



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Владимир Б. Кочовић

**РАЗВОЈ АЛАТА ЗА ЗАВРШНУ ОБРАДУ
ЦИЛИНДРИЧНИХ ОТВОРА
ИНЕРЦИЈАЛНОМ СИЛОМ**

Докторска дисертација

Ментор: др Бранко Тадић, ред. проф.

Крагујевац, 2020. година

<i>I Аутор</i>
Име и презиме: Владимир Кочовић
Датум и место рођења: 02. 04. 1990, Крагујевац
Садашње запослење: Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
<i>II Докторска дисертација</i>
Наслов: РАЗВОЈ АЛАТА ЗА ЗАВРШНУ ОБРАДУ ЦИЛИНДРИЧНИХ ОТВОРА ИНЕРЦИЈАЛНОМ СИЛОМ
Број страница: 188
Број слика: 99
Број библиографских података: 203
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Научна област (УДК): 621.9.02:621.9.04
Ментор: проф. др Бранко Тадић
<i>III Оцена и одбрана</i>
Датум пријаве теме: 13. 06. 2017.
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације: IV-04-1040/8 од 15. 11. 2017. год.
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Ђорђе Вукелић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду; уже научне области: метрологија, квалитет, еколошко-инжењерски аспекти, алати и прибори; председник комисије 2. Др Петар Тодоровић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу; уже научна област: производно машинство; члан 3. Др Бранко Тадић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу; уже научне области: производно машинство и индустријски инжењеринг; члан
Комисија за оцену докторске дисертације:
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Ђорђе Вукелић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду; уже научне области: метрологија, квалитет, еколошко-инжењерски аспекти, алати и прибори 2. Др Милан Ерић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу; уже научна област: производно машинство 3. Др Петар Тодоровић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу; уже научна област: производно машинство
Комисија за одбрану докторске дисертације:
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Ђорђе Вукелић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду; уже научне области: метрологија, квалитет, еколошко-инжењерски аспекти, алати и прибори 2. Др Милан Ерић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу; уже научна област: производно машинство 3. Др Петар Тодоровић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу; уже научна област: производно машинство
Датум одбране дисертације:

Мојој породици, сестри и родитељима

РАЗВОЈ АЛАТА ЗА ЗАВРШНУ ОБРАДУ ЦИЛИНДРИЧНИХ ОТВОРА ИНЕРЦИЈАЛНОМ СИЛОМ

РЕЗИМЕ

Ова дисертација се бави истраживањем могућности обраде метала резањем константном силом продирања резног алата у материјал предмета обраде. Преглед литературних извора указује на проблеме димензионе и геометријске тачности алатних машина који настају као последица термичког ширења елемената система кретања алатне машине, еластичне деформације резног алата, несавршености обртног кретања вретеништа алатне машине, промене геометрије резног алата, похабаности елемената система кретања алатне машине, грешака базирања и стезања предмета обраде и многих других фактора. Изучавање наведених проблема помогло је у развоју теоријског модела резног алата којим би било могуће елиминисати узроке настанка димензионе и геометријске грешке предмета обраде. За потребе прелиминарних експерименталних истраживања развијен је уређај за испитивање могућности резања константном силом продирања резног алата у материјал предмета обраде. Ова испитивања су показала да је испитиваном методом, уз одабир одговарајућих параметара обраде, могуће постићи смањење девијације кружности и изузетно фину регулацију пречника цилиндричних предмета обраде. На основу прелиминарних експерименталних истраживања развијен је резни алат за завршну обраду унутрашњих цилиндричних отвора константном силом продирања алата у материјал предмета обраде. Конструкцијом алата омогућена је регулација интензитета силе продирања алата у материјал предмета обраде, тј. регулација пречника предмета обраде. У циљу повећања микро тврдоће површинског слоја обрађене површине, развијен је и експериментално испитан алат за обраду површинском деформацијом предмета обраде. Комбинација обраде резањем константном силом и обраде површинском деформацијом предмета обраде, обезбеђује велику дубину регулације пречника, смањење девијације кружности, смањење храпавости, повећање микро тврдоће обрађене површине, као и повољнији распоред материјала у површинском слоју обрађене површине.

На основу испитивања приказаних у овој дисертацији, предложена метода завршне обраде метала резањем може значајно допринети унапређењу производног процеса у погледу могућности остваривања димензионе и геометријске тачности предмета обраде. Применом предложене методе елиминише се утицај несавршености система кретања алатне машине, као и грешке базирања и стезања предмета обраде.

Кључне речи: микро резање, константна сила резања, димензиона и геометријска тачност, кружност, храпавост

Захвалност: Ова дисертација је настала као резултат истраживања у оквиру пројекта ТР35021 Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

ABSTRACT

In this thesis the possibilities of metal cutting with the constant force of penetration of the cutting tool into the workpiece material are investigated. The overview of the literature sources points to the problems of dimensional and geometric accuracy of machine tools caused by the thermal expansion of the elements of the machine tool movement system, the elastic deformation of the cutting tool, the imperfection of the rotary motion of the machine tool spindle, the change in the geometry of the cutting tool, the wearing of the elements of the machine tool movement system, errors of basing and clamping of the workpiece and many other factors. Studying the causes of the dimensional and geometric errors of the work piece has helped in the development of the theoretical model of the cutting tool, which would eliminate the causes of these errors. For the purposes of preliminary experimental research, a device has been developed to test the possibility of cutting with the constant force of penetration of the cutting tool into the workpiece material. Results have shown that by implementing the method of testing, with the selection of appropriate processing parameters, it is possible to achieve a decrease in the deviation of the circular and an extremely fine regulation of the diameter of the cylindrical workpiece. On the basis of preliminary experimental research, a cutting tool for finishing the internal cylindrical holes has been developed with a constant force of penetration of the cutting tools into the workpiece material. The tool construction enables the regulation of the intensity of the penetration force of the tool into the workpiece material, i.e. regulation of the diameter of the workpiece. In order to increase the micro hardness of the treated surface, a machining tool for workpiece surface deformation has been developed and experimentally tested. The combination of machining the workpiece with constant force and the surface deformation provides a better regulation of the diameters, reduction of the circular deviation, reduction of roughness, an increase in the microhardness of the treated surface, as well as a more uniform material layout in the treated surface.

Based on the tests shown in this thesis, the proposed method of finishing metal cutting can significantly contribute to the improvement of the production process, in terms of the possibility of achieving the dimensional and geometric accuracy of the workpiece. By applying the proposed method, the influence of the imperfection of the machine tool movement system, as well as the errors of the foundation and workpiece clamping is eliminated.

Key words: micro cutting, constant cutting force, dimensional and geometric accuracy, circularity, roughness

Acknowledgment: This dissertation is the result of research within the project TR35021 of the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

САДРЖАЈ

1. Уводна разматрања	1
1.1 Полазне хипотезе	20
2. Завршне обраде цилиндричних отвора	21
2.1 Брушење	22
2.2 Суперфиниш	24
2.3 Хоновање	27
2.4 Леповање	31
2.5 Обрада површинским деформисањем предмета обраде - „ball burnishing“ поступак обраде	34
3. Теоријска разматрања	39
4. Развој уређаја и анализа процеса резања константном силом	48
4.1 План и циљ експерименталних испитивања	48
4.2 Мерна инструментација	51
4.3 Резултати, дискусија и закључци прелиминарних експерименталних испитивања	58
4.4 Анализа могућности примене „ball burnishing“ поступка обраде након обраде микро резањем	72
5. Пројектовање и прорачун склопа алата	73
5.1 Алат за микро резање	73
5.1.1 Прорачун силе продирања алата у материјал предмета обраде	75
5.2 Алат за обраду „ball burnishing“ процесом	80
6. Експериментална истраживања	82
6.1 Опрема коришћена за експериментална истраживања	83
6.2 План експерименталних истраживања	88
6.3 Резултати експерименталних истраживања	95
6.3.1 Утицај процеса микро резања на површинску хрпавост предмета обраде	95
6.3.2 Утицај процеса микро резања на дубину регулације промене пречника обрађеног цилиндра	96
6.3.3 Утицај процеса микро резања на криве ношења обрађене површине	98
6.3.4 Одступање кружности пре и након обраде микро резањем	101
7. Дискусија добијених резултата	102
8. Закључци	111

9. Литература.....	114
Прилог 1. Одређивање тежишта алата.....	129
Прилог 2. Одређивање отпора кретања колица по профилисаног вођици	137
Прилог 3. Техничка документација уређаја за испитивање резања константном силом ..	143
Прилог 4. Техничка документација алата за завршну обраду цилиндричних отвора инерцијалном силом	173
Прилог 5. Техничка документација алата за завршну обраду цилиндричних отвора „ball burnishing“ поступком	182

ПРЕГЛЕД СКРАЋЕНИЦА И СТРАНИХ РЕЧИ

Скраћеница	Енглески	Српски
<i>ACC</i>	<i>Adaptive Control with Constraint</i>	Адаптивно управљање са системом ограничења
<i>AFM</i>	<i>Atomic Force Microscope</i>	Микроскоп атомских сила
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Desing</i>	Конструисање помоћу рачунара
<i>CBN</i>	<i>Cubic Boron Nitride</i>	Кубни нитрид бора
<i>CFC</i>	<i>Constant Feed Cutting</i>	Резање задатим кретањем алата
<i>CIR</i>	<i>Circle</i>	Кружница
<i>CLC</i>	<i>Constant Load Cutting</i>	Резање константном силом резања
<i>CNC</i>	<i>Computer Numerical Control</i>	Рачунарско нумеричко управљање
<i>DCBFACA</i>	<i>Dynamic Characteristic-Based Fuzzy Adaptive Control Algorithm</i>	Динамички адаптивни алгоритам управљања заснован на динамичким карактеристикама
<i>DEV</i>	<i>Deviation</i>	Девиијација-одступање
<i>EDM</i>	<i>Electrical Discharge Machining</i>	Електроерозиона обрада
<i>FEM</i>	<i>Finite Element Method</i>	Метода коначних елемената
<i>FFBC</i>	<i>Force Feedback Controller</i>	Контролер силе резања
<i>GPFC</i>	<i>Grey Prediction Fuzzy Controller</i>	Фази контролер сивог предвиђања
<i>HRC</i>	<i>Hardness, Rockwell scale, Cup</i>	Мерење тврдоће „Rockwell C“ методом
<i>LIGA</i>	<i>Lithographie, Galvanoformung, Abformung</i>	Литографија, галванизација, обликовање
<i>MEAS</i>	<i>Measurement</i>	Мерење
<i>MEMS</i>	<i>Micro Electro-Mechanical Systems</i>	Микро електро-механички системи
<i>MR</i>	<i>Magnetorheological</i>	Магнеторхеолошки
<i>MRAC</i>	<i>Model Reference Adaptive Control</i>	Модел референтне адаптивне контроле
<i>PCD</i>	<i>Polycrystalline Diamond</i>	Синтетички дијамант
<i>PID</i>	<i>Proportional Integral Derivative Controller</i>	Пропорционални интегрални диференцијални контролер
<i>PMMA</i>	<i>Polymethyl Methacrylate</i>	Плексиглас
<i>SEM</i>	<i>Scanning Electron Microscope</i>	Скенирајући електронски микроскоп
<i>STR</i>	<i>Self Tuning Regulation</i>	Самоподесива регулација
<i>TFC</i>	<i>Traditional Fuzzy Controller</i>	Традиционални фази контролер
<i>UV</i>	<i>Ultraviolet</i>	Ултравиолетно
	<i>Fuzzy logic</i>	Фази логика
	<i>Grey System Theory</i>	Систем сиве теорије

ПРЕГЛЕД ЗНАЧАЈНИХ ОЗНАКА

c	Крутост опруге
d	Пречник предмета обраде
D	Пречник отвора који се обрађује
e	Полупречник ротације - ексцентрицитет
f	Посмак
F_2	Сила продирања алата у материјал предмета обраде
F_{in}	Инерцијална сила
F_n	Нормална сила
F_{nr}	Резултујућа нормална сила
F_o	Сила у опрузи
F_p	Сила продирања алата у материјал предмета обраде
F_r	Сила резања
F_s	Сила стезања
F_μ	Сила трења
h	Дебљина струготине
L	Дужина комада
m	Маса
m_n	Маса носача алата
M_p	Материјал предмета обраде
m_t	Маса тегова
n	Број обртаја вретеништа машине
R_a	Средње аритметичко одступање профила храпавости од средње линије профила на мереној дужини
r_e	Радијус врха резног алата
R_{max}	Максимална висина неравнина профила храпавости на мереној дужини
R_{max_n}	Максимална висина неравнина необрађене површине на мереној дужини
R_{max_o}	Максимална висина неравнина обрађене површине на мереној дужини
R_p	Средња висина испупчења профила на мереној дужини
R_v	Средња висина удубљења профила на мереној дужини
R_z	Средња висина профила на мереној дужини
S	Корак
s	Средњи корак локалних испупчења профила храпавости
S_a	Стање резног алата
t	Време обраде

U_a	Углови алата
V	Брзина резања
V_p	Брзина помоћног кретања
X	Растојање тежишта елемента склопа од бочне стране носача алата по X оси
X_t	Растојање тежишта покретног дела алата од бочне стране носача алата по X оси
z	Еластична релаксација материјала предмета обраде
α	Грудни угао резног алата
$\alpha/2$	Угао нагиба стране призме у односу на вертикалну осу призме
δ	Дубина резања
δ_b	Дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде
δ_D	Дозвољено одступање пречника цилиндричног комада
Δh	Грешка пропадања цилиндра у призму услед дозвољеног одступања пречника
δ_s	Стварна дубина резања
δ_z	Задата дубина резања
ω	Угаона брзина
r	Ексцентрицитет
δ	Дубина резања
ε	Грешка дубине резања

СПИСАК СЛИКА

Редни број	Ознака и назив
1.	Слика 1.1 – LIGA процес
2.	Слика 1.2 – Израда микро зупчаника LIGA процесом
3.	Слика 1.3 – Димензије компоненти у зависности од примењене микро-механичке обраде
4.	Слика 1.4 – Микро аутомобил израђен у размери 1:1000
5.	Слика 1.5 – Приказ ефеката различитих принципа резања (а) Константна дубина резања и (б) Константна сила резања
6.	Слика 1.6 – CLC механизам резања са контролом силе током резања (Force Feedback Controller, FFBC)
7.	Слика 1.7 – Израда микро жлебова на површинама са позитивним и негативним углом нагиба применом FFBC система
8.	Слика 1.8 – Позитивни и негативни грудни угао резног алата
9.	Слика 1.9 – Критична дубина резног алата у процесу микро резања
10.	Слика 1.10 – Минимална дебљина струготине, R_e - радијус резног алата, h – дебљина настале струготине, h_m - минимална дебљина струготине
11.	Слика 1.11 – Контакт резног алата и предмета обраде
12.	Слика 2.1 – Структура брусне површине
13.	Слика 2.2 – Хоризонтална машина за брушење
14.	Слика 2.3 – Два типа процеса брушења цилиндричних површина: а) спољашње и б) унутрашње
15.	Слика 2.4 – Поступак обраде суперфинишем а) између шиљака б) на ваљцима
16.	Слика 2.5 – Изглед површине пре и након обраде суперфинишом
17.	Слика 2.6 – Слика испитног уређаја за суперфиниш
18.	Слика 2.7 – Приказ алата за хоновање
19.	Слика 2.8 – Десет најчешћих грешака које се могу исправити хоновањем
20.	Слика 2.9 – Ротација и транслација алата при хоновању
21.	Слика 2.10 – Вертикална машина за хоновање која се користи у експериментима
22.	Слика 2.11 – Фотографија развијеног магнеторхеолошког алата за хоновање са задржаним MR флуидом за полирање
23.	Слика 2.12 – (а) Шематски приказ леповања (б) Леповање равних површина. (ц) Леповање цилиндричних површина
24.	Слика 2.13 – Конусни вентил обрађен леповањем одговарајућих комада

25.	Слика 2.14 – Једнострано и вишестрано леповање сферичних површина
26.	Слика 2.15 – Поступак припреме плоче за леповање са UV смолом
27.	Слика 2.16 – Параметри обраде методом „ball burnishing“
28.	Слика 2.17 – Модел течења материјала при обради „ball burnishing“ процесом
29.	Слика 2.18 – Приказ модела коришћеног за нумеричку анализу а) 3D приказ модела, б) мрежа на куглици, в,г) мрежа на предмету обраде
30.	Слика 2.19 – Заостали напони у предмету обраде настали обрадом „ball burnishing“ процесом на различиту дубину продирања куглице у материјал предмета обраде
31.	Слика 2.20 – Зависност заосталих напони од дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде
32.	Слика 2.21 – Зависност површинске хрпавости обрађене површине од силе продирања куглице у материјал предмета обраде за различите крутости алата
33.	Слика 2.22 – Зависност еластичне релаксација предмета обраде од остварене силе утискивања куглице у материјал предмета обраде
34.	Слика 3.1 – Промене облика танкозидног цилиндра током процеса обраде
35.	Слика 3.2 – Деформације танкозидног цилиндра током процеса обраде
36.	Слика 3.3 – Шематски приказ промене дубине резања услед еластичних деформација предмета обраде
37.	Слика 3.4 – Шематски приказ одступања дубине резања услед грешака базирања
38.	Слика 3.5 – Грешка базирања услед одступања пречника цилиндричног предмета обраде
39.	Слика 3.6 – Шематски приказ обраде унутрашње цилиндричне површина резањем при мимоилажењу оса вретеништа машине и предмета обраде
40.	Слика 3.7 – Шематски приказ обраде унутрашње цилиндричне површине резањем константном силом
41.	Слика 4.1 – Необрађени узорци са посудама за сакупљање струготине
42.	Слика 4.2 – Развијени уређај за експериментално испитивање резања константном силом
43.	Слика 4.3 – Димензије предмета обраде
44.	Слика 4.4 – Фотографски приказ носача алата (а), шематски приказ носача алата са системом за регулацију силе (б)
45.	Слика 4.5 – Носач алата са резним алатом
46.	Слика 4.6 – Специјални резни алат (а) са носачем алата (б)
47.	Слика 4.7 – Специјално дизајниран уређај за испитивање резања константном силом
48.	Слика 4.8 – Приказ вредности нормалне силе и силе резања

49.	Слика 4.9 – Координатна мерна машина на којој су извршена мерења промене пречника
50.	Слика 4.10 – Базирање и стезање предмета обраде на координатној мерној машини
51.	Слика 4.11 – Промена пречника предмета обраде израђеног од челика С45 у зависности од времена обраде за три различите брзине резања при обради силом од 5N
52.	Слика 4.12 – Промена пречника предмета обраде израђеног од челика С45 у зависности од времена обраде за три различите брзине резања при обради силом од 10N
53.	Слика 4.13 – Промена пречника предмета обраде израђеног од челика С45 у зависности од времена обраде за три различите брзине резања при обради силом од 15N
54.	Слика 4.14 – Кружност пре и након обраде на узорку број 6
55.	Слика 4.15 – Фотографски приказ трагова на узорку број 3 по обиму узорка
56.	Слика 4.16 – Запис силе резања (Fr) на трагу 1 узорка 3
57.	Слика 4.17 – Запис силе резања (Fr) на трагу 1 узорка 6
58.	Слика 4.18 – Промена пречника предмета обраде израђеног од AlCu5PbBi у зависности од времена обраде за три различите силе при истој брзини резања 0.27 [m/s]
59.	Слика 4.19 – Промена пречника предмета обраде израђеног од AlCu5PbBi у зависности од нормалне силе за три различита времена обраде при брзини резања 0.27 [m/s]
60.	Слика 4.20 – Дијаграмски прикази кружности пре и после обраде на узорку 10
61.	Слика 4.21 – Дијаграмски прикази кружности пре и после обраде на узорку 11
62.	Слика 4.22 – Дијаграмски прикази кружности пре и после обраде на узорку 12
63.	Слика 5.1 – Развијени резни алат за обраду цилиндричних отвора инерцијалном силом
64.	Слика 5.2 – Тежишта делова алата
65.	Слика 5.3 – Развијени алат за звршну обраду цилиндричних отвора „ball burnishing“ процесом
66.	Слика 5.4 – CAD модел алата за обраду „ball burnishing“ процесом
67.	Слика 6.1 – Микро геометрија површина пре и након обраде микро резањем
68.	Слика 6.2 – Уређај за мерење тврдоће ТК-14-250
69.	Слика 6.3 – Профилометар „Talysurf 6“
70.	Слика 6.4 – Облик и димензије коришћене мерне игле

71.	Слика 6.5 – Координатна мерна машина
72.	Слика 6.6 – Једновретена вертикална глодалица
73.	Слика 6.7 – Базирање и стезање радног комада
74.	Слика 6.8 – Коришћена кординатна мерна машина „HEXAGON TIGO SF“
75.	Слика 6.9 –а) Предмет обраде подељен у осам зона, б) Базирање радног комада у постољу профилометра
76.	Слика 6.10 – Обрада резањем константном силом
77.	Слика 6.11 – Профил храпавости површине мерен након обраде резањем инерцијалном силом
78.	Слика 6.12 – Профил храпавости површине у зони између необрађене и обрађене површине резањем инерцијалном силом
79.	Слика 6.13 – Обрада површине методом „ball burnishing“
80.	Слика 6.14 – Утицај броја пролаза и врсте обраде на површинску храпавост предмета обраде
81.	Слика 6.15 – Утицај броја пролаза и врсте обраде на пречник предмета обраде по изводници 1
82.	Слика 6.16 – Утицај броја пролаза и врсте обраде на пречник предмета обраде по изводници 3
83.	Слика 6.17 – Утицај броја пролаза и врсте обраде на пречник предмета обраде по изводници 5
84.	Слика 6.18 – Утицај броја пролаза и врсте обраде на пречник предмета обраде по изводници 7
85.	Слика 6.19 – Криве ношења пре и након обраде микро резањем по изводници 1
86.	Слика 6.20 – Криве ношења пре и након обраде микро резањем по изводници 3
87.	Слика 6.21 – Криве ношења пре и након обраде микро резањем по изводници 5
88.	Слика 6.22 – Криве ношења пре и након обраде микро резањем по изводници 7
89.	Слика 6.23 – Резултати мерења кружности обрађене и необрађене површине
90.	Слика 7.1 – Изглед обрађене површине након 50 пролаза развијеним алатом за микрорезање
91.	Слика 7.2 – Површина обрађена „ball burnishing“ поступком обраде
92.	Слика П1.1 – Маса делова алата
93.	Слика П1.2 – Носач резне плочице подељен на једноставна геометријска тела
94.	Слика П1.3 - Израчунавање запремине клина

95.	Слика П2.1 - Уређај за испитивање статичког коефицијента трења клизања колица по клизној стази
96.	Слика П2.2 - Елементи уређаја за одређивање статичког коефицијента трења
97.	Слика П2.3 - Нивелација уређаја: а) провера хоризонталности постоља уређаја, б) провера хоризонталности колица при нултој вредности угла нагиба
98.	Слика П2.4 - Равнотежа тела на строј равни
99.	Слика П2.5 - Гаусова расподела резултата експерименталних испитивања

СПИСАК ТАБЕЛА

Редни број	Ознака и назив
1.	Табела 2.1 – Храпавост површине произведене различитим процесима завршне обраде
2.	Табела 4.1 – План експерименталних испитивања на материјалу С45
3.	Табела 4.2 – План експерименталних испитивања на материјалу AlCu5PbBi
4.	Табела 4.3 – Карактеристике универзалног струга
5.	Табела 4.4 – Вредности пречника пре и након обраде резањем константном силом.
6.	Табела 4.5 – Промена пречника резањем константном силом коришћењем различитих параметара обраде
7.	Табела 4.6 – Одступање кружности пре и након обраде резањем константном силом узорака израђених од челика С45 (EN 10027-1) тј. Č1530 (JUS).
8.	Табела 4.7 – Промена кружности у зонама обраде узорака израђених од челика С45 (EN 10027-1) тј. Č1530 (JUS)
9.	Табела 4.8 – Хемијски састав коришћене легуре Алуминијума
10.	Табела 4.9 – Вредности пречника пре и након обраде резањем константном силом материјала AlCu5PbBi.
11.	Табела 4.10 – Промена пречника резањем константном силом коришћењем различитих сила и времена обраде
12.	Табела 4.11 – Одступање кружности пре и након обраде резањем константном силом узорака израђених од AlCu5PbBi.
13.	Табела 4.12 – Промена кружности у зонама обраде узорака израђених од AlCu5PbBi.
14.	Табела 5.1 – Тежиште слободног дела алата без тегова и завртњева за причвршћивање
15.	Табела 5.2 - Тежиште слободног дела алата без тегова са завртњевима за причвршћивање
16.	Табела 5.3 – Тежиште слободног дела алата са једним тегом и завртњевима за причвршћивање
17.	Табела 5.4 – Тежиште слободног дела алата са два тега и завртњевима за причвршћивање
18.	Табела 5.5 – Тежиште слободног дела алата са три тега и завртњевима за причвршћивање
19.	Табела 5.6 – Тежиште слободног дела алата са четири тега и завртњевима за причвршћивање

20.	Табела 6.1 – Основне техничке карактеристике нумеричке једновретене глодалице „HAAS Toolroom Mill TM-1HE“
21.	Табела 6.2 – Утицај броја пролаза и врсте обраде на површинску храпавост предмета обраде
22.	Табела 7.1 – Дубина резања након 50 пролаза алата по изводницама 1, 3,5 и 7
23.	Табела 7.2 – Вредности Ra које се постижу различитим врстама обраде
24.	Табела П1.1 – Растојање тежишта носача алата од кординатног почетка
25.	Табела П2.1 – Резултати експерименталног испитивања
26.	Табела П2.2 – Број понављања експерименталних резултата

1. Уводна разматрања

Савремена индустрија последњих година улаже велике напоре у усавршавање постојећих и проналажење нових начина завршне обраде метала. Најчешће коришћени видови завршне обраде представљају изузетно „прљаве“ и еколошки неприхватљиве методе, којима се обрада може изводити само на макро нивоу. Због строгих еколошких прописа и непрестане тежње за смањењем димензија машинских делова на најмању могућу меру, тако да оно ни на који начин не утиче на функционалност, јавља се потреба за развојем еколошки прихватљивог алата за завршне обраде на микро нивоу. Развој ових алата представља услов за будући технолошки развој широког спектра производа. Развијени алати морају компензовати све несавршености у системима кретања машина, због којих се јављају озбиљна димензиона одступања предмета обраде. Другим речима, развијени алати за микро обраду се морају суштински разликовати од конвенционалних алата и принципа обраде. Међутим, постоје изазови и ограничења у микро обради, па се микро обрада не може посматрати као смањени процес макро обраде. Ј. Чае и сарадници (2006), анализирали су примену микро обраде, посебно у операцијама глодања, и сугеришу које области макро обраде би требало додатно истражити, у циљу побољшања процеса микро обраде. Закључци до којих су Ј. Чае и сарадници (2006) дошли биће искоришћени као основа за детаљну анализу процеса обраде микро резањем која ће бити приказана у даљем тексту.

Д. А. Dornfeld и сарадници (2006) тврде да се микро резање, које се изводи алатом за резање малог пречника, може сматрати смањеном верзијом макро резања. Механичко микро резање се може користити за производњу микро делова са сложеним геометријама од разних материјала. Велику примену има у производњи делова који се користе у медицинским, оптичким уређајима и уређајима који као радну материју користе флуид.

Потреба за машинским деловима малих димензија је све већа у различитим гранама индустрије, као што су: ваздухопловна, електронска, аутомобилска индустрија, област биомедицине и заштите животне средине. Смањење димензија машинских делова доводи до побољшања квалитета живота у погледу имплементације различитих машинских компоненти у виталне тачке човековог организма, што обезбеђује правилнији рад система органа у који је елемент уграђен. Један од тих елемената је и “stent” који се имплементира у сужену артерију ради повећања протока крви [J. Corbett (2000); M. J. Madou (1997); M. Weck (1997); W. Lang (1999)].

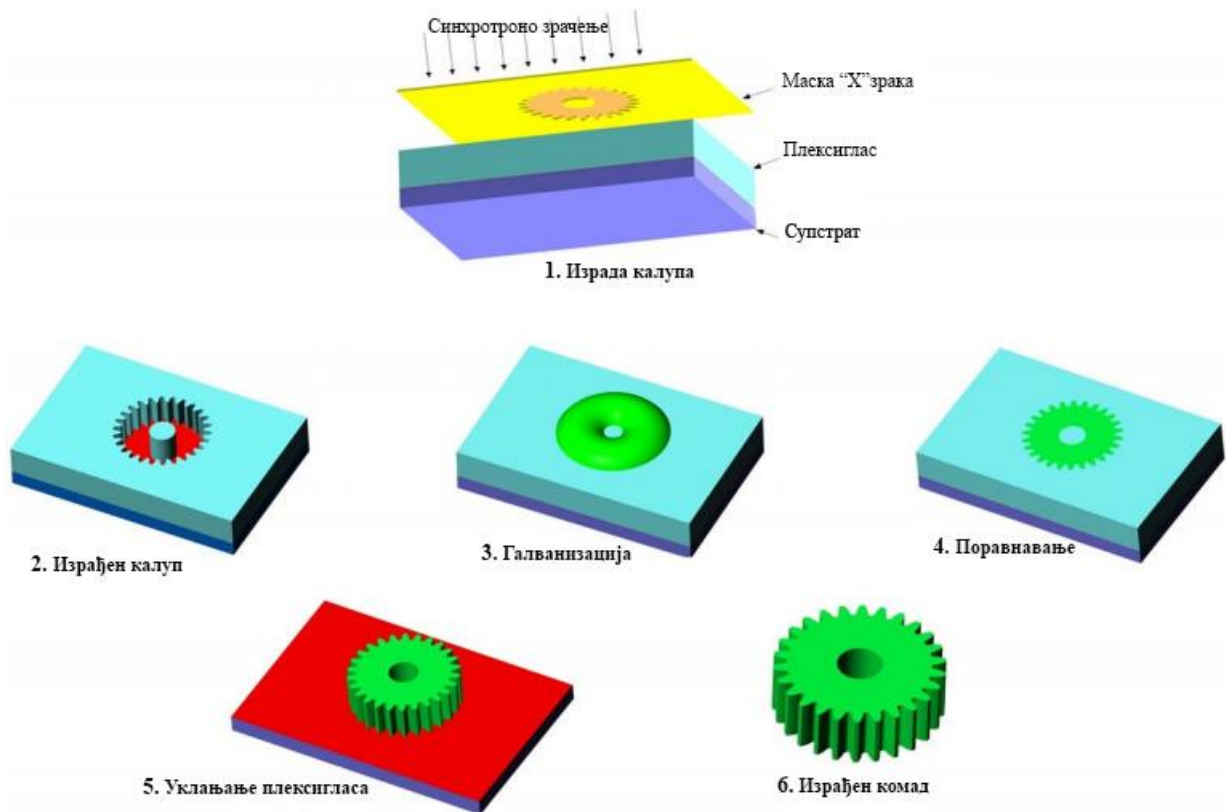
Процеси микро резања су веома ефикасне методе код производње делова малих димензија који се користе у микро електро-механичким системима (енгл. Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS). Основни проблем у обради минијатурних делова процесом микрорезања је непостојање адекватних микро алата. За поједине поступке обраде материјала, као што су брушење и други, није могуће израдити алат за микро обраду који ће бити одговарајуће димензије и крутости. Ограничење димензије (пре свега пречника) носача алата узрокује веома малу крутост алата који не може да издржи динамичка напрезања током процеса обраде. Због смањене крутости микро алата јавила се потреба за проналажењем алтернативних процеса обраде, као што су обрада електро-празњењем (енгл. Electrical Discharge Machining, EDM), обрада

електро жицом, обрада ласерским зрацима, обрада фокусираним јонима, итд. [M. Ganesh (2017)].

Проблеме, који се јављају у настојању да се осигура успешна индустријска примена микро обраде, треба у што краћем року и решити. На пример, иако се алати са малим пречником могу произвести напредним техникама за производњу алата, радијус резног алата се не смањује пропорционално смањењу пречника алата. Дебљина струготине у процесу микро резања је обично мала, па се однос дебљине струготине и радијуса врха резне плочице разликује неколико пута у поређењу са процесом макро обраде [Y. Altintas (2011)].

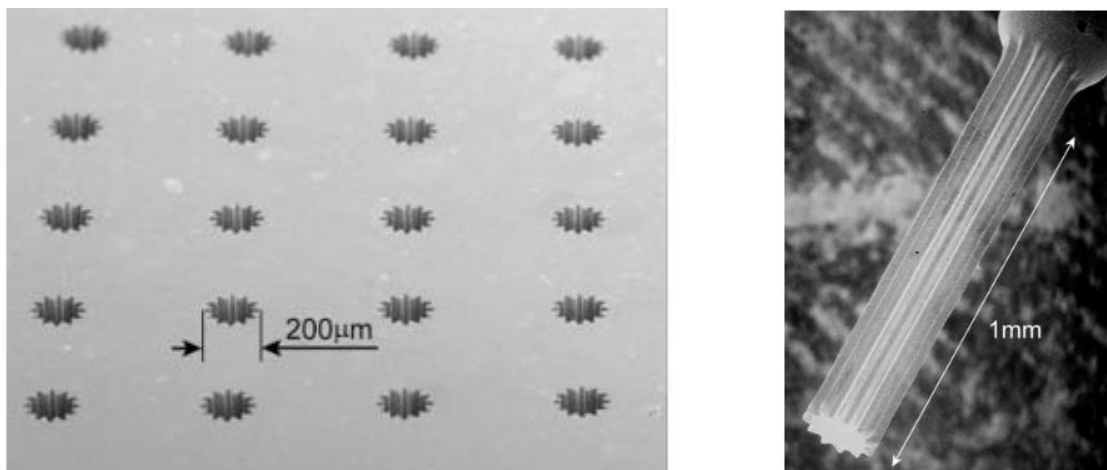
Серијска производња микро делова захтева поуздану опрему и прецизне алате. Зато се многи истраживачи баве изучавањем различитих процеса добијања микро компоненти. Неке од најчешће истраживаних метода су: LIGA и већ горе поменуте обраде јонским, ласерским, ултразвучним снопом, као и методе обраде микро електро пражњењем, за производњу комерцијално одрживих микро компоненти [M. J. Madou (1997); L. Alting (2003); T. Masuzawa (2000)]. Ове методе немају широку комерцијалну примену, пре свега због великих трошкова, ниске продуктивности, немогућности производње малих серија, ограниченог броја материјала који се могу обрађивати итд. LIGA је немачка скраћеница од **L**ithographie, **G**alvanoformung, **A**bformung (литографија, галванизација и обликовање) и описује технологију која се користи за израду микро делова. LIGA користи рендгенске X зраке, произведене синхротроном. Сам процес је заснован на методи емитовања енергије при промени правца кретања електрона. При одређеној брзини кретања, електрони емитују енергију, чија таласна дужина се поклапа са таласном дужином X зрака.

На слици 1.1 је приказано како се формира зупчаник применом LIGA процеса. У процесу електроформирања, метал се таложи у калупу процесом галванизације. Процес галванизације се наставља, док се калуп потпуно не попуни. Након равнања површине, плексиглас (енгл. Polymethyl Methacrylate, PMMA) се уклања и ослобођа се метални облик, односно, у овом случају, настаје метални микро зупчаник. Добијени LIGA елемент може се користити као калуп за прављење делова истог облика или као саставна компонента неког микро уређаја.



Слика 1.1 – LIGA процес [Southwest Center for Microsystems Education (SCME) (2010)]

К. Takahata и сарадници (2000), су користили LIGA процес за израду микро зупчаника пречника $200\ \mu\text{m}$ и дужине $1\ \text{mm}$ (Слика 1.2).



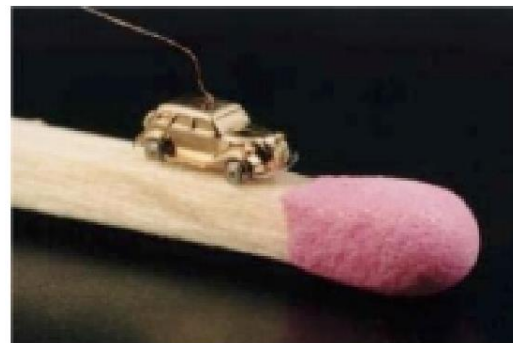
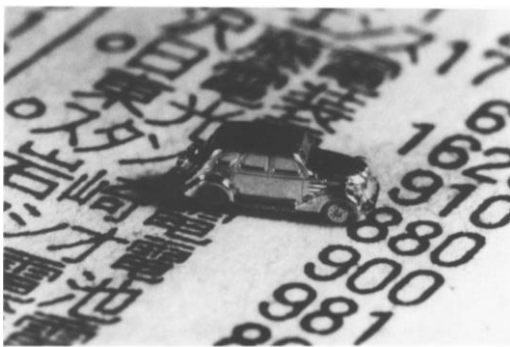
Слика 1.2 – Израда микро зупчаника LIGA процесом [К. Takahata (2000)]

Микро-механичка обрада је још једна метода за израду минијатурних уређаја и компоненти, са димензијама од неколико десетина микрометара до неколико милиметара (Слика 1.3) [J. Chae (2006)].



Слика 1.3 – Димензије компоненти у зависности од примењене микро-механичке обраде [J. Chae (2006)]

Како би се показале могућности микро машинске обраде направљен је микро аутомобил по моделу првог путничког аутомобила марке Toyota у размери 1:1000. Напајање мотора се врши струјом (3 V, 20 mA) преко бакарне жице пречника 18 μm , док мотор ради на 600 о/мин и остварује брзине кретања 5–6 mm/s [S. Middelhoek (1998); Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering Loughborough University, Loughborough, (2002)].

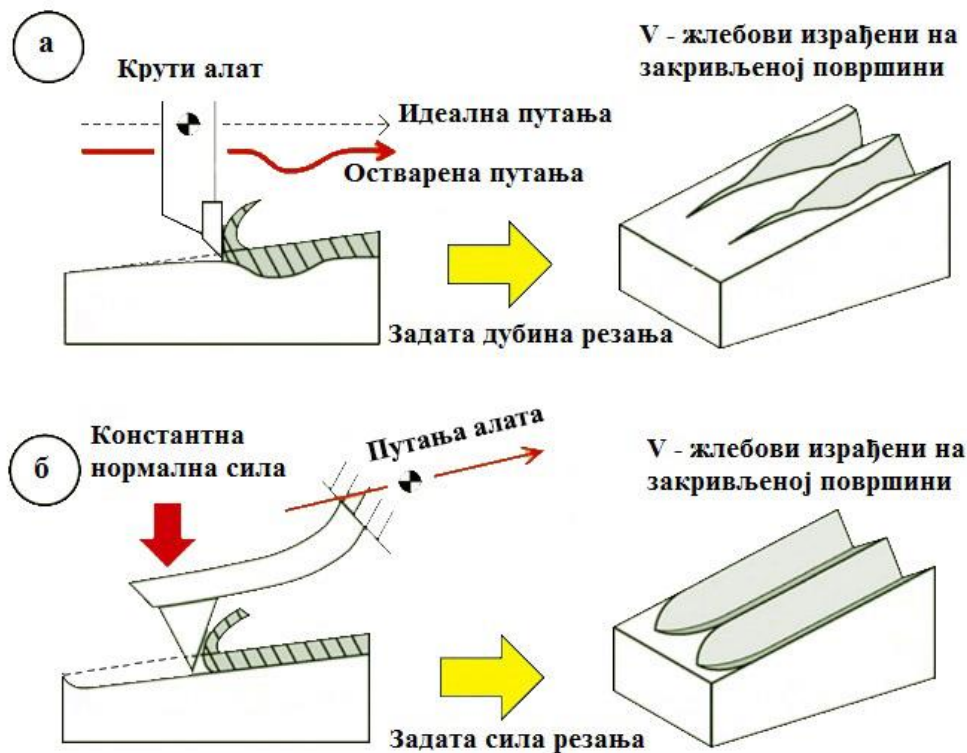


Слика 1.4 – Микро аутомобил израђен у размери 1:1000 [S. Middelhoek (1998); Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering Loughborough University, Loughborough, (2002)]

Изработом микро-мини компоненти процесима механичког резања бавио се у својим радовима X. Liu (2004-1), X. Liu (2004-2) и други.

Последњих година развијено је неколико техника које користе дијамантске алате за израду микроструктура и микро жлебова [J. M. Lee (2010); G. D. Kim (2010); J. Yan (2010); J. Yan (2012); T. Moriya (2010); E. Brinksmeier (2010); E. Brinksmeier (2012)]. Већина ових техника обраде се може користити само за обраду равних површина, јер захтевају механизме за веома прецизно кретање под строгим условима околине, као и веома сложене системе управљања, да би се добила потребна прецизност на нано/микро скали. Конвенционалне обрадне машине подешавају дубину резања помоћу система кретања (енгл. Constant Feed Cutting, CFC), тако да прецизност произведеног дела зависи директно од тачности машине на којој се врши обрада, тј. од похабаности и зазора спрегнутих елемената система кретања (Слика 1.5а). Једно од решења за овај проблем је процес примене константне силе резања (енгл. Constant Load

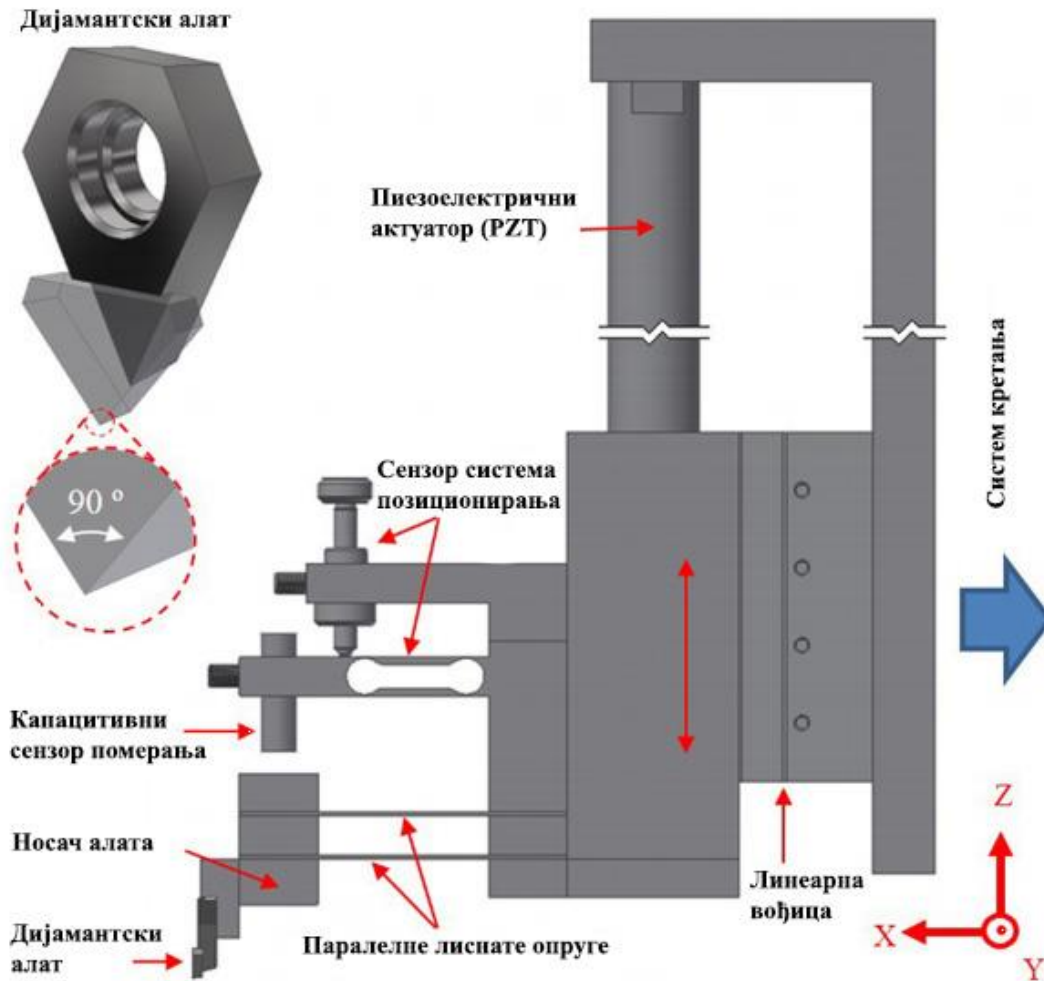
Cutting, CLC), (Слика 1.5б), чији је циљ контрола нормалне силе резања [К. Ashida (2011); G. H. Granados (2012)].



Слика 1.5 – Приказ ефеката различитих принципа резања (а) Константна дубина резања и (б) Константна сила резања [G. H. Granados (2014-2)]

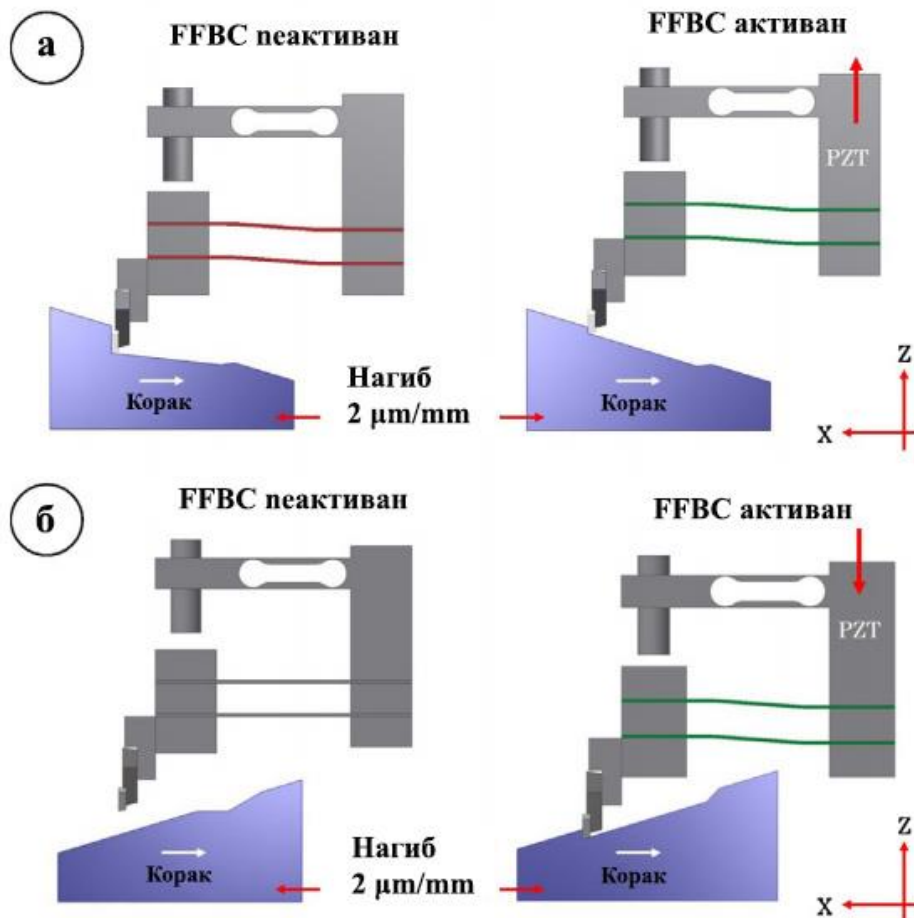
Пример CLC процеса је нано-реза техника која користи механизам микроскопа атомске силе (енгл. Atomic Force Microscope, AFM). Међутим, због ограниченог хода употребљеног пиезо скенера и ниске крутости конзолног носача, овај процес се не може применити за практично резање [К. Ashida (2001); N. Kawasegi (2006); Y. Yan (2007); S. H. Lee (2012); J. Shimizu (2013)].

G. H. Granados и сарадници (2014-1) су развили нови механизам резања за израду микро жлебова. Принцип рада се заснива на техници обраде микро резањем помоћу дијамантског резног алата, при чему се током обраде одржава константна сила резања (Слика 1.6). Код овог механизма алат је монтиран на конзолну греду, која се током процеса резања деформише, што је неопходно за примену система контроле силе. Конзолна греда није круто тело, тако да је потребно проучити како силе резања утичу на њену деформацију. Циљ рада је био да се анализира ефекат геометрије алата на деформацију конзолног носача алата.



Слика 1.6 – CLC механизам резања са контролом силе током резања (Force Feedback Controller, FFBC) [G. H. Granados (2014-1)]

Користећи технику нано резања применом AFM-а и предности дијамантних алата, G. H. Granados и сарадници (2014-1) су код микро машинске обраде увели еластичан механизам резања. Механизам се састоји од једног дијамантског алата који се монтира на конзолни носач, а помоћу оптичке методе процењује се укупна сила резања мерењем увијања и савијања конзолног носача (правац резања мора бити нормалан на најдужу страну конзолног носача). У истом раду дат је приказ модификованог механизма, где се применом паралелног конзолног система лиснатих опруга и сензора за линеарно померање, деформација конзоле, узрокована нормалном компонентом силе резања, може проценити и користи за имплементацију система за контролу силе резања FFBC. G. H. Granados и сарадници (2016) су експерименталним истраживањима доказали да се коришћењем FFBC система контроле нормалне силе резања могу израђивати жлебови захтеване дубине, на закривљеним и косим површинама, са позитивним или негативним углом нагиба, што је приказано на слици 1.7, при чему нису потребне информације о геометрији површине пре обраде.



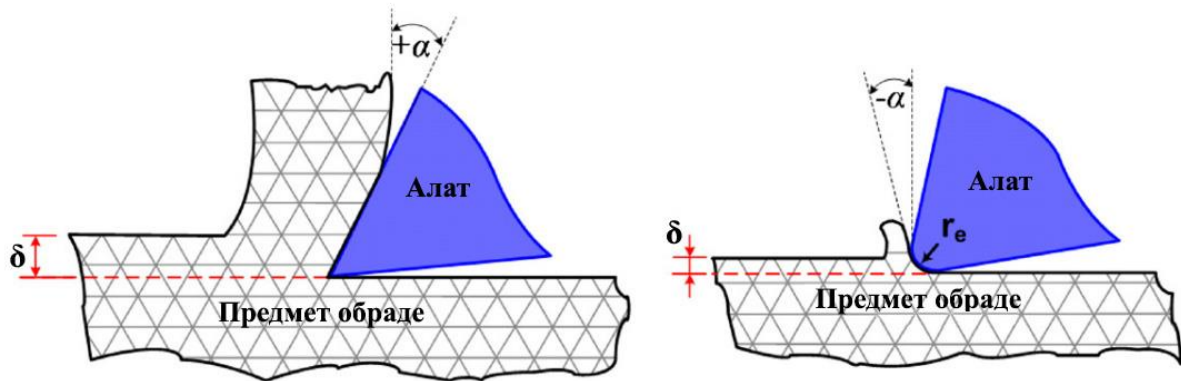
Слика 1.7 – Израда микро жлебова на површинама са позитивним и негативним углом нагиба применом FFBC система [G. H. Granados (2016)]

Као што је већ поменуто, бројни истраживачи предлажу принцип микро обраде који је суштински сличан принципу стандардне макро обраде. Површина радног комада се механички обрађује уклањањем вишка материјала уз помоћ микро алата. У односу на конвенционалне процесе макро обраде, микро обрада има специфичне карактеристике, због своје значајне редукације величине резног алата. Већина истраживања која се баве одређивањем утицаја радијуса врха резног клина на минималну дебљину струготине, извршена су веома прецизном обрадом микро резањем, скидањем танког слоја материјала уз помоћ макро алата са веома прецизним дијамантским сечивом [Н. К. Tonshoff (1988); Y. Furukawa (1988); D. A. Lucca (1991); M. C. Shaw (1995); M. P. Vogler (2002); T. L. Schmitz (2002)].

Н. Sung-jung и сарадници (2004) описују микро резање волфрамових карбида отпорних на хабање коришћењем алата за резање израђених од поли-кристалног дијаманта (енгл. Polycrystalline Diamond, PCD), при чему се метод директно посматра на скенирајућем електронском микроскопу (енгл. Scanning Electron Microscope, SEM). Сврха ове студије је да јасно опише механизам резања волфрамових карбида и понашање честица волфрам карбида у зони деформације при ортогоналном микро резању.

При веома прецизном процесу резања дијамантским алатом, грудни угао алата ће вероватно постати негативан, јер је радијус врха резног алата знатно већи од дубине

резања, која је реда величине испод једног микрометра. На слици 1.8 дат је преглед основних појмова резног алата.

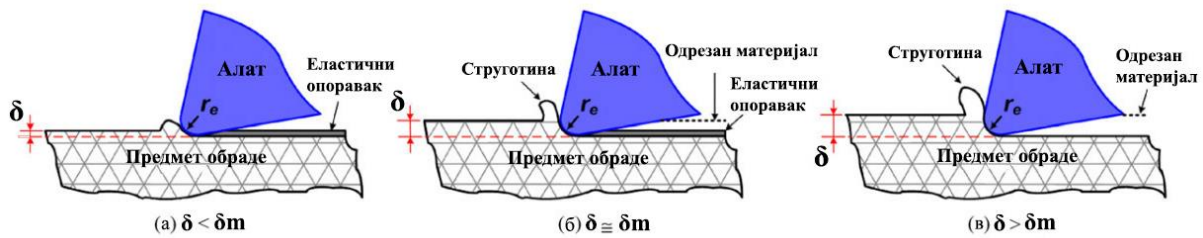


Слика 1.8 – Позитивни и негативни грудни угао резног алата [А. Агамчароен (2009)]

Округла ивица алата понекад може проузроковати браздање и лоше стање површине, или полирање, што резултира сјајном површином у зависности од дубине резања. У циљу одређивања утицаја дубине резања на храпавост обрађене површине вршена су многа истраживања. Резултати су показали да се храпавост површине смањује са повећањем дубине резања. Испитивања су вршена на узорцима материјала различитих тврдоћа (алуминијум, месинг и бакар). Како би се истражио утицај микро резања на микро тврдоћу обрађене површине, мерена је микро тврдоћа различитих материјала при варирању дубине продирања резног алата. Ефекат отврдњавања је био најмањи при минималној дубини резања код свих материјала. Верује се да је повећање тврдоће обрађене површине на дубинама резања мањим од минималне узроковано полирањем. Ово показује да је заостало напрезање на обрађеној површини најмање када се материјал обрађује минималном дубином резања. При минималној дубини резања, генерисана је непрекидна струготина и квалитет обрађене површине у погледу површинске храпавости био је најбољи [S. M. Son (2005)].

S. M. Son и сарадници (2005) су се бавили односом трења између алата и радног комада и минималне дубине резања при микро обради. Предложен је јако прецизан модел резног алата, у коме су радијус ивице алата и коефицијент трења главни фактори који одређују минималну дубину резања. Према постигнутом моделу, мањи радијус ивице резног алата омогућава смањење дубине резања, тј. мању дебљину струготине.

Минимална дубина резања при микро прецизном резању је тема која је интересантна великом броју истраживача. Приликом обраде код малих дубина резања алата, јавља се течење метала на месту радијуса ивице резног алата и то постаје веома важан процес (Слика 1.9). Утврђено је да постоји критична дубина резања која представља почетак формирања струготине.



Слика 1.9 – Критична дубина резног алата у процесу микро резања [А. Agarcharoen (2009)]

Р. К. Vasuray и сарадници (1977) представили су у свом раду приближну анализу, којом се предвиђа угао резног клина који одговара критичној дубини резања; закључили су да он износи 37.6° .

Да се може постићи непрекидна (континуална) струготина при нанометарским дубинама резања показују Н. Икава и сарадници (1985), користећи одређени радијус резне ивице изузетно оштрог и тврдог дијамантног алата. D. A. Lucca & Y. W. Seo (1993) су приметили ефекте браздања површине радног комада при микро обради и указали на важност ове појаве, због великог ефективног негативног грудног угла алата који је резултат радијуса ивице алата. Z. J. Yuan и сарадници (1996) су представили једноставан аналитички израз за оређивање минималне дубине резања, изведен из односа радијуса врха алата, силе резања и коефицијента трења.

У циљу спречавања изненадног лома врха резног алата, обрада микро резањем се често изводи алатом чији је радијус врха већи од дебљине струготине. За разлику од макро резања, где је дебљина струготине знатно већа од радијуса врха резног алата, смицање материјала код микро резања настаје дуж заобљења врха резног алата [J. D. Kim (1995)]. Као резултат тога, резање се изводи са негативним грудним углом алата, што неповољно утиче на силе резања. Дакле, може се закључити да се процесом микро резања могу лакше обрађивати тврђи материјали, чија се зона контакта са резним алатом минимално еластично деформише услед дејства силе продирања резног алата. Смањење тврдоће материјала предмета обраде доводи до знатног повећања утрошене енергије у процесу микро резања, јер се део енергије троши на еластичну деформацију дела, док се остатак енергије троши на стварање струготине [M. C. Shaw (1995)]. Када је дубина продирања алата у материјал предмета обраде мања од критичне дебљине струготине, струготина се не може генерисати током процеса микро резања; уместо тога, радни комад се еластично деформише (Слика 1.9) [А. Matsubara (2000)].

Код микро резања, радијус резне ивице и величина кристалних зрна материјала имају велики утицај на силу резања, па је проучавање утицаја величине кристалних зрна материјала на силу резања неизбежно. X. Wu и сарадници (2016), предложили су метод за процену силе резања. Резултати су показали да ситнозрнастија структура предмета обраде узрокује веће силе резања и веће специфичне енергије резања. Штавише, доказано је да са повећањем радијуса врха резног алата сила резања расте. Утицај величине кристалних зрна материјала на силу резања и специфичну енергију резања је знатно мањи од утицаја радијуса резног алата.

Повећање сила резања доводи до убрзаног хабања алата, великих деформација алата и промене геометрије резног алата [H. Weule (2001)]. Такође је добро познато да

нехомогеност материјала има велики утицај на храпавост обрађене површине и на силе резања у микро машинској обради [М. Р. Vogler (2003)].

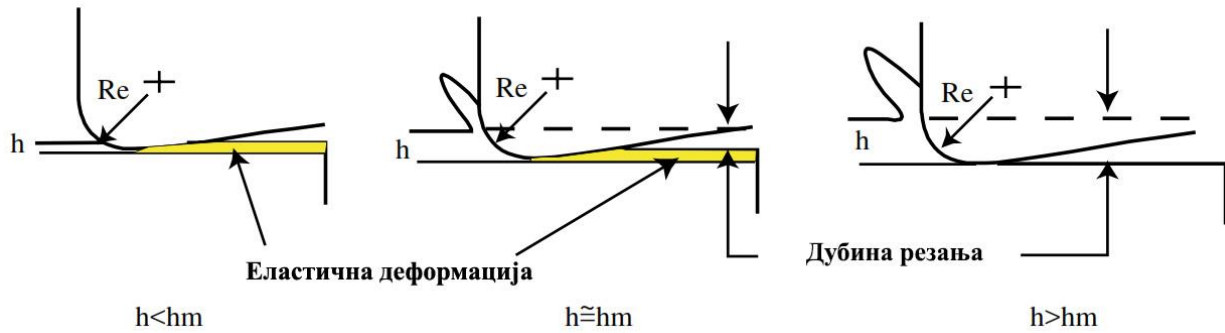
Процес формирања струготине је динамичан и веома комплексан процес, који зависи од много параметара као што су карактеристике материјала предмета обраде, резног алата и алатне машине. Разумевање формирања микро струготине је важно за прецизно предвиђање сила резања, односно за правилно димензионисање резних алата, како би се задовољила потребна крутост резног алата. С обзиром на то да се струготина не може формирати када је дубина резања мања од минималне дебљине струготине, проналажење минималне дебљине струготине привукло је много пажње [Н. Weule (2001); М. Р. Vogler (2003); В. Kim (2004)].

Код макро обраде, као што је већ речено, дебљина скинутог материјала по зубу је обично већа од радијуса ивице резног алата. Према [М. А. Davies (1995-1); М. А. Davies (1995-2)], ток скидања материјала при малим брзинама резања је веома нехомоген, што утиче на формирање прекидне струготине. Ова локализована деформација настаје као последица нестабилног термопластичног напрезања материјала.

Насупрот томе, W. Konig и сарадници (1993) показују да су периодично настале пукотине на површини радног комада, узроковане комбинацијом ниског притисног напона и високог смицајног напона, узрок настанка прекидне струготине.

Процес настанка струготине при микро обради се разликује од процеса настанка струготине при макро обради, па се резултати испитивања на макро нивоу не могу применити код микро обраде. Мала дубина резања и велики радијус резног алата узрокује велики негативни грудни угао резног алата. Овај феномен узрокује лошу храпавост обрађене површине и велике еластичне деформације материјала у зони контакта резног алата и материјала предмета обраде. В. Kim и сарадници (2004) су показали да постоји еластична деформација радног комада током процеса микро резања.

На основу наведених примера из литературе може се закључити да дубина продирања резног клина у материјал предмета обраде током процеса микро резања мора бити већа од критичне дебљине струготине. На слици 1.10 је дат шематски приказ одређивања критичне дебљине струготине. Ако је сила продирања резног клина у материјал предмета обраде мала, резни клин ће остварити еластичне, али не и пластичне деформације обрађиване површине. Даље повећање силе узрокује повећање дубине продирања резног клина у материјал предмета обраде, што доводи до појаве пластичних деформација, поред еластичних деформација обрађиване површине, тј. до појаве првих струготина. Дубина која условљава појаву првих пластичних деформација на обрађиваној површини радног комада представља критичну дубину продирања алата, тј. почетак уклањања материјала са обрађиване површине [X. Liu (2004-2), и В. Kim (2004)].



Слика 1.10 – Минимална дебелина струготине, R_e - радијус резног алата, h – дебелина настале струготине, h_m - минимална дебелина струготине [J. Chae (2006)]

Критична дубина резања зависи пре свега од карактеристика материјала и радијуса резног алата. М. Р. Vogler и сарадници (2004) истичу да не постоји теоријски модел којим се може одредити критична дубина продирања алата, већ се она мора одредити експерименталним путем или анализом методом коначних елемената (енгл. Finite Element Method, FEM). Поменути аутори су се бавили одређивањем минималне дебелине струготине која настаје микро резањем челика. Т. Morigaki и сарадници (1993) користили су FEM анализу као алат за експериментално одређивање генерисане топлоте у зони стварања микро струготине методом ортогоналног микро резања бабра, при чему је коришћен дијамантски алат. К. Liu и сарадници (2003) експериментално одређују формирање струготине и силе микро резања. Закључују да се изненадна промена силе продирања алата у материјал предмета обраде може користити за одређивање минималне дебелине струготине. Ова изненадна промена силе доводи до трансформације процеса клизања алата по материјалу у процес резања.

Будући да минимална дебелина струготине зависи од својстава материјала и режима обраде, S. M. Son и сарадници (2005) су у свом раду аналитички одредили минималну дебелину струготине на основу радијуса врха резног алата и коефицијента трења између радног комада и алата. Приметили су да се непрекидна струготина генерише при минималној дебелини струготине и да производи најбољу површину радног комада. Код микро-механичке обраде је важно идентификовати минималну дебелину струготине пре процеса резања, јер она директно утиче на процес формирање струготине. На минималну дебелину струготине утиче радијус врха резног алата и материјал предмета обраде.

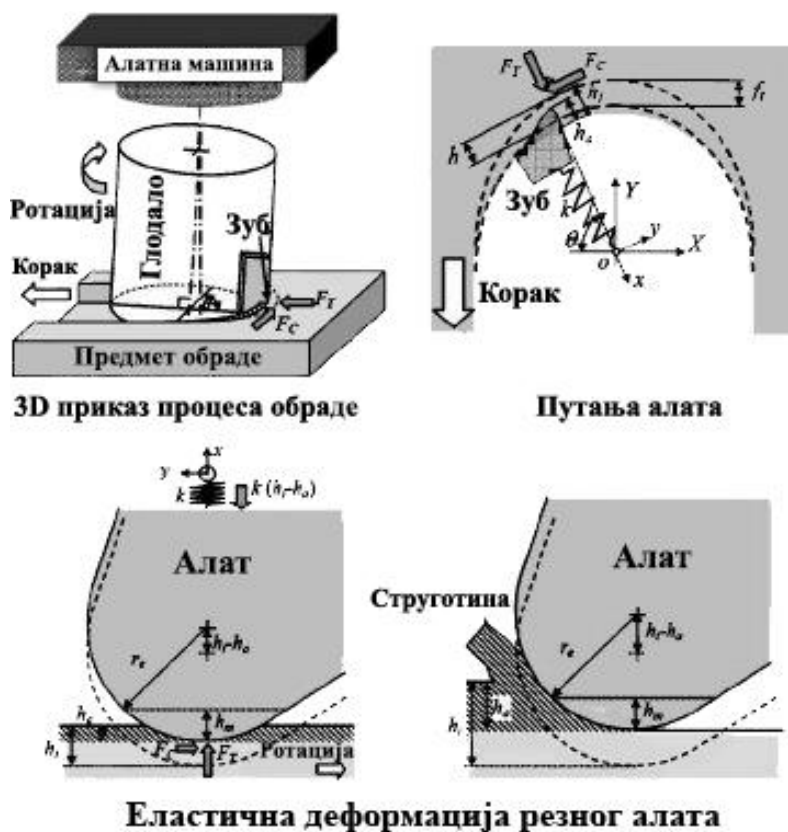
Процес стварања струготине је у директној вези са силом резања. Сила резања утиче на појаву напона услед којих се еластично деформише резни алат. Како настали напони у резном алату не би достигли вредност напона на граници течења материјала и тиме изазвали трајне деформације резног алата, неопходно је ограничити брзину помоћног кретања алата [E. Budak (2000); T. A. Dow (2004); B. Kim (2004)].

J. D. Kim и сарадници (1995) дају аналитички приказ разлике у силама резања између процеса макро обраде и микро обраде. Аналитички модел микро резања узима у обзир еластични опоравак радног комада дуж површине контакта резног алата и радног комада.

X. Liu и сарадници (2004-1) су утврдили да вибрација алата и еластични опоравак радног комада утичу на величину силе резања при малим брзинама резања.

Они су предложили процес микро глодања применом три типа механизма обраде: само еластична деформација (дубина продирања алата у материјал предмета обраде је мања од минималне дебљине струготине); еластична и смицајна деформација; смицајна деформација (дубина продирања алата у материјал предмета обраде је већа од минималне дебљине струготине). Користили су стопу еластичног опоравка добијену резултатима рада [V. Jardret и сарадници (1998)], како би квантификовали различите типове деформација. Поред тога, истраживали су микро обраду са малим дубинама продирања алата у материјал предмета обраде. Мењајући дубину продирања алата у материјал предмета обраде, открили су да мале дубине продирања алата у материјал предмета обраде доводе до варирања дебљине струготине, што резултира лошим квалитетом обрађене површине.

С. Ј. Kim и сарадници (2004) су истраживали утицај еластичне деформације резног алата на остварене грешке дубине продирања алата у материјал предмета обраде, при чему је алат посматран као једноставан конзолни носач. Њихов модел коригује стварну дубину продирања алата у материјал предмета обраде узимајући у обзир грешке настале због угиба резног алата (Слика 1.11).



Слика 1.11 – Контакт резног алата и предмета обраде [С. Ј. Kim (2004)]

Т. А. Dow и сарадници (2004) су такође кориговали грешке продирања алата у материјал предмета обраде услед насталог угиба у микро алату, тако што су предвидели вредности сила резања. Приликом предвиђања силе резања неопходно је узети у обзир еластичну деформацију резног алата, која директно утиче на вредност дубине продирања алата у материјал предмета обраде. Код микро-машинске обраде W. Y. Вао и сарадници (2000-1) су развили аналитички модел силе резања за израчунавање дебљине струготине, узимајући у обзир путању врха резног алата, али не и ефекат

негативног грудног угла алата, еластичну деформацију радног комада, нити угиб алата (коришћен је релативно велики пречник алата). J. Tlusty & P. Macneil (1975) и J. Tlusty & G.C. Andrews (1983) су на основу спроведених истраживања закључили да није пожељно примењивати конвенционални макро модел код процеса микро обраде, када је однос између скидања материјала по зубу и полупречника врха резног алата већи од 0.1.

Код микро резања дубина резања је често мања од критичне минималне дебљине струготине, да би се избегао лом алата и да би се задовољила захтевана димензиона тачност предмета обраде. Ово узрокује велики негативни грудни угао резног алата. Модел прорачуна силе макро резања не може бити од користи за предвиђање силе микро резања, нарочито због еласто–пластичне деформације радног комада и статичког угиба алата, који не могу бити изостављени у анализи силе микро резања. Да би се произвели прецизни микро делови, мора се узети у обзир кристална структура предмета обраде, јер је дубина резања често мања од величине зрна у материјалу радног комада. Због тога нехомогеност материјала предмета обраде знатно више утиче на квалитет микро обраде, него на квалитет макро обраде. Промена у структури материјала предмета обраде током процеса резања узрокује варијацију силе микро резања и појаву вибрација. Ове вибрације је тешко елиминисати редизајном машине или корекцијом параметара обраде, јер потичу из радног комада [J. Grum (2003)].

Последица нехомогености материјала су вибрације које настају услед промене силе микро резања. Ове вибрације су изузетно неповољне у прецизним машинским операцијама, јер директно утичу на топографију обрађене површине и димензиону тачност радног комада. Промена кристалне структуре материјала и оријентација зрна утиче на угао смицања и вредност смицајних напона током процеса микро резања дијамантским алатом [W. V. Lee (1999); W. V. Lee (2002)].

Праћење хабања алата интензивно је проучавано на макро нивоу, док се веома мало радова бави хабањем алата при микро обради. Група аутора је развила неуронску мрежу за предвиђање хабања алата при микро обради [I. N. Tansel (2000)].

Приликом обраде челика нехомогене структуре, услед разлике у тврдоћи зрна ферита и перлита, варира сила резања, а то ће неповољно утицати на квалитет обраде радног комада [M. P. Vogler (2003)]. Како би се елиминисао утицај нехомогености материјала радног комада на квалитет обрађене површине, предложен је начин добијања повољније структуре материјала за микро обраду нормализацијом челика. Показано је да се услед повећања брзине резања побољшава квалитет обрађене површине [H. Weule (2001)].

Код процеса микро резања утицај брзине резања на хабање алата већи је од утицаја дубине резања [J. R. S. Prakash (2001)]. Наведени научни рад се бави испитивањем утицаја притиска средства за хлађење на хабање алата у микро обради. Експериментални резултати су показали да не постоји значајан утицај притиска средства за хлађење на интензитет хабања микро алата. Хабање микро алата се најчешће прати коришћењем скенирајућег електронског микроскопа [K. Weinert (2004)].

Радни комад у микро обради треба посматрати као нехомогени материјал, јер се величина зрна може поредити са величином струготине. Смањењем дубине резања у микро обради повећава се трење између резног алата и радног комада, што доводи до повећања генерисане топлоте и хабања резног алата. Сходно томе, повећање радијуса врха резног клина смањује квалитет обрађене површине за исту дубину резања [С. R. Liu (1996); М. Xiao (2003)].

За различите алуминијумске легуре, посматран је утицај микроструктуре материјала на величину силе резања, у статичким и динамичким условима испитивања. Закључено је да се преласком алата са једне на другу микроструктуру материјала предмета обраде мењају дубина резања и сила, што узрокује варијацију силе резања, појаву вибрација, убрзано хабање резног алата и лош квалитет обрађене површине [J. Grum (2003)].

Приликом микро глодања, група аутора је уочила да мања дубина резања узрокује веће хабање алата код радног комада од бакра. Закључили су да хабање алата малих пречника зависи од угла спирале алата и дубине глодања. Њихови експерименти су открили да мања дубина глодања узрокује веће хабања алата, што је у складу са многим претходним истраживањима [М. Rahman (2001)].

Код микро обраде глодањем, због смањења површине контакта глодала и предмета обраде, приликом изласка глодала из захвата, смањују се и силе резања, које даље условљавају смањење еластичних деформација микро алата. Ова појава значајно утиче на формирање неравнина, које настају као последица промене дубине продирања резног алата [G. Вугне, 2003.]. Код микро обраде тврдих материјала често се јављају неравнине, услед повећаног хабања резног алата [Н. Weule, 2001.]. Поједини аутори су испитивали начине уклањања неравнина код микро делова од месинга и нерђајућег челика. У циљу смањења неравнина, премазивали су месинг полимерним материјалом. Полимерни материјал испуњава удубљења на површини радног комада, омогућавајући резном алату непрекидни контакт са радним комадом. После обраде полимерни материјал се уклања ацетоном у ултразвучном купатилу. За нерђајући челик коришћена је техника електрохемијског полирања, која представља веома скупу врсту завршне обраде [Th. Schaller, 1999.].

Непрестана тежња за већом продуктивношћу обрадних процеса довела је до повећања брзине обраде у процесу микро резања при изради сложених 3Д облика. Предвиђање силе резања и њено мерење изискују праћење многих утицајних величина као што су радијус врха резног алата, деформација алата, итд. Већина објављених истраживања, која се односе на силу резања током процеса микро обраде, баве се појединачним утицајем ових величина на силу резања. Свеобухватнији приступ би ипак требало да укључи и њихове међусобне везе. Повећање продуктивности у обради микро глодањем захтева већу дебљину струготине од минималне, при чему се мора водити рачуна да напрезања резног алата остану искључиво у области еластичне деформације. Ако се то не може постићи, конструкцију алата треба редизајнирати, како би се повећала његова крутост и тако постигли основни неопходни услови за повећање продуктивности процеса микро обраде.

Потребно је размотрити могућност примене знања из макро обраде у микро обради, идентификовањем сличних проблема у макро и микро доменима. На пример,

утицај динамике процеса обраде у микродомену је знатно већи, управо због смањене крутости микро алата, чија дубина резања мора бити већа од критичне. Проблеми који нису значајни у макро домену, попут бацања резног алата, у микро домену имају далеко већи значај. Један од највећих изазова је одржавање силе обраде испод критичне границе, да би се спречило прекомерно хабање алата и омогућило повећање продуктивности. Очекује се да ће бити више изазова у вези са микро обрадом него са макро машинском обрадом, али и да ће нова технолошка решења превазићи те препреке [J. Chae (2006)].

Отпори резања при макро и микро обради имају исте компоненте силе резања, при чему се резултујућа сила резања може разложити на неколико компоненти и то: силу продирања алата у материјал предмета обраде, силу трења, главну силу резања, силу смицања и нормалну силу [Y. Altintas (2000)]. Међутим, силе микро резања се доста разликују од сила макро обраде, што је уочено у претходним истраживањима.

Израду микро делова процесом микро резања отежава ограничење силе резања на вредност мању од критичне силе, која може довести до трајних деформација, па и разарања носача резног алата. Смањење силе резања могуће је извести применом ултразвучне елиптичне вибрације која је синхронизована са правцем тока струготине. Применом ове методе смањује се сила резања и постиже боља површинска храпавост обрађене површине, као и боља димензиона тачност израђеног радног комада [T. Moriwaki (1995)].

Трење између резног алата и радног комада није детаљно истражено у микро обради. Неколико аутора је истраживало ефекте хабања алата праћењем силе продирања при макро обради [Y. Yao (1990); R. K. Kountanya (2004)]. Када је дебљина струготине мања од радијуса ивице резног алата, сила резања се смањује док се резни клин не похаба, а затим се њена вредност повећава. Тај феномен се може објаснити повећаним трењем и хабањем алата услед резања са тупим резним ивицама. Да ли се тај феномен макро обраде појављује и у процесу микро резања, још није познато.

У процесу макро резања, повећано хабање резног алата је узроковано високим трењем и топлотним оптерећењем, које се јавља између врха алата и материјала радног комада. То доводи до промене напонског стања површине предмета обраде као и њених механичких карактеристика [G. Byrne (2003)]. Са повећањем дебљине струготине, код микро обраде, силе продирања алата у материјал предмета обраде опадају [X. Liu (2004-2)].

Одређивање стабилних услова резања за одговарајуће резне алате са специфичним геометријама је од суштинског значаја за постизање прецизног микро глодања са високим квалитетом обрађене површине. S. M. Afazov и сарадници (2013) су се бавили истраживањем утицаја углова и хабања резног алата, као и утицајем термичких напрезања комада на силе резања и стабилност процеса обраде. Утврђено је да се силе резања повећавају се повећањем радијуса ивице алата. Такође је примећено да су за грудни угао алата од 0° силе резања веће него за угао од 8° . Повећање сила резања је углавном повезано са променом услова трења у контакту између алата и радног комада.

Бацање резног алата и неуравнотеженост обично су мањи проблем у операцијама макро обраде. Међутим, проблем се увећава смањењем пречника алата и

значајним повећањем угаоне брзине резног алата при обради глодањем. Бацање алата је обично последица непоклапања оса симетрије алата, држача алата и вретеништа машине. У макро обради ово се често не узима у обзир, јер је пречник резног алата релативно велики у поређењу са бацањем алата, док је угаона брзина алата тј. вретеништа машине релативно мала у поређењу са процесом микро обраде.

