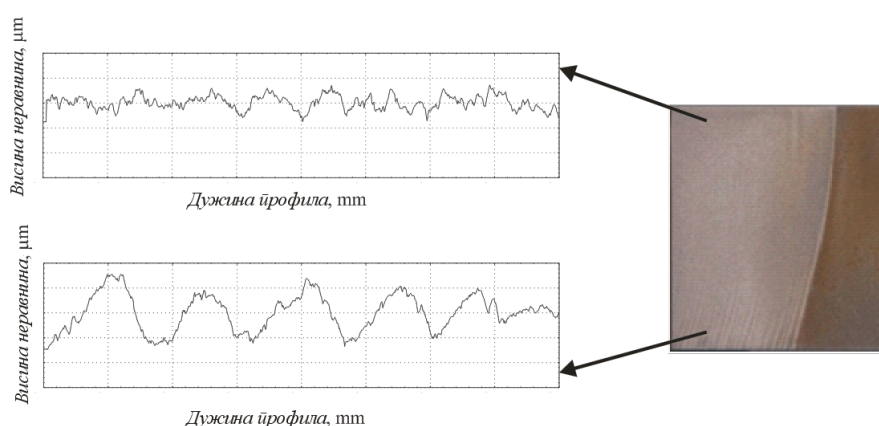
На слици 3.4.а) је SEM фотографија горње зоне површине реза магнезијум хромида, обрађене абразивним воденим млазом. Горња десна област представља fino обрађену површину, док се на левој страни фотографије уочавају грануле кубне форме магнезијум оксида. Као последица удара абразивних честица, великом брзином, дошло је до лома ових гранула кубне форме магнезијум оксида. У овој зони је очигледно основни механизам обраде лом материјала. За овакаве материјале, у горњој зони је специфична појава тзв. транс–грануларног лома.

Ситуација је знатно другачија на слици 3.4.б) која приказује доњу зону исте обрађене површине. На слици се уочава да су грануле кубне форме магнезијум оксида потпуно нетакнуте, али је материјал између њих уклоњен. Ова појава се објашњава губитком енергије абразивног воденог млаза са порастом дубине резања. За овакве материјале, у доњој зони је специфична појава тзв. интер–грануларног лома.

### 3.3. ТОПОГРАФИЈА ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ

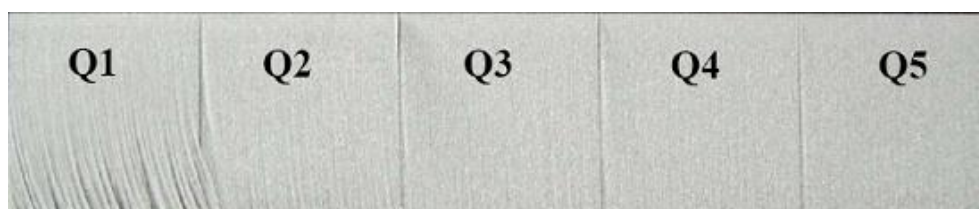
При обради абразивним воденим млазом долази до повећања храпавости обрађене површине са дубином резања. Највећи број аутора површину обрађену абразивним воденим млазом дели на две области, зону fine обраде или горњу зону и зону грубе обраде или доњу зону. Неправилности које се јављају у горњој зони обрађене површине се сматрају микроскопским неправилностима и спадају у домен храпавости. Неправилности које се јављају у доњој зони су макроскопских димензија. То су углавном појава бразди и рупа различитих величина. Ове неправилности спадају у домен валовитости код класичне машинске обраде.

На слици 3.5. је приказана храпавост обрађене површине на различитим дубинама резања. Материјал предмета обраде је челик X5CrNi 18–10.



Слика 3.5. Храјавосћ обрађене површине на различитим дубинама резања

Што се тиче квалитета обрађене површине, најчешћа подела је у пет карактеристичних група, слика 3.6. 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.

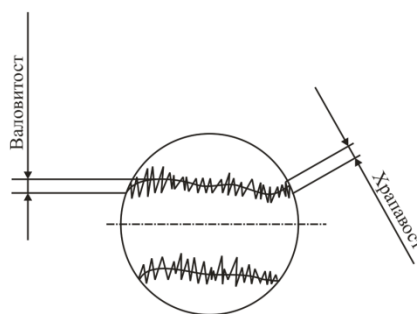


Слика 3.6. Пет карактеристичних квалитета обрађене површине [56]

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.

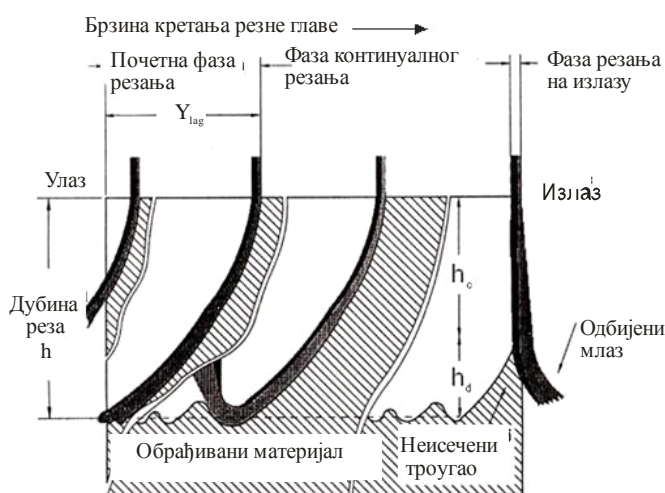
Валовитост обрађене површине је такође значајна појава при обради абразивним воденим млазом, слика 3.7. Утврђено је да постоји примарна и секундарна валовитост [70]. Вредности примарне валовитости у зони fine обраде се крећу од  $1 \div 1.5$  величине средњег пречника абразивног зрна, док су вредности секундарне валовитости  $0.33 \div 0.5$  величине средњег пречника абразивног зрна [70].





Слика 3.7. Валовитости и храпавости обрађене површине

Hashish [37] је први систематски истражио макроскопске појаве при обради абразивним воденим млазом, слика 3.8.



Слика 3.8. Структура процеса обраде абразивним воденим млазом [37]

На основу брзих фотографија у транспарентним материјалима (плексиглас, лексан), он је процес обраде абразивним воденим млазом представио сликом 3.8. на слици се издвајају три карактеристичне области–фазе у процесу резања: почетна фаза резања, фаза континуалног резања и фаза резања на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде. Прва фаза – почетна фаза резања се јавља у случајевима када је дубина реза мања од максималне могуће дубине резања, односно када је дебљина предмета обраде мања од максималне дубине резања. Када се достигне максимална дубина резања, односно, када је дебљина предмета обраде већа од максималне дубине резања, почиње фаза континуалног резања. Ова фаза је представљена као фаза цикличног уклањања материјала. Када дође до фазе резања на излазу, абразивни водени млаз се одбија од обрађиване површине и скреће на супротну страну, што доводи до појаве неисеченог троугла, који је карактеристичан за непотпуно расецања материјала.

## 4. МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

### 4.1. ПРЕГЛЕД МАТЕМАТИЧКИХ МОДЕЛА

Са све већом употребом обраде абразивним воденим млазом, јавља се потреба за квантитативним описом овог процеса обраде, па су због тога су потребни математички модели за опис параметара који су везани за обраду абразивним воденим млазом. У последњих 30 година су извршена многа истраживања да би се дошло до модела који најверније описује сам процес резања абразивним воденим млазом. Највећи број истраживања је био усмерен ка одређивању модела за процену максималне дубине резања за различите материјале, под одређеним условима. Модели су развијани емпиријским или полуемпиријским методама и коришћењем различитих теорија. Најчешће се сврставају у следеће основне групе:

- Модели засновани на количини еродираног материјала у процесу обраде
- Модели засновани на закону очувања енергије
- Регресиони модели
- Кинетички модели и
- Нумеричке симулације процеса обраде абразивним воденим млазом

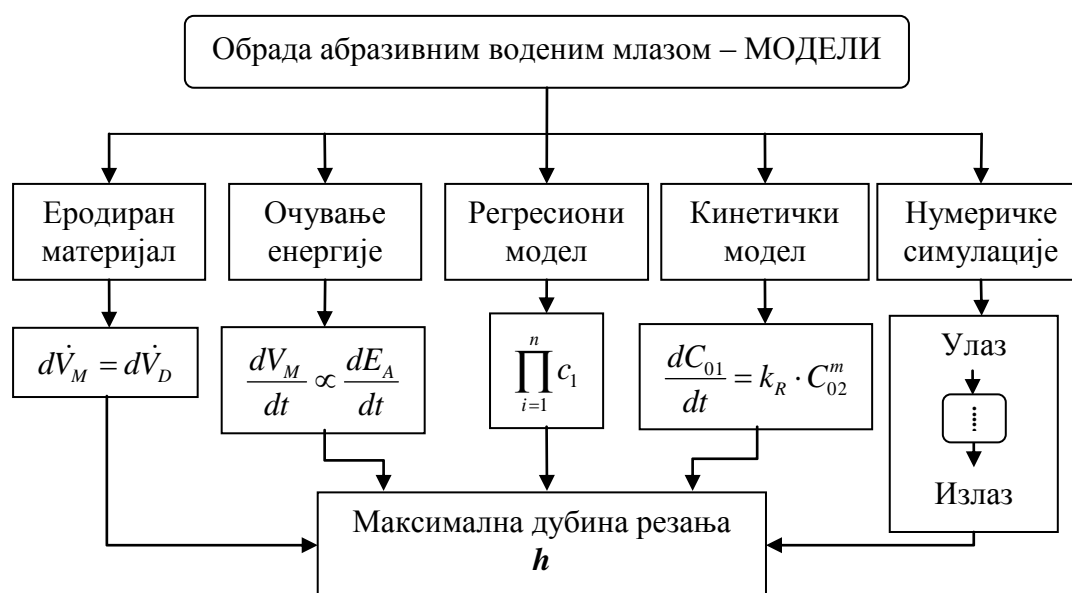
У овом поглављу су описани модели који су најзначајнији за боље разумевање процеса обраде абразивним воденим млазом, као и модели који се најчешће користе за одређивање максималне дубине резања абразивним воденим млазом. Уз сваки описани модел, дате су полазне основе, претпоставке и коначан облик модела. Модели су представљени формулама које се могу користити за коначне прорачуне. На слици 4.1. је графички приказан преглед модела који су описани у овом поглављу.

Код модела заснованих на количини еродираног материјала у процесу обраде абразивним воденим млазом, основна претпоставка је да су запремине еродираног модела добијене на основу математичких модела, у којима фигурирају физичке карактеристике абразивног воденог млаза, и геометријском анализом једнаке. Ова претпоставка је применљива код стабилних процеса резања. Претпоставка да је енергија абразивног воденог млаза пропорционална еродираном материјалу је основа за све моделе засноване на закону очувања енергије.

Сви регресиони модели изложени у овом поглављу се баве дефинисањем релација између улазних параметара процеса обраде абразивним воденим млазом и одређених излазних параметара. Овакви модели су добијени на основу потребног броја експеримената. Кинетички модели су засновани на претпоставци да је количина еродираног материјала пропорционална брзини реакције предмета обраде на деловање абразивног воденог млаза. То значи да што брже долази до еродирања честица

материјала предмета обраде под дејством абразивног воденог млаза, максимална дубина продирања абразивног воденог млаза је већа.

Код нумеричких модела су, у највећем броју случајева, абразивни водени млаз и/или материјал предмета обраде представљени методом коначних елемената, или неким сличним методама. Суштина је да се предмет обраде и абразивни водени млаз представе елементима мале запремине, при чему се свакој запремини могу доделити одређене карактеристике и законитости промене тих карактеристика.



Слика 4.1. Прејлед модела за обраду абразивним воденим млазом [70]

## 4.2. МОДЕЛИ ЗАСНОВАНИ НА КОЛИЧИНИ ЕРОДИРАНОГ МАТЕРИЈАЛА

Постоји доста теорија које објашњавају принцип и карактеристике процеса обраде абразивним воденим млазом. Највећи број теорија полази од претпоставке да се обрада абразивним воденим млазом заснива на ерозионом хабању. *Finnie* [28] је први једначинама описао модел резања материјала при удару једне абразивне честице у материјал. Модел претпоставља да чврста честица, масе  $m$ , која се креће брзином  $v$ , удара у равну површину под углом  $\alpha_1$ . Материјал у који честица удара је пластичан. Према овом моделу запремина материјала који еродира једна абразивна честица је:

$$W = \frac{m \cdot v^2}{\Psi \cdot p_1 \cdot k} \cdot \left[ \sin(2\alpha_1) - (6/k) \sin^2(\alpha_1) \right], \quad \text{tg } \alpha_1 \leq k/6 \quad (4.1.)$$

и

$$W = \frac{m \cdot v^2}{\Psi \cdot p_1 \cdot k} \cdot \left[ k \cdot \cos^2(\alpha_1) \right] / 6, \quad \text{tg } \alpha_1 > k/6 \quad (4.2.)$$

У формули је:

- $\alpha_1$  – нападни угао
- $k$  – однос вертикалне и хоризонталне компоненете силе
- $\psi$  – однос дужине контакта честице и материјала и дужине резања
- $v$  – брзина абразивне честице
- $p_1$  – напон течења обрађиваног материјала
- $W$  – запремина материјала еродираног једном абразивном честицом.

Укупна запремина материјала који се еродира при обради млазом абразивних честица се добија када се претходни изрази помноже са бројем абразивних честица, тако да се уместо масе једне абразивне честице  $m$ , у изразу јавља  $M$  као укупна маса абразивних честица које врше обраду.

$$W = \frac{c \cdot M \cdot v^2}{\Psi \cdot p_1 \cdot k} \cdot [\sin(2\alpha_1) - (6/k)\sin^2(\alpha_1)], \quad \text{tg } \alpha_1 \leq k/6 \quad (4.3.)$$

$$W = \frac{c \cdot M \cdot v^2}{\Psi \cdot p_1 \cdot k} \cdot [k \cdot \cos^2(\alpha_1)]/6, \quad \text{tg } \alpha_1 > k/6 \quad (4.4.)$$

У формулама 4.3. и 4.4. фигурише и константа  $c$ , која узима у обзир и абразивне честице које ударају једна у другу и ломе се приликом обраде, односно честице које не врше обраду.

Иако је овај *Finnie-в* модел доста упрошћен приказ обраде (не узима у обзир еластичност материјала), он се и даље третира као основа за изучавање обраде абразивним честицама, па тако и за обраду абразивним воденим млазом.

Значајан модел за објашњење процеса обраде абразивним честицама дао је и *Bitter*. Његов модел претпоставља да је количина материјала који се еродира абразивним честицама једнака збиру материјала који се еродира при пластичној деформацији  $W_D$  (приликом удара абразивне честице прелази се граница еластичности, разара се површински слој материјала и делови тог слоја се односе из зоне обраде) и материјала који се еродира резањем  $W_C$  (абразивне честице ударају у површину материјала и односе делиће из зоне обраде) [12, 13]. *Bitter* је претпоставио да се ерозија услед деформације материјала и ерозија услед резања јављају истовремено и да се њихови ефекти могу сабирати. Он је такође тврдио да се брзина абразивних честица  $v$  може разложити у два правца, правац нормалан на површину материјала који се обрађује и правац тангентан на површину. Нормална компонента брзине утиче на продирање абразивне честице у материјал, док тангенцијална компонента утиче на резање абразивне честице по површини материјала. Како је већ речено, укупна количина еродираног материјала је збир  $W_D$  и  $W_C$ , који се могу представити следећим једначинама:

$$W_D = \frac{M \cdot (v \cdot \sin \alpha_1 - v_{el})^2}{2 \cdot \varepsilon_b}, \quad v \cdot \sin \alpha_1 > v_{el} \quad (4.5.)$$

и

$$W_D = 0, \quad v \cdot \sin \alpha_1 < v_{el} \quad (4.6.)$$

$$W_C = 2 \cdot M \cdot C \cdot \frac{(v \cdot \sin \alpha_1 - v_{el})^2}{\sqrt{v \cdot \sin \alpha_1}} \cdot \left[ v \cdot \cos \alpha_1 - C \cdot \frac{(v \cdot \sin \alpha_1 - v_{el})^2}{\sqrt{v \cdot \sin \alpha_1}} \cdot \varphi_c \right], \quad \alpha_1 \leq \alpha_0 \quad (4.7.)$$

$$W_C = M \cdot \frac{\left[ v^2 \cdot \cos^2 \alpha_1 - K_1 \cdot (v \cdot \sin \alpha_1 - v_{el})^{3/2} \right]}{2 \cdot \varphi_c}, \quad \alpha_1 \geq \alpha_0 \quad (4.8.)$$

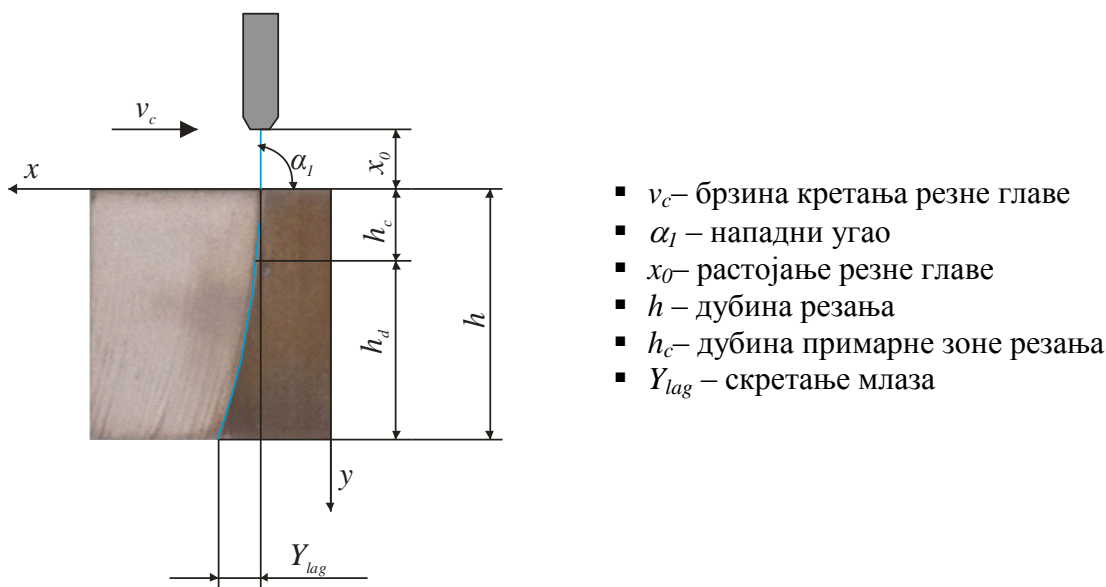
Где је:

- $\alpha_1$  – нападни угао
- $\varepsilon_b$  – фактор деформационог хабања (добива се експериментално)
- $v_{el}$  – гранична вредност брзине абразивних честица при којој настаје пластична деформација материјала који се обрађује
- $M$  – укупна маса абразивних честица
- $W_D$  – запремина еродираниог материјала при пластичној деформацији
- $W_C$  – запремина еродираниог материјала резањем
- $\varphi_c$  – фактор хабања за материјал који се обрађује (добива се експериментално).

Константе  $C$  и  $K_1$  се добијају помоћу једначина у којима се узимају у обзир модули еластичности материјала који се обрађује и абразивног материјала, као и граница еластичности материјала који се обрађује и густина абразивних честица.

*Bitter* је био први који је у разматрање узео и чињеницу да материјали углавном немају чисто пластичне или еластичне особине, већ су еласто–пластични. Такође, у *Bitter*–овом моделу и даље фигуришу коефицијенти који се добијају експериментално и важе само за одређени материјал.

Због бољег разумевања модела који ће бити разматрани на слици 4.2. је дата скица обраде абразивним воденим млазом са основним појмовима.



Слика 4.2. Скица обраде абразивним воденим млазом

#### 4.2.1. Модели за одређивање максималне дубине резања

Предмет обраде се налази испод резне главе на одређеном растојању  $x_0$ . Резна глава се креће брзином  $v_c$ . Абразивни водени млаз удара у обрађивану површину, и као последица ерозије ускоро се на површини јавља рез и формира се обрађена површина као на слици 4.2. Квалитет обрађене површине зависи од параметара процеса обраде абразивним воденим млазом и карактеристика материјала предмета обраде.

Модел за процену максималне дубине резања је први развио *Hashish* [34]. То је математички модел и важи за еластичне материјале. Заснива се на теорији да се максимална дубина резања код оваквих материјала састоји од два дела. Први део је настао као последица резања ( $h_c$ ) материјала предмета обраде абразивним честицама, а други део је настао као последица деформације материјала ( $h_d$ ) услед удара абразивних честица у њега. Ова два дела не настају одвојено, већ се ови процеси дешавају истовремено током обраде.

$$h_c = \frac{cm_a v^2 \alpha_1}{4\sigma_f d_j v_c} \quad (4.9.)$$

$$h_d = \frac{2(1-c)m_a v^2}{\pi d_j \varepsilon_c v_c} \quad (4.10.)$$

У формулама 4.9. и 4.10.  $c$  је константа,  $m_a$  проток абразива,  $v$  брзина абразивних честица,  $\alpha_1$  нападни угао,  $\sigma_f$  граница течења,  $d_j$  пречник абразивног млаза,  $v_c$  брзина кретања резне главе и  $\varepsilon_c$  енергија потребна да се уклони јединична запремина материјала при деформисању истог. Укупна дубина резања се може изразити као збир  $h_d$  и  $h_c$ .

Касније је *Hashish* [35] унапредио овај модел тако што је узео у обзир и друге параметре процеса. У формулама 4.11. и 4.12. је приказан редефинисан модел.

$$h_c = \frac{\frac{v_0}{C_k} d_j}{\left(\frac{\pi \rho_p v_c d_j^2}{14m_a}\right)^{2/5} + \left(\frac{v_e}{C_k}\right)} \quad (4.11.)$$

и

$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi d_j \sigma_f v_c}{2C_1 m_a (v_0 - v_e)^2} + \frac{C_f}{d_j} \cdot \frac{v_0}{(v_0 - v_e)}} \quad (4.12.)$$

У формулама је  $v_0$  почетна брзина абразивних честица на површини предмета обраде,  $\rho_p$  густина абразивних честица,  $v_e$  гранична брзина при којој долази до скидања материјала,  $\sigma_f$  граница течења,  $C_f$  коефицијент трења на обрађеној површини,  $C_1$  константа, а  $C_k$  је дефинисано формулом 4.13.

$$C_k = \sqrt{\frac{3\sigma_f R_f^{3/5}}{\rho_p}} \quad (4.13.)$$

При прорачуну коефицијента  $C_k$ ,  $R_f$  је фактор кружности абразивних честица (однос средње вредности максималне мере абразивне честице са пречником уписаног круга у абразивну честицу). Овакав унапређени модел је у бољој корелацији са експерименталним резултатима од претходног, али је још увек потребно његово унапређење. При даљим истраживањима треба узети у обзир величину и облик абразивних честица, расподелу брзина абразивних честица у млазу, узети у обзир геометрију реза и слично.

Zeng [101, 103] је развио модел за крпе материјале, након проучавања обраде керамичких материјала абразивним воденим млазом. Његов модел се заснива на познавању количине материјала који се одстрије ерозијом дејством појединачне абразивне честице. Овај модел је представљен формулом 4.14.

$$h = \left( \frac{\eta C_v C_y}{1+t_r} \right)^2 \cdot \frac{C m_a p}{\rho_w d_f v_c} \cdot \left( \frac{2 f_w \beta d \sigma_f \alpha_1^2}{3 \gamma E} + \frac{\alpha}{\sigma_f} \right) \quad (4.14.)$$

У формули 4.14 је  $\eta$  степен искоришћења импулса,  $C_v$  је коефицијент ефикасности млазнице,  $C_y$  је коефицијент компресије,  $t_r$  је однос протока абразива и протока воде,  $C$  је коефицијент ефикасности удара абразивне честице,  $p$  је притисак воде,  $\rho_w$  је густина воде,  $d_f$  пречник абразивне млазнице,  $f_w$  однос напона и енергије,  $\beta$  је функција Poisson–овог коефицијента за материјал предмета обраде,  $d$  је средња вредност димензија абразивних честица,  $\sigma_f$  је граница течења,  $\gamma$  енергија потребна за лом елементарне честице материјала и  $E$  је модул еластичности материјала предмета обраде.

Овај модел је превише сложен, а потребно је одредити и енергију коју пренесе једна абразивна честица на материјал предмета обраде, да би се предвидела максимална дубина резања. Када се у овом моделу замене све просечне вредности за коефицијенте и вредности константи, овај модел добија доста једноставнији облик:

$$h = \frac{m_a \cdot m_w^2 \cdot p}{2.67 \cdot (m_a + m_w)^2 \cdot d_f \cdot v_c \cdot R_E} \quad (4.15.)$$

У овој једначини је  $R_E$  „отпорност на ерозију“.

Ерозија кртих материјала се углавном заснива на механици кртог лома. Процес ерозије кртих материјала почиње са стварањем иницијалних пукотина и наставља се њиховим проширивањем и продубљавањем. El-Domiarty и Abdel-Rahman [26] су дефинисали два модела за одређивање максималне дубине резања у зависности од жилавости материјала предмета обраде.

$$h = C_1 g_1 (\alpha_e) \frac{1}{v_c d_j} \left( m_a v^{19/6} r^{2/3} \rho_p^{7/12} K c^{-4/3} H_m^{-1/4} \right) \quad (4.16.)$$

и

$$h = C_2 \cdot g_2(\alpha_e) \cdot \frac{1}{v_c \cdot d_j} \cdot (m_a \cdot v^{22/9} \cdot r^{2/3} \cdot \rho_p^{2/9} \cdot K_c^{-4/3} \cdot H_m^{1/9}) \quad (4.17.)$$

У формулама 4.16. и 4.17.  $C_1$  и  $C_2$  су константе,  $r$  је радијус абразивне честице,  $\rho_p$  густина абразивних честица,  $K_c$  жилавост материјала предмета обраде,  $H_m$  тврдоћа материјала предмета обраде,  $g_1(\alpha_e)$  и  $g_2(\alpha_e)$  функције од  $\alpha_e$ , где је  $\alpha_e$  угао скретања млаза на изласку из материјала предмета обраде.

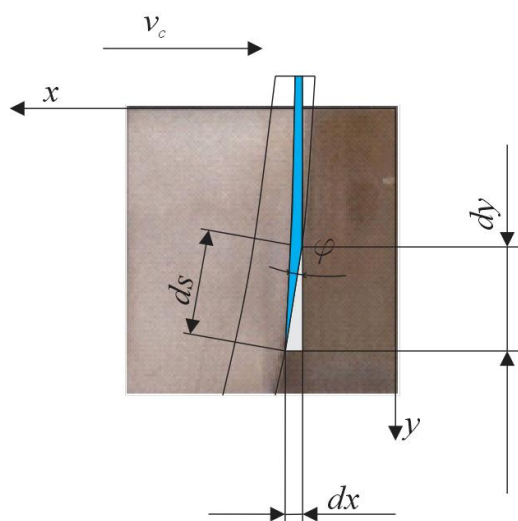
Ова два модела су доста једноставна. Ипак експериментима је утврђено да важе само за вредности притиска воде око 200 МПа. За вредности веће и мање од 200 МПа вредности добијене овим моделима знатно одступају од експерименталних вредности.

*Raju* и *Ramulu* [90, 91] су укупну дубину резања такође поделили на два дела  $h_c$  и  $h_d$ . Као полаз за свој модел су користили модел који је развио *Hashish* [35], а који је представљен формулама 4.11. и 4.12. Угао нагиба абразивног воденог млаза су описали његовим тригонометријским функцијама, а на основу слике 4.3.:

$$\sin\varphi = \frac{dx}{ds} \quad (4.18.)$$

и

$$\cos\varphi = \frac{dy}{ds} = \sqrt{1 - \left(\frac{dx}{ds}\right)^2} \quad (4.19.)$$



Слика 4.3. Процес резања абразивним воденим млазом

*Wang* [97] је максималну дубину резања код Al–керамичких материјала представио следећом формулом:

$$h_c = \frac{C \cdot m_a}{\rho_p \cdot d_j \cdot v_c} \cdot \left(\frac{p}{\sigma_f}\right)^q \cdot \left(\frac{H_d}{E}\right)^s \cdot \left(\frac{x}{d_p}\right)^r \cdot \left(\frac{x \cdot m_a}{d_p^3 \cdot \rho_p \cdot v_c}\right)^y \cdot \left(\frac{\rho_p \cdot v_c^2}{p}\right)^z \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_w}\right)^c \quad (4.20.)$$



где је  $C$  константа,  $m_a$  проток абразива,  $\sigma_f$  напон течења,  $p$  радни притисак,  $\rho_p$  густина абразивног материјала,  $d_j$  пречник абразивног воденог млаза,  $H_d$  динамичка тврдоћа материјала,  $E$  модул еластичности.

*Wang* и *Liu* [98] су утврдили да максимална дубина резања зависи од радијуса закривљења предње линије реза. Што је радијус већи и максимална дубина резања је већа. На основу ове тврдње, у претходни модел су увели и фактор пропорционалности  $K$ , који дефинише однос радијуса предње линије реза и максималне дубине резања. На основу овога, добијен је унапређен модел који гласи:

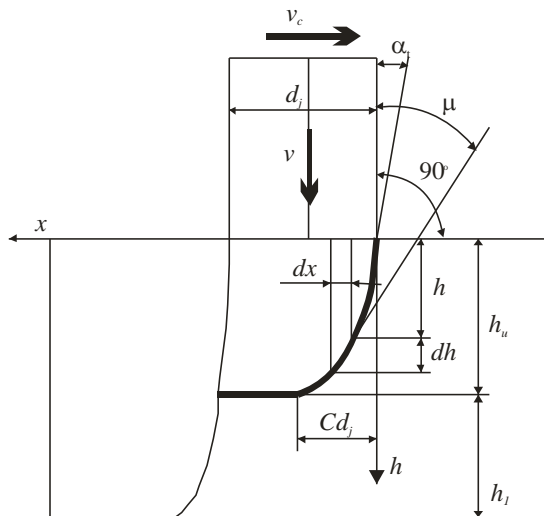
$$h_c = K \cdot \frac{C \cdot m_a}{\rho_p \cdot d_j \cdot v_c} \cdot \left( \frac{P}{\sigma_f} \right)^q \cdot \left( \frac{H_d}{E} \right)^s \cdot \left( \frac{x}{d_p} \right)^r \cdot \left( \frac{x \cdot m_a}{d_p^3 \cdot \rho_p \cdot v_c} \right)^y \cdot \left( \frac{\rho_p \cdot v_c^2}{P} \right)^z \cdot \left( \frac{\rho_p}{\rho_w} \right)^c \quad (4.21.)$$

Оба претходна модела су добијена димензионом анализом. Експериментима је потврђено да овај модел даје веома прецизно предвиђање максималне дубине. Максимална грешка модела, према тврдњи аутора, је 1%.

*Paul*, *Hoogstrate*, *Van Luttervelt* и *Kals* [81] су вршили испитивања на поликристалној керамици ( $Al_2O_3$ ) у циљу одређивања максималне дубине резања. Основне претпоставке су да нема лома абразивних зрна пре контакта са материјалом који се обрађује, енергија абразивног воденог млаза униформно распоређена по попречном пресеку млаза и да се брзина абразивних зрна не мења при контакту са зидовима реза.

На основу ових претпоставки, слике 4.4. и *Finnie*-вог модела развијен је модел за процену максималне дубине резања који је дефинисан следећом формулом:

$$h = \left( \frac{14 \cdot \alpha_i^{1.5}}{2.5 \pi \rho_p} \cdot \left( \frac{v}{c_k} \right)^{2.5} - \frac{10 \pi (1 + v_p) R_f x^{0.5} \sigma (\beta_3 + \beta_2 \mu^2) v^2 \alpha^2 C_f d_p}{18 E \gamma} \alpha_i^2 \right) \frac{C m_a}{v_c d_i} + \frac{4(1-C)m_a}{\pi v_c d_i} \left( \frac{(v_p - v_{kr})^2}{2 \varepsilon_c} + C_f \frac{5 f_f}{3 \gamma} \left( \frac{\rho}{\rho_p} \right)^{0.5} \left( \frac{\sigma}{E} \right)^{1.5} R_f^{1.5} S_f^{-0.5} d_p v^2 \right) \quad (4.22.)$$



Слика 4.4. Графички приказ насјанка предње линије реза [81]

У формули је  $\nu$  *Poisson*-ов коефицијент материјала који се обрађује,  $C_k$  коефицијент који зависи од брзине,  $R_f$  фактор кружности абразивних честица,  $\sigma$  тврдоћа по *Knoop*-у за материјал који се обрађује,  $C_f$  константа,  $d_p$  средња вредност пречника абразивних честица,  $E$  модул еластичности,  $f_f$  коефицијент односа потребне и уложене енергије за стварање пукотине,  $\gamma$  енергија потребна за стварање пукотине између зрна по јединици запремине,  $\varepsilon_c$  специфична енергија и  $v_{kr}$  критична брзина при којој почиње стварање пукотина.

У овом моделу је узет у обзир и утицај облика и величине абразивних зрна, али је занемарена промена ширине реза у зависности од дубине резања, што може довести до грешке од 20%. У истом раду је као потврда модела извршен експеримент где су вариране вредности радног притиска, протока абразива, пречника абразивне млазнице и брзине кретања резне главе. Коефицијент корелације између експериментално добијених вредности за максималну дубину резања и вредности добијених на основу модела је 0.9384 [81].

#### 4.2.2. Модели за дефинисање квалитета обрађене површине

Због непотпуног разумевања механизма појаве валовитости на обрађеној површини, и сложености развоја модела за одређивање храпавости обрађене површине, већина ових модела је заснована на експерименталним истраживањима. Иако модели до којих се дошло на овакав начин доста прецизно одређују храпавост обрађене површине, могу се користити само за одређене врсте материјала, под одређеним условима.

*Hashish* [34] је развио модел који повезује дубину резања и квалитет обрађене површине односно валовитост обрађене површине. Овај модел је заснован на претпоставци да дејство абразивног млаза на обрађену површину у секундарној зони резања није стабилно и да сав скинут материјал у овој зони је последица деформација и да је нападни угао  $90^\circ$ . И поред свега овај модел се доста добро слаже са експерименталним истраживањима. Математички облик овог модела је дат следећом формулом:

$$\frac{2R_w}{d_f} = 1 - \sqrt{1 - (\pi/4)^2 \left[ \frac{d_n (h - h_c) v_c}{0.5 m_a v^2 / \varepsilon_c} \right]^2} \quad (4.23.)$$

$R_w$  је валовитост обрађене површине,  $d_f$  пречник абразивне млазнице,  $\varepsilon_c$  енергија потребна да се уклони јединична запремина материјала при деформисању истог.

*Wang* и *Wong* [100] су у свом раду анализирали утицај параметара режима обраде абразивним воденим млазом на квалитет реза – храпавост обрађене површине и ширину и нагиб реза. Ове зависности су приказане следећим емпиријским моделима:

$$Ra = 34.506 - 0.221 \cdot p + (4 \cdot v_c - 0.9242 \cdot v_c \cdot x + 5 \cdot x \cdot p - m_a \cdot x + 0.3717 \cdot p^2) \cdot 10^{-3} \quad (4.24.)$$

$$T_a = -1.067 + 0.008 \cdot p - 0.212 \cdot Fr - (0.0789 \cdot v_c \cdot p + 3.887 \cdot Fr \cdot x + 1.906 \cdot v_c \cdot x - 1.363 \cdot p^2 + 0.02016 \cdot v_c^2) \cdot 10^{-5} \quad (4.25.)$$

$$W_t = -1.554 + 0.019 \cdot p + (4.33 \cdot x + 1.14 \cdot v_c \cdot x - 0.01785 \cdot v_c \cdot p + 4.33 \cdot x \cdot p - 0.3216 \cdot p^2) \cdot 10^{-4} \quad (4.26.)$$

Ово су емпиријски модели. Експерименти помоћу којих су ови модели развијени су вршени на узорцима од цинк–алуминијума G 300 дебљине 1 mm који је са обе стране био пресвучен металним превлакама.

### 4.3. МОДЕЛИ ЗАСНОВАНИ НА ЗАКОНУ ОЧУВАЊА ЕНЕРГИЈЕ

Следећи модели се заснивају на закону о очувању енергије. Основа оваквих модела је претпоставка да је количина материјала који се еродира са предмета обраде у току процеса обраде пропорционална кинетичкој енергији абразивних честица.

$$\frac{dV_M}{dt} \propto \frac{dE_a}{dt} \quad (4.27.)$$

где је  $dV_M$  количина материјала који се еродира са предмета обраде у току процеса обраде абразивним воденим млазом, а  $dE_a$  кинетичка енергија абразивних честица.

Користећи ову претпоставку *Chen, Siores* и *Wong* [20] су развили математички модел за одређивање дубине примарне зоне резања  $h_c$  и максималне дубине резања за керамичке материјале:

$$h_c = 0.88 \frac{m_a p^{0.51}}{v_c^{0.27}} \quad (4.28.)$$

и

$$h = 0.9 \frac{m_a p}{v_c^{0.78}} \quad (4.29.)$$

где је  $p$  притисак воде у инсталацији,  $m_a$  проток абразива, а  $v_c$  брзина кретања резне главе.

*Wang* и *Guo* [97] су у току својих истраживања закључили да је процес ерозије приликом обраде абразивним воденим млазом сложен механизам и да је у ствари комбинација ерозије пластичних и кртих материјала. Искључивање било које од ове две компоненте неће довести до добрих резултата. Ослањајући се на закон о очувању енергије, они су развили свој модел за одређивање максималне дубине резања у следећем облику:

$$h = k \frac{m_a^{1-\alpha_1} P^{1-\alpha_2}}{d_j v_c^{1-\alpha_3} \rho_w} \quad (4.30.)$$

где су  $k$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  константе. Овај модел је веома једноставан, али током процеса обраде долази до губитака енергије, што смањује његову поузданост.

*Oweinah* [80] користи полазну једначину у модификованом облику:

$$d\dot{V}_M \cdot \varepsilon_M = \frac{dE_a}{dt} \quad (4.31.)$$

$\varepsilon_M$  је специфична енергија ерозије, тако да коначан образац за одређивање максималне дубине обраде гласи:

$$h = \eta_h \cdot \frac{m_a \cdot v^2}{2 \cdot v_c \cdot b \cdot \varepsilon_M} \quad (4.32.)$$

где је  $b$  ширина реза, а  $\eta_h$  параметар који зависи од више карактеристика материјала и параметара процеса обраде.

#### 4.4. РЕГРЕСИОНИ МОДЕЛИ

*M. Chithirai Pon Selvan* и *N. Mohana Sundara Raju* [21] су посматрали максималну дубину резања као основни параметар за оцену применљивости процеса обраде абразивним воденим млазом за одређени материјал. Они су коришћењем регресионе анализе развили модел за предвиђање дубине резања нерђајућег челика. При развоју модела су узети у обзир различити параметри процеса обраде абразивним воденим млазом. Њихов модел је представљен формулом 4.33.:

$$h = 678 \cdot \frac{p^{0,339} \cdot m_a^{0,107} \cdot d_p^{1,795} \cdot \rho_p^{0,878}}{E^{0,324} \cdot v_c^{0,137} \cdot x_0^{0,009} \cdot \rho_w \cdot d_j} \quad (4.33.)$$

где је  $p$  радни притисак,  $m_a$  проток абразива,  $d_p$  средња вредност пречника абразивне честице,  $\rho_p$  густина абразивних честица,  $E$  модул еластичности материјала предмета обраде,  $v_c$  брзина кретања резне главе,  $x_0$  растојање резне главе од предмета обраде,  $\rho_w$  густина воде,  $d_j$  пречник млаза.

Овај модел је показао добро подударање са експериментално добијеним резултатима.

*Ramulu* и *Arola* [92] су користећи регресионе технике развили модел за процену односа ширина реза на улазу и излазу млаза из материјала. Овај модел је полином другог реда и узима у обзир утицај радног притиска, величине абразивних зрна, брзине кретања резне главе као и растојања резне главе од површине материјала који се обрађује на ширину реза. Модел је дефинисан следећом формулом:

$$T_R = c_o + \sum_{i=1}^4 c_i x_i + \sum_{i=1}^4 c_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 c_{ij} x_i x_j \quad (4.34.)$$

У формули је  $c_0$  константа,  $c_i$ ,  $c_{ii}$  и  $c_{ij}$  коефицијенти првог, другог реда и коефицијенти интеракције,  $x_1$  је радни притисак,  $x_2$  је величина абразивних зрна,  $x_3$  је брзина резне главе и  $x_4$  растојање резне главе од површине материјала који се обрађује.

*Kovačević* [53] је развио свој концепт за праћење дубине резања, тако што је пратио промену отпора резања при обради абразивним воденим млазом. Модел који је развио за одређивање отпора резања је:

$$F_w = 0.076 \cdot d_f^{0.877} \cdot m_a^{0.136} \cdot x_o^{-0.072} \cdot v_c^{0.06} \cdot p^{0.782} \quad (4.35.)$$

Уочено је да постоји снажна корелација између ове формуле и формуле коју је такође развио *Kovačević* [53], а односи се на модел за одређивање максималне дубине резања. У овим формулама  $d_f$  је пречник абразивне млазнице,  $x_o$  је растојање резне главе од предмета обраде,  $p$  је радни притисак а  $m_a$  проток абразива.

$$h = 0.0014 \cdot d_f^{0.756} \cdot m_a^{0.211} \cdot x_o^{-0.139} \cdot v_c^{-0.74} \cdot p^{1.47} \quad (4.36.)$$

На основу ових образаца, може се утврдити да све променљиве процеса обраде (пречник абразивне млазнице, проток абразива, растојање резне главе од предмета обраде и радни притисак) имају исти утицај на отпор резања и на максималну дубину резања. Једина разлика се уочава код брзине кретања резне главе. Наиме, брзина кретања резне главе веома мало утиче на отпор резања док је њен утицај на максималну дубину резања значајан.

Користећи регресиону анализу, *Kovačević* [53] је развио још један модел за одређивање отпора резања, а који гласи:

$$F_w = \frac{1}{e^{19.278}} \cdot p^{2.114} \cdot m_a^{0.243} \cdot d_f^{0.508} \quad (4.37.)$$

## 4.5. МОДЕЛИ ЗА ДЕФИНИСАЊЕ ГЕОМЕТРИЈЕ РЕЗА ПРИ ОБРАДИ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

### 4.5.1. Геометрија предње стране реза

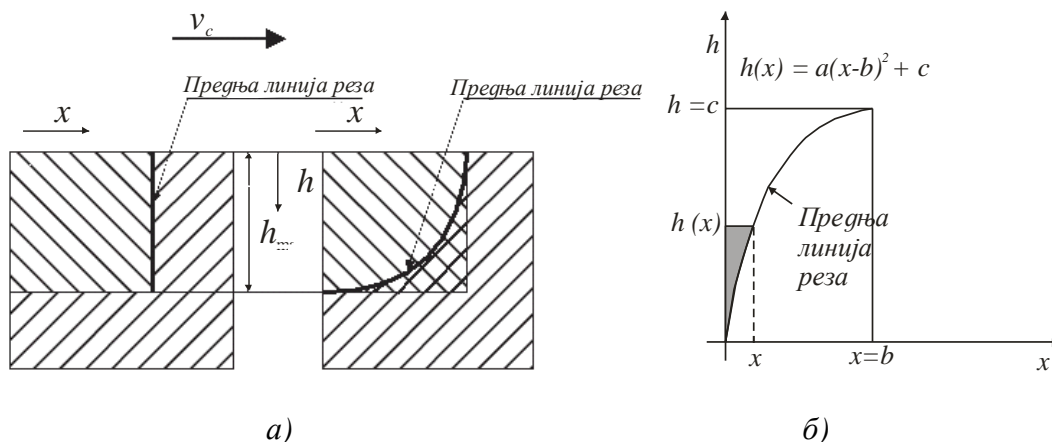
Да би описали геометрију предње линија реза *Zeng*, *Heines* и *Kim* [101] су предложили да се за тај опис користи парабола. *Chao* и *Geskin* [51] су предложили слично решење – полином другог реда који гласи:

$$h(x) = a \cdot (x - b)^2 + c \quad (4.38.)$$

У једначини су  $a$ ),  $b$ ) и  $c$ ) константе које се утврђују мерењем предње стране реза и на основу следећих формула:

$$\begin{aligned} c &= h_m a x; \\ b &= x_m; \\ a &= (-c) / b^2 = (-h_m a x) / (x_m a x^2) \end{aligned} \quad (4.39.)$$

Параметри  $x_m$  и  $h_m$  се могу једноставно измерити у случајевима када је максимална дубина резања мања од дебљине материјала који се обрађује. *Momber* и *Kovačević* [69] су такође усвојили овај модел параболе који је приказан на слици 4.5. (а и б).

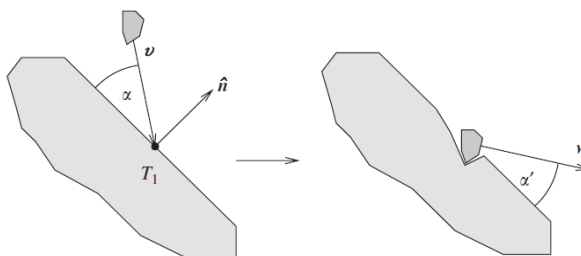


Слика 4.5. Модели предње ситране реза у облику параболе  
 а) Идеална слика и модел параболе [70]  
 б) Модел параболе [72]

#### 4.5.2. Моделирање геометрије обрађене површине

*Andrej Lebar* и *Mihael Junkar* [60] су покушали да објасне и моделирају процес обраде абразивним воденим млазом тако што су моделирали процес обраде за једну абразивну честицу, а онда га применили на случај када водени млаз помешан са абразивним честицама удара у материјал који се обрађује, односно, симулирали су јединични догађај који су понављали велики број пута и добили кумулативни резултат у облику обрађене површине.

