



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Саша Ранђеловић

**ЗАВРШНА ОБРАДА МЕТАЛА БАЗИРАНА НА  
КОТРЉАЊУ КРУТОГ АЛАТА**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2016. година

**ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

<b><i>I. Аутор</i></b>
Име и презиме: Саша Ранђеловић
Датум и место рођења: 02. 11. 1977. Пирот
Садашње запослење: Представништво Hexagon Metrology S.P.A.
<b><i>II. Докторска дисертација</i></b>
Наслов: Завршна обрада метала базирана на котрљању крутог алата
Број страница: 165
Број слика: 127
Број библиографских података: 140
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, Србија
Научна област (УДК): 621.7.075 Алати за обликовање, за пластичну и завршну обраду радних комада
Ментор: проф. др Бранко Тадић, редовни професор
<b><i>III. Оцена и одбрана</i></b>
Датум пријаве теме: 11. 12. 2012. године
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације: 01-1/726-9 од 21.3.2013. године
Комисија за оцену подобности кандидата и теме: 1. Др Милентије Стефановић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Производно машинство, Индустијски инжењеринг 2. Др Ђорђе Вукелић, ванр. проф., Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, уже научне области: Метрологија, Квалитет, Еколошко-инжењерски аспекти, Алати и прибори 3. Др Драган Адамовић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Производно машинство, Индустијски инжењеринг 4. Др Слободан Митровић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Производно машинство, Индустијски инжењеринг 5. Др Бранко Тадић, ред. проф., ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Производно машинство, Индустијски инжењеринг
Комисија за оцену докторске дисертације: 1. Др Милентије Стефановић, ред. проф. – председник комисије, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Производно машинство, Индустијски инжењеринг 2. Др Ђорђе Вукелић, ванр. проф., Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, уже научне области: Метрологија, Квалитет, Еколошко-инжењерски аспекти, Алати и прибори 3. Др Драган Адамовић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Производно машинство, Индустијски инжењеринг 4. Др Слободан Митровић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Производно машинство, Индустијски инжењеринг

---

5. Др Данијела Милорадовић, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Моторна возила, Друмски саобраћај

Комисија за одбрану докторске дисертације

1. Др Милентије Стефановић, ред. проф. – председник комисије, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Производно машинство, Индустијски инжењеринг
2. Др Ђорђе Вукелић, ванр. проф., Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, уже научне области: Метрологија, Квалитет, Еколошко-инжењерски аспекти, Алати и прибори
3. Др Драган Адамовић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Производно машинство, Индустијски инжењеринг
4. Др Слободан Митровић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Производно машинство, Индустијски инжењеринг
5. Др Данијела Милорадовић, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Моторна возила, Друмски саобраћај

Датум одбране докторске дисертације:



Мојим родитељима

---

# ЗАВРШНА ОБРАДА МЕТАЛА БАЗИРАНА НА КОТРЉАЊУ КРУТОГ АЛАТА

## Резиме

**Кључне речи:** обрада котрљањем куглице, крути алат, површинска храпавост, *FEM* анализа, заостали напони, димензиона и геометријска тачност

Овај рад се бави процесом завршне обраде метала котрљањем куглице по површини предмета обраде. Развијена су два алата високе крутости: алат за обраду равних и цилиндричних површина и алат за обраду отвора. Теоријски је разматран утицај крутости алата на параметре површинске храпавости а експериментално је утврђен утицај параметара процеса обраде, иницијалне храпавости и дефинисана је оптимална трајекторија крутог алата. Крутим алатом са куглицом која продира у профил храпавости до предефинисане дубине пенетрације се постиже оптимални квалитет површине без обзира на иницијалну машинску обраду. На основу анализе кинематике глодања је развијен модел храпавости који је коришћен за *FEM* анализу. Нумеричке симулације и коришћени модел храпавости потврђују тврдњу да се продирањем крутог алата до средње линије профила храпавости постижу најбољи резултати са аспекта побољшања површинске храпавости. Након анализе унутрашњих напона у предмету обраде успостављена је зависност унутрашњих напона по дубини отвореног слоја и дубине пенетрације куглице. Осим тога, феномен течења материјала са врхова неравнина је разјашњен. Примарни циљ обраде алатом за обраду отвора је постизање димензионе и геометријске тачности отвора. Коришћењем специјално конструисаног крутог алата отвори су проширени у просеку за  $0.06 \text{ mm}$  при чему су грешке кружности и цилиндричности драстично смањене, посебно при већим дубинама пенетрације куглице. Додатно, површинска храпавост је редукована за 35%. *FEM* анализом је одређена дистрибуција напона у предмету обраде као и заостали напони након обраде.

---

# METAL FINISHING BASED ON STIFF TOOL ROLLING

## Abstract

**Keywords:** ball burnishing, stiff tool system, surface roughness, *FEM* analysis, residual stresses, dimensional and geometrical accuracy

This paper is focused on the process of ball burnishing. Two high stiffness tools are developed: tool for processing of flat and cylindrical surfaces and tool for processing of openings. The influence of tool stiffness on surface roughness parameters was considered theoretically, while experimental investigation was conducted to define the influence of process parameters, initial surface roughness and optimal trajectory of stiff tool. The ball within the stiff tool system, which follow a predetermined depth of penetration into the roughness profile, very likely provide optimum surface quality, regardless of the initial machining. For the purpose of numerical simulations, a surface roughness model based on milling kinematics was used. Numerical simulations and the used roughness model support the claim that penetrating with a stiff tool up to the mean line of the roughness profile yields best surface quality. The analysis of internal stresses within the workpiece after ball burnishing allowed a relationship to be established between internal stress distribution along the depth of the hardened layer and ball penetration depth. Furthermore, the phenomenon of profile peak deformation is substantially clarified. The primary goal, when using tool for processing of openings, was to achieve dimensional and geometrical accuracy. Using a specially designed stiff tool, the openings were widened by 0.06 *mm* on average, while the roundness and cylindricity errors were drastically reduced, especially at greater ball penetration depths. In addition, the surface roughness was improved by 35%. *FEM* analysis was conducted to determine the stress field distribution in the workpiece, as well as to approximate the residual stresses after the ball burnishing.

## Списак слика

- Слика 2.1.1: Геометријске грешке обраде
- Слика 2.1.2: Структура површинског слоја: а) по *Schmaltz*-у и б) по *Яцерицын*-у
- Слика 2.1.3: Заостали напони, њихова промена по дубини површинског слоја и промена микротврдоће настали у процесу обраде метала резањем
- Слика 2.1.4: Валовитост и храпавост обрађене површине
- Слика 2.1.5: Попречна и уздужна храпавост
- Слика 2.1.6: Профил храпавости
- Слика 2.1.7: Графичка интерпретација средњег аритметичког одступања профила од средње линије профила  $R_a$ , максималне висине неравнина  $R_z$  ( $R_{max}$ ), максималне висине врха профила  $R_p$  и максималне дубине удубљења профила  $R_v$
- Слика 2.1.8: Графичка интерпретација средње висине неравнина  $R_z$
- Слика 2.1.9: Различити профили храпавости са истом вредношћу  $R_a$
- Слика 2.1.10: Крива ношења профила
- Слика 2.2.1: Алат за обраду клизањем алата по површини предмета обраде (*slide burnishing*): а) за спољашњу обраду и б) за унутрашњу обраду
- Слика 2.2.2: Алат за обраду котрљањем алата по површини предмета обраде
- Слика 2.3.1: Алат за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде код кога се неометано котрљање куглице и задавање силе врши помоћу флуида под притиском
- Слика 2.3.2: Алат за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде са помоћним куглицама које обезбеђују неометано котрљање куглице са задавањем силе помоћу калибрисане опруге
- Слика 2.3.3: Алат за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде код кога се куглица ослања на струму раван са задавањем силе помоћу калибрисане опруге
- Слика 2.3.4: Специјално решење алата за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде са носачем алата који омогућава бржу обраду великих равних површина код призматичних предмета обраде
- Слика 2.4.1: Шематски приказ параметара обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде
- Слика 3.1.1: Модел еласто-пластичног оптерећења са концентрисаном силом (*Bussinesque* проблем)
- Слика 3.1.2: Модел деформисања материјала са недеформабилном куглицом (*Hertz*-ов модел)

- Слика 3.1.3: Модел деформације материјала куглицом која се котрља по површини обрађене површине
- Слика 3.1.4: Модел деформације материјала куглицом која клиза по површини предмета обраде
- Слика 3.2.1: Узајамни притисак сфере и равне површине
- Слика 3.2.2: Узајамни притисак сфере и цилиндра
- Слика 3.3.1: Шема алата у захвату током процеса обраде
- Слика 3.4.1: Шематски приказ процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде заснованог на крутом систему алата
- Слика 3.4.2: Зона контакта и предпостављени правци течења материјала
- Слика 3.5.1: Шематски приказ поступка обраде глодањем
- Слика 3.5.2: Шематски приказ поступка обраде глодањем са алатом који има  $i$  зуба
- Слика 3.5.3: Дијаграмски приказ путање зуба глодала и профила обрађене површине при а) истосмерном и б) супротносмерном поступку обраде глодањем са параметрима  $d=10\text{ mm}$  ( $R_i=5\text{ mm}$ );  $v=9.4\text{ m/min}$ ;  $v_p=200\text{ mm/min}$  и  $z=4$  зуба
- Слика 3.5.4: Дијаграмски приказ путање  $i$ -тог зуба глодала и профила обрађене површине при истосмерном глодању са параметрима обраде:  $d=10\text{ mm}$ ,  $v=630\text{ obr/min}$ ,  $v_p=2500\text{ mm/min}$ ,  $z=4$  зуба
- Слика 3.5.5: Модел који је коришћен за  $2D\text{ FE}$  анализу
- Слика 3.5.6: Шематски приказ модела коришћеног за  $2D\text{ FE}$  анализу: а) тродимензионални приказ модела, б) приказ мреже на куглици, ц) приказ мреже коначних елемената на предмету обраде и д) увећани приказ мреже коначних елемената у интересној зони предмета обраде
- Слика 3.5.7: Профил храпавости са мрежом коначних елемената
- Слика 3.6.1: Модел коришћен за  $FE$  анализу: а)  $3D$  приказ и б) карактеристични  $2D$  пресек са мрежом коначних елемената
- Слика 4.1.1:  $3D$  модел алата намењеног за спољашњу обраду котрљањем куглице по површини призматичних и цилиндричних предмета обраде
- Слика 4.1.2: Приказ алата током процеса завршне обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде
- Слика 4.1.3:  $3D$  модел модификованог алата са опругом намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде
- Слика 4.1.4: а) Приказ опруга коришћених током експеримента и б) приказ модификоване верзије алата током процеса обраде
- Слика 4.2.1:  $3D$  модел алата намењеног за обраду отвора
- Слика 4.2.2: Алат намењен за обраду отвора котрљањем куглице са позицијама: 1) носач алата, 1а) држач, 1б) жлеб на носачу алата, 2) базна плоча, 3) носач лежајева, 4) навртка, 5) осовинице, 6) куглица, 7) котрљајни лежајеви, 8) лимени носач куглице и 9) специјални завртањ



- Слика 4.2.3: Приказ алата намењеног за завршну обраду отвора
- Слика 5.1: Шематски приказ плана експеримената
- Слика 5.1.1: CNC глодалица *HAAS TM – 1 HE*
- Слика 5.1.2: Универзални струг *Prvomajska DK480*
- Слика 5.1.3: Трокомпонентни динамометар *Kistler*
- Слика 5.1.4: а) Координатна мерна машина *Carl Zeiss Contura G2* и б) типично радно окружење *Calypso Software-a*
- Слика 5.1.5: *Taylor Hobson Talysurf 6*
- Слика 5.2.1: CAD модел плоче коришћене за експериментална истраживања
- Слика 5.2.2: Цртеж плоче са предходно припремљеним пољима различитих иницијалних површинских храпавости
- Слика 5.2.3: Шематски приказ распореда поља на плочи након обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде
- Слика 5.2.4: Шематски приказ плана експеримента са трајекторијама кретања алата по предходно припремљеној плочи
- Слика 5.2.5: Типичан запис силе са *Kistler* динамометра
- Слика 5.2.6: Приказ алата током обраде: а) алат високе крутости и б) модификована верзија алата са опругом
- Слика 5.3.1: Шематски приказ поља у којима су мерене силе којима се куглица притиска о површину предмета обраде и положај изводница по којима су мерени параметри храпавости
- Слика 5.3.2: Приказ апаратуре коришћене током обраде
- Слика 5.4.1: Прикази: а) крутог алата у захвату током експеримента и б) плоче након експеримента
- Слика 5.5.1: План експеримента изведеног на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за унутрашњу обраду цилиндричних површина
- Слика 5.5.2: Алат за завршну унутрашњу обраду котрљањем куглице: а) монтиран на глодалицу и б) у захвату за време обраде
- Слика 5.6.1: Упрошћени модел унутрашње обраде котрљањем куглице по површини цилиндричних површина
- Слика 5.6.2: Мрежа коначних елемената на алату намењеном за унутрашњу обраду цилиндричних површина
- Слика 6.1.1: Профил храпавости поља са иницијалном храпавошћу  $R_{a(ini)}=0.99 \mu m$
- Слика 6.1.2: Профил храпавости поља са иницијалном храпавошћу  $R_{a(ini)}=1.39 \mu m$
- Слика 6.1.3: Профил храпавости поља са иницијалном храпавошћу  $R_{a(ini)}=2.08 \mu m$
- Слика 6.1.4: Запис силе за прво поље са иницијалним  $R_{a(ini)}=0.99 \mu m$
- Слика 6.1.5: Запис силе за друго поље са иницијалним  $R_{a(ini)}=0.99 \mu m$
- Слика 6.1.6: Запис силе за треће поље са иницијалним  $R_{a(ini)}=0.99 \mu m$

- Слика 6.1.7: Запис силе за прво поље са иницијалним  $R_{a(ini)}= 1.39 \mu m$
- Слика 6.1.8: Запис силе за друго поље са иницијалним  $R_{a(ini)}= 1.39 \mu m$
- Слика 6.1.9: Запис силе за треће поље са иницијалним  $R_{a(ini)}= 1.39 \mu m$
- Слика 6.1.10: Запис силе за прво поље са иницијалним  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$
- Слика 6.1.11: Запис силе за друго поље са иницијалним  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$
- Слика 6.1.12: Запис силе за треће поље са иницијалним  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$
- Слика 6.1.13: Шематски приказ поља на обрађеној плочи са резултантним вредностима силе у сваком пољу
- Слика 6.2.1: Запис силе за прво поље са грубом претходном обрадом
- Слика 6.2.2: Запис силе за друго поље са грубом претходном обрадом
- Слика 6.2.3: Запис силе за треће поље са грубом претходном обрадом
- Слика 6.2.4: Запис силе за четврто поље са грубом претходном обрадом
- Слика 6.2.5: Запис силе за пето поље са грубом претходном обрадом
- Слика 6.2.6: Запис силе за шесто поље са грубом претходном обрадом
- Слика 6.2.7: Запис силе за прво поље са фином претходном обрадом
- Слика 6.2.8: Запис силе за друго поље са фином претходном обрадом
- Слика 6.2.9: Запис силе за треће поље са фином претходном обрадом
- Слика 6.2.10: Запис силе за четврто поље са фином претходном обрадом
- Слика 6.2.11: Запис силе за пето поље са фином претходном обрадом
- Слика 6.2.12: Запис силе за шесто поље са фином претходном обрадом
- Слика 6.3.1: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=5 \mu m$
- Слика 6.3.2: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=10 \mu m$
- Слика 6.3.3: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=15 \mu m$
- Слика 6.3.4: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=20 \mu m$
- Слика 6.3.5: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=25 \mu m$
- Слика 6.3.6: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=30 \mu m$
- Слика 6.3.7: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=35 \mu m$
- Слика 6.4.1: Приказ процеса мерења: а) предмет обраде на столу координатне мерне машине у процесу аклиматизације, б) процес мерења, в) мерни пипак дужине  $75 mm$  са пречником куглице  $2.5 mm$  и г) стезни прибор коришћен током процеса мерења

- Слика 6.5.1: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=10 \mu m$
- Слика 6.5.2: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=20 \mu m$
- Слика 6.5.3: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=30 \mu m$
- Слика 6.5.4: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=40 \mu m$
- Слика 6.5.5: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=50 \mu m$
- Слика 6.5.6: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=60 \mu m$
- Слика 6.5.7: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=70 \mu m$
- Слика 6.5.8: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=80 \mu m$
- Слика 6.5.9: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=90 \mu m$
- Слика 6.5.10: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=100 \mu m$
- Слика 6.5.11: Дистрибуција напона у предмету обраде на 25% процеса утискивања куглице у материјал предмета обраде за случај  $z=30 \mu m$
- Слика 6.5.12: Дистрибуција напона у предмету обраде на 50% процеса утискивања куглице у материјал предмета обраде за случај  $z=30 \mu m$
- Слика 6.5.13: Дистрибуција напона у предмету обраде на 75% процеса утискивања куглице у материјал предмета обраде за случај  $z=30 \mu m$
- Слика 6.5.14: Дистрибуција напона у предмету обраде на 100% процеса утискивања куглице у материјал предмета обраде за случај  $z=30 \mu m$
- Слика 6.5.15: *Color map* са вредностима померања чворова мреже коначних елемената: а) цели алат и б) увећани детаљ са куглицом
- Слика 7.1.1: Тренд промене  $R_a$  за различите вредности силе, посмака и броја пролаза при иницијалној површинској храпавости  $R_{a(ini)}=0.99 \mu m$
- Слика 7.1.2: Тренд промене  $R_a$  за различите вредности силе, посмака, броја пролаза при иницијалној површинској храпавости  $R_{a(ini)}=1.36 \mu m$
- Слика 7.1.3: Тренд промене  $R_a$  за различите вредности силе, посмака, броја пролаза при иницијалној површинској храпавости  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$
- Слика 7.1.4: Зависност површинске храпавости  $R_a$  од силе при различитим вредностима крутости система алата
- Слика 7.1.5: Преклопљени профили храпавости пре и након обраде
- Слика 7.2.1: Преклопљени профили храпавости добијени након обраде поља са грубом претходном обрадом силама од  $F=32 N$ ,  $F=47 N$  и  $F=67 N$

- Слика 7.2.2: Преклопљени профили храпавости добијени након обраде поља са грубом претходном обрадом силама од  $F=55\text{ N}$ ,  $F=213\text{ N}$  и  $F=320\text{ N}$
- Слика 7.2.3: Преклопљени профили храпавости добијени након обраде поља са фином претходном обрадом силама од  $F=81\text{ N}$ ,  $F=166\text{ N}$  и  $F=194\text{ N}$
- Слика 7.2.4: Преклопљени профили храпавости добијени након обраде поља са фином претходном обрадом силама од  $F=444\text{ N}$ ,  $F=305\text{ N}$  и  $F=322\text{ N}$
- Слика 7.3.1: Преклопљени профили храпавости иницијалне површине и површина добијених након нумеричких експеримената са различитим дубинама пенетрације куглице у материјал предмета обраде
- Слика 7.3.2: Релативна крива ношења за различите дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде
- Слика 7.3.3: Зависност заосталих напона у површинском слоју предмета обраде од дубине пенетрације куглице на различитим дубинама
- Слика 7.3.4: Профили храпавости: а) пре и након обраде котрљањем куглице и б) увећани детаљ пластичног течења материјала врха неравнине профила храпавости
- Слика 7.4.1: Површинска храпавост: а) варијација  $R_a$  за свих шест отвора и б) преклопљени профили храпавости пре и након обраде котрљањем куглице по површини отвора за отвор под редним бројем 3
- Слика 7.4.2: Графичка интерпретација грешке кружности: а) први отвор, б) други отвор, в) трећи отвор, г) четврти отвор, д) пети отвор и е) шести отвор
- Слика 7.4.3: Резултати CAD инспекције
- Слика 7.5.1: Зависност између силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде и дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде дуж  $z$ -осе
- Слика 7.6.1: Зависност површинске храпавости  $R_a$  од дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде у
- Слика 7.6.2: Зависност између површинске храпавости  $R_a$  и дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta$  добијена помоћу нумеричких експеримената
- Слика 7.6.3: Зависност између површинске храпавости  $R_a$  и дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta$  добијена експерименталним путем

## Списак табела

- Табела 2.1.1: Оријентационе вредности  $R_a$  које се могу постићи различитим врстама ручне и машинске обраде
- Табела 5.1: План експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду
- Табела 5.2: План експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем модификоване верзије алата са опругом
- Табела 5.3: План експеримента изведеног на универзалном стругу коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду
- Табела 5.4: План експеримента изведеног коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице
- Табела 5.5: План верификационог експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду
- Табела 5.6: План експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за обраду отвора који се односи на димензиону прецизност отвора
- Табела 5.7: План експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за обраду отвора који се односи на геометријску прецизност отвора
- Табела 5.8: План експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за обраду отвора који се односи на површинску храпавост
- Табела 5.9: План нумеричког експеримента изведеног коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини отвора
- Табела 5.2.1: Хемијски састав легуре алуминијума *EN AW-6082 (AlMgSi1) T651*
- Табела 5.2.2: Физичко-хемијске карактеристике легуре алуминијума *EN AW-6082 (AlMgSi1) T651*
- Табела 5.2.3: Хемијски састав челика *A 295 52100 (USA/ASTM)*
- Табела 5.3.1: Хемијски састав челика *36CrNiMo4*
- Табела 5.3.2: Физичко-хемијске карактеристике челика *36CrNiMo4*
- Табела 6.1.1: Измерене вредности параметара површинске храпавости за део плоче са иницијалном површинском храпавошћу  $R_a=0.99 \mu m$
- Табела 6.1.2: Измерене вредности параметара површинске храпавости за део плоче са иницијалном површинском храпавошћу  $R_a=1.36 \mu m$
- Табела 6.1.3: Измерене вредности параметара површинске храпавости за део плоче са иницијалном површинском храпавошћу  $R_a=2.02 \mu m$
- Табела 6.1.4: Вредности параметра храпавости  $R_a$  након обраде коришћењем модификоване верзије алата са опругама различитих крутости

- Табела 6.2.1: Резултати експерименталног истраживања на делу предмета обраде са грубом претходном обрадом
- Табела 6.2.2: Резултати експерименталног истраживања на делу предмета обраде са фином претходном обрадом
- Табела 6.3.1: Параметри површинске хрпавости пре и након симулација процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде
- Табела 6.3.2: Параметри површинске хрпавости пре и након процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде
- Табела 6.4.1: Резултати мерења иницијалне површинске хрпавости за свих шест отвора
- Табела 6.4.2: Резултати мерења резултујуће површинске хрпавости
- Табела 6.4.3: Резултати мерења пречника отвора
- Табела 6.4.4: Теоријска, захтевана и постигнута дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде
- Табела 6.4.5: Резултати мерења грешке цилиндричности
- Табела 6.4.6: Резултати мерења грешке кружности
- Табела 6.5.1: Померања чвора који је у контакту са куглицом током обраде и након растеређења
- Табела 7.1.1: Регресионе једначине и степен корелације експерименталних резултата

## Садржај

<b>1. Увод</b>	1
<b>2. Преглед и анализа литературних извора</b>	4
2.1. Преглед основних појмова	4
2.2. Класификација и намена процеса обраде котрљањем алата по површини предмета обраде	19
2.3. Алати за обраду котрљањем по површини предмета обраде	22
2.4. Параметри процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде	25
2.5. Утицај процеса обраде котрљањем по површини предмета обраде на физичко-хемијске и триболошке карактеристике обрађене површине и утицај процеса обраде на побољшање димензионе и геометријске прецизности обрађених површина	26
2.6. Критички осврт на литературне изворе	37
<b>3. Теоријске основе процеса завршне обраде заснованог на котрљању крутог алата по површини предмета обраде</b>	39
3.1. Класични модели процеса завршне обраде заснованог на котрљању алата по површини предмета обраде	40
3.2. Узајамни притисак сферних и цилиндричних тела – <i>Hertz</i> -ов притисак	43
3.3. Теоријска анализа процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде приликом коришћења еластичних алата	45
3.4. Теоријска анализа процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде приликом коришћења алата високе крутости	47
<b>4. Пројектна решења система крутог алата за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде и унутрашњу обраду цилиндричних површина</b>	59
4.1. Пројектно решење крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде	59
4.2. Пројектно решење крутог алата намењеног за унутрашњу обраду цилиндричних површина	62
<b>5. План и програм експерименталних истраживања</b>	65
5.1. Опрема коришћена за експериментална истраживања	72
5.2. План експеримента изведеног на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде	75
5.3. План експеримената изведених на универзалном стругу коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде	80
5.4. План нумеричких експеримената изведених коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини призматичног предмета обраде	83
5.5. План експеримента изведеног на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за унутрашњу обраду цилиндричних површина	85
5.6. План нумеричких експеримената изведених коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини отвора	86
<b>6. Резултати експерименталних истраживања</b>	91

---

6.1.	Резултати експеримената изведених на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде	91
6.2.	Резултати експеримената изведених на универзалном стругу коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде	102
6.3.	Резултати нумеричких експеримената изведених коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде	111
6.4.	Резултати експеримената изведених на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за унутрашњу обраду цилиндричних површина	117
6.5.	Резултати нумеричких експеримената изведених коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини отвора	121
<b>7.</b>	<b>Статистичка обрада и анализа резултата експерименталних истраживања и оптимизација процеса обраде</b>	<b>132</b>
7.1.	Статистичка обрада и анализа резултата експерименталних истраживања изведених на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде	132
7.2.	Анализа резултата експерименталних истраживања изведених на универзалном стругу коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде	136
7.3.	Анализа резултата нумеричких експеримената изведених коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде	138
7.4.	Анализа резултата експеримента изведеног на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за унутрашњу обраду цилиндричних површина	141
7.5.	Анализа резултата нумеричких експеримената изведених коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини отвора	144
7.6.	Оптимизација процеса обраде котрљањем куглице крутим алатом на основу дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде	145
<b>8.</b>	<b>Дискусија</b>	<b>148</b>
<b>9.</b>	<b>Закључци</b>	<b>154</b>
	<b>Литература</b>	<b>157</b>
	<b>Прилози</b>	



## 1. Увод

У савременој индустрији се последњих година придаје веома велика пажња процесима завршне обраде којом се постижу одговарајући квалитет обрађене површине и захтевана геометријска прецизност. Најчешће коришћени вид завршне обраде је брушење, међутим, свеприсутни тренд у свету је да се елиминише потреба за таквом врстом завршне обраде. За то постоји неколико разлога. Пре свега, то су савремени закони који се односе на еколошке аспекте по којима је пожељно елиминисање коришћења средстава за хлађење и подмазивање, али и елиминација обраде у више стезања. Искоришћена средства за хлађење и подмазивање се, по савременим законским прописима, морају на одговарајући начин складиштити и уништити, односно рециклирати. Постоје многобројне процедуре које су повезане са одговарајућом манипулацијом тих средстава што у многоме повећава трошкове привредних субјеката. Са друге стране, захтеви за прецизношћу машинских делова који су све ригорознији у старту елиминишу могућности обраде делова у више стезања.

У оквиру ове тезе је постављен циљ по којем је потребно развити алате намењене за завршну обраду којим се постижу одговарајући квалитет и геометријска прецизност третираних површина. Алати који су развијени раде на принципу котрљања куглице по површини предмета обраде. Развијени су алат намењен за спољашњу обраду цилиндричних и призматичних предмета обраде и алат намењен за унутрашњу обраду отвора.

У оквиру истраживања су извршене опсежне анализе постојећих решења алата за обраду котрљањем куглице. Са тим у вези треба поменути да развој алата за обраду котрљањем куглице захтева имплементацију знања из многих области науке и технике. Да би се креирало савремено решење овакве врсте алата, потребно је, поред инжењерских, базично теоријских и информатичких знања, имплементирати и висок ниво теоријских знања и искуства из уске области развоја резних алата и обраде деформисањем. Развоју савремених алата пришло се са научног аспекта у многим сферама. Пошто је циљ развој алата за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде који треба да се пласира пре свега на домаћем тржишту а потом и иностраном, онда је, у првом кораку, на научном нивоу прикупљен и обрађен велики број информација везаних за постојећа решења, специфичне захтеве, мишљења и слично.

У најкраћим цртама проблем који се решава карактеришу следећи критеријуми:

- развој алата намењеног за завршну обраду који се може користити на универзалним и нумерички контролисаним алатним машинама,
- развој алата којим ће се постићи веома висок ниво квалитета површине са аспекта побољшања површинке храпавости,
- развој алата којим је могуће обрађивати предмете обраде различитих облика, пре свега призматичне, цилиндричне и отворе,

- развој алата којим ће се избећи друге врсте завршних обрада, пре свега завршна обрада брушењем, што представља тренд који је свеprisутан у свету са аспекта прецизности обраде јер се на тај начин избегава дислоцирање предмета обраде са једне на другу алатну машину, такозване обраде са више стежања се у том случају елиминишу,
- развој алата којим ће се избећи коришћење средстава за хлађење и подмазивање пре свега због веома строгих еколошких норми приликом одлагања истих,
- развој алата којим ће се постићи површинско отврдњавање обрађене површине,

Уколико се осврнемо на постављене критеријуме, може се закључити да је задатак који је решаван веома сложен и амбициозан.

С обзиром да је развој алата за завршну обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде проблем интердисциплинарног карактера, примењене су различите технике истраживања:

- савремене технике прикупљања и обраде информација – рад са базама података и сл.,
- савремене технике које се примењују у анализи сложених динамичких система – теоријско динамичко моделирање конструкције и сл.,
- савремене технике оптимизације пројектног и конструктивног решења,
- савремене технике *CAD* моделирања - израде конструкционе документације и
- савремене технике *CAE* моделирања - моделирање и симулације процеса.

Анализирањем литературе која је непосредно повезана са овом облашћу уочено је да се код свих конструктивних решења алата сила, којом се куглица или ваљак притискају о површину предмета обраде, задаје помоћу калибрисаних опруга или коришћењем флуида под притиском. Оваква конструктивна решења су еластична.

Циљ тезе је развијање специјалног конструктивног решења крутог алата чијим ће се коришћењем на нумеричким и универзалним алатним машинама постизати већи квалитет обрађене површине са аспекта површинске храпавости. Очекује се да ће са оваквим конструктивним решењем алата, који ће се користити на нумеричким и универзалним алатним машинама, обрађена површина имати површинску храпавост која се постиже операцијама полирања.

Поред тога, још један од циљева ове тезе је постизање високе димензионе прецизности коришћењем крутог алата при обради унутрашњих цилиндричних површина, што са алатима заснованим на принципу опруге није било могуће.

У оквиру истраживања биће извршена и оптимизација процеса обраде са аспекта дубине продирања алата у површински слој предмета обраде.

Овај рад се заснива на двема хипотезама:

1. Крутим алатом се могу постићи бољи резултати са аспекта површинске храпавости у односу на претходно постојеће еластичне конструктивне изведбе алата. Ова хипотеза је донекле потврђена прелиминарним експериментима који су већ извршени. Резултати ових истраживања делом су објављени у међународним научним часописима.

2. При обради унутрашњих цилиндричних површина је могуће продирање алата у површински слој које је веће од максималне висине неравнина. На тај начин се на нумеричким и универзалним алатним машинама може постићи веома висока димензиона прецизност реда величине стотог дела милиметра.

У овом раду ће се користити следеће методе:

- аналитичка метода динамичког моделирања алата у процесу обраде,
- нумеричке методе (метод коначних елемената - *FEM*) при одређивању напона и деформација и
- експерименталне методе.

Реализацијом предвиђених истраживања у оквиру ове докторске дисертације очекују се следећи резултати, који представљају допринос овог рада:

- постизање вредности површинске храпавости обрађених површина на нумеричким и универзалним алатним машинама која ће бити у рангу обраде полирањем и мање храпавости у односу на површине које се данас добијају при обради еластичним алатима за обраду котрљањем куглице,
- постизање димензионе прецизности при обради предмета обраде на нумеричким и универзалним алатним машинама реда величине једног стотог дела милиметра, што до сада није био случај при обради овом методом.

У оквиру тезе је дат преглед и анализа релевантних литературних извора. Представљене су теоријске основе процеса завршне обраде заснованог на котрљању куглице по површини предмета обраде. Дата су пројектна решења алата за спољашњу обраду цилиндричних и призматичних предмета обраде и алата намењеног за завршну обраду унутрашњих цилиндричних површина, односно отвора. Представљени су план и програм експерименталних истраживања. Презентовани су резултати експерименталних истраживања, извршена је њихова статистичка обрада и оптимизација на бази дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде.

## 2. Преглед и анализа литературних извора

### 2.1. Преглед основних појмова

Прерада материјала (метала и неметала) и обликовање различитих делова, подсклопова, склопова, односно полупроизвода и производа се остварује применом технологија машиноградње. Технологија машиноградње изучава особине метала, неметала и легура и поступке њихове прераде у полупроизводе и производе. Технологија машиноградње обухвата пет група технологија и то технологије [1, 2, 18]:

- материјала,
- механичке обраде,
- термичке обраде,
- монтаже и
- површинске заштите.

Технологија материјала изучава проблематику која се односи на поступке прераде сировина, односно добијање материјала, њихове особине, намену, системе означавања и методе њиховог испитивања.

Технологија механичке обраде изучава проблематику израде и обраде машинских делова жељеног облика и димензија. Поступцима механичке обраде се од полуфабриката, који су добијени ливењем, ковањем, ваљањем или неким другим поступком, израђују и обликују готови делови.

Технологија термичке обраде обухвата поступке промене структуре материјала, хемијског састава и механичких карактеристика материјала. У технологије термичке обраде спадају отпуштање, каљење, нормализација, жарење, старење и тако даље. У ову групу технологија спадају и хемијско-термичке обраде као што су нитрирање, цементација, цијанизација и тако даље.

Технологијом монтаже се од готових делова формирају подсклопови, склопови, полупроизводи и готови производи различите намене.

Технологија површинске заштите изучава проблематику заштите металних делова, подсклопова, склопова, полупроизвода и готових производа од штетног дејства различитих хемијских утицаја околине. У штетне хемијске утицаје околине спадају утицај кисеоника из ваздуха (оксидација), утицај воде (корозија), утицај киселина, база и соли (нагризање површина) и остали утицаји. У технологије површинске заштите спадају поступци површинске заштите металом (цинковање, хромирање, калајисање, никловање, посребрење, позлаћивање итд.), поступци површинске заштите неметалом (емајл, лакови, боје, конзервација различитим средствима итд.), поступци површинске заштите хемијским поступцима (бојење, фосфатирање, брунирање итд.) и

електрохемијски поступци површинске заштите. Поступцима површинске заштите се истовремено постиже и побољшање естетског изгледа готовог дела.

Осврт на наведени кратки преглед технологија машиноградње има за циљ лоцирање места, улоге и значаја завршне обраде метала базиране на котрљању куглице по површини предмета обраде. Са тим у вези се може приметити да је, са обзиром на тему рада, релевантна група технологија механичке обраде у које се сврстава поступак обраде метала базиран на котрљању куглице по површини предмета обраде.

Поступци механичке обраде се разврставају у две групе, на поступке са уклањањем вишка материјала и на поступке без уклањања вишка материјала [1-27]. У наведеној литератури се ова подела често може пронаћи и као подела на поступке са скидањем струготине и на поступке без скидања струготине.

Обрадом без уклањања вишка материјала се врши обликовање без или са незнатним уклањањем вишка материјала. У овакве врсте обраде спадају обрада ливењем (ливење у песку, у кокили, под притиском, центрифугално ливење итд.), обрада спајањем (лемљење, лепљење, заваривање, закивање итд.) и обрада деформисањем (ковање, ваљање, савијање, дубоко извлачење, пресовање итд.).

Обрадом са уклањањем вишка материјала обликовање делова се врши уклањањем вишка материјала при чему се обрада може реализовати ручним путем (турпијање, сечење итд.), обрадом метала резањем на алатним машинама (стругање, глодање, рендисање, провлачење, бушење, проширивање, развртање, упуштање, обрада навоја, брушење, хоновање, леповање, суперфиниш, полирање итд.) и неконвенционалним поступцима обраде (уклањање вишка материјала коришћењем електричне, хемијске, светлосне, магнетне или других видова енергије).

Уколико се у обзир узме наведена подела поступака механичке обраде онда се поступак завршне обраде метала базиран на котрљању куглице по површини предмета обраде може сврстати у поступке обраде без уклањања вишка материјала.

У релевантној литератури [1-27] се може пронаћи још једна подела поступака механичке обраде. Према тој подели, а која се тиче квалитета обраде, сви поступци механичке обраде се могу поделити на поступке претходне и на поступке завршне обраде. Ова подела се често може наћи и као подела на поступке грубе механичке обраде и на поступке fine механичке обраде.

Превасходни циљ поступака претходне (грубе) механичке обраде је уклањање што веће количине материјала. У ове поступке спадају грубо стругање, грубо глодање, рендисање, бушење итд.

За разлику од поступака претходне обраде циљ поступака завршне (fine) обраде је остваривање максималног нивоа квалитета израде и обраде. У ову групу поступака механичке обраде спадају fino стругање, fino глодање, брушење, хоновање, леповање, полирање, суперфиниш итд.

На основу ове поделе поступак обраде базиран на котрљању куглице по површини предмета обраде се може ближе разврстати у поступке завршне (фине) механичке обраде.

У горенаведеном тексту је поменуто да је превасходни циљ поступака завршне механичке обраде постизање максималног, чешће захтеваног, нивоа квалитета израде и обраде. Квалитет израде и обраде је веома комплексан показатељ и функција је квалитета конструкције дела, квалитета обрадног система, пројектованог производног процеса, квалитета полуфабриката и др. [18, 19]. Квалитет израде и обраде је један од услова за постизање потребног (захтеваног) квалитета предмета обраде и обухвата тачност обраде и квалитет обрађених површина. Ова два комплексна показатеља квалитета обраде су међусобно зависна и функција су великог броја утицајних фактора.

Тачност обраде представља степен подударности обрађених делова са претходно дефинисаним еталоном. Тачност обраде је условљена захтевима техничке документације, која се односи на класу тачности, одступања и сл., како би се обезбедила функционалност и замењивост делова, подсклопова и склопова. Грешке обраде су углавном случајног карактера, веома ретко системског, и не могу се унапред предвидети али се правилним избором параметара обраде, алата и помоћних прибора могу свести у границе дозвољених (захтеваних) одступања.

Тачност обраде зависи од грешака обраде. Грешке обраде могу бити:

- предпроцесне,
- процесне и
- постпроцесне.

Предпроцесне грешке обраде су методолошке грешке (нпр. погрешан избор обраде), грешке базирања и стезања предмета обраде, грешке подешавања положаја алата и грешке израде алатних машина, алата и помоћних прибора.

Процесне грешке настају као последица грешака насталих због еластичних и температурних дилатација елемената технолошког система, грешака насталих због хабања алата и грешака које су последица унутрашњих заосталих напона у предмету обраде.

Постпроцесне грешке су последице грешака насталих у процесу мерења и контроле.

Приликом обраде долази до појава геометријских грешака обраде и до одређених микроструктурних грешака, односно промена. Геометријске грешке обраде се могу поделити на макрогеометријске и микрогеометријске (слика 2.1.1). Макрогеометријске грешке се даље могу поделити на:

- грешке облика,
- грешке димензија (грешке мере) и
- грешке положаја.

Грешке облика, односно одступања облика, представљају одступање стварног профила од геометријски идеалног. У ову групу грешака спадају правост, равност, кружност, цилиндричност, облик линије и облик површине.

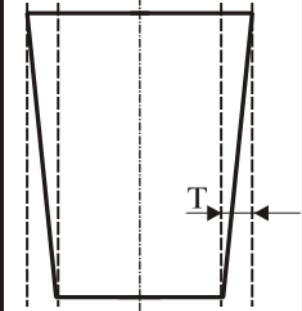
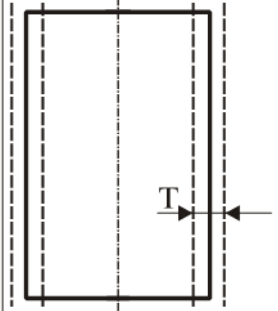
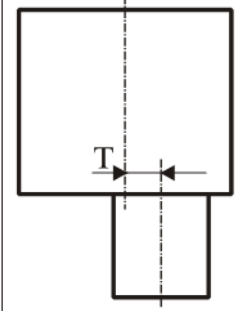
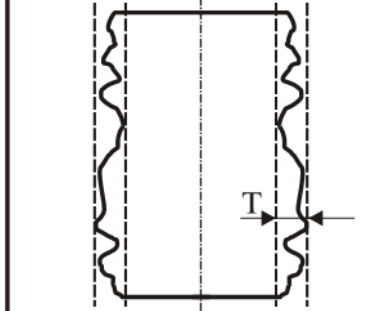
Грешке димензија, односно одступања мера (ширина, висина, дужина, пречник итд.) су одступања од техничком документацијом прописаних толеранција димензија.

Грешке положаја, односно одступања међусобног положаја површина, су одступања међусобног положаја у односу на идеални који је дефинисан техничком документацијом. Грешке положаја се разврставају у три групе:

- одступања правца,
- одступања места и
- одступања тачности обртања.

Одступања правца су одступања од паралелности, управности и угла нагиба. Одступања места су локација, концентричност, коаксијалност и симетричност. Одступања тачности обртања су кружност и равност обртања.

Интернационалним стандардима ISO TC 10 и ISO TC 213 су дефинисани сви горе поменути појмови који се односе на макрогеометријске грешке обраде.

МАКРОГЕОМЕТРИЈСКЕ ГРЕШКЕ			МИКРОГЕОМЕТРИЈСКЕ ГРЕШКЕ
Грешка облика	Грешка мере	Грешка положаја	Храпавост
			

Слика 2.1.1: Геометријске грешке обраде [18]

Микрогеометријске грешке обраде се односе на храпавост обрађених површина и директно су повезане са квалитетом обрађених површина. У даљем тексту су описани параметри који се односе на микрогеометријске грешке обраде, али претходно се мора појаснити појам обрађене површине као и феномени који су директно у вези са обрађеном површином.

Под обрађеном површином се подразумева слој материјала испод површине која је настала обрадом. Особине тог слоја су резултат дејства низа фактора, као што су физичко-хемијски фактори, међу којим пресудну улогу има пластично деформисање, отврдњавање и загревање предмета обраде. Тај слој се у литератури најчешће назива површински слој и он је по *Schmalz*-у састављен од два подслоја, док се по *Яцерицын*-у слој даље може поделити на више тањих подслојева [5, 6], слика 2.1.2:

- спољашњи површински слој, односно спољашњи гранични слој (СГС) и

- унутрашњи површински слој, односно унутрашњи гранични слој (УГС).

Спољашњи површински слој раздваја металну површину предмета обраде од атмосфере или неког другог належућег чврстог тела. Настаје као последица интеракције материјала предмета обраде са околином и по *Яцерицын-у* се састоји од три подслоја:

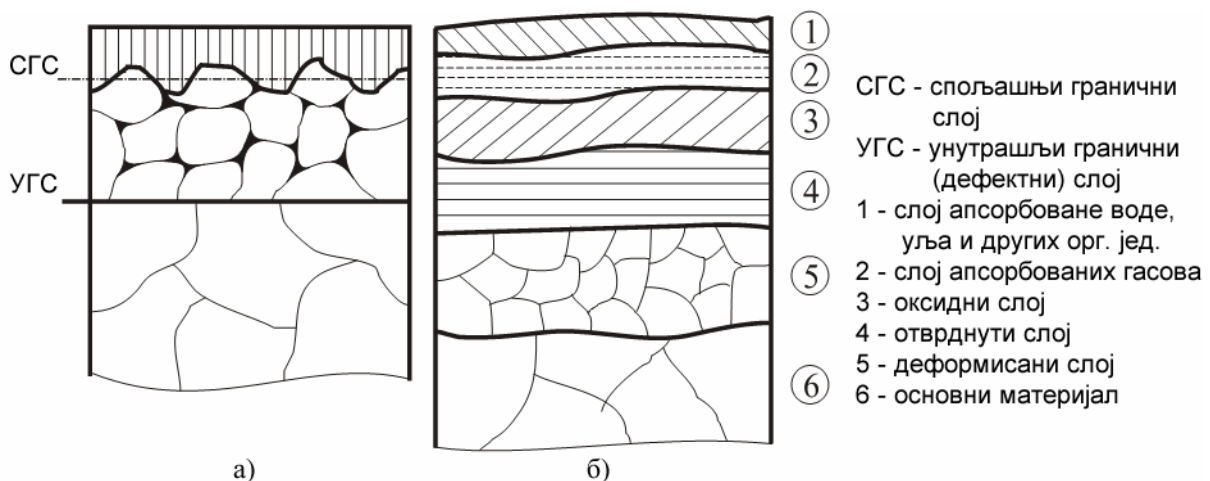
- слоја апсорбоване воде, уља и других органских једињења,
- слоја апсорбованих гасова и
- оксидационог слоја.

Дебљина и структура овог слоја зависи од природе материјала предмета обраде, пре свега његових физичко-хемијских карактеристика, и природе средине у којој се изводи процес обраде. Дебљина спољашњег површинског слоја се креће, по правилу, од  $0.0001\text{ mm}$  до  $0.001\text{ mm}$  [28].

Унутрашњи површински слој је танак структурно измењен слој материјала у односу на основну структуру материјала предмета обраде, и представља прелаз ка структурно неизмењеном материјалу. Настаје као последица пластичних деформација, топлотних и механичких оптерећења, физичко-хемијских дејстава и посебног стања атома код којих се јавља слободна површинска енергија и већа апсорпциона способност. Овај слој се по *Яцерицын-у* састоји од два подслоја:

- слоја отврдног материјала и
- слоја деформисаног материјала.

Физичке и хемијске карактеристике унутрашњег површинског слоја се значајно разликују од карактеристика које има основни материјал и карактеришу га многобројни дефекти. Управо због тога се овај слој често назива и дефектним слојем. Дебљина и структура овог слоја зависе од врсте обраде и режима процеса обраде. Дебљина унутрашњег површинског слоја се креће од  $0.01\text{ mm}$  до  $0.05\text{ mm}$  [28].



У литератури [29-33] се може пронаћи и другачија интерпретација површинског слоја, па се по *Gatos-у*, *Haltner-у*, *Buckley-у* и *Bhushan-у* површински слој састоји од физички апсорбованог слоја дебљине  $0.3\text{ nm} - 3\text{ nm}$ , хемијски апсорбованог слоја дебљине  $3\text{ nm}$ ,

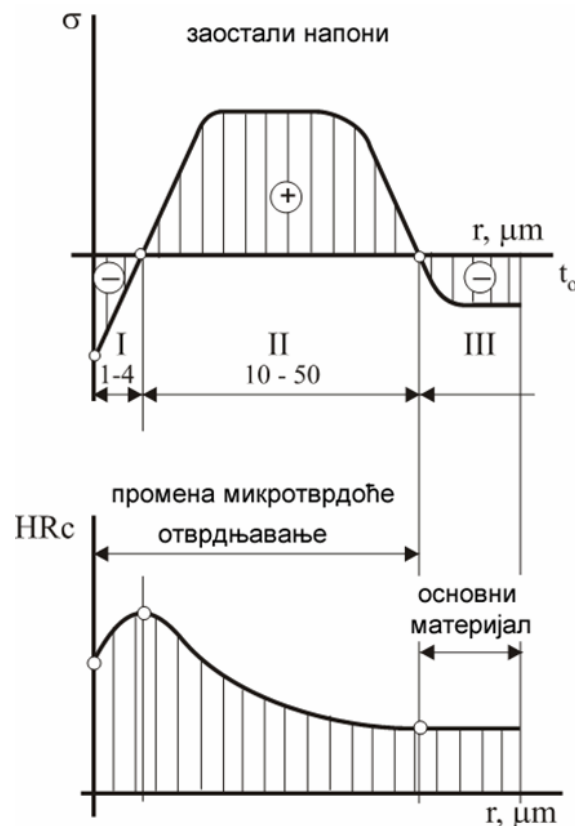


слоја који је хемијски реаговао са окружењем дебљине  $10\text{ nm} - 100\text{ nm}$ , слоја са микрокристалном или аморфном структуром (тзв. *Beilby* слој) дебљине  $1\text{ nm} - 100\text{ nm}$ , слоја веома деформисаног материјала дебљине  $1\text{ }\mu\text{m} - 10\text{ }\mu\text{m}$  и деформисаног слоја дебљине  $10\text{ }\mu\text{m} - 100\text{ }\mu\text{m}$ .

Показатељи квалитета обрађене површине се могу поделити на геометријске (храпавост, валовитост итд.) и физичко-механичке карактеристике (микроструктура, микротврдоћа, микропукотине, заостали напони итд.).

Као што је претходно поменуто, у површинском слоју обрађене површине, услед дејства топлотних и механичких оптерећења, долази до појаве нежељених ефеката као што су појава микропукотина, заосталих напона, пластичног деформисања и отврдњавања, промена микроструктуре, микротврдоће и појава местимично „нагорелих“ површина. Појава нежељених ефеката утиче на низ карактеристика обрађене површине као што су отпорност на хабање, корозиона отпорност, заморна чврстоћа итд.

Микропукотине настају као последица неравномерне промене запремине површинских слојева предмета обраде услед структурних трансформација при загревању и хлађењу материјала у процесу обраде. Ова појава је посебно изражена при завршној обради брушењем. Услед различите вредности температуре резања долази до неравномерног деформисања слојева и појаве заосталих напона на затезање. Када вредност заосталих напона достигне вредност затезне чврстоће долази до појава микропукотина чија величина, облик, дубина и просторни распоред зависе од температуре у зони резања.



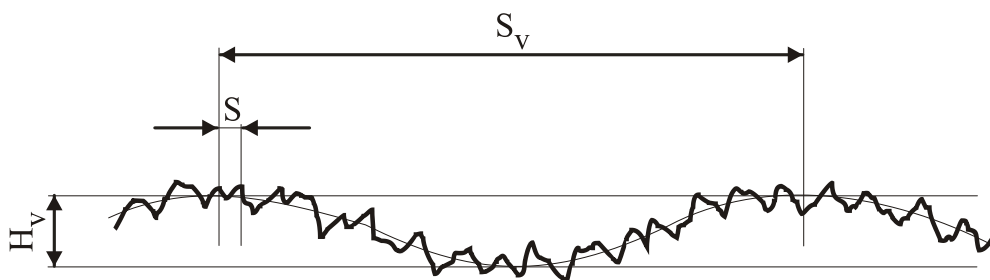
Слика 2.1.3: Заостали напони, њихова промена по дубини површинског слоја и промена микротврдоће, настали у процесу обраде метала резањем [23, 34, 35]

Заостали затезни или притисни напони су напони који остају и непрекидно делују у предмету обраде након израде или првог оптерећења. Заостали напони након обраде полуфабриката значајно утичу на квалитет обраде а након израде готових делова утичу на њихову функционалност, век трајања и поузданост рада. Постојање заосталих напона је последица неравномерног пластичног деформисања по дубини у току процеса обраде, неравномерног загревања или хлађења, промене фазе или настанка нових структура. Вредност заосталих напона зависи од режима обраде, геометрије резног алата, димензија и материјала предмета обраде, квалитета средстава за хлађење и подмазивање и других утицајних фактора. На слици 2.1.3 су приказани заостали напони и промена микротврдоће који су настали током процеса обраде резањем [23, 34, 35].

Отврдњавање површинских слојева је резултат пластичног деформисања слојева. Степен отврдњавања и дубина отврдњавања зависе од врсте обраде, особине материјала предмета обраде, геометрије и стања алата, врсте средстава за хлађење и подмазивање и других услова обраде. У неким случајевима отврдњавање површинских слојева је пожељно па су развијени поступци обраде код којих је управо циљ добијање отврднуте површине. Поступци обраде којима се може постићи такав ефекат су углавном базирани на чистом деформационом ојачању и то су бомбардовање сачмом, бомбардовање млазом воде под притиском. Ови поступци се често називају и поступци обраде гњечењем.

Појава „нагорелих“ површина је резултат интензивног загревања малих запремина површинског слоја. Ову појаву прате појаве микропукотина и промене микроструктуре што за последицу има смањење отпорности на хабање површинског слоја. Нагореле површине могу бити велике, у облику круга или елипсе, и мале у облику танких линија које се појављују у правцу обраде. Ова појава је нарочито изражена при завршној обради брушењем.

Параметри којима се дефинише микрогеометрија се могу сврстати у две основне групе [28]. У прву групу се сврставају параметри који се односе на валовитост а у другу групу параметри који се односе на храпавост (слика 2.1.4). Поред тога параметри храпавости се деле на основне и допунске.



Слика 2.1.4: Валовитост и храпавост обрађене површине [18]

Под валовитошћу површина подразумевају се неравнине које се јављају на површинама у валовима приближно једнаког корака и висине, при чему је корак вала знатно већи од висине вала. Под корак вала  $S_v$  се подразумева растојање између два врха вала и најчешће се креће између  $0.7 \text{ mm}$  и  $5 \text{ mm}$ . Висина вала  $H_v$  је знатно мања и креће се између  $0.001 \text{ mm}$  и  $0.03 \text{ mm}$ . Такође се под валовитошћу подразумевају оне неравнине на површинама предмета обраде које задовољавају услов:

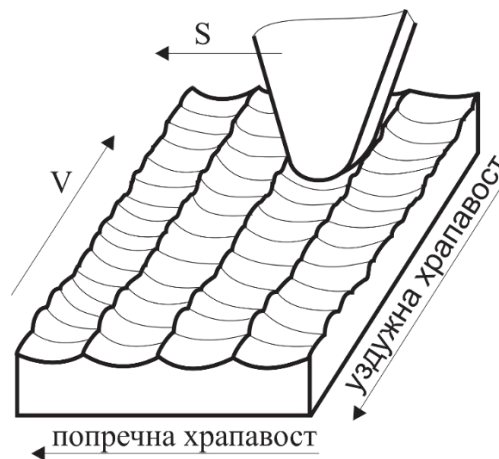
$$\frac{S_v}{H_v} \geq 40 \quad (1.1)$$

Под хрпавошћу површине се подразумевају неравнине чије је међусобно растојање релативно мало а висине могу бити веома различите. Храпавост обрађене површине је дефинисана наравнинама код којих однос корака  $S$  и висине  $H$  неравнина испуњава услов:

$$\frac{S}{H} < 40 \quad (1.2)$$

Растојање између две суседне неравнине се креће између  $2 \mu m$  и  $800 \mu m$ , а висине неравнина се крећу од  $0.03 \mu m$  до  $400 \mu m$ . На храпавост обрађене површине утичу многи параметри као што су услови резања, облик алата, стање резних ивица алата, хабање резне ивице алата, наслаге на резним ивицама алата, вибрације, крутост елемената технолошког система и друго.

Поред тога могу се разликовати попречна и уздужна храпавост (слика 2.1.5), при чему се попречна храпавост мери у правцу нормалном на трагове механичке обраде, а уздужна дуж трагова механичке обраде. Под нормалним условима обраде, попречна храпавост је већа од уздужне и меродавна је за оцену храпавости обрађене површине.



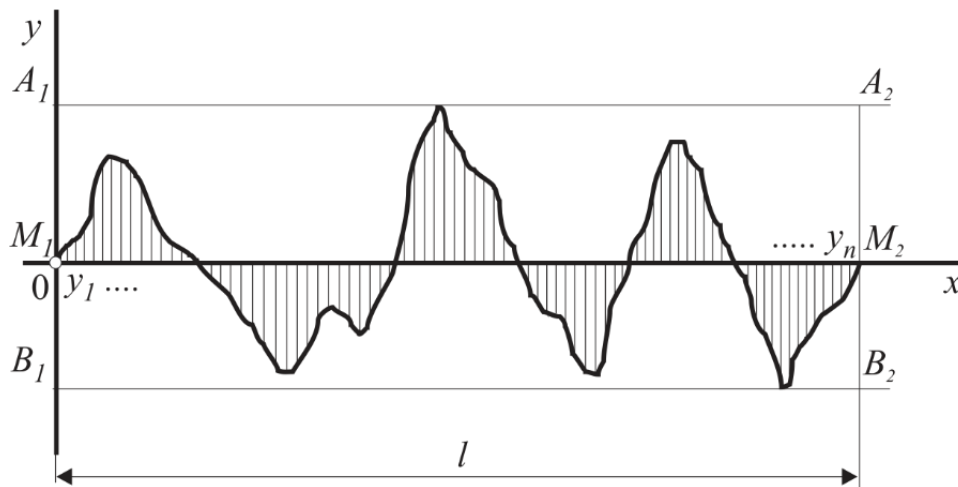
Слика 2.1.5: Попречна и уздужна храпавост [18]

Основне дефиниције и параметри храпавости су дефинисани одговарајућим интернационалним и националним стандардима ISO 25178 Part 1 – Part 701, ISO 4287:1996, ISO 4288, ISO 1302, ISO 11562, ISO 12085, ISO 13565, DIN 4768 Part 1 & Part 2, JUS M. A1. 020 односно SPRS M. A1. 020 итд. Сви параметри храпавости се према интернационалном ISO 25178 Part 1 – Part 701 стандарду могу поделити у три групе:

- параметре који се односе на вертикалне (висинске) особине неравнина, за које се често користе и други изрази као што су амплитудни [29, 30] или висински параметри храпавости,
- параметре храпавости који се односе на особине неравнина у правцу дужине профила, често познате под именом хоризонтални параметри и

- хибридне параметре који представљају комбинацију претходно наведених група параметара.

С обзиром на тему овог рада, од круцијалног је значаја познавање основних триболошких појмова који се односе на профил храпавости, као и основних параметара храпавости па је, с тим у вези, у даљем тексту дати кратак осврт са дефиницијама основних појмова и амплитудни параметри храпавости који су коришћени. Поред тога, наведени су и неки од параметара који су дефинисани SRPS М. А1. 020 стандардом који је од 28.01.2013. године замењен стандардом Геометријска спецификација производа – означавање површинске текстуре у техничкој документацији производа SRPS EN ISO 1302:2013, који је идентичан са интернационалним ISO 1302:2013 стандардом.



Слика 2.1.6: Профил храпавости

Референтна дужина профила  $l$  (слика 2.1.6) је минимална дужина исечка профила храпавости неопходна за поуздано дефинисање параметара храпавости, односно дужина на којој је елиминисан, тј. минимизован утицај других неправилности као што су валовитост, грешке облика и слично. Са порастом референтне дужине профила храпавости повећава се тачност одређивања основних параметара храпавости, али у исто време расте утицај валовитости обрађене површине на резултате мерења.

Средња линија профила ( $M_1M_2$ ) има облик номиналног профила (права или крива линија у зависности од облика површине). Поставља се кроз профил храпавости површине тако да је на референтној дужини  $l$  збир квадрата одстојања свих тачака профила од те линије минималан, односно:

$$\sum_{i=1}^n y_i^2 \rightarrow \min \quad (1.3)$$

Горња линија профила ( $A_1A_2$ ) пролази кроз највишу тачку профила и еквиливантна је средњој линији профила на референтној дужини  $l$ .

Доња линија профила ( $B_1B_2$ ) пролази кроз најнижу тачку профила и еквиливантна је средњој линији профила на референтној дужини  $l$ .

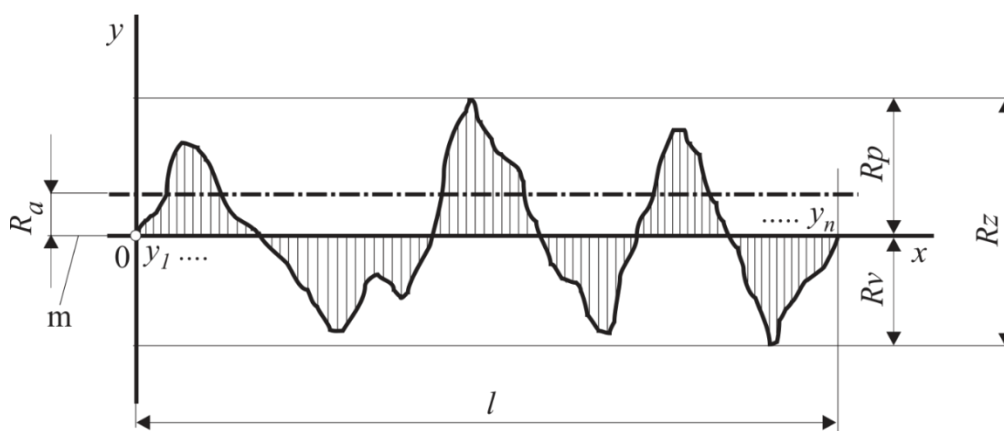
Растојање између горње и доње линије профила назива се максимална висина неравнина односно максимална висина профила храпавости. Обележава се са  $R_{max}$  и представља основни параметар храпавости. Овај параметар се у ISO 25178 стандарду обележава као  $R_z$  и рачуна се као:

$$R_z = R_p + R_v \quad (1.4)$$

где су:

$R_p$  – максимална висина врха (испупчења) профила (слика 2.1.7), односно растојање између средње линије профила и горње линије профила храпавости,

$R_v$  – максимална дубина удубљења профила (слика 2.1.7), односно растојање између средње линије профила и доње линије профила храпавости.



Слика 2.1.7: Графичка интерпретација средњег аритметичког одступања профила од средње линије профила  $R_a$ , максималне висине неравнина  $R_z$  ( $R_{max}$ ), максималне висине врха профила  $R_p$  и максималне дубине удубљења профила  $R_v$

Други основни параметар храпавости (који се најчешће користи у индустријској пракси) је средње аритметичко одступање профила од средње линије профила  $R_a$ . Средње аритметичко одступање профила од средње линије профила се може одредити помоћу два израза:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1.5)$$

или

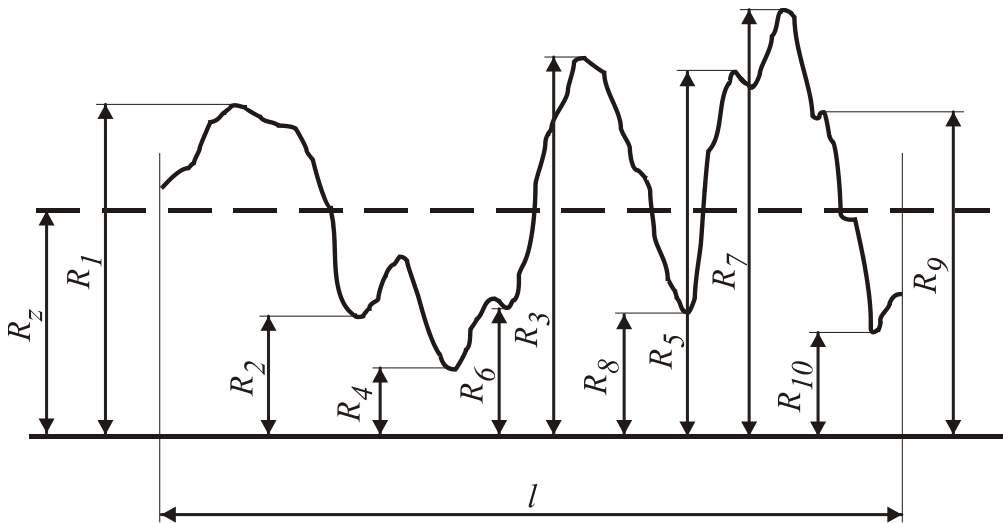
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (1.6)$$

где су:

$y_i$  – растојање сваке тачке профила обрађене површине од средње линије профила,

$n$  – број тачака профила обрађене површине и

$l$  – референтна дужина профила.



Слика 2.1.8: Графичка интерпретација средње висине неравнина  $R_z$

Трећи основни параметар храпавости је средња висина неравнина, обележава се са  $R_z$  (према новијим верзијама стандарда овај параметар се више не користи) и рачуна се по обрасцу:

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{i=5} |R_{maxi}| + \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{i=5} |R_{mini}| \quad (1.7)$$

односно према слици 2.1.8:

$$R_z = \frac{R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9}{5} + \frac{R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10}}{5} \quad (1.8)$$

при чему се мерење пет највиших врхова и пет најнижих удубљења на изабраној референтној дужини врши од средње линије профила. Веома је битно направити разлику између параметра максимална висина неравнина и средње висине неравнина јер се према новом стандарду максимална висина неравнина обележава са  $R_z$ , а средња висина неравнина се према старијим стандардима обележава исто. С обзиром да у новом стандарду параметар средња висина неравнина није дефинисан, а он се и даље користи у пракси, онда треба водити рачуна о ознакама и могућем мешању та два параметра.

Као што је већ поменуто, поред основних параметара храпавости, постоје допунски параметри храпавости и према наведеном SRPS EN ISO 1302:2013 стандарду то су дужина ношења профила, коефицијент ношења профила и слично.

Дужина ношења профила  $l_c$  је збир дужина свих елементарних одсека на профилу у границама референтне дужине које одсеца права паралелна са средњом линијом профила на растојању  $s$ . Дужина ношења профила се рачуна по обрасцу:

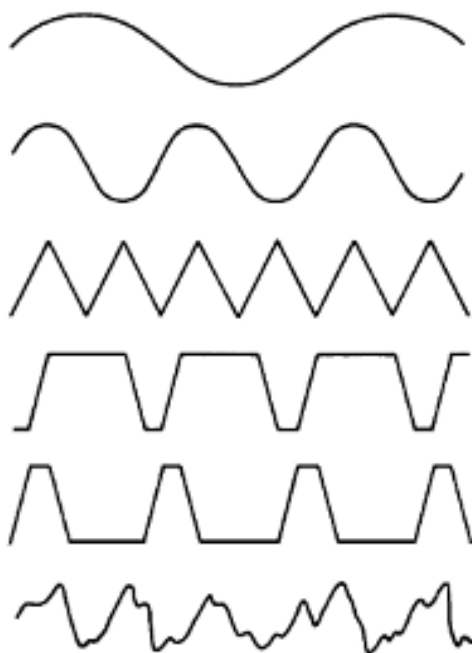
$$l_c = \sum_{i=1}^k l_{ci} \quad (1.9)$$

Коефицијент ношења профила  $p_{nc}$  је однос дужине ношења профила и референтне дужине профила. Коефицијент ношења профила се рачуна по обрасцу:

$$p_{nc} = \frac{l_c}{l} 100 \% \quad (1.10)$$

Поред наведеног треба напоменути да постоји преко 30 различитих допунских параметара који се користе за карактеризацију храпавости обрађене површине као и да се у различитим стандардима различито обележавају и дефинишу поједини параметри храпавости. Битно је нагласити да су сви наведени параметри храпавости дводимензионални. Постоје и тродимензионални параметри храпавости који у овом раду нису описани из неколико разлога, пре свега због тога што у раду нису коришћени. У раду ће бити коришћене ознаке и дефиниције које су општеприхваћене и прописане интернационалним EN ISO 1302:2013 стандардом.

За утврђивање параметара храпавости обрађене површине се користе квалитативне и квантитативне, контактне и бескотактне, механичке, пнеуматске, електричне, оптичке, ласерске и друге методе [36-38]. Квалитативне или упоредне методе су методе код којих се врши упоређивање храпавости обрађене површине и храпавости површине еталона. Квантитативне методе обезбеђују идентификовање бројне вредности параметара храпавости или формирање записа профила храпавости и параметара храпавости.



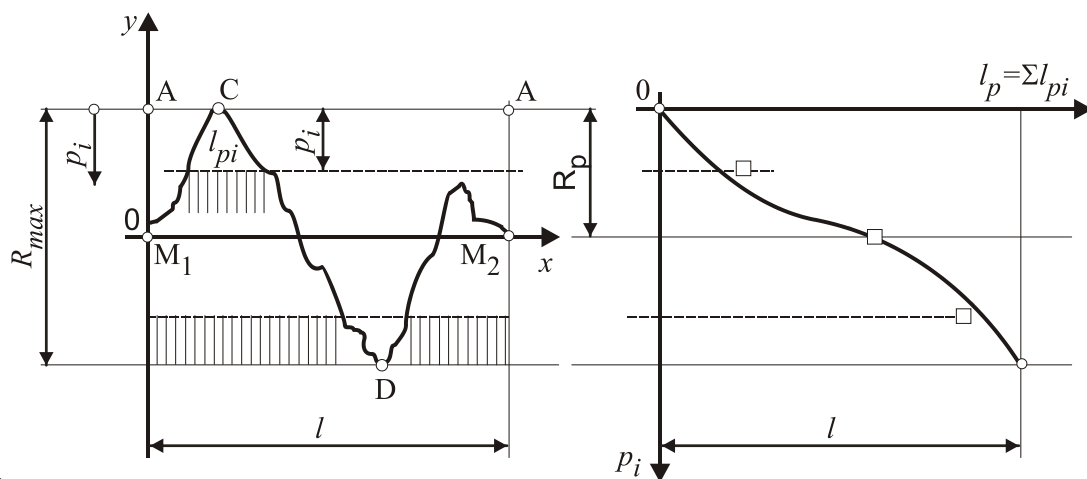
Слика 2.1.9: Различити профили храпавости са истом вредношћу  $R_a$  [29, 39]

Познавање величине основних параметара храпавости обрађених површина није довољно за проучавање контакта између два тела. Површине које имају једнаке основне параметре храпавости приликом остваривања контакта могу имати потпуно различито понашање. Разлог томе је чињеница да распоред материјала у површинском храпавом слоју, при истој вредности средње аритметичке храпавости  $R_a$ , не мора бити једнак. Као илустрација ове чињенице може послужити слика 2.1.9 [29, 39] на којој се могу уочити

јасне разлике у распореду материјала у површинском слоју при истој вредности средњег аритметичког одступања профила од средње линије профила  $R_a$ .

О распореду материјала у површинском хрпавом слоју обрађене површине најбоље говори крива носивости профила површине [28]. Крива представља графичку интерпретацију зависности дужине ношења профила од нивоа равни којом је профил пресечен (слика 2.1.10).

Ако би се остварио контакт између хрпаве површине и идеално глатке површине, реална површина контакта би била једнака површини врха неравнине по којој је контакт остварен, односно контакт би се остварио у само једној тачки. У овом случају је дужина ношења профила једнака нули. Даље, ако би се повећавало оптерећење у зони додира, идеално равна површина би се приближавала доњој линији профила, при томе би деформисала врх највеће неравнине и дошла у контакт са другим неравнинама. Положај идеално глатке површине, односно равни сечења профила, одређен је њеним растојањем од горње линије профила  $p_i$ . Дакле, деформисањем највећих неравнина и доласком у контакт са другим неравнинама повећава се дужина ношења профила. При томе би њена максимална вредност достигла вредност референтне дужине профила  $l$  на растојању идеално глатке површине од горње линије профила  $p_i = R_{max}$ .



Слика 2.1.10: Крива ношења профила [19]

У табели 2.1.1. су дате оријентационе вредности средњег аритметичког одступања од средње линије профила  $R_a$  које се могу постићи различитим врстама ручне и машинске обраде. На ову табелу треба обратити посебну пажњу јер ће у даљем тексту бити поновних осврта на њен садржај. Такође, треба нагласити да, у до сада наведеној литератури као и у различитим каталозима произвођача резних алата, постоји више различитих табела са сличним садржајем, при чему су међусобна одступања параметра  $R_a$  веома мала, па ова табела, практично, представља сумирајућу табелу у циљу обједињавања података на једном месту како би се на најлакши могући начин могла извршити поређења различитих врста ручне и машинске обраде са аспекта хрпавости.



Табела 2.1.1: Оријентационе вредности  $R_a$  које се могу постићи различитим врстама ручне и машинске обраде [18-20]

Поступак обраде	Средње аритметичко одступање профила од средње линије профила $R_a$ ( $\mu m$ )															
	0.25	0.5	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25	50	100	200	400	800
<b>Ручна обрада</b>																
Грубо турпијање																
Фино турпијање																
<b>Ливење</b>																
У песку																
У кокилама																
Под притиском																
<b>Ковање</b>																
Топло слободно																
Топло у калупу																
Хладно у калупу																
<b>Ваљање</b>																
Топло																
Хладно																
Пескарење																
Сачмарење																
Гасно резање																
<b>Стругање</b>																
Грубо																
Фино																
<b>Рендисање</b>																
Грубо																
Фино																
<b>Глодање</b>																
Грубо																
Фино																
Бушење																
Развртање																
<b>Брушење</b>																
Грубо																
Фино																
<b>Полирање</b>																
Механичко																
Електрично																
Хоновање																
Суперфиниш																
<b>Обрада навоја</b>																
Резање																
Брушење																
<b>Обрада зубаца</b>																
Рендисање																
Глодање																
Брушење																

Површинска храпавост има веома велики утицај на перформансе механичких компоненти. Неравнине које постоје на површинама механичких компоненти одређују начин интеракције стварног објекта са окружењем [40]. Последица ове чињенице је да се у савременој индустрији веома велики значај придаје процесима завршне обраде. Добра завршна обрада има позитивне ефекте на функционисање машинских склопова, пренос оптерећења, отпорност на хабање, корозиону отпорност, радни век склопова и заморну чврстоћу, док се лошом завршном обрадом повећева, пре свега, хабање, а потом и могућност добијања неодговарајућих толеранција и потребе одређеног механизма за енергијом [41]. Као што је већ поменуто, најчешће коришћени поступци завршне обраде су фина обрада стругањем, фина обрада глодањем, брушење, развртање, провлачење и остали поступци глачања као што су леповање, хоновање, суперфиниш, полирање и тако даље.

Са друге стране, још један од параметара који утиче на квалитет обрађене површине је површинска микротврдоћа која се мења током процеса обраде као последица отврдњавања површинских слојева. Вредност овог параметра у великој мери утиче на вредност отпорности на хабање и заморну чврстоћу. Алтернативни механички процеси за побољшање храпавости, површинске микротврдоће, заморне чврстоће и отпорности на хабање су базирани на чистом деформационом ојачању. Алтернативни процеси механичке обраде који се користе, пре свега за побољшање заморне чврстоће и отпорности на хабање, јесу пескарење, бомбардовање сачмом, ковање, обрада млазом воде под притиском, рибање, ваљање отвора и обрада високим притисцима.

Веома је важно нагласити да се алтернативним механичким процесима базираним на чистом деформационом ојачању добијају вредности тврдоће и заморне чврстоће које имају значајно мање вредности у односу на оне добијене термичким и термохемијским обрадама [26, 27].

Један од алтернативних процеса механичке обраде којим се може побољшати квалитет обраде предмета обраде са аспекта постизања потребног квалитета, који обухвата тачност обраде и квалитет обрађених површина, јесте завршна обрада метала базирана на котрљању алата по површини предмета обраде. Процес обраде котрљањем алата по површини предмета обраде је процес механичке обраде на хладно, без скидања струготине [42], којим се пластично деформише површински слој третираног предмета обраде [43]. Процес обраде котрљањем алата по површини предмета обраде функционише тако што се радни елемент алата (најчешће куглица, ваљак или диск) ваља по површини која се обрађује. Ваљањем радног елемента алата по површини предмета обраде појављују се високи контактни притисци (*Hertz*-ови притисци) који превазилазе вредност напона на граници течења па долази до пластичног течења материјала у површинском слоју. Врхови неравнина, под дејством контактних притисака, почињу пластично да теку, попуњавајући удубљења у профилу храпавости и размазују текстуру храпаве површине побољшавајући њену глаткост.

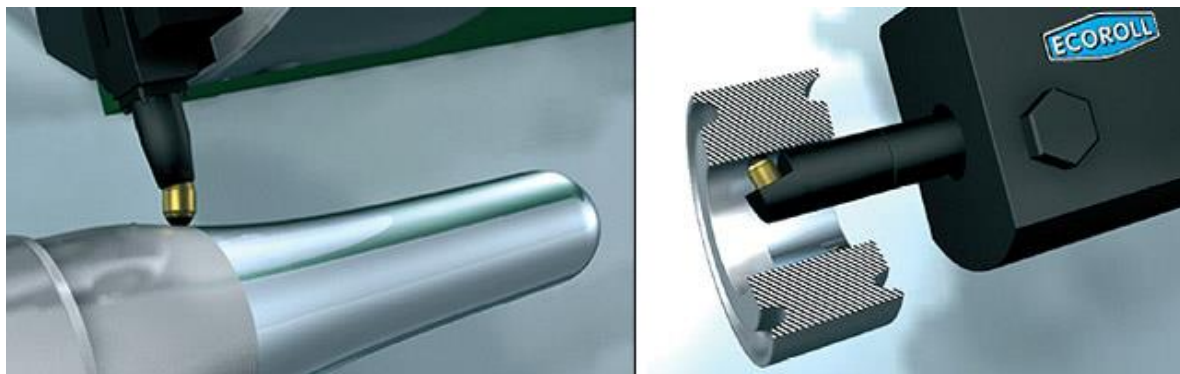
## 2.2. Класификација и намена процеса обраде котрљањем алата по површини предмета обраде

Процес механичке обраде котрљањем алата по површини предмета обраде је у иностраној литератури познат под енглеским називом *burnishing*. Поред овог назива, у иностраној литератури се, посебно код немачких аутора, може пронаћи још један термин којим се описује овај поступак машинске обраде а то је *deep rolling* [49-51]. Битно је нагласити да је опште прихваћен термин, који се користи у релевантној литератури, за овакав вид машинске обраде - *burnishing*.

Овај термин има шире значење и не означава искључиво обраду котрљањем алата по површини предмета обраде. С тим у вези се могу разликовати две врсте обраде и то:

- механичка обрада котрљањем алата по површини предмета обраде и
- механичка обрада клизањем алата по површини предмета обраде.

У релевантној литератури се процес обраде клизањем алата по површини предмета обраде може пронаћи под енглеским називом *slide burnishing*. На слици 2.2.1 су приказани алати за обраду клизањем по површини предмета обраде једног од произвођача. На слици под а) се види алат за спољашњу обраду, а под б) алат за унутрашњу обраду. Радни елемент алата који је у контакту са предметом обраде и који клизи по његовој површини је у случају обраде клизањем алата по површини предмета обраде најчешће облика полусфере или сферног одсечка.



а)

б)

Слика 2.2.1: Алат за обраду клизањем алата по површини предмета обраде (*slide burnishing*): а) за спољашњу обраду и б) за унутрашњу обраду

На слици 2.2.2 је приказан један алат за обраду котрљањем алата по површини предмета обраде.

Код механичке обраде котрљањем алата по површини предмета обраде се у зависности од облика радног елемента алата могу разликовати два различита типа обраде:

- *ball burnishing*, код кога је радни елемент алата куглица која котрља по површини предмета обраде и

- *roller burnishing*, код кога је радни елемент алата ваљак или диск који се котрља по површини предмета обраде.



Слика 2.2.2: Алат за обраду котрљањем по површини предмета обраде

Намена овог процеса машинске обраде је, пре свега, добијање одговарајућег квалитета третиране површине предмета обраде при чему се побољшавају површинска храпавост [40-43, 52-61], микротврдоћа [59-64], отпорност на хабање и корозију [65-71] и заморна чврстоћа [65, 66, 72]. Поред тога, овим процесом се утиче и на тачност обраде, пре свега при обради отвора [62]. Мора се нагласити да не постоји пуно радова који проучавају утицај ове врсте обраде на димензиону тачност обраде и они се углавном односе на процес обраде котрљањем ваљака по површини предмета обраде. Касније ће детаљније бити речи о овој проблематици.

Поред наведених побољшања квалитета обрађене површине заостали затезни напони у површинском слоју се трансформишу у притисне што додатно унапређује неколико механичких карактеристика, као што су затезна чврстоћа, елонгација итд. [72-75]. Дубина пенетрације притисних напона, као и дебљина отврдног површинског слоја, зависи од материјала предмета обраде, микроструктуре и примењеног оптерећења. Оваквом машинском обрадом се добија глатка површина са тврдим слојем који је формиран на површини предмета обраде као последица деформационог ојачања које је узроковано интензивном пластичном деформацијом површинског слоја. Као последица тога долази до смањења површинских дефеката и модификације микроструктуре обрађене површине [49-51, 54, 76-78].

Дакле, обрадом котрљањем или клизањем алата по површини предмета обраде се формира отврнути слој другачијих триболошких и физичко-хемијских карактеристика. Постоји неколико хипотеза о механизму отврдњавања метала након пластичног деформисања површинског слоја. У литератури [80, 81] се хипотезе о механизмима отврдњавања површинског слоја предмета обраде деле у три групе. То су:

- група хипотеза код којих отврдњавање зависи од величине кристалних фрагмената у складу са *Hall-Petch* законом<sup>1</sup>,
- група хипотеза код којих отврдњавање зависи од контролираних унутрашњих заосталих напона и
- група хипотеза код којих отврдњавање зависи од густина дислокација у површинском слоју.

У зависности од његове намене, у оквиру овог процеса машинске обраде могу се разликовати [76]:

1. Обрада котрљањем или клизањем алата по површини предмета обраде са циљем отврдњавања површинског слоја (eng. *Hardening Burnishing*). У овом случају се на хладно пластично деформише спољашњи површински слој и притиска до жељене дубине. Овакав вид обраде побољшава заморну чврстоћу, отпорност на хабање и друге карактеристике предмета обраде. Најзначајнији параметар је у овом случају дубина до које се пластична деформација јавља. Уколико се обрада врши крутим алатом, дубина до које ће се појавити пластична деформација се може одредити одабиром одговарајуће дубине утискивања куглице у материјал предмета обраде. У случају да се обрада врши еластичним алатом, дубина до које ће се појавити пластична деформација се може одредити избором одговарајуће силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде. Оба параметра, дубина утискивања и сила, у овом случају се бирају у зависности од физичко-хемијских карактеристика материјала предмета обраде и површине контактне геометрије између алата и предмета обраде. Овакав вид обраде котрљањем куглице је један од најстаријих и најкоришћенијих примена овакве врсте обраде. Проблеми који се односе на овакав вид обраде су анализирани и могу се наћи у литератури [40, 59]. Такође, постоје и многе математичке формуле које се односе на избор одговарајућих параметара. Произвођачи алата за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде углавном дају препоруке за два наведена параметра обраде, силу и дубину утискивања, која су у овом случају од пресудног значаја.
2. Обрада котрљањем или клизањем алата по површини предмета обраде са циљем постизања димензионе тачности (eng. *Dimensional Burnishing*). У овом случају је избором одговарајуће дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде, геометрије контактне површине и кинематике машинске обраде могуће добити одговарајућу димензиону тачност и адекватну храпавост обрађене површине. Код овакве обраде је дубина до које се пластична деформација јавља у површинском слоју од мањег значаја. Најважнији параметар ове методе машинске обраде је дубина утискивања куглице у површину предмета обраде и њена вредност се бира у зависности од жељене димензије предмета обраде и одговарајуће прецизности. Овакав вид обраде је могућ само са крутим алатом за

<sup>1</sup> *Hall-Petch*-овим законом је дата једначина којом се описује зависност између средње величине кристалног зрна и вредности напона на граници течења. По овом закону те две величине су обрнуто пропорционалне.