Небалансирани ротирајући склоп (резни алат и вретено машине) могу генерисати буку и узроковати промене интензитета силе резања, посебно при великим бројевима обртаја. Са повећањем броја обртаја расте центрифугална сила, која је последица ексцентрицитета, ексцентричне масе и угаоне брзине (броја обртаја). Овај ексцентрицитет се може појавити у тренутку наилаaska резног алата на тврђи слој, па се алат због своје мале површине попречног пресека може еластично деформисати и променити путању. Међутим, још увек нема истраживања у којима би био испитиван утицај нехомогене структуре на промену силе резања. То је зато што је процес резања веома сложен, а промене силе резања изузетно брзе.

Нека истраживања су се бавила изучавањем бацања резног алата у процесу резања, када резни алат није био у захвату [W. Y. Bao (2000-2); B. W. Ikuu (2001); T. A. Dow (2004)]. Истраживан је утицај различитих носача резног алата на бацање резног алата и силу резања. За испитивање бацања резног алата може се користити капацитивни сензор [X. Liu, 2004. (2)]. Међутим, капацитивни сензори нису поуздани за мерења на сферичним површинама, када мерење помака постаје нелинеарно [R. R. Vallance (2004)].

Бацање резног алата у процесу резања неповољно утиче на димензиону прецизност радног комада и узрокује већу хрпаовост обрађене површине [W. B. Lee (2001)]. E. I. Rivin и сарадници (2000) су испитивали могућност компензације бацања резног алата контролисаним померањем носача резног алата. У операцијама микро обраде, такође су потребна нова решења резних алата који раде са високим бројем обртаја.

Више значајних истраживања је спроведено у вези са сталним праћењем процеса макро обраде, применом различитих метода: праћењем промене јачине струје мотора за погон вретена машине [K. Matsushima (1982); N. Constantinides (1987)]; мерењем количине одстрањеног материјала [Y. Altintas (1992); T.Y. Kim (1996)]; мерењем вибрација [T. I. El-Wardany (1996)]; мерењем буке [T. Moriwaki (1991); A. Sampath (1987); D. Choi (1999)]; и мерењем силе резања [T. Moriwaki (1980); Y. Altintas (1989) и (2000); J. H. Tarn (1989); D. A. Dornfeld (1990); P. M. Lister (1993); Y. S. Tarn (1994-1); D. E. Dimla (1999)].

Мерење силе резања је најефикаснија метода за праћење процеса резања, јер најбоље представља стање алатне машине и резног алата [J. Tlusty (1983)]. Упркос развоју технологије, не постоје поуздани и практични сензори за праћење и управљање процесима резања који се изводе великим брзинама [D. E. Dimla (2000)]. Најчешће коришћени метод за мерење силе резања у операцијама обраде је преко динамометра који прати силу по више оса.

Сила резања представља функцију карактеристика материјала, дубине резања, корака резног алата, стања резног алата, углова резног алата итд. Услед динамике процеса резања, алат ствара вибрације, које могу утицати на квалитет обрађене

површине. Последично, сила резања варира због промене корака, дубине резања, хрпавости обрађиване површине, нехомогене структуре материјала, стања резног алата итд. Алат се током процеса обраде хаба, што доводи до повећања хрпавости обрађене површине и димензионих грешака предмета обраде.

Због поменутих проблема, тежи се остваривању константне силе резања и њеном одржавању на константном нивоу, како би се вибрације резног алата свеле на минимум, а тиме смањила хрпавост обрађене површине, повећала тачност обраде и продужио животни век резног алата. Тежи се и одржавању корака, који директно зависи од врсте материјала алата и радног комада, дубине резања итд. Велики број истраживача се бави истраживањима која се односе на контролу константне силе резања [Т. У. Kim (1996); С. У. Xu (2007); D. Kim (2011)].

Уз све већу потребу за индустријском аутоматизацијом, развијају се различити приступи контроли производних процеса. Стандардни пропорционални-интегрални-деривативни контролери (енгл. ProportionalIntegralDerivative Controller, PID) обично се примењују за контролу различитих аспеката система обраде. Међутим, процес контроле пре свега зависи од познавања параметара система. У реалним условима, различити фактори утичу на процесе обраде, укључујући геометрију радног комада, својства материјала радног комада, хабање алата итд. Међутим, та својства нису директно мерљива [S. J. Rober (1996)]. Промене наведених параметара могу неповољно утицати на перформансе система са фиксним контролером. Адаптивна контрола, код које се може управљати контролисаним параметрима обраде у времену, представља изузетно користан алат за постизање захтеваног квалитета обраде [M. Tomizuka (1988)].

Адаптивна контрола, уз пратећи развој теорије, попримила је различите облике у радовима великог броја истраживача и индустријских стручњака. Неке од контролних шема укључују модел референтне адаптивне контроле (енгл. Model Reference Adaptive Control, MRAC) и самоподесиву регулацију (енгл. Self Tuning Regulation, STR). У литератури се може наћи више примера примене адаптивне контроле при процесу резања метала [O. Masory (1983); A. G. Ulsoy (1983); L. K. Daneshmend (1986); M. Tomizuka (1988)].

O. Masory и сарадници (1983) су применили напредни адаптивни контролни систем при обради метала стругањем. Овај метод, као и MRAC, користи шеме за процене контролисаних параметара у времену, али се разликује од MRAC-а по томе што нема варирања параметара у току рада. L. K. Lauderbaugh и сарадници (1986) модификован контролер користе за ефективно смањење нивоа улазне осцилације. Развијени су и други механизми који користе системе контроле силе резања [D. W. Hood (2003); K. Bourne (2010); K. Kuriyama (2013)]. Међутим, они су углавном фокусирани на обраду у нано режиму и на компензацију хабања алата или деформације алата током процеса резања. Неки истраживачи су крајем прошлог века [M. Week (1980); O. Masory (1980); O. Masory (1983); O. Masory (1984); Y. Koren (1981); L. K. Lauderbaugh (1985); T. U. Kim (1996)] предложили адаптивно управљање са системом ограничења (енгл. Adaptive Control with Constraint, ACC) за алатне машине, како би се постигла константна сила резања у процесима у којима резни алат изводи ротационо кретање око сопствене осе. Основна идеја у адаптивној контроли система је да се контрола процеса резања обавља праћењем интензитета електричне струје коју електро

мотор троши при обради. Струја напајања мотора вретена машине садржи суштинске информације и може се користити за процену силе резања, па су [G. D. Kimand (1999); Y. H. Jeong (2002)] предложили АСС систем контролера са фиксним појачањем за систем контроле константне силе резања. Проблем ове контроле система је био избор одговарајућег појачања контролера, јер је одабир високог појачања могао проузроковати да систем резања постане нестабилан при повећању дубине резања. Када је дубина резања мала, ниско појачање контролера резултираће спорим одговором. Да би се решили ови проблеми са фиксним АСС контролером система, развијен је АСС систем променљивог појачавања, за окретање резног алата у складу са измереном силом резања и параметарима брзине резања. Овај контролер користи процењене параметре у реалном времену за регулацију појачања контролера, како би се приближио жељеној вредности. Дизајн контролера АСС система захтева тачно постављање математичких релација за процену жељених параметара. Ротација резног алата уноси динамичку побуду у систем, што додатно отежава прецизно дефинисање математичког модела система. Дакле, АСС је тешко дизајнирати, што га чини непогодним за ефикасно побољшање перформанси процеса резања. Нови систем прилагодљивих контролних ограничења (АСС) у процесу резања константном силом, где је представљен АСС контролни систем базиран на фази правилима, којима се може постићи аутоматско прилагођавање брзине резања у реалном времену у циљу одржавања константне силе резања, представио је Y. S. Tarng (1994-2).

Динамички адаптивни алгоритам управљања, заснован на динамичким карактеристикама (енгл. Dynamic Characteristic-Based Fuzzy Adaptive Control Algorithm, DCBFACA), како би се избегао утицај брзних промена силе резања на стабилност и прецизност обраде, представили су H. Liu и сарадници (2015). Сила резања се индиректно добија у реалном времену, праћењем тренутне јачине струје, односно вредности снаге потребне за обртање вретена машине. Брзина резања се подешава он-лине фази (енгл. fuzzy) логиком, а измерена вредност струје је коришћена као повратна спрега, у циљу контроле силе резања.

Алгоритам динамичке адаптивне контроле предлаже да се подешавање дубине резања и брзина окретања вретеништа машине, који утичу на јачину струје коју мотор вретена троши приликом процеса обраде, врши у реалном времену, како би се постигла минимална храпавост обрађене површине при тврдом сферном брушењу [D. Li (2012)].

Контрола константне силе резања доводи до повећања продуктивности процеса производње и дужег века трајања резног алата, јер се повећава брзина уклањања материјала. Међутим, систем ротационог кретања резног алата генерално може бити извор ударних динамичких напрезања. Пројектовање модела заснованог на контролеру за контролу константне силе резања представља комплексан процес, јер је тешко прецизно дефинисати математички модел у систему обртања резног алата. R. J. Lian и сарадници (2005) су користили моделе бесплатног фази контролера за контролу система ротације алата, како би постигли контролу константне силе резања.

Фази логика се широко користи у контроли машина. Фази логика (енгл. fuzzy logic) представља уопштење класичне логике, развијено над теоријом расплнутих скупова. За разлику од класичне логике, у којој искази могу имати вредности „тачно“ и „нетачно“, фази логика пружа аналитички апарат којим се могу моделирати искази чија

се истинитост може приказати правом са континуалним растом од нетачног ка тачном, тако да резултат може бити и делимично тачан.

Фази контролери су концептуално врло једноставни. Они се састоје од улазне фазе, фазе обраде и излазне фазе. Улазну фазу мапира сензор или други улаз. Фаза обраде позива свако правило и генерише онолики број резултата колико има правила, а затим комбинује резултате и правила. Коначно, излазна фаза претвара комбиновани резултат у одређену контролну излазну вредност. Најчешћи облик функција чланства је троугао, иако се користе и трапезоидне и звонасте криве, при чему је облик генерално мање важан од броја кривих и њиховог постављања. Од три до седам кривих су прикладне за покривање потребног распона улазне вредности, или "универзума дискурса" у фази жаргону.

Дизајн традиционалног фази контролера (енгл. Traditional Fuzzy Controller, TFC) има потешкоће у проналажењу правила контроле и одабиру одговарајуће функције чланства. Да би се решио овај проблем, у TFC је уведен алгоритам сиве теорије, како би се предвидела следећа излазна грешка система и променила, пре него што тренутна излазна грешка система и тренутна промена грешке постану улазне варијабле TFC. Овај дизајн фази контролера сивог предвиђања (енгл. Grey Prediction Fuzzy Controller, GPFC) не само да поједностављује TFC дизајн, већ и постиже жељени резултат у имплементацији TFC-а. Да би се потврдила применљивост предложених интелигентних контролера и контролисала константна сила резања, R. J. Lian и сарадници (2005) су преуредили систем главног кретања при обради стругањем. GPFC има боље перформансе у контроли константне силе резања него TFC, што је и експериментално потврђено.

Иако алтернативни приступи, као што су генетски алгоритми и неуронске мреже, у многим случајевима могу да функционишу једнако добро као и фази логика, фази логика има предност.

Стратегије контроле фази логике примењене су већ крајем прошлог века [C. C. Lee (1990); S. Z. He (1993); P. P. Wang (1994)]. Такве стратегије поседују посебне карактеристике развоја контролера без модела. Стога, стратегије управљања фази логиком могу се такође користити за контролу система за ротацију резног алата са компликованим динамичким моделом. Међутим, примена контроле фази логике и даље захтева доста напора, пре свега при идентификовању одговарајуће функције чланства и фази правила, посебно када је систем компликован или се брзо мења. Као што је претходно истакнуто, систем ротације резног алата очигледно има нелинеарне динамичке карактеристике. Ове карактеристике значајно повећавају тешкоће у пројектовању традиционалног фази контролера за управљање системом ротације резног алата у циљу контролисања силе резања, као што је већ истакнуто. Бројни аутори су наставили да се баве применом фази логике у контроли система обраде [M. Liang (2003); R. H. Guerra (2006); U. Zuperl (2005-1); U. Zuperl (2005-2); U. Zuperl (2011); U. Zuperl (2012-1); U. Zuperl (2012-2); P. Benardos (2014)].

Систем сиве теорије (енгл. Grey System Theory) дефинише ситуацију или систем без информација као црн, док онај са перфектним информацијама дефинише као бео, тако да је систем са некомплетним информацијама заправо сив. Након недавног развоја сиве теорије и микропроцесора, теорија сиве контроле се све више примењује у

различитим областима инжењерства [M. Lin (1989); D. Yi (1990); J. Liu (1992); Y. S. Liao (2000); R. J. Lian (2005); F. Ridwan (2012)].

К. Н. Fuh & С. Т. Chen (1997) су интегрисали технике фази контроле и сиве теорије, како би развили систем константне силе резања у условима константне брзине уклањања материјала. Комбиновани фази логички и сиви алгоритам предвиђања за развој система контроле силе резања такође су успешно применили [J. H. Chou (2000); M. Y. Yang (2002); C. H. Hsieh (2002); S. J. Kim (2007); J. Lin (2011)].

1.1 Полазне хипотезе

Полазне хипотезе предложене докторске дисертације у физичком смислу образлажу предности управљања силом у односу на управљање малим померањима. У том смислу наводе се полазне хипотезе:

1. Инерцијална сила која настаје при обртању ексцентричне масе одређеном угаоном брзином је физички прецизно дефинисана величина. Интензитет те инерцијалне силе је једнак производу ексцентричне масе, вредности ексцентрицитета и квадрата угаоне брзине. Теоријски, а великим делом и у инжењерском смислу, инерцијалном силом се може управљати од нулте вредности па до веома великих вредности сила. При чему се за управљање могу искористити три параметра: ексцентрична маса, ексцентрицитет и угаона брзина.
2. У процесу обраде предложеном методом, инерцијална сила представља силу продирања алата у материјал предмета обраде. Ако се зна да вредности инерцијалне силе могу бити веома мале онда произилази да ће и продирање алата у предмет обраде имати малу вредност. Са тим у вези а у теоријском смислу, могуће је изводити обраду при дубинама резања значајно мањим од једног микрометра.
3. За постизање жељеног пречника цилиндричног предмета обраде, при малим вредностима инерцијалних сила биће потребно знатно веће време и већи број пролаза алата, што управо у теоријском смислу указује да ова предложена метода има значајно већу дубину регулације у односу на постојеће методе завршне обраде предмета цилиндричног облика.

2. Завршне обраде цилиндричних отвора

Да би се обезбедиле поуздане перформансе и продужен век трајања савремених машина, њихове компоненте морају бити произведене не само са високом димензионом и геометријском тачношћу, већ и са одговарајућим квалитетом обрађене површине.

Површинска обрада значајно утиче на функционалне параметре, као што су отпорност на хабање, замор, корозиона отпорност и губитак енергије услед трења. Нажалост, стандардне методе обраде, као што су стругање, глодање или чак класично брушење, не могу задовољити овај строги захтев [F. Klocke (2009)]. Због тога се за постизање и побољшање наведених функционалних својстава машинских компоненти користе поступци суперфиниширања, као што су леповање, хоновање, полирање и брушење.

Табела 2.1 илуструје постепено побољшање храпавости површине произведене различитим процесима, од прецизног стругања и брушења до суперфиниширања, укључујући леповање и хоновање.

Табела 2.1 – Храпавост површине произведене различитим процесима завршне обраде [J. R. Davis (1989)]

Процес обраде	Ra [μm]
Стругање	1,25 – 12,5
Брушење	0,9 - 5
Хоновање	0,13 – 1,25
Суперфиниш	0,08 – 0,25
Леповање	0,01 – 0,25

Који ће се поступак завршне обраде применити зависи од намене предмета обраде, тј. од захтеваног квалитета обраде. Њима се уклањају веома мале количине метала, при чему се смањује површинска храпавост обрађене површине [H.A. Youssef (2008)].

Завршна обрада метала процесима брушења, хоновања, суперфиниша и леповања сврстава се у обраду метала са скидањем струготине, при чему коришћен резни алат нема тачно дефинисану резну геометрију. Неправилно распоређена тврда абразивна зрна остварују контакт са предметом обраде преко врхова неравнина, што доводи до смањења површинске храпавости. Абразивна зрна су изузетно тврда и могу имати различит хемијски састав и структуру. Који ће се абразив користити искључиво зависи од материјала предмета обраде. Тврда абразивна зрна повезује везивни материјал, од чијих карактеристика зависи постојаност алата. У даљем тексту ће бити више речи о поменутих поступцима завршне обраде.

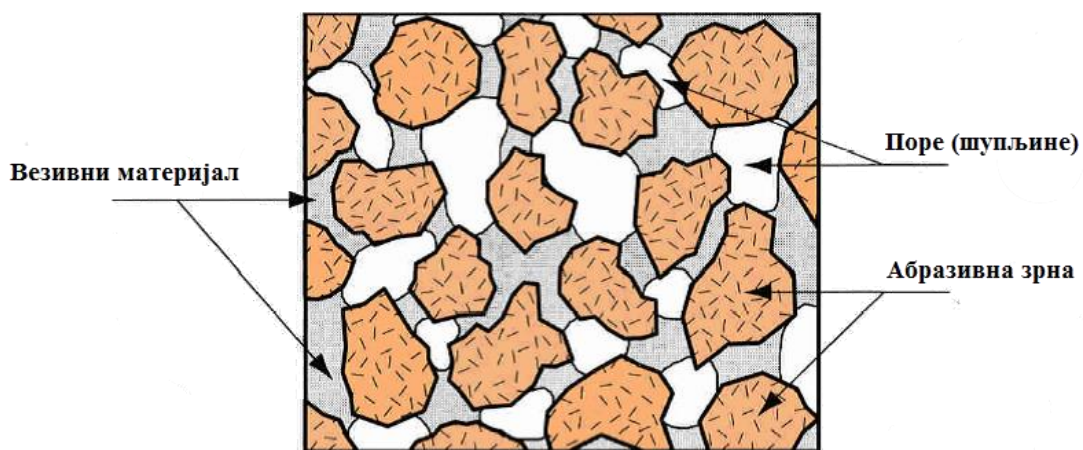
2.1 Брушење

Брушење је најзаступљенији поступак завршне обраде код тврдих материјала различитих облика. Томе у прилог иде развој абразивних материјала и темељно разумевање абразивне обраде, којом се бави велики број истраживача [R. Komanduri (1997); J. Webster (2004); B. Karpuschewski (2008); H.K. N. Ayrilmis (2010); H. N. Li (2016)]. Захваљујући малом попречном пресеку струготине и великој брзини резања, брушење се одликује високом тачношћу и добром завршном обрадом. Није нужно ограничено на уклањање материјала у малом опсегу. Може се користити и за уклањање велике количине материјала и посебно је економски исплативо у комбинацији са неким процесима обраде, као што су глодање и стругање [Toenshoff (2013)].

Брушење је процес уклањања метала, који користи абразивне брусне плоче или траке, чији су елементи за резање зрна абразивних материјала високе тврдоће и постојаности на високим температурама [F. Klocke (2009)].

Будући да су абразиви врло тврди, абразивна обрада се користи за обраду тврдих метала, обликовање тврдих неметалних материјала, као што су карбиди, керамика и стакло, за обраду гранита и бетона, за уклањање варова, чишћење површина итд.

Специфичност брушења, у поређењу с осталим поступцима обраде, лежи у геометријски неодређеној резној ивици која је састављена од великог броја абразивних зрна, која чине компактну целину захваљујући везивном материјалу. Тако се формирају разни облици и димензије брусних површина (Слика 2.1). На брусној површини, поред абразивних зрна и везивног материјала, налазе се шупљине (поре). Оне имају улогу складиштења насталих продуката хабања приликом обраде. Брусна зрна нису равномерно распоређена по резној, брусној површини, немају исте димензије и геометрију, без обзира на њихову категоризацију при производњи абразива, тако да чине неодређену резну геометрију алата.



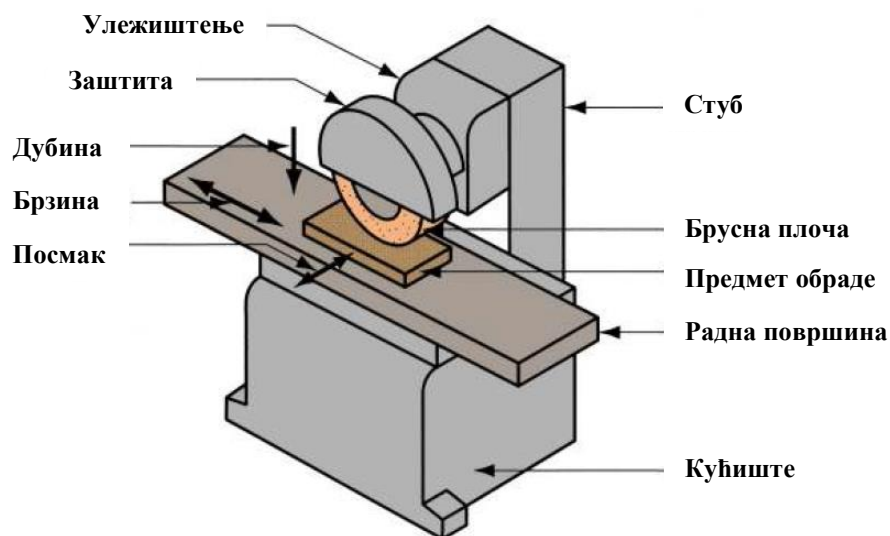
Слика 2.1 – Структура брусне површине [J. Wiley (2002)]

Абразиви за брусне плоче су тврди. Поред тврдоће, трошност је важна карактеристика абразива. Трошност је способност абразивних зрна да се разбијају на мање комаде. Ово својство абразива побољшава карактеристику самооштрења, што је важно за одржавање оштрине брусне плоче. Материјали који се најчешће користе за

производњу брусних зрна су алуминијум оксид (Al_2O_3), силицијум карбид (SiC), кубни нитрид бора (CBN), синтетички дијамант (PCD), набројани по тврдоћи респективно [J.R. Davis (1989); J. Wiley (2002)]. Која ће се брусна плоча користити зависи од материјала предмета обраде.

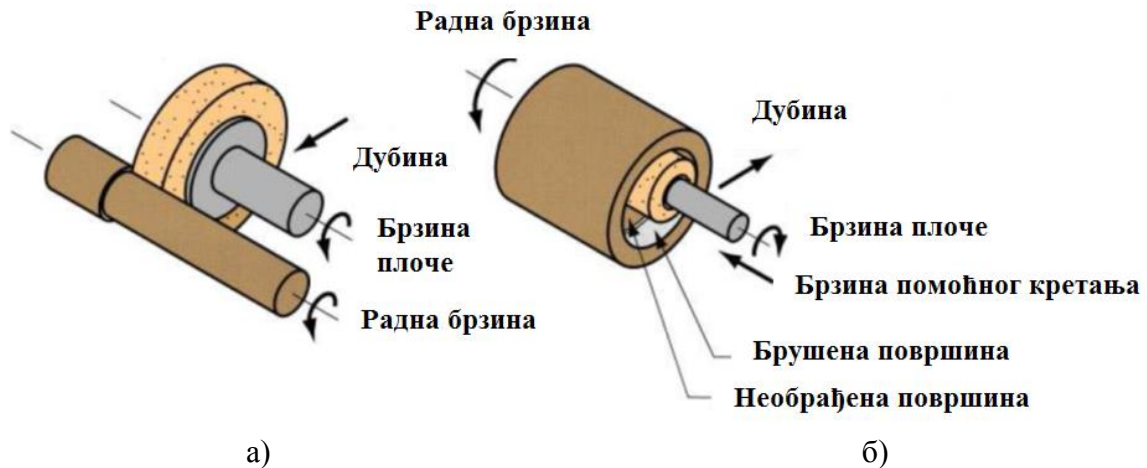
Везивни материјал је веома битан за својства саме брусне површине. Степен тврдоће брусне површине може се мерити отпором везивног материјала према избијању абразивних зрна из брусне површине приликом процеса брушења. Брусна површина може бити веома мека, мека, средње тврда, тврда и веома тврда. Веома мека брусна површина се интензивно троши, брзо губи геометријски облик и радни комад има повећану хрпавост, док веома тврда брусна површина може довести до појаве вибрација, повећања температуре брусне површине и промене површинске структуре материјала, попуњавања пора бруса и смањења учинка брушења. У процесу брушења, оштра зрна брусне површине постају заобљена и стога губе способност резања. Фактор који, уз истрошеност зрна, смањује способност брушења, је попуњавање шупљина и пора између зрна са продуктима хабања, чиме настаје стање познато као оптерећење брусног точка. Попуњавање се посебно догађа приликом брушења дуктилног материјала. Данас се најчешће као везивни материјали користе керамичка, силикатна, гумена и метална везива [F. Klocke (2009)].

Код брушења, главно ротационо кретање врши сам алат, док помоћно кретање изводи радни комад, при чему помоћно кретање може бити праволинијско, кружно и комбиновано (Слика 2.2).



Слика 2.2 – Хоризонтална машина за брушење [F. Klocke (2009)]

Поступци брушења се могу поделити у више група, зависно од посматраних критеријума. У зависности од облика површине која се обрађује, разликује се брушење округлих спољашњих и унутрашњих површина (Слика 2.3), равних и сложених површина. На основу положаја резне, брусне површине, према радном комаду брушење може бити ободно, чеono или профилно. Да ли ће брушење бити аксијално или радијално зависи од правца помоћног кретања, гледано према оси брусне плоче.

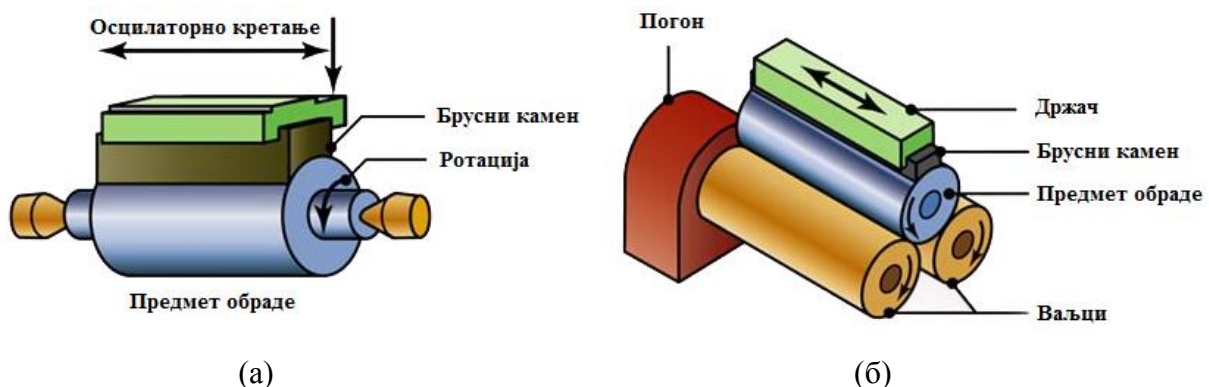


Слика 2.3 – Два типа процеса брушења цилиндричних површина: а) спољашње и б) унутрашње [F. Klocke (2009)]

2.2 Суперфиниш

Суперфиниш је поступак који се још назива и микрофиниш или кратко-потезно хоновање. То је поступак који смањује површинску хрпавост и геометријску тачност радног комада. Обично се изводи након обраде брушењем, при чему се смањује висина неравнина и побољшава профил ношења обрађене површине. Суперфиниш је високо ефикасна метода за површинску обраду цилиндричних површина [R. H. Todd (1994)].

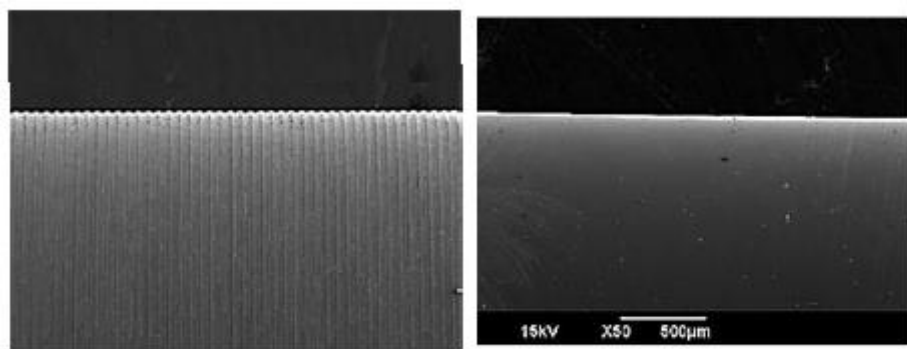
Компанија „Chrysler“ је развила овај поступак обраде непосредно пре Првог светског рата, али је поступак почео шире да се примењује тек 80-их година прошлог века. Главно обртно кретање код ове врсте обраде изводи цилиндрични предмет обраде, док помоћно транслаторно кретање у аксијалном правцу цилиндра изводи брусни камен одређеног облика, структуре и величине зрна (Слика 2.4). Геометрија брусног камена зависи од геометрије површине предмета обраде.



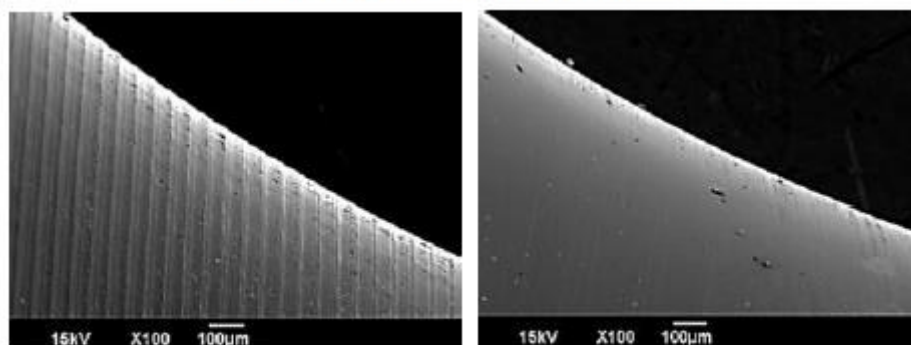
Слика 2.4 – Поступак обраде суперфинишем а) између шилака б) на ваљцима [S. Kalpakjian (2006)]

Алат који се користи за ову врсту обраде не разликује се битније од алата за брушење. Брусни камен обрађује површину радног комада у три фазе. Прва фаза представља остваривање контакта брусног камена и површине предмета обраде. У другој фази се врши самооштрење брусне површине; тупа зрна брусне површине се

ломе стварајући нову, оштру резну геометрију. У трећој фази, абразивна зрна постају тупа, што побољшава геометрију површине радног комада [S. Kalpakjian (2006)]. Квалитет обрађене површине радног комада зависи од величине абразивних зрна, па се најчешће користе врло фина зрна. Ова метода се најчешће примењује за обраду цилиндричних делова једноставне геометрије [К. Miura (2014)]. К. Miura и сарадници (2014) предлажу нову методу примене суперфиниша на цилиндричне закривљене предмете обраде. На слици 2.5 представљен је изглед површине радног комада пре и након суперфиниша.



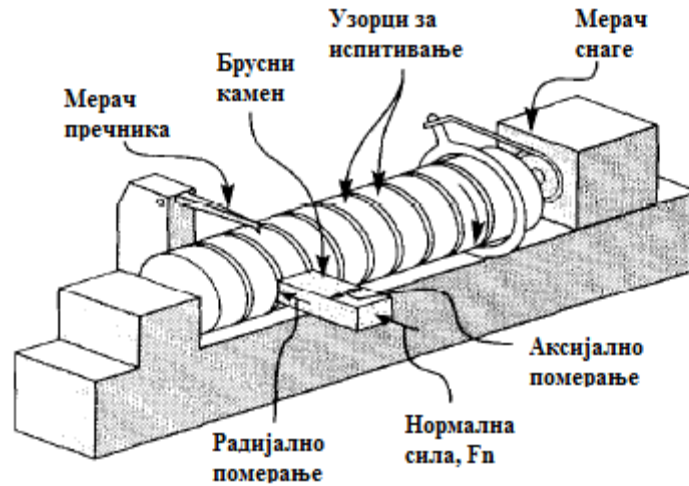
(а) Цилиндрична површина комада



(б) Закривљена површина комада

Слика 2.5 – Изглед површине пре и након обраде суперфинишом [К. Miura (2014)]

Врсте абразива које се употребљавају при овој врсти обраде су (Al_2O_3), (SiC), (CBN), (PCD) и графит, који није абразивни материјал, али се понекад може користити као мешавина са (Al_2O_3), ради побољшања изгледа радног комада. L. Grama и сарадници (2010), развили су вишеструки линеарни регресиони модел и модел неуронских мрежа за предвиђање хрпавости површине и трошења алата. Т. К. Puthanangady & S. Malkin (1995), вршили су експериментално истраживање на основу процеса суперфиниша. Развијен је уређај за испитивање процеса обраде спољашње цилиндричне површине методом суперфиниша, са сензорима за мерење смањења величине тврдог челичног узорка и трошења брусног камена, као и сензором за мерење снаге (Слика 2.6).



Слика 2.6 – Слика испитног уређаја за суперфиниш [Т.К. Puthanangady (1995)]

Својство самооштрења брусног камена омогућује обраду без прекида, што побољшава продуктивност производног процеса.

Суперфиниш се примењује у различитим гранама индустрије за обраду цилиндричних делова, у циљу смањења површинске храпавости. Највећи број обрађених предмета обраде је током процеса експлоатације изложен хабању, па је постизање минималне површинске храпавости од суштинске важности за дужи век обрађеног комада. С. Courbon и сарадници (2016) испитују утицај процеса суперфиниша на квалитет обрађене површине челика SAE 5120, кроз праћење површинских и запреминских својства материјала, односно заосталих напона, микроструктуре површинског слоја и храпавости обрађене површине.

Главне предности суперфиниша односе се на дужи експлоатациони век обрађеног комада, што се пре свега огледа у споријем процесу хабања. Овим начином обраде могуће је постићи и бољу димензиону тачност предмета обраде.

2.3 Хоновање

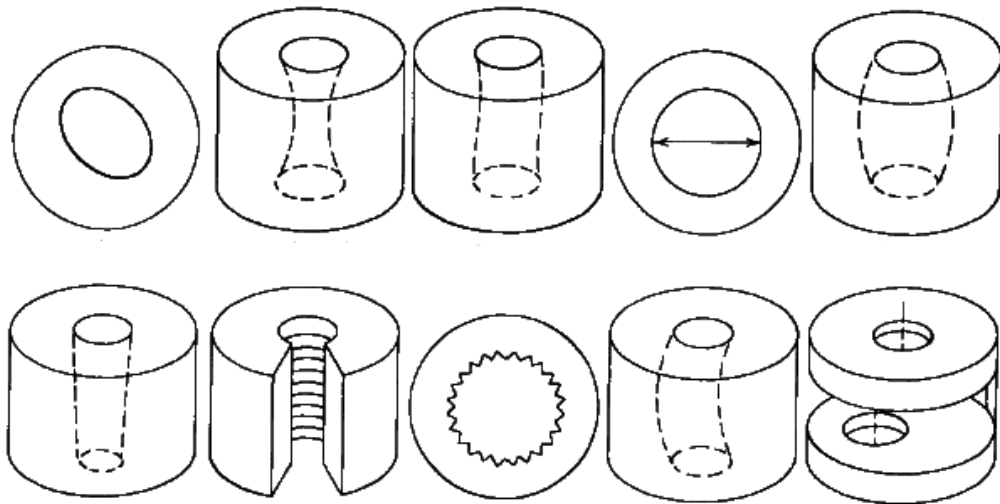
Хоновање се убраја у fine завршне обраде, најчешће унутрашњих цилиндричних површина. Обрада се изводи алатом недефинисане геометрије, који врши ротационо и транслаторно кретање дуж осе цилиндра који мирује. Ова обрада се, за разлику од брушења, изводи малим брзинама резања, што је повољније са аспекта термичких напрезања и остваривања боље димензионе тачности предмета обраде. Алат за хоновање може имати један или више брусних камена, постављених по ободу цилиндричног тела алата (Слика 2.7). Хоновање је први избор алата када је потребно постићи уједначену површинску храпавости и добру димензиону тачност обрађених цилиндричних површина [J. R. Davis (1989)].



Слика 2.7 – Приказ алата за хоновање [S. Kalpakjian (2006)]

Велика површина брусног камена остварује контакт са предметом обраде искључиво по врховима неравнина, што доводи до побољшања трибомеханичких карактеристика обрађене површине. Површинска храпавост обрађене површине (R_a) креће се од $0,8 \mu\text{m}$ до $0,2 \mu\text{m}$, док се процесом завршне обраде микро хоновањем може добити R_a у интервалу од $0,1 \mu\text{m}$ до $0,05 \mu\text{m}$ [E. Uhlmann (2015)]. Површинска храпавост делова обрађених хоновањем је чест предмет истраживања. У раду I. Вуј-Соррал & J. Vivancos-Calvet (2011) су приказани резултати храпавости челичних цилиндара обрађених хоновањем абразивним алатом израђеним од CBN. Различити параметри хоновања, као што су притисак камена на радни комад, брзина транслаторног кретања алата, као и величина зрна абразивног камена, су варирани, да би се одредио њихов утицај на храпавост површине цилиндара. Z. Sharifov & C. Aliyev (2018) разматрају утицај храпавости површине, обрађене различитим технолошким методама, па и хоновањем, на карактеристике отпорности на хабање површинског слоја високо прецизних делова бродских машина и механизма.

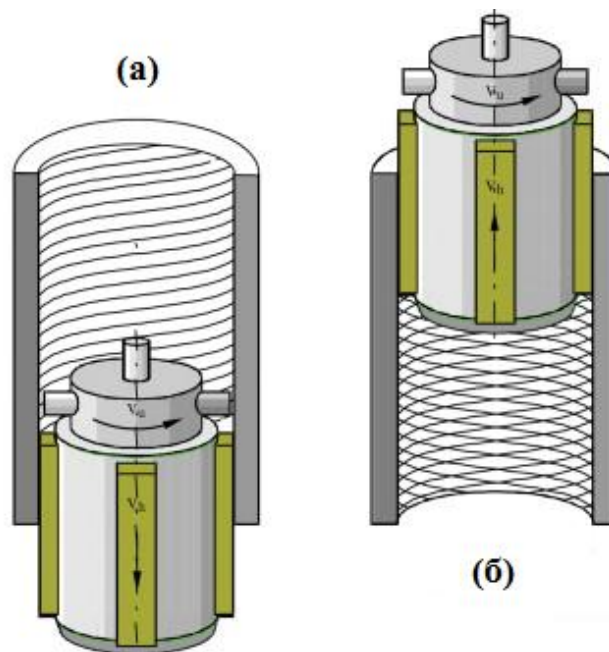
Поред уклањања површинског слоја, хоновање има важну улогу при стварању назначених функционалних карактеристика површина и укључује исправљање грешака претходних операција обраде. Генерисане функционалне карактеристике хоновањем укључују прецизност геометрије предмета обраде (радијалну заобљеност и равност, као и аксијалну равност), димензиону тачност и површинске карактеристике (храпавост, шрафура настала обрадом и целовитост површине). Десет најчешћих грешака узрокованих машинском обрадом, термичком обрадом или стезањем радног комада приказане су на слици 2.8. Хоновањем се могу исправити све грешке у условима скидања најмање могуће количине материјала [J. R. Davis (1989)].



Слика 2.8 – Десет најчешћих грешака које се могу исправити хоновањем [J. R. Davis (1989)]

За неке грешке облика хоновање је једини комерцијални начин обраде којим је могуће постићи захтевану димензиону и тачност облика. Грешка облика се најчешће јавља када је дужина већа од пречника цилиндра. Обраду оваквих предмета обраде није могуће извести брушењем због дужине вретена, које мултиплицира несавршеност ротационог кретања алатне машине, док је леповање скуп поступак. Када је унутрашњи пречник предмета обраде приближно једнак дужини отвора, обраду је могуће извести брушењем или хоновањем. Која ће се метода применити зависи од цене обраде, захтева тржишта и техничке опремљености привредног субјекта [J.R. Davis (1989)].

На основу карактеристичних трагова обраде, на обрађеној површини се може уочити путања алата за хоновање (Слика 2.9). Број обртаја, као и корак алата, могу се регулисати у одређеном интервалу, што зависи од пречника дела који се обрађује [J.R. Davis (1989)].

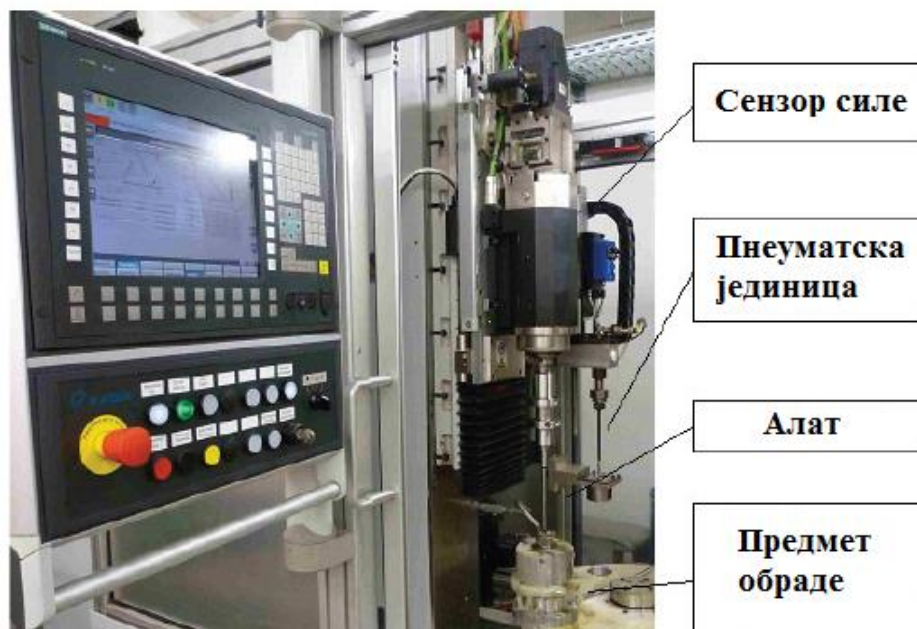


Слика 2.9 – Ротација и транслација алата при хоновању [E. Uhlmann (2015)]

В. Goedel и сарадници (2013) у свом раду говоре о флексибилној технологији хоновања, описујући нови прототип машине. Проучаване су три оригиналне методе изведене флексибилним хоновањем. Путања алата (шрафура која се јавља на површини обратка) комбинује две савремене методе индустријског хоновања: спирално хоновање са 135° у односу на дно цилиндра и конвенционално хоновање са углом од 45° . Ову методу карактерише већа продуктивност процеса обраде.

Алат или глава за хоновање састоји се од тела алата (трупа) и брусног камења или трака са абразивним зрнима, која уклањају материјал са унутрашње површине радног комада. Радни делови алата (брусно камење) се приликом процеса обраде константно налазе у захвату. Контакт радног алата и зидова површине обезбеђује се притиском, који се, у зависности од врсте обраде, може кратати у интервалу 3 bar до 7 bar. Брусно камење има задато сложено кретање, како би се спречило да свако појединачно абразивно зрно понавља исту путању. Критични параметри процеса су: брзина ротације, брзина осцилације, дужина и положај пролаза и притисак алата на зидове предмета обраде [F. Klocke (2009); E. Uhlmann (2015)].

Кретање при коме се скида површински слој радног комада представља један од одлучујућих фактора који утичу на резултате процеса хоновања. Може се реализовати кроз контролу уклањања слоја материјала или, у новијем приступу, преко контроле силе. Помоћу контролисаног уклањања површинског слоја при хоновању, положај брусног камења алата се мења по дефинисаним корацима, у одређеним временским интервалима. Насупрот томе, D. Vähre и сарадници (2012) приказују метод хоновања контролом силе, где се сила индиректно мери помоћу сензора и контролише се притисак камена за хоновање на зид предмета обраде (Слика 2.10). Константна сила треба да оствари боље резултате процеса хоновања, у смислу веће димензионе и тачности облика, као и повољније структуре површине.



Слика 2.10 – Вертикална машина за хоновање која се користи у експериментима [D. Vähre (2012)]

Брусно или абразивно камење (познато и као брусне или абразивне траке) састоји се од честица Al_2O_3 , SiC, као и доста тврђих честица дијаманта или CBN.

Абразивне честице које обезбеђују резање морају бити у стању да издрже потребан притисак за уклањање метала. Везиво мора бити довољно јако да држи абразивне честице заједно, али не сме бити ни превише чврсто, како не би отежавало резање браздањем отвора. Уколико камен не врши добру обраду, треба одабрати мекши камен, а ако се камен пребрзо троши, треба користити тврђи камен. Тврдоћа и тип везива су означене словима у коду назива камена и дати у каталогу произвођача [Н. А. Youssef (2008)].

Постизање жељеног квалитета обрађене површине хоновањем остварује се добрим избором величине зрна абразива.

Лубриканти су такође врло важни, јер смањују температуру приликом обраде, те онемогућују да се одвојене честице залепе за абразиве.

Фундаментално истраживање о механици процеса хоновања је објављено 1993. од стране J. Lee & S. Malkin. Развијен је експериментални уређај за тестирање, који се састоји од машине за хоновање са сензорима за мерење снаге вретена, експанзионог притиска и померања главе за хоновање. Уређај се повезује са рачунаром у циљу прикупљања и анализе података. Приказани експериментални резултати приказују ефекте примењене нормалне силе и величине зрна на снагу, брзину уклањања материјала, специфичну енергију, трошење камена, брзину хоновања и храпавост површине хоновања отвора од ливеног гвожђа са абразивним камењем силицијум карбида.

На основу свега наведеног, уочене су следеће предности хоновања:

- ефикасна обрада уз минимално загревање предмета обраде,
- исправља грешке у форми које су изазване претходним операцијама обраде,
- постиже висок квалитет и прецизност обрађене површине [Н. А. Youssef (2008)].

Нови магнеторхеолошки процес хоновања (енгл. magnetorheological honing process) дизајниран је и развијен за нано завршну обраду цилиндричних унутрашњих површина помоћу перманентних магнета. Радијално кретање магнетне површине алата се прилагођава према унутрашњем пречнику различитих цилиндричних површина и чини га фиксираним пре почетка завршне обраде, тако да може да одржава константан радни зазор док се изводи процес завршне обраде, слика 2.11. Развијена магнетна површина алата чини веће магнетно поље од унутрашње феромагнетне или неферомагнетне цилиндричне обрадне површине. Ово је важан услов за обраду унутрашње површине феромагнетних или неферомагнетних цилиндричних компоненти, јер обезбеђује да MR полирна течност не може да се залепи за површину обратка приликом завршне обраде. MR полирна течност за завршну обраду се састоји од феромагнетног материјала – честица гвожђа 20% величине 18 μm , немагнетног абразива 20% силицијум карбида – честице величине од 19 μm и 60% носеће течности (80% парафинског уља и 20% АПЗ масти). MR полирна течност је паметна течност, чија се реолошка својства мењају са променом интензитета магнетног поља [V. Grover (2017)].



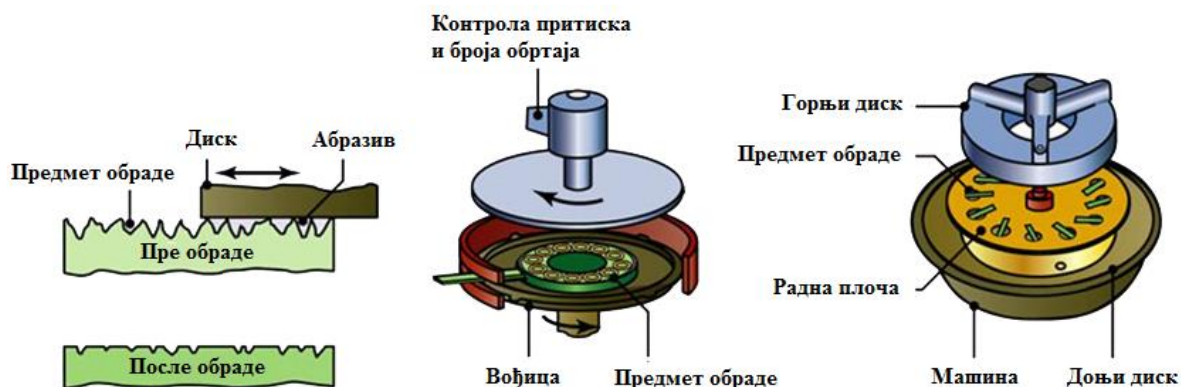
Слика 2.11 – Фотографија развијеног магнеторхеолошког алата за хоновање са задржаним MR флуидом за полирање [V. Grover (2017)]

2.4 Леповање

Леповање се сматра најстаријом методом fine завршне обраде. Леповање је у основи абразивни поступак у којем лабави, слободни абразиви делују као тачке резања, које налазе тренутни ослонац у алату. То је фина завршна обрада, која се врши при малим брзинама. Ова обрада временски не траје дуго, а њоме је могуће постићи:

- изузетну димензиону тачност предмета обраде,
- смањење површинске храпавости обрађене површине,
- повољнији профил ношења обрађене површине,
- уклањање оштећене површине и слојева материјала који деградирају електрична или оптичка својства [F. Klocke (2009)]

Слика 2.12 представља шематски приказ поступка леповања.

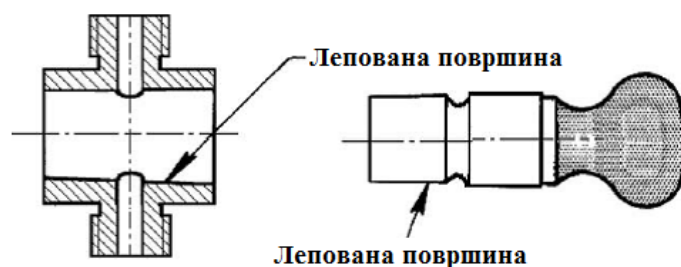


Слика 2.12 – (а) Шематски приказ леповања (б) Леповање равних површина. (ц) Леповање цилиндричних површина [S. Kalpakjian (2006)]

Дебљина одстрањеног материјала при леповању обично се креће у распону од 0,003 mm до 0,03 mm, али у неким случајевима досеже 0,08 mm, па чак и 0,1 mm.

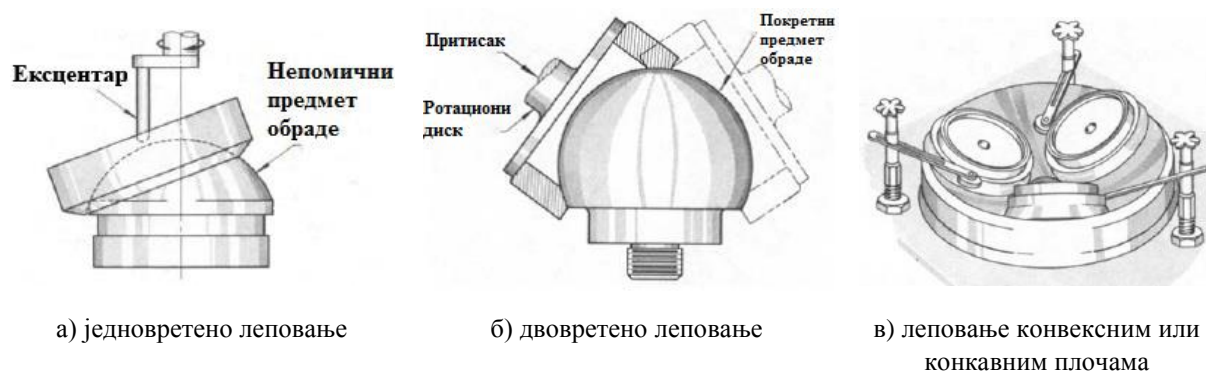
Нормалне толеранције лепованих површина су за пречник или друге димензије: $\pm 0,0006$ mm, равност, заобљеност: $\pm 0,0006$ mm и храпавост површине: $Ra = (0,1-0,4)$ μm [Н.А. Youssef (2008)].

Леповање се може поделити у две категорије: појединачно леповање и леповање одговарајућих комада. Код појединачног леповања абразивни материјал обрађује предмет обраде посебним алатом кружног облика – диском (обично од материјала који је мекши од радног комада). Када се користи слободан абразив, диск се обично прави од меког ливеног гвожђа или меког обојеног метала. Леповање појединачних делова је најефикасније за тврде метале или друге тврде материјале. Код леповања одговарајућих комада две површине радног комада, одвојене само слојем мешаног абразива у медијуму (средство за леповање), трљају једна о другу. Сваки радни комад погони абразив, тако да честице абразива делују на супротну површину. Неправилности које спречавају прецизно налагање две контактне површине на тај начин су елиминисане, а површине се упарују, као на слици 2.13 [J. R. Davis (1989)].



Слика 2.13 – Конусни вентил обрађен леповањем одговарајућих комада [J. R. Davis (1989)]

Величина, количина и потребна прецизност радног комада су главни фактори који одређују избор методе при леповању сферних површина. Код једностраног леповања, конкавне или конвексне плоче су индивидуално обликоване према радном комаду (Слика 2.14а и Слика 14б). Плоче израђене од ливеног гвожђа ситнозрнасте структуре, су погодне за леповање готово било ког метала, ако се процес довољно дуго изводи. Више сферних површина лепују се конкавним или конвексним плочама (Слика 14в). Плоче би требало да буду израђене од ливеног гвожђа и обрађене до потребних радијуса [J. R. Davis (1989)].



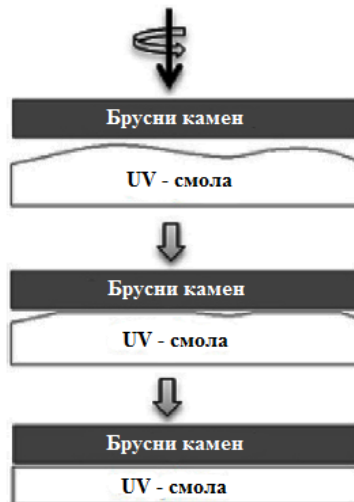
Слика 2.14 – Једнострано и вишестрано леповање сферичних површина [J. R. Davis (1989)]

Абразивна зрна за леповање могу бити различитих величина и састава, што зависи од врсте обраде. Зрна веће гранулације се користе код грубог, а мање гранулације код финог леповања. Најчешће коришћена абразивна зрна су израђена од следећих материјала:

- Al_2O_3 i SiC , величина зрна од 5 μm до 100 μm ,
- Cr_2O_3 , величина зрна од 1 μm до 2 μm ,
- V_4C_3 , величина зрна од 5 μm до 60 μm ,
- дијамант, величина зрна од 0,5 μm до 5 μm [J. R. Davis (1989)].

Обрада изведена овим абразивима је брза и економична [F. Klocke (2009)]. Медијуми за абразив који се користе код леповања су машинско уље, уље уљане репице или маст [J. R. Davis (1989)].

Конвенционална обрада леповањем заснива се на процесу суспензије, а абразивна зрна се слободно крећу у процесу. Највећи проблем код конвенционалног процеса леповања је да се добије равномерна расподела густог медијума између плоче за леповање и радног комада. Током обраде, плоча за леповање постаје углачанија, јер продукти хабања попуњавају удубљења у профилу храпавости плоче за обраду. Као резултат тога, смањује се брзина скидања материјала и продуктивност обраде опада. Стога се појавио нови процес леповања, назван фиксно-абразивно леповање, познато и као фино брушење. Недавно је истражена употреба ултраљубичасте смоле у производњи абразивних алата (Слика 2.15) [Q. Huang (2015)]. На тај начин добијене су плоче за леповање са бољим механичким карактеристикама, које остају непромењене у дужем временском периоду приликом обраде.



Слика 2.15 – Поступак припреме плоче за леповање са UV смолом [Q. Huang (2015)]

Предности поступка леповања су следеће:

- брзина уклањања материјала је ниска у поређењу с другим абразивним процесима, попут брушења, због ниских брзина резања и плитке пенетрације финих абразивних зрна у радну површину;
- леповање не генерише велику количину топлоте. то значи да нема промене структуре материјала изазване загревањем површинског слоја;
- леповањем се могу обрађивати три основна облика површине: равна, цилиндрична и сферична; ретко се може користити за обраду навоја;
- будући да се на радни предмет примењују релативно мале силе, леповање се може користити за ломљиве и крте материјале;
- овим процесом обраде се постиже добра димензиона тачност и тачност облика [T. K. Doi (2012)].

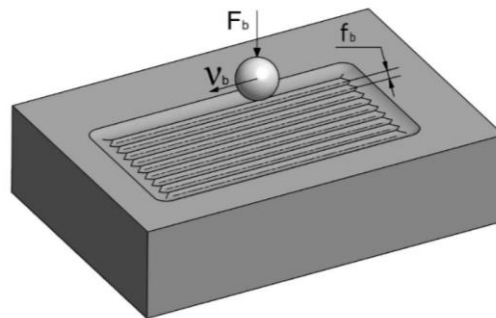
2.5 Обрада површинским деформисањем предмета обраде - „ball burnishing“ поступак обраде

„Ball burnishing“ поступак обраде представља обраду без скидања струготине, што овај поступак чини еколошки прихватљивијим у односу на остале завршне обраде. Поступак обраде се заснива на котрљању куглице одређеног пречника по површини предмета обраде под дејством нормалне силе, која утискује куглицу у материјал предмета обраде. Веома је важно обезбедити несметано котрљање куглице по површини предмета обраде, како би површинска храпавост обрађене површине била минимална. Такође је битно спречити појаву адхезионих спојева током процеса обраде. Три основна параметра које је неопходно контролисати су:

f_b – посмак

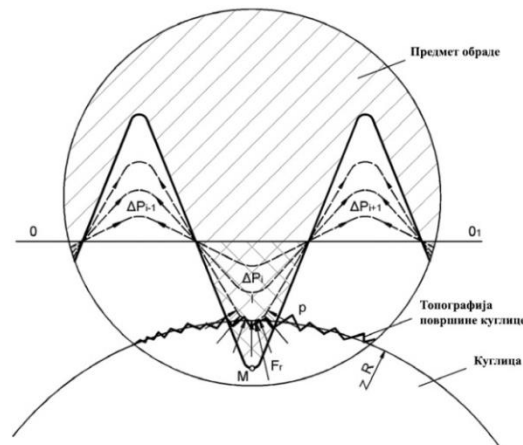
V_b – брзина кретања

F_b – нормална сила [С. Ранђеловић (2016)].



Слика 2.16 – Параметри обраде методом „ball burnishing“ [С. Ранђеловић (2016)]

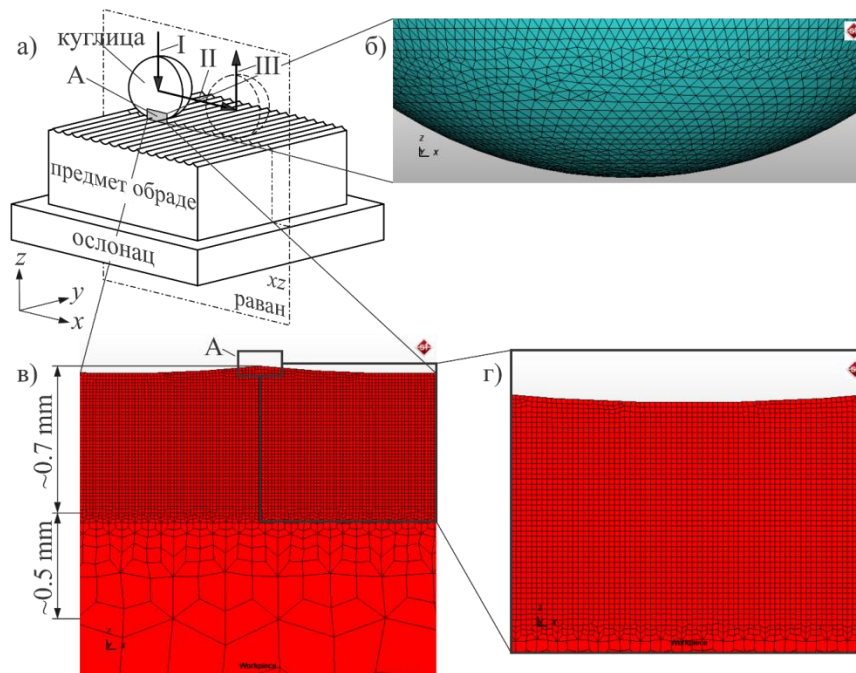
Завршна обрада поступком „ball burnishing“ се изводи силама које морају остварити напон у зони контакта куглице и обрађиване површине, који је већи од напона на граници течења материјала. Због тога се, врло често, као посебан параметар уводи и пречник куглице од кога зависи контактна површина, а самим тим и остварени притисак. С обзиром на то да се контакт куглице и предмета обраде остварује преко врхова неравнина, високи контактни притисци ће узроковати течење материјала који тежи да испуни удубљења у профилу храпавости [DJ. Vukelic (2013)].



Слика 2.17 – Модел течења материјала при обради „ball burnishing“ процесом [DJ. Vukelic (2013)]

Од суштинске је важности одредити оптималну дубину продирања куглице у материјал предмета обраде, тј. одредити до које дубине куглица треба да продре у материјал предмета обраде, како би се добила најмања површинска храпавост обрађене површине [В. Tadić (2016)]. S. Randjelovic (2015) је нумеричким прорачунима и експерименталним истраживањима закључио да је оптимална дубина продирања куглице у материјал предмета обраде у функцији површинске храпавости површине коју треба обрадити. Он је показао да се минимална површинска храпавост постиже при продирању куглице у материјал предмета обраде до средње линије профила храпавости. Тада је запремина испупчења профила храпавости приближно једнака запремини удубљења. Напони већи од напона на граници течења, који се обезбеђују дејством силе на куглицу одговарајућег пречника, условљавају прераспodelу материјала, при чему се испупчења профила храпавости сливају у удубљења и тако постиже минимална површинска храпавост обрађене површине.

У оквиру докторске дисертације С. Ранђеловић (2016) приказан је теоријски модел који дефинише облик и величину неравнина насталих процесом глодања површине пре поступка „ball burnishing“. Овај модел је искоришћен за конструкцију профила храпавости површине, који је коришћен за FEM анализу. Нумеричка анализа процеса обраде извршена је у софтверском пакету Simufact.Forming 11.0. Основни параметри храпавости анализирани површине су: $R_z=35,1 \mu\text{m}$ $R_p=22,763 \mu\text{m}$ $R_a=10,9 \mu\text{m}$. Куглица која се користи у овој анализи је пречника 6 mm и сматра се апсолутно крутом, јер је у стварним условима обраде тврдоћа куглице много већа од тврдоће обрађиваног материјала [С. Ранђеловић (2016)].

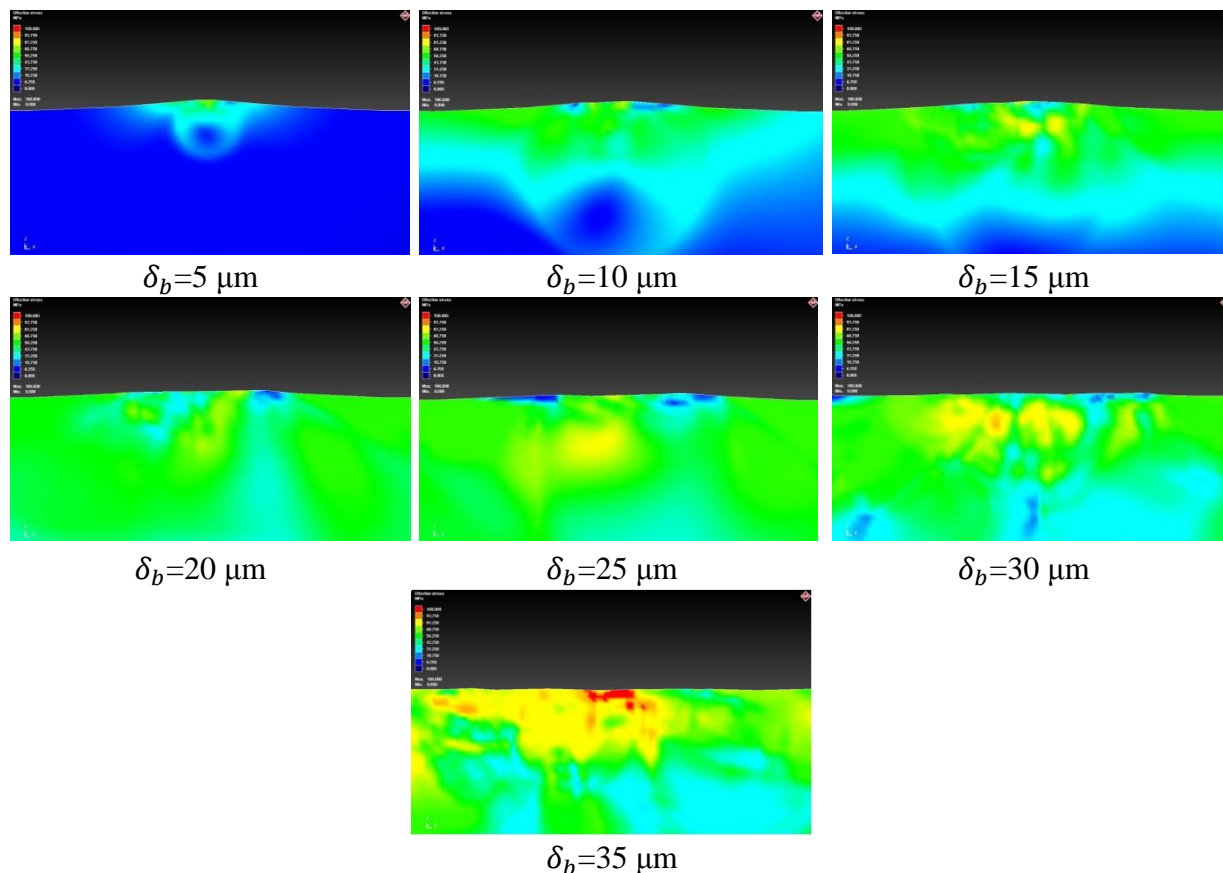


Слика 2.18 – Приказ модела коришћеног за нумеричку анализу

а) 3D приказ модела, б) мрежа на куглици, в,г) мрежа на предмету обраде [С. Ранђеловић (2016)]

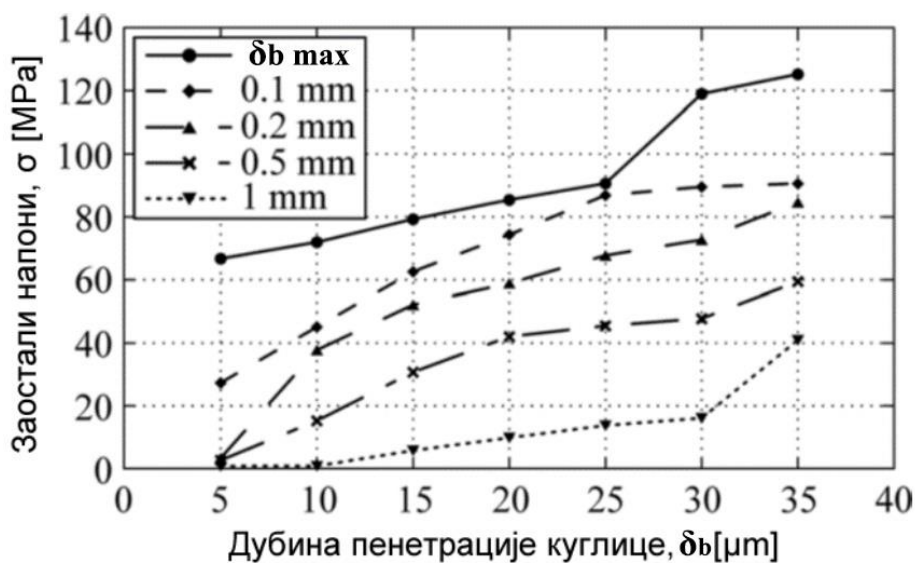
Планом експерименталних истраживања које је спровео С. Ранђеловић (2016) предвиђено је 7 симулација, при чему дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде варира са кораком 5 μm . Експеримент је осмишљен тако да максимална дубина пенетрације куглице буде једнака максималној висини неравнина.

Експериментална истраживања подразумевала су праћење нивоа заосталих напона за сваку дубину продирања куглице у материјал предмета обраде.



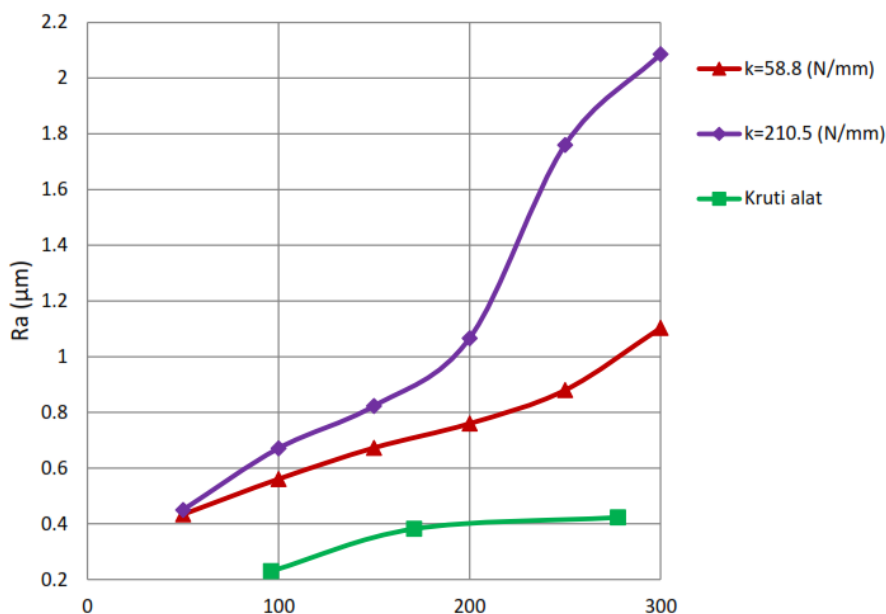
Слика 2.19 – Заостали напони у предмету обраде настали обрадом „ball burnishing“ процесом на различиту дубину продирања куглице у материјал предмета обраде [С. Ранђеловић (2016)]

Анализом слике 2.19 може се закључити да ниво заосталих напона расте са повећањем дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде, што је дијаграмски приказано на слици 2.20 [С. Ранђеловић (2016)].



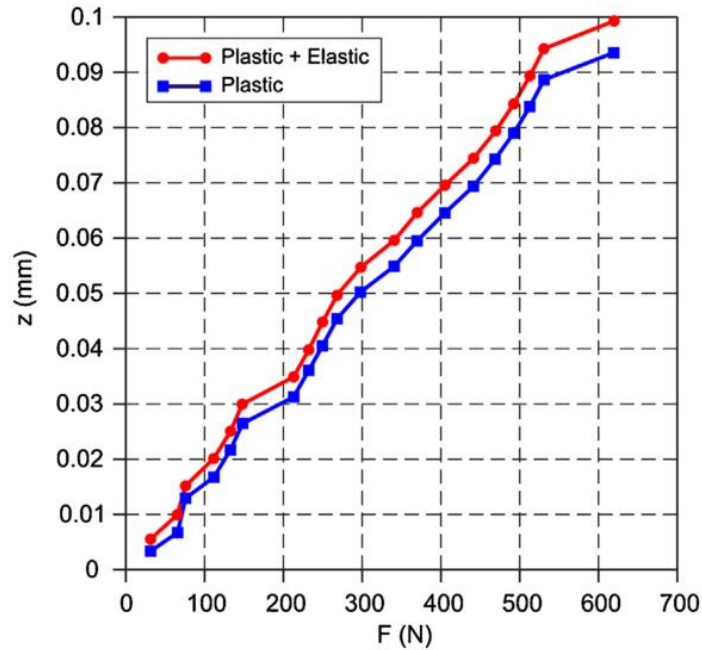
Слика 2.20 – Зависност заосталих напони од дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде [С. Ранђеловић (2016)]

У циљу испитивања утицаја крутости алата на површинску храпавост обрађене површине, у оквиру докторске дисертације С. Ранђеловић (2016) развијено је више алата за завршну обраду „ball burnishing“ процесом. Доказано је да површинска храпавост обрађене површине опада са повећањем крутости алата (Слика 2.21). Минимална површинска храпавост постигнута развијеним алатима за обраду „ball burnishing“ процесом обраде износи $Ra=0,062 \mu\text{m}$.



Слика 2.21 – Зависност површинске храпавости обрађене површине од силе продирања куглице у материјал предмета обраде за различите крутости алата [С. Ранђеловић (2016)]

В. Тадић и сарадници (2016) су истраживали утицај дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде на еластичну релаксацију материјала приликом обраде поступком „ball burnishing“. За процену напонских стања и еластичних релаксација материјала коришћен је софтверски пакет FEMAP. Експеримент је подразумевао продирање куглице у материјал предмета обраде до задате дубине, растерећење и мерење удела еластичних деформација које након растерећења нестају. Изведено је 20 нумеричких експеримената, при чему је варирана дубина пенетрације куглице од 0 mm до 0,1 mm са кораком од 5 μm . Резултати нумеричке анализе приказани су на слици 2.22.



Слика 2.22 – Зависност еластичне релаксације предмета обраде од остварене силе утискивања куглице у материјал предмета обраде [В. Tadić (2016)]

Плава крива описује пластичну деформацију посматраног чвора у зависности од силе утискивања куглице у материјал предмета обраде, док црвена крива дефинише укупну деформацију посматраног чвора. Разлика укупне и пластичне деформације представља еластичну деформацију посматраног чвора. Експериментални резултати показују да удео еластичне деформације расте са порастом силе продирања куглице у материјал предмета обраде. Познавање еластичне релаксације материјала од круцијалне је важности у случају када је неопходно постићи димензиону тачност предмета обраде [В. Tadić (2016)].

Анализом „ball burnishing“ процеса може се закључити да се ова метода може успешно примењивати за завршну обраду, у циљу смањења површинске хрпавости и повећања микротврдоће површинског слоја [М. Vabić (2017)]. Међутим, експериментална истраживања показују да се овом методом не може значајније променити димензија предмета обраде, па се за потребе значајније корекције димензија радног комада препоручује коришћење испитиване методе у комбинацији са неком другом завршном обрадом, која пружа могућност значајније корекције димензије предмета обраде.

3. Теоријска разматрања

Непрестана тежња индустрије за постизањем боље димензионе и геометријске тачности предмета обраде доводи до унапређења постојећих и проналажења нових начина обраде. Принцип обраде метала резањем није се значајније мењао последњих деценија. Сва унапређења процеса производње односила су се на развој нових резних алата и алатних материјала, унапређење стезних прибора, проналажење нових система стезања, као на развој прецизнијих алатних машина [Caixu Yue (2015)]. Обрада метала резањем се комерцијалним методама изводи задатом дужином резања, која се због грешака алатне машине никада не може прецизно остварити. Грешке израде комада на CNC (Computer Numerical Control) машинама се могу поделити у пет група:

- геометријске грешке настале производњом и састављањем делова машине (пре свега делова система кретања),
- грешке узроковане термичким ширењем делова машине, које су последица унутрашњих и спољашњих генератора топлоте,
- грешке деформације изазване силама резања, силама стезања, итд.,
- грешке управљачког система, које се пре свега односе на брзину одзива управљачких компоненти,
- грешке у кретању алата, које су последица несавршености вретеништа машине [R. Ramesh (2000)].

Грешка обраде, која је последица термичких деформација делова машине, може имати удео у износу чак 40% до 70%. Удео ове грешке се повећава са повећањем захтеване димензионе тачности дела [J. Bryan (1990); Yuan Kang (2007); Q. J. Guo (2010); Y. Zhang (2012)].

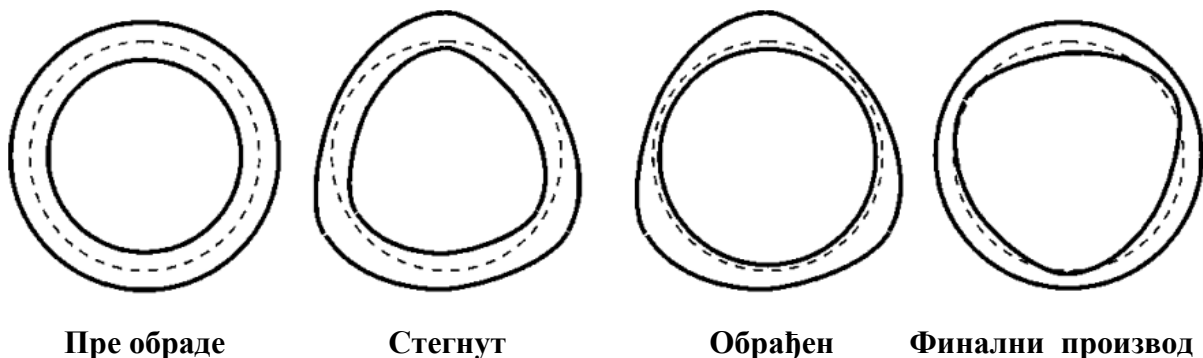
Топлота, која се генерише током процеса производње, последица је трења у систему кретања, процеса резања, претварања електричне енергије у топлотну, варијације температуре околине, зрачења других извора топлоте на алатну машину итд. Због сложености процеса праћења и система преноса топлоте изузетно је тешко успоставити зависност тачности израде комада од температуре конструктивних елемента алатне машине. Научници широм света покушавају применом различитих техника праћења да успоставе ову зависност, како би се компензовале грешке система кретања, које су последица термичког ширења елемената овог система. Компензација грешке кретања алата услед термичких ширења компоненти система кретања у реалном времену се састоји из два корака. Први корак подразумева обимна експериментална истраживања на коришћеној алатној машини, чији је циљ одређивање утицаја различитих извора топлоте на положај осе резног алата у простору. Други корак представља израду управљачког система, који ће на основу измерене температуре у одређеним зонама алатне машине претпоставити настала термичка ширења и приликом позиционирања алата узети у обзир настале промене [Gangwei Cui (2012); Li Yang (2015)].