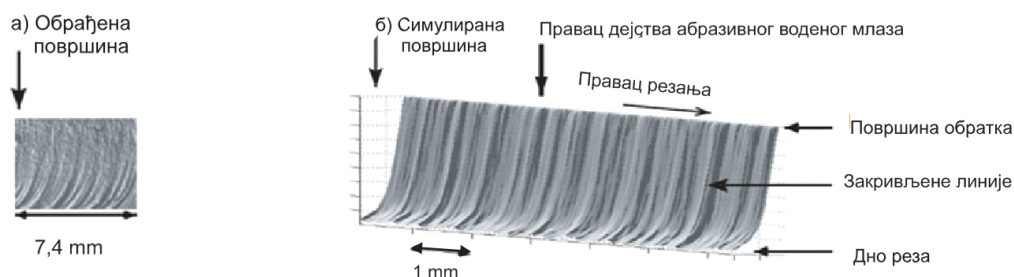
За сваку абразивну честицу је прорачунат кратер који настаје услед ерозије материјала који се обрађује, на основу модела који су креирали *Finnie* [28] и *Bitter* [12]. Основна претпоставка је да је нападни угао абразивне честице једнак углу под којим се абразивна честица одбија од материјала који се обрађује, слика 4.6. При моделовању процеса обраде абразивним воденим млазом у обзир су узети нападни угао абразивног млаза, енергија абразивног воденог млаза и карактеристике материјала који се обрађује.



Слика 4.6. Симулација удара једне абразивне честице [60]

При компјутерској симулацији, топографија предмета обраде је представљена као матрица једнаких просторних елемената. Сваки елемент матрице је реалан број који представља дубину неравнина на обрађеној површини у одређеној тачки. Да би се постигла што већа тачност симулиране површине, дефинисана је резолуција од 300 елемената матрице по једном милиметру.

Након обраде свих података, добијена је виртуелна површина која је карактеристична за обраду абразивним воденим млазом (слика 4.7.).

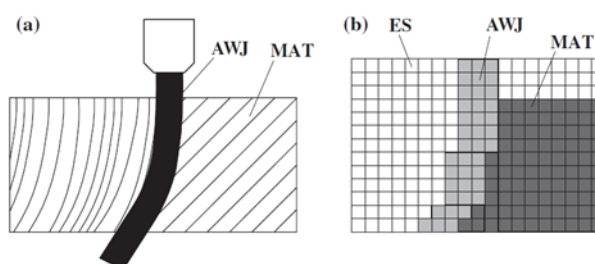


Слика 4.7. Површина обрађена абразивним воденим млазом, лево, и симулирана површина, десно [60]

#### 4.5.3. Дводимензионални мобилни аутоматски (cellular automata–CA) приступ

Henri Orbanic и Mihael Junkar [78] су покушали да помоћу СА приступа симулирају настанак предњег дела реза, односно, скретање абразивног воденог млаза при сечењу предмета обраде. Као што је већ речено, основни механизам обраде представља процес ерозије. Овај процес је веома тешко моделовати и математички описати. Због тога је примењен СА приступ који је већ коришћен за описивање неких поступака обраде.

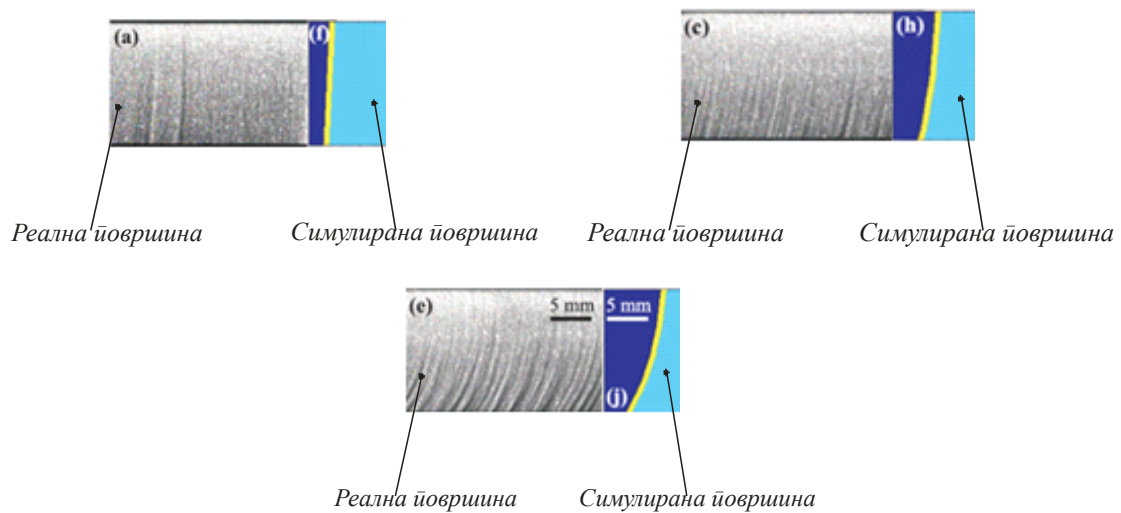
СА представља идеализацију физичког система, где су простор и време дискретне, а неке физичке величине мењају само ограничен број вредности. СА се састоје од правилно и једнако распоређених d–димензионалних низова ћелија, који могу бити неограничене дужине. Сваки елемент низа има своју карактеристику која представља вредности одређене физичке величине. Вредности физичке величине представљају колекцију свих стања у ћелији у неком временском интервалу. Свака ћелија у СА може да има интеракције само са ћелијом која је до ње.



Слика 4.8. Зона обраде абразивним воденим млазом подељена у три области–стања: ES–еразан простор, AWJ–абразивни водени млаз и MAT–необрађен материјал. Реални процес, б) Симулација процеса [78]

Код обраде абразивним воденим млазом посматра се уздужни пресек реза. Ћелије могу бити само у три стања (слика 4.8.); празна–ES, абразивни водени млаз–AWJ и необрађен материјал који тек треба да се обради MAT. MAT стање не описује количину материјала, већ је дефинисан параметром  $M_{mat}$  који представља отпорност материјала на обраду абразивним воденим млазом. Што је овај параметар већи, потребно је више времена да се материјал обради, односно да се уклони цела ћелија.

На почетку су за сваку ћелију дефинисане почетне вредности одговарајућих физичких величина и дефинисана је брзина кретања резне главе. На основу ових података и сложених процедура добијен је изглед зоне обраде абразивним воденим млазом. Овај прорачун се понавља циклично док се не добије изглед зоне резања по целом попречном пресеку предмета обраде. Добијени резултати су упоређени са експериментално добијеним вредностима. Експерименти су вршени на легури алуминијума Al6061–T6. На слици 4.9. је приказано поређење реалне и симулиране површине.



Слика 4.9. Поређење реалне и симулиране површине [78]

Deam, Lemta и Ahmed [20] су моделирали предњу линију реза, односно, средњу вредност радијуса предње линије реза, слика 4.10. Користећи Bitter–ов модел, аутори су дошли до следећих једначина:

$$R = \left( \frac{m_a}{4 \cdot \varepsilon \cdot w \cdot v_c \cdot \cos(\theta)} \right)^{2/3} \cdot \left( \frac{2 \cdot h_{max}}{X_D} \right)^{1/3} \cdot v_p^{4/3}$$

и

$$\theta_0 = \left( \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot v_c \cdot w \cdot h_{max}}{m_a} \right)^{1/3} \cdot \frac{1}{v_p^{2/3}} \quad (4.40.)$$

за случај када је заступљено деформационо хабање и



$$R = \left( \frac{m_a \cdot C}{W \cdot v_c \cdot \cos(\theta)} \right)^{4/5} \cdot \left( \frac{2 \cdot h_{\max}}{X_c} \right)^{1/5} \cdot v_p^2$$

и

$$\theta_0 = \left( \frac{v_c \cdot W \cdot h_{\max}}{2 \cdot C \cdot m_a} \right)^{2/5} \cdot \frac{1}{v_p} \quad (4.41.)$$

за случај када је доминантно микрорезање. У овим формулама  $C$  је константа,  $W$  ширина абразивног воденог млаза,  $v_p$  брзина абразивних честица а  $X_c$  и  $X_D$  маса еродираниог материјала за максималну дубину резања за случајеве микрорезања и деформационог хабања.



Слика 4.10. Моделирање предње линије реза, [24]

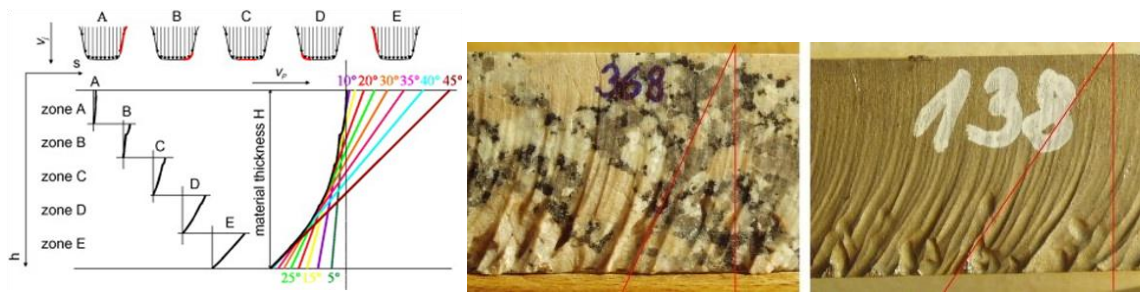
Модел је показао доста добро поклапање са реалним процесом обраде абразивним воденим млазом за мање дебљине материјала. При већим дубинама резања одступање предње линије реза од предвиђене кружнице је значајније. Такође, уочено је да је закривљење предње линије реза променљиво током времена.

*Adnan Akkurt* [2] је истраживао утицај брзине кретања резне главе на геометрију предње стране реза. Испитивао је узорке од месинга, дебљине 10 mm и 20 mm који су обрађивани са препорученим вредностима брзина од 63,16 mm/min и 28,46 mm/min респективно. Након анализе, добијени су математички модели у облику параболе који описују повезаност дубине резања– $x$  и одступања предње стране реза од вертикалне линије. Ови модели су приказани у табели 4.1.

Табела 4.1. Приказ модела предње линије реза [2]

$h$ , mm	$v_c$ , mm/min	Модел
10	63.16	$h = -3.923 \cdot x^2 + 11.52 \cdot x + 1.125$
20	28.46	$h = -3.0423 \cdot x^2 + 14.442 \cdot x + 2.548$

*Libor Hlavač* [39] је испитивао нагиб закривљених линија на површини обрађеној абразивним воденим млазом, на одређеним дубинама резања, слика 4.11.



Слика 4.11. Најиб закривљених линија на различитим дубинама резања [39]

На основу анализе резултата, зависност закривљености линија од нагиба закривљених линија на излазу млаза из материјала, може бити описана следећом једначином:

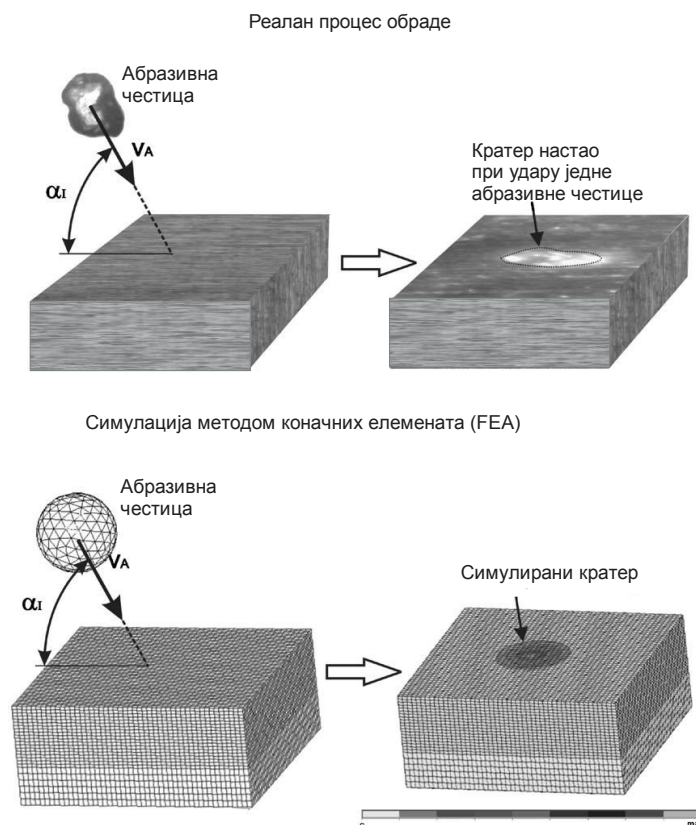
$$f(h) = C_h \frac{\theta_{\max}}{h^{c_\theta}} h^{c_{vp}} \quad (4.42.)$$

Где су  $c_h$ ,  $c_\theta$  и  $c_{vp}$  коефицијенти који показују зависност нагиба закривљених линија од дубине резања, максималног нагиба и брзине кретања резне главе,  $\theta_{\max}$  максимални нагиб закривљених линија на изласку абразивног воденог млаза из материјала, а  $h_{\max}$ , максимална дубина резања.

#### 4.6. НУМЕРИЧКЕ СИМУЛАЦИЈЕ ПРОЦЕСА ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

Данас постоји веома мало литературе која се односи на нумеричку симулацију процеса обраде абразивним воденим млазом. У скоро свим радовима до сада је најчешће коришћена метода коначних елемената за описивање удара једне абразивне честице у материјал који се обрађује и процеса ерозионог хабања које на тај начин настаје. На овај начин је описана количина материјала коју једна абразивна честица скине при удару у материјал. Абразивна честица се посматра као лопта од крутог материјала која не мења свој облик приликом удара, слика 4.12.

Један од првих нумеричких модела за обраду абразивним воденим млазом је модел *Mazurkiewicz-a* [65]. Он је материјал у који удара абразивни водени млаз поделио у ћелије. Затим је одређен број абразивних честица у свакој ћелији материјала који се обрађује. Под претпоставком да свака абразивна честица подједнако учествује у процесу обраде, и на основу укупне запремине материјала који се еродира абразивним воденим млазом у интервалу од једне секунде, одређена је просечна запремина материјала који се еродира за сваку абразивну честицу. Ова вредност је додељена свакој абразивној честици.

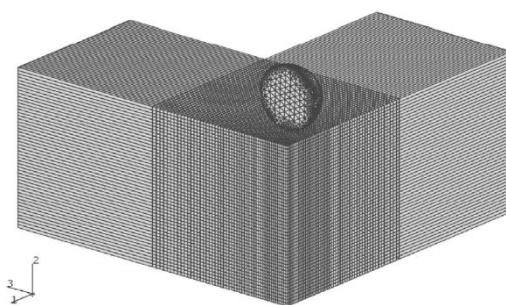


Слика 4.12. Реалан и симулиран процес обраде [65]

Симулирани процес обраде се наставља до краја предвиђеног временског интервала. Излаз из овог процеса је укупна маса и запремина материјала који је еродираан у задатом временском интервалу. Резултати добијени помоћу овог модела имају доста добро поклапање са резултатима добијеним *Finnie* – вим [28] моделом за микрорезање пластичних материјала.

*Junkar, Jurisevic, Fajdiga* и *Grah* [48] су у свом раду узели у обзир еласто–пластично понашање материјала који се обрађује и динамичке величине као што су гравитација и брзина абразивне честице. Због веома велике брзине абразивне честице при удару у материјал који се обрађује, веома малих димензија абразивних честица и веома кратког трајања самог удара одабран је ANSYS/LS–DYNA програм који је намењен за решавање различитих случајева удара. Абразивна честица је моделована са 3D моделом тетраедра, док је предмет обраде моделован 3D моделом квадра који има еласто–пластичне карактеристике. Симулација процеса је вршена за три различите вредности брзине абразивне честице и три вредности нападног угла. Потом су вршени експерименти под истим условима. Резултати добијени помоћу симулације и експеримента су упоређени. Примећено је одступање у добијеним вредностима, али је тренд промене код симулираних вредности исти као и код вредности добијених експериментом.

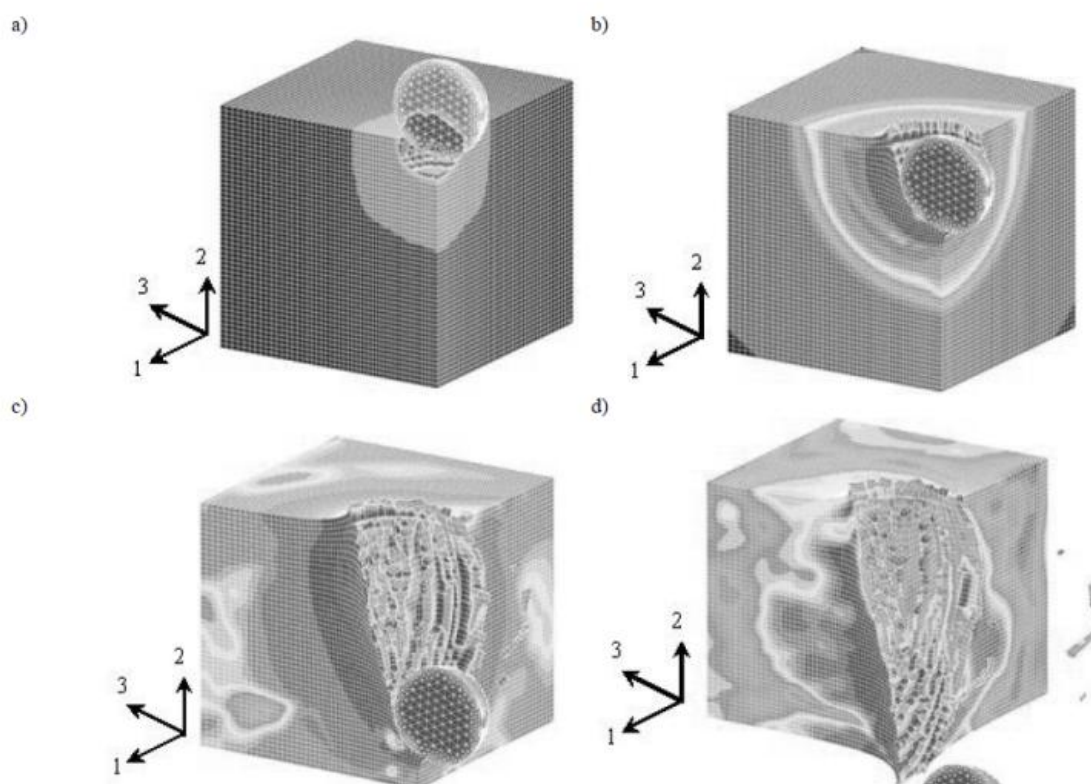
*Gudimetla* и *Yarlagadda* [29] су покушали да реше проблем резања кртих материјала методом коначних елемената. 3–димензионални FE модел је постављен помоћу PATRAN–а. Керамички материјал је моделован као коцка димензија 1 mm, док је полулопта пречника 0.1 mm коришћена као модел једне абразивне честице, слика 4.13. Систем је увезен у ABAKUS и урађена је анализа.



Слика 4.13. Дискретизовани FE модел [29]

Количина материјала који је еродираан у процесу резања је добијена множењем јединичне количине еродирааног материјала са укупним бројем честица. Резултати FEA су упоређени са моделом за крте материјале који су предложили *Kim* и *Zeng* [103].

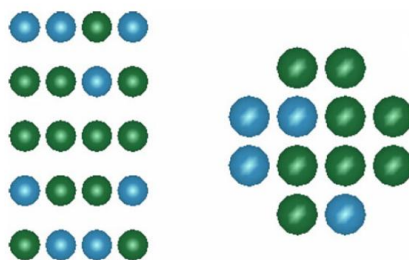
Резултати добијени FEA методом показују да је највећи проблем то што реални материјали који се обрађују абразивним воденим млазом нису идеално крти. То значи да је процес ерозије при њиховој обради мешовит – јављају се и пукотине, али и микрорезање. Резултати симулације су изоловани и приказани у четири различита временска интервала што је и приказано на слици 4.14 (a–d).



Слика 4.14. Симулација процеса обраде абразивним воденим млазом у четири различите фазе [65]

*Jianming, Na* и *Wenjun* [47] су у свом раду симулирали процес обраде абразивним воденим млазом SPH методом. SPH метода је *Lagrange*-ов модел код којег не постоји мрежа коначних елемената. Код ове методе се врши интерполација псеудо-честица да би се добило поље променљивих величина. Свака SPH честица има масу, *Lagrange*-ову позицију, *Lagrange*-ову брзину и сопствену енергију. Остале величине се добијају интерполацијом из полазних вредности.

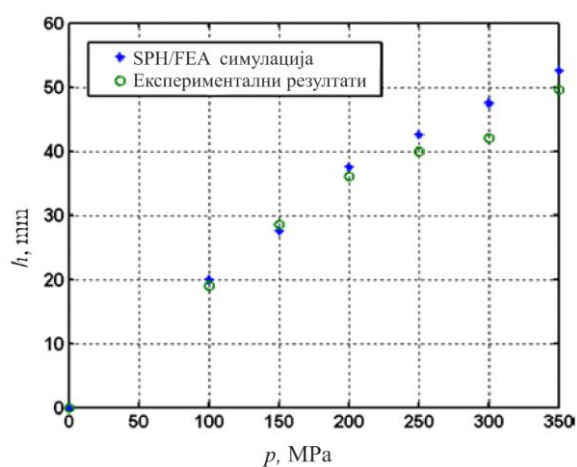
Да би објаснили процес обраде абразивним воденим млазом, аутори су абразивни водени млаз моделирали SPH методом. Абразивни водени млаз различите структуре, представљен SPH методом, приказан је на слици 4.15. Тамније честице представљају воду, док су светлије абразивне честице.



Слика 4.15. SPH честице за различите материјале [47]

Материјал који се обрађује је моделован као материјал код којег долази до пластичног очвршћавања, а помоћу методе коначних елемената. Остале карактеристике материјала су постављене као полазни параметри модела. Да би се симулирао процес стварања пукотине, примењен је метод уклањања честица материјала. Затезна чврстоћа материјала је постављена као гранични услов за простирање пукотине.

За одређене вредности радног притиска, извршена је симулација процеса обраде абразивним воденим млазом и одређене су вредности максималне дубине резања. Под истим почетним условима извршено је и експериментално одређивање максималне дубине резања. На слици 4.16 је извршено поређење ових резултата.

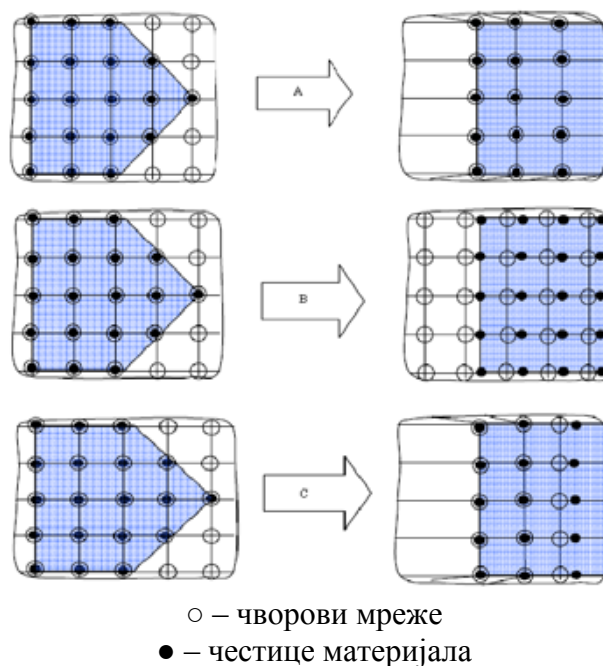


Слика 4.16. Поређење вредности максималне дубине резања добијених симулацијом и експериментом [47]



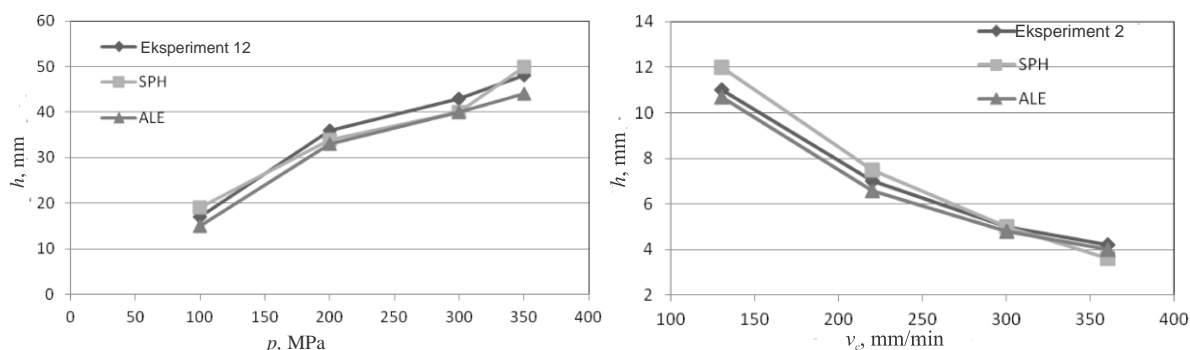
Са слике се види да постоји добро подударање вредности за мање вредности радног притиска. Са повећањем вредности радног притиска долази и до појаве већег одступања.

*Shahverdi, Zohoor* и *Mousav* [94] су симулирали процес обраде абразивним воденим млазом помоћу SPH и ALE метода. Новина у односу на претходне радове је ALE метода која практично комбинује FEM и SPH методе. Наиме, код овог модела, материјал се представља са мрежом, као код методе коначних елемената, али се чворови ове мреже могу кретати независно од остатка материјала. Поређење метода је приказано на слици 4.17.



Слика 4.17. Поређење метода: А– Eulerian, В – Lagrangian, С– ALE [94]

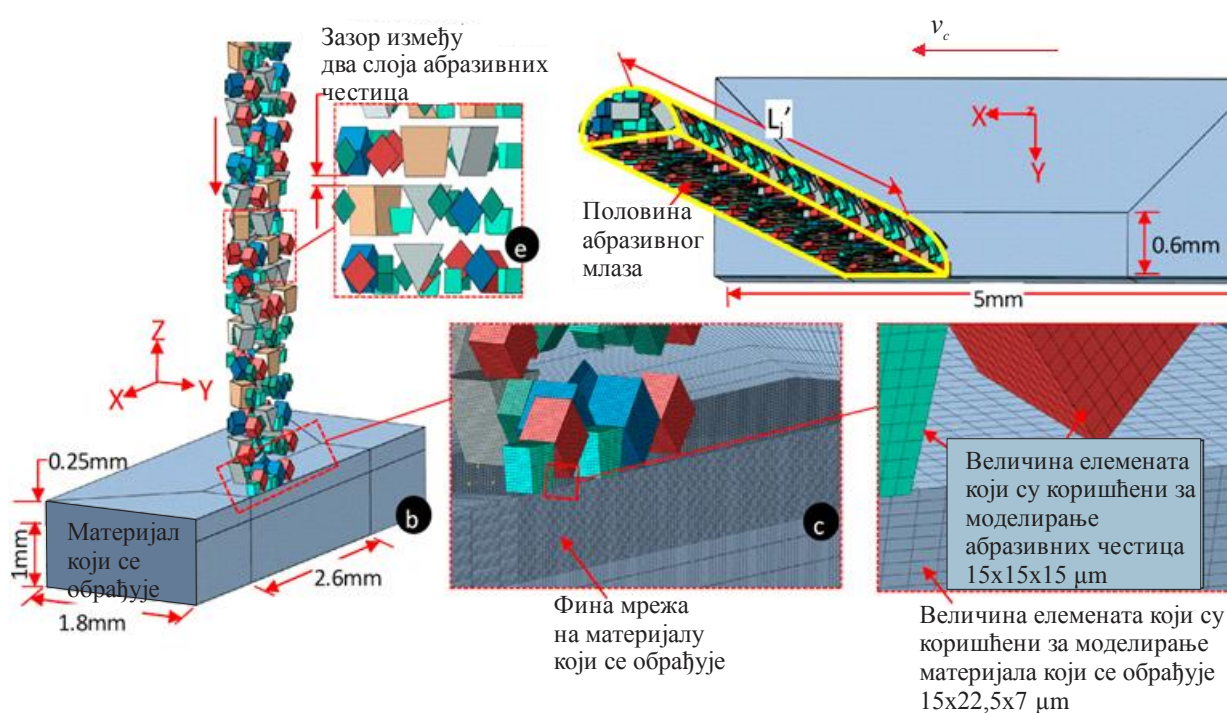
Помоћу SPH и ALE методе је симулиран процес обраде абразивним воденим млазом за различите вредности радног притиска и брзине кретања резне главе. Ови резултати су упоређени са резултатима добијеним експериментом, слика 4.18.



Слика 4.18. Поређење вредности максималне дубине резања добијених SPH и ALE методом и експериментом [94]

Са слике се види да постоји доста добро подударање у вредностима максималне дубине резања добијених симулацијом и експериментом.

Anwar, Axinte и Becker [3] су помоћу FEM методе моделовали површину која се добије након обраде абразивним воденим млазом. Материјал који се обрађује није расецан до краја. Циљ је био да се утврди могућност предвиђања, а потом и контроле дубине обраде абразивним воденим млазом, односно могућност коришћења обраде абразивним воденим млазом као обраде глодањем. Разлика ове симулације и претходних је у томе што су абразивне честице моделоване са различитим облицима који имају оштре резне ивице. Абразивне честице су распоређене по Гаусовој расподели око осе млаза. Материјал који се обрађује је моделован као еласто-пластичан. На слици 4.19 је приказан 3D модел процеса обраде абразивним воденим млазом који је коришћен за ову симулацију.

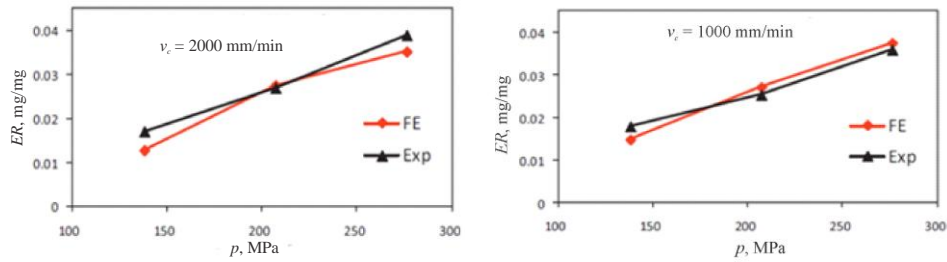


Слика 4.19. 3D модел процеса обраде абразивним воденим млазом [3]

Под истим условима је спроведен и експеримент. За оба случаја је одређиван степен ерозије (Erosion rate) ER:

$$(\text{Stepen erozije})ER = \frac{\text{Ukupna masa erodiranog materijala}}{\text{Ukupna masa abrazivnih čestica}} \quad (4.43.)$$

На слици 4.20. је приказано поређење вредности степена ерозије, ER, за експеримент и симулацију.



Слика 4.20. Поређење вредности (Erosion rate)  $ER$  за експеримент и симулацију [3]

Подударање у вредностима степена ерозије,  $ER$ , добијених симулацијом и експериментом је задовољавајуће. Ипак, потребно је извршити већи број експеримената са различитим вредностима брзина кретања резне главе и радних притисака да би се дошло до конкретнијег закључка.

Ово су само неки од постојећих модела који дефинишу максималну дубину обраде и описују геометрију реза при обради абразивним воденим млазом. Постоји велики број модела за дефинисање максималне дубине резања, док су модели геометрије реза много ређи. Због тога је истраживање у правцу дефинисања геометрије реза значајније. Основни недостатак свих наведених модела је што важе само за једну врсту материјала или за обраду под одређеним условима, са дефинисаним режимима обраде. Код многих модела се не види јасно утицај режима обраде.



## 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ АБРАЗИВНИМ ВОДЕНИМ МЛАЗОМ

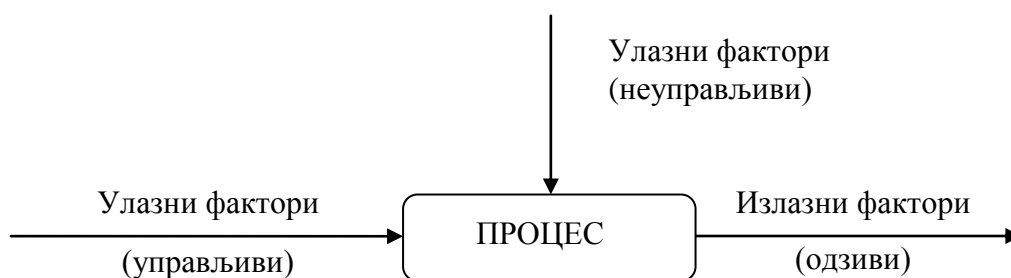
### 5.1. ПРЕДМЕТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА

Механизми процеса обраде абразивним воденим млазом нису у потпуности познати. Због тога је за добијање поузданих информација о овом процесу неопходно спровести експерименте и на тај начин анализирати механизме процеса обраде абразивним воденим млазом.

У овој докторској дисертацији посебна пажња је усмерена на експериментално мерење квалитета реза и отпора резања при обади абразивним воденим млазом у производним условима. Досадашња истраживања у овој области су доста скромна, вршена су у лабораторијским условима на моделима машина, при чему се резна глава није кретала.

Реализована експериментална истраживања су вршена у реалним условима, при чему су мерени параметри квалитета реза и отпори резања у зависности од примењених параметара режима обраде. Ова експериментална истраживања су вршена у циљу сагледавања енергетског аспекта обраде абразивним воденим млазом и квалитета реза (квалитета обрађене површине и тачности обраде).

У кибернетском смислу, сваки процес се одвија у одређеним условима и има своје улазне управљиве факторе (контролисани или управљиви фактори), излазне факторе (функције стања или карактеристике процеса добијене мерењем) и неуправљиве улазне факторе, који се могу елиминисати, држати на константном нивоу или мењати по закону вероватноће [59]. Када се анализирају процеси, анализирају се и утицаји улазних фактора на излазне факторе. Основни кибернетски принцип је да се процеси који се експериментално истражују представљају у облику црне кутије, слика 5.1.



Слика 5.1. Кибернетски приказ процеса

У последње време, експерименталне методе налазе све већу примену у моделирању и оптимизацији различитих обрадних процеса.

Процес обраде абразивним воденим млазом је дефинисан бројним факторима, који одређују ефикасност, економичност и квалитет обраде. Да би се постигла што већа ефикасност, економичност и квалитет обраде, неопходно је правилно дефинисање улазних фактора као и познавање њиховог утицаја на процес. Код обраде абразивним воденим млазом, улазни фактори су разврстани на управљиве, неуправљиве и поремећајне факторе.

Управљиви фактори су :

- Радни притисак,
- Проток абразива,
- Брзина кретања резне главе,
- Растојање резне главе од предмета обраде,
- Материјал предмета обраде и
- Дебљина предмета обраде.

Неуправљиви фактори су:

- Снага пумпе,
- Квалитет воде,
- Димензије радног стола,
- Тачност позиционирања и
- Пречник високопритисних цеви.

Поремећајни фактори су:

- Нагла промена правца кретања резне главе,
- Разлика у величини абразивних зрна,
- Осцилације у вредностима радног притиска и
- Промена пречника абразивне млазнице као последица хабања.

Код обраде абразивним воденим млазом одзиви су:

- Тачност облика и димензија,
- Квалитет обрађене површине,
- Енергија абразивног воденог млаза,
- Отпори резања и
- Време и трошкови обраде.

## 5.2. ЦИЉ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА

Циљ експерименталног истраживања процеса обраде абразивним воденим млазом био је да се дефинише утицај улазних фактора на излазне факторе. На слици 5.2. су приказани улазни фактори и одзиви при реализованим експерименталним истраживањима процеса обраде абразивним воденим млазом.



Слика 5.2. Фактори при експерименталном истраживању процеса обраде абразивним воденим млазом

Као одзиви процеса обраде абразивним воденим млазом су анализирани следећи параметри: геометрија реза (ширина реза, одступање од управности и нагиб реза), храпавост обрађене површине и отпори резања. На све ове параметре утичу улазни фактори који су сврстани у две групе: управљиви улазни фактори – фактори који су варијани током експеримента и константни фактори – фактори чија вредност није варијана током експеримента. У управљиве факторе су сврстани следећи фактори процеса обраде абразивним воденим млазом:

- Брзина кретања резне главе –  $v_c$ , mm/min,
- Радни притисак –  $p$ , МПа,
- Проток абразива –  $m_a$ , g/min,
- Дебљина предмета обраде –  $s$ , mm,
- Растојање резне главе од површине узорка –  $x_0$ , mm,
- Материјал предмета обраде и
- Хабање абразивне млазнице.

Сви побројани улазни фактори су варијани током експеримента у оквиру вредности које је било могуће задати на машини.

У константне факторе су сврстани:

- Пречник водене млазнице
- Пречник абразивне млазнице и
- Врста абразива.

Константни фактори нису мењани током експеримента јер је машина предвиђена за рад са унапред дефинисаним вредностима пречника водене млазнице, пречника абразивне млазнице и врсте абразива.

Експериментална истраживања процеса обраде абразивним воденим млазом су вршена из три дела. У првом делу, циљ експерименталног истраживања је био да се одреди специфична енергија обраде абразивним воденим млазом, као и зависност геометрије предње линије реза и храпавости обрађене површине од радног притиска, брзине кретања резне главе и протока абразива. У овом делу експеримента, управљиви улазни фактори су били:

- Брзина кретања резне главе –  $v_c$ : 10, 20, 30, 40, 50, 60 и 70 mm/min,
- Радни притисак –  $p$ : 205, 245, 290, 335 и 413 МПа и
- Проток абразива –  $m_a$ : 150, 200, 250, 300, 350 и 400 g/min.

Улазни константни фактори су:

- Дебљина предмета обраде –  $s = 30$  mm,
- Растојање резне главе од површине узорка –  $x_0 = 3$  mm,
- Материјал узорка: X5CrNi 18–10,
- Пречник водене млазнице –  $d_o = 0,3$  mm,
- Пречник абразивне млазнице –  $d_f = 1,02$  mm и
- Врста абразива: Garnet #80.

Одзиви су:

- Геометрија предње линије реза –  $Y_{lag}$ , mm и
- Храпавост обрађене површине –  $Ra$ ,  $\mu\text{m}$ .

Узорци који су коришћени у овом делу истраживања су приказани у табели 5.1.

Табела 5.1. Узорци за први део експерименталних истраживања

Узорак број	$p$ , МПа	$v_c$ , mm/min	$m_a$ , g/min
1.	413	10	400
2.	413	20	400
3.	413	30	400
4.	413	40	400
5.	413	50	400
6.	413	60	400
7.	413	70	400
8.	413	35	400
9.	335	35	400
10.	290	35	400
11.	245	35	400
12.	205	35	400
13.	413	35	350
14.	413	35	300
15.	413	35	250
16.	413	35	200
17.	413	35	150

У другом делу експерименталног истраживања циљ је био дефинисање утицаја већег броја улазних фактора на ширину и нагиб реза, квалитет обрађене површине и отпоре резања при обради абразивним воденим млазом. Такође, циљ овог експерименталног испитивања је био анализа утицаја улазних фактора на енергију абразивног воденог млаза и утицај промене уложене енергије у процес обраде на промену квалитета обраде и отпоре резања.

У овом делу експерименталног испитивања, управљиви улазни фактори су:

- Брзина кретања резне главе –  $v_c$ : 30, 50, 70, 90, 100, 110 и 150 mm/min,
- Радни притисак –  $p$ : 270, 320, 380 и 413 МПа,
- Проток абразива –  $m_a$ : 200, 300, 350 и 400 g/min,
- Дебљина предмета обраде –  $s$ : 5, 10, 15, 20 и 25 mm,
- Растојање резне главе од површине узорка –  $x_0$ : 2, 3 и 4 mm и
- Материјал узорка: S 235 JRG2, С 45 и X5CrNi 18–10.

Константни улазни фактори су:

- Пречник водене млазнице –  $d_o = 0,3$  mm,
- Пречник абразивне млазнице –  $d_f = 1,02$  mm и
- Врста абразива: Garnet #80.

Одзиви су:

- Геометрија реза: ширина реза на улазу абразивног воденог млаза у предмет обраде и излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде –  $W_g$  mm и  $W_d$  mm, нагиб реза –  $u$  mm и угао нагиба реза –  $\alpha^\circ$ ,
- Храпавост обрађене површине –  $Ra$   $\mu$ m и
- Отпори резања –  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$  N.

Узорци који су коришћени за други део експерименталних истраживања су дати у табели 5.2.

Табела 5.2. Узорци за други део експерименталних испитивања

Узорак број	$p$ , МПа	$v_c$ , mm/min	$m_a$ , g/min	$s$ , mm	Материјал	$x_0$ , mm
1.	270	50	400	20	X5CrNi 18-10	3
2.	320	50	400	20	X5CrNi 18-10	3
3.	380	50	400	20	X5CrNi 18-10	3
4.	413	50	400	20	X5CrNi 18-10	3
5.	413	50	200	20	X5CrNi 18-10	3
6.	413	50	250	20	X5CrNi 18-10	3
7.	413	50	300	20	X5CrNi 18-10	3
8.	413	50	350	20	X5CrNi 18-10	3
9.	413	50	400	20	X5CrNi 18-10	3
10.	413	30	400	20	X5CrNi 18-10	3
11.	413	50	400	20	X5CrNi 18-10	3
12.	413	70	400	20	X5CrNi 18-10	3
13.	413	90	400	20	X5CrNi 18-10	3
14.	413	110	400	20	X5CrNi 18-10	3
15.	320	50	300	20	X5CrNi 18-10	3
16.	270	30	200	20	X5CrNi 18-10	3
17.	413	70	400	20	C 45	3
18.	320	50	300	20	C 45	3
19.	270	30	200	20	C 45	3
20.	413	70	400	20	S 235 JRG2	3
21.	320	50	300	20	S 235 JRG2	3
22.	270	30	200	20	S 235 JRG2	3
23.	413	150	400	5	X5CrNi 18-10	3
24.	413	100	400	5	X5CrNi 18-10	3
25.	413	70	400	5	X5CrNi 18-10	3
26.	413	100	400	10	X5CrNi 18-10	3
27.	413	70	400	10	X5CrNi 18-10	3
28.	413	50	400	10	X5CrNi 18-10	3
29.	413	100	400	15	X5CrNi 18-10	3
30.	413	70	400	15	X5CrNi 18-10	3
31.	413	50	400	15	X5CrNi 18-10	3
32.	413	100	400	25	X5CrNi 18-10	3
33.	413	70	400	25	X5CrNi 18-10	3
34.	413	50	400	25	X5CrNi 18-10	3
35.	413	70	400	25	X5CrNi 18-10	2
36.	413	70	400	25	X5CrNi 18-10	3
37.	413	70	400	25	X5CrNi 18-10	4

У трећем делу експерименталног истраживања циљ је био да се прати утицај хабања абразивне млазнице на квалитет обрађене површине, односно на параметар храпавости обрађене површине  $Ra$ .

У овом делу експерименталног испитивања, управљиви улазни фактори су:

- Брзина кретања резне главе –  $v_c = 120 \text{ mm/min}$ ,
- Радни притисак –  $p = 350 \text{ MPa}$ ,
- Проток абразива –  $m_a = 306 \text{ g/min}$ ,
- Дебљина предмета обраде –  $s = 10 \text{ mm}$ ,
- Растојање резне главе од површине узорка –  $x_0 = 3 \text{ mm}$  и
- Материјал узорка: X5CrNi 18–10.

Константни улазни фактори су:

- Пречник водене млазнице –  $d_o = 0,3 \text{ mm}$ ,
- Почетни пречник абразивне млазнице –  $d_f = 1,02 \text{ mm}$ ,
- Тип абразивне млазнице – ROSTEC©100 и
- Врста абразива: Garnet #80.

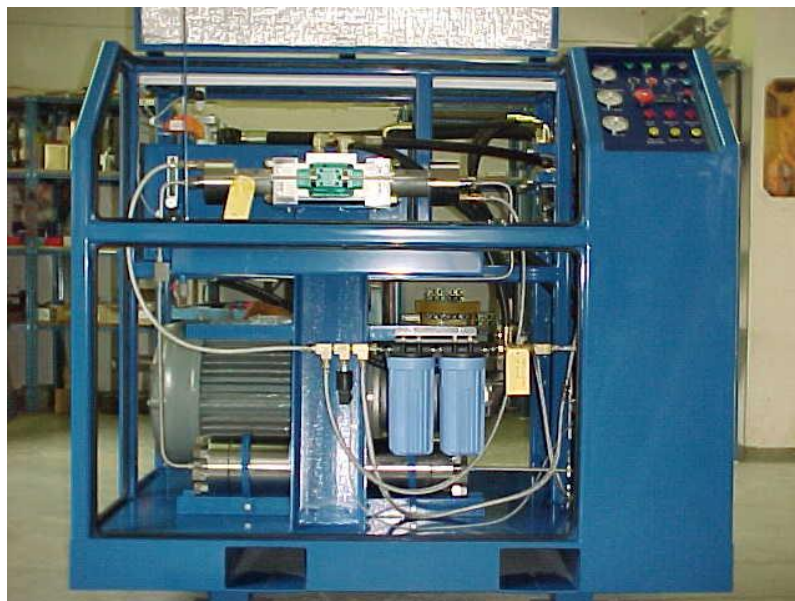
Одзиви су:

- Пречник абразивне млазнице –  $d_f$ ,
- Храпавост обрађене површине –  $Ra \text{ }\mu\text{m}$ .

### 5.3. МАШИНА НА КОЈОЈ СУ ВРШЕНА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

Експериментална испитивања су вршена у реалним, индустријским условима на машини PTV–3.8/60 произвођача PTV spol. sr.o, Czech Republic, која се налази у фирми „СЛОВАС“ из Чачка.

Машина за обраду абразивним воденим млазом PTV–3.8/60 се састоји из два дела који се налазе у посебним просторијама. Први део је хидраулични део машине и он је основни део машине за обраду абразивним воденим млазом, слика 5.3. У овом делу су смештене компоненте које су од виталног значаја за функционисање машине за обраду абразивним воденим млазом, а то су јединица за припрему воде, уљна пумпа, појачавач притиска и акумулатор притиска.