обраду котрљањем по површини предмета обраде. Најчешћа примена овакве машинске обраде је код завршне обраде отвора котрљањем ваљака или дискова по површини предмета обраде. Произвођачи алата дају препоруке за дубину утискивања радног дела алата (куглица, диск, ваљак) у материјал предмета обраде за разне врсте материјала.

3. Обрада котрљањем или клизањем алата по површини предмета обраде са циљем постизања што глаткије површине (eng. *Smoothing Burnishing*). У овом случају се претходним машинским обрадама добија одговарајући облик и димензија предмета обраде, а обрадом котрљањем по површини предмета обраде се побољшава храпавост третиране површине. И у овом случају дубина до које долази до пластичне деформације површинског слоја није од пресудног значаја, али је веома битно да се сачувају облик и димензија предмета обраде који су добијени претходним обрадама.

Обрадом котрљањем или клизањем алата по површини предмета обраде се могу обрађивати предмети обраде од различитих материјала као што су бронза [42, 59, 79], алуминијум [42, 53, 60, 72, 73], разне врсте челика [58, 68]: као што су *TRIP* челици<sup>2</sup> [49-51], меки челици [60], нерђајући X5CrNi 19-9 челик [67], AISI 1042 [75], аустенитни AISI 304 челик [92], термички обрађени INCONEL 718 [98], као и разне врсте легираних челика, на пример легура магнезијума и калцијума [88], или легура титана и никла [82]

Поред могућности коришћења овакве врсте обраде на радним комадима од различитих материјала, овај процес се може користити и на предметима обраде различитих геометрија. Могућа је обрада спољашњих и унутрашњих површина цилиндричних предмета обраде [49-53, 62] и обрада малих и великих равних површина призматичних предмета обраде [40, 72]. Генерално, до сада постоји велики број радова у којима је обрађен процес обраде котрљањем или клизањем алата по површини цилиндричних предмета обраде и малих равних површина, док обрада великих равних површина није у потпуности истражена, пре свега због потребе извођења великог броја експеримената који истовремено захтевају веома много времена.

### 2.3. Алати за обраду котрљањем по површини предмета обраде

Алати који се користе у процесу обраде котрљањем по површини предмета обраде имају куглицу, ваљак или диск као радни елемент. С обзиром на облик радног елемента алата, извршена је подела процеса обраде котрљањем по површини предмета обраде, о чему је већ говорено. Радни елемент алата је од материјала високе тврдоће и може бити од керамике, волфрам-карбида, хром-карбида, високохромираних челика и тако даље. У даљем тексту ће бити говора о алатима за обраду котрљањем по површини предмета обраде који као радни елемент имају куглицу, односно обзиром на типове обраде

<sup>2</sup> Скраћеница *TRIP* се односи на енглески назив који гласи *Transformation Induced Plasticity*. Најчешћа примена им је у ауто-индустрији и познати су по изузетном споју чврстоће и дуктилности. Микроструктура ових челика се састоји од заосталог аустенита у феритној матрици.

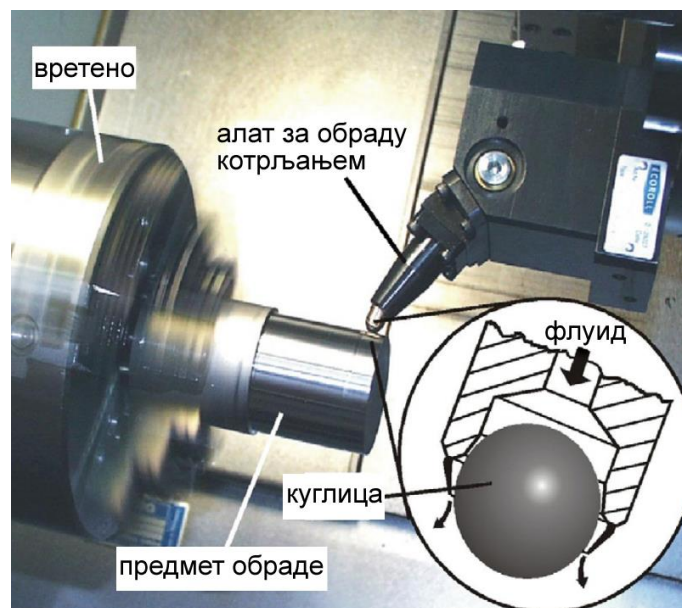
котрљањем, биће говора о алатима који се користе у процесу обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде.

Од пресудног значаја је да се конструктивним решењем алата обезбеди неометано котрљање радног елемента алата, у овом случају куглице, по површини предмета обраде тј. да се избегне клизање по третираној површини као и да се спречи појава адхезионих спојева током обраде. Постоје различита конструктивна решења којима се обезбеђује неометано котрљање радног елемента алата. С тим у вези, алати се могу поделити у неколико категорија. Чине их:

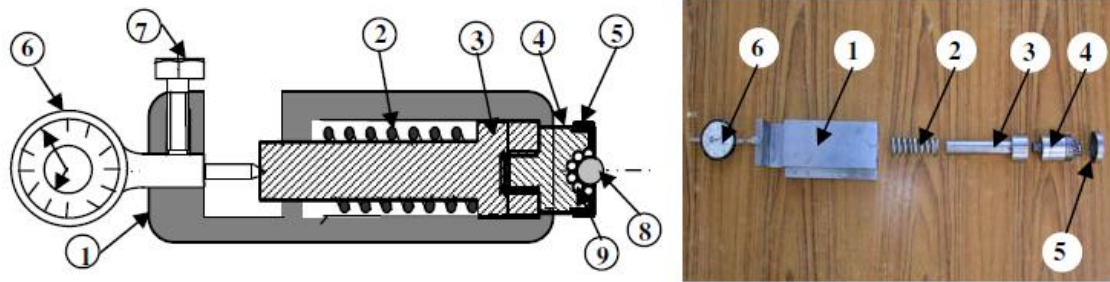
- алати код којих се котрљање куглице обезбеђује помоћу помоћних (водећих) куглица [40, 59, 72],
- алати код којих се котрљање куглице обезбеђује помоћу флуида под притиском [49-51, 81, 83],
- алати код којих је куглица ослоњена на стрму раван [79] и
- алати код којих се котрљање куглице обезбеђује помоћу котрљајућих лежајева [84, 85].

Поред тога, алати се могу поделити и према начину задавања силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде. На основу овог критеријума могу се разликовати алати код којих се сила задаје помоћу калибрисаних опруга [51, 52, 64], алати код којих се сила задаје помоћу флуида под притиском [49-51, 81, 83, 99], а постоје и другачија решења алата код којих се сила задаје коришћењем флексибилног држача алата [41, 60] итд.

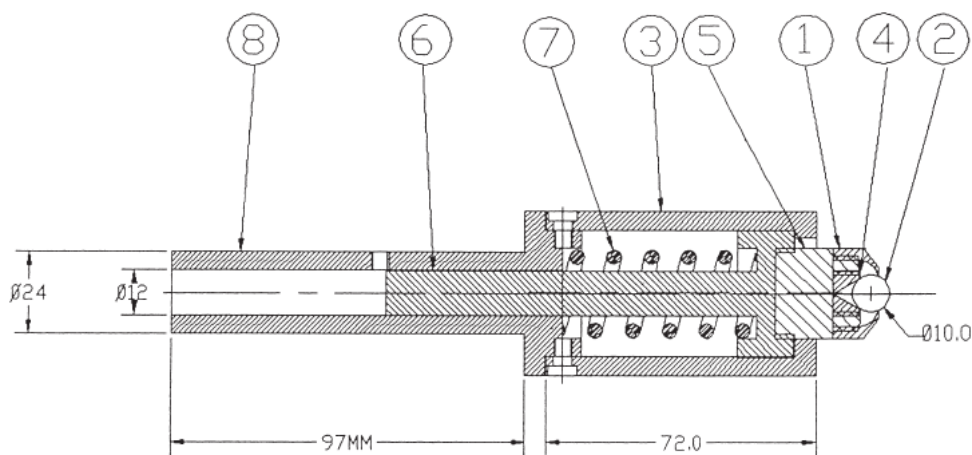
Постоје и специјална решења носача алата, намењена за обраду великих равних површина са циљем скраћења времена обраде, на које се може монтирати више једноставних алата за обраду котрљањем [72, 86].



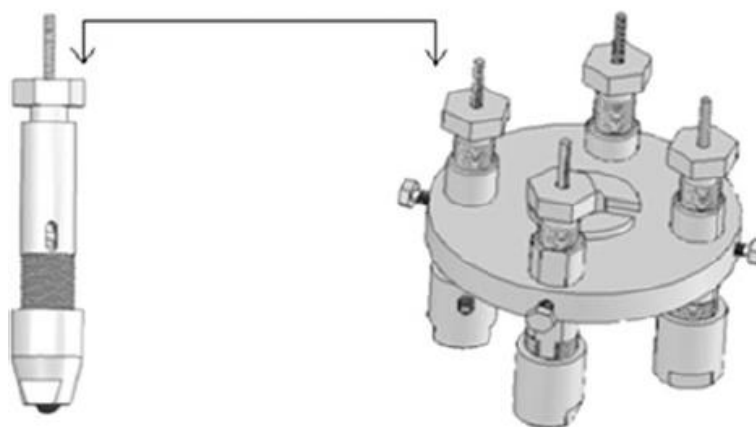
Слика 2.3.1: Алат за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде код кога се неометано котрљање куглице и задавање силе врши помоћу флуида под притиском [50]



Слика 2.3.2: Алат за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде са помоћним куглицама које обезбеђују неометано котрљање куглице са задавањем силе помоћу калибрисане опруге [59]. Позиције: 1. кућиште алата, 2. калибрисана опруга, 3. ослонац опруге, 4. ослонац куглице, 5. поклопац, 6. инструмент за читавање задате силе, 7. навртка, 8. куглица и 9. помоћне куглице



Слика 2.3.3: Алат за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде код кога се куглица ослања на стрму раван са задавањем силе помоћу калибрисане опруге [79]. Позиције: 1. поклопац адаптера, 2. куглица, 3. кућиште, 4. ослонац куглице, 5. адаптер, 6. ослонац опруге, 7. калибрисана опруга, 8. држач



Слика 2.3.4: Специјално решење алата за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде са носачем алата који омогућава бржу обраду великих равних површина код призматичних предмета обраде [72]

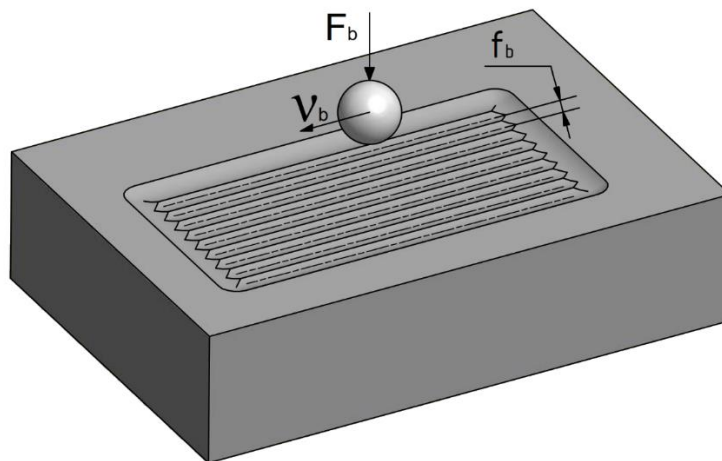


На сликама 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3 и 2.3.4 су приказана нека од конструктивних решења алата са различитим начинима обезбеђивања неометаног котрљања куглице и са различитим начинима задавања силе, као и једно специјално решење носача алата којим се обезбеђује бржа обрада великих равних површина призматичних предмета обраде.

#### 2.4. Параметри процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде

Параметри процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде су:

- $F_b$  - сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде,
- $v_b$  - брзина кретања куглице по површини предмета обраде,
- $f_b$  - посмак и
- $i$  односно  $n$  - број пролаза.



Слика 2.4.1: Шематски приказ параметара обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде

Често се у литератури уместо силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде  $F_b$ , као параметар обраде узима притисак  $p_b$  који настаје као последица деловања силе. Сила (односно притисак) којом се куглица притиска о површину предмета обраде као параметар обраде се често у литератури мења другим параметром обраде тзв. дубином утискивања, односно дубином пенетрације куглице у површину предмета обраде. Ова пракса је донекле повољнија зато што за различите материјале предмета обраде постоје различите дубине утискивања куглице у површину предмета обраде при дејству силе односно притиска исте величине. Дубина продирања куглице у површину предмета обраде зависи пре свега од физичко-хемијских карактеристика материјала предмета обраде, његове геометрије као и геометрије куглице.

Поред наведених параметара обраде често се као параметар обраде наводи и пречник куглице. Према *Hertz*-овој теорији о узајамном притиску између два тела, управо од пречника куглице зависе и вредности притисних напона. Одговарајућа обрађена површина ће имати карактеристике које у многоме зависе од геометрије радног елемента

алата, тј. да ли је радни део алата куглица, ваљак или диск. С тим у вези се могу разликовати врсте контакта између радног елемента алата и површине која се третира. Уколико је радни елемент алата куглица, контакт се остварује у околини тачке, а уколико је радни елемент алата ваљак, односно диск, контакт се остварује у околини линије. Дакле, резултујућа површина ће имати карактеристике које зависе од врсте контакта, димензија куглице, материјала куглице, материјала предмета обраде, примењеног оптерећења, брзине кретања куглице по површини предмета обраде, посмака, броја пролаза као и иницијалне храпавости површине која се обрађује.

## **2.5. Утицај процеса обраде котрљањем по површини предмета обраде на физичко-хемијске и триболошке карактеристике обрађене површине и утицај процеса обраде на побољшање димензионе и геометријске прецизности обрађених површина**

Код *TRIP* (трансформацијом индукована пластичност) челика је могуће извршити мартензитну трансформацију која ће бити индукована пластичном деформацијом. Међутим, мана ових челика је њихова лоша обрадивост. Неколико аустенитних нерђајућих челика је познато по одлици да на собној температури формирају метастабилну структуру која се трансформише у мартензитну под дејством пластичне деформације [44, 46]. Феномен мартензитне трансформације индуковане механичким оптерећењем на површину је већ описан 1920-их година, када је *Sauveur* препознао овај ефекат за време торзионог теста заморне чврстоће гвоздених узорака [47]. *Razim* је 1968. године извео прву корелацију између смањеног садржаја заосталог аустенита у површинским слојевима и повећање заморне чврстоће челика 14NiCr14 (AISI 3310) [48]. Последица ових истраживања *TRIP* челика је повећање интересовања академске заједнице и индустрије.

*Brinksmeier* и остали коаутори [49-51] су показали да се код челика са високим садржајем заосталог аустенита може постићи мартензитна трансформација индукована деформацијом, при чему се значајно унапређују микротврдоћа, заморна чврстоћа и отпорност на хабање механички обрађеног површинског слоја. За потребе истраживања аутори су конструисали алат код кога је радни елемент куглица која се притиска и котрља по површини предмета обраде уз помоћ флуида под притиском. Примарни циљ истраживања је утврђивање дебљине отврднутог слоја, промена тврдоће по дубини отврднутог слоја и промена микроструктуре. Аутори су показали да до хладног ојачања површина може доћи чистим деформационим ојачањем или мартензитном трансформацијом која може бити узрокована деформацијом или обрадом на температурама које су испод температуре неопходне за почетак мартензитне трансформације. Температуру обраде су спуштали коришћењем сувог леда ( $\text{CO}_2$ ). Анализа структуре отврднутог слоја је вршена дифракцијом X-зрака.

Комбинацијом претходне обраде стругањем и обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде од челика X155CrVMo12-1 (AISI D2) добијени су отврднути површински слојеви тврдоће до 850 *HV*, уз примену оптерећења од 1130 *N*, до дубине од

0.2 mm, при чему је значајно повећање тврдоће регистровано до дубине од 0.8 mm. При томе је садржај заосталог аустенита значајно смањен до дубине од 0.5 mm, а најмањи садржај аустенита од 60% идентификован је на дубини од 0.2 mm, при чему је после претходне обраде стругањем, на истој дубини, иницијално утврђено да постоји 90% аустенита у микроструктури подповршинског слоја.

Комбинацијом истих обрада на предмету обраде од челика X210Cr12 (AISI D3), са оптерећењем приликом обраде котрљањем куглице у границама од 560 N до 1130 N, добијена је тврдоћа од 650 HV до 750 HV на дубинама од 0.2 mm, при чему је регистрована значајна промена тврдоће у површинском слоју до дубине од 0.8 mm. Поред тога је утврђено да се до дубине од 0.45 mm након претходне обраде стругањем могу регистровати напони на притисак који полако прелазе у затежуће напоне како се иде ка већим дубинама, при чему се максимални заостали напони региструју непосредно испод саме површине предмета обраде и износе -450 MPa. Након обраде котрљањем алата по површини предмета обраде се такође региструју напони на притисак при чему је максимална вредност напона од -530 MPa регистрована на дубини од 0.27 mm. Садржај аустенита је и у овом случају значајно смањен, до дубине од 0.6 mm, при чему се најнижи садржај аустенита региструје на дубини од 0.3 mm и износи 60%, док је након претходне обраде стругањем на истој дубини регистровано 90% аустенита.

Иста група аутора је у својим радовима упоредила процеса обраде бомбардовањем сачмом и процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде на узорцима од челика X210Cr12 са аспекта побољшања тврдоће. Утврђено је да након процеса обраде бомбардовањем сачмом, тврдоћа површинског слоја достиже максималну вредност од 800 HV, на дубини око 0.1 mm, док након обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде тврдоћа достиже максималну вредност од 870 HV, на дубини од 0.2 mm. Утврђена је још једна битна разлика: значајно повећање тврдоће површинског слоја се код процеса обраде бомбардовањем сачмом може регистровати до дубине од 0.4 mm, док је код узорака који су обрађени котрљањем куглице по површини предмета обраде повећање тврдоће регистровано до дубине од 0.8 mm.

Поред наведеног, утврђено је да приликом обраде метастабилног аустенитног челика X210Cr12, обрадом котрљањем куглице по површини предмета обраде уз интензивно хлађење коришћењем CO<sub>2</sub>, тврдоћа може додатно да се повећа са иницијалних 870 HV обрадом без хлађења на 950 HV, при чему се хлађењем не утиче на дубину отврднутог слоја, већ се значајна промена тврдоће може регистровати до дубине од 0.8 mm. Применом додатног хлађења се и садржај заосталог аустенита додатно смањује, у просеку, за 5% у односу на узорке код којих је обрада вршена без хлађења.

Gharby и други коаутори [40] су испитивали утицај обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде у облику ваљаних челичних плоча од челика AISI 1010 дебљине 3 mm на микротврдоћу. Површинска микротврдоћа је мерена Rockwell-овом методом утисковањем куглице коришћењем „ArfriR System“ тестера тврдоће. Тврдоћа ваљане површине је 59 HRB ±1 HRB. Варирана су три параметра обраде, т.ј. сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде у распону од 200 N до 600 N, брзина

кретања куглице по површини предмета обраде у распону од  $67 \text{ obr/min}$  до  $401 \text{ obr/min}$  и посмак у распону од  $0.1 \text{ mm/obr}$  до  $0.42 \text{ mm/obr}$ . Резултати указују на то да се површинска микротврдоћа значајно поправља у комбинацији малих брзина и високих сила. При малим брзинама се површинска микротврдоћа повећава са порастом силе. При већим брзинама долази до малих промена површинске микротврдоће са порастом силе. Такође, може се приметити, да се велики пад микротврдоће при великим брзинама може компензовати применом сила мањег интензитета. Комбинацијом малог посмака и мале брзине се добија већа вредност микротврдоће. При малим посмацима, са повећањем брзине долази до пада микротврдоће, док при већим вредностима посмака варирање брзине нема велики утицај на промену микротврдоће. Оптимизацијом су добијени параметри, брзина од  $235 \text{ obr/min}$ , посмак од  $0.18 \text{ mm/obr}$  и сила у распону од  $500 \text{ N}$  -  $600 \text{ N}$ , којима се постижу најбољи резултати са аспекта побољшања микротврдоће.

*El-Taweel* и *El-Axir* [59] су испитивали утицај обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде на узорцима од бронзе, при чему је извршена оптимизација параметара са циљем добијања највиших вредности микротврдоће. Варирани су сила у распону  $50 \text{ N}$  -  $250 \text{ N}$ , брзина кретања куглице по површини предмета обраде у распону  $15.04 \text{ m/min}$  -  $150.33 \text{ m/min}$ , посмак у распону  $0.05 \text{ mm/obr}$  -  $0.25 \text{ mm/obr}$  и број пролаза у распону 1-5. Процењен је процентуални утицај сваког наведеног параметра на крајњи резултат. Утврђено је да је сила најутицајнији параметар са 42.85%, следи посмак са 29.3%, потом брзина са 13.95% и на крају број пролаза са 12.39%. Максимално побољшање микротврдоће је добијено приликом коришћења најнижих вредности брзине, средњим вредностима посмака, највишом вредношћу силе и при највећем броју пролаза.

*Ravindra* и други коаутори [87] су проучавали процес обраде котрљањем ваљка по површини предмета обраде на узорцима од челика EN 8/080M40 (AISI 1040), EN 24/817M40 (AISI 4340) и EN 31 (AISI E52100) са аспекта промене физичко-хемијских карактеристика резултујућег отврднутог слоја. Варирана је дубина утискивања ваљка у предмет обраде и број пролаза. Успостављена је корелација између дубине утискивања ваљка и промене микротврдоће, односно магнитуде заосталих притисних напона у отврднутом слоју. Утврђен је већи пораст микротврдоће код мекшег челика EN 24 у односу на друге два тврђа челика EN 8 и EN 31. Варирањем броја пролаза је утврђено да се најбољи резултати са аспекта побољшања микротврдоће и повећања дебљине отврднутог слоја добијају након првог пролаза. Отврднути слој се код EN 24 применом технике дифракције X-зрака региструје до дубине од  $0.7 \text{ mm}$  испод третиране површине, док се код EN 8 и EN 31 региструје до дубине од  $0.5 \text{ mm}$ .

*Lopez de Lacalle* и други коаутори [98] су испитивали утицај обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде на узорцима од претходно отврднутог нискоугљеничног челика AISI P20 и никлом легираног челика AMS 5596, познатијег као Inconel 718. Обрада котрљањем куглице је вршена након претходне обраде глодањем. Узорци од челика AISI P20 су имали микротврдоћу  $32 \text{ HRC}$  док су узорци од челика Inconel 718 имали микротврдоћу  $41 \text{ HRC}$ . На узорцима од оба материјала је вршена обрада котрљањем куглице при чему је вариран притисак флуида којим се куглица притиска у

површину предмета обраде. Испитивани су случајеви који одговарају силама од 250 *N*, 375 *N* и 500 *N* при чему је дубина продирања куглице у површину предмета обраде у распону 6  $\mu\text{m}$  - 10  $\mu\text{m}$ . Код узорак од AISI P20 је уочен пораст површинске микротврдоће, при сили од 250 *N* резултујућа микротврдоћа је 36 *HRC*, при сили од 375 *N* микротврдоћа је 37 *HRC*, а при сили од 500 *N* микротврдоћа је 38 *HRC*. И код узорак од Incotel 718 је уочен пораст микротврдоће, тако да је за силу од 200 *N* резултујућа микротврдоћа 43.8 *HRC*, за силу од 375 *N* микротврдоћа је 44.6 *HRC*, а при сили од 500 *N* микротврдоћа је 46.5 *HRC*.

*Rajasekariah* и *Vaidyanathan* [68] су изучавали утицај параметара обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде као што су пречник куглице, посмак, сила и иницијална површинска обрада на резултујућу храпавост, микротврдоћу и отпорност на хабање челичних материјала. Закључили су да је сила најутицајнији параметар који утиче на отпорност на хабање површинског слоја и да постоји оптимална вредност силе којом се постижу најбољи резултати.

*Neema* и *Pandey* [69] су на неким челичним шипкама изучавали утицај брзине, посмака, пречника куглице, силе и броја пролаза на отпорност на хабање и на триболошке карактеристике. Утврдили су да се обрадом котрљањем куглице по површини предмета обраде долази до побољшања отпорности на хабање.

*Anantha Ram* и *Krishnamurthy* [89] су разматрали утицај брзине, посмака, врсте мазива, иницијалне површинске храпавости и других аспеката на интегритет резултујуће површине. Испитиван је челик са 0.22% угљеника. Закључили су да постоји значајан пораст отпорности на хабање предмета обраде обрађених котрљањем алата по површини предмета обраде у односу на брушене предмете обраде.

*Niberg* [90] је открио да се обрадом вођица од перлитног ливеног гвожђа котрљањем ваљка по површини предмета обраде повећава њихова отпорност на хабање. Утврђено је да отврднути слој са повећаном отпорношћу на хабање постоји до дубине 0.15 *mm* - 0.2 *mm* испод површине.

*Hassan* [79] је вршио испитивања на бронзаним предметима обраде и закључио да се применом обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде побољшава отпорност на хабање. Такође је утврђено да се повећањем силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде и броја пролаза алата до одређених граница повећава отпорност на хабање бронзаних компоненти.

*Shin* и остали коаутори [94] су испитивали осцилације силе трења које су проузроковане корозијом на кочионим дисковима који су обрађени котрљањем куглице по површини предмета обраде. Разматрани су кочиони дискови од сивог лива и нискоугљеничних челика. Тестови који су извршени коришћењем коморе у којој су симулирани атмосферски услови којима су изложени дискови су показали да већ након 2 *h* почиње да се појављује иницијална корозија. Након тога, поновљени су тестови у комори при чему су дискови изложени воденој пари и температури која је нижа од амбијенталне за 5°C и мерени су оксидациони слојеви који су се формирали на површини дискова. Добијени оксидациони слој код диска од сивог лива је дебљине 50  $\mu\text{m}$  - 60  $\mu\text{m}$  док је код

нискоугљеничног челика скоро дупло дебљи. Закључили су да корозиона отпорност дискова зависи од материјала диска и дебљине отврднутог слоја добијеног након обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде.

*Bezhenov* и други коаутори [81] су проучавали механизам отврдњавања површинских слојева угљеничних челика са садржајем угљеника од 0.2%, 0.4% и 0.7%, при чему је површински слој изложен интензивној пластичној деформацији. Након излагања површинског слоја интензивној пластичној деформацији вршени су тестови заморне чврстоће коришћењем пулзатора. Утврђено је да се са порастом садржаја угљеника у челику повећава заморна чврстоћа. Тако је заморна чврстоћа челика са 0.4% угљеника повећана за 24% у односу на челик са 0.2% угљеника док је заморна чврстоћа повећана за 40% код челика са 0.7% угљеника у односу на челик са 0.2% угљеника.

*Belozherov* и други коаутори [95] су истраживали утицај обраде котрљањем ваљака по површини предмета обраде од челика 30KhGSN2A (GOST 4543-71) на заморну чврстоћу. Упоређене су вредности заморне чврстоће на необрађеним узорцима и узорцима који су обрађени са једним пролазом и два пролаза. Закључено је да се заморна чврстоћа узорака обрађеног једним пролазом, у односу на необрађени узорак, повећава за 60%. Утврђено је да се повећањем броја пролаза не утиче на даље побољшање заморне чврстоће.

*Gharby* и други коаутори [72] су проучавали утицај обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде на алуминијумским хладно ваљаним лимовима од 1050A (AA 1050) дебљине 3 mm, затезне чврстоће 121.24 MPa и напона на граници течења од 109.6 MPa. Извршена је оптимизација параметара обраде са циљем побољшања дуктилности епрувета које су након обраде тестиране затезањем на кидалици. Утврђено је да се може постићи значајно побољшање дуктилности алуминијумских епрувета. Криве ојачања тестираних епрувета су показале да се постиже повећање напона на граници течења и затезне чврстоће повећањем силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде. Најбољи резултати су добијени са највећом примењеном силом, при чему је сила варирана у распону од 50 N - 200 N. У поређењу са необрађеним узорком побољшање елонгације иде до 48 % када је узорак обрађен са посмаком од 0.1 mm/obr, брзином од 400 obr/min и силом од 200 N. У оптималном случају напон на граници течења је 108.2 MPa, затезна чврстоћа 125.16 MPa а процентуална елонгација је 12.94%. У овом случају узорак обрађен котрљањем куглице се добро истеже а пластичност се повећала. Разлог повећања вредности напона на граници течења и затезне чврстоће може бити уклањање микропукотина на ивицама епрувете или може бити последица побољшања завршне обраде којом се значајно смањују недостаци површинског слоја због којих настају иницијалне микропукотине. И у овом случају је уочена промена заосталих притисних напона до дубине отврднутог слоја од 0.35 mm. У поређењу са необрађеним епруветама код којих притисни напони прелазе у затежуће већ на дубини од 50  $\mu$ m, код обрађених епрувета постоје притисни напони до дубине од 0.35 mm при чему своје максималне вредности достижу на дубини од 50  $\mu$ m при обради силом од 100 N, односно на дубини од 110  $\mu$ m при обради силом од 200 N.

*Akkurt* [91, 92] је проучавао утицај завршне обраде отвора котрљањем ваљака по површини предмета обраде од аустенитних нерђајућих AISI 304 и алатних D3 челика са 2% угљеника и 11% хрома на цилиндричност и упоредио је резултате са другим врстама завршне обраде отвора. Испитујући цилиндричност отвора предмета обраде од AISI 304 и упоређујући различите врсте обрада, као што су стругање, бушење, брушење и хоновање, дошао је до закључка да се обрадом котрљањем ваљака по површини предмета обраде и хоновањем постижу најбољи резултати, с тим да је испитивањем микроструктуре отвореног слоја утврдио да је површина обрађена котрљањем ваљака по површини отвора униформнија односно хомогенија у односу на површину добијену након хоновања. Оптимизацијом параметара обраде је утврђено да сила којом се ваљак притиска о површину отвора има највећи утицај на квалитет резултујуће површине и да се прекорачењем одређене вредности силе на површини појављују дефекти. Испитујући цилиндричност отвора у алатном D3 челику утврђено је да је најутуцајнији параметар број пролаза, односно да се са повећањем броја пролаза погоршава цилиндричност. Оптимални резултати се добијају за вредност силе којом се ваљак притиска о површину отвора од 300 N.

*El-Taweel* и *Ebeid* [93] су представили хибридни процес завршне обраде којим се комбинује електро-хемијско полирање и обрада котрљањем ваљака по површини предмета обраде од легуре алуминијума Al-Zn-Mg. Ова легура се широко користи у авио-индустрији и није могућа завршна обрада брушењем. Извршена је оптимизација параметара обраде са циљем добијања најмање грешке кружности отвора. Варирањем силе, при чему су број обртаја и посмак били константни и износили су 700 *obr/min* односно 0.3 mm, утврђено је да се минималне вредности грешке кружности добијају у распону силе од 400 N - 500 N. Варирањем броја обртаја у распону од 300 *obr/min* - 1100 *obr/min* при чему је сила константна је утврђено да се повећањем броја обртаја побољшава кружност.

*Shreehah* [102] је вршио испитивања процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде са циљем добијања најмање грешке кружности осовине од бронзе CuZn39Pb2. Упоредени су резултати узорка који су обрађени на стругу и узорка обрађених на стругу па потом обрадом котрљањем куглице. Обрада на стругу је вршена при брзини од 840 *obr/min*, посмаком од 0.1 mm/*obr* и дубином резања од 0.5 mm. Обрада котрљањем је вршена куглицом пречника 18 mm, а параметри обраде су варирани са три различите вредности, сила од 150 N, 300 N и 450 N, броја обртаја 45 *m/min*, 60 *m/min* и 75 *m/min*, посмака 0.05 mm/*obr*, 0.1 mm/*obr* и 0.15 mm/*obr* и 2, 3 и 4 броја пролаза. Анализирајући узорке са инструментом за мерење кружности дошло се до закључка да је код свих узорка грешка кружности око 8  $\mu\text{m}$ . Супротно од претходних примера, закључено је да се процесом обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде не поправља грешка облика, односно грешка кружности, већ се само умањују површинске несавршености и побољшавају механичке карактеристике.

*Ibrahima* и други коаутори [105] су вршили испитивање процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде са циљем добијања мање грешке кружности и побољшања површинске храпавости. Разматран је утицај силе, брзине и посмака на

грешку кружности. Експериментални резултати су искоришћени као база за припрему модела применом фази логике (енг. *fuzzy logic model*) којим би се управљало параметрима обраде.

Већ је раније поменуто да се процес обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде може користити за обраду отвора, међутим у релевантној литератури постоји веома мало радова који се баве овом обрадом. Радови који се баве обрадом отвора котрљањем алата по површини предмета обраде се углавном односе на обраду котрљањем ваљака по површини предмета обраде [91, 92, 106-108]. Веома мали број радова се односи на обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде.

*El-Axir* и други коаутори [53] су користили *RSM (Response Surface Methodology)* како би поједноставили план експеримената без губитка прецизности резултата. Презентован је математички модел којим се може предвидети пет различитих параметара профила храпавости у зависности од параметара процеса обраде котрљањем куглице по површини отвора. *El-Axir* и други коаутори [62] су конструисали алат за обраду котрљањем куглице по површини отвора. Утврђен је утицај параметара процеса обраде на кружност обрађеног отвора и површинску микротврдоћу предмета обраде од легуре алуминијума.

*Bouzid* и други коаутори [75] су испитивали површинску храпавост AISI 1042 челика обрађеног претходним обрадама стругањем и брушењем па потом обрадом котрљањем куглице по површини предмета обраде. Узорци који су претходно обрађени стругањем са параметрима обраде: брзина резања  $200 \text{ m/min}$ , посмак  $0.06 \text{ mm/obr}$ , дубина резања  $0.5 \text{ mm}$  су имали вредност средњег аритметичког одступања профила од средње линије профила  $R_a = 0.96 \mu\text{m}$ . Након стругања је извршена обрада котрљањем куглице са параметрима: сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде  $150 \text{ N}$ , брзина  $100 \text{ m/min}$ , посмак у распону од  $0.1 \text{ mm/obr}$  -  $0.28 \text{ mm/obr}$  и један пролаз.  $R_a$  се након обраде, у зависности од промене посмака, креће у границама од  $0.2 \mu\text{m}$ , за посмак  $0.1 \text{ mm/obr}$ , до  $0.9 \mu\text{m}$ , за посмак  $0.28 \text{ mm/obr}$ . Смањење храпавости се у овом случају може објаснити чињеницом да су, за мале вредности посмака, раздаљине између сукцесивних трагова куглице и висине пресечне тачке између два сукцесивна трага куглице мале због чега куглица има више шанси да изглача неравнине. Узорци који су претходно брушени са параметрима обраде: брзина резања  $35 \text{ m/s}$  и дубина резања  $0.1 \text{ mm}$  су имали вредност  $R_a = 0.73 \mu\text{m}$ . Након брушења извршена је обрада котрљањем куглице са истим параметрима као и након претходне обраде стругањем.  $R_a$  се након обраде, у зависности од промене посмака, креће у границама од  $0.2 \mu\text{m}$ , за посмак  $0.1 \text{ mm/obr}$ , до  $0.55 \mu\text{m}$ , за посмак  $0.28 \text{ mm/obr}$ .

У свом другом раду [43], група аутора је вршила испитивања површинске храпавости предмета обраде од нерђајућег челика са истим планом експеримента и добијени су слични резултати. Закључено је да иницијална површинска храпавост има утицаја на резултујућу површинску храпавост обрађене површине. Сходно томе, обрада котрљањем куглице по површини предмета обраде даје боље резултате са аспекта побољшања површинске храпавости када јој претходи обрада брушењем у односу на претходну обраду стругањем.



*Nemat* и *Lyons* [60] су испитивали површинску храпавост узорака од меког челика A113 (ASTM) и алуминијума AA 6463 који су претходно обрађени стругањем па потом котрљањем куглице по површини предмета обраде. Иницијална храпавост узорака од меког челика након стругања је  $R_a = 2.8 \mu m$ , а узорака од алуминијума  $R_a = 2.1 \mu m$ . Разматран је појединачни утицај параметара обраде на површинску храпавост. Варирани су сила у распону  $1 kgf - 50 kgf$  (10-500 N), брзина у распону  $5 m/min - 42 m/min$ , посмак у распону  $0.05 mm/obr - 0.22 mm/obr$  и број пролаза у распону од 1 до 7. Разматран је утицај броја пролаза и закључено је да се до четвртог пролаза храпавост смањује а након тога погоршава, односно површински слојеви почињу да се љуште. На узорцима од меког челика минимална вредност храпавост се постиже након четвртог пролаза и износи  $R_a = 0.4 \mu m$  док се код узорака од алуминијума минимална вредност храпавости постиже након другог пролаза и износи  $R_a = 0.3 \mu m$ . Разматрајући утицај посмака на резултујућу храпавост може се закључити да се са најнижим вредностима посмака добијају најниже резултујуће храпавости. За узорке од меког челика за вредност посмака од  $0.1 mm/obr$  добија се  $R_a = 0.6 \mu m$  а за узорке од алуминијума  $R_a = 0.4 \mu m$ . Порастом силе до оптималне вредности од  $5 kgf$  за узорке од алуминијума се добија  $R_a = 0.4 \mu m$ , док је за узорке од меког челика оптимална вредност силе  $28 kgf$ , а резултујућа површинска храпавост је  $R_a = 0.75 \mu m$ , Повећањем силе изнад оптималних вредности нема даљег побољшања храпавости, већ долази до погоршања. Наиме када се сила повећа изнад оптималне вредности, нагомилани метал испред предње стране алата је превелики и регион пластичне деформације се шири па се оштећује претходно обрађена површина, што повећава резултујућу површинску храпавост. Површинска храпавост опада са повећањем брзине до постизања оптималне вредности, око  $20 m/min$  за меки челик, око  $30 m/min$  за алуминијум, након чега се површинска храпавост поново повећава. Закључак је да се оптимизацијом параметара обраде процеса обраде котрљањем по површини предмета обраде површинска храпавост узорака од алуминијума AA 6463 и меког челика A 113 може побољшати до 70%.

*Lin* и други коаутори [41] су извршили оптимизацију обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде са подмазивањем при чему је циљ побољшање површинске храпавости. Претходна обрада челичних шипки од AISI 1045, пречника  $60 mm$ , вршена је на стругу. Примећено је да комбинације различитих параметара обраде имају веома сличне крајње резултате. Уведен је нови параметар - фактор обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде  $l_b$  и утврђено је да постоји квадратна крива зависности између тог параметра и резултујуће површинске храпавости. Фактор  $l_b$  се рачуна по емпиријском изразу и зависи од тврдоће предмета обраде, максималног контактеног притиска између алата и предмета обраде, релативне брзине кретања алата и предмета обраде, корекционог фактора граничног слоја мазива, динамичке вискозности мазива и константе која зависи од карактеристике адитива у мазиву. Релација која успоставља зависност између резултујуће површинске храпавости и фактора обраде  $l_b$  је облика:

$$h_{rapavost} = A \cdot f(l_b) \quad (2.5.1)$$

где је А константа која зависи од посмака, иницијалне површинске храпавости предмета обраде и храпавости површине куглице.

Овим концептом је приближно објашњен феномен по коме се са различитим вредностима контактнoг притиска могу добити површине приближно исте храпавости. Поред тога, утврђено је да постоји критична вредност фактора  $l_b$  испод које долази до појаве адхезионих спојева, односно адхезионог хабања. Изнад критичне вредности фактора  $l_b$  долази до незнатног побољшања површинске храпавости. Овакав концепт оптимизације параметара обраде омогућава повећање флексибилности процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде.

*Gharby* и други коаутори [40] су поред испитивања микротврдоће резултујућег отврдног слоја, о чему је већ било говора, у истом раду вршили испитивање утицаја обраде котрљањем куглице на резултујућу површинску храпавост челичних плоча од AISI 1010. Варирана су три параметра обраде тј. сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде у распону од 200 N до 600 N, брзина кретања куглице по површини предмета обраде у распону од 67 *obr/min* до 401 *obr/min* и посмак у распону од 0.1 *mm/obr* до 0.42 *mm/obr*. Добијене су криве зависности резултујуће површинске храпавости у зависности од сваког параметра обраде посебно при различитим вредностима друга два параметра. Из добијених кривих се може извући закључак да је оптимална брзина у распону 151 *obr/min* - 319 *obr/min*, а да је при брзини од 235 *obr/min* површинска храпавост независна од посмака. Испод вредности брзине од 235 *obr/min* вредност  $R_a$  расте док изнад те вредности брзине опада  $R_a$ . Разматрањем утицаја силе утврђено је да се оптималне вредности  $R_a$  добијају када је сила у опсегу 400 N - 500 N. На основу резултата експеримената оптимизован је процес обраде при чему параметри обраде имају следеће вредности: сила 400 N, брзина 235 *obr/min* и посмак 0.18 *mm/obr*.

*Shreehah* [102] је поред испитивања утицаја обраде котрљањем куглице на грешку облика испитивао утицај параметара обраде на резултујућу површинску храпавост. Анализирајући утицај силе, закључио је да се на бронзаним узорцима најнижа вредност  $R_a$  добија када се примени најнижа вредност силе, односно сила од 150 N. Анализирајући утицај посмака, дошао је до закључка да се најнижа вредност  $R_a$  добија за најмање вредности посмака, у овом случају 0.05 *mm/obr*. Исти закључак је изведен посматрањем утицаја брзине. Посматрајући утицај броја пролаза, закључио је да се најниже вредности  $R_a$  добијају након четвртог пролаза.

Поред свега наведеног *Gharby* и остали коаутори [40, 72] су развили математички модел другог реда којим се са довољном прецизношћу могу предвидети параметри храпавости и микротврдоће резултујуће површине. Математички модел је верификован коришћењем података који су добијени помоћу *AFM*-а (енг. *Atomic Force Microscope*).

*Bougharriou* и остали коаутори [96] су развили аналитички модел за предвиђање параметара храпавости након обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде. Резултати добијени коришћењем аналитичког модела и експериментални резултати се у доброј мери поклапају са тим да се аналитичким моделом добијају нешто ниже вредности параметра  $R_a$ . Ову појаву су оправдали појавом еластичног повратног ефекта (енг. *springback*).

*Bouzid* и други коаутори [75] су такође развили математички модел за предвиђање параметара храпавости резултујуће површине. По том моделу резултантна површинска

храпавост зависи од иницијалне површинске храпавости, посмака и дубине утискивања куглице у материјал предмета обраде.

Многи аутори [57, 65, 91, 92, 97] су упоређивали процесе обраде котрљањем по површини предмета обраде са другим процесима завршне обраде као што су брушење, бомбардовање сачмом итд.

Генерално постоји велики број радова у којима се обрађује процес обраде котрљањем алата по површини предмета обраде цилиндричног облика и малих равних површина, док обрада великих равних површина није у потпуности истражена, пре свега због потребе извођења великог броја експеримената који истовремено захтевају веома много времена. Са тим у вези се примењују већ развијене технике помоћу којих се може лимитирати број експеримената и истовремено се могу добити поуздани резултати.

Једна од техника којом се могу добити поуздани резултати са релативно малим бројем експеримената је *Taguchi* техника [40, 59, 77, 78]. Код *Taguchi* технике се параметри процеса, који утичу на финалне резултате, деле у две групе: контролне факторе и факторе шума [99]. Контролни фактори се користе за бирање најбољих услова за стабилност завршног процеса, док фактори шума означавају све факторе који узрокују варијације. *Taguchi* је предложио прикупљање карактеристичних података коришћењем ортогоналног низа и анализирање измерених перформанси из података како би се одлучило који су оптимални параметри процеса. Овом методом се користи специјално дизајнирани ортогонални низ за изучавање целог опсега параметара са малим бројем експеримената. Поред тога може се користити и RSM (енг. *Response Surface Methodology*). RSM је системска метода која користи утицајне факторе процеса са циљем унапређења и оптимизације процеса. Коришћењем ове методе у комбинацији са *Taguchi* техником, *Gharby* [40] је извршио оптимизацију параметара процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде.

У литератури се могу пронаћи подаци о хибридним процесима обраде код којих се обрада котрљањем алата по површини предмета обраде комбинује са другим врстама обрада. Тако нпр. постоји комбинација обраде котрљањем куглице са електрохемијским полирањем [77], електроерозионом обрадом [78] или обрада котрљањем ваљка са електрохемијским полирањем [93, 100, 101] итд.

*Sayashi* и остали коаутори [83] су извршили дводимензионално (2D) и тродимензионално (3D) моделирање процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде користећи методу коначних елемената (*FEM* – енг. *Finite Element Method*) са циљем предвиђања заосталих напона. При томе је коришћен комерцијални софтвер за нелинеарну анализу *ABAQUS*. Добијени резултати су упоређени са експерименталним резултатима. Дводимензионални *FE* модел је развијен тако да не одговара у потпуности реалном стању обраде зато што се процес обраде симулира у три корака. У првом кораку врши се оптерећење куглице до постизања жељене вредности силе, потом се у другом кораку врши растерећење куглице, а у трећем кораку се врши померање куглице за вредност посмака након чега се цео процес понавља. Резултати који се односе на заостале напоне добијени симулацијама са 2D *FE* моделом се не поклапају са резултатима добијеним експериментима. Постоје веома велика неслагања

по дубини (разматрано је до дубине од 1 mm) посматраног слоја испод површине предмета обраде, па тако на дубини од 0,1 mm има разлику од 500 MPa, што је највећа разлика, док најмању разлику има на дубинама од 0,3 mm до 1 mm и она приближно износи 300 MPa. 3D FE модел процеса обраду симулира у два корака при чему се у првом врши оптерећење куглице док се не достигне жељена вредност силе, а у другом се куглица креће по унапред одређеној путањи. Резултати који се добијају такође не одговарају резултатима добијеним експериментима али је приметно знатно мање одступање у односу на 2D FE модел. Дуж целе посматране дубине постоји максимална разлика напона од 300 MPa на дубинама од 0,2 mm и 0,5 mm док је на свим осталим дубинама разлика знатно мања и не прелази 200 MPa.

Bougharriou и други коаутори [96] су извршили 2D FE моделирање процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде од челика AISI 1042. При томе су користили FE софтвер ZEBULON. Разматрали су профил храпавости обрађене површине, заостале напоне и утицај параметара обраде (дубину пенетрације куглице у предмет обраде, посмак, полупречник куглице и иницијалну храпавост), а након тога су извршили поређење са експерименталним резултатима. Симулација процеса обраде је показала да је  $R_a$  површине, која је иницијално стругана и има иницијалну вредност  $R_a = 1.33 \mu m$ , након обраде  $R_a = 0.32 \mu m$ . Резултати FE симулација су показали да се заостали притисни напони могу регистровати до дубине од 0.6 mm, при чему своје максималне вредности, око 600 MPa, достижу на површини предмета обраде. Симулације са посмаком од 0.065 mm/obr и брзином од 105 m/min, при чему је варирана дубина пенетрације куглице у предмет обраде, показују да параметар храпавости  $R_a$  опада до оптималне вредности дубине пенетрације куглице па потом почиње да расте. Дубина пенетрације куглице при којој се добијају најниже вредности  $R_a$  је 7  $\mu m$ . Резултати симулација показују да на вредност заосталих напона утиче дубина продирања куглице у предмет обраде, односно да се са повећањем дубине пенетрације куглице повећава и вредност заосталих напона. Симулације које су вршене са варирањем посмака показују да се вредности параметара храпавости повећавају са порастом вредности посмака. Поред тога, утврђено је да посмак има веома мали утицај на величине заосталих притисних напона. Варирањем пречника куглице је показано да вредности параметара храпавости опадају са повећањем пречника куглице до одређене вредности пречника, а потом, са даљим повећањем пречника, постоји веома мали пораст параметара храпавости и на крају стабилизација, односно параметри храпавости се не мењају са даљим повећањем пречника куглице. Оптимални пречник куглице је 9 mm. Утврђено је да постоји извесно преклапање између резултата добијених експерименталним испитивањем и резултата добијеним коришћењем 2D FE модела, али се резултати симулација не могу користити за прецизно предвиђање вредности параметара храпавости и заосталих напона.

Nicoletti и остали коаутори [103] су вршили анализу заосталих напона након обраде процесом котрљањем ваљка по површини предмета обраде, коришћењем методе коначних елемената. При томе је нумерички нелинеарни проблем решаван коришћењем Newton-Raphson методе. С обзиром да у раду није детаљније објашњен начин на који је процес моделиран и да нису дати подаци о вредностима заосталих напона може се само

закључити, на основу тврдњи аутора, да се коришћењем оваквог модела могу прецизно одредити заостали напони.

*Bouzid* и *Sai* [104] су развили два *FE* модела контакта куглице и предмета обраде. Први модел претпоставља да су куглица и предмет обраде еластични, а други претпоставља да је куглица круто тело а предмет обраде има еластопластична својства. Разматран је утицај обраде на површинску храпавост. Резултати добијени коришћењем *FE* модела су експериментално верификовани. На основу аналитичког модела је извршено предвиђање карактеристика храпавости резултујуће површине. Коришћењем *Hertz*-ове теорије контакта је израчуната дубина пенетрације куглице у предмет обраде за силу од  $150\text{ N}$  и она износи  $5,2\ \mu\text{m}$ . Коришћењем еластичног *FE* модела се добија  $3,69\ \mu\text{m}$ , а коришћењем пластичног *FE* модела  $4,49\ \mu\text{m}$ . Експериментални резултати се налазе између резултата добијених аналитички и резултата добијених помоћу пластичног *FE* модела.

*Balland* и остали коаутори [109] су детаљно проучавали механику процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде коришћењем *3D* нумеричких модела. У складу са експерименталним опсервацијама су објаснили механизам формирања и течења неравнина. Овај феномен има веома важну улогу приликом деформисања површине. Чини се да механизам формирања и течења неравнина има централну улогу приликом обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде.

*Balland* и остали коаутори [110] су развили *3D FE* модел обраде котрљањем ваљка по површини предмета обраде коришћењем *ABAQUS* софтвера. Предвиђања помоћу овог модела су упоредива са експерименталним мерењима. Разматрано је геометријско стање површина, резултати нумеричких експеримената се у знатној мери поклапају са експерименталним мерењима. Резултати показују да ефекти обраде котрљањем ваљка по површини предмета обраде зависе од комплексне интеракције саме обраде котрљањем ваљка по површини предмета обраде и машинске обраде која јој претходи. Закључено је да су параметри, као што су дубина пенетрације ваљка у површину предмета обраде и посмак, есенцијални за управљањем храпавошћу финалне површине.

## 2.6. Критички осврт на литературне изворе

Из литературних извора се може извући заједнички закључак који: сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде је најутицајнији параметар који одређује површинску храпавост, тврдоћу, дубину отврднутог слоја као и да ли ће током обраде доћи до оштећења третиране површине (љуштење површинских слојева). У већини објављених радова који се баве проблематиком оптимизације процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде се вредност силе варира у распону од  $0\text{ N}$  -  $400\text{ N}$ . Међутим, оптимална вредност силе зависи од физичко-хемијских карактеристика материјала предмета обраде. Уколико се третира један челик, оптимална вредност силе ће се разликовати у односу на неки други. Ако се узме у обзир да се у индустријској пракси користи веома велики број различитих материјала и да сваки од

тих материјала има другачије карактеристике, онда би то могло да представља велики недостатак за ширу примену овакве врсте обраде. У том случају је неопходна велика база података са подацима о оптималним вредностима силе за сваки материјал појединачно. Међутим, вредност силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде није једини параметар овакве врсте обраде што додатно компликује оптимизацију.

Анализом постојећих конструктивних изведби може се закључити да алат за обраду котрљањем по површини предмета обраде и предмет обраде чине еластичан (еласто-пластичан) систем. Независно од начина задавања силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде, било да је реч о калибрисаним опругама или о флуиду под притиском, постоји изванредан ниво осцилација. Извор осцилација представљају опруга, у случају задавања силе калибрисаном опругом, флуид, односно променљиви притисак флуида или стишљивост флуида, као и сама природа контакта куглице и предмета обраде који се остварује преко храпаве површине. Осцилације које постоје у систему имају утицај на резултујућу површину.

Узимајући у обзир комплексност оптимизације процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде, као и да су претходна истраживања углавном вршена са еластичним алатима, једно од могућих решења може бити коришћење алата високе крутости. Коришћењем таквог алата би се могло обезбедити константно продирање алата у неравнине и могла би се дефинисати оптимална вредност дубине продирања куглице у површину предмета обраде која би одговарала оптималним вредностима квалитета обрађене површине.

Претходна истраживања углавном не узимају у обзир технолошко наслеђе. Претпоставка је да се применом алата високе крутости могу постићи бољи ефекти у побољшању квалитета обрађене површине у односу на примењиване алате са калибрисаним опругама или флуидом под притиском. Посебно се знатна процентуална побољшања очекују приликом обраде грубљих површина.

Поред тога, у објављеним истраживањима није детаљније разматран феномен течења материјала на нивоу врхова неравнина, односно није дубље разјашњен феномен промене храпавости обрађене површине.

Већ је поменуто да постоји веома мали број извора који говоре о обради отвора котрљањем куглице по површини предмета обраде. Већина радова обраду отвора углавном третира обрадом котрљањем ваљака по површини предмета обраде. Супротно од тога, један од циљева рада је постизање димензионе и геометријске прецизности отвора коришћењем специјално конструисаног алата високе крутости.

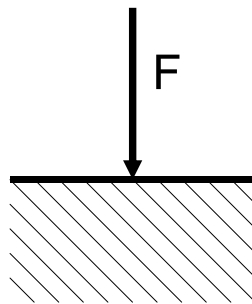
### 3. Теоријске основе процеса завршне обраде заснованог на котрљању крутог алата по површини предмета обраде

У литературним изворима се може пронаћи да су многи аутори развили аналитичке моделе којима се са извесном прецизношћу могу предвидети триболошки параметри резултујуће површине на основу параметара обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде. Такође, многи аутори су коришћењем методе коначних елемената моделирали овај процес обраде. Теоријске основе процеса обраде засноване на котрљању алата по површини предмета обраде се у досадашњим истраживањима заснивају пре свега на четири постојећа класична модела. С тим у вези је у даљем тексту дат преглед класичних модела као и модела који су коришћени у овом истраживању.

#### 3.1. Класични модели процеса завршне обраде заснованог на котрљању алата по површини предмета обраде

У последњих неколико година није било значајног напретка или новина у оквиру теоријских разматрања моделирања процеса завршне обраде заснованог на котрљању алата по површини предмета обраде. С тим у вези аутори релевантних радова презентују овакав процес обраде користећи један од четири класична модела [76]:

1. Модел еластопластичног оптерећења са концентрисаном силом (слика 3.1.1), односно *Bussinesque* проблем. Према овом моделу је могуће израчунати дубину пластично деформисане зоне и силе потребне да би се добила жељена дубина деформисане зоне и та зависност је генерално позната као *Bussinesque*–ово решење. Према овом моделу, дубина до које ће доћи до пластичног деформисања површинског слоја зависи од физичко-хемијских карактеристика материјала и величине примењене силе. Претпоставка је да сила делује у једној тачки и да нема деформисања материјала предмета обраде у околини те тачке.



Слика 3.1.1: Модел еластопластичног оптерећења са концентрисаном силом (*Bussinesque* проблем)

Према овом моделу, сила потребна да би се остварила жељена дебљина отврднутог слоја се рачуна по обрасцу:

$$F_b = \frac{2}{3}\pi R_e g^2 \quad (3.1.1)$$

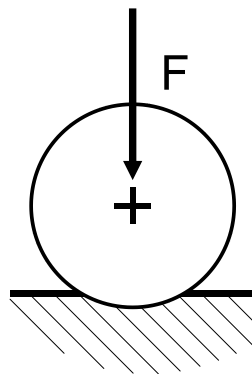
где су:  $F_b$  – сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде,

$R_e$  – константа која зависи од физичко-хемијских карактеристика материјала предмета обраде и

$g$  – дебљина отврднутог слоја.

Дакле, према овом моделу дебљина отврднутог слоја зависи само од физичко-хемијских карактеристика материјала предмета обраде и примењене силе. Међутим, када је намена процеса обраде постизање адекватне храпавости обрађене површине, при чему је дебљина отврднутог слоја реда величине неравнина које постоје на предмету обраде, коришћењем овог модела за израчунавање силе добијају се веома мале вредности које су знатно ниже од оних које су добијене експерименталним истраживањима.

2. Модел деформисања материјала са недеформабилном куглицом, односно *Hertz*-ов модел. Овај модел је модификација претходног модела и узима у обзир чињеницу да се сила којом куглица делује на предмет обраде дистрибуира на одређену површину у околини контакта куглице и предмета обраде. Куглица се посматра као недеформабилно тело док је материјал предмета обраде деформабилан.



Слика 3.1.2: Модел деформисања материјала са недеформабилном куглицом (*Hertz*-ов модел)

Према овом моделу сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде се рачуна према следећем обрасцу:

$$F_b = c R_e g^2 \quad (3.1.2)$$

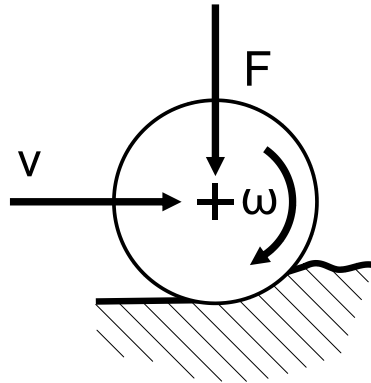
где је  $c$  – експериментална константа.

Овакав модел се веома често и успешно примењује за анализу процеса деформисања када су два тела у контакту. Поред осталог, може се успешно применити када је намена процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде постизање жељене



дебљине отврдног слоја [111, 112]. Коришћењем овог модела, као и у претходном случају, када је намена процеса обраде постизање одговарајуће резултујуће храпавости, добијају се вредности силе које се у многоне разликују од вредности силе која се добија експериментално.

3. Модел деформације материјала куглицом која се котрља по површини обрађене површине. Модел су развили *Papsev* [113] и *Przybylski* [114]. Овакав модел одговара стању које се јавља приликом обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде.



Слика 3.1.3: Модел деформације материјала куглицом која се котрља по површини обрађене површине

Према овом моделу, сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде се рачуна према следећим обрасцима:

$$F_b = 50 + \frac{D^2}{6} \quad (3.1.3)$$

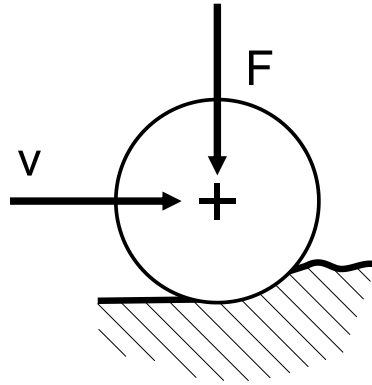
$$F_b = \pi \rho (R \sin \alpha)^2 \quad (3.1.4)$$

где су:  $\rho$  – експериментални коефицијент,

$D$ ,  $R$  и  $\alpha$  – геометријске константе.

Овим моделом су предвиђене две једначине за рачунање силе и уколико се користе обе једначине резултати који се добијају се умногоне разликују. Такође, коришћењем оваквог модела за случај обраде са циљем постизања адекватне резултујуће храпавости добијају се вредности силе које су веће у односу на вредности силе које се добијају експериментално. Још једна примедба везана за овај модел је то што препорукама није дефинисано коју једначину, од две наведене, треба користити и у којим случајевима.

4. Модел деформације материјала куглицом која клиза по површини обрађене површине. Овакав модел одговара стању које се јавља приликом обраде клизањем куглице по површини предмета обраде. Модел су независно развили *Torbilo* [115] и *Korzynsky* [116] и предложено је неколико различитих једначина за одређивање силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде.



Слика 3.1.4: Модел деформације материјала куглицом која клиза по површини предмета обраде

Предложене једначине су следећих облика:

$$F_b = (0.008 \div 0.0013) \left( \frac{DR}{D+R} \right)^2 \quad (3.1.5)$$

$$F_b = 0.0085(HB)R^2 \quad (3.1.6)$$

$$F_b \geq \pi \varepsilon_1 HV \left( \frac{DR}{D+R} \right)^2 \quad (3.1.7)$$

$$F_b = 2 \pi R h q_n \quad (3.1.8)$$

$$F_b = 0.64 \pi \varepsilon HVR^2 \quad (3.1.9)$$

$$F_b = \frac{1}{2} \pi R^2 HB \quad (3.1.10)$$

где су:  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_1$  - експериментални коефицијенти,

$q_n$ ,  $HB$ ,  $HV$  – карактеристике материјала предмета обраде и

$D$ ,  $R$ ,  $h$  – геометријске константе.

Коришћењем оваквог модела, код кога је предложен велики број различитих једначина, долази до забуне јер се применом различитих једначина добијају различите вредности тражене силе. На пример, применом једначине 3.1.10 се добијају вредности силе које су девет пута веће од вредности силе које се добијају једначином 3.1.5. И за овај модел нису дате препоруке које се односе на одабир одговарајуће једначине.

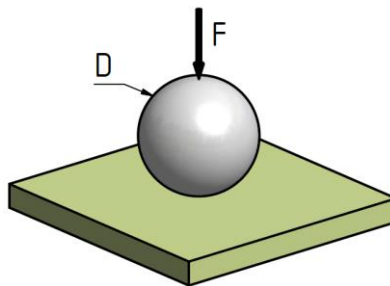
Сви презентовани модели описују зависност између дубине пластично деформисаног слоја и силе којом се делује на површину и карактеристика материјала предмета обраде. У сваком од њих постоје експериментални коефицијенти који их чине бескорисним у условима који се разликују у односу на оне у којима су одређени коефицијенти. У пракси је показано да се оптимални параметри обраде добијени коришћењем ових модела умногоме разликују у односу на оне који су добијени експериментално. Такође, ови модели, с обзиром да у сваком од њих фигурише дебљина пластично отврднутог слоја, одговарају процесу обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде са циљем

добиања отврдног површинског слоја. У друга два случаја овакви модели нису адекватни. Веома је важно поменути да ниједан од представљених модела не узима у обзир стање површине пре обраде, тј. не узима у обзир иницијалне вредности хрпавости површина које се обрађују. Велики број истраживача и велики број анализа показују да иницијално стање површине има значајну улогу у одређивању резултујуће површинске хрпавости након обраде [116-119].

### 3.2. Узајамни притисак сфере и равне површине – *Hertz*-ов притисак

Године 1881. немачки физичар *Hertz* је дао решење проблема узајамног притиска два еластична тела ограничена сферном или цилиндричном површином пречника  $D_1$  и  $D_2$  у близини додирне тачке [120]. Услед узајамног притиска тела околина додирне тачке ће се деформисати и међусобни додир се проширује на малу површину у околини додирне тачке. У случају сферних површина додирна површина је ограничена кругом полупречника  $\rho_k$ , а у случају цилиндричних површина додирна површина је ограничена правоугаоником странице  $\rho_k$ .

Током обраде котрљањем куглице по површини призматичног предмета обраде, теоријски посматрано, контакт између куглице и предмета обраде се може представити као узајамни притисак сфере и равне површине (Слика 3.2.1).



Слика 3.2.1: Узајамни притисак сфере и равне површине

Уколико посматрамо случај са слике 3.2.1, онда је полупречник додирног круга:

$$\rho_k = 0.721 \sqrt[3]{FD(k_1 + k_2)} \quad (3.2.1)$$

где су:  $F$  – сила којом се сфера притиска о равну површину,

$D$  – пречник сфере и

$k_1, k_2$  – коефицијенти који зависе од материјала сфере и равне површине и рачунају се по обрасцу:

$$k_i = \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} \quad (3.2.2)$$

где су:  $\mu_i$  – *Poisson*-ови коефицијенти материјала сфере и равне површине и

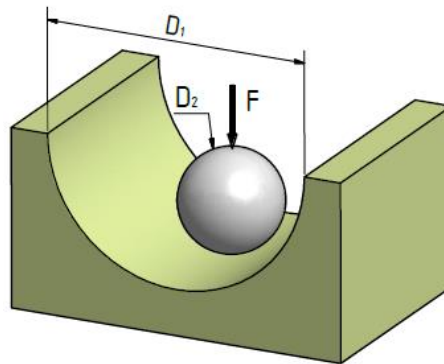
$E_i$  – модули еластичности материјала сфере и равне површине.

Уколико је  $\rho_k$  позната величина, онда се једноставним коришћењем Питагорине теореме може одредити колика је дубина пенетрације сфере, односно куглице, у равну површину, односно у материјал предмета обраде  $z$ . При томе се уводи једна апроксимација која се односи на сферу. Претпоставља се да не долази до еластичне деформације сфере, или је она веома мала, па се може занемарити обзиром на то да је материјал сфере знатно тврђи од материјала равне површине.

Даље се на основу *Hertz*-ових образаца може израчунати контактни притисак:

$$p_o = 0.918 \sqrt[3]{\frac{F}{D^2(k_1 + k_2)^2}} \quad (3.2.3)$$

По аналогији са овим случајем теоријски посматрано обрада отвора котрљањем куглице по његовој површини се може представити као узајамни притисак између сфере и цилиндра (Слика 3.2.2).



Слика 3.2.2: Узајамни притисак сфере и цилиндра

У случају са слике 3.2.2 полупречник додирног круга је:

$$\rho_k = 0.721 \sqrt[3]{Fv(k_1 + k_2)^2} \quad (3.2.4)$$

где је  $v$  геометријски коефицијент који зависи од пречника цилиндра  $D_1$  и сфере  $D_2$  и рачуна се као:

$$v = \frac{D_1 \cdot D_2}{(D_1 - D_2)} \quad (3.2.5)$$

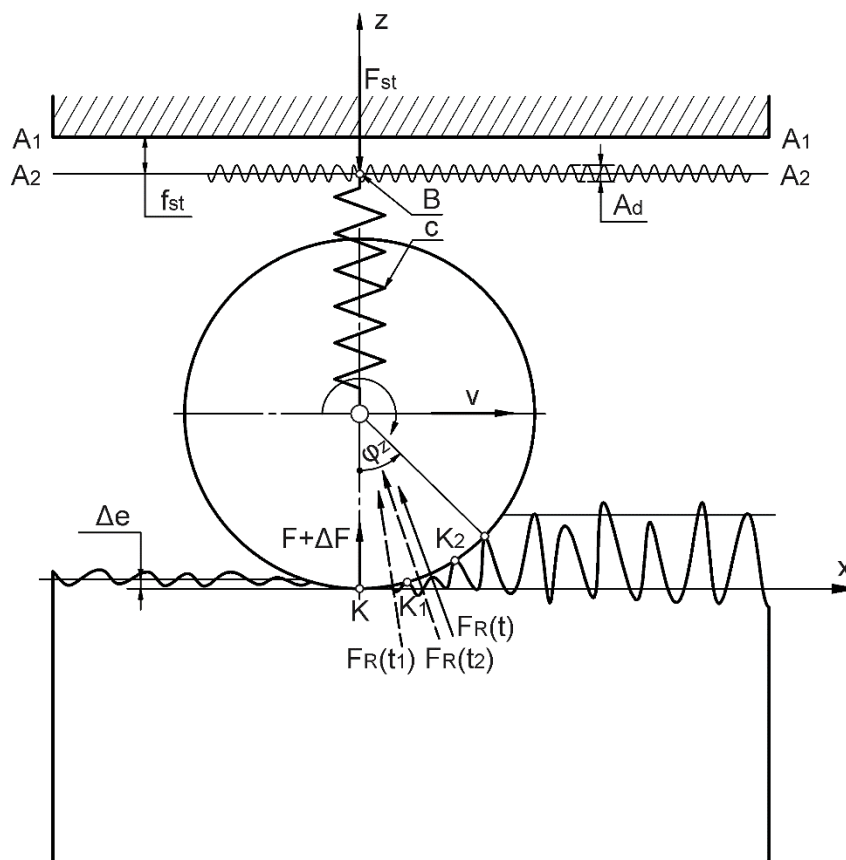
У овом случају се контактни притисак рачуна по следећем обрасцу:

$$p_o = 0.918 \sqrt[3]{\frac{F}{v^2(k_1 + k_2)^2}} \quad (3.2.6)$$

### 3.3. Теоријска анализа процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде приликом коришћења еластичних алата

У било ком процесу обраде, поред параметара који дефинишу режиме обраде и остале услове обраде (стање машине, стезни прибор, подмазивање и др.), једну од кључних улога има алат којим се изводи процес обраде. Истраживања у области обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде треба усмерити у правцу анализе динамичког понашања алата са којим се процес обраде изводи. Ово се односи посебно на случајеве код којих се обрада изводи великим брзинама, на пример при обради котрљањем куглице по површини предмета обраде која се изводи на стругу. У анализираној литератури нема података о алатима који би омогућили да се у теоријском смислу дубље анализира динамичко понашање алата у датим условима обраде. На пример, подаци о крутости опруга преко којих се обезбеђује сила или подаци о притиску флуида и варијације притиска флуида који обезбеђује силу којом се остварује притисак између куглице и предмета обраде нису познати.

Међутим, треба нагласити да је теоријски веома тешко моделирати динамичко понашање алата у условима обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде. Посебно ако се има у виду да се процес највећим делом обавља по неравнинама и да је дисперзија побудних сила које делују на алат у суштини непозната као и да се ради о померањима алата у дубину неравнина микроскопских вредности.



Слика 3.3.1: Шема алата у захвату током процеса обраде

Предстојеће теоријско разматрање [84] има за циљ да глобално укаже на величине које су везане за алат а које су утицајне на излазне ефекте процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде. Разматра се обрада равне површине са релативно малим брзинама померања алата. На слици 3.3.1 је приказана шема алата у захвату током обраде.

Сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде се остварује преко опруге крутости  $c$ . Да би се остварила сила  $F$  опруга се пре почетка процеса обраде сабија за вредност статичког угиба  $f_{st}$  из референтног положаја  $A_1A_1$  у положај  $A_2A_2$ . Контакт куглице са материјалом предмета обраде током кретања дуж осе  $x$  почиње по врховима неравнина, на пример, у тачкама  $K_1$  и  $K_2$ , дуж угла захвата куглице  $\varphi_z$ . Због стохастичке природе неравнина мења се величина угла захвата  $\varphi_z$  и резултујући отпор  $F_R$  који у тренуцима времена  $t_1$  и  $t_2$  има вредности  $F_{R(t_1)}$  и  $F_{R(t_2)}$ . Ова варијација отпора изазваће осциловање краја опруге (тачка В) у односу на референтни положај  $A_2A_2$  за неку вредност  $f_d$ . Настале осцилације опруге у одређеном делу се морају одразити на квалитет обрађене површине (средње аритметичко одступање профила, валовитост површине и друге параметре храпавости). У вези са претходно наведеним се може написати једначина:

$$F \pm \Delta F = c(f_{st} \pm f_d) \quad (3.3.1)$$

из које следи:

$$f_d = \pm \frac{\Delta F}{c} \quad (3.3.2)$$

где су:  $\pm \Delta F$  – интервал варијације силе и

$f_d$  – померање алата (куглице) у правцу  $z$  осе услед силе  $\pm \Delta F$ .

Посматрајући слику 3.3.1 може се претпоставити да је:

$$f_d \approx \frac{A_d}{2} \quad (3.3.3)$$

Коришћењем претходних једначина се може показати да побудна сила од свега  $\Delta F=0.01N$  и код опруга крутости  $10^4 N/m$  изазива сабијање опруге у износу од  $1\mu m$ , што је значајна вредност када је у питању храпавост при завршној обради котрљањем куглице по површини предмета обраде. Побудна сила од  $\Delta F=0.01 N$  је извесна због саме стохастичке природе претходно обрађене површине, као и због грешака саме машине (засори на осам), грешке облика куглице и грешака осталих делова алата и стезног прибора. На основу претходног разматрања произлази да са аспекта квалитета обрађене површине и прецизности израде потребну силу треба остваривати са опругама високе крутости што ће позитивно утицати на смањење висина неравнина резултујуће површине.

Ова теоријска разматрања нису узела у обзир инерцијалне силе и силе пригушења из следећих разлога:

- Разматра се обрада равне површине на нумеричкој глодалици. Обрада се изводи при брзини радног стола машине од  $2000 \text{ mm/min}$ . На основу прелиминарних експеримената је одређено да је валовитост површине реда величине, корак вала  $S_v \approx 1 \text{ mm}$ , а висина вала  $H_v \approx 0.6 \text{ }\mu\text{m}$ . Ако се претпостави да куглица врши осциловање по валовима неравнина, на основу брзине кретања радног стола машине и корака вала неравнина произлази да фреквенција осциловања куглице износи приближно  $f = 33.3 \text{ s}^{-1}$ , а угаона брзина осциловања приближно  $\omega = 209 \text{ s}^{-1}$ .
- Маса куглице која је коришћена у прелиминарним експериментима је свега  $m = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ N}$ . На основу вредности масе, амплитуде осциловања (висина вала неравнина) и угаоне брзине произлази приближна вредност инерцијалне силе и она износи:

$$F_{in} = m \frac{H_v}{2} \omega^2 = 3.3 \cdot 10^{-7} \text{ N} \quad (3.3.4)$$

при чему је претпостављено кретање куглице по валовима неравнина према закону синусне функције помоћу које се у основи може симулирати валовитост површине.

- Сила пригушења је једнака производу коефицијента пригушења и брзине осциловања куглице, односно:

$$F_p = b \frac{H_v}{2} \omega = 6,18 \cdot 10^{-5} \cdot b \quad (3.3.5)$$

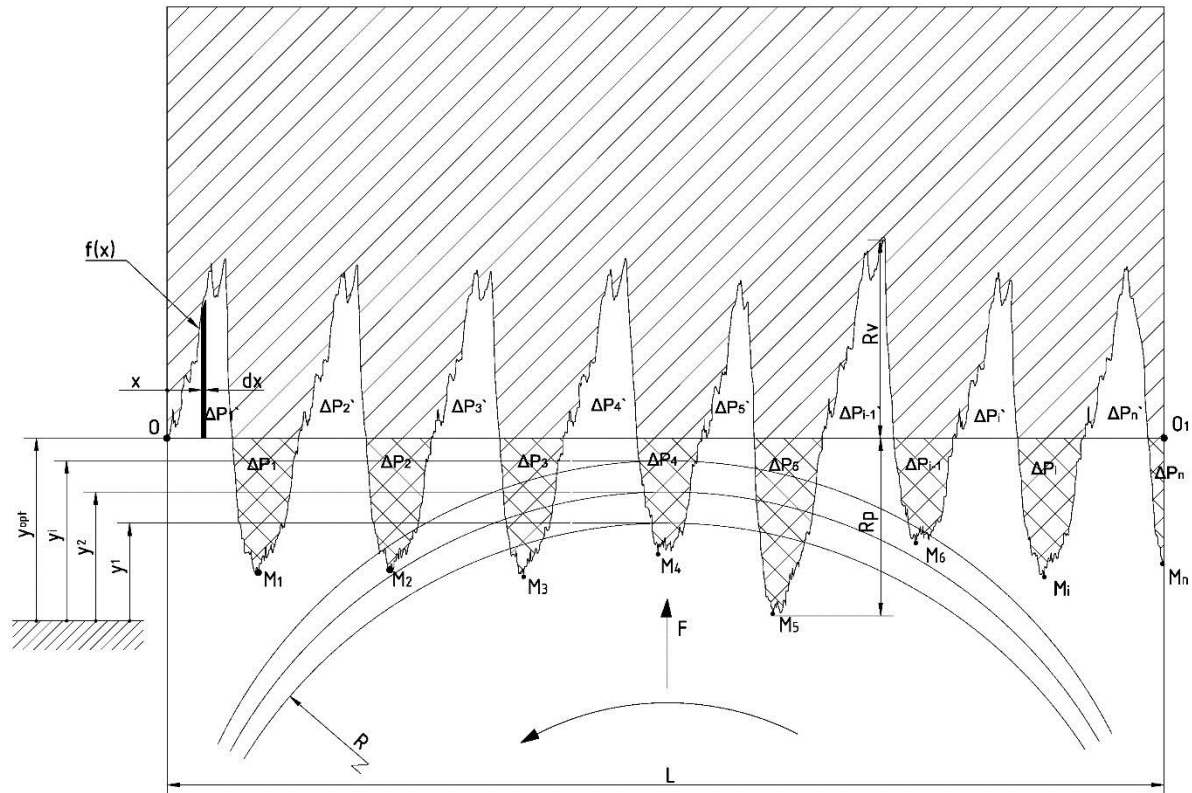
где је:  $b$  – коефицијент пригушења.

С обзиром на вредности коефицијента пригушења [121, 122], може се закључити да је и сила пригушења нижег реда величине у односу на еластичну силу опруге која се јавља при реалним вредностима побуде куглице.

На основу ових теоријских разматрања закључено је да се коришћењем алата високе крутости могу постићи повољнији резултати са аспекта побољшања површинске храпавости.

#### **3.4. Теоријска анализа процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде приликом коришћења алата високе крутости**

Разматра се процес обраде котрљањем куглице по површини цилиндричног предмета обраде, односно котрљање куглице по неравнинама претходно обрађене површине (слика 3.4.1). Обрада се изводи алатом високе крутости и одређене величине пречника куглице [85].



Слика 3.4.1: Шематски приказ процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде заснованог на крутом систему алата

У зависности од величине радијуса куглице, корака неравнина и облика неравнина контакт куглице са предметом обраде започиње по једном или више врхова неравнина. Према слици 3.4.1 контакт се остварује у околини тачака  $M_1, M_2 \dots M_n$ . Током продирања куглице у дубину профила по равнима које су паралелне оси  $OO_1$  контактна површина између куглице и неравнина се повећава. За задату вредност померања алата  $y_i$  у дубину неравнина од неке референтне тачке на алату или машини важи неједначина:

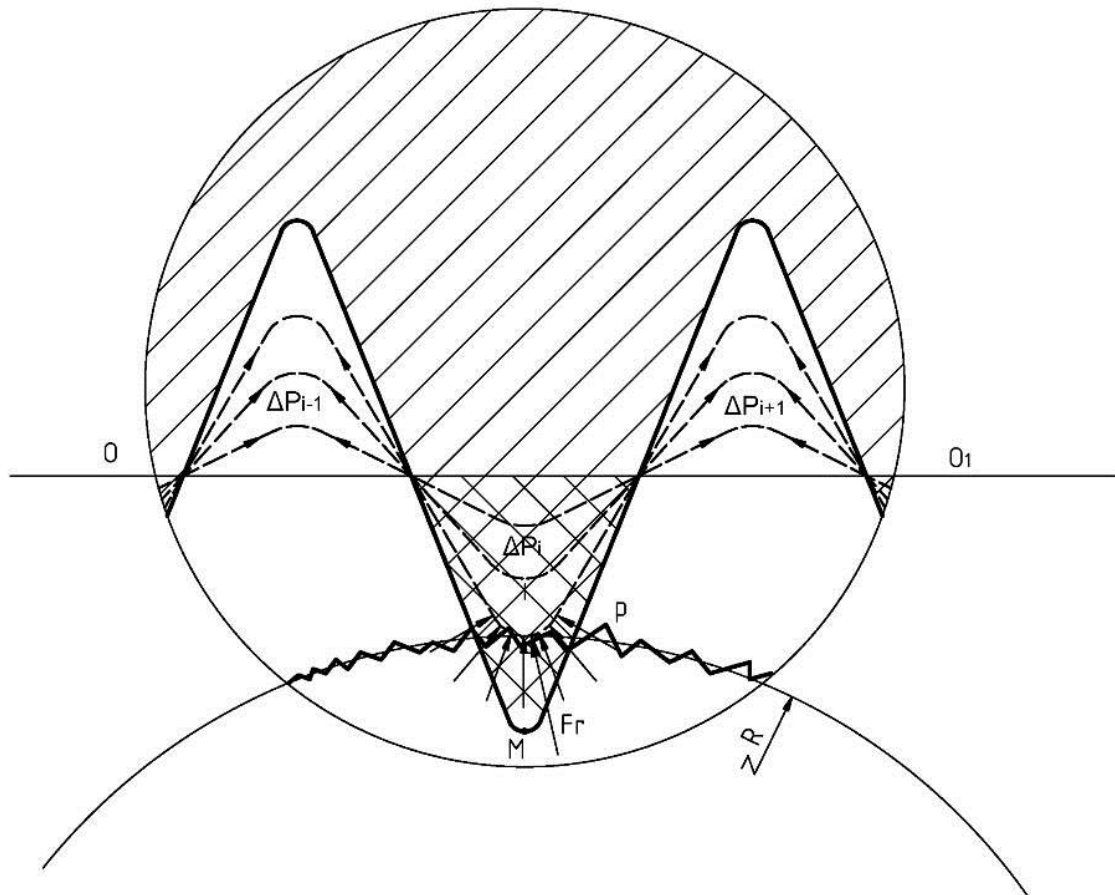
$$F(y_i) \geq F(y_{i-1}) \geq F(y_2) \geq F(y_1) \quad (3.4.1)$$

где су:  $F(y_i), F(y_{i-1}), F(y_2)$  и  $F(y_1)$  – вредности силе које одговарају померању алата за координате  $y_i, y_{i-1}, y_2$  и  $y_1$ .

Уколико се жели постићи максимални могући квалитет обрађене површине онда се логично намеће питање до које вредности координате померања алата  $y_{opt}$  алат треба да продре у дубину неравнина.

Један од могућих модела течења материјала у зони контакта током процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде је дат на слици 3.4.2. Услед високих вредности контактних притисака који превазилазе напон на граници течења материјала предмета обраде, долази до течења материјала врхова неравнина који попуњава удубљења у профилу.





Слика 3.4.2: Зона контакта и претпостављени правци течења материјала

Са повећањем вредности координате продирања алата  $y$  у дубину профила се повећава и степен попуњености удубљења профила. Претпоставља се да величина продирања алата треба да буде одређена на основу снимљеног профила храпавости претходно обрађене површине, односно да треба да се задовољи услов:

$$y \approx R_p \quad (3.4.2)$$

где је:  $R_p$  – максимална висина испупчења профила претходно обрађене површине.