Процес брушења великих зупчаника на нумеричким машинама генерише велику количину топлоте, која узрокује грешке у остваривању дубине резања. Jiandu Ji и сарадници (2018) су направили модел који методом коначних елемената предвиђа ову

грешку, на основу параметара обраде и карактеристика материјала предмета обраде. ZuDe Zhou и сарадници (2019) су изучавали утицај загревања машине на димензиону тачност предмета обраде. Закључили су да је грешка израде услед термичких ширења делова система кретања машине једна од најутицајнијих грешака које се јављају при обради делова на нумеричким машинама. Предложили су систем компензације ове грешке помоћу модела предвиђања, при чему тачност модела предвиђања грешке услед термичког ширења значајно зависи од избора тачака мерења температуре. У циљу побољшања перформанси модела предвиђања, у овом научном раду је приказана метода одабира кључних тачака мерења температуре.

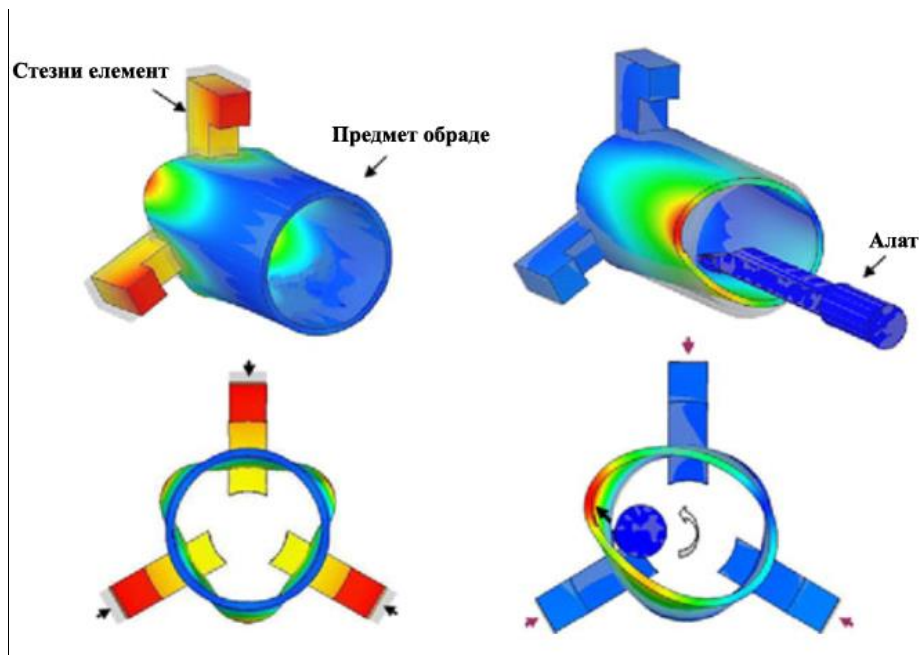
Поред грешке услед термичког ширења елемената система кретања машине, на димензиону и геометријску тачност предмета обраде утиче и еластична деформација предмета обраде која настаје као последица облика стезача, распореда стезача, начина стезања, силе стезања, силе резања итд. Многи истраживачи широм света нумеричким и другим методама одређују облик и величину еластичне деформације танкозидних предмета обраде, у циљу предвиђања грешке која ће се јавити у процесу обраде [M. Estrems (2015); U. Heisel (2010); Jans Sölter (2011)]. Утицај еластичне деформације цилиндричног предмета обраде, која је последица силе стезања, на грешке обрађеног цилиндра могуће је умањити, али не и потпуно елиминисати, системом адаптивне контроле силе стезања, чијим се развојем баве многи истраживачи [U. Župerl (2010); Dirk Stöbener (2013)].

Стезање танкозидних предмета обраде универзалним стезним прибором, као што је стезна глава са три елемента за стезање, која се у пракси најчешће користи, такође изазива еластичну деформацију предмета обраде. Промена облика цилиндричног предмета обраде у свакој фази процеса обраде приказана је на слици 3.1.



Слика 3.1 – Промене облика танкозидног цилиндра током процеса обраде [M. Estrems (2015)]

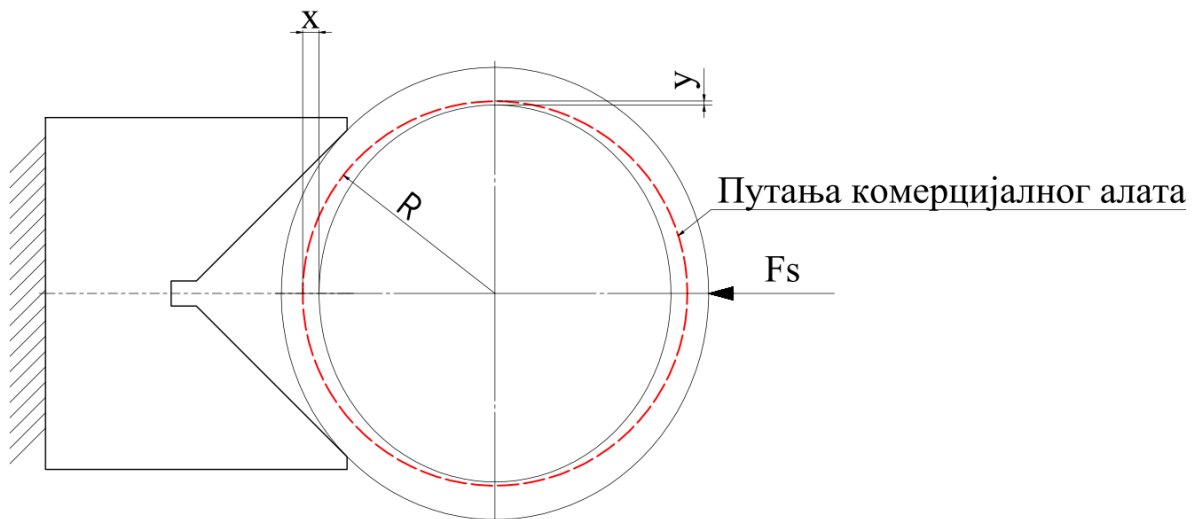
Димензиона тачност предмета обраде зависи и од еластичних деформација које настају као последица силе продирања алата у материјал предмета обраде. Нумеричка анализа насталих деформација танкозидних предмета обраде током процеса обраде резањем показује утицај силе стезања и силе резања на деформацију предмета обраде (Слика 3.2).



Слика 3.2 – Деформације танкозидног цилиндра током процеса обраде [U. Heisel (2010)]

Истраживања које су спровели U. Heisel & C. Kang (2010), недвосмислено указују на грешке облика цилиндричних танкозидних предмета обраде, које настају као последица силе стезања и задате дубине резања.

На слици 3.3 шематски је приказана грешка дубине резања, настала као последица силе стезања цилиндричног предмета обраде у призми.

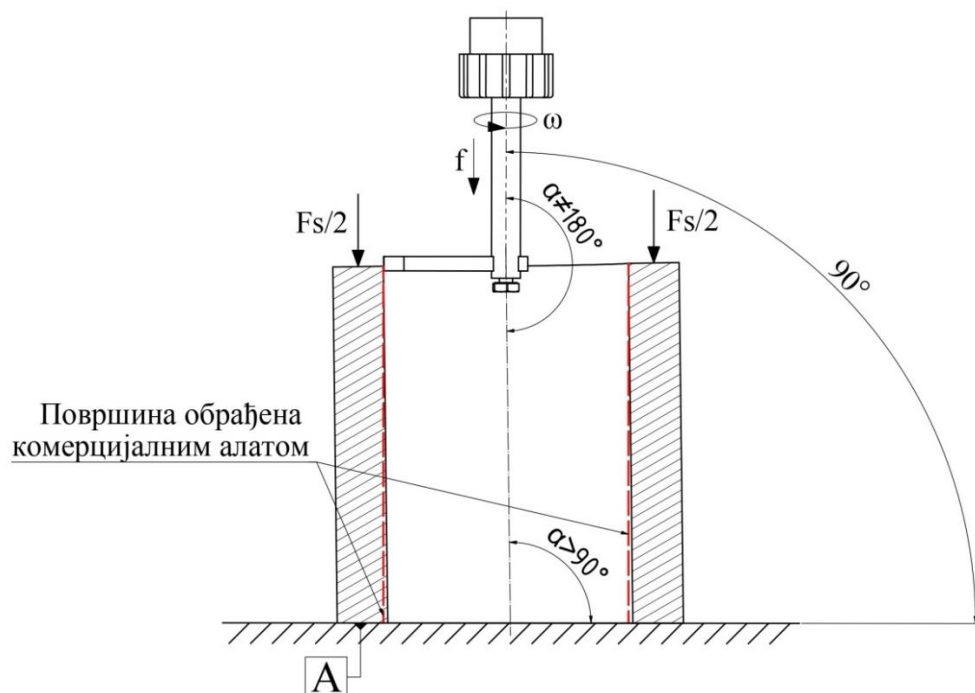


Слика 3.3 – Шематски приказ промене дубине резања услед еластичних деформација предмета обраде

Како се стезање цилиндричних предмета обраде обично врши у призмама одговарајуће величине и угла, сила стезања обезбеђује добро налегања предмета обраде на базне површине приликом процеса обраде. У току процеса обраде интензитет, правац и смер силе резања се мења, па се сила стезања бира тако да се у најнеповољнијим условима динамичког напрезања обезбеди једнозначно дефинисан положај предмета обраде. Задатак силе стезања је уравнотежење сила резања. Реална вредност силе стезања треба да буде знатно већа од прорачунате вредности, због много утицајних фактора који прорачуном силе стезања нису обухваћени (храпавост базних

површина предмета обраде, затупљеност резног алата, режими обраде, прекидно или непрекидно резање, дозвољено одступање силе стезања, итд.) [Тадић Б. (2013)]. Међутим, утицај интензитета силе стезања танкозидних цилиндричних предмета обраде опада са порастом пречника и смањењем дебљине зида предмета обраде. Еластичне деформације које настају овим начином стезања значајно мењају облик танкозидних предмета обраде великог пречника [Monika Marašeková (2012)]. Тако предмет обраде кружног попречног пресека поприма облик елипсе, при чему је велика полуоса елипсе управна на силу стезања. Промена облика попречног пресека предмета обраде узрокује минималну дубину резања у правцу велике полуосе и максималну дубину резања у правцу мале полуосе. Кружна путања комерцијалног резног алата приказана је црвеном испрекиданом линијом на слици 3.3. Разлика у дубини резања доводи до разлике у дебљини зида предмета обраде након процеса обраде. Дебљина зида је најмања у правцу мале полуосе, где је дубина резања била највећа. Након извршене обраде, предмет обраде се растеређује, при чему нестају еластичне деформације. Релаксација материјала мења кружни облик попречног пресека обрађеног унутрашњег цилиндра у елиптични. Приказани пример јасно показује грешке обраде комерцијалним резним алатима, узроковане силом стезања танкозидних цилиндричних предмета обраде.

У циљу потпуног елиминисања грешке облика, која је последица обраде еластично деформисаног танкозидног цилиндричног предмета обраде, предмет обраде се може ослањати по базној површини А, а стезати управно на ту површину (Слика 3.4).

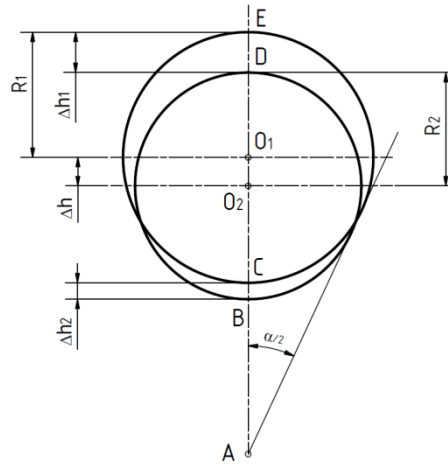


Слика 3.4 – Шематски приказ одступања дубине резања услед грешака базирања

На слици 3.4 приказан је случај обраде унутрашње цилиндричне површине комерцијалним алатом, при чему оса предмета обраде и оса вретеништа машине заклапају угао различит од 180° . Овај угао може бити последица: оштећења базних површина, нечистоће, као и грешака претходне обраде цилиндра одсецањем. Осе тела ексцентричног резног алата и цилиндра предмета обраде секу се само у равни у којој се

врши подешавање алатне машине за обраду одабраним алатом. Обрада резањем се изводи ротациом ексцентричног резног алата угаоном брзином ω и посмаком f . Продирање алата у дубину обрађиваног цилиндра доводи до већег мимоилажења осе алата и осе обрађиваног цилиндра, што наводи на закључак да се са повећањем дужине цилиндра грешка облика повећава. Површина обрађена комерцијалним алатом у описаном случају приказана је испрекиданом црвеном линијом на слици 3.4.

Дозвољено одступање величине спољашњег пречника цилиндричног предмета обраде, које се базира у призми, може довести до грешке базирања услед пропадања или издизања предмета обраде из призме (Слика 3.5).



Слика 3.5 – Грешка базирања услед одступања пречника цилиндричног предмета обраде [Тадић Б. (2013)]

Укупно дозвољено одступање пречника износи:

$$\delta_D = D_1 - D_2 \tag{3.1}$$

[Тадић Б. (2013)]

При чему је:

D_1 – максимални дозвољени пречник цилиндра и

D_2 – минимални дозвољени пречник цилиндра.

На основу геометрије приказане на слици 3.5 може се написати израз:

$$\Delta h_1 = AE - AD; \quad AE = AO_1 + O_1E; \quad AD = AO_2 + O_2D \tag{3.2}$$

[Тадић Б. (2013)]

$$\Delta h_1 = \frac{R_1}{\sin \alpha/2} + R_1 - \left(\frac{R_2}{\sin \alpha/2} + R_2 \right) = (R_1 - R_2) \cdot \left(\frac{1 + \sin \alpha/2}{\sin \alpha/2} \right) = \left(\frac{D_1 - D_2}{2} \right) \cdot \left(\frac{1 + \sin \alpha/2}{\sin \alpha/2} \right), \tag{3.3}$$

[Тадић Б. (2013)]

$$\Delta h_1 = \delta_D \cdot \left(\frac{1 + \sin \alpha/2}{2 \sin \alpha/2} \right). \tag{3.4}$$

[Тадић Б. (2013)]

$$\Delta h = AO_1 - AO_2 = \frac{R_1}{\sin \alpha/2} - \frac{R_2}{\sin \alpha/2} = \frac{R_1 - R_2}{\sin \alpha/2} = \frac{D_1 - D_2}{2 \cdot \sin \alpha/2}, \quad (3.5)$$

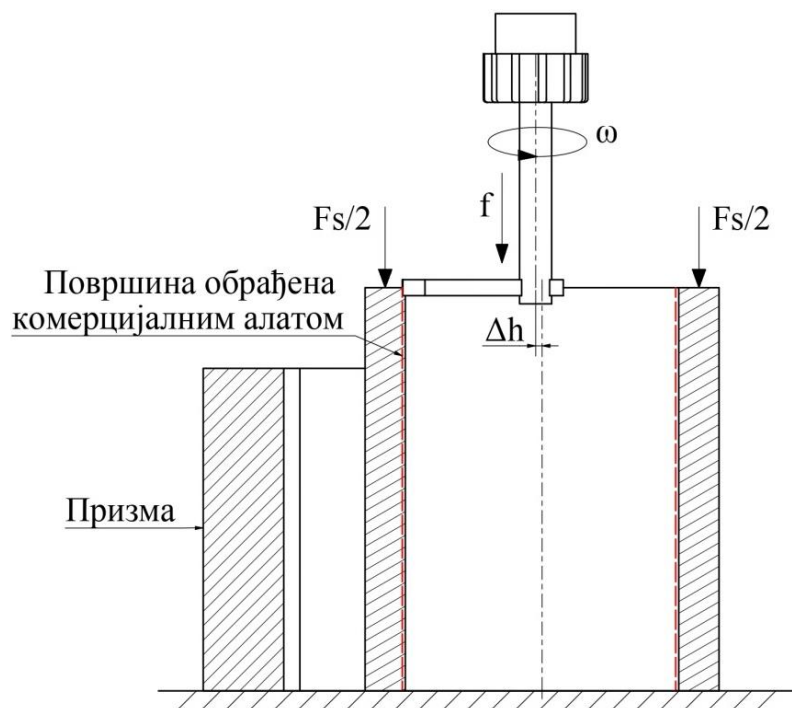
[Тадић Б. (2013)]

На крају, укупна грешка пропадања цилиндра у призму услед дозвољеног одступања пречника се рачуна по обрасцу:

$$\Delta h = \frac{\delta_D}{2 \cdot \sin \alpha/2}. \quad (3.6)$$

[Тадић Б. (2013)]

Ова промена пречника доводи до мимоилажења осе цилиндра и осе вретена машине за вредност „ Δh “ што је шематски приказано на Сlici 3.6. Несаосност предмета обраде и вретеништа алатне машине доводи до разлике у дубини резања по обиму цилиндра. Несаосност већа од задате дубине резања условљава прекидно резање, тј. обраду дела цилиндричне површине.

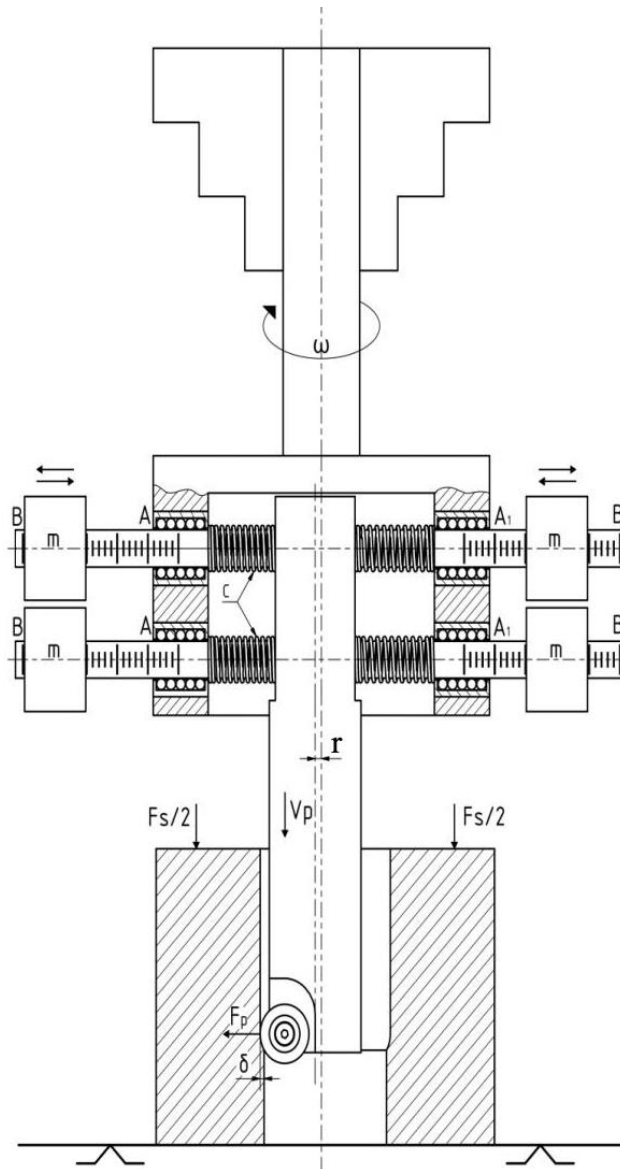


Слика 3.6 – Шематски приказ обраде унутрашње цилиндричне површине резањем при мимоилажењу осе вретеништа машине и предмета обраде

Црвеном испрекиданом линијом приказана је површина коју описује резни алат. Будући да је мимоилажење осе вретеништа машине и предмета обраде веће од жељене дубине резања, део цилиндричне површине није обрађен (Слика 3.6, десна испрекидана црвена линија), док је део обрађен дубином већом од жељене (Слика 3.6, лева испрекидана црвена линија).

Грешке облика и димензије предмета обраде, настале обрадом цилиндричних предмета у приказаним случајевима, уобичајене су и врло честе при обради комерцијалним методама. Унапређење поступка обраде може умањити, али не и потпуно елиминисати ове грешке. У циљу потпуног елиминисања описаних грешака потребно је развити нови алат, који не задаје дубину резања коју је немогуће прецизно остварити због описаних проблема, већ прецизно остварује и контролише силу продирања алата у материјал предмета обраде. Фундаменталне промене су настале као

последица несавршености комерцијалних метода и немогућности постизања димензионе и геометријске тачности. На слици 3.7 дат је шематски приказ обраде унутрашње цилиндричне површине резањем константном силом.



Слика 3.7 – Шематски приказ обраде унутрашње цилиндричне површине резањем константном силом

Обрада комерцијалним алатима подразумева обраду константном дужином резања.

$$\delta_s = const \quad (3.7)$$

Због несавршености система кретања алатне машине, задата и остварена дужина резања се разликују. Ова разлика узрокује грешку дужине која износи:

$$\varepsilon = \delta_z - \delta_s \quad (3.8)$$

При чему је:

δ_z – Задата дужина резања и

δ_s – Стварна дужина резања.

Алатне машине новије генерације имају могућност задавања померања за вредност 0,001 mm. Међутим, задато и остварено померање се разликују пре свега због грешака у систему кретања које се експлоатационом машине, тј. хабањем елемената система кретања повећавају. Зато се предлаже метода обраде, при чему се уместо дубине резања задаје сила продирања алата у материјал предмета обраде.

$$F_p = const \quad (3.9)$$

Предложени теоријски модел анализира обраду унутрашњих цилиндричних отвора инерцијалном силом, која се јавља као последица ротације слободног резног алата одређене масе. У вретениште машине се причвршћује резни алат, чија слободна маса m , ексцентрицитет e и угаона брзина вретеништа машине ω изазивају инерцијалну силу, која резни алат доводи у контакт са унутрашњом цилиндричном површином која се обрађује.

Отпор продирања алата у материјал предмета обраде зависи од:

- дубине резања δ ,
- брзине резања V ,
- корака S ,
- угла резног алата U_a ,
- материјала предмета обраде M_p ,
- стања резног алата S_a итд.

$$F_p = f(\delta, V, S, U_a, M_p, S_a, \dots) \quad (3.10)$$

Отпор продирања се може написати као зависност дубине резања и корака:

$$F_p \approx c \cdot \delta^x \cdot s^y \quad (3.11)$$

при чему вредности x и y зависе од параметара обраде.

Ако се корак резања не мења, сила продирања ће зависити само од дубине резања, па се израз може написати у облику:

$$c_1 = c \cdot s^y = const,$$

$$F_p \approx c_1 \cdot \delta^x, \quad (3.12)$$

$$\delta = \left[\frac{F_p}{c_1} \right]^{\frac{1}{x}}.$$

Из наведеног се закључује да дубина продирања алата у материјал предмета обраде (дубина резања) директно зависи од силе продирања алата у материјал предмета обраде. Наведени теоријски модел (Слика 3.7) разматра могућност коришћења инерцијалне силе и циљу продирања алата у материјал предмета обраде.

$$F_p = k \cdot F_{in}$$

$$F_p = k \cdot m \cdot r \cdot \omega^2$$

$$\delta = \left[\frac{r \cdot m \cdot \omega^2}{C_1} \right]^{\frac{1}{x}} \quad (3.13)$$

Наведени израз показује могућност изузетно fine регулације дубине резања, што је могуће постићи променом једне од три утицајне величине. Ако једна од три утицајне величине тежи нултој вредности, дубина резања ће такође тежити нултој вредности. То практично значи да је услов за остваривање дубине резања да све утицајне величине имају вредност већу од нуле.

$$\begin{aligned} \lim \delta &= 0 \\ m &\rightarrow 0 \\ r &\rightarrow 0 \\ \omega &\rightarrow 0 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Изведени изрази потврђују хипотезу 1 по којој се инерцијалном силом може управљати од нулте па до веома великих вредности сила варирањем три параметра: ексцентричне масе, ексцентрицитета и угаоне брзине.

Изведено теоријско разматрање описује решење проблема комерцијалних алата, који се пре свега односи на немогућност остварења димензионе и тачности облика као последице:

- несавршености система кретања алатне машине,
- еластичне деформације предмета обраде силом стезања,
- еластичне деформације предмета обраде силом резања,
- грешака услед термичког ширења делова алатне машине,
- грешака базирања, стезања, бацања вретеништа машине итд.

Предложен начин обраде елиминише све наведене грешке, које се неминовно јављају при обради комерцијалним алатима.

4. Развој уређаја и анализа процеса резања константном СИЛОМ

Веома честа потреба за машинском обрадом високе димензионе тачности иницирала је експеримент, чији је циљ верификација генерисане идеје о машинској обради резањем без задате дубине резања. Конвенционалне методе које се примењују у индустрији засноване су на обради са задатом дужином резања, која дефинише обрађени пречник дела, ако је реч о цилиндричном предмету обраде. Испитивана метода заснива се на резању константном силом, при чему су силе резања мале, а дубине продирања алата у материјал предмета обраде свега неколико микрометара, па и мање. Комерцијалним машинама није могуће остварити тако мале дубине продирања алата у материјал предмета обраде, јер настала димензиона грешка предмета обраде зависи од: термичког ширења елемената система кретања алатне машине, еластичне деформације резног алата, несавршености обртног кретања вретеништа алатне машине, промене геометрије резног алата, похабаности елемената система кретања алатне машине и многих других фактора. У циљу елиминисања наведених грешака, испитивана метода се заснива на константној сили продирања алата у материјал предмета обраде, при чему се сила задаје на основу жељеног пречника предмета обраде, тј. у зависности од жељене дубине резања.

4.1 План и циљ експерименталних испитивања

Циљ експерименталних истраживања је одређивање дубине регулације пречника узорка обрађених резањем константном силом, као и одређивање појединачних утицаја брзине резања, времена обраде и силе продирања алата у материјал предмета обраде на количину одстрањеног материјала тј. дужину резања. Такође експеримент треба да покаже утицај ове методе на кружност и храпавост површине, као и при којим параметрима обраде се добија најбоља обрада у погледу кружности и храпавости површине. Поред тога, треба упоредити позитивне ефекте испитиване методе при истим условима обраде на различитим врстама материјала, који су претходно припремљени на исти начин. Експериментална испитивања изведена су на челику С45 и легури алуминијума AlCu5PbBi.

Експеримент на материјалу С45 је осмишљен као пун експеримент, при чему се обрада врши на девет узорка, док се на легури алуминијума AlCu5PbBi обрада врши на три узорка. Обрада сваког узорка се врши у три поља са истом угаоном брзином и нормалним оптерећењем, али различитим временом обраде.

Како би се спречило оштећење површина, а самим тим и нарушавање почетних експерименталних услова, направљен је сталак за узорке који спречава међисобни контакт два суседна узорка. Сви узорци су обележени и за сваки траг на узорку резервисана је посуда за сакупљање струготине након извршене обраде (Слика 4.1).



Слика 4.1 – Необрађени узорци са посудама за сакупљање струготине

Детаљан план експерименталних испитивања на материјалу С45 приказан је табелом 4.1.

Табела 4.1 – План експерименталних испитивања на материјалу С45

Брзина резања	Промена пречника [mm]								
	v_1 [m/s]			v_2 [m/s]			v_3 [m/s]		
Нормала сила	F_1 [N]	F_2 [N]	F_3 [N]	F_1 [N]	F_2 [N]	F_3 [N]	F_1 [N]	F_2 [N]	F_3 [N]
Број узорка	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_1 [s]	Траг 1	Траг 1	Траг 1	Траг 1	Траг 1	Траг 1	Траг 1	Траг 1	Траг 1
t_2 [s]	Траг 2	Траг 2	Траг 2	Траг 2	Траг 2	Траг 2	Траг 2	Траг 2	Траг 2
t_3 [s]	Траг 3	Траг 3	Траг 3	Траг 3	Траг 3	Траг 3	Траг 3	Траг 3	Траг 3

Као што се види из плана, експеримент је замишљен тако да се прати промена пречника предмета обраде при различитим условима обраде.

Сваки узорак (предмет обраде) након испитивања има три трага (зоне обраде), који су добијени при истом нормалном оптерећењу и истој брзини резања, али при различитим временима обраде. Експеримент је замишљен као пун експеримент, при чему се обрађује девет узорака са три различите брзине резања, са три времена обраде и при три различите нормалне силе.

Након обраде константном силом вршено је сакупљање струготине и мерење промене пречника узорака у зонама обраде на координатној мерној машини.

Пре обраде узорака било је неопходно одредити оптималне параметре при којима треба извршити обраду. У ту сврху коришћен је пробни узорак, на коме су дефинисани нормална сила, брзина резања и време обраде, који доводе до микро резања, услед чега се пречник мења не више од пар стотих делова милиметра. Варирањем поменутих параметара у обради овог узорка закључено је да вредности нормалних сила треба да износе $F_1 = 5$ N, $F_2 = 10$ N и $F_3 = 15$ N, број обртаја вретена машине: $n_1 = 150$ o/min, $n_2 = 200$ o/min и $n_3 = 250$ o/min и да времена обраде треба да износе: $t_1 = 60$ s, $t_2 = 90$ s и $t_3 = 120$ s.

Прорачун брзине резања на основу познатог броја обртаја рачуна се помоћу израза 5.1.

$$v = \frac{d \cdot \pi \cdot n}{1000 \cdot 60} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (5.1)$$

При чему је:

$d [mm]$ – пречник предмета обраде,

$n [\frac{o}{min}]$ – број обртаја вретеништа машине.

Из израза 5.1 следи да брзине резања којима је вршена обрада износе:

$$v_1 = 0,27 \frac{m}{s}$$

$$v_2 = 0,36 \frac{m}{s}$$

$$v_3 = 0,45 \frac{m}{s}$$

Након одређивања оптималних параметара обраде започета је обрада узорака одабраним параметрима. Узорци су направљени од челика ознаке Č1530 (JUS), односно С45 (EN 10027-1), добијеног ваљањем. Припрема узорака извршена је стругањем и брушењем обе цилиндричне површине, како би се добила што мања хрпаваост и смањио ексцентрицитет. У циљу поређења позитивних ефеката обраде резањем константном силом на различитим материјалима, неопходно је обраду при истим параметрима извести и на легури алуминијума AlCu5PbBi. Овај експеримент је изведен по следећем плану:

Табела 4.2 – План експерименталних испитивања на материјалу AlCu5PbBi

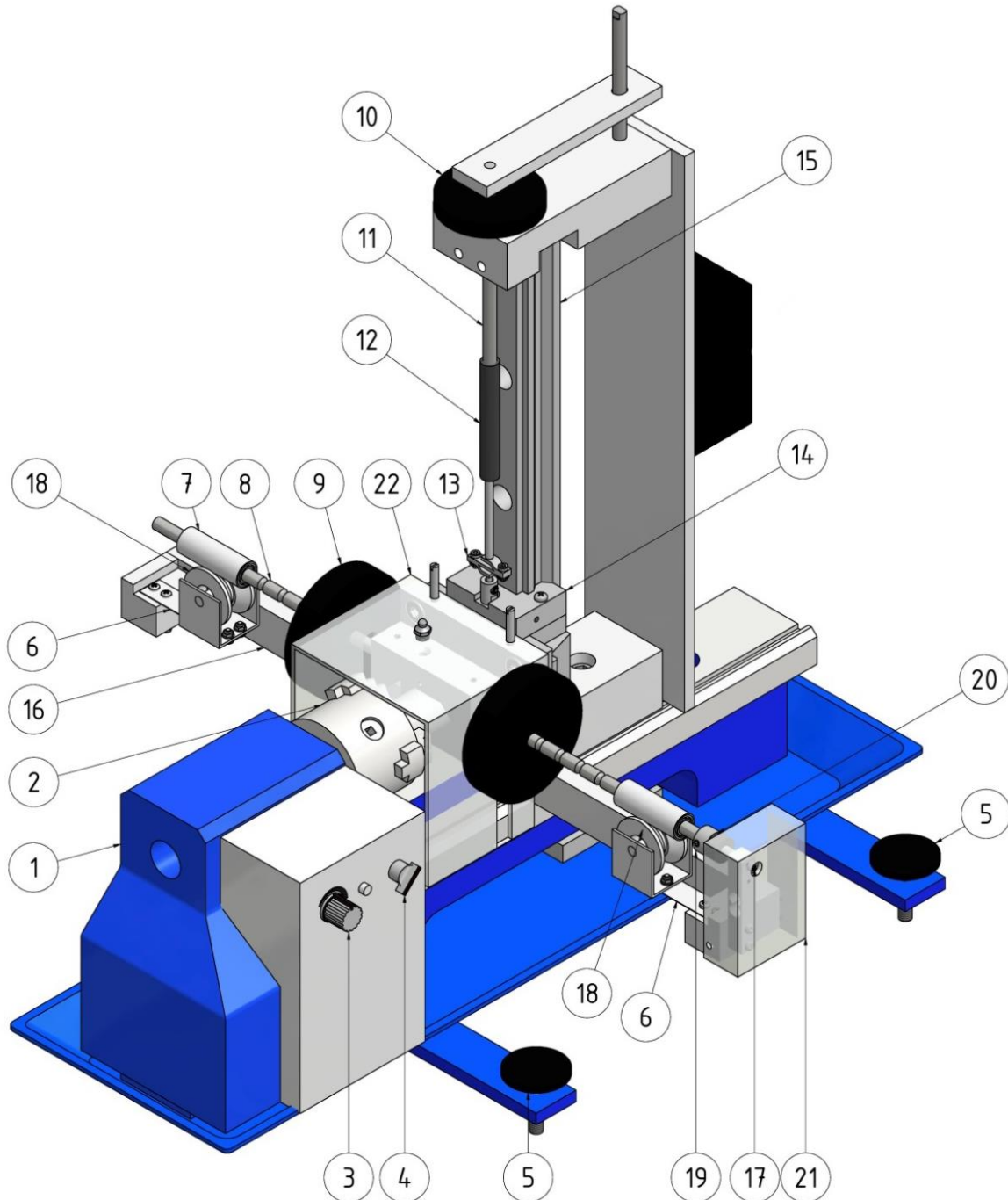
	Промена пречника [mm]		
Брзина резања	$v_1 [m/s]$		
Нормална сила	$F_1 [N]$	$F_2 [N]$	$F_3 [N]$
Број узорака	1	2	3
$t_1 [s]$	Траг 1	Траг 1	Траг 1
$t_2 [s]$	Траг 2	Траг 2	Траг 2
$t_3 [s]$	Траг 3	Траг 3	Траг 3

Као што се може видети из плана експерименталних испитивања приказаног табелом 4.2, експеримент изведен на легури алуминијума AlCu5PbBi није пун експеримент, јер његов циљ није да покаже утицај брзине резања на количину одстрањеног материјала, већ служи за релативно поређење ефеката испитиване методе на два различита материјала, при чему су обраде изведене при истим параметрима. Обрада је изведена на три узорка легуре алуминијума, који су припремљени на исти начин као челични узорци, стругањем и брушењем.

Поређењем експерименталних резултата при истим условима обраде два различита материјала може се закључити на ком материјалу коришћена метода даје боље ефекте у погледу кружности обрађене површине, површинске хрпаваости, као и дубине регулације промене пречника.

4.2 Мерна инструментација

Експериментална испитивања изведена су на специјално развијеном уређају за испитивање резања константном силом, приказаном на слици 4.2.



Слика 4.2 – Развијени уређај за експериментално испитивање резања константном силом

Елементи уређаја за експериментално испитивање резања константном силом су:

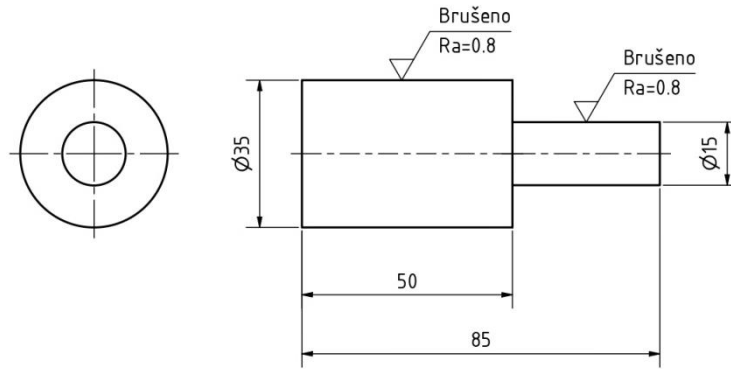
- | | |
|----------------------|---------------------------------------|
| 1) Универзални струг | 12) Еластична спојница |
| 2) Стезна глава | 13) Динамометар |
| 3) Потенциометар | 14) Колица |
| 4) Прекидач | 15) Клизна стаза |
| 5) Ослони завртањ | 16) Носећа конструкција носача алата |
| 6) Изменљива опруга | 17) Динамометар за мерење силе резања |
| 7) Котрљајна цев | 18) Кружна призма |
| 8) Носач алата | 19) Носач амортизера |
| 9) Тег | 20) Амортизер |
| 10) Завртањ | 21) Заштита бочног динамометра |
| 11) Навојно вретено | 22) Провидна заштита |

За основу уређаја искоришћен је универзални струг (Позиција 1) чије су карактеристике дате у табели 4.3.

Табела 4.3 – Карактеристике универзалног струга

Модел	CJ0618/A/BX200/X300/X350
Максимални пречник обраде \varnothing	180 mm
Пречник стезне главе	80 mm
Отвор вретена	20 mm
Брзина вретена	50 o/min до 2500 o/min
Снага мотора	550 W
Напон/фреквенција	220 V – 240 V (50 Hz)
Маса	38 kg
Димензије	760 mm x 305 mm x 315 mm

Као што се види из табеле 4.3, струг има могућност подешавања брзине резања променом броја обртаја стезне главе (Позиција 2) преко потенциометра (Позиција 3), као и промену смера окретања преко прекидача (Позиција 4). С обзиром на то да се брзина окретања стезне главе може подесити у интервалу од 50 o/min до 2500 o/min, време обраде и дубина обраде се могу веома ефикасно регулисати променом броја обртаја. Предмет обраде, који се позиционира и стеже у стезној глави преко цилиндра пречника 15 mm и дужине 35 mm, је кружног попречног пресека (Слика 4.3). Пречник цилиндра који се обрађује је 35 mm, при чему су обе цилиндричне површине пре експеримента брушене, како би се смањила њихова ексцентричност као и површинска хрпавост. Брушење је изведено између шилака.

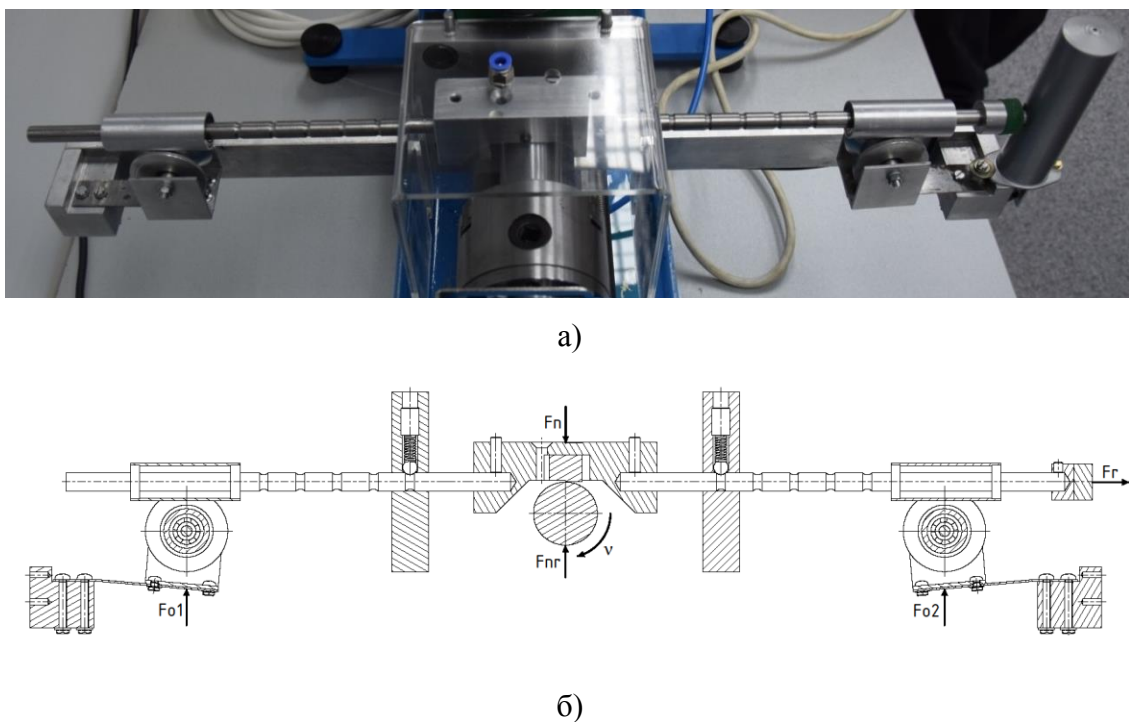


Слика 4.3 – Димензије предмета обраде

Након базирања и стегања предмета обраде, потребно је нивелисати уређај помоћу ослоних подесивих завртњева (Позиција 5). Веома је важно правилно одабрати нормално оптерећење, као и крутост опруга (Позиција 6) преко којих се ослања носач алата, заједно са системом који омогућава правилно налегање резне ивице целом дужином на предмет обраде. Правилно налегање резне ивице на површину предмета обраде остварено је преко једног степена слободе кретања и то ротације око осе носача алата. Окретање резног алата око осе носача алата омогућују цеви са по два котрљајна радијална лежаја (Позиција 7). Захваљујући овом систему, резна ивица алата ће увек бити целом својом дужином у контакту са предметом обраде. Нормално оптерећење остварује се додавањем тегова (Позиција 9) на носач алата (Позиција 8). Маса носача алата заједно са масом додатих тегова дефинише максималну нормалну силу (силу продирања алата у материјал предмета обраде) која се у том тренутку може остварити. Фино подешавање нормалне силе врши се правилним одабиром крутости опруга (Позиција 6), преко којих се ослања носач алата са теговима. У случају када је потребно остварити нормално оптерећење мање од максималног, потребно је одузети нормалну силу напрезањем опруга (Позиција 6). Наиме, приликом припреме уређаја за испитивање неопходно је преко завртња (Позиција 10) и навојног вретена (Позиција 11), које је преко еластичне спојнице (Позиција 12) спојено са динамометром (Позиција 13), подићи колица (Позиција 14) која клизају по клизној стази (Позиција 15). За колица је крутом везом везана носећа конструкција носача алата (Позиција 16). Подизањем колица постиже се смањење силе продирања алата у материјал предмета обраде, јер опруге преузимају део нормалне силе. Када опруге преузму цео износ нормалне силе, то је тренутак када резна ивица више није у контакту са предметом обраде. Тај положај се може сматрати референтним и неопходно је ресетовати мерни систем, како би нормална сила тада била једнака нули. Мерни систем се састоји од динамометра за мерење нормалне силе, динамометра за мерење силе резања (Позиција 17), рачунарске јединице која прикупља измерене вредности и прослеђује их централном рачунару у коме се подаци приказују и складиште. Пре почетка експеримента потребно је извршити повезивање централног рачунара са рачунарском јединицом уређаја. Преко СОМ Port-а и апликације Telemetry Viwer остварује се конекција између централног рачунара и рачунарске јединице уређаја, чиме је систем за аквизицију података спреман за рад. Вредности нормалне силе и силе резања дијаграмски се приказују на централном рачунару у реалном времену. Након повезивања система за аквизицију података, неопходно је ресетовати мерни систем и кренути са постепеним одвртањем завртња (Позиција 10). Тада се носећа конструкција

резног алата спушта, а резни алат приближава предмету обраде. У тренутку када алат оствари контакт са предметом обраде уочава се пораст нормалне силе чија се вредност читава на централном рачунару. Вредност силе продирања алата у материјал предмета обраде регулише се завртњем, тј. положајем носача алата у односу на носећу конструкцију носача алата, односно напрезањем опруга. У тренутку остваривања контакта резне ивице алата и предмета обраде, јавиће се и сила резања, која ће условити аксијално померање носача алата ротацијом носећих кружних призми (Позиција 18). Аксијално померање има мали пређени пут, који се завршава ударом носача алата у динамометар за мерење силе резања (Позиција 17). Будући да сила резања има динамички карактер, у циљу смањења удара и пригушења осцилација силе испред динамометра је преко носача (Позиција 19) постављен гумени амортизер (Позиција 20), који представља механички филтер сигнала силе резања. Како би се избегла случајна оштећења динамометра, за мерење силе резања постављена је заштита (Позиција 21). Контакт динамометра и гуменог амортизера остварује се по малој површини, преко челичне куглице, како би се избегла грешка мерења услед промене крака силе на динамометру. У циљу повећања нивоа безбедности оператера, преко обртне масе налази се провидна заштита (Позиција 22).

На слици 4.4 дат је детаљан приказ носача алата са алатом у захвату са назначеним силама у процесу обраде.



Слика 4.4 – Фотографски приказ носача алата (а), шематски приказ носача алата са системом за регулацију силе (б)

Укупна расположива нормална сила која може деловати преко резне ивице алата на предмет обраде једнака је:

$$F_n = (m_t + m_n) \cdot g \text{ [N]} \quad (4.2)$$

При чему је:

m_t [kg] – маса тегова,

m_n [kg] = const – маса носача алата,

$g = 9,81 \frac{m}{s^2} = const$ – убрзање земљине теже.

Из израза 4.2 може се закључити да је укупна расположива нормална сила константна вредност и да директно зависи од масе тегова, јер се маса носача алата не може мењати.

У случају када није потребно деловати максималном силом на предмет обраде преко резне ивице алата, носач алата ће се спустити у одговарајући положај, при чему ће се део нормалне силе потрошити на еластичну деформацију опруга, па ће укупна нормална сила бити једнака:

$$F_n = F_{o1} + F_{o2} + F_{nr} [N] \quad (4.3)$$

При томе је:

F_{o1} [N] – сила у опрузи 1,

F_{o2} [N] – сила у опрузи 2,

F_{nr} [N] – резултујућа нормална сила која преко резне ивице алата делује на предмет обраде (сила продирања алата у материјал предмета обраде).

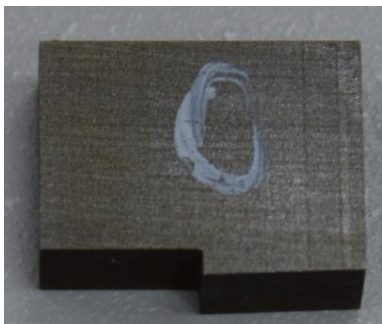
Из израза 4.3 се може закључити да са спуштањем носача алата, тј. смањењем силе у опругама F_{o1} и F_{o2} повећава резултујућа нормална сила, која преко резне ивице алата делује на предмет обраде. С обзиром на то да су тегови исте масе и да се налазе на истом краку од осе предмета обраде, силе у опругама ће бити једнаке, па ће и деформација бити једнака уз услов да су опруге једнаке крутости.

Носач алата са резним алатом приказан је на слици 4.5.



Слика 4.5 – Носач алата са резним алатом

На слици 4.6а приказан је специјално дизајниран резни алат са грудним углом 0° и леђним углом 2° . Резни алат је израђен од брзорезног челика непознатог хемијског састава.



а)



б)

Слика 4.6 – Специјални резни алат (а) са носачем алата (б)

Базирање резног алата врши се преко његове две веће површине, док се стезање врши завртњем (Слика 4.6б).

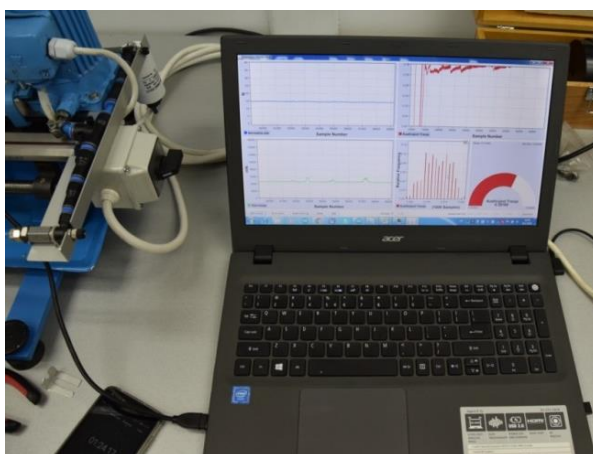
Пре задавања нормалног оптерећења неопходно је задати жељену брзину резања правилним одабиром броја обртаја вретеништа машине, тј. предмета обраде.

Фотографски приказ уређаја на коме је изведен експеримент дат је на слици 4.7.



Слика 4.7 – Специјално дизајниран уређај за испитивање резања константном силом

Вредност нормалне силе и силе резања праћен је системом за аквизицију података, који на монитору централног рачунара приказује тренутне вредности сила (Слика 4.8). Вредности прочитаних сила сачуване су након завршетка испитивања. Систем за аквизицију података након завршетка експеримента чува измерене вредности силе у времену у .xlsx формату.



Слика 4.8 – Приказ вредности нормалне силе и силе резања

Након обраде узорака параметрима обраде датим у табелама 4.2 и 4.3 вршено је мерење пречника необрађене и обрађене површине. На сваком узорку постојала су три трага на којима су мерена три пречника обрађене површине. Такође, поред ових

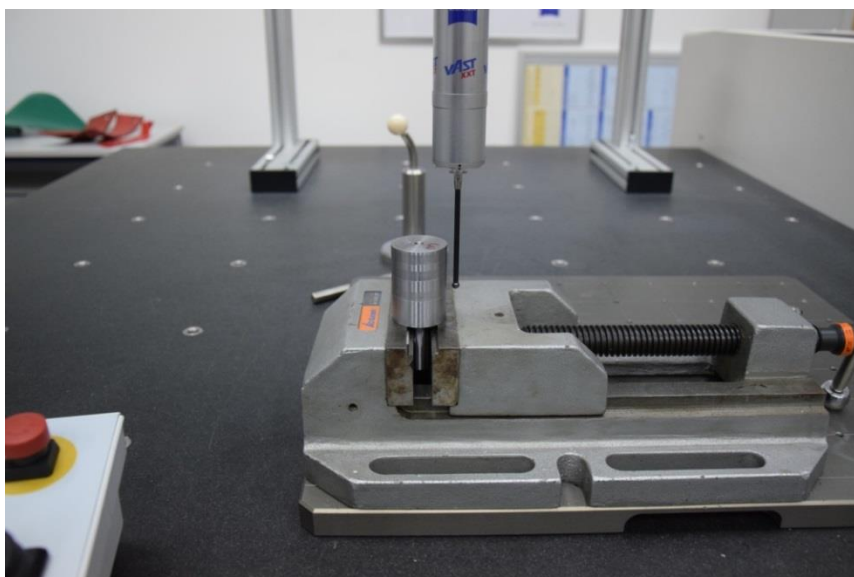
пречника, мерена су и три референтна пречника тик уз зоне обраде. Промена пречника представља разлику измереног референтног пречника и измереног пречника обрађене површине. Мерењем три референтна пречника смањена је релативна грешка промене пречника, која у случају када су дубине резања неколико микрометара може да буде изузетно велика. Мерење пречника извршено је координатном мерном машином (Слика 4.8) „Carl Zeiss CONTURA G2 ACTIV“, мерним сензором у облику рубинске куглице пречника 6 mm. Велики пречник мерног пипка изабран је како би се смањио утицај површинске храповости на релативну грешку промене пречника. Тачност поменутих мерних машина је $1,5 \mu\text{m} + L/350 \mu\text{m}$, где је са L означена мерена дужина у mm. Сва мерења извршена су у контролисаним условима (21°C и влажност ваздуха 40% до 60%). Приликом мерења коришћен је софтвер „Calypso“.

Коришћена координатна мерна машина приказана је на слици 4.9.



Слика 4.9 – Координатна мерна машина на којој су извршена мерења промене пречника

Базирање и стезање предмета обраде приликом мерења извршено је универзалним стезним прибором са елементима за стезање цилиндричних делова (Слика 4.10).



Слика 4.10 – Базирање и стезање предмета обраде на координатној мерној машини

Мерење пречника вршено је VAST XXT (скенирајућим сензором) у 500 тачака. Поред мерења пречника обрађене и необрађене површине, на координатној мерној машини је мерена и кружност површине пре и после обраде, како би се испитао ефекат примењене методе на кружност обрађиване површине.

4.3 Резултати, дискусија и закључци прелиминарних експерименталних испитивања

Измерене вредности пречника пре и након обраде испитиваном методом резања, узорака израђених од материјала С45 (EN 10027-1), тј. Č1530 (JUS), приказане су у табели 4.4.

Табела 4.4 – Вредности пречника пре и након обраде резањем константном силом.

	Узорак	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Траг 1	Референтни пречник [mm]	35,1579	35,1588	35,1382	35,0982	35,1703	35,0523	35,103	35,1578	35,026
	Измерени пречник [mm]	35,151	35,1513	35,1043	35,0894	35,1684	34,9891	35,1017	35,1507	35,0185
Траг 2	Референтни пречник [mm]	35,159	35,1602	35,1411	35,0982	35,173	35,0491	35,1054	35,1524	35,0294
	Измерени пречник [mm]	35,154	35,1561	35,0883	35,0925	35,171	34,973	35,1029	35,0926	35,0266
Траг 3	Референтни пречник [mm]	35,1599	35,165	35,1447	35,0982	35,176	35,052	35,107	35,1541	35,0377
	Измерени пречник [mm]	35,1567	35,1569	35,0789	35,0962	35,1732	35,0474	35,1057	35,1531	34,9142

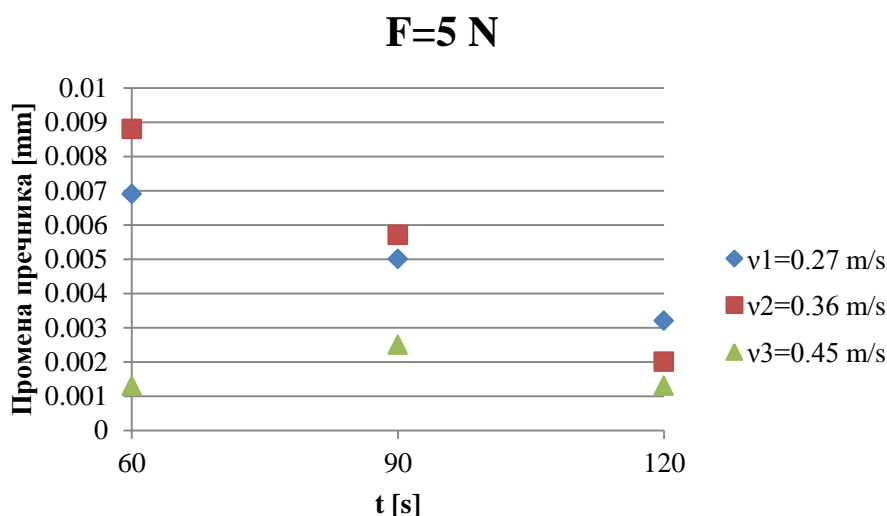
Одузимањем вредности измереног пречника обрађене површине од измереног референтног пречника необрађене површине добија се промена пречника услед обраде методом резања константном силом (Табела 4.5).

Табела 4.5 – Промена пречника резањем константном силом коришћењем различитих параметара обраде

Брзина резања	Промена пречника [mm]								
	$v_1 = 0,27 \frac{m}{s}$			$v_2 = 0,36 \frac{m}{s}$			$v_3 = 0,45 \frac{m}{s}$		
Узорак	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нормална сила	$F_1=5\text{ N}$	$F_2=10\text{ N}$	$F_3=15\text{ N}$	$F_1=5\text{ N}$	$F_2=10\text{ N}$	$F_3=15\text{ N}$	$F_1=5\text{ N}$	$F_2=10\text{ N}$	$F_3=15\text{ N}$
$t_1=60\text{ s}$	0,0069	0,0075	0,0339	0,0088	0,0019	0,0632	0,0013	0,0071	0,0075
$t_2=90\text{ s}$	0,005	0,0041	0,0528	0,0057	0,002	0,0761	0,0025	0,0598	0,0028
$t_3=120\text{ s}$	0,0032	0,0081	0,0658	0,002	0,0028	0,0046	0,0013	0,001	0,1235

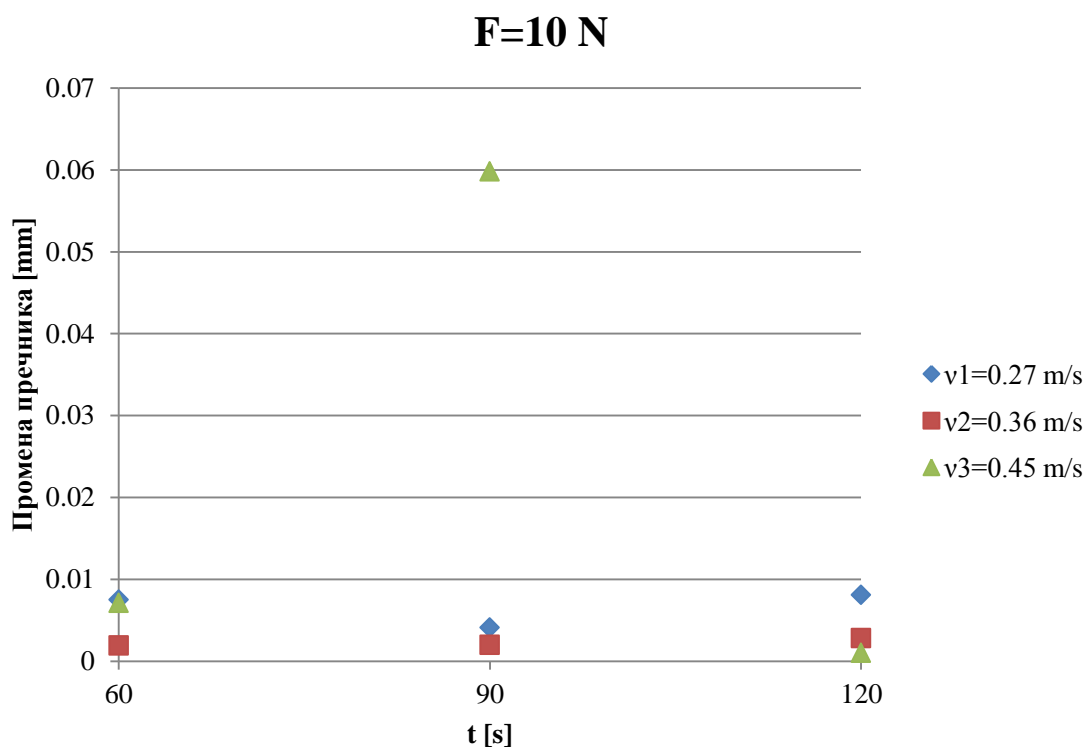
У табели 4.5 промена пречника је приказана у mm. Анализом табеларних вредности може се уочити да се промена пречника креће у интервалу од 0,001 mm до 0,1235 mm, у зависности од параметара обраде. На основу тога се може закључити да коришћена метода има изузетно прецизну регулацију дубине резања и да се као таква може користити у случају када је потребно извршити изузетно прецизну обраду дела резањем. Такође, из табеле се закључује да је највећа дубина резања добијена при највећој брзини резања, при највећој сили и најдужем времену обраде, што је и очекивано. Овај експеримент такође указује на један велики проблем, који се односи на мерење малих промена пречника дела. Наиме, координатна мерна машина је измерила најмању промену пречника од 1 μm , али тај податак се не може сматрати апсолутно тачним, јер је дозвољена грешка координатне мерне машине већа од измерене величине. Податак се може сматрати корисним у циљу потврде да се овом методом заиста могу постићи изузетно мале дубине резања, али се не може посматрати као апсолутна вредност промене пречника.

Дијаграмски прикази измерених промена пречника челичних узорака обрадом резањем константном силом дати су на наредним сликама.



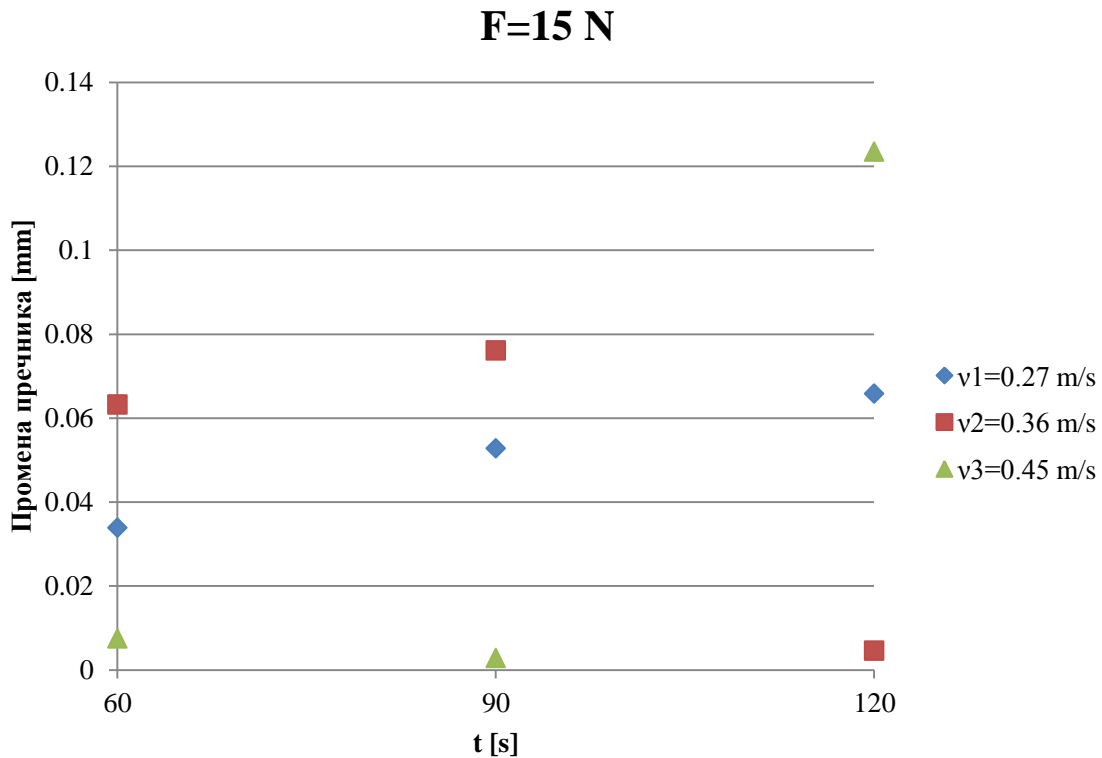
Слика 4.11 – Промена пречника предмета обраде израђеног од челика С45 у зависности од времена обраде за три различите брзине резања при обради силом од 5 N

Са дијаграма на слици 4.11 може се закључити да је обрада челичног предмета обраде константном силом од 5 N, при различитим временима обраде, узроковала смањење пречника предмета обраде мање од 0,01 mm. Из тога се може закључити да изабрани режими обраде доводе до микро резања, што значи да резни клин остварује контакт по врховима неравнина, што и јесте био циљ истраживања. Кретањем алата по врховима неравнина врши се фина регулација задате димензије пречника дела, тј. завршна обрада метала резањем. Предност ове методе у поређењу са комерцијалном методом обраде метала резањем, где се алату саопштава дубина продирања у материјал предмета обраде, је у томе што се услед несавршености система за остваривање задатог померања, реално остварено померање алата разликује од задатог. Такође, овим системом није могуће остварити померање од неколико μm , што је могуће системом резања константном силом.



Слика 4.12 – Промена пречника предмета обраде израђеног од челика С45 у зависности од времена обраде за три различите брзине резања при обради силом од 10 N

Као што се види на дијаграму приказаном на слици 4.12, обрада резањем константном силом од 10 N, као и обрада силом од 5 N, узрокује микро резање, при чему је максимална промена пречника предмета обраде мања од 0,01 mm. Такође, са повећањем нормалне силе долази до повећања неизвесности остваривања микро резања, што показује промена пречника на трагу добијеном при брзини резања $v_3 = 0,45 \frac{m}{s}$ и времену обраде од 90 s.



Слика 4.13 – Промена пречника предмета обраде израђеног од челика С45 у зависности од времена обраде за три различите брзине резања при обради силом од 15 N

Дијаграм са слике 4.13 доказује да се са повећањем нормалне силе смањује вероватноћа појаве микро резања. Када нормална сила за одређене услове обраде (материјал предмета обраде, геометрија резног алата, вредност нападног угла, итд.) пређе критичну вредност, микро резање прелази у макро резање. Испитивана метода се заснива на микро резању, па силе у зависности од осталих параметара обраде треба одабрати тако да увек буду мање од критичне вредности. Анализом дијаграма са слика 4.11, 4.12 и 4.13 може се закључити да вредност критичне силе за коришћене услове обраде износи око 10 N. За одређивање тачне вредности критичне силе неопходно је извршити експериментално истраживање при истим условима обраде, при чему би прираштај нормалне силе био мали.

Расипање резултата, тј. немогућност проналажења зависности промене пречника од нормалне силе, брзине резања и времена обраде, последица је сложености процеса, при чему је немогуће ограничити све утицајне параметре процеса, као ни грешку координатне мерне машине, која у овом случају износи приближно 2 μm .

У табели 4.6 приказано је одступање кружности пре и након обраде резањем константном силом узорака израђених од челика С45 (EN 10027-1), тј. $\check{C}1530$ (JUS).

Табела 4.6 – Одступање кружности пре и након обраде резањем константном силом узорака израђених од челика С45 (EN 10027-1) тј. Č1530 (JUS).

	Узорак	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Траг 1	Одступање кружности пре обраде [mm]	0,0736	0,0345	0,0157	0,0146	0,0248	0,055	0,0266	0,0151	0,0157
	Одступање кружности након обраде [mm]	0,0374	0,0191	0,017	0,0144	0,0154	0,0491	0,0187	0,0152	0,0236
Траг 2	Одступање кружности пре обраде [mm]	0,0294	0,02	0,0151	0,025	0,0150	0,1021	0,0157	0,0156	0,0153
	Одступање кружности након обраде [mm]	0,0287	0,0283	0,0295	0,021	0,0146	0,0229	0,0154	0,0162	0,0157
Траг 3	Одступање кружности пре обраде [mm]	0,0289	0,0278	0,0157	0,0291	0,0153	0,0158	0,0176	0,0178	0,0273
	Одступање кружности након обраде [mm]	0,0135	0,0156	0,018	0,0229	0,0152	0,0153	0,0084	0,0155	0,0516

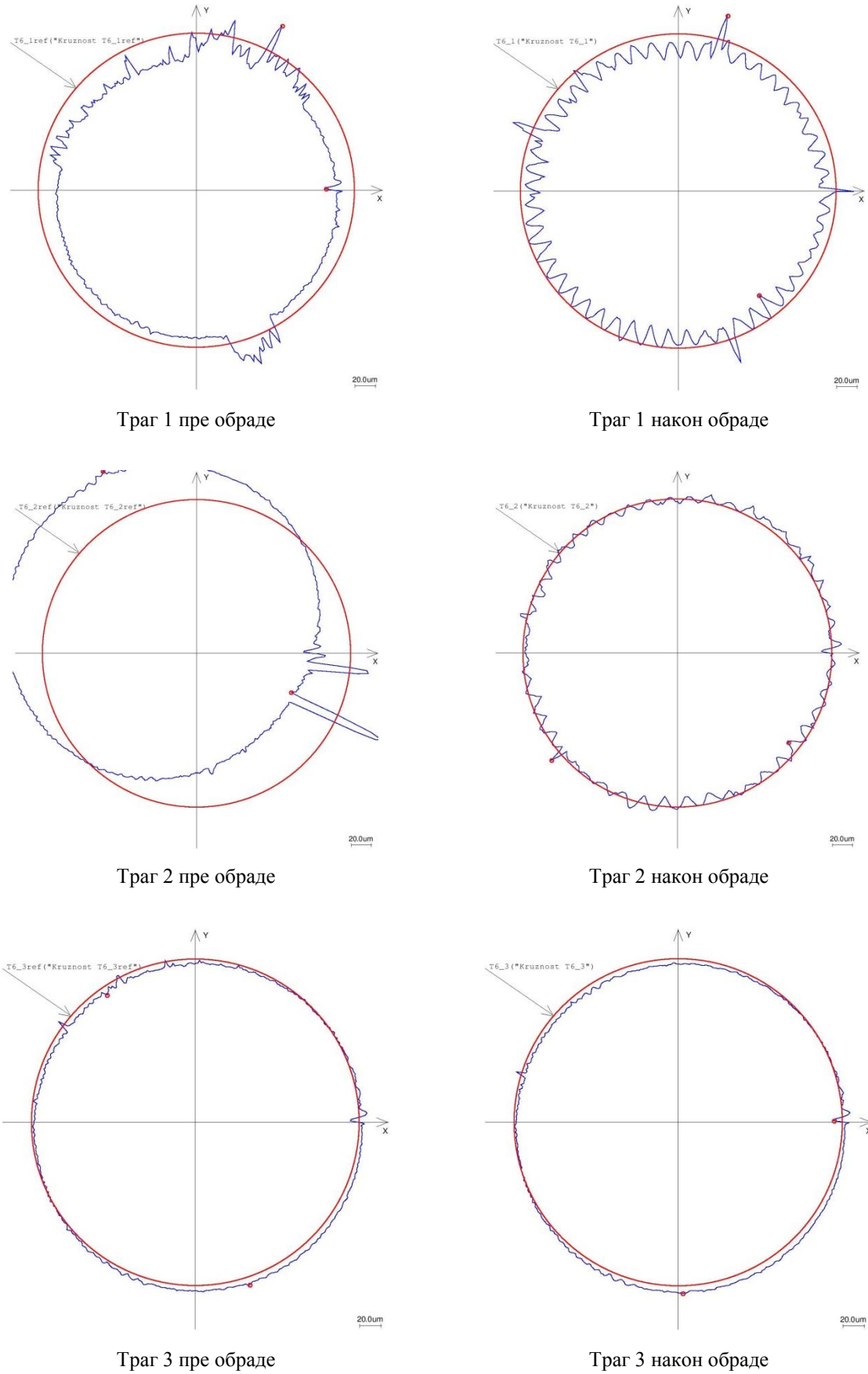
Утицај испитиване методе на кружност предмета обраде најбоље се може приказати разликом одступања кружности пре и након обраде. Позитиван резултат открива траг на коме је кружност боља у односу на необрађену површину, док негативан резултат открива траг на коме је кружност лошија у односу на необрађену површину (Табела 4.7).

Кружност је мерена пре и након обраде испитиваном методом резања у истој зони цилиндра, што је обезбеђено правилним базирањем узорака за испитивање.

Табела 4.7 – Промена кружности у зонама обраде узорака израђених од челика С45 (EN 10027-1) тј. Č1530 (JUS)

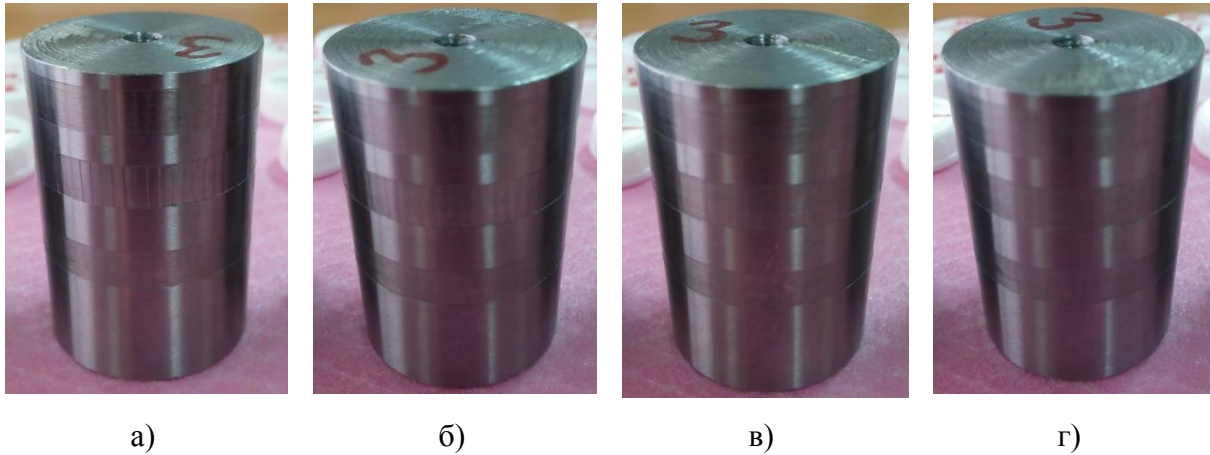
Одступање кружности [mm]									
Брзина резања	$v_1 = 0,27 \frac{m}{s}$			$v_2 = 0,36 \frac{m}{s}$			$v_3 = 0,45 \frac{m}{s}$		
Узорак	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нормална сила	$F_1=5\text{ N}$	$F_2=10\text{ N}$	$F_3=15\text{ N}$	$F_1=5\text{ N}$	$F_2=10\text{ N}$	$F_3=15\text{ N}$	$F_1=5\text{ N}$	$F_2=10\text{ N}$	$F_3=15\text{ N}$
$t_1=60\text{ s}$	0,0362	0,0154	-0,0013	0,0002	0,0094	0,0059	0,0079	-0,0001	-0,0079
$t_2=90\text{ s}$	0,0007	-0,0083	-0,0144	0,004	0,0004	0,0792	0,0003	-0,0006	-0,0004
$t_3=120\text{ s}$	0,0154	0,0122	-0,0023	0,0062	0,0001	0,0005	0,0092	0,0023	-0,0243

Анализом резултата приказаних у табели 4.7 може се закључити да је на 18 трагова добијена боља кружност од почетне, док је на 9 трагова измерена лошија кружност од почетне. Такође, из табеле 4.7 се уочава да је побољшана кружност на свим узорцима који су обрађивани нормалном силом од 5 N (узорци 1, 4 и 7). При сили од 10 N на шест од девет трагова је измерена боља кружност од почетне, док се на четири трага девијација кружности променила за неколико десетих делова μm , што се са сигурношћу може сматрати грешком мерне машине, јер је измерена вредност 10 до 20 пута мања од тачности мерне машине. Из табеле 4.7 се такође може закључити да се девијација кружности при сили од 15 N повећала на шест од девет трагова.



Слика 4.14 – Кружност пре и након обраде на узорку број 6

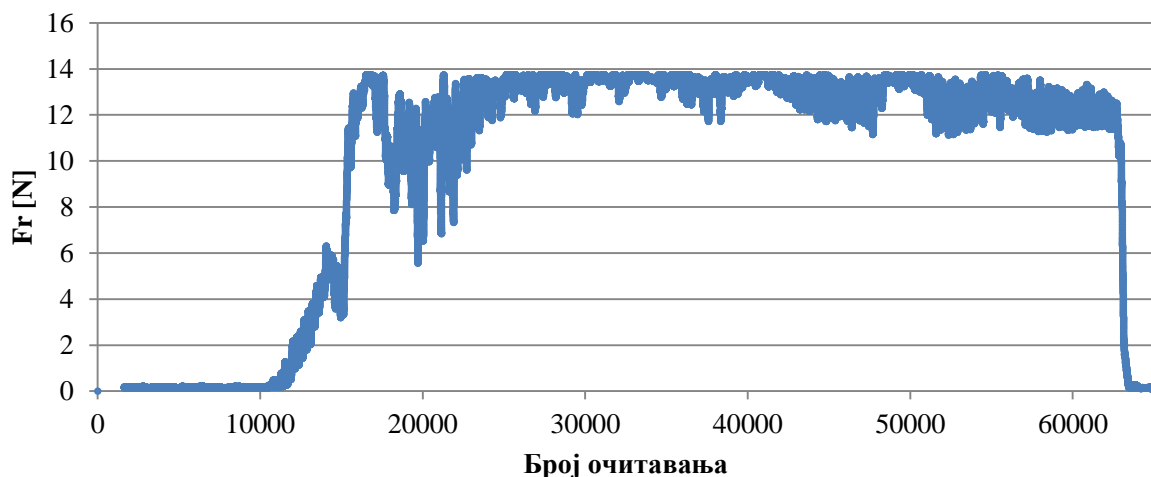
Узорци на којима је на сваком трагу нарушена кружност су узорци број 3 и 9. То наводи на закључак да параметри коришћени приликом обраде тих узорака нису погодни за обраду узорака израђених од челика С45 овом методом. Визуелним прегледом узорака 3 и 9 може се закључити да су ови параметри обраде довели до велике дубине продирања алата у предмет обраде (Табела 4.5), која, у комбинацији са несавршеностима вретеништа машине и нехомогеношћу материјала предмета обраде и низом других неконтролисаних параметара, доводи до прекидног резања у појединим зонама на кружној путањи, што директно утиче на повећање површинске храпавости, а самим тим доводи и до већег одступања кружности (Слика 4.15).