Слика 5.3. Хидраулични гео машине PTV-3.8/60

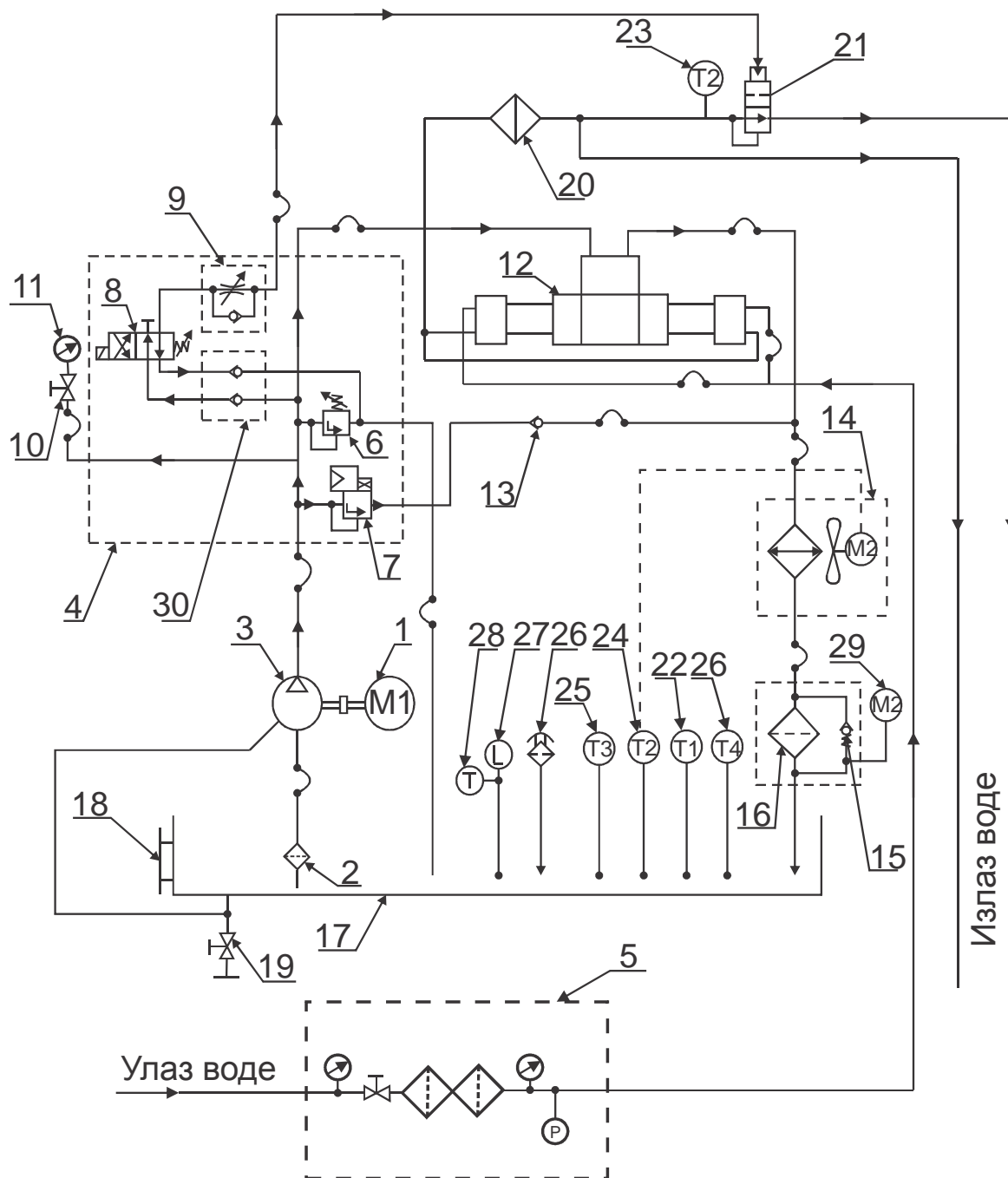
Други део машине је извршни део, слика 5.4. Њега чине резна глава, радно сто и јединица за управљање.



Слика 5.4. Извршни гео машине за обраду абразивним воденим млазом PTV-3.8/60

На слици 5.5. је дата хидраулична шема машине PTV-3.8/60.





Слика 5.5. Хидраулична шема машине PTV-3.8/60

У табели 5.1. су дата објашњења позиција за хидрауличну шему дату на слици 5.5.

Табела 5.1. Хидрауличне компоненте машине за обраду абразивним воденим млазом

Позиција бр.	Назив компоненте
1.	Електромотор
2.	Усисни филтер
3.	Хидраулична пумпа
4.	Хидраулични блок
5.	Јединица за филтрирање воде
6.	Сигуросни вентил
7.	Пропорционални вентил за ограничење притиска
8.	Електро–магнетни разводник
9.	Пригушно неповратни вентил
10.	Вентил
11.	Манометар
12.	Мултипликатор
13.	Неповратни вентил
14.	Хладњак хидрауличног уља
15.	Неповратни вентил
16.	Филтер
17.	Резервоар хидрауличног уља
18.	Отвор
19.	Испусни вентил
20.	Цилиндар за уравнотежење притиска
21.	Испусни вентил
22.	Сензор нивоа уља
23.	Сензор нивоа уља
24.	Сензор нивоа уља
25.	Сензор нивоа уља
26.	Сензор нивоа уља
27.	Сензор нивоа уља
28.	Термометар
29.	Сензор за притисак
30.	Неповратни вентили

Електромотор (1) покреће хидрауличну пумпу (3). Хидраулично уље се усисава из резервоара (17), преко усисног филтера (2) до хидрауличне пумпе (3). Уље под притиском долази до хидрауличног блока (4). Главни вод уља под притиском има уграђен сигурносни вентил (6) као заштиту од надпритиска. У хидраулични блок (4) је уграђен и пропорционални вентил за ограничење притиска (7). Уље под притиском долази у мултипликатор (12). У мултипликатору се притисак увећава и преноси на воду, која се преко цилиндра за уравнотежење притиска (20), путем високопритисних цеви доводи до резне главе.

Техничке карактеристике машине за обраду абразивним воденим млазом су дате у табели 5.2.

Табела 5.2. Карактеристике машине за обраду абразивним воденим млазом

Карактеристика машине		Вредност
Хидраулични део машине	Максимални радни притисак	413 МПа
	Притисак воде на улазу у систем	3.5 ÷ 6 bar
	Максимална потрошња воде	3.8 l/min
	Максимална снага	39.2 kW
	Максимални притисак уља	215 bar
	Димензије	1900 x 1250 x 1575 mm
Извршни део машине	Димензије радног стола	4000 x 2250 mm
	Тачност позиционирања на 300 mm	± 0,05 mm
	Максимална брзина кретања резне главе при обради	5 000 mm/min
	Максимална брзина кретања резне главе при позиционирању	60 000 mm/min

#### 5.4. МАТЕРИЈАЛ ПРЕДМЕТА ОБРАДЕ

Као материјали за узорке су коришћени X5CrNi 18–10, С 45 и S 235 JRG2. Највећи број експеримената је вршен на челику X5CrNi 18–10. Материјали С 45 и S 235 JRG2 су коришћени због анализе утицаја врсте материјала на излазне факторе. У табели 5.3. су дате карактеристике материјала коришћених за експериментална истраживања.

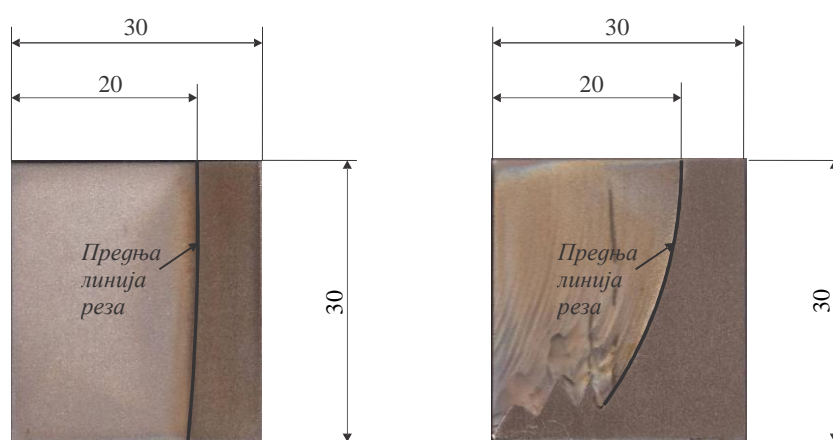
Табела 5.3. Материјали коришћени за експериментална истраживања

Материјал	Стара ознака материјала	Тврдоћа <i>HB</i>	Граница течења $R_p$ , N/mm <sup>2</sup>	Затезна чврстоћа $R_m$ , N/mm <sup>2</sup>
S 235 JRG2	Č 0361	102 ÷ 125	230	370 ÷ 450
C45	Č 1530	207	340	580 ÷ 770
X5CrNi18–10	Č 4580	130 ÷ 180	185	500 ÷ 700

Узорци су призматичног облика, димензија 20 x 300 x *s*, где је *s* – дебљина узорака (*s*: 5, 10, 15, 20, 25 и 30 mm).

## 5.5. РЕАЛИЗАЦИЈА ЕКСПЕРИМЕНТА

Као што је већ речено, експериментална истраживања су вршена из три дела. У првом делу је циљ био одређивање специфичне енергије обраде абразивним воденим млазом и зависност геометрије предње линије реза и храпавост обрађене површине од радног притиска, брзине кретања резне главе и протока абразива. Узорци су припремљени од материјала X5CrNi 18–10 дебљине 30 mm и ширине 30 mm. Узорци су расецани абразивним воденим млазом, али не до краја, већ до дужине од 20 mm. У тој тачки је заустављан проток абразива и заустављана је машина. Узорци су накнадно расецани до краја на ерозимату са жицом (WEDM). На тај начин су добијени узорци са јасно оцртаном предњом линијом реза, слика 5.6.



Радни притисак  $p = 413$  МПа  
 Проток абразива  $m_a = 400$  g/min  
 Брзина кретања резне главе  $v_c = 10$  mm/min

Радни притисак  $p = 205$  МПа  
 Проток абразива  $m_a = 400$  g/min  
 Брзина кретања резне главе  $v_c = 35$  mm/min

Слика 5.6. Изглед предње линије реза на узорцима

На овако добијеним узорцима је мерена геометрија предње линије реза и храпавост обрађене површине.

У другом делу експериментална истраживања су вршена у циљу одређивања утицаја већег броја улазних фактора (режими обраде абразивним воденим млазом, дебљина материјала, врста материјала и растојање резне главе од предмета обраде) на ширину и нагиб реза, квалитет обрађене површине и отпоре резања при обради абразивним воденим млазом. Током експеримента, узорци су били стезани у трокомпонентном динамометру KISTLER Тип 9265A1, слика 5.7.



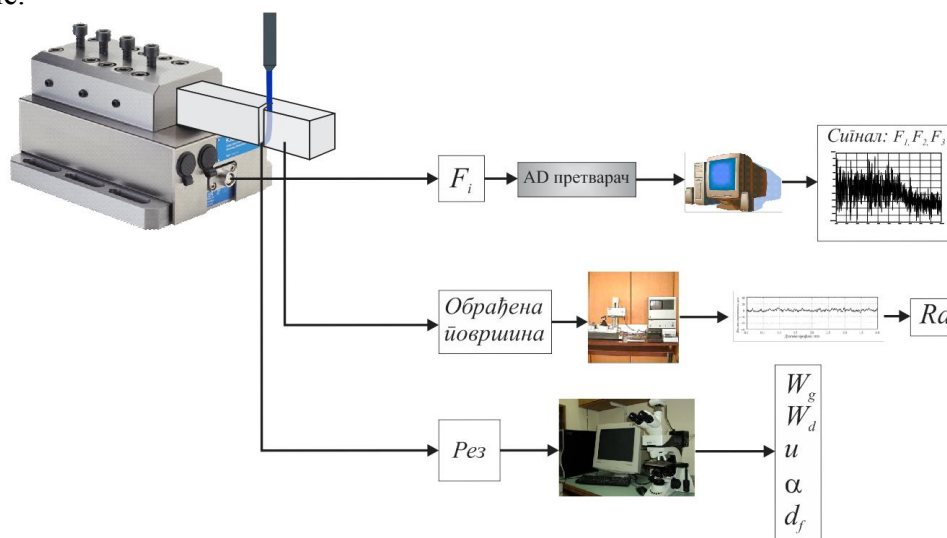
Слика 5.7. Узорци током другог дела експерименталних истраживања

Ови узорци такође нису били расецани до краја да би се могли мерити параметри који дефинишу геометрију реза. Узорци су касније расечени до краја, и на тако добијеним површинама је мерена храпавост обрађене површине.

Трећи део експерименталних истраживања се односи на мерење хабања абразивне млазнице и дефинисање утицаја хабања абразивне млазнице на храпавост обрађене површине. Као основни параметар за оцену хабања абразивне млазнице, узет је пречник излазног отвора млазнице. У одговарајућим временским интервалима је вршено мерење овог пречника. У истим временским интервалима када је вршено мерење излазног пречника абразивне млазнице, вршено је и сечење узорака да би се пратио утицај хабања абразивне млазнице на храпавост обрађене површине.

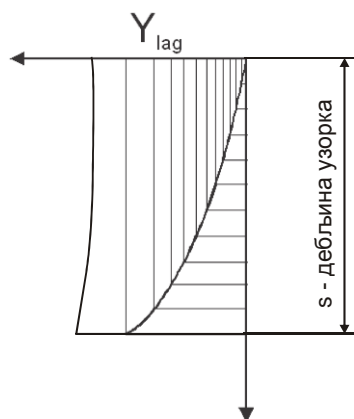
## 5.6. МЕРНЕ ВЕЛИЧИНЕ И МЕРНА ОПРЕМА

При експерименталним истраживањима, која су вршена у овој докторској дисертацији, коришћена је различита мерна опрема. На слици 5.8. је приказан мерни ланац који је коришћен за мерење компоненти отпора резањем и квалитета обрађене површине.



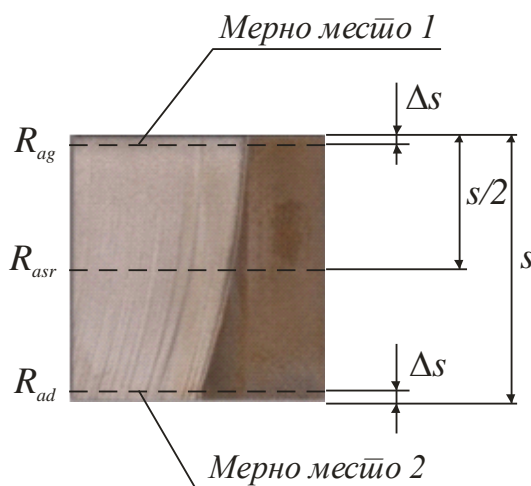
Слика 5.8. Мерни ланац за мерење отпора резања и квалитета обрађене површине

Дефинисање геометрије предње линије реза је уствари одређивање одступања – скретања  $Y_{lag}$ , абразивног воденог млаза од вертикалне линије. Истраживан је утицај радног притиска, брзине резне главе, протока абразива и дубине резања на скретање абразивног воденог млаза. Да би се овај утицај дефинисао, било је потребно одредити математички модел који ће описати све ове утицаје. За формирање модела било је неопходно одредити тачке кроз које предња линија реза пролази. Мерења су вршена на десет места (на једнаком растојању) по дубини резања, као што је приказано на слици 5.8. Мерења су вршена на оптичком микроскопу.



Слика 5.8. Мерење скретања абразивног воденог млаза

Храпавост обрађене површине је мерена у горњем и доњем делу узорка и на средини узорка, слика 5.9. Такође, храпавост је мерена на више места по дужини узорка па је одређивана средња вредност храпавости. Одређивање храпавости узорка на мерном месту 1 и мерном месту 2 је вршено на растојању  $\Delta s = 0.1s$  од горње и доње површине узорка.



Слика 5.9. Одређивање храпавости на обрађеној површини узорка

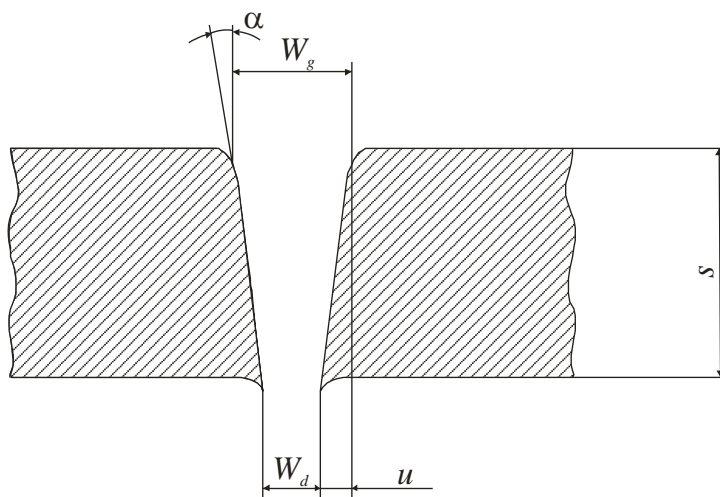
Мерење храпавости вршено је на мерном систему Talysurf 6 (*Taylor Hobson*) на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу у лабораторији за обраду метала резањем и трибологију. Мерни систем служи за мерење карактеристика микрогеометрије површина приказан на слици 5.10. Уређај је компјутеризован и има широк спектар могућности као што су:

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



Слика 5.10. Мерни систем Talysurf 6

Геометрија реза код обраде абразивним воденим млазом је дефинисана ширином реза на улазу абразивног воденог млаза у материјал који се обрађује – мерно место 1 –  $W_g$  и ширином реза на излазу абразивног воденог млаза из материјала који се обрађује – мерно место 2 –  $W_d$ , одступањем од управности – нагибом реза  $u$  и углом нагиба реза  $\alpha$ . На слици 5.11. је приказана скица геометрије реза са обележеним карактеристичним величинама и стварни изглед геометрије реза.



Слика 5.11. Геометрија реза код обраде абразивним воденим млазом

Мерење геометрије реза вршено је на универзалном мерном микроскопу. Нагиб реза је дефинисан на основу измерених вредности  $W_g$  и  $W_d$ , а на основу формуле (5.1.), која гласи:

$$u = \frac{W_g - W_d}{2s} \quad (5.1.)$$

Угао нагиба реза,  $\alpha$ , је дефинисан формулом (5.2.)

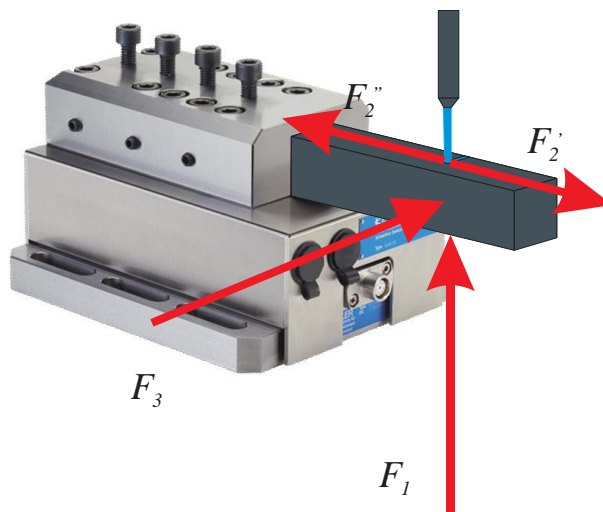
$$\alpha = \arctg \frac{u}{s} \quad (5.2.).$$

Мерење пречника излазног отвора абразивне млазнице је вршено на универзалном мерном микроскопу, слика 5.13.



Слика 5.12. Универзални мерни микроскоп

Отпори резања су мерени помоћу трокомпонентног динамометра за обраду стругањем, слика 5.13.

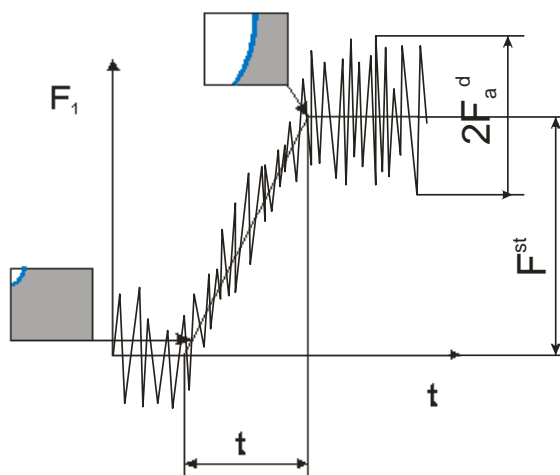


Слика 5.13. Мерење отпора резања при обради абразивним воденим млазом

Као што је на слици приказано, постоје три компоненте отпора резања,  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ . Отпор резања  $F_2$  има две компоненте,  $F_2'$  и  $F_2''$  које су веома малог интензитета. Међусобно су истог интензитета, али различитих смерова, тако да се резултујућа вредност отпора  $F_2$  креће око нуле, па се вредности овог отпора не могу разматрати. Отпор  $F_1$  је отпор резања у правцу брзине абразивног воденог млаза, па је највећа пажња посвећена овом отпору. Отпор резања  $F_3$  је еквивалент отпору помоћног кретања код класичне обраде на стругу.



У општем случају, дијаграм промене отпора резања  $F_1$  са временом има облик као што је то приказано на слици 5.14.



Слика 5.14. Дијаграм промене отпора резања  $F_1$

На слици се види да отпор  $F_1$  има своју динамичку и статичку компоненту. За истраживање које је у овом раду вршено, анализирана је само статичка компонента отпора резања. Због динамичког карактера процеса обраде абразивним воденим млазом, отпори резања при овој обради имају изразито динамички карактер. То се у појединим случајевима манифестује значајним одступањем сигнала отпора резања од његове средње вредности.

Мерни ланац за мерење отпора резања је приказан на слици 5.15. Састоји се од трокомпонентног динамометра KISTLER Тип 9265A1, мерног појачивача KISTLER Тип Ca5001, АД претварача Burb Brown тип 2000 и рачунара PC/AT. Аквизиција сигнала све три компоненте отпора резања је вршена са 300 Hz у временском интервалу од 10 секунди, применом софтвера LT/control v.5.02.

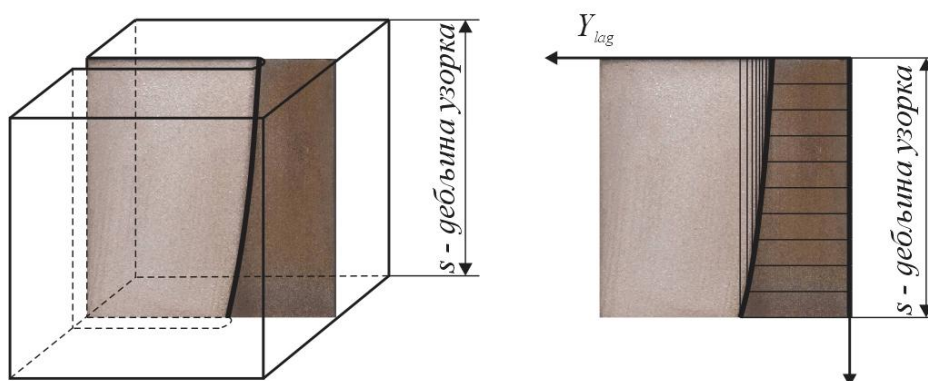


Слика 5.15. Део мерне опреме за експериментална истраживања отпора резања

## 5.7. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА

### 5.7.1. Предња линија реза

Да би се одредила предња линија реза, било је потребно мерити одступање абразивног воденог млаза  $Y_{lag}$ , од идеалне предње линије реза, слика 5.16. Одступање је мерено на десет места по дубини реза.



Слика 5.16. Мерње одступања абразивног воденог млаза

Да би се могло мерити одступање абразивног воденог млаза од идеалне предње линије реза, сечени су узорци од X5CrNi 18–10, дебљине 30 mm и ширине 30 mm. Узорци су расецани до дужине од 20 mm. На тој дужини реза је заустављан доток абразива, а одмах затим и машина. На тај начин је оцртана линија која показује путању по којој се кретао абразивни водени млаз. Након тога, узорци су расецани електроерозионом обрадом са жицом до краја. Површине узорка које су тако добијене су приказане у табели 5.4.

Приликом овог истраживања, параметри процеса обраде абразивним воденим млазом су били константни:


















- Материјал предмета обраде – X5CrNi 18–10
- Пречник водене млазнице –  $d_0 = 0.3 \text{ mm}$
- Пречник абразивне млазнице –  $d_f = 1.02 \text{ mm}$
- Растојање резне главе од предмета обраде –  $x_0 = 3 \text{ mm}$
- Дебљина предмета обраде –  $s = 30 \text{ mm}$

Мењани су следећи параметри процеса обраде абразивним воденим млазом:

- Брзина кретања резне главе –  $v_c$ : 10, 20, 30, 40, 50, 60 и 70 mm/min,
- Радни притисак –  $p$ : 205, 245, 290, 335 и 413 МПа и
- Проток абразива –  $m_a$ : 150, 200, 250, 300, 350 и 400 g/min.

У табелама 5.5., 5.6. и 5.7. су дате измерене вредности одступања абразивног воденог млаза од идеалне предње линије реза у зависности од промене параметара процеса обраде  $v_c$ ,  $p$  и  $m_a$ .

Табела 5.4. Узорци за одређивање предње линије реза

I					
	$v_{c1} = 10 \text{ mm/min}$	$v_{c2} = 20 \text{ mm/min}$	$v_{c3} = 30 \text{ mm/min}$	$v_{c4} = 40 \text{ mm/min}$	
					
	$v_{c5} = 50 \text{ mm/min}$	$v_{c6} = 60 \text{ mm/min}$	$v_{c7} = 70 \text{ mm/min}$		
Радни притисак $p = 413 \text{ MPa}$ Проток абразива $m_a = 400 \text{ g/min}$ Абразив – garnet #80					
II					
	$p_1 = 413 \text{ MPa}$	$p_2 = 335 \text{ MPa}$	$p_3 = 290 \text{ MPa}$	$p_4 = 245 \text{ MPa}$	$p_5 = 205 \text{ MPa}$
	Брзина резне главе $v_c = 35 \text{ mm/min}$ Протокабразива $m_a = 400 \text{ g/min}$ Абразив – garnet #80				
III					
	$m_{a1} = 350 \text{ g/min}$	$m_{a2} = 300 \text{ g/min}$	$m_{a3} = 250 \text{ g/min}$	$m_{a4} = 200 \text{ g/min}$	$m_{a5} = 150 \text{ g/min}$
	Радни притисак $p = 413 \text{ MPa}$ Брзина резне главе $v_c = 35 \text{ mm/min}$ Абразив – garnet #80				

Табела 5.5. Измерене вредности одстиуања абразивној воденој млази од идеалне њредње линије реза у зависности од њромене брзине резне ѓлаве

$v_c$ , mm/min	10	20	30	40	50	60	70
$h$ , mm	$Y_{lag}$ , mm						
0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.05628	0.10009	0.10385	0.0935	0.24782	0.27143	0.27681
6	0.12058	0.20605	0.22131	0.28171	0.40867	0.4959	0.50696
9	0.20876	0.33425	0.346	0.52277	0.66747	0.80639	0.84479
12	0.31438	0.4879	0.54307	0.80824	0.99978	1.25284	1.26874
15	0.46214	0.64305	0.76813	1.10449	1.41222	1.77634	1.80106
18	0.51479	0.88809	1.00522	1.55096	1.87828	2.30828	2.41576
21	0.62593	1.15173	1.31635	2.0997	2.50994	2.95754	3.16885
24	0.79992	1.43117	1.62041	2.62193	3.30834	3.67712	4.15193
27	0.97126	1.74992	2.00955	3.16995	4.19305	4.49258	5.10356
30	1.228	2.06073	2.25346	3.72458	4.89844	5.26979	5.98733

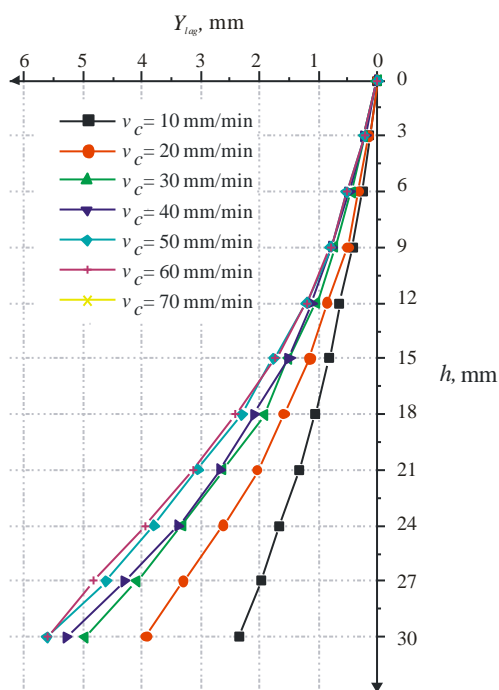
Табела 5.6. Измерене вредности одстиуања абразивној воденој млази од идеалне њредње линије реза у зависности од њромене радној њријиска

$p$ , МПа	413	335	290	245	205
$h$ , mm	$Y_{lag}$ , mm				
0	0	0	0	0	0
3	0.12704	0.12235	0.1454	0.18782	0.24768
6	0.2527	0.3127	0.41268	0.47786	0.53795
9	0.42241	0.54673	0.66858	0.78875	0.9177
12	0.64039	0.82552	1.02618	1.17759	1.6719
15	0.81822	1.2105	1.54755	1.672	2.64675
18	1.04642	1.64281	2.19631	2.33081	3.97325
21	1.34001	2.23044	2.94884	3.41319	5.26853
24	1.66254	2.96549	3.6556	4.47696	7.01014
27	1.98427	3.62422	4.26939	5.40957	26.7051
30	2.34503	4.46416	4.97164	6.42704	

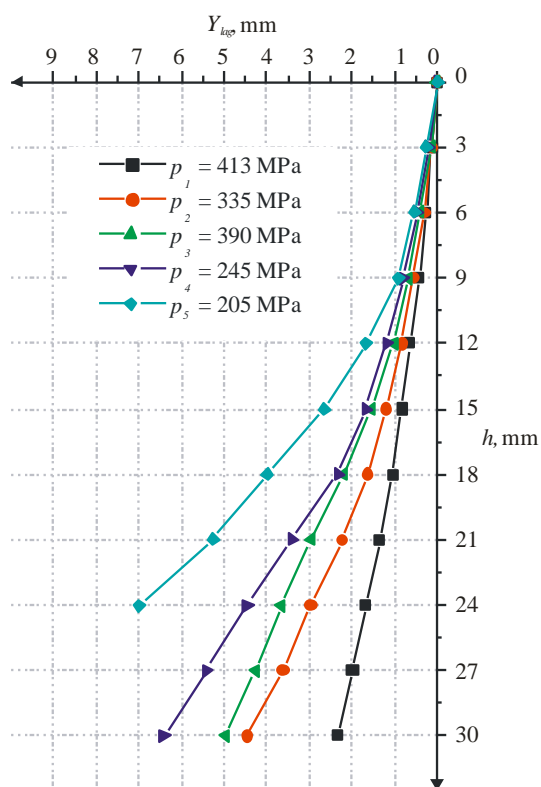
Табела 5.7. Измерене вредности одступања абразивног воденог млаза од идеалне предње линије реза у зависности од промене пројекта абразива

$m_a, \text{g/min}$	400	350	300	250	200	150
$h, \text{mm}$	$Y_{lag}, \text{mm}$					
0	0	0	0	0	0	0
3	0.127	0.13772	0.21726	0.2095	0.222	0.22081
6	0.25263	0.32393	0.43466	0.48827	0.52546	0.52434
9	0.42236	0.50142	0.7212	0.78162	0.78842	0.79629
12	0.64031	0.84531	1.03476	1.12952	1.19408	1.18942
15	0.81815	1.14495	1.50809	1.51006	1.7678	1.72972
18	1.04634	1.58903	1.91981	2.09515	2.30909	2.41706
21	1.33989	2.03338	2.63494	2.66896	3.06029	3.13558
24	1.66244	2.61083	3.32053	3.38097	3.79499	3.93275
27	1.98414	3.30096	4.09255	4.29608	4.61182	4.82932
30	2.34503	3.92639	4.96051	5.28956	5.61783	5.6145

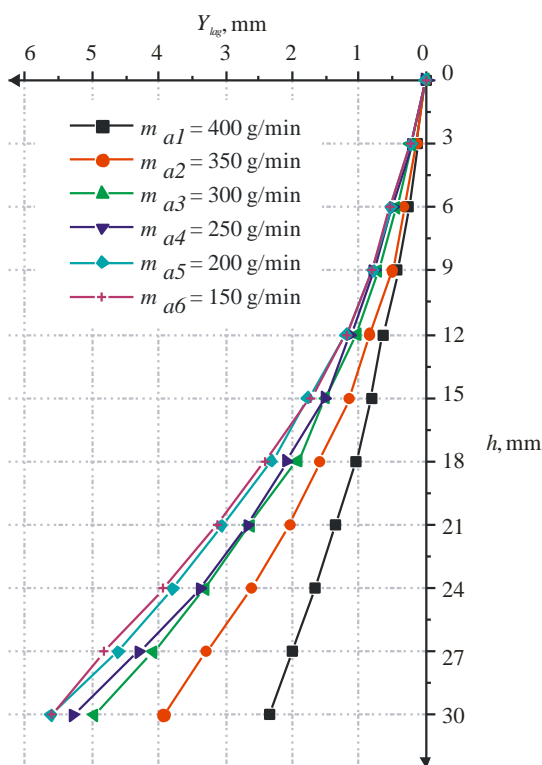
На основу ових резултата су нацртани дијаграми који показују утицај промене режима резања и дубине резања на одступање абразивног воденог млаза од идеалне предње линије реза, односно реалан изглед предње линије реза.



Слика 5.17. Утицај брзине резања и дубине резања на одступање абразивног воденог млаза од идеалне предње линије реза



Слика 5.18. Утицај радног притиска и дубине резања на предњу линију реза



Слика 5.19. Утицај притока абразива и дубине резања на предњу линију реза

Са дијаграма се уочава да са порастом дубине резања расте и одступање предње линије реза од идеалне. Такође, пораст брзине кретања резне главе има за последицу повећање одступања предње линије реза од идеалне предње линије реза. При обради са већим вредностима протока абразива и радног притиска, одступање предње линије реза од идеалне је мање.

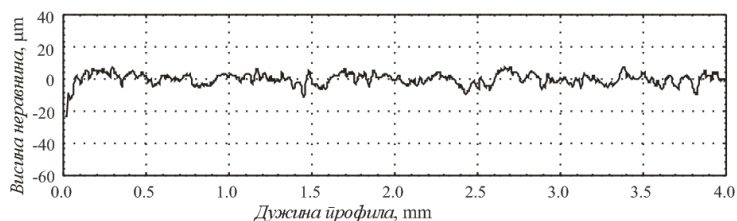
### 5.7.2. Храпавост обрађене површине

Као основни параметар за оцену храпавости обрађене површине усвојено је средње аритметичко одступање профила  $Ra$ . Храпавост обрађене површине је мерена на истим узорцима који су коришћени за одређивање предње линије реза. На овим узорцима је и снимана топографија обрађене површине на мерном месту 1 и мерном месту 2, слика 5.9.

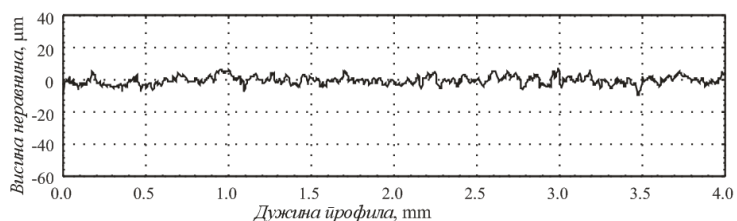
Храпавост је мерена и на узорцима који су коришћени за други део експерименталног истраживања. На овим узорцима је варирана дебљина узорака, радни притисак, проток абразива, брзина кретања резне главе, растојање резне главе од предмета обраде, као и врста материјала који је обрађиван.

На следећим сликама је приказана топографија обрађене површине узорака на мерном месту 1 и мерном месту 2, према слици 5.9., а који су коришћени у претходном испитивању.

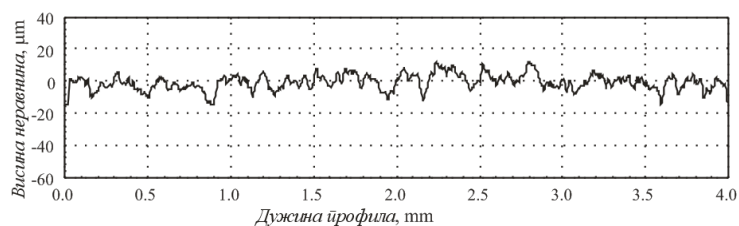
#### Топографије обрађених површина за узорке код којих је мењана вредност брзине резне главе



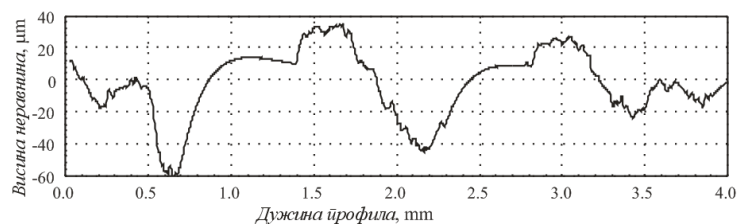
Слика 5.20. Топографија површине на мерном месту 1, узорак број 1,  $v_c = 10 \text{ mm/min}$



Слика 5.21. Топографија површине на мерном месту 2, узорак број 1,  $v_c = 10 \text{ mm/min}$

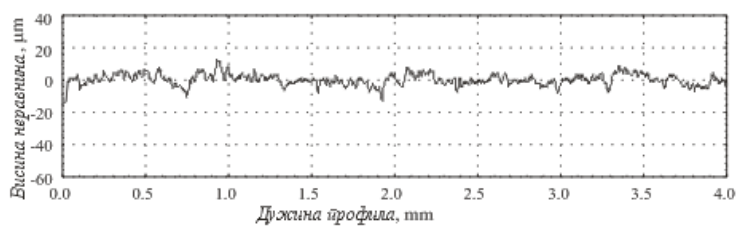


Слика 5.22. Топографија површине на мерном месту 1, узорак број 7,  $v_c = 70 \text{ mm/min}$

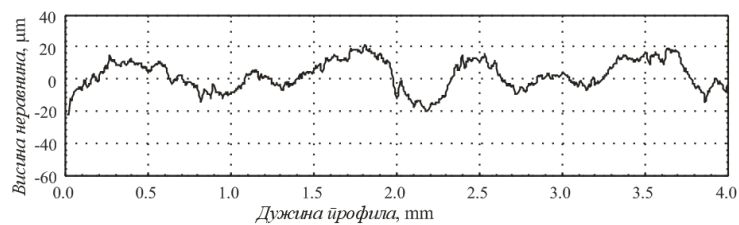


Слика 5.23. Топографија површине на мерном месту 2, узорак број 7,  $v_c = 70 \text{ mm/min}$

**Топографије обрађених површина за узорке код којих је мењана вредност радног притиска**

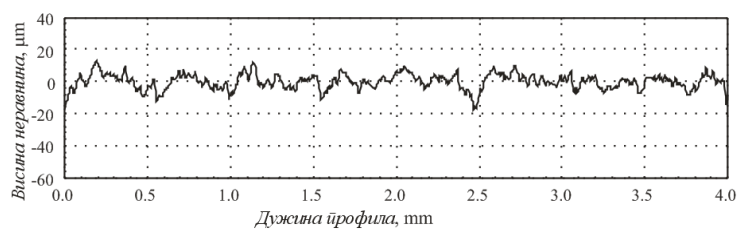


Слика 5.24. Топографија површине на мерном месту 1, узорак број 8,  $p = 413 \text{ MPa}$

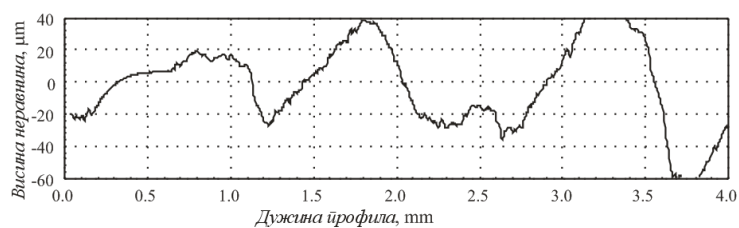


Слика 5.25. Топографија површине на мерном месту 2, узорак број 8,  $p = 413 \text{ MPa}$



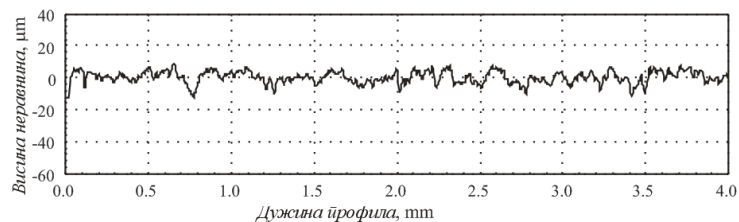


Слика 5.26. Топографија површине на мерном месту 1, узорак број 11,  $p = 245 \text{ MPa}$

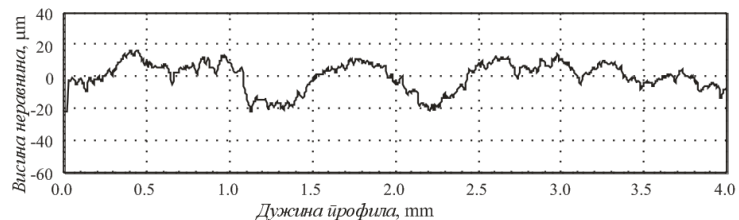


Слика 5.27. Топографија површине на мерном месту 2, узорак број 11,  $p = 245 \text{ MPa}$

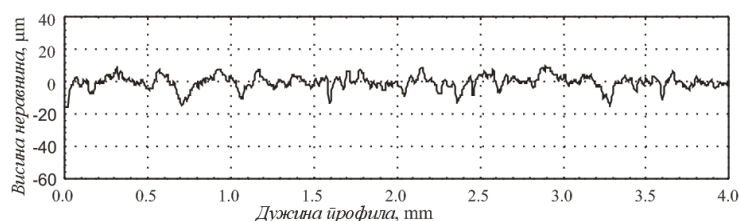
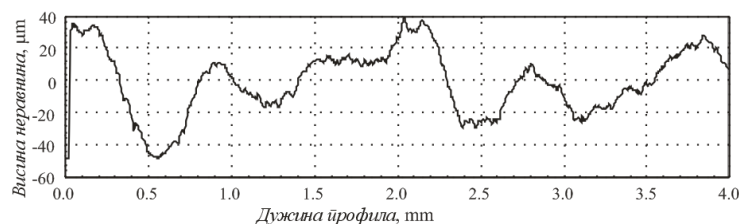
**Топографије обрађених површина за узорке код којих је мењана вредност протока абразива**



Слика 5.28. Топографија површине на мерном месту 1, узорак број 13,  $t_a = 350 \text{ g/min}$



Слика 5.29. Топографија површине на мерном месту 2, узорак број 13,  $t_a = 350 \text{ g/min}$


 Слика 5.30. Тојографија површине на мерном месџу 1, узорак број 17,  $m_a = 150$  g/min

 Слика 5.31. Тојографија површине на мерном месџу 2, узорак број 17,  $m_a = 150$  g/min

У табели 5.8. су дате измерене вредности  $R_a$  на мерним местима 1 и 2. Узорци у овој табели су од челика X5CrNi 18–10, дебљине 30 mm, и коришћени су за истраживање одступања предње линије реза. Храпавост је мерена на више места по дужини узорака а на истој дубини резања. Приказане вредности су у ствари средње вредности измерених параметара храпавости обрађене површине  $R_a$ .

 Табела 5.8. Вредности  $R_a$ 

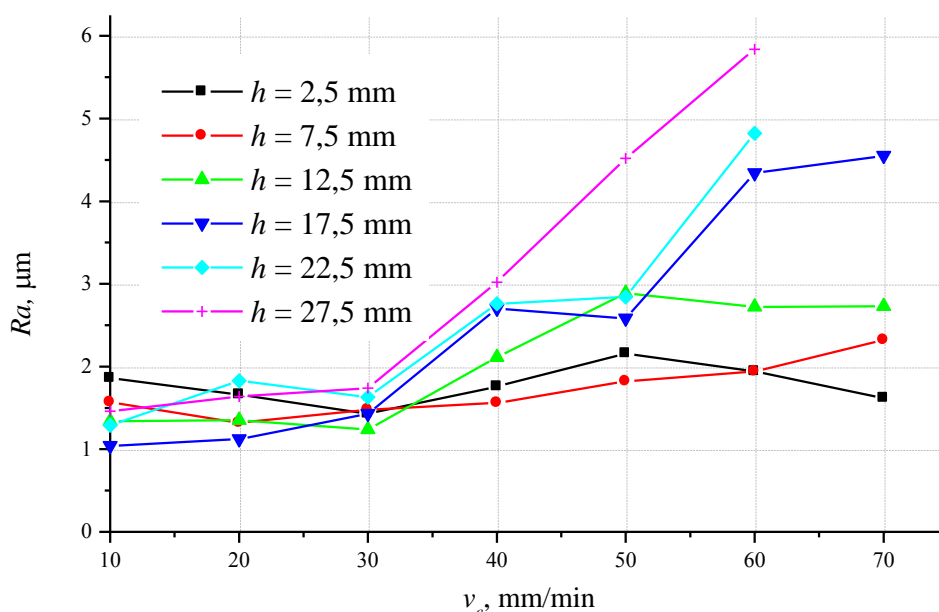
Узорак број	$p$ , МПа	$v_c$ , mm/min	$m_a$ , g/min	$R_a$ , $\mu\text{m}$	
				Мерно месџо 1	Мерно месџо 2
1.	413	10	400	2.9	2.22
2.	413	20	400	3.17	3.7
3.	413	30	400	3.06	4.31
4.	413	40	400	2.82	8.3
5.	413	50	400	3.69	8.7
6.	413	60	400	3.71	11.46
7.	413	70	400	4.54	14.8
8.	413	35	400	2.67	6.78
9.	335	35	400	3.22	13.2
10.	290	35	400	3.7	17.1
11.	245	35	400	3.06	20.6
12.	205	35	400	3.29	/
13.	413	35	350	2.88	7.3
14.	413	35	300	3.29	7.01
15.	413	35	250	3.11	4.82
16.	413	35	200	3.06	9.9
17.	413	35	150	3.2	16.8

У табели 5.9. су дате вредности храпавости обрађене површине за различите вредности брзине резне главе. Храпавост обрађене површине је мерена на различитим дубинама реза. Узорци који су коришћени за ова мерења су од Х5CrNi 18–10, дебљине 30 mm. Храпавост је мерена на више места на истој дубини резања, а приказане вредности су средње вредности.