Као последица овог услова се може поставити приближна једнакост површина:

$$\sum_{i=1}^{i=n} P_{vi} \cong \sum_{i=1}^{i=n} P_{pi} \quad (3.4.3)$$

где су:  $P_{vi}$  – површина  $i$ -тог удубљења у односу на средњу линију профила и

$P_{pi}$  – површина  $i$ -тог испупчења у односу на средњу линију профила

Једначина 3.4.3 се може написати као:

$$\int_0^L f(x)dx \Big|_{f(x)<0} \cong \int_0^L f(x)dx \Big|_{f(x)>0} \quad (3.4.4)$$

Јасно је да крива профила претходно обрађене површине нема аналитичку функцију  $f(x)$ . Међутим сви савремени уређаји за мерење храпавости дају низове нумеричких вредности на бази којих се, коришћењем одговарајућег програмског пакета (*software*), може проверити услов о приближној једнакости површина испупчења и удубљења профила храпавости. Претпоставка према којој се приближно максимални квалитет обрађене површине постиже према услову да продирање алата треба да буде до дубине максималног испупчења неравнина  $R_p$  претходно обрађене површине, што приближно испуњава услов о једнакости површина испупчења и удубљења профила, базира се на следећим чињеницама:

- Материјалу који тече низ испупчења на профилу треба обезбедити одређени простор у који ће се сместити (слика 3.4.2). Услов о једнакости површина испупчења и удубљења профила теоријски омогућава истовремено смањење висине испупчења  $R_p$  и висине (односно дубине) удубљења  $R_v$ .
- Када се алат, односно куглица, помери у односу на неки референтни положај на алату или машини према дубини профила за величину  $u_{opt}$ , материјал који тече са испупчења профила испуњава удубљења профила и неће стварати значајна додатна испупчења на профилу.
- Течење материјала испупчења профила се највероватније, у највећој мери одвија у виду ширења и скраћења испупчења. Ова тврдња се образлаже претпоставком да резултујућа контактна сила сабијања материјала испупчења, због великог односа радијуса куглице и реално малих вредности корака претходне обраде, вероватно има правац приближно нормалан на средњу линију профила (слика 3.4.2). С тим у вези је реално, без обзира на стохастичку димензију профила претходно обрађене површине, очекивати да ће предложена метода обраде, базирана на крутом систему алата, у односу на алате који функционишу на принципу константне силе, дати веће ефекте по питању квалитета обрађене површине. Алата који функционишу по принципу константне силе (алата са опружним механизмом), због променљиве вредности отпора материјала предмета обраде, осцилују значајно око праве линије, што само по себи генерише нове неравнине и валовитост профила.



$$z(t) = R_i \cos \varphi(t) \quad (3.5.3)$$

где су:  $R_i$  - полупречник  $i$ -тог зуба глодала и

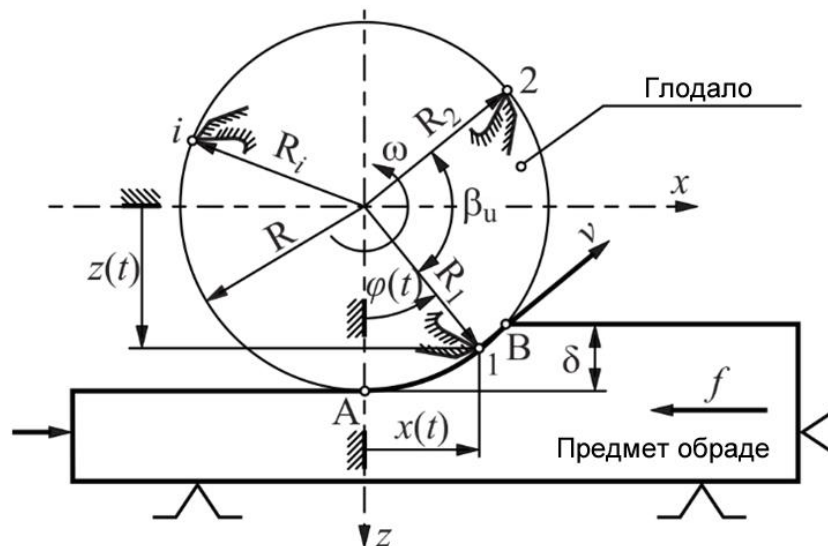
$f$  - брзина помоћног кретања.

Након замене  $\varphi(t)$  из једначине 3.5.1 у једначине координата положаја врха резног зуба глодала 3.5.2 и 3.5.3 добија се следеће:

$$x(t) = R_i \sin \omega t + ft \quad (3.5.4)$$

$$z(t) = R_i \cos \omega t \quad (3.5.5)$$

Реалне производне услове обраде глодањем карактеришу одређена радијална одступања појединих зуба глодала која су последица грешака израде и оштрења глодала као и одступања кинематске и геометријске осе глодала. У таквим условима обраде положај зуба глодала је одређен различитим радијус вектором  $R_i$  и углом  $\beta_u$  (слика 3.5.2).



Слика 3.5.2: Шематски приказ поступка обраде глодањем са алатом који има  $i$  зуба [123]

Координате положаја  $x(t)$  и  $z(t)$   $i$ -тог зуба глодала су одређене изразима:

$$x_i(t) = |R_i| \sin[\omega t + (i - 1)\beta_u] + ft \quad (3.5.6)$$

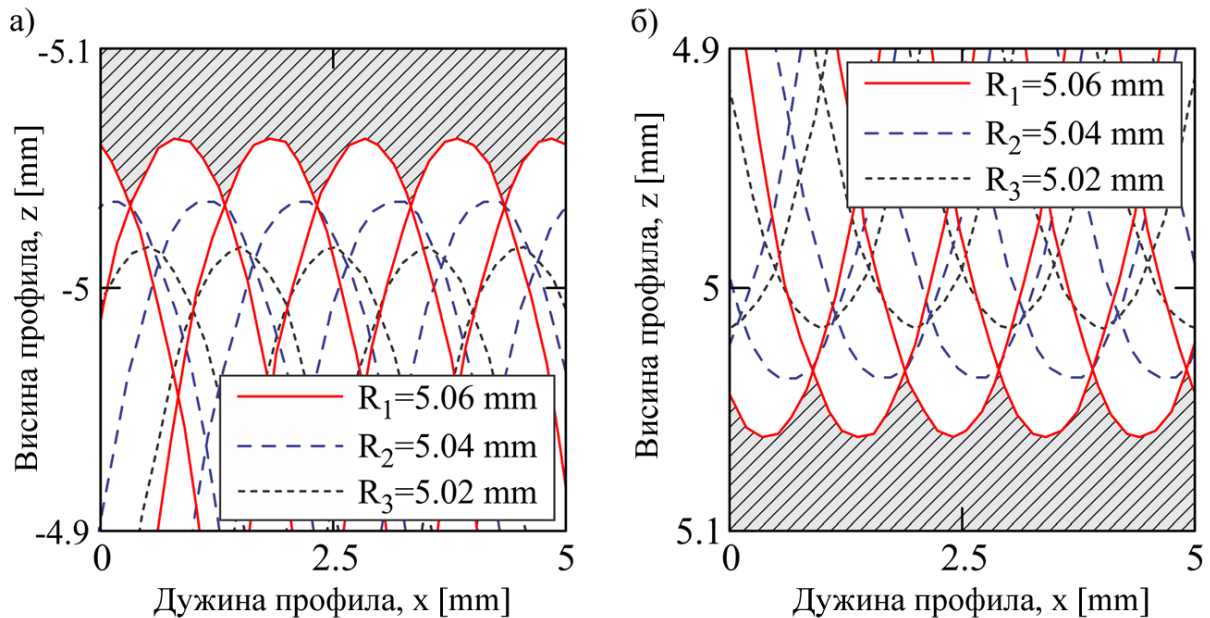
$$z_i(t) = |R_i| \cos[\omega t + (i - 1)\beta_u] \quad (3.5.7)$$

при чему је:

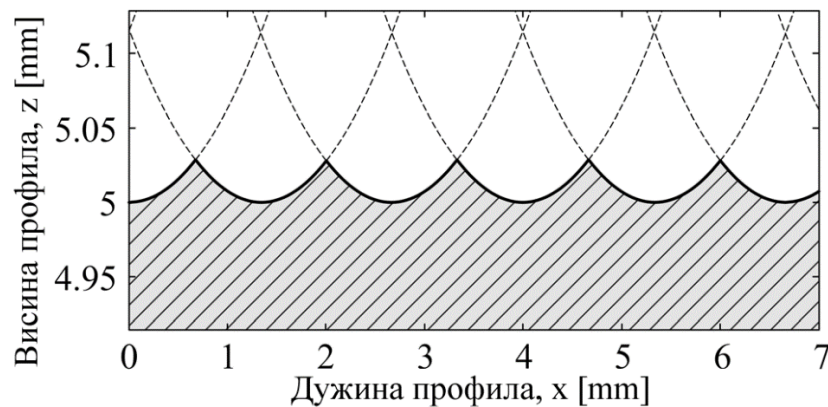
$$\beta_u = \frac{2\pi}{N} \quad (3.5.8)$$

где је:  $N$  – број зуба глодала.

Анализирањем једначина 3.5.6 и 3.5.7 се може закључити да профил обрађене површине формира  $i$ -ти зуб са највећим радијус вектором. Дијаграмски приказ путања зуба глодала при истосмерном и супротносмерном поступку обраде глодањем са параметрима обраде:  $d=10\text{ mm}$  ( $R_i=5\text{ mm}$ );  $v=9.4\text{ m/min}$ ;  $f=200\text{ mm/min}$  и  $N=3$  зуба је приказан на слици 3.5.3.



Слика 3.5.3: Дијаграмски приказ путање зуба глодала и профила обрађене површине при: а) истосмерном и б) супротносмерном поступку обраде глодањем са параметрима:  $d=10\text{ mm}$  ( $R_i=5\text{ mm}$ );  $v=9.4\text{ m/min}$ ;  $f=300\text{ mm/min}$  и  $N=3$  зуба [123]



Слика 3.5.4: Дијаграмски приказ путање  $i$ -тог зуба глодала и профила обрађене површине при истосмерном глодању са параметрима обраде:  $d=10\text{ mm}$ ,  $v=7.1\text{ m/min}$ ,  $f=300\text{ mm/min}$ ,  $z=3$  зуба

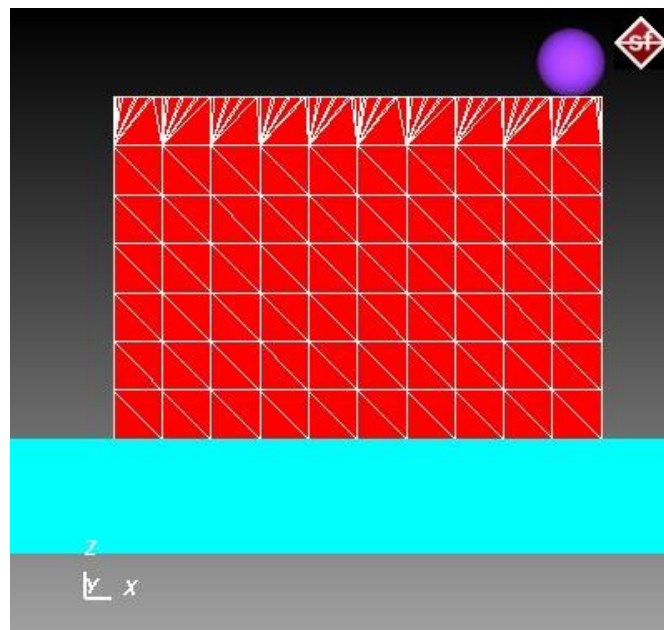
На слици 3.5.4 је приказан профил обрађене површине коју формира  $i$ -ти зуб глодала са највећим радијус вектором, при чему су параметри обраде глодањем:  $d=10\text{ mm}$ ,  $v=7.1\text{ m/min}$ ,  $f=300\text{ mm/min}$ .

Представљени теоријски модел је искоришћен за моделирање профила хрпавости предмета обраде који је коришћен за *FEM* анализу.

За моделирање процеса завршне обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде је коришћен комерцијални софтверски пакет *Simufact.Forming 11.0*. [124]. Овај софтвер је намењен за симулирање индустријских процеса обликовања и покрива цело спектар технологија обликовања. *Simufact.Forming* је базиран на два *solver*-а *MSC.Marc* и *MSC.Dytran*. *MSC.Marc* је намењен за нелинеарну анализу методом коначних елемената док је *MSC.Dytran* намењен за анализу методом коначних запремина (*Finite Volume - FV*). Оба *solver*-а омогућавају приказе комплексних нелинеарних физичких процеса са високом прецизношћу.

Извршена је 2D FE анализа при чему је варирана дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Посматрани теоријски модел храпавости има иницијалну максималну висину неравнина  $R_{max}$  односно  $R_z=35.1 \mu m$ , при чему је  $R_v=12.337 \mu m$ ,  $R_p=22.763 \mu m$  и  $R_a=10.9 \mu m$ . Материјал предмета обраде је алуминијумска легура *EC1350*. Модел којим је симулиран процес се састоји из три елемента (слика 3.5.5 и слика 3.5.6 а)):

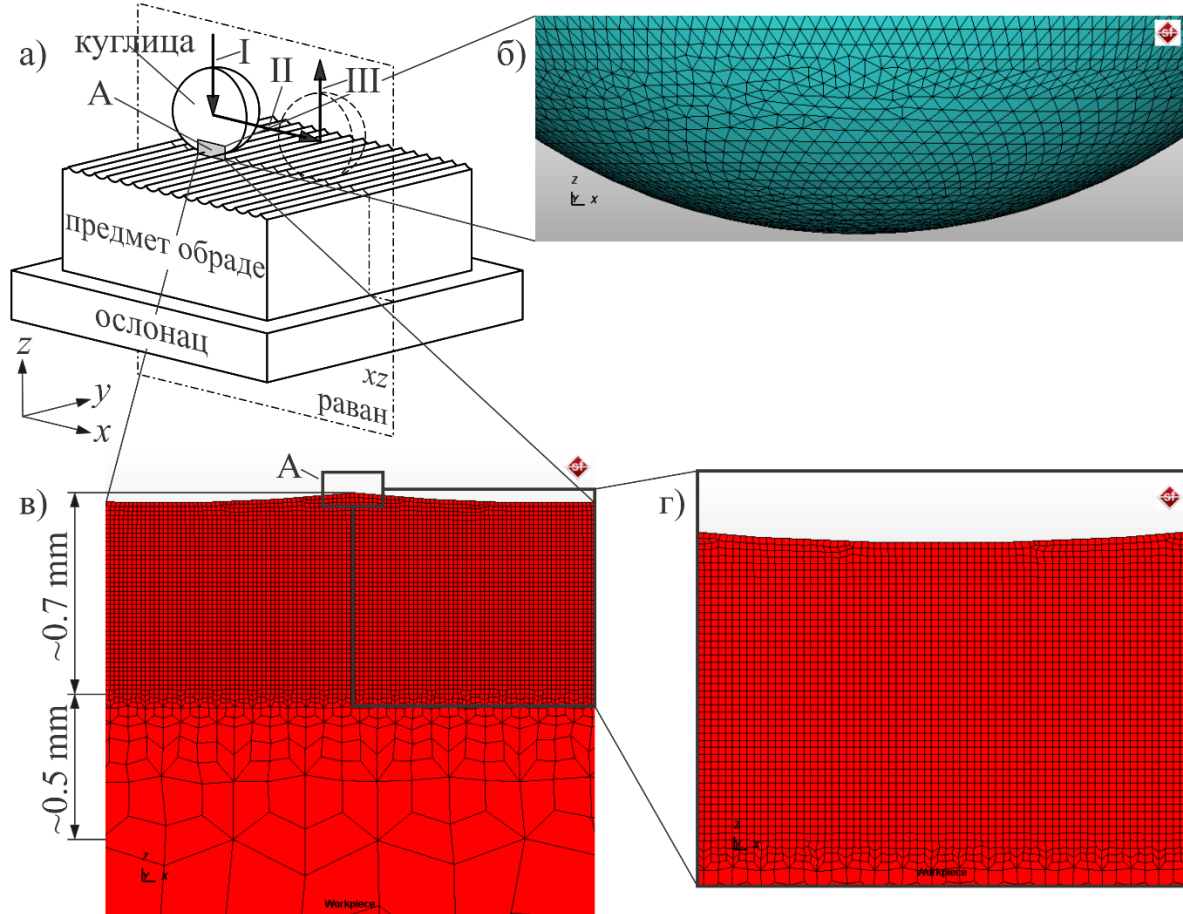
- предмета обраде,
- ослонца на који је постављен предмет обраде који представља радни сто машине и
- куглице која се неометано котрља по површини предмета обраде.



Слика 3.5.5: Модел који је коришћен за 2D FE анализу – *Printscreen* из *Simufact.Forming*

За креирање мреже коначних елемената на предмету обраде је коришћен *Quadtree Mesher* са *Quad(10)* типом коначног елемента. Мрежа коначних елемената се састоји од 107641 коначног елемента, при чему је у зони предмета обраде, која је од есенцијалног интереса, извршено fino уситњавање мреже са ивицом коначног елемента која је приближне величине до  $7 \mu m$ . Зона предмета обраде у којој је извршено fino уситњавање коначних елемената задире у површину предмета обраде приближно

0.7 mm. Испод фино уситњене зоне се налази међузона дебљине приближно 0.5 mm у којој се врши прелаз са фино уситњених коначних елемената до коначних елемената чија је ивица приближно 1 mm. Сви детаљи се могу уочити на слици 3.5.6 в).

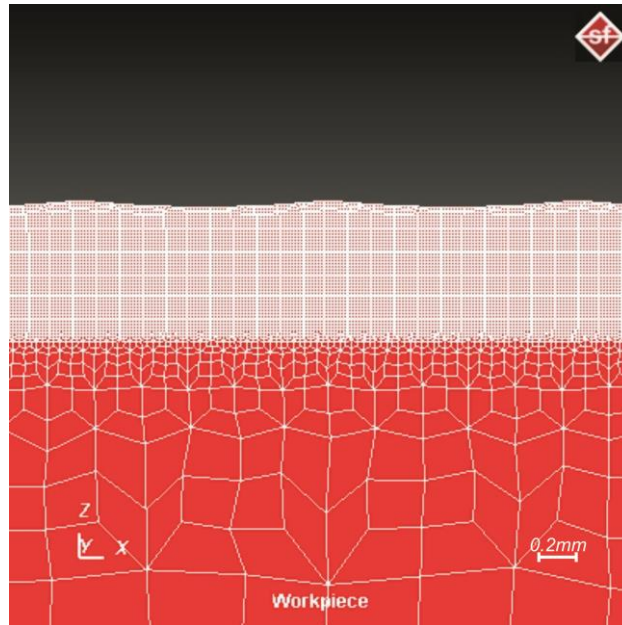


Слика 3.5.6: Шематски приказ модела коришћеног за 2D FE анализу:

- а) тродимензионални приказ модела, б) приказ мреже на куглици, в) приказ мреже коначних елемената на предмету обраде и г) увећани приказ мреже коначних елемената у интересној зони предмета обраде

Профил храпавости се састоји од неколико узастопних неравнина које су истих димензија, као што је приказано на слици 3.5.4. На слици 3.5.7 је приказан изглед профила храпавости са мрежом коначних елемената на предмету обраде на којем се могу уочити три узастопне неравнине. На слици је уочљива разлика у димензијама коначних елемената у интересној зони, односно на самој површини предмета обраде и коначних елемената који се налазе у осталим зонама предмета обраде.

За ослонац на који је постављен предмет обраде као и за сам предмет обраде уводе се гранични услови по којима су сва транслаторна кретања у правцу све три осе координатног система и све ротације око оса координатног система ограничене и износе нула.



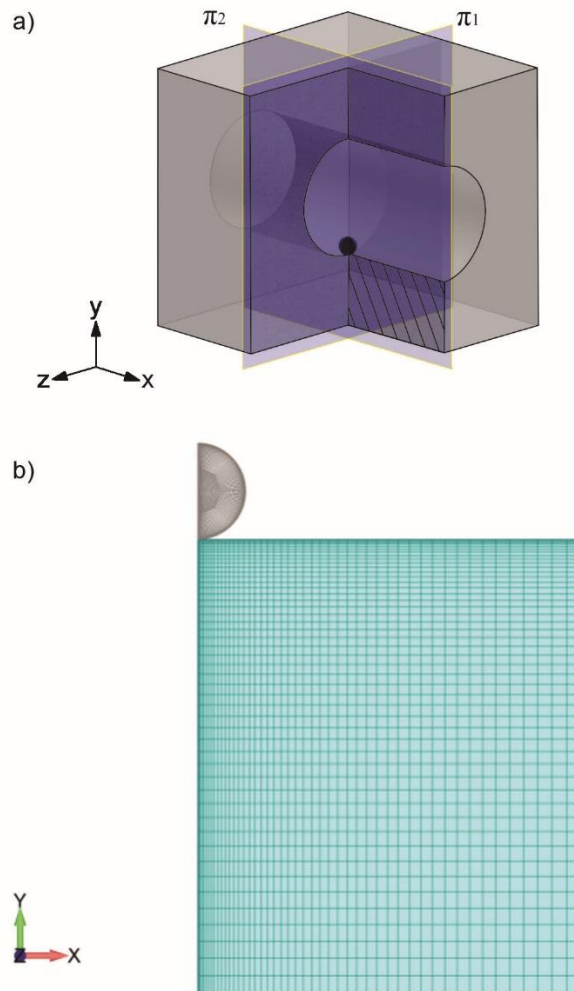
Слика 3.5.7: Профил храпавости са мрежом коначних елемената

Куглица која се при томе користи је пречника  $6\text{ mm}$  (слика 3.5.6 б)). Модел куглице је додатно побољшан опцијом *Surface Remesh* како би се одстраниле иницијалне неправилности које постоје на површини, а последица су несавршене триангулације која се врши приликом извоза *CAD* модела. Као што се и на слици 3.5.6 б) може видети коначна мрежа на куглици је веома глатка. Куглица се приликом извођења нумеричких експеримената сматра апсолутно крутим телом што се и дефинише приликом одабира материјала куглице. Деформација куглице се занемарује с обзиром на то да је материјал куглице у стварним условима обраде знатно тврђи од материјала предмета обраде.

### 3.6 Нумеричко моделирање процеса обраде котрљањем куглице по површини отвора у предмету обраде

Приликом обраде отвора котрљањем куглице по површини предмета обраде се поред уобичајених захтева за постизање оптималне вредности површинске храпавости постављају и други захтеви. У овом случају се жели постићи димензиона и геометријска тачност обрађеног отвора. Ако се то узме у обзир онда је познавање вредности еластичне деформације од круцијалног значаја. С тиме у вези, с обзиром на то да се приликом обраде врши деформисање површинског слоја, веома је важно одредити удео еластичне деформације јер ће у зависности од њене величине доћи до еластичног растеређења након обраде и то ће имати утицај на димензиону и геометријску тачност.





Слика 3.6.1: Модел коришћен за *FE* анализу: а) *3D* приказ и б) карактеристични *2D* пресек са мрежом коначних елемената

Сврха нумеричког моделирања процеса обраде котрљањем куглице по површини отвора у предмету обраде је, у овом случају, одређивање удела еластичних деформација отвора током обраде као и процена напонских стања и заосталих напона током и након обраде.

За процену напонских стања и заосталих напона, као и за процену величине еластичне деформације у предмету обраде током процеса обраде котрљањем куглице по површини отвора, коришћена је метода коначних елемената. При томе је коришћен софтверски пакет за нелинеарну анализу *FEMAP* са *PAK-S solver*-ом [126-128].

Извршена је *2D FE* анализа при чему је варирана дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде у распону од  $0\text{ mm}$  до  $0.1\text{ mm}$  са кораком од  $5\text{ }\mu\text{m}$ . Планирано је да се изведе 20 нумеричких експеримената.

Модел (слика 3.6.1 а)) којим је симулиран процес се састоји од два елемента:

- предмета обраде и
- куглице пречника  $7\text{ mm}$  која се утискује у предмет обраде.

Предмет обраде је призма са отвором у себи (слика 3.6.1 а)). Уочава се попречни пресек предмета обраде и равни  $\pi_1$  који је нормалан у односу на осу симетрије отвора. Потом се разматра попречни пресек предмета обраде и равни  $\pi_2$  који се сматра аксисиметричним моделом чија оса симетрије пролази кроз центар кугле.

Оваква упрошћавања се уведена како би се скратило време неопходно за прорачуне. Уведени су и следећи гранични услови:

- померања на оси симетрије модела у правцу нормалном на осу симетрије модела се сматрају једнаким нули и
- с обзиром да се модел састоји од два елемента тј. нема тела на које се ослања предмет обраде својом доњом страном уведен је гранични услов којим се померања доње странице предмета обраде по у оси једнака нули. На овај начин је избегнуто померање предмета обраде под дејством силе, која се преноси преко куглице, целом својом запремином (с обзиром да се ради о  $2D$  анализи исправније је рећи површином) дуж у осе.

Предмет обраде је подељен на 4500 коначних елемената са 4 чвора и у целом моделу предмета обраде постоје 4672 чвора (слика 3.6.1 б)). При томе је битно напоменути да је величина коначног елемента у зони контакта са куглицом најмања. Ивице паралелопипедног коначног елемента су у зони контакта  $22 \mu m$  и  $26 \mu m$ . Како се даље удаљавамо од зоне контакта повећава се и величина коначних елемената.

Битно је напоменути да се са оваквим моделом не може у потпуности симулирати процес обраде котрљањем куглице по површини отвора због тога што се куглица само утискује у материјал предмета обраде и при томе нема котрљања по површини. Нумеричким експериментима је симулирано продирање куглице до жељене дубине у материјал предмета обраде и након тога је вршено растерећење. На овај начин је могуће одређивање удела еластичне деформације материјала предмета обраде након растерећења.

## **4. Пројектна решења система крутог алата за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде и унутрашњу обраду цилиндричних површина**

У претходним поглављима су приказана нека од решења алата за завршну обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде. Уочено је да се конструктивним решењем мора обезбедити неометано котрљање куглице по површини предмета обраде како би се избегло клизање куглице по третираној површини и могућа појава адхезионих спојева. Са тим у вези је дата подела алата на основу начина којим се то може извести.

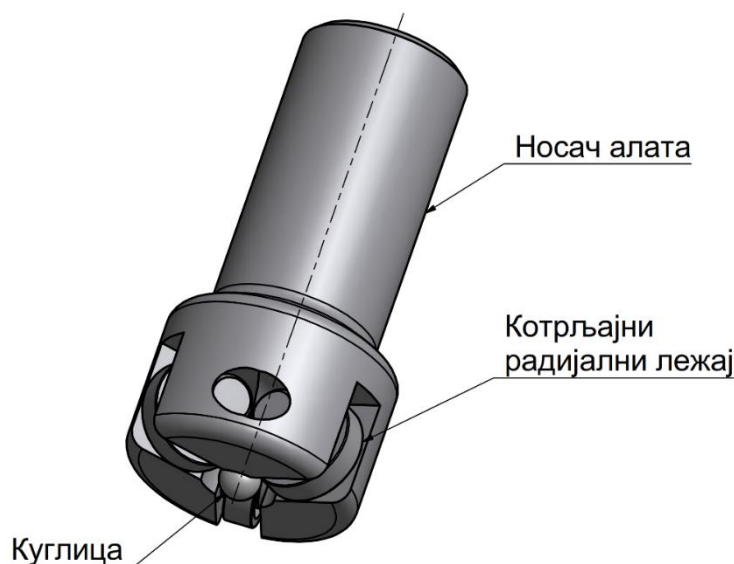
Поред тога, разликује се и начин на који се задаје сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде. Уочено је да се готово сва конструктивна решења, без обзира да ли се користи претходно калибрисана опруга или флуид под притиском, могу сврстати у еластичне алате, односно алате код којих у извесној мери постоји осциловање куглице као последица осциловања опруга, односно осциловање куглице као последица стишљивости флуида под притиском.

На основу теоријских истраживања приказаних у претходном поглављу је закључено да се коришћењем алата за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде високе крутости могу постићи повољнији резултати са аспекта побољшања површинске храпавости. Наведени закључци и претпоставке одредили су и приступ развоју алата високе крутости. За потребе даљих истраживања су конструисана два алата. Први алат је намењен спољашњој обради призматичних и цилиндричних предмета обраде, односно обради равних површина, а други алат је намењен унутрашњој обради цилиндричних површина, односно обради отвора. Поред тога развијена је и модификација алата намењеног за спољашњу обраду призматичних предмета обраде код које постоји калибрисана опруга којом се задаје сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде. Оваква модификација алата је развијена како би се упоредили резултати добијени обрадама коришћењем алата високе крутости и еластичних алата. У даљем тексту у овом поглављу су дати описи свих новоразвијених алата, а у додатку је дата комплетна техничка документација са склопним и радионичким цртежима.

### **4.1. Пројектно решење крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде**

Из наведених разлога приступило се развоју новог алата високе крутости код којег је основна разлика у односу на постојећа конструктивна решења, та што он не функционише по принципу константне силе, као код конструктивних решења са калибрисаним опругама односно флуидом под притиском, већ по принципу константне дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде.

Код оваквог пројектног решења сила која је неопходна за извођење процеса се одређује преко вредности дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде, односно за одређене изабране вредности силе се одређују вредности дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Прорачун силе, односно дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде, може се одредити једноставним коришћењем једначина о узајамном притиску два тела, односно коришћењем једначина о *Hertz*-овом притиску.



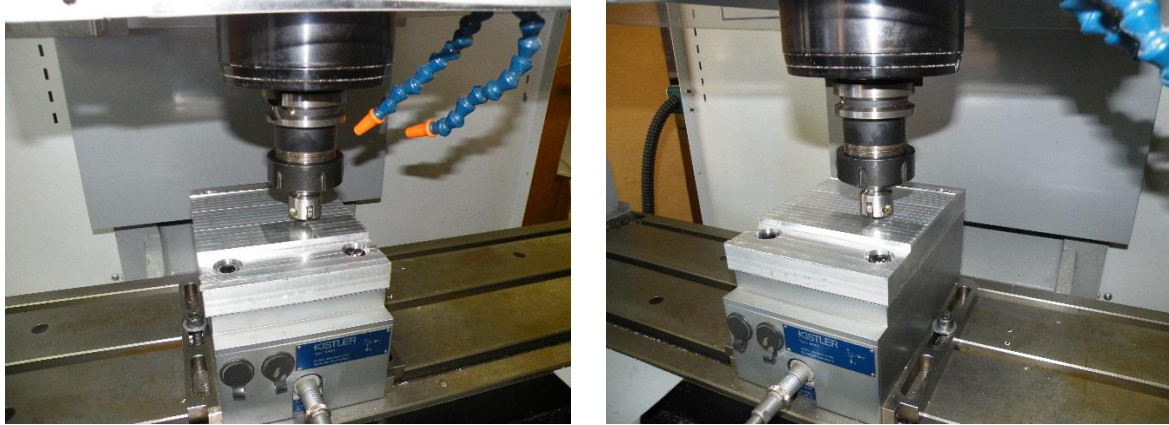
Слика 4.1.1: 3D модел алата намењеног за спољашњу обраду котрљањем куглице по површини призматичних и цилиндричних предмета обраде

На слици 4.1.1 је приказан 3D модел алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде [129]. Као што се и са слике може уочити алат је веома једноставне конструкције и састоји се од четири дела:

- носача алата чија је намена са једне стране прихват лежајева на које се ослања куглица, док се са друге стране монтира у вретениште машине алатке са стезном чауром за прихват пречника 20 mm,
- котрљајних радијалних лежајева,
- осовинице и
- куглица.

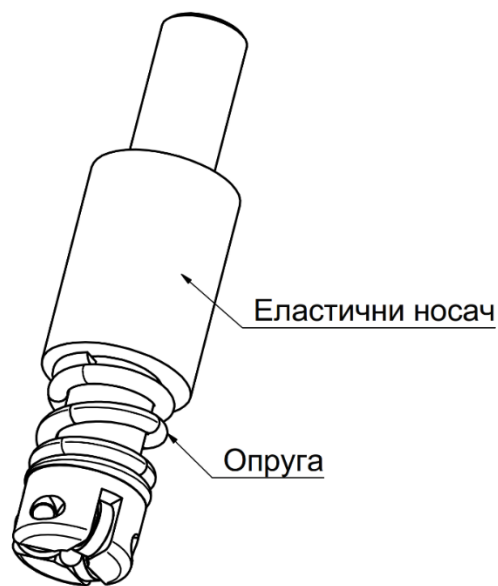
Величина куглице која се може користити је одређена ширином жлебова у које се монтирају котрљајни лежајеви и генерално могу се користити куглице различитих пречника у распону од свега неколико милиметра, приближно 5 mm, па до 15 mm.

Крутост алата је одређена величином деформација које настају у контакту куглице и три радијална лежаја која су распоређена под углом од 120° у односу на правац продирања куглице у материјал предмета обраде. Оваквим концептом алата са ослањањем куглице у три тачке се обезбеђује потпуно котрљање куглице у  $xu$  равни. Радијални лежајеви су смештени у заједнички носач чије се деформације могу занемарити. На овај начин укупна попустљивост система алата се своди на деформације настале у зонама контакта куглице и спољашњих прстенова радијалних лежајева. На слици 4.1.2. је фотографски приказ алата у захвату.



Слика 4.1.2: Приказ алата током процеса завршне обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде

На слици 4.1.3 је приказана модификована верзија алата намењеног за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде. Ова верзија алата је осмишљена како би се показала разлика између крајњих резултата са аспекта побољшања параметара храпавости који се постижу коришћењем алата високе крутости и алата који у себи имају калибрисану опругу.



Слика 4.1.3: 3D модел модификованог алата са опругом намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде

Модификована верзија алата је по конструкцији готово иста као и претходна, с тим да код модификоване верзије постоје два додатна елемента и то:

- еластични носач и
- опруга.

Еластични носач у овом случају има улогу коју у претходној верзији има носач алата и он је са једне стране држач који се монтира у вретениште машине алатке са стезном

чауром за прихват пречника  $20\text{ mm}$ , а са друге стране на њега се ослањају носач алата и опруга која га потискује.



а)



б)

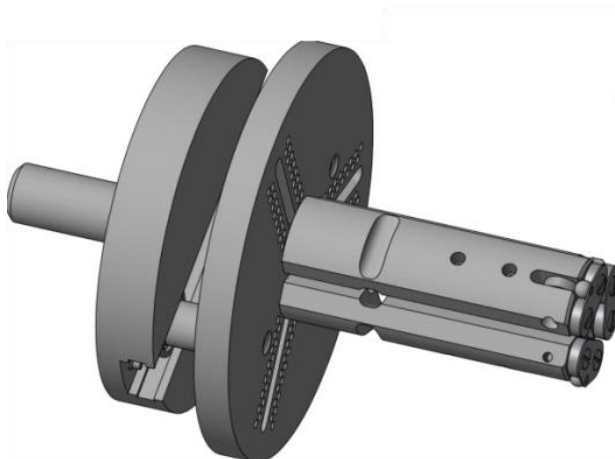
Слика 4.1.4: а) Приказ опруга коришћених током експеримента и б) приказ модификоване верзије алата током процеса обраде

Током експеримената, који ће касније бити детаљно објашњени, коришћено је пет различитих опруга крутости  $58.8\text{ N/mm}$ ,  $71.2\text{ N/mm}$ ,  $87.0\text{ N/mm}$ ,  $190.5\text{ N/mm}$  и  $210.5\text{ N/mm}$ . На слици 4.1.4. су дати приказ коришћених опруга (а) и приказ алата у захвату (б).

#### 4.2. Пројектно решење крутог алата намењеног за унутрашњу обраду цилиндричних површина

У оквиру истраживања конструисан је алат намењен за унутрашњу обраду цилиндричних површина односно отвора. У фази конципирања конструкције алата постављени су следећи захтеви:

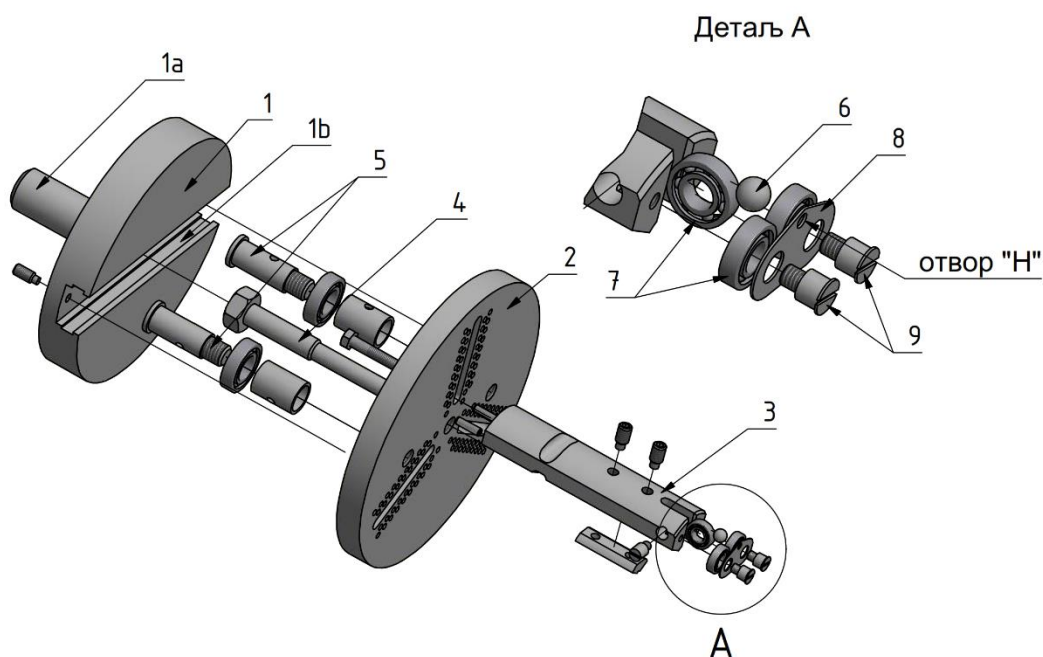
- могућност обраде великог опсега пречника отвора који се могу обрађивати са једним алатом (од  $40\text{ mm}$  до  $120\text{ mm}$ ),
- постизање димензионе тачности,
- елиминисање грешке вретеништа алатне машине,
- унапређење карактеристика површинског слоја обрађеног отвора са аспекта побољшања површинске храпавости, као и других физичко-хемијских карактеристика које нису описане у овом раду (као што су отпорност на хабање, корозиона отпорност, побољшање тврдоће итд.) и
- прихватљива цена израде.



Слика 4.2.1: 3D модел алата намењеног за обраду отвора

На слици 4.2.1 је приказан 3D модел алата за обраду отвора. Посматрано са аспекта функције коју обавља алат за обраду котрљањем куглице по површини отвора се може грубо поделити на четири целине, а чине их:

1. носач алата (спојница) (позиција 1),
2. базна плоча са отворима за монтирање носача лежајева (позиција 2),
3. носач лежајева (позиција 3) и
4. навртка (позиција 4).



Слика 4.2.2: Алат намењен за обраду отвора котрљањем куглице са позицијама:

- 1) носач алата, 1а) држач, 1б) жлеб на носачу алата, 2) базна плоча, 3) носач лежајева,
- 4) навртка, 5) осовинице, 6) куглица, 7) котрљајни лежајеви, 8) лимени носач куглице и
- 9) специјални завртањ

Носач алата (поз. 1) има држач (поз. 1а) који се монтира у вретениште алатне машине са стезном чауром за прихват пречника 20 *mm*. На носачу алата постоји жлеб (поз. 1б) у који се монтирају две осовинице (поз. 5) преко којих се остварује веза са базном плочом

(поз. 2). Овакво конструктивно решење је изабрано како би се алат могао сам прилагодити отвору који се обрађује и на тај начин се умањује грешка вретеништа алатне машине на којој се обрада врши.

С обзиром на то да је распон пречника отвора који се овим алатом могу обрађивати велики ( $40\text{ mm} - 120\text{ mm}$ ), конструисане су три различите базне плоче (поз. 2) са отворима за повезивање носача лежајева (поз. 3). У зависности од пречника отвора који се обрађује врши се избор одговарајуће базне плоче.

Носач лежајева (поз. 3) има функцију прихватања куглице (поз. 6) којом се врши обрада и при томе обезбеђује неометано котрљање куглице, при чему се мора избећи клизање куглице по површини предмета обраде, односно отвора. Неометано котрљање куглице се постиже помоћу три котрљајна лежаја (поз. 7). На базну плочу се монтирају три носача лежајева који међусобно заклапају угао од  $120^\circ$ . Носачи лежајева могу прихватити куглице различитих пречника. На носач лежајева (поз. 3) се причвршћује лимени носач куглице (поз. 8) помоћу специјалних завртња (поз. 9). На лименом носачу куглице постоји отвор „Н“ у који куглица упада и на тај начин се спречава испадање куглице из алата. Када се не врши обрада, односно када на куглицу не делује сила, куглица је смештена у отвор „Н“ и није у контакту са котрљајним лежајевима (поз. 7). Међутим, када на куглицу делује сила, она долази у контакт са котрљајним лежајевима и напушта контакт са лименим носачем куглице.



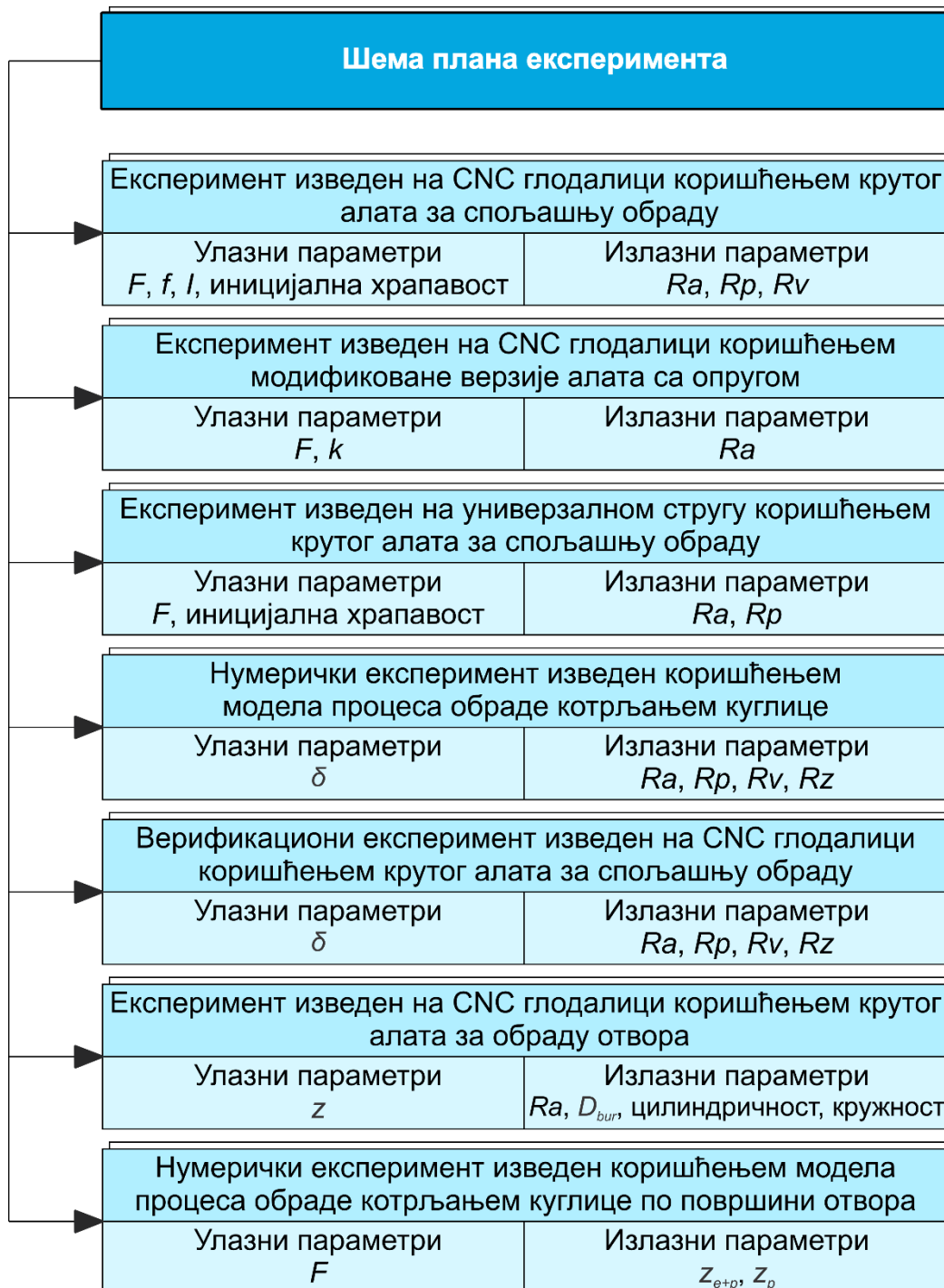
Слика 4.2.3: Приказ алата намењеног за завршну обраду отвора

Специјално конструисана навртка (поз. 4) на слободном крају има конус под углом од  $10^\circ$ . Окретањем навртке се врши оптерећивање носача лежајева и на тај начин се директно може одредити угиб на слободном крају носача лежајева. Један пун окрет навртке одговара померању слободног краја носача лежаја од  $0.1\text{ mm}$ . Ово је од великог значаја јер се на тај начин одређује дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Поред тога, оваквим конструктивним решењем добија се крут систем алат – куглица - предмет обраде, што обезбеђује обраду котрљањем куглице по површини отвора са константном дужином продирања куглице у материјал предмета обраде.



## 5. План и програм експерименталних истраживања

У оквиру експерименталних истраживања изведено је седам експеримената. На слици 5.1. је дат шематски приказ свих изведених експеримената.



Слика 5.1: Шематски приказ плана експеримената

Експерименталним истраживањима је претходио велики број прелиминарних експеримената у којима су коришћена оба пројектна решења алата намењених за обраду котрљањем куглице. При томе су варирани параметри обраде и материјали предмета обраде (алуминијумске легуре, разне врсте челика, пластике па чак и дрвета). Резултати прелиминарних експеримената као и планови експерименталних истраживања нису дати због обимности, али су послужили за дефинисање експерименталних истраживања која ће бити представљена у даљем тексту. Веома је важно нагласити да су резултати прелиминарних истраживања у складу са резултатима који су представљени у даљем тексту. Резултати прелиминарних експеримената се у великој мери поклапају са резултатима добијеним представљеним експериментима и њихова одступања нису већа од 10%.

Као што се са слике 5.1. може уочити, експерименти су изведени на две различите алатне машине и при томе су коришћени алат намењен за спољашњу обраду, његова модификована верзија са опругом и алат намењен за обраду отвора. Поред класичних експеримената извршени су и нумерички експерименти у којима је симулиран процес обраде котрљањем куглице као и процес утискивања куглице у материјал предмета обраде. У даљем тексту су дате најосновније информације о свим експериментима као и табеле са плановима експеримената. Детаљне информације о сваком експерименту су дате у наредним поднасловима. Сви експерименти су извршени на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.

У оквиру експеримента изведеног на *CNC* глодалици, коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду, варирани су параметри обраде котрљањем куглице: сила  $F$ , посмак  $f$ , број пролаза  $I$  и иницијална храпавост предмета обраде. Излазни параметри експеримента су параметри храпавости  $R_a$ ,  $R_v$  и  $R_p$ . Циљ овог експеримента је добијање најнижих могућих вредности мерених параметара храпавости коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду. У табели 5.1. је приказан план експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду.

Експеримент изведен на *CNC* глодалици коришћењем модификоване верзије алата са опругом је, пре свега, спроведен како би се могла уочити разлика између различитих конструктивних решења алата за обраду котрљањем куглице. Осмишљен је тако да се обрада врши на предмету обраде познате иницијалне површинске храпавости  $R_a$  и при томе се варира само један параметар обраде котрљањем куглице, сила  $F$ , при чему се мењају опруге које се монтирају у модификовану верзију алата, односно варирају се крутости алата. Излаз из овог експеримента је параметар храпавости  $R_a$ . У табели 5.2. је приказан план експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем модификоване верзије алата са опругом.

Експеримент изведен на универзалном стругу коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду је изведен тако што су варирани само један параметар обраде, сила  $F$ , и иницијална површинска храпавост претходно припремљеног предмета обраде. Излазни параметри експеримента су параметри храпавости  $R_a$ ,  $R_v$  и  $R_p$ . Циљ експеримента је добијање најнижих могућих вредности мерених параметара храпавости

коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду на универзалном стругу. У табели 5.3. је приказан план експеримента изведеног на универзалном стругу коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду.

Табела 5.1: План експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду

I	Иницијална храпаваост $R_a=0.99 \mu m$				Иницијална храпаваост $R_a=1.36 \mu m$				Иницијална храпаваост $R_a=2.02 \mu m$			
	$f_1=0.3 (mm)$		$f_2=0.2 (mm)$		$f_3=0.1 (mm)$		$f_1=0.3 (mm)$		$f_2=0.2 (mm)$		$f_3=0.1 (mm)$	
	$F (N)$	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$	$F (N)$	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$	$F (N)$	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$
1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
2	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
3	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
4	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
2	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
3	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
4	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
2	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
3	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
4	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•



материјал предмета обраде  $\delta$ . Овај параметар је еквивалентан сили којом се куглица притиска о материјал предмета обраде и директно зависи од интензитета силе и физичко-хемијских параметара материјала предмета обраде. Варирање параметра  $\delta$  је одабрано зато што ће у даљем тексту бити извршена оптимизација процеса обраде на основу дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Као и код претходно описаних експеримената, излазне величине су параметри храпавости  $R_a$ ,  $R_v$ ,  $R_p$  и  $R_z$ . У табели 5.4. је дат план нумеричког експеримента изведеног коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице.

Табела 5.4: План експеримента изведеног коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице

	$\delta (\mu m)$	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$	$R_z (\mu m)$
Иницијална храпавост	-	10.90	22.76	12.34	35.10
Симулација 1	5	•	•	•	•
Симулација 2	10	•	•	•	•
Симулација 3	15	•	•	•	•
Симулација 4	20	•	•	•	•
Симулација 5	25	•	•	•	•
Симулација 6	30	•	•	•	•
Симулација 7	35	•	•	•	•

Како би се верификовали резултати добијени нумеричким експериментима, осмишљен је додатни експеримент изведен на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду. Као код нумеричких експеримената варирана је само дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta$ . Излазне величине су параметри храпавости  $R_a$ ,  $R_v$ ,  $R_p$  и  $R_z$ . У табели 5.5. је дат план верификационог експеримента.

Табела 5.5: План верификационог експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду

	$\delta (\mu m)$	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$	$R_z (\mu m)$
Иницијална храпавост	-	2.91	15.4	14.8	31.2
Поље 1	2	•	•	•	•
Поље 2	4	•	•	•	•
Поље 3	6	•	•	•	•
Поље 4	8	•	•	•	•
Поље 5	10	•	•	•	•
Поље 6	12	•	•	•	•
Поље 7	14	•	•	•	•
Поље 8	16	•	•	•	•
Поље 9	18	•	•	•	•
Поље 10	20	•	•	•	•
Поље 11	22	•	•	•	•
Поље 12	24	•	•	•	•
Поље 13	26	•	•	•	•
Поље 14	28	•	•	•	•
Поље 15	30	•	•	•	•
Поље 16	32	•	•	•	•

У оквиру експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за обраду отвора вариран је само један параметар обраде, дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $z$ . Излазне величине из овог експерименталног истраживања су  $R_a$ , пречник отвора након обраде  $D_{bur}$ , цилиндричност и кружност резултујућих отвора. Циљ овог истраживања је, поред постизања одговарајуће хрпавости, постизање димензионе и геометријске прецизности обрађених отвора. У табелама 5.6, 5.7 и 5.8 су приказани планови експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за обраду отвора.

Табела 5.6: План експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за обраду отвора који се односи на димензиону прецизност отвора

Редни број отвора	Пречник			Девијација
	$D_{nom}$	$D_{mill}$	$D_{bur}$	$ D_{nom} - D_{bur} $
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	54.0020	53.9999	●	●
2	54.0020	53.9789	●	●
3	54.0020	53.9688	●	●
4	54.0020	53.9599	●	●
5	54.0020	53.9412	●	●
6	54.0020	53.9357	●	●

Табела 5.7: План експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за обраду отвора који се односи на геометријску прецизност отвора

Редни број отвора	1	2	3	4	5	6
Цилиндричност (mm)	●	●	●	●	●	●
Кружност (mm)	●	●	●	●	●	●

Табела 5.8: План експеримента изведеног на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за обраду отвора који се односи на површинску хрпавост

Редни број отвора	1	2	3	4	5	6
$R_a$ ( $\mu m$ )	●	●	●	●	●	●

Нумерички експерименти изведени коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини отвора осмишљени су са циљем одређивања величине пластичне и еластичне деформације предмета обраде након обраде. Варирана је само сила као параметар процеса обраде, а излазни параметри су вредности деформација предмета обраде  $z_e$  и  $z_{e+p}$ , при чему је  $z_e$  еластична деформација а  $z_{e+p}$  збир еластичне и пластичне деформације. Познавање вредности деформација је веома важно обзиром на циљ обраде - постизање димензионе прецизности. У табели 5.9. је приказан план нумеричког експеримента изведеног коришћењем модела процеса обраде отвора.

Табела 5.9: План нумеричког експеримента изведеног коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини отвора

$F$ ( $N$ )	Еластопластично померање $z_{e+p}$ ( $mm$ )	Пластично померање $z_p$ ( $mm$ )
50	•	•
100	•	•
150	•	•
200	•	•
250	•	•
300	•	•
350	•	•
400	•	•
450	•	•
500	•	•
550	•	•
600	•	•
650	•	•
700	•	•
750	•	•
800	•	•
850	•	•
900	•	•
950	•	•
1000	•	•

### 5.1. Опрема коришћена за експериментална истраживања

У оквиру експерименталних истраживања испланиран је и изведен одређени број експеримената при чему је коришћена одговарајућа опрема. Експерименти су извођени на алатним машинама. Поред тога коришћена је специјална опрема за мерење сила резања, координатна мерна машина за мерење димензионих карактеристика и грешака облика предмета обраде и уређај за снимање топографије површине. Сва коришћена опрема, осим координатне мерне машине која је у власништву Факултета техничких наука (ФТН) из Новог Сада, у власништву је Факултета инжењерских наука (ФИН) у Крагујевцу.

Алатне машине на којима су извођени експерименти су:

- CNC глодалица, у оквиру ЦИМ центра ФИН у Крагујевцу – произвођач *HAAS Automation*, модел *HAAS TM – 1 HE*, произведен 2006. године (слика 5.1.1) [130]
- Универзални струг, у оквиру Лабораторије за обраду метала резањем ФИН у Крагујевцу – произвођач *Prvomajska*, модел *DK480* од 10 kW, произведен 1980. године (слика 5.1.2) [131]



Слика 5.1.1: CNC глодалица *HAAS TM – 1 HE*





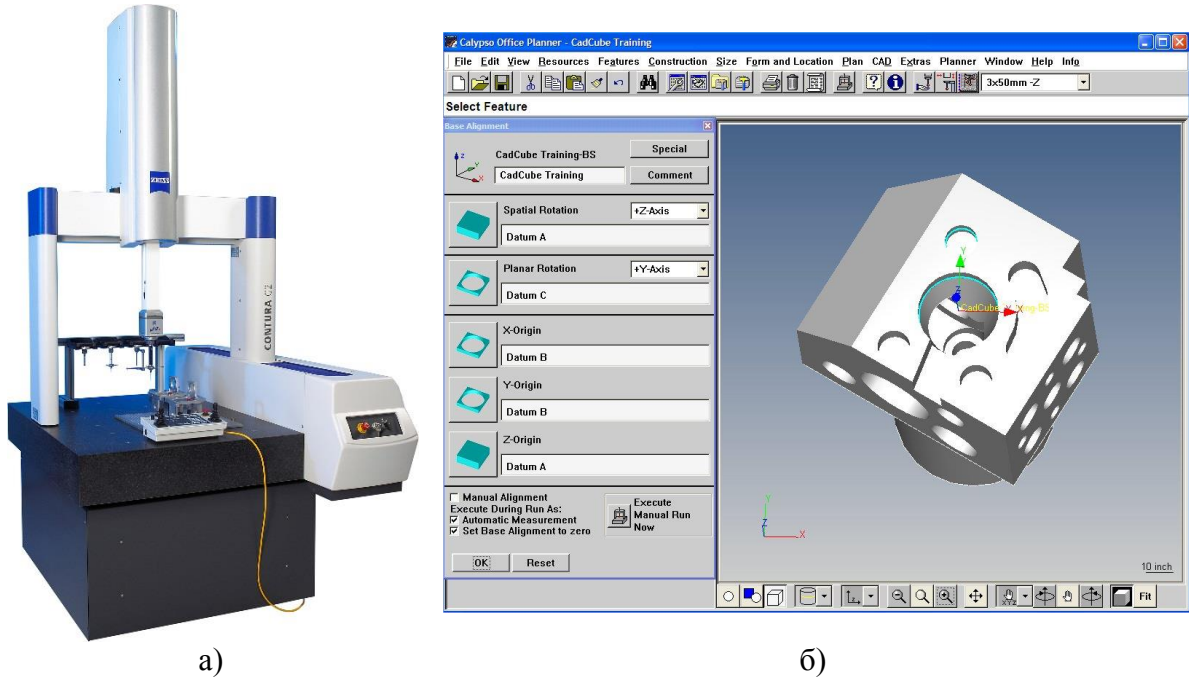
Слика 5.1.2: Универзални струг *Prvomajska DK480*

За мерење сила резања ја коришћен трокомпонентни динамометар *Kistler* (слика 5.1.3) произведен 1975. године. Динамометар се састоји од основне јединице типа 9265А за коју се, у зависности од апликације, везује носач алата типа 9441В уколико је реч о обради стругањем, односно стезна плоча типа 9443В уколико је реч о обради глодањем или брушењем [132]. Динамометар се преко мерног моста и *AD* конвертора *Texas Instruments*-а [133] повезује на рачунар на коме се бележи сигнал силе. Динамометар се налази у Лабораторији за обраду метала резањем ФИН у Крагујевцу.



Слика 5.1.3: Трокомпонентни динамометар *Kistler*

За мерење димензионих карактеристика и грешака облика предмета обраде коришћена је тркоординатна мерна машина *Carl Zeiss Contura G2* (слика 5.1.4) са *Calypso Software*-ом [134]. Машина се налази у Центру за метрологију ФТН у Новом Саду.



Слика 5.1.4: а) Координатна мерна машина *Carl Zeiss Contura G2* и б) типично радно окружење *Calypso Software*-а

За мерење параметара површинске хрпавости коришћен је уређај за мерење топографије контактних површина *Talysurf 6* (слика 5.1.5) [135] произвођача *Taylor Hobson* из 1988. године. Уређај се налази у Центру за трибологију ФИН у Крагујевцу.



Слика 5.1.5: *Taylor Hobson Talysurf 6*

## 5.2. План експеримента изведеног на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде

Експериментална истраживања су вршена на равној плочи од легуре алуминијума *EN AW-6082 (AlMgSi1) T651*. Хемијски састав материјала предмета обраде је дат у табели 5.2.1. док су физичко-хемијске карактеристике материјала дате у табели 5.2.2.

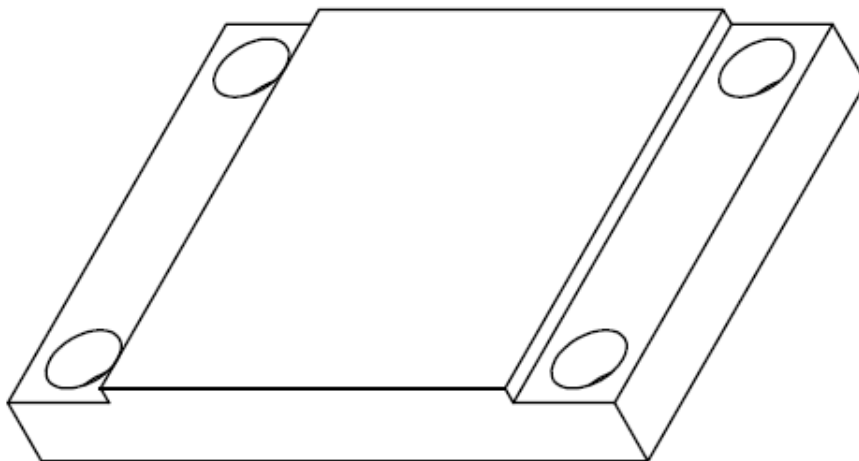
Табела 5.2.1: Хемијски састав легуре алуминијума *EN AW-6082 (AlMgSi1) T651*

Хемијски елемент	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
%	0.9	0.5	0.6	0.9	0.25	0.2	0.1	Остало

Табела 5.2.2: Физичко-хемијске карактеристике легуре алуминијума *EN AW-6082 (AlMgSi1) T651*

Модул еластичности	Напон на граници течења	Затезна чврстоћа	Тврдоћа	Густина	Линеарни коеф. термичког ширења (20-100 °C)	Термичка проводљивост
E (GPa)	R <sub>p0.2</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	R <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	HB	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	α	k (W/mK)
69	240-255	275-300	89	2.7	23.4 · 10 <sup>-6</sup>	165-185

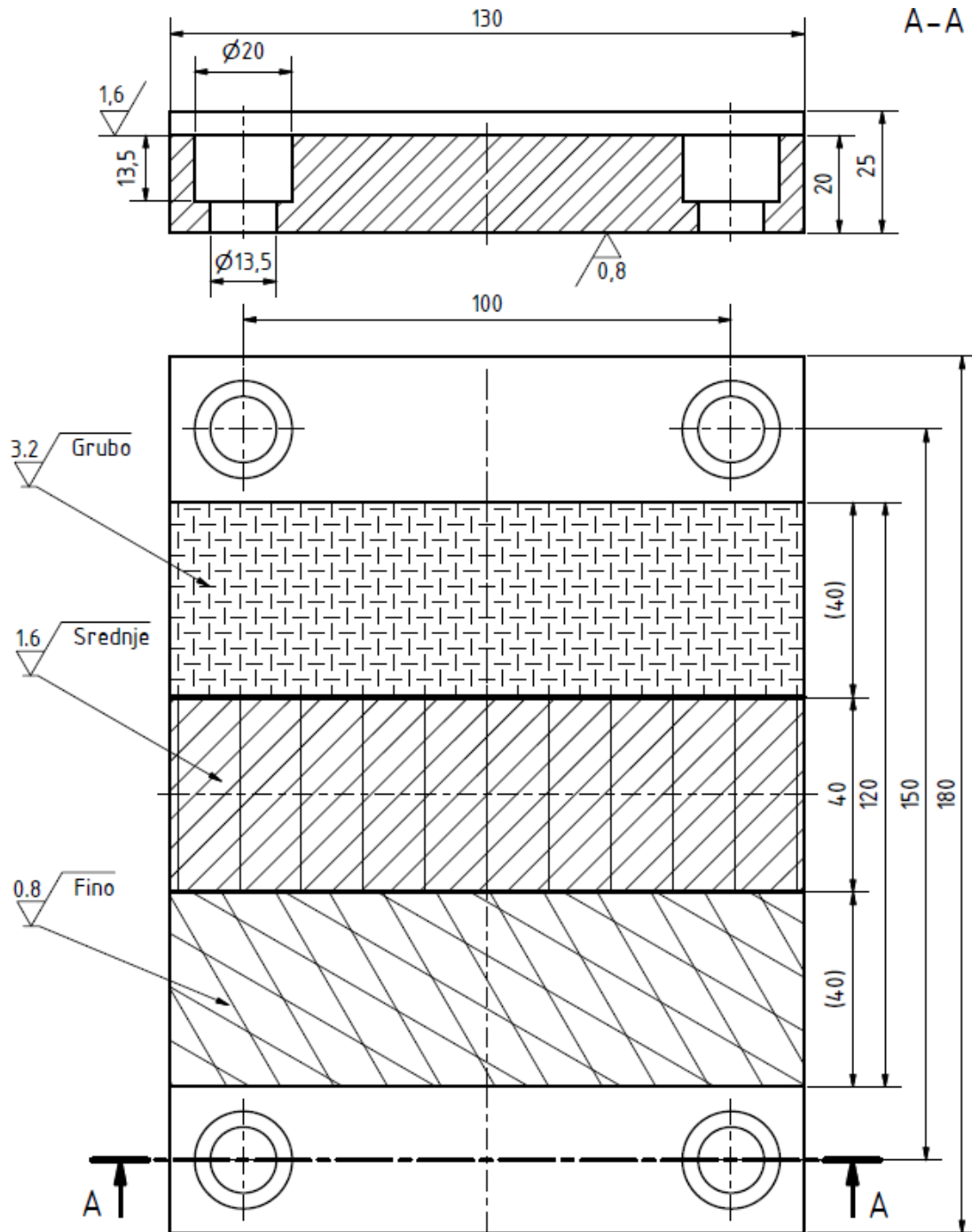
Димензије плоче су 180 mm x 130 mm x 25 mm. Изглед плоче на којој су вршена експериментална истраживања је приказан на слици 5.2.1. Плоча је геометријски подељена на три поља димензија 130 mm x 40 mm (слика 5.2.2.). Свако поље је претходно обрађено глодањем са различитим режимима обраде тако да се на сваком од поља могу уочити површине различитих иницијалних површинских храпавости.



Слика 5.2.1: CAD модел плоче коришћене за експериментална истраживања

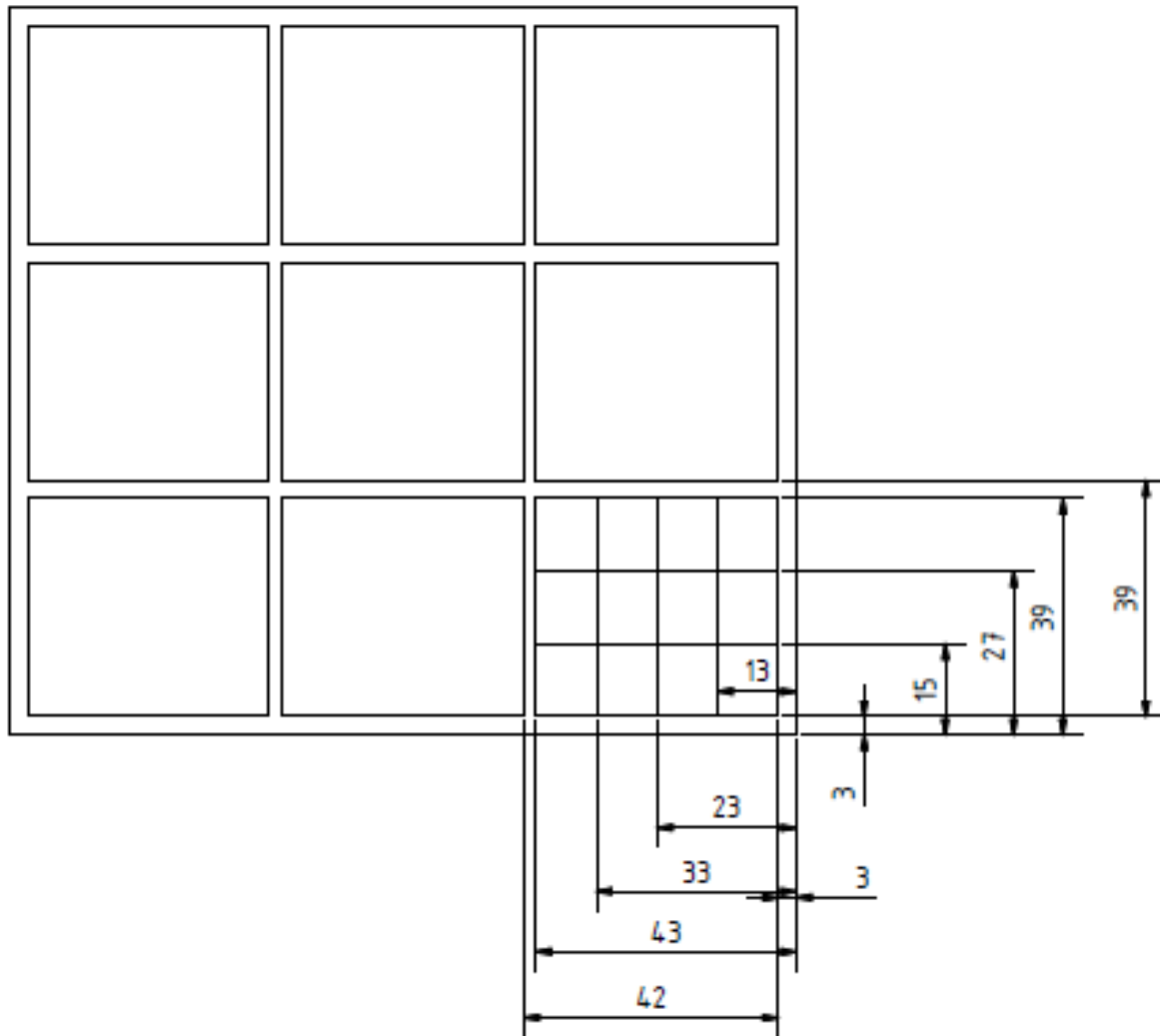
Даље је свако од три поља, обрађено глодањем са различитим режимима обраде, подељено на три поља у којима је вршена обрада котрљањем куглице са три различите

вредности силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде (слика 5.2.3). Свако од та три поља је подељено на 12 поља у којима су варирани параметри обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде. Дакле, на целом предмету обраде постоји укупно 108 поља у којима се разликују иницијалне вредности површинске храпавости и параметри обраде котрљањем куглице. На слици 5.2.2 је приказан цртеж плоче са распоредом поља која су претходно обрађена различитим режимима обраде глодањем.



5.2.2: Цртеж плоче са претходно припремљеним пољима различитих иницијалних површинских храпавости

На слици 5.2.3 су шематски приказани распоред и димензије поља на плочи у којима су варирани параметри обраде котрљањем куглице.



Слика 5.2.3: Шематски приказ распореда поља на плочи након обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде

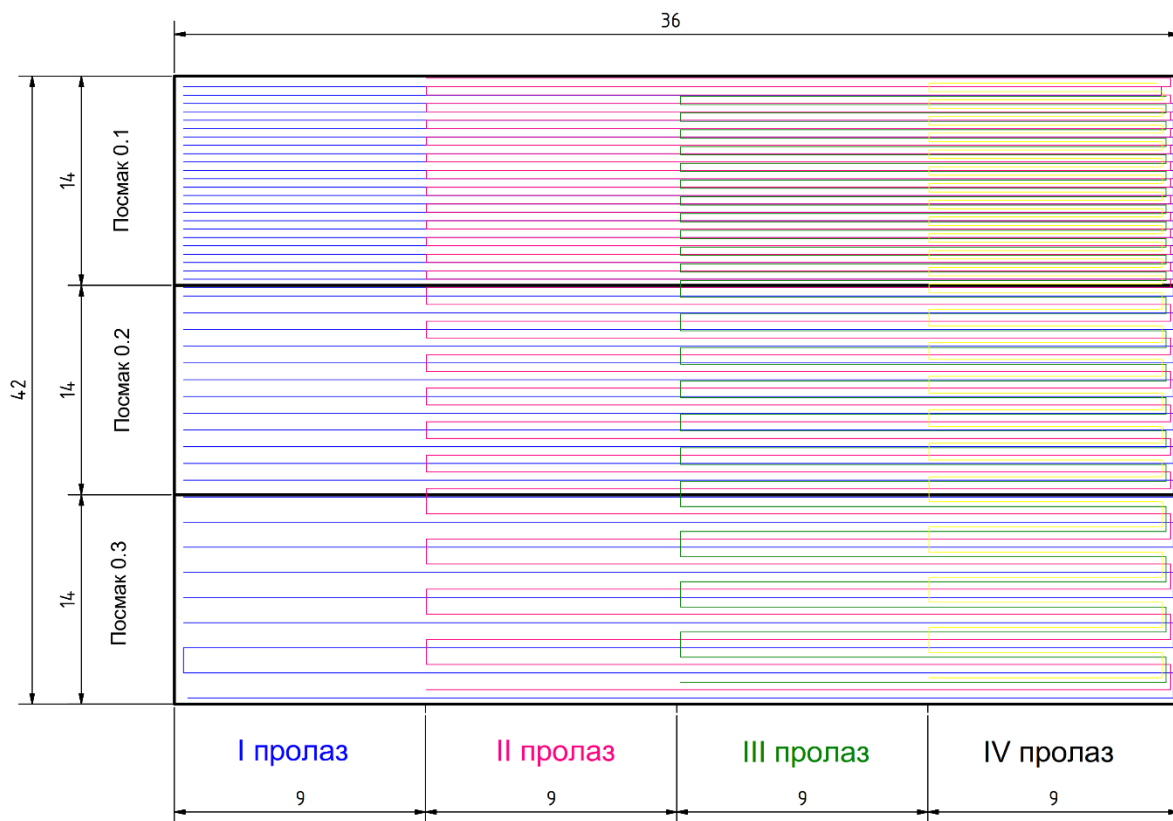
Процес обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде је изведен на нумерички контролисаној глодалици *HAAS TM – 1 HE* коришћењем алата који је у претходном поглављу детаљно објашњен и чији се склопни и радионички цртежи налазе у прилогу. При томе је коришћена куглица пречника  $7\text{ mm}$ , од челика који спада у групу конструктивних челика и подгрупу високоугљеничних челика за лежајеве *A 295 52100 (USA/ASTM)*.

Табела 5.2.3: Хемијски састав челика *A 295 52100 (USA/ASTM)*

Хемијски елемент	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	Остали
%	0.95 - 1.05	0.15 - 0.35	0.25 - 0.45	1.4 - 1.65	$\leq 0.1$	$\leq 0.025$	$\leq 0.02$	Ni $\leq 0.3$ Cu $\leq 0.25$ Ni+Cu $\leq 0.5$

Куглица је тврдоће 65 *HRC*, затезне чврстоће 760 *MPa* и површинске храпавости  $R_a=0.02 \mu m$ . У табели 5.2.3. је дат хемијски састав челика *A 295 52100 (USA/ASTM)*.

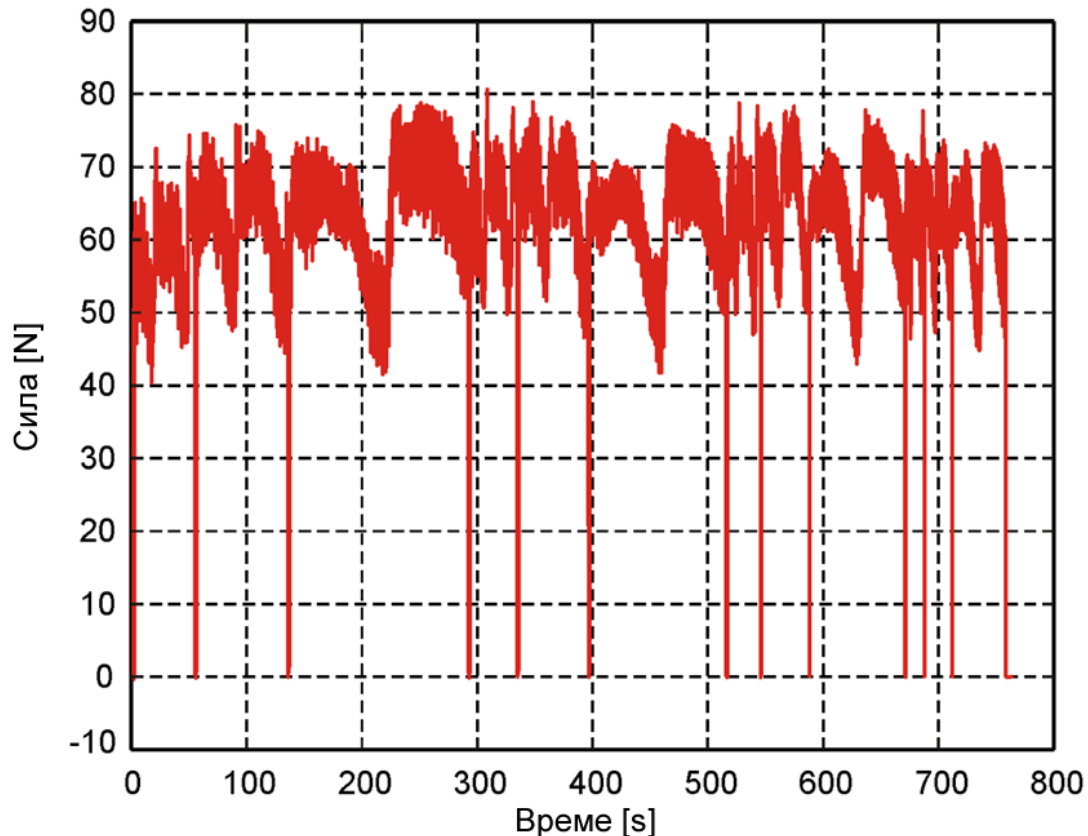
Плоча је монтирана на стезну плочу типа *9443B* која је завртњима повезана за трокомпонентни динамометар *Kistler 9265A* који је коришћен за мерење силе којом се куглица притиска о плочу. Нумерички контролисана машина је програмирана тако да изврши процес обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде у 12 поља на плочи са различитим режимима обраде, према плану експеримента са слике 5.2.4, при чему је вредност силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде константна. Претходно припремљени програм је пуштан 9 пута за свако од девет поља која се могу уочити на слици 5.2.4, при чему је у сваком од 9 поља другачија вредност силе којом се куглица притиска о површину плоче. Вредност силе је праћена континуално у сваком од 9 поља помоћу трокомпонентног динамометра, при чему су варирано следећи параметри обраде котрљањем куглице: посмак са три различите вредности 0.1 *mm*, 0.2 *mm* и 0.3 *mm*; број пролаза са четири различите вредности 1, 2, 3 и 4; при чему је брзина кретања куглице по површини предмета обраде  $v=2000 \text{ mm/min}$ . Сила је варирана у распону од 36.31 *N* до 383.64 *N*. Овим силама одговара дубина продирања куглице у материјал предмета обраде по *z*-оси (видети слику 3.3.1) у распону од 6  $\mu m$  до 18  $\mu m$ .



Слика 5.2.4: Шематски приказ плана експеримента у пољу са трајекторијом кретања алата по претходно припремљеној плочи

Према претходно представљеном плану експеримента планирано је да вредности номиналне силе буду 50 *N*, 150 *N* и 300 *N*. Међутим, у сваком пољу се одступа од

номиналних вредности за силу због грешака равности површине плоче и иницијалне површинске хрпавости. Ове варијације не утичу на излазне резултате ако се узме у обзир да је планирано да се изведе процес обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде у одређеном интервалу сила. На слици 5.2.5 је приказан један типичан пример записа силе са динамометра који одговара дубини продирања куглице у материјал предмета обраде по  $z$ -оси од приближно  $6 \mu m$ .



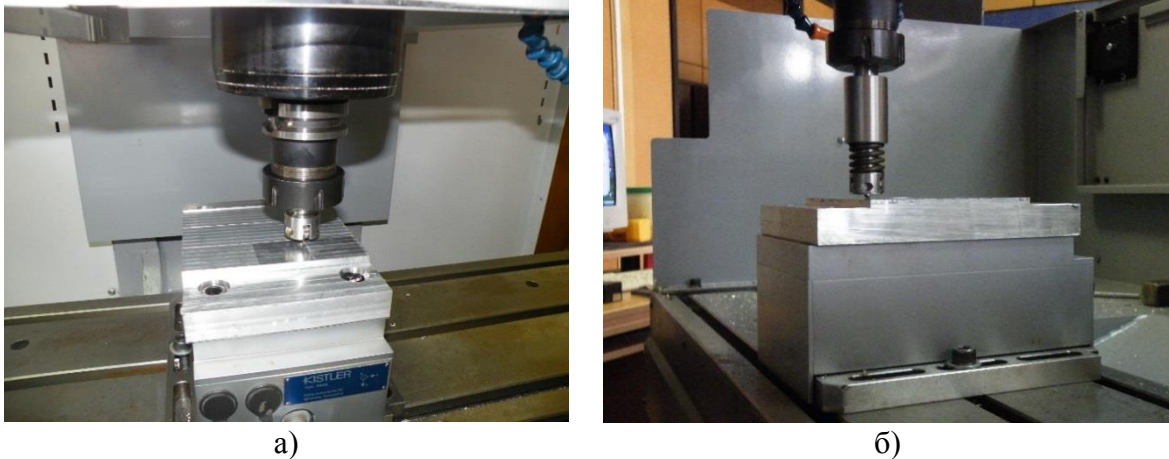
Слика 5.2.5: Типичан запис силе са *Kistler* динамометра

Како би се верификовао теоријски модел представљен у трећем поглављу изведени су додатни експерименти. Циљ додатних експеримената је утврђивање утицаја крутости алата на резултујућу површинску хрпавост. Приликом извођења додатних експеримената коришћена је модификована верзија алата за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде (видети слику 4.1.3) која је у претходном поглављу детаљно објашњена и чији се склопни и радионички цртежи налазе у прилогу.

Код модификоване верзије алата се сила, којом се куглица притиска о површину предмета обраде, задаје коришћењем система са опругом. При томе су коришћене опруге различитих крутости  $58.8 \text{ N/mm}$ ,  $71.2 \text{ N/mm}$ ,  $87.0 \text{ N/mm}$ ,  $190.5 \text{ N/mm}$  и  $210.5 \text{ N/mm}$ . Као и претходни, експеримент је изведен на плочи истих димензија и од истог материјала. При томе се на плочи налази само једно поље које је претходно обрађено на глодалици и има иницијалну површинску хрпавост  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$ . Обрада котрљањем куглице се врши у једном пролазу са посмаком  $f=0.2 \text{ mm}$  при чему је брзина кретања куглице по површини предмета обраде  $v=2000 \text{ mm/min}$ . Сила је варирана у распону од

50 N до 300 N са кораком од 50 N. Поље са одређеном иницијалном храпавошћу подељено је тако да укупно има 5 поља на којима је вршена обрада модификованом верзијом алата при чему су коришћене опруге различитих крутости. На слици 5.2.6 је приказан алат током обраде.