Слика 4.15 – Фотографски приказ трагова на узорку број 3 по обиму узорка

Анализом фотографија на слици 4.15 може се чак и визуелним прегледом уочити да храпавост трагова, а нарочито трага 2, није иста дуж кружности.

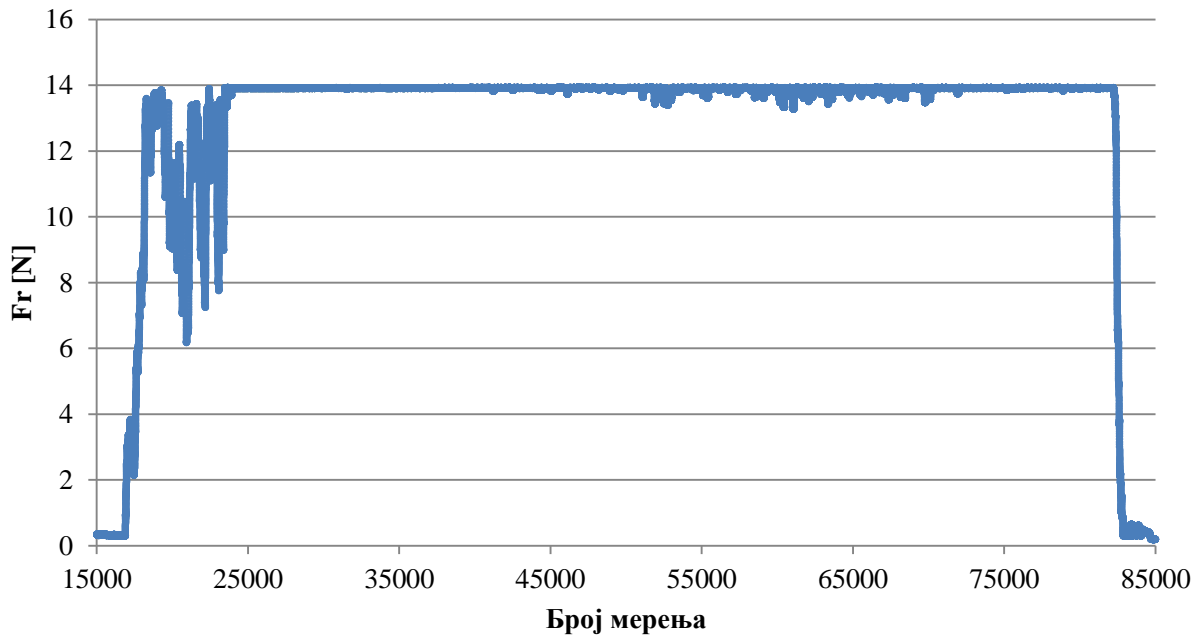
Коришћени уређај за испитивање пружа могућност мерења тангенцијалне силе (силе резања) у времену. Овај дијаграм је изузетно добар показатељ правилно одабира режима обраде. На слици 4.16 приказан је дијаграм силе резања у времену за траг 1 на узорку 3.



Слика 4.16 – Запис силе резања (F_r) на трагу 1 узорка 3

Снимљена сила указује на велику нестабилност процеса резања, што је последица лоших режима обраде.

На слици 4.17 приказан је дијаграм силе резања у времену за траг 1 на узорку 6.



Слика 4.17 – Запис силе резања (F_r) на трагу 1 узорка 6

Поређењем записа на слици 4.16 и записа на слици 4.17 може се закључити да иста нормална сила (сила продирања алата у материјал предмета обраде) при различитим осталим параметрима обраде може имати знатно повољнији утицај на стабилност процеса резања и квалитет обрађене површине.

Према плану експерименталних испитивања приказаним табелом 4.3 извршена је обрада резањем константном силом материјала $AlCu5PbBi$. Хемијски састав легуре алуминијума приказан је у табели 4.8.

Табела 4.8 – Хемијски састав коришћене легуре алуминијума

Елемент	Садржај [%]
Al	90,9499 - 94,5999
Cu	5,0 - 6,0
Bi	0,2 - 0,7
Pb	0,2 - 0,7
Fe	0,0 - 0,7
Si	0,0 - 0,4
Zn	0,0 - 0,3

Измерене вредности пречника предмета обраде пре и након обраде, мерене у истој зони цилиндричног узорка, приказане су у табели 4.9.

Табела 4.9 – Вредности пречника пре и након обраде резањем константном силом материјала AlCu5PbBi.

	Узорак	10	11	12
Траг 1	Референтни пречник [mm]	35,15	35,154	35,183
	Измерени пречник [mm]	35,149	35,1518	35,1802
Траг 2	Референтни пречник [mm]	35,1523	35,158	35,1829
	Измерени пречник [mm]	35,151	35,1495	35,1805
Траг 3	Референтни пречник [mm]	35,1529	35,151	35,1836
	Измерени пречник [mm]	35,1528	35,1494	35,1831

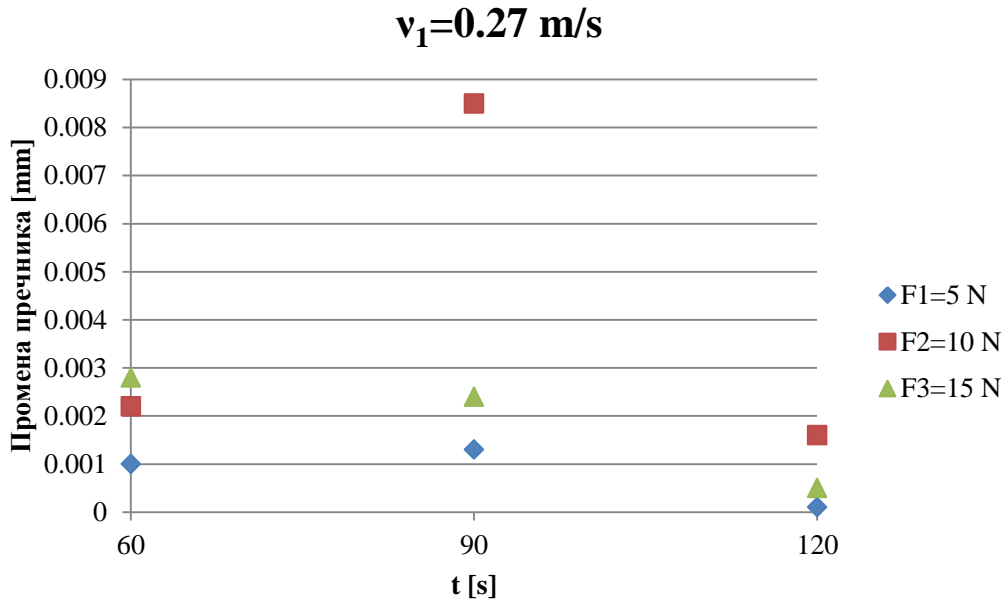
Одузимањем вредности измереног пречника обрађене површине од измерене вредности референтног пречника добија се промена пречника, која је последица обраде методом резања константном силом (Табела 4.10).

Табела 4.10 – Промена пречника резањем константном силом коришћењем различитих сила и времена обраде

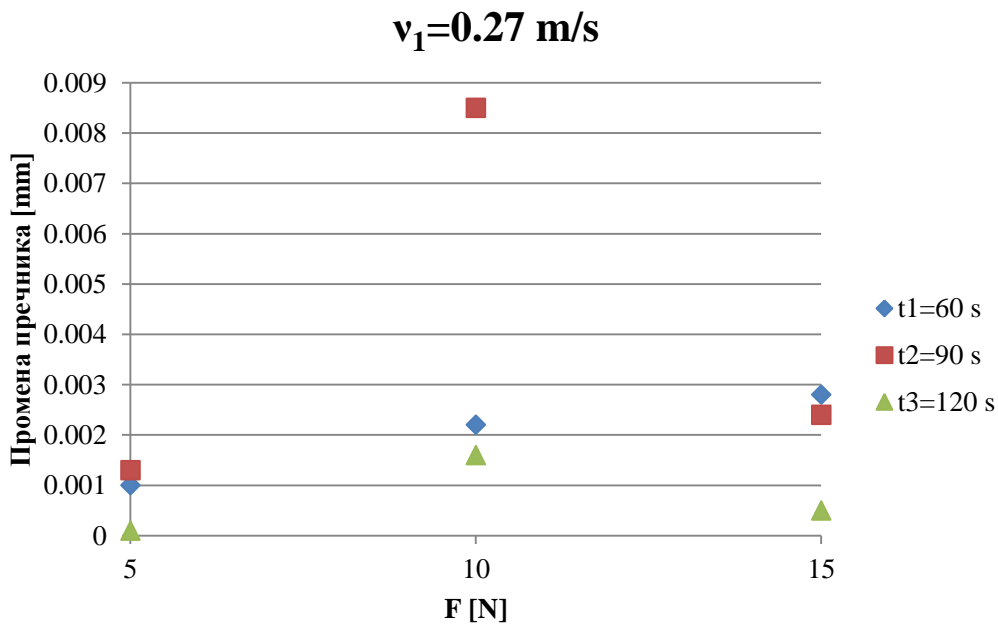
	Промена пречника [mm]		
Брзина резања	$v_1 = 0,27 \frac{m}{s}$		
Узорак	10	11	12
Нормална сила	$F_1=5\text{ N}$	$F_2=10\text{ N}$	$F_3=15\text{ N}$
$t_1=60\text{ s}$	0,001	0,0022	0,0028
$t_2=90\text{ s}$	0,0013	0,0085	0,0024
$t_3=120\text{ s}$	0,0001	0,0016	0,0005

Анализом табеларних вредности може се уочити да се промена пречника предмета обраде израђених од легуре алуминијума, која је узрокована резањем константном силом продирања алата у материјал предмета обраде, креће у интервалу од 0,0001 mm до 0,0085 mm. За исте параметре обраде узорак израђеног од материјала С45 промена пречника се креће у интервалу од 0,0032 mm до 0,0658 mm. Поређењем промене пречника на узорцима AlCu5PbBi и узорцима С45 при истој брзини резања и нормалној сили, закључује се да испитивана метода има већу дубину регулације пречника на легури алуминијума, јер је потребно дуже време обраде за постизање исте промене пречника.

На слици 4.18 дат је дијаграмски приказ промене пречника у зависности од времена обраде и нормалне силе.



Слика 4.18 – Промена пречника предмета обраде израђеног од AlCu5PbBi у зависности од времена обраде за три различите силе при истој брзини резања 0,27 m/s



Слика 4.19 –Промена пречника предмета обраде израђеног од AlCu5PbBi у зависности од нормалне силе за три различита времена обраде при брзини резања 0,27 m/s

Са дијаграма на сликама 4.18 и 4.19 може се закључити да су промене пречника услед обраде резањем константним нормалним силама (5 N, 10 N и 15 N), брзином резања од $v_1=0,27 \text{ m/s}$, и временима обраде (60 s, 90 s и 120 s) веома мале и износе свега неколико μm . Расипање резултата, тј. немогућност проналажења зависности промене пречника од нормалне силе, брзине резања и времена обраде, и у овом случају последица је сложености процеса, при чему је немогуће ограничити све утицајне параметре процеса, као и грешку координатне мерне машине, која у овом случају износи приближно 2 μm .

Поред промене пречника, испитиван је и утицај обраде резањем константном силом на кружност дела.

У табели 4.11 приказано је одступање кружности пре и након обраде резањем константном силом узорача израђених од AlCu5PbBi.

Табела 4.11 – Одступање кружности пре и након обраде резањем константном силом узорача израђених од AlCu5PbBi.

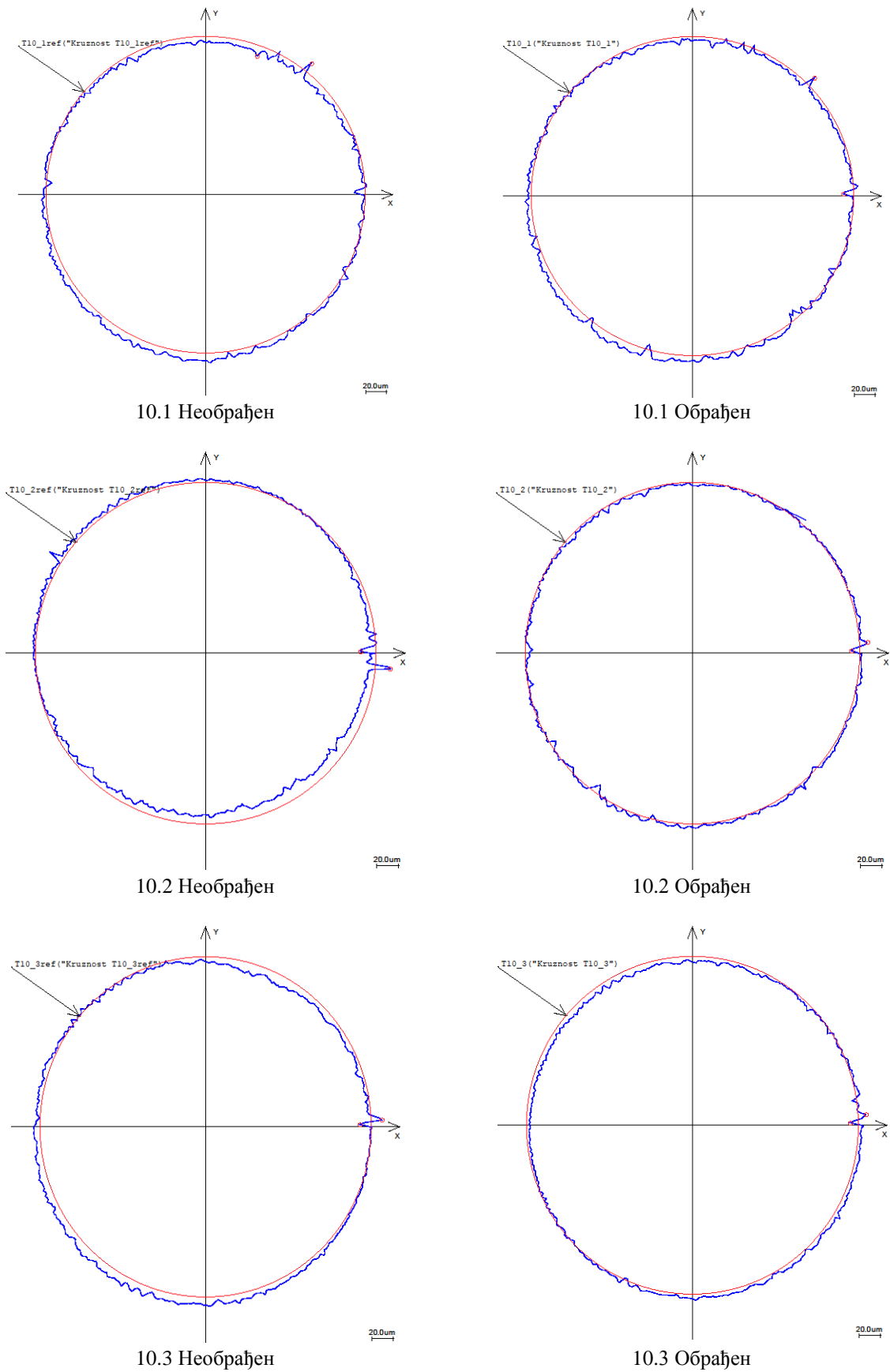
	Узорак	10	11	12
Траг 1	Одступање кружности пре обраде [mm]	0,0198	0,0371	0,0152
	Одступање кружности након обраде [mm]	0,0187	0,0152	0,0134
Траг 2	Одступање кружности пре обраде [mm]	0,0275	0,0134	0,0206
	Одступање кружности након обраде [mm]	0,0146	0,0137	0,0165
Траг 3	Одступање кружности пре обраде [mm]	0,0207	0,0428	0,0189
	Одступање кружности након обраде [mm]	0,0146	0,0156	0,0163

Утицај коришћене методе на кружност предмета обраде најбоље се може приказати разликом одступања кружности пре и након обраде. Позитиван резултат открива траг на коме је кружност боља у односу на необрађену површину, док негативан резултат траг на коме је кружност лошија у односу на необрађену површину (Табела 4.12). Приликом мерења кружности сваки траг је имао своју референтну кружност мерену у зони обраде, пре обраде константном силом продирања алата у материјал предмета обраде.

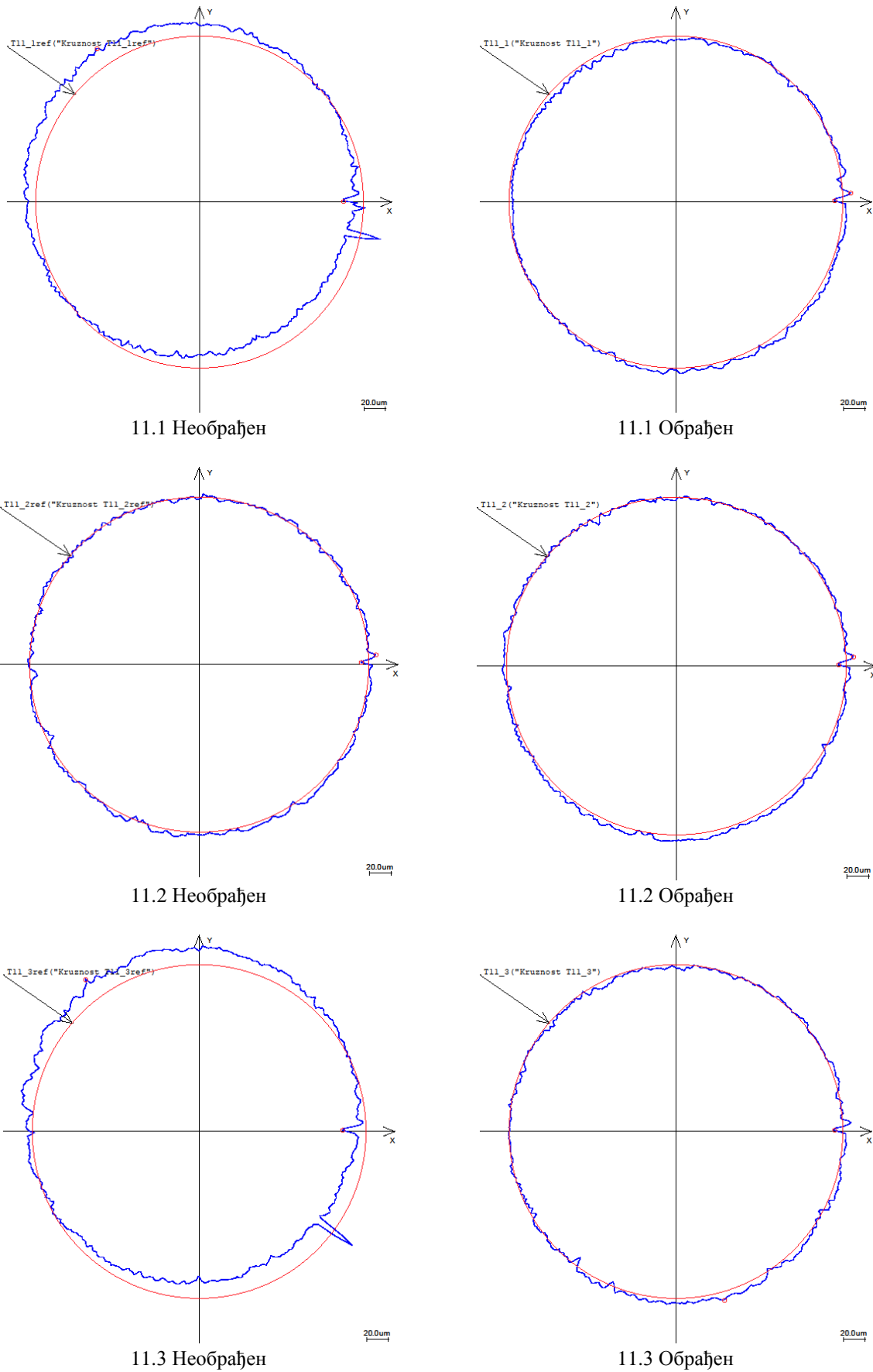
Табела 4.12 – Промена кружности у зонама обраде узорача израђених од AlCu5PbBi.

Одступање кружности [mm]			
Брзина резања	$v_1 = 0,27 \frac{m}{s}$		
Узорак	1	2	3
Нормална сила	$F_1=5\text{ N}$	$F_2=10\text{ N}$	$F_3=15\text{ N}$
$t_1=60\text{ s}$	0,0011	0,0219	0,0018
$t_2=90\text{ s}$	0,0129	-0,0003	0,0041
$t_3=120\text{ s}$	0,0061	0,0272	0,0026

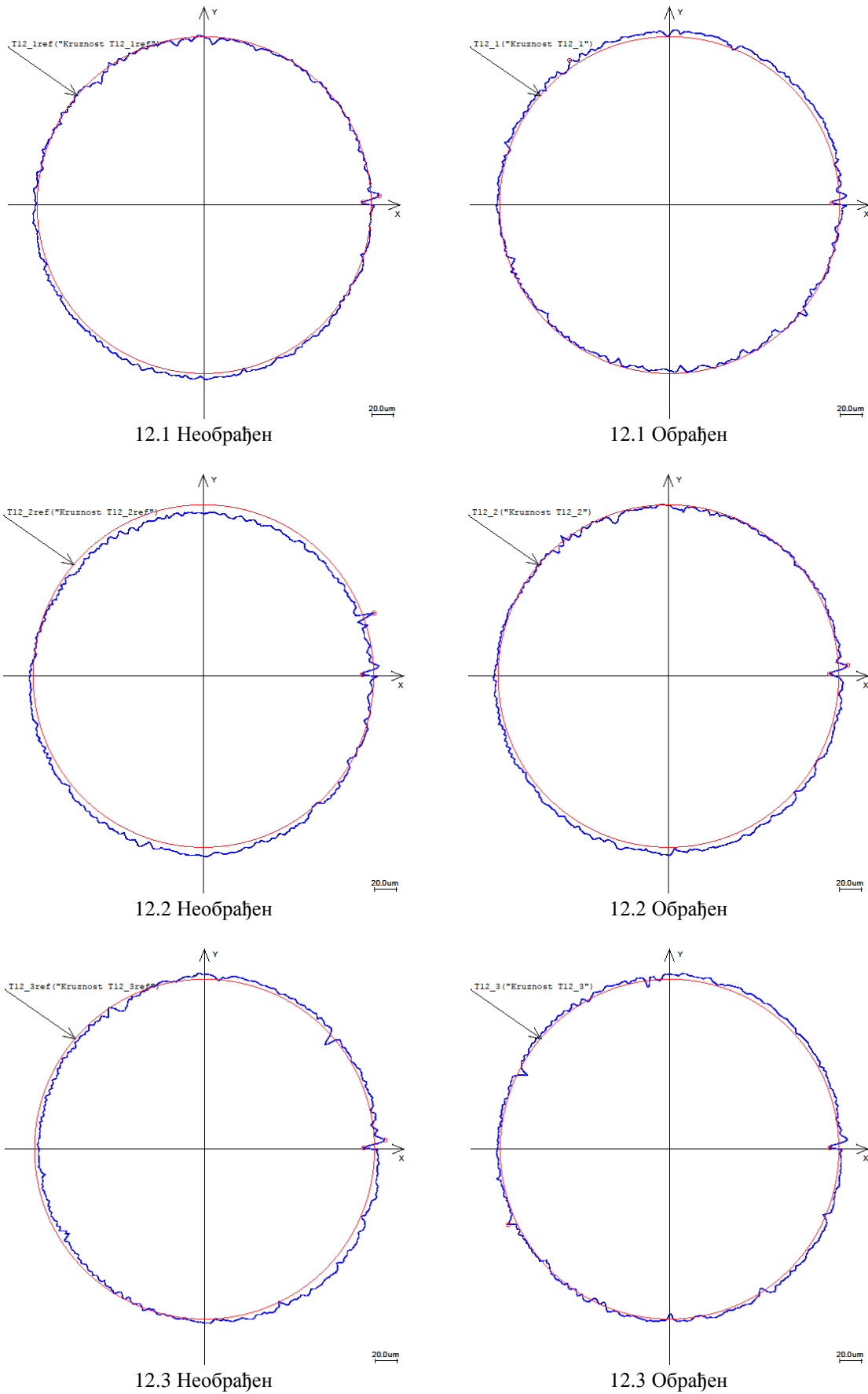
Дијаграмски приказ кружности пре и након обраде на узорцима израђеним од AlCu5PbBi приказан је на сликама 4.20, 4.21 и 4.22.



Слика 4.20 – Дијаграмски прикази кружности пре и после обраде на узорку 10



Слика 4.21 – Дијаграмски прикази кружности пре и после обраде на узорку 11



Слика 4.22 – Дијаграмски прикази кружности пре и после обраде на узорку 12

Добијени експериментални подаци показују повољан утицај обраде резањем константном силом на испитивану легуру алуминијума, у смислу смањења девијације кружности. Анализом експерименталних података приказаних у табели 4.12 и на сликама 4.20, 4.21 и 4.22 може се закључити да је на осам од девет трагова остварено смањење девијације кружности. Као и у случају обраде резањем константном силом челичних узорака и код узорака израђених од легуре алуминијума уочена је лошија кружност на траговима са највећом променом пречника. То наводи на закључак да се са повећањем дубине продирања алата у материјал предмета обраде кружност погоршава, независно од материјала предмета обраде.

4.4 Анализа могућности примене „ball burnishing“ поступка обраде након обраде микро резањем

Анализом прелиминарних експерименталних резултата закључено је да мања сила продирања алата у материјал предмета обраде узрокује бољу кружност и прецизнију димензиону контролу обрађиваног цилиндра. Промене пречника цилиндра које настају резањем под дејством мале силе продирања алата у материјал предмета обраде могу бити пар микрометара па и мање, што пружа могућност изузетно фине регулације пречника цилиндра. Међутим, обрада резањем под дејством константне силе продирања алата у материјал предмета обраде у више пролаза гарантује значајнију промену пречника обрађиваног цилиндра, уз смањење девијације кружности. Прегледом литературних извора закључено је да завршна обрада површинским деформисањем предмета обраде обезбеђује изузетну малу површинску храпавост, уз повећање микротврдоће површинског слоја. Једини недостатак ове обраде је немогућност значајније промене димензије дела [Branko Tadic (2016); С. Ранђеловић (2016); М. Babić (2017)]. У циљу постизања минималне површинске храпавости и повећања микротврдоће обрађиване површине, поред боље кружности, димензионе контроле и значајније промене пречника, предлаже се обрада „ball burnishing“ процесом након обраде микро резањем. Комбинација методе микро резања са методом „ball burnishing“ практично оумгућује добру димензиону тачност дела, уз могућност веће промене пречника и уз већу отпорност на хабање, због смањења површинске храпавости и повећања микротврдоће површинског слоја предмета обраде.

Позитивни ефекти методе „ball burnishing“ процеса обраде, најутицајнији параметри процеса обраде, утицај дубине пенетрације куглице на површинску храпавост, утицај крутости алата на површинску храпавост предмета обраде, еластична релаксација материјала након обраде, детаљно су анализирани у поглављу 2. Ова анализа процеса обраде представља основ за конструкцију алата за обраду унутрашњих цилиндричних површина „ball burnishing“ поступком обраде, који ће бити приказан у поглављу 5.

5. Пројектовање и прорачун склопа алата

Изведена прелиминарна експериментална истраживања имала су за циљ да потврде или оповргну очекиване предности методе резања константном силом продирања алата у материјал предмета обраде у поређењу са стандардним методама резања, код којих се димензија предмета обраде остварује контролисаним померањем резног алата. Прелиминарна експериментална истраживања су јасно показала предности обраде константном силом у поређењу са стандардном обрадом резањем, које се огледају у ефикасном управљању веома малим променама димензија радног комада, реда величине неколико μm , као и у побољшању кружности цилиндричних предмета обраде.

Поред наведеног, теоријска разматрања предложене методе недвосмислено објашњавају предност испитиване методе у поређењу са стандардним методама резања, која се огледа у елиминисању димензионих и грешака облика које су последица:

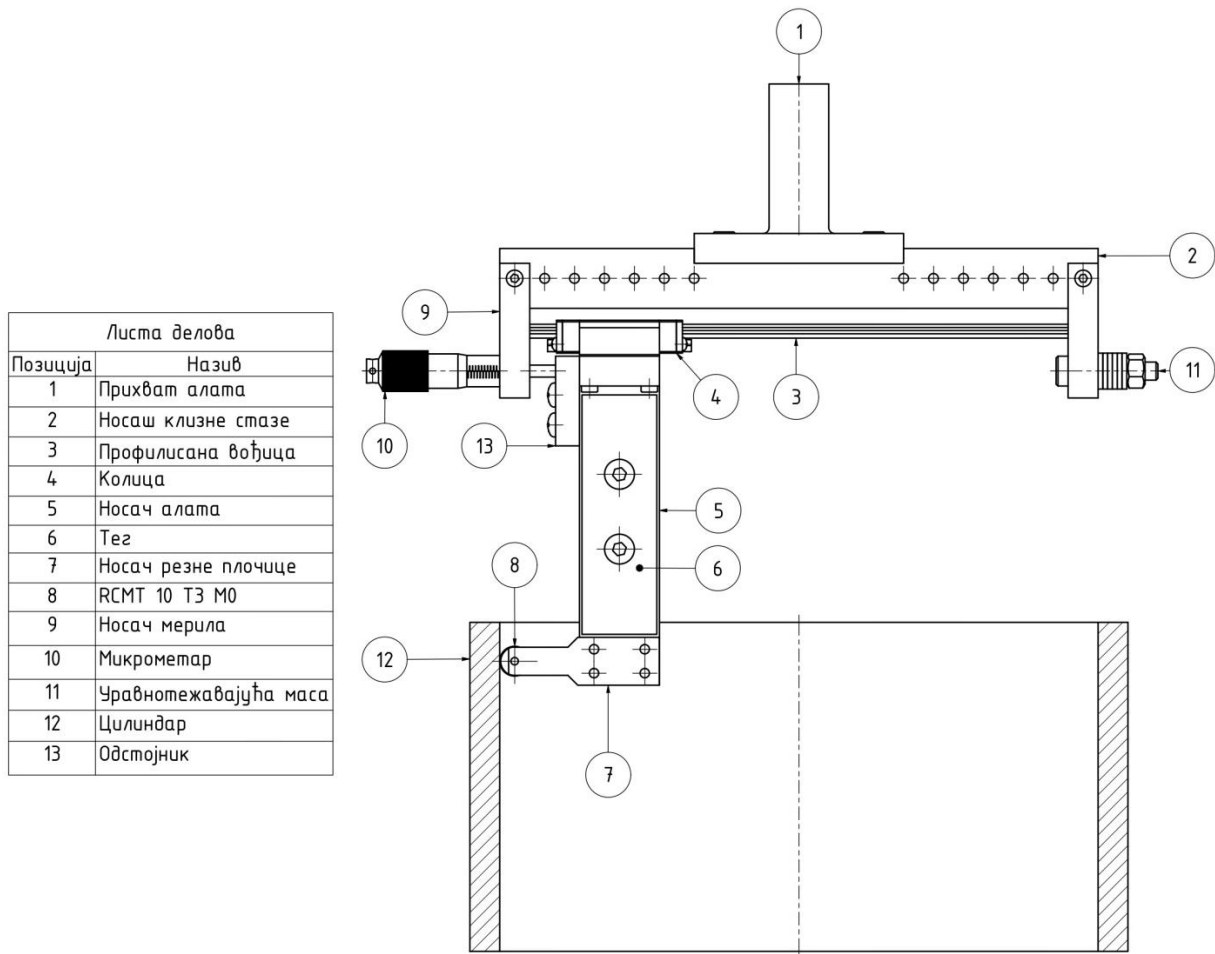
- термичког ширења елемената система кретања,
- бацања вретеништа машине,
- еластичне деформације предмета обраде која је последица силе стезања, распореда и облика стезача,
- еластичне деформације предмета обраде која је последица силе резања, нарочито при обради танкозидних предмета обраде,
- стања резног алата,
- грешака базирања предмета обраде итд.

Грешке облика и димензије, чији су узроци наведени, могу се умањити али не и потпуно елиминисати код комерцијалних машинских обрада, чији рад се заснива на задавању дубине продирања алата у материјал предмета обраде.

5.1 Алат за микро резање

Резултати прелиминарног експеримента су указали на предности и недостатке предложене методе и на основу њих је развијен индустријски алат за обраду цилиндричних унутрашњих површина константном силом продирања алата у материјал предмета обраде. С обзиром на то да је прелиминарни експеримент показао да на површинску храпавост обрађене површине и смањење пречника предмета обраде највише утиче сила продирања алата у материјал предмета обраде, неопходно је развити алат који има могућност веома прецизне регулације силе. У том циљу, код развијеног резног алата, сила продирања алата у материјал предмета обраде представља инерцијалну, тј. центрифугалну силу, чијим интензитетом је могуће управљати променом масе, ексцентрицитета и угаоне брзине. Овим принципом се постиже изузетно велика дубина регулације силе, а самим тим и одлично управљање

дубином продирања алата у материјал предмета обраде. Развијени резни алат приказан је на слици 5.1.



Листа делова	
Позиција	Назив
1	Прихват алата
2	Носач клизне стазе
3	Профилисана вођица
4	Колица
5	Носач алата
6	Тег
7	Носач резне плочице
8	РСМТ 10 ТЗ М0
9	Носач мерила
10	Микрометар
11	Уравнотежавајућа маса
12	Цилиндар
13	Одстојник

Слика 5.1 – Развијени резни алат за обраду цилиндричних отвора инерцијалном силом

Развијени резни алат се преко прихвата алата (Позиција 1) поставља у вретениште вертикалне глодалице. За прихват алата причвршћен је носач клизне стазе (Позиција 2) и клизна стаза (Позиција 3). На клизну стазу су постављена оговарајућа колица (Позиција 4), која преко котрљајних кугличних лежајева налажу на клизну стазу уз остваривање минималних зазора. За колица је фиксиран носач алата (Позиција 5) на који се, по потреби, у циљу повећања ексцентричне масе могу поставити тегови одговарајуће масе (Позиција 6). За носач алата причвршћен је носач резне плочице (Позиција 7), на који је постављена одговарајућа резна плочица (Позиција 8). На левој и десној страни алата постављени су подесиви носачи (Позиција 9), чија позиција зависи од пречника обрађиваног цилиндра. Један носач служи за причвршћивање микрометарског мерила (Позиција 10), чија је функција грубо граничење алата, док други носач служи за ношење уравнотежавајуће масе (Позиција 11). Будући да се колица са носачем алата, теговима, носачем резног алата и резним алатом слободно крећу дуж клизне стазе, услед ротације резног алата јавља се инерцијална сила која има правац клизне стазе, а смер од осе дела ка резној плочици. Резни алат под дејством инерцијалне силе остварује контакт преко резне плочице са предметом обраде (Позиција 12) и отпочиње обраду микро резањем.

5.1.1 Прорачун силе продирања алата у материјал предмета обраде

За потребе експерименталних испитивања у оквиру ове дисертације развијен је резни алат за обраду унутрашњих цилиндричних површина инерцијалном силом (Слика 5.1). Продирање алата у материјал предмета обраде последица је инерцијалне (центрифугалне) силе која се јавља при окретању ексцентричне слободне масе. Ова сила се рачуна по обрасцу:

$$F_{in} = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad [N]. \quad (5.1)$$

При чему је:

m [kg] – маса,

r [m] – ексцентрицитет,

ω [s⁻¹] – угаона брзина.

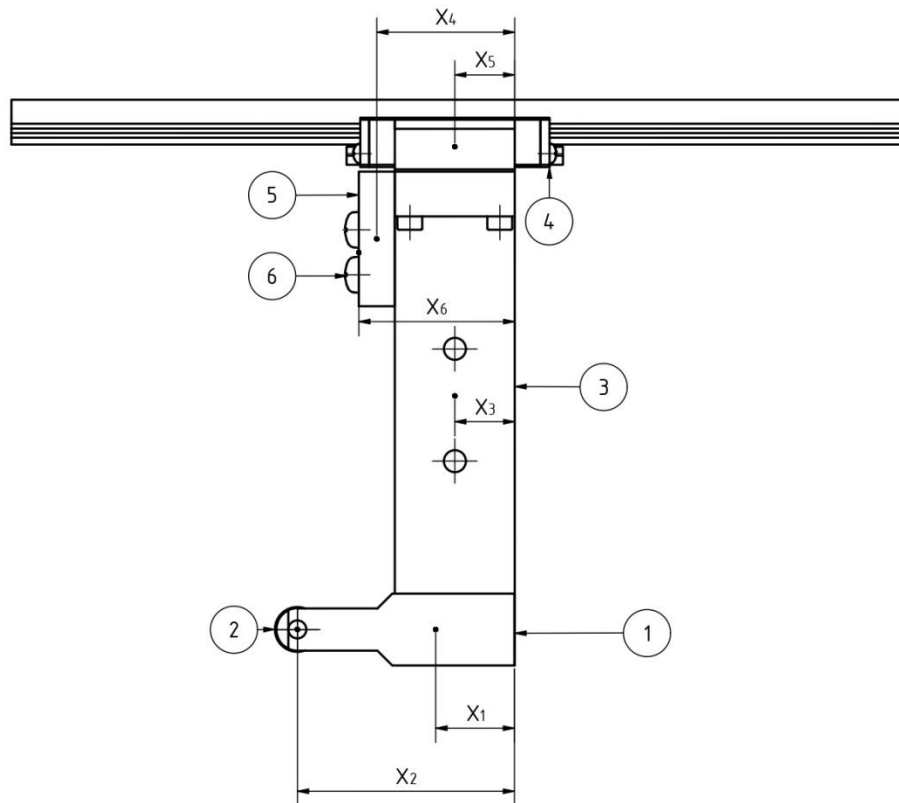
Угаона брзина зависи само од броја обртаја резног алата, тј. вретеништа машине n [o/min] и рачуна се по обрасцу:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad [s^{-1}]. \quad (5.2)$$

У циљу прецизног одређивања инерцијалне силе, неопходно је одредити тежиште слободног дела алата који се састоји од:

- Носача резне плочице (Позиција 1),
- Резне плочице са завртњем за причвршћивање (Позиција 2),
- Носача алата (Позиција 3),
- Одстојника (Позиција 5),
- Колица (Позиција 4),
- Завртњева за прићвршћивање одстојника (Позиција 6), (Слика 5.5).

Од тежишта слободног дела алата зависи ексцентрицитет алата тј. инерцијална сила, која представља силу продирања алата у материјал предмета обраде. Детаљан поступак одређивања тежишта слободног дела алата приказан је у прилогу 1, док је у табелама 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 и 5.6 дата израчуната вредност растојања тежишта слободног дела алата од бочне стране алата, за различиту масу алата, која зависи од броја постављених тегова.



Слика 5.2 – Тежишта делова алата

У циљу што финије регулације инерцијалне силе, поред регулације бројем обртаја, алат је дизајниран тако да се регулација може вршити и масом алата додавањем тегова на носач алата. Тегови се за носач алата причвршћују завртњевима чија се маса поред масе додатих тегова такође додаје носачу алата. Број додатих тегова зависи од жељене инерцијалне силе, при чему то не утиче на измештање тежишта носача алата. Међутим, додавање тегова на носач алата утиче на повећање његове масе, па ће се то директно одразити на промену кординате тежишта слободног дела алата (Табеле 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 и 5.6). У приказаним табелама је са X_t означено растојање тежишта покретног дела алата од бочне стране алата по X оси (слика 5.2).

У табели 5.1 израчунато је тежиште алата без тегова и завртњева за причвршћивање.

Табела 5.1 - Тежиште слободног дела алата без тегова и завртњева за причвршћивање

	маса [g]	X [mm]	m·X [g·mm]	Xt [mm]
Носач резне плочице	m1	47,329	21,892	15,789
Резна плочица са завртњем	m2	3,319	48,25	
Носач алата са завртњевима	m3	192,09	13,5	
Осдојник са завртњевима	m4	11,938	31	
Колица	m5	59	13,5	
	Σ	313,676		

У табели 5.2 израчунато је тежиште слободног дела алата без тегова са завртњевима за причвршћивање.

Табела 5.2 – Тежиште слободног дела алата без тегова са завртњевима за причвршћивање

	маса [g]		X [mm]	m·X [g·mm]	Xt [mm]
Носач резне плочице	m1	47,329	21,818	1032,603	15,68
Резна плочица са завртњем	m2	3,319	48,25	160,142	
Носач алата	m3	192,09	13,5	2593,215	
Одстојник	m4	11,938	31	370,078	
Колица	m5	59	13,5	796,500	
Завртњеви	m6	15,677	13,5	211,640	
	Σ	329,353			

У табели 5.3 израчунато је тежиште слободног дела алата са једним тегом и завртњевима за причвршћивање.

Табела 5.3 – Тежиште слободног дела алата са једним тегом и завртњевима за причвршћивање

	маса [g]		X [mm]	m·X [g·mm]	Xt [mm]
Носач резне плочице	m1	47,329	21,818	1032,603	15,27
Резна плочица са завртњем	m2	3,319	48,25	160,142	
Носач алата	m3	192,09	13,5	2593,215	
Одстојник	m4	11,938	31	370,078	
Колица	m5	59	13,5	796,500	
Завртњеви	m6	15,677	13,5	211,640	
Тег 1	m7	77,1	13,5	1040,85	
	Σ	406,453			

У табели 5.4 израчунато је тежиште слободног дела алата са два тега и завртњевима за причвршћивање.

Табела 5.4 – Тежиште слободног дела алата са два тега и завртњевима за причвршћивање

	маса [g]		X [mm]	m·X [g·mm]	Xt [mm]
Носач резне плочице	m1	47,329	21,818	1032,603	14,98
Резна плочица са завртњем	m2	3,319	48,25	160,142	
Носач алата	m3	192,09	13,5	2593,215	
Одстојник	m4	11,938	31	370,078	
Колица	m5	59	13,5	796,500	
Завртњеви	m6	15,677	13,5	211,640	
Тег 1	m7	77,1	13,5	1040,85	
Тег 2	m8	77,2	13,5	1042,2	
	Σ	483,653			

У табели 5.5 израчунато је тежиште слободног дела алата са три тега и завртњевима за причвршћивање.

Табела 5.5 – Тежиште слободног дела алата са три тега и завртњевима за причвршћивање

	маса [g]		X [mm]	m·X [g·mm]	Xt [mm]
Носач резне плочице	m1	47,329	21,818	1032,603	14,7799
Резна плочица са завртњем	m2	3,319	48,25	160,142	
Носач алата	m3	192,09	13,5	2593,215	
Одстојник	m4	11,938	31	370,078	
Колица	m5	59	13,5	796,500	
Завртњеви	m6	15,677	13,5	211,640	
Тег 1	m7	77,1	13,5	1040,85	
Тег 2	m8	77,2	13,5	1042,2	
Тег 3	m9	77,26	13,5	1043,01	
	Σ	560,913			

У табели 5.6 израчунато је тежиште слободног дела алата са четири тега и завртњевима за причвршћивање.

Табела 5.6 – Тежиште слободног дела алата са четири тега и завртњевима за причвршћивање

	маса [g]		X [mm]	m·X [g·mm]	Xt [mm]
Носач резне плочице	m1	47,329	21,818	1032,603	14,62483
Резна плочица са завртњем	m2	3,319	48,25	160,142	
Носач алата	m3	192,09	13,5	2593,215	
Одстојник	m4	11,938	31	370,078	
Колица	m5	59	13,5	796,500	
Завртњеви	m6	15,677	13,5	211,640	
Тег 1	m7	77,1	13,5	1040,85	
Тег 2	m8	77,2	13,5	1042,2	
Тег 3	m9	77,26	13,5	1043,01	
Тег 4	m1	77,33	13,5	1043,955	
	Σ	638,243			

Анализом табела 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 и 5.6 може се закључити да максимална промена тежишта слободног дела алата додавањем четири тега и завртњева за причвршћивање износи 1,165 [mm]. Та промена тежишта директно утиче на ексцентрицитет алата, тј. са смањењем растојања тежишта покретног дела алата смањује се и ексцентрицитет алата. То смањење је мало и његов релативни удео се смањује са повећањем ексцентрицитета, тј. применом алата за обраду цилиндара већих пречника.

Веома је битно нагласити да израчунато растојање тежишта покретног дела алата од бочне ивице носача алата (Табеле 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 и 5.6) не представља ексцентрицитет резног алата, који ће зависити од пречника отвора који се обрађује. Растојање тежишта покретног дела алата од бочне ивице носача алата представљаће ексцентрицитет (r) само у случају обраде отвора чији пречник износи 0,1065 m. Сходно томе, прорачун ексцентрицитета алата при обради отвора врши се по обрасцу:

$$r = \frac{D - 0,1065}{2} + Xt. \quad (5.3)$$

При чему је:

$D [m]$ – пречник отвора који се обрађује,

$Xt [m]$ – растојање тежишта покретног дела алата од бочне стране алата по x оси, у зависности од броја постављених тегова (Табеле 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 и 5.6).

Познавањем ексцентрицитета резног алата могуће је одредити инерцијалну силу по обрасцу 5.1. Међутим, због отпора кретања, који настаје као последица трења колица по профилисаног вођици (клизној стази), резултујућа сила, тј. сила продирања алата у материјал предмета обраде, се умањује за отпоре трења.

$$F_2 = m \cdot r \cdot \omega^2 - F_\mu [N] \quad (5.4)$$

При чему је:

F_2 – сила продирања алата у материјал предмета обраде,

F_μ – сила трења.

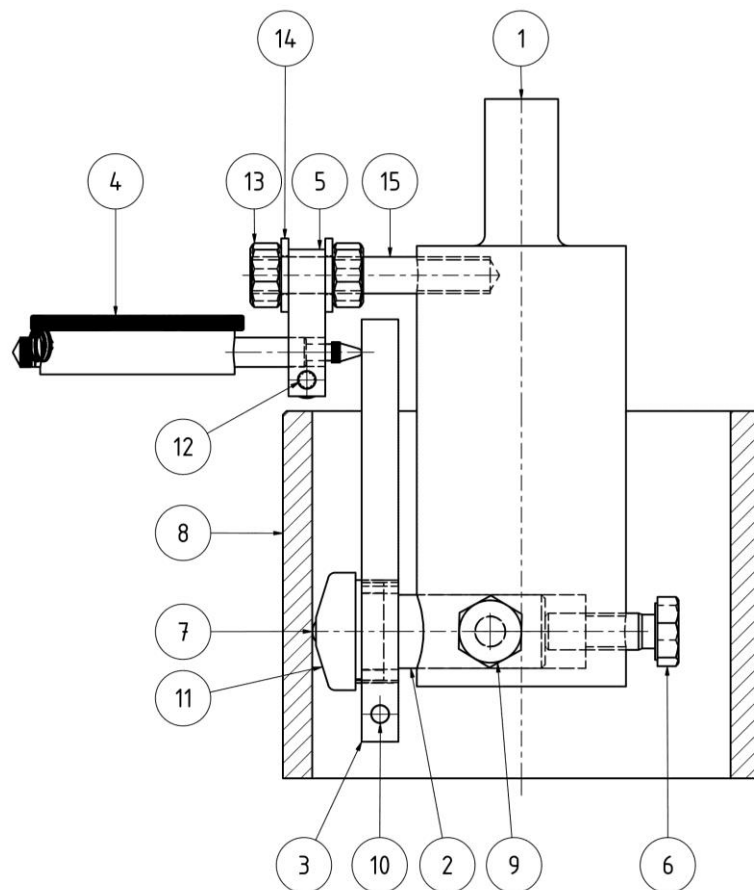
У циљу прецизног одређивања резултујуће силе, тј. силе продирања алата у материјал предмета обраде, неопходно је експерименталним путем одредити паразитну силу трења. Поступак одређивања паразитне силе трења детаљно је описан у прилогу 2. Од круцијалне је важности нагласити да је испитивањем одређен статички коефицијент трења на основу кога је прорачуната паразитна сила трења. Нарочито је битно нагласити да се извршено испитивање отпора кретања колица по профилисаног вођици не може сматрати апсолутно тачним, јер се приликом обраде јавља и напрезање под дејством момента, који је последица дужине носача алата и силе продирања алата у материјал предмета обраде. То моментно напрезање ће узроковати пораст отпорне силе. С обзиром на мале силе продирања алата у материјал предмета обраде, не очекује се значајна промена отпорне силе. Познавањем отпора трења, а на основу израза 5.3 и 5.4, коначно је могуће дефинисати образац за израчунавање силе продирања алата у материјал предмета обраде.

$$F_2 = m \cdot \left(\frac{D - 0,1065}{2} + Xt \right) \cdot \omega^2 - 0,0905 [N] \quad (5.5)$$

5.2 Алат за обраду „ball burnishing“ процесом

Као што је већ наведено у поглављима 2 и 4, „ball burnishing“ процес представља процес завршне обраде површинским деформисањем предмета обраде. Обрада се изводи котрљањем тврде куглице по површини предмета обраде, уз дејство нормалне силе која утискује куглицу у материјал предмета обраде и на тај начин пластично деформише површински слој. Површине обрађене овом методом имају изузетно малу хрпаваост. Међутим, недостатак ове методе је немогућност значајније промене димензије предмета обраде, па се из тог разлога препоручује комбинација са другом методом завршне обраде као што је микро резање. На слици 5.3 приказан је алат за обраду унутрашњих цилиндричних отвора „ball burnishing“ процесом, који је развијен за потребе експерименталних испитивања спроведених у оквиру израде ове докторске дисертације.

Листа делова	
Позиција	Назив
1	Носач алата
2	Алат
3	Реперна плоча
4	Компаратер
5	Носач компаратера
6	Завртањ М10 x 30
7	Куглица 9 мм
8	Цилиндар
9	Завртањ М10 x 22
10	Завртањ М6 x 40
11	Поклопац алата
12	Завртањ М6 x 20
13	Навртка
14	Подлошка
15	Навојна шипка

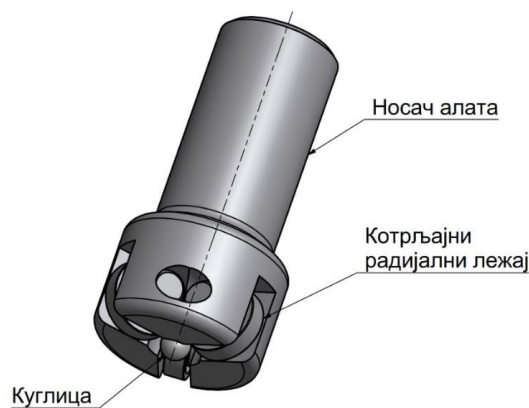


Слика 5.3 – Развијени алат за звршну обраду цилиндричних отвора „ball burnishing“ процесом

Алат за завршну обраду цилиндричних отвора „ball burnishing“ процесом се састоји из три целине и то: носача алата, алата за обраду и мерача дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Преко носача алата (Позиција 1) алат се поставља у вретениште вертикалне глодалице. У носач алата се преко прецизно израђеног клизног споја поставља алат за обраду (Позиција 2). На алат је завртњем (Позиција 10) чврсто причвршћена реперна плоча (Позиција 3) коју додирује мерни пипак компаратера (Позиција 4), који је преко носача компаратера (Позиција 5) чврсто

везан за носач алата. Завијањем завртња (Позиција 6) алат за обраду преко куглице (Позиција 7) остварује контакт са зидом цилиндра (Позиција 8). То је тренутак када скалу компаратера треба нулирати, како би се даљим завијањем завртња измерила прецизно дефинисана дубина продирања куглице у материјал предмета обраде. Блокирање алата за обраду у дефинисаном положају остварује се завртњем (Позиција 9). У циљу прецизног одређивања дубине продирања коришћен је компаратер прецизности 1 μ m. Како би се спречило испадање куглице из алата за обраду, преко куглице на алат је постављен поклопац алата (Позиција 11).

Коришћени алат за обраду је развијен у оквиру докторске дисертација С. Ранђеловић (2016) и приказан на слици 5.4.



Слика 5.4 – CAD модел алата за обраду „ball burnishing“ процесом [С. Ранђеловић (2016)]

Алат са слике 5.4 намењен је завршној обради равних површина, али је уградњом алата у нову конструкцију омогућена обрада цилиндричних отвора. Приказани алат се састоји из три целине, и то:

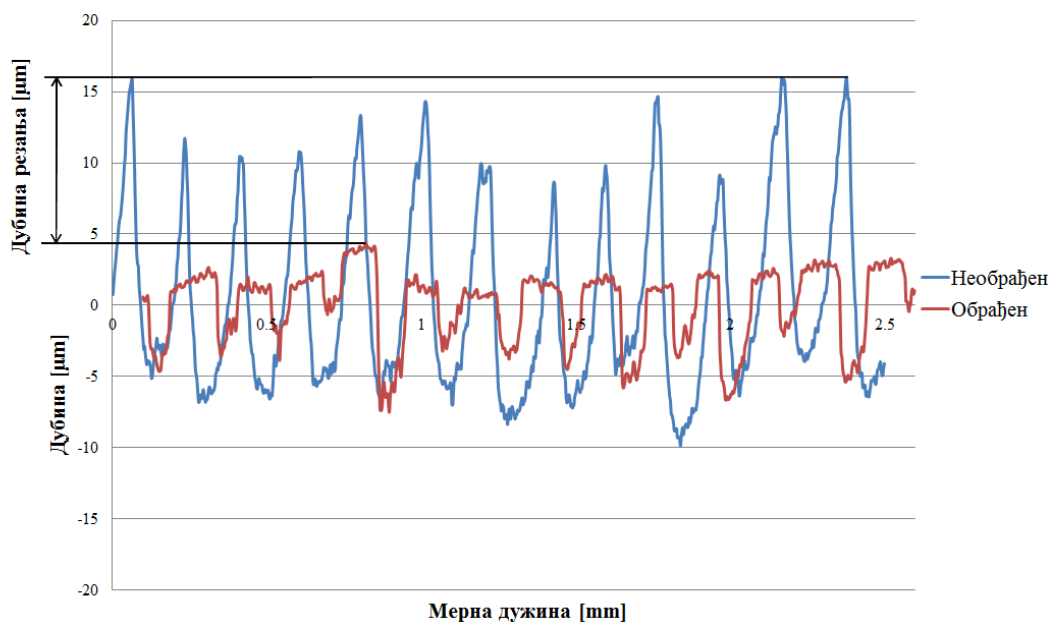
- носача алата,
- котрљајних лежајева и
- куглице којом се врши обрада.

Алат се преко носача алата позиционира у носач алата за обраду цилиндричних отвора. Површина је брушена, како би се обезбедио клизни спој са минималним зазором. Три котрљајна радијална лежаја су постављена под углом од 120° и обезбеђују котрљање куглице у свим правцима кретања. На котрљајне лежајеве се ослања куглица жељеног пречника. Пречник куглице се бира у зависности од материјала предмета обраде и задатих нормалних сила, које морају узроковати напон већи од напона на граници течења материјала предмета обраде. Променом пречника куглице мења се контактна површина куглице и површине предмета обраде, а самим тим и остварени напон [С. Ранђеловић (2016)].

6. Експериментална истраживања

Прелиминарна експериментална истраживања изведена су у циљу верификовања идеје базиране на позитивним ефектима обраде резањем константном силом. Ово истраживање је показало све предности и недостатке ове обраде, на које посебно треба обратити пажњу приликом пројектовања резног алата и процеса обраде. Евидентне су предности ове методе у односу на комерцијалне методе обраде, у погледу остваривања изузетно прецизних промена пречника дела, реда величине неколико μm . Основни проблем који се јавља приликом обраде, када је реч о промени димензије за пар μm па и мање, јесте непостојање адекватне мерне опреме, која уз малу релативну грешку може регистровати остварену промену пречника. Дозвољена грешка координатних мерних машина може да буде приближно једнака очекиваној промени пречника. Сходно томе, оваква мерна опрема се не може користити за мерење промена пречника остварених резањем константном силом. Дакле, координатним мерним машинама је могуће мерити макро геометрију дела, али не и промене на микро нивоу.

Имајући у виду да обрада микро резањем константном силом на обрађиваној површини изазива промену микро геометрије, за мерење промене пречника услед промене микро геометрије површине мора се користити мерна опрема која мери микро геометрију површине. Очекивана дубина продирања резног алата у материјал предмета обраде износи свега пар μm , па се може рећи да се овом обрадом смањује висина неравнина профила храпавости, што доводи до веома прецизне промене пречника дела. Одступање профила храпавости, мереног у прецизно дефинисаној зони пре и након извршене обраде микро резањем, последица је одстрањивања материјала микро резањем. Поређењем максималне висине неравнина пре и након извршене обраде микро резањем уочава се дубина продирања резног алата (Слика 6.1).



Слика 6.1 – Микро геометрија површина пре и након обраде микро резањем

Анализом профила храпавости пре и након извршене обраде микро резањем може се закључити да је дубина резања једнака:

$$\delta = R_{max_n} - R_{max_o} \cdot \quad (6.1)$$

При чему је:

δ – дубина резања,

R_{max_n} – максимална висина неравнина необрађене површине,

R_{max_o} – максимална висина неравнина обрађене површине.

С обзиром да се обрада микро резањем врши по целом обиму цилиндричне површине, промена пречника цилиндра једнака је двострукој дубини резања.

$$\Delta D = 2 \cdot \delta \quad (6.2)$$

6.1 Опрема коришћена за експериментална истраживања

За потребе експерименталних испитивања резања константном силом развијен је специјални уређај, који омогућује истовремену обраду микро резањем цилиндричних делова константном силом продирања алата у материјал предмета обраде и мерење главне силе резања (Слика 4.2). Развијени уређај пружа могућност изузетно прецизне контроле силе продирања алата у материјал предмета обраде, која се мери у времену. Вредности силе продирања алата у материјал предмета обраде и главне силе резања се преко микроконтролера преузимају и дијаграмски приказују у коришћеној апликацији, која пружа могућност чувања свих прикупљених података. Развијени уређај пружа могућност измене резног алата, тако да се може истраживати утицај геометрије резног алата на квалитет обрађене површине микро резањем. Резни клин се специјално дизајнираним обртним системом прилагођава радном комаду, што обезбеђује налагање резне ивице алата целом дужином на предмет обраде. На тај начин се елиминишу грешке настале услед бацања вретеништа машине, као и грешке настале услед непрецизне израде носача резног алата.

Након обраде узорака на специјално развијеном уређају за микро резање константном силом мерена је промена кружности и смањење пречника цилиндричних предмета обраде. Мерења су изведена мерном машином „Carl Zeiss CONTURA G2 ACTIV“ тачности $1,5 \mu\text{m} + L/350 \mu\text{m}$, где је са L означена мерена дужина у mm (Слика 4.9). Сва мерења извршена су у контролисаним условима (21°C и влажност ваздуха 40% до 60%). Приликом мерења коришћен је софтвер „Calypso“.

Резултати прелиминарног експерименталног истраживања су јасно показали предности и ограничења испитиване методе микро резања константном силом. На основу тога конструисан је резни алат који изузетно прецизно задаје силу продирања алата у материјал предмета обраде и притом у потпуности елиминише грешку бацања алата, која је узрокована несавршеностима вретеништа машине (Слика 5.1). У циљу смањења површинске храпавости и повећања површинске микротврдоће предмета обраде, развијен је алат за обраду деформисањем површинског слоја цилиндричних предмета обраде (Слика 5.12).

С обзиром да је тврдоћа материјала једна од основних механичких карактеристика материјала, мерење тврдоће предмета обраде извршено је на уређају за одређивање тврдоће материјала по „Rockwell C“ методи који носи ознаку ТК-14-250 (Слика 6.2). Измерена тврдоћа материјала који је коришћен за потребе експерименталних истраживања износи 19 HRC.



Слика 6.2 – Уређај за мерење тврдоће ТК-14-250

Микро геометрија површине предмета обраде представља изузетно значајну карактеристику, у случају када предмет обраде представља део трибомеханичког система. Делови трибомеханичког система релативно се крећу, при чему се неминовно јавља отпор трења, који узрокује загревање и хабање контактних површина. Утицај микро геометрија контактних површина огледа се у интензитету хабања тих површина.

За мерење профила храпавости пре и након обраде микро резањем коришћен је уређај „Talysurf 6”, приказан на слици 6.3, који омогућава дефинисање стања површине и израчунавање основних параметара профила храпавости као што су:

Ra – средње аритметичко одступање профила храпавости од средње линије профила,

Rp – средња висина испупчења профила храпавости,

Rv – средња висина удубљења профила храпавости,

$Rmax$ – максимална висина неравнина профила храпавости,

s – средњи корак локалних испупчења профила храпавости.

Поред основних параметара, уређај пружа могућност добијања и допунских параметара храпавости, од којих је најзначајнија крива носећа профила храпавости. Ова крива представља графичку интерпретацију зависности носеће дужине профила од нивоа равни сечења профила [Branko Ivkovic (1991)].

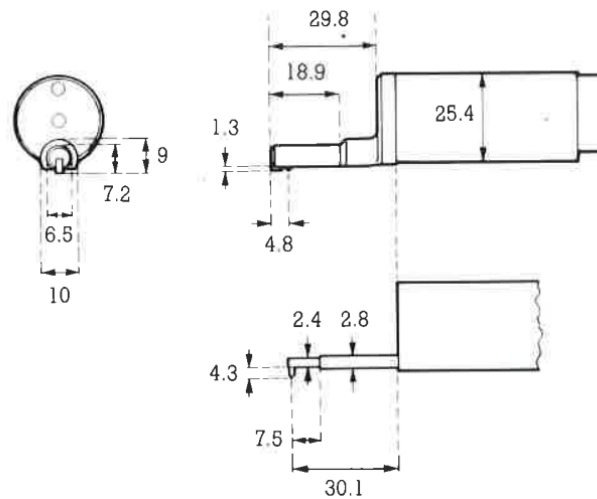


Слика 6.3 – Профилометар „Talysurf 6“

У циљу добијања што реалнијих профила храпавости, приликом мерења коришћен је нефилтриран сигнал, који омогућује одређивање карактеристика површине на референтној дужино од 2,5 mm. Овим је спречена корекција профила храпавости површине коришћењем статистичких метода. Мерење спада у групу контактних мерења, при чему се мерна игла креће по површини чије се карактеристике одређују. Нормална сила којом мерна игла делује на испитивану површину износи 0.5 N. Ова сила обезбеђује стаалан контакт радијуса мерне игле, који износи 2 μm , са површином чије се карактеристике одређују [Operator's handbook, Rank Taylor Hobson Limited, Leicester, (1986)]

За конекцију рачунара и коришћене мерне опреме коришћен је „Serial Port Terminal“, који пружа могућност преузимања свих измерених параметара профила храпавости [М. Егис, 2014.]. На основу координата тачака профила храпавости, измереног растојања од средње линије профила до горње линије профила R_p , као и растојања од средње линије профила до доње линије профила R_v , конструише се профил храпавости површине.

Облик и димензије коришћене мерне игле приказани су на слици 6.4.



Слика 6.4 – Облик и димензије коришћене мерне игле [Operator’s handbook, Rank Taylor Hobson Limited, Leicester, 1986.]

Веома битна геометријска карактеристика, било да је реч о пнеуматским, хидрауличним или цилиндрима мотора са унутрашњим сагоревањем, је кружност, односно цилиндричност. У циљу одређивања утицаја развијеног алата за микро резање на кружност обрађиваног цилиндра, коришћена је координатна мерна машина „HEXAGON“ (модел „TIGO SF“), чији су ходови по x оси 500 mm, по y оси 580 mm и по z оси 500 mm (Слика 6.5). Дозвољена грешка мерења износи $2.2 \mu\text{m} + L/300 \mu\text{m}$, при чему је L мерена дужина у mm. За ово испитивање коришћен је мерни пипак под углом од 90° на чијем врху је рубинска куглица пречника 5 mm.



Слика 6.5 – Координатна мерна машина



Слика 6.6 – Једновретена вертикална глодалица

Све обраде изведене су на CNC нумеричкој једновретој глодалици „HAAS Toolroom Mill TM-1HE“ (Слика 6.6) у ручно позиционираном режиму рада, при чему не постоји кретање по x и y оси, већ се алат спушта по оси z уз одговарајућу брзину ротације алата. Основне карактеристике машине дате су у табели 6.1.

Табела 6.1 – Основне техничке карактеристике нумеричке једноврете глodalице „HAAS Toolroom Mill TM-1HE“

РАДНИ ХОД МАШИНЕ	
Максимални ход по X оси	762 mm
Максимални ход по Y оси	304,8 mm
Максимални ход по Z оси	406,4 mm
РАДНИ СТО МАШИНЕ	
Дужина радног стола	1212,85 mm
Ширина радног стола	266,7 mm
Максимална дозвољена тежина предмета обраде	454 kg
Ширина T жлеба	15,875 mm
Растојање између T жлеба	102 mm
Број T жлебова	3
ГЛАВНО ВРЕТЕНО	
Максимална брзина вретена	4000 o/min
Максимални обртни момент вретена	45 Nm на 1200 o/min
Снага мотора вретена машине	5,6 KW
Начин подмазивања лежајева	Ваздушно / уљем
Хлађење	Ваздушно
ПОМОЋНО КРЕТАЊЕ	
Брзина помоћног кретања	≥5,1 m/min
НОСАЧ АЛАТА	
Пречник алата	≥89 mm
Тежина алата	≥5,4 kg
ОСНОВНИ ПОДАЦИ	
Тежина машине	1315 kg
Притисак ваздуха	6,5 bar

6.2 План експерименталних истраживања

План експерименталних истраживања садржан је у девет тачака, које су поређане хронолошким редом и то:

1. Избор материјала

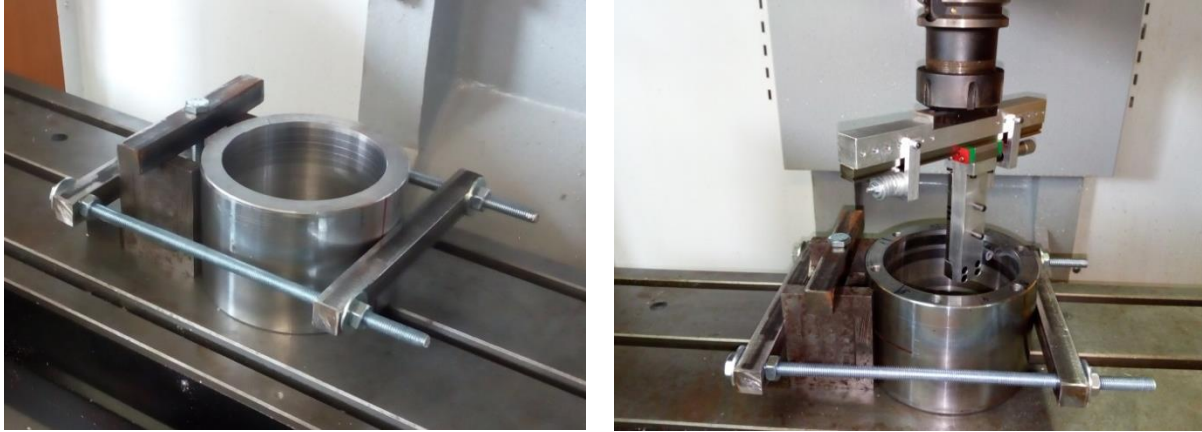
С обзиром на то да је челик најчешће коришћени материјал за израду цилиндара, било да је реч о пнеуматским, хидрауличним или другим цилиндрима, како би се видео практични значај испитиване методе, испитивања су изведена на челику С45 који није термички обрађен.

2. Груба обрада одабраног материјала стругањем

Припрема радног комада за обраду резањем инерцијалном силом извршена је стругањем спољашње и унутрашње цилиндричне површине у једном стезању, након чега је извршено одсецање цилиндра на дужину 100 mm. Обрада је извршена на универзалном стругу старије генерације, како би се постигла што већа девијација кружности. Велика девијација кружности је битна, како би се сагледао утицај испитиване методе на кружност предмета обраде.

3. Конструкција система за базирање и стезање предмета обраде

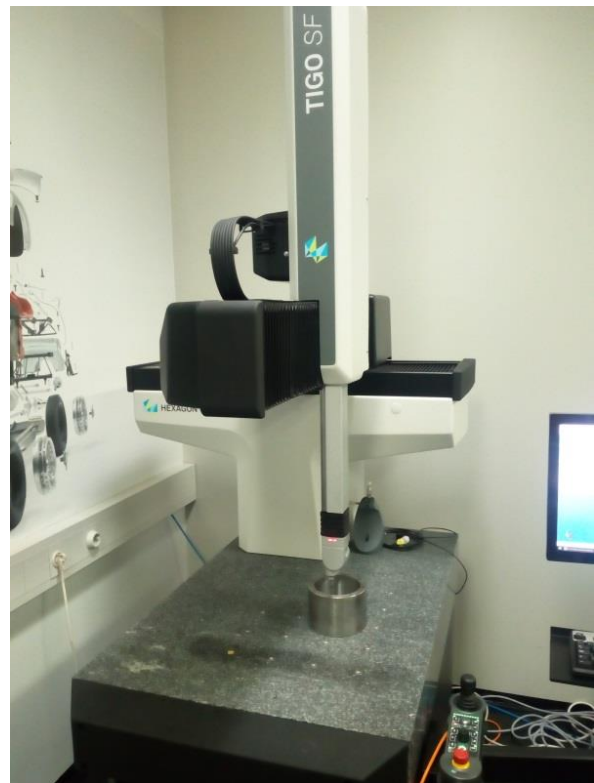
Приликом конструкције стезног прибора неопходно је омогућити лаку монтажу и демонтажу предмета одбраде из стезног прибора. Такође, стезни прибор треба да обезбеди једнозначни положај предмета обраде, како би се након извршеног мерења промене пречника, без остварених грешака базирања, предмет обраде поново поставио у стезни прибор. Битна предност ове методе у односу на комерцијалну обраду резањем са задатом дужином продирања алата у материјал предмета обраде огледа се у занемаривању еластичних деформација изазваних стезањем радног комада. Промене силе продирања резног алата у материјал предмета обраде услед промене пречника, изазване еластичним деформацијама цилиндра, су безначајне и не могу утицати на погоршање кружности дела, што није случај код комерцијалних обрада са задатом дужином продирања алата. Цилиндрични радни комад се базира у призми, која је чврсто везана за радни сто машине централним завртњем. Систем стезања је осмишљен тако да се сила акције и реакције међусобно уравнотежавају и не могу изазвати промену положаја призме у којој се базира радни комад. Стезање радног комада врши се примицањем елемената за стезање равномерним завијањем навртки (Слика 6.7). Одузимање шестог степена слободе кретања, ротација око сопствене осе, врши се поклапањем реперне црте која је постављена на комаду и реперне црте на призми.



Слика 6.7 – Базирање и стезање радног комада

4. Мерење кружности површине у зони извођења обраде микро резањем

Мерење кружности извршено је координатном мерном машином контактном методом у 200 тачака на кружници. Мерење је изведено на дубини цилиндра на којој ће бити изведена обрада, како би добијени резултати кружности након обраде могли релативно да се пореде. Мерење је извршено координатном мерном машином произвођача „HEXAGON TIGO SF“ (Слика 6.8) у контролисаним микро климатским условима, при чему је температура одржавана на $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, а влажност ваздуха на $50\% \pm 2\%$.



Слика 6.8 – Коришћена координатна мерна машина „HEXAGON TIGO SF“

5. Мерење параметара микро геометрије површине пре обраде микро резањем

Како би се одредио утицај технолошког наслеђа на квалитет обрађене површине испитиваном методом, цилиндар је подељен у осам зона (Слика 6.9а), а микро геометрија површине је мерена у свакој зони након сваког пролаза алата. Приликом овог мерења неопходно је цилиндар поставити у призму, како би се спречило његово обртање око сопствене осе. Угао ротације цилиндра одређен је реперном цртом, која се поклапа са реперном цртом на телу призме. Цилиндар је неопходно базирати и по аксијалном правцу, како би мерна игла отпочела мерење профила храпавости увек са исте дубине цилиндра, што се постиже чеоним базирањем цилиндра, тј. равнањем базе цилиндра са чеоном површином призме (Слика 6.9б). Почетни положај мерне игле у односу на призму у којој се базира радни комад се не мења (Слика 6.9).



а)



б)

Слика 6.9 – а) Предмет обраде подељен у осам зона, б) Базирање радног комада у постољу профилометра

6. Обрада унутрашњег цилиндра развијеним алатом у више пролаза

Обрада се изводи у више пролаза алата, истим параметрима обраде на вертикалној нумеричкој глодалици „HAAS Toolroom Mill TM-1HE“. Прелиминарним експерименталним истраживањима одређени су оптимални услови обраде и то: $n=160$ o/min; $V_p=10$ mm/min, са алатом на који је позициониран један тег масе 77,1 g. Обрада је извршена специјалним развијеним алатом, на који је постављена плочица од тврдог метала произвођача „SECO“ ознаке RCMT 10 T3 M0 (R - округла резна плочица, C – леђни угао 7° , M – толеранција одступања димензије плочице, T- тип плочице, 10 – пречник плочице је 10 mm, T3 – дебљина плочице 3,97 mm, M0 – кружна резна плочица) (Слика 6.9). Резна плочица је постављена у одговарајући носач резне плочице

ознаке SRDCN1616H10 (S – причвршћивање резне плочице централним завртњем, R – носач кружне резне плочице, D – тип носача, C – леђни угао носача 7° , N – неутрални смер резања, 1616 – димензије попречног пресека носача алата 16 mm x 16 mm, H – дужина носача резног алата 100 mm, 10 – пречник резне плочице 10 mm) (Слика 6.10). Носач резне плочице је претрпео минималне корекције у погледу смањења дужине и димензија попречног пресека, како би био причвршћен на конструкцију резног алата. Детаљан опис измена дат је у прилогу 3.

Брзина резања којом је вршена обрада у оквиру експерименталних истраживања износи:

$$v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1000} = \frac{114,5 \cdot 3,14 \cdot 160}{1000} = 57,5 \left[\frac{m}{min} \right] \quad (6.3)$$

Branko Ivković (1991)

Познавањем вредности масе алата m , као и растојања тежишта од бочне стране алата Xt , датих у табели 5.4, а на основу измереног пречника цилиндра D који се обрађује (Слика 6.40), могуће је применом образаца 5.2 и 5.42 израчунати силу продирања алата у материјал предмета обраде.

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14159 \cdot 160}{30} = 16,755 [s^{-1}] \quad (6.4)$$

$$F_2 = m \cdot \left(\frac{D - 0,1065}{2} + Xt \right) \cdot \omega^2 - 0,0905 [N] \quad (6.5)$$

$$F_2 = 0,406453 \cdot \left(\frac{0,1145 - 0,1065}{2} + 0,01527 \right) \cdot 16,755^2 - 0,0905 = 2,108 [N]$$

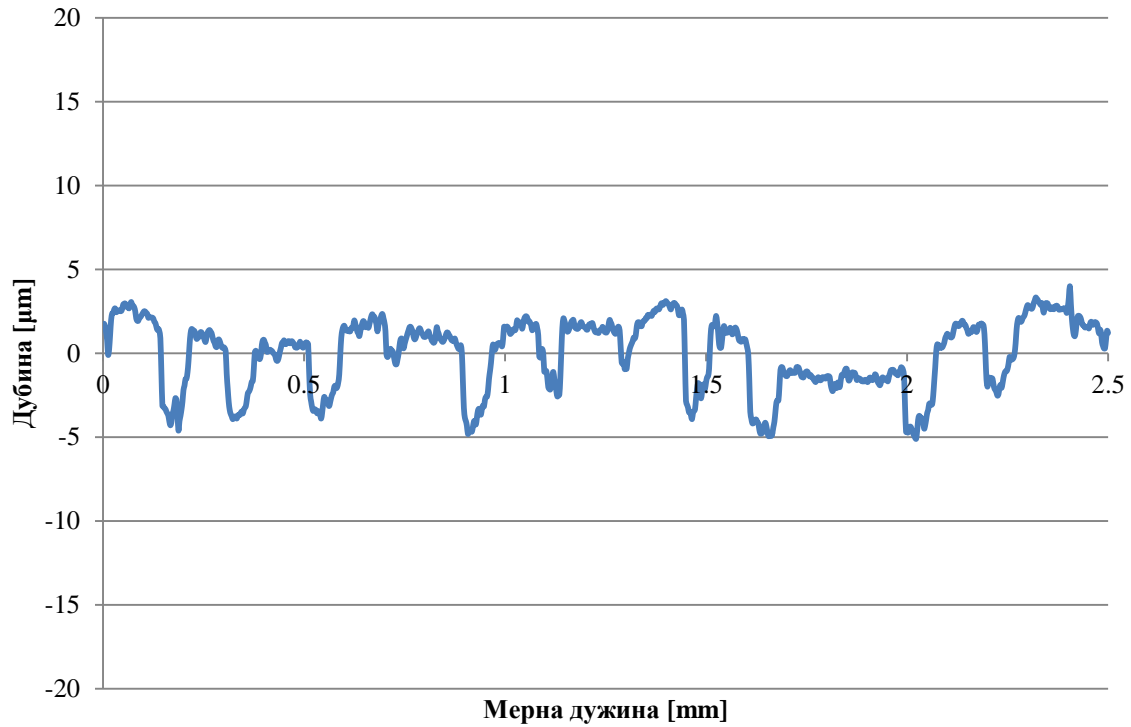
Сила продирања алата у материјал предмета обраде од 2,108 N обезбеђује веома фину регулацију пречника обрађиваног цилиндра. Обрада цилиндра вршена је у дужини од 10 mm. С обзиром на то да сила продирања алата у материјал предмета обраде практично представља центрифугалну силу, која се јавља при окретању ексцентричне масе угаоном брзином ω , пре задавања обртног кретања алата неопходно је резну плочицу довести у контакт са материјалом предмета обраде, како би се услед задавања угаоне брзине избегао удар плочице о материјал предмета обраде. Ово се такође може избећи и постепеним повећањем броја обртаја вретена машине, како би резна плочица остварила контакт са материјалом предмета обраде под дејством мале центрифугалне силе.