Табела 5.9. Вредности  $Ra$  за различите вредности брзине резне главе и дубине реза  $h$

$v_c$ , mm/min		$h$ , mm					
		2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5
$v_{c1}$	10	1.86	1.57	1.34	1.04	1.29	1.46
$v_{c2}$	20	1.66	1.32	1.35	1.12	1.83	1.64
$v_{c3}$	30	1.43	1.48	1.24	1.43	1.63	1.74
$v_{c4}$	40	1.76	1.56	2.11	2.7	2.76	3.02
$v_{c5}$	50	2.16	1.82	2.89	2.58	2.84	4.52
$v_{c6}$	60	1.94	1.94	2.72	4.34	4.82	5.84
$v_{c7}$	70	1.62	2.32	2.73	4.55	–	–

Утицај дубине реза и брзине кретања резне главе на храпавост обрађене површине је приказан на слици 5.32.

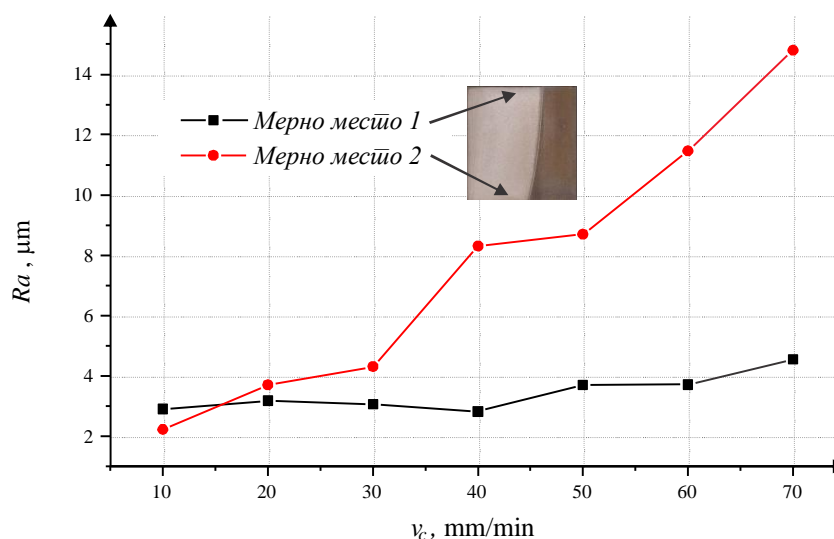


Слика 5.32. Утицај брзине резне главе и дубине реза на храпавости обрађене површине

На основу ових измерених вредности, нацртани су дијаграми који показују утицај брзине кретања резне главе, радног притиска и протока абразива на параметар храпавости обрађене површине  $Ra$  на мерном месту 1 и на мерном месту 2.

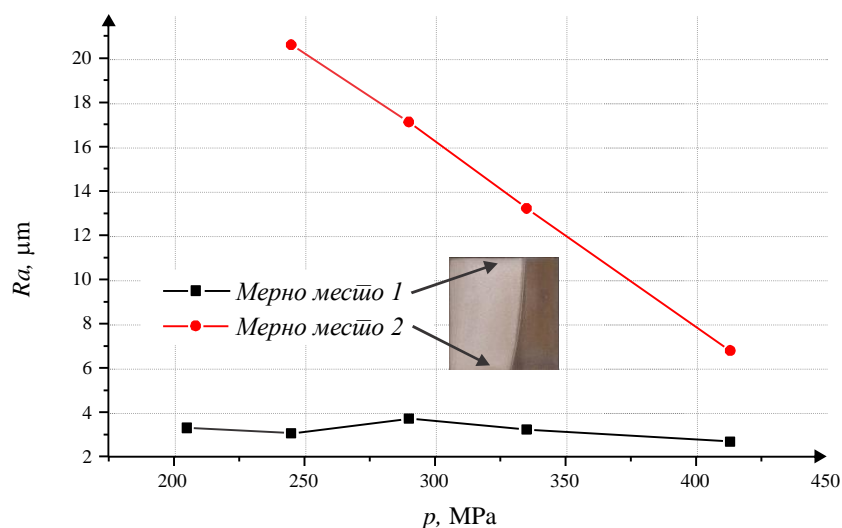
Са слике 5.33. се уочава да са порастом брзине кретања резне главе долази до пораста параметра храпавости обрађене површине,  $Ra$ . Такође, промена  $Ra$  је значајнија

на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде – мерном месту 2, док је на мерном месту 1, пораст параметра  $Ra$  са порастом брзине резне главе скоро занемарљив.



Слика 5.33. Утицај брзине кретања резне главе на харапавости обрађене површине

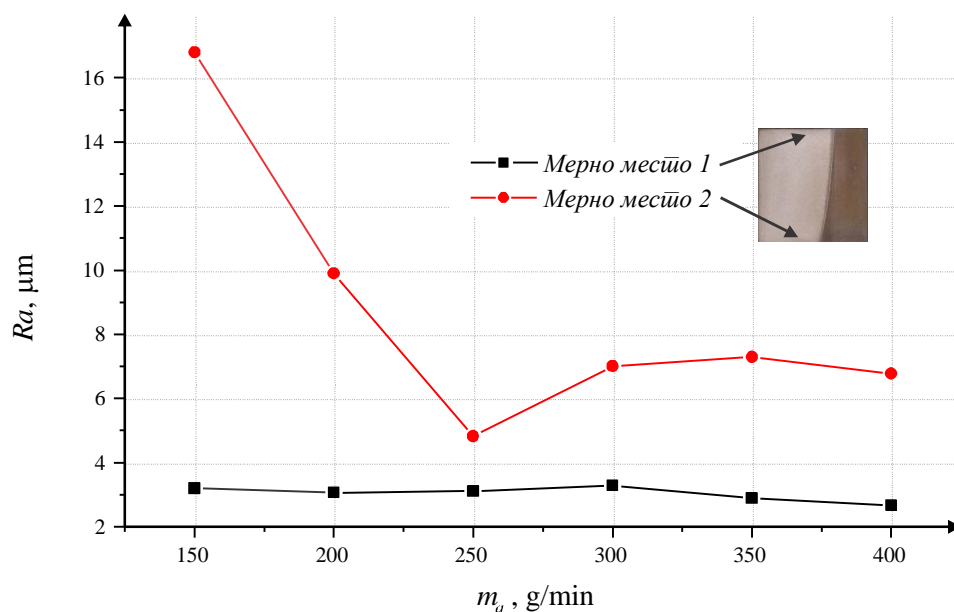
Обрада абразивним воденим млазом са већим вредностима радног притиска има за последицу знатно мање вредности параметра харапавости обрађене површине  $Ra$  на мерном месту 2, слика 5.34. Параметар харапавости обрађене површине  $Ra$  на мерном месту 1 такође опада са порастом радног притиска, али је та промена доста мања него на мерном месту 2.



Слика 5.34. Утицај радног притиска на харапавости обрађене површине

На слици 5.35. је приказан утицај протока абразива на харапавост обрађене површине, односно на параметар  $Ra$ . Обрада абразивним воденим млазом са мањим протоком абразива даје површине које имају веће вредности параметра  $Ra$ . Са порастом протока абразива, вредност параметра  $Ra$  опада. Оваква промена се уочава до неке

вредности протока абразива. Након те вредности протока абразива долази до поновног благог раста вредности параметра  $Ra$ .



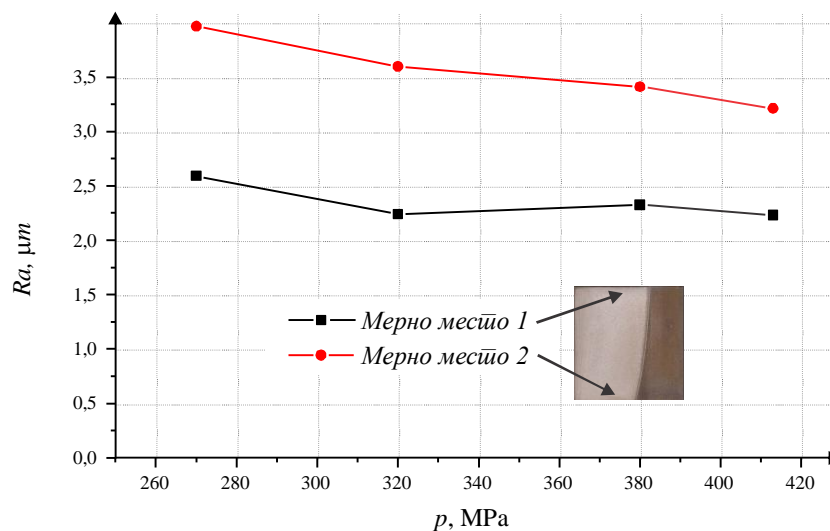
Слика 5.35. Утицај протока абразива на храпавост обрађене површине

У табели 5.10. су дате вредности параметра храпавости обрађене површине  $Ra$  за другу групу узорака. И код ових узорака, храпавост је мерена на више места по дужини на истој дубини реза.

Табела 5.10. Вредности параметра храјавости обрађене површине Ra

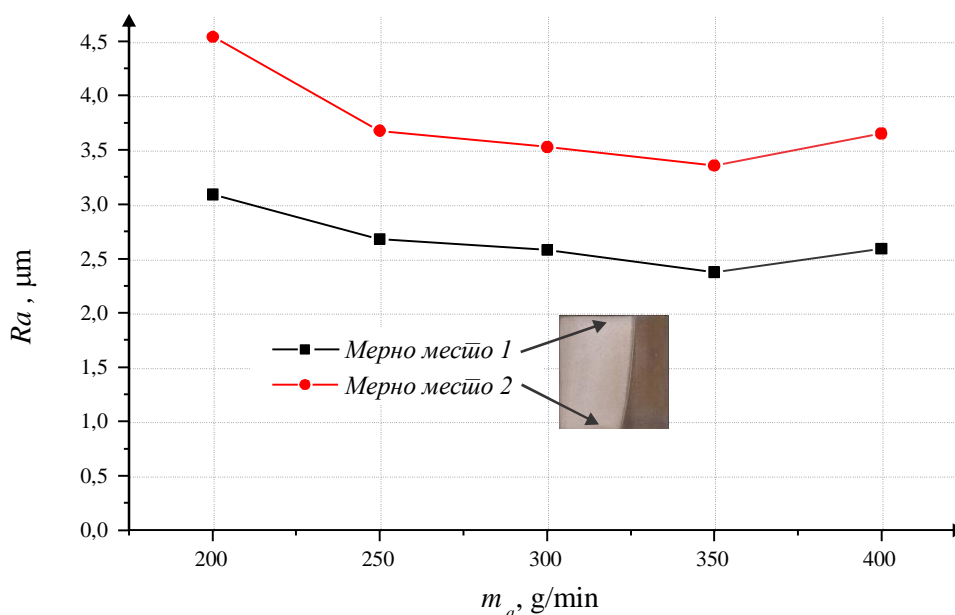
Узорак број	$p$ , MPa	$v_c$ , mm/min	$m_a$ , g/min	$s$ , mm	Материјал	$x_0$ , mm	Ra, $\mu\text{m}$	
							Мерно место 1	Мерно место 2
1.	270	50	400	20	X5CrNi 18-10	3	2.59	3.965
2.	320	50	400	20	X5CrNi 18-10	3	2.24	3.595
3.	380	50	400	20	X5CrNi 18-10	3	2.325	3.41
4.	413	50	400	20	X5CrNi 18-10	3	2.23	3.21
5.	413	50	200	20	X5CrNi 18-10	3	3.09	4.54
6.	413	50	250	20	X5CrNi 18-10	3	2.68	3.675
7.	413	50	300	20	X5CrNi 18-10	3	2.58	3.525
8.	413	50	350	20	X5CrNi 18-10	3	2.375	3.355
9.	413	50	400	20	X5CrNi 18-10	3	2.59	3.65
10.	413	30	400	20	X5CrNi 18-10	3	2.28	2.93
11.	413	50	400	20	X5CrNi 18-10	3	2.35	3.125
12.	413	70	400	20	X5CrNi 18-10	3	2.72	3.445
13.	413	90	400	20	X5CrNi 18-10	3	2.765	3.535
14.	413	110	400	20	X5CrNi 18-10	3	2.66	4.16
15.	320	50	300	20	X5CrNi 18-10	3	2.905	3.765
16.	270	30	200	20	X5CrNi 18-10	3	2.98	3.575
17.	413	70	400	20	C 45	3	3.2	3.425
18.	320	50	300	20	C 45	3	2.67	3.815
19.	270	30	200	20	C 45	3	2.975	3.38
20.	413	70	400	20	S 235 JRG2	3	3.195	3.36
21.	320	50	300	20	S 235 JRG2	3	3.8	3.815
22.	270	30	200	20	S 235 JRG2	3	3.375	3.295
23.	413	150	400	5	X5CrNi 18-10	3	3.685	3.515
24.	413	100	400	5	X5CrNi 18-10	3	3.2	2.915
25.	413	70	400	5	X5CrNi 18-10	3	3.6	3.22
26.	413	100	400	10	X5CrNi 18-10	3	3.045	3.32
27.	413	70	400	10	X5CrNi 18-10	3	3.37	3.225
28.	413	50	400	10	X5CrNi 18-10	3	3.48	2.965
29.	413	100	400	15	X5CrNi 18-10	3	2.975	3.56
30.	413	70	400	15	X5CrNi 18-10	3	2.7	3.19
31.	413	50	400	15	X5CrNi 18-10	3	2.705	3.455
32.	413	100	400	25	X5CrNi 18-10	3	2.975	7.15
33.	413	70	400	25	X5CrNi 18-10	3	3.26	4.48
34.	413	50	400	25	X5CrNi 18-10	3	2.49	3.855
35.	413	70	400	25	X5CrNi 18-10	2	2.405	3.19
36.	413	70	400	25	X5CrNi 18-10	3	2.7	4.00
37.	413	70	400	25	X5CrNi 18-10	4	3.19	5.23

Са дијаграма приказаног на слици 5.36., се уочава да са порастом притиска долази до смањења храпавости обрађене површине на мерном месту 1 и на мерном месту 2. Уочава се и да је разлика у вредностима параметра храпавости обрађене површине  $Ra$  на мерним местима 1 и 2, мања за веће вредности радног притиска.

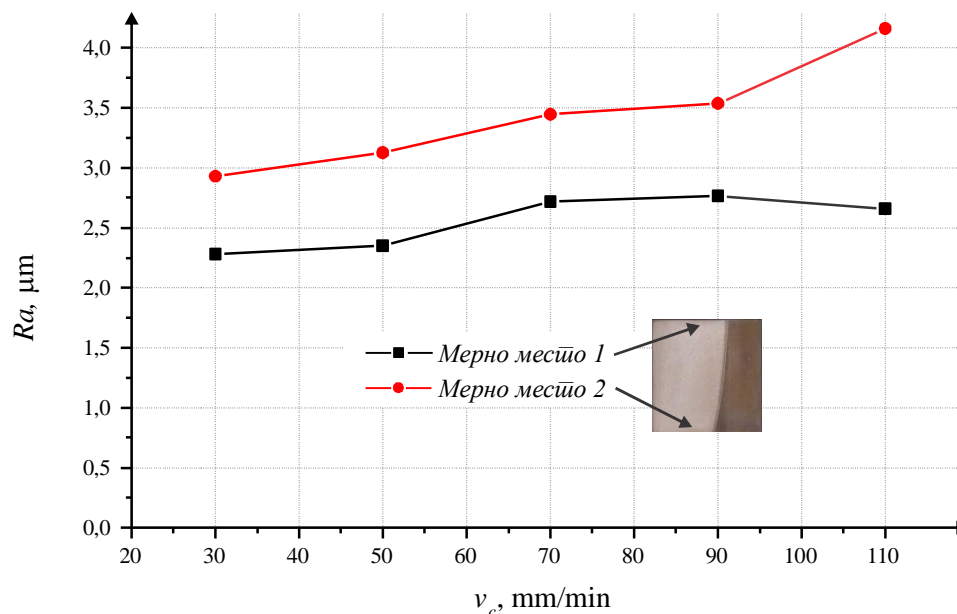


Слика 5.36. Утицај радног притиска на храпавост обрађене површине

Када је у питању утицај протока абразива на храпавост обрађене површине, са дијаграма, слика 5.37. се види да при обради са већим вредностима протока абразива долази до смањења параметра храпавости обрађене површине,  $Ra$  али само до вредности протока абразива од приближно 350 g/min. При даљем повећању вредности протока абразива долази до повећања вредности параметра храпавости обрађене површине  $Ra$ . Овакав тренд промене је исти на мерном месту 1 и мерном месту 2.



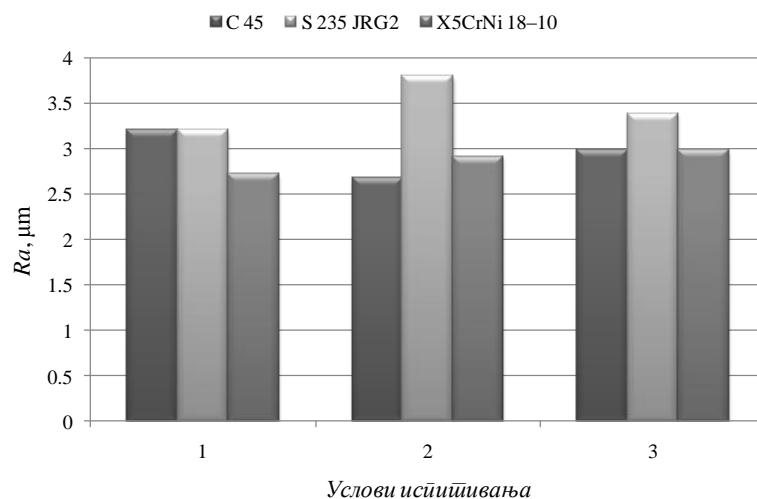
Слика 5.37. Утицај протока абразива на храпавост обрађене површине



Слика 5.38. Утицај брзине кретања резне главе на храпавости обрађене површине

Са порастом брзине кретања резне главе долази до повећања храпавости обрађене површине, слика 5.38. и на мерном месту 1 и мерном месту 2. Што је брзина кретања резне главе већа, разлика у вредностима параметра  $Ra$  се повећава.

Са дијаграма приказаних на сликама 5.39. и 5.40. може се упоредити параметар храпавости  $Ra$  за различите врсте челика при истим условима испитивања. На дијаграмима се уочава да постоји разлика у вредностима  $Ra$  за различите челике.



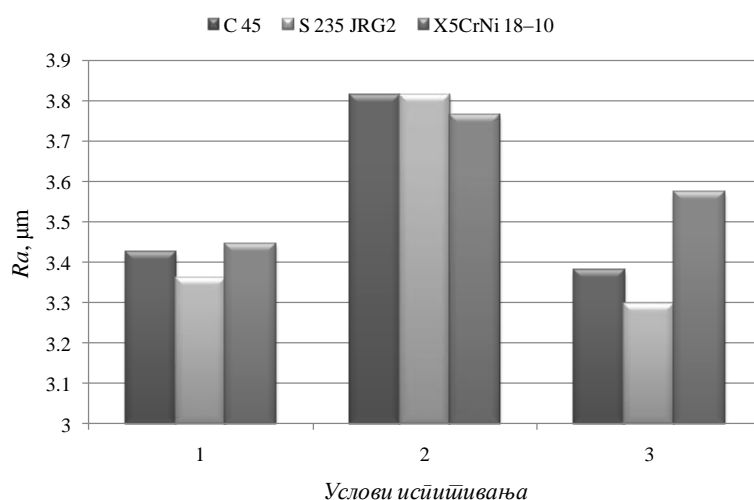
Услови испитивања 1:  $p = 413$  МПа;  $m_a = 400$  g/min;  $v_c = 70$  mm/min

Услови испитивања 2:  $p = 320$  МПа;  $m_a = 300$  g/min;  $v_c = 50$  mm/min

Услови испитивања 3:  $p = 270$  МПа;  $m_a = 200$  g/min;  $v_c = 30$  mm/min

Слика 5.39. Храпавости обрађене површине на мерном месту 1 за различите врсте челика



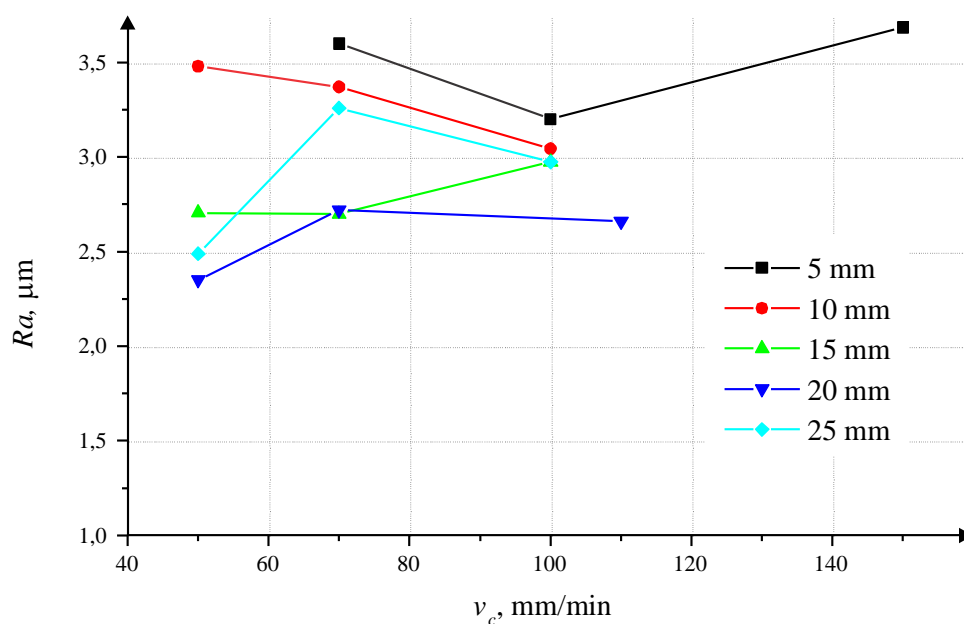


Услови испитивања 1:  $p = 413 \text{ MPa}$ ;  $m_a = 400 \text{ g/min}$ ;  $v_c = 70 \text{ mm/min}$   
 Услови испитивања 2:  $p = 320 \text{ MPa}$ ;  $m_a = 300 \text{ g/min}$ ;  $v_c = 50 \text{ mm/min}$   
 Услови испитивања 3:  $p = 270 \text{ MPa}$ ;  $m_a = 200 \text{ g/min}$ ;  $v_c = 30 \text{ mm/min}$

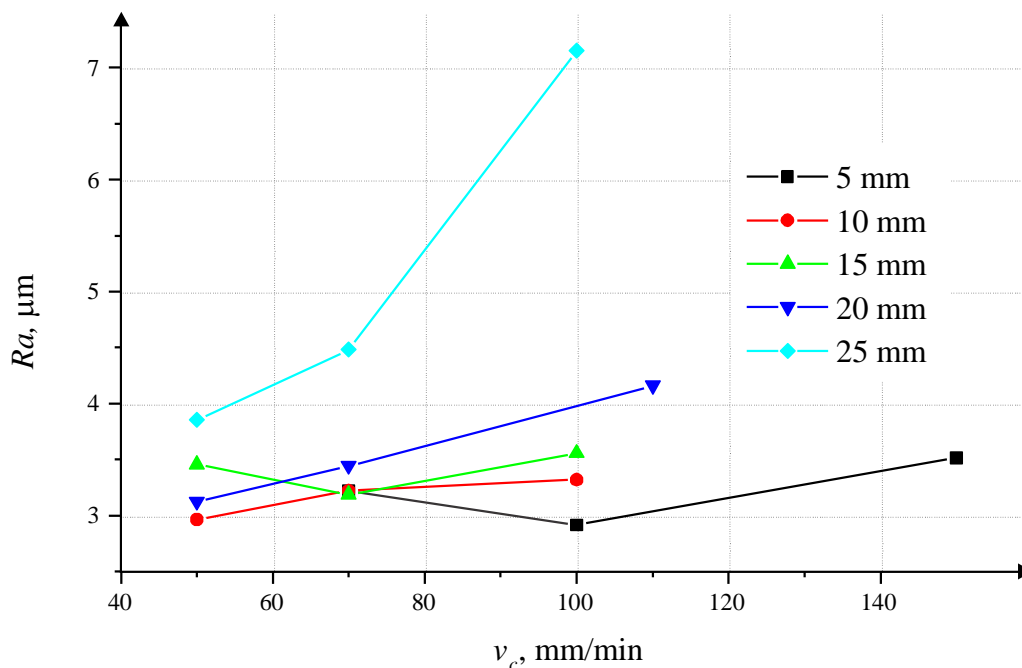
Слика 5.40. Храпавости обрађене површине на мерном месту 2 за различите врсте челика

Однос храпавости за различите материјале није исти за све услове испитивања, а мења се и са променом мерних места.

На сликама 5.41. и 5.42. су дијаграми који показују утицај дебљине материјала који се обрађује и брзине кретања резне главе на храпавост обрађене површине. Са дијаграма се уочава да је храпавост обрађене површине на мерном месту 1, за све дебљине обрађиваног материјала и за све брзине резне главе, приближно иста и налази се у интервалу од  $2 \div 4 \mu\text{m}$ . Када се посматра дијаграм на коме је приказана храпавост обрађене површине на мерном месту 2, слика 5.42., види се да је за мање вредности брзине резне главе вредност параметра храпавости обрађене површине  $Ra$  скоро иста за све дебљине испитиваног челика. Са порастом брзине резне главе долази до пораста параметра  $Ra$ . Вредности параметра  $Ra$  на мерном месту 2 за исте вредности брзине резне главе су много веће код дебљих материјала.



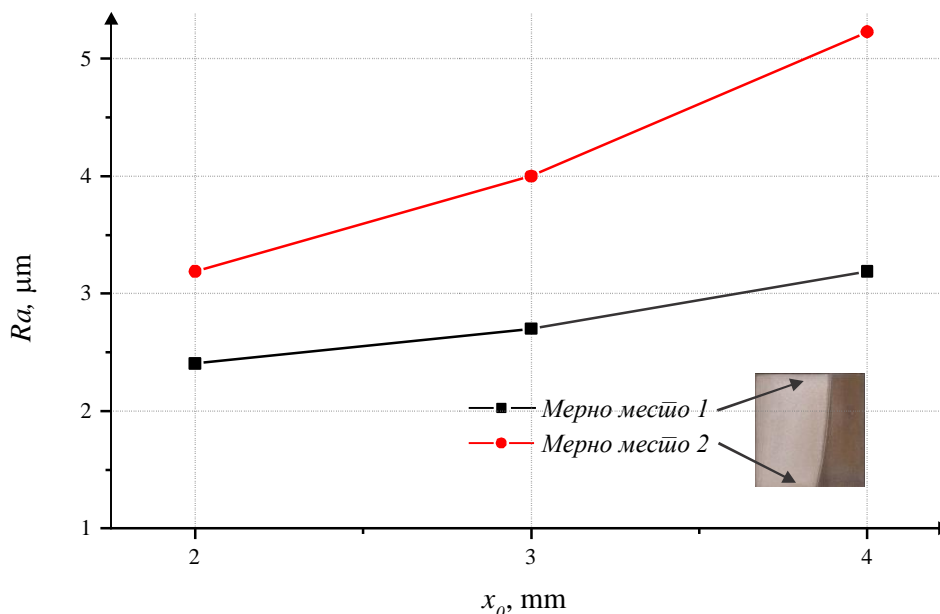
Слика 5.41. Храпавости обрађене површине на мерном месту 1 за различитије дебљине челика X5CrNi 18–10



Слика 5.42. Храпавости обрађене површине на мерном месту 2 за различитије дебљине челика X5CrNi 18–10

Промена храпавости обрађене површине у зависности од промене растојања резне главе од предмета обраде је приказана на слици 5.43. Са слике се може уочити да са повећањем растојања резне главе од предмета обраде долази до повећања храпавости обрађене површине. Такође, уочава се да на мерном месту 2 са повећањем растојања

резне главе од обрађиваног материјала долази до знатно веће промене вредности параметра храпавости обрађене површине  $Ra$  него што је то случај на мерном месту 1.



Слика 5.43. Утицај растојања резне главе од предмета обраде на храпавост обрађене површине

### 5.7.3. Хабање абразивне млазнице

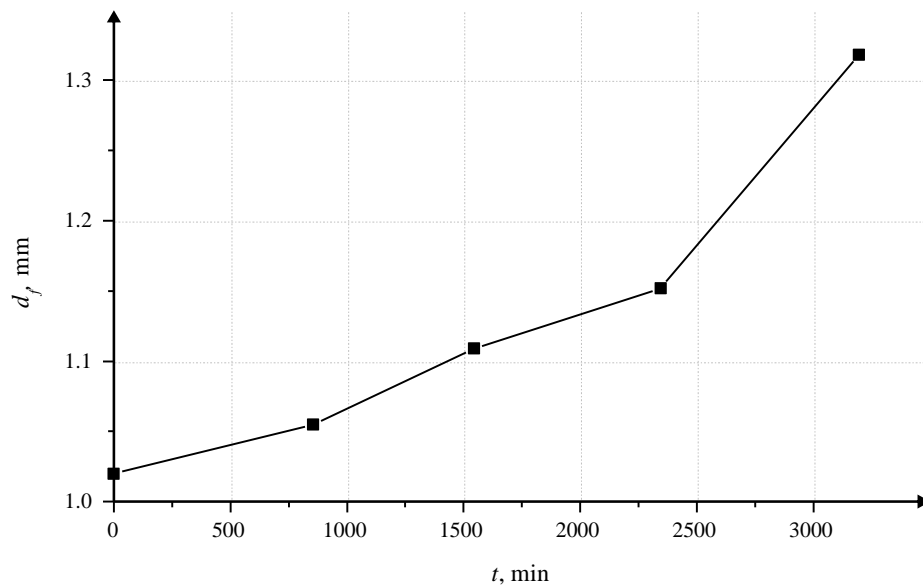
У овом делу експерименталног истраживања је праћено хабање абразивне млазнице и утицај хабања на храпавост обрађене површине. Тип цеви за усмеравање млаза која је коришћена за експеримент је ROSTEC<sup>®</sup>100. Као основни параметар за оцену хабања абразивне млазнице, узет је пречник излазног отвора -  $d_f$ . Нова абразивна млазница је постављена у резну главу. Пречник излазног отвора абразивне млазнице је измерен пре почетка обраде, на новој абразивној млазници. Потом је тај исти пречник мерен у временским интервалима од 10 до 15 часова. Према подацима произвођача, радни век оваквих цеви је око 120 часова.

Са новом абразивном млазницом је исечен један узорак од челика X5CrNi 18–10, дебљине 10 mm, на коме је измерена храпавост обрађене површине. Са том млазницом је даље вршена обрада. У четири временска интервала, када је процес производње то дозвољавао, вршено је сечење узорака од челика X5CrNi 18–10, дебљине 10 mm. Сви узорци су резани са радним притиском  $p = 350$  MPa, брзина кретања резне главе је била  $v_c = 120$  mm/min, а проток абразива  $m_a = 306$  g/min. Абразив који је коришћен је гарнет mash#80. Абразивна млазница је демонтирана са резне главе и мерен је пречник излазног отвора. Подаци који су добијени мерењем излазног пречника абразивне млазнице су приказани у табели 5.11.

Табела 5.11. Вредности излазног пречника цеви за усмеравање млаза,  $d_f$  у функцији времена резања

$t$ , min	0	855	1545	2345	3195
$d_f$ , mm	1.02	1.055	1.109	1.152	1.318

Зависност промене излазног пречника абразивне млазнице од времена које је абразивна млазница провела у раду је приказана на слици 5.44.



Слика 5.44. Промена излазног пречника абразивне млазнице са временом [74]

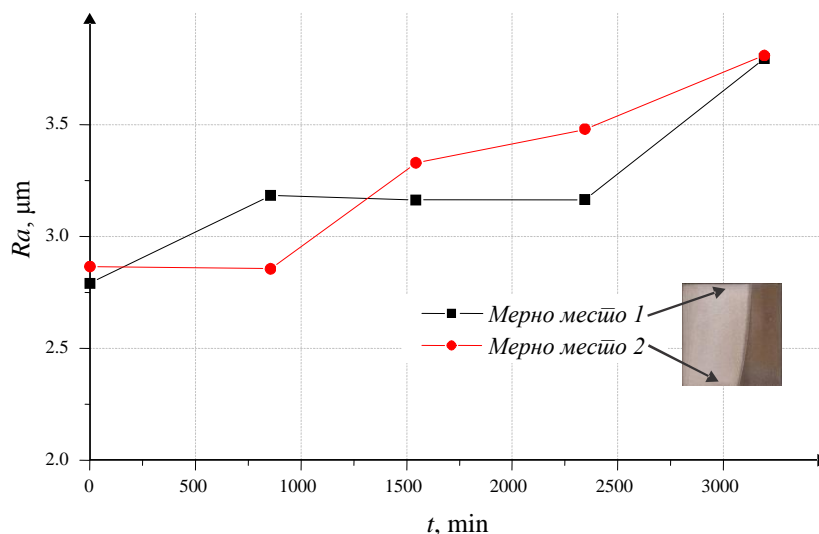
Пречник излазног отвора млазнице се у току времена повећао, слика 5.44. За приближно педесет радних сати, што је мање од половине радног века абразивне млазнице, пречник се повећао за скоро тридесет процената.

Вредности за параметар храпавости  $Ra$ , за пет узорака, на мерним местима 1 и 2 су дате у табели 5.12.

Табела 5.12. Вредности параметра  $Ra$  у функцији времена резања

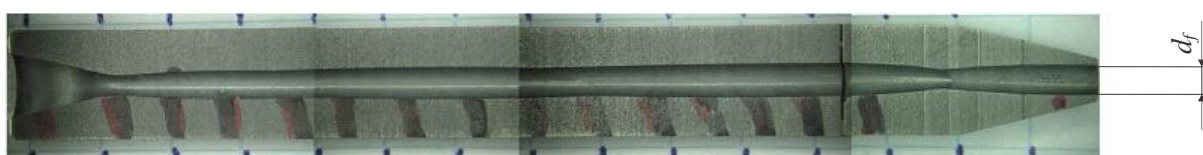
$t$ , min	$Ra$ , $\mu\text{m}$	
	Мерно место 1	Мерно место 2
0	2.79	2.864
855	3.182	2.854
1545	3.162	3.328
2345	3.164	3.478
3195	3.794	3.808

Промена храпавости у зависности од времена који је абразивна млазница провела у раду је приказана на слици 5.45. Током времена долази до пораста вредности параметра храпавости обрађене површине  $Ra$  на оба мерна места, односно и на улазу и на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде. Између вредности параметра храпавости обрађене површине  $Ra$  за мерна места 1 и 2 је за поједина мерења незнатна јер је дебљина узорка била доста мала.



Слика 5.45. Промена  $Ra$  у зависности од времена које је абразивна млазница извршила у раду

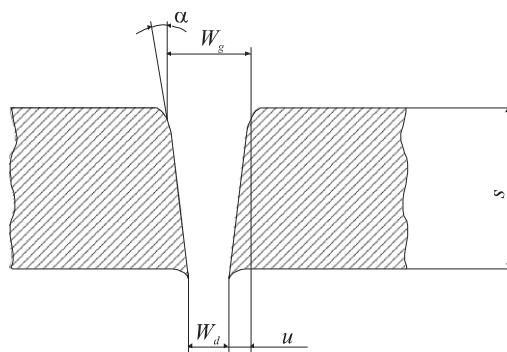
Након завршеног експерименталног истраживања, абразивна млазница је расечена по дужини да би се могло видети хабање унутрашњег отвора, слика 5.46. На унутрашњем отвору абразивне млазнице се уочава валовито хабање и дивергентно хабање. То значи да абразивна и водена млазница нису добро центриране.



Слика 5.46. Уздужни пресек похабане абразивне млазнице [74]

#### 5.7.4. Геометрија реза

Геометрија реза који настаје при обради абразивним воденим млазом је дефинисана ширином реза на мерном месту 1 -  $W_g$ , на мерном месту 2 -  $W_d$ , нагибом реза  $u$  и углом нагиба реза  $\alpha$ , слика 5.47.



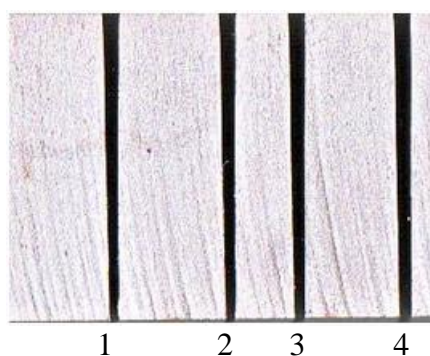
Слика 5.47. Карактеристичке геометрије реза при обради абразивним воденим млазом

Након сечења узорака вршено је мерење ширине реза на мерном месту 1 и мерном месту 2. На основу измерених вредности су израчунате вредности за нагиб реза и угао нагиба реза. Ове вредности су приказане у следећим табелама.

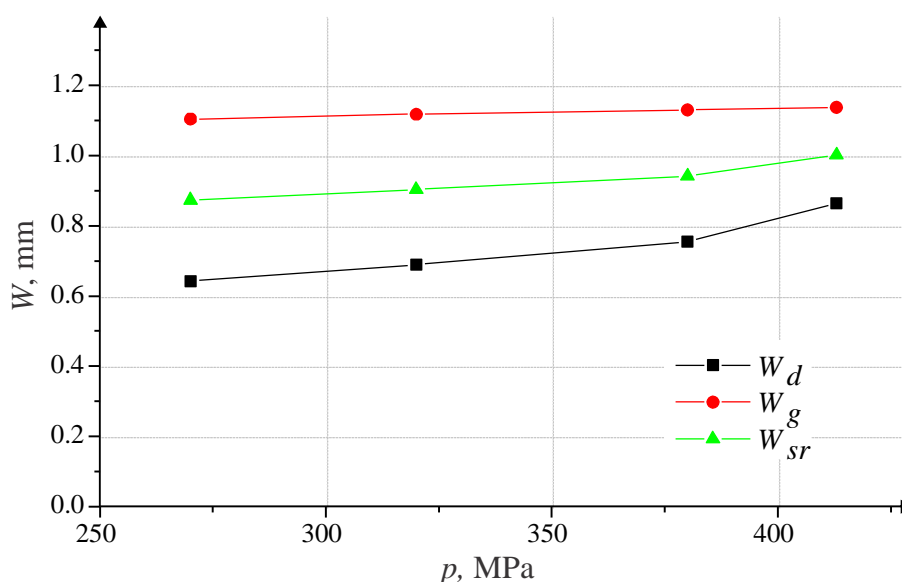
Табела 5.13. Вредности карактеристике реза за различите вредности радног притиска

$m_a$ , g/min	$v_c$ , mm/min	Р.бр. реза	$p$ , МПа	$W_d$ , mm	$W_g$ , mm	$W_{sr}$ , mm	$u$ , mm	$\alpha$ , °
400	50	1.	270	0.642	1.104	0.873	0.231	0.662
		2.	320	0.689	1.118	0.9035	0.2145	0.614
		3.	380	0.754	1.130	0.942	0.188	0.538
		4.	413	0.865	1.137	1.001	0.136	0.3896

На слици 5.48. је приказан изглед реза у зависности од промене радног притиска. Сваки рез је обележен према редном броју у табели 5.13.



Слика 5.48. Изглед реза за различите вредности радног притиска (табела 5.13)

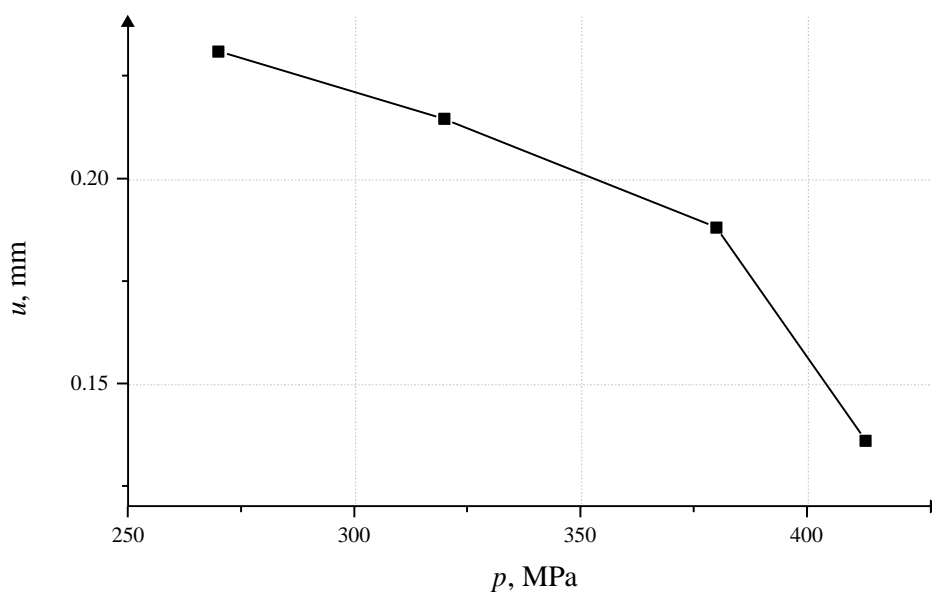


Слика 5.49. Утицај радног притиска на ширину реза [7]

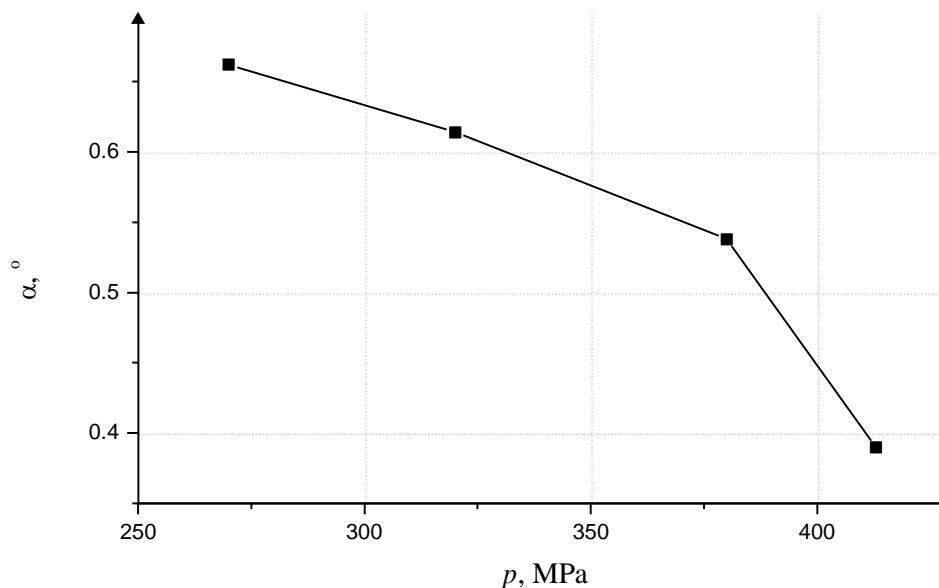
На слици 5.49. је приказан утицај радног притиска на ширину реза на мерном месту 1 и мерном месту 2. Са дијаграма се види да са порастом радног притиска долази

до пораста ширине реза. Такође, уочава се да је за веће вредности радног притиска разлика у ширини реза на мерном месту 1 и 2 мања него за мање вредности радног притиска.

На сликама 5.50. и 5.51. је приказан утицај радног притиска на нагиб реза и угао нагиба реза. Уочава се да са порастом радног притиска долази до смањења нагиба реза и угла нагиба реза. Промене на овим дијаграмима су у складу са дијаграмом приказаним на слици 5.49.



Слика 5.50. Утицај радног притиска на нагиб реза



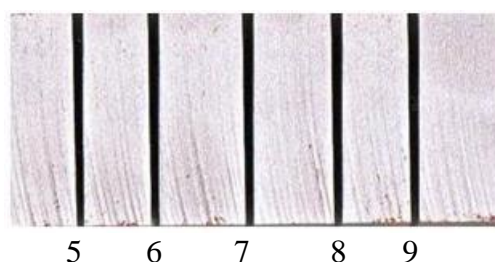
Слика 5.51. Утицај радног притиска на угао нагиба реза [7]

У табели 5.14. су дате вредности измерених вредности карактеристика реза за различите вредности протока абразива.

Табела 5.14. Вредности карактеристике реза за различите вредности протока абразива

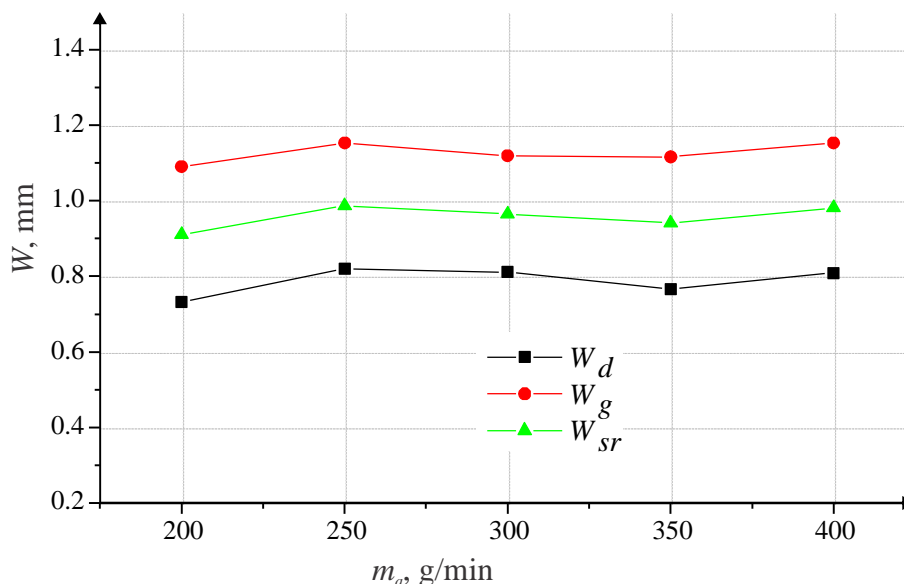
$\rho$ , МПа	$v_c$ , mm/min	Р.бр. реза	$m_a$ , g/min	$W_d$ , mm	$W_g$ , mm	$W_{sr}$ , mm	$u$ , mm	$\alpha$ , °
413	50	5.	200	0.732	1.090	0.911	0.179	0.513
		6.	250	0.820	1.153	0.9865	0.1665	0.477
		7.	300	0.811	1.119	0.965	0.154	0.441
		8.	350	0.766	1.116	0.941	0.175	0.501
		9.	400	0.809	1.153	0.981	0.172	0.493

На слици 5.52. је приказан изглед реза у зависности од промене протока абразива. Резови су обележени редним бројевима датим у табели 5.14.