Након извођења свих експеримената мерена је храпавост сваког поља на уређају за мерење топографије контактних површина *Taylor Hobson Talysurf 6*.



Слика 5.2.6: Приказ алата током обраде: а) алат високе крутости и б) модификована верзија алата са опругом

### 5.3. План експеримената изведених на универзалном стругу коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде

План експерименталних истраживања обухвата обраду котрљањем куглице по површини цилиндричних предмета обраде. Обрада је извршена на узорку шипкастог облика од побољшаног челика *Č5430 (36CrNiMo4, EN 1.6511)*. Хемијски састав материјала предмета обраде је дат у табели 5.3.1. док су физичко-хемијске карактеристике материјала дате у табели 5.3.2.

Табела 5.3.1: Хемијски састав челика *36CrNiMo4*

Хемијски елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
%	0.32 - 0.4	0.1 - 0.4	0.5 – 0.8	≤ 0.035	≤ 0.035	0.9 - 1.2	0.15 - 0.3	0.9- 1.2

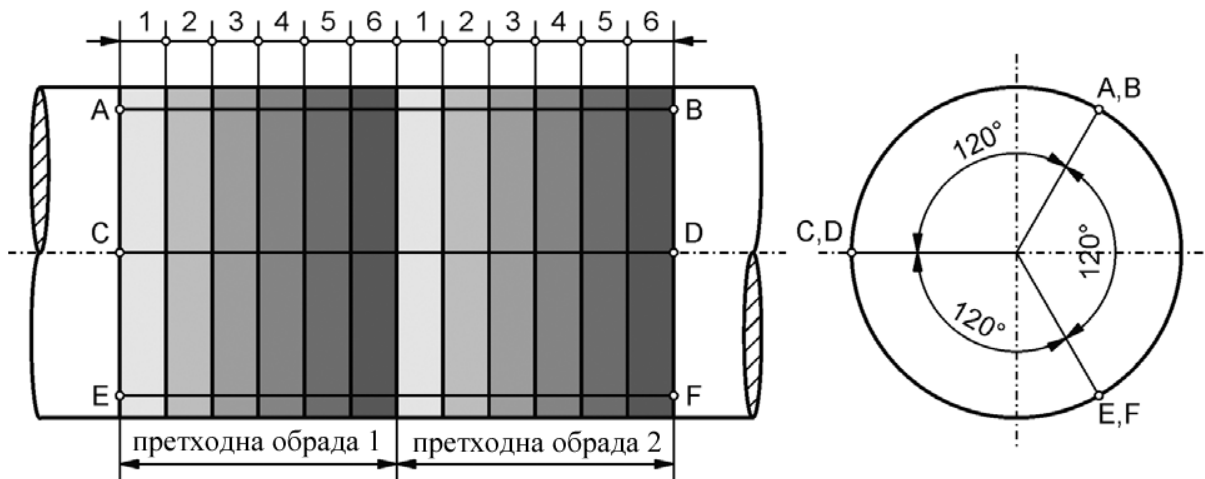


Табела 5.3.2: Физичко-хемијске карактеристике материјала *36CrNiMo4*

Модул еластичности	Напон на граници течења	Затезна чврстоћа	Тврдоћа	Густина	Линеарни коеф. термичког ширења (20-100 °C)	Термичка проводљивост
E (GPa)	R <sub>p0.2</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	R <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	HRC	ρ (kg/mm <sup>3</sup> )	α	k (W/mK)
200	900	1100 - 1300	42	7850	11 - 13 · 10 <sup>-6</sup>	16-43

Обрада је извршена на универзалном стругу *Prvomajska DK480* коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду котрљањем куглице по површини призматичних и цилиндричних предмета обраде. Алат који је при томе коришћен је детаљно описан у претходном поглављу, а склопни и радионички цртежи се налазе у прилогу. При томе је коришћена куглица пречника *7 mm*, од челика који спада у групу конструктивних челика и подгрупу високоугљеничних челика за лежачеве *A 295 52100 (USA/ASTM)*. Карактеристике материјала куглице су дате у претходном тексту.

Предмет обраде је, у овом случају, шипка (слика 5.3.1) димензија  $d=50\text{ mm}$  и  $L=400\text{ mm}$ . Челична шипка је претходно обрађена на стругу са два различита режима обраде. Прва претходна обрада је извршена са следећим параметрима резања: посмак  $f=0.5\text{ mm/obr}$ , дубина резања  $d=1\text{ mm}$  и број обртаја  $n=710\text{ obr/min}$ , док је друга претходна обрада извршена са истим параметрима резања с тим да је посмак промењен и износи  $f=0.1\text{ mm/obr}$ .



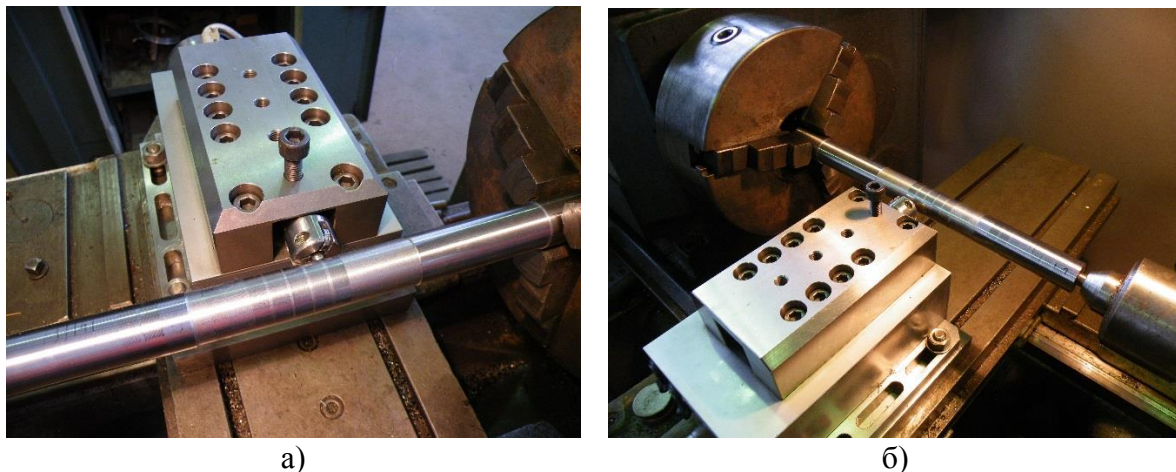
Слика 5.3.1: Шематски приказ поља у којима су мерене силе којима се куглица притиска о површину предмета обраде и положај изводница по којима су мерени параметри храповости

Након претходне обраде стругањем извршена је обрада котрљањем куглице по површини предмета обраде. Обрада је вршена на стругу у једном пролазу са бројем обртаја  $n=45\text{ obr/min}$  и посмаком  $f=0.05\text{ mm/obr}$ . Може се уочити да је коришћен релативно мали број обртаја. Овај параметар је тако изабран са циљем елиминисања термичких и динамичких ефеката. Наиме, ако се узму у обзир теоријска разматрања

представљена у претходном поглављу у одељку 3.4, мали број обртаја је одабран како би се избегло интензивно грејање куглице алата и значајније вибрације система алата и предмета обраде. На тај начин је створен битан предуслов за дубље залажење у сам процес обраде и реалније поређење развијеног теоријског модела и експерименталних резултата.

Поред наведеног, битно је нагласити да је због ограничене носивости малих котрљајних лежајева, који се налазе у алату, максимална дозвољена сила на куглици  $F = 600 \text{ N}$ . Уколико се та вредност силе прекорачи, долази до оштећења лежајева. Имајући наведено у виду, треба нагласити да није било могуће извести испитивања са дубинама пенетрације куглице у материјал предмета обраде које су веће од максималне висине испупчења претходно обрађених површина.

Оптерећења су задавана преко попречног клизача (попречног супорта) универзалног струга. На попречни клизач је причвршћен динамометар *Kistler 9265A*, а за динамометар алат за обраду котрљањем куглице по површини предмета обраде (слика 5.3.2). Ниво оптерећења је одређиван помоћу динамометра пре почетка процеса обраде котрљањем куглице.



Слика 5.3.2: Приказ апаратуре коришћене током обраде

Током процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде, преко динамометра је вршен континуални мониторинг силе којом је процес изведен. Обрада је у оба претходно припремљена поља са различитим иницијалним параметрима храпавости вршена са шест различитих вредности силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде.

Након извођења процеса обраде, мерним уређајем *Talisurf 6* мерени су параметри храпавости ( $R_a$  и  $R_p$ ) у свих 12 поља. Параметри храпавости су мерени дуж изводница испитиваног узорка у три радијална правца која се налазе под углом од  $120^\circ$  у односу на осу испитиваног узорка (слика 5.3.1). Референтна дужина на којој су мерени параметри храпавости је износила  $3 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm} = 2.4 \text{ mm}$ .

#### 5.4. План нумеричких експеримената изведених коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини призматичног предмета обраде

У претходном поглављу у потпоглављу 3.5 представљен је теоријски модел храпавости добијен на основу анализе кинематике глодања (видети слику 3.5.2). Овај теоријски модел је искоришћен за моделирање профила храпавости предмета обраде који је коришћен за *FEM* анализу. Као што је претходно објашњено, процес обраде котрљањем куглице симулиран је коришћењем *Simufact.Forming 11.0.* софтвера. Развијен је 3D модел и у репрезентативном пресеку је извршена 2D FE анализа. Детаљи о развијеном моделу, мрежи коначних елемената на куглици и предмету обраде, подешавања и опције које су коришћене приликом симулирања процеса обраде су објашњени раније.

Разматран је профил храпавости (видети слику 3.5.4) који има следеће параметре храпавости: максималну висину неравнина  $R_z=35.1 \mu m$ , при чему је максимална висина испупчења профила  $R_p=22.763 \mu m$  а максимална дубина удубљења профила  $R_v=12.337 \mu m$  и средње аритметичко одступање профила од средње линије профила  $R_a=10.9 \mu m$ .

Материјал предмета обраде је *EC1350 (EN 50182)*. Материјал је одабран из базе података *Simufact.Forming 11.0.* софтвера. Како у бази података софтвера није било могуће одабрати материјал који би одговарао материјалу који је претходно коришћен и како би за генерисање новог материјала било неопходно вршити испитивања на кидалици, сматра се да је избор материјала за нумеричко симулирање процеса извршен на задовољавајући начин и да ће бити могуће поређење резултата добијених у оба експеримента.

Симулација се изводи у две етапе. У првој етапи куглица продире у материјал предмета обраде до жељене дубине (видети слику 3.5.6) у тачки контакта *A*. Иницијални контакт између куглице и предмета обраде је остварен на највишој тачки теоријског профила храпавости односно у тачки која има највећу *z* координату. У другој етапи симулације куглица се котрља по површини предмета обраде са предефинисаном брзином (на слици 3.5.6 је путања означена са *II*). При томе куглица пређе преко пет узастопних неравнина теоријског профила храпавости. Оптерећење које претрпи неравнина на којој је остварен иницијални контакт и на којој се врши прва етапа симулације је по својој природи различито у односу на оптерећење које претрпе остале неравнине током симулације. Из тог разлога се одбацују резултати добијени на првој неравини који се односе на топографију површине и на расподелу напонских поља унутар предмета обраде. Веома је важно нагласити да је коефицијент трења између куглице и предмета обраде подешен на нулу. У стварном процесу обраде коефицијент трења је већи од нуле, али је због комплексности процеса обраде и избегавања могуће грешке приликом усвајања вредности коефицијента трења одлучено да се одабере оваква вредност. Поред осталог, то је урађено са циљем елиминације клизања између та два елемента нумеричког модела.

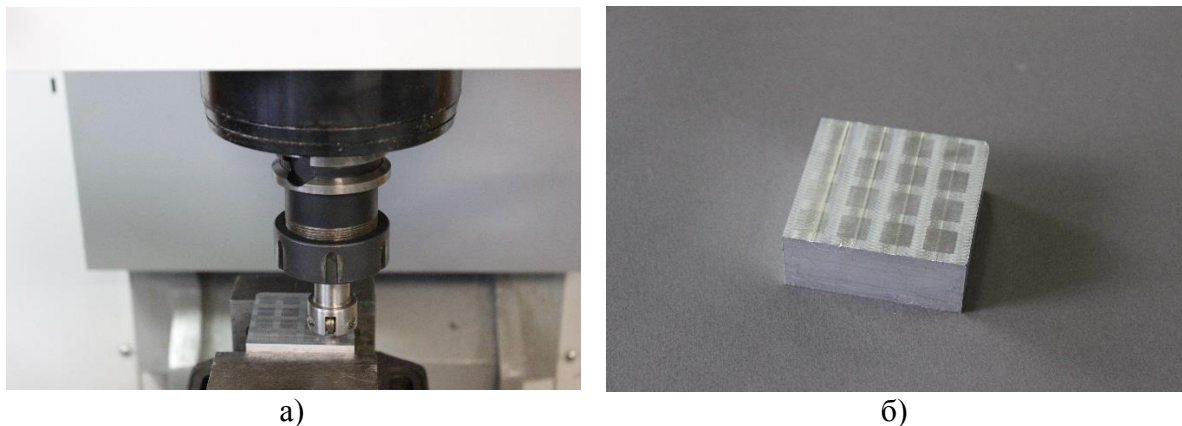
По плану експеримената је предвиђено да се уради седам симулација при чему ће се варирати дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Прва симулација је урађена са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде од  $5 \mu m$ . Свака

следећа симулација се ради са повећањем дубине пенетрације за  $5 \mu m$ . С како је максимална висина неравнина теоријског профила храпавости  $R_z=35.1 \mu m$ , тако ће са седмом, последњом, симулацијом бити покривен случај код којег се врши обрада котрљањем куглице са продирањима која су реда величине  $R_z$ .

Излаз из симулација су координате тачака чворова коначних елемената које се налазе на површини предмета обраде. Тачке су коришћене за одређивање параметара храпавости резултујуће површине. Поред тога, излаз су и напонска стања у предмету обраде након растерећења.

Како би се верификовали резултати добијени *FEM* анализом, коришћењем претходно развијеног модела, изведено је додатно експериментално истраживање на *CNC* глодалици коришћењем претходно описаног алата. Експеримент је извршен на плочи димензија  $62 mm \times 62 mm \times 25 mm$ , од алуминијумске легуре *EN AW-6082 (AlMgSi1) T651*, чији су хемијски састав и физичко-хемијске карактеристике дате у табелама 5.2.1 и 5.2.2. При томе је коришћена куглица пречника  $7 mm$ , од челика *A 295 52100 (USA/ASTM)*.

Иницијална површина плоче је добијена чеоним глодањем са глодалом пречника  $20 mm$ . Обрада котрљањем куглице је извршена на 16 поља димензија  $10 mm \times 10 mm$  при чему је посмак у свим пољима  $f_b= 0.2 mm$ , а брзина  $v_b= 2000 mm/min$ . Као и у претходно описаним нумеричким експериментима, варирана је дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде, при чему је иницијална дубина пенетрације на првом пољу приближно једнака  $\delta=2 \mu m$ . На сваком следећем пољу дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде је повећавана за  $2 \mu m$  па је тако на последњем, шеснаестом пољу дубина  $\delta=32 \mu m$ . На слици 5.4.1 су приказани алат у захвату током експеримента и плоча након експеримента.

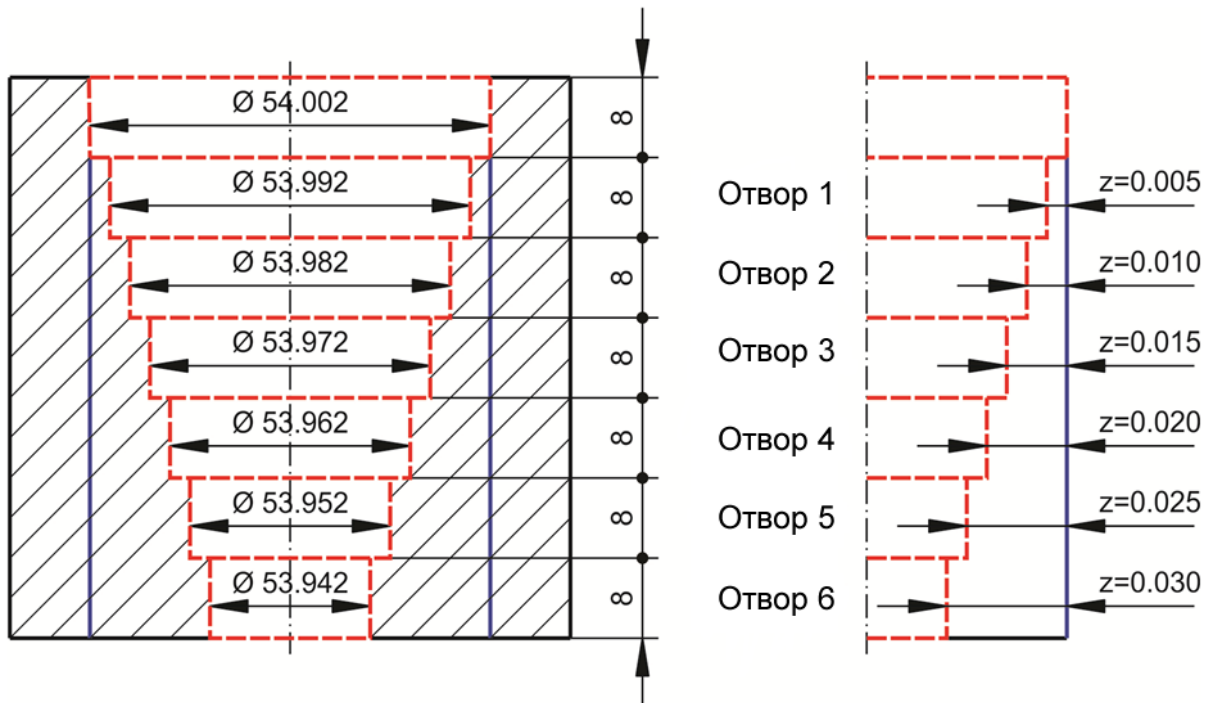


Слика 5.4.1: Прикази: а) крутог алата у захвату током експеримента и б) плоче након експеримента

Параметри храпавости пре и након обраде котрљањем куглице су мерени уређајем за мерење топографије контактних површина *Taylor Hobson Talysurf 6*.

### 5.5. План експеримента изведеног на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за унутрашњу обраду цилиндричних површина

Експеримент је изведен на предмету обраде димензија  $120\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 56\text{ mm}$  од алуминијумске легуре *EN AW-6082 (AlMgSi1) T651* чији су хемијски састав и физичко-хемијске карактеристике дате у табелама 5.2.1 и 5.2.2. Предмет обраде је претходно обрађен на CNC глодалици *HAAS TM1-HE* вретенастим глодалом пречника  $20\text{ mm}$ , тако да се у њему може уочити степенести отвор. Пречник првог отвора је  $54.002\text{ mm}$ , док се пречник сваког следећег отвора инкрементално смањује за  $10\text{ }\mu\text{m}$ , све до последњег, седмог отвора који је пречника  $53.932\text{ mm}$ . Дубина сваког отвора је  $8\text{ mm}$ . Оваква претходна обрада омогућава обраду котрљањем куглице по површини отвора са шест различитих дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде. План експеримента је приказан на слици 5.5.1.



Слика 5.5.1: План експеримента изведеног на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за унутрашњу обраду цилиндричних површина

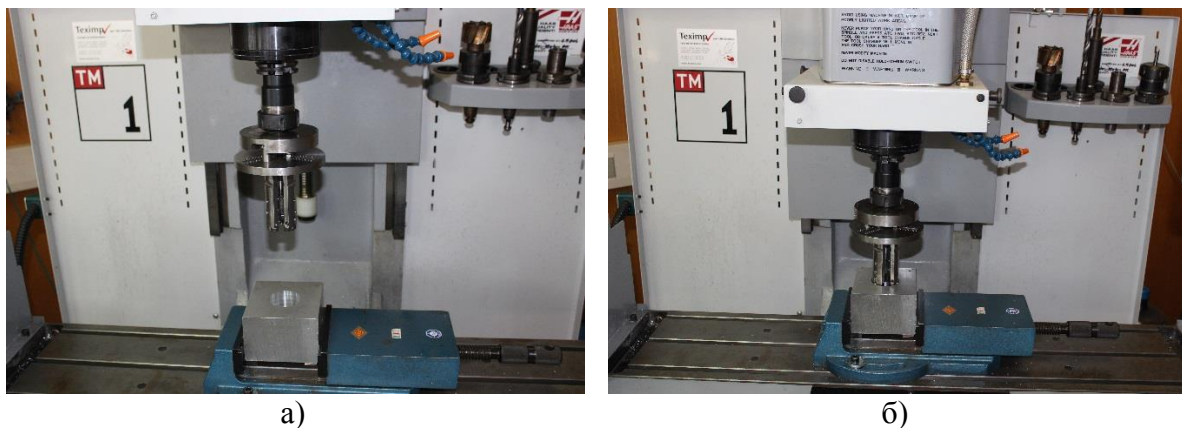
Након претходне обраде извршена је завршна обрада котрљањем куглице по површини отвора. Обрада је извршена алатом који је у претходном поглављу детаљно објашњен и чији се склопни и радионички цртежи налазе у прилогу. При томе су коришћене куглице пречника  $7\text{ mm}$  од челика *A 295 52100 (USA/ASTM)* чији су хемијски састав и физичко-хемијске карактеристике дате у табели 5.2.3. Куглице су тврдоће  $65\text{ HRC}$ , затезне чврстоће  $760\text{ MPa}$  и површинске храпавости  $R_a=0.02\text{ }\mu\text{m}$ . Као што је већ поменуто, претходна обрада је омогућила обраду котрљањем куглице по површини отвора са шест различитих теоријских дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Почетна дубина пенетрације на отвору број 1 (слика 5.5.1) је  $5\text{ }\mu\text{m}$  и на сваком следећем

отвору дубина пенетрације расте инкрементално за  $5 \mu m$ , до вредности од  $30 \mu m$  на отвору б.

Треба нагласити да се на отвору пречника  $54.002 \text{ mm}$  врши подешавање алата на одговарајући пречник. То практично значи да се на том отвору три куглице које се користе при обради, доводе у контакт са површином отвора. Дакле, дубина продирања куглице у материјал предмета обраде на том отвору је нула, што значи да овај отвор није обрађен котрљањем куглице.

Обрада котрљањем куглице је изведена са следећим параметрима: број пролаза је  $i=1$ , посмак  $f=50 \text{ mm/min}$  и број обртаја  $n=200 \text{ obr/min}$ . Избор параметара је извршен тако да током обраде не долази до преклапања трајекторија куглица.

На слици 5.5.2. је приказан алат за завршну унутрашњу обраду котрљањем куглице по површини отвора.



Слика 5.5.2: Алат за завршну унутрашњу обраду котрљањем куглице: а) монтиран на глодалицу и б) у захвату за време обраде

Параметри храпавости пре и након обраде котрљањем куглице су мерени уређајем за мерење топографије контактних површина *Taylor Hobson Talysurf 6* док је за мерење геометријских карактеристика отвора коришћена координатна мерна машина *Carl Zeiss Contura G2*.

### 5.6. План нумеричких експеримената изведених коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини отвора

Како је приликом постављања захтева за израду алата за завршну унутрашњу обраду цилиндричних површина предвиђено, поред постизања оптималних вредности параметара површинске храпавости, постизање димензионе и геометријске тачности обрађеног отвора, веома је важно познавање вредности еластичне деформације. Једноставније речено, веома је битно одредити за коју вредност ће се отвор еластично растеретити након примене оптерећења које се на површину преноси преко куглица. Управо вредност еластичног растерећења одређује финалну меру третираног отвора.

Сврха извођења нумеричких експеримената је одређивање удела еластичних деформација отвора током и након обраде котрљањем куглице по површини отвора. Поред тога извршене су и процене напонских стања и заосталих напона у површинском слоју третиране површине након обраде.

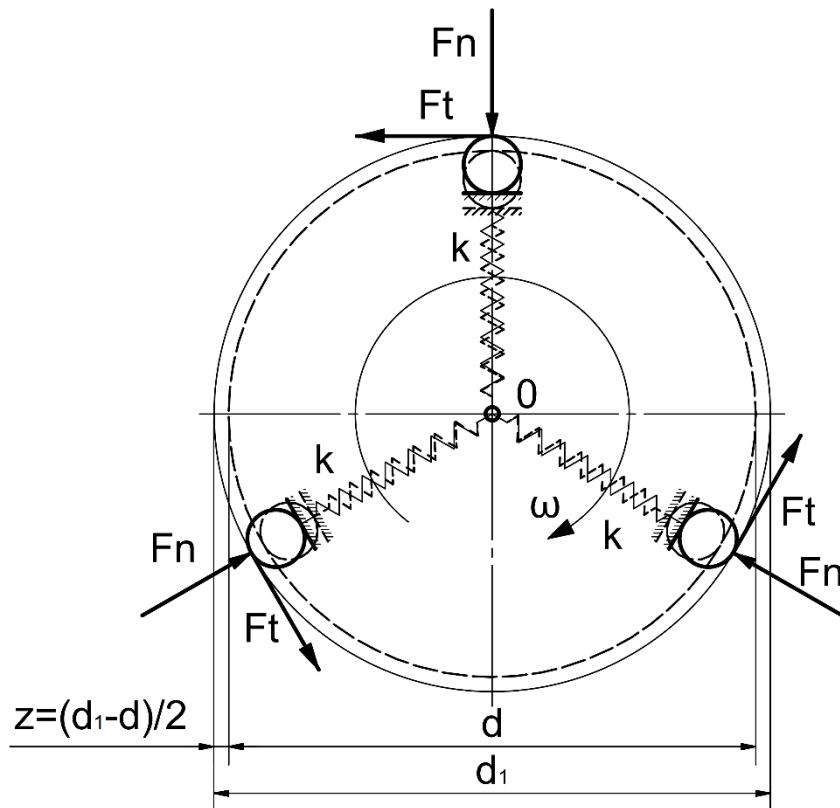
Као што је већ објашњено, коришћен је софтверски пакет за нелинеарну анализу *FEMAP* са *PAK-S* солвером. Развијен је *3D* модел у коме је уочен карактеристични *2D* пресек у коме су изведене нумеричке анализе. Представљеним моделом се не може у потпуности симулирати процес обраде котрљањем куглице зато што се куглица само утискује у предмет обраде и нема котрљања по третираној површини, али се сматра да се са довољном поузданошћу могу одредити вредности еластичне и пластичне деформације, као и приближне вредности напонских стања у предмету обраде.

Према плану експеримената је извршена *FE* анализа на представљеном моделу при чему је варирана дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Материјал предмета обраде је алуминијумска легура *EN AW-6082 (AlMgSi1) T651* чији су хемијски састав и физичко-хемијске карактеристике дате у табелама 5.2.1. и 5.2.2. Дубина пенетрације је варирана у опсегу од  $0\text{ mm}$  до  $0.1\text{ mm}$  са кораком од  $5\text{ }\mu\text{m}$ . Планирано је и изведено укупно двадесет нумеричких експеримената.

План експеримената који су изведени на *CNC* глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде, између осталог, предвиђа поређење резултата који се добијају коришћењем крутог алата и модификације алата који у себи има опружни механизам. Из теоријских основа, као и из резултата, који ће у наредном поглављу бити детаљно приказани, произилази да је коришћење крутог алата повољније са аспекта побољшања параметара површинске храпавости.

При коришћењу крутог алата за обраду унутрашњих цилиндричних површина је, поред познавања вредности еластичне деформације предмета обраде, веома битно одредити колика је крутост коришћеног алата. Алат је састављен од неколико делова који приликом обраде трпе силе, односно отпоре, који се на алат преносе преко куглице. Теоријски механички модел алата се може представити као на слици 5.6.1.

Круг на слици са пречником  $d_1$  означава локацију куглице пре процеса обраде, односно локацију куглице пре него што се на њу примени сила. Због отпора који се појављују током процеса обраде, нормалне силе  $F_n$  и силе трења  $F_t$ , куглица заузима позицију која је означена кругом пречника  $d$ . Као последица тога свака куглица има радијално померање  $z$ , при чему померање куглице у тангенцијалном правцу није приказано јер је значајно мање у поређењу са радијалним и нема битан утицај на његову вредност. Померање  $z$  се јавља због еластичних деформација које се јављају у контакту куглице и котрљајног лежаја, као и због еластичних деформација носача лежаја.



Слика 5.6.1: Упрости́ени модел унутрашње обраде котрљањем куглице по површини цилиндричних површина

Цео алат, котрљајући лежајеви, носач лежајева и остали елементи алата пројектовани су тако да се вредност радијалног померања  $z$  минимизира. Вредност  $z$  се умањује са повећањем крутости алата. Ово је један од предуслова за постизање димензионе прецизности третираних отвора. Вредност  $z$  је одређена *FEM* анализом.

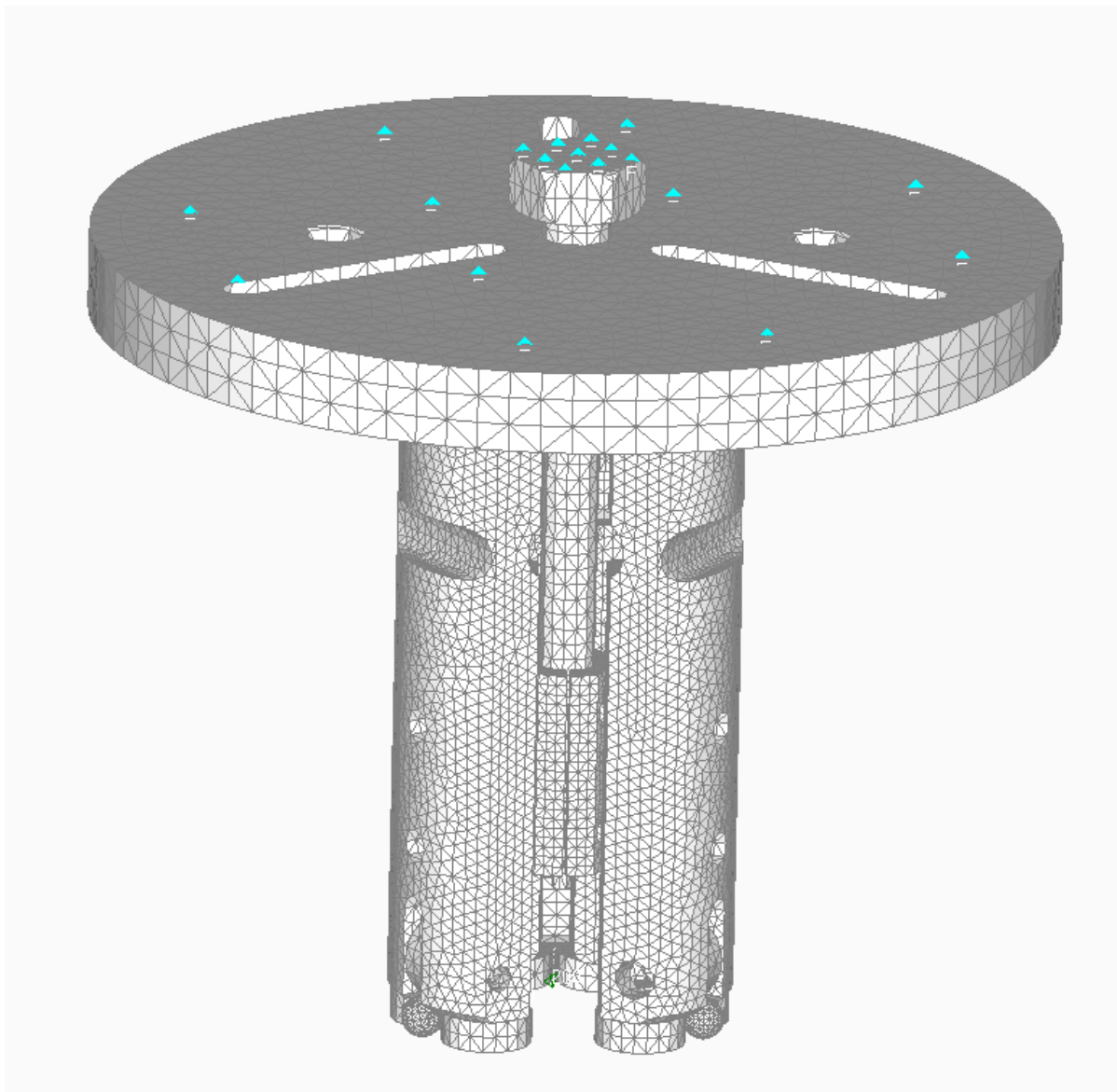
*FEM* анализа је рађена у *FEMAP* софтверском пакету. Извршена је статичка анализа померања на алату при дејству три силе  $F_n$  које су задате на куглицама које су распоређене по ободу алата и међусобно заклапају угао од  $120^\circ$ .

Пре анализе се на склопу алата врше неопходна упрошћавања, мали отвори се затварају, навоји се свде на отворе итд. Упрошћавања се врше како би се избегли проблеми приликом креирања мреже коначних елемената. Када се упрошћавања не би вршила, у околини отвора, навоја и других специфичних фичера, би се морало вршити уситњавање мреже, што у крајњој инстанци има за последицу повећање броја коначних елемената што даље повећава време потребно за извршење неопходних прорачуна. Без тога би стабилност процеса била угрожена и време потребно за анализу би се могло мерити данима. При томе треба нагласити да уведена упрошћавања не утичу у великој мери на крајње резултате.

Након тога се креира мрежа коначних елемената на сваком делу алата посебно. Коначни елемент је тетраедар са 4 чвора. Величина коначних елемената варира од елемента до елемента и креће се у распону од  $0.7 \text{ mm}$  на куглици па до  $4.6 \text{ mm}$  на базној плочи. На



свим елементима склопа алата постоје укупно 150663 коначна елемента. На слици 5.6.2 је приказан алат са генерисаном мрежом коначних елемената.



Слика 5.6.2: Мрежа коначних елемената на алату намењеном за унутрашњу обраду цилиндричних површина

Сваком елементу склопа алата се додељују особине материјала у складу са техничком документацијом. Дефинисане су и нумерисане све зоне контакта на свим елементима склопа и извршено је упаривање одговарајућих контактних зона. Уведени су гранични услови по којима је померање базне плоче и навртке у свим правцима једнако нули. На слици 5.6.2 се могу уочити плави троуглови помоћу којих је то изведено. Овакав гранични услов је uveden како би цео склоп алата остао на месту, односно да не би дошло до транслације или евентуалне ротације целог склопа. Оптерећење се дефинише тако што се одреди тачка на елементу у којој делује сила и задају се правац, смер и интензитет силе. У овом случају су задате три силе чији правац пролази кроз центар куглице и осу алата, смер је ка оси алата, а интензитет силе је  $200\text{ N}$ . Ова вредност силе је одабрана у складу са прорачунима који су базирани на *FEM* анализи која је описана на почетку овог

потпоглавља, односно на основу дијаграма еластичне и пластичне деформације који ће бити дат у поглављу 6.

Решавање диференцијалних једначина је извршено коришћењем *NX Nastran solver*-а. Излаз из *FEM* анализе је *colour map* на којој се у зависности од боје може уочити величина померања на сваком коначном елементу. Избором било ког чвора коначног елемента се може добити одговарајуће померање тог чвора.

Резултати анализе ће бити представљени у следећем поглављу.

## 6. Резултати експерименталних истраживања

### 6.1. Резултати експеримената изведених на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде

Планом експеримената, представљеним у претходном поглављу у оквиру поднаслова 5.2, предвиђена је обрада котрљањем куглице на плочи која је подељена на три поља претходно обрађених глодањем са три различита режима обраде. То је урађено како би се видео утицај претходне обраде на резултујуће површине добијене након обраде котрљањем куглице по површини плоче. На сликама 6.1.1, 6.1.2 и 6.1.3 су приказани иницијални профили храпавости у претходно припремљеним пољима. Топографија површине је мерена на референтној дужини од  $3 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm} = 2.4 \text{ mm}$ .



Слика 6.1.1: Профил храпавости поља са иницијалном храпавошћу  $R_{a(ini)}=0.99 \mu\text{m}$

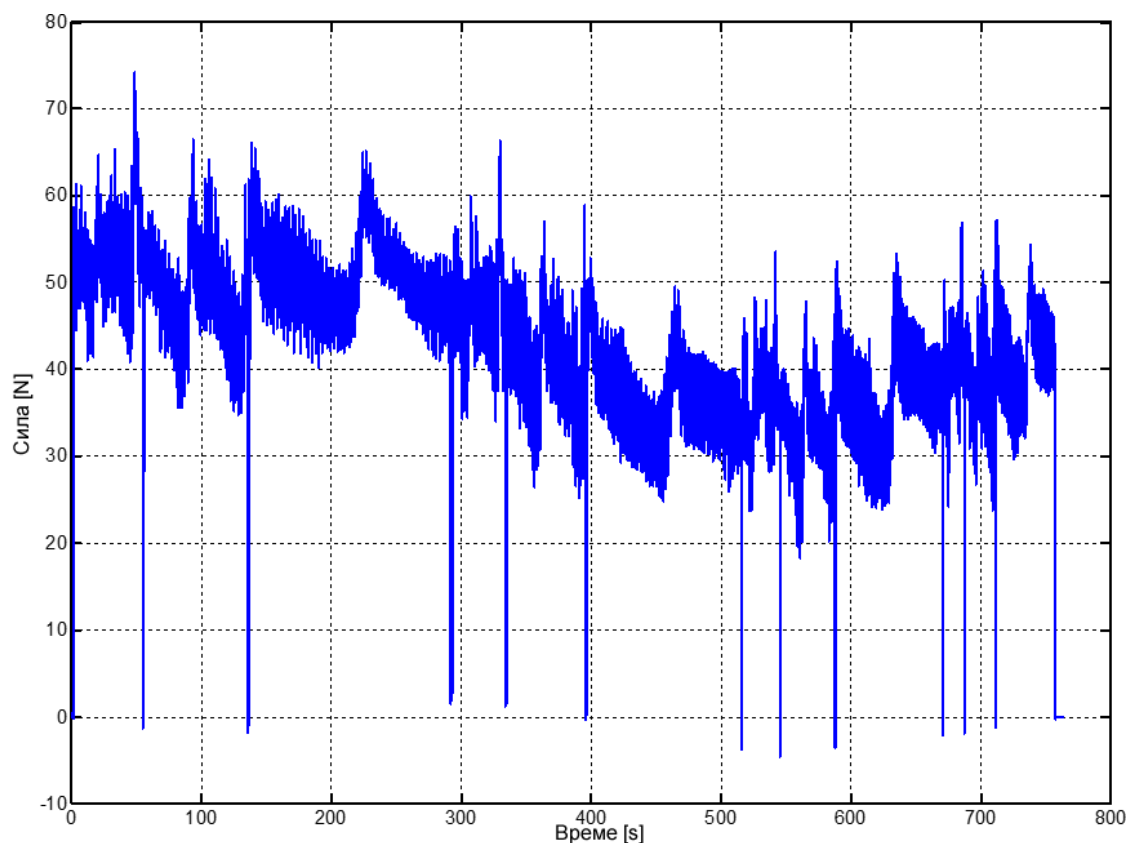


Слика 6.1.2: Профил храпавости поља са иницијалном храпавошћу  $R_{a(ini)}=1.39 \mu\text{m}$

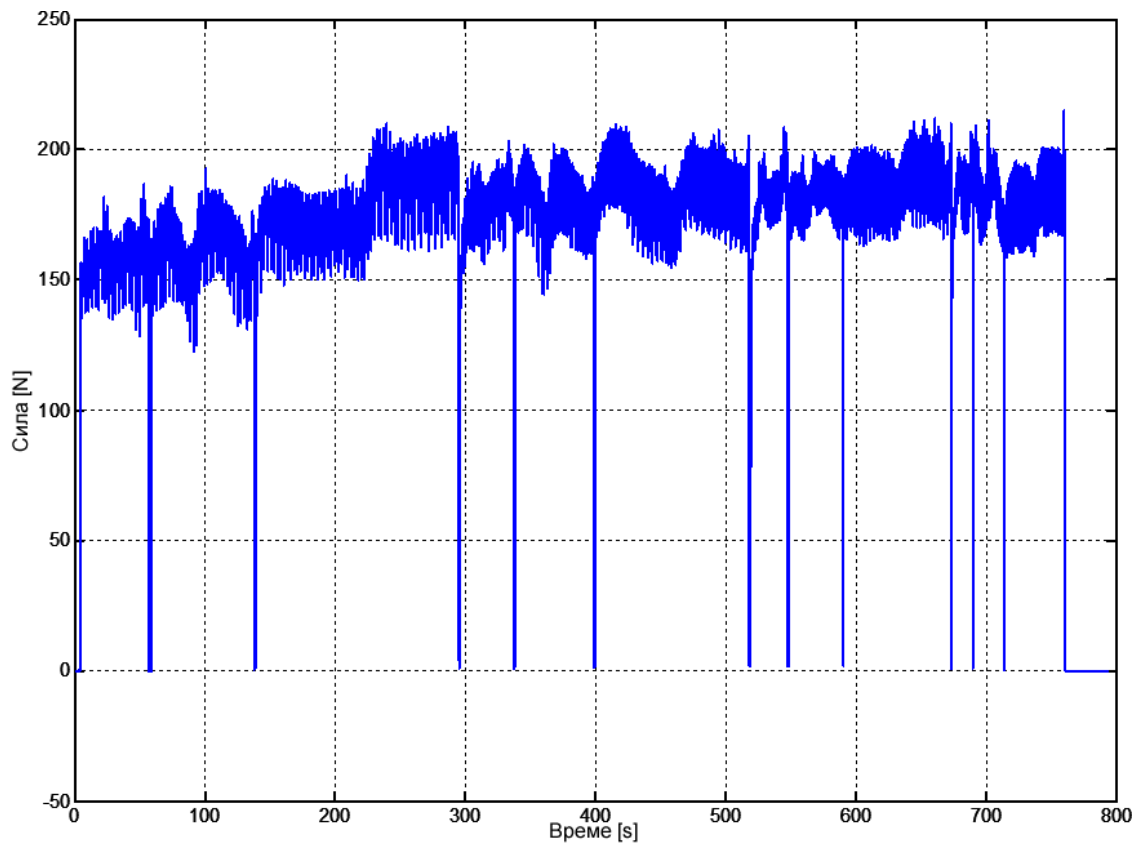


Слика 6.1.3: Профил хрпавости поља са иницијалном хрпавошћу  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$

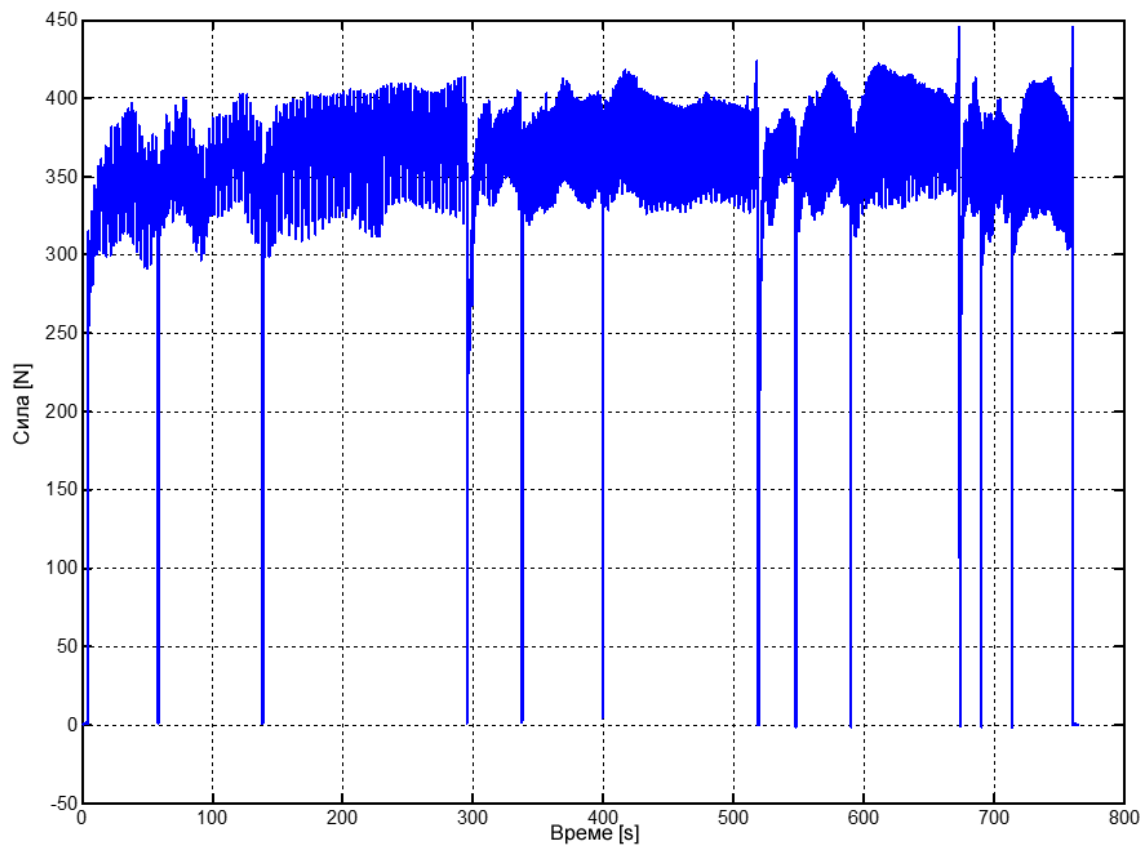
Као што је претходно објашњено, три поља са различитим иницијалним површинским хрпавостима су даље подељена на девет поља у којима је континуално праћена сила преко трокомпонентног динамометра *Kistler 9265A*. Свако од девет поља је потом подељено на 12 поља у којима су варирани остали параметри обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде. Укупно постоји 108 поља на којима су варирани параметри обраде. На сликама од 6.1.4. до 6.1.12. су приказани записи силе  $F_z$  којом се куглица притиска о површину предмета обраде. Сила се креће у распону од 36.31 N до 383.64 N, што одговара дубинама продирања куглице у материјал предмета обраде по  $z$ -оси у распону  $6 \mu m - 18 \mu m$ .



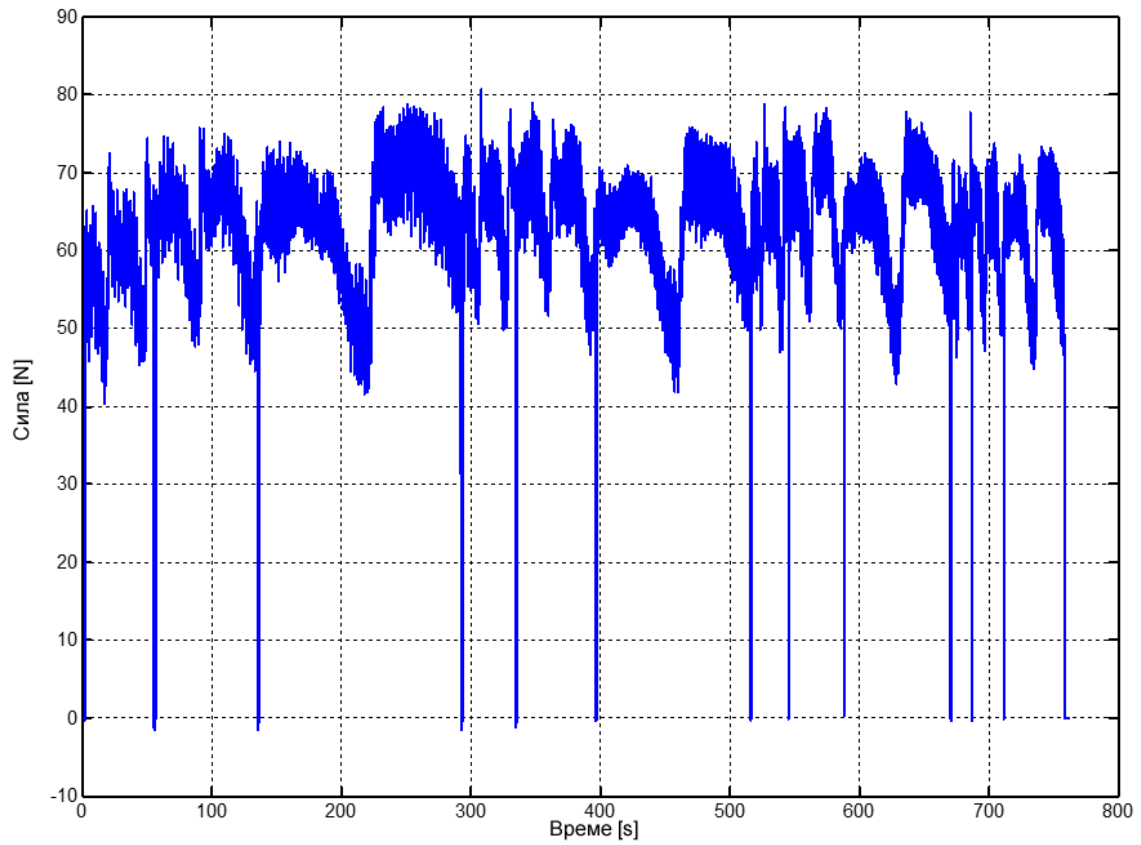
Слика 6.1.4: Запис силе за прво поље са иницијалним  $R_{a(ini)}=0.99 \mu m$



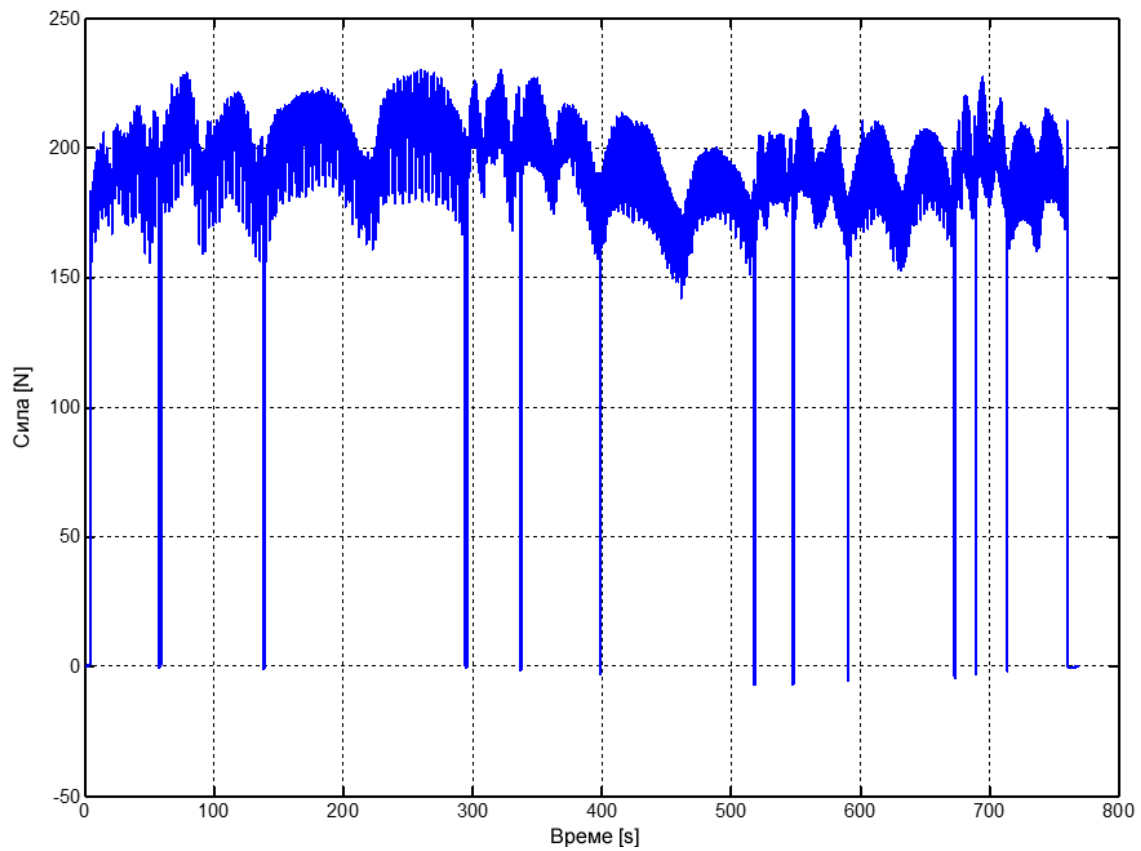
Слика 6.1.5: Запис силе за друго поље са иницијалним  $R_{a(i\text{ni})} = 0.99 \mu\text{m}$



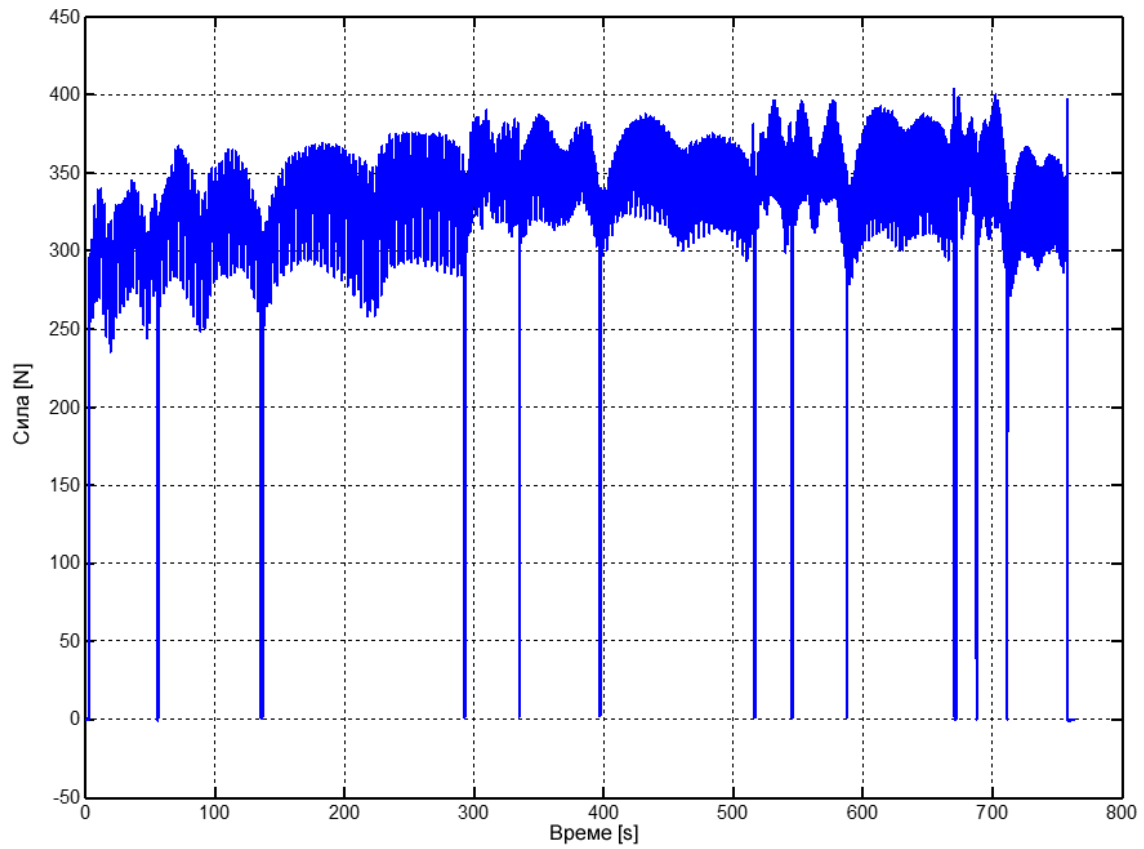
Слика 6.1.6: Запис силе за треће поље са иницијалним  $R_{a(i\text{ni})} = 0.99 \mu\text{m}$



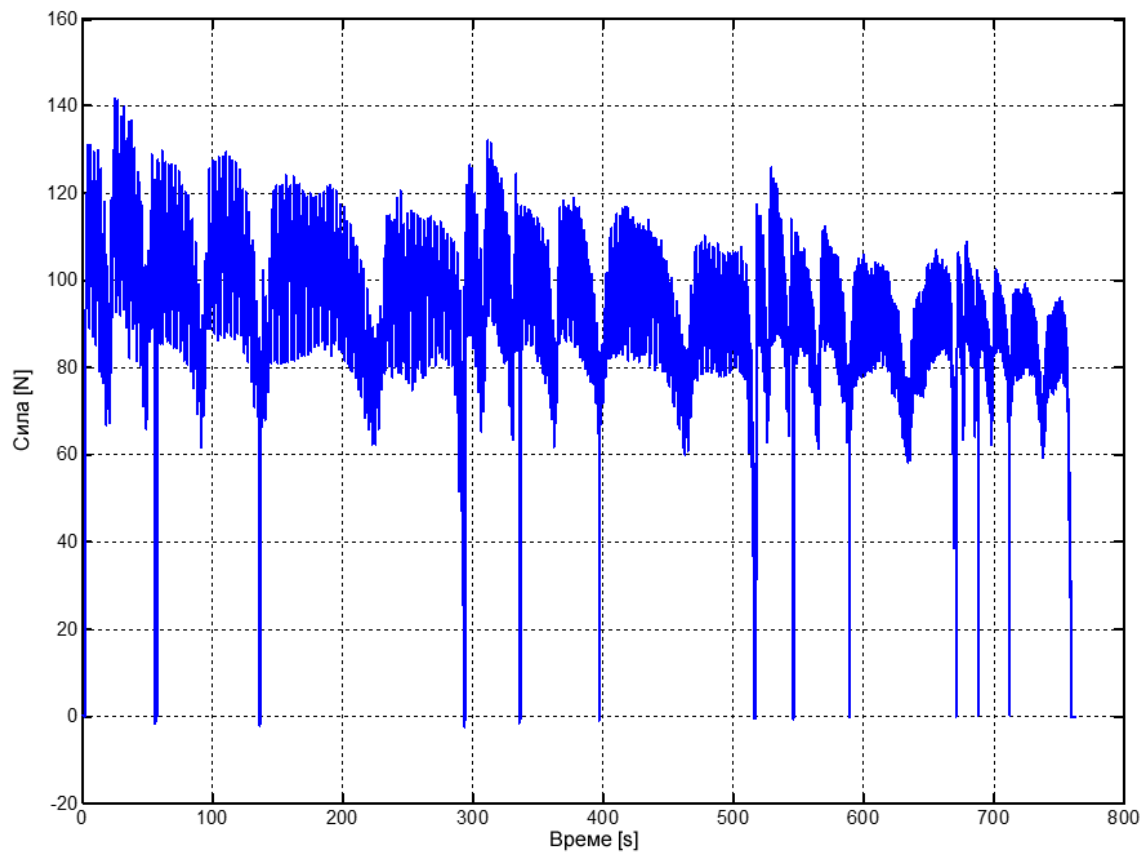
Слика 6.1.7: Запис силе за прво поље са иницијалним  $R_{a(ini)} = 1.39 \mu m$



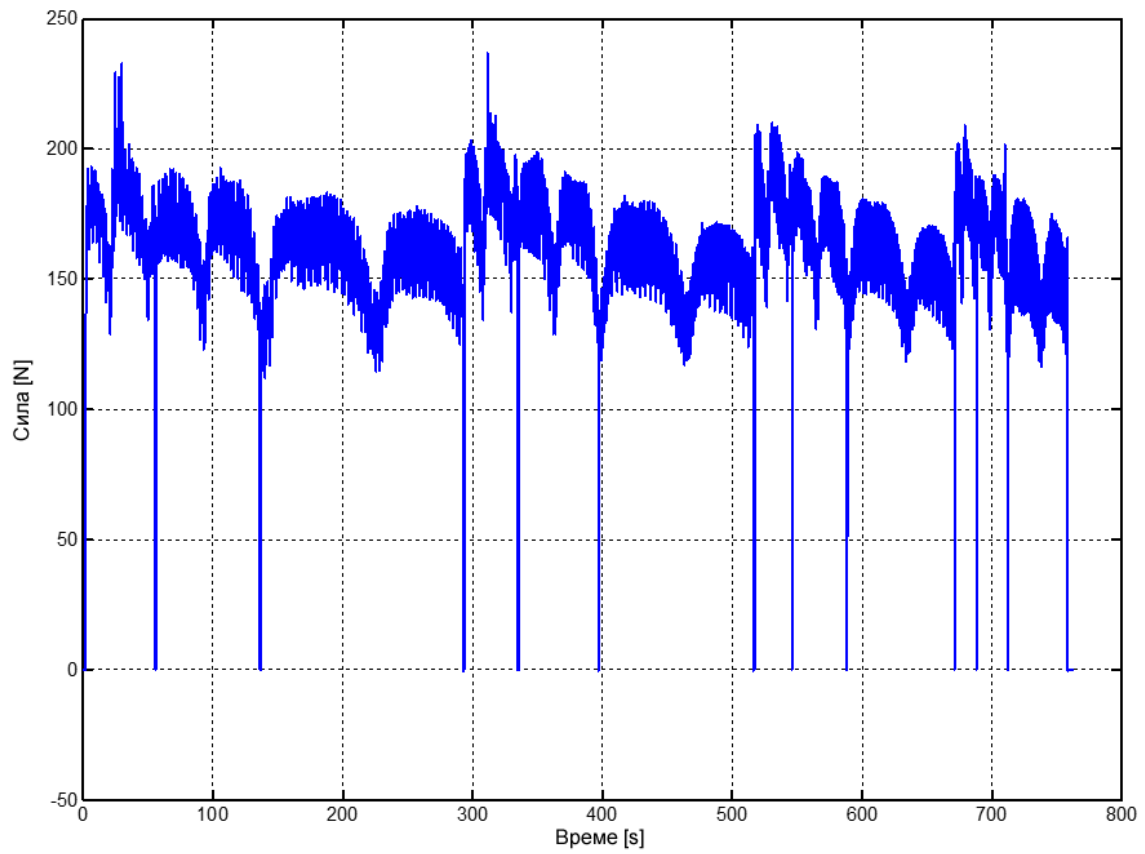
Слика 6.1.8: Запис силе за друго поље са иницијалним  $R_{a(ini)} = 1.39 \mu m$



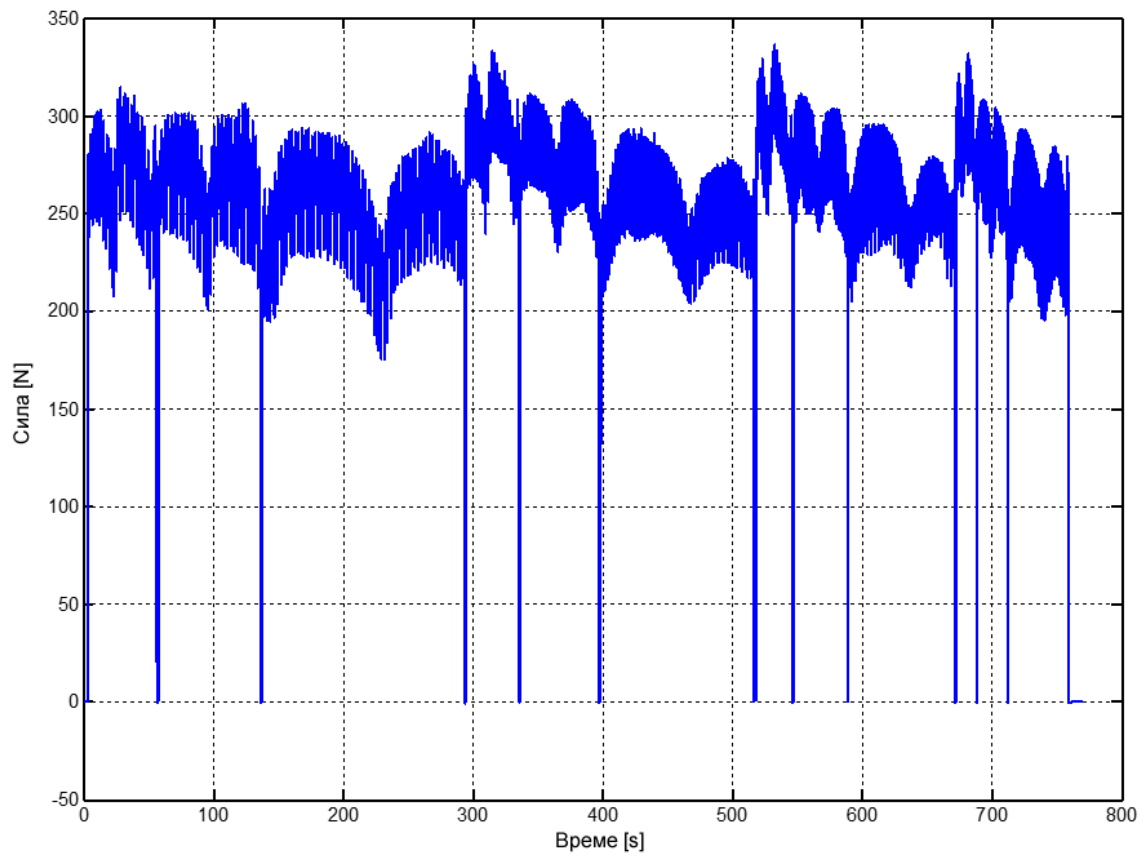
Слика 6.1.9: Запис силе за треће поље са иницијалним  $R_{a(ini)}=1.39 \mu m$



Слика 6.1.10: Запис силе за прво поље са иницијалним  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$



Слика 6.1.11: Запис силе за друго поље са иницијалним  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$



Слика 6.1.12: Запис силе за треће поље са иницијалним  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$



На свим сликама се могу јасно уочити прелази куглице из поља у поље, као и различити временски интервали трајања обраде у појединим пољима што је повезано са посмаком и бројем пролаза. Са нижом вредношћу посмака време потребно да се обради једно поље се продужава. Поред тога, време трајања обраде зависи и од тога колико се поља истовремено обрађује. Детаљни опис слика са записима сила је дат у даљем тексту.

Обрада укупно траје приближно 770 s. У том временском интервалу се јасно уочава 12 различитих вредности силе. Свакој од тих 12 вредности силе се може приписати обрада у одређеном пољу. У интервалу од 0 s па до приближно 300 s траје обрада котрљањем куглице по површини плоче првим пролазом, од приближно 300 s до 510 s траје обрада у другом пролазу, од 510 s до 680 s обрада у трећем и у интервалу од 680 s до 770 s обрада у четвртном пролазу.

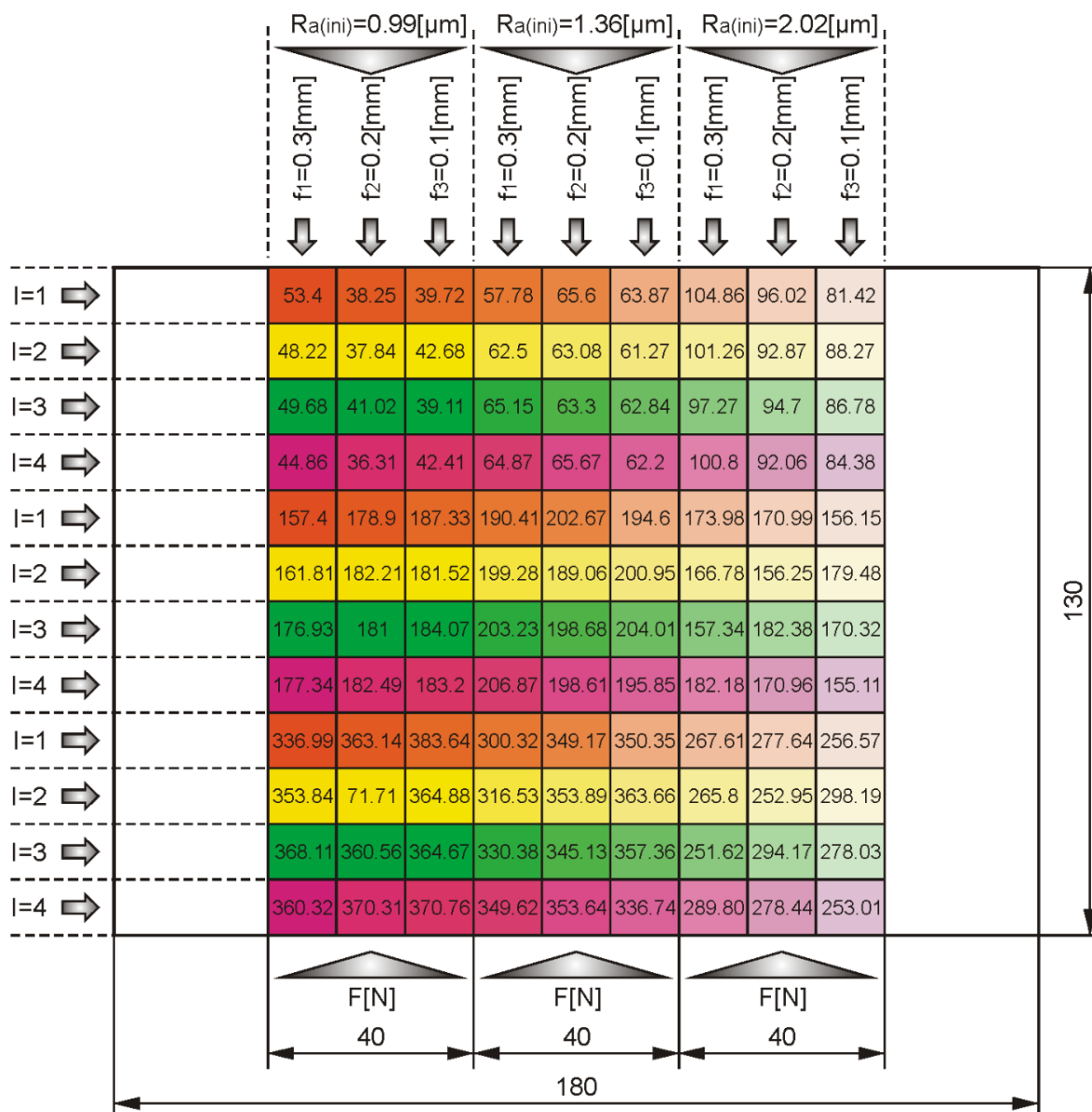
Даље се сваки временски интервал може поделити на више мањих интервала у којима се може уочити обрада са различитим вредностима посмака. Тако се током трајања обраде у првом пролазу могу уочити следећи временски интервали: у временском интервалу од 0 s до приближно 60 s се врши обрада по 4 поља са вредношћу посмака од 0.3 mm; у временском интервалу од приближно 60 s до приближно 130 s се врши обрада по 4 поља са вредношћу посмака од 0.2 mm, и у временском интервалу од приближно 130 s до приближно 300 s се врши обрада по 4 поља са вредношћу посмака од 0.1 mm.

Током трајања обраде у другом пролазу се, такође, уочавају временски интервали обраде са различитим вредностима посмака: од приближно 300 s до 340 s обрада 3 поља са посмаком од 0.3 mm, од приближно 340 s до 400 s обрада 3 поља са посмаком од 0.2 mm и од приближно 400 s до 510 s обрада 3 поља са посмаком од 0.1 mm.

Током трајања обраде у трећем пролазу се, такође, уочавају временски интервали обраде са различитим вредностима посмака: од приближно 510 s до 550 s обрада 2 поља са посмаком од 0.3 mm, од приближно 550 s до 590 s обрада 2 поља са посмаком од 0.2 mm и од приближно 590 s до 680 s обрада 2 поља са посмаком од 0.1 mm.

Током трајања обраде у четвртном пролазу се, поново, уочавају временски интервали обраде са различитим вредностима посмака: од приближно 680 s до 690 s обрада једног поља са посмаком од 0.3 mm, од приближно 690 s до 710 s обрада једног поља са посмаком од 0.2 mm и од приближно 710 s до 770 s обрада једног поља са посмаком од 0.1 mm.

Сигнал записа силе са трокомпонентног динамометра је након мерења обрађен. Сигнал је прво фрагментиран према временским интервалима који су објашњени у претходном тексту. Након тога су одређене максималне и минималне вредности силе, дисперзија силе, односно стандардна одступања и извршено је осредњавање вредности за свако поље посебно. На слици 6.1.13 су шематски приказане резултантне вредности измерених сила за свако поље.



Слика 6.1.13: Шематски приказ поља на обрађеној плочи са средњим вредностима силе у сваком пољу

Након обраде котрљањем куглице по површини плоче коришћењем крутог алата извршено је мерење храпавости сваког поља. У табелама од 6.1.1 до 6.1.3 дати су подаци о измереним параметрима храпавости сваког поља [84]. Табеле су одвојене тако да се у свакој дају подаци о параметрима  $R_a$ ,  $R_p$  и  $R_v$  за три претходно припремљена поља са различитим иницијалним вредностима храпавости. Сумирано три табеле дају податке о свих 108 поља која су обрађена различитим режимима обраде котрљањем куглице.

У табели 6.1.1. су дати подаци за 36 поља на делу плоче који је имао иницијалну површинску храпавост  $R_a=0.99 \mu m$ ,  $R_p=4.33 \mu m$ ,  $R_v=3.22 \mu m$  и  $R_z=7.55 \mu m$ .

У табели 6.1.2. су дати подаци за 36 поља на делу плоче који је имао иницијалну површинску храпавост  $R_a=1.36 \mu m$ ,  $R_p=5.48 \mu m$ ,  $R_v=3.7 \mu m$  и  $R_z=9.18 \mu m$ .

У табели 6.1.3. су дати подаци за 36 поља на делу плоче који је имао иницијалну површинску храпавост  $R_a=2.02 \mu m$ ,  $R_p=7.29 \mu m$ ,  $R_v=7.17 \mu m$  и  $R_z=14.46 \mu m$ .

Табела 6.1.1: Измерене вредности параметара површинске храпавости за део плоче са иницијалном површинском храпавошћу  $R_a=0.99 \mu m$

I	$f_1=0.3 (mm)$				$f_2=0.2 (mm)$				$f_3=0.1 (mm)$			
	F (N)	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$	F (N)	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$	F (N)	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$
1	53.4	0.264	1.17	1.92	38.25	0.174	0.41	0.6	39.72	0.093	0.22	0.98
2	48.22	0.262	0.71	0.89	37.84	0.163	0.43	0.92	42.68	0.170	0.43	1.19
3	49.68	0.365	1.03	1.6	41.02	0.167	0.5	1.34	39.11	0.09	0.33	1.42
4	44.86	0.207	0.71	0.79	36.31	0.163	0.36	1.12	42.41	0.062	0.19	0.41
1	157.4	0.48	0.67	1.07	178.9	0.272	0.95	0.77	187.33	0.07	0.31	0.52
2	161.81	0.52	2	1.6	182.21	0.269	0.52	0.55	181.52	0.119	0.65	0.7
3	176.93	0.5	1.2	0.84	181	0.33	1.8	0.8	184.07	0.103	1.22	0.99
4	177.34	0.537	0.84	1.32	182.49	0.279	0.66	0.6	183.2	0.085	0.62	0.48
1	336.99	0.76	3.7	2.1	363.14	0.4	0.7	0.92	383.64	0.125	0.32	0.61
2	353.84	0.75	1.1	1.7	371.71	0.397	1.03	0.94	364.88	0.125	0.37	0.47
3	368.11	0.79	1.2	2	360.56	0.47	1.1	1.8	364.67	0.15	0.4	1.5
4	360.32	0.75	1.3	1.8	370.31	0.47	0.9	1.3	370.76	0.12	0.5	0.6

Табела 6.1.2: Измерене вредности параметара површинске храпавости за део плоче са иницијалном површинском храпавошћу  $R_a=1.36 \mu m$

I	$f_1=0.3 (mm)$				$f_2=0.2 (mm)$				$f_3=0.1 (mm)$			
	F (N)	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$	F (N)	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$	F (N)	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$
1	57.78	0.56	2	2.3	65.6	0.47	1.3	4.3	63.87	0.16	0.8	1
2	62.5	0.57	1.9	3.8	63.08	0.34	1.2	1.4	61.27	0.29	1.4	1.4
3	65.15	0.38	1.2	1.5	63.3	0.167	0.38	0.8	62.84	0.11	0.9	0.9
4	64.87	0.35	1.1	1.2	65.67	0.35	1.3	1.1	62.2	0.09	0.6	0.5
1	190.41	0.54	1.23	2.14	202.67	0.317	2.87	0.81	194.6	0.225	2.29	0.92
2	199.28	0.575	1.04	1.23	189.06	0.3	0.57	0.58	200.95	0.101	0.62	0.44
3	203.23	0.54	2.8	1.3	198.68	0.315	0.66	0.64	204.01	0.111	0.55	0.55
4	206.87	0.56	1.1	1.4	198.61	0.38	3	1.2	195.85	0.26	2.7	1.2
1	300.32	0.71	2.1	1.6	349.17	0.333	0.66	1.37	350.35	0.124	0.34	0.39
2	316.53	0.81	2.3	2.2	345.13	0.5	1.2	1.1	363.66	0.17	0.5	0.7
3	330.38	0.87	2	2.1	353.89	0.46	1.1	1.3	357.36	0.22	0.7	0.8
4	349.62	0.86	2.2	2.4	353.64	0.47	3.4	1.4	336.74	0.22	0.8	1.4

Табела 6.1.3: Измерене вредности параметара површинске храпавости за део плоче са иницијалном површинском храпавошћу  $R_a=2.02 \mu m$

I	$f_1=0.3 (mm)$				$f_2=0.2 (mm)$				$f_3=0.1 (mm)$			
	F (N)	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$	F (N)	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$	F (N)	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$
1	104.86	0.44	1.17	1.59	96.02	0.23	0.41	1.91	81.42	0.072	0.21	0.85
2	101.26	0.431	1.43	1.19	92.87	0.25	0.65	0.85	88.27	0.111	0.67	1.01
3	97.24	0.414	0.9	1.46	94.7	0.234	0.68	0.66	86.78	0.085	0.52	0.83
4	100.8	0.374	0.6	0.94	92.06	0.221	0.56	0.56	84.38	0.076	0.25	0.43
1	173.98	0.56	1.3	1.5	170.99	0.382	0.75	0.91	156.15	0.21	1.5	1
2	166.78	0.55	1.1	1.6	156.25	0.291	0.6	0.66	179.48	0.067	0.24	0.14
3	157.34	0.54	1.1	1.4	182.38	0.29	0.6	0.7	170.32	0.17	2	1.1
4	182.18	0.51	1.1	1.2	170.96	0.256	0.52	0.78	155.11	0.091	0.26	0.36
1	267.61	0.63	1.4	1.7	277.64	0.423	1.07	0.59	256.57	0.072	0.19	0.2
2	265.8	0.72	1.5	1.9	252.95	0.301	1.1	0.77	298.19	0.105	0.38	0.55
3	251.62	0.68	1.5	1.6	294.17	0.654	1.48	1.42	278.03	0.148	0.53	0.5
4	289.8	0.67	1.4	1.8	278.44	0.635	1.42	1.39	253.01	0.138	0.43	0.44

Посматрањем резултата из претходне три табеле може се уочити да се најповољнији резултати, са аспекта побољшања површинске храпавости, добијају при нижим вредностима посмака. У сва три случаја најнижа вредност површинске храпавости се добија за посмак  $f_3=0.1 mm$ . Такође се може уочити да се најнижа вредност површинске храпавости добија при нижим вредностима силе којом се куглица притиска о плочу. У сва три случаја се најнижа вредност површинске храпавости добија за вредности силе које су у опсегу од приближно 39 N до 85 N. Посматрањем утицаја броја пролаза не може се извући конкретан закључак јер у неким случајевима долази до побољшања храпавости са повећањем броја пролаза док се у другим случајевима дешава супротно. Анализа утицаја сваког параметра ће бити извршена нешто касније а сада ће се истаћи само најбољи резултати у сваком од три претходно припремљена поља различитих вредности иницијалне храпавости.

У пољу са иницијалном површинском храпавошћу од  $R_a=0.99 \mu m$  најповољнији резултат је  $R_a=0.062 \mu m$  и он се добија након обраде у четвртом пролазу, силом од приближно 40 N и посмаком  $f=0.1 mm$ .

У пољу са иницијалном површинском храпавошћу од  $R_a=1.36 \mu m$  најповољнији резултат је  $R_a=0.09 \mu m$  и он се добија након обраде у четвртом пролазу, силом од приближно 62 N и посмаком  $f=0.1 mm$ .

У пољу са иницијалном површинском храпавошћу од  $R_a=2.02 \mu m$  најповољнији резултат је  $R_a=0.067 \mu m$  и он се добија након обраде у другом пролазу, силом од приближно 180 N и посмаком  $f=0.1 mm$ .

У сва три случаја обраде на нумерички контролисаној глодалици се добија површина која се на основу вредности  $R_a$  може сврстати у површине које су обрађене обрадом полирањем, хоновањем или суперфиношом (табела 1.1). При томе се не посматрају најповољнији резултати већ сви, укупни, резултати у свим пољима.

У оквиру сета експеримената који су извршени на нумерички управљаној глодалици урађен је и експеримент са модификованом верзијом алата за обраду котрљањем куглице. Иницијална вредност параметра  $R_a$  је  $2,02 \mu m$  док је обрада вршена у једном пролазу са посмаком  $f=0.2 mm$  и брзином кретања куглице по површини предмета обраде  $v=2000 mm/min$ . Вредност силе је варирана у распону од  $50 N$  до  $300 N$  са кораком од  $50 N$ . Мерење параметра храпавости је вршено на исти начин као и у претходном случају.