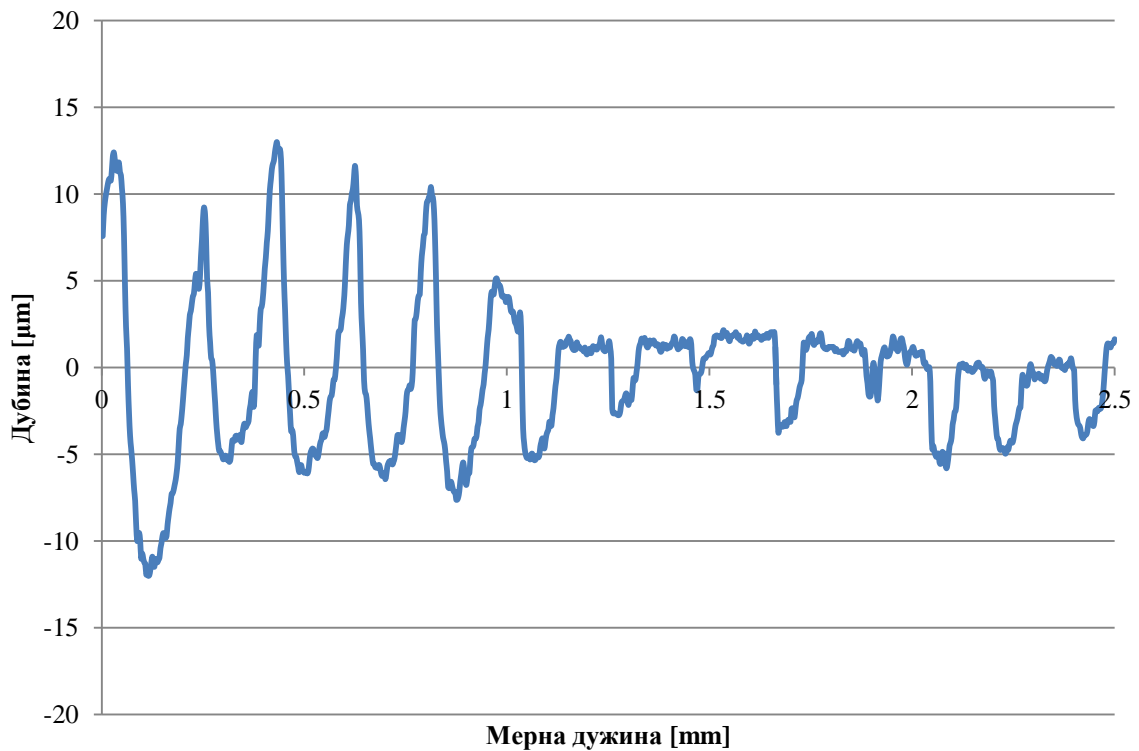
Слика 6.10 – Обрада резањем константном силом

7. Мерење параметара микро геометрије након сваког пролаза

Након завршене обраде у једном пролазу, обрађени цилиндар се демонтира из стезног прибора и поставља на профилометар ради добијања основних параметара микро геометрије површине. Након сваког пролаза алата неопходно је мерење микро геометрије профила храпавости обрађене површине, како би се измерила дубина обраде у том пролазу алата, као и основни и допунски параметри храпавости (Слика 6.11). Веома битан параметар који се добија овим мерењем је и крива ношења профила храпавости. Такође, након сваког пролаза алата мерен је профил храпавости у зони између необрађене и обрађене површине, како би се уочила укупна дубина резања алата (Слика 6.12). Мерење је извођено увек у истој зони цилиндра, што је постигнуто фиксним положајем мерне игле, као и правилним базирањем обрађеног цилиндра. Анализом експерименталних података закључено је да нема значајног одступања параметара храпавости мерених по осам изводница на кружници. У циљу боље прегледности и лакшег праћења насталих промена, након сваког пролаза алата за микро резање праћена је промена микро геометрије у изводницама 1, 3, 5 и 7, које су међусобно распоређене под углом од 90° (Слика 6.9).



Слика 6.11 – Профил хрпавости површине мерен након обраде резањем инерцијалном силом



Слика 6.12 – Профил хрпавости површине у зони између необрађене и обрађене површине резањем инерцијалном силом

8. Мерење кружности дела након последњег пролаза алата за завршну обраду микро резањем.

Мерење кружности пре и након обраде резањем константном силом извршено је координатном мерном машином „HEXAGON TIGO SF“ контактном методом у 200 тачака на кружности на истој дубини цилиндра са истим мерним пипком. Исти експериментални услови омогућавају поређење одступања кружности пре и након извршене обраде, у циљу одређивања утицаја испитиване методе на кружност предмета обраде.

9. Обрада површине методом „ball burnishing“ у циљу смањења храпавости и повећања тврдоће површинског слоја обрађиване површине.

Досадашња експериментална истраживања у области обраде пластичном деформацијом површинског слоја предмета обраде котрљањем куглице под дејством нормалне силе показала су да је овом методом могуће постићи површинску храпавост мању од $0,1\mu\text{m}$ [С. Ранђеловић, 2016.]. У том циљу, након обраде цилиндра микро резањем извршена је обрада „ball burnishing“ поступком. За ову врсту обраде развијен је алат приказан на слици 6.13.



Слика 6.13 – Обрада површине методом „ball burnishing“

6.3 Резултати експерименталних истраживања

6.3.1 Утицај процеса микро резања на површинску храпавост предмета обраде

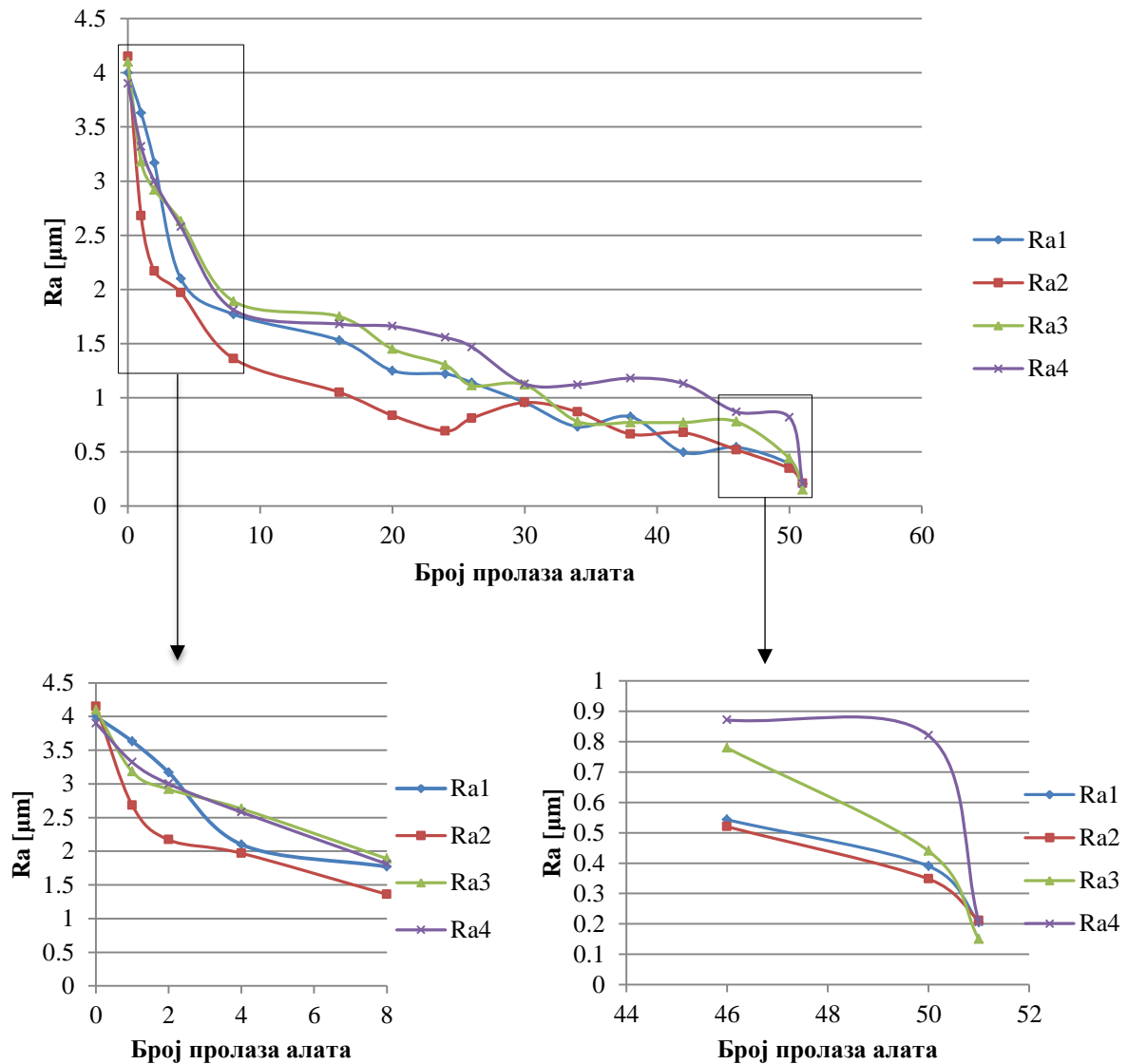
Један од основних циљева експерименталних истраживања било је одређивање утицаја испитиване методе микро резања на површинску храпавост обрађиваног цилиндра. Табеларна зависност површинске храпавости од броја пролаза алата, мерена у четири прецизно дефинисане зоне на цилиндричној површини међусобно распоређене под углом од 90°, приказана је табелом 6.2. У табели 6.2 такође је приказан и утицај „ball burnishing“ поступка обраде на површинску храпавост предмета обраде.

Табела 6.2 – Утицај броја пролаза и врсте обраде на површинску храпавост предмета обраде

Број пролаза алата	Ra1 [μm]	Ra2 [μm]	Ra3 [μm]	Ra4 [μm]	
Резање	0	4	4,15	4,1	3,9
	1	3,63	2,68	3,18	3,32
	2	3,17	2,17	2,92	3
	4	2,1	1,97	2,63	2,58
	8	1,77	1,36	1,89	1,81
	16	1,53	1,05	1,75	1,68
	20	1,25	0,837	1,45	1,66
	24	1,22	0,693	1,302	1,557
	26	1,14	0,811	1,113	1,469
	30	0,957	0,956	1,12	1,129
	34	0,733	0,869	0,781	1,1209
	38	0,825	0,664	0,772	1,181
	42	0,496	0,679	0,772	1,13
	46	0,543	0,52	0,779	0,871
	50	0,39	0,348	0,44	0,82
„Ball burnishing“	51	0,205	0,211	0,15	0,206

Дијаграмски приказ утицаја броја пролаза алата за микро резање на површинску храпавост предмета обраде дат је на слици 6.14. На слици 6.14 приказан је и утицај „ball burnishing“ поступка обраде на површинску храпавост предмета обраде.

Храпавост

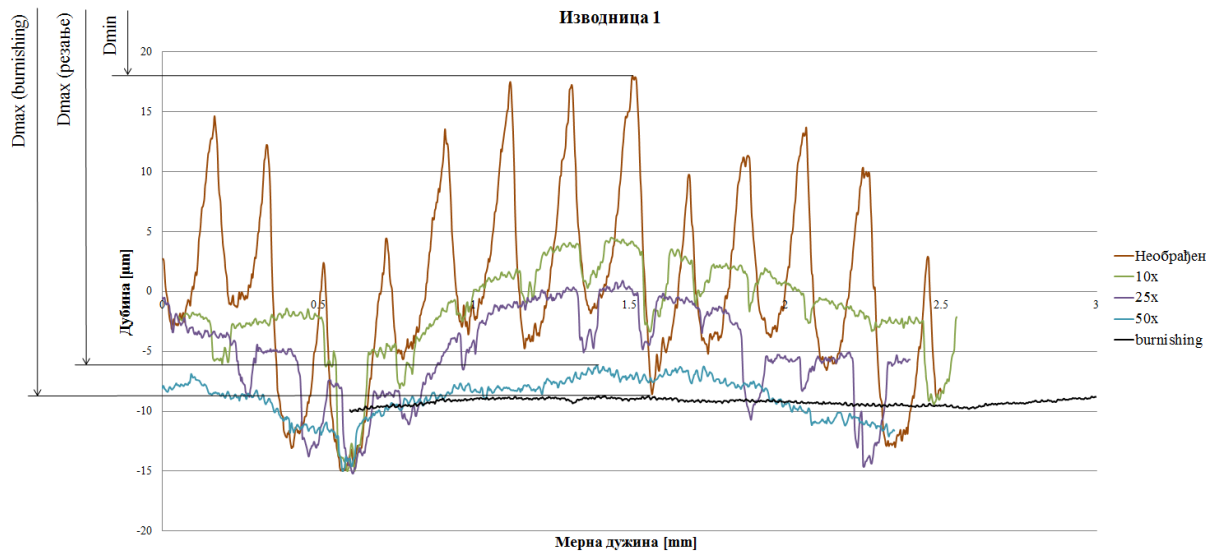


Слика 6.14 – Утицај броја пролаза и врсте обраде на површинску храпавост предмета обраде

6.3.2 Утицај процеса микро резања на дубину регулације промене пречника обрађеног цилиндра

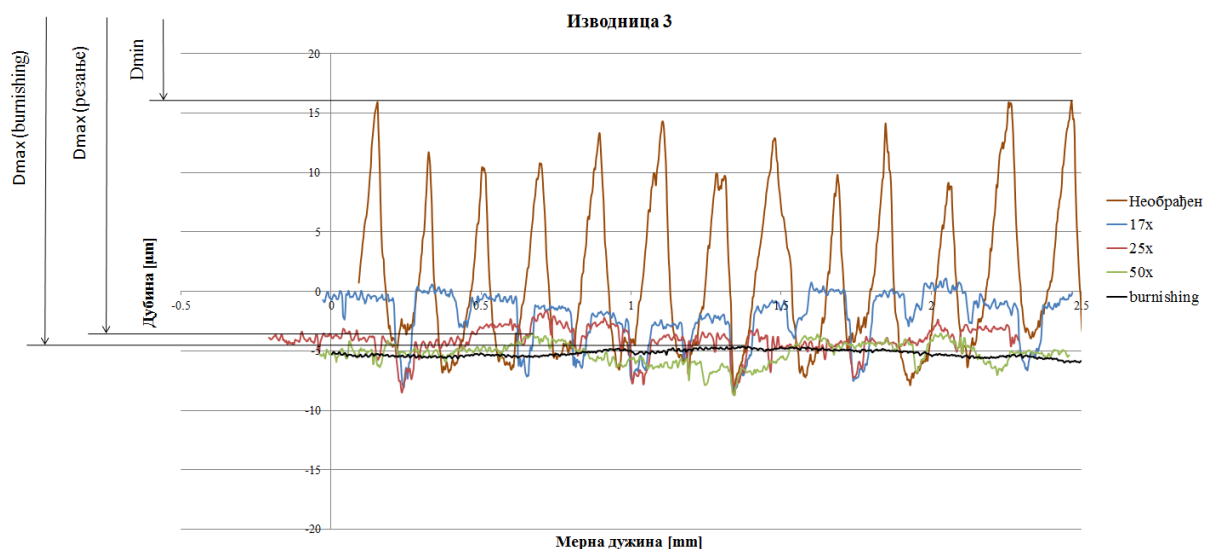
Када је реч о обради микро резањем, настале промене димензија није могуће измерити мерном опремом која је намењена димензионој контроли, јер су силе продирања алата у материјал предмета обраде изузетно мале (око 2 N). Тако мале силе узрокују изузетно мале дубине продирања алата у материјал предмета обраде, при чему дозвољена грешка мерне опреме може бити и неколико пута већа од мерене промене димензије, настале процесом микро резања. Сходно томе, промена пречника предмета обраде прати се променом висина неравнина. Ако се профил храпавости мери у прецизно дефинисаној зони након сваког пролаза алата, преклапањем профила храпавости уочава се разлика у висини неравнина, која представља дубину резања.

Промена висине неревнина мерена је по четири изводнице обрађиване површине у прецизно дефинисаним зонама, које су међусобно померене за 90°. Правилно позиционирање предмета обраде на радном столу уређаја за одређивање параметара храпавости остварује се системом базирања предмета обраде. На слици 6.15 приказани су преклопљени профили храпавости необрађене површине и површина обрађених са 10, 25 и 50 пролаза алата за микро резање, мерени на изводници 1. Такође је приказан и профил храпавости површине, измерен након обраде „ball burnishing“ поступком.



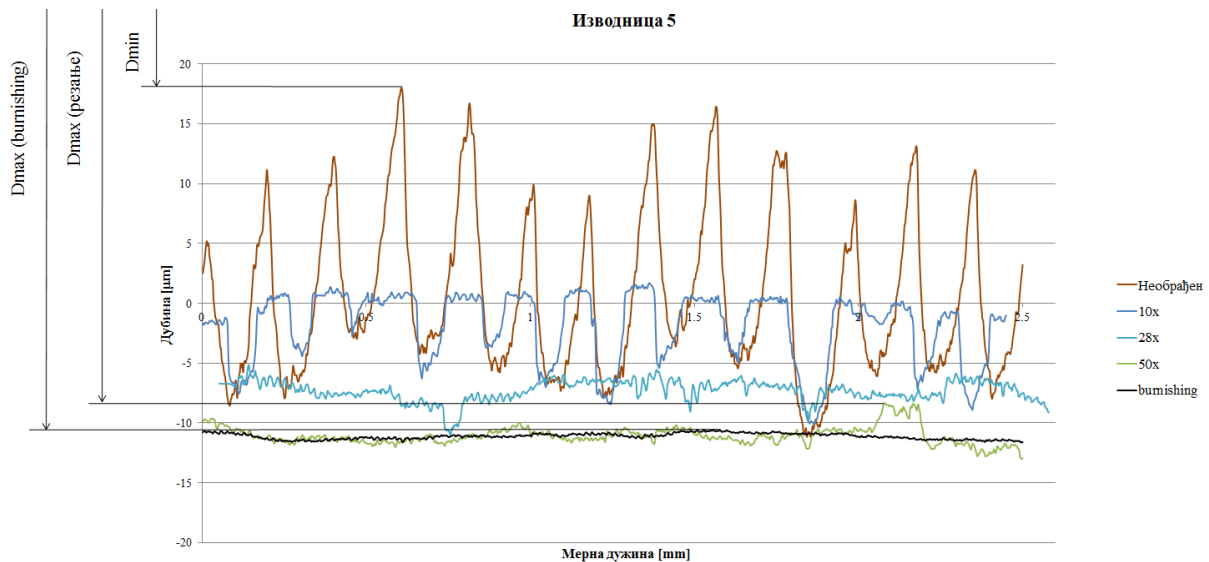
Слика 6.15 – Утицај броја пролаза и врсте обраде на пречник предмета обраде по изводници 1

На слици 6.16 приказани су преклопљени профили храпавости необрађене површине и површина обрађених са 17, 25 и 50 пролаза алата за микро резање, мерени на изводници 3. Такође је приказан и профил храпавости површине, измерен након обраде „ball burnishing“ поступком.



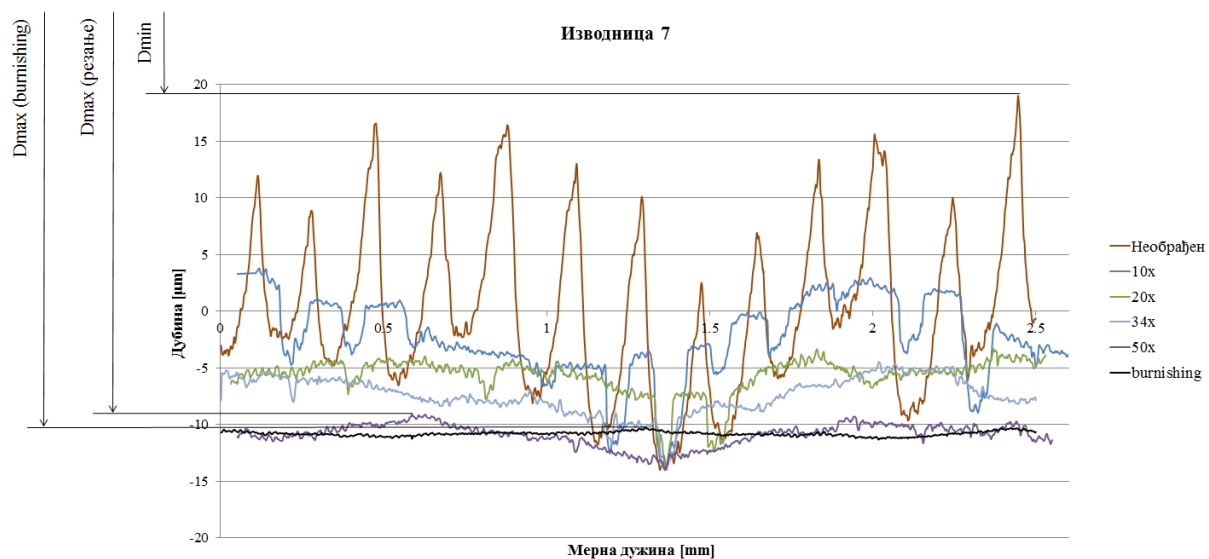
Слика 6.16 – Утицај броја пролаза и врсте обраде на пречник предмета обраде по изводници 3

На слици 6.17 приказани су преклопљени профили храпавости необрађене површине и површина обрађених са 10, 28 и 50 пролаза алата за микро резање, мерени на изводници 5. Такође је приказан и профил храпавости површине, измерен након обраде „ball burnishing“ поступком.



Слика 6.17 – Утицај броја пролаза и врсте обраде на пречник предмета обраде по изводници 5

На слици 6.18 приказани су преклопљени профили храпавости необрађене површине и површина обрађених са 10, 20, 34 и 50 пролаза алата за микро резање, мерени на изводници 7. Такође је приказан и профил храпавости површине, измерен након обраде „ball burnishing“ поступком.



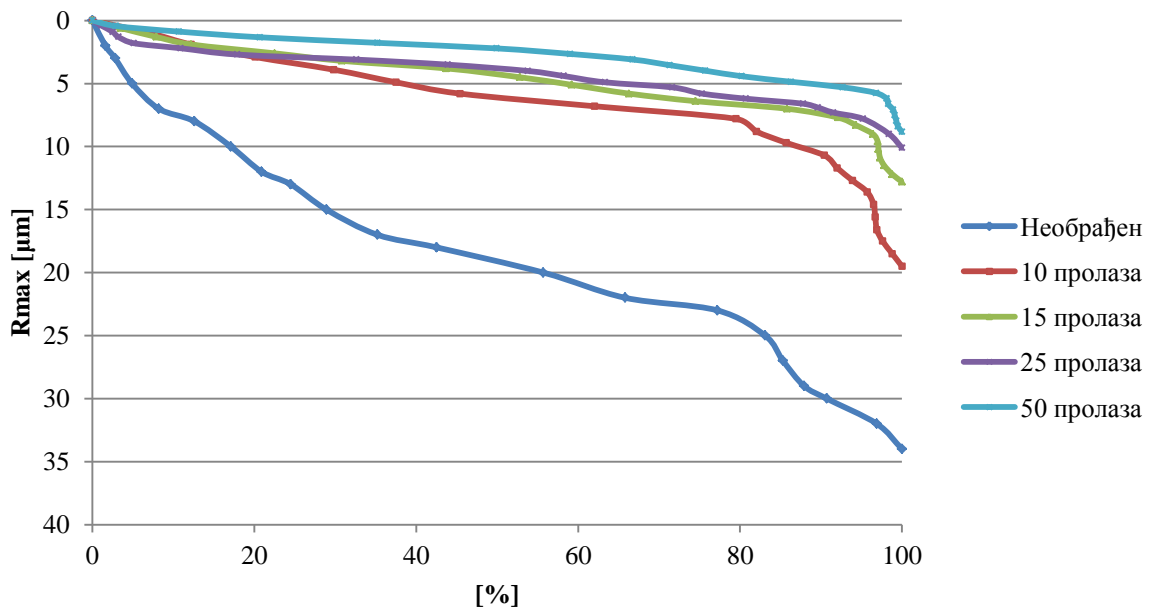
Слика 6.18 – Утицај броја пролаза и врсте обраде на пречник предмета обраде по изводници 7

6.3.3 Утицај процеса микро резања на криве ношења обрађене површине

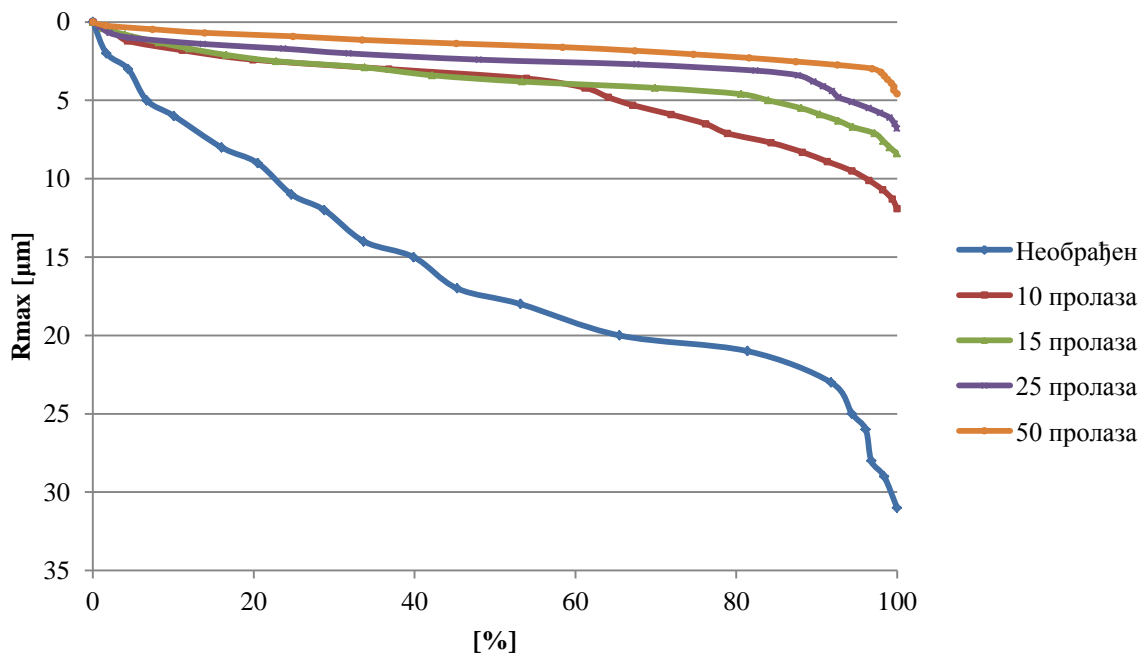
Површине које имају исту површинску храпавост R_a могу имати различит облик и распоред неравнина. Из тог разлога познавање основних параметара храпавости две површине које су у контакту није довољно за изучавање зоне контакта [С. Ранђеловић, 2016.]. У циљу прецизног одређивања расподеле материјала у површинском слоју, конструисана је крива ношења профила храпавости. Релативним поређењем кривих ношења необрађених и обрађених површина могуће је утврдити утицај обраде микро резањем на расподелу материјала у површинском слоју обрађене површине. Профили ношења су конструисани за четири изводнице цилиндра,

распоређене под углом од 90° . Криве ношења су конструисане за различит број пролаза алата, како би се утврдио оптимални број пролаза алата за микро резање у погледу расподеле материјала у површинском слоју обрађене површине.

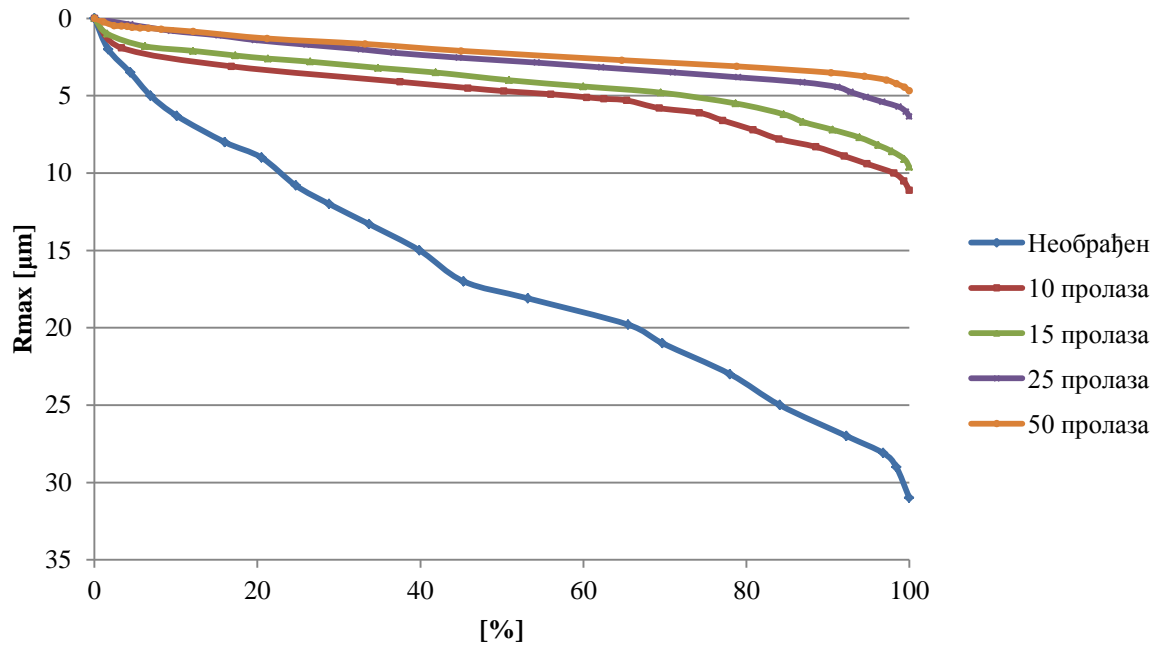
На сликама 6.19, 6.20, 6.21 и 6.22 приказане су криве ношења профила хрпавости по изводницама 1, 3, 5 и 7 респективно. Упоредни прикази показују утицај обраде микро резањем на расподелу материјала у површинском слоју обрађене површине.



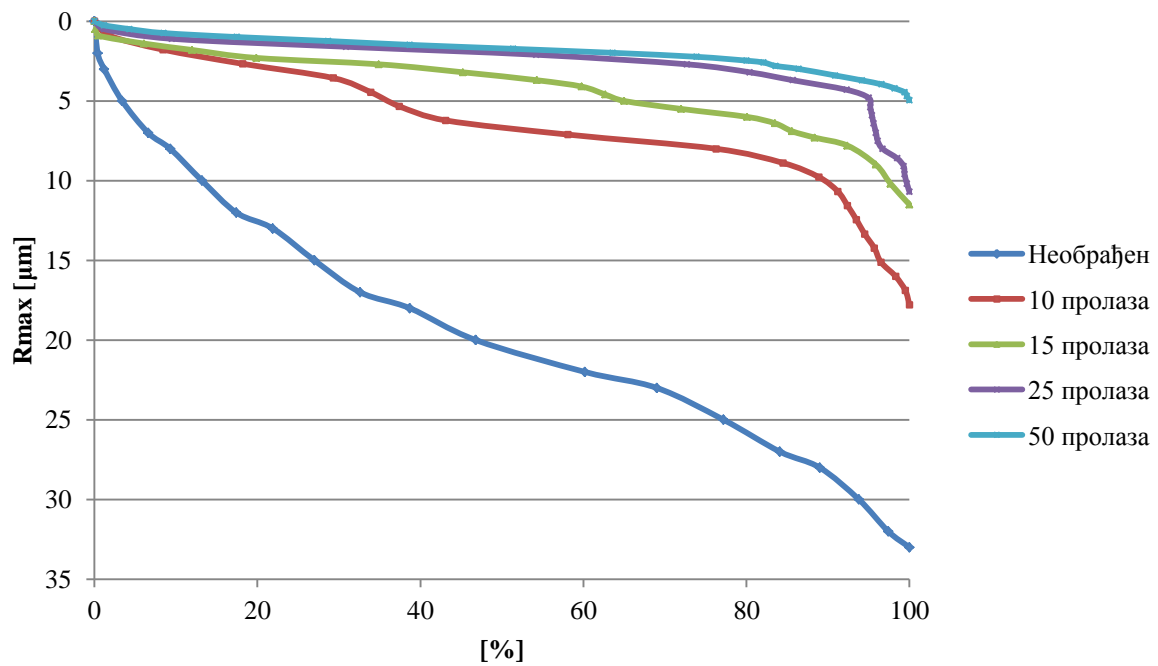
Слика 6.19 – Криве ношења пре и након обраде микро резањем по изводници 1



Слика 6.20 – Криве ношења пре и након обраде микро резањем по изводници 3



Слика 6.21 – Криве ношења пре и након обраде микро резањем по изводници 5



Слика 6.22 – Криве ношења пре и након обраде микро резањем по изводници 7

6.3.4 Одступање кружности пре и након обраде микро резањем

У циљу одређивања утицаја испитиване методе микро резања на кружност обрађеног цилиндра, мерена је кружност цилиндра пре и након обраде испитиваним алатом за микро резање константном силом. За потребе овог испитивања коришћена је координатна мерна машина „HEXAGON TIGO SF“. Сва мерења су изведена у контролисаним микро климатским условима, при чему је температура одржавана на $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, а влажност ваздуха на $50\% \pm 2\%$. Мерење цилиндричности необрађене површине је извршено у зони у којој ће бити изведена обрада микро резањем. Мерење је извршено мерним пипком под углом од 90° са рубинском куглицом пречника 5mm, контактном методом у 200 тачака по кружници. Мерење кружности након обраде развијеним алатом извршено је у истим експерименталним условима, коришћењем исте мерне опреме. Обрада микро резањем извршена је силом продирања алата у материјал предмета обраде од 2,108 N (образац 6.5) у 50 пролаза алата. Релативним поређењем кружности пре и након обраде микро резањем јасно се запажа утицај испитиване методе на девијацију кружности. На слици 6.23 приказана је девијација кружности пре (CIR4) и након обраде (CIR5) испитиваним резним алатом. Такође се уочава промена пречника, коју је узроковала изведена обрада цилиндра.

Pc		PART NAME : merenje Cillindra		June 25, 2018		12:24	
		REV NUMBER :		SFR NUMBER :		STATS COUNT : 1	
FCFCIRTY1	MM	○ 0.01					
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
CIR4	0.000	0.010		0.053	0.053	0.043	
CIR5	0.000	0.010		0.043	0.043	0.033	
#	MM	LOC1 - CIR4					
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
D	114.500	0.050	0.050	114.548	0.048	0.000	
#	MM	LOC2 - CIR5					
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
D	114.500	0.050	0.050	114.599	0.099	0.049	

Слика 6.23 – Резултати мерења кружности обрађене и необрађене површине

7. Дискусија добијених резултата

Повећање броја становника на Земљи и непрестана тежња за бољим животним стандардом узрокују изузетно велику потрошњу енергије, чији су ресурси ограничени. Како би се ресурси очували, усвојени су строжији еколошки прописи, који захтевају велике степене корисног дејства свих произведених машина, уређаја и других машинских склопова, који у циљу обављања своје намене троше било који вид енергије. Непрестана тежња за већим искоришћењем енергије намеће све ригорозније захтеве машинској индустрији у погледу димензионе тачности и тачности облика. Са друге стране, строги еколошки прописи теже чистијим процесима обраде, који подразумевају редуковање примене средстава за хлађење и подмазивање, као и њихово адекватно складиштење и рециклирање, што додатно повећава трошкове производње.

Строги захтеви тржишта у погледу димензионе и тачности облика предмета обраде, намећу све већу потребу за истраживањима у овој области. Највећи број машинских обрада се изводи одстрањивањем материјала задатом дубином резања. Основни проблем овог начина обраде представља разлика, која се неминовно јавља између задате и остварене дубине резања. Основни узрок неслагања задате и остварене дубине резања лежи у несавршености елемената система кретања алатне машине. Такође, велики проблем представља и несавршеност вретеништа алатне машине, које у случају обраде крутим алатом узрокује грешке облика обрађиваног цилиндра. Грешке облика предмета обраде настају и као последица еластичне деформације танкозидних предмета обраде приликом стезања, грешака базирања, термичких ширења елемената система кретања алатне машине итд, што је детаљно објашњено у поглављу 3 и илустративно приказано сликама 3.1; 3.2; 3.3; 3.4; 3.5 и 3.6. Непрестана потреба за повећањем димензионе и тачности облика захтева смањење поменутих грешака, па многи истраживачи широм света изучавају овај проблем. Имајући у виду динамику процеса резања, веома је тешко успоставити апсолутну контролу над системом који је Осостављен од више стотина елемената. Најчешће редна веза ових елемената узрокује сабирање грешака у ланцу система, па апсолутна контрола оваквих система није могућа. Унапређење постојећих система може смањити, али не и потпуно елиминисати димензионе и грешке облика предмета обрађених задатом дубином резања. Унапређење постојећих система подразумева мапирање узрока настанка описаних грешака алатне машине, њихово праћење и успостављање зависности димензионе и тачности облика предмета обраде од утицајне величине. На основу успостављене зависности и система праћења утицајне величине, модел предвиђања предвиђа грешку која ће се јавити и преко система кретања је компензује. Међутим, сложен систем, као што је алатна машина, захтева праћење и контролу великог броја утицајних величина, што значајно компликује и поскупљује процес обраде. Модел предвиђања не може у потпуности елиминисати грешку, због сложености процеса обраде и многих утицајних величина које није могуће пратити. Велики проблем код оваквог система јесте немогућност развоја универзалног модела предвиђања, који би компензовао грешку обраде у свим условима рада, за све материјале и режиме обраде. Позиција машине у производњи, температура околине, изложеност сунчевим зрацима, топлотно зрачење других уређаја и машина ка алатној машини, вибрације, режими обраде, коришћени алати и њихова димензија, врста обраде итд. утичу на различите експлоатационе

услове алатне машине, због чега није могуће користити универзални модел предвиђања грешака у систему кретања алатне машине. Непрестано релативно померање елемената система кретања хаба ове елементе, због чега прецизност машине током времена опада. Отуда и неопходност сталног праћења стања елемената система кретања, на основу кога ће се кориговати модел предвиђања, што у значајној мери компликује и поскупљује процес обраде. И поред компензације грешака система кретања алатне машине, на тачност израде дела утиче и похабаност резног алата, грешке базирања и стезања предмета обраде, бацање вретеништа машине итд, што је детаљно анализирано у поглављу 3. Наведени проблеми комерцијалних резних алата и процеса обраде инспиришу истраживаче широм света [J. M. Lee (2010); G. D. Kim (2010); J. Yan (2010); J. Yan (2012); T. Moriya (2010); E. Brinksmeier (2010); E. Brinksmeier (2012); G. H. Granados (2014-1); K. Ashida (2011); G. H. Granados (2012); итд.] да изучавају принципе резања, који се фундаментално разликују од комерцијалних, код којих се задаје дубина резања. Наведени и многи други истраживачи баве се изучавањем процеса резања контролом силе резања, од које зависи дубина резања, тј. димензија предмета обраде. Спроведена експериментална истраживања показују позитивне ефекте резања константном силом, са освртом на проблеме који се могу очекивати. Изведена експериментална истраживања на ову тему изучавала су процес микро резања на микро машинским елементима. Међутим, потреба за великом димензионом тачношћу и квалитетом обрађене површине макро елемената захтева изучавање процеса микро резања макро машинских делова, чиме се ова дисертација бави.

Велики број алатних машина старије генерације, због похабаности елемената система кретања, не може задовољити потребе тржишта у погледу димензионе и тачности облика, због чега многи привредни субјекти нису конкурентни на тржишту. Ремонт ових машина често изискује велика улагања, на шта се економски слаби привредни субјекти тешко одлучују. Ремонт машине би у великој мери умањио димензионе и грешке облика предмета обраде, али их не би потпуно елиминисао. Потпуно елиминисање узрока настанка димензионих и грешака облика могуће је искључиво развојем специјалног резног алата, на чију тачност не утичу несавршености система кретања алатне машине, бацање вретеништа алатне машине, грешке базирања и стезања предмета обраде, термичка ширења елемената система кретања алатне машине итд. Развој таквог алата омогућује постизање високе димензионе и тачности облика предмета обраде на универзалним машинама старије генерације, што би привредне субјекте на тржишту учинило конкурентним.

Све строжији захтеви у погледу димензионе тачности и тачности облика делова произведених машинском обрадом иницирали су експеримент, чији је циљ развој алата за завршну обраду без задате дубине резања. Испитивана метода заснива се на микро резању, при чему се уместо задавања дубине резања задаје сила продирања алата у материјал предмета обраде. У циљу испитивања могућности прецизне регулације пречника цилиндра контролом силе продирања алата у материјал предмета обраде, развијен је уређај приказан на слици 4.2. Као што је детаљно објашњено у поглављу 4, уређај има могућност fine регулације силе продирања алата у материјал предмета обраде, у циљу постизања што финије регулације пречника обрађиваног цилиндра. Прелиминарна експериментална истраживања спроведена су по плану приказаном у табелама 4.1 и 4.2, који је подразумевао обраду цилиндричних делова исте храпавости

при различитим параметрима обраде, при чему је мерена промена пречника, као и утицај овог начина обраде на кружност обрађених цилиндара. У табели 4.5 приказана је промена пречника предмета обраде након извршене обраде резањем константном силом продирања алата у материјал предмета обраде. Анализом табеларних вредности може се уочити да настала промена пречника износи од 0,001 mm до 0,1235 mm, у зависности од параметара обраде. На основу тога може се закључити да испитивана метода пружа могућност изузетно fine регулације пречника цилиндра, па се може користити за обраду делова код којих се захтева висока димензиона тачност. Највеће дубине резања остварене су дејством највеће силе продирања алата у материјал предмета обраде, што је и очекивано. Веома битан закључак, који је проистекао из прелиминарних експерименталних испитивања, је да се изузетно мале промене пречника (око 1 μm), настале резањем константном силом, не могу са одговарајућом тачношћу мерити координатном мерном машином, јер је њена дозвољена грешка већа од настале промене димензије. Стога се резултати не могу релативно поредити, али се добијени подаци могу сматрати корисним, јер потврђују претпоставку да се овом методом заиста могу постићи изузетно мале дубине резања.

Са дијаграма приказаног на слици 4.11 може се закључити да сила продирања алата у материјал предмета обраде од 5 N узрокује промену пречника од неколико μm . То наводи на закључак да се контакт у тим условима остварује само преко врхова неравнина, при чему је промена пречника последица смањења висине врхова неравнина. Обрада овом силом продирања алата у материјал предмета обраде омогућава изузетно фину регулацију пречника. Са дијаграма се уочава да највећа брзина резања и најдуже време обраде узрокују најмању промену пречника, што се не може сматрати прихватљивим. Међутим, дијаграм показује пад дубине резања са повећањем времена обраде за све брзине резања, што указује на појаву системске грешке мерења промене пречника. То се може протумачити једино као последица загревања узорка услед дуже обраде, што је довело до термичког ширења материјала. Мерење пречника обрађене површине извршено је непосредно после обраде, не дозвољавајући предмету обраде да се охлади до температуре при којој је мерен пречник необрађеног дела. Промена температуре од неколико $^{\circ}\text{C}$ довела је до термичких ширења, која су у поређењу са дубинама резања изузетно велика. Све ово наводи на закључак да неке промене услова испитивања, које се на макро нивоу апсолутно могу занемарити, при испитивањима на микро нивоу могу имати изузетно велики утицај. Повећањем силе продирања алата у материјал предмета обраде овај утицај се смањује, што се може видети на дијаграму 4.13, где се јасно уочава повећање дубине резања са повећањем времена обраде. Утицај брзине резања на количину генерисане топлоте уочава се на дијаграмима 4.11 и 4.13, где је измерена минимална промена пречника на пет од шест трагова обраде, који су добијени резањем највећом коришћеном брзином резања. Из свега наведеног, добијени експериментални подаци се могу сматрати корисним као потврда да се овом методом заиста могу постићи изузетно мале дубине микро резања, али се измерене промене пречника не могу посматрати као апсолутне вредности, нити се могу релативно поредити.

Утицај коришћене методе на кружност предмета обраде приказана је у табели 4.7 разликом девијације кружности, пре и након обраде. Позитиван резултат открива траг на коме је постигнуто смањење девијације кружности, док негативан резултат открива траг на коме је измерено повећање девијације кружности у односу на

необрађену површину. Смањење девијације кружности измерено је на осамнаест трагова, док је на девет трагова измерено повећање девијације кружности. Веома је битно запазити да је смањена девијација кружности на свим узорцима који су обрађивани нормалном силом од 5 N (узорци 1, 4 и 7). При сили од 10 N на шест од девет трагова измерено је смањење девијације кружности, док је при сили од 15 N девијација кружности смањена са само три од девет трагова. То наводи на закључак да се са повећањем силе продирања алата у материјал предмета обраде повећава и девијација кружности обрађених површина. Контакт резног алата и материјала предмета обраде се остварује искључиво преко врхова неравнина, па се прецизним остваривањем жељене мере постиже и смањење површинске храпавости. Сходно томе, резање константном силом продирања алата у материјал предмета обраде треба изводити малим силама, које засигурно обезбеђују смањење девијације кружности и прецизно остваривање веома уских димензионих мера.

У циљу испитивања могућности обраде различитих врста материјала предложеном методом резања, експериментална истраживања су спроведена истим параметрима обраде на узорцима од AlCu5PbBi. Анализом вредности измерене промене пречника у зависности од параметара обраде, који су приказани у табели 4.10, може се закључити да испитивана метода омогућује изузетну фину регулацију димензије узорака израђених од AlCu5PbBi. Минимална измерена промена пречника узорака израђених од легуре алуминијума, остварена обрадом резањем константном силом продирања алата у материјал предмета обраде, износи 0,0001 mm, док максимална измерена промена пречника износи 0,0085 mm. За исте параметре обраде узорака израђених од материјала С45 промена пречника се креће у интервалу од 0,0032 mm до 0,0658 mm. Поређењем измерених промена пречника на узорцима AlCu5PbBi и челику С45 при истој брзини резања и нормалној сили, закључује се да испитивана метода има већу дубину регулације пречника на легури алуминијума.

У табели 4.12 приказан је утицај испитиване методе на девијацију кружности узорака израђених од AlCu5PbBi. Експериментална испитивања показују да је остварено смањење девијације кружности на осам од девет трагова обраде. Само на једном трагу је измерено повећање девијације кружности од 3 μm , што се може посматрати и као могућа грешка координатне мерне машине.

Анализом резултата прелиминарних експерименталних истраживања закључено је да се испитивана метода обраде резањем константном силом продирања алата у материјал предмета обраде може користити у циљу постизања велике димензионе тачности и смањења девијације кружности цилиндричних делова израђених од различитих врста материјала.

Прелиминарна експериментална истраживања су изузетно корисна у случају развоја нових производа, нарочито када се нови производ фундаментално разликује од претходног. Тада прелиминарни експеримент има задатак да мапира све предности и недостатке, као и области могуће примене и проблеме који се могу јавити. Добро испланиран и организован експеримент много вреди, само у случају правилног тумачења добијених резултата, без кога развој квалитетног производа није могућ.

Због свега наведеног, у оквиру ове дисертације развијен је резни алат за обраду унутрашњих цилиндричних површина у циљу постизања велике димензионе тачности

и мале површинске храпавости (Слика 5.1). Конструкција резног алата изведена је тако да се једноставном заменом профилисане вођице алат прилагођава пречнику предмета обраде, тако да не постоји ограничење у погледу пречника цилиндра који се овим алатом може обрађивати. Велика цена стандардних алата за завршну обраду унутрашњих цилиндричних површина и узак опсег пречника који се са њима могу обрађивати дају предност развијеном алату. Друга веома битна предност овог алата огледа се у коришћењу округле резне плочице, која теоријски има бесконачно много резних ивица, па се након хабања врха резне плочице плочица закреће за угао који обезбеђује непохабану резну геометрију алата. С обзиром на мале дубине обраде које су присутне у завршним обрадама, угао закретања резне плочице је веома мали, што обезбеђује дужи период њене експлоатације. Након хабања целе резне ивице, резна плочица се мења. Правилним одабиром резне плочице развијеним алатом је могуће вршити обраду различитих врста материјала. Најбитнија предност развијеног алата, у односу на комерцијалне алате за завршну обраду, који раде по принципу задавања жељене дубине резања, огледа се у потпуном елиминисању грешака кретања, које неминовно настају због несавршености елемената система кретања. Такође, завршна обрада развијеним алатом се може изводити на машинама старије генерације са великим бацањем вретеништа (несавршеност кружног кретања вретена алатне машине), што мала предузећа може учинити конкурентним у области завршне обраде унутрашњих цилиндричних површина. Потпуно елиминисање бацања вретеништа машине не захтева ни правилно позиционирање предмета обраде, што наводи на закључак да се развијеним алатом може вршити обрада цилиндричних отвора и у условима када се оса предмета обраде и оса вретеништа машине не поклапају (Слика 3.6). Мимоилажење оса доведиће до минималне промене силе продирања алата у материјал предмета обраде, као последице промене ексцентрицитета резног алата. Са повећањем пречника предмета обраде утицај ове грешке се смањује. Услед стезања предмета обраде може доћи до еластичних деформација, које након обраде и отпуштања дела нестају (Слика 3.1; Слика 3.2 и Слика 3.3). Комерцијални резни алати еластично деформисан предмет обраде обрађују тако да настали елиптични облик унутрашњег цилиндра, настао услед еластичних деформација као последице силе стезања, обрадом претварају у кружни, што након растерећења условљава појаву нове елипсе, која је последица неједнаке дубине резања. Развијени резни алат делује константном силом продирања у материјал предмета обраде, што условљава далеко мање промене у дубини продирања алата у материјал предмета обраде од комерцијалних алата, код којих се задаје дубина продирања. Дакле, развијени алат компензује грешке базирања, грешке стезања, грешке бацања вретеништа машине и грешке настале услед несавршености система кретања.

Обрада цилиндра развијеним алатом за микрорезање представља изузетно фину обраду, при чему се дубином резања управља преко силе продирања алата у материјал предмета обраде. Прелиминарним експерименталним истраживањем утврђено је да мале силе продирања обезбеђују бољу кружност и већу дубину регулације контролисаног пречника цилиндра. Из тог разлога, сва експериментална испитивања развијеног резног алата спроведена су са силама продирања алата у материјал предмета обраде од 2.108 N. Мала вредност силе продирања алата у материјал предмета обраде узрокује изузетно мале промене пречника, које је могуће мерити једино праћењем промена микрогеометрије обрађене површине. С обзиром да се контакт резног клина и

материјала предмета обраде остварује искључиво преко врхова неравнина, праћењем максималне висине неравнина пре и након обраде микрорезањем уочава се настала промена висине неравнина, тј. дубина резања (Слика 6.1). Параметри храпавости обрађене површине мерени су на уређају „Talysurf 6” (Слика 6.3) применом мерне игле са радијусом врха 2 μm (Слика 6.4).

Резултати експерименталних истраживања који су табеларно (Табела 6.2) и дијаграмски приказани (Слика 6.14), описују промену храпавости насталу обрадом микрорезањем у више пролаза алата. Са дијаграма се уочава јасан тренд пада храпавости са повећањем броја пролаза алата. Пад храпавости није линеаран, већ се интензиван пад храпавости запажа на малом броју пролаза алата. Са повећањем броја пролаза алата повећава се контактна површина резног клина и врхова неравнина, па због константне силе продирања алата у материјал предмета обраде дубина резања опада. Смањење дубине резања условљава смањење интензитета пада површинске храпавости. Од 34. до 50. пролаза алата површинска храпавост се у зони 1 умањила за 0,343 μm , у зони 3 се умањила за 0,521 μm , у зони 5 се умањила за 0,341 μm , у зони 7 се умањила за 0,3 μm . За исти број пролаза алата истим параметрима обраде, од 0. до 16. пролаза алата површинска храпавост се у зони 1 умањила за 2,47 μm , у зони 3 се умањила за 3,1 μm , у зони 5 се умањила за 2,35 μm , у зони 7 се умањила за 2,22 μm . Минимална вредност средњег аритметичког одступања профила од средње линије профила R_a остварена микрорезањем константном силом продирања алата у материјал предмета обраде износи $R_a = 0,348 \mu\text{m}$ и измерена је након 50 пролаза алата по изводници 5. Поређење те вредности са вредностима R_a које се могу постићи стандардним машинским обрадама сврстава ову врсту обраде међу најфиније завршне обраде, као што су хоновање и суперфиниш (Табела 7.2). Фотографски приказ ове површине дат је на слици 7.1.



Слика 7.1 – Изглед обрађене површине након 50 пролаза развијеним алатом за микрорезање

Дијаграмски прикази преклопљених профила храпавости, измерених након одређеног броја пролаза алата за микрорезање у тачно дефинисаним зонама обраде, приказани су на сликама 6.15, 6.16, 6.17 и 6.18. Анализом ових дијаграма може се закључити да дубина продирања алата у материјал предмета обраде не зависи линеарно од броја пролаза алата. Тако је дубина резања остварена до 10. пролаза алата једнака дубини резања од 10. до 50. пролаза алата (Слика 6.15). Разлог смањења дубине

резања лежи у повећању контактне површине резног клина и предмета обраде, које због непромењене силе продирања алата у материјал предмета обраде, узрокује пад контактне притиска. Са слика 6.15 и 6.18 се може закључити да се обрадом микрорезањем не може значајније утицати на промену валовитости обрађене површине, која је последица макро обраде.

Анализом споменутих дијаграмских приказа могуће је утврдити дубине обраде у појединим зонама након 50 пролаза алата (Табела 7.1).

Табела 7.1 – Дубина резања након 50 пролаза алата по изводницама 1, 3,5 и 7

Изводница	Дубина обраде након 50 пролаза алата за микрорезање [μm]
1	24
3	20
5	26
7	28

Средња вредност остварене дубине обраде износи 24,5 μm , на основу чега се применом формуле 6.2 може закључити да смањење пречника цилиндра након 50 пролаза алата износи 49 μm , што у просеку износи приближно 1 μm по пролазу алата. Ради провере коришћене методе мерења, промена пречника након 50 пролаза алата мерена је кординатном мерном машином „HEXAGON TIGO SF“, чија дозвољена грешка износи приближно 2 μm . Промена пречника цилиндра представља разлику пречника цилиндра пре и након извршене обраде микрорезањем, при чему је мерење извршено у истој зони цилиндра при истим условима испитивања (Слика 6.40). Измерена промена пречника износи 114,599 mm - 114,548 mm = 0,051 mm, односно 51 μm . Разлика измерене промене пречника на кординатној мерној машини и промене пречника одређене методом поређења профила храпавости износи 2 μm , што представља дозвољену грешку координатне мерне машине. На основу тога се може закључити да је коришћена метода мерења промене пречника цилиндра апсолутно поуздана. Поред мерења пречника пре и након обраде, мерена је и девијација кружности. Из извештаја мерења (Слика 6.40) се може закључити да је процесом микрорезања смањена девијација кружности за 0,01 mm, што представља значајно побољшање облика.

У циљу смањења површинске храпавости и повећања тврдоће површинског слоја обрађиване цилиндричне површине, развијен је алат за обраду пластичном деформацијом површинског слоја предмета обраде (Слика 5.3). Обрадом „ball burnishing“ поступком поред смањења храпавости постиже се и повећање тврдоће површинског слоја, што је за делове трибомеханичког система који су изложени хабању од суштинске важности [М. Вабич, 2017.]. Један такав трибомеханички систем представља клип, који преко клипних прстенова остварује контакт са цилиндром. Повећање тврдоће цилиндра ће смањити интензитет његовог хабања кроз време, док ће се интензитет хабања клипних прстенова повећати. С обзиром на велику разлику у цени клипних прстенова и цилиндра, економски је исплативија замена истрошених прстенова од похабаног цилиндра. На слици 7.2 приказана је обрађена површина поступком „ball burnishing“ након 50 пролаза алата за микрорезање. Овом обрадом је постигнуто средње аритметичко одступање профила од средње линије профила $R_a=0,15 \mu\text{m}$.



Слика 7.2 – Површина обрађена „ball burnishing“ поступком обраде

Експериментална истраживања спроведена у оквиру докторске дисертације [С. Ранђеловић, 2016.] показују да се овим поступком могу постићи много мање површинске храпавости $Ra=0,062 \mu m$ пенетрацијом куглице до оптималне дубине. Такође је утврђено да је оптимална дубина пенетрације куглице приближно једнака средњој висини испупчења профила храпавости површине (R_p).

Јасно је да обрада „ball burnishing“ поступком није изведена оптималним параметрима обраде који би резултовали знатно мању храпавост од остварене. Циљ изведеног експеримента је испитивање могућности комбиновања различитих метода обраде, у циљу постизања што бољег квалитета обрађене површине, док су могућности овог поступка обраде у погледу површинске храпавости детаљно објашњене у оквиру докторске дисертације [С. Ранђеловић, 2016.] и није их потребно додатно доказивати. Експериментална истраживања спроведена у оквиру дисертације [С. Ранђеловић, 2016.] показују да се „ball burnishing“ поступком обраде не може значајније променити димензија предмета обраде. Из свега наведеног, може се закључити да се обрадом „ball burnishing“ поступком након обраде микрорезањем константном силом може постићи значајнија промена димензије предмета обраде, изузетно мала површинска храпавост, повећање микротврдоће и смањење девијације кружности цилиндричних предмета обраде.

Криве ношења површина пре и након обраде микрорезањем са 10, 15, 25 и 50 пролаза алата приказане су на сликама од 6.19 до 6.22. Криве ношења су добијене мерењем профила храпавости у 4 зоне обрађиваног цилиндра које су међусобно померене за угао 90° . Анализом приказаних профила ношења јасно се може уочити позитиван утицај испитиване методе микрорезања на расподелу материјала у површинском слоју. Највећи ефекат у погледу расподеле материјала у површинском слоју предложена метода остварује након 10 пролаза алата док се са даљим повећењем броја пролаза алата тај ефекат смањује. С обзиром на то да обрада предложеном методом не смањује валовитост обрађене површине, може се закључити да је

побољшање расподеле материјала у површинском слоју обрађене површине остварено на рачун смањења површинске храпавости.

Табела 7.2 – Вредности Ra које се постижу различитим врстама обраде [М. Lazić, 2002.]

Поступак обраде	Средње аритметичко одступање профила од средње линије профила Ra (μm)															
	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	200	400	800
Ручна обрада																
Грубо турпијање																
Фино турпијање																
Ливење																
У песку																
У кокилама																
Под притиском																
Ковање																
Топло слободно																
Топло у калупу																
Хладно у калупу																
Ваљање																
Топло																
Хладно																
Пескарење																
Сачмарење																
Гасно резање																
Стругање																
Грубо																
Фино																
Рендисање																
Грубо																
Фино																
Глодање																
Грубо																
Фино																
Бушење																
Развртање																
Брушење																
Грубо																
Фино																
Полирање																
Механичко																
Електрично																
Хоновање																
Суперфиниш																
Обрада навоја																
Резање																
Ваљање																
Обрада зубаца																
Рендисање																
Глодање																
Брушење																

8. Закључци

Обрада микро резањем представља изузетно популарно научно-истраживачко поље, при чему се највећи број истраживања бави проблемима израде микро делова. Међутим, све строжији захтеви за повећањем димензионе тачности макро делова, уз захтевани квалитет обрађене површине, намећу потребу за микро обрадом макро делова. Анализом конвенционалних поступака обраде мапирани су кључни проблеми због којих није могуће постићи велику димензиону тачност предмета обраде, који су садржани у несавршеностима вретеништа и система кретања алатне машине, грешкама базирања и стегања предмета обраде, еластичној деформацији предмета обраде услед дејства силе продирања алата у материјал предмета обраде, термичким ширењима елемената система кретања алатне машине итд. У циљу елиминисања димензионе и грешке облика предмета обраде, развијен је уређај за испитивање процеса резања константном силом продирања алата у материјал предмета обраде. Изведена прелиминарна експериментална истраживања резања константном силом продирања алата у материјал предмета обраде указала су на предности и недостатке испитиване методе:

- Резањем константном силом продирања алата у материјал предмета обраде смањује се девијација кружности цилиндричних предмета обраде. Девијација кружности се смањује са смањењем силе продирања алата у материјал предмета обраде. Мале силе продирања алата у материјал предмета обраде остварују контакт са предметом обраде по врховима неравнина при чему нехомогеност материјала не утиче на процес обраде. Дејством веће силе, резни клин продире у материјал предмета обраде испод корена неравнина, што доводи до велике дубине резања, која услед нехомогености материјала може да варира. Зона повећане тврдоће до које дође резни клин узрокује повећање отпора резања, тј. смањење дубине резања, што узрокује повећање девијације кружности предмета обраде.
- Испитивана метода пружа могућност изузетно fine регулације пречника цилиндра, па се може користити за обраду делова код којих се захтева висока димензиона тачност.
- Изузетно мале промене пречника, настале резањем константном силом продирања алата у материјал предмета обраде од неколико N , није могуће мерити кординатном мерном машином, чија је дозвољена грешка приближно једнака насталој промени пречника.
- Претварање механичке у топлотну енергију током процеса обраде микро резањем загрева предмет обраде, што доводи до његовог термичког ширења. Загревање предмета обраде за неколико $^{\circ}C$ доводи до промене пречника материјала, која може бити већа од настале промене пречника поступком микро резања. Сходно томе, мерење пречника предмета обраде пре и након обраде, у циљу контроле остварене дубине резања, мора се изводити при истој температури предмета обраде, како би се елиминисала описана грешка мерења.
- Поређењем измерених промена пречника на узорцима израђеним од легуре $AlCu5PbV_i$ и челика $C45$ при истој брзини резања, истој нормалној сили и истом

времену обраде, закључује се да испитивана метода има већу дубину регулације пречника на легури алуминијума.

- Испитивана метода показује подједнако добре резултате у погледу смањења девијације кружности на оба испитивана материјала.

Прелиминарна експериментална истраживања указала су на проблем мерења остварене промене пречника. Мерење настале промене пречника цилиндра услед резања константном силом, вршено је кординатном мерном машином чија је дозвољена грешка, при одређеним параметрима обраде, једнака насталој промени пречника цилиндра. Резањем малом силом продирања алата у материјал предмета обраде настају промене микро геометрије површине, па процес обраде називамо микро резање. С обзиром на то да кординатна мерна машина служи за мерење макро геометрије предмета обраде, настале промене се не могу мерити њоме.

Резултати прелиминарних експерименталних истраживања јасно су указали на предности ове врсте обраде, као и на недостатке које треба отклонити конструкцијом и начином испитивања алата за завршну обраду цилиндричних отвора инерцијалном силом. Испитивањем развијеног алата закључено је:

- Обрадом развијеним алатом за микро резање могуће је постићи храпавост која ову врсту обраде сврстава међу најфиније завршне обраде, као што је полирање.
- Обрада развијеним алатом за микро резање омогућава изузетно фину регулацију пречника обрађиваног цилиндра. Настала промена пречника након 50 пролаза алата при непромењеним утицајним параметрима обраде износи приближно 50 μm . То практично значи да овај начин обраде пружа могућност регулације пречника са прецизношћу 1 μm па и мање, јер се са повећањем броја пролаза алата смањује дубина резања при непромењеним осталим параметрима обраде. Смањењем силе продирања алата у материјал предмета обраде могуће је остварити још финију регулацију пречника предмета обраде. Овим су потврђене друга и трећа хипотеза.
- Обрадом развијеним алатом за микро резање смањује се девијација кружности обрађене површине. Забележено смањење девијације кружности за 0,01 mm при промени пречника од 0,05 mm представља значајно побољшање. Комерцијални поступци обраде врше обраду алатима који имају задату путању по којој се крећу. Путања зависи од бацања вретеништа машине, квалитета израде алата, прецизности система кретања машине итд. Због еластичних деформација које настају стецањем танкозидних цилиндричних предмета обраде у призми, доћи ће до промене облика предмета обраде, коју комерцијални поступци обраде занемарују. Након обраде унутрашње цилиндричне површине и растерећења предмета обраде еластичне деформације нестају, што доводи до промене облика обрађене површине. Тако се уместо кружног, добија елиптични облик попречног пресека обрађене површине. При резању константном силом продирања алата у материјал предмета обраде, резном алату се не задаје путања по којој ће се кретати током обраде, већ сила којом ће деловати управно на површину обраде. То омогућује компензовање деформација које су настале стецањем предмета обраде и обезбеђује смањење девијације кружности.
- Развијени алат елиминира грешке базирања предмета обраде. Мимоилажење осе дела и осе вретеништа машине реда величине 0,1 mm се може занемарити, јер тако

мала промена ексцентрицитета не узрокује значајне промене силе продирања алата у материјал предмета обраде.

- Развијени алат елиминише грешке стезања предмета обраде. Развијени алат компензује еластичне деформације дела настале стазањем танкозидних цилиндричних предмета обраде, при чему настале деформације не могу значајније утицати на промену ексцентрицитета, тј. силе продирања алата у материјал предмета обраде.
- Развијени алат елиминише грешке система кретања машине. С обзиром да развијени алат ради по принципу константне силе продирања алата у материјал предмета обраде, елиминисане су грешке које су последица немогућности остварења задате дубине резања.
- Развијени алата пружа могућност обраде унутрашњих цилиндричних површина различитих димензија. Пречник и дужина цилиндра који треба обрадити дефинишу дужину профилисане вођице и дужину носача алата. Променом ова два дела могуће је обрађивати цилиндар бесконачно великих пречника и дужина.
- Развијени алат пружа могућност извођења завршне обраде унутрашњих цилиндричних површина на машинама старије генерације, што мања предузећа може учинити конкурентнијим. Елиминисањем грешака у систему кретања машине, као и бацања вретеништа машине, не постоје ограничења у погледу прецизности машине на којој се развијени алат може успешно експлоатисати.
- Ниска цена алата.
- Коришћење стандардне резне плочице обезбеђује ниску цену експлоатације алата.
- Обрада „ball burnishing“ поступком након обраде микро резањем омогућује и постизање изузетно мале површинске храпавости и повећања тврдоће површинског слоја обрађене површине.

Развијени алат представља потпуно нови начин обраде, при чему су у оквиру ове дисертације испитиване само могућности примене и предности испитиване методе у поређењу са комерцијалним методама обраде. С тим у вези будућа истраживања треба усмерити ка испитивању могућности обраде различитих врста материјала, проналажењу оптималних параметара обраде цилиндара израђених од различитих материјала, испитивању утицаја претходне, грубе обраде на квалитет површине обрађене развијеним алатом и ка испитивању поновљивости параметара микро геометрије обрађене површине при непромењеним осталим условима обраде.

Будућа истраживања ће такође бити усмерена и ка испитивању могућности примене развијеног алата за обраду унутрашњих површина сложене геометрије, у циљу смањења површинске храпавости.

Сва наведена будућа истраживања морају претходити индустријској примени алата, који у циљу прилагођавања производним процесима, може претрпети одређене измене.

9. Литература

1. **A. Aramcharoen (2009)**, P. T. Mativenga, *Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel*, Precision Engineering, Vol. 33, pp. 402–407, 2009.
2. **A. G. Ulsoy (1983)**, Y. Koren, F. Rasmussen, *Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools*, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 105, No. 2, pp. 107–112, 1983.
3. **A. Matsubara (2000)**, Y. Kakino, T. Ogawa, H. Nakagawa, T. Sato, *Monitoring of cutting forces in end-milling for intelligent machine tools*, Proceedings of the Fifth International Conference on Progress of Machining Technology (ICPMT), pp. 615, 2000.
4. **A. Sampath (1987)**, S. Vajpayee, *Tool health monitoring using acoustic emission*, International Journal of Production Research, Vol. 25, No. 5, pp. 703–719, 1987.
5. **B. Goedel (2013)**, J. Voisin, D. Dumur, M. El Mansori, M. Frablot, *Flexible right sized honing technology for fast engine finishing*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 62, No. 1, pp. 327–330, 2013.
6. **B. Jeremic (2013)**, D. Vukelic, P. M. Todorovic, I. Macuzic, M. Pantic, D. Dzunic, B. Tadic, *Static friction at high contact temperatures and low contact pressure*, Journal of Friction and Wear, Vol. 34, No. 2, pp. 114–119, 2013.
7. **B. Karpuschewski (2008)**, H. J. Knoche, M. Hipke, *Gear finishing by abrasive processes*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 57, No. 2, pp. 621–640, 2008.
8. **B. Kim (2004)**, M. C. Schmittiel, F. L. Degertekin, T. R. Kurfess, *Scanning grating micro interferometer for MEMS metrology*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, No 4, pp. 807–812, 2004.
9. **B. Tadić (2016)**, S. Ranđelović, P. Todorović, J. Živković, V. Kočović, I. Budak, Đ. Vukelić, *Using a high-stiffness burnishing tool for increased dimensional and geometrical accuracies of openings*, Precision Engineering, Vol. 43, No. 1, pp. 335–344, 2016.
10. **B. W. Ikua (2001)**, H. Tanaka, F. Obata, S. Sakamoto, *Prediction of cutting forces and machining error in ball end milling of curved surfaces—I theoretical analysis*, Journal of International Societies of Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 25, No. 4, pp. 266–273, 2001.
11. **Branko Ivković (1991)**, *Teorija rezanja*, Samostalno autorsko izdanje, 1991.
12. **C. C. Lee (1990)**, *Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic. Parts I and II*, IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 20, pp. 404–435, 1990.
13. **C. Courbona (2016)**, F. Valiorguea, C. Claudina, M. Jacquiera, F. Dumonta, J. Recha, *Influence of some Superfinishing Processes on Surface Integrity in Automotive Industry*, Procedia CIRP, Vol. 45, pp. 99 – 102, 2016.

14. **C. H. Hsieh (2002)**, J. H. Chou, Y. J. Wu, *Optional predicted fuzzy controller of a constant turning force system with fixed metal removal rate*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 123, pp. 22-30, 2002.
15. **C. J. Kim (2004)**, J. Rhett Mayor, J. Ni, *A static model of chip formation in micro scale milling*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, No. 4, pp. 710–718, 2004.
16. **C. R. Liu (1996)**, S. Mittal, *Single-step super finish hard machining: feasibility and feasible cutting conditions*, Robotics Computer-Integrated Manufacture, Vol. 12, No. 1, pp. 15–27, 1996.
17. **C. Y. Xu (2007)**, Y. C. Shin, *Control of cutting force for creep-feed grinding processes using a multi-level fuzzy controller*, Transactions of the ASME—Journal of Dynamic Systems, Vol. 129, No. 4, pp. 480–492, 2007.
18. **Caixu Yue (2015)**, Huize Feng, Zhaonan Zhong and Haitao Zhang, *Development and Application of Materials of Cutting Tools for Machining of Hard Materials*, Recent Patents on Materials Science, Vol. 8, No. 1, 2015.
19. **D. A. Dornfeld (1990)**, *Neural network sensor fusion for tool conditioning monitoring*, Annals of CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 101–105, 1990.
20. **D. A. Dornfeld (2006)**, S. Min, Y. Takeuchi, *Recent Advances in Mechanical Micromachining*, Annals of CIRP, Vol. 55, No. 2, pp. 745-768, 2006.
21. **D. A. Lucca (1991)**, R. L. Rhorer, R. Komanduri, *Energy dissipation in the ultraprecision machining of copper*, Annals of CIRP, Vol. 40, No. 1, pp. 69–72, 1991.
22. **D. A. Lucca (1993)**, Y. W. Seo, *Effect of tool edge geometry on energy dissipation in ultraprecision machining*, Annals of CIRP, Vol. 42, No. 1, pp. 83-86, 1993.
23. **D. Bähre (2012)**, C. Schmitt, U. Moos, *Analysis of the Differences between Force Control and Feed Control Strategies during the Honing of Bores*, Procedia CIRP Vol. 1, pp. 377 – 381, 2012.
24. **D. Choi (1999)**, W.T. Kwon, C.N. Chu, *Real time monitoring of tool fracture in turning using sensor fusion*, International Journal of Advance Manufacturing Technology, Vol. 15, No. 5, pp. 305–310, 1999.
25. **D. E. Dimla (1999)**, *Tool wear monitoring using cutting force measurements*, 15th NCMR, University of Bath, pp. 33–37, 1999.
26. **D. E. Dimla (2000)**, *Sensor Signals for tool wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods*, International Journal of Mechanic Science, Vol. 40, No. 8, pp. 1073–1098, 2000.
27. **D. Kim (2011)**, D. Jeon, *Fuzzy-logic control of cutting forces in CNC milling processes using motor currents as indirect force sensors*, Precision Engineering, Vol. 35, No. 1, pp. 143–152, 2011.
28. **D. Li (2012)**, M. Xu, C. Wei, D. Hu, L. Xu, *A dynamic threshold-based fuzzy adaptive control algorithm for hard sphere grinding*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 60, No. 9-12, pp. 923–932, 2012.

29. **D. W. Hood (2003)**, G. D. Buckner, T. A. Dow. *Force feedback control of tool deflection in miniature ball end milling*. In: ASPE annual meeting, equipment, machines & instruments, 2003.
30. **D. Yi (1990)**, R. Yang, *Grey predictor controller for dc speed control system*, J. Grey Syst., Vol. 2, pp. 189–215, 1990.
31. **Dirk Stöbener (2013)**, Björn Beekhuis, *Application of an in situ measuring system for the compensation of wall thickness variations during turning of thin-walled rings*, CIRP Annals, Vol. 62, No. 1, pp. 511–514, 2013.
32. **Djordje Vukelic (2013)**, Dragomir Miljanic, Sasa Randjelovic, Igor Budak, Dragan Dzunic, Milan Eric, Marko Pantic, *A BURNISHING PROCESS BASED ON THE OPTIMAL DEPTH OF WORKPIECE PENETRATION*, Materials and technology, Vol. 47, No. 1, pp. 43–51, 2013.
33. **E. Brinksmeier (2010)**, O. Roemer, R. Glaube, B. Lunemann, C. V. Kopylow, C. Dankwart, *Submicron functional surfaces generated by diamond machining*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 59, No. 1, pp. 535–538, 2010.
34. **E. Brinksmeier (2012)**, R. Glabe, L. Schonemann. *Review on diamond-machining processes for the generation of functional surface structures*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 5, pp. 1-7, 2012.
35. **E. Budak (2000)**, *Improving productivity and part quality in milling of titanium based impellers by chatter suppression and force control*, Annals of CIRP, Vol. 49, No. 1, pp. 31–36, 2000.
36. **E. I. Rivin (2000)**, *Tooling structure—interface between cutting edge and machine tool*, Annals of CIRP, Vol. 49, No. 2, pp. 591-634, 2000.
37. **E. Uhlmann (2015)**, G. Spur, M. Kleinschnitker, *Honing and Superfinishing, Chapter 5 in Handbook of Ceramics Grinding and Polishing*, ISBN: 978-1-4557-7858-4, 2015.
38. **F. Klocke (2009)**, *Manufacturing processes 2. Grinding, Honing, Lapping*, Berlin: Springer-Verlag, 2009.
39. **F. Ridwan (2012)**, X. Xu, F. C. L. Ho, *Adaptive execution of an NC program with feed rate optimization*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 63, No. 9-12, pp. 1117– 1130, 2012.
40. **G. Byrne (2003)**, D. Dornfeld, B. Denkena, *Advancing cutting technology*, Annals of CIRP, Vol. 52, No. 2, pp. 483-507, 2003.
41. **G. D. Kim (1999)**, C. N. Chu, *Indirect cutting force measurement considering frictional behaviour in a machining centre using feed motor current*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, No. 7, pp. 478–484, 1999.
42. **G. D. Kim (1999)**, C. N. Chu, *Indirect cutting force measurement considering frictional behaviour in a machining centre using feed motor current*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, No. 7, pp. 478–484, 1999.