Слика 5.52. Изглед реза за различите вредности протока абразива (табела 5.14)

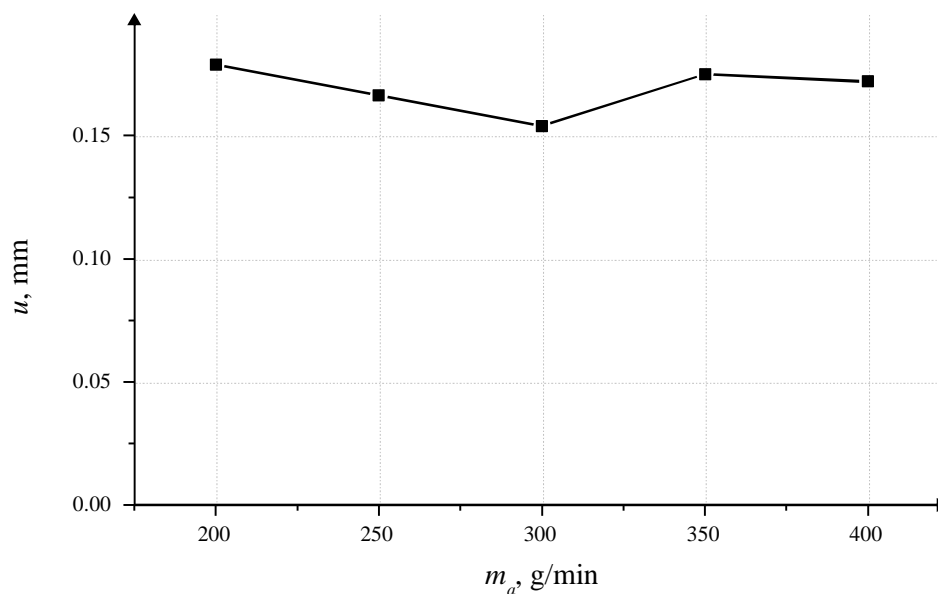
На слици 5.53. је приказан утицај протока абразива на ширину реза на мерном месту 1 и мерном месту 2, као и средња вредност ширине реза.



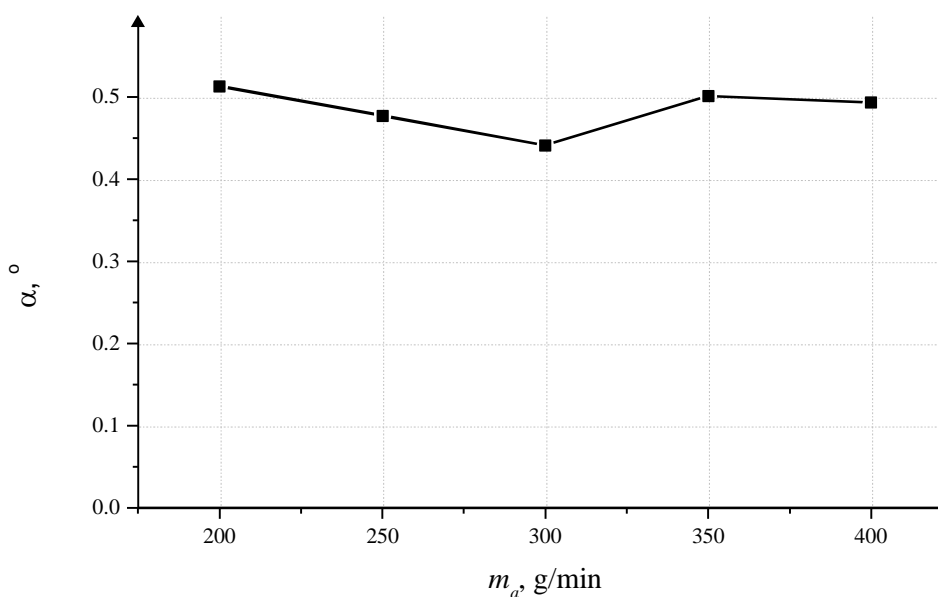
Слика 5.53. Утицај протока абразива на ширину реза [7]

Са дијаграма се види да са променом протока абразива не долази до значајне, промене ширине реза. Такође, за све вредности протока абразива, разлика у ширини реза на мерном месту 1 и мерном месту 2 је скоро константна.





Слика 5.54. Утицај протока абразива на најиб реза



Слика 5.55. Утицај протока абразива на угао најиба реза [7]

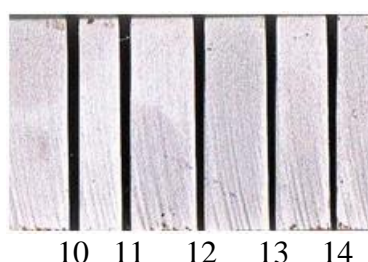
Утицај протока абразива на нагиб реза и угао нагиба реза је приказан на сликама 5.54. и 5.55. Са дијаграма се види да су вредности нагиба реза и угла нагиба реза за све вредности протока абразива скоро константне, што је у складу са дијаграмом приказаним на слици 5.53.

У табели 5.15. су дате вредности измерених вредности карактеристика реза за различите вредности брзине кретања резне главе.

Табела 5.15. Вредности карактеристике реза за различите вредности брзине кретања резне главе

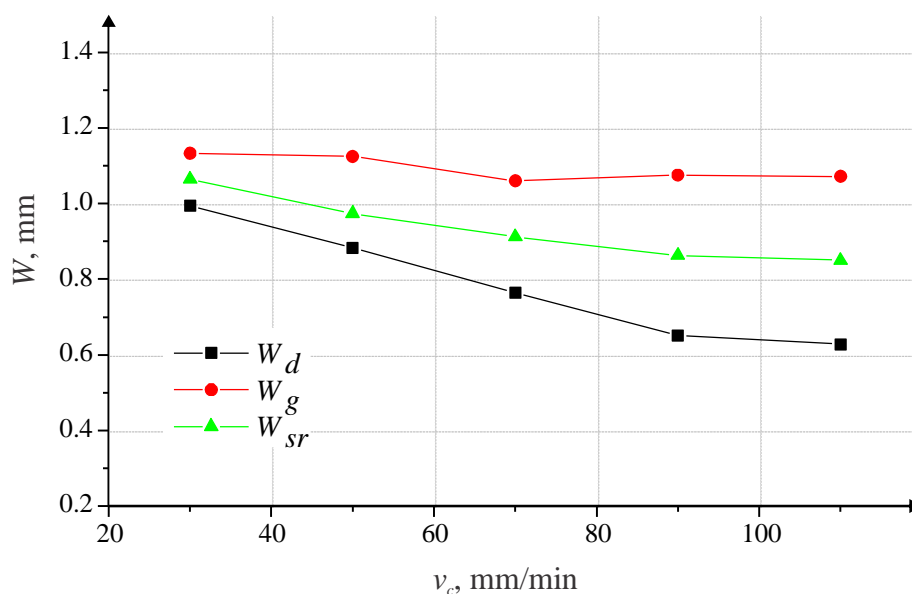
$p$ , МПа	$m_a$ , g/min	Р.бр. реза	$v_c$ , mm/min	$W_d$ , mm	$W_g$ , mm	$W_{sr}$ , mm	$u$ , mm	$\alpha$ , °
413	400	10.	30	0.995	1.133	1.064	0.069	0.198
		11.	50	0.883	1.125	0.974	0.121	0.347
		12.	70	0.764	1.060	0.912	0.148	0.424
		13.	90	0.651	1.075	0.863	0.212	0.607
		14.	110	0.628	1.072	0.85	0.222	0.636

На слици 5.56. је приказан изглед реза у зависности од промене брзине кретања резне главе. Испод сваког реза је обележен одговарајући редни број, према табели 5.15.

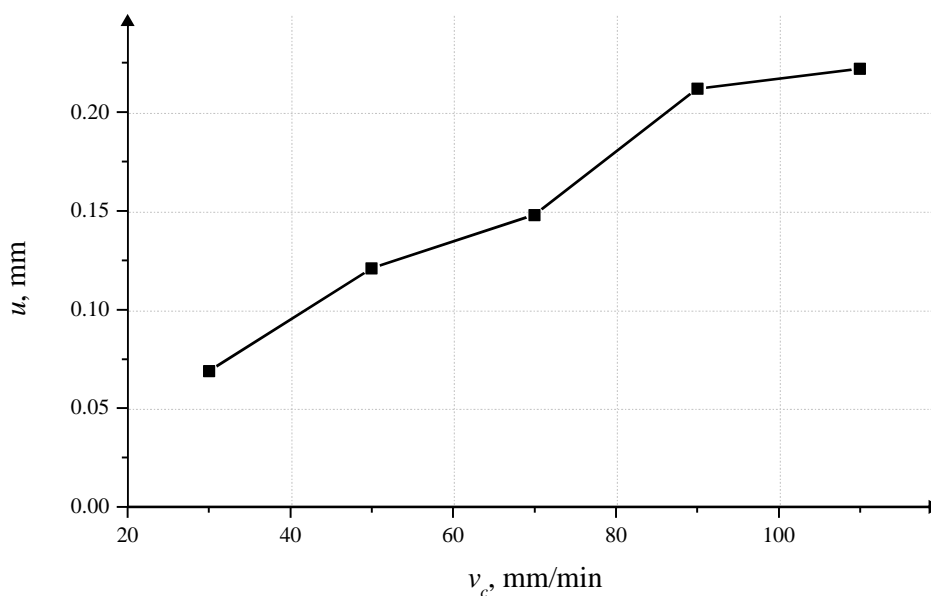


Слика 5.56. Изглед реза за различите вредности брзине кретања резне главе (таб.5.15)

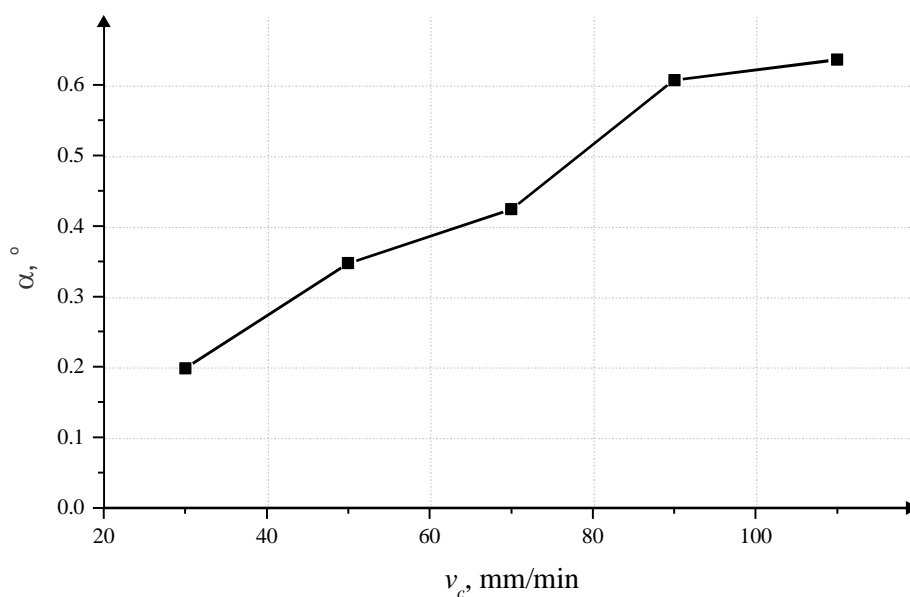
Утицај брзине кретања резне главе на ширину реза на мерном месту 1 и мерном месту 2 је приказан на слици 5.57. Са дијаграма се види да са порастом брзине кретања резне главе долази до смањења ширине реза на мерном месту 1 и мерном месту 2. Смањење ширине реза на мерном месту 2 је значајније у односу на смањење ширине реза на мерном месту 1. Такође, са порастом брзине кретања резне главе долази до повећања разлике у ширини реза на мерном месту 1 и 2. То указује на повећање нагиба реза, односно угла нагиба реза.



Слика 5.57. Утицај брзине резне главе на ширину реза [7]



Слика 5.58. Утицај брзине резне главе на најиб реза



Слика 5.59. Утицај брзине резне главе на угао најиба реза [7]

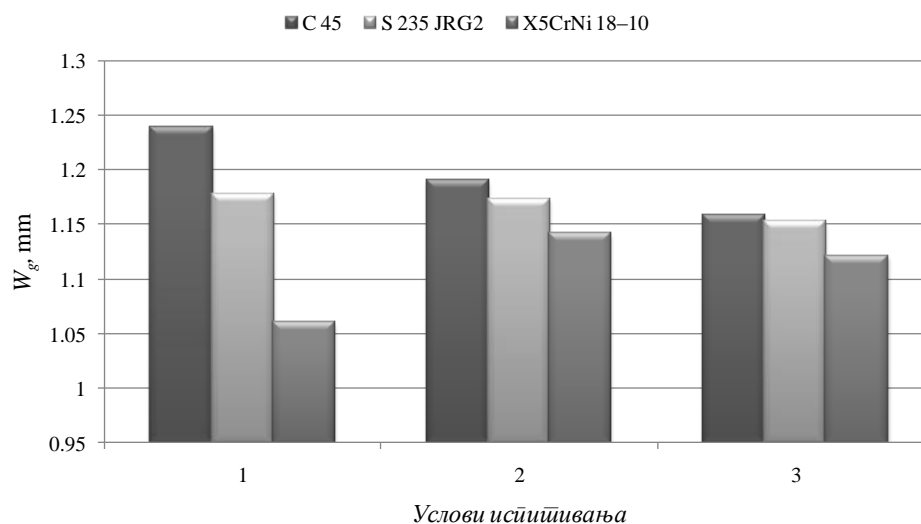
На сликама 5.58. и 5.59. је приказан утицај брзине кретања резне главе на промену нагиба реза и угла нагиба реза. Са дијаграма се види да са повећањем брзине кретања резне главе долази до повећања нагиба реза и угла нагиба реза.

У табели 5.16. су дате вредности карактеристика реза за различите материјале. Различити материјали дебљине 20 mm су обрађивани са три различита режима резања. За сваки материјал и одговарајуће параметре процеса обраде су мерене карактеристике реза, табела 5.16.

Табела 5.16. Вредности карактеристике реза за различите материјале

X5CrNi 18–10 # 20							
$p$ , МПа	$m_a$ , g/min	$v_c$ , mm/min	$W_d$ , mm	$W_g$ , mm	$W_{sr}$ , mm	$u$ , mm	$\alpha$ , °
413	400	70	0.764	1.060	0.912	0.148	0.424
320	300	50	0.718	1.142	0.93	0.212	0.607
270	200	30	0.758	1.121	0.9395	0.1815	0.52
C 45 # 20							
$p$ , МПа	$m_a$ , g/min	$v_c$ , mm/min	$W_d$ , mm	$W_g$ , mm	$W_{sr}$ , mm	$u$ , mm	$\alpha$ , °
413	400	70	0.819	1.239	1.029	0.21	0.602
320	300	50	0.788	1.190	0.989	0.201	0.576
270	200	30	0.858	1.159	1.0085	0.1505	0.431
S 235 JRG2 # 20							
$p$ , МПа	$m_a$ , g/min	$v_c$ , mm/min	$W_d$ , mm	$W_g$ , mm	$W_{sr}$ , mm	$u$ , mm	$\alpha$ , °
413	400	70	0.780	1.178	0.979	0.199	0.57
320	300	50	0.768	1.173	0.9705	0.2025	0.58
270	200	30	0.798	1.153	0.9755	0.1775	0.508

На слици 5.60. је приказана промена ширине реза на мерном месту 1, у зависности од врсте челика који се обрађује. Са дијаграма се види да је за челик X5CrNi 18–10 најмања ширина реза, док је код челика C 45 ширина реза највећа. Вредности ширине реза за челик S 235 JRG2 су између вредности за C 45 и X5CrNi 18–10. Овакав однос ширина реза је непромењен за све режими резања.



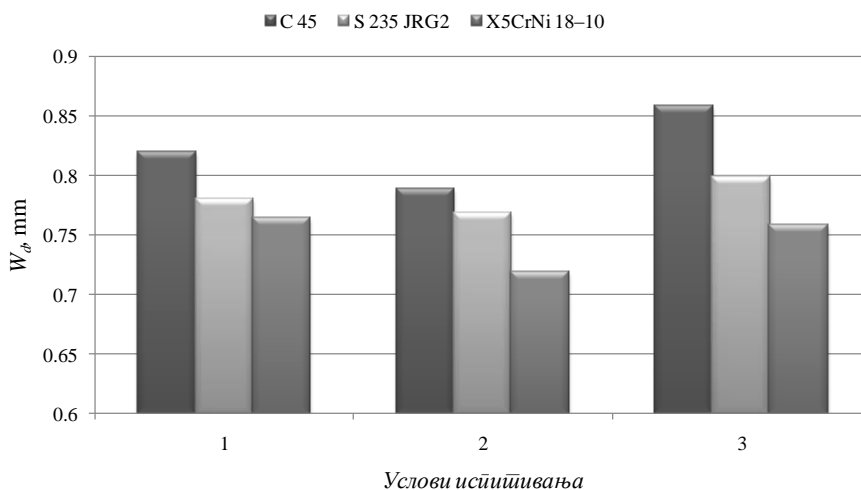
Услови испитивања 1:  $p = 413$  МПа;  $m_a = 400$  g/min;  $v_c = 70$  mm/min

Услови испитивања 2:  $p = 320$  МПа;  $m_a = 300$  g/min;  $v_c = 50$  mm/min

Услови испитивања 3:  $p = 270$  МПа;  $m_a = 200$  g/min;  $v_c = 30$  mm/min

Слика 5.60. Ширина реза на мерном месту 1 за различите врсте челика

На сликама 5.61. и 5.62. су приказане промене ширине реза на мерном месту 2 и средња вредност ширине реза у зависности од челика који се обрађује. Са дијаграма се види да важи иста правилност као и за ширину реза на мерном месту 1, наиме, највећа ширина реза је за челик С 45, док је најмања ширина реза за материјал Х5СrNi 18–10.

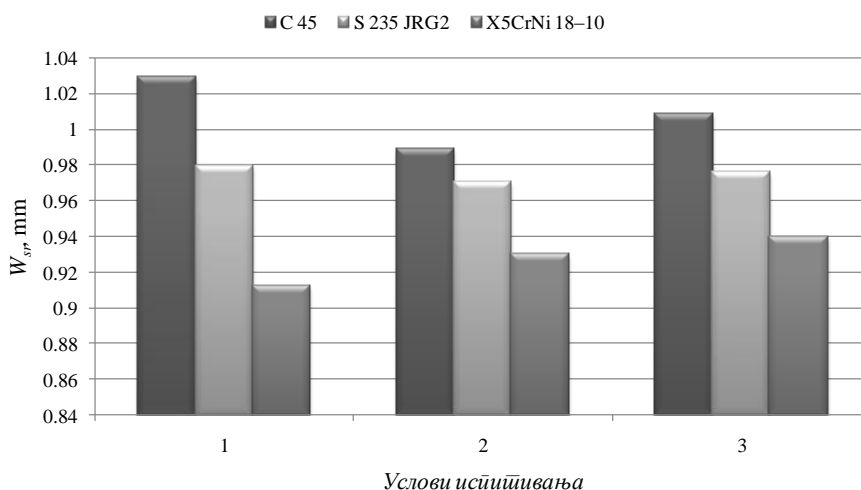


Услови испитивања 1:  $p = 413$  МПа;  $m_a = 400$  g/min;  $v_c = 70$  mm/min

Услови испитивања 2:  $p = 320$  МПа;  $m_a = 300$  g/min;  $v_c = 50$  mm/min

Услови испитивања 3:  $p = 270$  МПа;  $m_a = 200$  g/min;  $v_c = 30$  mm/min

Слика 5.61. Ширина реза на мерном месту 2 за различите врсте челика



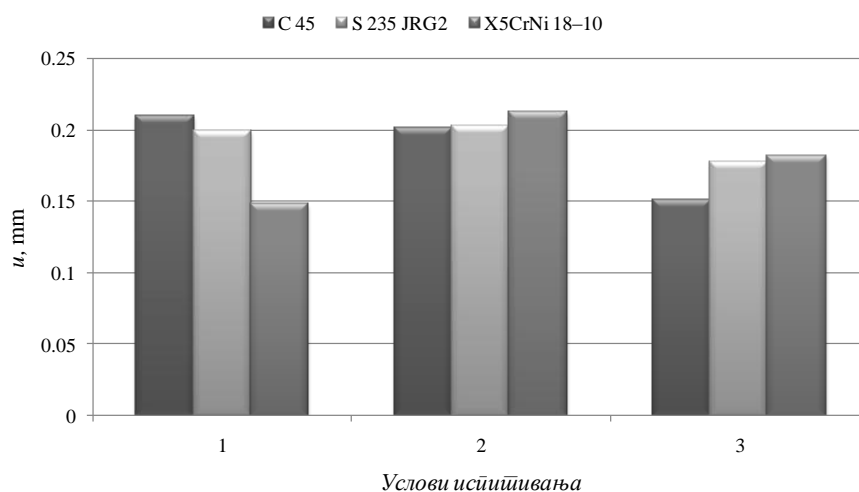
Услови испитивања 1:  $p = 413$  МПа;  $m_a = 400$  g/min;  $v_c = 70$  mm/min

Услови испитивања 2:  $p = 320$  МПа;  $m_a = 300$  g/min;  $v_c = 50$  mm/min

Услови испитивања 3:  $p = 270$  МПа;  $m_a = 200$  g/min;  $v_c = 30$  mm/min

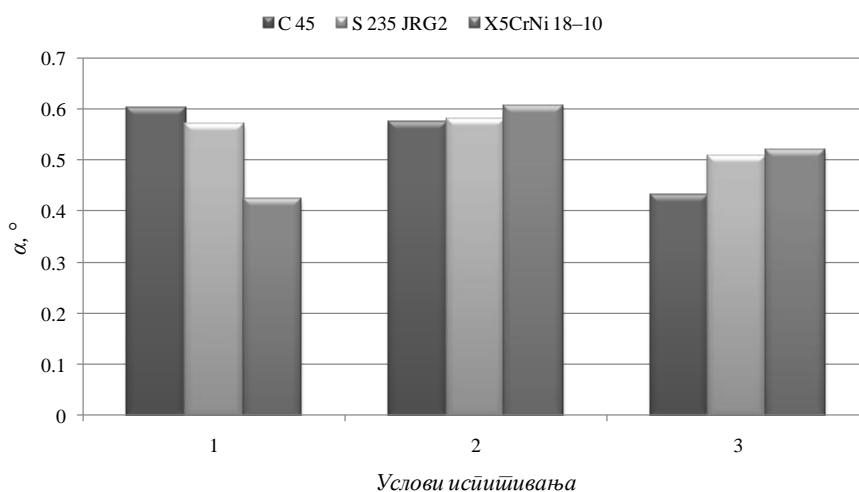
Слика 5.62. Средња ширина реза за различите врсте челика

Промена нагиб реза и угао нагиба реза за различите врсте челика су приказани на сликама 5.63. и 5.64. На дијаграмима се уочава да је при обради са највећим вредностима параметара процеса обраде, најмањи нагиб и угао нагиба реза за челик X5CrNi 18–10, док је за челик С 45 нагиб реза и угао нагиба реза највећи. При обради са средњим вредностима параметара, нагиб реза и угао нагиба реза су приближно исти за све материјале. При обради са најнижим вредностима параметара услова испитивања нагиб реза и угао нагиба реза за челик X5CrNi 18–10 су највећи, док су за челик С 45 најмањи. То указује да на ширину реза, осим параметара процеса обраде, утичу и карактеристике материјала који се обрађује (тврдоћа, затезна чврстоћа и сл.), при чему свака карактеристика има различит утицај.



Услови испитивања 1:  $p = 413$  МПа;  $m_a = 400$  g/min;  $v_c = 70$  mm/min  
 Услови испитивања 2:  $p = 320$  МПа;  $m_a = 300$  g/min;  $v_c = 50$  mm/min  
 Услови испитивања 3:  $p = 270$  МПа;  $m_a = 200$  g/min;  $v_c = 30$  mm/min

Слика 5.63. Нагиб реза за различите врсте челика



Услови испитивања 1:  $p = 413$  МПа;  $m_a = 400$  g/min;  $v_c = 70$  mm/min  
 Услови испитивања 2:  $p = 320$  МПа;  $m_a = 300$  g/min;  $v_c = 50$  mm/min  
 Услови испитивања 3:  $p = 270$  МПа;  $m_a = 200$  g/min;  $v_c = 30$  mm/min

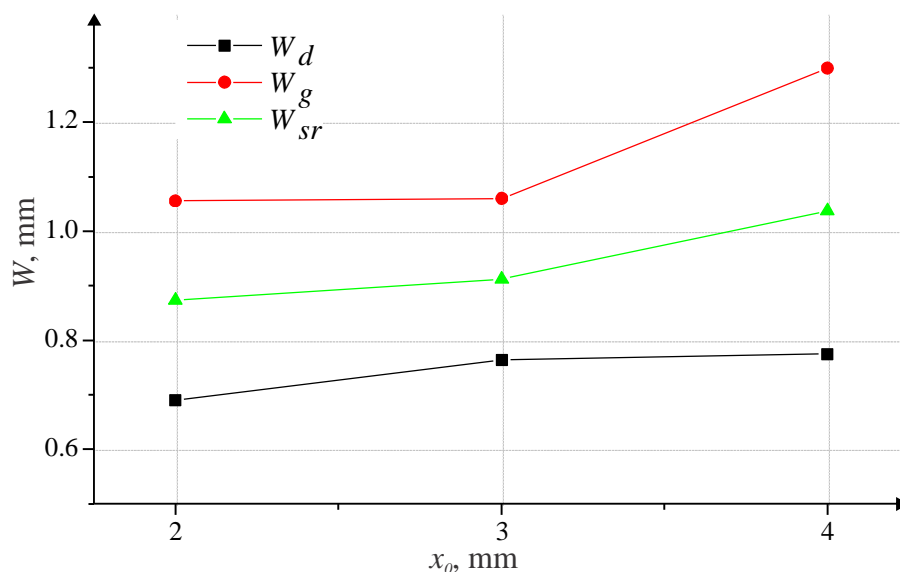
Слика 5.64. Угао нагиба реза за различите врсте челика

У табели 5.17. су дате вредности ширине реза након обраде са различитим растојањима резне главе од материјала који се обрађује. Материјал који је коришћен за ово испитивање је челик X5CrNi 18–10 дебљине 25 mm.

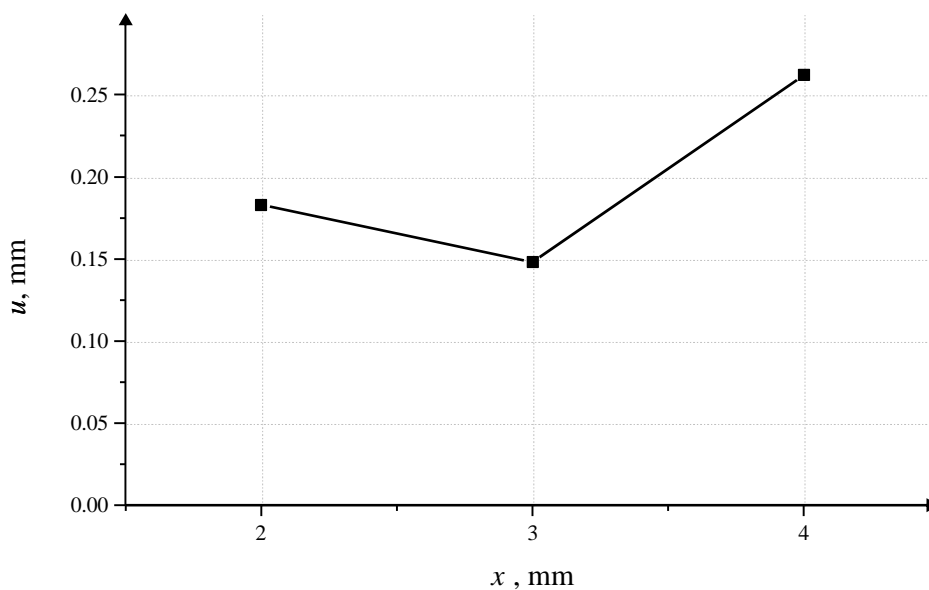
Табела 5.17. Вредности карактеристике реза за различите вредности растојања резне главе од материјала који се обрађује

$p$ , МПа	$m_a$ , g/min	$v_c$ , mm/min	$x_o$ , mm	$W_d$ , mm	$W_g$ , mm	$W_{sr}$ , mm	$u$ , mm	$\alpha$ , °
413	400	70	2	0.690	1.056	0.873	0.183	0.524
413	400	70	3	0.764	1.060	0.912	0.148	0.424
413	400	70	4	0.775	1.299	1.037	0.262	0.6

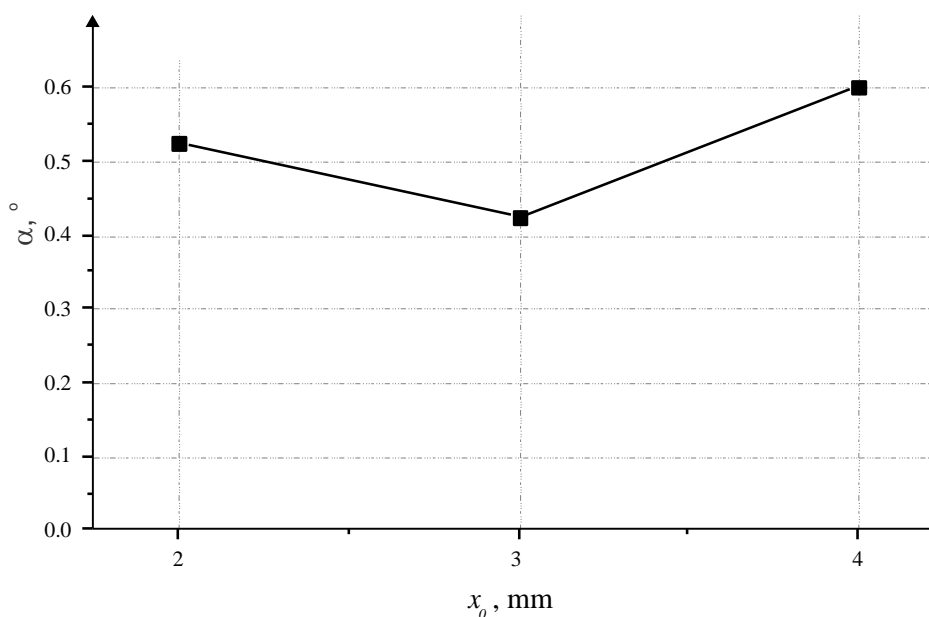
На слици 5.65. је приказан утицај растојања резне главе од материјала који се обрађује на ширину реза. Са дијаграма се види да је ширина реза најмања за најмање растојање резне главе. Са порастом растојања резне главе од материјала који се обрађује долази до повећања ширине реза. Такође, уочава се да се ширина реза на мерном месту 1, знатно брже повећава са повећањем растојања резне главе него што је то случај са ширином реза на мерном месту 2.



Слика 5.65. Ширина реза за различите вредности растојања резне главе од материјала који се обрађује



Слика 5.66. Нагиб реза за различитије вредности растојања резне главе од материјала који се обрађује



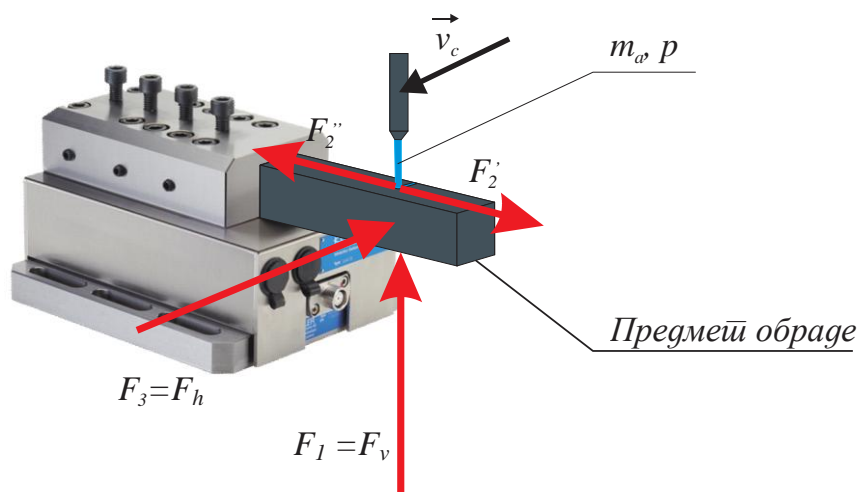
Слика 5.67. Угао нагиба реза за различитије вредности растојања резне главе од материјала који се обрађује

На сликама 5.66. и 5.67. је приказан утицај растојања резне главе од материјала који се обрађује. Најмањи нагиб реза и угао нагиба реза се уочавају за вредности растојања резне главе од материјала који се обрађује од 3 mm. За ове вредности растојања резне главе од материјала који се обрађује је најмања разлика у ширини реза на улазу и излазу абразивног воденог млаза из материјала који се обрађује.



### 5.7.5. Отпори резања при обради абразивним воденим млазом

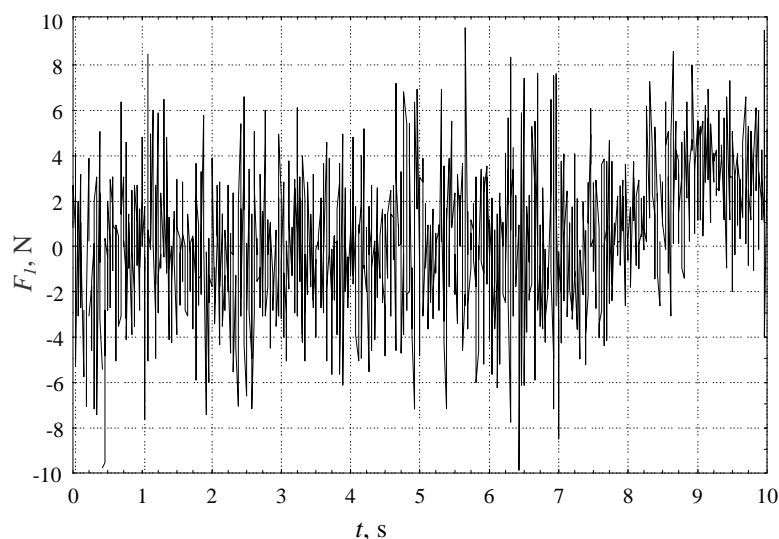
При обради узорака од X5CrNi 18–10, дебљине 20 mm, мерени су отпори резања. Током експеримента, узорци су били стезани у динамометру KISTLER, слика 5.68.



Слика 5.68. Мерење отпора резања при обради абразивним воденим млазом

За сам процес обраде абразивним воденим млазом, најзначајнији су отпори резања  $F_1$  и  $F_3$ . Отпори  $F_2''$  и  $F_2'$  су приближно истих вредности, истог правца, али супротних смерова, тако да је њихова резултујућа вредност занемарљива.

На следећим сликама (5.69., 5.70. и 5.71.) су приказани записи сигнала мерења отпора резања,  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ , односно њихова промена у току времена.

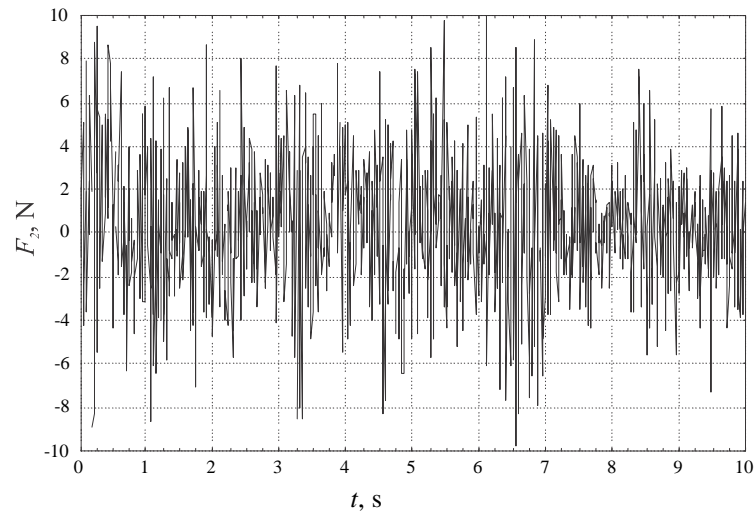


Слика 5.69. Запис сигнала мерења отпора резања  $F_1$ ,  $p = 413 \text{ MPa}$ ;  $v_c = 50 \text{ mm/min}$ ;  $m_a = 400 \text{ g/min}$

Са слике 5.69. се може уочити да до пораста вредности компоненте отпора резања  $F_1$  долази тек када абразивни водени млаз почиње сечење узорка. Вредности

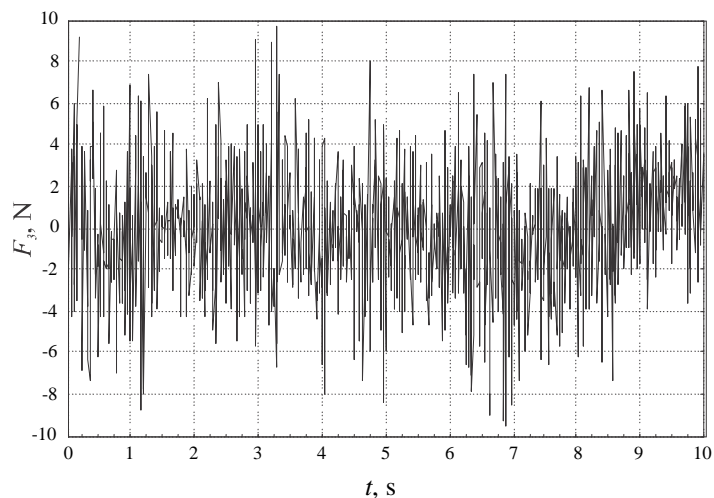
расту све док абразивни водени млаз не расече потпуно материјал. Након тог тренутка (приближно девет секунди) не долази до даљег раста вредности компоненте отпора резања.

На слици 5.70. је приказан запис сигнала мерења компоненте отпора резања  $F_2$ . Може се уочити да се вредности ове компоненте резања немају значајнију промену у току времена.



Слика 5.70. Запис сигнала мерења отпора резања  $F_2$ ,  $p = 413 \text{ MPa}$ ;  $v_c = 50 \text{ mm/min}$ ;  $m_a = 400 \text{ g/min}$

Запис сигнала компоненте отпора резања  $F_3$  је приказан на слици 5.71. Уочава се да у истом тренутку када компонента  $F_1$  почиње да расте, долази и до раста вредности компоненте  $F_3$ . То је моменат када абразивни водени млаз почиње сечење материјала. Од тренутка када је абразивни водени млаз потпуно расекао материјал, вредност компоненте  $F_3$  отпора резања се не мења.



Слика 5.71. Запис сигнала мерења отпора резања  $F_3$ ,  $p = 413 \text{ MPa}$ ;  $v_c = 50 \text{ mm/min}$ ;  $m_a = 400 \text{ g/min}$

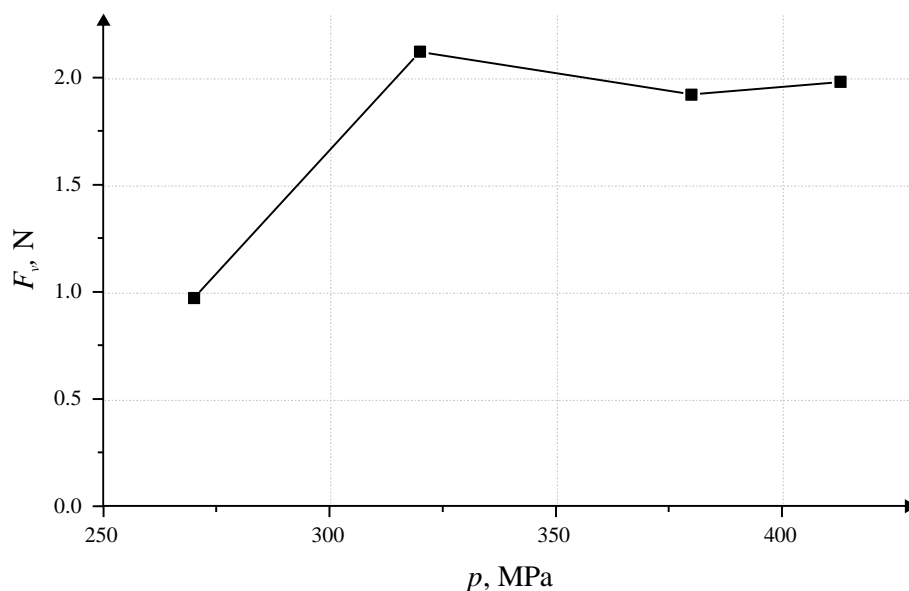
На сликама се, такође, уочава да због динамичког карактера процеса обраде абразивним воденим млазом, и компоненте имају изразито динамички карактер. То доводи до великих разлика у вредностима компоненти отпора резања током времена. Обзиром да су вредности компоненте  $F_2$  занемарљиве, а компонента  $F_3$  има доста мање вредности од  $F_1$ , у даљим анализама ће се користити само вредности за компоненту  $F_1$ . Како ова компонента делује у вертикалном правцу, у даљем тексту ће бити обележена као  $F_v$ .

У табели 5.18. су дате вредности вертикалне компоненте отпора резања који су мерени при обради друге групе узорака.

Табела 5.18. Измерене вредности вертикалне компоненте отпора резања

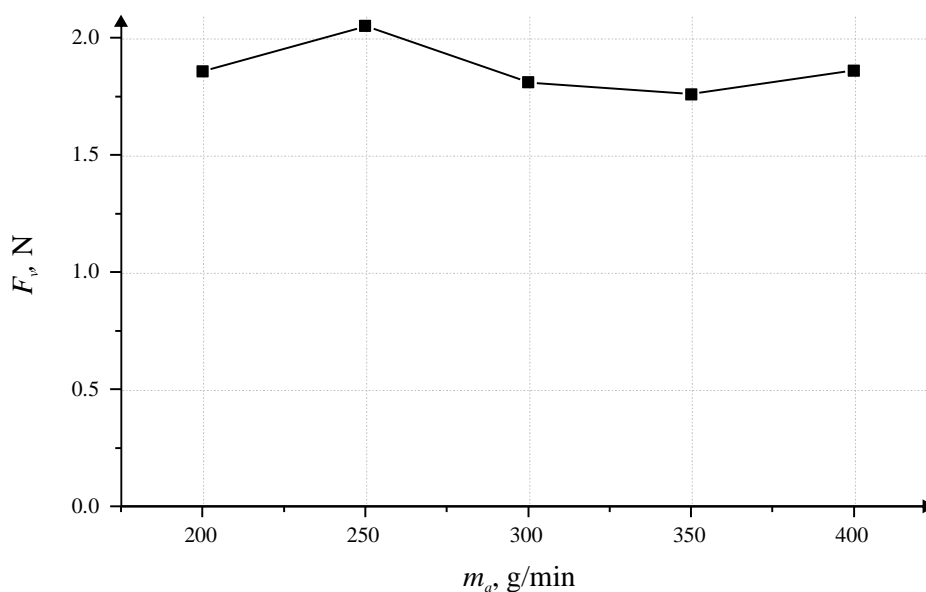
Узорак број	$p$ , МПа	$v_c$ , mm/min	$m_a$ , g/min	$s$ , mm	Материјал	$x_0$ , mm	$F_v$ , N
1.	270	50	400	20	X5CrNi 18-10	3	0.97
2.	320	50	400	20	X5CrNi 18-10	3	2.12
3.	380	50	400	20	X5CrNi 18-10	3	1.92
4.	413	50	400	20	X5CrNi 18-10	3	1.98
5.	413	50	200	20	X5CrNi 18-10	3	1.86
6.	413	50	250	20	X5CrNi 18-10	3	2.05
7.	413	50	300	20	X5CrNi 18-10	3	1.81
8.	413	50	350	20	X5CrNi 18-10	3	1.76
9.	413	50	400	20	X5CrNi 18-10	3	1.86
10.	413	30	400	20	X5CrNi 18-10	3	1.43
11.	413	50	400	20	X5CrNi 18-10	3	1.98
12.	413	70	400	20	X5CrNi 18-10	3	2.85
13.	413	90	400	20	X5CrNi 18-10	3	1.98
14.	413	110	400	20	X5CrNi 18-10	3	3.45
15.	320	50	300	20	X5CrNi 18-10	3	1.85
16.	270	30	200	20	X5CrNi 18-10	3	1.5
17.	413	70	400	20	C 45	3	1.12
18.	320	50	300	20	C 45	3	1.22
19.	270	30	200	20	C 45	3	1.46
20.	413	70	400	20	S 235 JRG2	3	1.32
21.	320	50	300	20	S 235 JRG2	3	2.19
22.	270	30	200	20	S 235 JRG2	3	1.55
23.	413	150	400	5	X5CrNi 18-10	3	1.57
24.	413	100	400	5	X5CrNi 18-10	3	1.1
25.	413	70	400	5	X5CrNi 18-10	3	0.93
26.	413	100	400	10	X5CrNi 18-10	3	2.15
27.	413	70	400	10	X5CrNi 18-10	3	1.4
28.	413	50	400	10	X5CrNi 18-10	3	1.02
29.	413	100	400	15	X5CrNi 18-10	3	3.64
30.	413	70	400	15	X5CrNi 18-10	3	2.23
31.	413	50	400	15	X5CrNi 18-10	3	1.38
32.	413	100	400	25	X5CrNi 18-10	3	1.58
33.	413	70	400	25	X5CrNi 18-10	3	3.34
34.	413	50	400	25	X5CrNi 18-10	3	2.53
35.	413	70	400	25	X5CrNi 18-10	2	3.53
36.	413	70	400	25	X5CrNi 18-10	3	3.34
37.	413	70	400	25	X5CrNi 18-10	4	3.51

Утицаји појединих параметара процеса обраде абразивним воденим млазом на вертикалну компоненту отпора резања су дати на следећим сликама. Промена вертикалне компоненте отпора резања у зависности од радног притиска је приказана на слици 5.69. На слици се може уочити да прва тачка,  $p = 270$  МПа, доста одступа од осталих измерених вредности. Ако се посматрају остале измерене вредности, може се рећи да раст радног притиска доводи до смањења вредности отпора резања, односно његове вертикалне компоненте.