Табела 6.1.4: Вредности параметра храпавости  $R_a$  након обраде коришћењем модификоване верзије алата са опругама различитих крутости

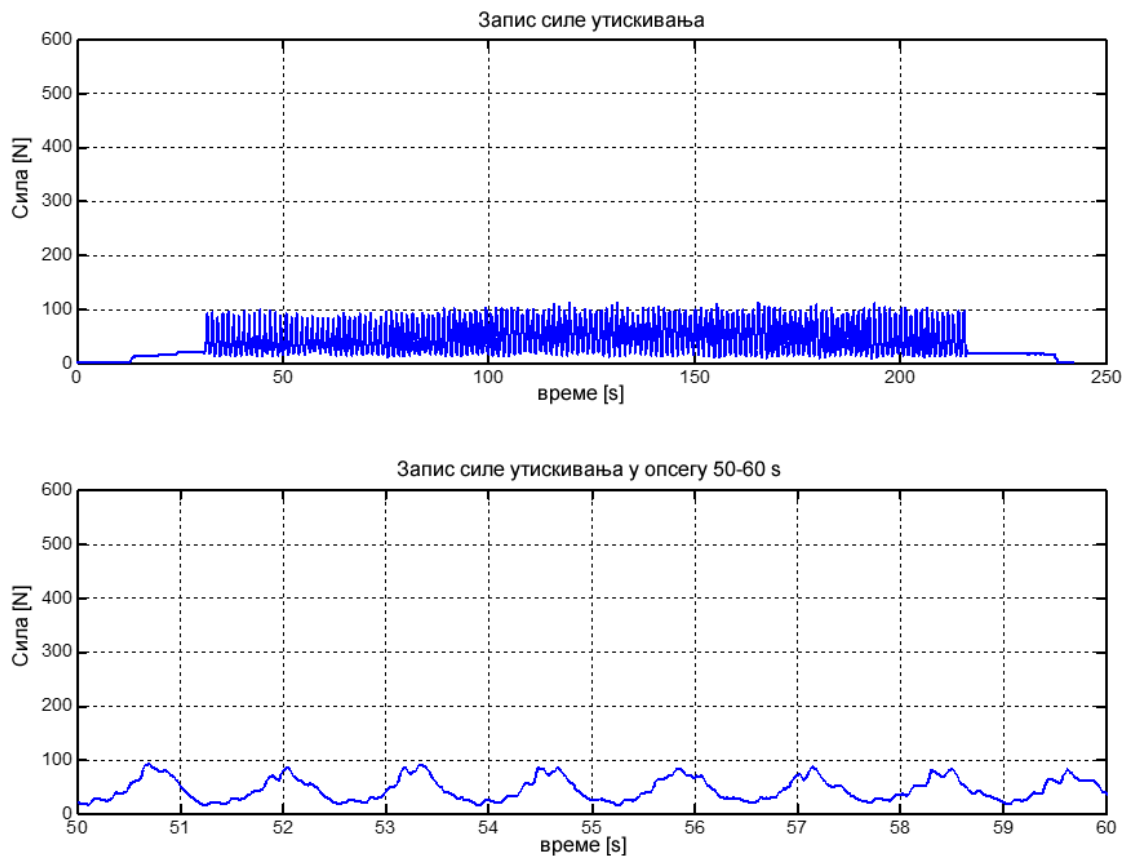
	Крутост опруге $\kappa$ (N/mm)				
	58.8	71.2	87.0	190.5	210.5
$F$ (N)	$R_a$ ( $\mu m$ )				
50	0.434	0.775	0.519	0.319	0.45
100	0.561	0.85	1.126	0.505	0.671
150	0.673	1.176	2.13	0.544	0.823
200	0.76	1.783	2.063	0.648	1.066
250	0.88	1.38	2.026	0.963	1.76
300	1.103	1.49	2.036	1.536	2.086

Посматрајући табелу 6.1.4. се може уочити да се коришћењем модификоване верзије алата са опругом долази до побољшања параметра површинске храпавости. Међутим вредности које се у овом случају постижу не могу се упоредити са вредностима параметара храпавости које се добијају коришћењем крутог алата. У овом случају, ако се осврнемо на табелу 1.1 и вредности параметра храпавости  $R_a$ , резултујуће површине добијене обрадом котрљањем куглице по плочи имају  $R_a$  у распону од  $0.319 \mu m$  до  $2.086 \mu m$  и према томе одговарају површинама које се могу добити обрадама брушењем (фино и грубо), глодањем (фино и грубо), стругањем (фино и грубо), финим рендисањем и сачмарењем. Обрадом котрљањем куглице по површини предмета обраде коришћењем алата који у себи има опружни механизам се, на основу резултата, може постићи квалитет површине, са аспекта побољшања параметара храпавости, који се може добити обрадом брушењем.

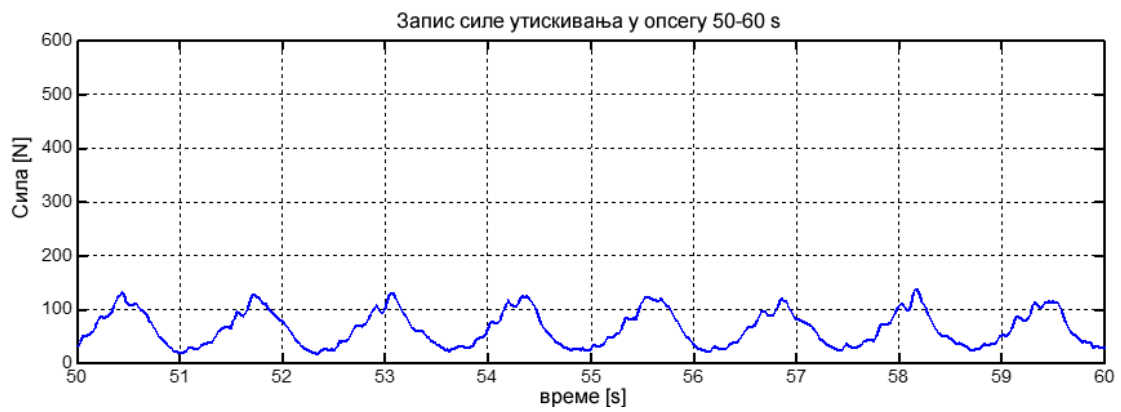
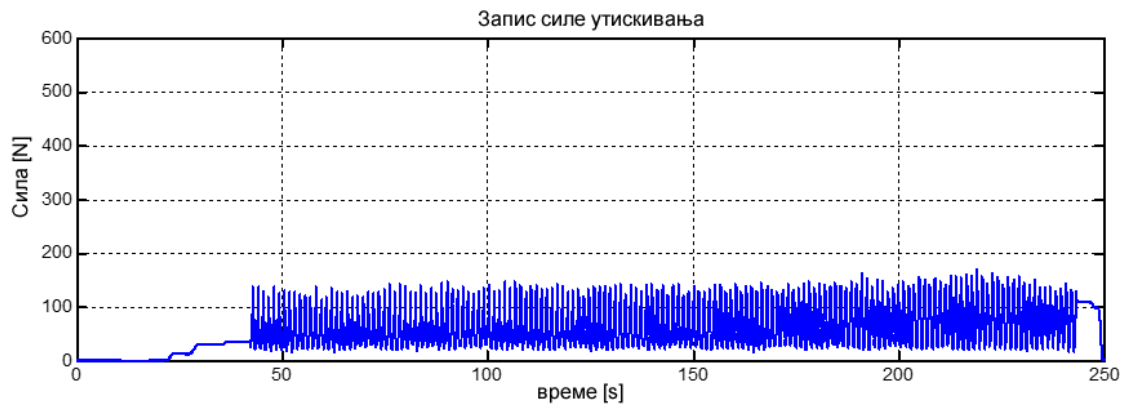
## 6.2. Резултати експеримената изведених на универзалном стругу коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде

Планом експеримената, представљеним у претходном поглављу у потпоглављу 5.3, предвиђена је обрада котрљањем куглице по цилиндричном предмету обраде шипкастог облика који је подељен на два поља претходно обрађена стругањем са два различита режима обраде. Параметри обраде стругањем и котрљањем куглице су дати у претходном поглављу у поднаслову 5.3.

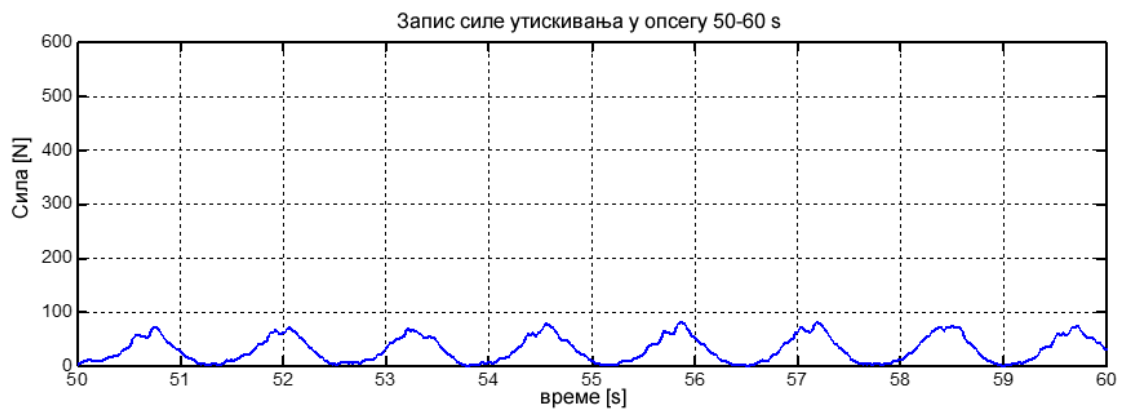
У овом случају је сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде праћена континуално преко трокомпонентног динамометра. Ниво оптерећења је подешаван динамометром непосредно пре почетка обраде котрљањем куглице. Обрада је извршена у 12 поља са различитим вредностима силе. На сликама од 6.2.1 до 6.1.12 приказани су записи силе  $F_y$  којом се куглица притиска о површину предмета обраде. Сила се креће у распону од  $32.3\text{ N}$  до  $444.28\text{ N}$  што одговара дубинама продирања куглице у материјал предмета обраде по  $y$ -оси у распону од  $1\ \mu\text{m}$  до  $15.2\ \mu\text{m}$ . Сви записи сила су дати у истој размери како би се могли међусобно упоредити.



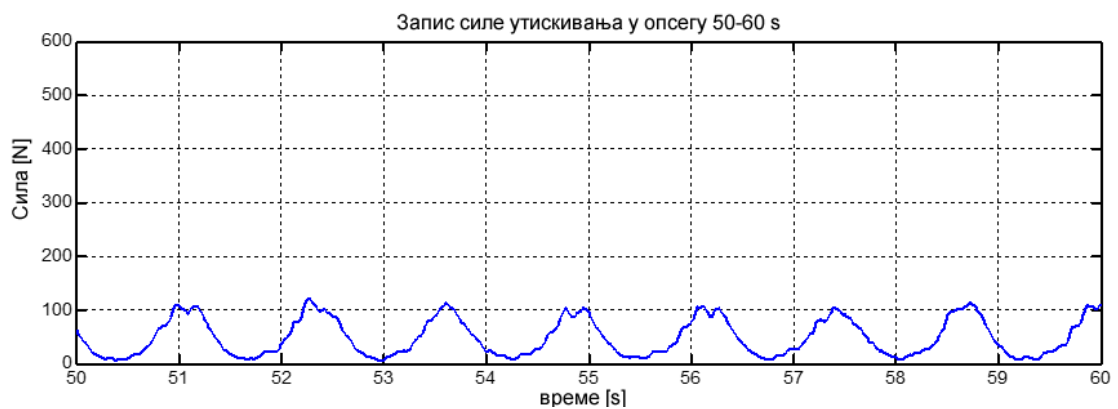
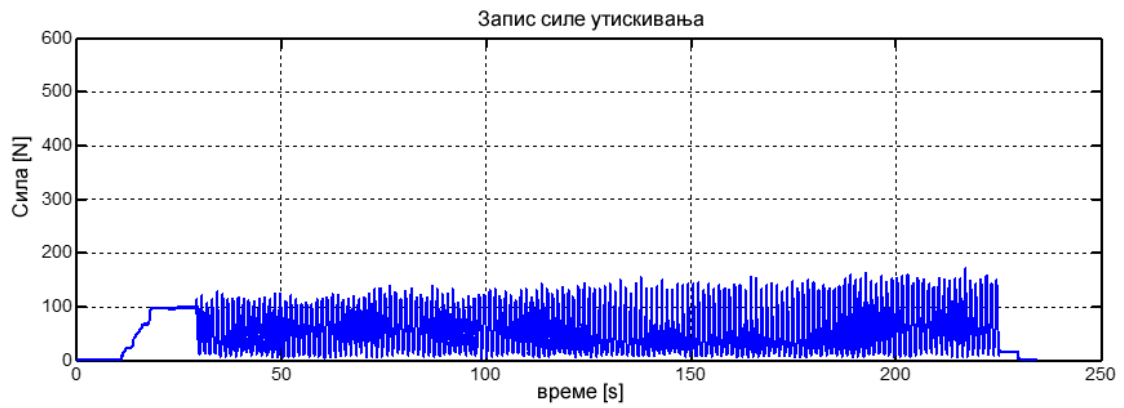
Слика 6.2.1: Запис силе за прво поље са грубом претходном обрадом



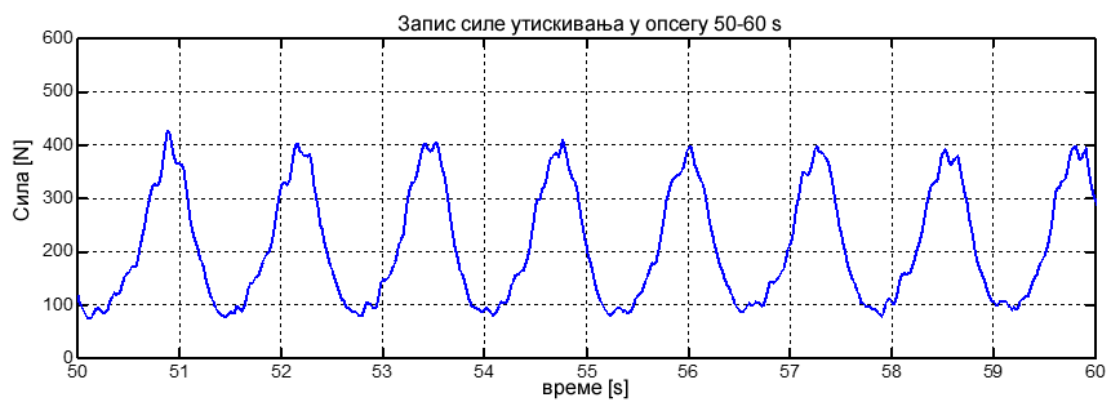
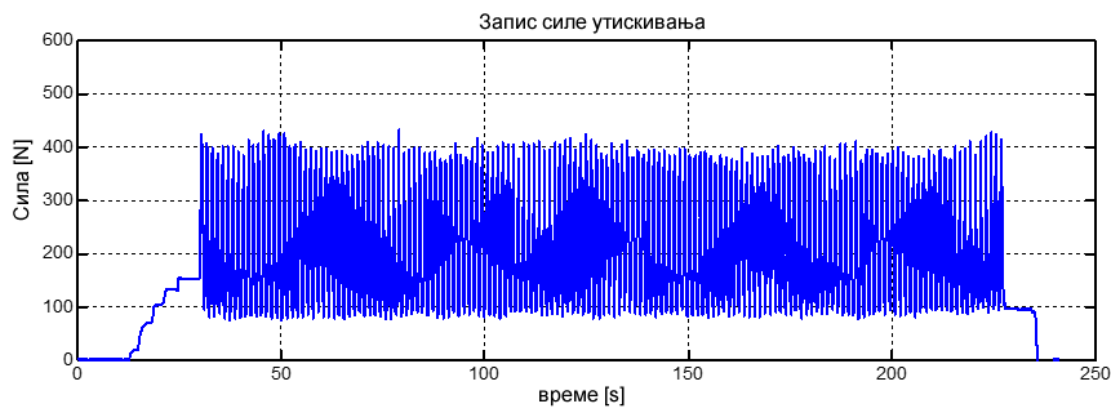
Слика 6.2.2: Запис силе за дуго поље са грубом претходном обрадом



Слика 6.2.3: Запис силе за треће поље са грубом претходном обрадом

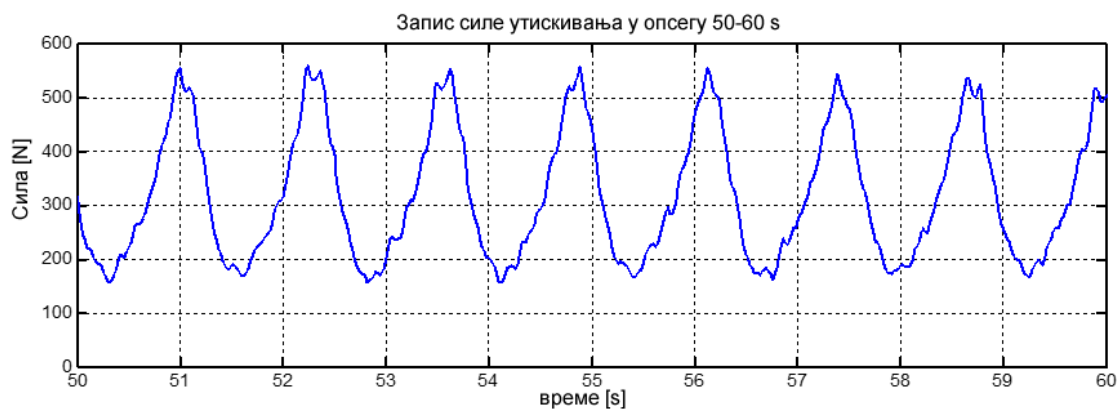
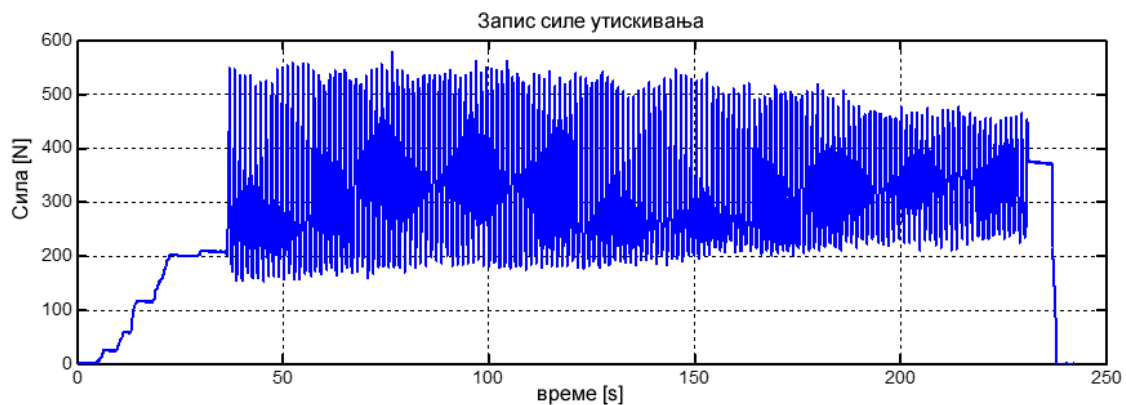


Слика 6.2.4: Запис силе за четврто поље са грубом претходном обрадом

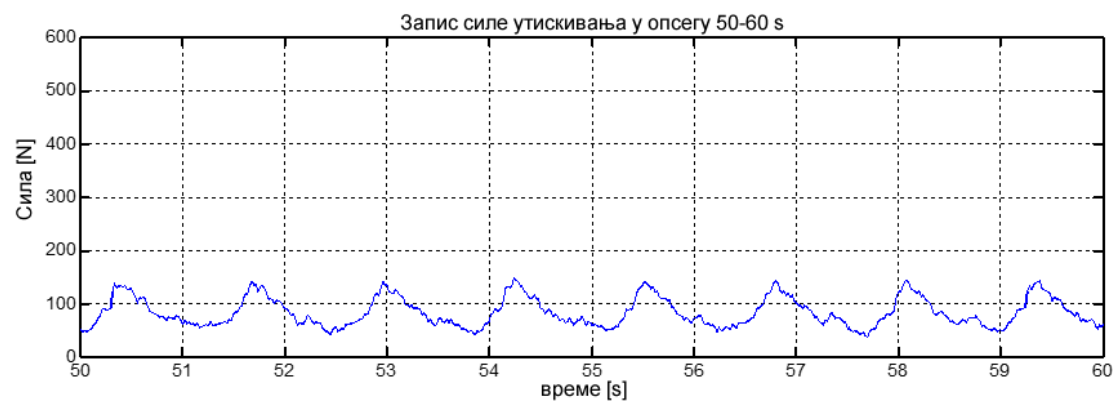
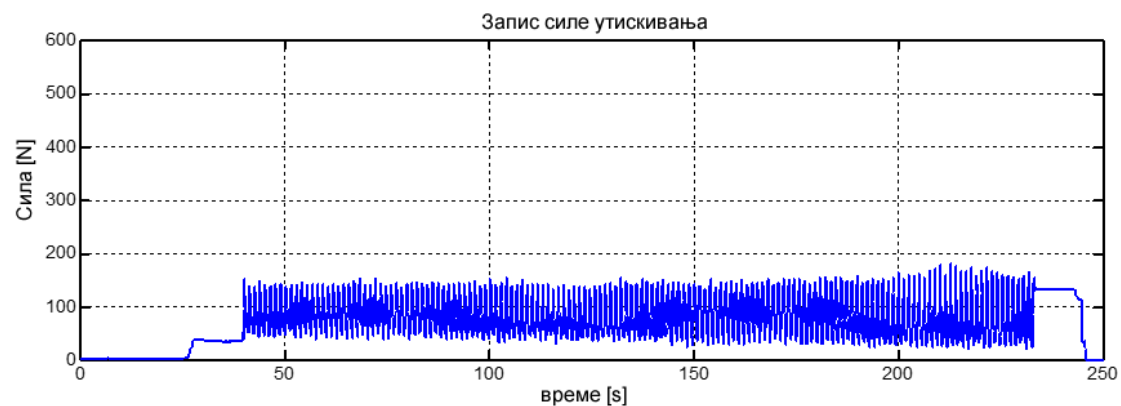


Слика 6.2.5: Запис силе за пето поље са грубом претходном обрадом

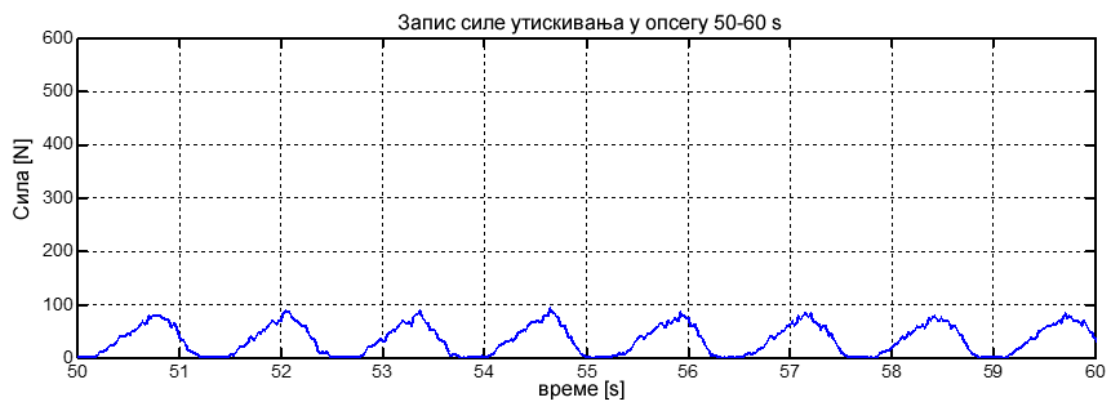
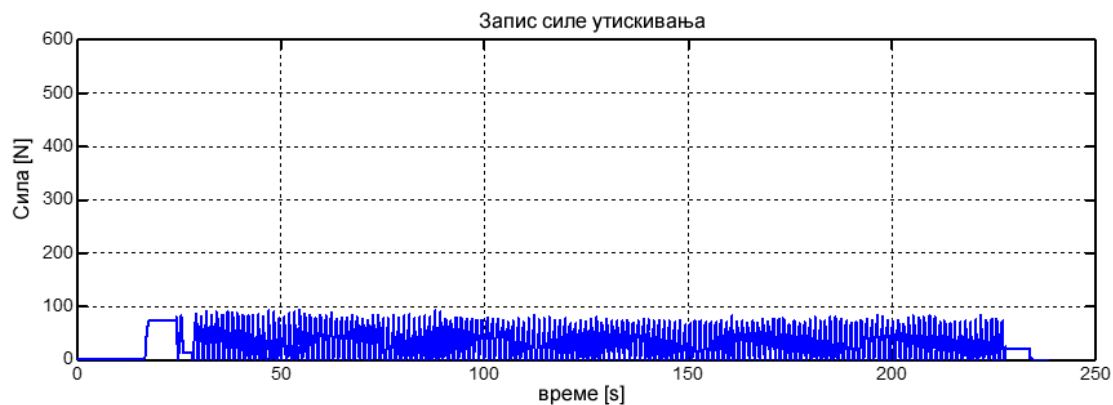




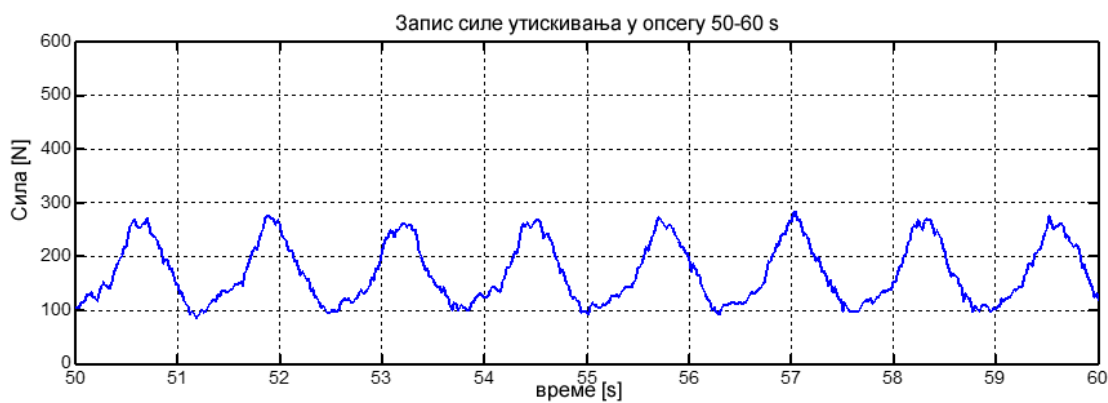
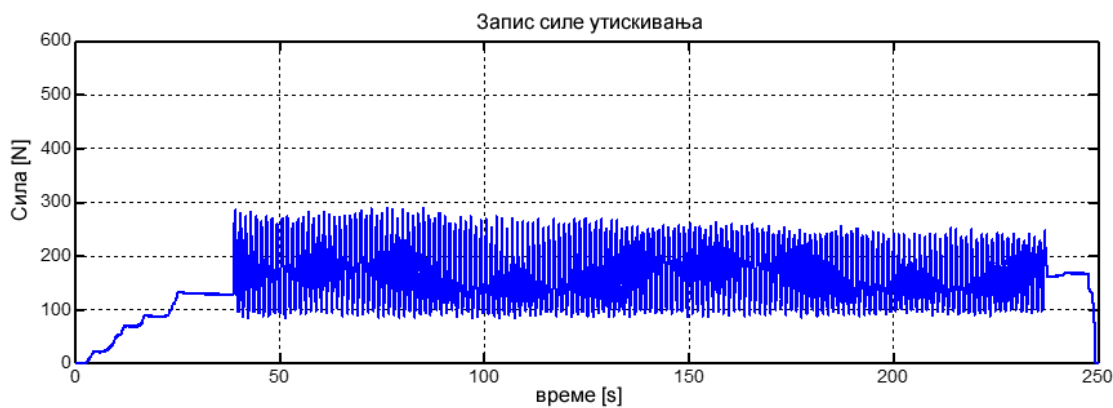
Слика 6.2.6: Запис силе за шесто поље са грубом претходном обрадом



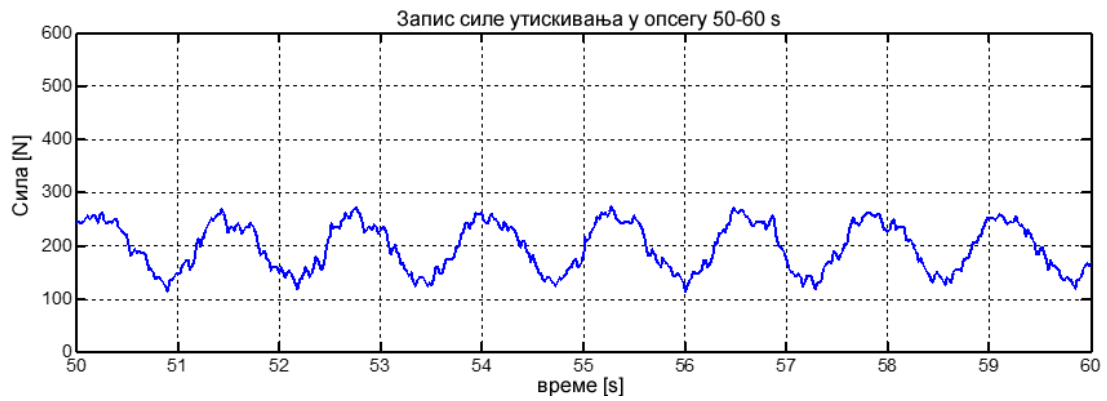
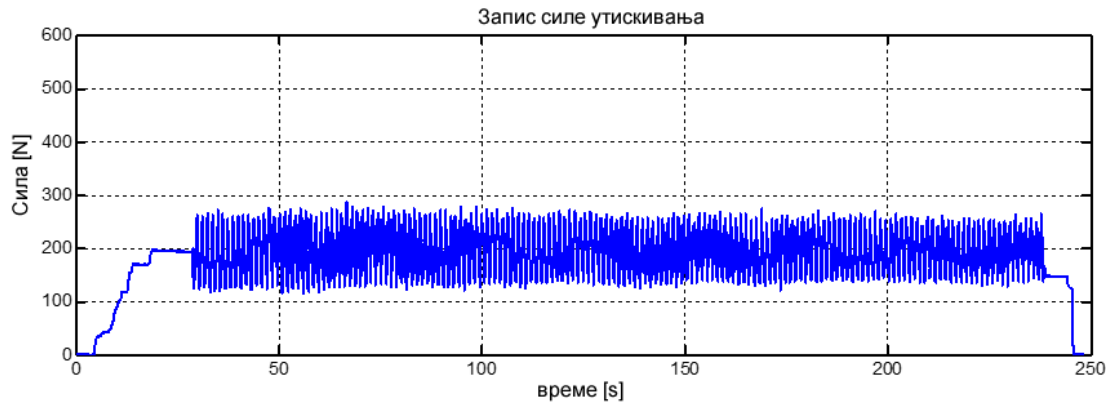
Слика 6.2.7: Запис силе за прво поље са фином претходном обрадом



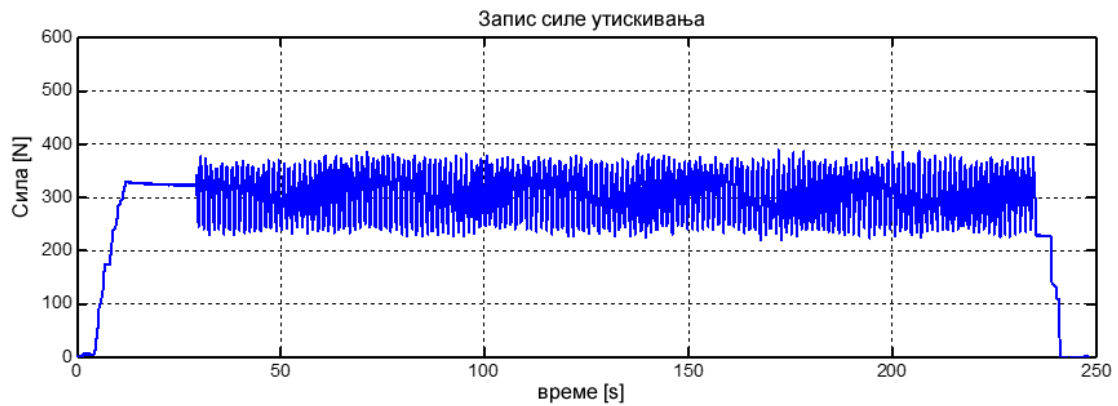
Слика 6.2.8: Запис силе за друго поље са фином претходном обрадом



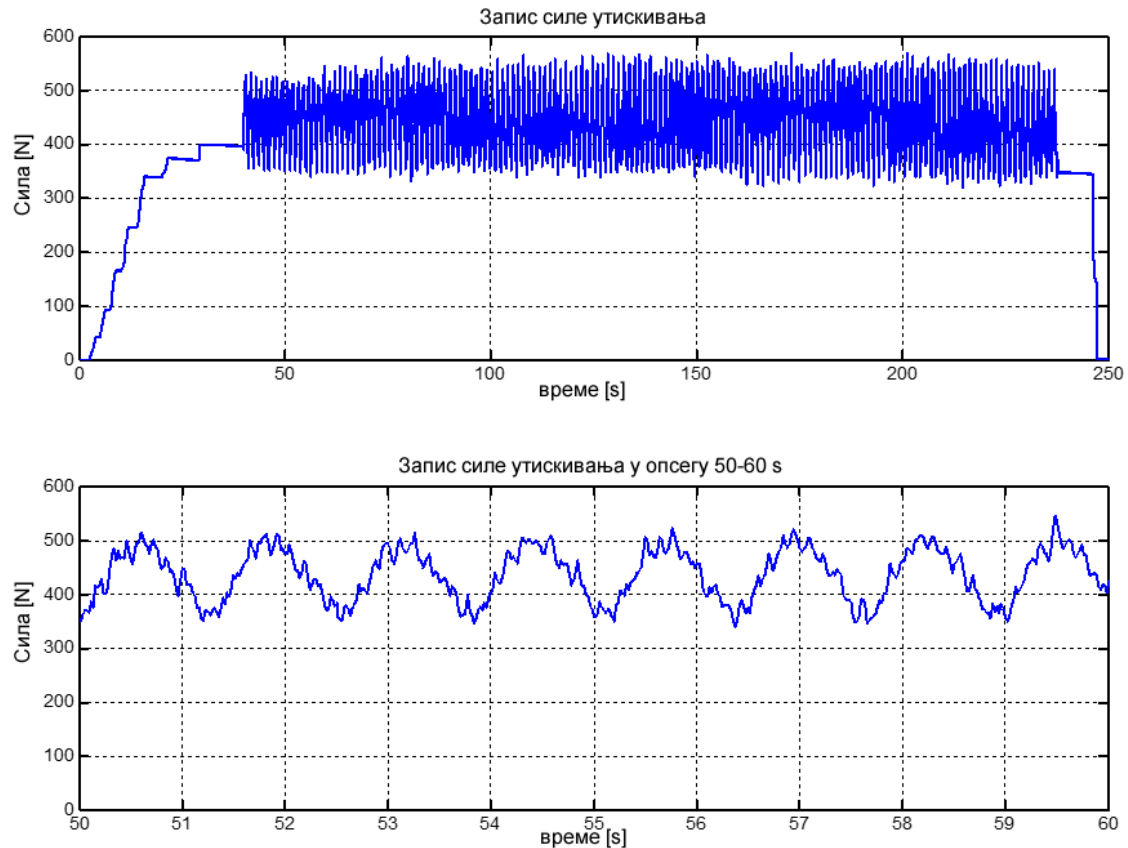
Слика 6.2.9: Запис силе за треће поље са фином претходном обрадом



Слика 6.2.10: Запис силе за четврто поље са финим претходном обрадом



Слика 6.2.11: Запис силе за пето поље са финим претходном обрадом



Слика 6.2.12: Запис силе за шесто поље са фином претходном обрадом

На свим сликама на којима су приказани записи силе се може уочити периодични шаблон варијације силе у оквиру једног обртаја предмета обраде. Варијација силе се понавља на сваких  $1.33\text{ s}$  и то приближно одговара примењеном броју обртаја приликом обраде котрљањем куглице од  $45\text{ obr/min}$ . Ово указује на варијацију силе којом се куглица притиска о материјал предмета обраде што као последицу има варијацију резултантне површинске храпавости. До ове појаве долази због грешке циркуларности предмета обраде, одступања кружности и равности обртања, као и због еластичних деформација предмета обраде. И најмања грешка, било да је реч о грешци циркуларности или о одступању тачности обртања, води до варијација контактне притиска између алата и предмета обраде.

Након обраде котрљањем куглице према плану експеримента описаног у претходном поглављу у потпоглављу 5.3. вршена су мерења параметара храпавости  $R_a$  и  $R_p$ . Референтна дужина на којој су мерени параметри храпавости износи  $3\text{ mm} \times 0.8\text{ mm} = 2.4\text{ mm}$ . Параметри храпавости су у сваком пољу мерени дуж изводница  $AB$ ,  $CD$  и  $EF$  у три радијална правца која се налазе под углом од  $120^\circ$  у односу на осу испитиваног узорка (слика 5.3.1).

У табелама 6.2.1. и 6.2.2. [85] приказани су резултати мерења параметара храпавости у свих 12 поља, при чему су у табели 6.2.1. резултати добијени на површини претходно обрађеној на стругу грубом претходном обрадом, док су у табели 6.2.2. резултати добијени на површини фином претходном обрадом.

Табела 6.2.1: Резултати експерименталног истраживања на делу предмета обраде са грубом претходном обрадом

Силе и параметри храпавости		Груба претходна обрада						
		$R_a (\mu m)$		$R_p (\mu m)$		$R_v (\mu m)$		
		7.3 ÷ 7.53		15 ÷ 16		13 ÷ 14		
		Број мерења -варијација силе-						
		1	2	3	4	5	6	
Силе и дисперзије сила	$F_{ysr} (N)$	47.98	67.41	32.30	55.53	213.28	320.70	
	$\sigma_{Fn} (N)$	25.21	36.32	26.05	40.51	103.20	103.46	
	$F_{ymin} (N)$	8.14	16.74	0	3.16	74.32	125.57	
	$F_{ymax} (N)$	111.68	169.94	103.88	169.23	432.60	577.61	
Изводнице на предмету обраде	AB	$R_a (\mu m)$	6.6	6.9	6.6	6.9	4.1	1.04
		$R_p (\mu m)$	13	15	13	15	9	1.9
		$y (\mu m)$	3	1	3	1	7	14.1
	CD	$R_a (\mu m)$	5.7	5.06	3.69	4.31	0.57	0.84
		$R_p (\mu m)$	12	8.8	7.8	8.6	1.3	1.8
		$y (\mu m)$	4	7.2	8.2	7.4	14.7	14.2
	EF	$R_a (\mu m)$	6.59	6.85	6.1	6.35	2.75	1.2
		$R_p (\mu m)$	13.1	14.3	12.3	12.6	4.3	2.3
		$y (\mu m)$	1.9	0.7	2.7	2.4	10.7	12.7

Табела 6.2.2: Резултати експерименталног истраживања на делу предмета обраде са фином претходном обрадом

Силе и параметри храпавости		Фина претходна обрада						
		$R_a (\mu m)$		$R_p (\mu m)$		$R_v (\mu m)$		
		4.5 ÷ 5.4		14 ÷ 17		16 ÷ 19		
		Број мерења -варијација силе-						
		1	2	3	4	5	6	
Силе и дисперзије сила	$F_{ysr} (N)$	81.75	166.08	194.86	322.37	305.21	444.28	
	$\sigma_{Fn} (N)$	34.71	52.74	39.88	47.98	38.31	56.77	
	$F_{ymin} (N)$	21.31	83.00	113.49	216.88	220.71	318.03	
	$F_{ymax} (N)$	182.97	289.21	287.77	428.39	389.76	569.26	
Изводнице на предмету обраде	AB	$R_a (\mu m)$	0.84	1.33	1.05	0.49	0.85	0.774
		$R_p (\mu m)$	3.6	3.5	2.5	1.3	2	2.27
		$y (\mu m)$	13.7	13.8	14.8	16	15.3	15.03
	CD	$R_a (\mu m)$	1.82	0.627	0.51	0.41	0.5	0.52
		$R_p (\mu m)$	5	2.02	1.4	1.5	1.2	1.3
		$y (\mu m)$	12	14.89	15.6	15.5	15.8	15.7
	EF	$R_a (\mu m)$	1.89	0.88	0.76	0.54	1.01	0.55
		$R_p (\mu m)$	6.1	2.4	2.4	1.5	2	2.8
		$y (\mu m)$	7.9	11.6	11.6	12.5	12	11.2

У обе табеле су дати подаци о средњој вредности силе којом се куглица притиска о површину шипке, њена стандардна девијација, минимална вредност силе и максимална вредност силе. Поред тога, изнесени су подаци о параметрима храпавости  $R_a$ ,  $R_p$  и  $R_v$  који су измерени на површини која је претходно обрађена стругањем. У оба случаја, при претходнј грубој и финој обради, дати су интервали у којима се налазе вредности иницијалних параметара храпавости због тога што су мерени на исти начин као и параметри храпавости након обраде котрљањем куглице по површини шипке, односно по три изводнице на предмету обраде  $AB$ ,  $CD$  и  $EF$ . На крају, што је била и сврха експеримента, дати су подаци о параметрима храпавости  $R_a$  и  $R_p$  након обраде котрљањем куглице по површини шипке и подаци о дубини пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $y$ . Дубина пенетрације  $y$  је добијена тако што је од иницијалне максималне висине испупчења профила  $R_{p(init)}$  одузета максимална висина испупчења профила након обраде котрљањем куглице  $R_{p(F)}$ .

$$y = R_{p(init)} - R_{p(F)} \quad (6.2.1)$$

Значи, вредности  $y$  представљају реалну дубину пенетрације куглице у профил храпавости материјала предмета обраде. Вредности су мерене након процеса обраде котрљањем куглице, што елиминише грешке које настају услед еластичне деформације предмета обраде, система алата и система стезања и позиционирања. Мерењем параметара по три изводнице умањује се негативни утицај технолошких грешака односно одступања тачности обртања предмета обраде. Утицај одступања тачности обртања се манифестује тако што се на записима сила може уочити дисперзија силе. Ово није само логична претпоставка, напротив, ова појава је уочена током самог експеримента. Свака варијација силе којом се куглица притиска о материјал предмета обраде је резултирала девијацијама параметара површинске храпавости и то се може видети по резултатима у претходне две табеле.

На основу резултата из табела 6.2.1 и 6.2.2 може се уочити да се најповољнији резултати са аспекта побољшања површинске храпавости постижу за вредности дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде,  $y$ , које су приближне вредностима максималне висине испупчења профила  $R_p$ . За обе иницијалне машинске обраде на стругу се може уочити да вредност  $R_a$  веома опада са повећањем дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде до вредности која је приближна  $R_p$ , а након тога наставља да опада мањим интензитетом. У оба случаја је приметно да се најповољнији резултати добијају за вредности:

$$y = R_p = 14 \mu m \div 17 \mu m \quad (6.2.2)$$

На крају, најбитнија опсервација за резултате добијене експериментима који су изведени на универзалном стругу коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде је да се, за обе претходне обраде, најниже вредности  $R_a$  добијају за дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде,  $y$ , које су приближно једнаке максималној висини испупчења профила храпавости  $R_p$ .

### 6.3. Резултати нумеричких експеримената изведених коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде

Планом експеримената, представљеним у претходном поглављу у поднаслову 5.4., предвиђено је да се уради седам симулација при чему ће се варирати дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде. С обзиром на то да је максимална висина неравнина теоријског профила храпавости  $R_z=35.1 \mu m$  и да је дубина пенетрације куглице  $\delta$  у материјал предмета обраде варирана са кораком од  $5 \mu m$ , то значи да ће са седмом, последњом, симулацијом бити покривен случај код којег се врши обрада котрљањем куглице са дубинама пенетрације куглице у материјал предмета обраде која су реда величине максималне висине неравнина  $R_z$ .

У табели 6.3.1. [136] су дате вредности параметара храпавости  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_v$  и  $R_z$  у зависности од дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta$  за почетни профил храпавости, где је  $\delta=0 \mu m$ , и за свих седам нумеричких експеримената.

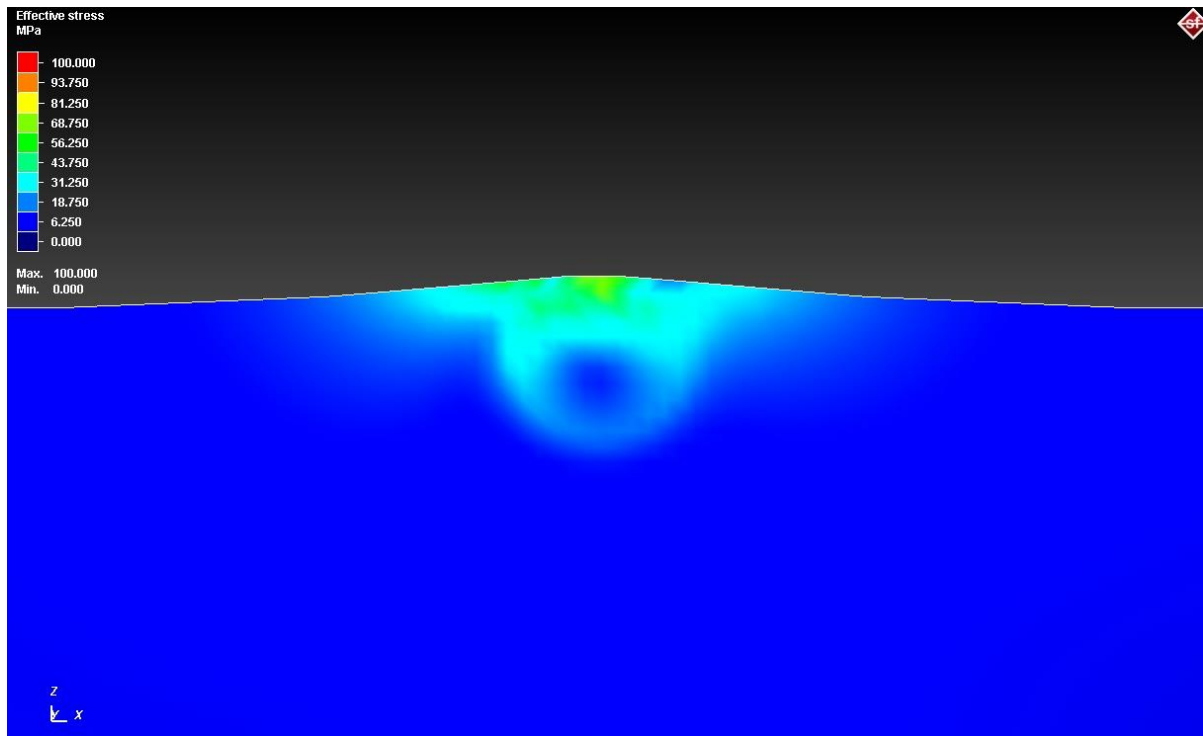
Табела 6.3.1: Параметри површинске храпавости пре и након симулација процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде

	$\delta (\mu m)$	$R_a (\mu m)$	$R_p (\mu m)$	$R_v (\mu m)$	$R_z (\mu m)$
Иницијална храпавост	-	10.90	22.76	12.34	35.10
Симулација 1	5	8.94	20.25	11.38	31.63
Симулација 2	10	8.73	18.87	11.35	30.22
Симулација 3	15	8.06	13.38	10.88	24.26
Симулација 4	20	6.63	11.41	10.07	21.48
Симулација 5	25	4.04	6.31	7.85	14.16
Симулација 6	30	4.26	6.01	17.69	23.70
Симулација 7	35	6.82	20.27	18.92	39.19

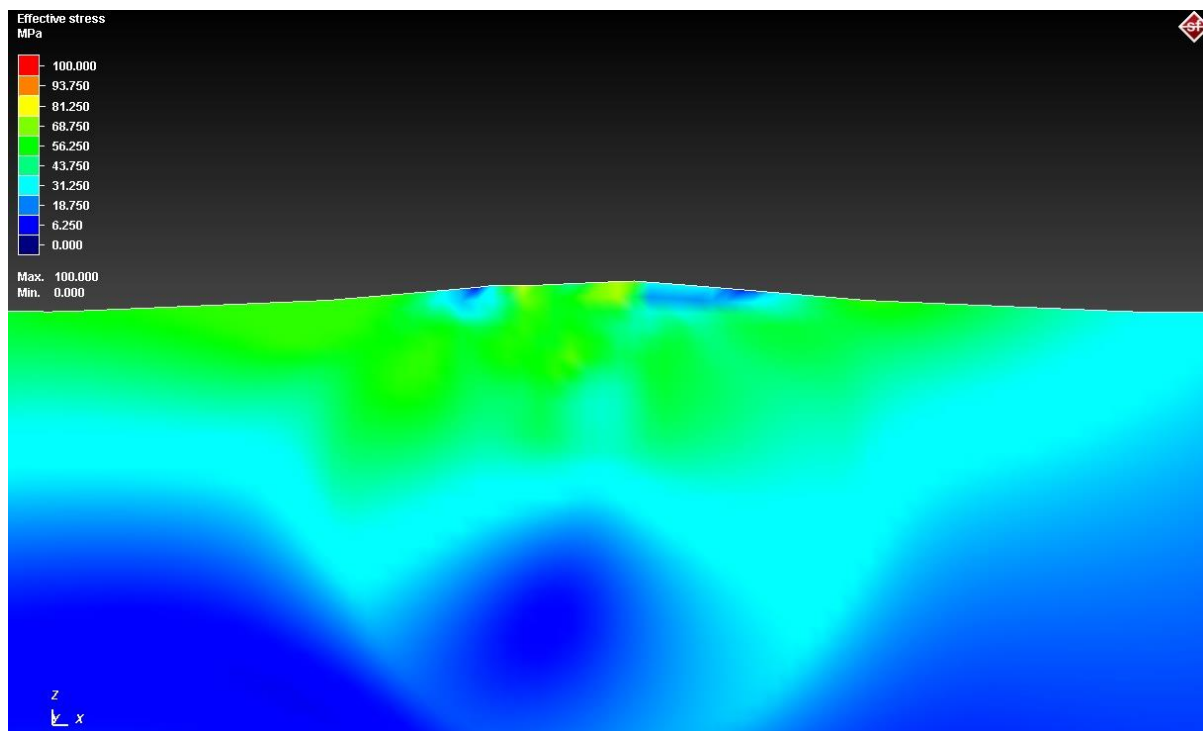
Најповољнији резултати, са аспекта побољшања површинске храпавости, остварени су за случај дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде од  $\delta=25 \mu m$ . У том случају је иницијални профил храпавости са параметрима  $R_a=10.9 \mu m$ ,  $R_p=22.76 \mu m$ ,  $R_v=12.34 \mu m$  и  $R_z=35.1 \mu m$  сведен на профил храпавости са параметрима  $R_a=4.04 \mu m$ ,  $R_p=6.31 \mu m$ ,  $R_v=7.85 \mu m$  и  $R_z=14.16 \mu m$ .

Поред тога, са дубинама пенетрације  $\delta$  које су приближне вредности максималне висине испупчења профила,  $15 \mu m$ ,  $20 \mu m$  и  $30 \mu m$ , такође су приметна значајна побољшања  $R_a$ . Са малим дубинама пенетрације  $5 \mu m$  и  $10 \mu m$  су такође приметна побољшања, али у знатно мањем обиму. Једино је у случају када је дубина пенетрације куглице приближно једнака максималној висини неравнина  $\delta \approx R_z$  није примећено побољшање параметара храпавости, чак долази до извесног погоршања.

На сликама од 6.3.1 до 6.3.7 приказана су напонска стања у предмету обраде након извршене обраде котрљањем куглице за свих седам симулација. Приказани су ефективни, *Von Mises*-ови, заостали напони.

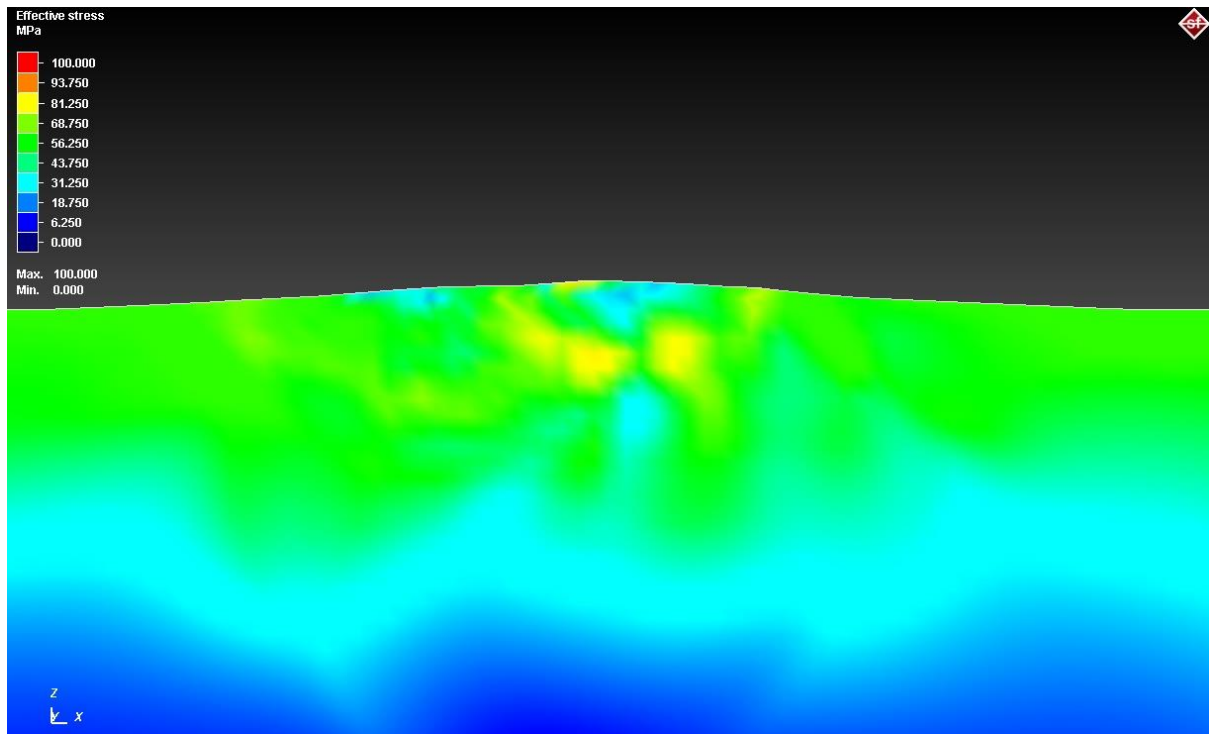


Слика 6.3.1: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=5 \mu m$

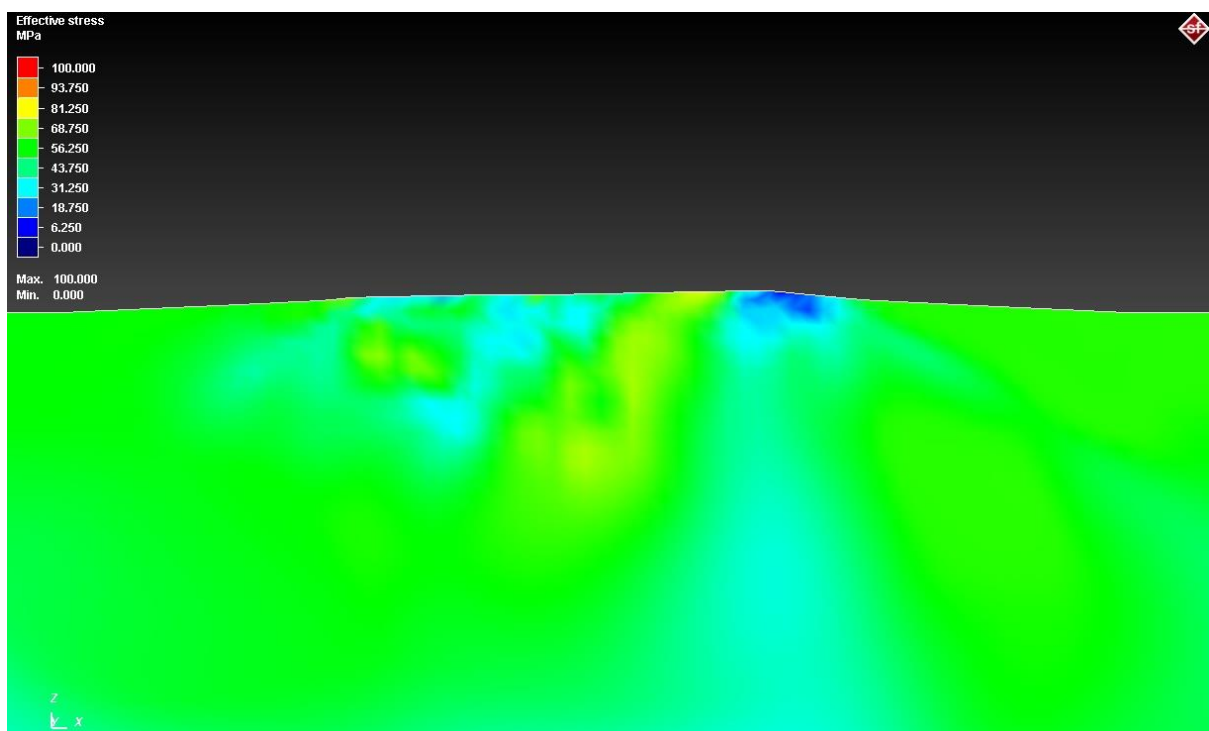


Слика 6.3.2: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=10 \mu m$

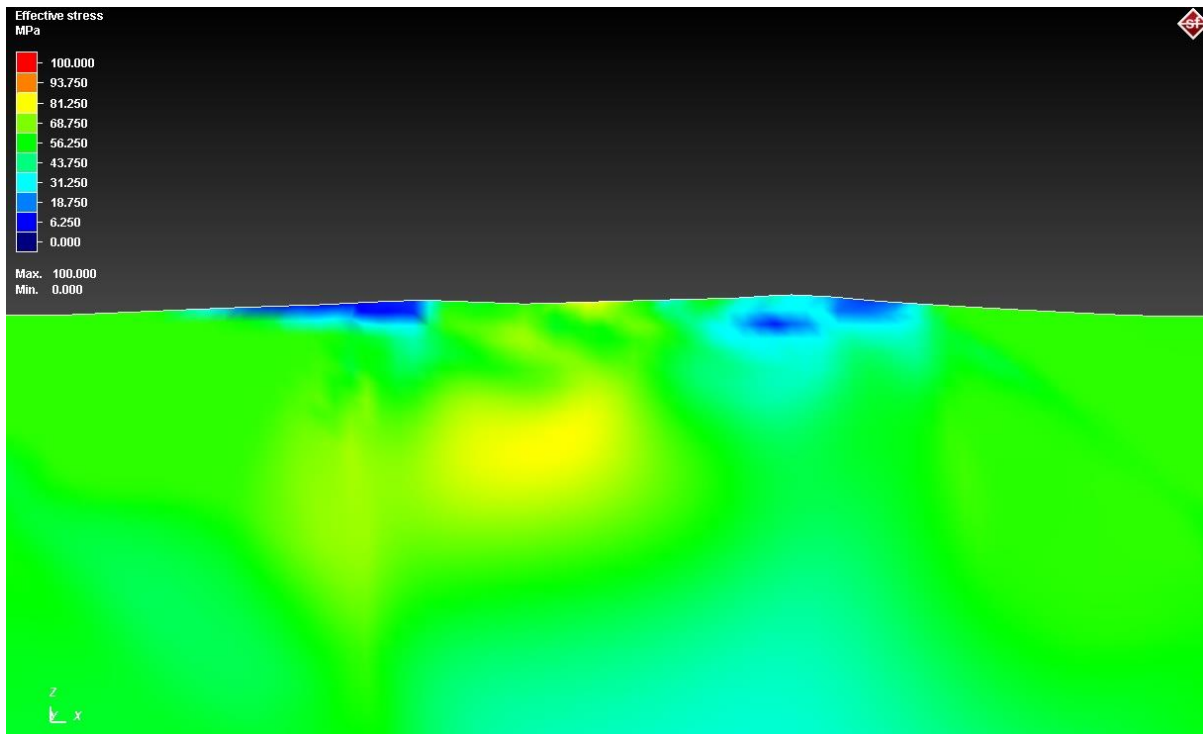




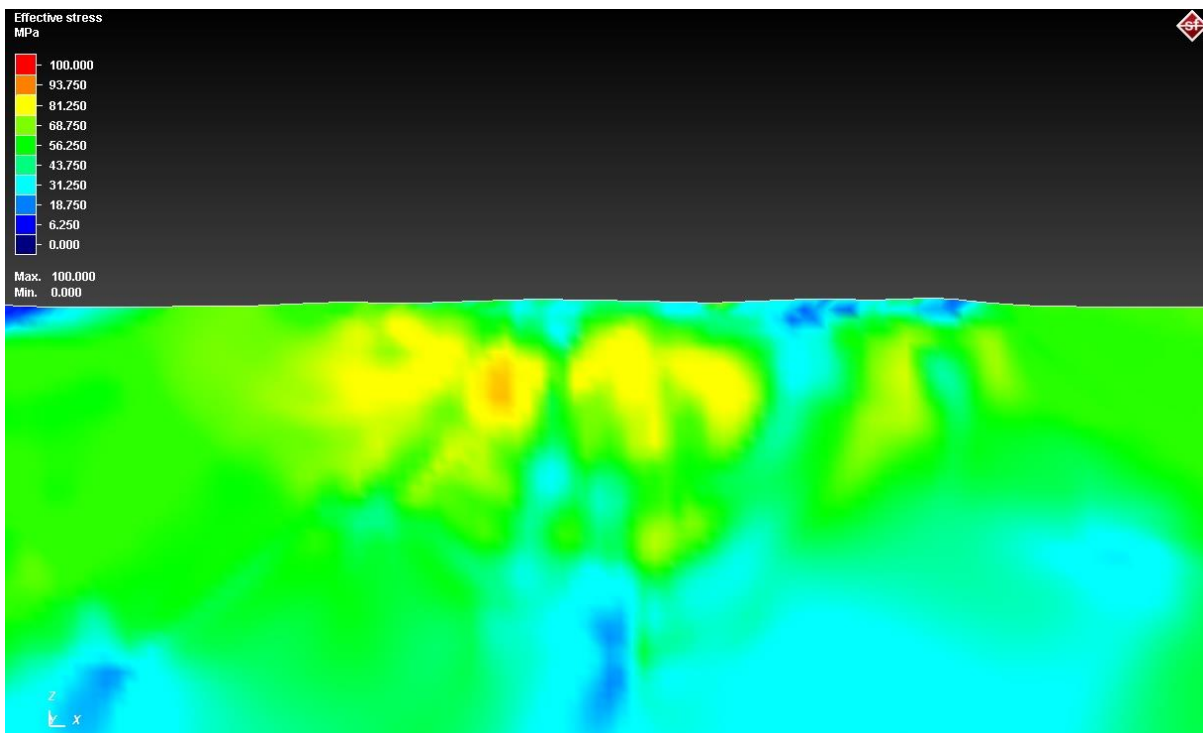
Слика 6.3.3: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=15 \mu\text{m}$



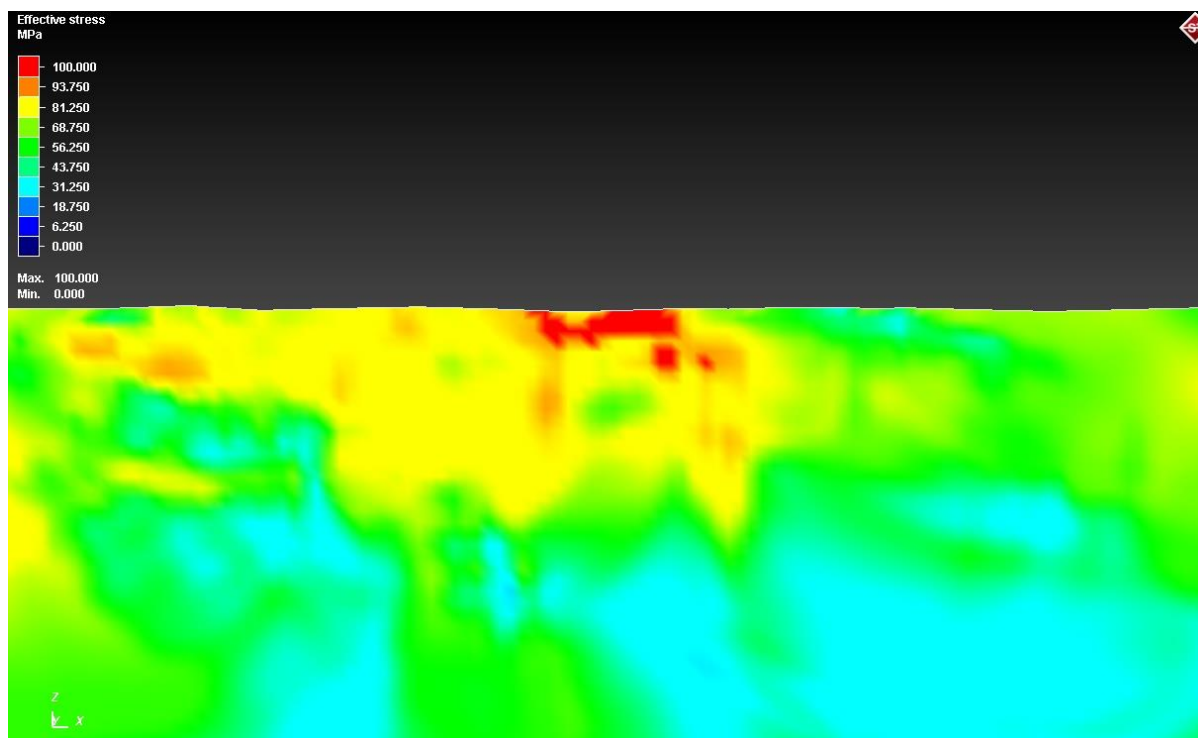
Слика 6.3.4: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=20 \mu\text{m}$



Слика 6.3.5: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=25 \mu\text{m}$



Слика 6.3.6: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дубином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=30 \mu\text{m}$



Слика 6.3.7: Заостали напони у предмету обраде након обраде котрљањем куглице са дужином пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=35 \mu m$

Посматрањем слика 6.3.1-6.3.7 може се закључити да дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде пресудно утиче на величину и распоред напонских поља у предмету обраде. Како би то било што уочљивије и како би се на основу боја могло вршити упоређивање вредности напона, легенда вредности напона је иста на свим сликама. Повећањем дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta$  повећава се и вредност заосталих напона у предмету обраде као и дубина до које се заостали притисни напони могу регистровати. Максимална вредност заосталих напона се, за свих седам симулација, може уочити непосредно испод површине предмета обраде и она износи  $70 MPa$  за  $\delta=5 \mu m$  па до  $130 MPa$  за  $\delta=35 \mu m$ . Дубина до које се могу регистровати извесне вредности заосталих напона је  $0.1 mm$  за  $\delta=5 \mu m$ , а чак  $1 mm$  за  $\delta=35 \mu m$ . Детаљније разматрање ће бити дато у наредном поглављу.

Како би се верификовали резултати добијени *FEM* анализом, изведен је додатни експеримент. У претходном поглављу је описан план експеримента. Као и у претходно описаним нумеричким експериментима варирана је дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде, при чему је иницијална дубина пенетрације на првом пољу приближно једнака  $\delta=2 \mu m$ . На сваком следећем пољу је дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде повећавана за  $2 \mu m$ , па је тако на последњем, шеснаестом пољу дубина  $\delta=32 \mu m$ . У табели 6.3.2 су дате вредности параметара храпавости  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_v$  и  $R_z$  у зависности од дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде за свих 16 поља као и подаци о иницијалном профилу храпавости.

Табела 6.3.2: Параметри површинске храпавости пре и након процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде

	$\delta$ ( $\mu m$ )	$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_p$ ( $\mu m$ )	$R_v$ ( $\mu m$ )	$R_z$ ( $\mu m$ )
Иницијална храпавост	-	2.91	15.4	14.8	31.2
Поље 1	2	1.78	7.4	8.9	16.3
Поље 2	4	1.22	4.7	5.3	10.0
Поље 3	6	1.08	2.8	5.7	8.5
Поље 4	8	0.74	2.0	2.3	4.3
Поље 5	10	0.49	1.1	5.7	6.8
Поље 6	12	0.53	2.8	3.7	6.5
Поље 7	14	0.50	1.4	1.8	3.2
Поље 8	16	0.33	1.2	1.2	2.4
Поље 9	18	0.61	4.2	2.3	6.5
Поље 10	20	0.64	3.8	5.8	9.6
Поље 11	22	0.58	3.0	1.5	4.5
Поље 12	24	0.71	5.5	2.0	7.5
Поље 13	26	1.09	2.5	4.3	6.8
Поље 14	28	0.98	1.7	4.6	6.3
Поље 15	30	0.85	2.0	5.1	7.1
Поље 16	32	0.86	2.0	4.1	6.1

Најповољнији резултати са аспекта побољшања површинске храпавости су постигнути у осмом пољу где је дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде износила  $\delta=16 \mu m$  што приближно одговара вредности максималне висине испупчења профила  $\delta \approx R_p$ . У том пољу је иницијални профил храпавости са параметрима  $R_a=2.91 \mu m$ ,  $R_p=15.4 \mu m$ ,  $R_v=14.8 \mu m$  и  $R_z=31.2 \mu m$  сведен на профил храпавости са параметрима  $R_a=0.33 \mu m$ ,  $R_p=1.2 \mu m$ ,  $R_v=1.2 \mu m$  и  $R_z=2.4 \mu m$ .

Поред наведеног у свим пољима је дошло до извесног побољшања параметара храпавости. Може се уочити да до одређене дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде долази до значајних побољшања параметара храпавости. Највећа побољшања се постижу у околини вредности дубине продирања куглице која је блиска максималној висини испупчења профила, а када се та вредност прекорачи и даље постоји тренд побољшања, с тим да су она нешто мањег обима.

#### 6.4. Резултати експеримената изведених на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за унутрашњу обраду цилиндричних површина

Планом експеримената, представљеним у претходном поглављу у потпоглављу 5.5, предвиђено је да се изврши обрада шест претходно припремљених отвора котрљањем куглице коришћењем крутог алата намењеног за унутрашњу обраду цилиндричних површина који је представљен у потпоглављу 4.2.

Иницијална површинска храпавост претходно припремљених отвора је мерена на свих шест отвора по три изводнице у радијалном правцу које се налазе под углом од  $120^\circ$ . У табели 6.4.1. су дате вредности мерења средњег аритметичког одступања профила од средње линије профила  $R_a$  за свих шест отвора.

Табела 6.4.1: Резултати мерења иницијалне површинске храпавости за свих шест отвора

Редни број отвора	$R_a (\mu m)$		
	Мерење 1	Мерење 2	Мерење 3
1	0.826	0.838	0.798
2	0.822	0.729	0.776
3	0.789	0.796	0.836
4	0.842	0.815	0.805
5	0.843	0.858	0.869
6	0.841	0.828	0.813

Укупно постоји 18 резултата мерења који су осредњени и узети као полазна мера површинске храпавости за свих шест посматраних отвора при чему је аритметичка средња вредност површинске храпавости  $R_a=0.818 \mu m$ . Њена вредност се креће у распону од  $R_{amin}=0.729 \mu m$  до  $R_{amax}=0.869 \mu m$ , а вредност стандардне девијације износи  $\sigma(R_a)=0.031 \mu m$ .

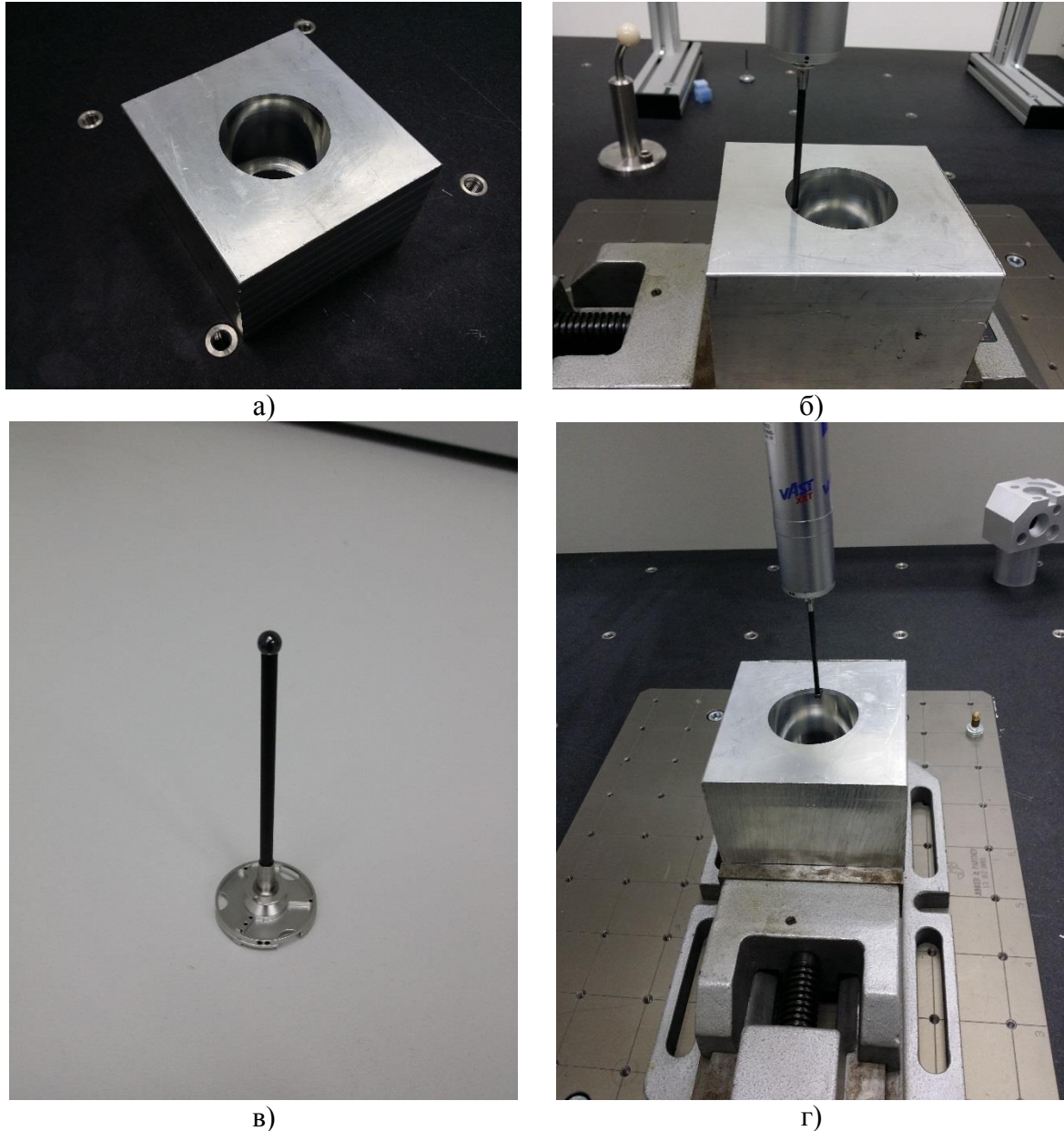
Након обраде котрљањем куглице по површини отвора извршена су мерења храпавости на свих шест отвора коришћењем *Talysurf 6* профилометра на референтној дужини  $3 \times 0.8 = 2.4 mm$ . Резултати мерења су дати у табели 6.4.2 [137].

Табела 6.4.2: Резултати мерења резултујуће површинске храпавости

Редни број отвора	1	2	3	4	5	6
$R_a (\mu m)$	0.600	0.560	0.535	0.576	0.603	0.629

Посматрањем резултата може се уочити да је у свим отворима дошло до побољшања површинске храпавости. Највеће побољшање је остварено на трећем отвору и оно приближно износи 35%. Треба нагласити да је примарни циљ при конструкцији алата за обраду отвора постизање димензионе и геометријске тачности, а да је унапређење површинске храпавости очекивано али не и од пресудног значаја.

Третирани отвори су мерени пре и након процеса завршне обраде на координатној мерној машини *Carl Zeiss Contura G2*. Мерења су извршена у контролисаним микро климатским условима на температури која се кретала у опсегу  $20.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  при влажности ваздуха  $50\% \pm 2\%$ . Приликом мерења је коришћен прав мерни пипак дужине  $75\text{ mm}$  са пречником куглице  $2.5\text{ mm}$ . За мерење је коришћена стратегија скенирања са брзином скенирања од  $25\text{ mm/s}$ , при чему је инкремент на коме се прикупљају тачке  $0.5\text{ mm}$ . На слици 6.4.1 је приказ процеса мерења са карактеристичним детаљима.



Слика 6.4.1: Приказ процеса мерења: а) предмет обраде на столу координатне мерне машине у процесу аклиматизације, б) процес мерења, в) мерни пипак дужине  $75\text{ mm}$  са пречником куглице  $2.5\text{ mm}$  и г) стезни прибор коришћен током процеса мерења

У табели 6.4.3. [137] су дати резултати мерења за свих шест отвора. Номинални пречник је  $D_{nom}=54.0020\text{ mm}$ , пречник  $D_{mill}$  је пречник добијен након претходне обраде глодањем и пречник  $D_{bur}$  је пречник добијен након обраде котрљањем куглице. Резултати који су

приказани у табели су осредњене вредности добијене претходно описаном стратегијом скенирања.

Табела 6.4.3: Резултати мерења пречника отвора

Редни број отвора	Пречник			Девиијација
	$D_{nom}$	$D_{mill}$	$D_{bur}$	$ D_{nom} - D_{bur} $
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	54.0020	53.9999	53.9932	0.0088
2	54.0020	53.9789	53.9998	0.0022
3	54.0020	53.9688	53.9993	0.0027
4	54.0020	53.9599	54.0001	0.0019
5	54.0020	53.9412	54.0005	0.0015
6	54.0020	53.9357	54.0008	0.0012

На основу резултата из табеле 6.4.3 може се закључити да постоји разлика у пречницима отвора пре и након обраде котрљањем куглице. Такође се може уочити да са већим дубинама пенетрације куглице опада вредност девијације пречника отвора. Највећа девијација је на првом отвору и износи 0.0088 mm док је на последњем, шестом, отвору девијација најмања и износи 0.0012 mm. На основу ових резултата може се извући закључак да пречник отвора након обраде котрљањем куглице зависи од дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде.

У табели 6.4.4 [137] су дате израчунате вредности теоријске, захтеване и постигнуте дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Теоријска дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде је једнака половини разлике теоријских пречника са цртежа плана експеримента (слика 5.5.1). Захтевана дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде је једнака половини разлике теоријског пречника након обраде котрљањем куглице (у овом случају 54.0020 mm) и пречника отвора пре обраде котрљањем куглице. Постигнута дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде је једнака половини разлике средњег пречника пре и након обраде котрљањем куглице. Из резултата приказаних у табели 6.4.4 може се видети да постоји извесна разлика између теоријске, захтеване и постигнуте дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Постигнута дубина пенетрације куглице за сваки отвор је већа од теоријске дубине пенетрације. Међутим, дубина пенетрације куглице је мања од захтеване дубине пенетрације куглице која би резултовала постизањем теоријског пречника отвора након обраде котрљањем куглице. Такође је приметно да разлика између захтеване и постигнуте дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде опада са порастом дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Ова разлика између захтеване и постигнуте дубине пенетрације се може приписати еластичним деформацијама предмета обраде и алата, пре свега еластичним деформацијама које се јављају у контакту котрљајни лежај - куглица.

Табела 6.4.4: Теоријска, захтевана и постигнута дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде

Редни број отвора	Дубина пенетрације $z$ (mm)		
	Теоријска	Захтевана	Постигнута
1	0.005	0.0011	0.0055
2	0.010	0.0115	0.0104
3	0.015	0.0166	0.0152
4	0.020	0.0211	0.0201
5	0.025	0.0304	0.0297
6	0.030	0.0332	0.0326

У табели 6.4.5 [137] су приказани резултати мерења грешке цилиндричности отвора. Грешка цилиндричности је мерена стратегијом скенирања при чему је извршено мерење цилиндра на 17 нивоа и при томе је узето 6545 тачака по сваком мереном цилиндру. Максимална грешка цилиндричности је на отвору 1 и износи 0.0317 mm. Минимална грешка цилиндричности је на отвору 6 и износи 0.0149 mm. Средња девијација грешке цилиндричности је 0.0193 mm.

Табела 6.4.5: Резултати мерења грешке цилиндричности

Редни број отвора	1	2	3	4	5	6
Цилиндричност (mm)	0.0317	0.0198	0.0173	0.0163	0.0155	0.0149

У табели 6.4.6 [137] су приказани резултати мерења грешке кружности отвора. Грешка кружности је мерена стратегијом скенирања и при томе је узето 386 тачака по сваком мереном кругу. Максимална грешка кружности је на отвору 1 и износи 0.0088 mm. Минимална грешка кружности је на отвору 6 и износи 0.0012 mm. Средња девијација грешке кружности износи 0.0031 mm.

Табела 6.4.6: Резултати мерења грешке кружности

Редни број отвора	1	2	3	4	5	6
Кружност (mm)	0.0088	0.0022	0.0027	0.0019	0.0015	0.0012

У оба случаја мерења грешака цилиндричности и кружности отвора, може се приметити да са порастом дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде опадају вредности обе грешке облика.



### 6.5. Резултати нумеричких експеримената изведених коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини отвора

Планом експеримената, представљеним у претходном поглављу у потпоглављу 5.6, предвиђено је извођење 20 нумеричких експеримената код којих ће се варирати дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Дубина пенетрације је варирана у опсегу од 0 *mm* до 0.1 *mm* са кораком од 5  $\mu m$ . Сврха извођења нумеричких експеримената је одређивање вредности еластичне деформације отвора након извршене обраде котрљањем куглице по површини отвора. Управо вредност еластичне деформације одређује финалну меру третираног отвора.

Поред наведеног, нумеричким експериментима су извршене процене вредности напона и одређена напонска стања у предмету обраде за време и након обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде.