43. **G. D. Kim (2010)**, B. G. Loh, *Machining of micro-channels and pyramidal patterns using elliptical vibration cutting*, International Journal Adv Manuf Technol, Vol. 49, No. 9-12, pp. 961–968, 2010.
44. **G. H. Granados (2012)**, K. Ashida, I. Ogura, Y. Okazaki, N. Morita, L.R. Huerta, *Micro-groove cutting for different materials using an elastic leaf spring type tool holder*, Key Engineering Materials, Vol. 523–524, pp. 93–98, 2012.
45. **G. H. Granados (2014-1)**, K. Ashida, I. Ogura, Y. Okazaki, N. Morita, H. Hidai, *Development of a non-rigid micro-scale cutting mechanism measuring the cutting force using an optical lever*, International Journal of Automation Technology, Vol. 8, No. 6, pp. 903-911, 2014.
46. **G. H. Granados (2014-2)**, K. Ashida, I. Ogura, Y. Okazaki, N. Morita, H. Hidai, S. Matsusaka, A. Chiba, *Effect of cutting angles during the microgroove fabrication process using a non-rigid cutting mechanism*, 9th International Workshop on Microfactories, pp. 108-115, 2014.
47. **G. H. Granados (2016)**, N. Morita, H. Hidai, S. Matsusaka, A. Chiba, K. Ashida, I. Ogura, Y. Okazaki, *Development of a non-rigid micro-scale cutting mechanism applying a normal cutting force control system*, Precision Engineering, Vol. 43, pp. 544–553, 2016.
48. **Gangwei Cui (2012)**, Yong Lu, Jianguang Li, Dong Gao, Yingxue Yao, *Geometric error compensation software system for CNC machine tools based on NC program reconstructing*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 63, No. 1-4, pp. 169-180, 2012.
49. **H. A. Youssef (2008)**, H. El-Hofy, *Machining technology: machine tools and operations*, CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN 978-1-4200-4339-6, 2008.
50. **H. K. Tonshoff (2013)**, B. Denkena, *Basics of Cutting and Abrasive Processes*, Lecture Notes in Production Engineering, Germany, ISBN 978-3-642-33256-2, 2013.
51. **H. K. Tonshoff (1988)**, *Developments and trends in monitoring and control of machining processes*, CIRP Annals, Vol. 37, No. 2, pp. 611–622, 1988.
52. **H. Liu (2015)**, T. Wang, D. Wang, *Constant Cutting Force Control for CNC Machining Using Dynamic Characteristic-Based Fuzzy Controller*, Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration, Article ID 406294, 8 pages, 2015.
53. **H. N. Li (2016)**, D. Axinte, *Textured grinding wheels: A review*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 109, pp. 8-35, 2016.
54. **H. Sung-jung (2004)**, *Micro Cutting of Tungsten Carbides with SEM Direct Observation Method*, KSME International Journal, Vol. 18 No. 5, pp. 770-779, 2004.
55. **H. Weule (2001)**, V. Huntrup, H. Tritschler, *Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization*, CIRP Annals, Vol. 50, No 1, pp. 61–64, 2001.

56. **I. Buj-Corral (2011)**, J. Vivancos-Calvet, *Roughness variability in the honing process of steel cylinders with CBN metal bonded tools*, Precision Engineering, Vol. 35, No. 2, pp. 289–293, 2011.
57. **I. N. Tansel (2000)**, T.T. Arkan, W.Y. Bao, N. Mahendrakar, B. Shisler, D. Smith, M. McCool, *Tool wear estimation in micro-machining. Part 2: neural-network-based periodic inspector for non-metals*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, No. 4, pp. 609–620, 2000.
58. **J. Bryan (1990)**, *International status of thermal error research*, CIRP Annals–Manufacturing Technology, , Vol. 39, No. 2, pp. 645–656, 1990.
59. **J. Chae (2006)**, S. S. Park, T. Freiheit, *Investigation of micro-cutting operations*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 3–4, pp. 313–332, 2006.
60. **J. Corbett (2000)**, P. A. McKeon, G. N. Peggs, R. Whatmore, *Nanotechnology: international developments and emerging products*, CIRP Annals, Vol. 49, No. 2, pp. 523–546, 2000.
61. **J. D. Kim (1995)**, D. S. Kim, *Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultra-precision machining*, Journal of materials Processing Technology, Vol 49, No 3–4, pp. 387–398, 1995.
62. **J. Grum (2003)**, M. Kisin, *Influence of microstructure on surface integrity in turning-part 2: the influence of a microstructure of the work piece material on cutting forces*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, No. 15, pp. 1545–1551, 2003.
63. **J. H. Chou (2000)**, S. H. Chen, J. J. Lin, *Application of the Taguchi-genetic method to design an optimal grey-fuzzy controller of a constant turning force system*, Journal of Materials Processing Technology, pp. 333–343, 2000.
64. **J. H. Tarn (1989)**, M. Tomizuka, *On-line monitoring of tool and cutting conditions in milling*, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, No. 3, pp. 206–212, 1989.
65. **J. Lee (1993)**, S. Malkin, *Experimental Investigation of the Bore Honing Process*, Transactions of the ASME, Vol. 115, No. 4, pp. 406–414, 1993.
66. **J. Lin (2011)**, R. J. Lian, *Hybrid self-organizing fuzzy and radial basis-function neural-network controller for constant cutting force in turning*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 53, No. 9–12, pp. 921–933, 2011.
67. **J. Liu (1992)**, C. Wang, D. Xiao, P. Liu, *Application of grey system theory to the forecasting and control of air environmental quality*, J. Grey Syst., Vol. 4, pp. 181–192, 1992.
68. **J. M. Lee (2010)**, T.J. Je, D.S. Choi, S.W. Lee, D. Le, S.J. Kim, *Micro grooving simulation and optimization in the roughing stage*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, No. 3, pp. 361–368, 2010.

69. **J. R. Davis (1989)**, *Metals Handbook, Ninth Edition, Vol.16 Machining*, ISBN 0-87170-007-7, 1989.
70. **J. R. S. Prakash (2001)**, A. Senthil Kumar, M. Rahman, S.C. Lim, *A model for predicting tool life for coated micro end mill*, Fourth International Machining and Grinding Troy, Michigan, pp. 149-158, 2001.
71. **J. Shimizu (2013)**, L. Zhou, T. Yamamoto, H. Ojima, T. Onuki, H. Huang, *Mold pattern fabrication by nano scratching*, Int J Automat Technol, Vol. 7, No. 6, pp. 686-693, 2013.
72. **J. Tlustý (1975)**, P. Macneil, *Dynamics of cutting forces in end milling*, Annals of CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 21–25, 1975.
73. **J. Tlustý (1983)**, G.C. Andrews, *A critical review of sensors for unmanned machining*, Annals of CIRP, Vol. 32, No. 2, pp. 563–572, 1983.
74. **J. Webster (2004)**, M. Tricard, *Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding*, CIRP Annals, Vol. 53, No. 2, pp. 597–617, 2004.
75. **J. Wiley (2002)**, Sons, Inc. M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing 2/e*, 2002.
76. **J. Yan (2010)**, Z. Zhang, T. Kuriyagawa, *Fabricating micro-structured surface by using single-crystalline diamond endmill*, Int J Manuf Technol, Vol. 51, pp. 957–964, 2010.
77. **J. Yan (2012)**, A. Horikoshi, T. Kuriyagawa, Y. Fukushima, *Manufacturing structured surface by combining micro indentation and ultraprecision cutting*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 5, pp. 41–47, 2012.
78. **Jans Sölter (2011)**, Christian Grote, Ekkard Brinksmeier, *INFLUENCE OF CLAMPING STRATEGIES ON ROUNDNESS DEVIATIONS OF TURNED RINGS*, Machining Science and Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 338–355, 2011.
79. **Jiandu Ji (2018)**, Rongjing Hong, Fuzhong Sun, Xiaodiao Huang, *Thermal characteristic analysis of Z-axis guideway based on thermal contact resistance*, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 10, No. 10, pp. 1–14, 2018.
80. **K. Ashida (2001)**, N. Morita, Y. Yoshida. *Study on nano-machining process using mechanism of a friction force microscope*, JSME International Journal, Series C, Vol. 44, No. 1, pp. 244–253, 2001.
81. **K. Ashida (2011)**, G. Herrera, I. Ogura, Y. Okazaki, *Basic study of micro-groove cutting using an elastic leaf spring type tool holder*, Intl Conference on Micro Manufacturing, ICOMM, 2011.
82. **K. Bourne (2010)**, S. G. Kapoor, R. E. DeVor, *Study of high performance AFM probe-based micro scribing process*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 132, pp. 030906-1-030906-10, 2010.
83. **K. H. Fuh (1997)**, C. T. Chen, *Constant turning force operation with a fixed metal removal rate via a prior fuzzy controller system*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 70, pp. 116-121, 1997.

84. **K. Kuriyama (2013)**, M. Fukuta, K. Sekiya, K. Yamada, Y. Yamane. *Applying constant pressure unit to ductile mode cutting of hard and brittle materials*, International Journal of Automation Technology, Vol. 7, No. 3, pp. 278–284, 2013.
85. **K. Liu (2003)**, X. P. Li, M. Rahman, *Characteristics of high speed micro cutting of tungsten carbide*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, No. 1–3, pp. 352–357, 2003.
86. **K. Matsushima (1982)**, P. Bertok, T. Sata, *In process detection of tool breakage by monitoring the spindle current of a machine tool*, ASME Journal of Measurement and Control, pp. 145–154, 1982.
87. **K. Miura (2014)**, T. Yamada, M. Takahashi, H. Lee, *Application of Superfinishing to Curved Surfaces*, Key Engineering Materials, Vol. 581, pp. 241-246, 2014.
88. **K. Takahata (2000)**, N. Shibaiki, H. Guckel, *High-aspect-ratio WC-Co microstructure produced by the combination of LIGA and micro-EDM*, Microsystem Technologies, Vol. 6, No. 5, pp. 175–178, 2000.
89. **K. Weinert (2004)**, V. Petzoldt, *Machining of NiTi based shape memory alloy*, Materials Science and Engineering: A, Vol. 378, No.1-2, pp. 180–184, 2004.
90. **L. Alting (2003)**, F. Kimura, H. N. Hansen, G. Bissacco, *Micro engineering*, CIRP Annals, Vol. 52, No. 2, pp. 635-657, 2003.
91. **L. Grama (2010)**, M. Gabor, V. Dattoma, J. Beno, *Study of Different Process Parameters on the Surface Roughness at Superfinishing*, Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Targu Mures, Vol. 7, No. 1, 2010.
92. **L. K. Daneshmend (1986)**, H. A. Pak, *Model Reference Adaptive Control of Feed Force in Turning*, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 108, No. 3, pp. 215-222, 1986.
93. **L. K. Lauderbaugh (1985)**, H. A. Pak, *Model reference adaptive control of cutting force in turning in: Dynamic Systems: Modeling and Control*, Transactions of the ASME, pp. 43–50, 1985.
94. **L. K. Lauderbaugh (1986)**, A. G. Ulsoy, *Model Reference Adaptive Force Control in Milling, Modeling, Sensing, and Control of Manufacturing Processes*, ASME, New York, pp. 165-179, 1986.
95. **Li Yang (2015)**, Zhao Wanhua, Lan Shuhuai, Ni Jun, Wu Wenwu, Lu, Bingheng, *A review on spindle thermal error compensation in machine tools*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 95, pp. 20–38, 2015.
96. **M. A. Davies (1995-1)**, C.J. Evans, K. K. Harper, *Chip segmentation in machining AISI 52100 steel*, ASPE 11, pp. 235–238, 1995.
97. **M. A. Davies (1995-2)**, Y. Chou, C.J. Evans, *On chip morphology, tool wear and cutting mechanism in finish hard turning*, CIRP Annals, Vol. 45, No. 1, pp. 77–82, 1995.

98. **M. Babić (2017)**, V. Kočović, Đ. Vukelić, G. Mihajlović, M. Erić, B. Tadić, *Investigation of ball burnishing processing on mechanical characteristics of wooden elements*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 231, No. 1, pp. 120-127, 2017.
99. **M. C. Shaw (1995)**, *Precision finishing*, CIRP Annals, Vol. 44, No. 1, pp. 343–348, 1995.
100. **M. Eric (2014)**, M. Babic, S. Mitrovic, B. Tadic, D. Dzunic, *Conversion of data into information in tribology research*, Journal of the Balcan Tribological Association, Vol. 20, No. 1, pp. 49 -63, 2014.
101. **M. Estrems (2015)**, M. Arizmendi, A. J. Zabaleta, A. Gil, *Numerical Method to Calculate the Deformation of Thin Rings during Turning Operation and its Influence on the Roundness Tolerance*, Procedia Engineering, Vol. 132, pp. 872-879, 2015.
102. **M. Ganesh (2017)**, Ajay Sidpara and Sankha Deb, *Fabrication of Micro-cutting Tools for Mechanical Micro-machining*, Advanced Manufacturing Technologies, Chapter 1 Machining and Tribology, ISBN: 978-3-319-56098-4, pp. 3-21, 2017.
103. **M. J. Madou (1997)**, *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, Boca Raton, 1997.
104. **M. Lazić (2002)**, B. Nedić, S. Mitrović, *Tehnologija obrade metala rezanjem - izbor režima obrade*, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet, 2002.
105. **M. Liang (2003)**, T. Yeap, A. Hermansyah, S. Rahmati, *Fuzzy control of spindle torque for industrial CNC machining*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, No. 14, pp. 1497–1508, 2003.
106. **M. Lin (1989)**, *An application of the GM (1,1) model: the prediction of flight safety*, J. Grey Syst., Vol. 1, pp. 89–102, 1989.
107. **M. P. Vogler (2002)**, X. Liu, S. G. Kapoor, R. E. Devor, K. F. Ehmann, *Development of meso-scale machine tool (mMT) systems*, Technical Paper - Society of Manufacturing Engineers, pp. 1–9, 2002.
108. **M. P. Vogler (2003)**, R. E. Devor, S. G. Kapoor, *Microstructure-level force prediction model for micro-milling of multi-phase materials*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 125, No 2, pp. 202–209, 2003.
109. **M. P. Vogler (2004)**, R.E. Devor, S.G. Kapoor, *On the modeling and analysis of machining performance in micro endmilling*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, No. 4, pp. 685–705, 2004.
110. **M. Rahman (2001)**, S. Kumar, J.R.S. Prakash, *Micro milling of pure copper*, Journal of materials Processing Technology, Vol. 116, No. 1, pp. 39–43, 2001.
111. **M. Tomizuka (1988)**, S. Zhang, *Modeling and Conventional/Adaptive PI Control of a Lathe Cutting Process*, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 110, No. 4, pp. 350-354, 1988.

- 112.** M. Weck (1997), S. Fischer, M. Vos, Fabrication of micro components using ultra precision machine tools, *Nanotechnology*, Vol. 8, No. 3, pp. 145–148, 1997.
- 113.** M. Week (1980), *Adaptive control in turning*, Proc. Mach. Tool Task Force Conf. 4 Sec. 7.15, 1980.
- 114.** M. Xiao (2003), K. Sato, S. Karube, T. Soutone, *The effect of tool nose radius in ultrasonic vibration cutting of hard metal*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 13, pp. 1375–1382, 2003.
- 115.** M. Y. Yang (2002), T. M. Lee, *Hybrid adaptive control based on the characteristics of CNC end milling*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 4, pp. 489–499, 2002.
- 116.** Monika Maračeková (2012), Marek Zvončan, Augustín Görög, *EFFECT OF CLAMPING PRESSURE ON PARTS INACCURACY IN TURNING*, *Tehnički vjesnik*, Vol. 19, No. 3, pp. 509-512, 2012.
- 117.** N. Ayrilmis (2010), Z. Candan, T. Akbulut, O. D. Balkiz, *Effect of Sanding on Surface Properties of Medium Density Fiberboard*, *Drvna Industrija*, Vol. 61, No. 3, pp. 175-181, 2010.
- 118.** N. Constantinides (1987), S. Bennett, *An investigation of methods for on line estimation of tool wear*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 27, No. 2, pp. 225–237, 1987.
- 119.** N. Ikawa (1985), S. Shimada, H. Tsuwa, *Non-destructive strength evaluation of Diamond for Ultra-Precision Cutting Tool*, *Annals of the CIRP*, Vol. 34, No. 1, pp. 117-120, 1985.
- 120.** N. Kawasegi (2006), N. Takano, D. Oka, N. Morita, S. Yamada, K. Kanda, *Nanomachining of silicon surface using atomic force microscope with diamond tip*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, No. 3, pp. 723-729, 2006.
- 121.** Nermina Zaimović-Uzunović (2007), Dušan Vukojević, Nedim Hodžić, Alma Žiga, *STATIKA*, Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet u zenici, 2007.
- 122.** O. Masory (1980), Y. Koren, *Adaptive control system for turning*, *Annals of the CIRP*, Vol. 29, No. 1, pp. 281–284, 1980.
- 123.** O. Masory (1983), Y. Koren, *Variable Gain Adaptive Control System for Turning*, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 165-173, 1983.
- 124.** O. Masory (1984), *Real-time estimation of cutting process parameters in turning*, *Transactions of the ASME*, Vol. 106, No. 3, pp. 218–221, 1984.
- 125.** **Operator’s handbook, Rank Taylor Hobson Limited, Leicester, England, 1986.**
- 126.** P. Benardos (2014), G. C. Vosniakos, *Offline flexible optimization of feed and speed in computer numerical control machining of sculptured surfaces exploiting dedicated cutting force metamodels*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 228, No. 6, pp.878–892, 2014.

127. **P. K. Basuray (1977)**, B.K. Misra, G.K. Lal, *Transition from Ploughing to Cutting During Machining with Blunt Tools*, *Wear*, Vol. 43, No. 1, pp. 341 – 349, 1977.
128. **P. M. Lister (1993)**, *On-line Measurement of Tool Wear*, PhD Thesis, UMIST, Manchester, UK, 1993.
129. **P. P. Wang (1994)**, C. Y. Tyan, *Fuzzy dynamic system and fuzzy linguistic controllers classification*, *Automatica*, Vol. 30, No. 11, pp. 1769–1774, 1994.
130. **P. Todorović (2013)**, M. Blagojević, M. Jeremić, A. Stanković, A. Marković, B. Trifunović, M. Miljković, *The Impact of One Heat Treated Contact Element on the Coefficient of Static Friction*, *Tribology in Industry*, Vol. 35, No. 4, pp. 345-350, 2013.
131. **Q. Huang (2015)**, L. Guo, I. D. Marinescu, *Grind/Lap of Ceramics with UV-Bonded Diamond Wheels*, *Handbook of Ceramics Grinding and Polishing*, Chapter 8, pp. 360-393, ISBN: 978-1-4557-4557-7858, 2015.
132. **Q. J. Guo (2010)**, J G. Yang, H. Wu, *Application of ACO-BPN to thermal error modeling of NC machine tool*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 5, pp. 667–675, 2010.
133. **R. H. Guerra (2006)**, S. Y. Liang, J. R. Alique, R. H. Haber, *Fuzzy control of spindle torque in high-speed milling processes*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, No. 4, pp. 1014–1018, 2006.
134. **R. H. Todd (1994)**, D. K. Allen. L. Alting, *Manufacturing Processes Reference Guide*, Industrial Press Inc., ISBN 0-8311-3049-0, 1994.
135. **R. J. Lian (2005)**, B. F. Lin, J. H. Huang, *A grey prediction fuzzy controller for constant cutting force in turning*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 9, pp.1047–1056, 2005.
136. **R. K. Kountanya (2004)**, W.J. Endres, *Flank wear of edge-radiused cutting tools under ideal straight-edged orthogonal conditions*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, No. 3, pp. 496–505, 2004.
137. **R. Komanduri (1997)**, D.A. Lucca, Y. Tani, *Technological Advances in Fine Abrasive Processes*, *Annals of the CIRP*, Vol. 46, No. 2, 1997.
138. **R. R. Vallance (2004)**, E. Marsh, P. Smith, *Effect of spherical targets on capacitive displacement measurements*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 822–829, 2004.
139. **R. Ramesh (2000)**, M. Mannan, A. Poo, *Error compensation in machine tools—a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40 No. 9, pp. 1235–1256, 2000.
140. **S. H. Lee (2012)**, *Analysis of ductile mode and brittle transition of AFM nanomachining of silicon*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 61, pp. 71-79, 2012.

141. **S. J. Kim (2007)**, H. U. Lee, D. W. Cho, *Prediction of chatter in NC machining based on a dynamic cutting force model for ball end milling*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, No. 12-13, pp. 1827–1838, 2007.
142. **S. J. Rober (1996)**, Y. C. Shin, *Control of Cutting Force for End Milling Processes Using an Extended Model Reference Adaptive Control Scheme*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp. 339-347, 1996.
143. **S. Kalpakjian (2006)**, S. R. Schmid, *MANUFACTURING, ENGINEERING AND TECHNOLOGY, FIFTH EDITION*, ISBN 0-13-148965-8, 2006.
144. **S. M. Afazov (2013)**, D. Zdebski, S. M. Ratchev, J. Segal, S. Liu, *Effects of micro-milling conditions on the cutting forces and process stability*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213, No. 5, pp. 671-684, 2013.
145. **S. M. Son (2005)**, H. S. Lim, J. H. Ahn, *Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, No. 4-5, pp. 529–535, 2005.
146. **S. Middelhoek (1998)**, T. Fukuda, Wolfgang Menz, *Micro Mechanical Systems, Principles and Technology (Handbook of Sensors and Actuators)*, ISBN: 0-444-82363-8, Vol. 6, Elsevier Science B.V., 1998.
147. **S. Z. He (1993)**, S. Tan, F. L. Xu, *Fuzzy self-tuning of PID controllers*, Fuzzy Sets Syst, Vol. 56, pp. 37-46, 1993.
148. **S. Randjelovic (2015)**, B. Tadic, P. M. Todorovic, Dj. Vukelic, D. Miloradovic, M. Radenkovic, C. Tsiafis, *Modelling of the ball burnishing process with a high-stiffness tool*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 81, No. 9-12, pp. 1509-1518, 2015.
149. **Southwest Center for Microsystems Education (SCME) (2010)**, *LIGA Micromachining Simulation Activity – Part I, booklet*, University of New Mexico, 2010.
150. **T. A. Dow (2004)**, E. L. Miller, K. Garrard, *Tool force and deflection compensation for small milling tools*, Precision Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 31–45, 2004.
151. **T. I. El-Wardany (1996)**, D. Gao, M.A. Elbestawi, *Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, No. 6, pp. 687–711, 1996.
152. **T. K. Doi (2012)**, I. D. Marinescu, S. Kurokawa, *The Current Situation in Ultra-Precision Technology Silicon Single Crystals as an Example*, Advances in CMP/Polishing Technologies, Chapter 3, pp. 15-111, doi.org/10.1016/B978-1-4377-7859-5.00003-X, 2012.
153. **T. K. Puthanangady (1995)**, S. Malkin, *Experimental investigation of the superfinishing process*, Wear, Vol. 18, No. 5, pp. 173-182, 1995.
154. **T. L. Schmitz (2002)**, M. Davies, M.D. Kennedy, *Tool point frequency response prediction for high-speed machining by RCSA*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 123, No.4, pp. 700–707, 2002.

155. **T. Masuzawa (2000)**, *State of the art of micromachining*, CIRP Annals, Vol. 49, No. 2, pp. 473–488, 2000.
156. **T. Moriwaki (1980)**, *Detection for tool fracture by Acoustic Emission measurement*, CIRP Annals, Vol. 29, No. 1, pp. 35–40, 1980.
157. **T. Moriwaki (1991)**, E. Shamoto, *Ultra precision diamond turning of stainless steel by applying ultrasonic vibration*, Annals of CIRP, Vol. 40, No. 1, pp. 559–562, 1991.
158. **T. Moriwaki (1993)**, N. Sugimura, S. Luan, *Combined stress material flow and heat analysis of orthogonal micromachining of copper*, CIRP Annals, Vol. 42, No. 1, pp. 75–78, 1993.
159. **T. Moriwaki (1995)**, E. Shamoto, *Ultrasonic elliptical vibration cutting*, CIRP Annals, Vol. 44, No. 1, pp. 31–34, 1995.
160. **T. Moriya (2010)**, K. Nakamoto, T. Ishida, Y. Takeuchi, *Creation of V-shaped microgrooves with flat-ends by 6-axis control ultraprecision machining*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 59, pp. 61–66, 2010.
161. **T. Y. Kim (1996)**, J. Kim, *Adaptive cutting force control for a machining center by using indirect cutting force measurements*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, No. 8, pp. 925–937, 1996.
162. **Th. Schaller (1999)**, L. Bohn, J. Mayer, K. Schubert, *Microstructure grooves with a width of less than 50 μ m cut with ground hard metal micro end mills*, Precision Engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 229–235, 1999.
163. **U. Heisel (2010)**, C. Kang, *Model-based form error compensation in the turning of thin-walled cylindrical parts*, Production Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 151–158, 2010.
164. **U. Zuperl (2005-1)**, F. Cus, M. Milfelner, *Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end-milling*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 164-165, pp. 1472–1478, 2005.
165. **U. Zuperl (2005-2)**, *A combined system for off-line optimization and adaptive adjustment of the cutting parameters during a ball-end milling process*, Journal of Mechanical Engineering, Vol. 51, No. 9, pp. 542–559, 2005.
166. **U. Župerl (2011)**, F. Čuš, Đ. Vukelić, *VARIABLE CLAMPING FORCE CONTROL FOR AN INTELIGENT FIXTURING*, Journal of Production Engineering, Vol. 14, No. 1, pp.19-22, 2011.
167. **U. Zuperl (2011)**, F. Cus, M. Reibenschuh, *Neural control strategy of constant cutting force system in end milling*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 27, No. 3, pp. 485–493, 2011.
168. **U. Zuperl (2012-1)**, F. Cus, M. Reibenschuh, *Modeling and adaptive force control of milling by using artificial techniques*, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 23, No. 5, pp. 1805–1815, 2012.

- 169.** U. Zuperl (2012-2), F. Cus, *System for off-line feed rate optimization and neural force control in end milling*, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 26, No. 2, pp. 105–123, 2012.
- 170.** V. Grover (2017), A. K. Singh, *A novel magnetorheological honing process for nano-finishing of variable cylindrical internal surfaces*, Materials and Manufacturing Processes, Vol. 32, No. 5, pp. 573–580, 2017.
- 171.** V. Jardret (1988), H. Zahouani, J.L. Loubet, T.G. Mathia, *Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test*, Wear, Vol. 218, No. 1, pp. 8–14, 1998.
- 172.** V. Kočović (2019), S. Kostić, S. Vasiljević, Ž. Santoši, A. Košarac, *Determination of the parasitic forces that occur as a consequence of the roller over the miniature profiled guide*, 9th International Scientific Conference – IRMES 2019, Kragujevac, 2019.
- 173.** W. B. Lee (1999), C.F. Cheung, S. To, *Materials induced vibration in ultra-precision machining*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 89, No. 90, pp. 318–325, 1999.
- 174.** W. B. Lee (2001), C. F. Cheung, *A dynamic surface topography model for the precision of nano-surface generation in ultra-precision machining*, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 43, No. 4, pp. 961–991, 2001.
- 175.** W. B. Lee (2002), C. F. Cheung, S. To, *A Microplasticity Analysis of Micro-Cutting Force Variation in Ultra-Precision Diamond Turning*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 124, No. 2, pp. 170–177, 2002.
- 176.** W. Konig (1993), A. Berktold, K.F. Koch, *Turning versus grinding—a comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies*, CIRP Annals, Vol. 42, No. 1, pp. 39–43, 1993.
- 177.** W. Lang (1999), *Reflexions on the future of microsystems*, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 72, No. 1, pp. 1–15, 1999.
- 178.** W. Y. Bao (2000-1), I. N. Tansel, *Modeling micro-end-milling operations. Part1: analytical cutting force model*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, pp. 2155–2173, 2000.
- 179.** W. Y. Bao (2000-2), I. N. Tansel, *Modeling micro-end-milling operations. Part 2: tool run-out*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, pp. 2175–2192, 2000.
- 180.** Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering Loughborough University, Loughborough (2002), *An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)*, ISBN: 1-84402-020-7, Loughborough University, 2002.
- 181.** X. Liu (2004-1), M.B. Jun, R. E. DeVor, S.G. Kappor, *Cutting mechanisms and their influence on dynamic forces, vibrations and stability in micro-endmilling*, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, California, pp. 13–20, Nov, 2004.

182. **X. Liu (2004-2)**, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, K.F. Ehman, *The mechanics of machining at the micro scale: assessment of the current state of the science*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, No. 4, pp. 666–678, 2004.
183. **X. Wu (2016)**, L. Li, N. He, C. Yao, M. Zhao, *Influence of the cutting edge radius and the material grain size on the cutting force in micro cutting*, Precision Engineering, Vol. 45, pp. 359-364, 2016.
184. **Y. Altintas (1989)**, I. Yellowley, *In-Process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models*, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, No. 2, pp. 149–157, 1989.
185. **Y. Altintas (1992)**, *Prediction of cutting forces and tool breakage in milling from feed drive current measurements*, ASME Journal of Engineering of Industry, Vol. 114, No. 4, pp. 386–392, 1992.
186. **Y. Altintas (2000)**, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, Cambridge University Press, Second Edition, Cambridge, 2000.
187. **Y. Altintas (2011)**, X. Jin, *Mechanics of micro-milling with round edge tools*, CIRP Annals, Vol. 60, No. 1, pp. 77-80, 2011.
188. **Y. Furukawa (1988)**, N. Moronuki, *Effect of Material Properties on Ultra Precise Cutting Processes*, CIRP Annals, Vol. 37, No. 1, pp. 113–116, 1988.
189. **Y. H. Jeong (2002)**, D. W. Cho, *Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, No. 14, pp. 1559–1566, 2002.
190. **Y. Koren (1981)**, O. Masory, *Adaptive control with process estimation*, Annals of the CIRP, Vol. 29, No. 1, pp. 373–376, 1981.
191. **Y. S. Liao (2000)**, J. C. Woo, *Design of a fuzzy controller for the adaptive control of WEDM process*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, No. 15, pp. 2293–2307, 2000.
192. **Y. S. Tarn (1994-1)**, T.C. Li, *On-line monitoring and suppression of self-excited vibration in end milling*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 8, No. 5, pp. 597–606, 1994.
193. **Y. S. Tarn (1994-2)**, Y. S. Wang, *A New Adaptive Controller for Constant Turning Force*, International Journal of Adv Manuf Technol, Vol. 9, pp. 211-216, 1994.
194. **Y. Yan (2007)**, T. Sun, Y. Liang, S. Dong, *Investigation on AFM-based micro/nano CNC machining system*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, pp. 1651–1659, 2007.
195. **Y. Yao (1990)**, X.D. Fang, G. Amdt, *Comprehensive tool wear estimation in finish-machining via multivariate time-series analysis of 3-D cutting forces*, CIRP Annals, Vol. 39, No. 1, pp. 57–60, 1990.

- 196.** **Y. Zhang (2012)**, J. G. Yang, H. Jiang, *Machine tool thermal error modeling and prediction by grey neural network*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 59, No. 9, pp. 1065–1072, 2012.
- 197.** **Yuan Kang (2007)**, Chuan-Wei Chang, Yuanruey Huang, Chuag-Liang Hsu, I-Fu Nieh, Modification of a neural network utilizing hybrid filters for the compensation of thermal deformation in machine tools, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, No. 2, pp. 376–387, 2007.
- 198.** **Z. J. Yuan (1996)**, M. Zhou, S. Dong, *Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 62, No. 4, pp. 327-330, 1996.
- 199.** **Z. Sharifov (2018)**, C. Aliyev, *Study of the impact of surface roughness on wear resistance of ship machinery and mechanisms*, Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Vol. 54, No.126, pp. 28–34, doi: 10.17402/282, 2018.
- 200.** **Zude Zhou (2019)**, Jianmin Hu, Quan Liu, Ping Lou, Junwei Yan, Jiwei Hu, Lin Gui, *The selection of key temperature measurement points for thermal error modeling of heavy-duty computer numerical control machine tools with density peaks clustering*, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 1–11, 2019.
- 201.** **Драган С. Цунић (2015)**, *Анализа процеса трења и хабања нанокмпозита са металном основом*, Докторска дисертација, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- 202.** **С. Ранђеловић (2016)**, *Завршна обрада метала базирана на котрљању крутог алата*, Докторска дисертација, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2016.
- 203.** **Тадих Б. (2013)**, Вукелић Ђ., Јурковић З.: *Алати и прибори*, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2013.

Прилог 1. Одређивање тежишта алата

У циљу одређивања тежишта алата, може се користити Архимедова теорема: Ако се геометријско тело састоји из два мања дела, његово тежиште ће бити колинеарно са тежиштима та два тела [N. Zaimović Uzunović (2007)].

Ако се тело са тежиштем у тачки $C(x_c, y_c, z_c)$, запремине V , састоји из два дела са тежиштима $C_1(x_1, y_1, z_1)$ и $C_2(x_2, y_2, z_2)$ и запреминама V_1 и V_2 редом ($V = V_1 + V_2$), тада важи:

$$x_c = \frac{\int_V x dV}{V}, \quad x_1 = \frac{\int_{V_1} x dV}{V_1}, \quad x_2 = \frac{\int_{V_2} x dV}{V_2} \quad (\text{П1.1})$$

[N. Zaimović Uzunović (2007)]

Одакле следи:

$$V \cdot x_c = \int_V x dV \quad (\text{П1.2})$$

$$= \int_{V_1+V_2} x dV = \int_{V_1} x dV + \int_{V_2} x dV = Vx_1 + Vx_2 \quad [\text{N. Zaimović Uzunović (2007)}]$$

$$(V_1 + V_2)x_c = V_1x_1 + V_2x_2 \quad (\text{П1.3})$$

[N. Zaimović Uzunović (2007)]

$$x_c = \frac{V_1x_1 + V_2x_2}{V_1 + V_2}. \quad (\text{П1.4})$$

[N. Zaimović Uzunović (2007)]

На исти начин се добију и остале две координате тежишта тела y_c и z_c , које у овом случају нису значајне, јер на инерцијалну силу утиче само растојање у правцу осе x .

Из наведених релација се може закључити:

$$C_1C : CC_2 = V_1 : V_2 \quad (\text{П1.5})$$

[N. Zaimović Uzunović (2007)]

Наведени образац би се могао применити само у случају да је густина свих делова склопа идентична. С обзиром на то да је алат склоп челичних и алуминијумских делова, у обрасцу ће уместо запремина фигурисати масе делова, па ће се исти применити у облику:

$$x_c = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 \dots + m_nx_n}{m_1 + m_2 \dots + m_n}, \quad (\text{П1.6})$$

где n представља број делова ексцентричног дела алата.

Развој алата за завршну обраду цилиндричних отвора инерцијалном силом

Екцентрични део алата је расклопљен на делове како би се измерила маса сваког дела појединачно. Масе делова склопа мерене су на прецизној дигиталној ваги Kern АЕТ 200-4NM прецизности 0,1 mg. На слици П1.1 приказане су масе делова склопа.



Тег 1



Тег 2



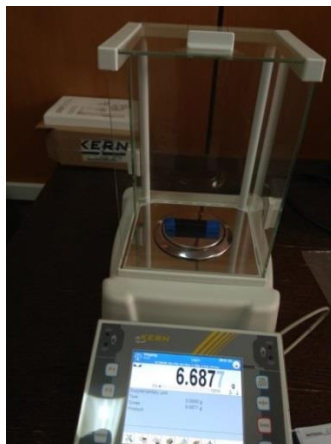
Тег 3



Тег 4



Носач алата



Пластична шина



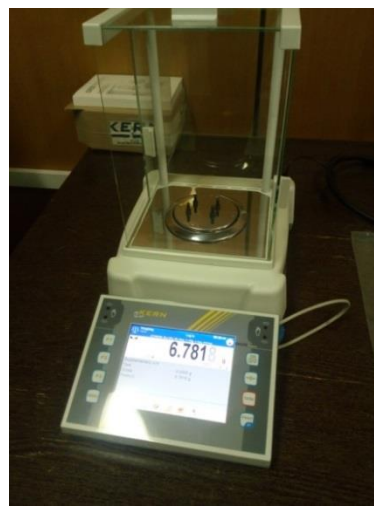
Завртњиви за причвршћивање тегова



Носач резне плочице са резном плочицом



Резна плочица са завртњем за стезање



Завртњиви за стезање носача алата и носача резне плочице

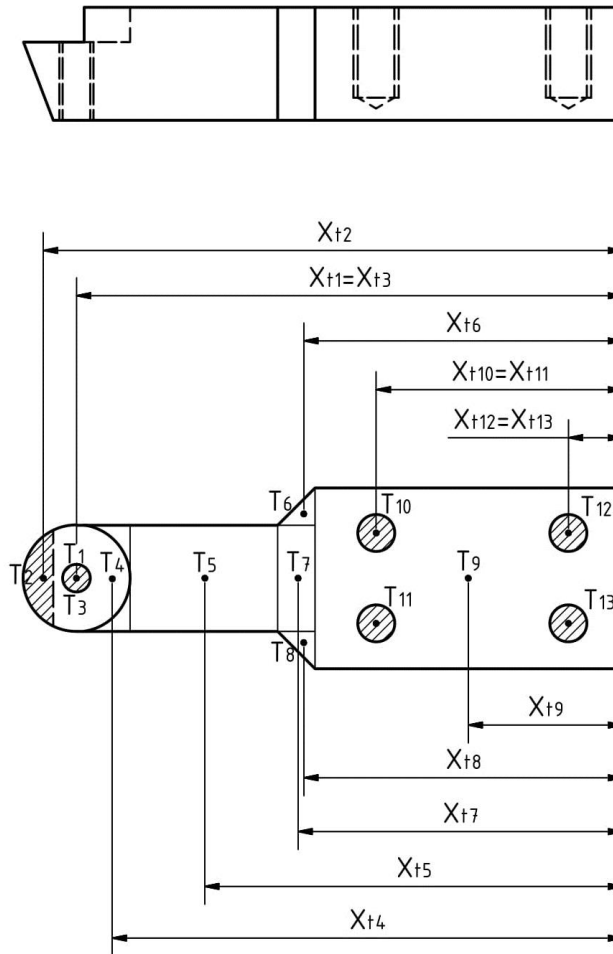


Одстојник

Слика П1.1 – Маса делова алата

На основу познатих маса и димензија делова алата, најпре је пронађено тежиште носача резне плочице. На слици П1.2 приказан је носач резне плочице, који је

у циљу одређивања елементарних маса подељен на 13 једноставних геометријских тела.



Слика П1.2 – Носач резне плочице подељен на једноставна геометријска тела

Укупна маса носача резне плочице једнака је збиру маса свих неосенчених делова носача.

$$m = m_1 - m_2 - m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7 + m_8 + m_9 - m_{10} - m_{11} - m_{12} - m_{13} \quad (\text{П1.7})$$

$$m = V_u \cdot \rho \quad (\text{П1.8})$$

$$m = (V_1 - V_2 - V_3 + V_4 + V_5 + V_6 + V_7 + V_8 + V_9 - V_{10} - V_{11} - V_{12} - V_{13}) \cdot \rho \quad (\text{П1.9})$$

При чему је:

V_1 – запремина ваљка, чија је база круг пречника 9,5 mm а висина 7 mm.

$$V_1 = r^2 \cdot \pi \cdot H \quad (\text{П1.10})$$

$$V_1 = 3,14 \cdot 4,75^2 \cdot 7 = 495,923 \text{ mm}^3$$

V_2 – запремина клина.

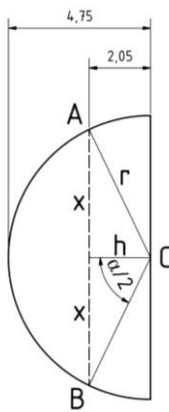
$$V_2 = P_2 \cdot H \quad (\text{П1.11})$$

Будући да је једна база клина површина кружног одсечка, а површина друге базе једнака нули, због поједностављења израза клин је посматран као призма чија је база половина кружног одсечка.

$$P_2 \approx \frac{P_i - P_t}{2} \approx \frac{\frac{r^2 \cdot \pi \cdot \alpha}{360} - \frac{2x \cdot h}{2}}{2} \approx \frac{\frac{4,75^2 \cdot 3,14 \cdot 128,864}{360} - \frac{2 \cdot 4,284 \cdot 2,05}{2}}{2}$$

$$P_2 \approx \frac{25,359 - 8,7822}{2} \approx 8,2884 \text{ mm}^2 \quad (\text{П1.12})$$

$$V_2 \approx 8,2884 \cdot 7 \approx 58,0188 \text{ mm}^3$$

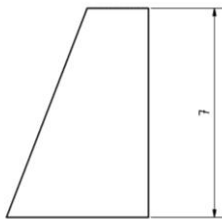


$$(x)^2 = r^2 - h^2 \quad (\text{П1.13})$$

$$x = \sqrt{r^2 - h^2} = \sqrt{4,75^2 - 2,05^2} = 4,284 \text{ mm}$$

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{h}{r} = 0,431578$$

$$\alpha = 2 \cdot \arccos 0,43157 = 128,864^\circ$$



$$\alpha = 128,864^\circ$$

Слика П1.3 – Израчунавање запремине клина

V_3 – запремина ваљка чија је база круг пречника 4 mm а висина 7 mm.

$$V_3 = P_3 \cdot H$$

$$V_3 = r^2 \cdot \pi \cdot H = 2^2 \cdot 3,14 \cdot 7 = 87,92 \text{ mm}^3 \quad (\text{П1.14})$$

V_4 – запремина половине разлике запремина правилне четворостране призме димензија 9,5 x 9,5 x 10 mm и запремине ваљка пречника основе 9,5 mm и висине 10 mm.

$$V_4 = \frac{(P_4 - P_1) \cdot H_1}{2} \quad (\text{П1.15})$$
$$V_4 = \frac{(9,5 \cdot 9,5 - 4,75^2 \cdot 3,14) \cdot 10}{2} = 97,0187 \text{ mm}^3$$

V_5 – запремина четворостране призме димензија 9,5 mm x 13,2 mm x 10 mm.

$$V_5 = P_5 \cdot H_1 = 9,5 \cdot 13,2 \cdot 10 = 1254 \text{ mm}^3 \quad (\text{П1.16})$$

V_6, V_8 – запремина тростране призме чија је основа правоугли троугао катета дужине 3 mm и 3,25 mm и висина 10 mm.

$$V_6 = V_8 = P_6 \cdot H_1 = \frac{3 \cdot 3,25}{2} \cdot 10 = 48,75 \text{ mm}^3 \quad (\text{П1.17})$$

V_7 – запремина четворостране призме димензија 9,5 x 3 x 10 mm.

$$V_7 = P_7 \cdot H_1 = 9,5 \cdot 3 \cdot 10 = 285 \text{ mm}^3 \quad (\text{П1.18})$$

V_9 – запремина четворостране призме димензија 16 x 27,3 x 10 mm.

$$V_9 = P_9 \cdot H_1 = 16 \cdot 27,3 \cdot 10 = 4368 \text{ mm}^3 \quad (\text{П1.19})$$

$V_{10}, V_{11}, V_{12}, V_{13}$ – запремине ваљака чија је база круг пречника 4 mm а висина 8 mm.

$$V_{10} = V_{11} = V_{12} = V_{13} = P_{10} \cdot H_2 = r^2 \pi \cdot H_2 = 2^2 \cdot 3,14 \cdot 8 = 100,48 \text{ mm}^3 \quad (\text{П1.20})$$

Укупна измерена маса носача резне плочице (без резне плочице) износи 47,329 g. Овај податак је неопходан за одређивање густине материјала.

$$V_u = V_1 - V_2 - V_3 + V_4 + V_5 + V_6 + V_7 + V_8 + V_9 - V_{10} - V_{11} - V_{12} - V_{13} \quad (\text{П1.21})$$
$$V_u = 6048,54 \text{ mm}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V_u} = 0,0078249 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \quad (\text{П1.22})$$

На основу израчунате густине и запремине делова носача резне плочице може се израчунати маса делова носача, која је неопходна за одређивање тежишта дела.

Маса делова носача алата је рачуната по обрасцу:

$$m_n = \rho \cdot V_n \quad (\text{П1.23})$$

При чему је $n=1,2,3,\dots,13$

Израчунате масе делова алата приказане су у табели П1.1.

Применом Архимедове теореме одређено је тежиште ексцентричног резног алата, у циљу одређивања инерцијалне силе приликом ротације алата око сопствене осе. С обзиром на то да инерцијална сила делује само у једном правцу, није неопходно одређивати координате тежишта у простору, већ само у правцу деловања инерцијалне силе. На слици 5.3 приказана су тежишта делова носача резне плочице са назначеним растојањима од кординатног почетка.

$$X_{t12} = X_{t13} = 5,15 \text{ mm} \quad (\text{П1.24})$$

$$X_{t10} = X_{t11} = 5,15 + 17 = 22,15 \text{ mm} \quad (\text{П1.25})$$

$$X_{t9} = \frac{27,3}{2} = 13,65 \text{ mm} \quad (\text{П1.26})$$

$$X_{t8} = X_{t6} = 27,3 + \frac{3}{3} = 28,3 \text{ mm} \quad (\text{П1.27})$$

$$X_{t7} = 27,3 + \frac{3}{2} = 28,8 \text{ mm} \quad (\text{П1.28})$$

$$X_{t5} = 27,3 + 3 + \frac{13,2}{2} = 36,9 \text{ mm} \quad (\text{П1.29})$$

$$X_{t4} = 27,3 + 3 + 13,2 + \frac{4,75}{3} = 45,083 \text{ mm} \quad (\text{П1.30})$$

$$X_{t3} = X_{t1} = 27,3 + 3 + 13,2 + 4,75 = 48,25 \text{ mm} \quad (\text{П1.31})$$

$$X_{t2} = 27,3 + 3 + 13,2 + 4,75 + 2,05 + \frac{2,7}{3} = 51,2 \text{ mm} \quad (\text{П1.32})$$

У табели П1.1 дат је приказ појединачних запремина и маса делова носача резне плочице као и кординате тежишта за сваки део носача. У последњој колони дато је растојање тежишта тела од кординатног почетка.

Табела П1.1 – Растојање тежишта носача алата од координатног почетка

	Запремина [mm ³]		Густина [g/mm ³]	Маса [g]	X _t [mm]	m·X _v	X ₁ [mm]
Ваљак	V ₁	494,8797	0,0078249	3,872366336	48,25	186,8416757	21,892
Кружни одсечак	V ₂	58,0188	0,0078249	0,453989218	51,2	23,24424796	
Рупа за завртањ	V ₃	87,92	0,0078249	0,687962041	48,25	33,19416846	
Око плочице	V ₄	97,01875	0,0078249	0,759158522	45,083	34,22514363	
Носач до плочице	V ₅	1254	0,0078249	9,812379423	36,9	362,0768007	
Троугао 1	V ₆	48,75	0,0078249	0,381462119	28,3	10,79537796	
Правоугаоник	V ₇	285	0,0078249	2,230086232	28,8	64,2264835	
Троугао 2	V ₈	48,75	0,0078249	0,381462119	28,3	10,79537796	
Тело носача	V ₉	4368	0,0078249	34,17900584	13,65	466,5434297	
Рупа за завртањ	V ₁₀	100,48	0,0078249	0,786242332	22,15	17,41526766	
Рупа за завртањ	V ₁₁	100,48	0,0078249	0,786242332	22,15	17,41526766	
Рупа за завртањ	V ₁₂	100,48	0,0078249	0,786242332	5,15	4,04914801	
Рупа за завртањ	V ₁₃	100,48	0,0078249	0,786242332	5,15	4,04914801	
	Σ	6048,54				47,329	

Координата тежишта носача резне плочице означена је са X_1 и за дати случај износи:

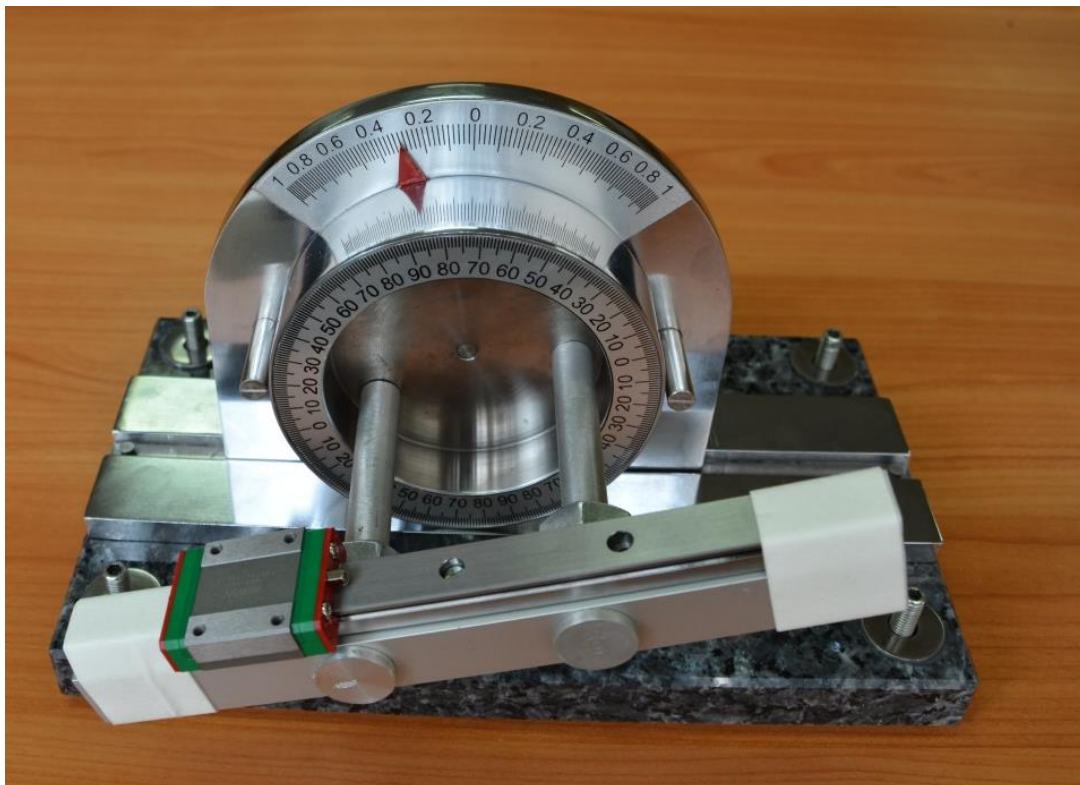
$$\begin{aligned}
 & X_1 \\
 = & \frac{m_1 \cdot X_{t1} - m_2 \cdot X_{t2} - m_3 \cdot X_{t3} + m_4 \cdot X_{t4} + m_5 \cdot X_{t5} + m_6 \cdot X_{t6} + m_7 \cdot X_{t7}}{m} \\
 + & \frac{m_8 \cdot X_{t8} + m_9 \cdot X_{t9} - m_{10} \cdot X_{t10} - m_{11} \cdot X_{t11} - m_{12} \cdot X_{t12} - m_{13} \cdot X_{t13}}{m} \quad (\text{П1.33})
 \end{aligned}$$

$$X_1 = 21,892 \text{ mm}$$

Након одређивања тежишта носача резне плочице, чија геометрија је најсложенија, неопходно је одредити тежиште осталих делова склопа алата. Једноставна геометрија осталих елемената склопа алата омогућава одређивање тежишта једноставним прорачунима, које није потребно детаљно анализирати.

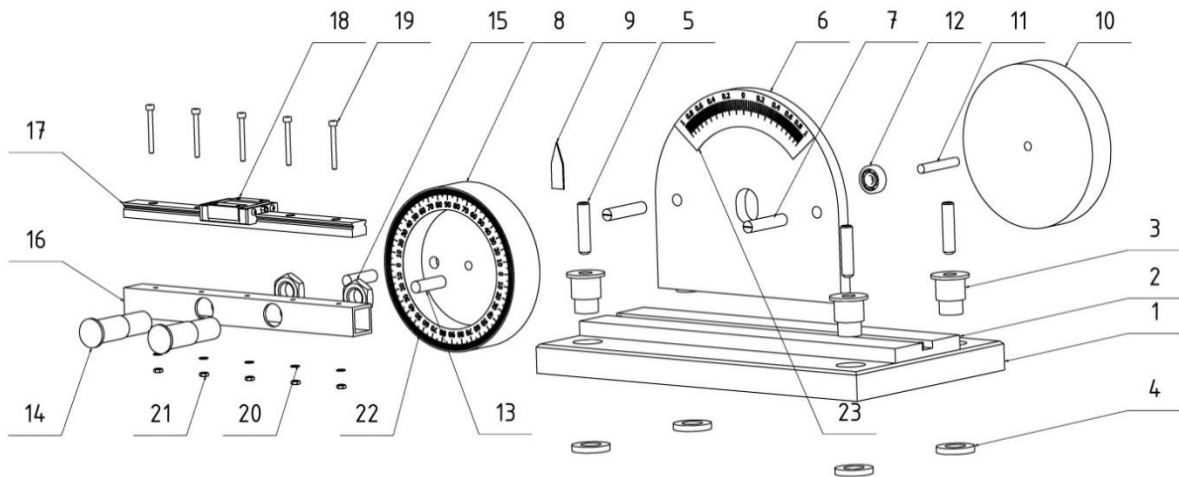
Прилог 2. Одређивање отпора кретања колица по профилисаној вођици

Како би колица започела кретање по профилисаној вођици, неопходно је да погонска сила буде већа од силе трења. Прецизним мерењем погонске силе могуће је одредити силу трења. У циљу прецизног повећања погонске силе, експеримент је извршен на трибometру који ради по принципу стрме равни. Повећањем угла нагиба равни расте погонска сила. Повећање нагиба равни престаје након настанка кретања колица по профилисаној вођици. То је тренутак када се изједначавају погонска и отпорна сила. Очитавањем угла стрме равни који узрокује кретање и познавањем масе колица могуће је одредити паразитну силу трења, која настаје при кретању колица по профилисаној вођици. Због дужине клизне стазе направљен је носач, који ће обезбедити несметано закретање контактнoг пара (Слика П2.1).



Слика П2.1 – Уређај за испитивање статичког коефицијента трења клизања колица по клизној стази [V. Kočović (2019)]

Уређај за испитивање је неопходно поставити на стабилан и раван сто како би се смањиле грешке и избегло велико расипање резултата мерења. Такође, прецизност израде носача клизног пара може утицати на грешке мерења силе трења. Зато је неопходно пре почетка мерења проверити хоризонталност носача клизне стазе при нултом углу нагиба стрме равни. Носач клизне стазе, направљен у сврху испитивања силе трења, представља лаку конструкцију како би остварени момент био минималан. На крајеве клизне стазе постављени су граничници, који обезбеђују заустављање колица при кретању по стрмој равни.



Слика П2.2 – Елементи уређаја за одређивање статичког коефицијента трења

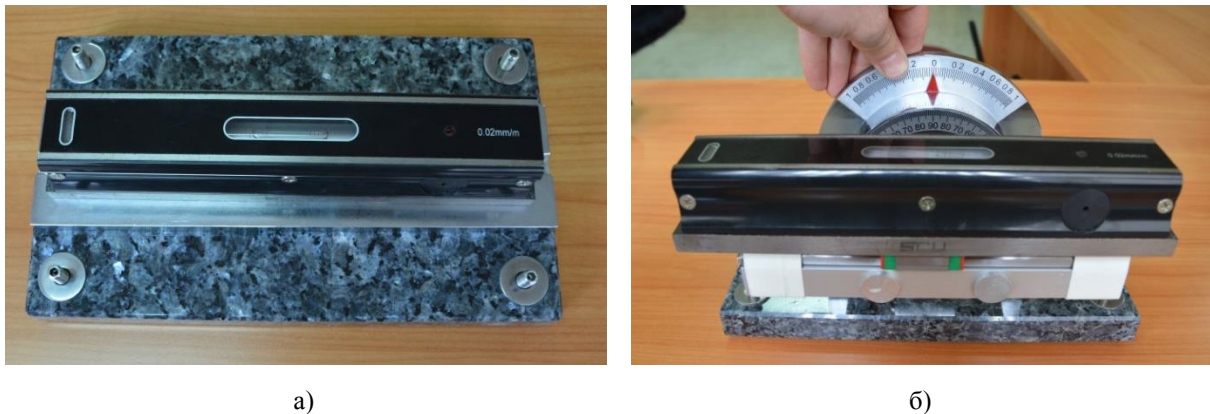
На слици П2.2 су јасно приказани и назначени сви елементи склопа тробометра за одређивање силе трења:

- 1) Постоље уређаја
- 2) Ослона плоча
- 3) Чаура
- 4) Навртка
- 5) Завртањ за нивелацију
- 6) Средња плоча
- 7) Чивија са мерном цртом
- 8) Предњи диск
- 9) Показна стрелица
- 10) Задњи диск
- 11) Осовина
- 12) Радијални лежај
- 13) Ослона чивија
- 14) Спојница
- 15) Навртка
- 16) Носач контакног пара
- 17) Профилисана вођица
- 18) Колица
- 19) Завртањ
- 20) Подлошка
- 21) Навртка
- 22) Скала угла закретања
- 23) Скала коефицијента трења

У циљу постизања веће стабилности, постоље уређаја је масивно (израђено од мермера). Подешавање хоризонталности уређаја врши се ослоним завртњевима завијеним у чауре, које су за постоље уређаја причвршћене на врткама. За постоље уређаја круто је везана ослона плоча, која обезбеђује транслаторно кретање средње плоче. За средњу плочу везани су предњи и задњи диск преко осовине и лежаја, који су централно постављени у средњу плочу. Лежај обезбеђује котрљање дискова по осноној

плочи, при чему се повећава нагиб стрме равни контактнoг пара. У предњи диск су упресоване ослоне чивије, које служе за монтажу спојнице причвршћене навртком за носач контактнoг пара. Клизна стаза је преко завртњева, подлошки и навртки причвршћена за носач. На клизну стазу су након позиционирања навучена колица и постављени граничници, који спречавају пад колица са клизне стазе.

Нивелација уређаја остварује се преко ослоних завртњева (Слика П2.3). Извршена је и провера хоризонталности колица при нултој вредности угла нагиба (Слика 5.4 б). За нивелацију уређаја коришћена је либела прецизности 0,02 mm/m.



Слика П2.3 – Нивелација уређаја: а) провера хоризонталности постоља уређаја, б) провера хоризонталности колица при нултој вредности угла нагиба [V. Kočović (2019)]

Након правилног позиционирања уређаја, започет је експеримент, који подразумева закретање контактнoг пара до настанка кретања колица по клизној стази. Угао стрме равни се остварује транслаторним померањем средње плоче дуж ослоне плоче, што доводи до котрљања дискова, тј. до раста угла стрме равни. Угао се повећава до настанка кретања колица по клизној стази. Чивија са мерном цртом показује угао при коме је настало котрљање колица по клизној стази, док показна стрелица показује коефицијент трења.

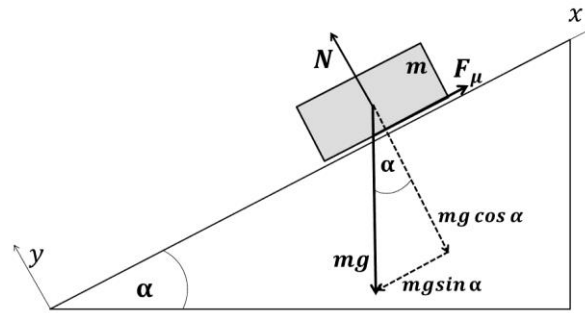
Принцип мерења коефицијента трења преко стрме равни (Слика П2.4) се заснива на коришћењу гравитационе силе. Статички коефицијент трења, као што је познато, представља однос силе трења и силе управне на површину контакта [P. Todorović (2013)], при чему је услов равнотеже на стрмој равни дефинисан изразом П2.1.

$$F_{\mu} > mg \cdot \sin \alpha \quad (\text{П2.1})$$

У граничном случају трења клизања важи једнакост:

$$\mu = \frac{F_{\mu}}{N} = \frac{mg \sin \alpha}{mg \cos \alpha} = \text{tg } \alpha, \quad (\text{П2.2})$$

где је: μ – величина статичког коефицијента трења; F_{μ} – сила трења; m – маса тела; g – убрзање земљине теже; α – угао стрме равни [P. Todorović (2013)].



Слика П2.4 - Равнотежа тела на стрмој равни [P. Todorović (2013)]

Грешка мерења статичког коефицијента трења, заснованог на овом принципу, последица је грешке мерења угла α у односу на идеални хоризонтални положај у тренутку када је тело које се налази на стрмој равни из стања мировања прешло у стање кретања. Према истраживањима В. Јеремич (2013) грешка мерења износи:

$$\varepsilon = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \Delta\alpha) - \operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\alpha} \cdot 100 [\%] \quad (\text{П2.3})$$

где је ε – релативна грешка мерења; $\Delta\alpha$ – грешка мерења угла α .

В. Јеремич (2013) је доказао да су грешке мерења статичког коефицијента трења котрљања мање од 5%, док су грешке мерења статичког коефицијента трења клизања далеко мање.

Резултати експерименталних испитивања угла нагиба стрме равни, који за испитивани контактни пар узрокује кретање колица по профилисаног вођици, дати су у табели П2.1. Извршено је 200 независних експеримената, како би се што прецизније одредила сила трења.

Табела П2.1 – Резултати експерименталог испитивања [V. Kočović (2019)]

Број мерења	Угао стрме равни [°]	Број мерења	Угао стрме равни [°]	Број мерења	Угао стрме равни [°]	Број мерења	Угао стрме равни [°]
1	13	51	7	101	9	151	7
2	11	52	9	102	8	152	10
3	11	53	11	103	10	153	7
4	10	54	12	104	7	154	14
5	12	55	12	105	8	155	10
6	11	56	9	106	10	156	7
7	12	57	12	107	9	157	13
8	5	58	5	108	9	158	8
9	12	59	8	109	11	159	9
10	12	60	9	110	10	160	7
11	11	61	9	111	9	161	9
12	12	62	10	112	8	162	11
13	9	63	9	113	8	163	9

Развој алата за завршну обраду цилиндричних отвора инерцијалном силом

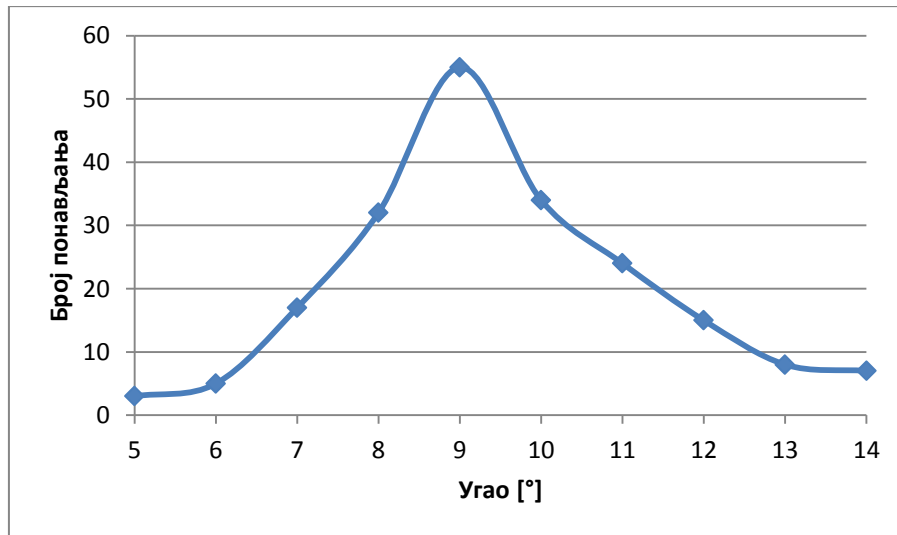
14	14	64	9	114	9	164	11
15	9	65	11	115	9	165	8
16	6	66	10	116	7	166	11
17	10	67	11	117	5	167	10
18	10	68	13	118	9	168	7
19	9	69	8	119	8	169	10
20	9	70	14	120	11	170	12
21	9	71	9	121	8	171	11
22	12	72	10	122	9	172	8
23	9	73	8	123	6	173	8
24	9	74	13	124	8	174	11
25	11	75	14	125	10	175	8
26	8	76	11	126	10	176	9
27	11	77	8	127	6	177	10
28	10	78	9	128	9	178	8
29	9	79	12	129	9	179	10
30	8	80	9	130	10	180	11
31	8	81	9	131	9	181	9
32	10	82	10	132	10	182	10
33	11	83	9	133	10	183	7
34	10	84	8	134	7	184	9
35	14	85	8	135	8	185	11
36	9	86	9	136	14	186	11
37	10	87	9	137	9	187	11
38	9	88	8	138	7	188	7
39	12	89	6	139	7	189	13
40	9	90	9	140	10	190	8
41	10	91	9	141	9	191	8
42	9	92	8	142	10	192	10
43	9	93	12	143	8	193	11
44	9	94	9	144	7	194	14
45	13	95	8	145	13	195	7
46	12	96	13	146	10	196	12
47	6	97	9	147	9	197	11
48	10	98	9	148	7	198	8
49	10	99	9	149	7	199	10
50	9	100	8	150	8	200	9

Сви експериментални резултати су подељени у 10 класа, како би се формирала Гаусова расподела и што реалније одредио угао при коме долази до кретања колица по клизној стази.

Табела П2.2 — Број понављања експерименталних резултата [V. Коџовић (2019)]

Угао [°]	Број понављања
5	3
6	5
7	17
8	32
9	55
10	34
11	24
12	15
13	8
14	7

На основу експерименталних података формирана је Гаусова расподела која је приказана на слици П2.5.



Слика П2.5 – Гаусова расподела резултата експерименталних испитивања [V. Коџовић (2019)]

Са слике П2.5 се може закључити да угао при коме настаје клизање колица по клизној стази износи приближно 9°.

Из релације П2.2 следи да је сила трења једнака:

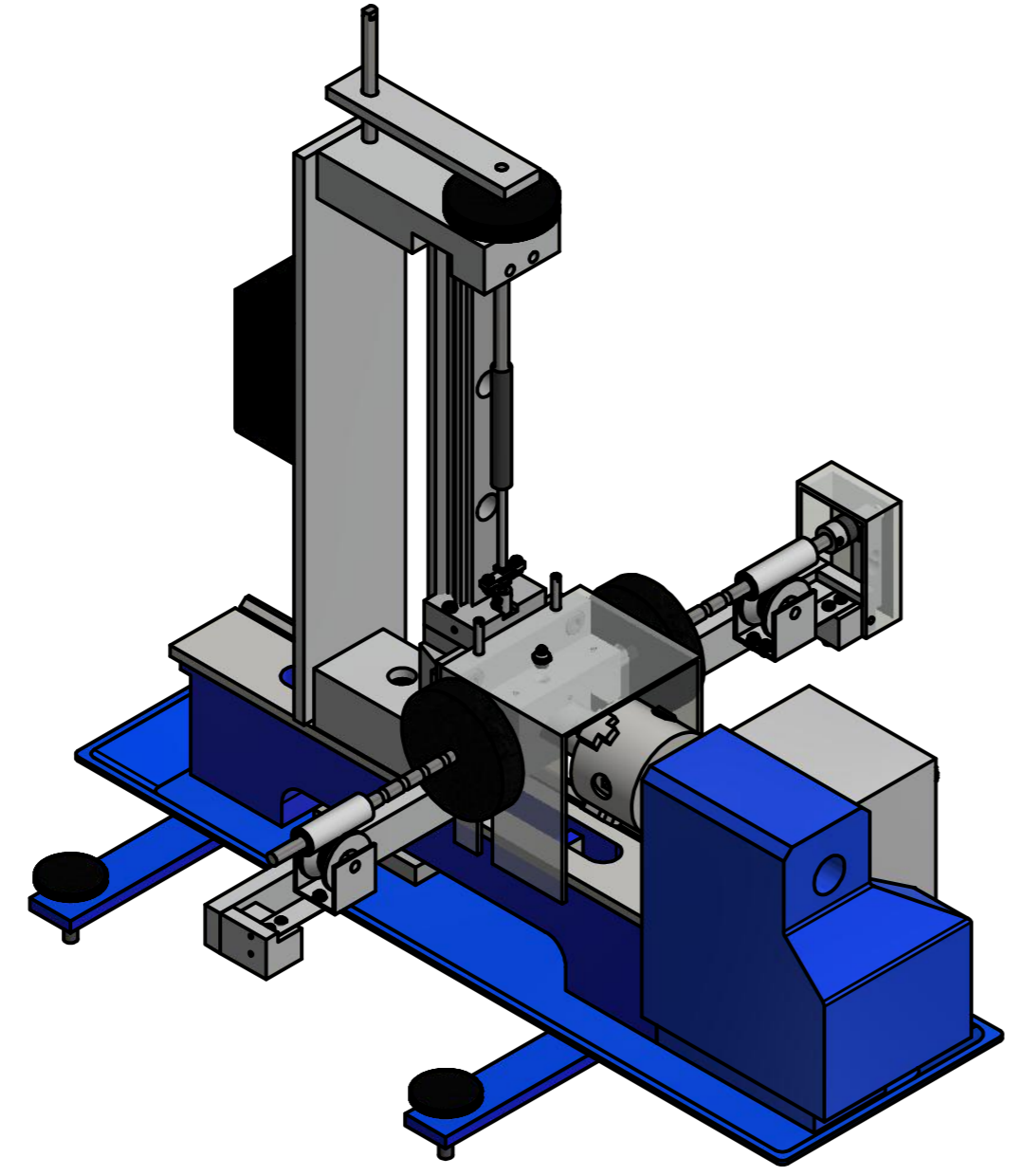
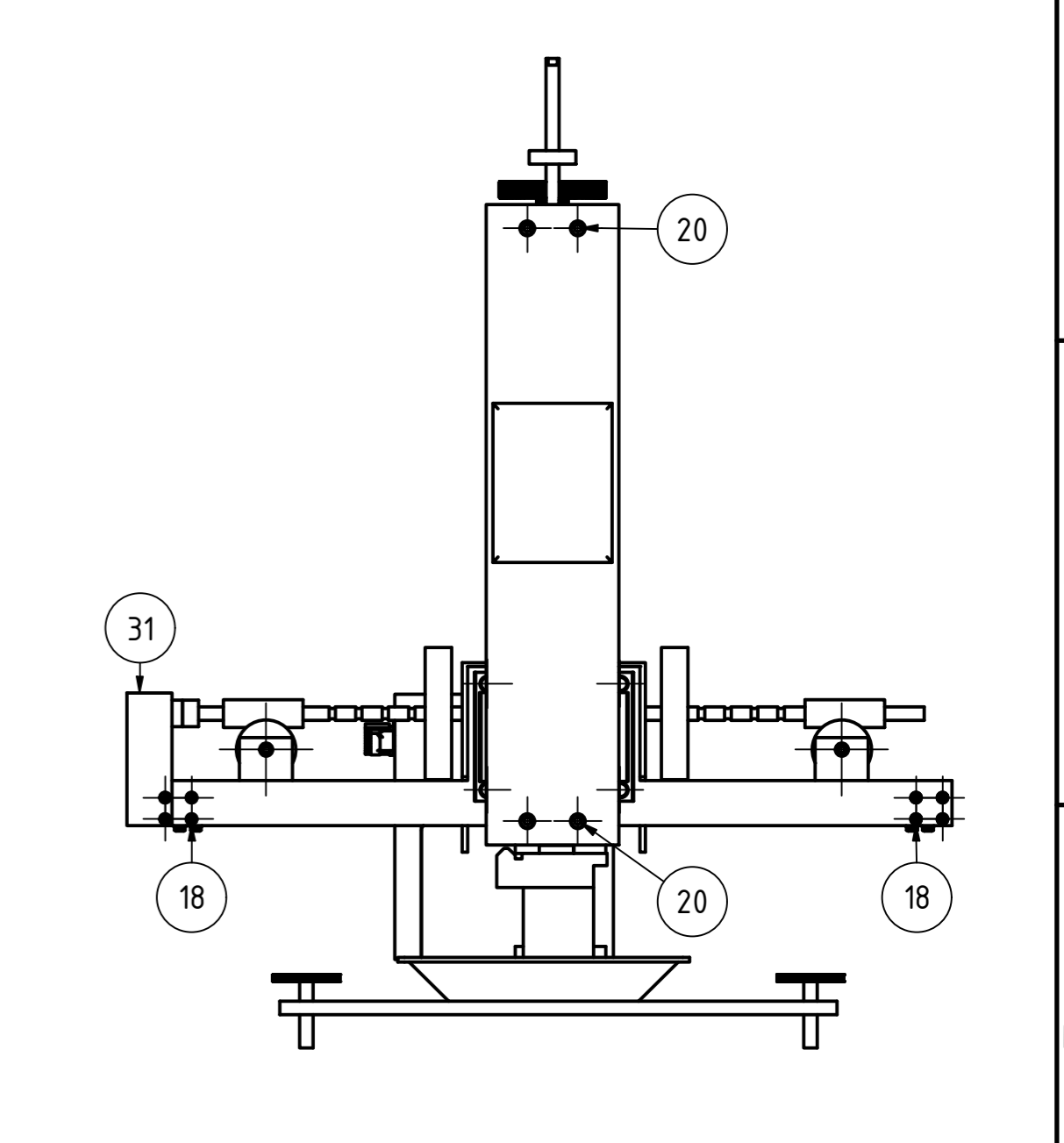
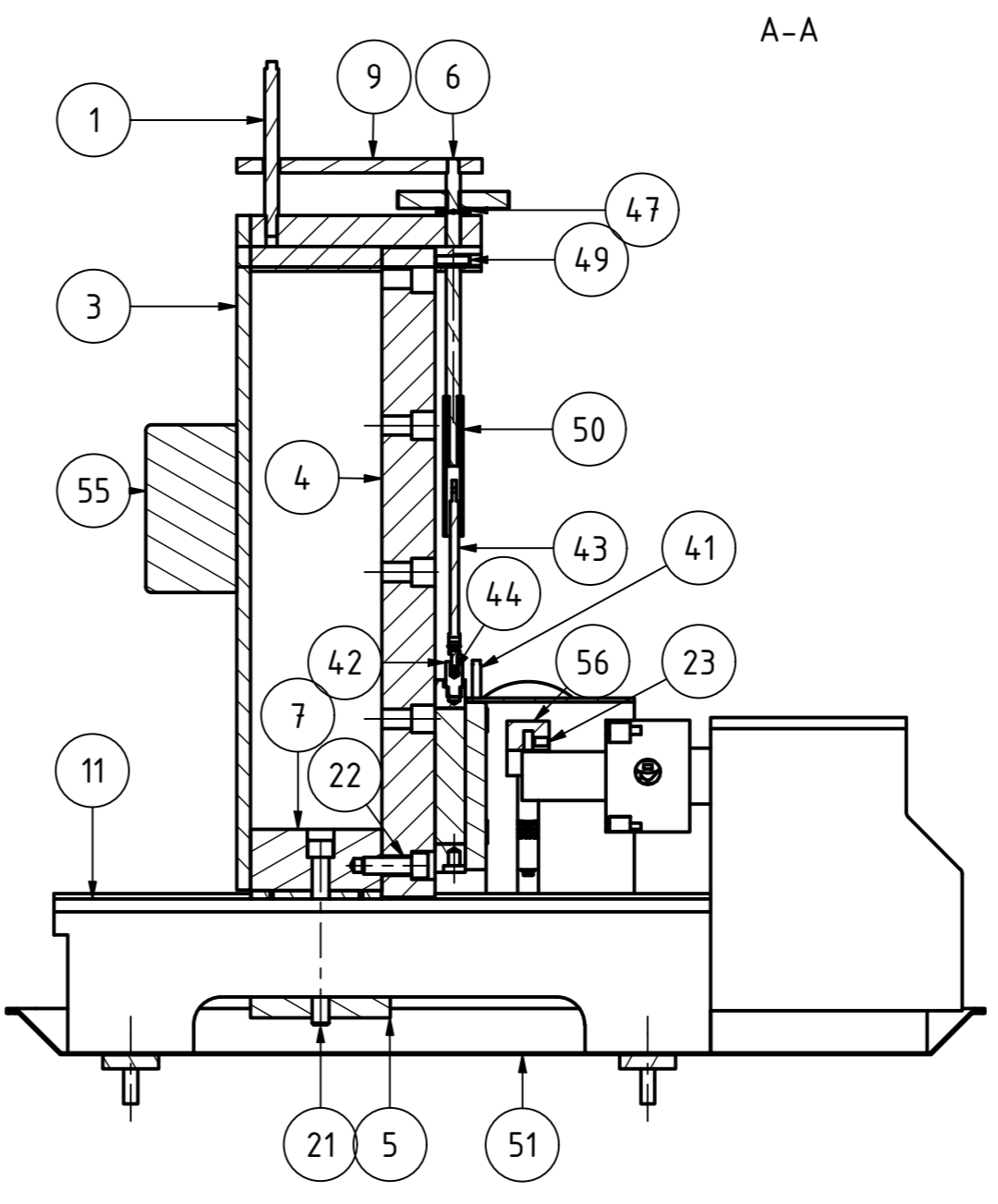
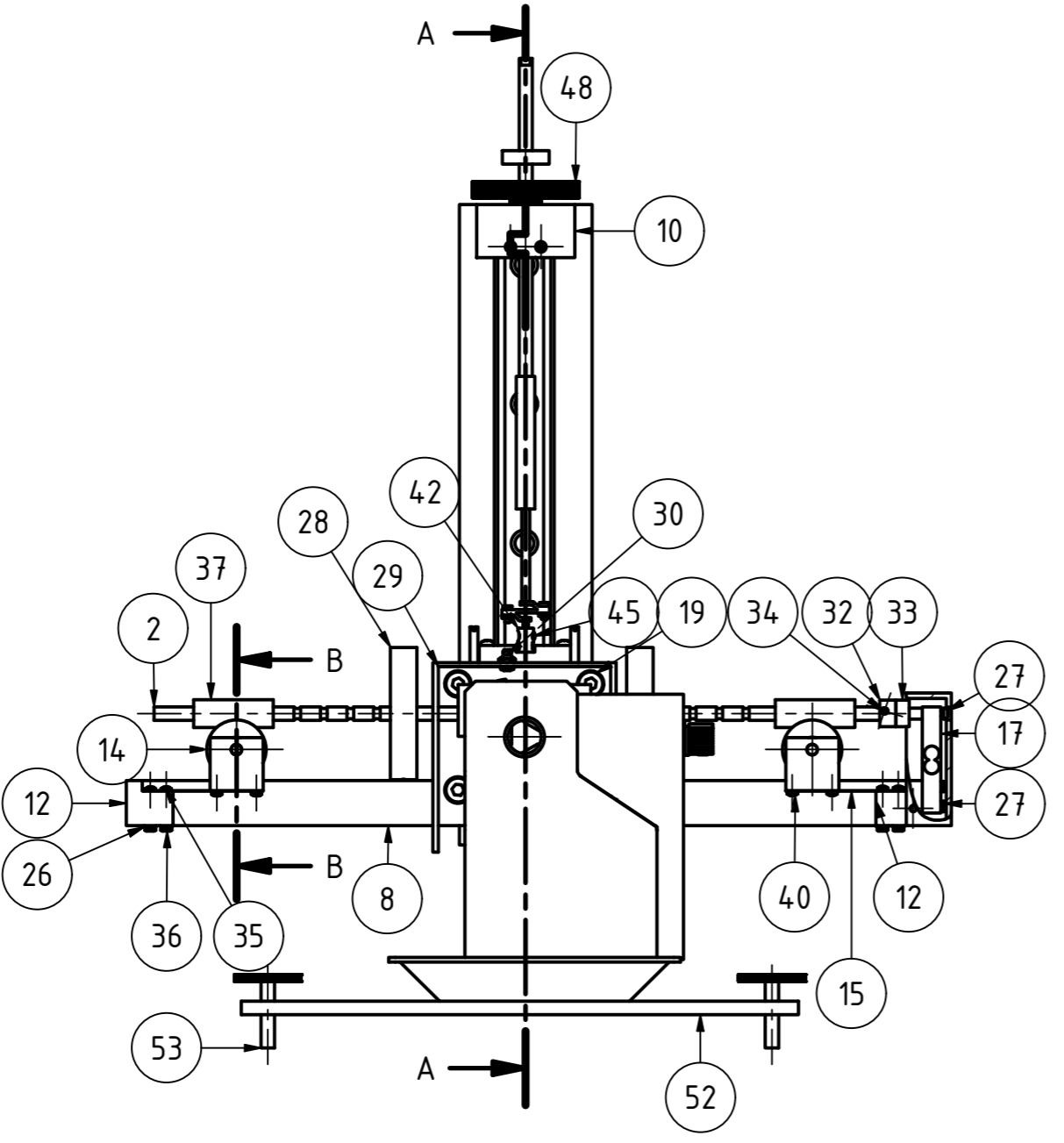
$$F_{\mu} = m \cdot g \cdot \sin \alpha = 0,059[kg] \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot \sin 9^{\circ} = 0,0905[N] \quad (\text{П2.4})$$

[V. Коџовић (2019)]

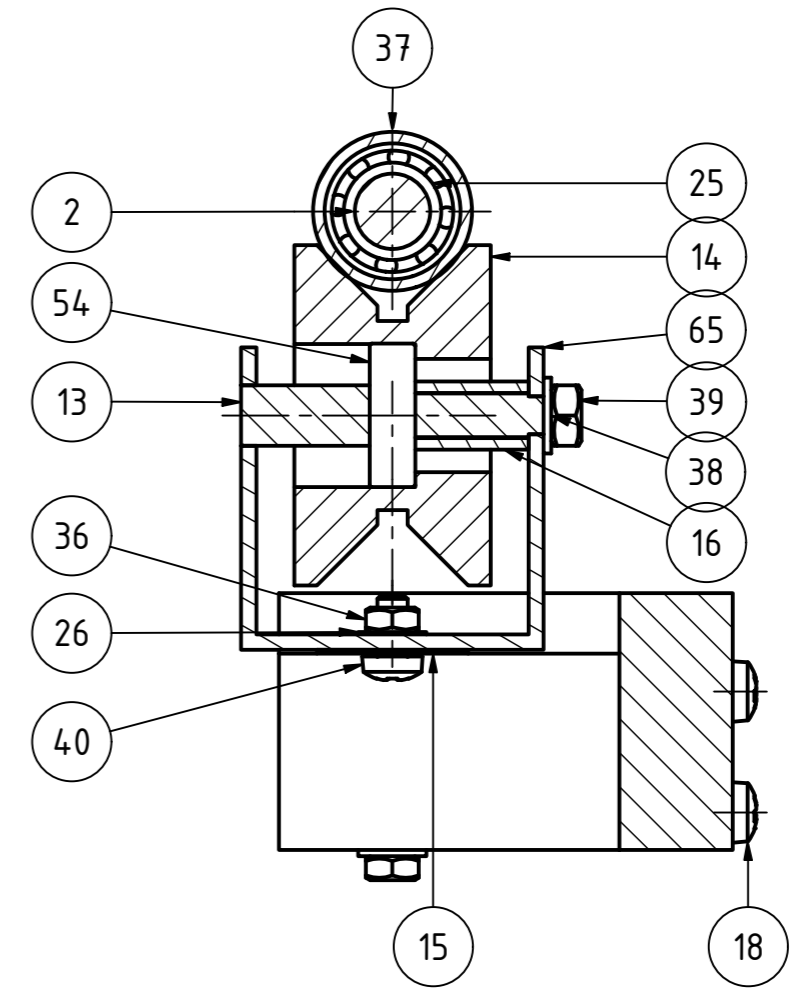
Из израза П2.4 се види да је сила трења мала, али њен релативни удео у сили продирања алата у материјал предмета обраде, када је реч о микро резању, може да буде значајан. Зато се она не сме занемарити, нарочито при обради изузетно малим силама.