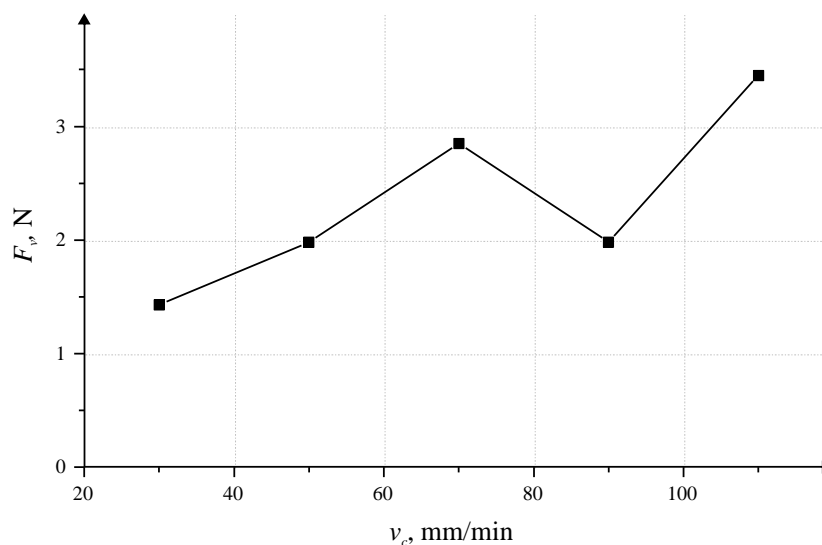
Слика 5.69. Утицај радног притиска на  $F_v$

Слика 5.69. показује утицај протока абразива на вредност вертикалне компоненте отпора резања. Посматрањем дијаграма, види се да промена протока абразива не утиче значајно на  $F_v$ .



Слика 5.70. Утицај протока абразива на  $F_v$

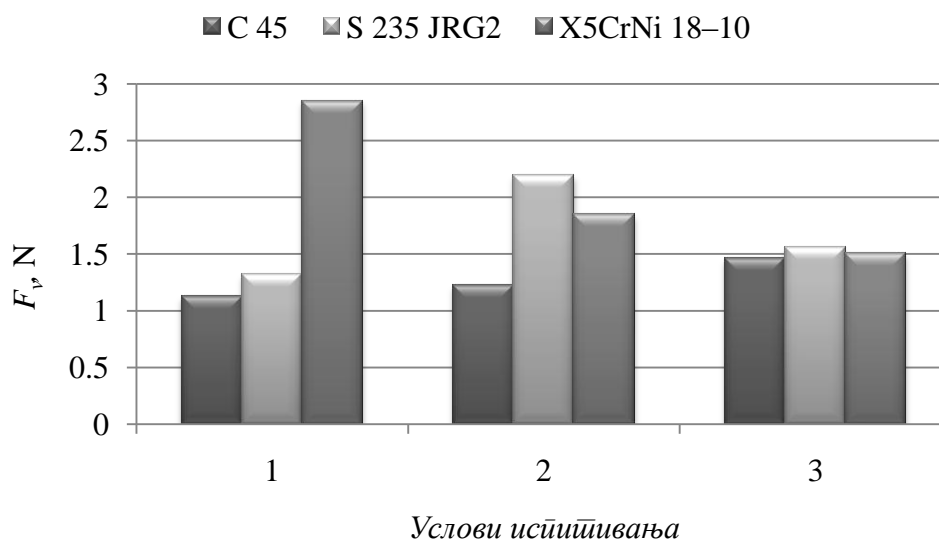
Утицај брзине кретања резне главе на вертикалну компоненту отпора резања  $F_v$  је приказан на слици 5.71.



Слика 5.71. Утицај брзине кретања резне главе на  $F_v$

Са слике се види да брзина кретања има значајан утицај на вредности  $F_v$ . При обради са већим брзинама резања, јављају се већи отпори резања.

На слици 5.72. је приказан утицај врсте материјала који се обрађује на вредност компоненте отпора резања  $F_v$ . На основу слике се може закључити да на вредности компоненте отпора резања поред параметара процеса обраде, утичу и карактеристике материјала (тврдоћа, затезна чврстоћа и сл.). Свака карактеристика материјала појединачно утиче на вредност отпора резања, тако да је утицај врсте материјала који се обрађује на компоненту отпора резања  $F_v$  комплексан.

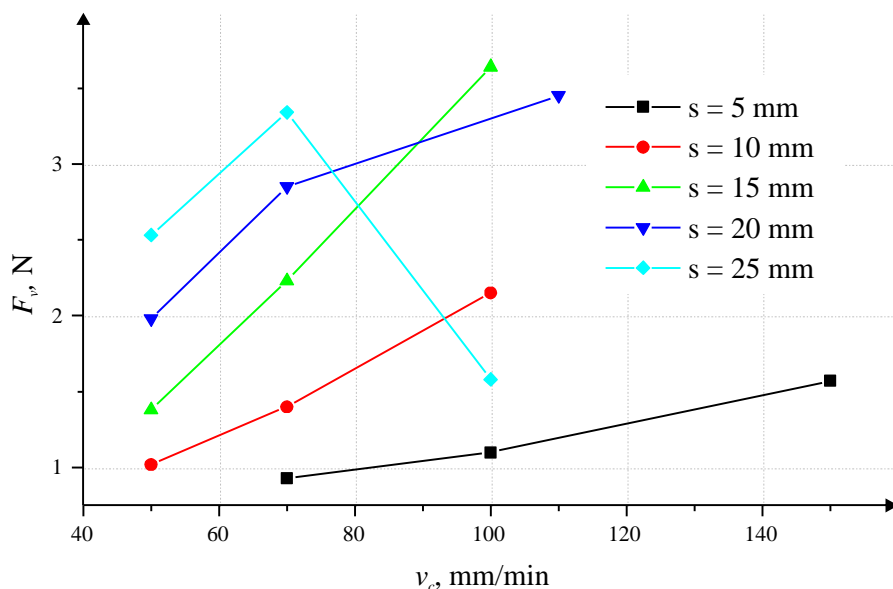


Услови испитивања 1:  $p = 413$  МПа;  $m_a = 400$  g/min;  $v_c = 70$  mm/min  
 Услови испитивања 2:  $p = 320$  МПа;  $m_a = 300$  g/min;  $v_c = 50$  mm/min  
 Услови испитивања 3:  $p = 270$  МПа;  $m_a = 200$  g/min;  $v_c = 30$  mm/min

Слика 5.72. Утицај врсте материјала на  $F_v$

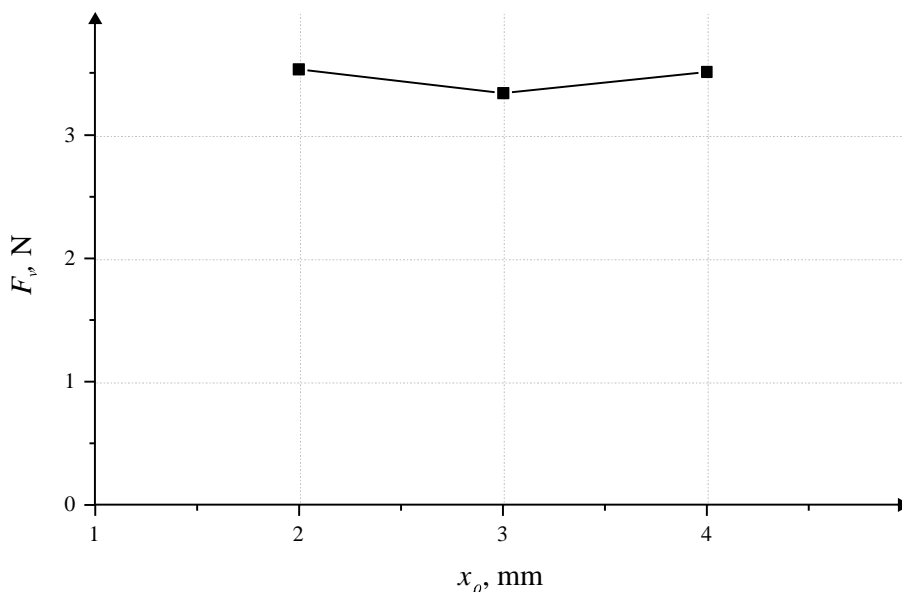
Са слике се види да врста материјала који се обрађује има утицаја на вредност отпора резања. Такође, може се закључити да је утицај већи уколико се обрада врши са већим брзинама кретања резне главе.

Утицај дебљине материјала који се обрађује је такође значајан, слика 5.73. Са слике се може уочити да и при обради са истим брзинама кретања резне главе, отпор резања има знатно веће вредности при обради дељких материјала.



Слика 5.73. Утицај дебљине обрађиваног материјала на  $F_v$

Слика 5.74. приказује утицај растојања резне главе од предмета обраде на вредност отпора резања  $F_v$ . Са слике се може учити да промена растојања резне главе од предмета обраде нема значајан утицај на вредности отпора резања,  $F_v$ .



Слика 5.74. Утицај растојања резне главе од предмета обраде на  $F_v$

## 6. УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА ИЗЛАЗНЕ ФАКТОРЕ

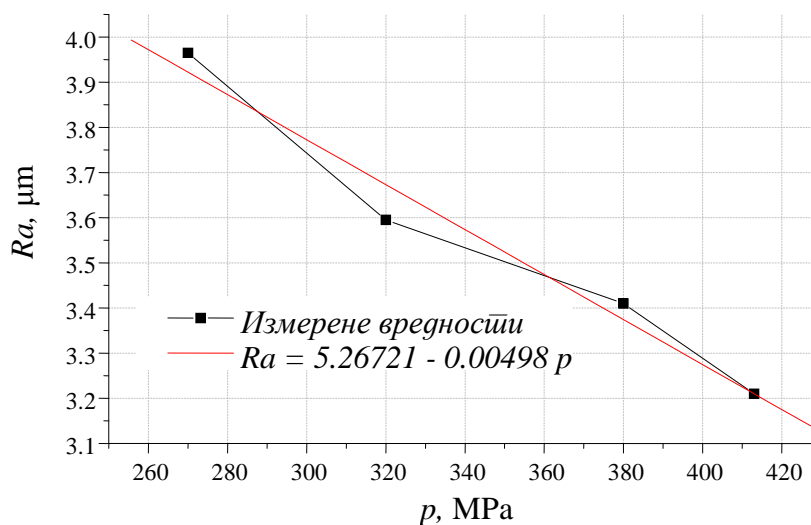
Као што је већ речено, храпавост обрађене површине, геометрија реза и облик предње линије реза су веома важани излазни фактори за оцену квалитета обраде абразивним воденим млазом. Поред ових излазних фактора, велики значај има и отпор резања јер он описује сам процес обраде. Због тога је од великог значаја дефинисање зависности ових излазних фактора од најважнијих параметара процеса обраде абразивним воденим млазом. У даљем тексту су представљене корелативне зависности наведених излазних фактора и параметара процеса обраде.

### 6.1. УТИЦАЈ РАДНОГ ПРИТИСКА НА ХРАПАВОСТ ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ

Дефинисање утицаја радног притиска на храпавост обрађене површине је засновано на анализи резултата мерења који су приказани у табели 5.8. и 5.10. На основу анализе резултата, уочено је да је за дефинисање утицаја радног притиска на храпавост обрађене површине најпогоднији линеарни модел облика:

$$Ra = a_p + b_p \cdot p \quad (6.1.)$$

На основу података из табеле 5.10. приказана је промена храпавости обрађене површине у зависности од промене радног притиска.



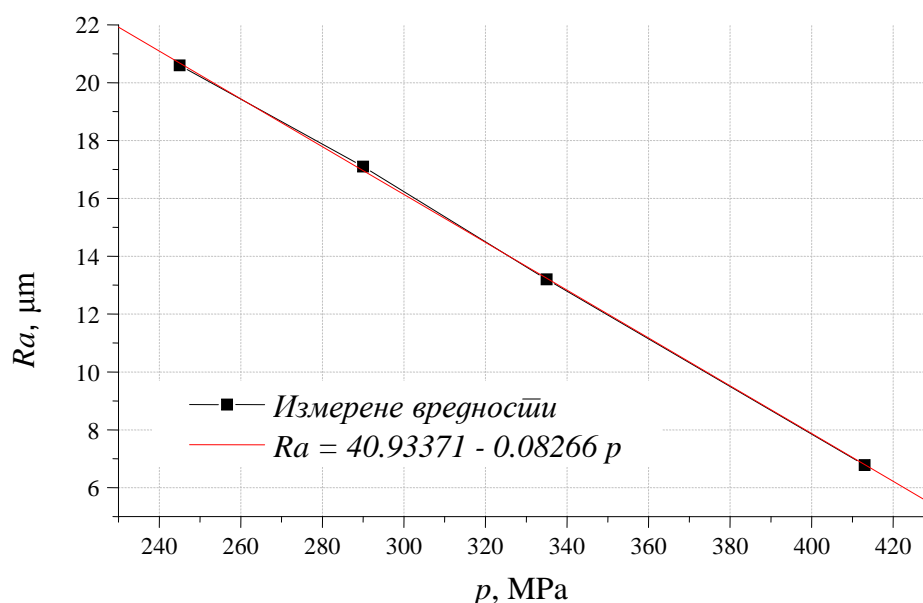
Слика 6.1. Промена храпавости обрађене површине на мерном месџу 2 у зависности од радног притиска, X5CrNi 18-10, # 20 mm[6]

За конкретне вредности парметара процеса обраде абразивним воденим млазом, ( $v_c = 50 \text{ mm/min}$ ,  $m_a = 400 \text{ g/min}$ ,  $s = 20 \text{ mm}$ ,  $x_0 = 3 \text{ mm}$ , материјал предмета обраде X5CrNi 18–10), а који су приказани у табели 5.10., корелативна зависност промене храпавости обрађене површине и радног притиска се може писати у следећем облику:

$$Ra = 5.26721 - 0.00498 \cdot p \quad (6.2.)$$

Коефицијент корелације за ову зависност је  $R = 0.984987$ , што показује да постоји веома добро поклапање вредности добијених прорачуном и измерених вредности.

Утицај радног притиска на храпавост обрађене површине је испитиван и на узорцима од X5CrNi 18–10, дебљине 30 mm. Ови резултати су приказани у табели 5.8. На основу ових резултата дефинисана је промена храпавости обрађене површине у зависности од радног притиска, слика 6.2.



Слика 6.2. Промена храпавости обрађене површине на мерном месџу 2 у зависности од радног притиска, X5CrNi 18–10, # 30 mm [6]

Са слике 6.2. се види да је код ових узорака за дефинисање утицаја радног притиска на храпавост обрађене површине такође најпогоднији линеарни модел представљен формулом (6.1.). На основу података из табеле 5.8. може се формирати корелативна зависност промене храпавости обрађене површине и радног притиска у облику:

$$Ra = 40.93371 - 0.08266 \cdot p \quad (6.3.)$$

У овом случају коефицијент корелације је  $R = 0.99987$ .

За храпавост обрађене површине на улазу абразивног воденог млаза у предмет обраде није вршена анализа и није дефинисана зависност од радног притиска, јер је већ у претходном поглављу, где су анализирани резултати мерења, утврђено да на малим дубинама реза не долази до значајне промене храпавости обрађене површине.



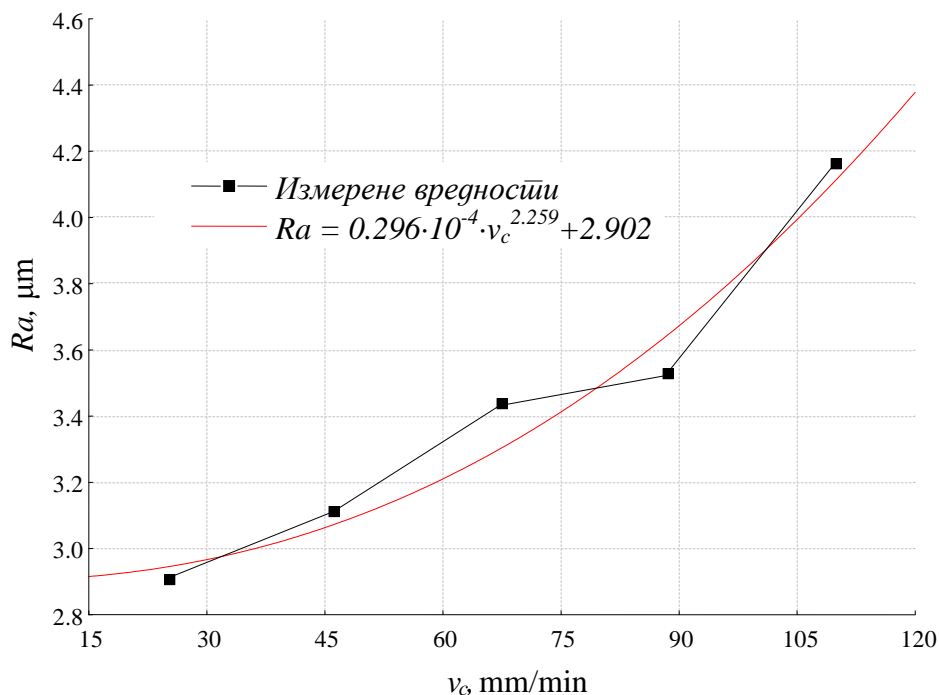
Корелативна зависност представљена изразом (6.2.) важи само за X5CrNi 18–10, дебљине 20 mm који је обрађиван са брзином кретања резне главе 50 mm/min и протоком абразива од 400 g/min, док корелативна зависност која је представљена изразом (6.3.) важи само за X5CrNi 18–10, дебљине 30 mm, који је обрађиван са брзином кретања резне главе 35 mm/min и протоком абразива од 400 g/min.

## 6.2. УТИЦАЈ БРЗИНЕ КРЕТАЊА РЕЗНЕ ГЛАВЕ НА ХРАПАВОСТ ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ

Статистичком анализом резултата мерења датих у табелама 5.8. и 5.10., а који се односе на дефинисање утицаја брзине кретања резне главе на храпавост обрађене површине, као најпогоднији усвојен је модел представљен изразом (6.4.).

$$Ra = a_v + b_v \cdot v_c^{c_v} \quad (6.4.)$$

Утицај брзине кретања резне главе на храпавост обрађене површине, на основу резултата мерења датих у табели 5.10., је приказан на слици 6.3.



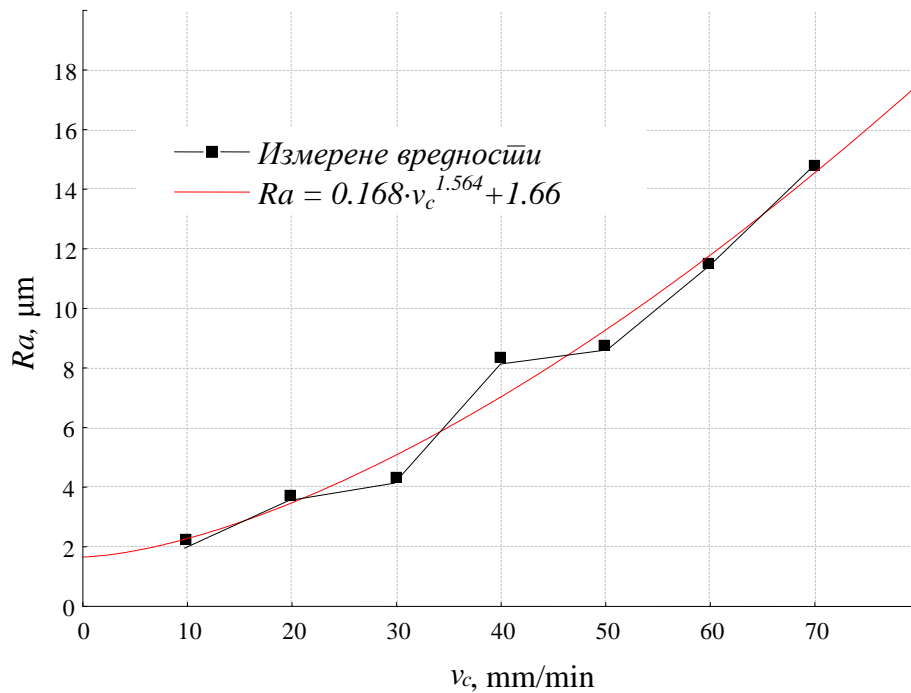
Слика 6.3. Промена храпавости обрађене површине на мерном месину 2 у зависности од брзине кретања резне главе, X5CrNi 18–10, # 20 mm

Заменом конкретних вредности за параметре процеса обраде из табеле 5.10., израз (6.4.) добија облик:

$$Ra = 0,296 \cdot 10^4 \cdot v_c^{2,259} + 2.902 \quad (6.5.)$$

Коефицијент корелације за овај модел је  $R = 0.98067$ . То показује да модел веома добро одговара измереним вредностима.

Константе  $a_v$ ,  $b_v$  и  $c_v$  у формули (6.5.) важе само за X5CrNi 18–10, дебљине 20 mm, који је сечен са протоком абразива од 400 g/min, при радном притиску од 413 МПа, док је брзина кретања резне главе варирана. Утицај брзине кретања резне главе је испитиван и на узорцима од X5CrNi 18–10, дебљине 30 mm. Корелативна зависност која је добијена за ове узорке (табела 5.8.) приказана је на слици 6.4.



Слика 6.4. Промена храјавости обрађене површине на мерном месџу 2 у зависности од брзине кретања резне главе, X5CrNi 18–10, # 30 mm

И за ове узорке се, као најбољи, показао модел чији је општи облик дат изразом (6.4.). За услове испитивања дате у табели 5.8., може се дефинисати следећа корелативна зависност:

$$Ra = 0.168 \cdot v_c^{1.564} + 1.66 \quad (6.6.)$$

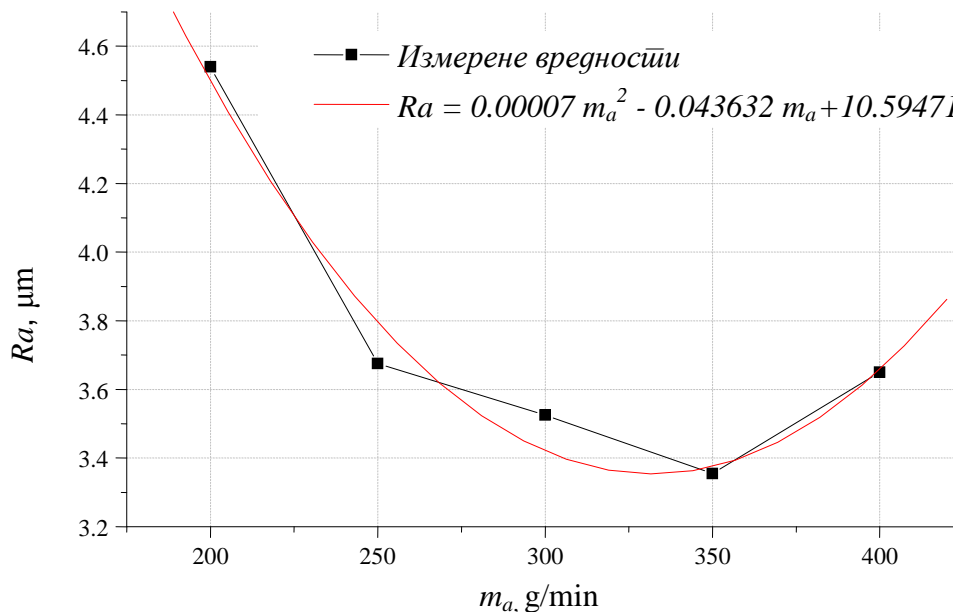
Коефицијент корелације за ову зависност је  $R = 0.98874$ . Константе у изразу (6.6.) важе само за X5CrNi 18–10, дебљине 30 mm, који је сечен са протоком абразива од 400 g/min, при радном притиску од 413 МПа, док је брзина кретања резне главе варирана.

### 6.3. УТИЦАЈ ПРОТОКА АБРАЗИВА НА ХРАПАВОСТ ОБРАЂЕНЕ ПОВРШИНЕ

За исте групе узорака је вршена статистичка анализа да би се дефинисала зависност храпавости обрађене површине од протока абразива. На основу анализе је уочено да се као општи облик корелативне зависности може узети полином другог реда, формула (6.7.).

$$Ra = a_m \cdot m_a^2 + b_m \cdot m_a + c_m \quad (6.7.)$$

Промена храпавости обрађене површине у зависности од промене протока абразива је, за резултате мерења који су приказани у табели 5.10., представљена на слици 6.6.



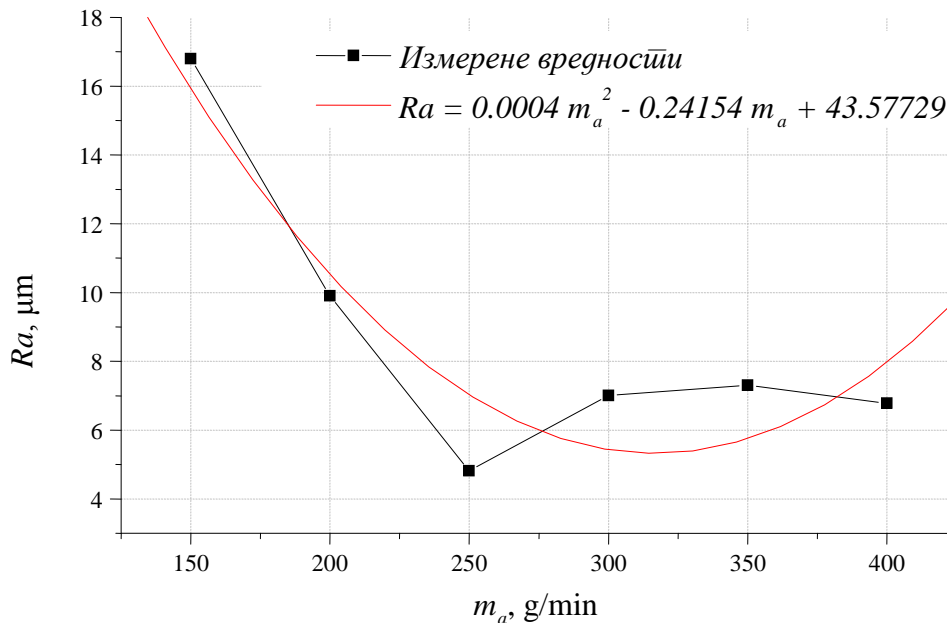
Слика 6.6. Промена храпавости обрађене површине на мерном месју 2 у зависности од протока абразива, X5CrNi18–10, # 20 mm

За конкретне вредности дате у табели 5.10. општи облик корелативне зависности се може представити формулом (6.8.):

$$Ra = 0.00007 \cdot m_a^2 - 0.043632 \cdot m_a + 10.59471 \quad (6.8.)$$

За овај израз је коефицијент корелације  $R = 0.98361$ . Корелативна зависност, представљена формулом (6.8.), има минимум за вредности протока абразива између 300 и 350 g/min. Овај израз важи само за X5CrNi 18–10, дебљине 20 mm, који је сечен брзином кретања резне главе од 50 mm/min, при радном притиску од 413 МПа.

Утицај протока абразива је испитиван и на узорцима од X5CrNi 18–10, дебљине 30 mm. Резултати мерења за ове узорке су приказани у табели 5.8. Промена храпавости обрађене површине у зависности од протока абразива за ову групу узорака је приказана на слици 6.7.



Слика 6.7. Модел за дефинисање храповости обрађене површине на мерном месџу 2 у зависности од протока абразива, X5CrNi 18–10, # 30 mm

И у овом случају је за дефинисање корелативне зависности храповости обрађене површине и протока абразива најпогоднији полином другог реда, формула (6.7.). За вредности резултата мерења, дате у табели 5.8., корелативна зависност има облик:

$$Ra = 0.0004 \cdot m_a^2 - 0.24154 \cdot m_a + 43.57729 \quad (6.9.)$$

Коефицијент корелације за овај израз је  $R = 0.92951$ , што показује да је овакав облик корелативне зависности доста добар.

Такође, корелативна зависност, формула (6.9.) има минимум за одређене вредности протока абразива. Ове вредности протока абразива се крећу између 300 и 350  $g/min$ . Овај израз, формула (6.9.), важи само за X5CrNi 18–10, дебљине 30 mm, који је сечен брзином резне главе од 35mm/min, при радном притиску од 413 МПа.

За обе групе узорака уочава се да су корелативне зависности облика полинома другог степена и да оба полинома имају минимум за вредности протока абразива између 300 и 350  $g/min$ .

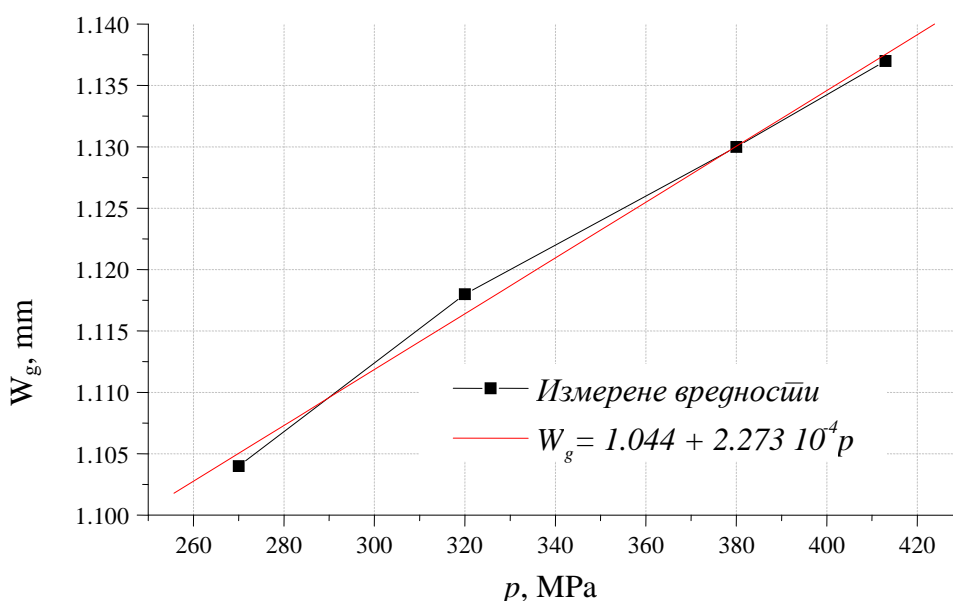
#### 6.4. УТИЦАЈ РАДНОГ ПРИТИСКА НА ГЕОМЕТРИЈУ РЕЗА

За дефинисање геометрије реза изабрани су следећи параметри: ширина реза на улазу и излазу абразивног воденог млаза у предмет обраде и угао нагиба реза. Модели за геометрију реза су дефинисани само на основу мерења која су вршена на узорцима од X5CrNi 18–10, дебљине 20 mm. Резултати ових мерења су приказани у табелама 5.11. и 5.13. Утицај протока абразива на ширину реза није узет у обзир, јер је у претходном поглављу утврђено да је утицај протока абразива на ширину реза занемарљив.

Анализом резултата из табела 5.11. и 5.13., као општи облик корелативне зависности ширине реза на улазу абразивног воденог млаза у предмет обраде и радног притиска усвојен је:

$$W_g = d_p + e_p \cdot p \quad (6.10.)$$

На слици 6.8. је приказан утицај радног притиска на ширину реза на улазу абразивног воденог млаза у предмет обраде.



Слика 6.8. Промена ширине реза на улазу абразивног воденог млаза у предмет обраде у зависности од радног притиска, X5CrNi 18–10, # 20 mm

За резултате представљене у табели 5.11. корелативна зависност ширине реза на улазу абразивног воденог млаза у предмет обраде и радног притиска има облик:

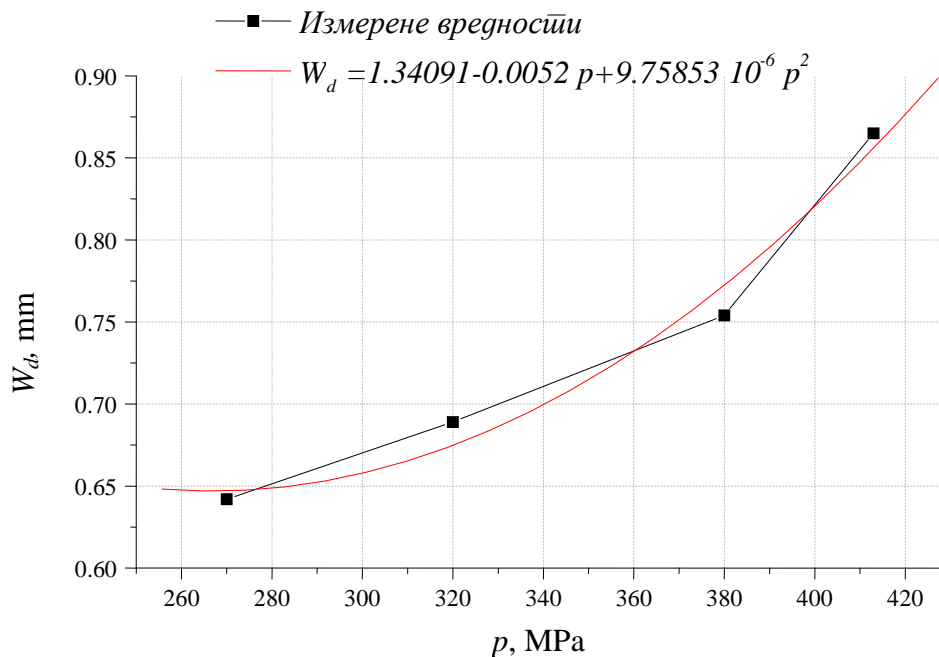
$$W_g = 1.044 + p \cdot 2.237 \cdot 10^{-4} \quad (6.11.)$$

Коефицијент корелације је  $R = 0.997$ . То показује да је успостављена корелативна зависност добра.

За исту групу узорака дефинисан је корелативна зависност радног притиска и ширине реза на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде. Ова зависност је представљена изразом (6.12.).

$$W_d = h_p \cdot p^2 + g_p \cdot p + f_p \quad (6.12.)$$

На слици 6.9. је приказана промена ширине реза на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде у зависности од радног притиска.



Слика 6.9. Промена ширине реза на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде у зависности од радног притиска, X5CrNi18-10, # 20 mm

На основу резултата мерења датих у табели 5.11., корелативна зависност дата изразом (6.12.) постаје:

$$W_d = 1.341 - 0.0052 \cdot p + 9.76 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 \quad (6.13.)$$

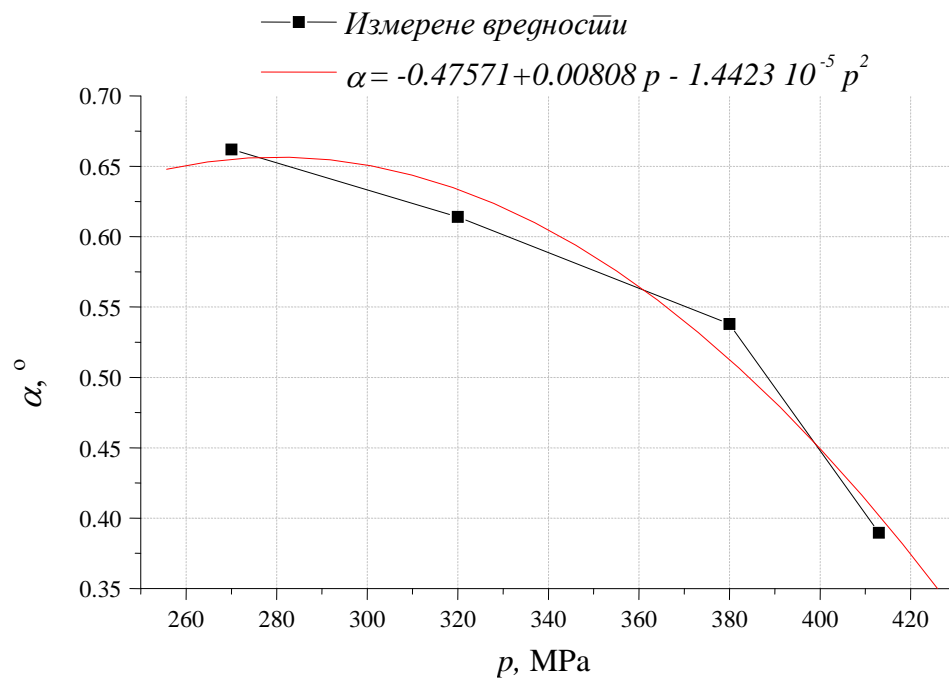
За ову корелативну зависност је  $R = 0.9767$ .

Такође, за исте узорке дефинисана је корелативна зависност радног притиска на углу нагиба реза,  $\alpha$ . Корелативна зависност је описана изразом (6.14.).

$$\alpha = i_p \cdot p^2 + j_p \cdot p + k_p \quad (6.14.)$$

Као што се може видети, за описивање утицаја радног притиска на угао нагиба реза највише одговара модел облика полинома другог реда.

Дијаграм зависности угла нагиба реза од радног притиска је приказан на слици 6.10. На слици је приказана и корелативна зависност за испитиване узорке.



Слика 6.10. Промена угла најбољег реза у зависности од радног притиска, X5CrNi 18-10, # 20mm

За испитиване узорке корелативна зависност је:

$$\alpha = -0.476 + 0.0081 \cdot p - 1.4423 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 \quad (6.15.)$$

Коефицијент корелације овако дефинисане зависности је  $R = 0.9712$ .

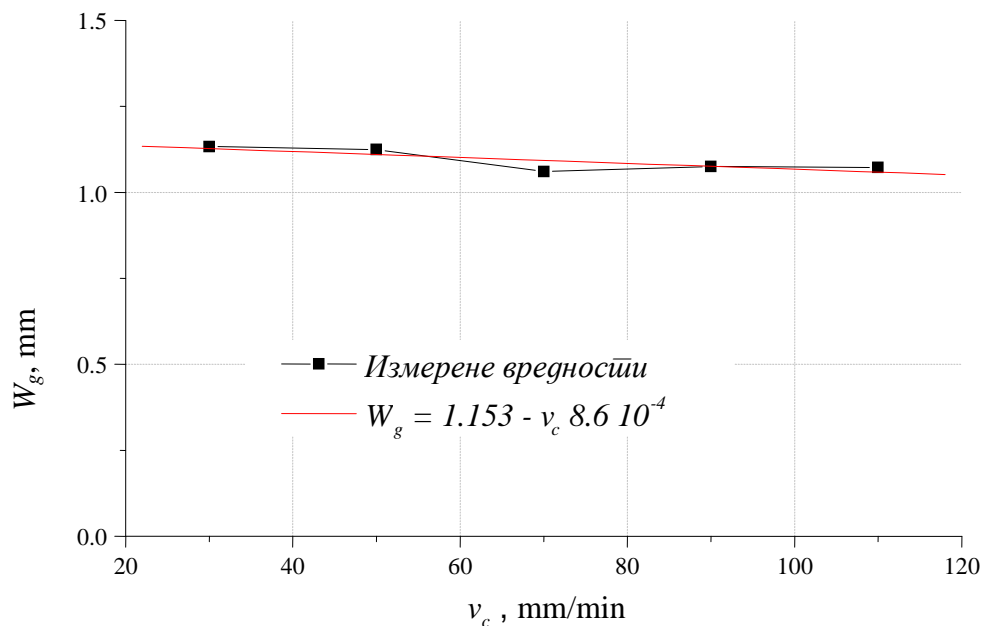
## 6.5. УТИЦАЈ БРЗИНЕ КРЕТАЊА РЕЗНЕ ГЛАВЕ НА ГЕОМЕТРИЈУ РЕЗА

За исту групу узорака дефинисана је корелативна зависност брзине резне главе и геометрије реза. Резултати мерења на основу којих су дефинисане зависности, су дати у табели 5.13.

Анализом резултата мерења, утврђено је да утицај брзине кретања резне главе на ширину реза на уласку абразивног воденог млаза у предмет обраде најбоље описује израз:

$$W_g = d_v + e_v \cdot v_c \quad (6.15.)$$

На слици 6.11. је приказана промена ширине реза на улазу абразивног воденог млаза у предмет обраде у зависности од брзине кретања резне главе.



Слика 6.11. Промена ширине реза на улазу абразивног воденог млаза у предмет обраде у зависности од брзине кретања резне главе, X5CrNi 18–10, # 20 mm

Корелативна зависност ширине реза на улазу абразивног воденог млаза у предмет обраде и брзине кретања резне главе, за услове испитивања дате у табели 5.13. има облик:

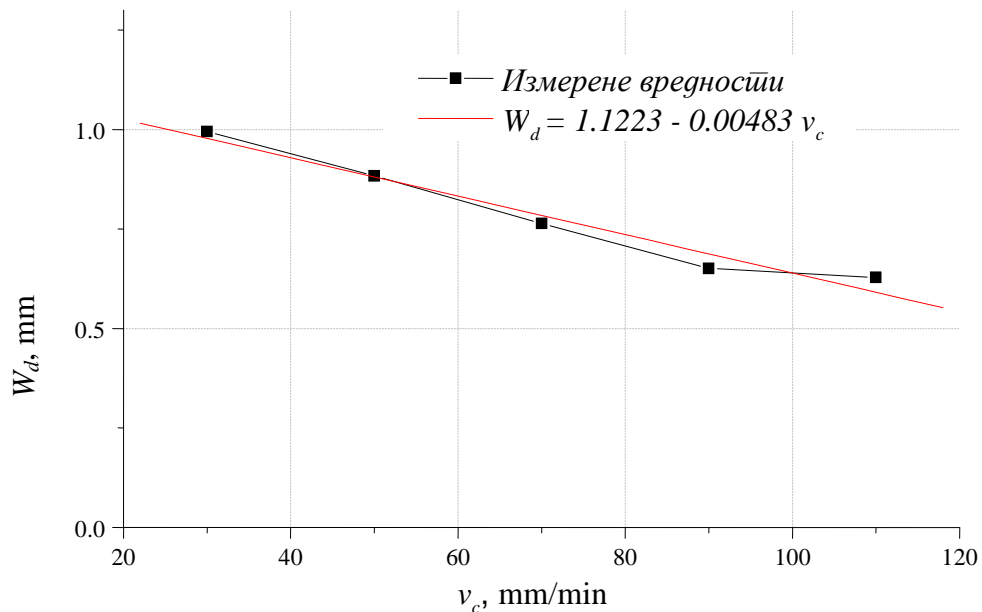
$$W_g = 1.153 - 8.6 \cdot 10^{-4} \cdot v_c \quad (6.16.)$$

За исту групу узорка дефинисана је и корелативна зависност која описује утицај брзине кретања резне главе на ширину реза на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде анализом резултата мерења датих у табели 5.13. најпогоднији за дефинисање ове зависности је линеарни облик, (6.17.).

$$W_d = g_v \cdot v_c + f_v \quad (6.17.)$$

На слици 6.12. је приказана промена ширине реза на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде.





Слика 6.12. Промена ширине реза на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде у зависности од брзине резне главе, X5CrNi 18-10, # 20 mm

Када се општи облик зависности промене ширине реза на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде, примени за конкретне узорке, корелативна зависност се може представити изразом:

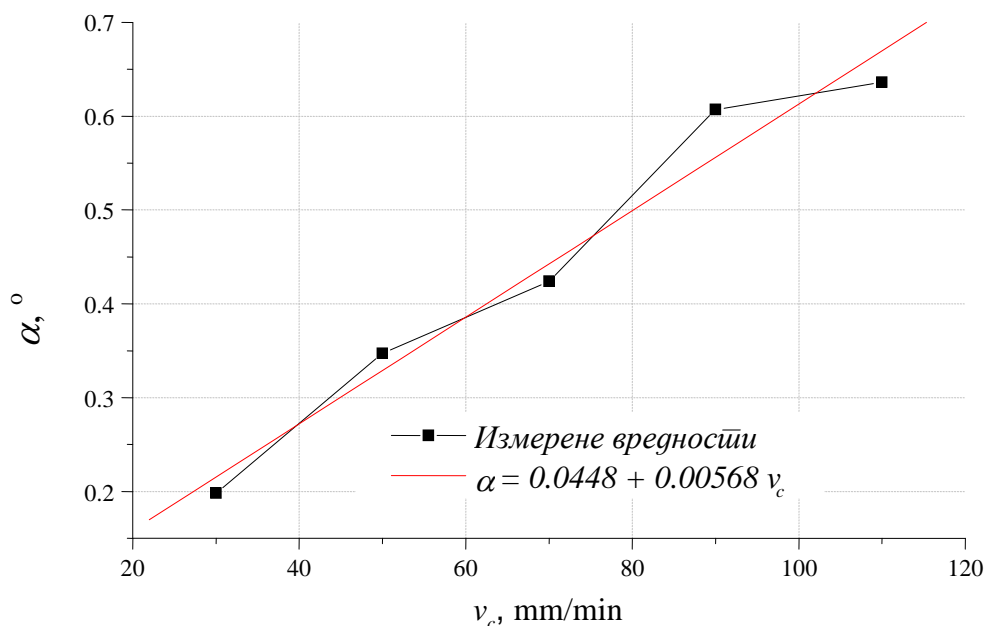
$$W_d = 1.1223 - 0.00483 \cdot v_c \quad (6.18.)$$

Ова корелативна зависност има доста добро поклапање са измереним вредностима, што показује и податак да је коефицијент корелације  $R = 0.9821$ .