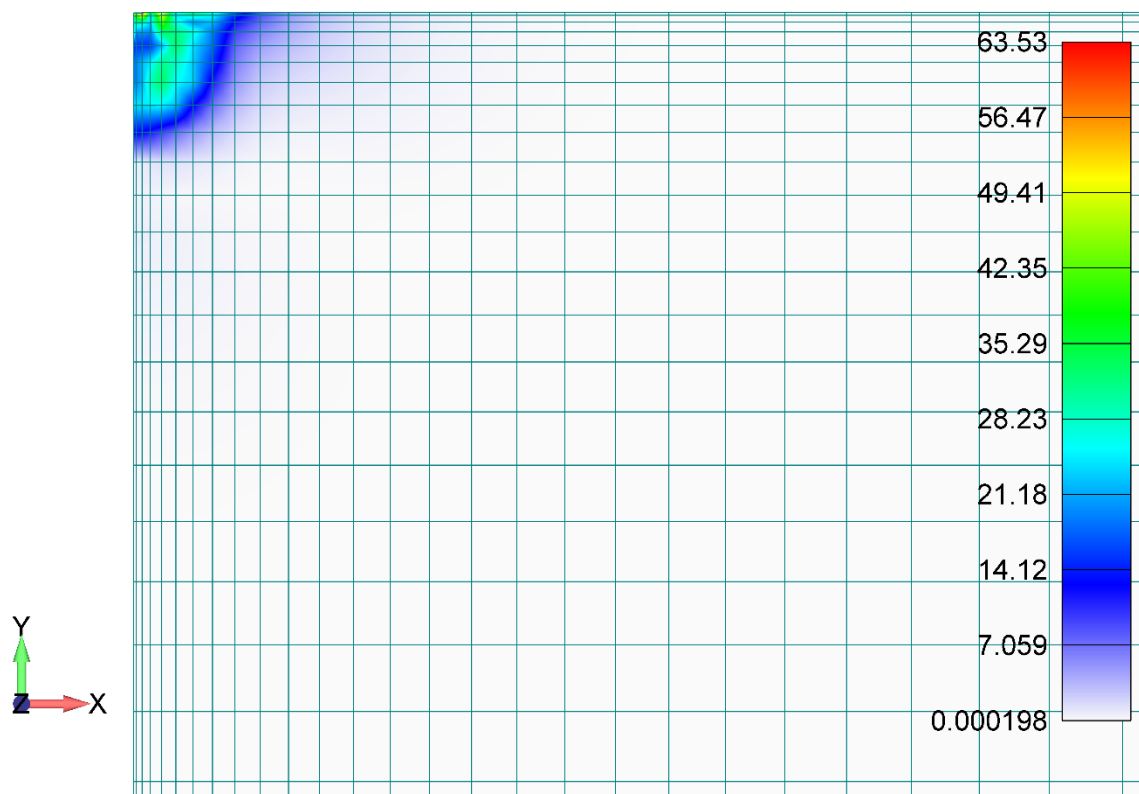
Табела 6.5.1: Померања чвора који је у контакту са куглицом током обраде и након растерећења

$F$ ( <i>N</i> )	Еластопластично померање $z_{e+p}$ ( <i>mm</i> )	Пластично померање $z_p$ ( <i>mm</i> )
32.57	0.005554	0.003297
65.73	0.009969	0.006693
76.03	0.015199	0.012986
111.92	0.020119	0.016719
132.56	0.025007	0.021644
147.98	0.029953	0.026396
212.35	0.034863	0.031206
231.54	0.039759	0.036049
248.99	0.044724	0.040431
267.87	0.04968	0.045383
296.92	0.054634	0.050151
339.57	0.059559	0.054786
368.47	0.064501	0.059491
403.52	0.069463	0.064457
439.57	0.074387	0.06931
467.09	0.079347	0.074257
490.43	0.084302	0.078899
510.66	0.089268	0.083709
528.62	0.094233	0.088556
616.56	0.099181	0.093467

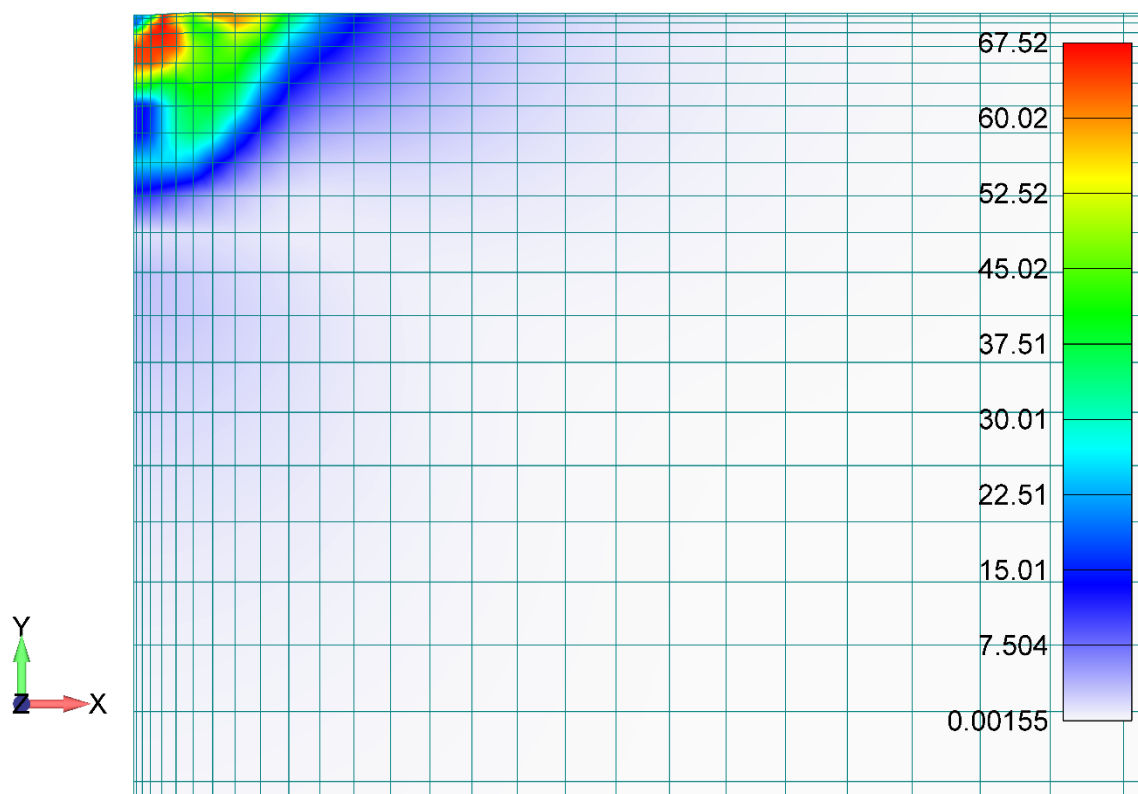
У табели 6.5.1. су дате вредности померања чвора мреже коначних елемената који је у почетном тренутку у контакту са куглицом, као и вредности силе које одговарају датим вредностима померања. Еластопластично померање представља померање чвора у контакту са куглицом на крају процеса утискивања куглице у материјал предмета

обrade, док пластично померање представља померање истог чвора након растерећења. Вредност пластичног померања је мања од вредности еластопластичног померања зато што се након растерећења посматрани чвор еластично растерети. Као што је већ поменуто познавање вредности померања чвора након растерећења је од есенцијалног значаја за постизање геометријске и димензионе прецизности. На основу резултата из табеле 6.5.1 се може уочити да је ефекат еластичног растерећења директно пропорционалан вредности дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде.

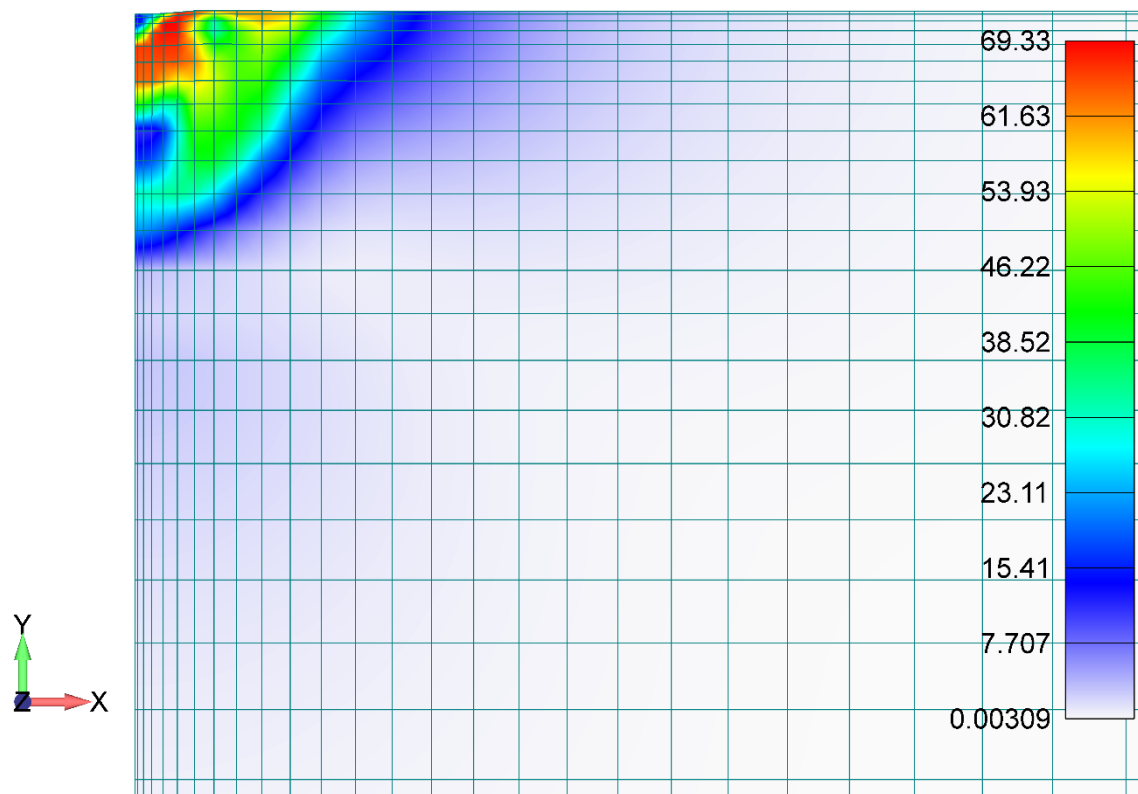
На сликама од 6.5.1 до 6.5.10 су приказани заостали напони у предмету обраде након изведених нумеричких експеримената за различите дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде након растерећења. Приказане су слике са дубинама пенетрације куглице од  $10 \mu m$ ,  $20 \mu m$ ,  $30 \mu m$ ,  $40 \mu m$ ,  $50 \mu m$ ,  $60 \mu m$ ,  $70 \mu m$ ,  $80 \mu m$ ,  $90 \mu m$  и  $100 \mu m$ . На свим сликама је вредност напона изражена у *MPa*. Лако се могу уочити поља дистрибуције напона у предмету обраде као и то да вредност заосталих напона и њихова дистрибуција зависе од дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Вредности напона се крећу у распону од приближно  $60 \text{ MPa}$  за дубину пенетрације од  $10 \mu m$ , па до  $80 \text{ MPa}$  за дубину пенетрације од  $100 \mu m$ , при чему се максималне вредности могу уочити непосредно испод третиране површине.



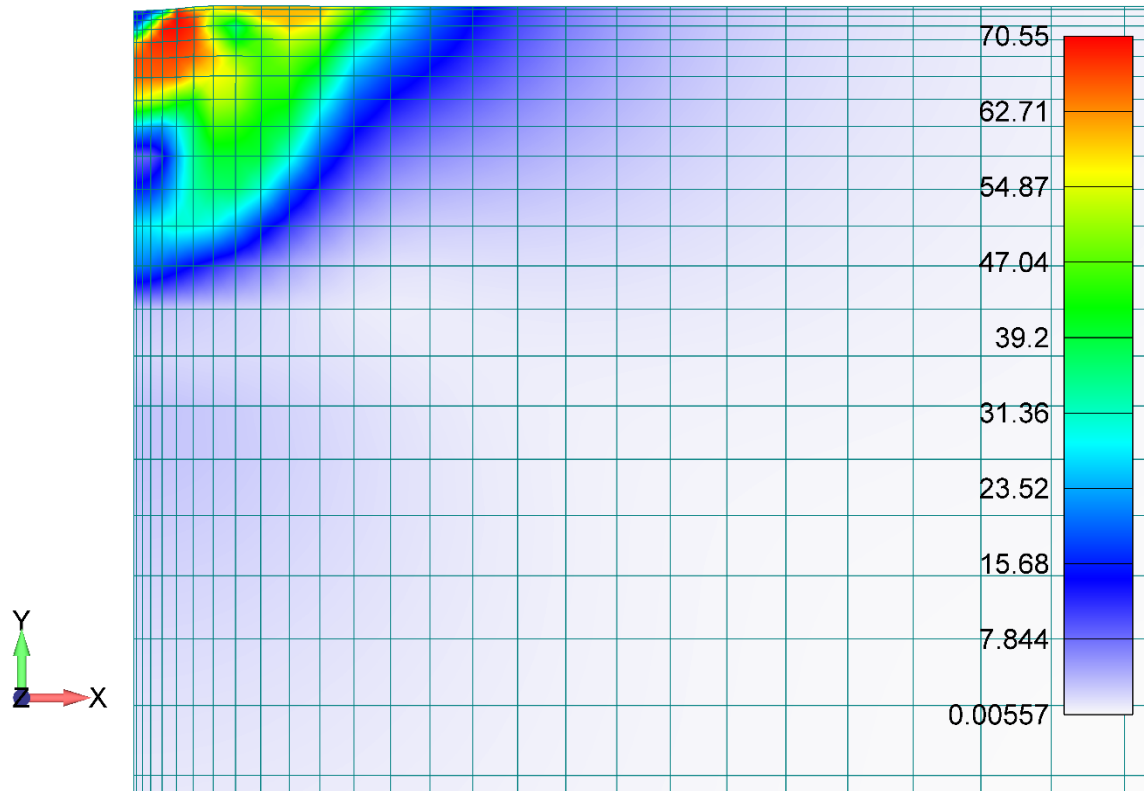
Слика 6.5.1: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=10 \mu m$



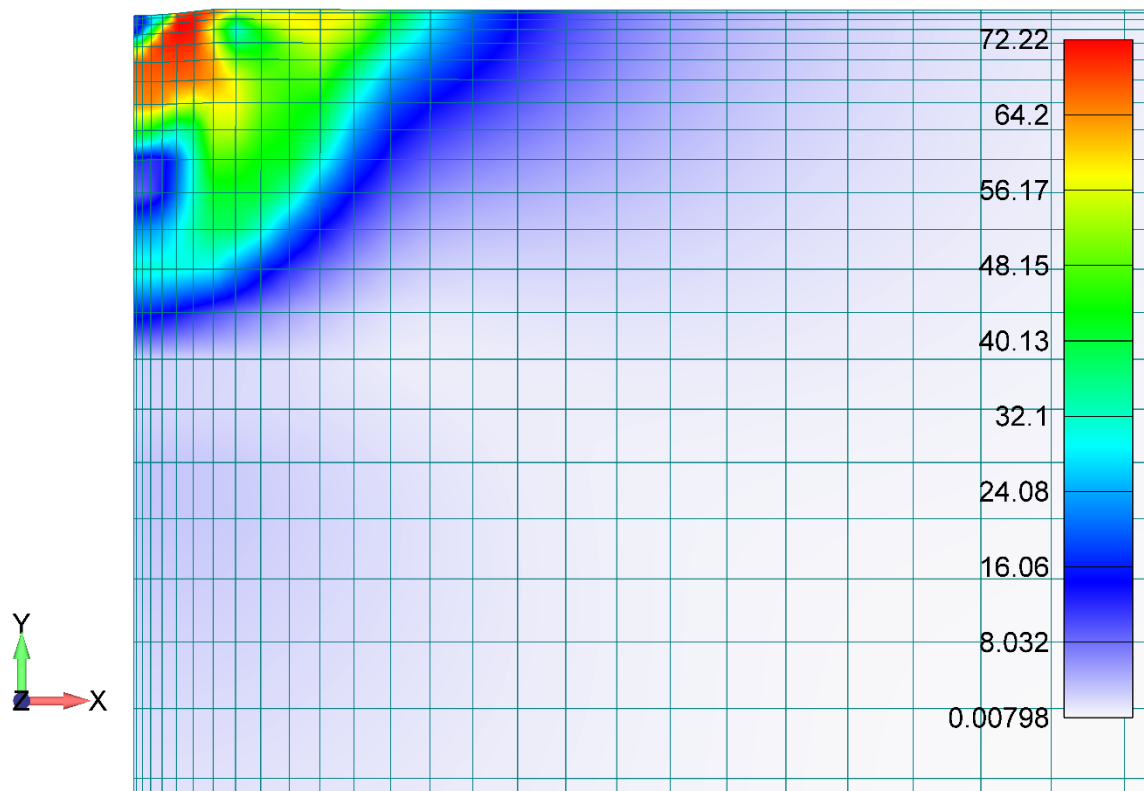
Слика 6.5.2 Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=20 \mu m$



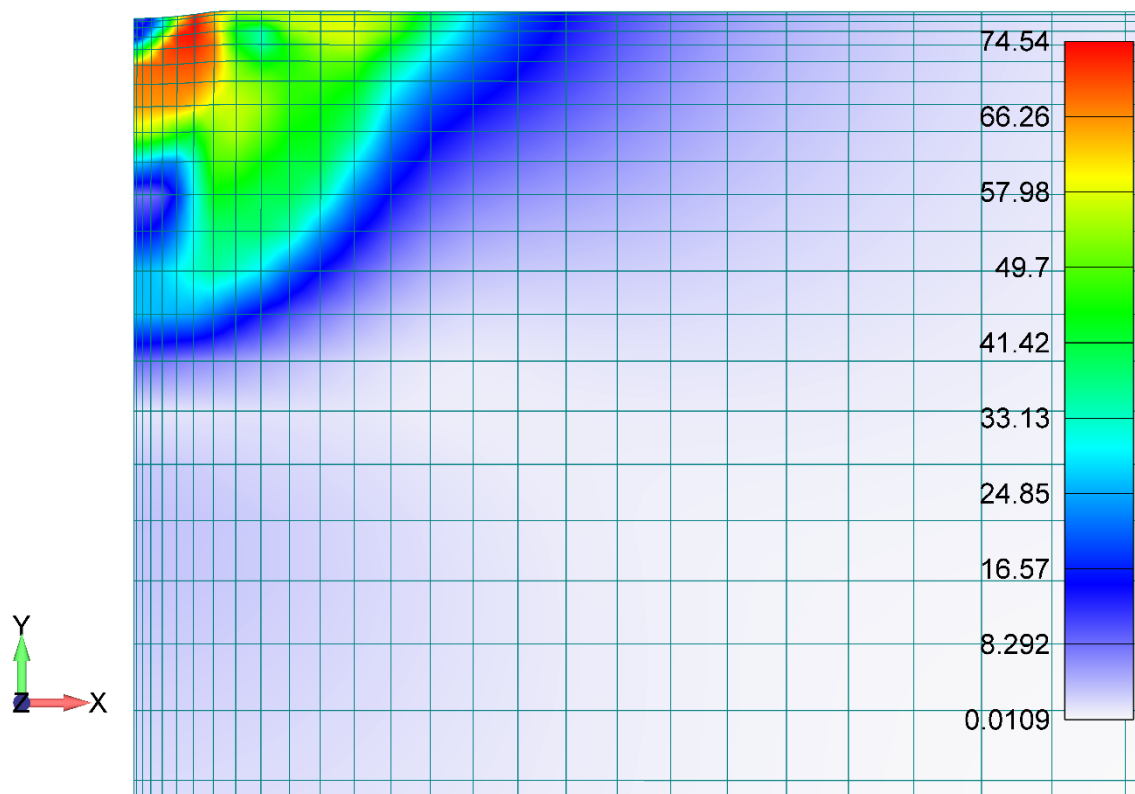
Слика 6.5.3: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=30 \mu m$



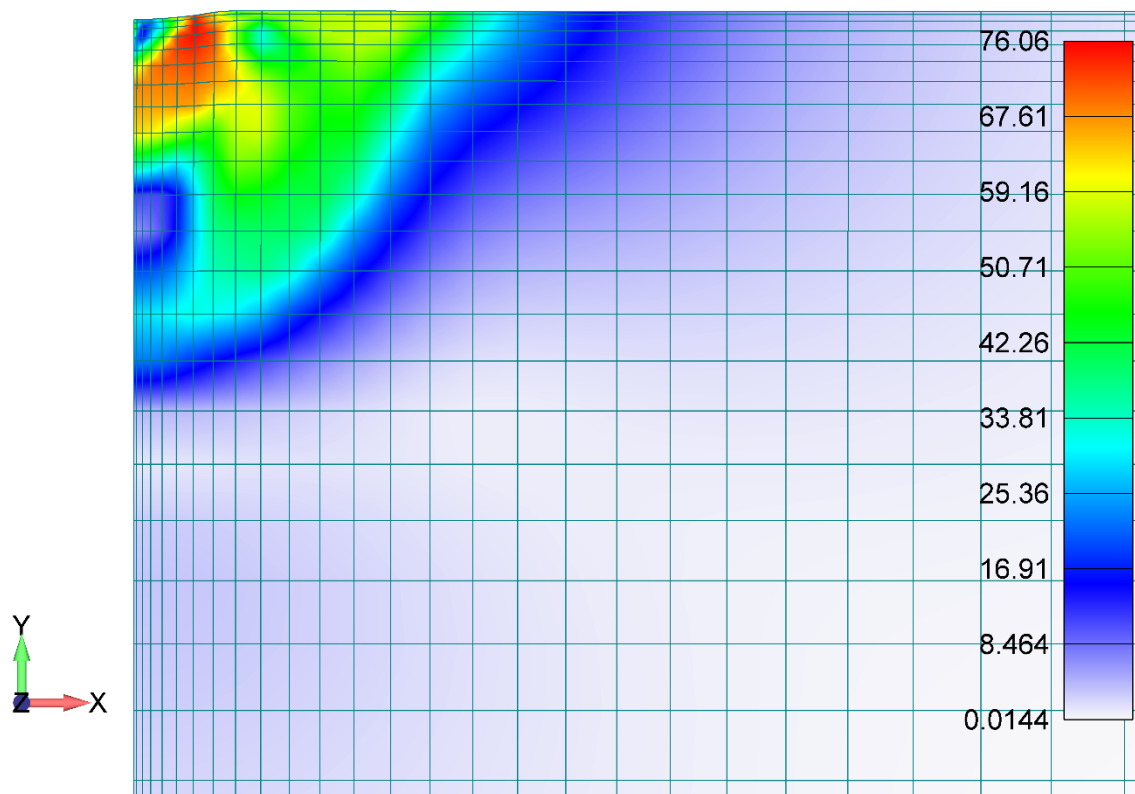
Слика 6.5.4: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=40 \mu m$



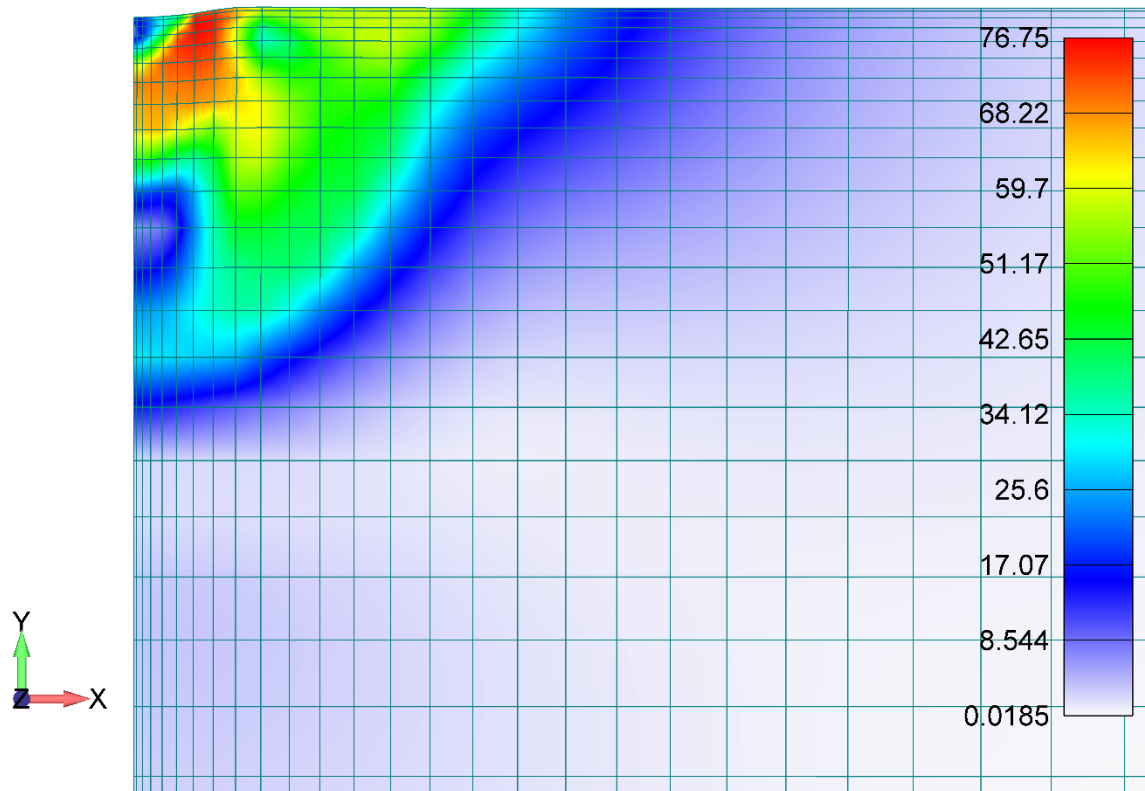
Слика 6.5.5: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=50 \mu m$



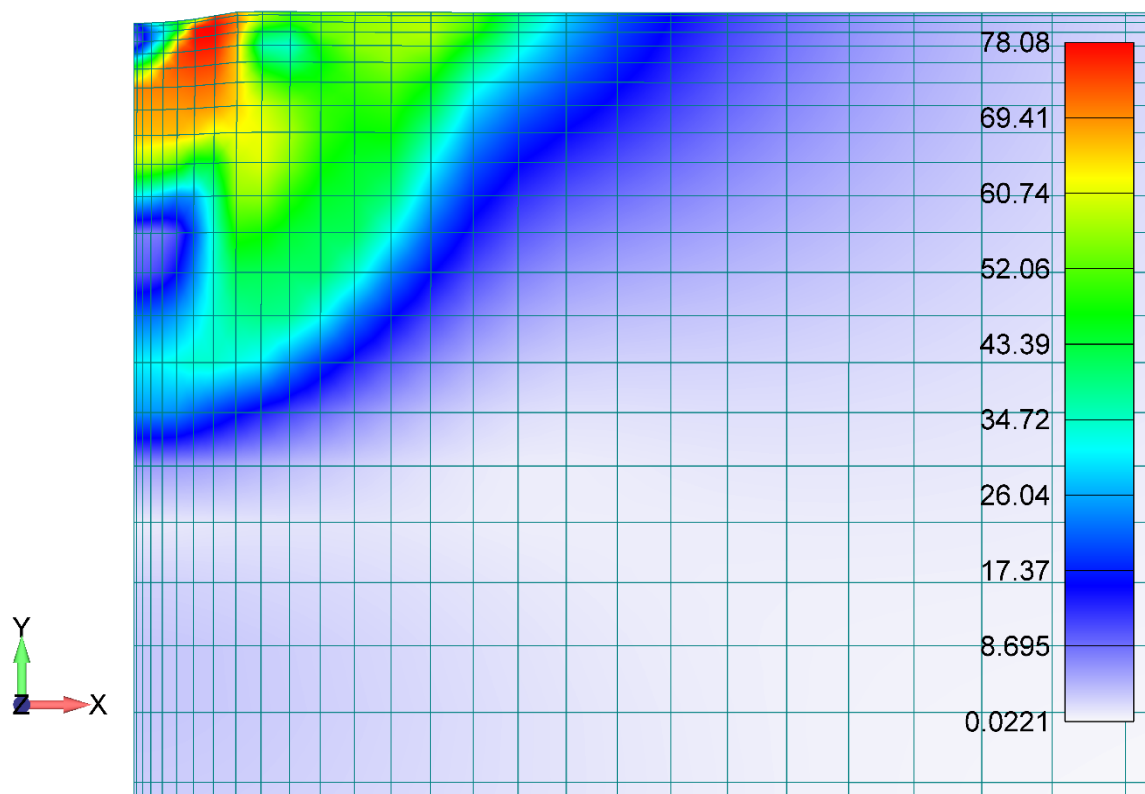
Слика 6.5.6: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=60 \mu m$



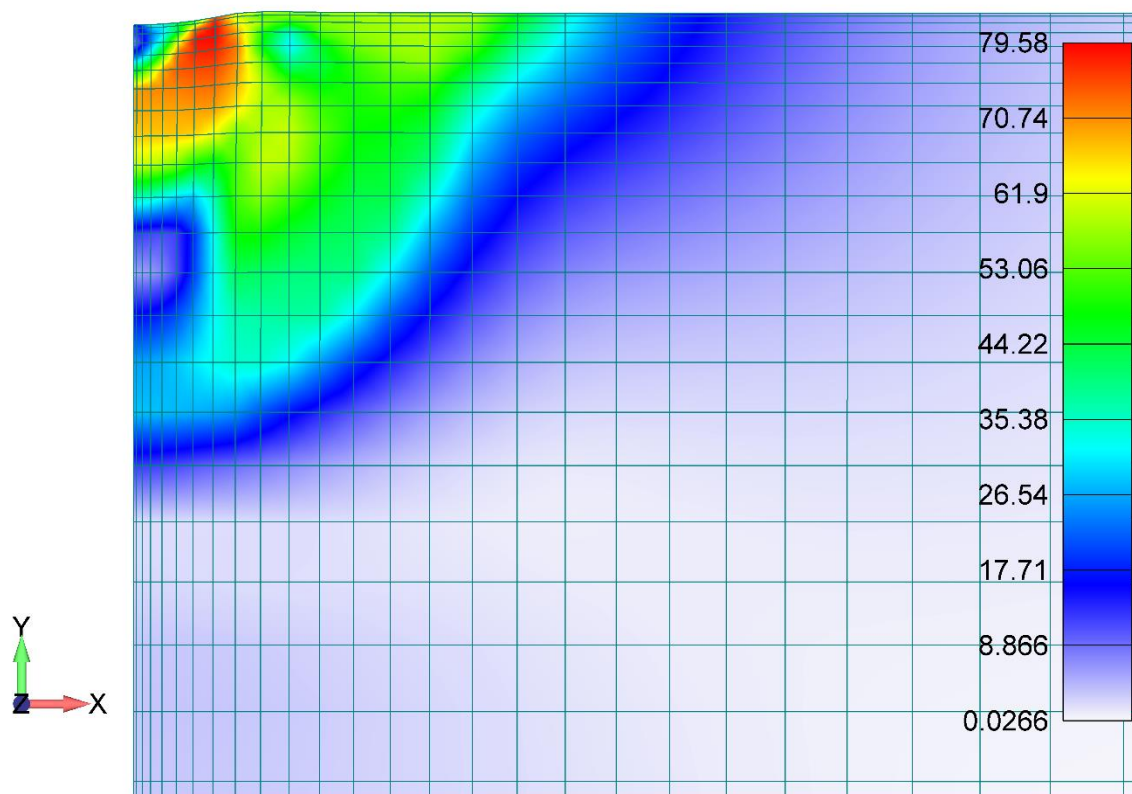
Слика 6.5.7: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=70 \mu m$



Слика 6.5.8: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=80 \mu m$



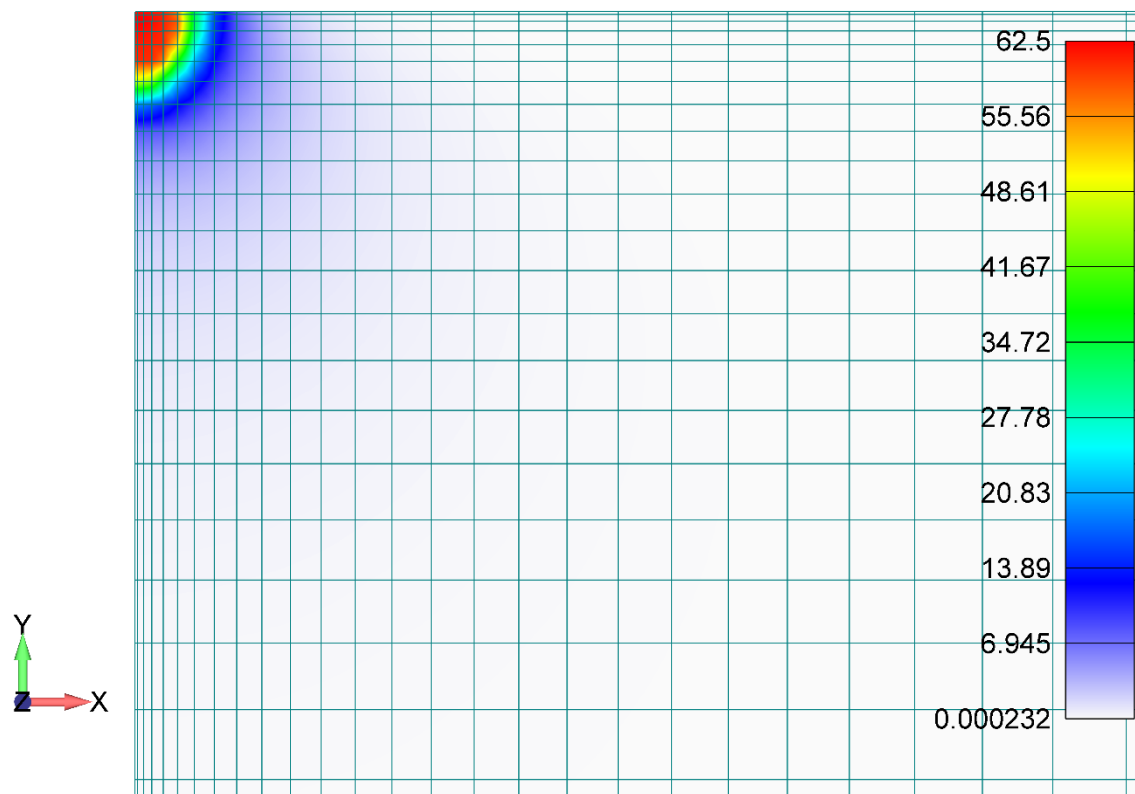
Слика 6.5.9: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=90 \mu m$



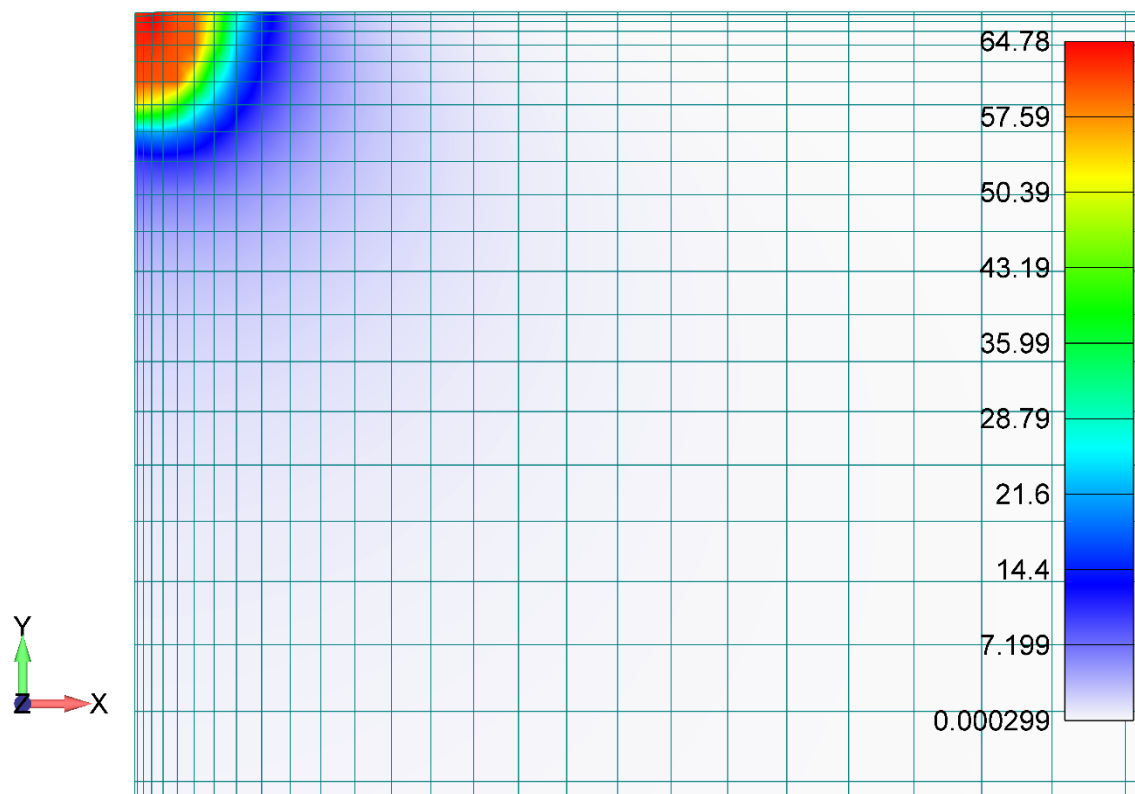
Слика 6.5.10: Заостали напони у предмету обраде након утискивања куглице до дубине од  $z=100 \mu m$

На сликама 6.5.11 - 6.5.14 приказани су дистрибуције напона и напонска поља током процеса утискивања куглице у материјал предмета обраде, у временским интервалима који представљају приближно 25%, 50%, 75% и 100% од укупног трајања процеса. Приказан је случај када се куглица утискује у материјал предмета обраде до дубине од  $30 \mu m$ . На све четири слике се лако може уочити развој напонских поља и како се са порастом дубине утискивања повећава и вредност максималног напона.

За разлику од напонског стања које се јавља у предмету обраде након растерећења, код којег се максимална вредност напона уочава непосредно испод третиране површине, у случају утискивања на 100% процеса, максимална вредност се може уочити на чвору који је у почетном тренутку био у иницијалном контакту са куглицом. Ова разлика се може објаснити ефектом еластичног растерећења чворова који се налазе на самој површини. Вредности максималних напона на 100% утискивања и након растерећења су приближно исте.

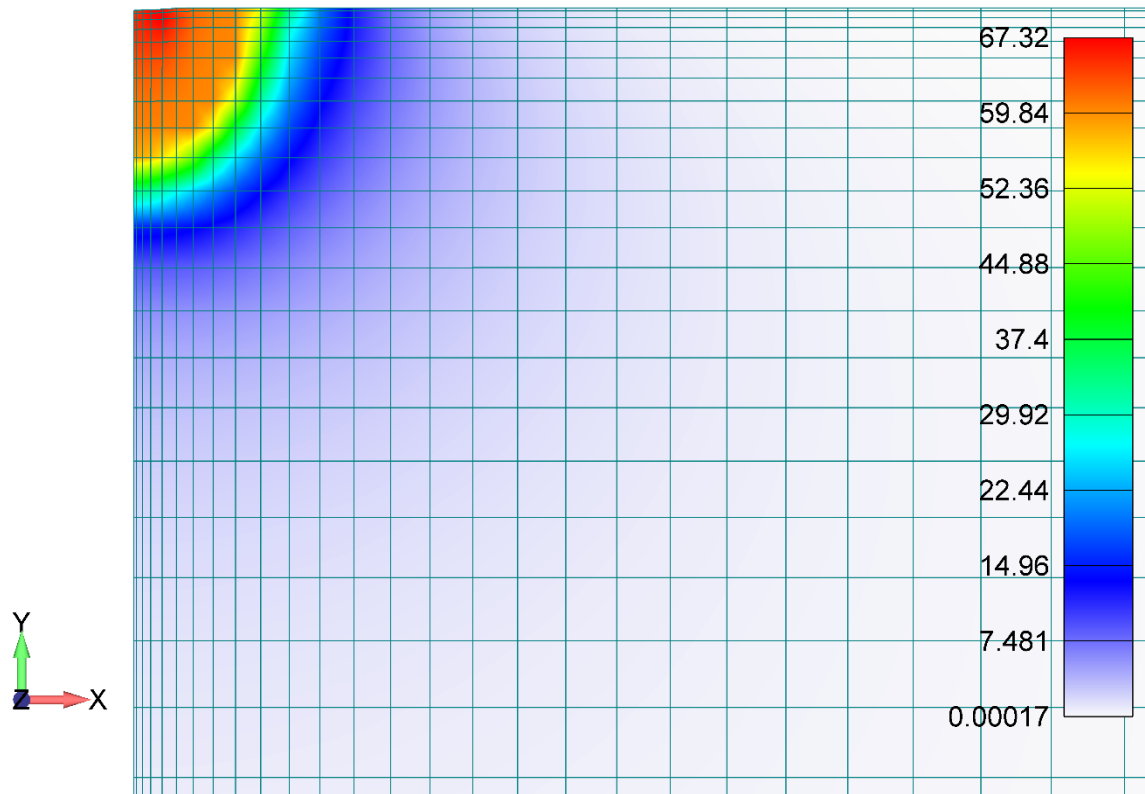


Слика 6.5.11: Дистрибуција напона у предмету обраде на 25% процеса утискивања куглице у материјал предмета обраде за случај  $z=30 \mu m$

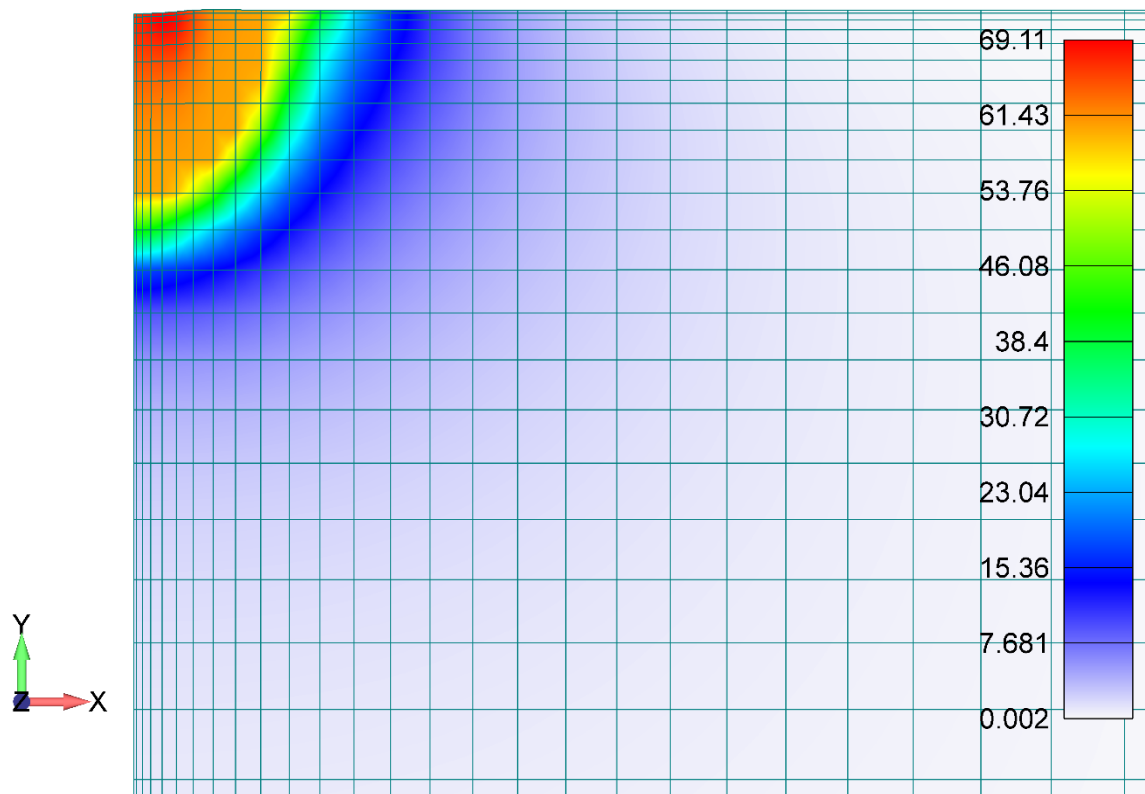


Слика 6.5.12: Дистрибуција напона у предмету обраде на 50% процеса утискивања куглице у материјал предмета обраде за случај  $z=30 \mu m$



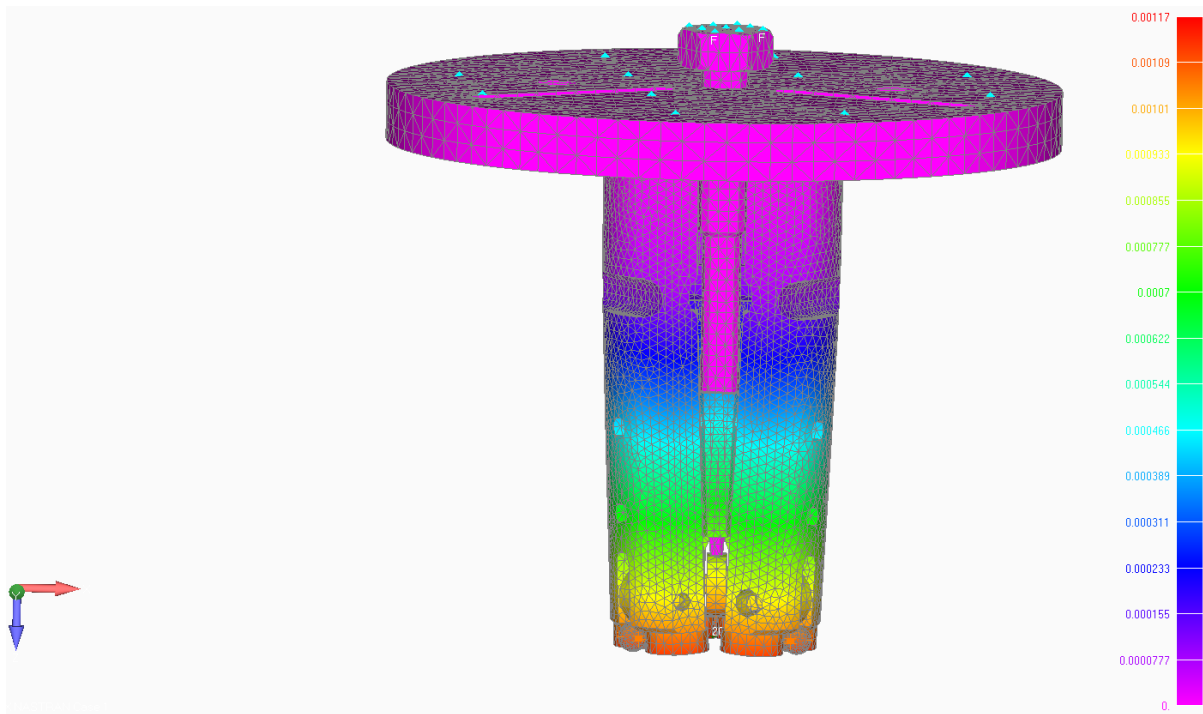


Слика 6.5.13: Дистрибуција напона у предмету обраде на 75% процеса утискивања куглице у материјал предмета обраде за случај  $z=30 \mu m$

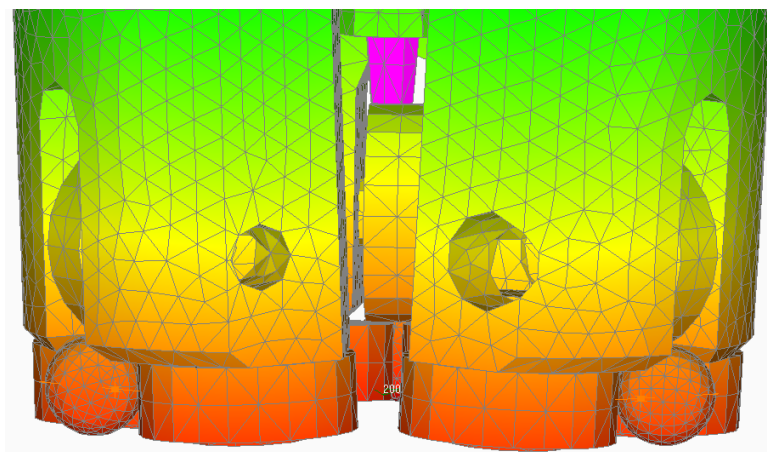


Слика 6.5.14: Дистрибуција напона у предмету обраде на 100% процеса утискивања куглице у материјал предмета обраде за случај  $z=30 \mu m$

Претходно предсављеним резултатима је приказан ефекат еластичног повратног дејства у материјалу предмета обраде. Међутим, веома је важно одредити колика се еластична деформација јавља на алату. За одређивање величине еластичне деформације на алату, као и одређивања крутости самог алата, извршена је *FEM* анализа у софтверском пакету *FEMAP*. На основу резултата из табеле 6.5.1 се може уочити да за дубину пенетрације куглице у материјал предмета обраде од  $30 \mu\text{m}$  одговара вредност силе која је приближно једнака  $200 \text{ N}$ . Ова вредност дубине пенетрације куглице је изабрана зато што је према плану експеримента, представљеног у потпоглављу 5.5, и резултатима експеримента, представљеним у потпоглављу 6.4, управо та вредност дубине пенетрације куглице максимална.



а)



б)

Слика 6.5.15: *Color map* са вредностима померања чворова мреже коначних елемената:  
а) цели алат и б) увећани детаљ са куглицом

*FEM* анализом је одређено померање куглице при дејству задате силе. На слици 6.5.15. су приказана померања на целом алату (*color map*) и детаљ на коме се могу уочити померања на куглици. Са слике се може уочити да је максимална вредност померања на куглици и она износи  $0.00117\text{ mm}$ , односно  $1.17\ \mu\text{m}$ .

На основу добијене вредности може се израчунати крутост алата као однос силе и померања.

$$k = \frac{F}{z} = \frac{200}{1.17} = 170.94 \left( \frac{N}{\mu\text{m}} \right) \quad (6.5.1)$$

## 7. Статистичка обрада и анализа резултата експерименталних истраживања

### 7.1. Статистичка обрада и анализа резултата експерименталних истраживања изведених на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде

Резултати експеримената изведених на CNC глодалици коришћењем алата високе крутости намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде подвргнути су регресионој и корелационој анализи. Регресиона анализа је извршена помоћу софтверског пакета *StatSoft Statistica V8* [139]. При томе је извршена анализа података који су дати у претходном поглављу у потпоглављу 6.1, у табелама 6.1.1, 6.1.2 и 6.1.3. Добијене су функционалне регресионе једначине за сва три поља са различитим вредностима иницијалних површинских храпавости, као и одговарајући коефицијенти вишеструке корелације. Добијене једначине дају зависност резултујуће површинске храпавости  $R_a$  од параметара процеса обраде котрљањем куглице: посмака  $f$ , броја пролаза  $I$  и силе  $F$  којом се куглица притиска о површину предмета обраде У табели 7.1.1. су дате добијене регресионе једначине и одговарајући коефицијенти корелације. Битно је нагласити да дате регресионе једначине важе само за материјал предмета обраде који је коришћен током експеримента. Да би се добиле регресионе једначине за друге врсте материјала предмета обраде, било би потребно извршити ново експериментално истраживање.

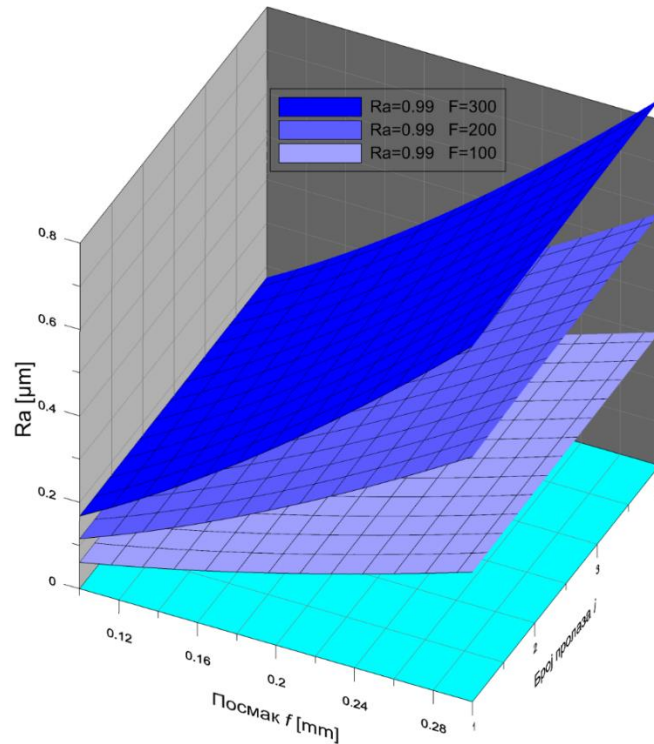
Табела 7.1.1: Регресионе једначине и степен корелације експерименталних резултата

Иницијална површинска храпавост $R_{a(ini)} (\mu m)$	Регресионе једначине	Коефицијент корелације $R$
2.08	$R_a = 0.024672 \times f^{1.446031} \times I^{0.021286} \times F^{0.920447}$	0.941
1.39	$R_a = 0.616834 \times f^{1.249964} \times I^{0.00003332} \times F^{0.290122}$	0.980
0.99	$R_a = 0.63252 \times f^{1.291022} \times I^{0.015914} \times F^{0.277760}$	0.991

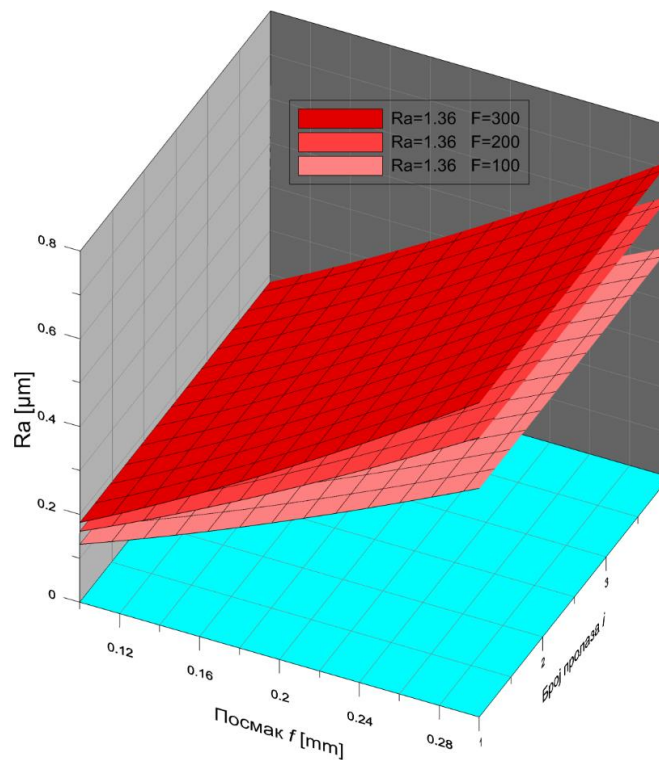
Анализом добијених једначина може се закључити да су једначине нелинеарне и да се на основу вредности вишеструких коефицијената корелације добијеним једначинама може са веома високом прецизношћу утврдити вредност површинске храпавости  $R_a$  након обраде.

На основу регресионих једначина креирани су 3D дијаграми са слика 7.1.1, 7.1.2 и 7.1.3. 3D дијаграм са слике 7.1.1 се односи на претходно припремљено поље са иницијалном површинском храпавошћу  $R_{a(ini)}=0.99 \mu m$  и приказује зависност резултујуће површинске

храпавости  $R_a$  од параметара процеса обраде котрљањем куглице, посмака  $f$ , броја пролаза  $I$  и силе  $F$  којом се куглица притиска о површину предмета обраде. Приказане су три криве површине које одговарају силама од 100 N, 200 N и 300 N.

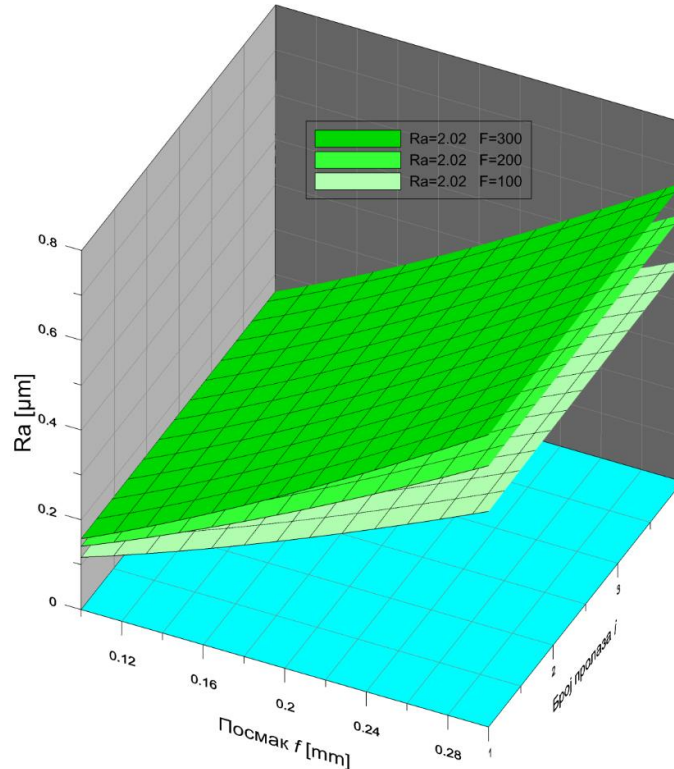


Слика 7.1.1: Тренд промене  $R_a$  за различите вредности силе, посмака и броја пролаза при иницијалној површинској храпавости  $R_{a(ini)}=0.99 \mu\text{m}$



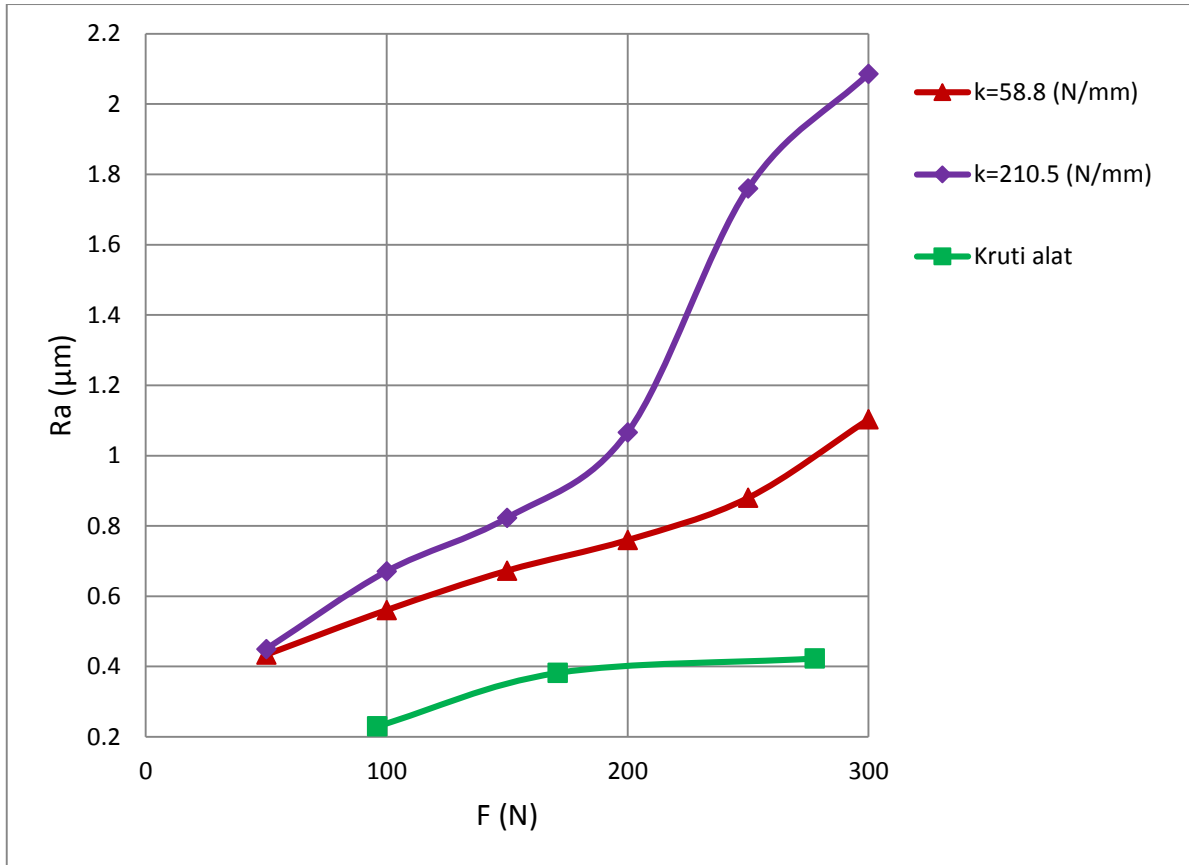
Слика 7.1.2: Тренд промене  $R_a$  за различите вредности силе, посмака, броја пролаза при иницијалној површинској храпавости  $R_{a(ini)}=1.36 \mu\text{m}$

На сликама 7.1.2 и 7.1.3 приказани су 3D дијаграми зависности резултујуће површинске храпавости  $R_a$  од посмака  $f$ , броја пролаза  $I$  и силе  $F$  којом се куглица притиска о површину предмета обраде за поља са иницијалном површинском храпавошћу  $R_{a(ini)}=1.36 \mu m$  и  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$ . На свакој од слика су приказане три криве површине које одговарају силама од 100 N, 200 N и 300 N.



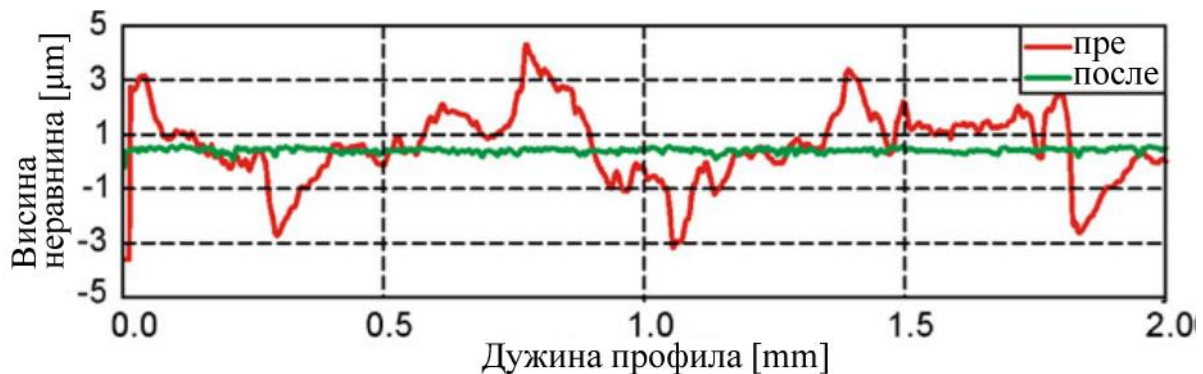
Слика 7.1.3: Тренд промене  $R_a$  за различите вредности силе, посмака, броја пролаза при иницијалној површинској храпавости  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$

У оквиру експерименталних истраживања процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде коришћењем алата високе крутости развијена је модификација алата са опружним механизмом који служи за задавање силе. Експеримент је описан у претходним поглављима, а резултати експеримента су дати у табела 6.1.4. На основу резултата из табеле 6.1.4 и на основу резултата из табеле 6.1.3 добијен је дијаграм приказан на слици 7.1.4. Како је приликом експеримента са алатом који има опружни механизам иницијална храпавост узорка износила  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$ , а посмак  $f=0.2 mm$ , поређење резултата на дијаграму 7.1.4 је извршено са резултатима експеримента на претходно припремљеном пољу са истом иницијалном храпавошћу и истим посмаком. Због прегледности слике нису унете вредности свих пет резултујућих површинских храпавости, већ само резултати добијени приликом коришћења опруга са најнижом и највишом вредности крутости.



Слика 7.1.4: Зависност површинске храпавости  $R_a$  од силе при различитим вредностима крутости система алата

Као што се из табела 6.1.1, 6.1.2 и 6.1.3 може видети, у свим пољима је дошло до значајног побољшања параметара површинске храпавости. Најповољнији резултат  $R_a=0.062 \mu\text{m}$  је постигнут у пољу са најнижом иницијалном површинском храпавошћу  $R_a=0.99 \mu\text{m}$  и он се добија након обраде у четвртм пролазу, силом од приближно  $40 \text{ N}$  и посмаком  $f=0.1 \text{ mm}$ . На слици 7.1.5. су приказани преклопљени профили иницијалне површинске храпавости и профила храпавости који се добија у најповољнијем случају.

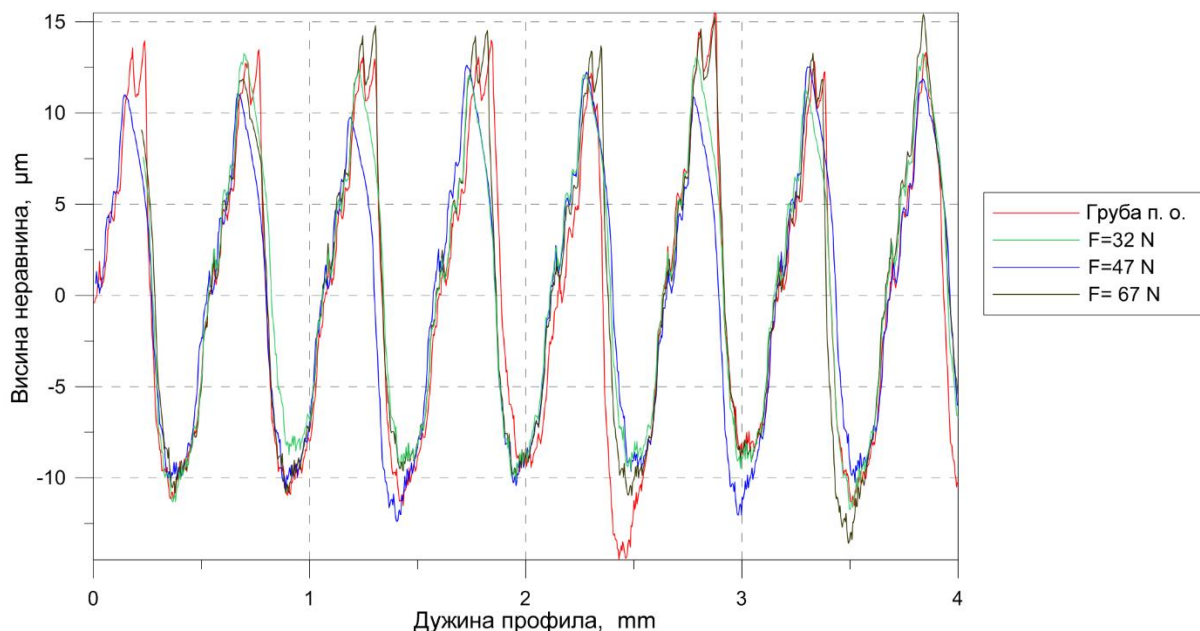


Слика 7.1.5: Преклопљени профили храпавости пре и након обраде

## 7.2. Анализа резултата експерименталних истраживања изведених на универзалном стругу коришћењем крутог алата намењеног за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних предмета обраде

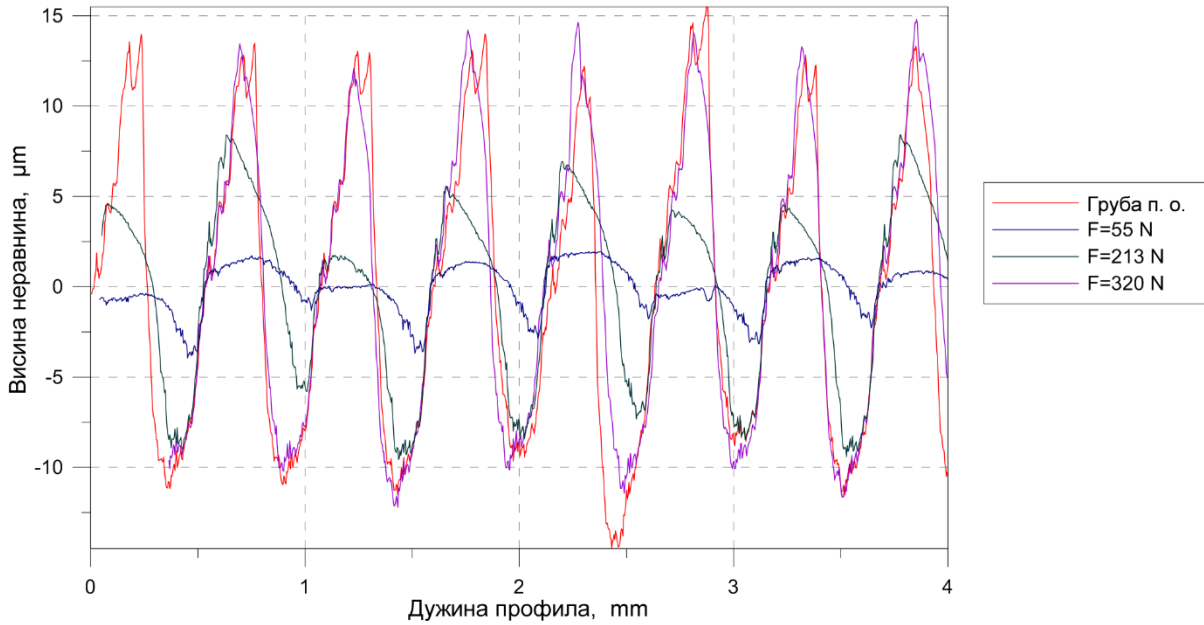
Мерења која су извршена на *Talysurf 6* профилометру искоришћена су за добијање профила храпавости обрађених површина. Поред тога, добијени су и параметри храпавости резултујућих површина који су представљени у претходном поглављу у табелама 6.2.1 и 6.2.2. Добијени профили храпавости су преклопљени како би се могла извршити визуелна анализа промена које су настале након обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде са различитим вредностима силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде.

На сликама 7.2.1 и 7.2.2 приказани су поменути преклопљени профили храпавости за 6 поља са грубом претходном обрадом, обрађена са различитим вредностима силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде. У пољу са првом, односно грубом претходном обрадом, средње аритметичко одступање профила од средње линије профила се креће у распону од  $R_a=7.3 \mu\text{m} - 7.53 \mu\text{m}$ , у зависности на којој од три изводнице су мерени параметри храпавости. Са оба дијаграма са слика 7.2.1 и 7.2.2 се може уочити да са повећањем силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде долази до редукције параметара површинске храпавости. Поред тога, веома је битно уочити да дубине продирања куглице у материјал предмета обраде у које су блиске вредности максималне висине испупчења профила  $R_p$  претходно обрађеног поља приближно одговарају најнижим вредностима  $R_a$  резултујућих површина. Ова тврдња се најлакше може уочити у табелама 6.2.1 и 6.2.2.



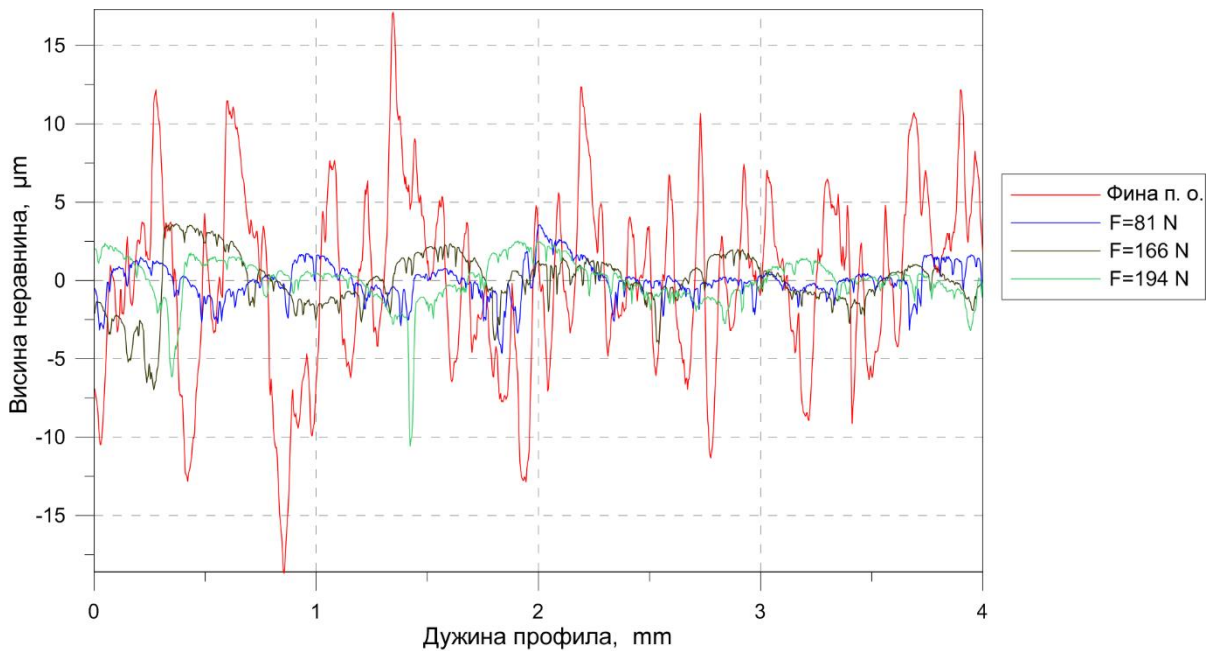
Слика 7.2.1: Преклопљени профили храпавости добијени након обраде поља са грубом претходном обрадом силама од  $F=32 \text{ N}$ ,  $F=47 \text{ N}$  и  $F=67 \text{ N}$



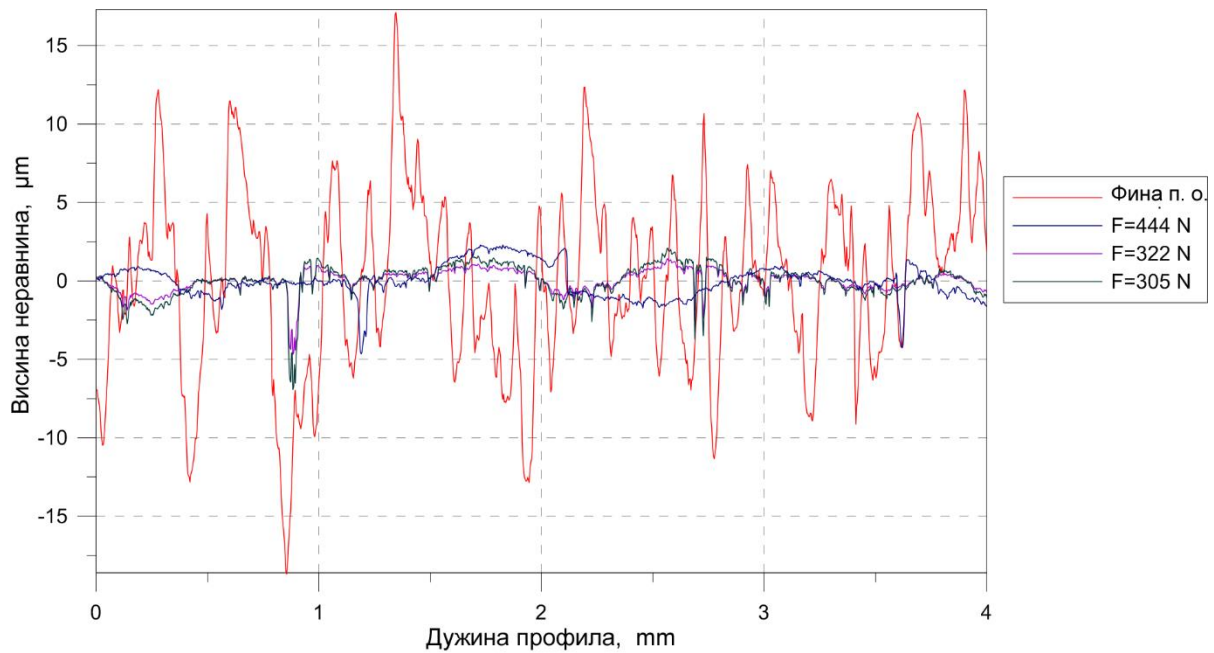


Слика 7.2.2: Преклопљени профили храпавости добијени након обраде поља са грубом претходном обрадом силама од  $F=55\text{ N}$ ,  $F=213\text{ N}$  и  $F=320\text{ N}$

На сликама 7.2.3 и 7.2.4 су приказани преклопљени профили храпавости за 6 поља са фином претходном обрадом која су обрађена са различитим вредностима силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде. У пољу са фином претходном обрадом  $Ra$  се креће у распону од  $4.5\ \mu\text{m}$  до  $5.4\ \mu\text{m}$ . У овом случају се може уочити да са повећањем силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде до неке одређене вредности долази до редукције параметара површинске храпавости. Приметно је да се најповољнији параметри храпавости добијају са силом од  $322\text{ N}$ .



Слика 7.2.3: Преклопљени профили храпавости добијени након обраде поља са фином претходном обрадом силама од  $F=81\text{ N}$ ,  $F=166\text{ N}$  и  $F=194\text{ N}$



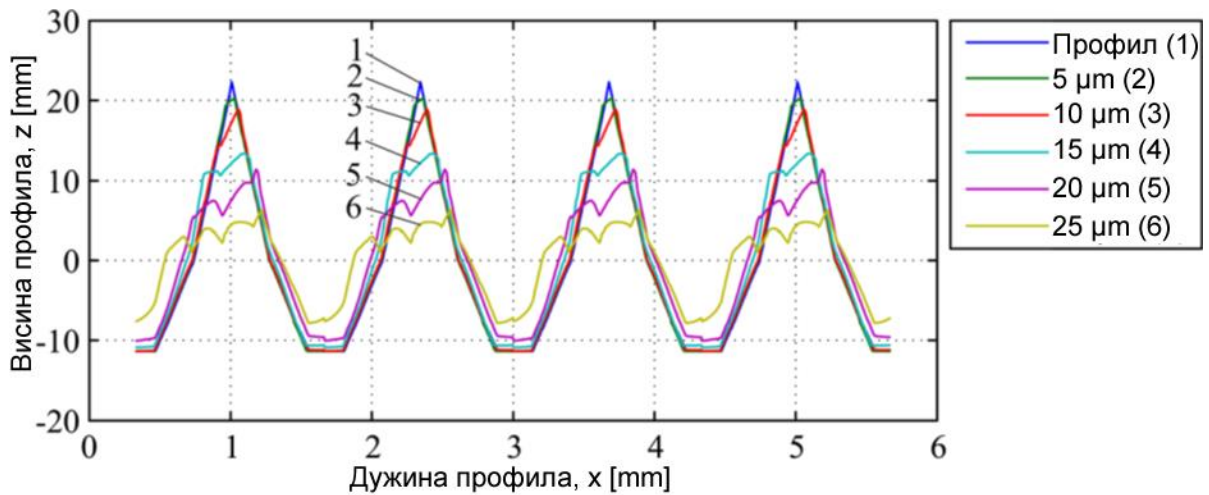
Слика 7.2.4: Преклопљени профили храпавости добијени након обраде поља са фином претходном обрадом силама од  $F=444\text{ N}$ ,  $F=305\text{ N}$  и  $F=322\text{ N}$

На основу података из табела 6.2.1 и 6.2.2 и претходно презентованих слика, за обе претходне обраде се може уочити зависност између параметра храпавости  $R_a$  и дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $u$ .

### 7.3. Анализа резултата нумеричких експеримената изведених коришћењем модела процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде

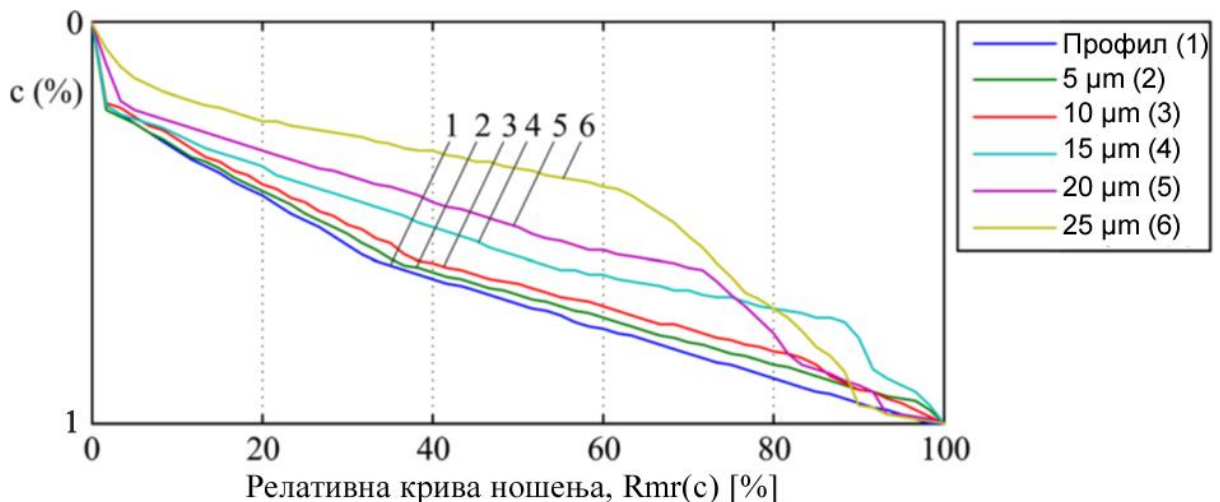
Након извођења нумеричких експеримената извршено је прикупљање координата чворова коначних елемената који се налазе на површини предмета обраде. Добијени низ координата чворова коначних елемената је искоришћен како би се утврдили параметри резултујуће површине и ти подаци су представљени у претходном поглављу у потпоглављу 6.3. и табели 6.3.1. Поред наведеног, координате чворова коначних елемената су искоришћене како би се графички представили резултујући профили храпавости површина добијених након сваког нумеричког експеримента. На слици 7.3.1 су представљени преклопљени профили храпавости почетног профила и профили храпавости добијени након првих пет нумеричких експеримената.

На слици 7.3.1 се може јасно уочити на који начин се деформишу врхови неравнина под дејством куглице која се притиска о површину предмета обраде. Неравнине се смањују и шире попуњавајући простор између њих при чему материјал тече испред куглице у правцу њеног кретања.



Слика 7.3.1: Преклопљени профили храповости иницијалне површине и површина добијених након нумеричких експеримената са различитим дубинама пенетрације куглице у материјал предмета обраде

На слици 7.3.2 дате су криве носивости профила храповости за различите дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Приметно је да се са повећањем дубине пенетрације побољшава распоред материјала у профилу храповости површине обрађене котрљањем куглице.