Прилог 3. Техничка документација уређаја за испитивање резања константном силом

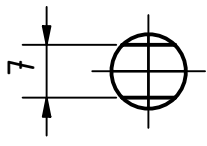
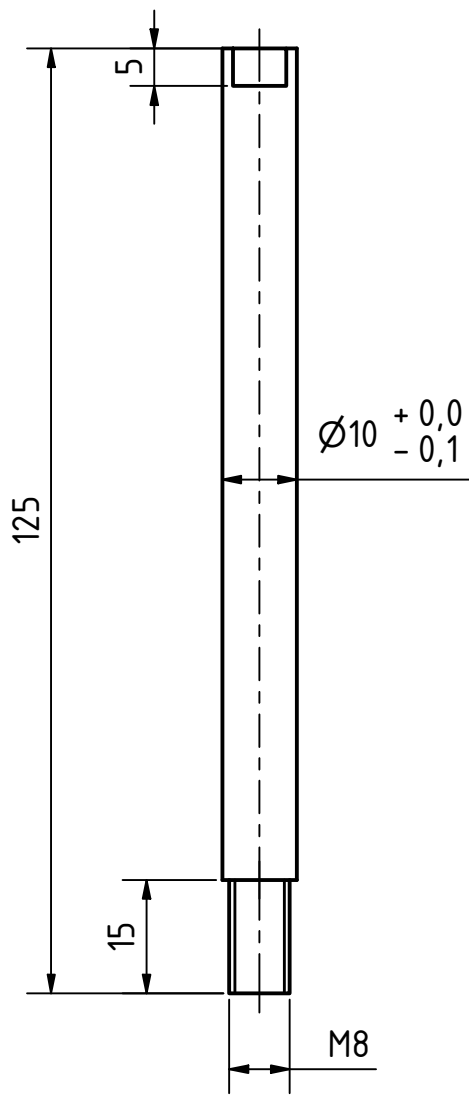
LISTA DELOVA		
Pozicija	Količina	Naziv
1	1	Vođica dinamometra
2	2	Prohromska šipka
3	1	Vertikalna ploča
4	1	Klizna staza
5	1	Donja zatezna ploča
6	1	Nosač dinamometra
7	1	Oslona ploča sa klinom
8	1	Noseca ploča
9	1	Ploča za pomeranje
10	1	Nosač dinamometra gornji
11	1	Univerzalni strug
12	2	Nosač opruge
13	2	Osovina za prizmu
14	2	Rotaciona prizma
15	6	Opruga 0,5 mm
16	2	Čaura za prizmu
17	1	Dinamometer sile rezanja
18	8	DIN 7985 (H) - M4x20-H
19	4	DIN 7984 - M12 x 25
20	4	DIN 912 - M6 x 20
21	1	DIN 912 - M12 x 120
22	1	DIN 912 - M12 x 35
23	2	DIN 916 - M6 x 12
24	1	DIN 916 - M6 x 16
25	4	DIN 625 SKF - SKF 61800
26	12	DIN 125 - A 4.3
27	3	DIN 7985 (H) - M4x22-H
28	6	Teg
29	1	Zaštita 1
30	1	DIN 71412 - AM10 x 1 coned short
31	1	Zastita 2
32	1	Šešir šipke
33	1	Stabilizator
34	1	DIN 913 - M5 x 5
35	4	DIN 7985 (H) - M4x30-H
36	10	DIN 555-5 - M4
37	1	Cev za ležajeve
38	2	DIN 125 - A 5.3
39	2	DIN 555-5 - M5
40	6	DIN 7985 (H) - M4x8-H
41	2	Nosač zaštite
42	1	Veza dinamometra i kolica
43	1	Dinamometer normalne sile
44	1	ISO 7046-1 - M3 x 12 - 4.8 - H
45	1	DIN 555-5 - M3
46	1	DIN 5405 T2 - AXK1024 - 10 x 24 x 2
47	2	Aksijalni ležaj
48	1	Radlovani disk
49	2	DIN 913 - M6 x 25
50	1	Elastična veza
51	1	Korito
52	2	Oslonac
53	4	Osloni zavrtnaj
54	2	DIN 625 SKF - SKF 626
55	1	Računarska jedinica
56	1	Nosač alata



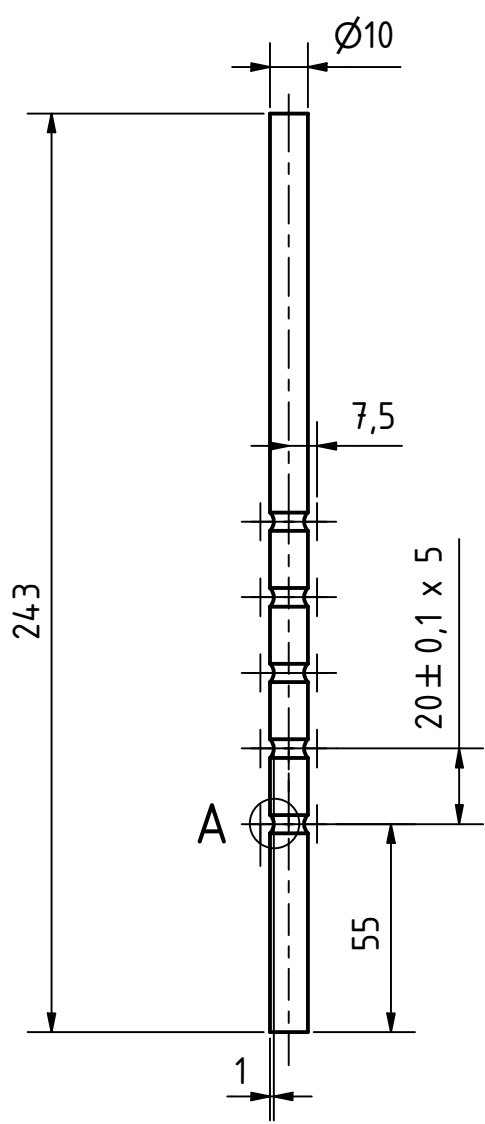
B-B (1 : 1)



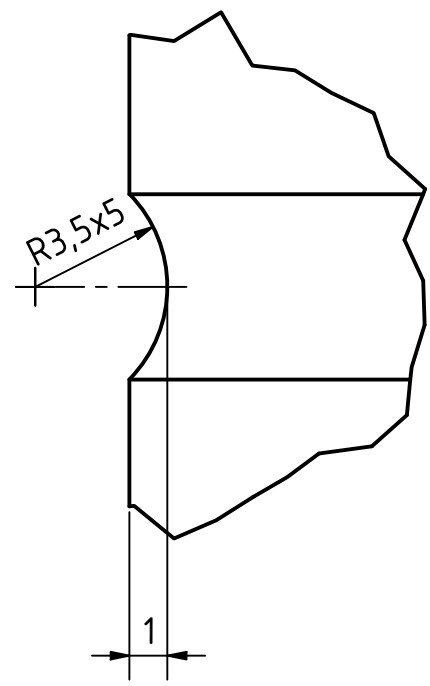
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal:				Termička obrada:	
				Broj komada: 1	Masa:
				Razmera: 1 : 5	
		Datum: 11/6/2017	Naziv: Sklop uređaja za ispitivanje		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka:	1
					A2
State:	Izmene:	Datum:	Ime:		



Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: X5 CrNiMo 17-12-2				Termička obrada:	
		Broj komada: 1		Masa:	Razmera: 1 : 1
		Datum: 11/6/2017		Naziv: Vodjica dinamometra	
		Obradio: Vladimir			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 1	
Stafa		Izmene:	Datum:	Ime:	List: 1 A4

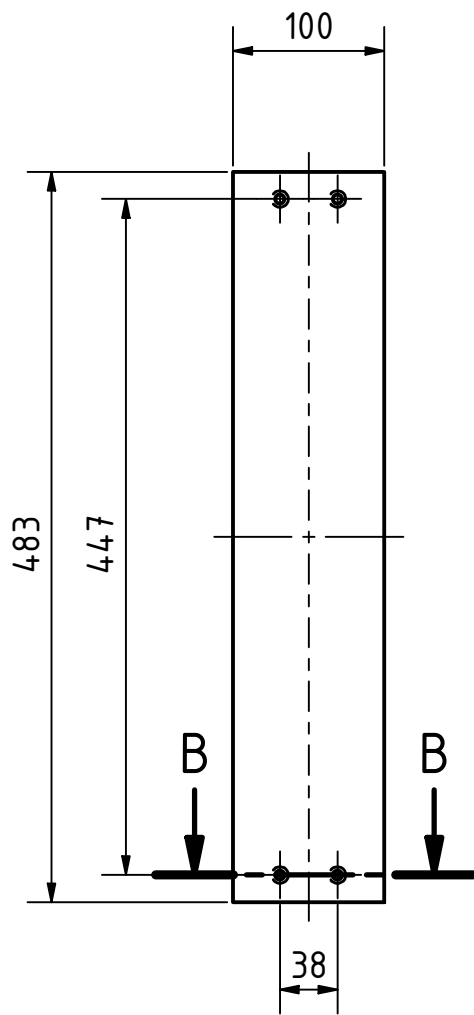


A (5 : 1)

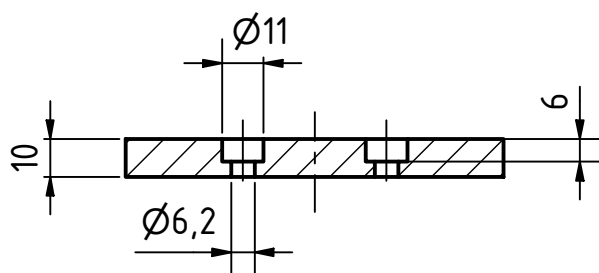


Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0,5mm x 45°

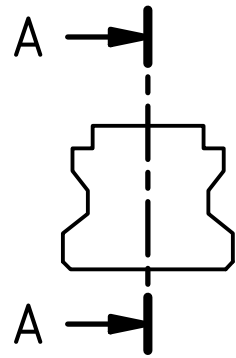
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: X5 CrNiMo 17-12-2				Termička obrada:	
		Broj komada: 1		Masa:	Razmera: 1 : 2
		Datum: 11/6/2017		Naziv: Prohromska šipka	
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 2	
Stafa		Izmene:		Datum:	
		Ime:		List: 1 A4	



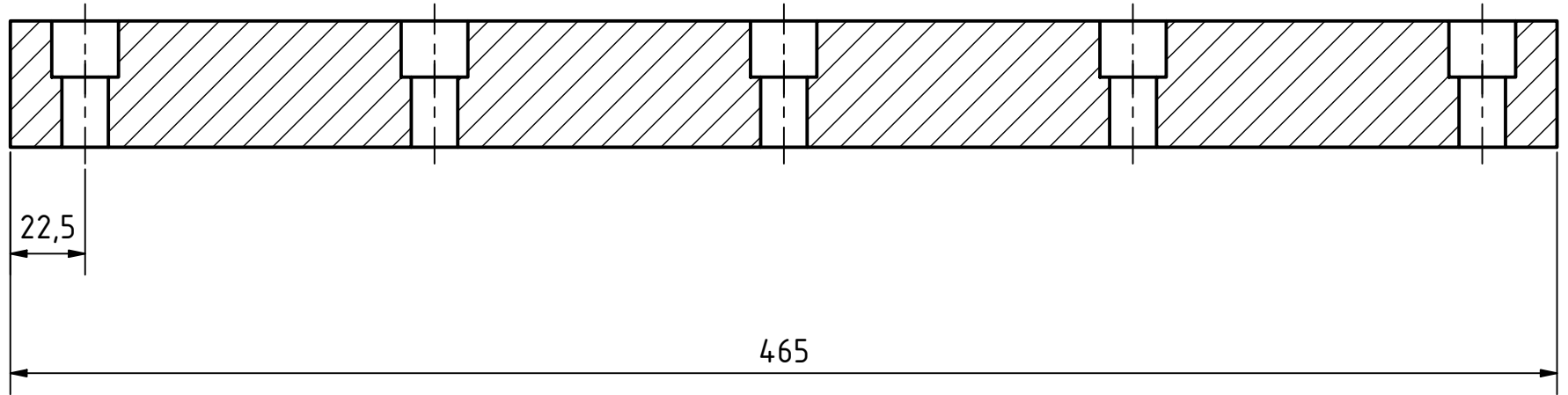
B-B (1 : 2)



Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi				Termička obrada:	
		Broj komada: 1		Masa:	Razmera: 1 : 5
		Datum: 11/6/2017		Naziv: Vertikalna ploča	
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 3	
				List: 1	
				A4	
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		

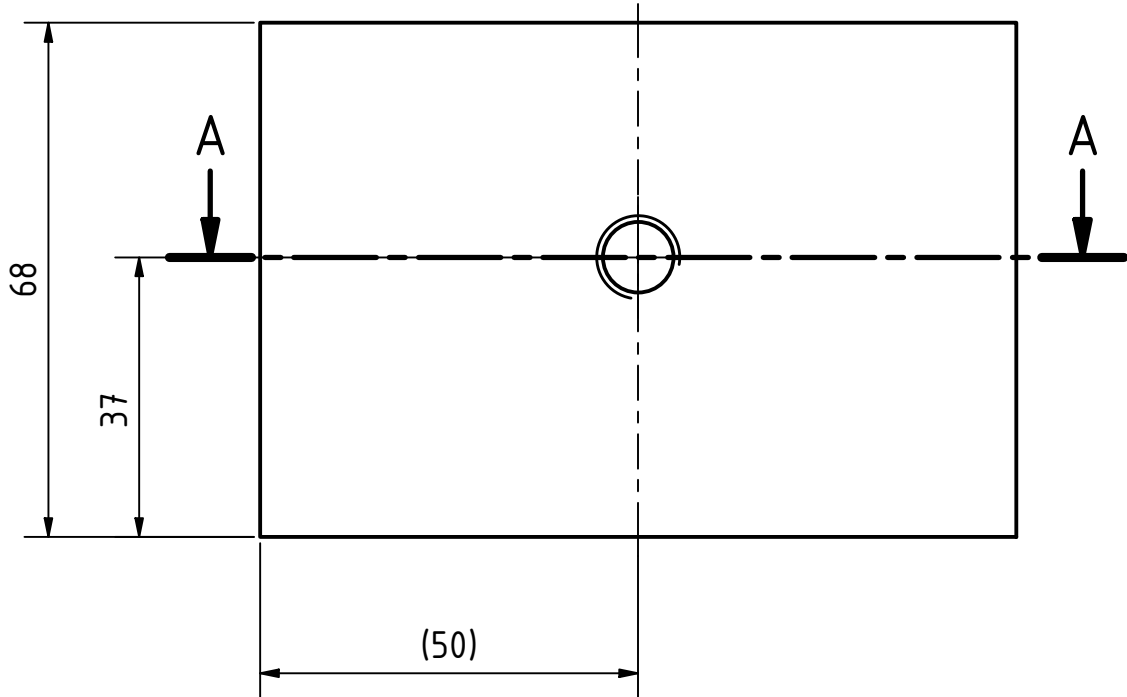


A-A

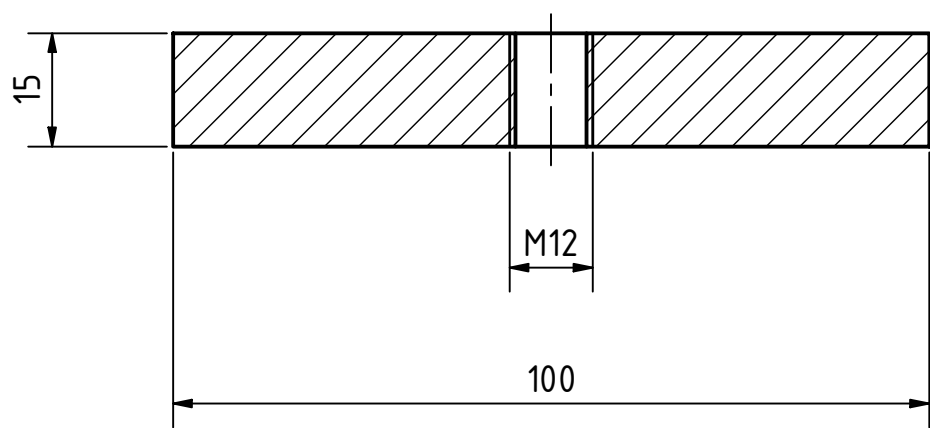


Napomena: Kliznu stazu HGH45CA odseći prema dostavljenim merama

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal:			Termička obrada:		
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 1 : 2	
		Datum: 11/6/2017	Naziv: Klizna staza HGH45CA		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 4	List: 1 A4
Štafe	Izmene:	Datum:	Ime:		



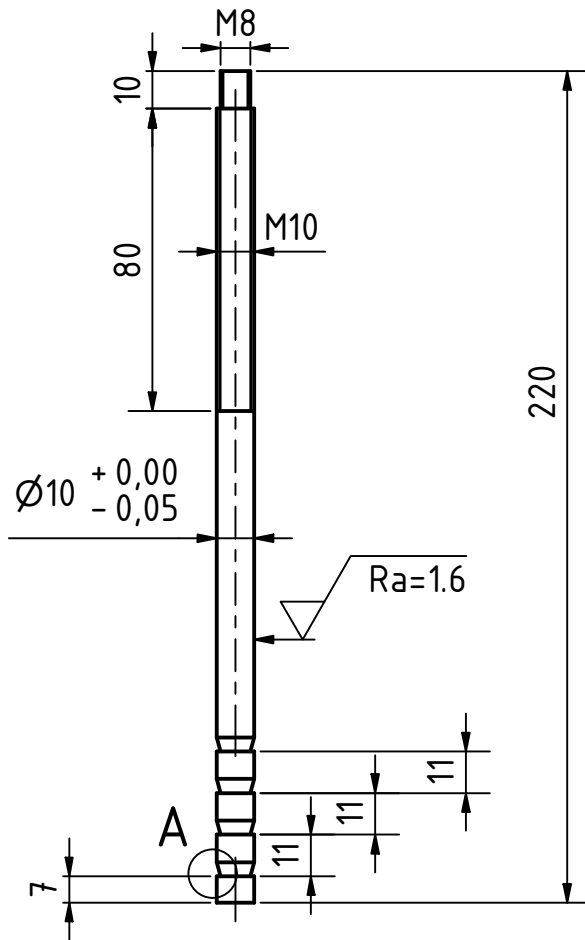
A-A



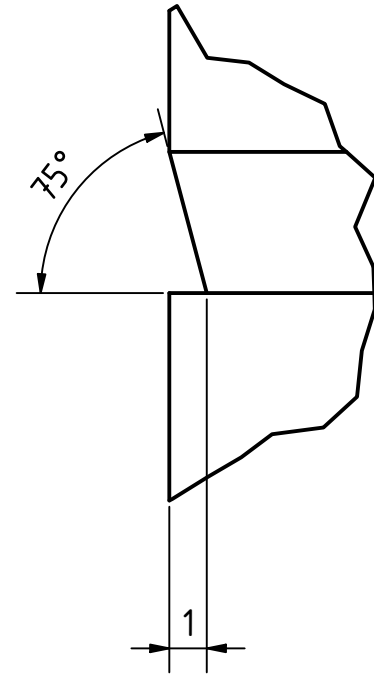
Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi			Termička obrada:		
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 1 : 1	
		Datum: 11/6/2017	Naziv: Donja zatezna ploča		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
Fakultet inženjerskih nauka			Oznaka: Pozicija 5		List: 1 A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		

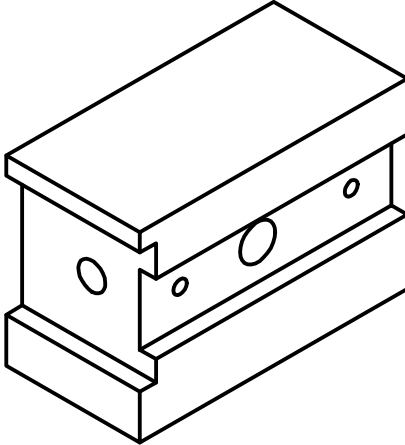
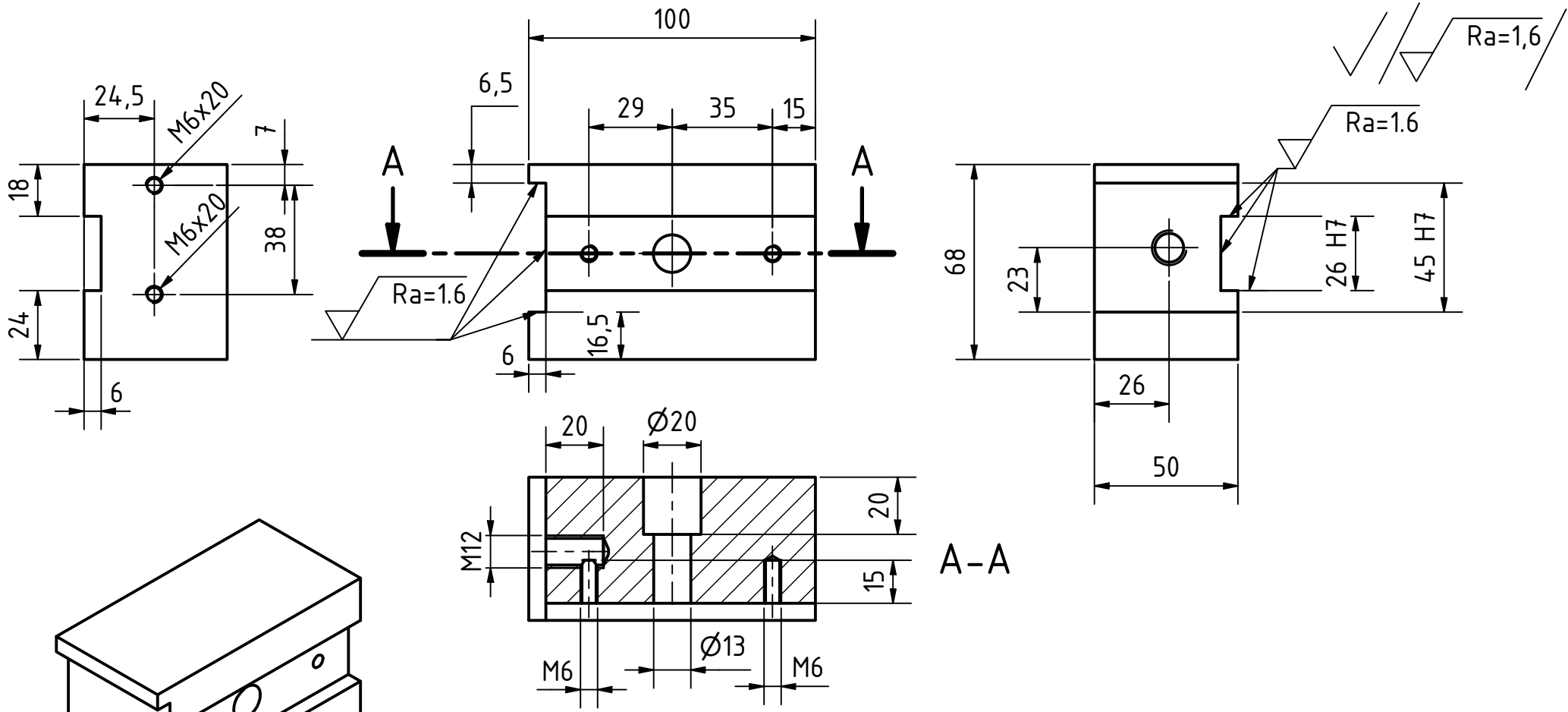
✓ Ra=1,6



A (5 : 1)



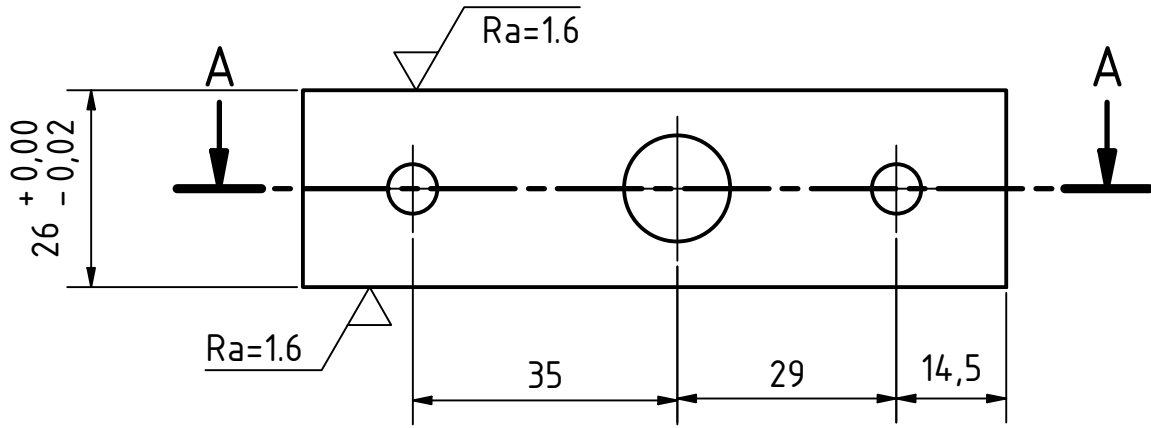
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:		
Materijal: X5 CrNiMo 17-12-2				Termička obrada:		
		Broj komada: 1		Masa:	Razmera: 1 : 2	
		Datum: 11/3/2017		Naziv: Nosač dinamometra		
		Obradio: Vladimir Kočović				
		Datum: 11/21/2017				
		Odobrio: Branko Tadić				
		Fakultet inženjerskih nauka			Oznaka: Pozicija 6	List: 1
						A4
Stafa:	Izmene:	Datum:	Ime:			



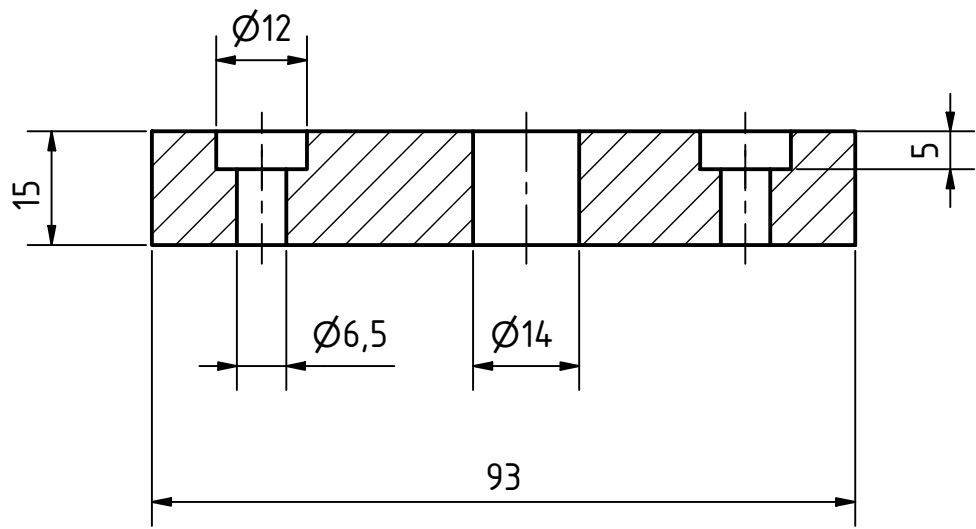
Napomene:
 -Sve oštre ivice oboriti 0,5mm x 45°
 -Otvore M6 (x2) i $\varnothing 13$ bušiti u sklopu sa pozicijom 7/1

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi				Termička obrada:	
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 1 : 2	
		Datum: 11/4/2017	Naziv: Oslona ploča		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 7	List: 1
					A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		

✓/✓/✓ Ra=1.6

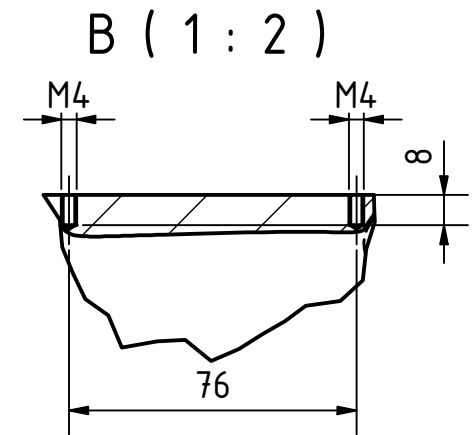
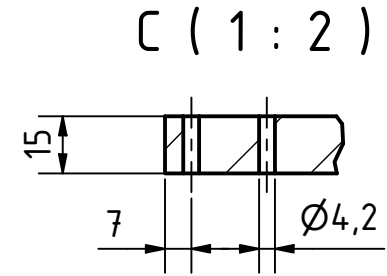
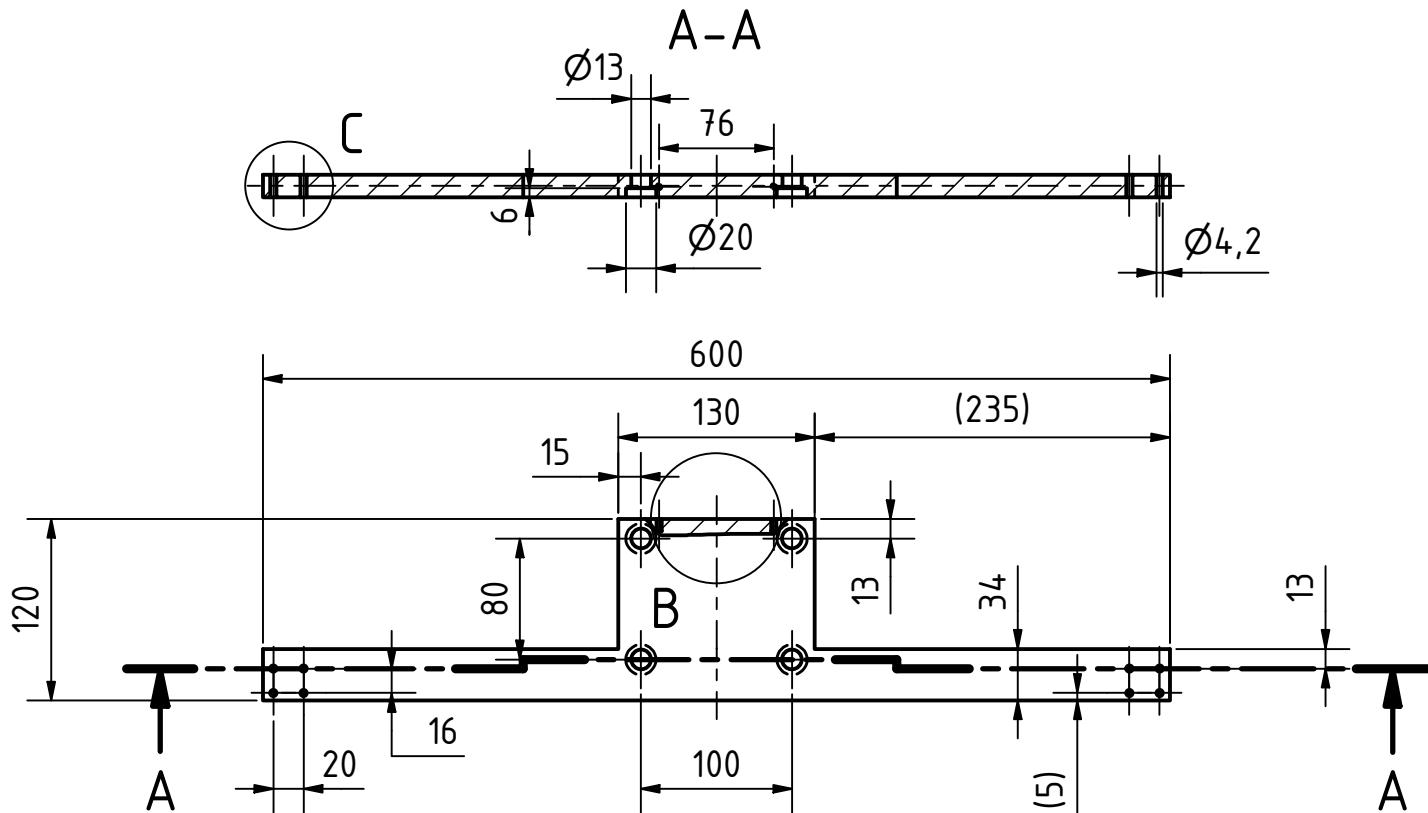


A-A



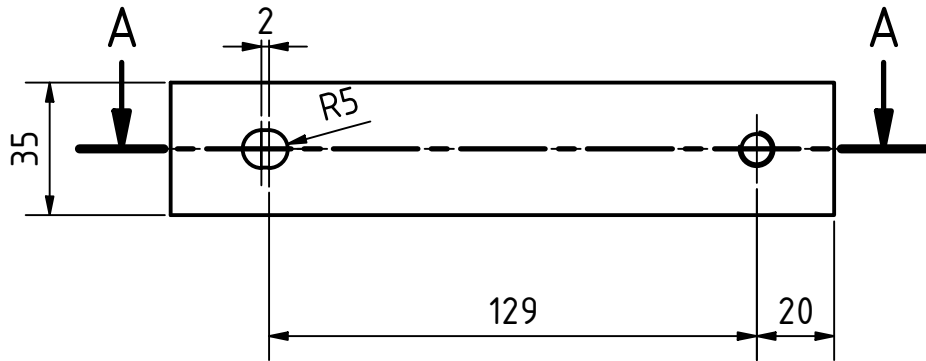
Napomena: Sve oštne ivice oboriti za 0,5mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi			Termička obrada:		
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 1 : 1	
		Datum: 11/4/2017	Naziv: Klin za sto masine		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
Fakultet inženjerskih nauka			Oznaka: Pozicija 7/1		List: 1
					A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		

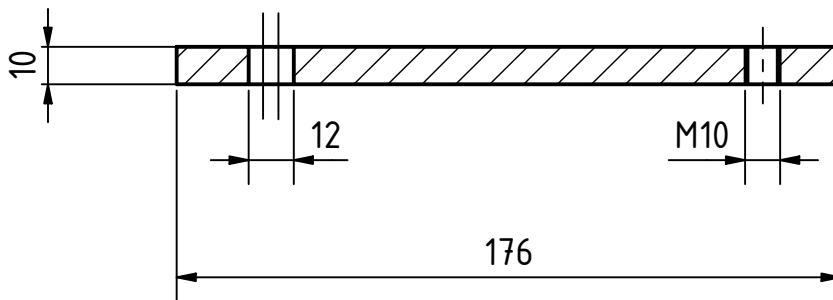


Napomena: Sve oštre ivice oboriti 0,5mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi				Termička obrada:	
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 1 : 5	
		Datum: 11/3/2017	Naziv: Noseca ploča		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 8	List: 1
					A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		

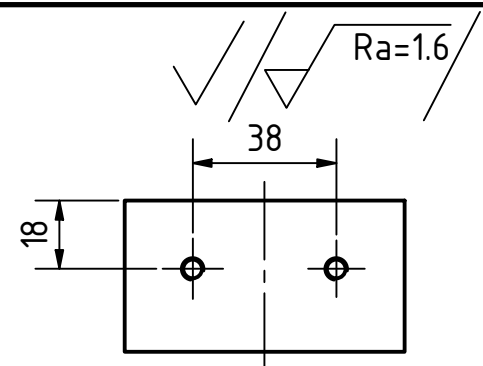
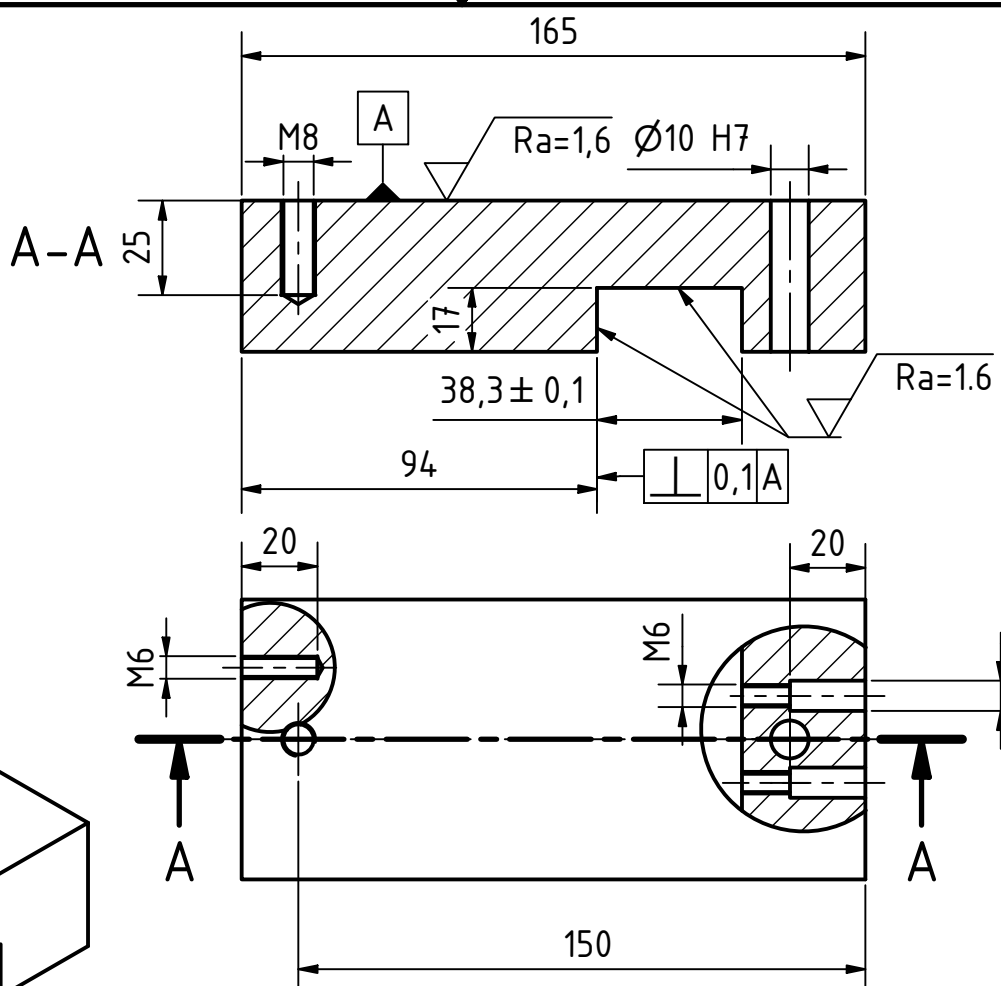
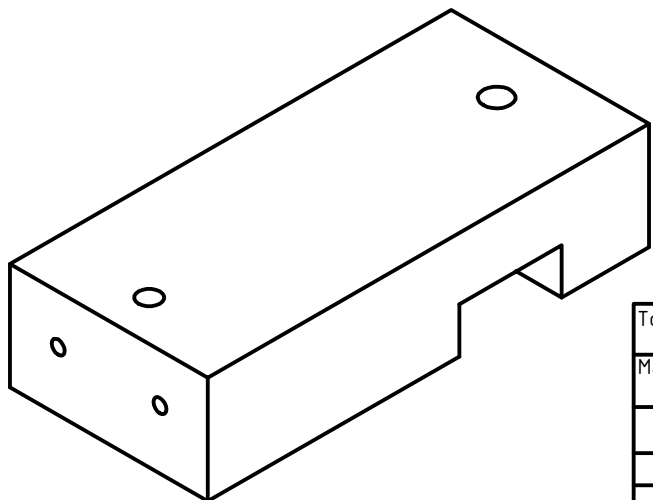
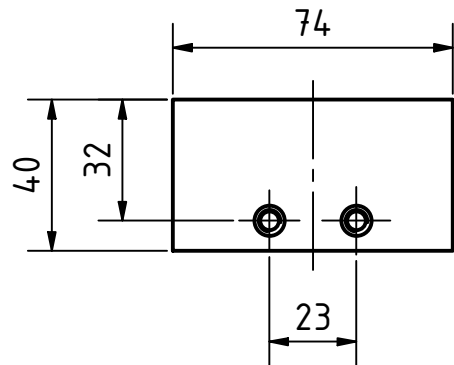


A-A



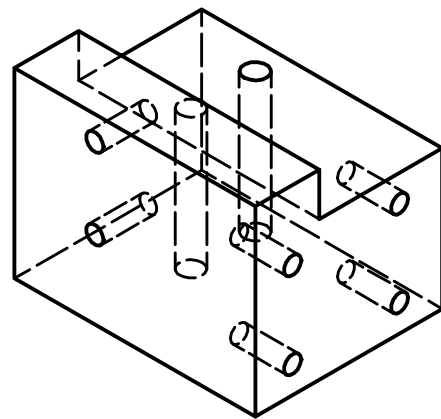
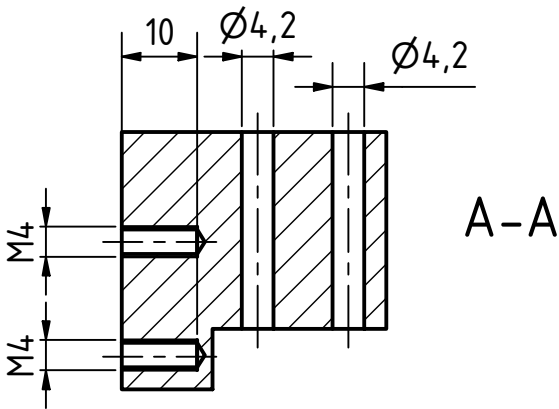
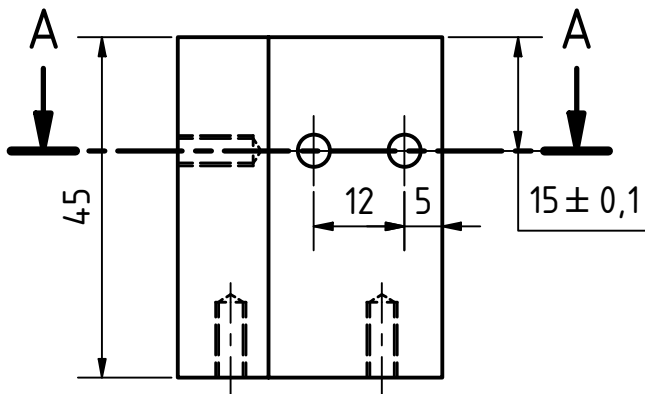
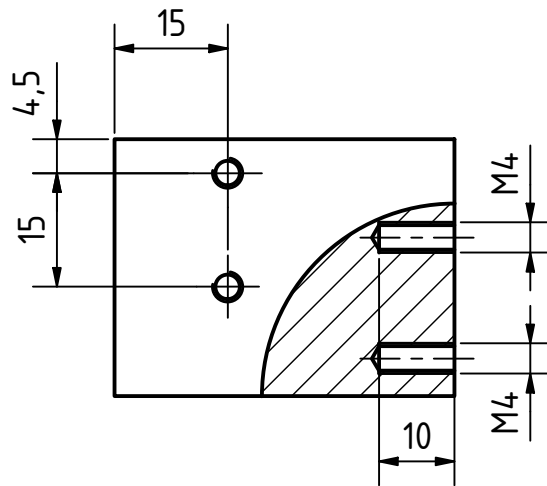
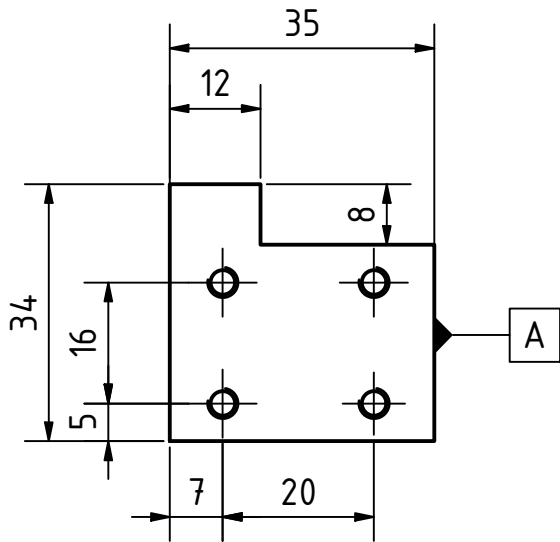
Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi			Termička obrada:		
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 1 : 2	
		Datum: 11/3/2017	Naziv: Ploča za pomeranje		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
Fakultet inženjerskih nauka			Oznaka: Pozicija 9		List: 1 A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		



Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi				Termička obrada:	
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 1 : 2	
		Datum: 11/3/2017	Naziv: Nosač dinamometra gornji		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 10	
Sfate		Izmene:	Datum:	Ime:	List: 1 / A4

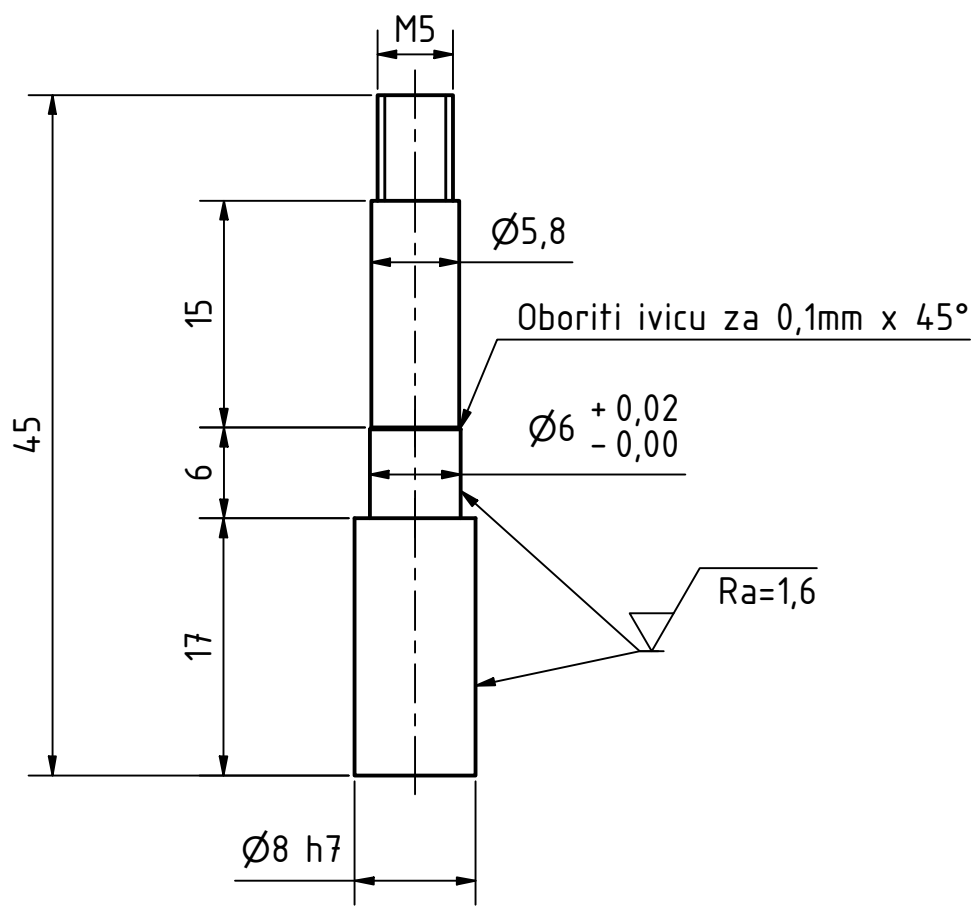
Napomena:
Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°



- Napomene: - Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°
 - Drugi komad je pogled u ogledalu prvog komada preko površine A
 - Svi otvori na istoj stranici komada su istih dimenzija

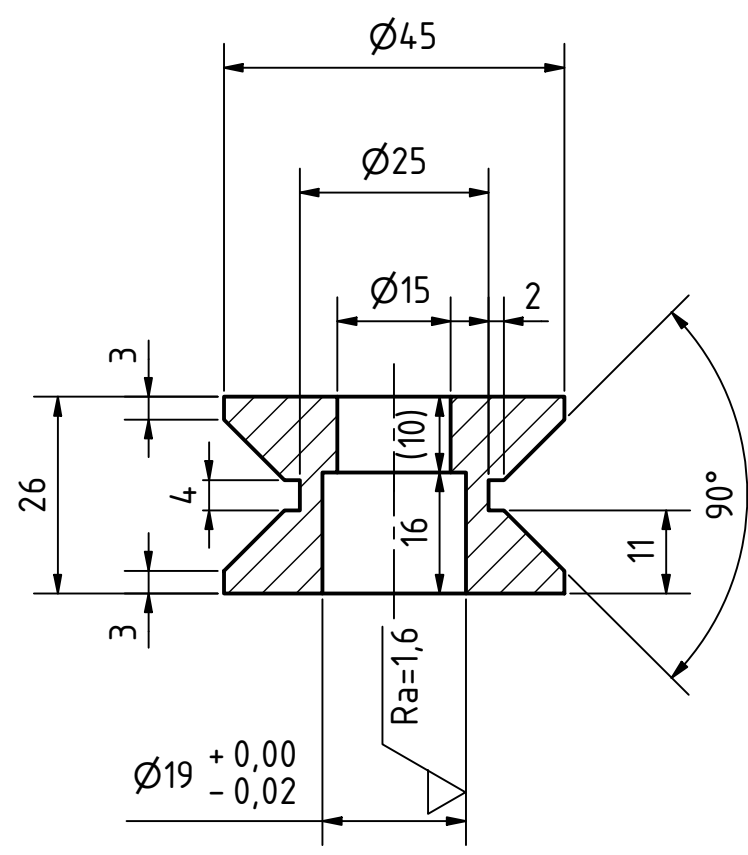
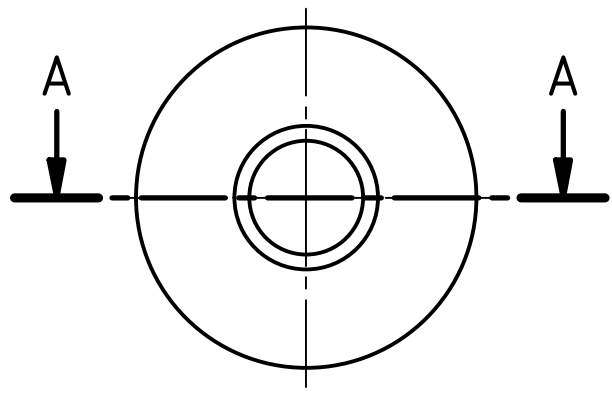
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:			
Materijal: AlCu5PbBi				Termička obrada:			
		Broj komada: 2		Masa:	Razmera: 1 : 1		
		Datum: 11/6/2017		Naziv: Nosač opruge			
		Obradio: Vladimir Kočović					
		Datum: 11/21/2017					
		Odobrio: Branko Tadić		Oznaka: Pozicija 12			
Fakultet inženjerskih nauka						List: 1 A4	
				Stafa		Izmene:	

✓/✓/✓ Ra=1,6



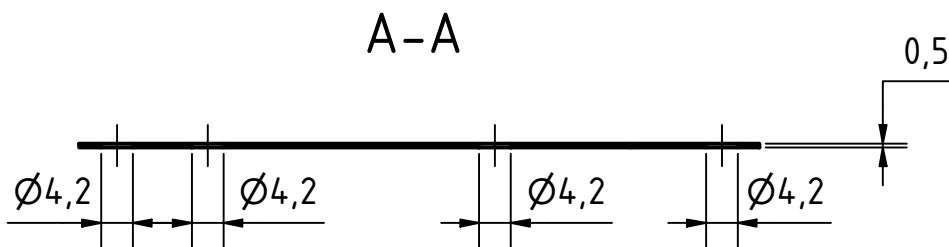
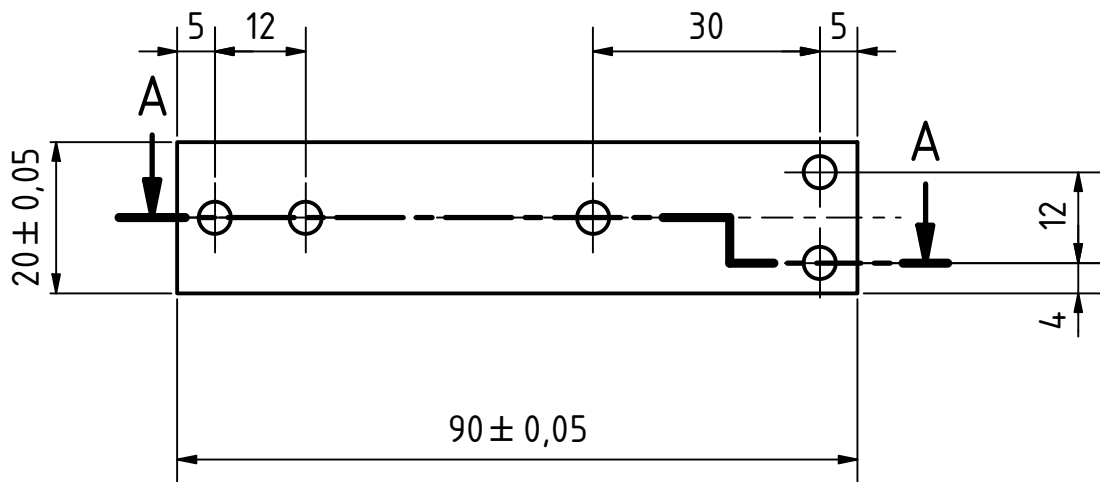
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi			Termička obrada:		
		Broj komada: 2	Masa:	Razmera: 2 : 1	
		Datum: 11/4/2017	Naziv: Osovina za prizmu		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
Fakultet inženjerskih nauka			Oznaka: Pozicija 13		List: 1
					A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		

✓/✓/✓ Ra=1,6



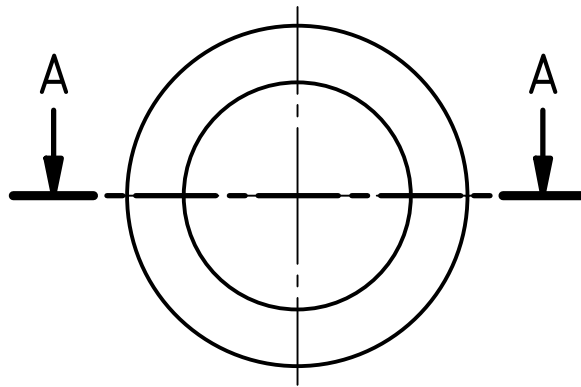
Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi				Termička obrada:	
		Broj komada: 2	Masa:	Razmera: 1 : 1	
		Datum: 11/4/2017	Naziv: Rotirajuća prizma		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 14	List: 1
					A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		

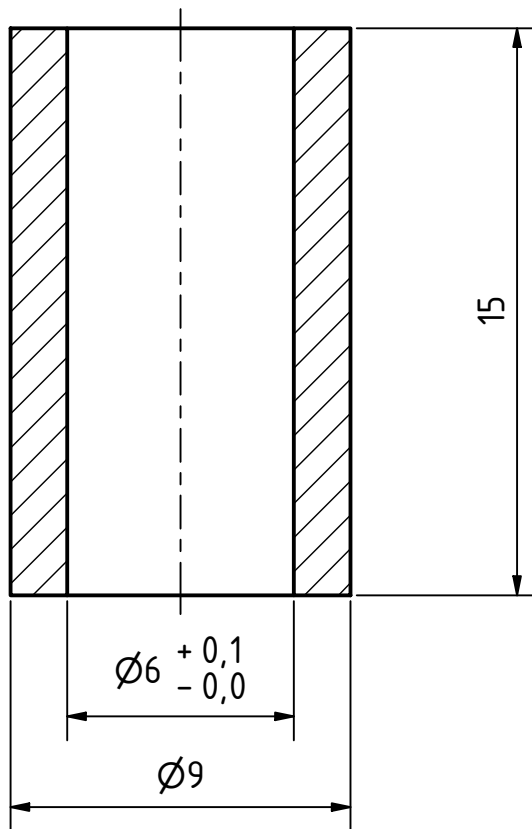


Napomena: Sve oštne ivice oboriti 0,1mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:		
Materijal: 1 CS 60				Termička obrada:		
		Broj komada: 6		Masa:	Razmera: 1 : 1	
		Datum: 11/6/2017		Naziv: Opruga 0,5 mm		
		Obradio: Vladimir Kočović				
		Datum: 11/21/2007				
		Odobrio: Branko Tadić				
		Fakultet inženjerskih nauka			Oznaka: Pozicija 15	List: 1 A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:			

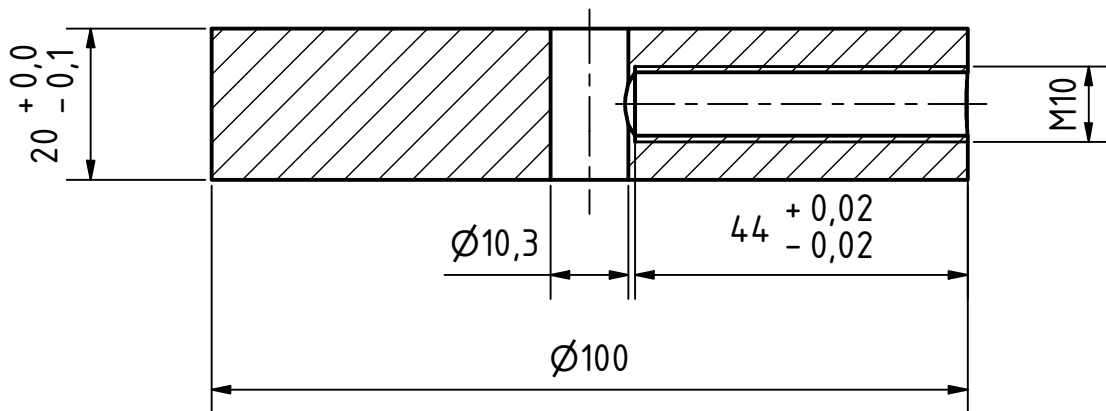
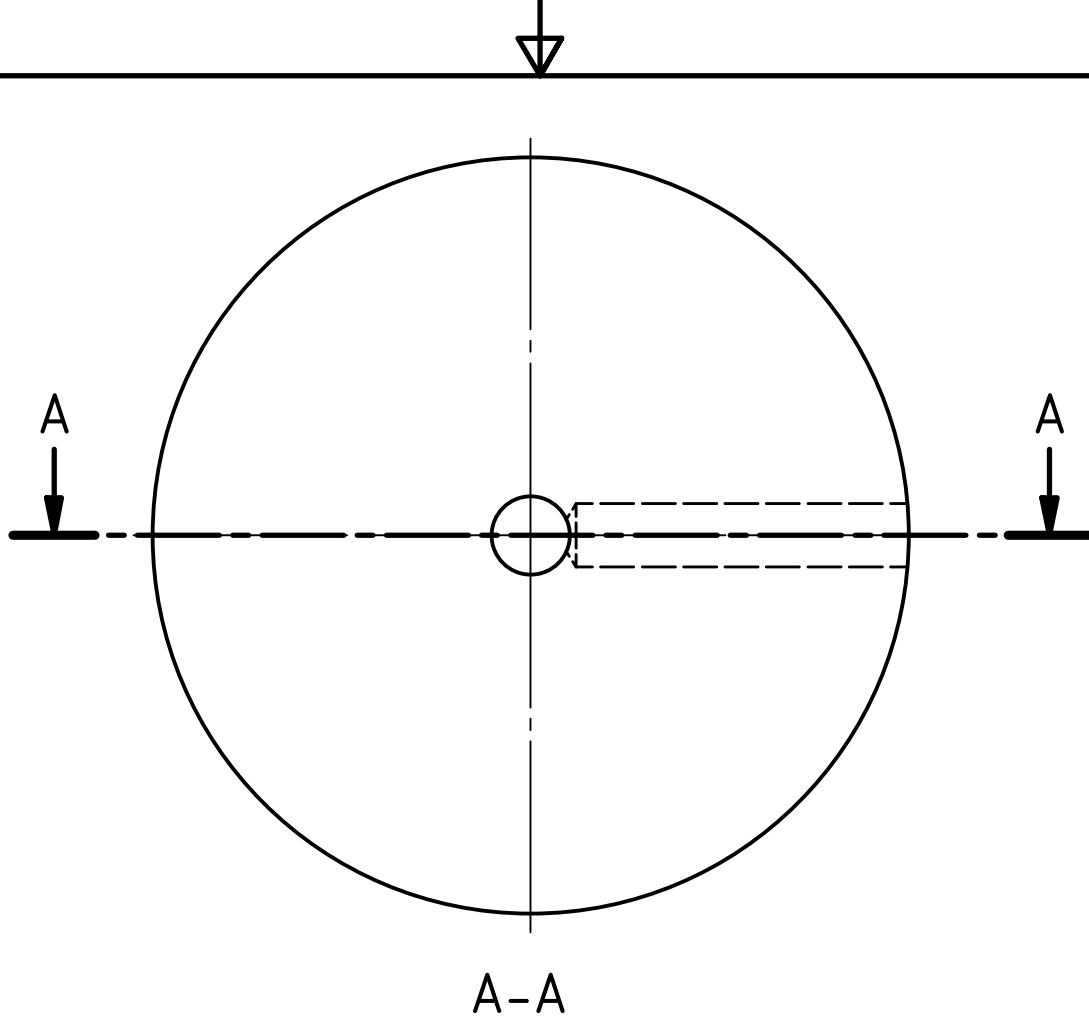


A-A



Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°

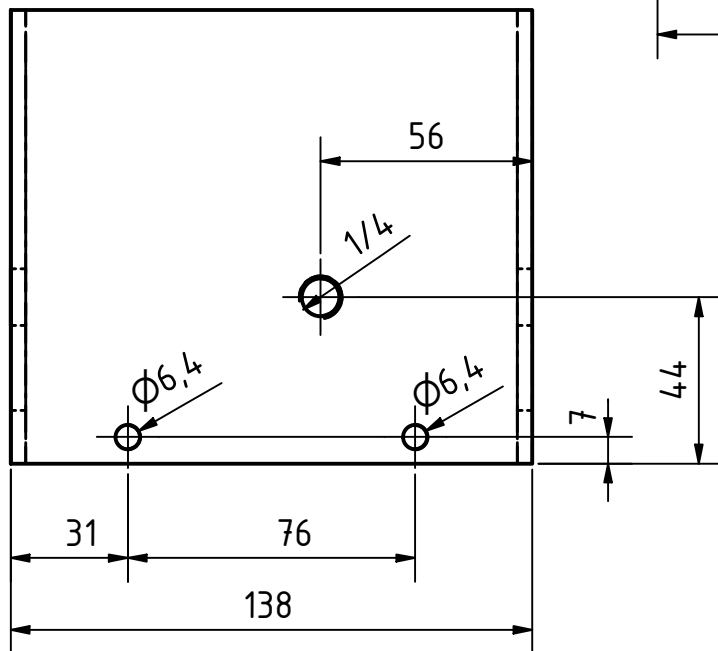
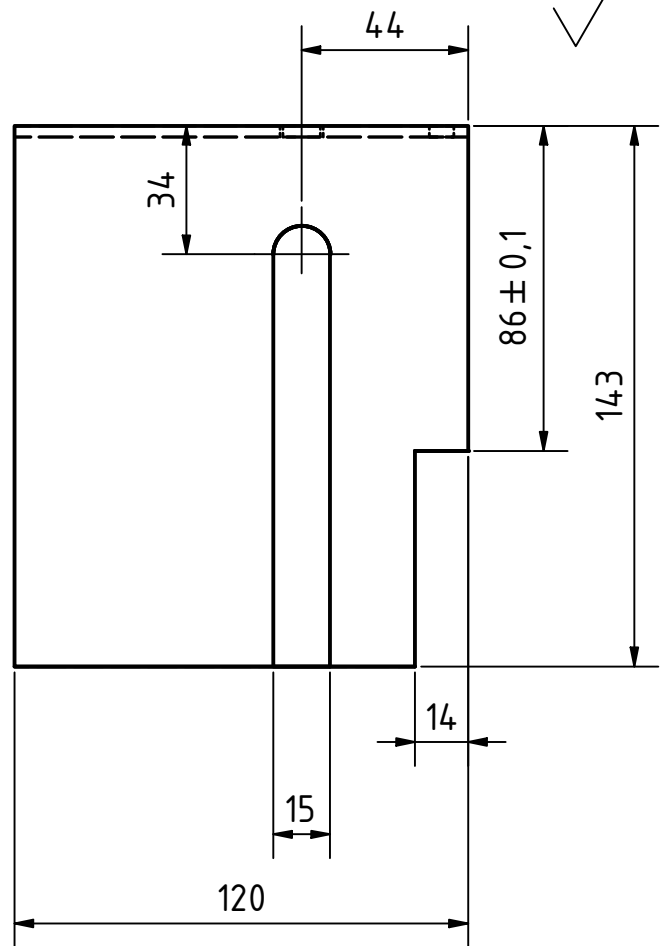
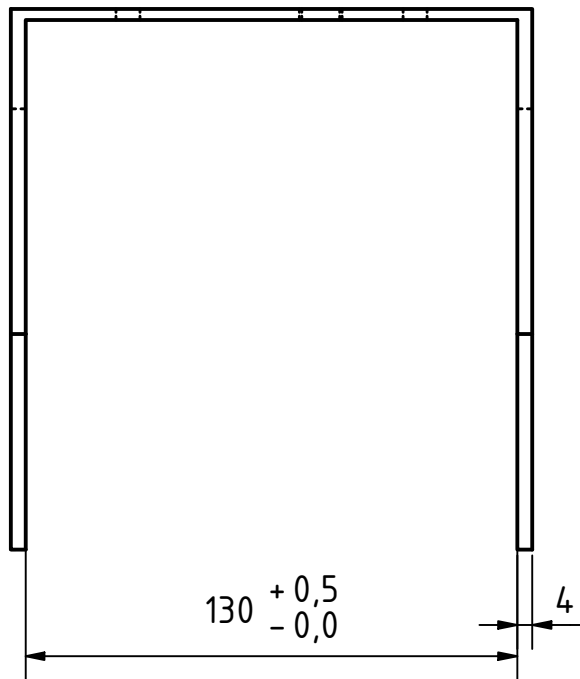
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi			Termička obrada:		
		Broj komada: 2	Masa:	Razmera: 5 : 1	
		Datum: 11/6/2017	Naziv: Čaura za prizmu		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
Fakultet inženjerskih nauka			Oznaka: Pozicija 16		List: 1
					A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		



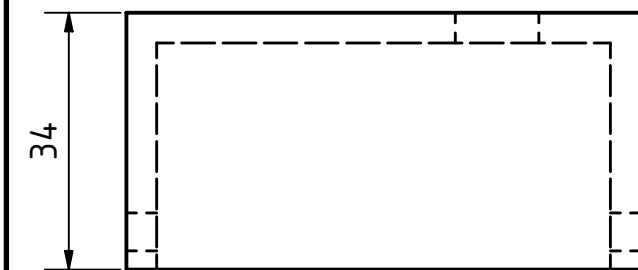
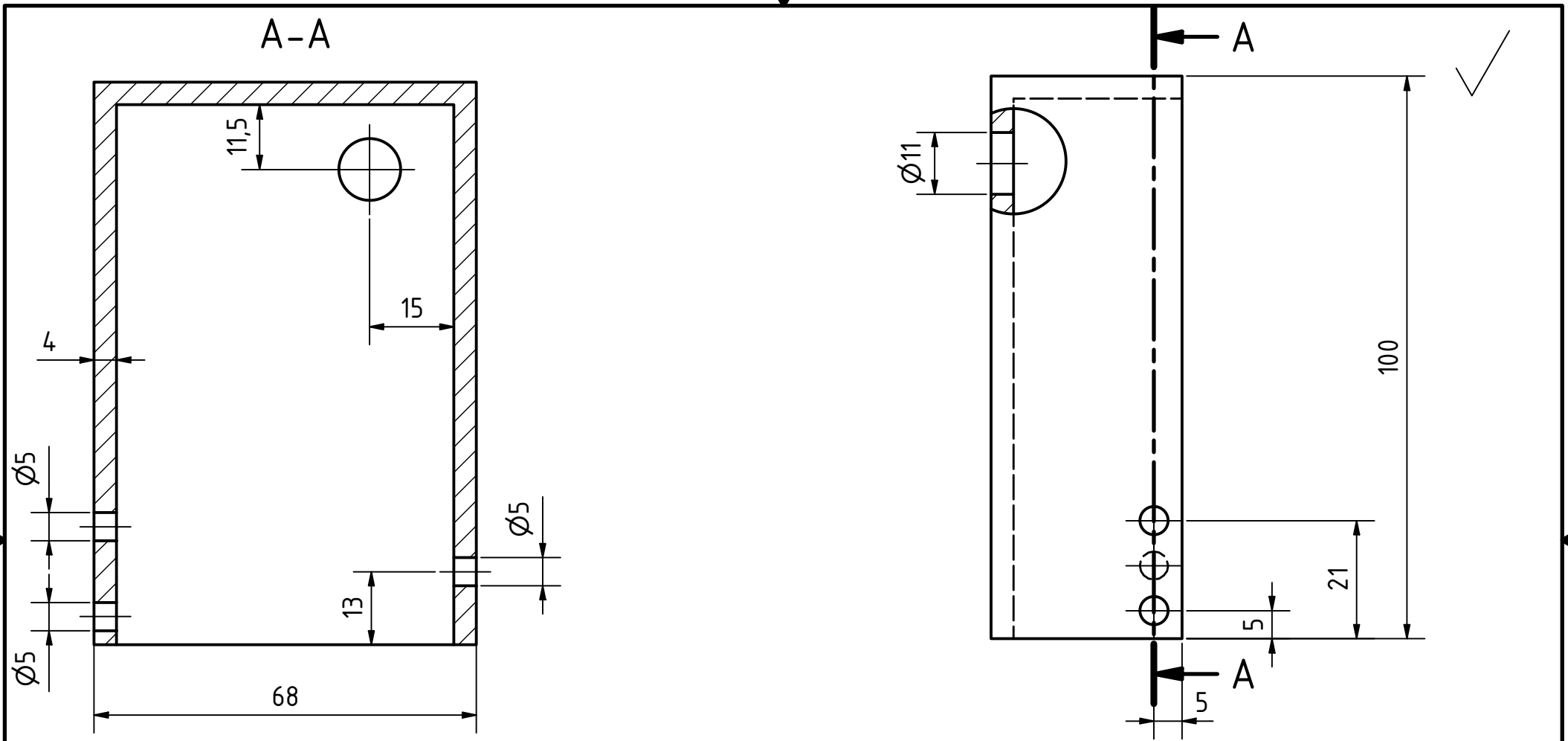
Napomene:

- Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°
- Svi tegovi moraju biti iste mase
- Masu tegova korigovati promenom prečnika