За укупну оцену утицаја брзине кретања резне главе на геометрију реза битан је и утицај на угао нагиба реза. Да би се утицај брзине кретања резне главе на угао нагиба реза оценио, дефинисана је њихова корелативна зависност. Анализом резултата из табеле 5.13. као најпогоднији облик корелативне зависности се узиме линеарни модел:

$$\alpha = j_v \cdot p + k_v \quad (6.19.)$$

Промена угла нагиба реза у зависности од промене брзине кретања резне главе резне главе, представљена је на слици 6.13.



Слика 6.13. Промена угла нагиба реза у зависности од брзине кретања резне главе, X5CrNi 18–10, # 20 mm

Корелативна зависност која дефинише утицај брзине кретања резне главе на угао нагиба реза за узорке из табеле 5.13. је представљена изразом (6.20.).

$$\alpha = 0.0448 + 0.00568 \cdot v_c \quad (6.20.)$$

За овај израз је коефицијент корелације  $R = 0.9823$ .

## 6.6. УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА ОБЛИК ПРЕДЊЕ ЛИНИЈЕ РЕЗА

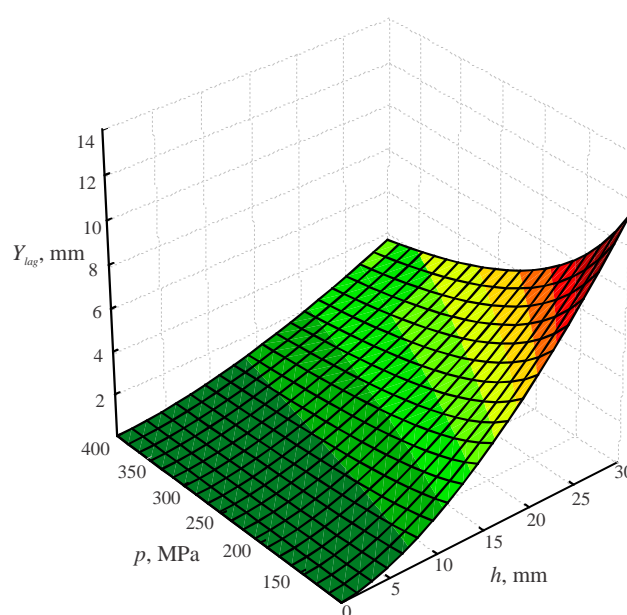
Да би се дефинисала геометрија предње линије реза (скретање абразивног воденог млаза), било је потребно мерити одступање абразивног воденог млаза  $Y_{lag}$ , од идеалне предње линије реза – вертикална линија, како је већ описано у претходном поглављу, слике 5.6. и 5.8. Одступање је мерено на десет места по дубини реза. Резултати који су на овај начин добијени су приказани у табелама 5.5., 5.6. и 5.7., и на сликама 5.17., 5.18. и 5.19. На основу ових резултата дефинисане су корелативне зависности облика предње линије реза и параметара процеса обраде. Прво су развијене зависности које дефинишу појединачни утицај параметара процеса обраде абразивним воденим млазом: радног притиска, протока абразива и брзине кретања резне главе и дубине реза на облик предње линије реза.

Анализом резултата мерења датих у табели 5.6. за дефинисање корелативне зависности облика предње линије реза и радног притиска усвојен је модел облика:

$$Y_{lag} = A_p \cdot h^{B_p} \cdot p^{C_p} \quad (6.21)$$

На слици 6.14. је представљен утицај радног притиска и дубине реза на облик предње линије реза, за резултате мерења дате у табели 5.6. За ове резултате мерења корелативна зависност се може дефинисати изразом:

$$Y_{lag} = 7.93358 \cdot h^{1.66358} \cdot p^{-1.0583} \quad (6.22.)$$



Слика 6.14. Промена облика предње линије реза у зависности од радног притиска и дубине реза [63]

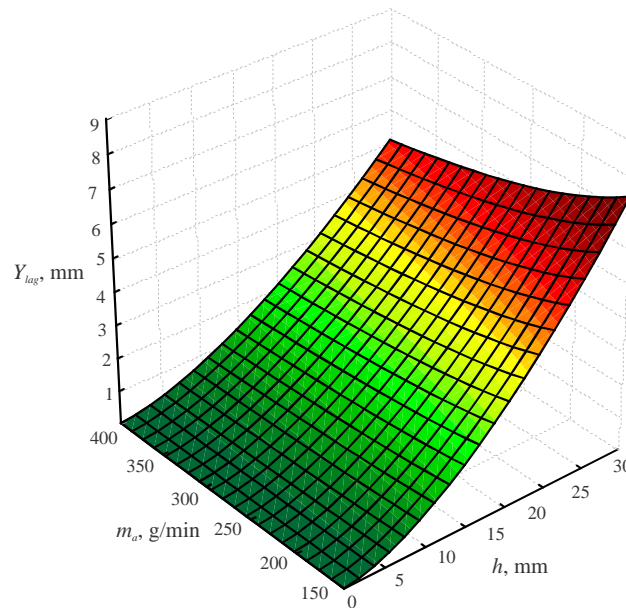
На основу слике 6.14., може се закључити да са повећањем дубине реза расте и одступање предње линије реза од идеалне. Међутим, повећање вредности радног притиска доводи до смањења одступања предње линије реза од идеалне.

Следећа корелативна зависност која је дефинисана је зависност облика предње линије реза и протока абразива и дубине реза. Анализом резултата мерења који су дати у табели 5.7. уочено је да се корелативна зависност најбоље може описати изразом:

$$Y_{lag} = A_m \cdot h^{B_m} \cdot m_a^{C_m} \quad (6.23)$$

Промена облика предње линије реза у зависности од протока абразива и дубине реза је приказана на слици 6.15. За узорке из табеле 5.7. корелативна зависност има облик:

$$Y_{lag} = 0.1955 \cdot h^{1.587} \cdot m_a^{0.3986} \quad (6.24.)$$



Слика 6.15. Промена облика предње линије реза у зависности од протока абразива и дубине реза [63]

На основу слике 6.15., може се закључити да повећање протока абразива доводи до смањења одступања предње линије реза од идеалне.

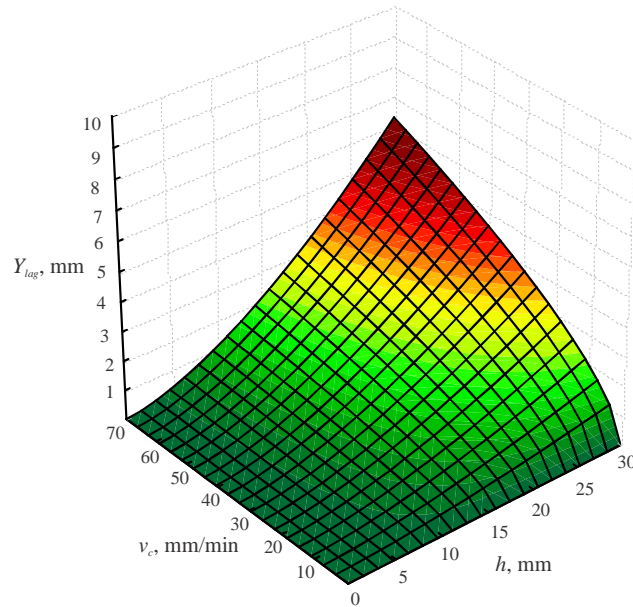
Корелативна зависност облика предње линије реза, брзине кретања резне главе и дубине реза је дефинисана и за исте узорке. Ова корелативна зависност је представљена следећим моделом:

$$Y_{lag} = A_v \cdot h^{B_v} \cdot v_c^{C_v} \quad (6.25)$$

За вредности параметара процеса обраде абразивним воденим млазом, који су дати у табели 5.5. ова зависност се може представити изразом:

$$Y_{lag} = 0.002289 \cdot h^{1.592} \cdot v_c^{0.5895} \quad (6.26.)$$

Зависност облика предње линије реза од брзине кретања резне главе и дубине реза је приказана на слици 6.16.



Слика 6.16. Промена предње линије реза у зависности од брзине кретања резне главе и дубине реза [63]

Са слике 6.16. се може закључити да повећањем брзине кретања резне главе доводи до већег одступања предње линије реза од идеалне.

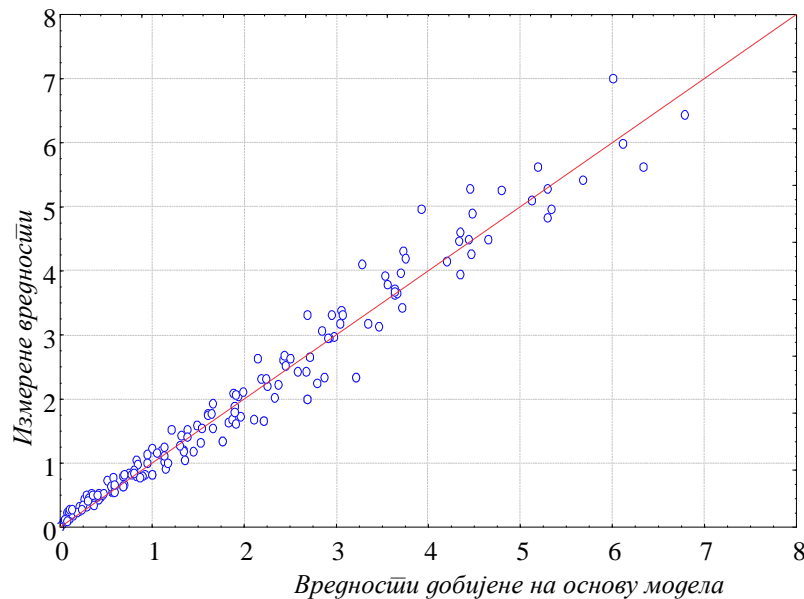
Анализом резултата мерења датих у табелама 5.5., 5.6. и 5.7. долази се до зависности измеђе параметара процеса обраде и дубине реза на геометрију предње линије реза. Зависност се може представити изразом (6.27.).

$$Y_{lag} = A \cdot h^B \cdot p^x \cdot m_a^y \cdot v_c^z \quad (6.27.)$$

За конкретне вредности параметара процеса обраде, израз (6.27) постаје:

$$Y_{lag} = 132.3607 \cdot h^{1.687} \cdot p^{-1.4297} \cdot m_a^{-0.691} \cdot v_c^{0.9274} \quad (6.28.)$$

Коефицијент корелације овако добијеног израза је  $R = 0.9864$ . Ово показује да је степен корелације између измерених вредности и вредности добијених на основу модела веома висок. Однос између измерених и израчунатих вредности је приказан на слици 6.17.



Слика 6.17. Однос измерених вредности и вредности добијених на основу корелативне зависности (6.28.) за  $Y_{lag}$  [63]

На основу слике 6.17. може се закључити да је поклапање измерених вредности за одступање предње линије реза од идеалне и вредности добијених прорачуном на основу израза (6.28.), веома велико. Највећи број тачака се налази у области где је одступање предње линије реза мало, до три милиметра. Веће разлике у измереним и прорачунатим вредностима се могу уочити у области већих одступања предње линије реза, и то углавном код узорака који су обрађивани са екстремно великим или малим вредностима параметара процеса обраде.

## 6.7. УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА ОТПОР РЕЗАЊА

У претходном поглављу је уочено да на вредности отпора резања  $F_v$  од свих параметара процеса обраде значајан утицај имају брзина кретања резне главе и радни притисак. Због тога ће овде бити дефинисане само ове корелативне зависности.

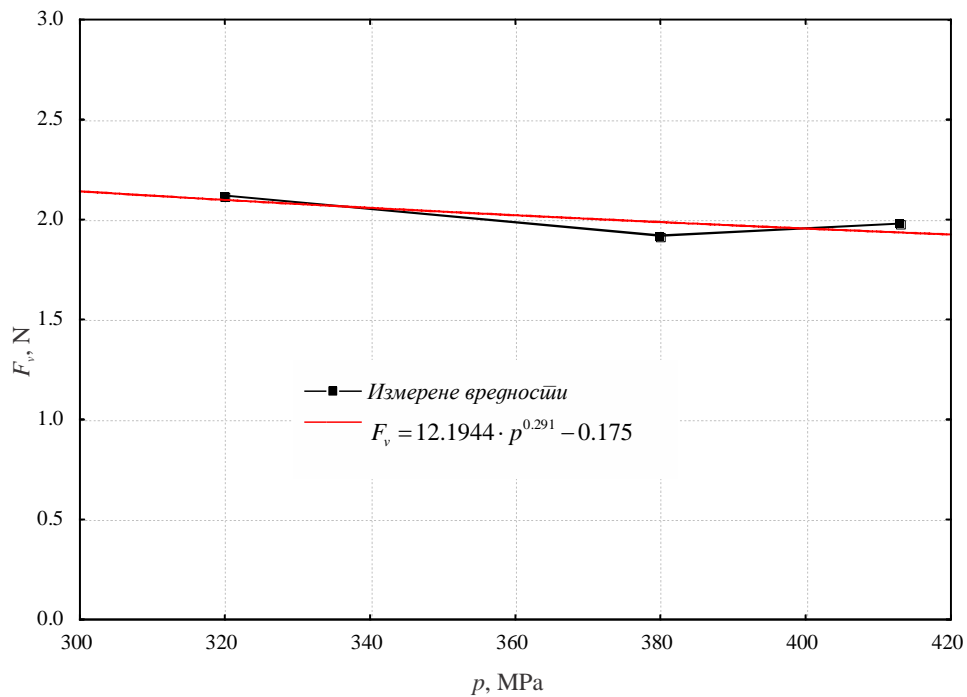
На основу анализе резултата мерења, датих у табели 5.18., уочено је да се корелативна зависност отпора резања и радног притиска може представити у облику:

$$F_v = l_p \cdot p^{n_p} + r_p \quad (6.29.)$$

За конкретне измерене вредности и вредности параметара процеса обраде, при којима су вршена истраживања, корелативна зависност се може представити изразом:

$$F_v = 12.1944 \cdot p^{0.291} - 0.175 \quad (6.30.)$$

На слици 6.18. је приказан утицај радног притиска на отпор резања, као и корелативна зависност која овај утицај описује.



Слика 6.18. Промена отпора резања у зависности од радног притиска, X5CrNi 18–10, # 20 mm

Корелативна зависност отпора резања и брзине кретања је дефинисана на основу резултата мерења који су приказани у табели 5.18. За општи облик корелативне зависности је узет следећи израз:

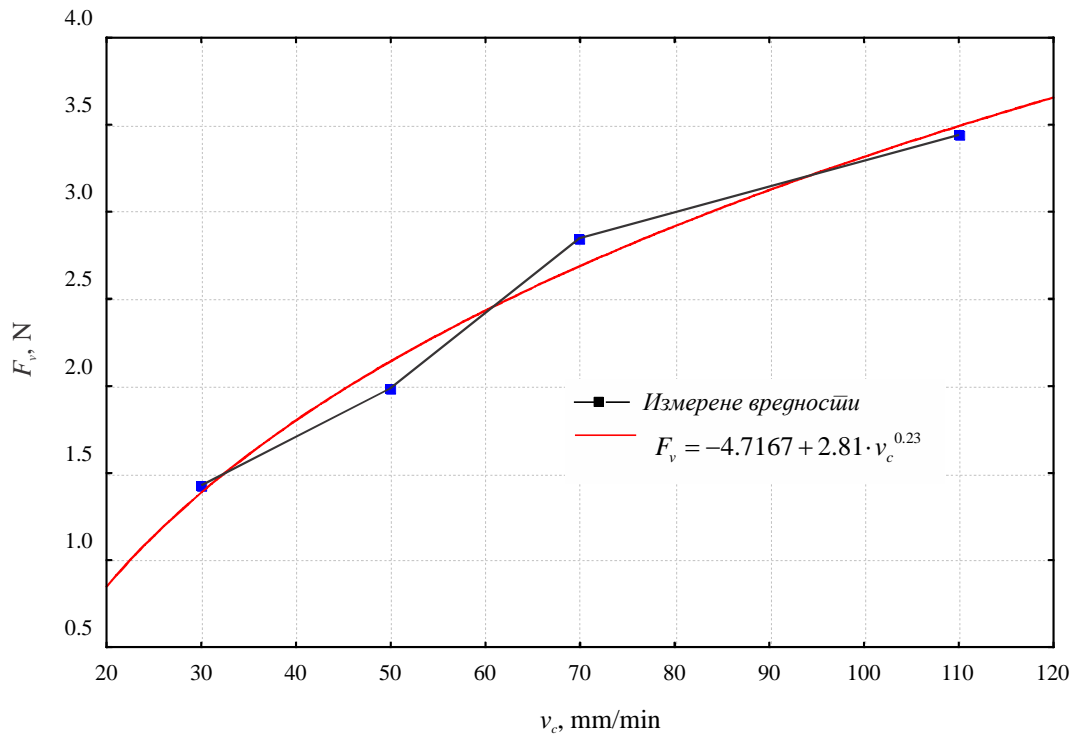
$$F_v = l_v \cdot v_c^{n_v} + r_v \quad (6.31.)$$

Када се општи облик корелативне зависности промене отпора резања и брзине кретања резне главе, примени за конкретне резултате и услове мерења, корелативна зависност се може представити изразом:

$$F_v = -4.7167 + 2.81 \cdot v_c^{0.23} \quad (6.32.)$$

Овај облик корелативне зависности није показао велики степен корелације са измереним вредностима отпора резања.

На слици 6.19. је приказан утицај промене брзине кретања резне главе на отпор резања  $F_v$ . Са слике се види да раст брзине кретања резне главе доводи до повећања отпора резања  $F_v$ .



Слика 6.19. Промена отпора резања у зависности од брзине кретања резне главе, X5CrNi 18–10, # 20 mm

Корелативне зависности отпора резања  $F_v$  и радног притиска и брзине кретања резне главе нису даље анализирани, јер ће се у следећем поглављу много више пажње посветити развоју модела за прорачун отпора резања.



## 7. МОДЕЛ ПРОРАЧУНА ЕНЕРГИЈЕ АБРАЗивног ВОДеног МЛАЗА

Током обраде материјала абразивним воденим млазом долази до одступања абразивног воденог млаза од вертикалне линије. Ово скретање абразивног воденог млаза је последица кретања резне главе у односу на предмет обраде и губитка енергије абразивног воденог млаза при продирању кроз материјал који се обрађује. Величина тог скретања зависи како од брзине кретања резне главе, тако и од енергије абразивног воденог млаза. Абразивни водени млаз се при продирању у предмет обраде креће путањом која је дефинисана предњом линијом реза.

Кинетичка енергија абразивног воденог млаза, на изласку из абразивне млазнице се може представити следећом формулом, [70].

$$E_{awj} = \frac{M_{awj} \cdot v_{awj}^2}{2} \quad (7.1.)$$

У формули (7.1.) је  $M_{awj}$  маса абразивног воденог млаза који протекне кроз абразивну млазницу у неком временском интервалу, [70], а  $v_{awj}$  је брзина абразивног воденог млаза на уласку абразивног воденог млаза у предмет обраде.

$$M_{awj} = (m_a + m_w) \cdot t \quad (7.2.)$$

У овом изразу  $m_a$  и  $m_w$  су проток абразива и проток воде у јединици времена. Како проток абразивног воденог млаза мора бити једнак збиру протока воде и протока абразива (ваздух као трећа компонента се занемарује јер чини до 3% укупног протока), брзина абразивног воденог млаза се може изразити на следећи начин, [70]:

$$v_{awj} = \alpha \frac{v_w}{1 + \frac{m_a}{m_w}} \quad (7.3.)$$

Целокупна енергија чистог воденог млаза који долази до коморе за мешање се не преноси на абразивне честице јер постоје губици на трење о зидове абразивне млазнице и коморе за мешање, као и на изласку из водене млазнице, па се зато уводи коефицијент  $\alpha$ . Овај коефицијент је бездимензионални и најчешће има вредност  $0,6 < \alpha < 0,8$  [2].

За водени млаз који пролази кроз дијамантску млазницу се може написати и *Bernoulli*-јева једначина у следећем облику, [70]:

$$p_{at} + \frac{\rho_w}{2} \cdot v_{w1}^2 + \rho_w \cdot g \cdot h_1 = p_{at} + \frac{\rho_w}{2} \cdot v_{w2}^2 + \rho_w \cdot g \cdot h_2 \quad (7.4.)$$

где је:

- $v_{w1}$  – брзина млаза на изласку из водене млазнице,
- $v_{w2}$  – брзина воде на уласку у водену млазницу,
- $h_1$  и  $h_2$  – висине испред и иза водене млазнице,
- $p$  – притисак воде у инсталацији и
- $\rho_w$  – густина воде.

Како разлика у висинама не постоји  $h_1 = h_2$ , атмосферски притисак је много мањи од притиска у цевотоку  $p_{at} \ll p$  и брзина воде по изласку из млазнице је много већа од брзине воде која доспева у млазницу  $v_{w1} \gg v_{w2}$ , из ове једначине, брзина воденог млаза по изласку из водене млазнице се може изразити као, [70]:

$$v_{w1} = v_w = \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}} \quad (7.5.)$$

Ово је израз за израчунавање максималне теоријске брзине воденог млаза. Како и овде постоје губици, уводи се коефицијент искоришћења млазнице  $\varphi$ , па се брзина воденог млаза на излазу из млазнице може изразити као, [70]:

$$v_w = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}} \quad (7.6.)$$

Вредности за коефицијент  $\varphi$  се крећу у границама од 0.83÷0.93, [2]. Када се сви ови изрази замене у почетни, добија се коначан израз за кинетичку енергију абразивног воденог млаза, [70].

$$E_{avj} = \alpha^2 \cdot \varphi^2 \cdot \frac{m_w + m_a}{\left(1 + \frac{m_a}{m_w}\right)^2} \cdot \frac{p}{\rho_w} \cdot t \quad (7.7.)$$

## 7.1. ПРОРАЧУН СПЕЦИФИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Код свих обрада са уклањањем вишка материјала, енергија која се утроши за уклањање једне јединице запремине материјала који се обрађује се назива специфична енергија обраде –  $E_c$ . Специфична енергија неке обраде се може представити следећим изразом:

$$E_c = \frac{F \cdot L}{V} \quad (7.8.)$$

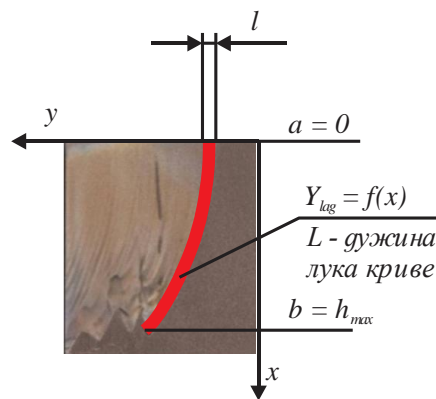
где  $V$  представља запремину уклоњеног материјала,  $F$  је сила којом се делује на предмет обраде, а  $L$  је дужина на којој та сила делује. Обзиром да је обрада абразивним воденим млазом, обрада са уклањањем – еродирањем материјала, овакав израз за прорачун специфичне енергије се може применити и за ову обраду.

Да би се одредила специфична енергија обраде абразивним воденим млазом, посматрани су узорци који нису расечени до краја, слика 7.1. На оваквом узорку је одређена запремина уклоњеног материјала и за режиме резања овог узорка израчуната енергија абразивног воденог млаза.

Енергија абразивног воденог млаза која се искористи за обраду, односно сечење материјала је пропорционална запремини материјала који се uklони из зоне резања процесом ерозије. Ова запремина се, даље, може изразити на основу дужине предње линије реза, дебљине слоја уклоњеног материјала и средње ширине реза:

$$V = L \cdot l \cdot W_{sr} \quad (7.9.)$$

У изразу (7.9.)  $L$  је дужина криве  $Y_{lag} = f(x)$  од уласка абразивног воденог млаза у предмет обраде до максималне дубине продирања абразивног воденог млаза у предмет обраде, односно дужина предње линије реза,  $W_{sr}$  средња ширина реза а  $l$  пут који резна глава пређе у једној секунди.



Слика 7.1. Запремина уклоњеног материјала при обради абразивним воденим млазом

Дужина криве  $L$  се може одредити на основу израза:

$$L = \int_a^b \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx \quad (7.10.)$$

Дужина  $l$ , односно пут који резна глава пређе у једној секунди износи:

$$l = v_c \cdot t \quad (7.11)$$

Енергија абразивног воденог млаза која је потребна за расечање материјала одређене дебљине,  $E_{pot}$ , односно, за уклањање одређене запремине материјала  $V$ , се може представити и као:

$$E_{pot} = V \cdot E_c \quad (7.12.)$$

где је  $E_c$  специфична енергија обраде, односно, енергија потребна да се резањем одвоји јединица запремине материјала који се обрађује, а  $V$  запремина материјала који

се уклања. Да би се дошло до потпуног раздвајања при сечењу абразивним воденим млазом, разлика између енергије на улазу и енергије која је потребна за обраду мора бити већа од специфичне енергије, односно:

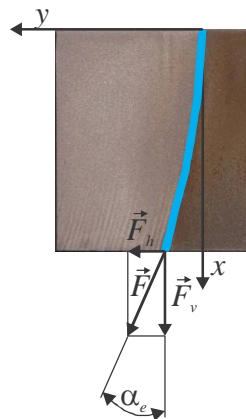
$$E_{awj} - E_{pot} > E_c \quad (7.13.)$$

Када се изрази (7.7.) и (7.12.) уврсте у израз (7.13.), добија се коначан израз за специфичну енергију обраде абразивним воденим млазом:

$$\alpha^2 \cdot \varphi^2 \cdot \frac{m_w + m_a}{\left(1 + \frac{m_a}{m_w}\right)^2} \cdot \frac{p}{\rho_w} \cdot t \cdot \frac{1}{(1+V)} > E_c \quad (7.14)$$

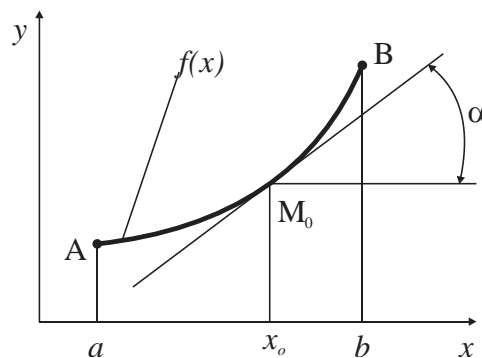
## 7.2. РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА ПРОРАЧУН ОТПОРА РЕЗАЊА

При свом кретању кроз материјал који се обрађује, абразивни водени млаз делује на материјал неком силом  $\vec{F}$ . Ова сила има исти правац и смер као и брзина абразивног воденог млаза  $\vec{v}$ , односно, тангентна је на путању абразивног воденог млаза, слика 7.2.



Слика 7.2. Сила резања при обради абразивним воденим млазом

На основу слике 7.3., тангента на неку криву, се може изразити као:



Слика 7.3. Тангенција на криву

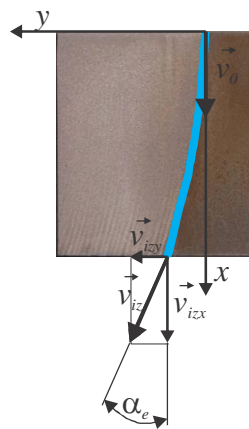
$$\operatorname{tg} \alpha = f'(x_0) \quad (7.15)$$

Сила  $\vec{F}$ , којом абразивни водени млаз делује на предмет обраде може се разложити на две компоненте,  $\vec{F}_v$  и  $\vec{F}_h$ , при чему је :

$$\vec{F} = \vec{F}_v + \vec{F}_h \quad (7.16.)$$

Сила којом абразивни водени млаз делује на предмет обраде такође је једнака промени количине кретања абразивног воденог млаза у неком временском интервалу  $\Delta t$ , слика 7.4.

$$m_{awj} \vec{v}_0 - m_{awj} \vec{v}_{iz} = \vec{F} \quad (7.17.)$$



Слика 7.4. Промена брзине абразивног воденог млаза

Ако се сила  $\vec{F}$  разложи на компоненте  $\vec{F}_v$  и  $\vec{F}_h$ , добијају се једначине:

$$m_{awj} \vec{v}_0 - m_{awj} \vec{v}_{izx} = \vec{F}_v \quad (7.18.)$$

и

$$m_{awj} \vec{v}_{izy} = \vec{F}_h \quad (7.19.)$$

Уколико је позната специфична енергија обраде абразивним воденим млазом, може се одредити и брзина абразивног воденог млаза на излазу из предмета обраде. То се може учинити на основу промене кинетичке енергије на улазу у материјал и на изласку из материјала. То се може представити следећим формулама:

$$E_{awj} - E_{pot} = E_{iz} \quad (7.20.)$$

$$E_{iz} = \frac{M_{awj} \cdot v_{iz}^2}{2} \quad (7.21.)$$

одакле следи:

$$v_{iz} = \sqrt{\frac{2 \cdot (E_{awj} - E_{pot})}{M_{awj}}} \quad (7.22.)$$

Такође, уколико је позната специфична енергија обраде абразивним воденим млазом, на основу формуле (7.8.) може се израчунати и сила резања. На основу формуле (7.8.), сила резања се може изразити следећом формулом:

$$F = \frac{E_c \cdot V}{L} \quad (7.23.)$$

Израз (7.20.) се може записати као:

$$E_{pot} = E_{awj} - E_{iz} \quad (7.24.)$$

Када се у израз (7.24.) уврсте изрази (7.1.), (7.12.) и (7.21), а потом обе стране поделе са временом  $t$ , израз постаје:

$$\frac{V \cdot E_c}{t} = \frac{M_{awj} \cdot v_0^2}{2 \cdot t} - \frac{M_{awj} \cdot v_{iz}^2}{2 \cdot t} \quad (7.25.)$$

Сређивањем израза (7.25.) се долази до:

$$\frac{V \cdot E_c}{t} = \frac{m_{awj} \cdot v_0^2}{2} - \frac{m_{awj} \cdot v_{iz}^2}{2} \quad (7.26.)$$

$$\frac{V \cdot E_c}{t} = \frac{m_{awj}}{2} \cdot (v_0^2 - v_{iz}^2) \quad (7.27.)$$

$$\frac{V \cdot E_c}{t} = \frac{m_{awj}}{2} \cdot (v_0 - v_{iz}) \cdot (v_0 + v_{iz}) \quad (7.28.)$$

Уколико се ради о интензитетима сила резања, изрази (7.18.) и (7.19.) постају:

$$m_{awj} \cdot (v_0 - v_{izx}) = F_v \quad (7.29.)$$

и

$$m_{awj} \cdot v_{izy} = F_h \quad (7.30.)$$

Израз (7.28.) се може пројектовати на  $x$  и  $y$  осу, и написати у следећим облицима:

$$\frac{V \cdot E_c}{t} \cdot \cos \alpha_e = \frac{m_{awj}}{2} \cdot (v_0 - v_{izx}) \cdot (v_0 + v_{izx}) \quad (7.31.)$$

$$\frac{V \cdot E_c}{t} \cdot \sin \alpha_e = \frac{m_{awj}}{2} \cdot v_{izy}^2 \quad (7.32.)$$

Даљим сређивањем израза се добија:

$$\frac{V \cdot E_c}{t \cdot v_{xsr}} \cdot \cos \alpha_e = F_v \quad (7.33.)$$

$$\frac{V \cdot E_c}{t \cdot v_{ysr}} \cdot \sin \alpha_e = F_h \quad (7.34.)$$

где су  $v_{xsr}$  и  $v_{ysr}$  средње вредности брзина у правцу оса. Ове брзине се могу представити следећим изразима:

$$v_{xsr} = \frac{(v_0 + v_{izx})}{2} \quad (7.35.)$$

и

$$v_{ysr} = \frac{v_{izy}}{2} \quad (7.36.)$$

Отпор резања су по интензитету једнак сили резања, истог је правца а супротног смера у односу на силу резања. На основу претходног теоријског разматрања, за прорачун отпора резања је потребно претходно дефинисати геометрију предње линије реза, ширину реза и специфичну енергију обраде абразивним воденим млазом.

Како је већ поменуто, да би дошло до потпуног раздвајања материјала који се сече абразивним воденим млазом, потребно је да енергија абразивног воденог млаза који се користи за обраду сечењем буде већа од енергије која је потребна за расецање материјала. За одређивање специфичне енергије обраде абразивним воденим млазом посматрани су узорци који нису расечени до краја. За узорак број 12, слика 7.5., расецање није могло бити извршено до краја. За овај узорак је израчуната специфична енергија обраде абразивним воденим млазом.



Слика 7.5. Узорак број 12,  
 $p_5 = 205 \text{ MPa}$ ,  $v_c = 35 \text{ mm/min}$ ,  $m_a = 400 \text{ g/min}$ , X5CrNi 18–10, # 30 mm

На основу слике 7.5. се види да је целокупна енергија абразивног воденог млаза утрошена за уклањање материјала, али да та енергија није била довољна за потпуно расецање материјала, већ само за уклањање одређене запремине материјала. На основу тога израз (7.20.) се може прилагодити на следећи начин:

$$E_{awj} = E_{pot} \quad (7.37.)$$

Користећи изразе (7.12.) и (7.37.) долази се до израза за специфичну енергију:

$$E_c = \frac{E_{awj}}{V} \quad (7.38.)$$

$E_{awj}$  је енергија абразивног воденог млаза описана изразом (7.7.)

$$E_{awj} = \alpha^2 \cdot \varphi^2 \cdot \frac{m_w + m_a}{\left(1 + \frac{m_a}{m_w}\right)^2} \cdot \frac{P}{\rho_w} \cdot t$$

а  $V$  запремина уклоњеног материјала, (7.9.).

$$V = L \cdot l \cdot W_{sr}$$

У изразу (7.7.),  $t$  је време.

Да би се одредила запремина уклоњеног материјала, прво је било потребно одредити дужину предње линије реза до дубине до које је извршено расецање,  $L$ , (7.10.).

$$L = \int_a^b \sqrt{1 + \left(f'(x)\right)^2} dx$$

Полазећи од израза да је :

$$f_{(x)} = f_{(h)} \quad (7.39.)$$

и од општег емпиријског израза (6.28.):

$$f_{(h)} = Y_{lag} = 132.3607 \cdot h^{1.687} \cdot p^{-1.4297} \cdot m_a^{-0.691} \cdot v_c^{0.9274}$$

за конкретне вредности режима резања  $p = 205$  МПа,  $v_c = 35$  mm/min и  $m_a = 400$  g/min, израз (6.17.) се може представити у следећем облику:

$$f_{(x)} = 0.02838 \cdot x^{1.687} \quad (7.40.)$$

тако да се израз за израчунавање дужине лука криве може писати у следећем облику:

$$L = \int_0^{26.70511} \sqrt{1 + 0.00223 \cdot x^{1.32716}} dx \quad (7.41.)$$

Из израза (7.41.), се добија:

$$L = 27.68 \text{ mm}.$$



Пут који резна глава пређе у једној секунди, на основу израза (7.11.), једнак је:

$$l = v_c \cdot t$$

Заменом вредности  $t = 1$  s, добија се да је пређени пут једнак:

$$l = 0.583 \text{ mm}.$$

Средња ширина реза је средња вредност ширине реза на улазу абразивног воденог млаза у материјал који се обрађује и ширине реза на излазу абразивног воденог млаза из материјала који се обрађује.

$$W_{sr} = \frac{W_g + W_d}{2} \quad (7.42.)$$

Ширина реза на улазу абразивног воденог млаза у материјал који се обрађује је дата изразом (6.11.):

$$W_g = 1.044 + p \cdot 2.237 \cdot 10^{-4}$$

Заменом вредности за  $p = 205$  МПа, добија се да је:

$$W_g = 1.09 \text{ mm}.$$

Ширина реза на излазу абразивног воденог млаза из материјала који се обрађује је дата изразом (6.13.):

$$W_d = 1.341 - 0.0052 \cdot p + 9.76 \cdot 10^{-6} \cdot p^2$$

Заменом вредности за  $p = 205$  МПа, добија се да је:

$$W_d = 0.685 \text{ mm}.$$

На основу ових вредности добија се да је:

$$W_{sr} = 0.888 \text{ mm}.$$

Заменом свих добијених вредности у формулу (7.9.) добија се запремина уклоњеног материјала:

$$V = 14.33 \text{ mm}^3.$$

Енергија абразивног воденог млаза се израчунава на основу формуле (7.7.):

$$E_{awj} = \alpha^2 \cdot \varphi^2 \cdot \frac{m_w + m_a}{\left(1 + \frac{m_a}{m_w}\right)^2} \cdot \frac{p}{\rho_w} \cdot t$$

где су  $\alpha$  и  $\varphi$  бездимензиони коефицијенти,  $\alpha = 0.6$ ,  $\varphi = 0.83$ ,  $\rho_w$  густина воде која је на притиску  $p = 205 \text{ MPa}$  је  $1088 \text{ kg/m}^3$ , а  $m_w$  проток воде. Проток воде за машину на којој су експерименти вршени је био подешен на  $m_w = 2 \text{ l/min}$ . Временски интервал за који је вршен прорачун је  $t = 1 \text{ s}$ . Заменом свих вредности добија се да је:

$$E_{awj} = 1298.02 \text{ J.}$$

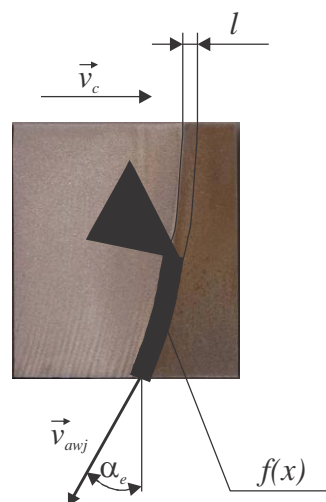
Када се у изразу (7.38.) замене вредности за запремину уклоњеног материјала и енергију абразивног воденог млаза, добија се специфична енергија обраде абразивним воденим млазом:

$$E_c = 0.9058 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}.$$

Користећи израз (7.23.), заменом израчунате вредности специфичне енергије, могу се прорачунати вредности отпора резања при обради абразивним воденим млазом.

$$F = \frac{E_c \cdot V}{L}$$

При развоју модела за прорачун отпора резања код обраде абразивним воденим млазом, абразивни водени млаз је апроксимиран резним клином вишесечног алата који се креће брзином  $v_{awj}$  кроз материјал који се обрађује. Истовремено, резна глава се креће у односу на материјал који се обрађује брзином  $v_c$ , слика 7.6.



Слика 7.6. Апроксимација процеса обраде абразивним воденим млазом

У изразу (7.22.),  $L$  је дужина лука предње линије реза која је дефинисана општим емпиријским изразом (6.17.) и то је дужина на којој делује сила резања (дужина струготине).  $E_c$  је специфична енергија обраде абразивним воденим млазом а  $V$  је запремина уклоњеног материјала и дефинисана је изразом (7.9.):

$$V = L \cdot l \cdot W_{sr}$$

Ознаке  $L$  и  $W_{sr}$  имају исто значење и одређују се помоћу истих формула као у прорачуну специфичне енергије обраде абразивним воденим млазом.  $l$  је пут који резна глава пређе за време које је потребно замишљеном резном клину да пређе пут  $L$ , односно:

$$l = v_c \cdot \frac{L}{v_{avj}} \quad (7.43.)$$

Помоћу овог модела прорачунати су отпори резања за све узорке приказане у табели 7.1. Резултати прорачуна су дати у табели 7.2.

Табела 7.1. Узорци за које је вршен прорачун отпора резања

Редни број узорка	$p$ , МПа	$v_c$ , mm/min	$m_a$ , g/min	$s$ , mm	Материјал	$x_0$ , mm
1.	270	50	400	20	X5CrNi 18–10	3
2.	320	50	400	20	X5CrNi 18–10	3
3.	380	50	400	20	X5CrNi 18–10	3
4.	413	50	400	20	X5CrNi 18–10	3
5.	413	50	200	20	X5CrNi 18–10	3
6.	413	50	250	20	X5CrNi 18–10	3
7.	413	50	300	20	X5CrNi 18–10	3
8.	413	50	350	20	X5CrNi 18–10	3
9.	413	50	400	20	X5CrNi 18–10	3
10.	413	30	400	20	X5CrNi 18–10	3
11.	413	50	400	20	X5CrNi 18–10	3
12.	413	70	400	20	X5CrNi 18–10	3
13.	413	90	400	20	X5CrNi 18–10	3
14.	413	110	400	20	X5CrNi 18–10	3
15.	320	50	300	20	X5CrNi 18–10	3
16.	270	30	200	20	X5CrNi 18–10	3
17.	413	70	400	20	AISI 1043	3
18.	320	50	300	20	AISI 1043	3
19.	270	30	200	20	AISI 1043	3
20.	413	70	400	20	S 235 JRG2	3
21.	320	50	300	20	S 235 JRG2	3
22.	270	30	200	20	S 235 JRG2	3
23.	413	150	400	5	X5CrNi 18–10	3
24.	413	100	400	5	X5CrNi 18–10	3
25.	413	70	400	5	X5CrNi 18–10	3
26.	413	100	400	10	X5CrNi 18–10	3
27.	413	70	400	10	X5CrNi 18–10	3
28.	413	50	400	10	X5CrNi 18–10	3
29.	413	100	400	15	X5CrNi 18–10	3
30.	413	70	400	15	X5CrNi 18–10	3
31.	413	50	400	15	X5CrNi 18–10	3
32.	413	100	400	25	X5CrNi 18–10	3
33.	413	70	400	25	X5CrNi 18–10	3
34.	413	50	400	25	X5CrNi 18–10	3
35.	413	70	400	25	X5CrNi 18–10	2
36.	413	70	400	25	X5CrNi 18–10	3
37.	413	70	400	25	X5CrNi 18–10	4

Табела 7.2. Вредности израчунајне силе резања (на основу формуле 7.23.) за узорке из шабеле 7.1.

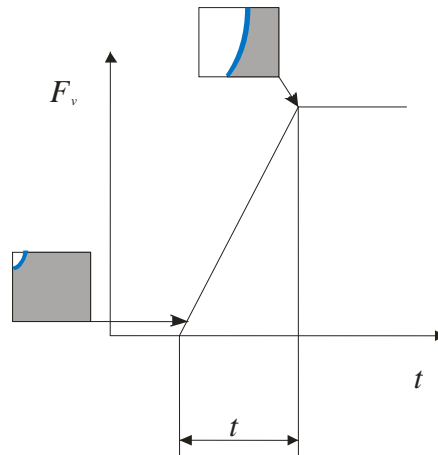
Редни број узорка	$L$ , mm	$l$ , mm	$W_{sp}$ , mm	$V$ , mm <sup>3</sup>	$F$ , N
1.	20.51	2.92248E-05	0.873	0.000523	2.310992
2.	20.31	2.65925E-05	0.9035	0.000488	2.176301
3.	20.19	2.42576E-05	0.942	0.000461	2.069809
4.	20.15	2.32215E-05	1.001	0.000468	2.105504
5.	20.39	2.34992E-05	0.911	0.000437	1.939114
6.	20.29	2.33801E-05	0.9865	0.000468	2.089183
7.	20.23	2.33064E-05	0.965	0.000455	2.037205
8.	20.18	2.32567E-05	0.941	0.000442	1.982306
9.	20.15	2.32215E-05	0.981	0.000459	2.063436
10.	20.06	1.38685E-05	1.064	0.000296	1.336607
11.	20.15	2.32215E-05	0.974	0.000456	2.048712
12.	20.28	3.27206E-05	0.912	0.000605	2.703013
13.	20.45	4.2412E-05	0.863	0.000748	3.315366
14.	20.65	5.23373E-05	0.85	0.000918	4.029603
15.	20.46	2.67897E-05	0.93	0.00051	2.256751
16.	20.51	1.75394E-05	0.9395	0.000338	1.492604
17.	20.28	3.27206E-05	1.029	0.000683	3.049781
18.	20.46	2.67897E-05	0.989	0.000542	2.399921
19.	20.51	1.75394E-05	1.0085	0.000363	1.602225
20.	20.28	3.27206E-05	1.029	0.000683	3.049781
21.	20.46	2.67897E-05	0.979	0.000537	2.375655
22.	20.51	1.75394E-05	0.9705	0.000349	1.541854
23.	5.043	1.74345E-05	0.9755	8.58E-05	1.540527
24.	5.021	1.15702E-05	1.0495	6.1E-05	1.099909
25.	5.011	8.08319E-06	1.0445	4.8E-05	0.867628
26.	10.11	2.32903E-05	1.081	0.000246	2.203511
27.	10.05	1.62207E-05	1.081	0.000176	1.588287
28.	10.03	1.1557E-05	1.1115	0.000129	1.163553
29.	15.28	3.5205E-05	1.1645	0.000626	3.713441
30.	15.14	2.44294E-05	0.9805	0.000363	2.169669
31.	15.08	1.73732E-05	0.935	0.000245	1.471377
32.	25.92	5.97253E-05	0.9385	0.001453	5.077204
33.	25.48	4.11025E-05	0.917	0.00096	3.414054
34.	25.26	2.91049E-05	0.939	0.00069	2.475504
35.	25.48	4.11025E-05	0.981	0.001027	3.65233
36.	25.48	4.11025E-05	0.873	0.000914	3.250239
37.	25.48	4.11025E-05	0.972	0.001018	3.618822

За исте узорке израчунао је и угао  $\alpha_e$ , слика 7.6. и на основу формуле (7.14.), па су на основу овог угла, отпори резања разложени на компоненте  $F_v = F_1$  и  $F_h = F_3$ . Ови резултати су дати у табели 7.3.