Слика 7.3.2: Релативна крива ношења за различите дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде

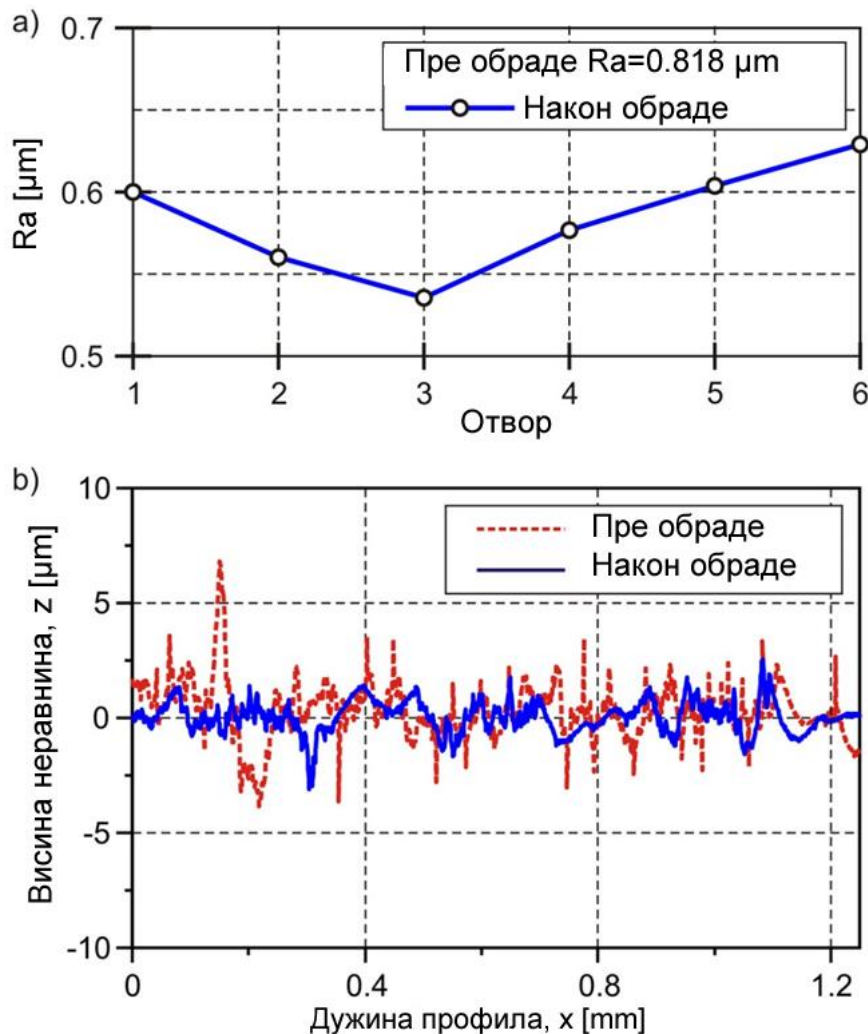
У претходном поглављу у потпоглављу 6.3, на сликама од 6.3.1 до 6.3.7 приказана су напонска стања у предмету обраде након извршене обраде котрљањем куглице за свих седам симулација. Анализом тих слика се може закључити да дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде пресудно утиче на величину и распоред напонских поља у предмету обраде. Максималне вредности заосталих напона се могу регистровати непосредно испод обрађене површине и како се дубље залази у површински слој њихова вредност постепено опада. Заостали напони се региструју до дубине од 1 mm у зависности од дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде. На слици 7.3.3 је приказана зависност заосталих напона у површинском слоју предмета обраде од дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде на различитим дубинама површинског слоја



долази до пластичног течења материјала са врхова неравнина у удубљења (долине) која постоје у профили храпавости. Као последица тога материјал са испупчења, који је на слици 7.3.4 б) обележен са  $A_p$ , попуњава следеће удубљење, на слици 7.3.4 б) означено са  $A_v$ , и на тај начин редукује укупну површинску храпавост.

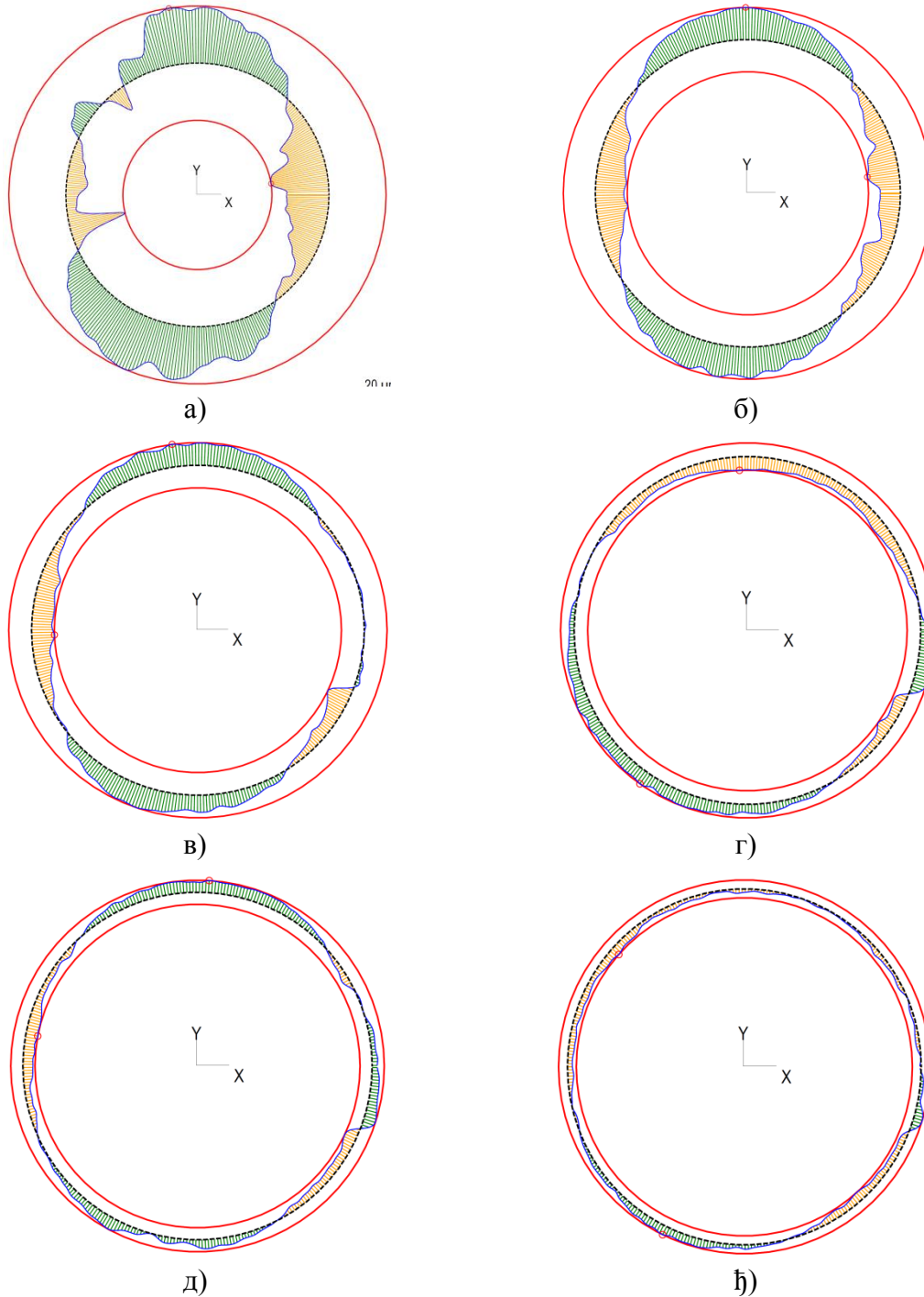
#### 7.4. Анализа резултата експеримента изведеног на CNC глодалици коришћењем крутог алата намењеног за унутрашњу обраду цилиндричних површина

На основу добијених резултата мерења иницијалне храпавости и храпавости након обраде, који су презентовани у табелама 6.4.1 и 6.4.2, за свих шест отвора, креиран је дијаграм на слици 7.4.1 а) који приказује промену параметра храпавости  $R_a$  у свих шест отвора. На слици 7.4.1 б) су приказани преклопљени профили храпавости пре и након обраде котрљањем куглице по површини отвора за отвор под редним бројем 3. Приказан је отвор са редним бројем 3 јер је на њему забележено највеће побољшање  $R_a$ .



Слика 7.4.1: Површинска храпавост: а) варијација  $R_a$  за свих шест отвора и б) преклопљени профили храпавости пре и након обраде котрљањем куглице по површини отвора за отвор под редним бројем 3

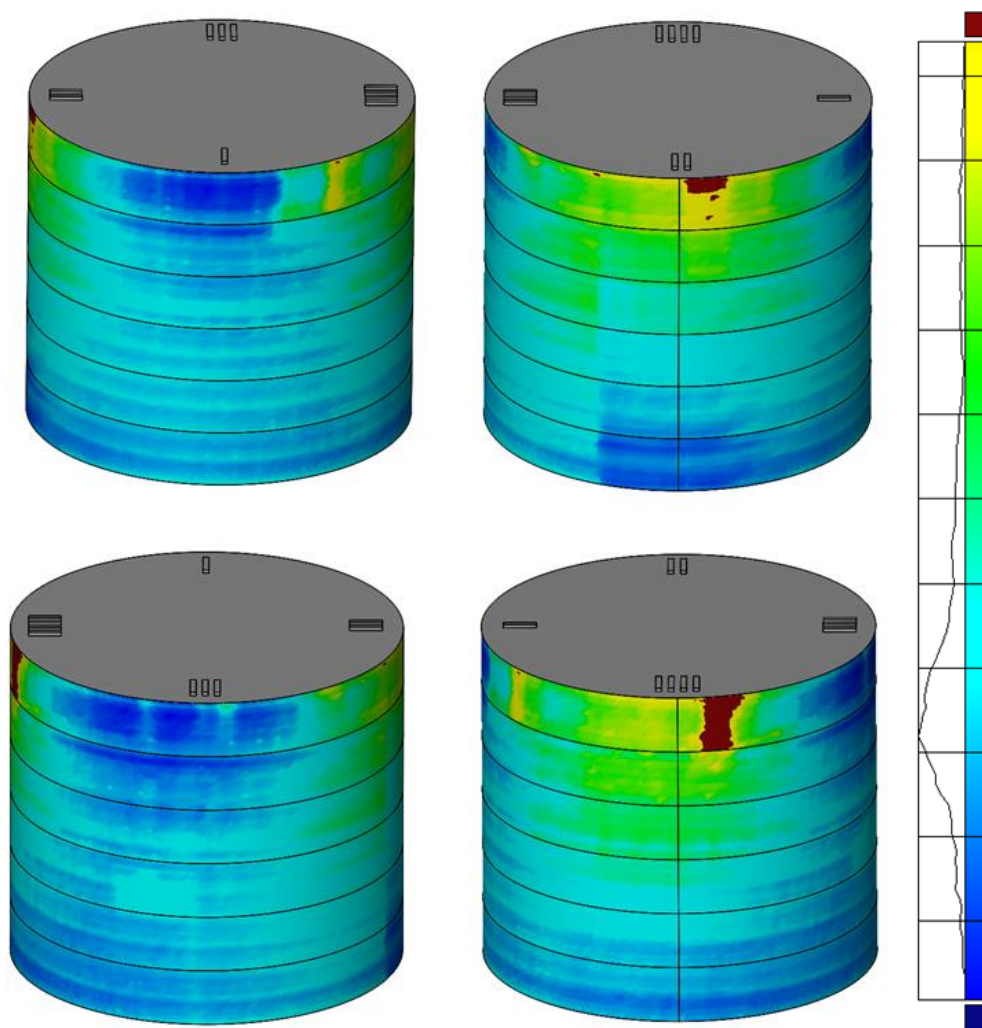
Према табели 6.4.2 и према дијаграму 7.4.1 а) може се уочити да је најнижа вредност  $R_a$  након обраде котрљањем куглице по површини отвора забележена на отвору 3 и износи  $R_a=0.535 \mu m$ . На свим отворима је забележено побољшање  $R_a$ . Поред тога, може се уочити да  $R_a$  опада са повећањем дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде до одређене вредности, а након тога почиње лагано да расте. На последњем отвору, под редним бројем 6, код којег је дубина пенетрације куглице била највећа, забележено је најмање побољшање параметра  $R_a$  и у том случају је  $R_a=0.629 \mu m$ .



Слика 7.4.2: Графичка интерпретација грешке кружности: а) први отвор, б) други отвор, в) трећи отвор, г) четврти отвор, д) пети отвор и њ) шести отвор

Превасходни циљ обраде крутим алатом намењеним за унутрашњу обраду цилиндричних површина је, поред побољшања површинске хрпавости, постизање димензионе и геометријске тачности отвора. Са тим у вези у претходном поглављу у подпоглављу 6.4, у табелама 6.4.3, 6.4.5 и 6.4.6, приказани су резултати који се односе на добијене пречнике отвора, њихове грешке кружности и грешке цилиндричности.

На слици 7.4.2 је приказана графичка интерпретација грешке кружности. Црвеним круговима су приказани максимални и минимални измерени пречници. Црни круг означава средњи измерени пречник. Позитивна одступања од кружности у односу на средњи измерени пречник су графички приказана зеленом шрафуром, а негативна одступања наранџастом. Са слике се може уочити да се максимална одступања јављају на отвору под редним бројем 1, а минимална на отвору под редним бројем 6. Такође се може уочити да грешка кружности опада са повећањем дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде.



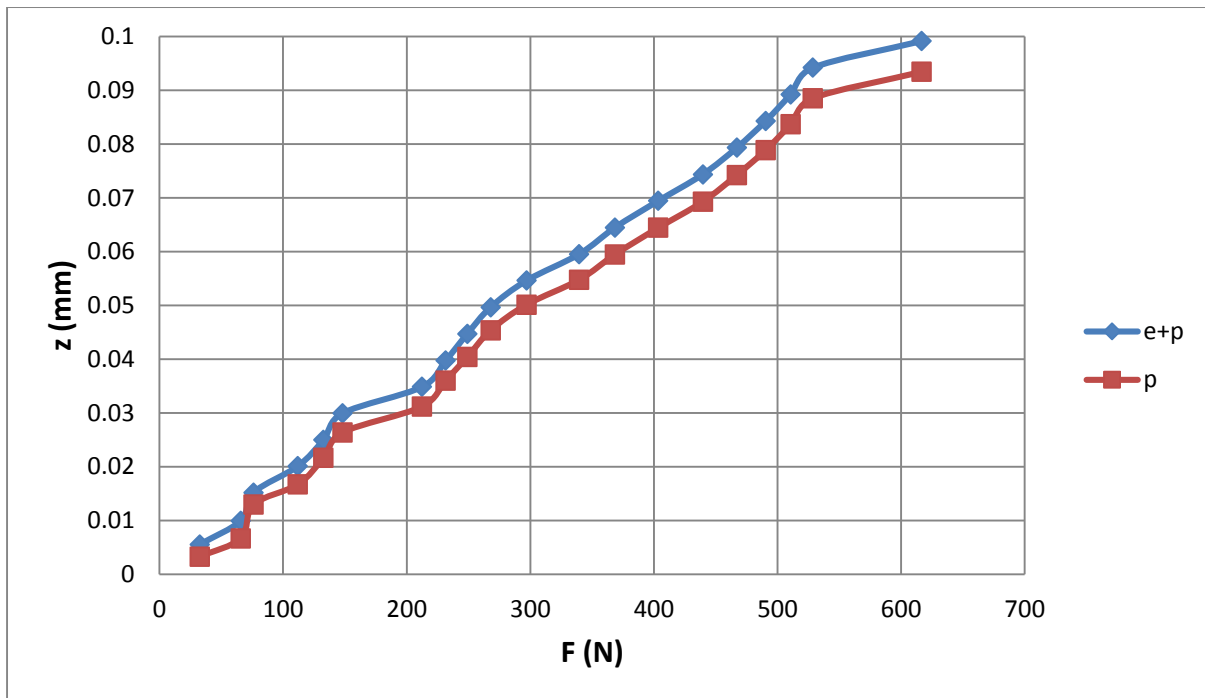
Слика 7.4.3: Резултати CAD инспекције

На слици 7.4.3 су приказани резултати CAD провере отвора. У оквиру CAD провере је извршена анализа геометријских одступања отвора након обраде котрљањем куглице у односу на номиналну геометрију. Анализа је извршена у оквиру програмског пакета *GOM Inspect V7.5 SR2* [140]. Геометријска одступања су приказана у виду мапа региона, у боји, при чему свака боја одговара одређеном нивоу одступања. Максимално

pozitivno odstupanje je 0.0313 mm a maksimalno negativno odstupanje je -0.0595 mm. Oba maksimalna odstupanja se javljaju na otvoru pod rednim brojem 1.

### 7.5. Analiza rezultata numeričkih eksperimenata izvedenih korišćenjem modela procesa obrade kotrljanjem kuglice po površini otvora

Eksperimentima izvršenim korišćenjem modela procesa obrade kotrljanjem kuglice po površini otvora je planirano određivanje vrednosti elastične deformacije otvora nakon izvršene obrade. Poznavanje te vrednosti je od veoma velikog značaja za određivanje finalne mere otvora. Na osnovu rezultata prikazanih u prethodnom poglavlju u podnaslovu 6.5. u tabeli 6.5.1. kreiran je dijagram prikazan na slici 7.5.1.



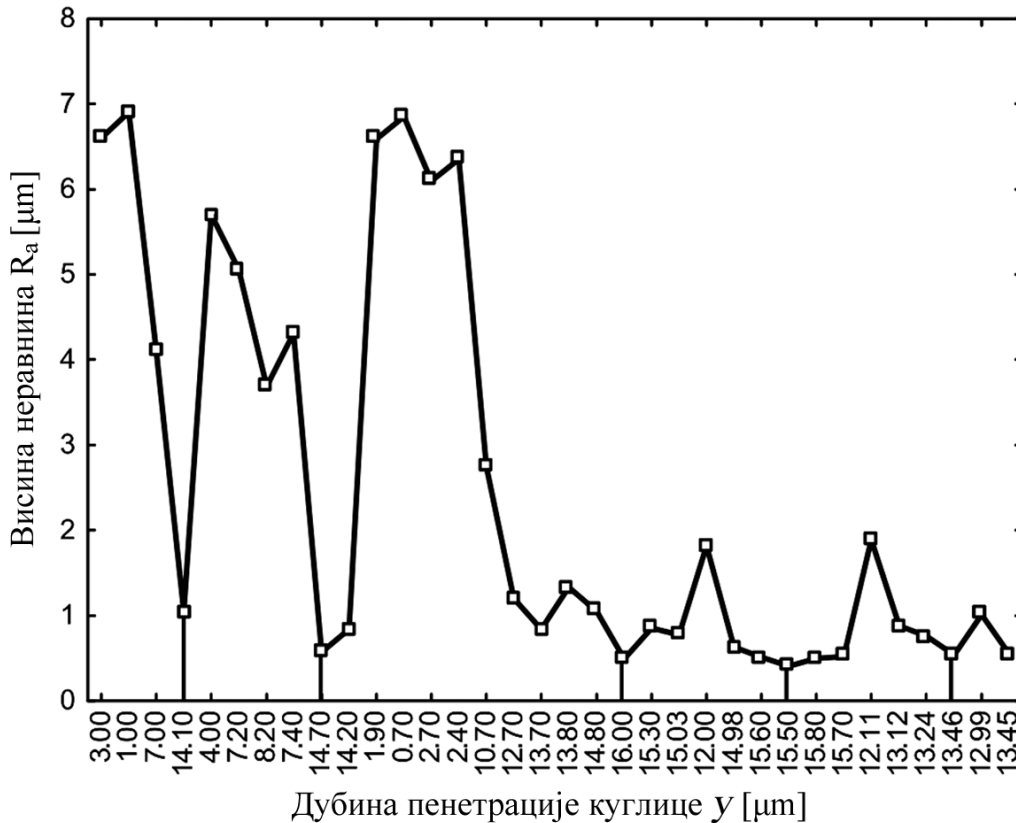
Слика 7.5.1: Зависност између силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде и дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде дуж  $z$ -осе

На слици су приказане две криве: плава крива представља померање чвора који је у контакту са куглицом, црвена крива представља стварно померање истог чвора након растерећења. Односно, плава крива представља збир еластичне и пластичне деформације посматраног чвора у правцу  $z$ -осе док црвена крива представља пластичну деформацију посматраног чвора. Са слике се може уочити да након растерећења предмета обраде долази до еластичног повратног дејства посматраног чвора. Веома је битно одредити удео еластичне деформације јер уколико се познаје њена величина онда је познато и стварно померање чвора након растерећења. Са слике се такође може уочити да са повећањем дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде долази и до повећања удела еластичне деформације. Величина еластичног повратног дејства је директно пропорционална величини дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде.



### 7.6. Оптимизација процеса обраде котрљањем куглице крутим алатом на основу дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде

На основу већ презентованих података добијених експериментом изведеним на универзалном стругу, из табела 6.2.1 и 6.2.2, за обе претходне обраде, може се уочити да постоји зависност између параметра храпавости  $R_a$  и дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $y$ . На слици 7.6.1 је представљена уочена зависност између та два параметра.

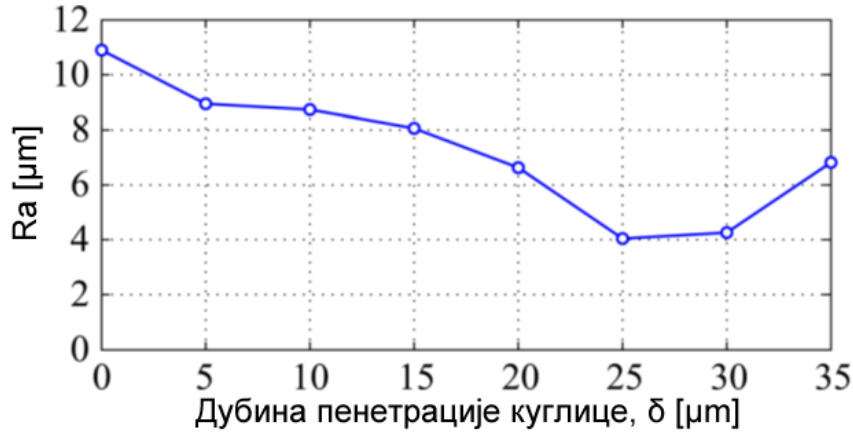


Слика 7.6.1: Зависност површинске храпавости  $R_a$  од дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $y$

На дијаграму се за обе претходне обраде може уочити тренд варијације површинске храпавости  $R_a$  у зависности од дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $y$ . Евидентно је да, за обе претходне обраде, површинска храпавост опада веома брзо док се не достигне максимална висина испупчења профила претходно обрађене површине, односно док се не достигне вредност која је у интервалу  $y=14 \mu\text{m} - 17 \mu\text{m}$ . Након те тачке вредност површинске храпавости веома мало опада или се даље не побољшава. Оптимални резултати, са аспекта побољшања  $R_a$ , добијају се када је дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде приближно једнака максималној висини испупчења профила храпавости  $R_p$ .

На основу резултата добијених симулацијама успостављена је зависност између дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta$  и промене параметра храпавости  $R_a$ . Успостављена зависност је приказана на слици 7.6.2. Најбољи резултати са аспекта побољшања  $R_a$  су постигнути за дубину пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=25 \mu\text{m}$ , при чему је иницијална површинска храпавост са  $R_a=10.9 \mu\text{m}$  сведена

на  $R_a=7.4 \mu m$ . Поред тога, побољшања су приметна за дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде које су мање од максималне висине испупчења иницијалног профила храпавости  $R_p$ . Подсећања ради код иницијалног профила храпавости максимална висина испупчења профила износи  $R_p=22.76 \mu m$ . За мале дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta=5 \mu m$  и  $\delta=10 \mu m$ , као и за дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде које превазилазе вредност  $R_p$ , односно  $\delta=25 \mu m$ , побољшања површинске храпавости су мања.



Слика 7.6.2: Зависност између површинске храпавости  $R_a$  и дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta$  добијена помоћу нумеричких експеримената

Како би се верификовали резултати добијени *FEM* анализом изведен је додатни експеримент који је описан у претходним поглављима. Прикупљени резултати су приказани у претходном поглављу у потпоглављу 6.3, у табели 6.3.2. На основу резултата из табеле 6.3.2 креиран је дијаграм варијација параметра површинске храпавости  $R_a$  у зависности од дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta$  који је приказан на слици 7.6.3.



Слика 7.6.3: Зависност између површинске храпавости  $R_a$  и дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta$  добијена експерименталним путем

Анализом дијаграма са слике 7.6.3 уочава се да са повећањем дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде долази до побољшања  $R_a$  до одређене границе након које  $R_a$  почиње да расте са повећањем дубине пенетрације  $\delta$ . Минимална вредност  $R_a$  се добија за дубину пенетрације куглице  $\delta=16 \mu m$ . Веома је важно приметити да је оптимална вредност дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде веома

блиска максималној висини испупчења профила храпавости  $R_p$  иницијалног профила ( $R_p=15.4 \mu m$ ).

Посматрањем дијаграма са слика 7.6.2 и 7.6.3 може се уочити да се резултати добијени *FEM* анализом и помоћним експериментом, а који се односе на побољшање храпавости, у великој мери поклапају. На основу тога се може закључити да се до највећег побољшања параметра храпавости  $R_a$  долази када су дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде  $\delta$  приближно једнаке максималној висини испупчења иницијалног профила храпавости  $R_p$ .

На крају овог поглавља, на основу презентованих резултата и дијаграма који су креирани коришћењем истих, може се извући закључак да се, без обзира да ли је реч о обради котрљањем куглице по површини предмета обраде на стругу или глодалици, оптимални резултати, са аспекта побољшања резултујуће површинске храпавости  $R_a$ , добијају за вредности дубине пенетрације куглице које су једнаке или приближно једнаке максималној висини испупчења иницијалног профила храпавости  $R_p$  [138].

## 8. Дискусија

Истраживања процеса обраде котрљањем куглице по површини предмета обраде која су до сада објављена обично су вршена коришћењем алата који у себи имају опружни механизам који омогућава обраду са константном силом. Међутим, у теоријској анализи која је дата у поглављу 3 показано је да крутост алата има критичну улогу уколико се желе постићи ниже вредности површинске храпавости и димензионе прецизности. Стога је за извођење експерименталних истраживања пројектован алат високе крутости. На основу дијаграма 7.1.4 се може закључити да се обрадом котрљањем куглице, при чему су сви параметри обраде исти, алатом високе крутости постижу значајно бољи резултати са аспекта побољшања површинске храпавости. Изражене варијације силе које се јављају приликом обраде алатом високе крутости су последица претходне површинске храпавости и грешке равности што је сагласно са представљеним теоријским разматрањима. Сила осцилује у односу на претходно подешену вредност и то се може уочити на сликама од 6.1.4 до 6.1.12, као и на сликама од 6.2.1 до 6.2.12.

Приликом извођења експеримента на *CNC* глодалици који је представљен у поднаслову 5.2. дубина пенетрације алата високе крутости, односно куглице, варирана је у распону од  $6 \mu m$  до  $18 \mu m$ . Примећује се да су ове дубине релативно мале и у вези са тим се може уочити:

- За практичну примену предложене методе обраде котрљањем куглице коришћењем алата високе крутости захтевају релативно високу прецизност позиционирања алата. С обзиром да савремене *CNC* машине алатке обезбеђују прецизност позиционирања која је реда величине испод једног микрометра (до  $0.5 \mu m$ ) и да су дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде у опсегу од  $6 \mu m$  -  $18 \mu m$  може се закључити да је могуће коришћење дубине пенетрације за управљање процесом обраде са грешком која је вероватно испод 10%.
- Експериментална истраживања која су изведена су примарно извршена како би се разјаснио феномен обраде котрљањем куглице коришћењем алата високе крутости. Истраживање је показало да се сила, као један од параметара обраде, може користити као један од кључних фактора за оптимизацију процеса. Међутим практична индустријска примена предложене методе обраде би захтевала да се у алат високе крутости имплементира сензор за мерење силе. На тај начин би се сила којом се куглица притиска о површину предмета обраде могла користити као параметар за оптимизацију процеса обраде.

Експеримент је замишљен као „пуни“ експеримент при чему су параметри обраде, сила, посмак и број пролаза, варирани у оквиру претходно дефинисаних вредности и при томе је обрада вршена на три различите површине које имају различите вредности иницијалних површинских храпавости. На основу резултата експеримента су формиране регресионе једначине са високим коефицијентом корелације. Коришћењем

регресионих једначина може се анализирати утицај сваког од параметара обраде на резултујућу површинску храпавост. На пример, уколико се погледа експонент броја пролаза евидентно је да број пролаза има веома мали утицај на резултујућу површинску храпавост без обзира која је иницијална површинска храпавост. Број пролаза има највећи утицај у случају обраде поља са највишом вредности иницијалне храпавости. Утицај се може одредити уколико се максимални број пролаза  $I=4$  дигне на 0.021286 степен. При томе се добија вредност која износи 1.02995. То указује да утицај броја пролаза на резултујућу површинску храпавост није већи од 3%, при чему се повољније вредности добијају за већи број пролаза. Слично овоме, на основу регресионих једначина се може закључити следеће:

- Силом од 100  $N$ , којом се куглица притиска о површину предмета обраде, примењеном на површину са иницијалном површинском храпавошћу  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$  добија се 63.6% умањења резултујуће површинске храпавости  $R_a$  у односу на резултујућу површинску храпавост која је добијена силом од 300  $N$ .
- Силом од 100  $N$ , којом се куглица притиска о површину предмета обраде, примењеном на површину са иницијалном површинском храпавошћу  $R_{a(ini)}=1.36 \mu m$  добија се 37.54% умањења резултујуће површинске храпавости  $R_a$  у односу на резултујућу површинску храпавост која је добијена силом од 300  $N$ .
- Силом од 100  $N$ , којом се куглица притиска о површину предмета обраде, примењеном на површину са иницијалном површинском храпавошћу  $R_{a(ini)}=0.99 \mu m$  добија се 35.7 % умањења резултујуће површинске храпавости  $R_a$  у односу на резултујућу површинску храпавост која је добијена силом од 300  $N$ .

Горе наведено указује да мање силе дају већу редукцију резултујуће површинске храпавости када се примене на површине са већом иницијалном храпавошћу.

На основу графика са слика 7.1.1, 7.1.2 и 7.1.3 може се закључити да се у оквиру интервала броја пролаза и посмака најнижа вредност површинске храпавости  $R_a$  добија на површини са иницијалном површинском храпавошћу  $R_{a(ini)}=0.99 \mu m$  коришћењем силе од 100  $N$ . Поред тога, на основу истих дијаграма, применом силе од 300  $N$  на површини са најнижом вредношћу иницијалне површинске храпавости  $R_{a(ini)}=0.99 \mu m$  добија се највиша вредност површинске храпавости у целом интервалу варијације параметара. Највиша вредност  $R_a$ , у интервалу варијације параметара, добија се за максималну вредност примењене силе од 300  $N$ . На основу дијаграма и регресионих једначина се закључује да се најниже вредности  $R_a$  добијају са малом вредношћу силе ( $F < 100 N$ ) на површинама са мањом иницијалном површинском храпавошћу.

Значајан је утицај посмака на резултујућу површинску храпавост. На основу анализе регресионих једначина следи:

- Посмаком од 0.1  $mm$ , на површини са иницијалном површинском храпавошћу  $R_{a(ini)}=2.02 \mu m$ , добија се 79.6% умањења резултујуће површинске храпавости  $R_a$  у односу на резултујућу површинску храпавост која је добијена посмаком од 0.3  $mm$ .
- Посмаком од 0.1  $mm$ , на површини са иницијалном површинском храпавошћу  $R_{a(ini)}=1.36 \mu m$ , добија се 74.67% умањења резултујуће површинске храпавости  $R_a$  у односу на резултујућу површинску храпавост која је добијена посмаком од 0.3  $mm$ .
- Посмаком од 0.1  $mm$  на површини са иницијалном површинском храпавошћу  $R_{a(ini)}=0.99 \mu m$ , добија се 75.8% умањења резултујуће површинске храпавости  $R_a$

у односу на резултујућу површинску храпавост која је добијена посмаком од  $0.3 \text{ mm}$ .

На основу тога, у датим експерименталним условима, утицај посмака на резултујућу површинску храпавост веома мало зависи од вредности иницијалне површинске храпавости.

На слици 7.1.5 приказани су профили храпавости површина, у истој размери, пре и након обраде котрљањем куглице за случај у коме је добијена површина са најнижом вредношћу  $R_a=0.062 \text{ }\mu\text{m}$ , при чему је  $R_{a(\text{ini})}=0.99 \text{ }\mu\text{m}$ . Резултујућа површинска храпавост је 16 пута мања и еквивалентна је површини која се добија обрадом полирањем.

Фокус експеримента изведеног на универзалном стругу коришћењем алата високе крутости је дефинисање одговарајуће дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде, односно дефинисање дубине којом ће се добити оптимална вредност резултујуће површинске храпавости, без обзира на магнитуду силе и остале параметре процеса обраде котрљањем куглице. На основу теоријских разматрања из потпоглавља 3.4. се сматра да ће се коришћењем алата високе крутости, при чему се дубина пенетрације куглице одређује по једначини 3.4.2, односно 3.4.4, добити минимална вредност резултујуће површинске храпавости.

Основна претпоставка, по којој се дубина пенетрације одређује према једначини 3.4.2, потврђена је резултатима експерименталних истраживања. Дијаграм са слике 7.6.1 јасно указује да дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде која је веома блиска вредности максималне висине испупчења иницијалног профила храпавости даје најниже вредности резултујуће површинске храпавости  $R_a$ . За прву, односно грубу претходну обраду максимална висина испупчења профила  $R_p$  је у распону  $15 \text{ }\mu\text{m} - 16 \text{ }\mu\text{m}$ . Евидентно је, са слике 7.6.1 и из табеле 6.2.1, да се за  $y=14.7 \text{ }\mu\text{m}$  добија најнижа вредност резултујуће површинске храпавости  $R_a=0.57 \text{ }\mu\text{m}$ . Ако посматрамо другу, односно фину претходну обраду максимална висина испупчења иницијалног профила храпавости се креће у интервалу  $14 \text{ }\mu\text{m} - 17 \text{ }\mu\text{m}$ . Са слике 7.6.1 и из табеле 6.2.2 се уочава да се за  $y=15.5 \text{ }\mu\text{m}$  добија најнижа вредност резултујуће површинске храпавости  $R_a=0.41 \text{ }\mu\text{m}$ . Поред тога, треба приметити да за случај фине претходне обраде на изводницама  $AB$  и  $CD$  постоји низ вредности дубина пенетрације у које су приближно једнаке  $R_p$  и које дају приближно минималне вредности резултујуће  $R_a$ .

На основу истог дијаграма са слике 7.6.1 запажамо да за обе претходне обраде резултујућа површинска храпавост значајно опада док дубина пенетрације куглице у не достигне вредности које су приближне максималној висини испупчења иницијалног профила храпавости, а након тога смањење  $R_a$  је значајно мање. Такође, за грубу претходну обраду процентуална промена  $R_a$  је значајно већа. Ово запажање може да буде веома корисно при обради површина котрљањем куглице које имају грубу претходну обраду.

Евидентно је да материјалу који тече са врхова неравнина треба обезбедити простор у који ће се сместити (слика 3.4.2). Услов једнакости површина испод и изнад средње линије профила храпавости теоретски дозвољава истовремено смањење максималне висине испупчења  $R_p$  и максималне дубине удубљења  $R_v$  профила. Материјал који тече са испупчења профила попуњава удубљења профила и при томе не креира нова испупчења. По овој тврдњи (илустрована на сликама од 7.2.1 до 7.2.4) и приказује да материјал који тече шири врхове испупчења и на тај начин попуњава удубљења профила храпавости.

Експеримент је изведен на универзалном стругу код кога није могуће прецизно дефинисати дубине пенетрације куглице. Другим речима, лимитирана прецизност клизних вођица струга, присуство зазора и попустљивости спречава могућност кретања куглице по теоријски дефинисаним путањама. Због тога је одговарајућа дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде одређена индиректно праћењем варијација силе. Силе су периодично повећаване како би се постигле жељене дубине пенетрације куглице. Дијаграми са слика 7.2.1 - 7.2.4 јасно показују да долази до постепеног смањења површинске храпавости у интервалу у ком су силе у распону од 32  $N$  до 320  $N$ .

Како експериментом изведеним на стругу није било могуће директно одређивање дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде, изведени су нумерички експерименти и додатни експерименти на *CNC* глодалици којим су верификовани резултати симулација. На основу нумеричких симулација и експеримената изведених на *CNC* глодалици може се тврдити да је претпоставка да се максимални квалитет површине постиже обрадом код које је дубина пенетрације куглице приближно једнака максималној висини испупчења иницијалног профила храпавости. Поред тога, утврђено је да се дубинама пенетрације куглице које превазилазе  $R_p$  не утиче значајно на даље побољшање површинске храпавости. Главни разлог због кога се то дешава је то што материјал који се деформише приликом обраде вероватно креира нове неравнине. Резултати добијени *FEM* анализом показују да се током обраде пластично течење врхова материјала одвија тако што се празан простор између неравнина попуњава док део материјала тече непосредно испред куглице у смеру посмака. Ова тврдња се најбоље може уочити на слици 7.3.1.

Због комплексности процеса обраде котрљањем куглице, као и избегавања могућих грешака при усвајању вредности коефицијента трења између куглице и предмета обраде, овај коефицијент је током извођења симулација био подешен на нулу. У стварном процесу коефицијент трења је свакако већи од нуле. Међутим, без обзира на усвојену вредност коефицијента трења, симулације су дале резултате који су у сагласју са резултатима експеримената изведених на *CNC* глодалици (слике 7.6.2 и 7.6.3).

Анализом напонских стања са слика 6.3.1 - 6.3.7 могуће је уочити да се за дубине пенетрације куглице које достижу вредности максималне висине неравнина добијају високи унутрашњи напони на притисак у површинском слоју који достижу вредности до 130  $MPa$ . Уколико се узме у обзир чињеница да материјал који се користио за нумеричке експерименте има напон на граници течења од 60  $MPa$  могуће је да се претпостави да високи напони на притисак имају утицај на феномен љуштења који се може појавити. Љуштење површинског слоја након обраде котрљањем куглице је до сада повезивано са лошим конструкцијским решењем алата, односно решењем алата код којег није обезбеђено неометано котрљање куглице, већ долази до повремених клизања. Ова појава се уочава код еластичних алата када се обрада врши са великим вредностима силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде или када се обрада врши у више пролаза. Тврдња да до појаве љуштења долази када се прекорачи дубина пенетрације (када је већа од максималне висине неравнина) није доказана. Међутим то може бити предмет даљег истраживања.

На основу истраживања која су у овом раду извршена коришћењем алата високе крутости за обраду спољашњих призматичних и цилиндричних површина, установљено је да крутост алата има кључну улогу за постизање адекватног квалитета обрађене површине. У ту сврху развијен је веома крут, прилагодљиви алат, намењен за обраду унутрашњих цилиндричних површина, односно отвора. Алат омогућава слободно

котрљање куглица, без појаве клизања, што је од великог значаја уколико се жели постићи оптимална површинска храпавост. Пошто се алат може прилагодити на пречник отвора, може се користити на алатним машинама које имају извесну грешку у вретеништу.

Уколико се обрати пажња на резултате из табела 6.4.3 и 6.4.4, може се уочити да пречник отвора након обраде котрљањем куглице одговара дубини пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Прецизније, постоји извесна девијација између захтеване и постигнуте мере пречника отвора. Приметно је да разлика између захтеване и постигнуте мере опада са порастом дубине пенетрације. Ова разлика се може приписати еластичним деформацијама предмета обраде и алата, односно еластичним деформацијама котрљајних лежајева. Овај проблем се може елиминисати повећањем крутости алата. Све ово води ка закључку да се обрадом котрљањем куглице коришћењем алата високе крутости може постићи димензиона прецизност што може бити веома корисно у различитим случајевима, на пример, приликом обраде отвора великих пречника у које се смештају котрљајни лежајеви.

Због постојања разлике између захтеване и постигнуте мере отвора извршене су *FEM* анализе са циљем одређивања удела еластичне деформације. Модел који је искоришћен уједно је могао да послужи и за одређивање напонских стања у предмету обраде. Као што је очекивано, напони расту са порастом дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Резултати *FEM* анализе показују да је ефекат еластичног растерећења директно пропорционалан дубини пенетрације куглице (табела 6.5.1). Са друге стране, резултати експерименталних истраживања из табеле 6.4.4. показују да са повећањем дубине пенетрације ефекат еластичног растерећења прво опада па се потом повећава. Ова разлика између резултата симулација и експерименталних се може објаснити утицајем сила стезања, као и утицајем топлоте која се генерише током обраде.

Стезање предмета обраде је извршено у зонама отвора 5 и отвора 6 и управо у тој зони се уочава највећа девијација између резултата. У зони отвора 5 девијација износи  $4.7 \mu m$ , док у зони отвора 6 износи  $2.6 \mu m$ . Редукције пречника отвора у зонама отвора 5 и 6 пре обраде су последица сила стезања. Према томе, због редукције отвора 5 и 6 дубине пенетрације превазилазе теоретске и захтеване вредности. У случајевима отвора 1 - 4 то се не може уочити.

Процес обраде котрљањем куглице генерише извесне температурне ефекте. За време котрљања куглице генеришу топлоту која проузрокује ширење материјала. Ова појава такође утиче на пречнике отвора. Без обзира што куглице генеришу мање топлоте током котрљања, утицај температуре може бити значајан, посебно ако се у обзир узме следеће:

- Линеарни коефицијент термичке експанзије у распону од  $20^{\circ}C$  до  $100^{\circ}C$  износи  $\alpha=23.4 \mu m/m^{\circ}C$  и он се не може занемарити.
- У зонама отвора 5 и 6 предмет обраде је у контакту са стезним прибором што генерише напоне у контактним површинама предмета обраде. Ови напони су супротни у односу на температурне ефекте и они држе под контролом термичку експанзију у зонама отвора 5 и 6. Као последица тога пречници отвора 5 и 6 се умањују у односу на остале отворе (отвори од 1 до 4) и то доприноси појави да су дубине пенетрације веће у односу на номиналне, односно теоретске вредности.

Треба нагласити да у овом случају говоримо о девијацијама које су веома мале и у опсегу су од  $0.0004 mm$  до  $0.00047 mm$ .

На основу резултата из табела 6.4.5 и 6.4.6 може се закључити да се обрадом котрљањем куглице алата високе крутости утиче на грешку кружности и грешку цилиндричности.



Ако се упореде вредности пре обраде, када је грешка кружности износила  $0.0056 \text{ mm}$ , и вредности средње грешке кружности након обраде, која износи  $0.0031 \text{ mm}$ , може се рећи да је дошло до смањења грешке. Исти случај је и са грешком цилиндричности која је пре обраде износила  $0.0440 \text{ mm}$ , а после обраде је опала на  $0.0193 \text{ mm}$ . Поред тога треба нагласити да грешке цилиндричности и кружности опадају са повећањем дубине пенетрације куглице (слика 7.4.2).

Посматрањем резултата из табеле 6.4.2 и са слике 7.4.1 може се закључити да се површинска храпавост побољшава са повећањем дубине пенетрације куглице до одређеног нивоа, након чега храпавост почиње да расте. На основу тога се закључује да се оптимизацијом на бази дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде могу побољшати површинска храпавост и димензиона прецизност.

## 9. Закључци

Теоретска разматрања и резултати експерименталних истраживања показују да крутост алата значајно утиче на резултујућу површинску храпавост обрађене површине. Резултати експерименталних истраживања потврђују тврдњу да се обрадом котрљањем куглице коришћењем алата високе крутости може веома ефектно изводити процес обраде. Резултати обимних експерименталних истраживања су омогућили креирање регресионих једначина које су високог степена корелације између параметра површинске храпавости  $R_a$  и најугицајнијих параметара процеса: силе којом се куглица притиска о површину предмета обраде, посмака, броја пролаза и иницијалне површинске храпавости. На основу регресионих једначина установљено је да сила и посмак значајно утичу на резултујућу површинску храпавост док број пролаза има веома мали утицај. Горенаведено је у складу са литературним изворима. Поред тога, установљено је да иницијална површинска храпавост има значајан утицај на процес обраде. Одређеном комбинацијом параметара обраде добијена је резултујућа површинска храпавост, која износи  $R_a=0.062 \mu m$ , што је резултат који није забележен у доступним литературним изворима. Према до сада публикованим радовима, најбољи забележени резултат је  $R_a=0.19 \mu m$ , постигнут на челику AISI 1042 који је претходно брушен.

На основу резултата експеримената, површине које су добијене обрадом котрљањем куглице коришћењем алата високе крутости одговарају по вредностима параметара храпавости површинама које се добијају обрадом полирањем. Вредности резултујуће површинске храпавости које су добијене коришћењем крутог алата су знатно мање у односу на вредности које се добијају коришћењем еластичних алата. Овим је потврђена хипотеза по којој се претпоставља да се крутим алатом могу постићи бољи резултати са аспекта површинске храпавости у односу на претходно постојеће еластичне конструкције.

Теоријске претпоставке које се односе на дефинисање оптималне трајекторије алата која ће водити ка добијању најповољнијих резултата са аспекта побољшања површинске храпавости су експериментално потврђене. Куглица која се котрља у систему алата високе крутости предефинисаном дубином пенетрације ће довести до оптималне минималне површинске храпавости, без обзира на квалитет иницијалне обраде. На основу експерименталних резултата утврђено је да дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде која је приближно једнака максималној висини испупчења профила  $R_p$  води ка добијању минималне вредности параметра површинске храпавости  $R_a$ . Такође, дубине пенетрације које су веће од  $R_p$  не утичу значајно на даље побољшање параметра  $R_a$ , пре свега зато што део материјала који се креће непосредно испред куглице креира нове неравнине. Податак да се обрадом котрљањем куглице са

предефинисаном дубином пенетрације, која је приближно једнака  $R_p$ , веома је битан посебно код обраде површина које имају релативно високу површинску храпавост.

Преклапањем профила храпавости пре и након обраде различитим вредностима силе у истој размери у великој мери је разјашњен феномен деформације врхова неравнина. Дубина пенетрације која је једнака  $R_p$  задовољава услов приближне једнакости површина које се налазе изнад и испод средње линије профила, односно једнакости површина испупчења и удубљења профила.

На основу теоријских разматрања, *FEM* симулација и експеримента на *CNC* глодалици могуће је извести неколико закључака:

- Презентовани теоретски модел претходно обрађене површине је кинематски компатибилан за истосмерно и супротносмерно глодање.
- На основу резултата симулација установљено је да се минимална површинска храпавост,  $R_a$ , добија када је дубина пенетрације куглице приближно једнака максималној висини испупчења профила храпавости  $R_p$ .
- Утврђена је дистрибуција ефективних, односно *Von Mises*-ових, напона у површинском слоју. Порастом дубине пенетрације расту и вредности унутрашњих напона.
- Како би се верификовали резултати нумеричких експеримената, изведен је експеримент на предмету обраде који је претходно обрађен чеоним глодањем. Теоретски, чеоно (површина добијена експериментом на *CNC* глодалици) и обимно глодање (површина коришћена као улаз за симулације) дају површине чије се површинске храпавости међусобно разликују.
- Без обзира на чињеницу да *FEM* симулације и експеримент користе различите резне алате који дају површине другачијих површинских карактеристика као и да су коришћене различите дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде, добијају се идентични резултати.
- У оба случаја, минимална резултујућа површинска храпавост,  $R_a$ , добијена је када је дубина пенетрације куглице у материјал предмета обраде приближно једнака максималној висини испупчења профила храпавости  $R_p$ .
- Обрада котрљањем куглице са дубином пенетрације која је приближно једнака  $R_p$  даје најповољније услове за течење материјала са врхова неравнина у удубљења профила храпавости.

Коришћењем алата високе крутости намењеног за унутрашњу обраду цилиндричних површина могуће је добити бољу димензиону и геометријску прецизност предмета обраде. Анализа резултата доводи до закључка да се коришћењем алата високе крутости отвори могу проширити до  $0.06 \text{ mm}$  што је веома значајан резултат.

Проширењем отвора на жељену димензију се не нарушавају грешка кружности и грешка цилиндричности, већ се, напротив, њихове вредности смањују са повећањем дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде. Средњи фактор редукције грешке кружности износи 1.81, док код грешке цилиндричности износи 2.28.

Овим је потврђена и друга хипотеза по којој је претпостављено да се може вршити проширивање отвора реда величине једног стотог дела милиметра, а да се при томе постиже и веома висока димензиона прецизност.

Додатно, применом предложене методе обраде побољшава се површинска храпавост свих отвора. Иницијална вредност површинске храпавости се побољшава просечно за 35%. Поред тога се мора нагласити да је средње аритметичко одступање профила иницијалне површине износило  $R_a=0.818 \mu m$ , што одговара површинама које су добијене финим стругањем односно финим глодањем. На основу претходних резултата површинска храпавост се може унапредити за више од 35% у случајевима обраде претходно грубо обрађених површина. Међутим, због ограничења која су повезана са планом експеримената, усвојено је да иницијална површина буде финија. Резултати воде ка закључку да је и са крутим алатом намењеним за обраду отвора могуће вршити оптимизацију процеса на основу дубине пенетрације куглице у материјал предмета обраде уколико је крајњи циљ постизање одговарајуће вредности површинске храпавости.

Ово истраживање отвара могућности за нова истраживања као што су тестирање система крутог алата на различитим материјалима предмета обраде, тестирање различитих режима обраде и тестирање обраде на површинама које су обрађене на различитим алатним машинама. Предложени модел даје нову димензију процесу обраде котрљањем куглице и даје нове правце за истраживање крутог алата, без обзира на иницијалну обраду, режиме обраде или материјале предмета обраде.

Будућа истраживања би требало усмерити ка добијању површина чија ће површинска храпавост бити еквивалентна површинској храпавости куглице која се приликом процеса обраде користи. Као што је претходно и речено, правци будућих истраживања процеса обраде алатом високе крутости котрљањем куглице по површини предмета обраде би требало да буду усмерени ка испитивању утицаја обраде на физичко-хемијске карактеристике резултујуће површине. То се посебно односи на испитивање утицаја обраде на микротврдоћу, отпорност на хабање, корозиону отпорност и низ других карактеристика. Поставља се питање да ли се предложеном методом оптимизације долази до оптималних резултата који се тичу унапређења наведених карактеристика. Због обима експерименталних истраживања у овом раду није посебно обрађена пажња на наведене карактеристике али то може бити предмет додатних истраживања.

Поред тога, конструктивна решења оба алата могу бити подвргнута одређеним изменама. На пример, код алата високе крутости који је намењен за спољашњу обраду призматичних и цилиндричних површина може се надоградити један држач који би спречавао могућност испадања куглице или, у случају крутог алата намењеног за обраду отвора, могла би се унапредити попустљивост веза и на тај начин додатно повећати његова крутост.

---

## Литература

1. Балашкин Б. С., Основы технологии машиностроения, Машиностроение, Москва, 1966
2. Корсаков В. С., Основы технологии машиностроения, Машиностроение, Москва, 1977
3. Филоненко С. Н., Резание металлов, Техника, Киев, 1975
4. Горелов В. Н., Резание металлов, Машиностроение, Москва, 1966
5. Ящерицын П. И., Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении, Высшэйшая школа, Минск, 1974
6. Ящерицын П. И., Ерменко М. Л., Жигалко Х. И., Основы резания материалов и режущий инструмент, Высшэйшая школа, Минск, 1975
7. Kalpakjian S., Manufacturing Process for Engineering Materials, Addison Wesley Publishing Company, Sydney, 1997
8. Armarego E. J. A., Brown R. H., The Machining of Metals, Printice-Hall Inc., New York, 1969
9. Trent E. M., Metal Cutting, Butterworths, London 1978
10. Vidosic J. P., Metal machining and forming technology, The Ronald Press Company, New York, 1964
11. Schey J. A., Introduction Manufacturing Processes, McGRAW-HILL Book Company Inc., New York, 1977
12. Black P. H., Theory of Metal Cutting, McGRAW-HILL Book Company Inc., New York, 1961
13. Krar S. F., Technology of Machine Tools, McGRAW-HILL Book Company of Canada Limited, Toronto, 1969
14. Ivković B., Tribologija rezanja, sredstva za hlađenje i podmazivanje, Građevinska knjiga, Beograd, 1979
15. Ivković B., Obrada metala rezanjem, izbor ekonomičnih režima obrade, V izdanje, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 1985
16. Ivković B., Teorija rezanja – osnovi mehanike, termodinamike, tribologije i ekonomije procesa rezanja, Samostalno autorsko izdanje, Kragujevac, 1991
17. Ivković B., Obrada metala rezanjem – mehanika rezanja, tribologija rezanja, termodinamika rezanjem, ekonomija rezanja, Jugoslovensko društvo za tribologiju, Kragujevac, 1994
18. Lazić M., Tehnologija obrade metala rezanjem, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Jugoslovensko društvo za tribologiju, Kragujevac, 2002
19. Lazić M., Obrada metala rezanjem, monografija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2002
20. Lazić M., Nedić B., Mitrović S., Tehnologija obrade metala rezanjem – izbor režima obrade, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2002
21. Kalajdžić M., Tehnologija mašinogradnje I, Mašinski fakultet, Beograd, 1989
22. Stanić J., Teorija obrade metala I, Mašinski fakultet, Beograd, 1986
23. Kovač P., Milikić D., Rezanje metala, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1998

24. Milikić D., Tehnologija obrade rezanjem, opšta i primenjena teorija, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Novi Sad, 2003
25. Horvat O., Mehanička tehnologija, obrada skidanjem strugotine, Tehnička kniiga, Zagreb, 1965
26. Musafiija B., Obrada metala plastičnom deformacijom I i II deo, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo, 1965
27. Devedžić B., Osnovi teorije plastičnog deformisanja metala, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 1975
28. Ivković B., Rac A., Tribologija, Jugoslovensko društvo za tribologiju, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1995
29. Bhushan B., Principles and Application of Tribology, Wiley, New York, 1999
30. Bhushan B., Handbook of Micro/Nanotribology, 2<sup>nd</sup> edition, CRC, Boca Raton, 1999
31. Buckley D. H., Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication, Elsevier, Amsterdam, 1981
32. Gatos H. C., Ku P. M., Structure of Surfaces and their interactions, Interdisciplinary Approach to Friction and Wear, SP-181, NASA, Washington D.C., pp. 7-84, 1968
33. Haltner A. J., Ling F. F. et al., The Physics and Chemistry of Surfaces: Surface Energy, Wetting and Adsorption, in Boundary Lubrication, ASME, New York, pp.39-60, 1969
34. Бобров В. Ф., Основы теорий резания металлов, Машиностроение, Москва, 1975
35. Зорев Н. Н., Грановский Г. И., и др., Развитие науки о резаний металлов, Машиностроение, Москва, 1967
36. Lazić M., Osnovi metrologije, mašinski fakultet, Kragujevac, 1987
37. Lazić M., Milićević R., Merenje i kontrola, Viša tehnička škola mašinske i saobraćajne struke, Kragujevac, 2000
38. Babić M., Doprinos istraživanju triboloških svojstava kontaktnih slojeva kroz razvoj tribometrije, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1994
39. Astakhov V. P., Davim J. P., Tribology in Manufacturing Technology, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
40. F. Gharbi, S. Sghaier, K.J. Al-Fadhalah, and T. Benameur, Effect of Ball Burnishing Process on the Surface Quality and Microstructure Properties of AISI 1010 Steel Plates. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, pp. 903–910, 2011
41. Y. C. Lin, S. W. Wang, H.-Y. Lai, The relationship between surface roughness and burnishing factor in the burnishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 23, Issue 9-10, pp. 666-671, 2004
42. A.M. Hassan, An Investigation into Surface Characteristics of Burnished Cast Al-Cu Alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, Issue 6, pp. 813–821, 1997
43. W. Bouzid Saï and J. L. Lebrun, Influence of Finishing by Burnishing on Surface Characteristics. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 12, Issue 1, pp. 37-40, 2003
44. G. S. Raman, K. A. Padmanabhan, Influence of Martensite Formation and Grain Size on Room Temperature Low Cycle Fatigue Behaviour of AISI 304LN Austenitic Steel. *Materials Science and Technology* 10(7): pp. 614–620, 1994

45. Gonzales J.L., Aranda R., Jonapa M., The Influence of Grain Size on the Kinetics of Strain Induced Martensite in Type 304 Stainless Steel. in Nordberg H, Borklund J, (Eds.) Applications of Stainless Steels. The Institute of Metals ASM International, Stockholm, Sweden, pp. 1009–1016, 1992
46. Brandis H, Schmid H, Schaffrath W, Einfluß von mechanischer Beanspruchung auf die Restaustenitumwandlung verschiedener Stähle. Hartereitechnische Mitteilungen 40(2): pp. 57–64, 1985
47. Sauveur A., What is steel? The Iron Age 113: pp. 581–583, 1924
48. Razim C., Über den Einfluß von Restaustenit auf das Festigkeitsverhalten einsatzgeharteter Probekörper bei schwingender Beanspruchung. Hartereitechnische Mitteilungen 23: pp. 1–8, 1968
49. E. Brinksmeier, M. Garbrecht, D. Meyer, J. Dong, Surface hardening by strain induced martensitic transformation. Production Engineering, Vol.2, Issue 2, pp. 109–116, 2008
50. E. Brinksmeier, M. Garbrecht, D. Meyer, Cold surface hardening. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 57, Issue 1, pp. 541–544, 2008
51. D. Meyera, E. Brinksmeier, F. Hoffmann, Surface hardening by cryogenic deep rolling. Procedia Engineering, Vol. 19, pp. 258 – 263, 1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), 2011
52. N. H. Loh, S. C. Tam, and S. Miyazawa, A Study of the Effect of Ball-Burnishing Parameters on Surface Roughness Using Factorial Design, Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 18, Issue 1, pp. 53–61, 1989
53. M. H. El-Axir, O. M. Othman, and A. M. Abodiena, Study of Inner Surface Finishing of Aluminum Alloy 2014 by Ball Burnishing Process, Journal of Materials Processing Technology, Volume 202, Issues 1–3, pp. 435–442, 2008
54. M. H. El-Axir, An Investigation into Roller Burnishing, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, Issue 11, pp. 1603–1617, 2000
55. H. Hamadache, L. Laouar, N. E. Zeghib, and K. Chaoui, Characteristics of Rb40 Steel Superficial Layer Under Ball and Roller Burnishing, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 180, Issues 1–3, pp. 130–136, 2006
56. M. H. El-Axir and A. A. Ibrahim, Some Surface Characteristics Due to Center Rest Ball Burnishing, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 167, Issue 1, pp. 47–53, 2005
57. S. Fang-Jung and H. Chih-Cheng, Surface Finishing of Hardened and Tempered Stainless Tool Steel Using Sequential Ball Grinding, Ball Burnishing and Ball Polishing Processes on a Machining Centre, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 205, Issues 1-3, pp. 249–258, 2008
58. L. Liviu, N.V. Sorin, and M. Ioan, Effects of Working Parameters on Surface Finish in Ball-Burnishing of Hardened Steels, Precision Engineering, Vol. 29, Issue 2, pp. 253–256, 2005
59. T. A. El-Taweel, M. H. El-Axir, Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 41, Issue 3-4, pp. 301-310, 2009

60. M. Nemat and A. C. Lyons, An Investigation of the Surface Topography of Ball Burnished Mild Steel and Aluminium. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, Issue 7, pp. 469–473, 2000
61. T. Morimoto and K. Tamamura, Burnishing process using a rotating ball tool-effect of tool material on the burnishing process, *Wear*, Vol. 147, Issue 1, pp. 185–193, 1991
62. M. H. El-Axir, O. M. Othman, and A. M. Abodiena, Improvements in Out-of-Roundness and Microhardness of Inner Surfaces by Internal Ball Burnishing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, Issues 1-3, pp. 120-128, 2008
63. M. H. El-Axir and M. M. El-Khabeery, Influence of Orthogonal Burnishing Parameters on Surface Characteristics for Various Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, Issues 1-3, pp. 82–89, 2003
64. M. M. El-Khabeery and M. H. El-Axir, Experimental Techniques for Studying the Effects of Roller-Burnishing Parameters on Surface Integrity, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, Issue 12, pp. 1705–1719, 2001
65. A. M. Hassan and A. M. S. Momani, Further Improvements in Some Properties of Shot Peened Components Using the Burnishing Process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, Issue 12, Pages 1775–1786, 2000
66. A.M. Hassan and A.S. Al-Bsharat, Improvements in Some Properties of Non-Ferrous Metals by the Application of the Ball-Burnishing Process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, Issue 3, pp. 250–256, 1996
67. K. Palka, A. Weronki, and K. Zaleski, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Burnished X5CrNi 18-9 Stainless Steel, *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 16, Issue 1-2, pp. 57–62, 2006
68. R. Rajaselkariah and S. Vaidyanathan, Increasing the wear resistance of steel components by ball burnishing, *Wear*, Vol. 34, Issue 2, pp. 183–188, 1975
69. M. L. Neema and P. C. Pandey, Investigation of the performance characteristic of cold-worked machined surfaces, *Wear*, Vol. 60, Issue 1, pp. 157–166, 1980
70. R. Narayan, Corrosion resistance of ball burnished components. 13th AIMTDR Conference, Jadavpur University, India, pp. 6–10, 1988
71. P. Prév y , J. Cammett, The influence of surface enhancement by low plasticity burnishing on the corrosion fatigue performance of Al7075-T6. *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, Issue 9, pp. 975-982, 2004
72. F. Gharbi, S. Sghaier, H. Hamdi, T. Benameur, Ductility improvement of aluminum 1050A rolled sheet by a newly designed ball burnishing tool device, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 60, Issues 1-4, pp. 87-99, 2012
73. X. Yu, L. Wang, Effect of various parameters on the surface roughness of an aluminium alloy burnished with a spherical surfaced polycrystalline diamond tool, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, Issue 3, pp. 459–469, 1999
74. H. Luo, J. Liu, L. Wang, Q. Zhong, Investigation of the burnishing force during the burnishing process with a cylindrical surfaced tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, No. 6, pp. 893-904, 2006



75. W. Bouzid, O. Tsoumarev, K. Sai, An investigation of surface roughness of burnished AISI 1042 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, Issue 1-2, pp. 120–125, 2004
76. M. Korzynski, A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction. *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, Issue 1, pp. 625-633, 2009
77. S. J. Ebeid, T. A. El-Taweel, Surface improvement through hybridization of electrochemical turning and roller burnishing based on the Taguchi technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 219, No. 5, pp. 423-430, 2005
78. Y. C. Lin, B. H. Yan, F. Y. Huang, Surface improvement using a combination of electrical discharge machining with ball burnish machining based on the Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 18, Issue 9, pp. 673-682, 2001
79. A. M. Hassan, S. Z. S. Al-Dhifi, Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 96, Issue 1-3, pp. 73-80, 1999
80. G. A. Malygin, Analysis of the parameters of a submicron dislocation structure in metals subjected to severe plastic deformation, *Physics of the Solid State*, Vol. 46, Issue 11, pp. 2035-2041, 2004
81. S. O. Bezhenov, H. A. Byalik, O. I. Bezhenov, Mechanism of surface hardening of structural carbon steels, *Materials Science*, Vol. 45, Issue 1, pp. 89-96, 2009
82. C.H. Fu, Y.B. Guo, J. McKinney, X.T. Wei, Process Mechanics of Low Plasticity Burnishing of Nitinol Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 21, Issue 12, pp. 2607-2617, 2012
83. M. Sayahi, S. Sghaier, H. Belhadjsalah, Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, Issue 5-8, pp. 1665-1673, 2013.
84. B. Tadic, P. M. Todorovic, O. Luzanin, D. Miljanic, B. M. Jeremic, B. Bogdanovic, Đ. Vukelic, Using specially designed high-stiffness burnishing tool to achieve high-quality surface finish. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, Issue 1-4, pp. 601-611, 2013
85. Đ. Vukelić, D. Miljanić, S. Randelović, I. Budak, D. Džunić, M. Erić, M. Pantić, Burnishing process based on optimal depth of workpiece penetration. *Materials and Technology*, Volume 47, No. 1, pp. 43-51, 2013
86. N. H. Loh and S. C. Tam, Effects of ball burnishing parameters on surface finish – a literature survey and discussion. *Precision Engineering*, Vol. 10, Issue 4, pp. 215–220, 1988
87. P. Ravindra Babu, K. Ankamma, T. Siva Prasad, A. V. S. Raju, N. Eswara Prasad, Effects of Burnishing Parameters on the Surface Characteristics, Microstructure and Microhardness in EN Series Steels, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 64, Issue 6, pp. 565-573, 2011

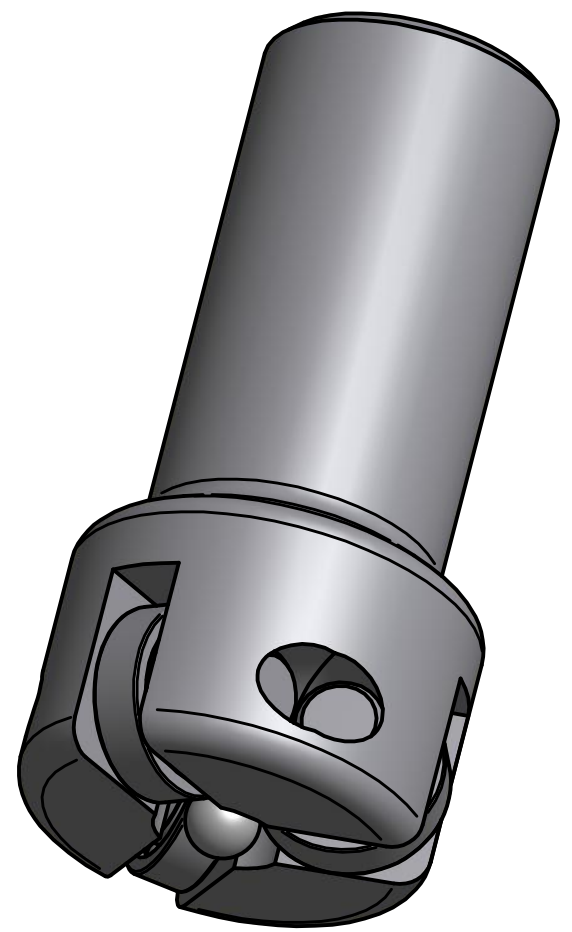
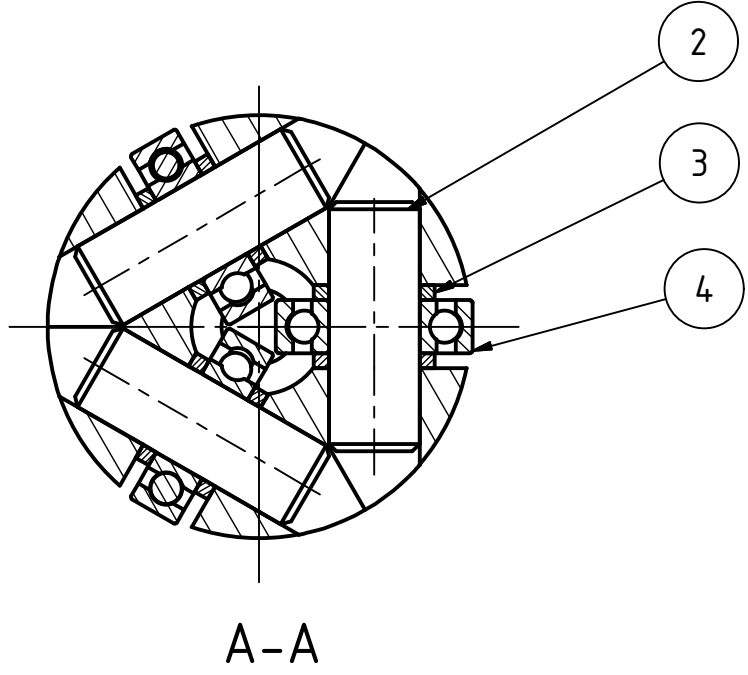
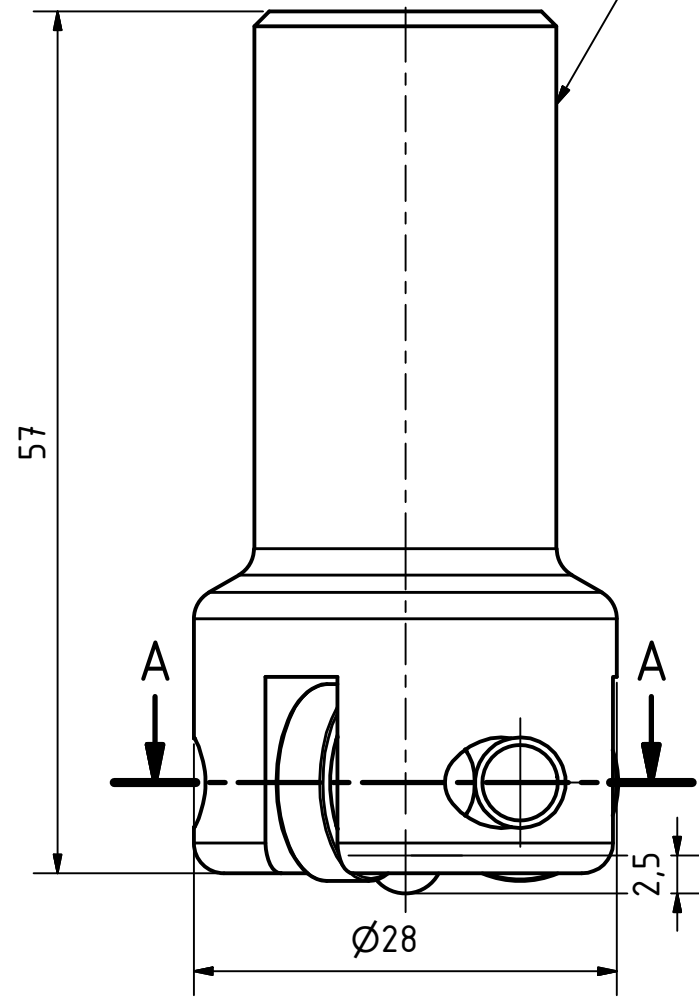
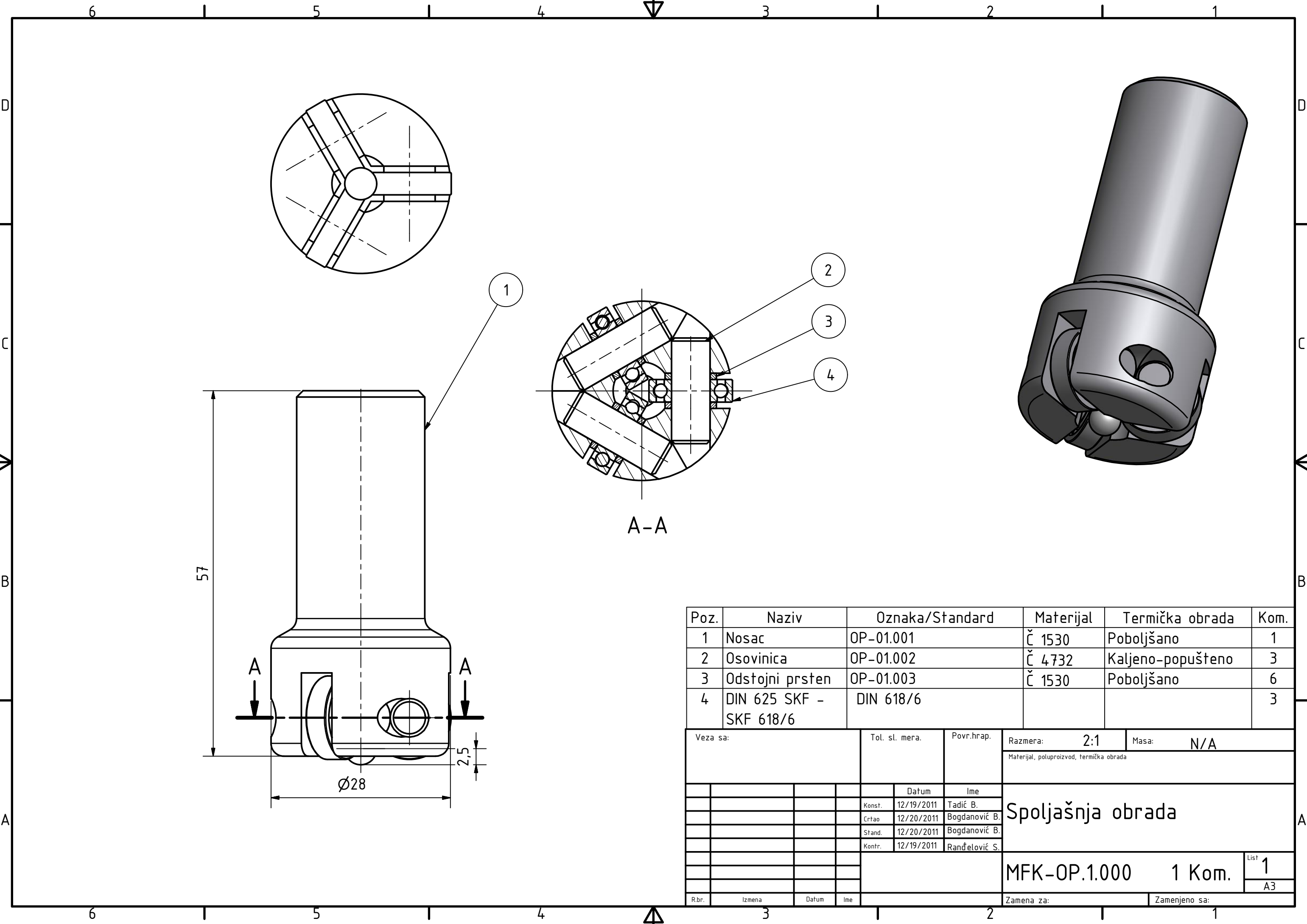
88. M. Salahshoor, Y. B. Guo, Process mechanics in ball burnishing biomedical magnesium–calcium alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, Issue 1-4, pp. 133–144, 2013
89. B. L. Anantha Ram, R. Krishnamurthy, Surface integrity studies in burnishing, *Proceedings of the Eighth AIMTDR Conference*, IIT, Bombay, 1978
90. A.N. Niberg, Wear resistance of slideways strengthened by burnishing, *Soviet Engineering Research*, Vol. 7, Issue 5, pp. 67-68, 1987
91. A. Akkurt, Comparison of roller burnishing and other methods of finishing treatment of the surface of openings in parts from tool steel D3 for cold forming, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 53, Issue 3 – 4, pp. 145-150, 2011. Translated from *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, Vol. 3, pp. 41 – 47, 2011
92. A. Akkurt, Comparison of Roller Burnishing Method with Other Hole Surface Finishing Processes Applied on AISI 304 Austenitic Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, Issue 6, pp. 960-968, 2011.
93. T. A. El-Taweel, S. J. Ebeid, Effect of hybrid electrochemical smoothing–roller burnishing process parameters on roundness error and micro-hardness, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 42, Issue 7-8, pp. 643-655, 2009
94. M. W. Shin, K. H. Cho, S. J. Kim, H. Jang, Friction Instability Induced by Corrosion of Gray Iron Brake Discs, *Tribology Letter*, Vol 37, Issue 2, pp. 149–157, 2010
95. V. V. Belozarov, A. I. Makhatilova, V. V. Subbotina, Cyclic Strength of Parts with Overlapping Zones Formed by Roller Burnishing, *Strength of Materials*, Vol. 38, Issue 3, pp. 324-327, 2006
96. A. Bougharriou, W. B. Saï, K. Saï, Prediction of surface characteristics obtained by burnishing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 51, Issue 1-4, pp. 205-215, 2010
97. Fang-Jung Shiou, Chao-Chang A. Chen, Wen-Tu Li, Automated surface finishing of plastic injection mold steel with spherical grinding and ball burnishing processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, Issue 1-2, pp. 61–66, 2006
98. L. N. López de Lacalle, A. Lamikiz, J. A. Sánchez, J. L. Arana, The effect of ball burnishing on heat-treated steel and Inconel 718 milled surfaces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32, Issue 9-10, 958-968, 2007
99. P. J. Ross, *Taguchi techniques for quality engineering*, 2nd edn. McGraw-Hill, New York, 1996
100. P. S. Pa, Design of freeform surface finish using burnishing assistance following electrochemical finishing, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, Issue 10, pp. 1630-1636, 2007
101. P. S. Pa, Continuous finishing processes using a combination of burnishing and electrochemical finishing on bore surfaces, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, Issue 1-4, pp.147–154, 2010
102. Tareq A. Abu Shreehah, Developing and investigating of elastic ball burnishing tool, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, Issue. 3-4 pp. 270-279, 2008

103. N. Nicoletti, E. Aubry, D. Fendeleur, M. Renner, A finite element model for the analysis of roll burnishing. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 55, pp. 183-187, 1997
104. W. Bouzid Saï, K.Saï, Finite element modeling of burnishing of AISI 1042 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, Issue 5-6 pp. 460–465, 2005
105. A. A. Ibrahima, S. M. Abd Rabbo, M. H. El-Axir, A. A. Ebiedb, Center rest balls burnishing parameters adaptation of steel components using fuzzy logic, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, Issue 5, pp. 2428-2435, 2009.
106. N. S. M. El-Tayeb, K. O. Low, P. V. Brevern, The influence of roller burnishing process on hardness and roughness of cylindrical polymer surfaces, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 222, Issue. 7, pp. 947-955, 2008
107. I. Ovali, A. Akkurt, Comparison of Burnishing Proces with Other Methods of Hole Surface Finishing Process Applied on Brass Materials, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, Issue. 8, pp. 1064-1072, 2011
108. A. Akkurt, A. Kurt, A. Ozdemir, U. Seker, Comparison of Hole Surface Finishing Processes with Roller Burnishing Method Applied in Copper Materials, *Gazi University Journal of Science*, Vol. 27, Issue. 1, pp. 721-734, 2014
109. P. Balland, L. Tabourot, F. Degre, V. Moreau, Mechanics of the burnishing process. *Precision Engineering*, Vol 37, Issue 1, pp. 129-134, 2013
110. P. Balland, L. Tabourot, F. Degre, V. Moreau, An investigation of the mechanics of roller burnishing through finite element simulation and experiments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 65, pp.29-36, 2013
111. Biezuchow, N.I., *Theory of Elasticity and Plasticity*. Science Publishing Home, Warszawa, pp. 262–297, 1957
112. Jezierski, J., Mazur, T., Siemiakowski, Z., Kowalik, M., The calculation of thickness of deformed plastically surface layer after burnishing with ceramic tools. In: Przybylski, W. (Ed.), *Proceedings of Conference on Modern Problems of Burnishing Technology*. Gdansk, Poland, pp. 9–16, 2005
113. Papsev, D. D., *Finishing & Hardening with Cold Working*. Mechanical Engineering, Moskva, pp.10-15, 1978
114. Przybylski, W., *Burnishing Technology*. Science Publishing Home, Warszawa, pp.266-269, 1987
115. Torbilo, V.M., *Diamond Burnishing*. Mechanical Engineering, Moskva, pp. 4–11, 1974
116. Korzynski, M., *Smoothing Slide Burnishing*. Science Publishing Home, Warszawa, pp. 24–33, 2007
117. Kulakowska, A., Kukielka, L., The experimental investigations of influence of deviation height of triangular inequality after turning on roughness of surface of burnished product. In: Przybylski, W. (Ed.), *Proceedings of Conference on Modern Problems of Burnishing Technology*. Gdansk, Poland, pp.65-72, 2005
118. Shiou, F. J., Chen, C. H., Determination of optimal ball-burnishing parameters for plastic injection moulding steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 3, pp.177-185, 2003

119. Hassan, A.M., Meqableh, A. M., The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components, *Journal of Material Processing Technology* 102, pp.115-121, 2000
120. Rašković D., *Tablice iz otpornosti materijala*, Građevinska knjiga, Beograd, 1985.
121. S.H. Ghafari, F. Golnaraghi, F. Ismail, Effect of localized faults on chaotic vibration of rolling element bearings. *Nonlinear Dynamics* 53: 287–301, 2008
122. Henryk Kapusta, Analysis of the Dynamics of a Double-Crank Driving Unit for a Needle Bench. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe* October / December 2004, Vol. 12, No. 4 (48), 2004
123. Tadić B., *Modelska ispitivanja procesa istosmernog glodanja sa dinamičkog i tribološkog aspekta*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Srbija, 1997
124. Simufact.Forming v.11, User Manual, Simufact Engineering GMBH., Hamburg, Germany, 2013
125. Kojić M., Slavković R., Živković M., Grujović N., *Metod konačnih elemenata I – Linearna analiza*, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Srbija, 1998
126. FEMAP, User Guide, Unigrafix Solutions Inc., Exton, USA, 2002
127. Kojić M., Slavković R., Živković M., Grujović N., User Manual for PAK – finite element program for linear and nonlinear structural analysis and heat transfer, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Srbija, 2003
128. Živković M., Kojić M., Slavković R., Grujović N., PAK-S program for FEM structural analysis. Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Srbija, 2003
129. Tadić B., Randelović S., Todorović P., Vukelić Đ., Koćović V., Bogdanović B., Jeremić M., *Kruti alat namenjen za završnu obradu metala kotrljanjem kuglice*, TR-88, preduzeće Metalik d.o.o., Crna Gora, FIN Kragujevac, Republika Srbija, 2015
130. Tool Room Mill Operator Training Manual - HAAS TM Series Operator Manual, HAAS Factory Outlet Productivity Inc., Revised May 2012
131. [www.prvomajska-tzr.hr](http://www.prvomajska-tzr.hr), (03.08.2015)
132. Kistler Data Sheet 000-152m-02.91 (DB06.9265Bm), Kistler Instrumente AG Winterthur, 1975
133. [www.ti.com](http://www.ti.com), (04.08.2015)
134. [www.zeiss.com](http://www.zeiss.com), (04.08.2015)
135. Operator's handbook, Rank Taylor Hobson Limited, Leicester, England, 1986
136. Randjelović S., Tadić B., Todorović P. M., Vukelić Dj., Miloradović D., Radenković M., Tsiafis Ch., Modelling of the ball burnishing process with a high-stiffness tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Doi 10.1007/s00170-015-7319-4, In Printing.
137. Tadić B., Randjelović S., Todorović P., Živković J., Kocović V., Budak I., Vukelić Dj., Using a high-stiffness burnishing tool for increased dimensional and geometrical accuracies of openings. *Precis Eng* (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.08.014>