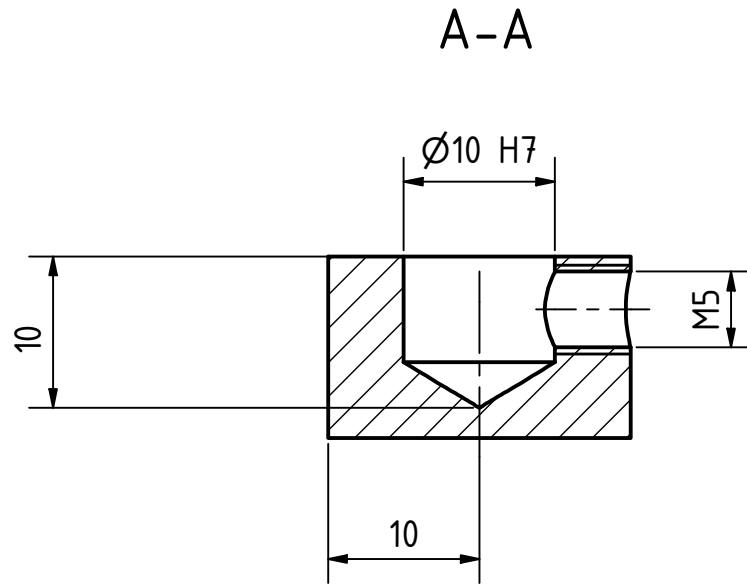
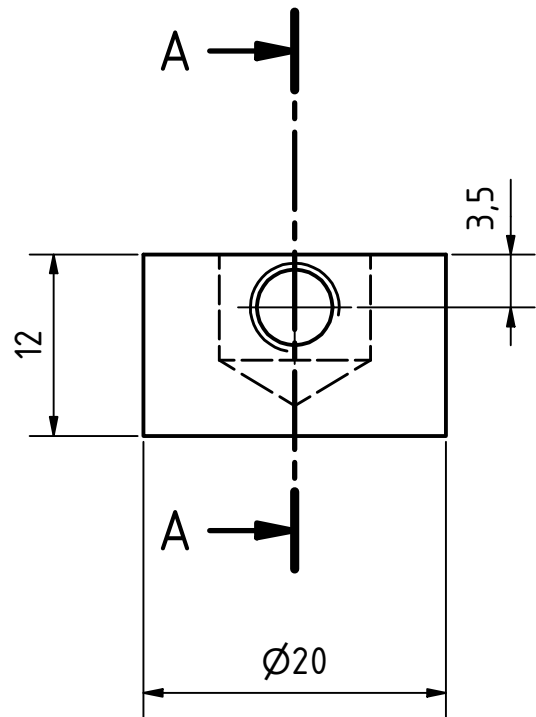
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: S235 JR			Termička obrada:		
		Broj komada: 6	Masa:	Razmera: 1 : 1	
		Datum: 11/6/2017	Naziv: Teg		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017	Oznaka: Pozicija 28		
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		List: 1 A4	
Stafa	Izmene:				Datum:



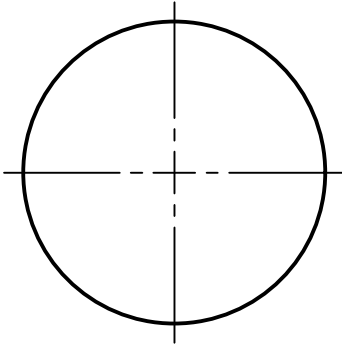
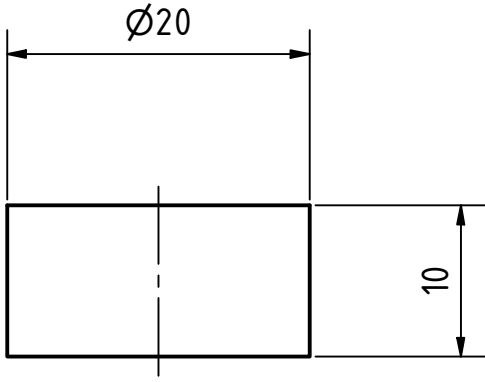
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: Pleksiglas providni				Termička obrada:	
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 1 : 2	
		Datum: 11/6/2017	Naziv: Zaštita		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017	Oznaka: Pozicija 29		
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		List: 1 A4	
Stafa	Izmene:				Datum:



Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: Pleksiglas providni				Termička obrada:	
		Datum: 11/6/2017	Naziv:	Broj komada: 1	Masa:
		Obradio: Kočović Vladimir	Zaštita 2	Razmera: 1 : 1	
		Datum: 11/21/2017	Oznaka:	Pozicija 31	List: 1
		Odobrio: Branko Tadić	Fakultet inženjerskih nauka	A4	
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		

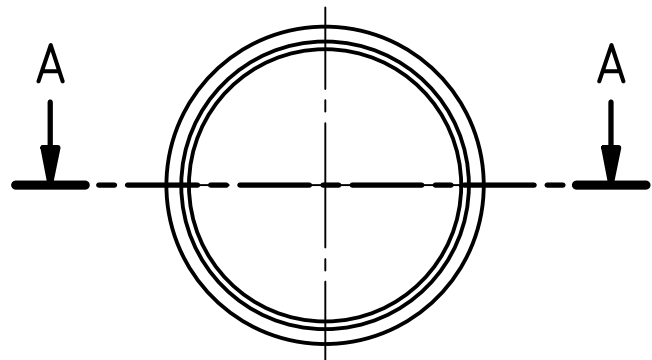


Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi			Termička obrada:		
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 2 : 1	
		Datum: 11/6/2017	Naziv:		
		Obradio: Vladimir Kočović	Šešir šipke		
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 32	List: 1
					A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		



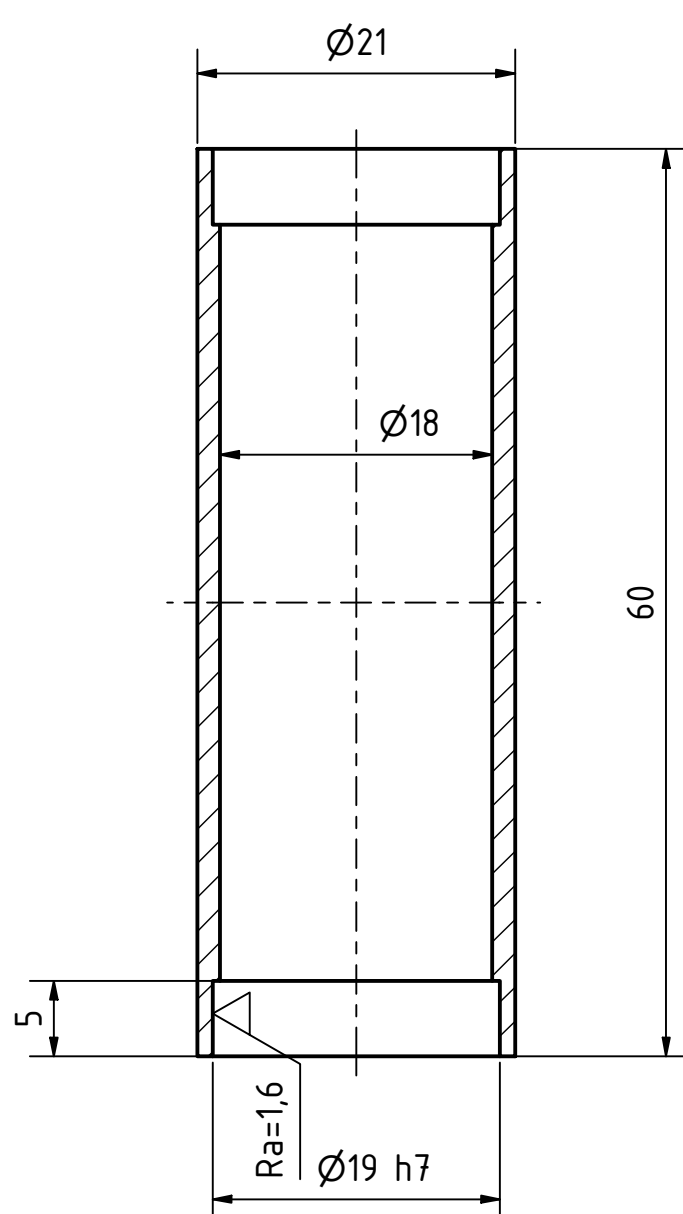
Napomena: Komad odseći od materijala FIBROELAST-Round rod 2531.4.020 prečnika Ø20 na potrebnu dužinu

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: Polyester			Termička obrada:		
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 2 : 1	
		Datum: 11/6/2017	Naziv: Stabilizator		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017	Oznaka: Pozicija 33		
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		List: 1	A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		

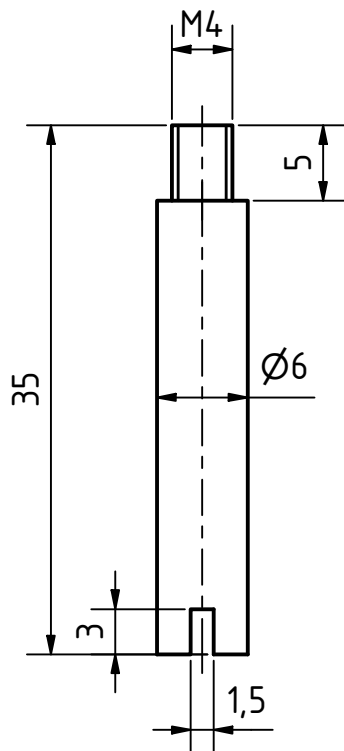
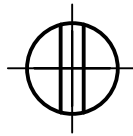


✓ / ✓ Ra=1,6 / ✓

A-A

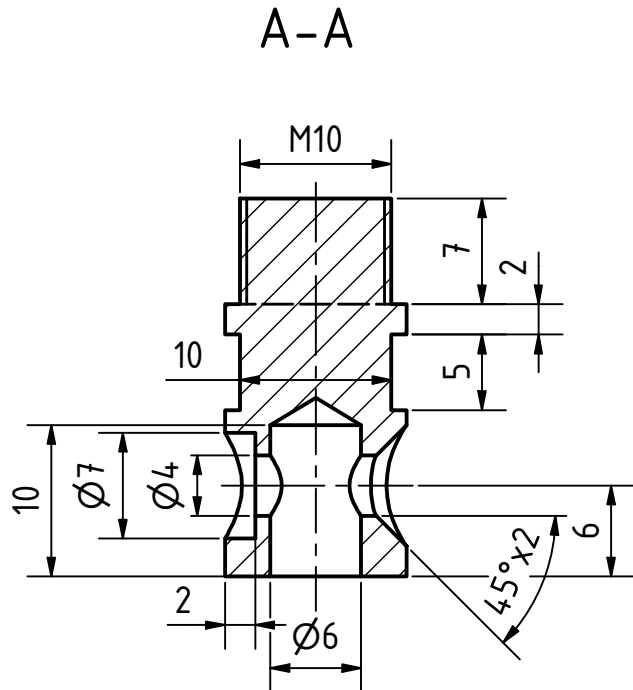
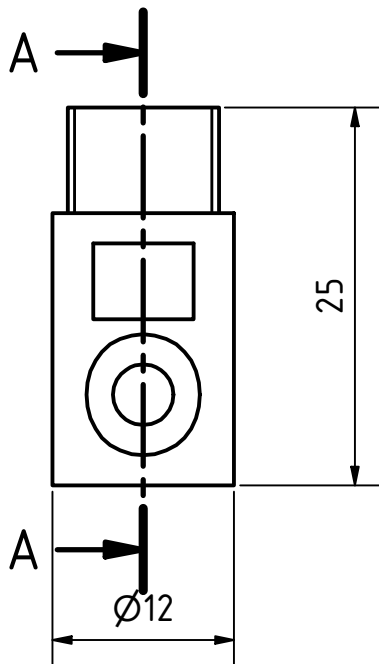


Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi			Termička obrada:		
		Broj komada: 2	Masa:	Razmera: 2 : 1	
		Datum: 11/6/2017	Naziv: Cev za ležajeve		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić	Oznaka: Pozicija 37		List: 1
Fakultet inženjerskih nauka					A4
Stafa:	Izmene:	Datum:	Ime:		



Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°

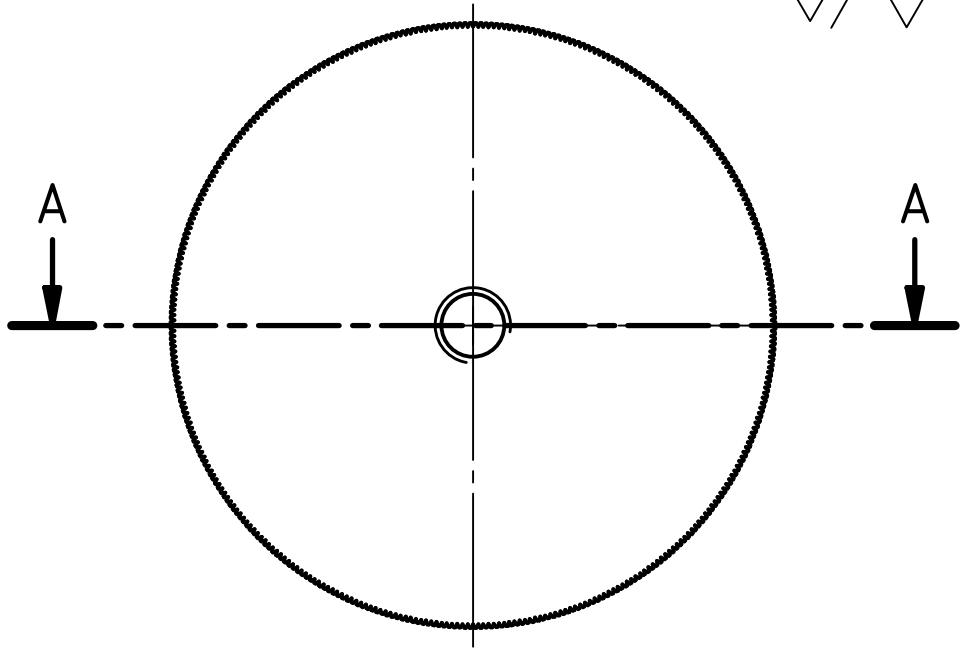
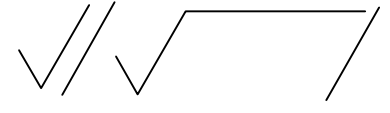
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi			Termička obrada:		
		Broj komada: 2	Masa:	Razmera: 2 : 1	
		Datum: 11/6/2017	Naziv: Nosač zaštite		
		Obradio: Kočović Vladimir			
		Datum: 11/21/2017	Oznaka: Pozicija 41		
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		List: 1 A4	
Staže	Izmene:				Datum:



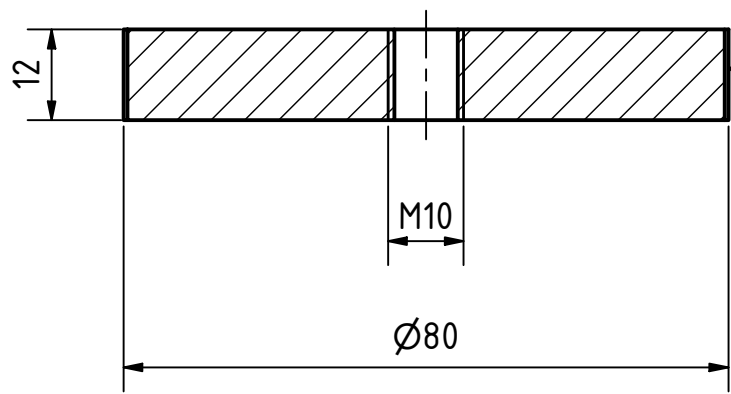
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: S235JR			Termička obrada:		
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 2 : 1	
		Datum: 11/6/2017	Naziv: Veza dinamometra i kolica		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2007			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 42	List: 1
					A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		



Radlovano



A-A

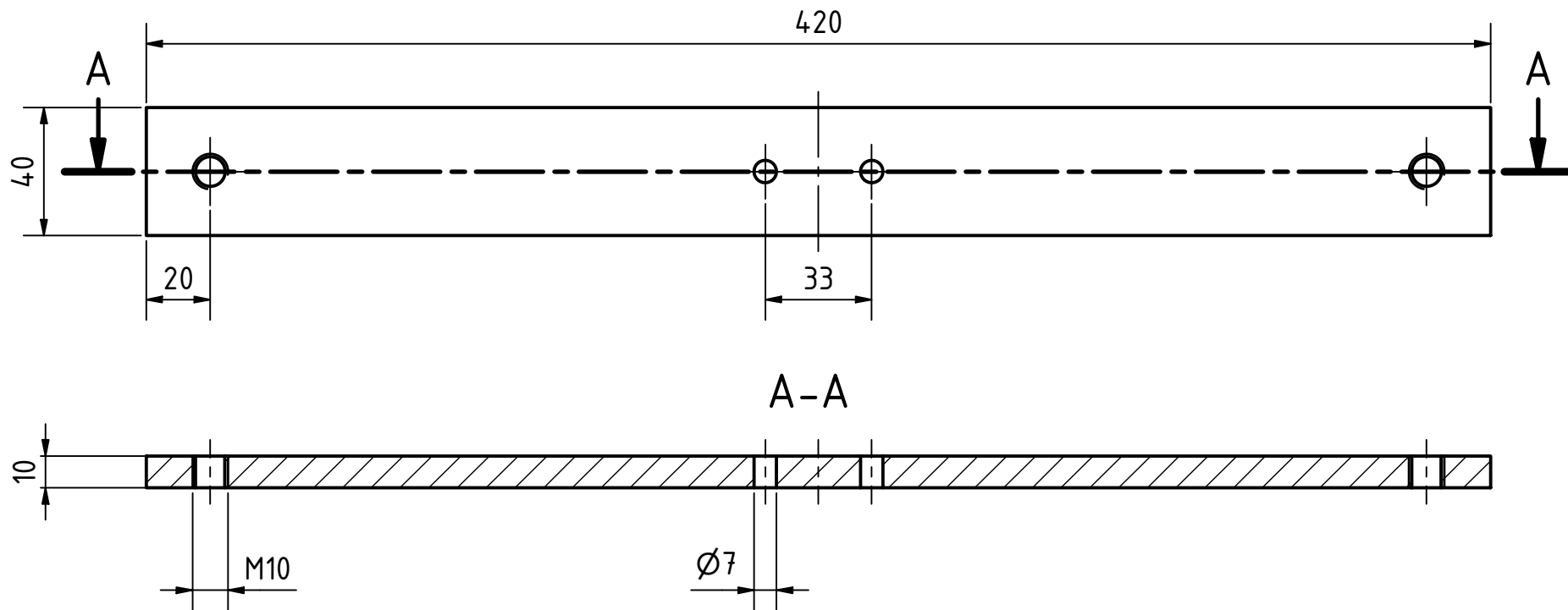


Radlovano

Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: S235JR			Termička obrada:		
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 1 : 1	
		Datum: 11/6/2017	Naziv: Radlovani disk		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017	Oznaka: Pozicija 48		
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		List: 1 A4	
Stafa	Izmene:				Datum:

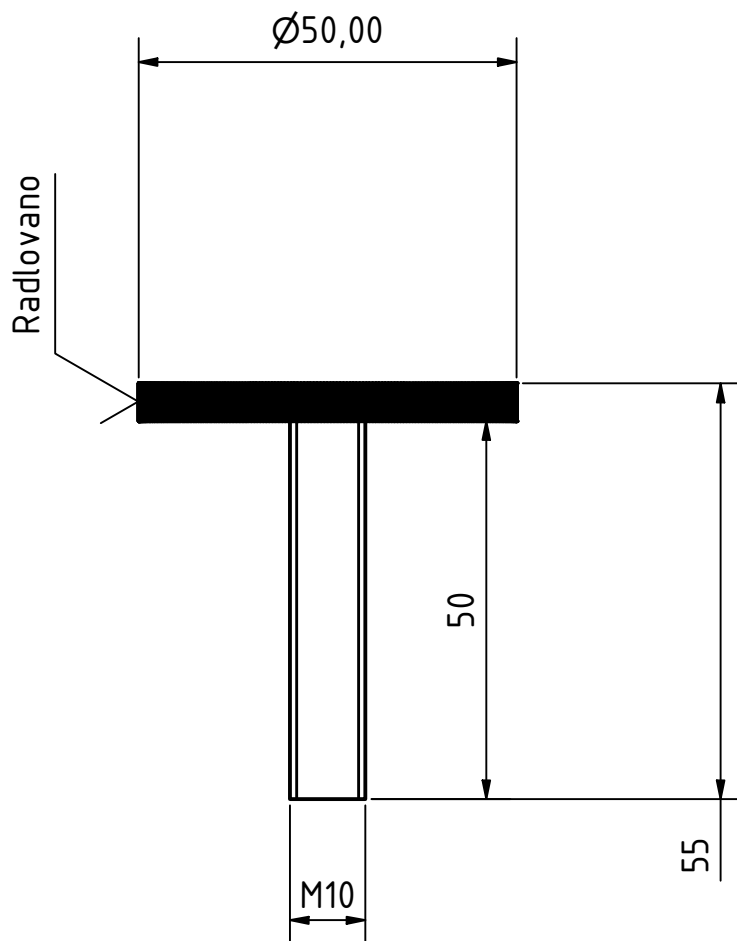
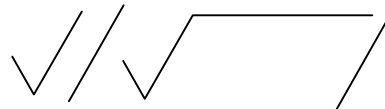




Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°

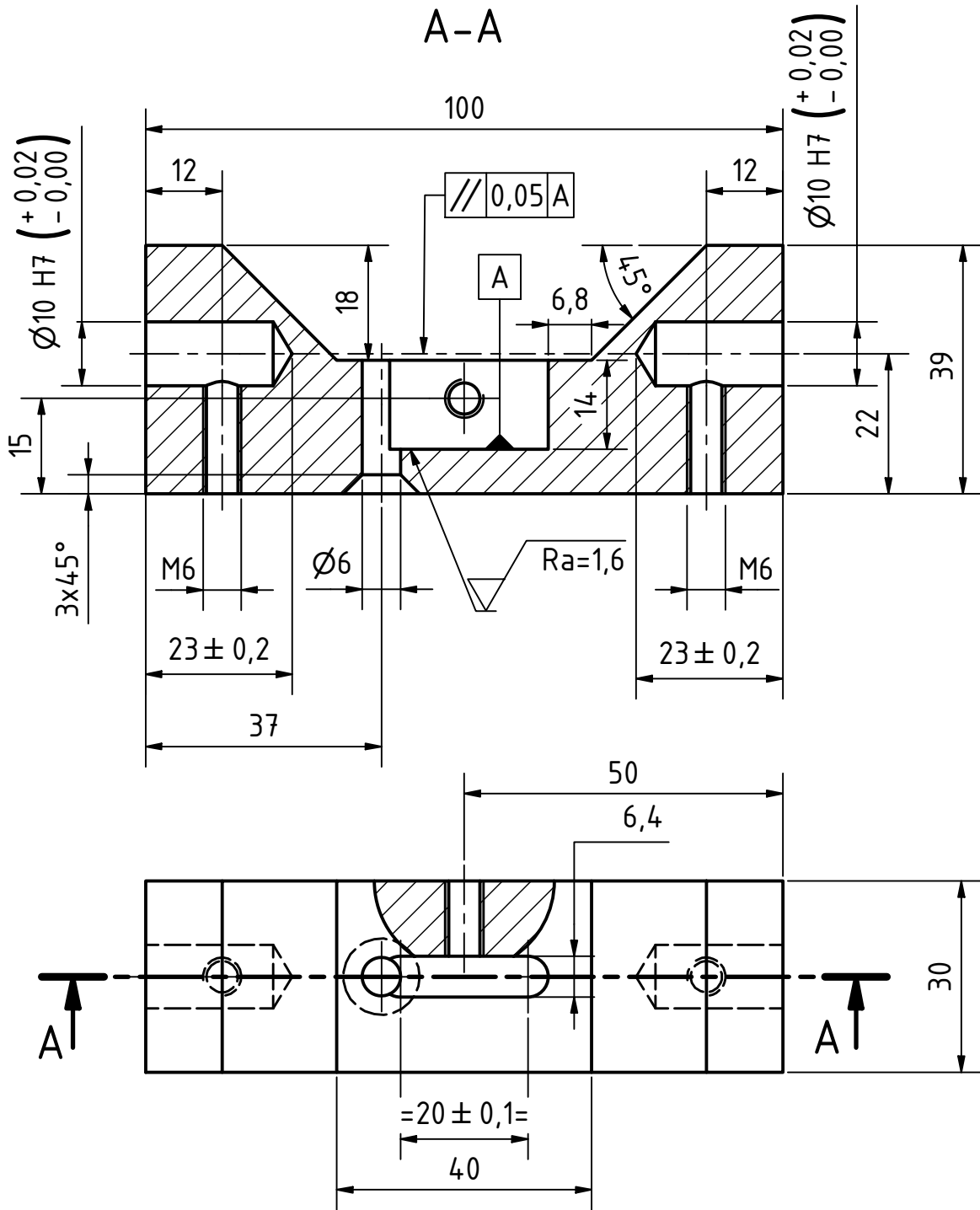
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: S235JR			Termička obrada:		
		Broj komada: 2	Masa:	Razmera: 1 : 2	
		Datum: 11/6/2017	Naziv: Oslonac		
		Obradio: Kočović Vladimir			
		Datum: 11/21/2017	Oznaka: Pozicija 52		
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		List: 1 A4	
State	Izmene:	Datum:	Ime:		

Radlovano



Napomene: -Sve oštre ivice oboriti 0,5mm x 45°
 -Deo se može izraditi iz dva dela

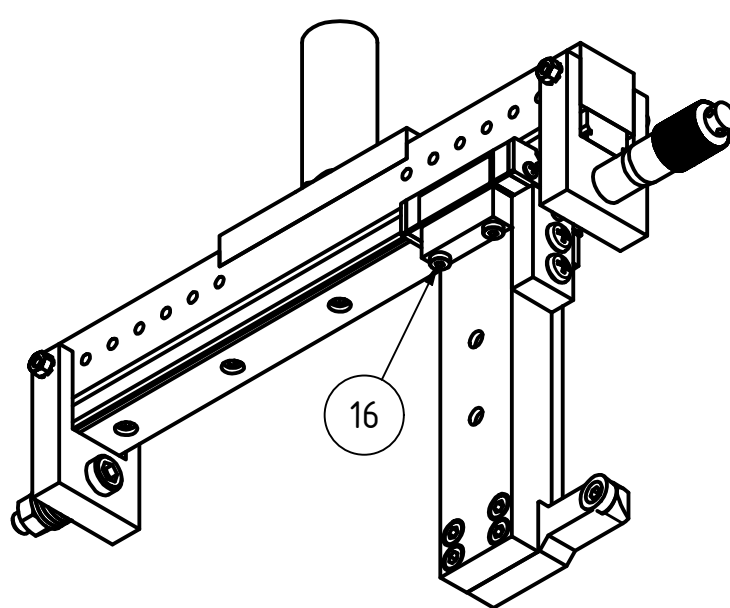
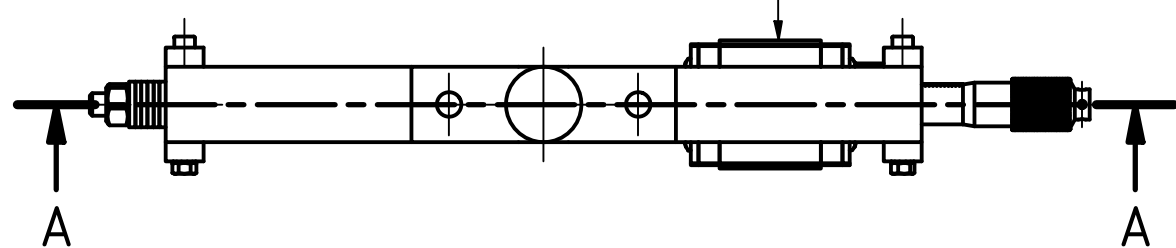
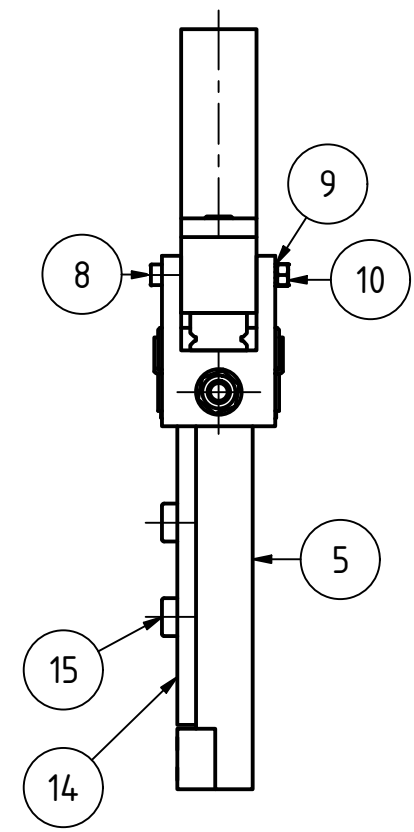
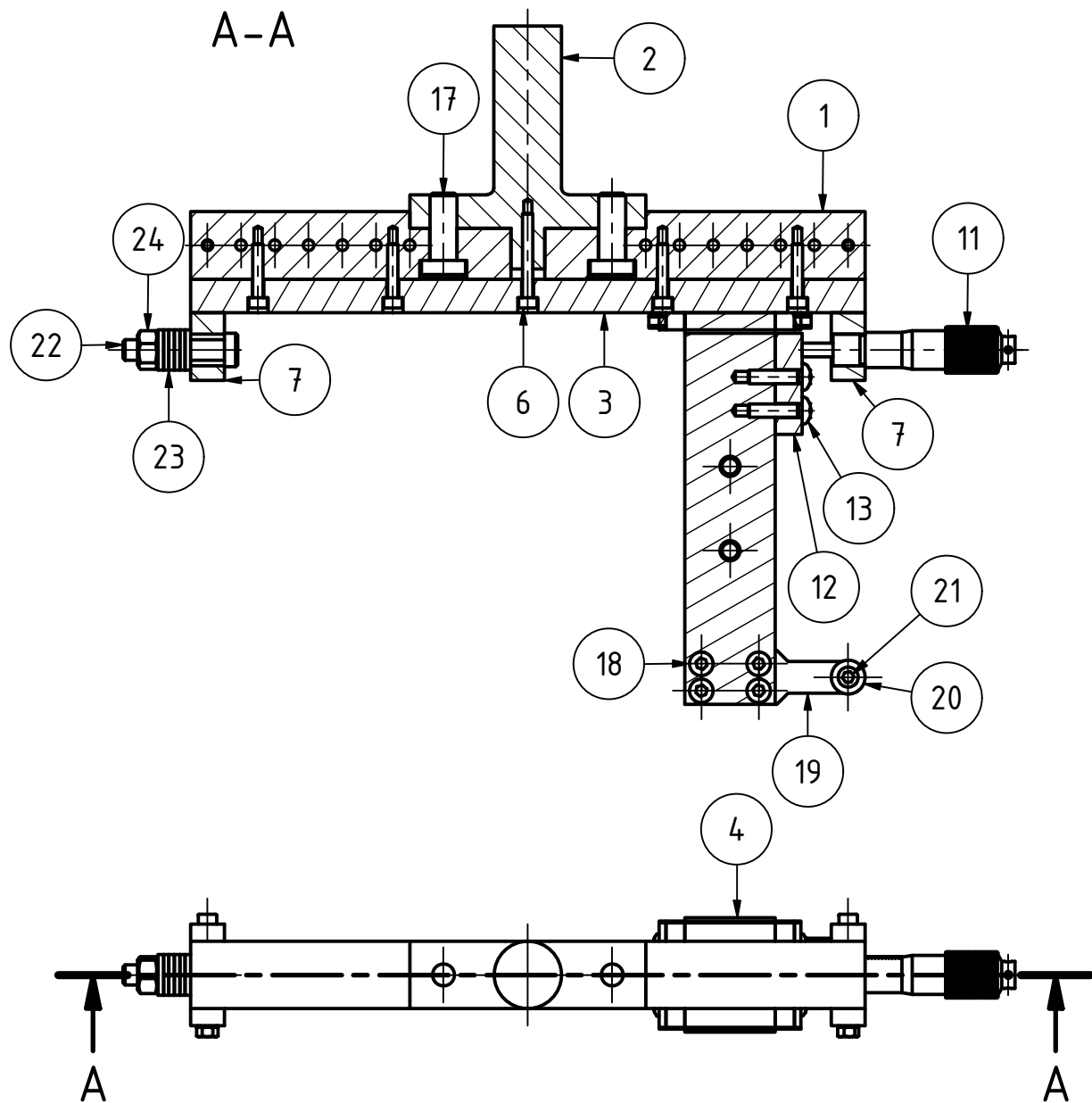
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: S235JR			Termička obrada:		
		Broj komada: 4		Masa:	Razmera: 1 : 1
		Datum: 11/6/2017		Naziv: Osloni zavrtnanj	
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 53	
				List: 1	
				A4	
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		



Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°

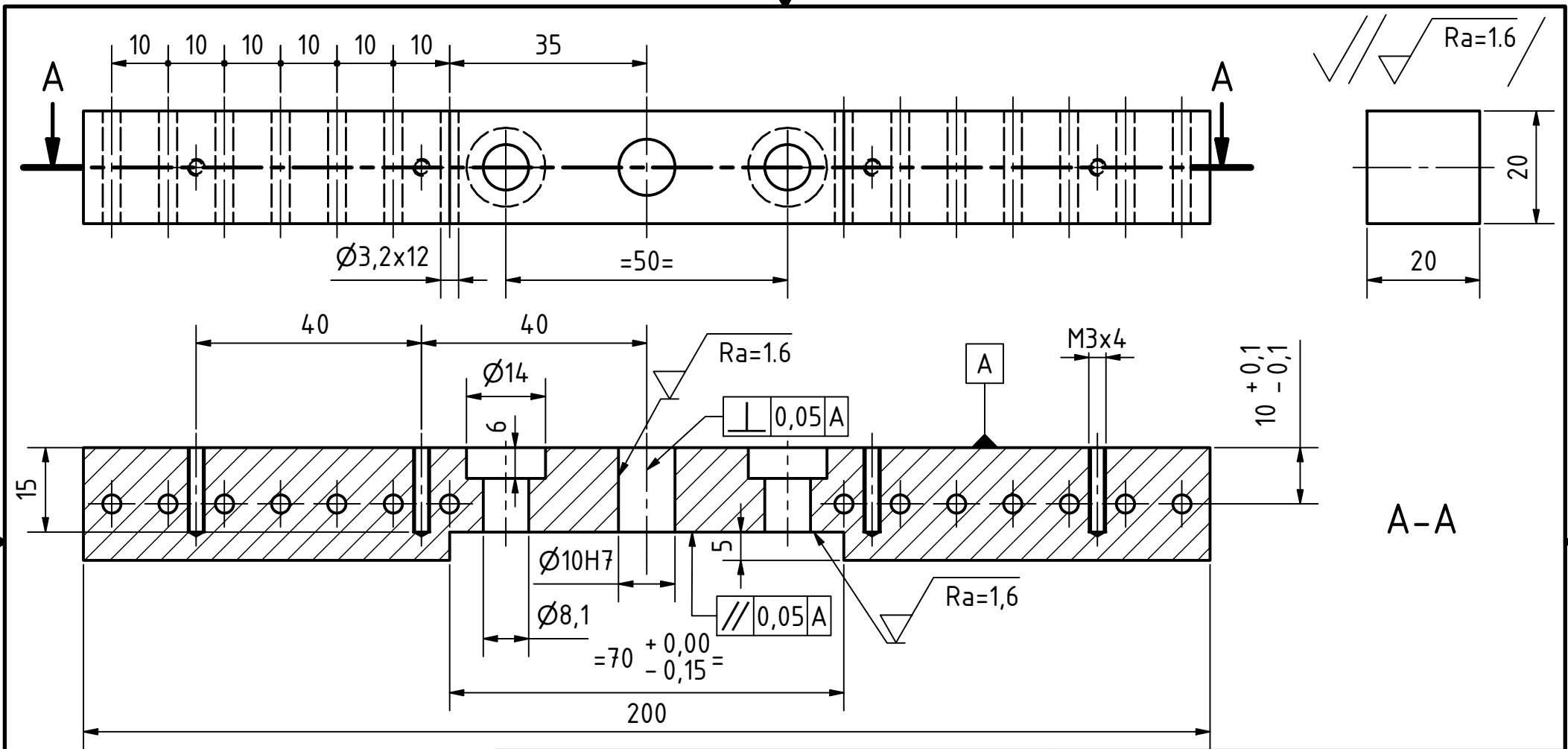
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi				Termička obrada:	
		Broj komada: 1		Masa:	Razmera: 1 : 1
		Datum: 11/6/2017		Naziv: Nosač alata	
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 11/21/2017			
		Odobrio: Branko Tadić		Oznaka: Pozicija 56	
Fakultet inženjerskih nauka					
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		

Прилог 4. Техничка документација алата за завршну обраду цилиндричних отвора инерцијалном силом



Lista delova		
Pozicija	Količina	Naziv
1	1	Nosač klizne staze
2	1	Prihvat alata
3	1	Klizna staza MGN 15C
4	1	Kolica MGN 15C
5	1	Nosač alata
6	1	ANSI B18.3.1M - M3x0.5 x 25
7	2	Nosač merila
8	2	ANSI B18.3.1M - M3x0.5 x 30
9	2	AS 1969 - M3
10	2	ANSI B18.2.4.2M - M3x0.5
11	1	Mikrometar
12	1	Odstojnik
13	2	AS 1427 - M4 x 16
14	1	Teg
15	2	DIN 7984 - M6 x 18
16	4	DIN 7984 - M3 x 14
17	2	DIN 6912 - M8 x 20
18	4	ANSI B18.3.1M - M4x0.7 x 16
19	1	Nosač rezne pločice
20	1	Rezna pločica RCMT 10 T3 M0
21	1	Zavrtnanj za pričvršćivanje pločice
22	1	DIN 6912 - M6 x 30
23	6	DIN 125 - A 6.4
24	1	ISO 4034 - M6

Tolerancije slobodnih mera:	Površinska hrapavost:	Površinska zaštita:		
Materijal:		Termička obrada:		
		Broj komada: 1 Masa: Razmera: 1 : 2		
	Datum: 3/20/2018	Naziv: Sklop reznog alata		
	Obradio: Vladimir Kočović			
	Datum: 4/2/2018			
	Odobrio: Branko Tadić			
	Fakultet inženjerskih nauka	Oznaka:		
State	Izmene:	Datum:	Ime:	1
				A3

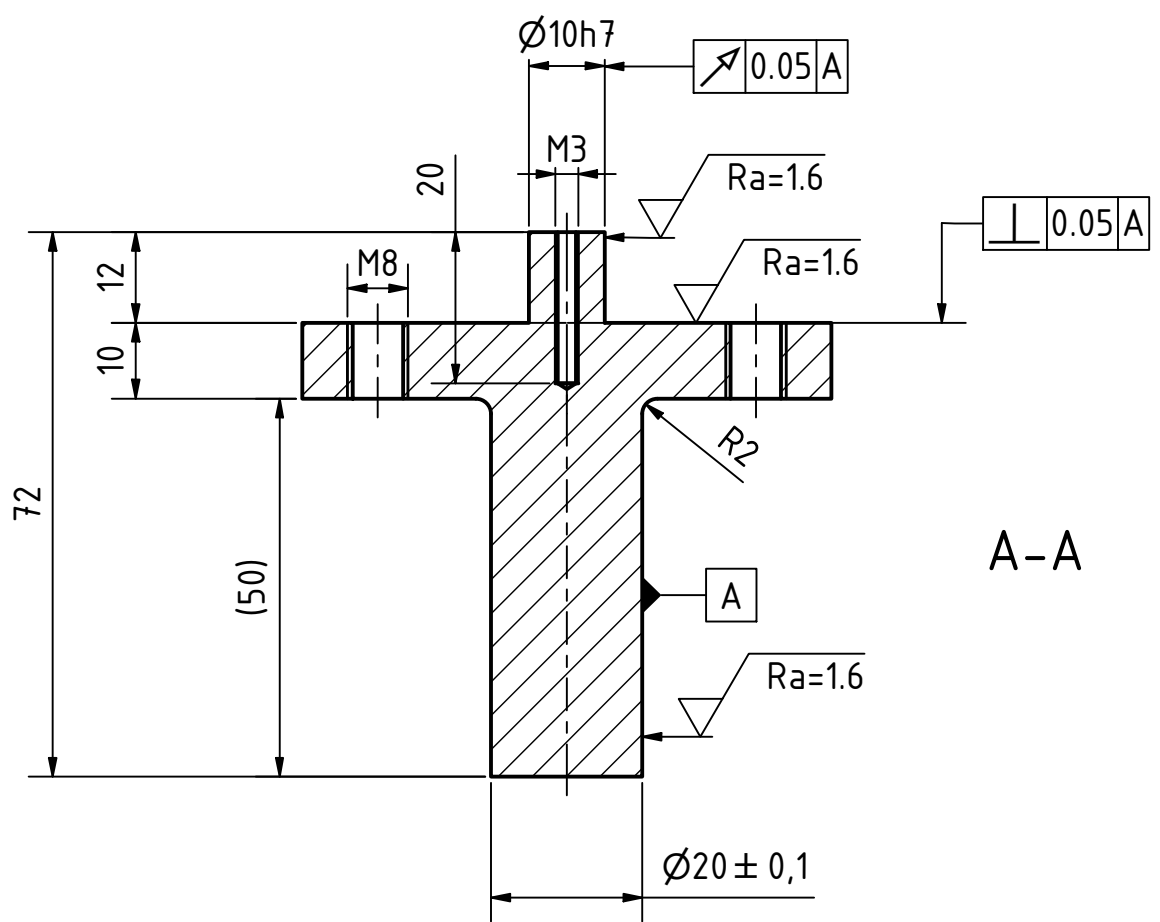
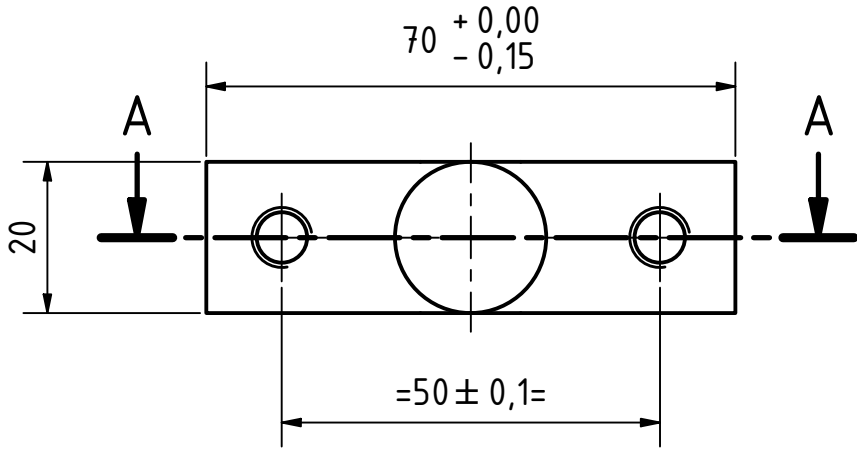


Napomena:

- Sve oštre ivice oboriti za $0,5\text{mm} \times 45^\circ$
- Dužinu klizne staze i raspored rupa za pričvršćivanje prilagoditi poziciji 1

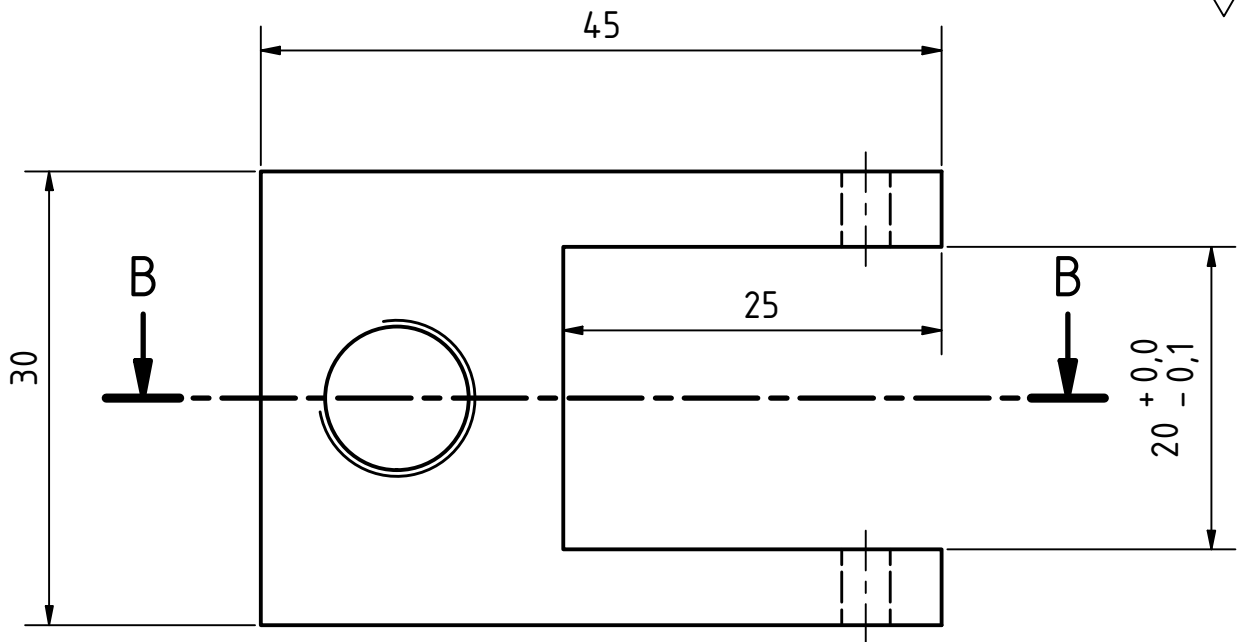
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:		
Materijal: AlCu5PbBi				Termička obrada:		
		Datum: 3/20/2018		Broj komada: 1		Masa:
		Obradio: Vladimir Kočović		Naziv: Nosáč klizne staze		Razmera: 1 : 1
		Datum: 4/2/2018		Oznaka: Pozicija 1		
		Odobrio: Branko Tadić				
		Fakultet inženjerskih nauka		List: 1		A4
Stafe		Izmene:		Datum:		Ime:

✓/✓/✓ Ra=1.6

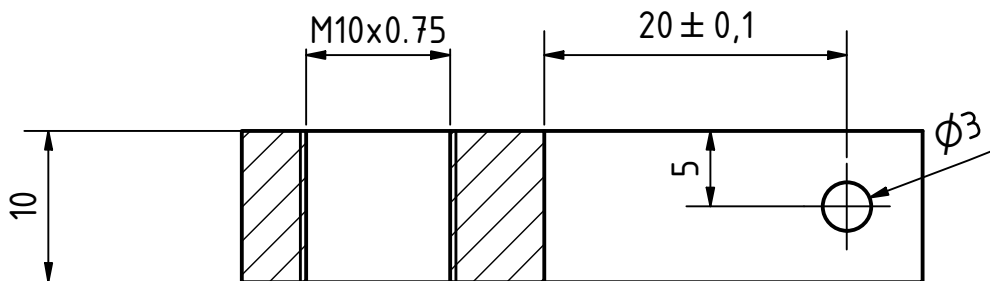


Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: S235JR				Termička obrada:	
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 1 : 1	
		Datum: 3/20/2018	Naziv: Prihvat alata		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 4/2/2018			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 2	List: 1
					A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		

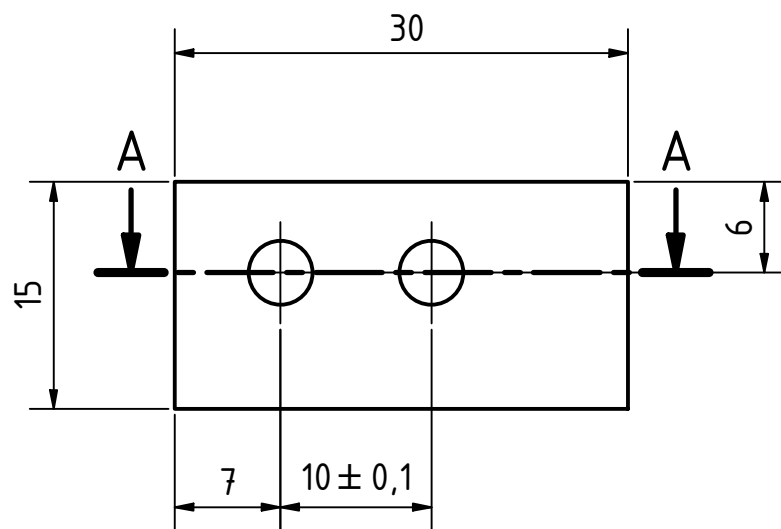


B-B

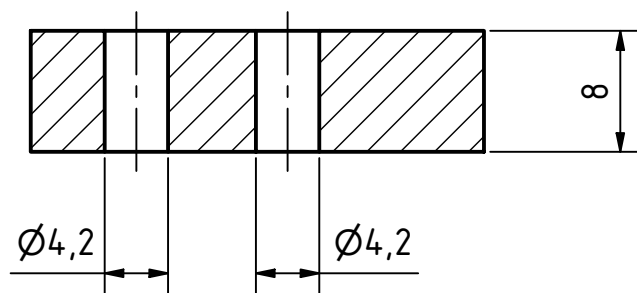


Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0.5mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi				Termička obrada:	
		Broj komada: 2		Masa:	Razmera: 2 : 1
		Datum: 3/20/2018		Naziv: Nosac merila	
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 4/2/2018			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 7	
Stafa		Izmene:		Datum:	
		Ime:		List: 1 / A4	

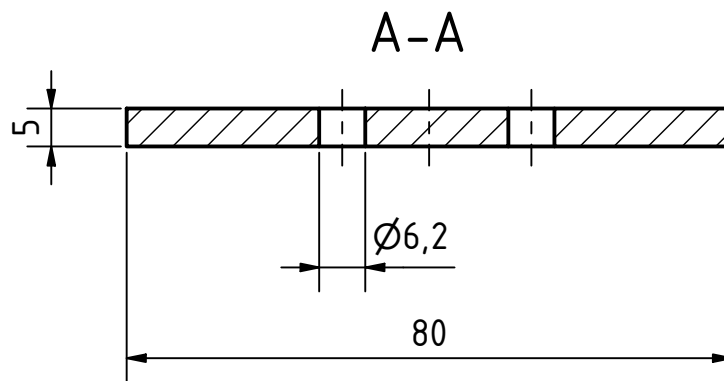
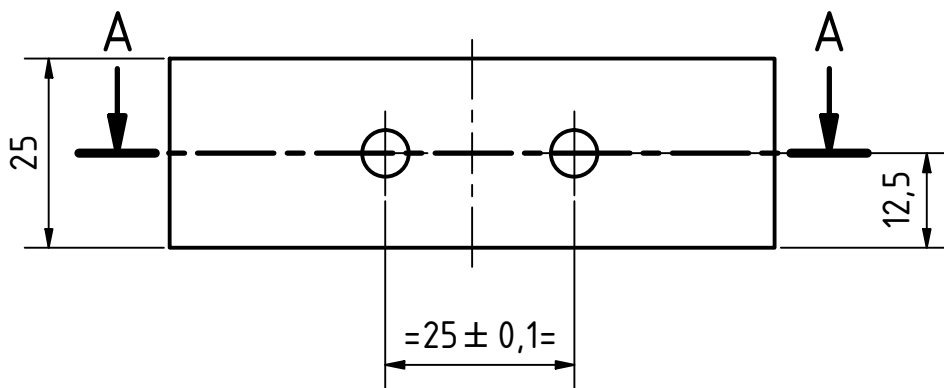


A-A



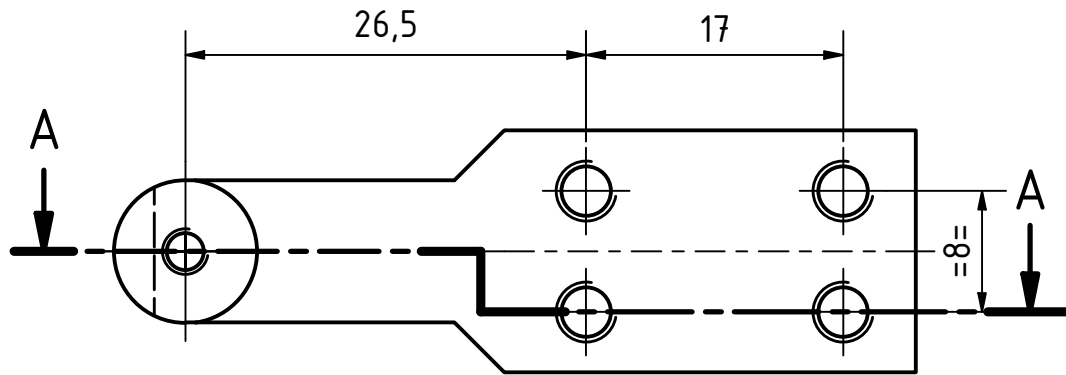
Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0,5mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi			Termička obrada:		
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 2 : 1	
		Datum: 3/21/2018	Naziv: Odstojnik		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 4/2/2018			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 12	List: 1
					A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		

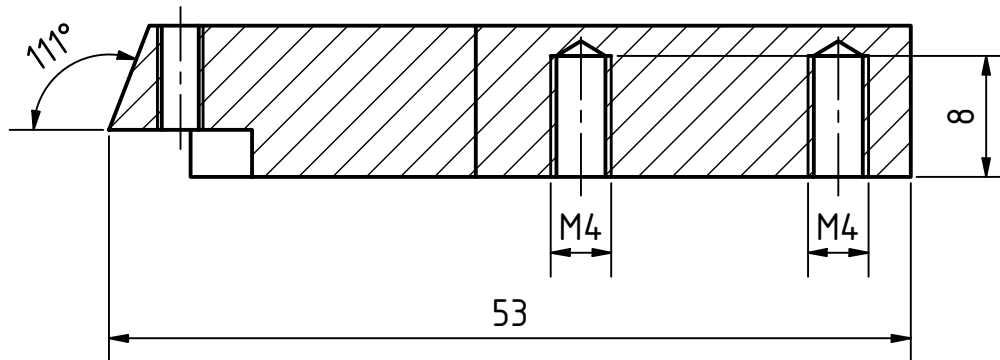
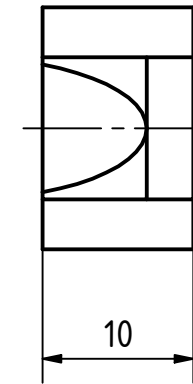


Napomena: Sve oštne ivice oboriti za 0.5mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: S235JR			Termička obrada:		
		Broj komada: 4	Masa:	Razmera: 1 : 1	
		Datum: 3/22/2018	Naziv: Teg		
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 4/2/2018			
		Odobrio: Branko Tadić			
Fakultet inženjerskih nauka			Oznaka: Pozicija 14		List: 1
					A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		



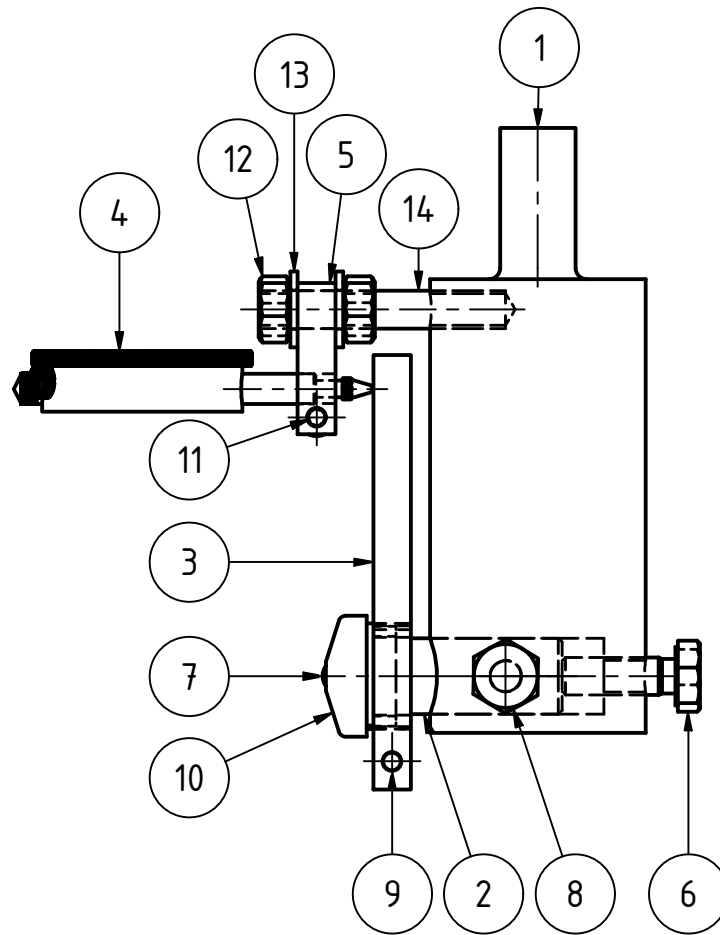
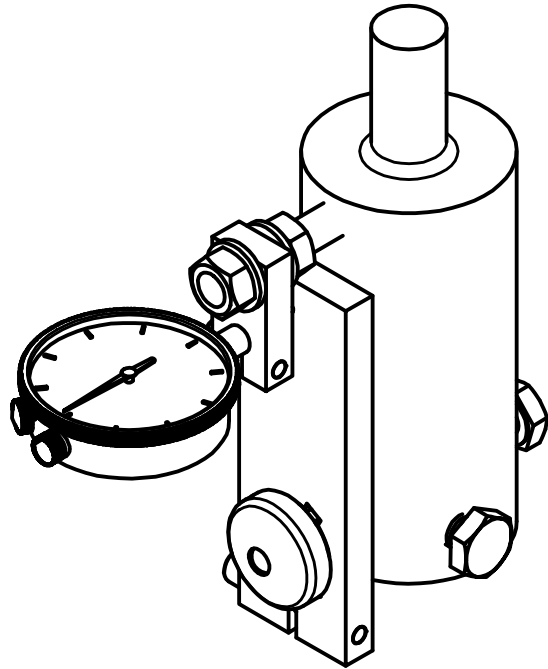
A-A



Napomena: Dostavljeni nosač rezne pločice prilagoditi prema priloženoj dokumentaciji

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:		
Materijal:				Termička obrada:		
				Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 2 : 1
		Datum: 3/20/2018		Naziv: Nosač rezne pločice		
		Obradio: Vladimir Kočović				
		Datum: 4/2/2018				
		Odobrio: Branko Tadić				
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 19		List: 1
						A4
State	Izmene:	Datum:	Ime:			

Прилог 5. Техничка документација алата за завршну обраду цилиндричних отвора „ball burnishing“ поступком

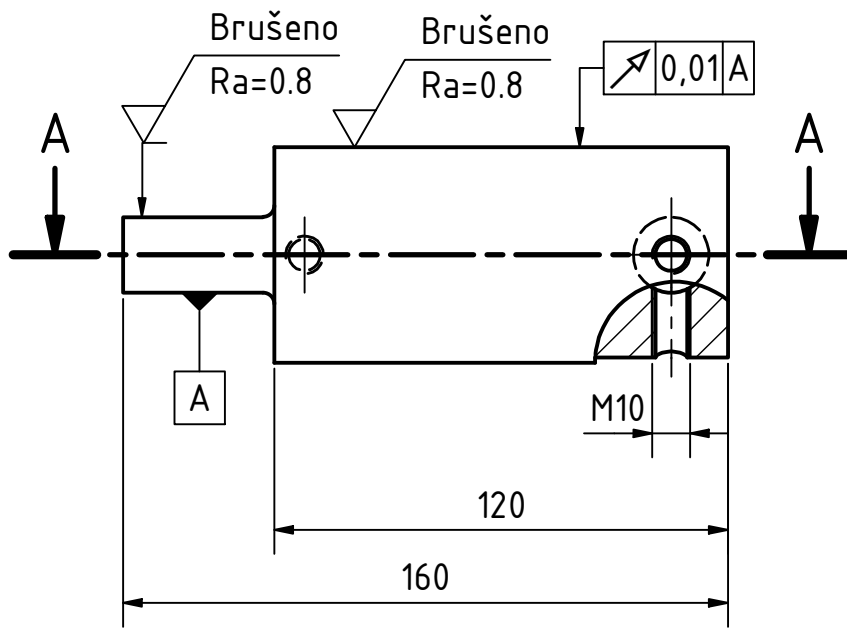


LISTA DELOVA

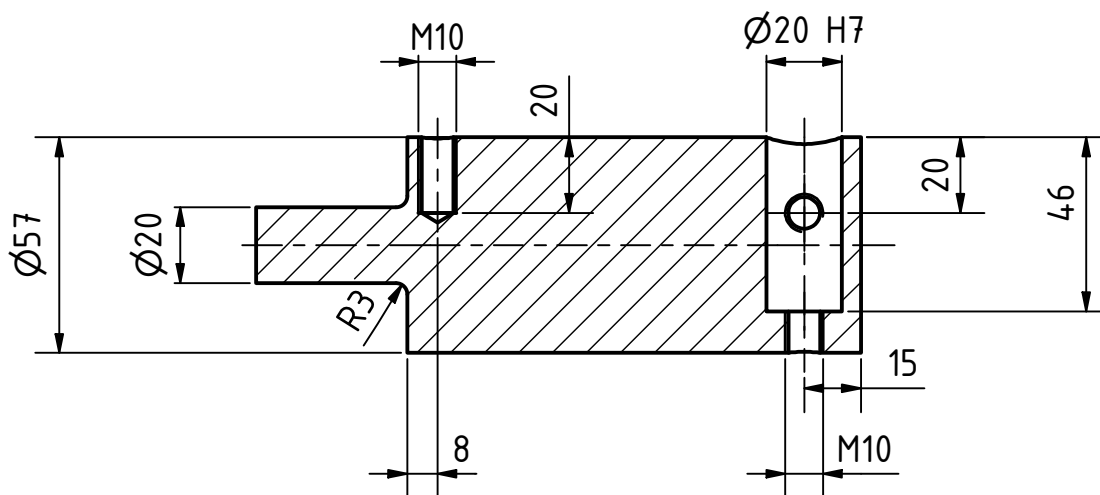
Pozicija	Količina	Naziv
1	1	Nosač alata
2	1	Alat
3	1	Reperna ploča
4	1	Komparater
5	1	Nosač komparatera
6	1	Zavrtanj M10 x 30
7	1	Kuglica 9 mm
8	1	Zavrtanj M10 x 22
9	1	Zavrtanj M6 x 40
10	1	Poklopac alata
11	1	Zavrtanj M6 x 20
12	2	Navrtka M10
13	2	Podloška M10
14	1	Navojna šipka

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal:				Termička obrada:	
				Broj komada: 1	Masa:
				Razmera: 1 : 2	
		Datum: 3/20/2018		Naziv: Склоп	
		Obradio: Vladimir Kočović			
		Datum: 4/2/2018			
		Odobrio: Branko Tadić			
Fakultet inženjerskih nauka				Oznaka:	
				List: 1 A4	
Štafe	Izmene:	Datum:	Ime:		

✓/✓/✓ Ra=0,8

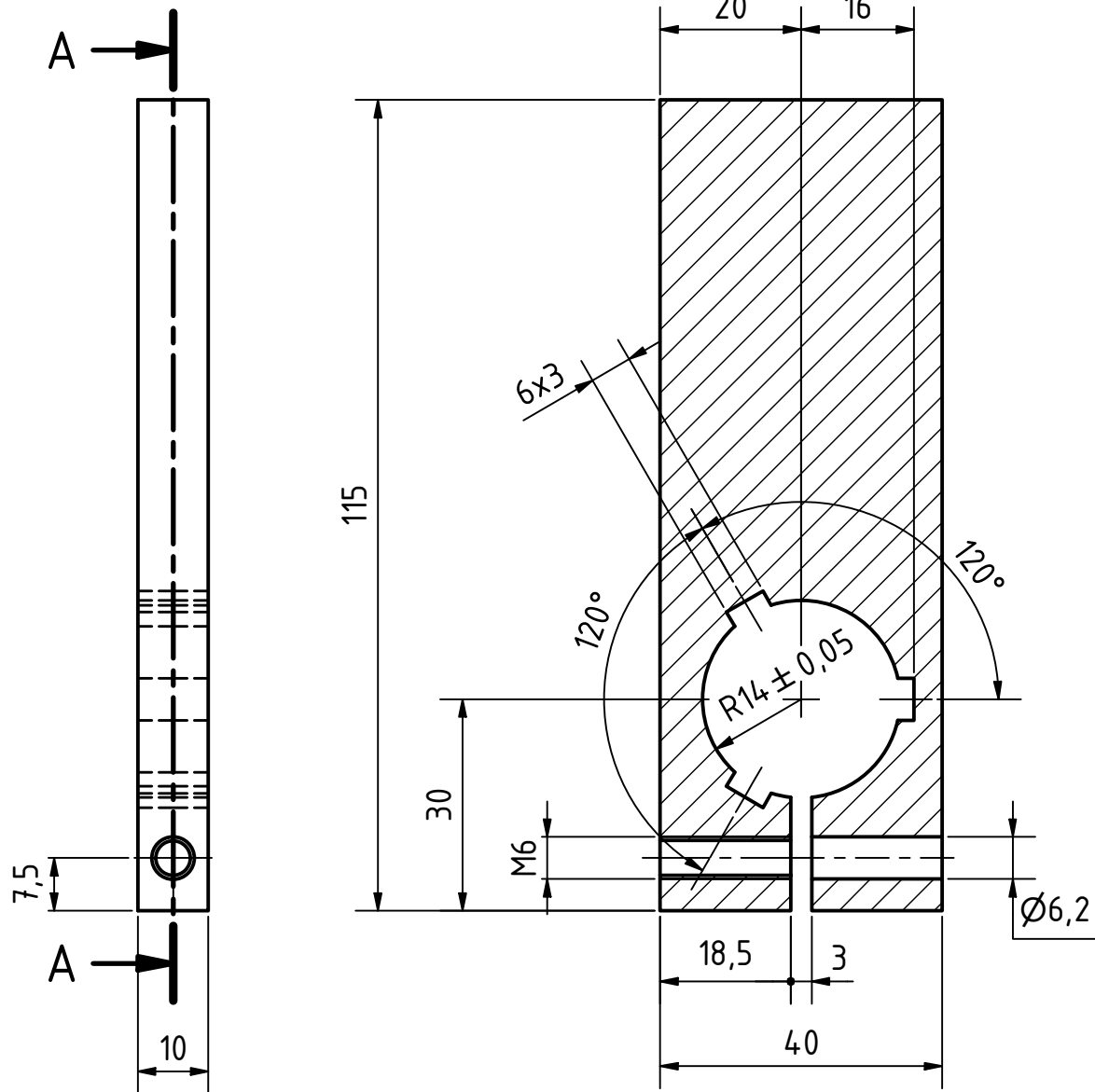


A-A



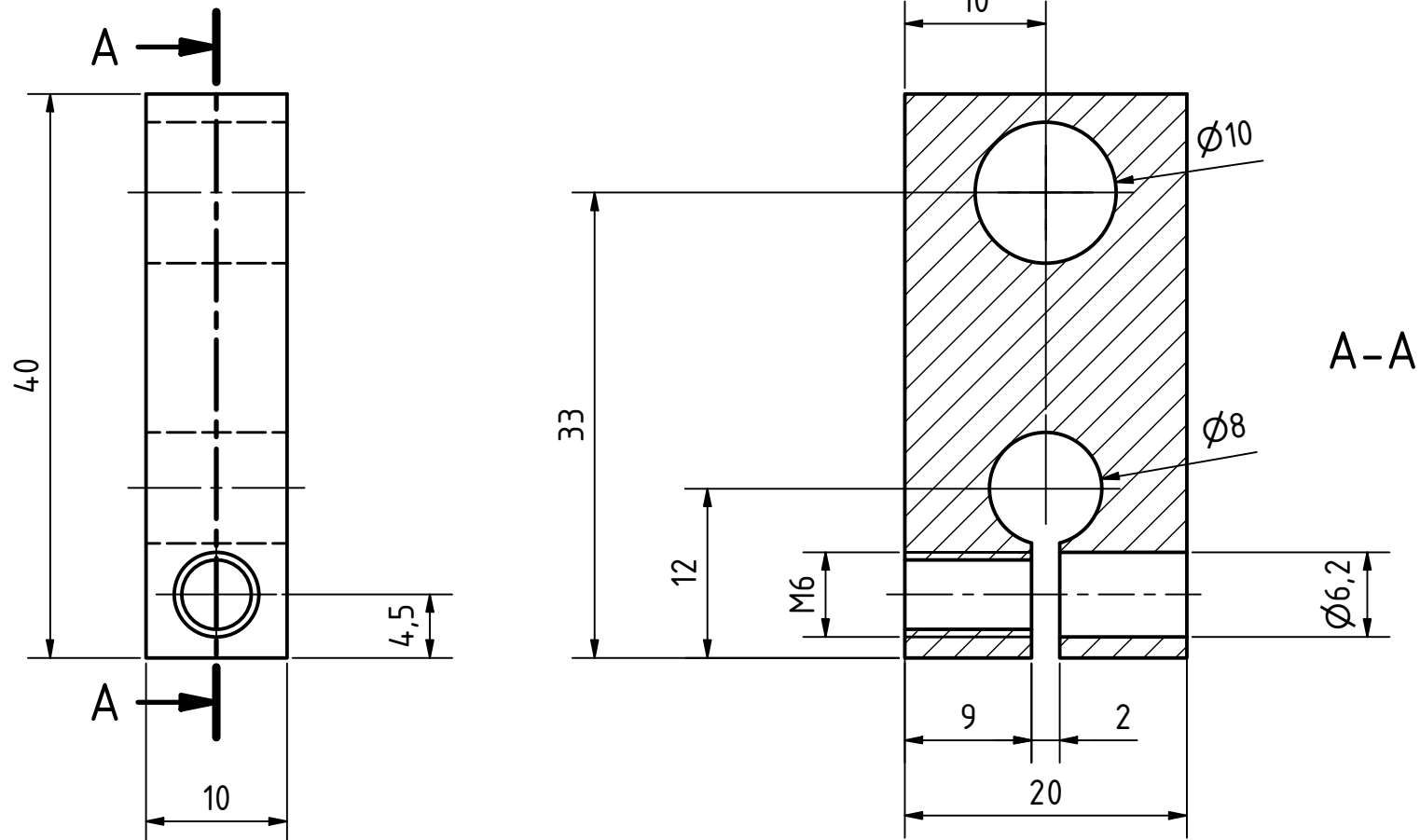
Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0,5 mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:		
Materijal: S235JR				Termička obrada:		
		Broj komada: 1		Masa:	Razmera: 1 : 2	
		Datum: 6/1/2018		Naziv: Nosač alata		
		Obradio: Kočović Vladimir				
		Datum: 6/15/2018				
		Odobrio: Branko Tadić				
		Fakultet inženjerskih nauka			Oznaka: Pozicija 1	List: 1
						A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:			



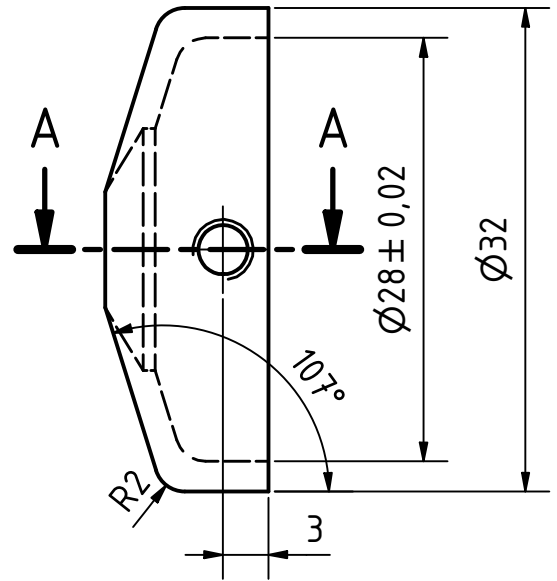
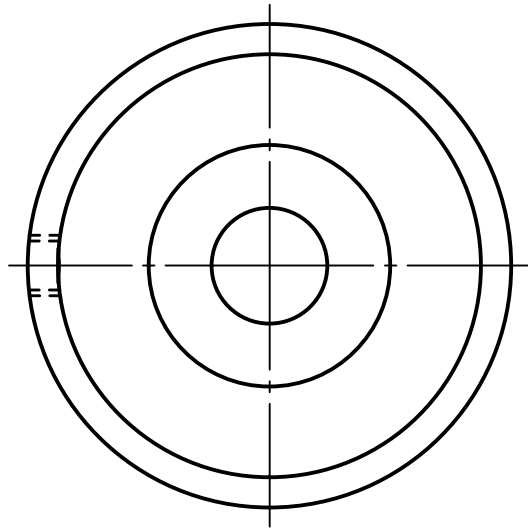
Napomena: Sve oštne ivice oboriti za 0,5mm x 45°

Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi				Termička obrada:	
		Broj komada: 1		Masa:	Razmera: 1 : 1
		Datum: 6/1/2018		Naziv: Reporna ploča	
		Obradio: Kočović Vladimir			
		Datum: 6/15/2018			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 3	
Stafa		Izmene:		Datum:	
		Ime:		List: 1 A4	

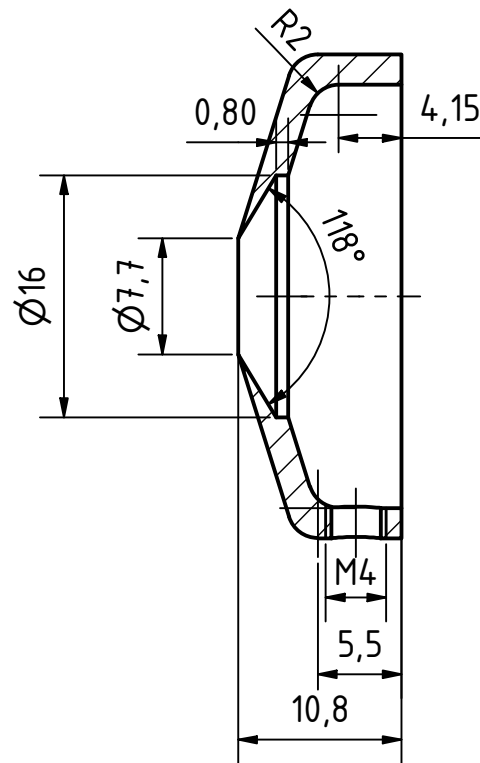


Napomena: Sve oštre ivice oboriti za 0.5mm x45°

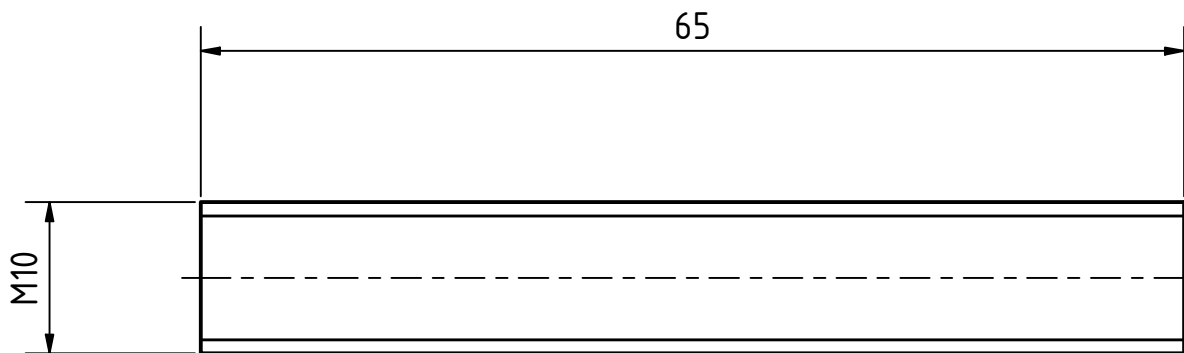
Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: AlCu5PbBi				Termička obrada:	
		Broj komada: 1		Masa:	Razmera: 2 : 1
		Datum: 6/1/2018		Naziv: Nosač komparatera	
		Obradio: Kočović Vladimir			
		Datum: 6/15/2018			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 5	
State		Izmene:		Datum:	
		Ime:		List: 1	
				A4	



A-A



Tolerancije slobodnih mera:		Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:	
Materijal: S235JR			Termička obrada:		
		Broj komada: 1	Masa:	Razmera: 1 : 1	
		Datum: 6/1/2018	Naziv: Poklopac alata		
		Obradio: Kočović Vladimir			
		Datum: 6/15/2018			
		Odobrio: Branko Tadić			
		Fakultet inženjerskih nauka		Oznaka: Pozicija 10	List: 1
					A4
Stafa	Izmene:	Datum:	Ime:		



Napomena: Odseći navojnu šipku M10 na meru

Tolerancije slobodnih mera:				Površinska hrapavost:		Površinska zaštita:					
Materijal: S235JR						Termička obrada:					
						Broj komada: 1		Masa:		Razmera: 2 : 1	
				Datum: 6/1/2018		Naziv: Navojna šipka					
				Obradio: Kočović Vladimir							
				Datum: 6/15/2018							
				Odobrio: Branko Tadić							
				Fakultet inženjerskih nauka				Oznaka: Pozicija 14			List: 1
											A4
Stafe	Izmene:	Datum:	Ime:								