Табела 7.3. Израчунаше вредности оштора резања

Редни број узорка	$\alpha_e, ^\circ$	$\sin\alpha$	$\cos\alpha$	$F_v, N$	$F_h, N$
1.	19.30371	0.330414301	0.943836	2.181197	0.763585
2.	15.36171	0.264780636	0.964309	2.098627	0.576242
3.	12.12724	0.209978462	0.977706	2.023665	0.434615
4.	10.79993	0.187286214	0.982305	2.068247	0.394332
5.	17.11713	0.294181355	0.95575	1.853308	0.570451
6.	14.78648	0.255091151	0.966917	2.020067	0.532932
7.	13.10029	0.226543386	0.974001	1.98424	0.461515
8.	11.81578	0.204663344	0.978832	1.940345	0.405705
9.	10.79993	0.187286214	0.982305	2.026923	0.386453
10.	6.773789	0.117890186	0.993027	1.327287	0.157573
11.	10.79993	0.187286214	0.982305	2.01246	0.383696
12.	14.60751	0.252071111	0.967709	2.61573	0.681351
13.	18.21273	0.312392876	0.949953	3.149442	1.035697
14.	21.62026	0.368275416	0.929717	3.74639	1.484004
15.	18.52857	0.31762211	0.948217	2.13989	0.716794
16.	19.39731	0.331954943	0.943295	1.407966	0.495477
17.	14.60751	0.252071111	0.967709	2.951301	0.768762
18.	18.52857	0.31762211	0.948217	2.275646	0.762268
19.	19.39731	0.331954943	0.943295	1.511371	0.531867
20.	14.60751	0.252071111	0.967709	2.951301	0.768762
21.	18.52857	0.31762211	0.948217	2.252636	0.754561
22.	19.39731	0.331954943	0.943295	1.454423	0.511826
23.	11.52296	0.199660709	0.979865	1.509508	0.307583
24.	7.968059	0.138551204	0.990355	1.0893	0.152394
25.	5.741829	0.099995625	0.994988	0.863279	0.086759
26.	12.69938	0.219726074	0.975562	2.149662	0.484169
27.	9.195308	0.159720037	0.987162	1.567897	0.253681
28.	6.75735	0.117605421	0.99306	1.155478	0.13684
29.	16.58028	0.285217917	0.958463	3.559196	1.05914
30.	12.07259	0.209046311	0.977906	2.121732	0.453561
31.	8.897379	0.154587415	0.987979	1.45369	0.227456
32.	22.92443	0.389329856	0.921098	4.676602	1.976707
33.	16.89883	0.29053961	0.956863	3.266782	0.991918
34.	12.53653	0.216953772	0.976182	2.416542	0.53707
35.	16.89883	0.29053961	0.956863	3.494779	1.061147
36.	16.89883	0.29053961	0.956863	3.110033	0.944323
37.	16.89883	0.29053961	0.956863	3.462717	1.051411

У општем случају дијаграм отпора резања при обради абразивним воденим млазом изгледа као на слици 7.7. У почетном тренутку, отпор резања има вредност нула. Током времена, абразивни водени млаз улази све даље у материјал који се обрађује, па вредност отпора резања расте.



Слика 7.7. Дијаграм промене општора резања  $F_v$

Коначну вредност отпор резања достиже тек када је материјал који се обрађује расечен до краја, односно након временског периода који је на слици 7.7. обележен као  $t$ . Ова појава је последица скретања абразивног воденог млаза. Овакав облик у највећем броју случајева имају и сигнали измерених отпора резања. Са сигнала измерених отпора резања су очитане максималне вредности отпора  $F_v$ . Овако очитане вредности су упоређене са вредностима добијеним прорачуном. Упоредне вредности отпора резања су дате у табели 7.4.

Табела 7.4. Поређење израчунаних и измерених вредности ошћора резања  $F_v$ 

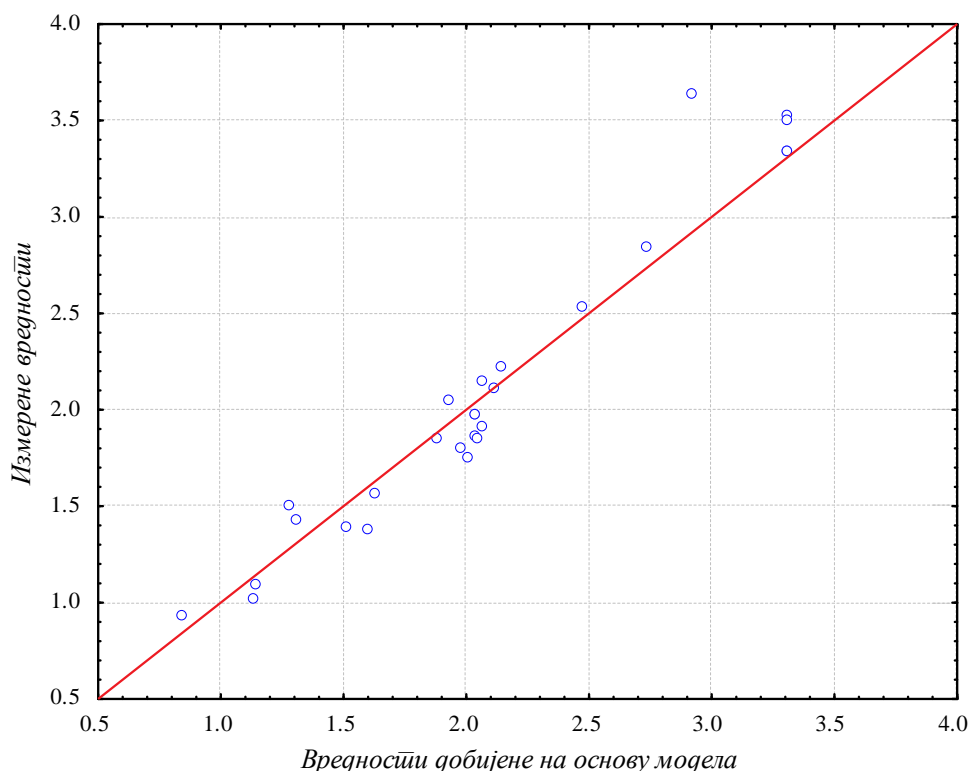
Редни број узорка	Израчунато	Измерено
	$F_v, N$	$F_v, N$
1.	2.181197	0.97
2.	2.098627	2.12
3.	2.023665	1.92
4.	2.068247	1.98
5.	1.853308	1.856
6.	2.020067	2.05
7.	1.98424	1.81
8.	1.940345	1.76
9.	2.026923	1.86
10.	1.327287	1.43
11.	2.01246	1.98
12.	2.61573	2.85
13.	3.149442	1.98
14.	3.74639	3.45
15.	2.13989	1.85
16.	1.407966	1.5
17.	2.951301	1.12
18.	2.275646	1.22
19.	1.511371	1.46
20.	2.951301	1.32
21.	2.252636	2.19
22.	1.454423	1.55
23.	1.509508	1.57
24.	1.0893	1.1
25.	0.863279	0.93
26.	2.149662	2.15
27.	1.567897	1.4
28.	1.155478	1.02
29.	3.559196	3.64
30.	2.121732	2.23
31.	1.45369	1.38
32.	4.676602	1.58
33.	3.266782	3.34
34.	2.416542	2.53
35.	3.494779	3.53
36.	3.266782	3.34
37.	3.462717	3.51

На основу измерених вредности за отпор резања  $F_v$  (вредности из табеле 7.4. које су осенчене нису узете у разматрање, јер много одступају од вредности добијених прорачуном а узорци број 17, 18, 19, 20, 21 и 22 нису од материјала за који је позната специфична енергија обраде), добијен је следећи израз:

$$F_v = 0.006 \cdot p^{-0.137} \cdot v_c^{0.871} \cdot m_a^{0.11} \cdot s^{0.853} \quad (7.44.)$$

Из ове корелативне зависности се може уочити да највећи утицај на отпор резања имају брзина кретања резне главе и дебљина материјала који се обрађује.

Ова зависност је показала доста велики степен поклапања са измереним вредностима, што показује и коефицијент корелације  $R = 0.9617$ . Однос измерених вредности и вредности добијених на основу модела, датог у формули (7.44.), за отпор резања  $F_v$ , приказан је на слици 7.8.



Слика 7.8. Однос измерених вредности и прорачунајних вредности добијених на основу израза (7.44.) за  $F_v$

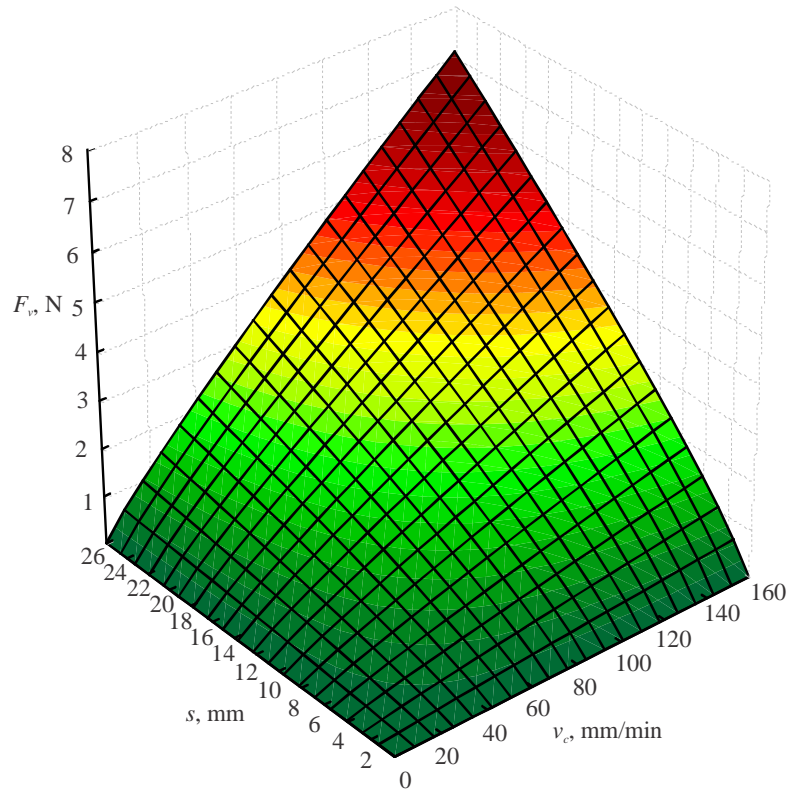
Параметри процеса обраде абразивним воденим млазом који се најчешће мењају су брзина кретања резне главе и дебљина материјала који се обрађује (углавном се ради са максималним притиском и протоком абразива). Због тога се може користити поједностављен израз за дефинисање зависности отпора резања  $F_v$  од брзине кретања резне главе и дебљине материјала који се обрађује. Модел је дефинисан формулом (7.45.):

$$F_v = 0.0049 \cdot v_c^{0.88} \cdot s^{0.856} \quad (7.45.)$$



За модел представљен претходном формулом је коефицијент корелације  $R = 0.96$ .

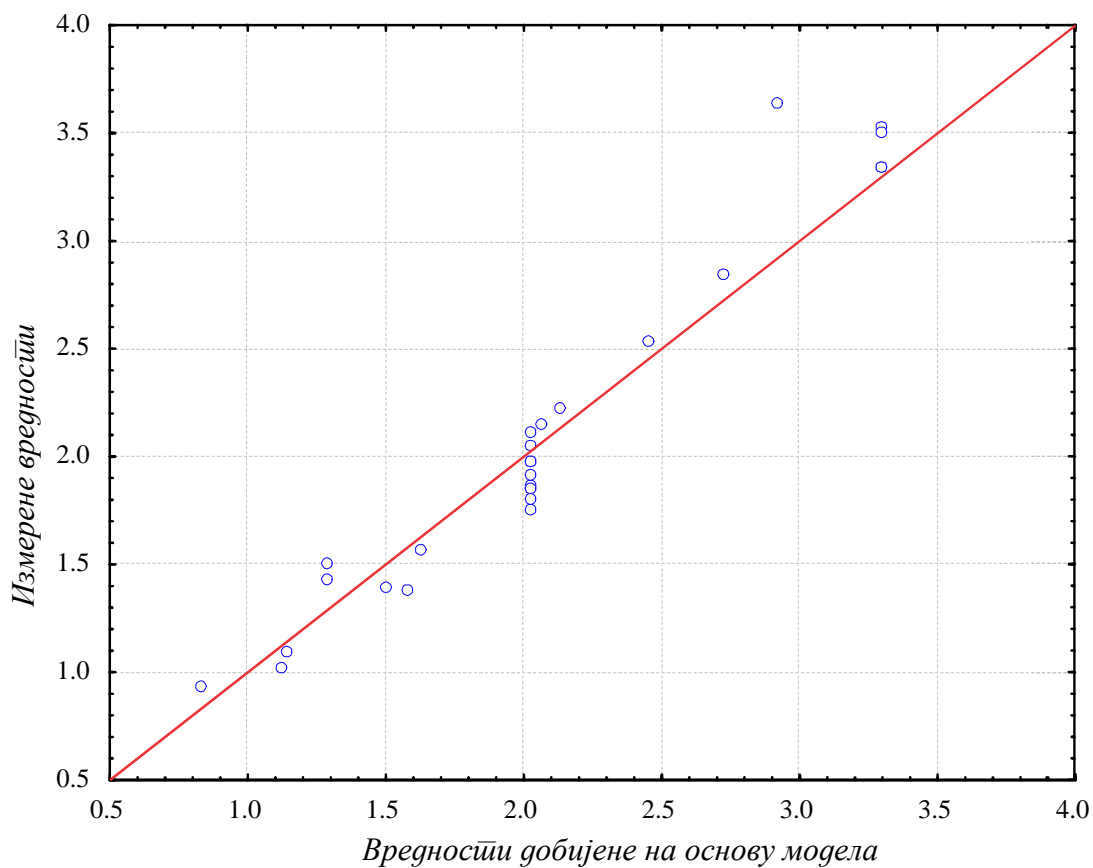
Зависност отпора резања  $F_v$  од брзине кретања резне главе –  $v_c$  и дебљине материјала који се обрађује –  $s$ , приказана је на слици 7.9.



Слика 7.9. Зависности отпора резања  $F_v$  од брзине резне главе –  $v_c$  и дебљине материјала који се обрађује –  $s$

Однос измерених вредности и вредности добијених за отпор резања  $F_v$ , на основу израза (7.45.), приказан је на слици 7.10.

На слици се види да се вредности добијене на основу израза (7.45.) и вредности које су добијене мерењем доста добро поклапају. То значи да је корелативна зависност, дефинисана изразом (7.45.), задовољавајућа и да се може користити за прорачун отпора резања за све препоручене вредности брзине кретања резне главе и одговарајуће дебљине челика X5CrNi 18-10.



Слика 7.10. Однос измерених вредности и израчунајних вредности добијених на основу израза (7.45.) за  $F_v$

## 8. ЗАКЉУЧАК

Обрада абразивним воденим млазом је један од новијих неконвенционалних поступака обраде. Она се данас све више примењује у индустрији, најчешће за контурно сечење различитих врста материјала. Иако се све више примењује, обрада абразивним воденим млазом је још увек, добрим делом, неистражена област.

Прегледом литературе, уочено је да је највећи број истраживања из области обраде абразивним воденим млазом, био усмерен на дефинисање максималне дубине реза. Сви модели, до којих се могло доћи, максималну дубину реза одређују на основу експеримената који су вршени за случај када се резна глава не креће. Доста аутора се бавило истраживањем утицаја појединих параметара процеса обраде абразивним воденим млазом на геометрију реза (ширину реза и угао нагиба реза), али тако добијени модели имају ограничену примену – важе само за одређене услове обраде и материјале. Веома мали број истраживања је био усмерен ка одређивању храпавости обрађене површине и утицаја појединих параметара процеса обраде на храпавост обрађене површине. Енергијом абразивног воденог млаза и отпорима резања при обради се бавило свега неколико аутора, при чему су њихова истраживања такође била вршена у условима када се резна глава не креће. Због свега наведеног, у овој докторској дисертацији су вршена истраживања утицаја најважнијих параметара процеса обраде абразивним воденим млазом – радног притиска, брзине кретања резне главе, протока абразива итд. на квалитет реза и на отпоре резања, успостављање корелативних зависности и развој модела прорачуна енергије абразивног воденог млаза и отпора резања. Истраживања су била усмерена на више основних циљева:

- дефинисање технолошких параметара процеса обраде абразивним воденим млазом и излазних параметара процеса и систематизацију теоријских знања о њиховој међузависности,
- развој експерименталне опреме и мерног ланца за мерења у обради абразивним воденим млазом,
- експериментално одређивање зависности између технолошких параметара процеса обраде и излазних параметара,
- развој теоријског модела прорачуна отпора резања и потребне енергије абразивног воденог млаза.

Радни притисак, брзина кретања резне главе, проток абразива, дебљина предмета обраде, материјал предмета обраде и растојање резне главе од предмета обраде су најзначајнији улазни параметри процеса обраде. Излазни параметри процеса обраде абразивним воденим млазом су храпавост обрађене површине, ширина реза,

угао нагиба реза и отпор резања. За праћење промене излазних параметара процеса обраде у зависности од улазних параметара процеса обраде развијен је мерни ланац.

Анализом утицаја радног притиска на храпавост обрађене површине, уочено је да је радни притисак параметар који има веома велики утицај на храпавост обрађене површине. При обради материјала абразивним воденим млазом са већим вредностима радног притиска добија се обрађена површина чија је храпавост знатно мања него при обради са нижим вредностима радног притиска. Брзина кретања резне главе је параметар процеса обраде абразивним воденим млазом који значајно утиче на храпавост обрађене површине. Са повећањем брзине кретања резне главе долази до значајног повећања храпавости обрађене површине. Што је дубина реза већа, израженије је повећање храпавости обрађене површине.

Поред радног притиска и брзине кретања резне главе, анализиран је и утицај протока абразива на храпавост обрађене површине. Анализом експериментално добијених резултата, уочено је да повећање протока абразива, али само до одређене вредности, доводи до смањења храпавости обрађене површине. Даље повећање протока абразива доводи до поновног повећања храпавости обрађене површине. Са повећањем дубине реза, ова промена је још израженија.

Растојање резне главе од предмета обраде је параметар процеса обраде абразивним воденим млазом чији је утицај на храпавост обрађене површине такође анализиран. На основу резултата мерења, уочава се да повећање растојања резне главе од предмета обраде доводи до повећања храпавости обрађене површине.

На храпавост обрађене површине има утицај и врста челика који је обрађиван. Све карактеристике материјала који се обрађује утичу на храпавост обрађене површине. Тврдоћа материјала, граница течења, затезна чврстоћа и остале карактеристике материјала на различите начине утичу на храпавост обрађене површине. Да би се са сигурношћу могло тврдити на који начин нека карактеристика обрађиваног материјала утиче на храпавост обрађене површине, потребна су додатна истраживања.

На основу резултата мерења дефинисане су корелативне зависности параметра храпавости обрађене површине  $Ra$  и радног притиска и брзине кретања резне главе. Ови модели имају ограничену примену, јер важе само за одређени материјал и одређене дебљине материјала.

У докторској дисертацији је, такође, анализиран утицај стања абразивне млазнице на храпавост обрађене површине. Утврђено је да се са временом проведеним у раду повећава излазни пречник абразивне млазнице. Повећање излазног пречника абразивне млазнице доводи до смањења брзине абразивног воденог млаза, што узрокује повећање храпавости обрађене површине.

Поред анализе утицаја наведених улазних параметара процеса обраде абразивним воденим млазом на храпавост обрађене површине, анализиран је и њихов утицај на остале излазне параметре, као што су: ширина реза на улазу абразивног воденог млаза у предмет обраде и на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде и на угао нагиба реза. Обрада са већим вредностима радног притиска доводи до повећања ширине реза на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде, док се ширина реза на улазу абразивног воденог млаза не мења значајно. То значи да повећање вредности радног притиска доводи до смањења угла нагиба реза, односно, обрадом са већим вредностима радног притиска се добија већа паралелност страница реза.

Брзина кретања резне главе има значајан утицај на ширину реза. Са повећањем брзине кретања резне главе долази до смањења ширине реза на излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде, док ширина реза на улазу абразивног воденог млаза

у предмет обраде остаје скоро непромењена. Такође, са повећањем брзине кретања резне главе долази до повећања угла нагиба реза, чиме је и тачност обраде мања. Утицај протока абразива на ширину реза и на уласку и на изласку абразивног воденог млаза из предмета обраде је занемарљив.

Растојање резне главе од предмета обраде утиче на ширину реза. Анализом резултата мерења, уочено је да постоји оптимално растојање резне главе од предмета обраде, при коме је угао нагиба реза најмањи. Смањење растојања резне главе од предмета обраде доводи до смањења ширине реза на уласку и изласку абразивног воденог млаза из предмета обраде, али и до повећања угла нагиба реза. Повећање растојања резне главе од предмета обраде доводи до повећања ширине реза на уласку и изласку абразивног воденог млаза из предмета обраде и до повећања угла нагиба реза.

Када је у питању ширина реза, врста материјала који је обрађиван има утицај. Све карактеристике материјала утичу на ширину реза, али је њихов утицај различит.

Статистичком анализом резултата мерења изведени су изрази за корелативне зависности ширине реза на улазу и излазу абразивног воденог млаза из предмета обраде и угла нагиба реза од радног притиска и брзине кретања резне главе.

Такође је анализиран и утицај радног притиска, брзине кретања резне главе, протока абразива и осталих параметара процеса обраде на отпоре резања. Анализом резултата мерења, утврђено је да раст радног притиска доводи до смањења отпора резања. Утицај протока абразива на отпор резања је готово занемарљив, док брзина кретања резне главе и дубина реза знатно утичу на отпор резања. Повећање брзине кретања резне главе, ако и повећање дубине реза доводе до повећања отпора резања.

Карактеристике материјала који се обрађује, такође утичу на вредности отпора резања. Како је брзина кретања резне главе један од најутицајнијих параметара процеса обраде на отпоре резања, утицај врсте обрађиваног материјала је израженији при обради са већим брзинама кретања резне главе.

Анализом сигнала мерења отпора резања, уочено је да са повећањем дубине реза долази до раста отпора резања. Максималну вредност отпор резања достиже тек када је абразивни водени млаз потпуно расекао предмет обраде.

На основу резултата мерења отпора резања, формиран је математички модел за прорачун отпора резања у функцији од радног притиска, брзине кретања резне главе, протока абразива и дебљине предмета обраде. Обзиром да брзина кретања резне главе и дебљина предмета обраде имају највећи утицај на отпор резања, формиран је и упрешћен математички модел за одређивање отпора резања у зависности од ова два параметра.

Значајан део истраживања је посвећен дефинисању облика предње линије реза. Као што је већ речено, предња линија реза је линија која показује путању абразивног воденог млаза кроз материјал који се обрађује. До сада је ова линија најчешће описивана параболом, у којој фигурише максимална дубина реза. У овом раду је формиран математички модел за дефинисање облика предње линије реза у зависности од радног притиска, брзине резања, протока абразива и дубине реза. Уочено је да повећање радног притиска и протока абразива доводе до смањења одступања предње линије реза од идеалне вертикалне линије, док повећање брзине резне главе доводи до његовог повећања. Математички модел који је у овом раду развијен, показао је доста добро поклапање са измереним вредностима.

Прорачуну енергије абразивног воденог млаза је посвећен значајан део истраживања. Циљ истраживања је био да се енергија абразивног воденог млаза при обради, у условима када се резна глава креће и када се обрађује неки материјал, дефинише у функцији параметара процеса обраде и да се формира модел за израчунавање потребне енергије абразивног воденог млаза. На основу закона о очувању

енергије и математичког модела за дефинисање облика предње линије реза, изведен је израз за израчунавање специфичне енергије обраде абразивним воденим млазом.

Полазећи од претпоставке да се обрада абразивним воденим млазом може представити као обрада вишесечним крутим алатом, комбиновањем раније стечених знања из класичне обраде резањем и обраде абразивним воденим млазом, као и новонасталих модела, развијен је теоријски модел за дефинисање отпора резања, који повезује отпор резања и специфичну енергију обраде абразивним воденим млазом.

Резултати експерименталних истраживања, приказани у овом раду, показују да параметри процеса обраде абразивним воденим млазом директно утичу на излазне параметре процеса обраде. Такође се може закључити да је специфична енергија обраде абразивним воденим млазом карактеристика материјала који се обрађује и зависи од параметара процеса обраде.

Реализована експериментална истраживања, математичка и теоријска моделирања и овако добијени резултати указују на правце будућих истраживања:

- даља истраживања утицаја улазних параметара процеса обраде на излазне параметре у циљу верификације постављених модела,
- истраживања утицаја протока абразива на енергију абразивног воденог млаза и дефинисање модела енергије абразивног воденог млаза у функцији протока абразива,
- истраживања утицаја протока абразива на излазне параметре процеса обраде абразивним воденим млазом и одређивање оптималне вредности протока абразива,
- истраживање утицаја параметара процеса обраде абразивним воденим млазом, пре свега радног притиска и осцилација вредности радног притиска, на облик предње линије реза, валовитост обрађене површине и законитост њиховог понављања,
- формирање модела за симулацију обраде абразивним воденим млазом и развој виртуелног модела симулације и
- истраживања утицаја улазних параметара процеса обраде на излазне параметре за већи број различитих материјала и режима резања.

Реализацијом наведених експерименталних истраживања и успостављањем зависности параметара процеса обраде абразивним воденим млазом и излазних параметара обраде створили би се услови за формирање математичког модела за оптимизацију процеса обраде и формирање експертског система. Такође, анализа енергије резања и поређење са другим врстама обраде резањем допринела би бољем разумевању суштине процеса који се одвијају у зони одношења материјала. То би омогућило даља теоријска разматрања и прорачуне.

## 9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Akkurt, A.*, „Surface properties of the cut face obtained by different cutting methods from AISI 304 stainless steel materials”, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol.16, 2009, pp. 373–384.
- [2] *Akkurt, A.*, „Cut Front Geometry Characterization in Cutting Applications of Brass with Abrasive Water Jet“, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol.19, No.4, 2010, pp. 599–606.
- [3] *Anwar, S., Axinte, D., Becker, A.*, „Finite element modelling of abrasive waterjet milled footprints“, *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, pp.180–193.
- [4] *Arola D., Ramulu, M.*, „Mechanism of material removal in abrasive waterjet machining“, *Proceedings of the Seventh Water Jet Conference*, vol. 1, WJTA, Seattle, Washington, 1993, pp. 46–64.
- [5] *Arola D., Ramulu M.*, „Material removal in abrasive waterjet machining of metals: Surface integrity and texture“, *Wear*, Vol. 210, 1997, pp. 50-58.
- [6] *Baralić, J., Nedić, B., Janković, P.*, „Effect of traverse speed and operating pressure on surface roughness in AWJ machining“, *ICPE 2013*, 2013, pp. 137-140.
- [7] *Baralić, J., Nedić, B.*, „The effect of abrasive water jet cutting parameters on kerf geometry“, *ММА 2012*, 2012, pp. 1-4.
- [8] *Baralić, J., Nedić, B.*, „Утицај хабања цеви за усмеравање млаза на изглед и квалитет обрађене површине“, 36. JUPITER Конференција, Машински факултет Београд, Београд, 2010., pp. 371-375.
- [9] *Baralić, J., Radonjić, S., Nedić, B.*, „Утицај хабања цеви за усмеравање млаза на квалитет обрађене површине“, XXXII Саветовање производног машинства Србије 2008, Нови Сад, 18.-20. септембар 2008., pp. 39-42.
- [10] *Baralić, J., Radonjić, S., Nedić, B.*, „Influence of focusing tube wear on the cut-surface quality“, 12. International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2008, Istanbul, Turkey, 26-30 August, 2008, pp. 33-36.
- [11] *Baralić, J., Nedić, B., Marušić, V.*, „Focusing Tube Wear and Quality of the Machined Surface of the Abrasive Water Jet Machining“, *Tribology in industry*, Vol. 30. No 3&4, 2008, pp. 55-58.
- [12] *Bitter, J.*, „A study of erosion phenomena, part I“, *Wear* 6, 1963, pp. 5–21.
- [13] *Bitter, J.*, „A study of erosion phenomena, part II“, *Wear* 6, 1963, pp. 169–190.
- [14] *Blickwedel, H., Guo, N. S., Haferkamp, H., et al.*, „Prediction of abrasive jet cutting performance and quality“, *Jet Cutting Technol.*, Elsevier, London, 1991, pp. 163–179.

- [15] *Bortolussi, A., Ciccu, R.*, "Contour cutting of thick steel plates", 14<sup>th</sup> International Conference Jetting Technology, Brugge, Belgium, Mechanical Engineering Publications, 1998, pp. 273–284.
- [16] *Burnett, A. J., Pittman, A.N., Bradley, M.S.A.*, „Observations on the modeling of erosive wear of a long-radius pneumatic conveyor bend“, Proc. Inst. Mech.Eng. Part J: J. Eng. Tribol. 212, 1998, pp. 369–379.
- [17] *Chao, J. E.*, Experimental study of the striation formation and spectral analysis of the abrasive water jet generated surfaces“, Proc. 7th Amer. Water Jet Conf. Vol. 1, 1993, pp. 27–41.
- [18] *Chao, J., Geskin, E.S., Chung, Y.*, „Investigation of the dynamics of the surfaces topography formation during abrasive waterjet machining“, Proceedings of the 11th International Conference on Jet Cutting Technology, BHR Group, St. Andrews, Scotland, Kluwer Academic Publishers, 1992, pp. 593–603.
- [19] *Chen F.L., Siores, E.*, „The effect of cutting jet variation on surface striation formation in abrasive water jet cutting“, J. Mater. Process. Technol. No. 135, 2003, pp. 1–5.
- [20] *Chen, W.L., Geskin, E. S.*, „Kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of ceramic materials“, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, pp. 1201–1206.
- [21] *Chithirai Pon Selvan, M., Mohana Sundara Raja, N.*, „A Machinability Study of Stainless Steel Using Abrasive Waterjet Cutting Technology“, International Conference on Mechanical, Automobile and Robotics Engineering (ICMAR'2012), Penang, Malaysia, 2012, pp. 208–212.
- [22] *Chung, Y., Geskin, E.S., Singh, P.*, “Prediction of the geometry of the kerf created in the course of abrasive water jet machining of ductile materials”, Jet Cutting Technol., Lichtarowicz, A., Kluwer Acad. Press, Dordrecht, 1992, pp. 525–541.
- [23] *Coray P.S., B. Jurisević, M. Junkar. K.C. Heinige*, “Measurements on 5:1 Scale Abrasive Water Jet Cutting Head Models”, pp. 1-15
- [24] *Deam R.T., E. Lemma, D.H. Ahmed*, „Modelling of the abrasive water jet cutting process“, Wear 257, 2004, 877–891.
- [25] *Deng T., M. Patel, I. Hutchings, M.S.A. Bradley*, „Effect of bend orientation on life and puncture point location due to solid particle erosion of a high concentration flow in pneumatic conveyors“, Wear, No. 258, 2005, pp. 426–433.
- [26] *El-Domiarty A.A., Abdel-Rahman, A.A.*, “Maximum depth of cut for ceramics using abrasive waterjet technique“, Wear, Vol. 218, No. 2, 1998, pp. 216–222.
- [27] *El-Domiarty, A.A., Shabara, M.A., Abdel-Rahman, A.A., et al.*, "On the modelling of abrasive waterjet cutting", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 12(4), 1996, pp. 255–265.
- [28] *Finnie, I.*, „The Mechanism of Erosion of Ductile Metals“, U.S. National Congress of Applied Mechanics, New York: ASME, 1958, pp. 527–532.
- [29] *Gudimetla, P., Yarlagadda, P.*, „Finite element analysis of the interaction between an AWJ particle and a polycrystalline alumina ceramic“, Journal of Achievements in Materials, No. 23, 2007, pp. 7–14.
- [30] *Guo, N.S., Louis, H., Meier, G.*, „Surface structure and kerf geometry in abrasive water jet cutting: formation and optimisation“, Proceedings of the Seventh Water Jet Conference, vol. 1, WJTA, Seattle, Washington, 1993, pp. 1–25.
- [31] *Guo, N. S.*, “Schneidprozeß und Schnittqualität beim Wasser abrasiv strahlschneiden”, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 2, Nr. 328, 1994.
- [32] *Hashish, M.*, „A modelling study of metal cutting with abrasive waterjets“, J. Eng. Mater. Technol., Vol. 106, 1984, pp. 88-100.



- [33] *Hashish, M.*, „On the modelling of surface waviness produced by abrasive waterjets“, Proceedings of the 11th International Conference on Jet Cutting Technology, BHR Group, St. Andrews, Scotland, Kluwer Academic Publishers, 1992, pp. 17–34.
- [34] *Hashish, M.*, „An improved model for erosion by solid particle impact“, Proc. 7th Int. Conf. Erosion by Liquid and Solid Impact, 1987, pp. 66.1–66.9.
- [35] *Hashish, M.*, „Prediction of depth of cut in abrasive waterjet (AWJ) machining“, MD, Vol. 3, 1987, pp. 65–82.
- [36] *Hashish, M.*, "A model for abrasive–waterjet (AWJ) machining", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 111, 1989, pp. 154–162.
- [37] *Hashish, M.*, "Visualization of the abrasive waterjet cutting process", Exp. Mechan., No. 28, 1988, pp. 159–169.
- [38] *Henning, A., Westkamper, E.*, "Three–Dimensional Modelling of the Abrasive Waterjet Contour", Proceedings of the 6th Pacific Rim International Conference on Water Jetting Technology, Sydney, Australia, 2000, pp. 273–276.
- [39] *Hlavač, L.*, „Investigation of the abrasive water jet trajectory curvature inside the kerf“, Journal of Materials processing Technology, 2009, pp. 4154–4161.
- [40] *Hoogstrate, A., Luttermelt, C.A.V.*, "Opportunities in AWJM", Annals of the CIRP, Vol. 46(2), 1997, pp. 697–714.
- [41] *Hoogstrate, A.M., Karpuschewski, B., Luttermelt, C.A.v., et al.*, "Modelling of high velocity, Loose abrasive machining processes", Annals of the CIRP, Vol. 51(1), 2002, pp. 263–266.
- [42] <http://www.omax.com/learn/how-does-waterjet-work>
- [43] *Hunt, D.C., Burnham, C.D., Kim T.J.*, „Surface Finish Characterization in Machining Advanced Ceramics by Abrasive Waterjet“, University of Rhode Island, Kingston, 2003.
- [44] *Janković, P.*, „Modeliranje procesa sečenja abrazivnim vodenim mlazom i razvoj tehnološkog procesora“, doktorska disertacija, Niš, 2009.
- [45] *Janković, P., Igić, T., Nikodijević, D.*, „Process parameters effect on material removal mechanism and cut quality of abrasive water jet machining“, Journal Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 40, No.1, 2012, pp. 247–261.
- [46] *Janković, P., Radovanović, M., Baralić, J., Nedić, B.*, „Prediction model of surface roughness in abrasive water jet cutting of aluminium alloy“, J BALK TRIBOL ASSOC, Vol. 19, No 4, 2013, pp. 585–595.
- [47] *Jianming, W., Na, G., Wenjun, G.*, „Abrasive waterjet machining simulation by SPH method“, Int J Adv Manuf Technol, 2010, pp. 227–234.
- [48] *Junkar, M., Jurisevic, B., Fajdiga, M., Grah, M.*, „Finite element analysis of single–particle impact in abrasive“, International Journal of Impact Engineering, No. 32, 2006, pp. 1095–1112.
- [49] *Jurisevic, B., Brissaud, D., Junkar, M.*, „Monitoring of abrasive water jet (AWJ) cutting using sound detection“, Int J Adv Manuf Technol, Vol. 24, 2004, pp. 733–737.
- [50] *Knaupp, M., Meyer, A., Erichsen, G., Sahney, M., Burnham, C.*, „Dynamic compensation of abrasive water jet properties through 3-dimensional jet control“, Proceedings of the 16th International Conference on Water Jetting, BHR Group, Aix-en-Provence, France, 2002, pp. 75–89.
- [51] *Kolb, M.*, "Waterjet cutting", Bystronic, 2006.
- [52] *Kovačević, R., Wang, L., Zhang, Y.M.*, „Detection of AWJ nozzle wear using acoustic signature analysis“, Proceedings of the 7th American water jet technology conference, Seattle, Washington, 28–31 August, 1993, vol 1, pp. 217–231.

- [53] *Kovačević, R.*, „Monitoring the depth of abrasive waterjet penetration“, *Int. J. Mach. Tools and Manufacturing*, Vol.32, 1992, pp. 725–736.
- [54] *Kovačević, R., Hashish, M., Mohan, R., et al.*, "State of the art of research and development in abrasive waterjet machining", *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 119(4(B)), 1997, pp.776–785.
- [55] *Kovačević, R., Liaw, H.H., Barrows, J.F.*, “Surface finish and its relationship to cutting parameters”, *SME TP MR88–589*, Soc. of Manuf. Engrs., Dearborn, 1988, pp.1–5.
- [56] *Kovačević, R., Beardsley, H.*, “Nozzle wear sensing in turning operation with abrasive waterjet”, *Proc. Conf. on Nontrad. Machining*, SME MS89-809, Dearborn, 1989, pp. 1-11.
- [57] *Kovač, P.*, “Teorija obradnih procesa”, Novi Sad: FTN Izdavaštvo, 2007.
- [58] *Lazić, M.*, „Nekonvencionalni postupci obrade“, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [59] *Lazarević, D., Radovanović, M.*, „Nekonvencionalne metode-Obrada materijala odnošenjem“, Mašinski fakultet Niš, 1994.
- [60] *Lebar, A., Junkar, M.*, „Simulation of abrasive water jet cutting process:Part 1. Unit event approach“, *MODELLING AND SIMULATION IN MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, 2004, pp. 1159–1170.
- [61] *Lemma, E., Chen, L., Siores, E., Wang, J.*, „Optimising the AWJ cutting process of ductile materials using nozzle oscillation technique“, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* Vol. 42/7, 2002, pp. 781-789.
- [62] *Luttervelt, C.A.V.*, "On the selection of manufacturing methods illustrated by an overview of separation techniques for sheet materials", *Annals of the CIRP*, Vol. 38(2), 1989, pp. 587–607.
- [63] *Marusić, V., Baralić, J., Nedić, B., Rosandić, Ž.*, „Effect of machining parameters on jet lagging in abrasive water jet cutting“, *Tehnički vjesnik* 20, Vol. 4, 2013, pp. 677-682.
- [64] *Mason, J.S., Smith, B.V.*, „The erosion of bends by pneumatically conveyed suspension of abrasive particles“, *Powder Technol.* 6, 1972, pp. 323–335.
- [65] *Mazurkiewicz, M.*, „Study of a Leading Edge Profile for a Slot Formed During Hydro–Abrasive Cutting“, *Proceedings of the 6th American Water Jet Conference*, St.Louis, 1991, pp. 43–49.
- [66] *Mikov, I., N., Osipova, L., P., Gusenkov, E., N., Malamov, V., M.*, „Developments in the field of technology for cutting figures of decorative rock materials employing water jet cutting equipment“, *ANNUAL of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”*, Mechanization, electrification and automation in mines, Vol. 49, 2006, pp. 21–25.
- [67] *Mills, D., Mason, J.S.*, „Particle size effects in bend erosion“, *Wear*, Vol.44, 1977, pp. 311–328.
- [68] *Momber, A., Kovačević, R.*, „Energy dissipative processes in high speed water–solid particle erosion“, *ASME Heat Transfer and Fluids Engng.*, New York, 1995, pp. 243–356.
- [69] *Momber, A.W., Kovačević, R.*, „Quantification of energy absorption capability in abrasive water jet machining“, *Inst. Mech. Engrs., J. of Engn. Manuf.* 209, 1995, pp. 491–498.
- [70] *Momber, A.W., Kovačević, R.*, "Principles of abrasive water jet machining", Springer, London, 1998.
- [71] *Momber, A.W., Kovačević, R.*, „Calculation of exit jet energy in abrasive water jet cutting“, *PED*, Vol.68–1, 1994, pp. 361–366.

- [72] *Monno, M., Ravasio, C.*, „The effect of cutting head vibration on the surfaces generated by waterjet cutting“, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* Vol. 45, 2005, pp. 355–363.
- [73] *Mount, J.F.*, „California Rivers And Streams—The Conflict Between Fluvial Process and Land Use“, University of California Press, 1995.
- [74] *Nedić, B., Baralić, J.*, „The Wear of the Focusing Tube and the Cut-Surface Quality“, *Tribology in industry*, Volume 32, No. 2, 2010, pp. 38-43.
- [75] *Nedić B., Baralić J.*, „Утицај параметара обраде абразивним воденим млазом на квалитет обрађене површине“, 34. JUPITER Конференција, Машински факултет Београд, Београд, 04.-05. јун 2008., pp. 369-374.
- [76] *Nedić B., Baralić J.*, „Специфичности обраде абразивним воденим млазом“, *Часопис ИМК-14*, број(26-27), 1-2/2007, pp. 113-120.
- [77] *Nedić B., Baralić J.*, „Обрада абразивним воденим млазом и квалитет обрађене површине“, *SERBIATRIB*, Крагујевац, 20.-21. јун. 2007, pp. 249-253.
- [78] *Orbanic, H., Junkar, M.*, „Analysis of striation formation mechanism in abrasive water jet cutting“, *Wear* 265, 2008, pp. 821–830.
- [79] *Orbanic, H., Junkar, M.*, „Simulation of abrasive water jet cutting process: Part 2. Cellular automata approach“, *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2004, pp. 1171–1184.
- [80] *Owenaih, H.*, „Leistungssteigerung des Hochdruckwasserstrahlschneidens durch Zugabe von Zusatzstoffen“, PhD thesis, TU Darmstadt, 1989
- [81] *Paul, S., Hoogstrate, A., Lutervelt, C. V., Kals, H.*, „Analytical modelling of the total depth of cut in the abrasive water jet machining of polycrystalline brittle material“, *Journal of Materials Processing Technology* 73, 1998, pp. 206–212.
- [82] *Proceedings of the 5th American Water Jet Conference*, August 29-31, 1989, Toronto, Canada
- [83] *Proceedings of the 7th American Water Jet Conference*, August 28-31, 1993, Seattle, Washington, Volume I and Volume II.
- [84] *Proceedings of the 8th American Water Jet Conference*, August 26-29, 1995, Houston, Texas, Volume I and Volume II.
- [85] *Proceedings of the 9th American Waterjet Conference*, August 23-26, 1997, Dearborn, Michigan, Volume I and Volume II.
- [86] *Proceedings of the First U.S. Water Jet Conference*, April 7- 9, 1981, Colorado School of Mines, Golden, Colorado
- [87] *Proceedings of the Fourth U.S. Water Jet Conference*, August 26-28, 1987, University of California, Berkeley, California
- [88] *Proceedings of the Second U.S. Water Jet Conference*, May 24-26, 1983, University of Missouri-Rolla, Rolla, Missouri
- [89] *Proceedings of the Third U.S. Water Jet Conference*, May 21-23, 1985, University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania
- [90] *Raju, S.P., Ramulu, M.*, „Predicting hydro-abrasive erosive wear during abrasive waterjet cutting—part 1 a mechanistic formulation and its solutions“, *PED—Vol.68—1*, 1994, pp. 339–351.
- [91] *Ramulu, M., Arola, D.*, „Influence of waterjet cutting conditions on the surface quality graphite/epoxy laminates“, *International Journal of Machine tools and Manufacture*, 1994, pp. 295–313.
- [92] *Roctec brochure*, „Roctec Composite Carbide – Abrasive Waterjet Nozzles“, 2006
- [93] *Shahverdi, H., Zohoor, M., Mousav, S.*, „Numerical Simulation of Abrasive Water jet Cutting Process using the SPH and ALE Methods“, *Int J Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 5, No. 1, 2011, pp. 43–50.

- [94] *Trieb, F., Karl, R., Moderer, R.*, "Pressure and flow rate fluctuations at high pressure intensifier pumps", Proceedings of the 2007 American WJTA Conference and Expo, Houston, Texas, August 19–21, 2007, Paper 3–I.
- [95] *Wang, J.*, „Abrasive waterjet machining of polymer matrix composites—cutting performance, erosive process and predictive models“, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, pp. 757–768.
- [96] *Wang, J.*, „A new model for predicting the depth of cut in abrasive“, Journal of materials processing technology 209, 2009, pp. 2314–2320.
- [97] *Wang, J.*, „Profile cutting on alumina ceramics by abrasive waterjet I Experimental investigation“, Mech. Engrs. Part C: J. Mech. Eng. Sci.220, 2006, pp. 703–714.
- [98] *Wang, J.*, "Abrasive waterjet machining of engineering materials", Trans Tech Publications, Uetikon–Zuerich, Switzerland, 2003.
- [99] *Wang, J., Wong, W.*, „A study of abrasive waterjet cutting of metallic coated sheet“, International Journal of Machine Tools & Manufacture 39, 1999, pp. 855–870.
- [100] *Zeng J., Hines, R., Kim, T.*, „Characterization of energy dissipation phenomena in abrasive water jet cutting“, Proc. 6th Amer. Water Jet Conf., St.Louis, 1991, pp. 163–177.
- [101] *Zeng J., Olsen, J., Olsen, C., Guglielmetti, B.*, „Taper-free abrasive waterjet cutting with a tilting head“, Proceedings of the 2005 WJTA American Water Jet Conference, WJTA, Houston, Texas, 2005, pp. 2A–7A.
- [102] *Zeng, J., Kim, T.*, „Development of an abrasive waterjet kerf cutting model for brittle materials“, Jet Cutting Technology, 1992, pp. 483–501.
- [103] *Zeng, J., Kim, T.*, "Development of an abrasive waterjet kerf cutting model for brittle materials", Proceedings of 11th International Conference on Jet Cutting Technology, St Andrews, Scotland, Kluwer Academic Publishers, 1992, pp. 483–501.
- [104] *Zeng, J., Munoz, J.P.*, "Intelligent automation of AWJ cutting for efficient production", Proceedings 12th International Conference on Jet Cutting Technology, Rouen France, Mechanical Engineering Publication Limited, 1994, pp. 401–408.