- 
138. Randelović S., Vukelić Đ., Todorović P., Koćović V., Bogdanović B., Ivanović L., Tadić B., Optimizacija procesa završne obrade kotrljanjem kuglice po površini predmeta obrade na osnovu dubine penetracije kuglice u materijal predmeta obrade, TR-89, preduzeće Metalik d.o.o., Crna Gora, FIN Kragujevac, Republika Srbija, 2015
  139. StatSoft Statistica V8, User Manual, StatSoft Inc., Tulsa Oklahoma, USA, 2007
  140. GOM Inspect V7.5 SR2, User Manual, GOM mbH, Braunschweig, Germany, 2013

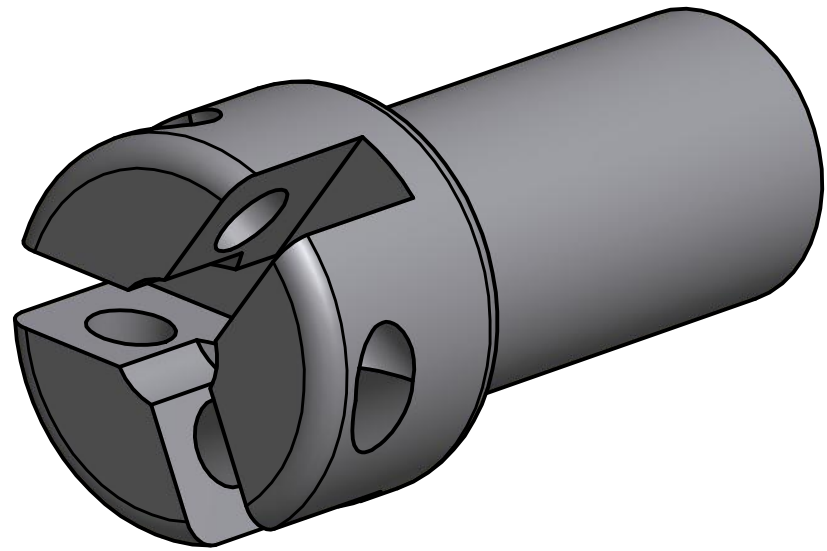
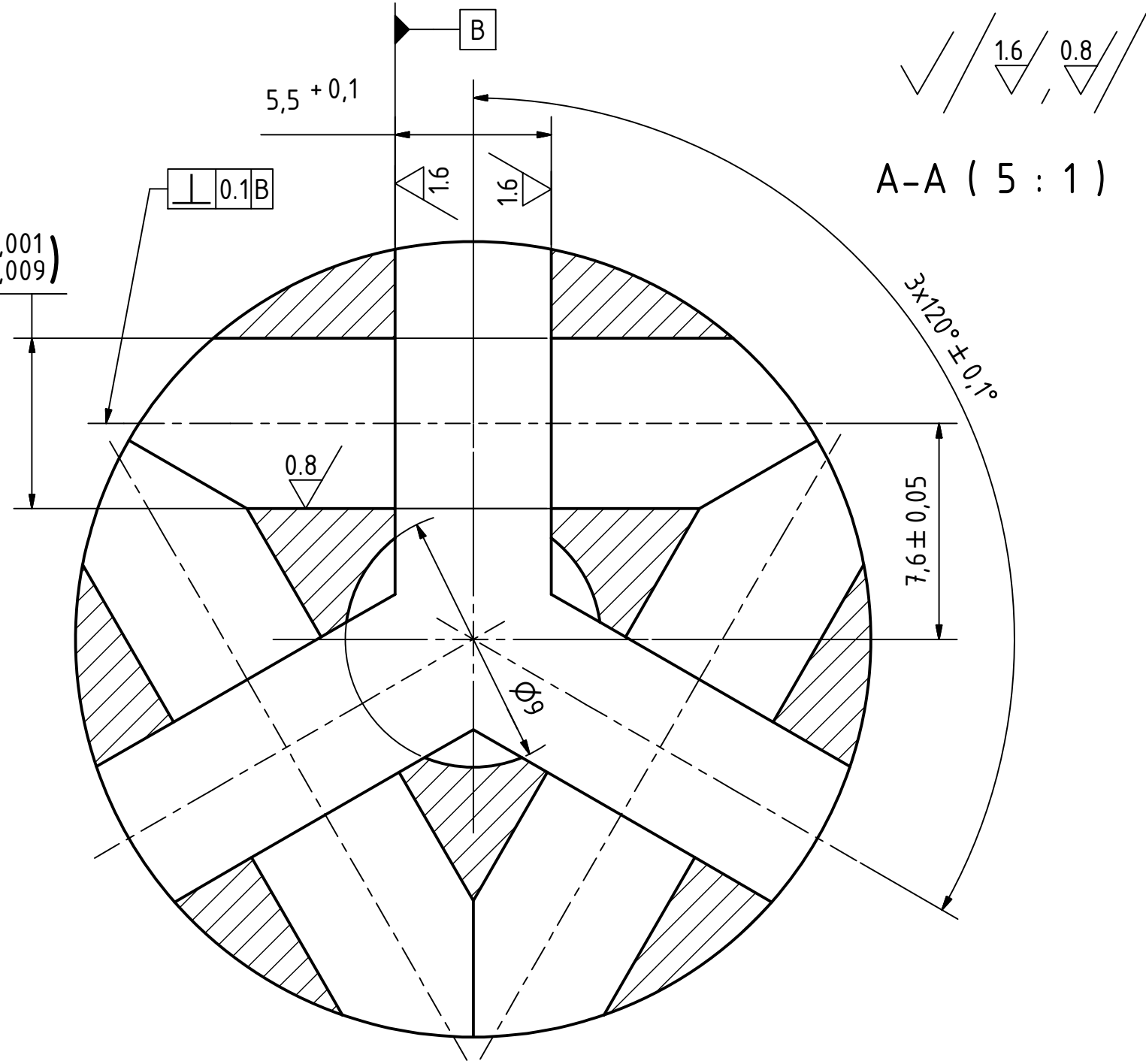
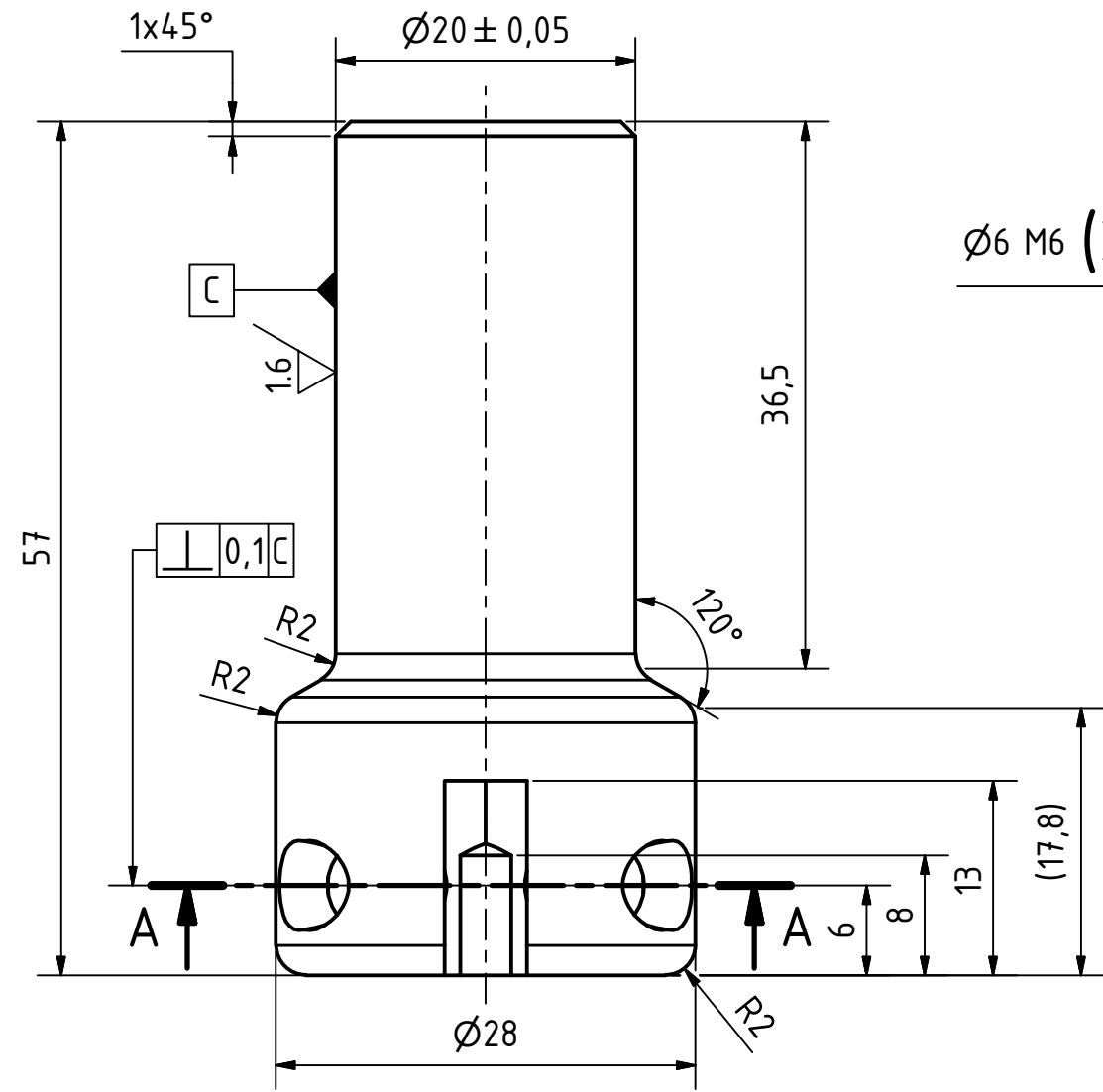
## **ПРИЛОЗИ**



Poz.	Naziv	Oznaka/Standard	Materijal	Termička obrada	Kom.
1	Nosac	OP-01.001	Č 1530	Poboljšano	1
2	Osovinica	OP-01.002	Č 4732	Kaljeno-popušteno	3
3	Odstojni prsten	OP-01.003	Č 1530	Poboljšano	6
4	DIN 625 SKF - SKF 618/6	DIN 618/6			3

Veza sa:		Tol. sl. mera.	Povr.hrap.	Razmera: 2:1	Masa: N/A
Materijal, poluproizvod, termička obrada					
		Datum	Ime	Spoljašnja obrada	
	Konst.	12/19/2011	Tadić B.		
	Crtao	12/20/2011	Bogdanović B.		
	Stand.	12/20/2011	Bogdanović B.		
	Kontr.	12/19/2011	Randelović S.		
				MFK-OP.1.000	1 Kom.
				Zamena za:	Zamenjeno sa:

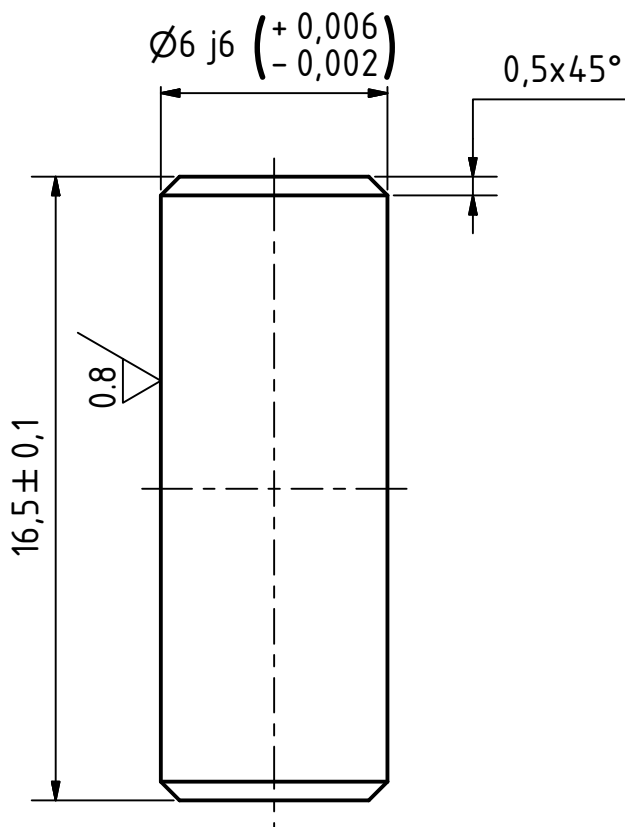
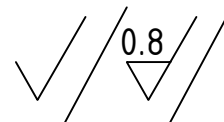
List 1  
A3



Veza sa: MFK-OP.1.002 MFK-OP.1.003		Tol. sl. mera.	Povr.hrap.	Razmera: 2:1	Masa: 0.152 kg	
				Materijal, poluproizvod, termička obrada Č1530, Ø28x57, poboljšano		
		Datum	Ime	<b>Nosač</b>		
		Konst.	12/20/2011			Tadić B.
		Crtao	12/20/2011			Bogdanović B.
		Stand.	12/20/2011			Bogdanović B.
		Kontr.	12/20/2011	Ranđelović S.		
				MFK-OP.1.001	1 Kom.	
R.br.	Izmena	Datum	Ime	Zamena za:	Zamenjeno sa:	

List 1  
A3





Veza sa: MFK-OP.1.001 MFK-OP.1.003		Tol. sl. mera.		Povr.hrap.		Razmera: 2:1		Masa: 0.004 kg	
						Maferijal, poluproizvod, termička obrada Č4732, Ø6x16.5 , Kaljeno-popušteno			
				Datum		Ime			
				Konst.		12/20/2011		Tadić B.	
				Crtao		12/20/2011		Bogdanović B.	
				Stand.		12/20/2011		Bogdanović B.	
				Kontr.		12/20/2011		Randelović S.	
						MFK-OP.1.002		3 Kom.	
								List 1	
								A4	
R.br.		Izmena		Datum		Ime		Zamena za:	
								Zamenjeno sa:	

Osovinica

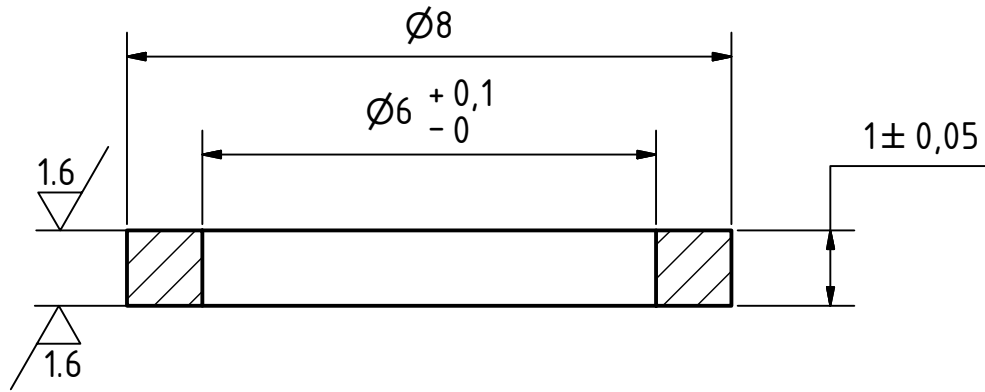
MFK-OP.1.002

3 Kom.

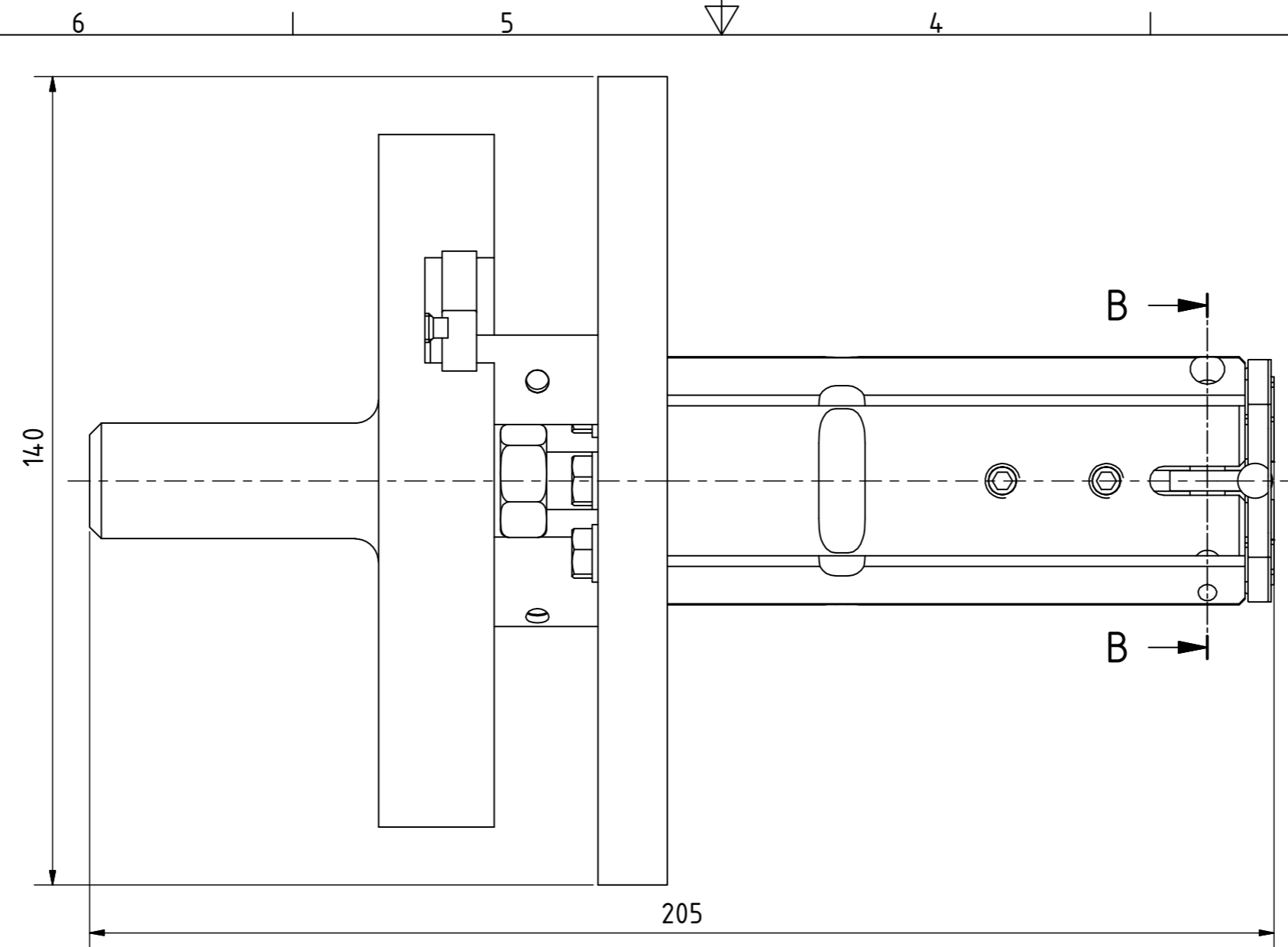
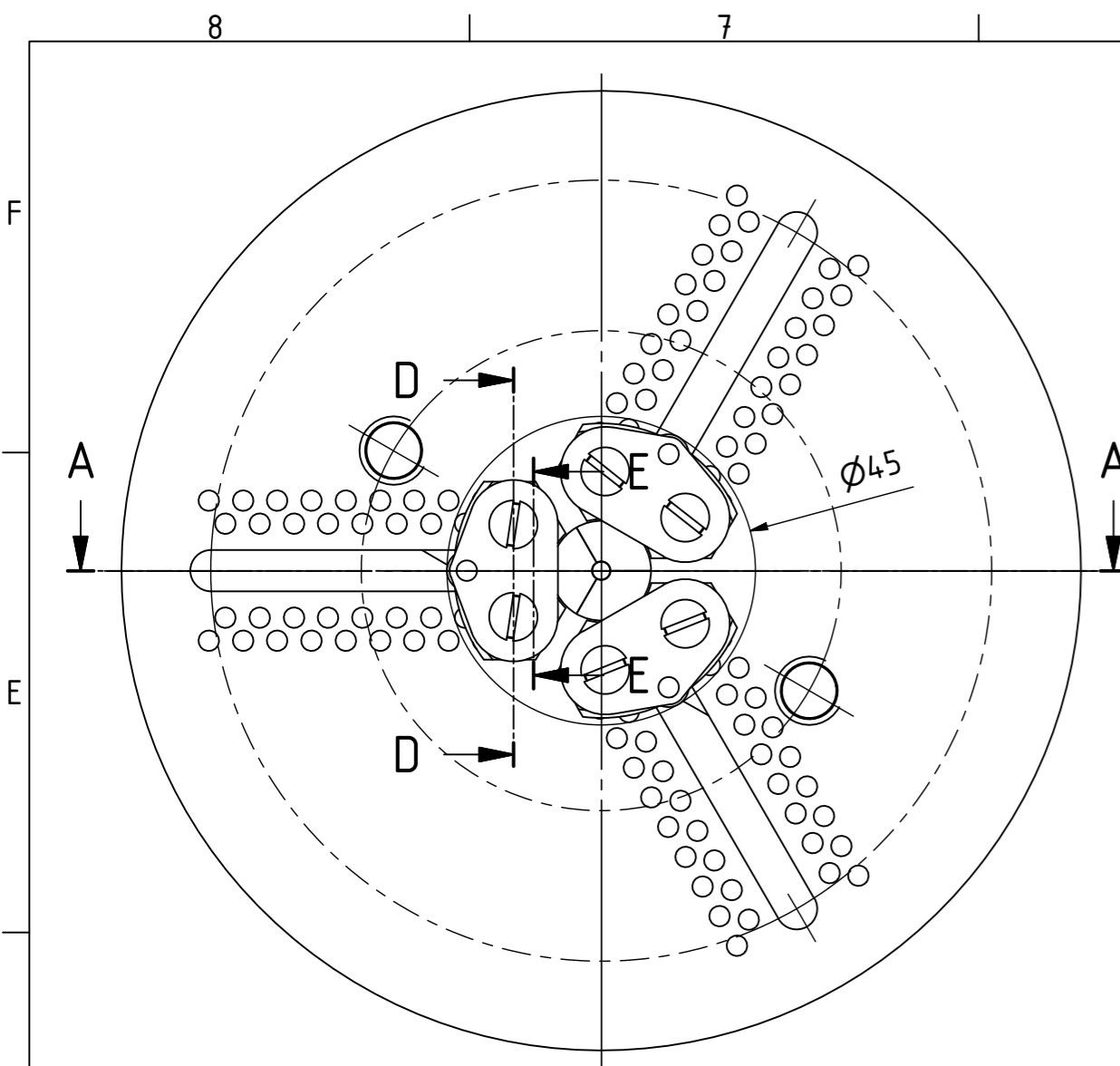
List 1

A4

✓ / 1.6 / ✓

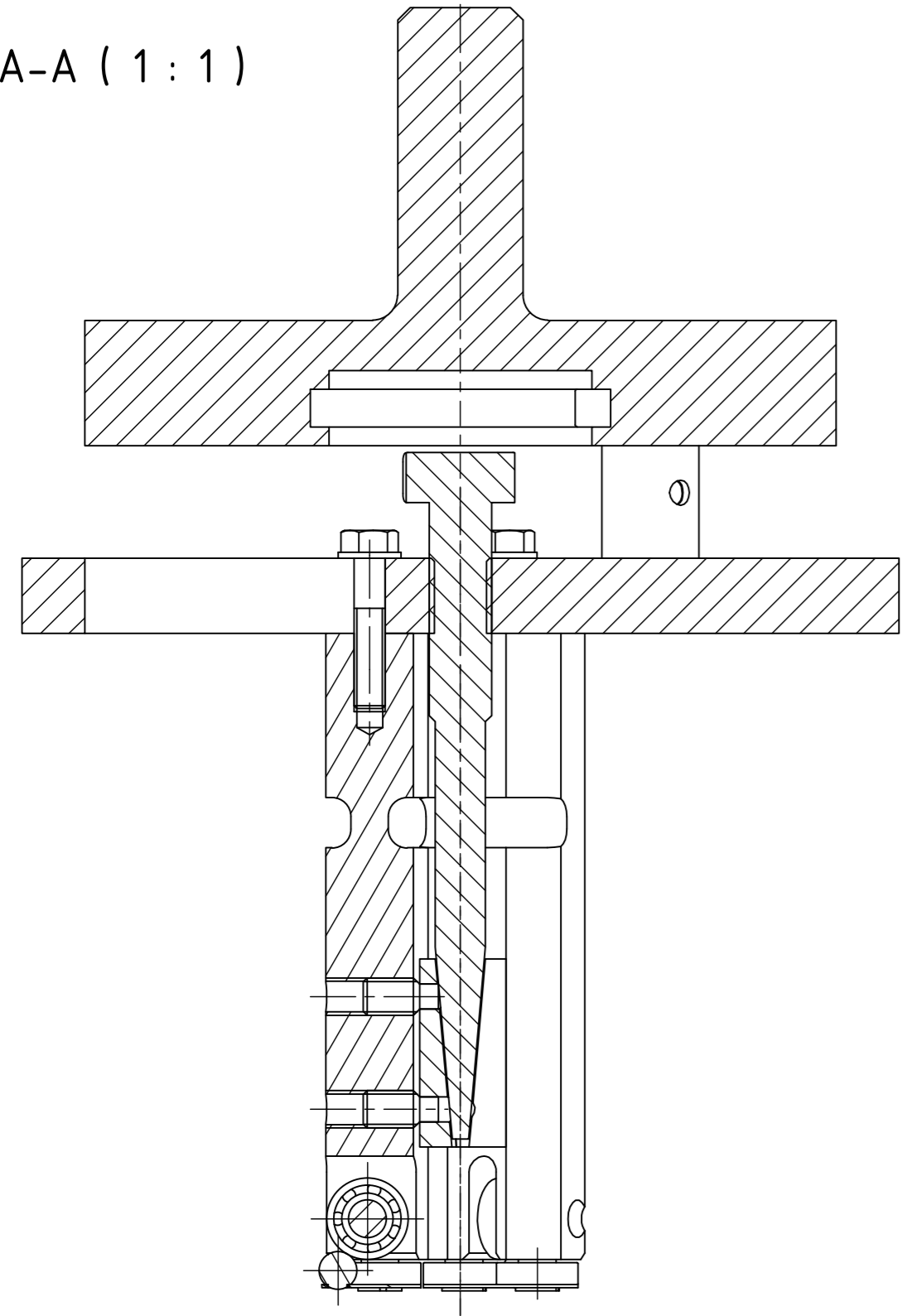


Veza sa: MFK-OP.1.001 MFK-OP.1.002				Tol. sl. mera.		Povr.hrap.		Razmera: 5:1		Masa:	
								Maferijal, poluproizvod, termička obrada Č1530, Ø6x16.5 , poboljšano			
				Datum		Ime		Odstojni prsten			
				Konst.	12/20/2011	Tadić B.					
				Crtao	12/20/2011	Bogdanović B.					
				Stand.	12/20/2011	Bogdanović B.					
				Kontr.	12/20/2011	Randelović S.					
								MFK-OP.1.003		6 Kom.	
										List 1 A4	
R.br.	Izmena	Datum	Ime	Zamena za:				Zamenjeno sa:			

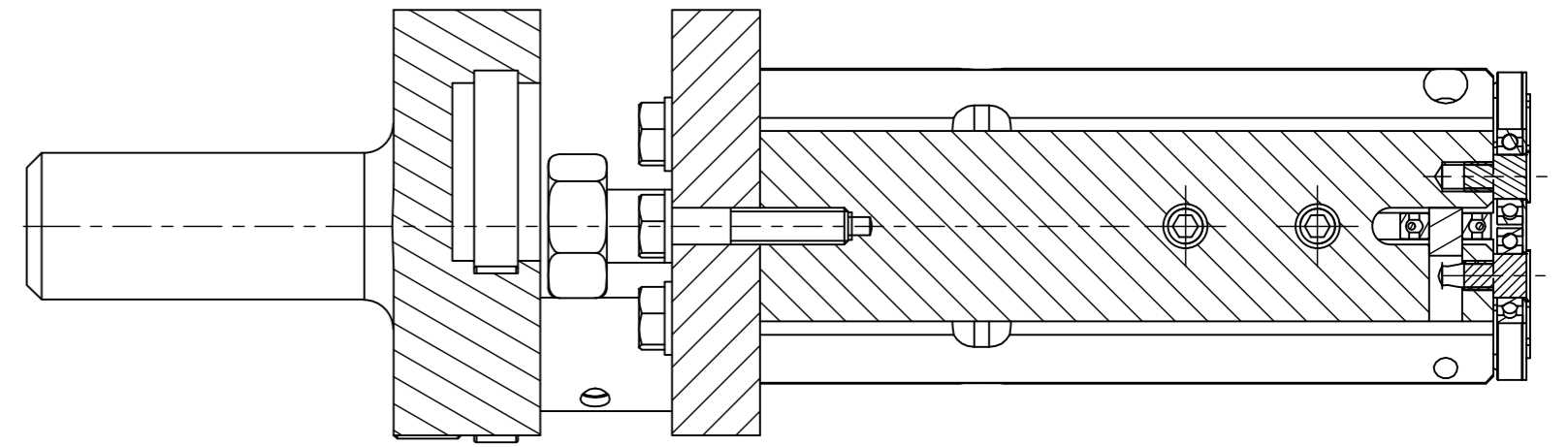


PARTS LIST				
R.B.	Kom.	Naziv dela	Opis	Materijal
1	9	DIN 625 SKF - SKF 618/6	Single row ball bearings	
2	3	Kuglica		
3	3	Nosac lezajeva	FIN-BC.1.001	Č1730 poboljšan
4	3	Bazna ploča	FIN-BC.1.002	Č1530 poboljšan
5	3	DIN 125 - A 5.3	Washer	
6	3	ISO 4016 - M5 x 25	Hex-Head Bolt	
7	3	Oslonac	FIN-BC.1.007	Č4732 kaljeno
8	30	Distantni zavrtnji	FIN-BC.1.010	Č1530
9	6	Osovinica 1	FIN-BC.1.009	Č1530 poboljšan
10	3	Osovinica 2	FIN-BC.1.008	Č1530 poboljšan
11	6	ISO 8752 - 3 x 12	Spring-Type Straight Pin	
12	3	Lim	FIN-BC.1.011	
13	1	Navrtka	FIN-BC.1.004	Č4732 kaljeno
14	1	Spojnica	FIN-BC.1.005	Č1530 poboljšan
15	2	DIN 625 SKF - SKF 61901	Single row ball bearings	
16	2	Osovinica 3	FIN-BC.1.006	Č1530 poboljšan
17	2	DIN 915 - M5 x 12	Hexagon Socket Set Screw	
18	2	Čaura	FIN-BC.1.002	Č1530 poboljšan

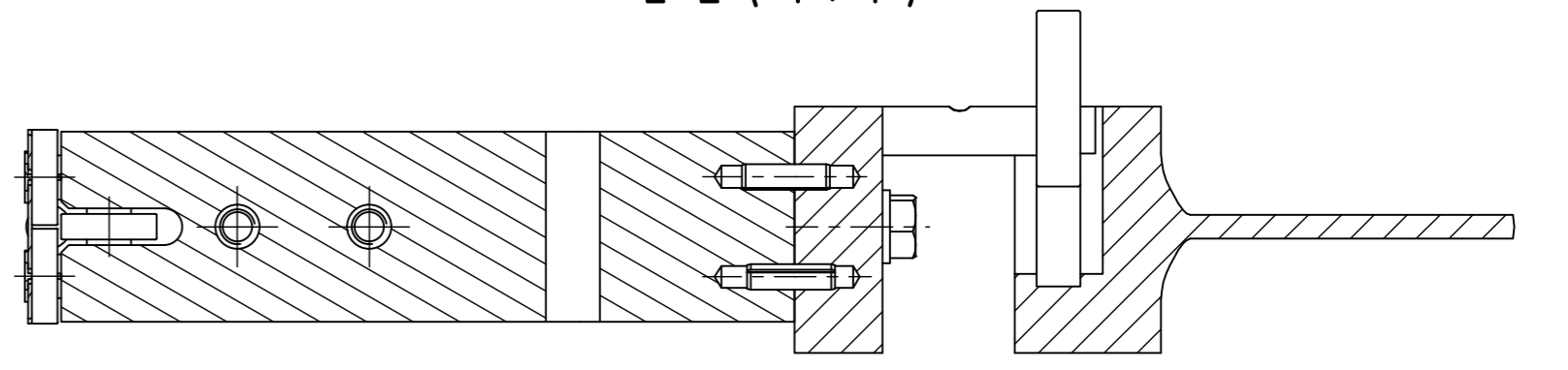
A-A (1:1)



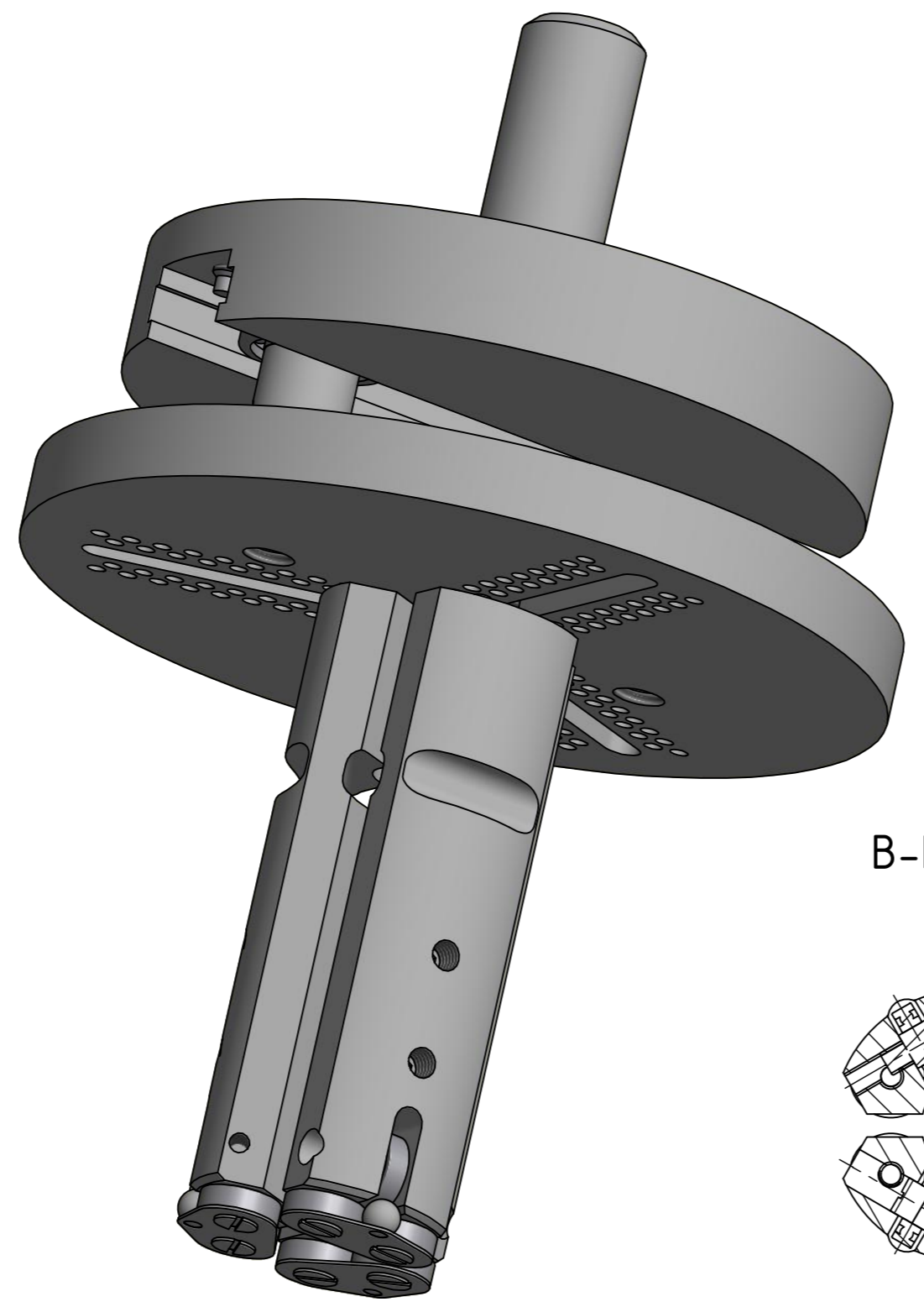
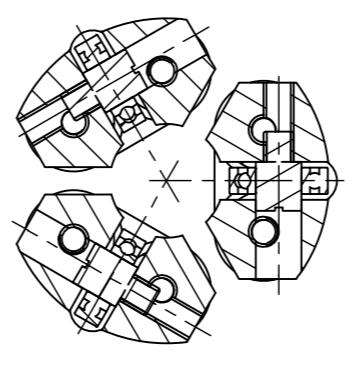
D-D (1:1)



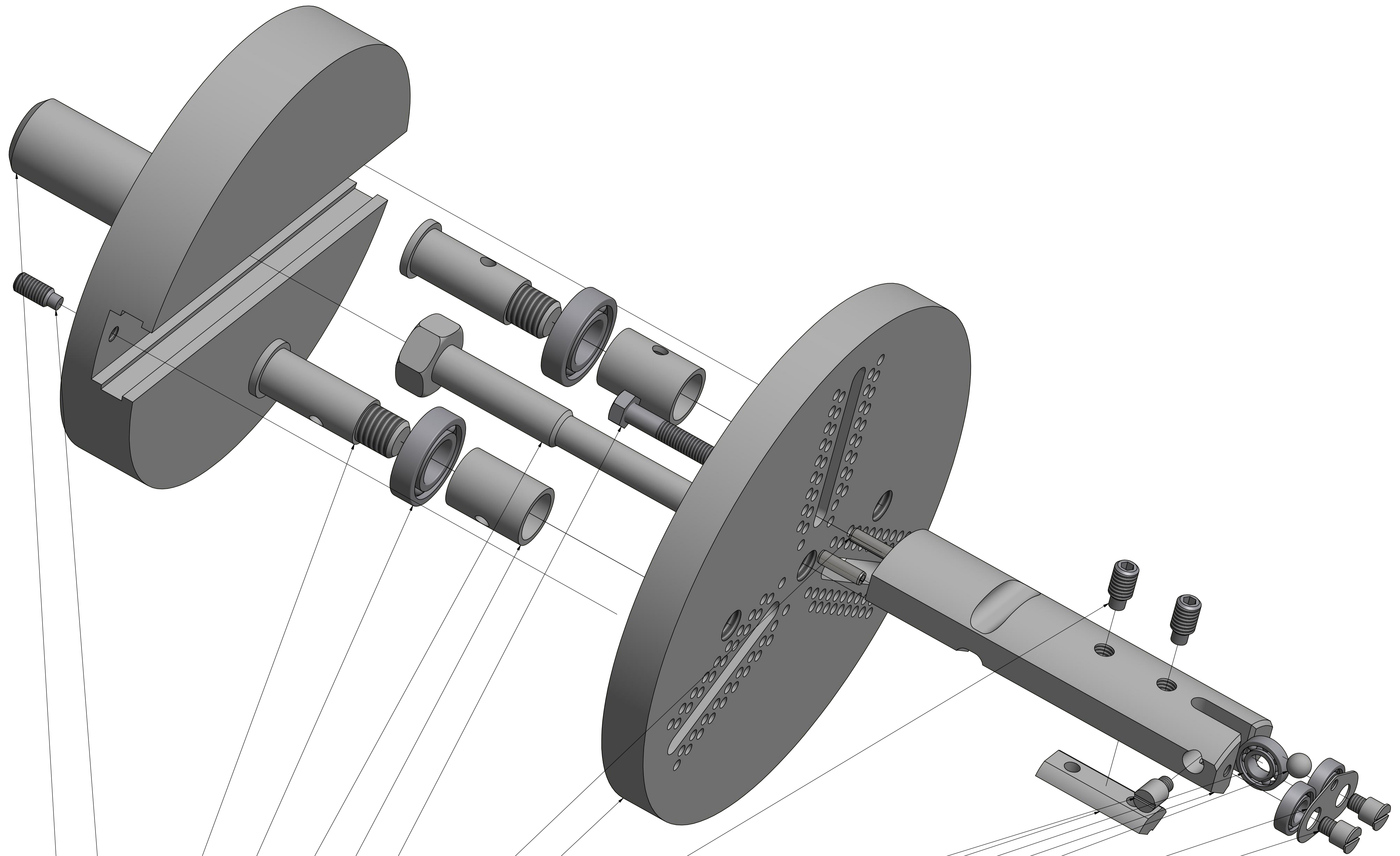
E-E (1:1)



B-B (1:1)

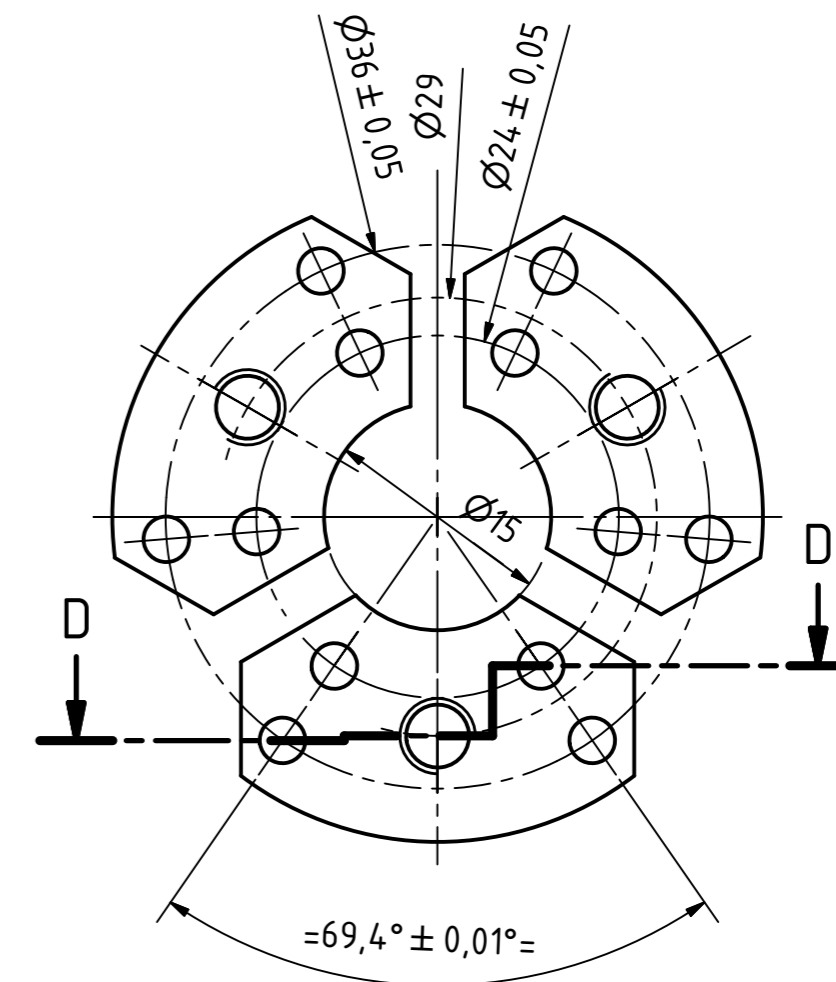
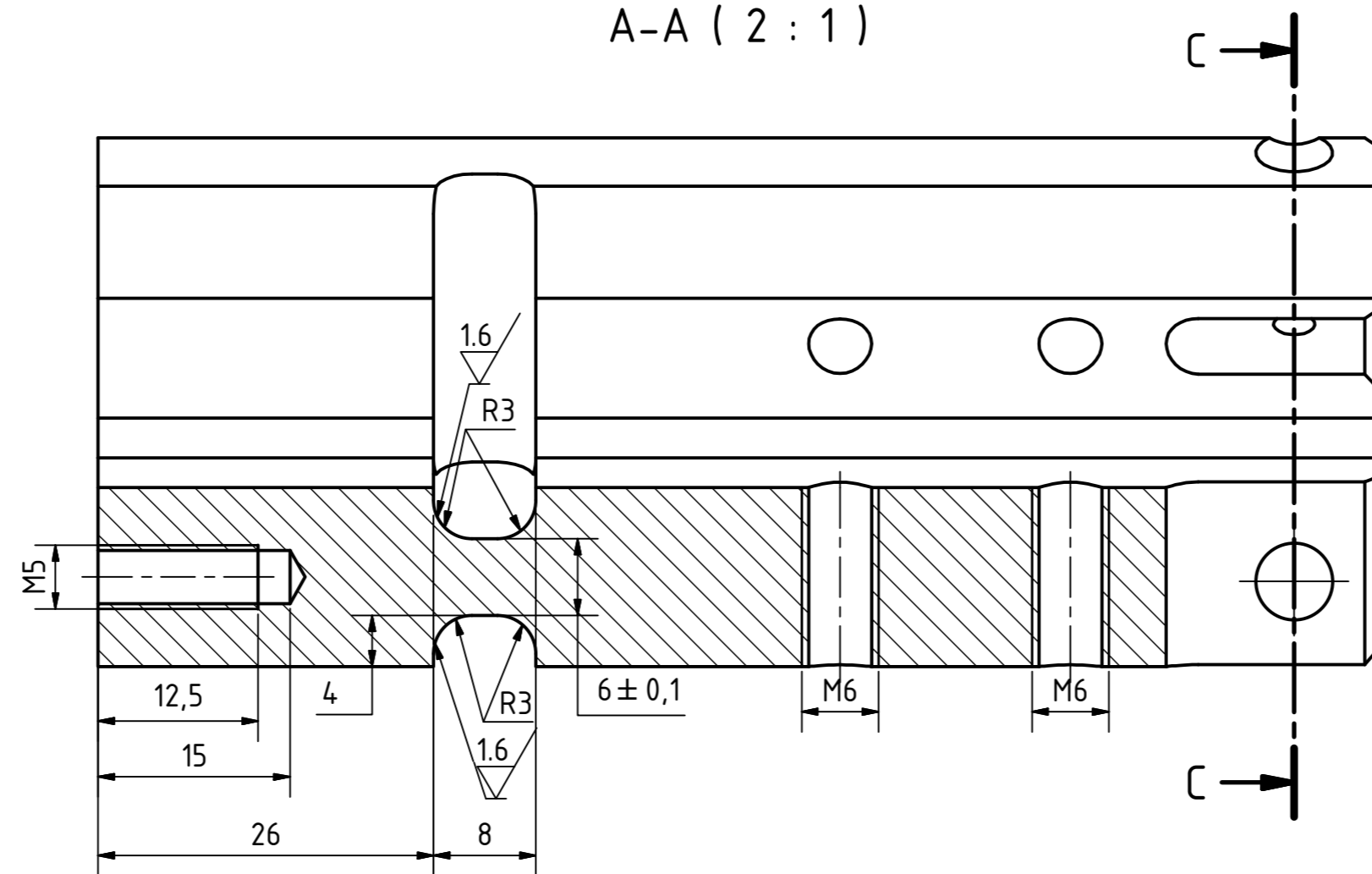
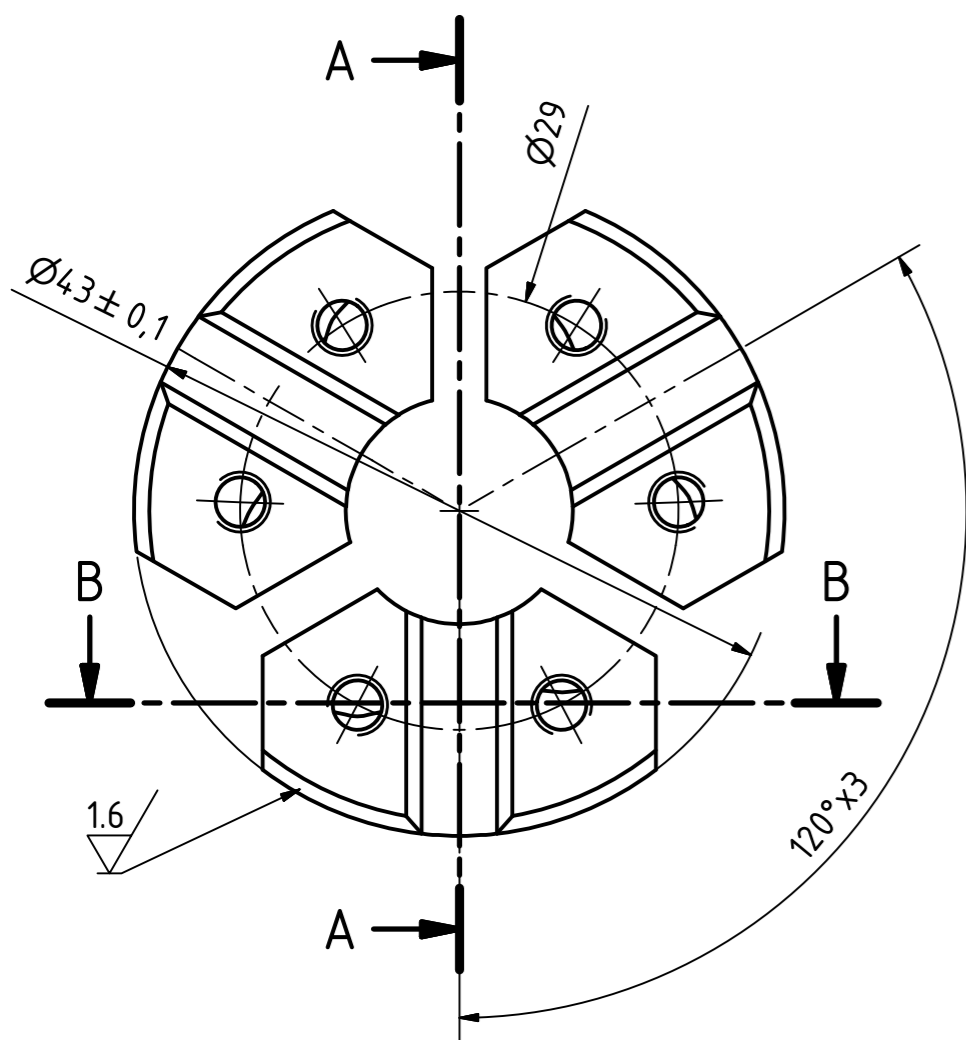


Veza sa:		Tol. sl. mera.	Povr.hrap.	Razmera: 1:1	Masa: N/A	
		Datum	Ime	<b>Unutrašnja obrada</b> FIN-BC.1.000		
		Konst.	10/23/2012			Tadić B.
		Crtao	11/08/2012			Bogdanović B.
		Stand.	11/08/2012			Bogdanović B.
		Kontr.	10/23/2012			Randjelović S.
Rbr.	Izmena	Datum	Ime	Zamena za:	Zamenjeno sa:	

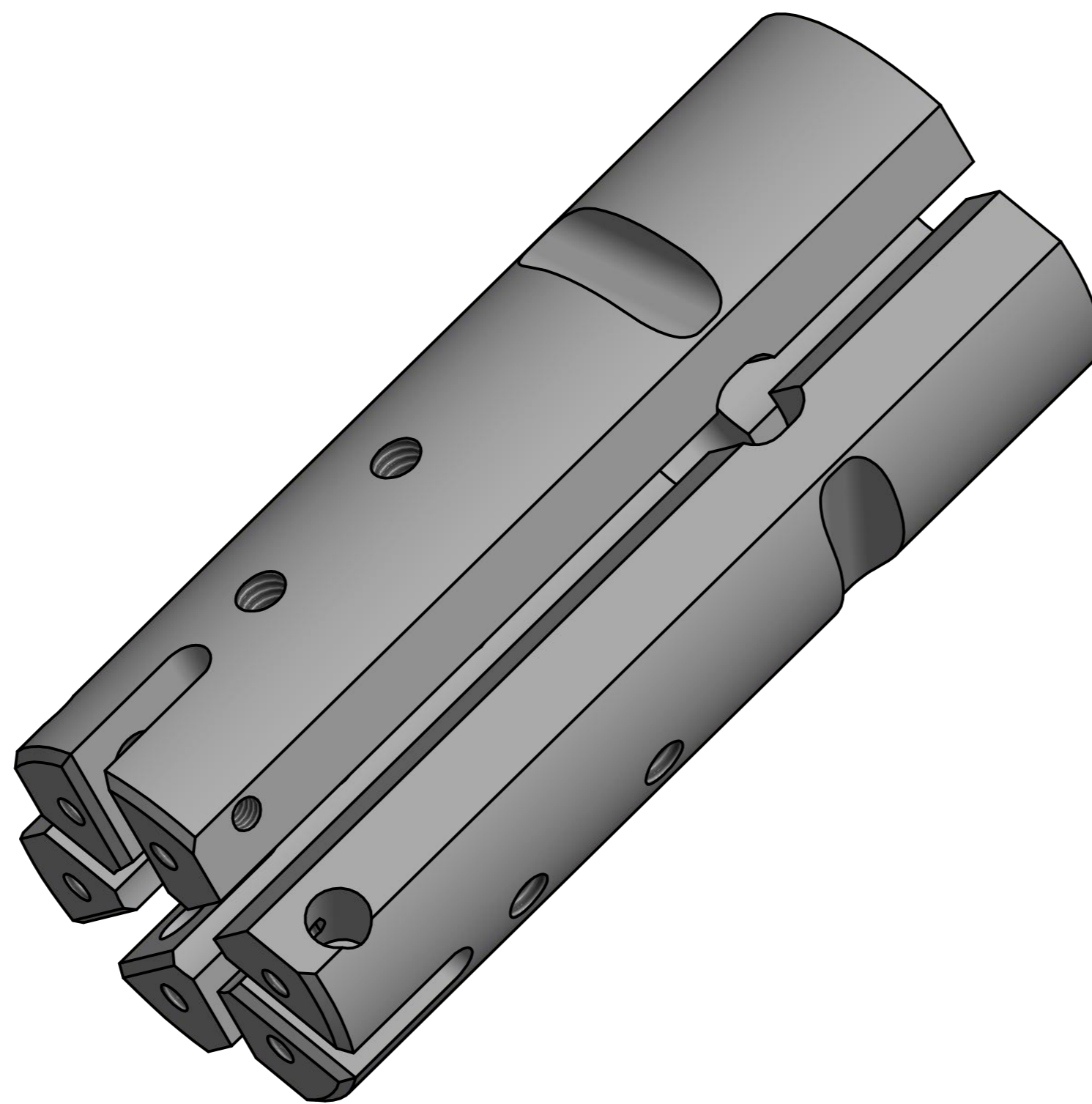
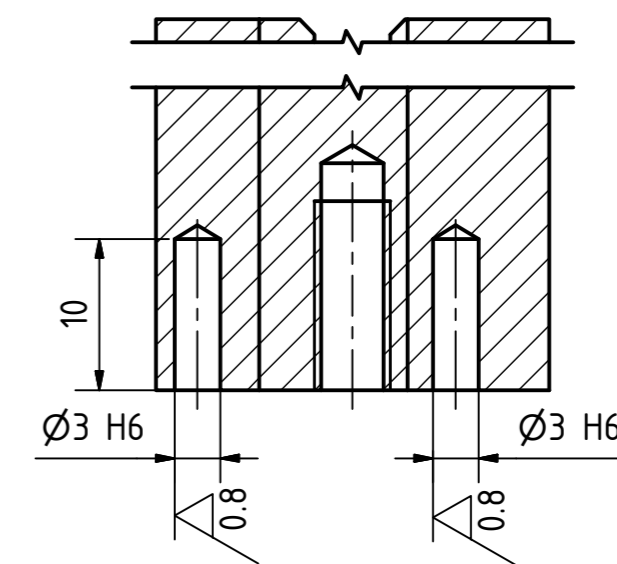
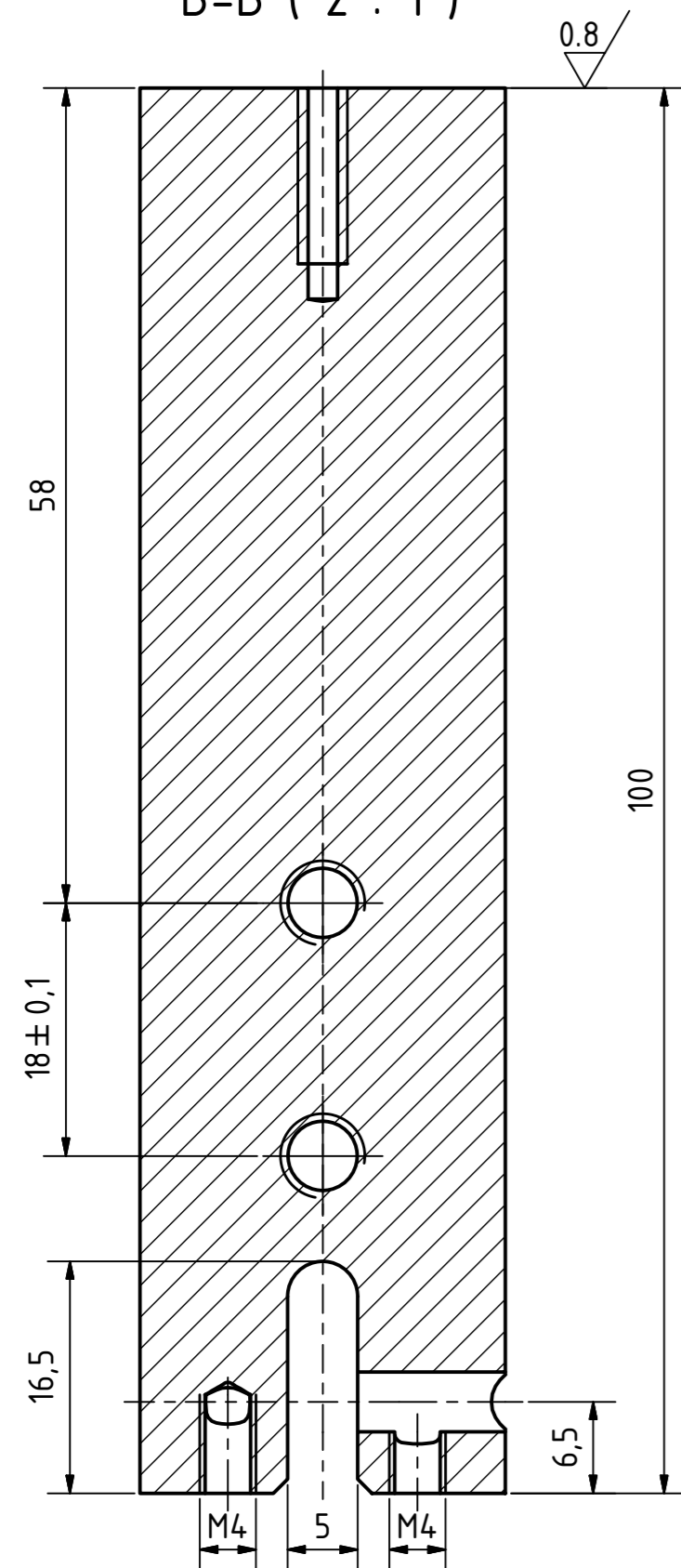


- 14
- 17
- 16
- 15
- 13
- 18
- 6
- 11
- 4
- 8
- 10
- 7
- 1
- 3
- 2
- 12
- 9

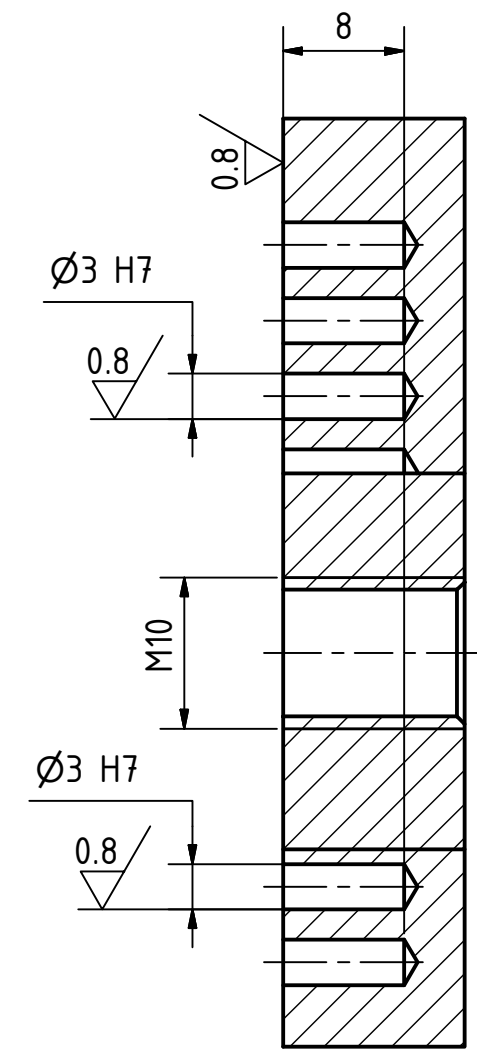
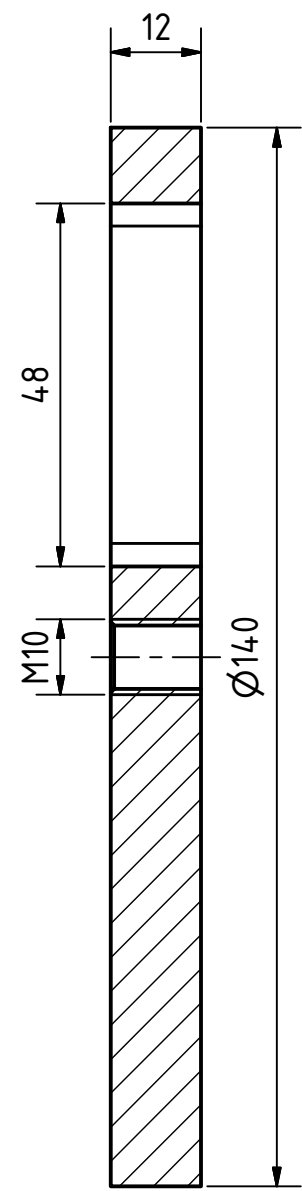
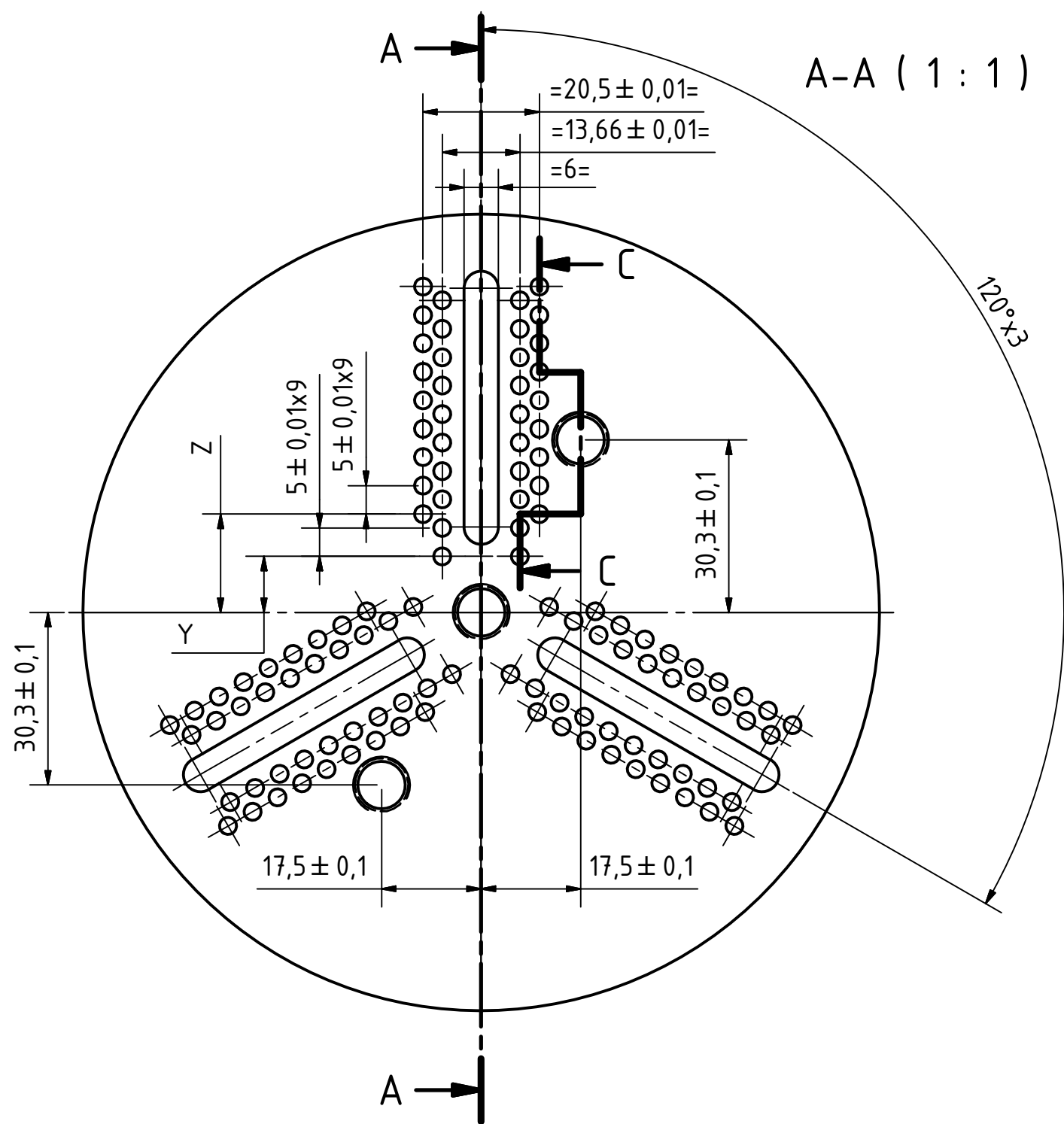
Veza sa:		Tol. sl. mera:	Povr.hrhap.	Razmera: 1:1	Masa: N/A
		Datum		Ime	
		Konst.	10/23/2012	Tadić B.	
		Crtao	11/08/2012	Bogdanović B.	
		Stano	11/08/2012	Bogdanović B.	
		Kontr.	10/23/2012	Randjelović S.	
				<b>Unutrašnja obrada</b>	
				<b>FIN-BC.1.000</b>	
				Lst 2	
				A1	
Rbr.	Imena	Datum	Ime	Zamena za:	Zamenjeno sa:
				2	1



B-B (2:1)



Veza sa:		Tol. sl. mera.	Povr.hrap.	Razmera: 2:1	Masa: N/A
Materijal, poluproizvod, termička obrada					
Č1730, Ø45x100, poboljšano 36-40 HRC					
		Datum	Ime	<b>Nosač Ležajeva</b> FIN-BC.1.001 3 Kom.	
Konst.	03/11/2012	Tadić B.			
Crtao	03/11/2012	Bogdanović B.			
Stand.	03/11/2012	Bogdanović B.			
Kontr.	03/11/2012	Randjelović S.			
Rbr.	Izmena	Datum	Ime	Zamena za:	Zamenjeno sa:

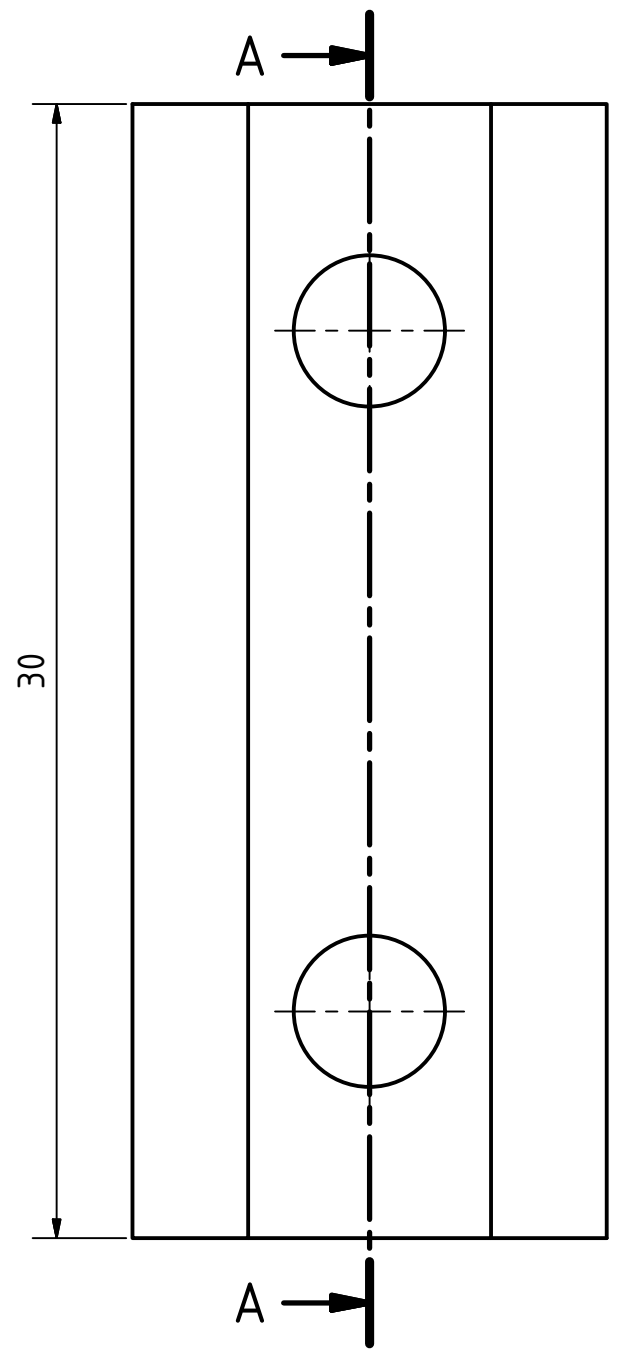


C-C (2:1)

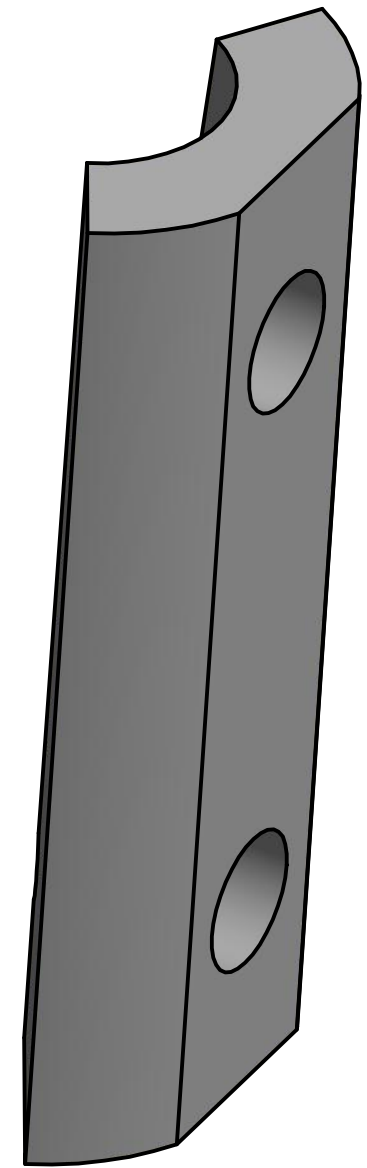
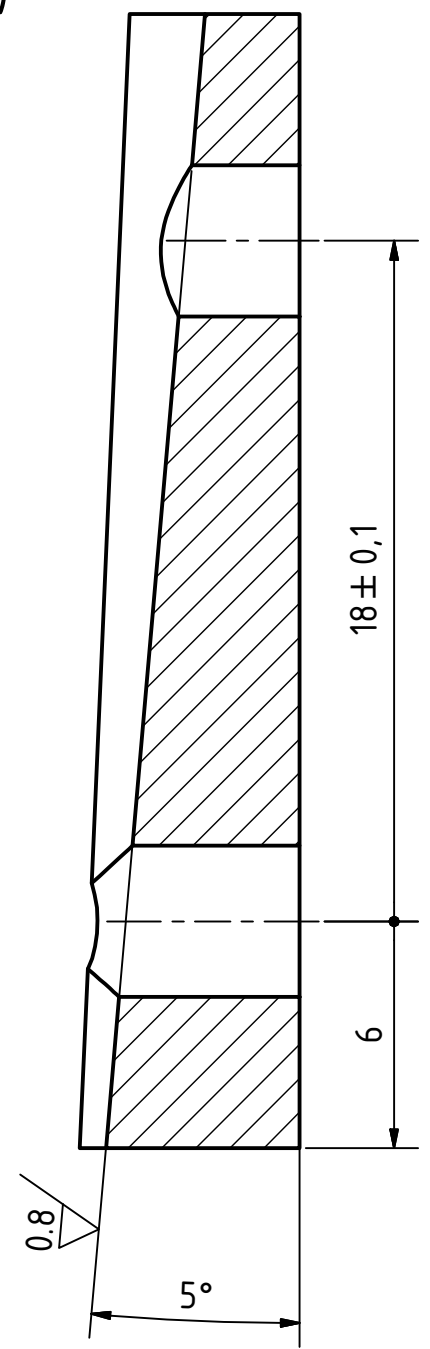
Ploča			
Red. Br	Y	Z	Komada
1	9.87	17.3	1
2	11.37	18.8	1
3	12.87	20.3	1

Veza sa:		Tol. sl. mera.	Povr.hrap.	Razmera: 2:1	Masa: N/A	
Materijal, poluproizvod, termička obrada Č1530, Ø140x12, poboljšano						
		Datum	Ime	<b>Bazna ploča</b>		
		Konst.	04/11/2012			Tadić B.
		Crtao	08/11/2012			Bogdanović B.
		Stand.	08/11/2012			Bogdanović B.
		Kontr.	04/11/2012	Randjelović S.		
				FIN-BC.1.002	3 Kom.	
				Zamena za:	Zamenjeno sa:	
R.br.	Izmena	Datum	Ime			

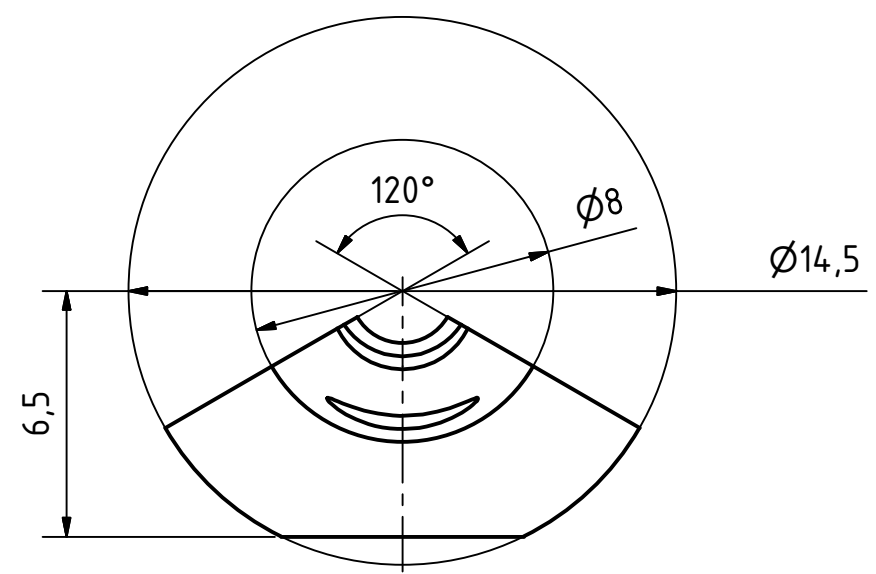
FIN-BC.1.002 3 Kom. List 1 A3



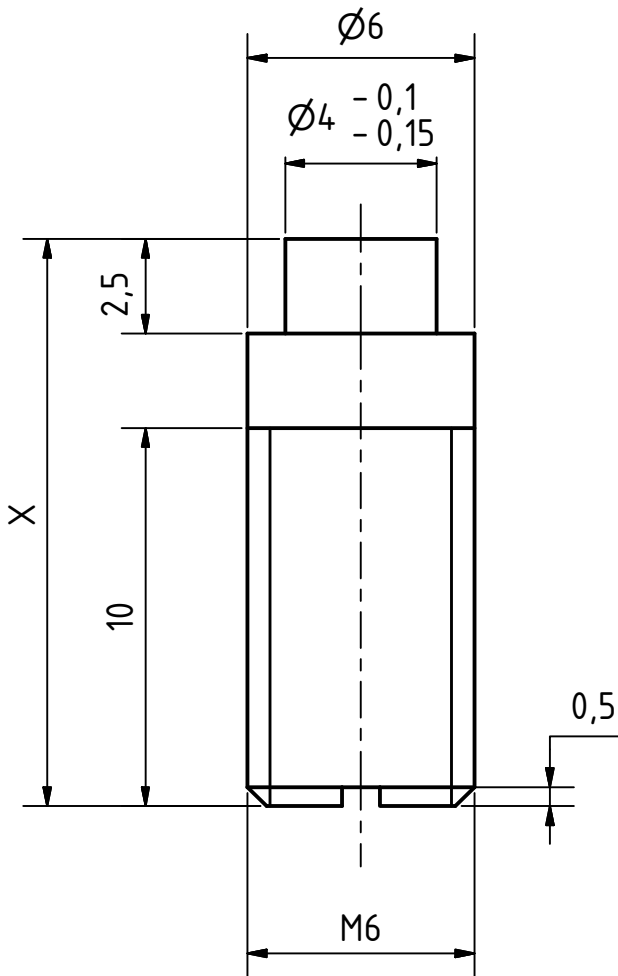
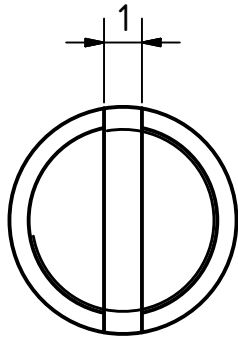
A-A ( 5 : 1 )



0.8



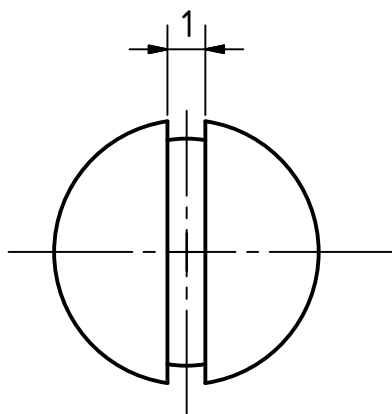
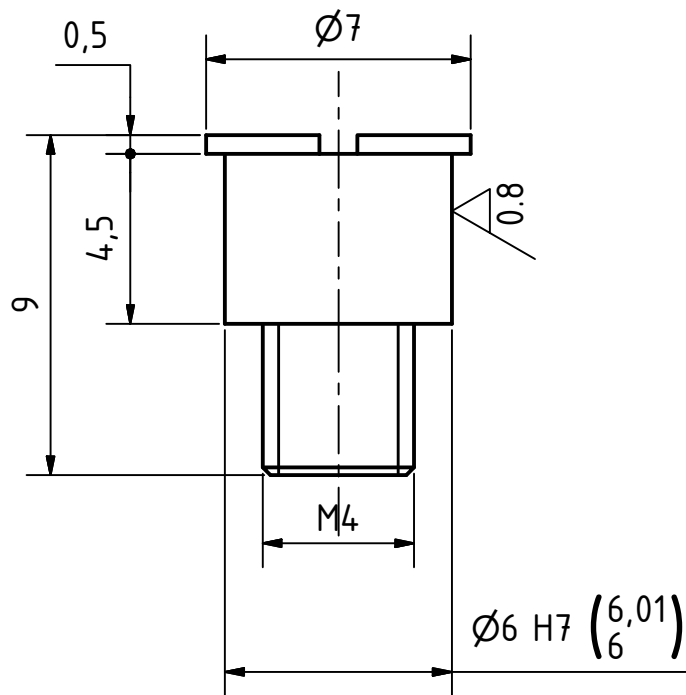
Veza sa:		Tol. sl. mera.		Povr.hrap.		Razmera: 5:1		Masa: N/A	
						Materijal, poluproizvod, termička obrada Č4732, Ø15x30, kaljeno 50+5 HRC			
			Datum	Ime		Oslonac			
		Konst.	06/11/2012	Tadić B.					
		Crtao	08/11/2012	Bogdanović B.					
		Stand.	08/11/2012	Bogdanović B.					
		Kontr.	06/11/2012	Randjelović S.					
						FIN-BC.1.007		3 Kom.	
R.br.	Izmena	Datum	Ime		Zamena za:		Zamenjeno sa:		List 1 A3



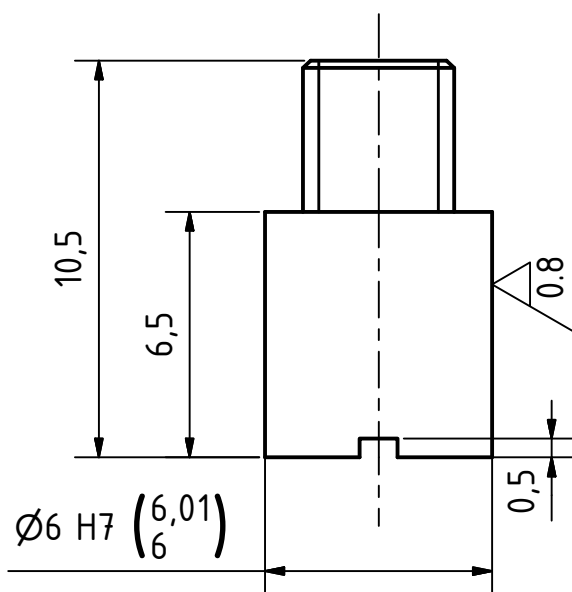
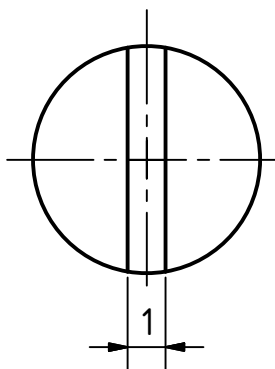
Distantni zavrtnji		
Red. Br.	X	Komada
1	15	6
2	25	6
3	35	6
4	45	6
5	55	6

Veza sa:		Tol. sl. mera.		Povr.hrap.		Razmera: 5:1		Masa: N/A		
						Maferijal, poluproizvod, termička obrada				
						Č1530, Ø6xX				
				Datum	Ime	Distantni zavrtnj				
				Konšt.	06/11/2012					Tadić B.
				Crtao	08/11/2012					Bogdanović B.
				Stand.	08/11/2012					Bogdanović B.
				Konfr.	06/11/2012					Randjelović S.
						FIN-BC.1.010		30 Kom.		
								List	1	
								A4		
R.br.	Izmena	Datum	Ime			Zamena za:		Zamenjeno sa:		

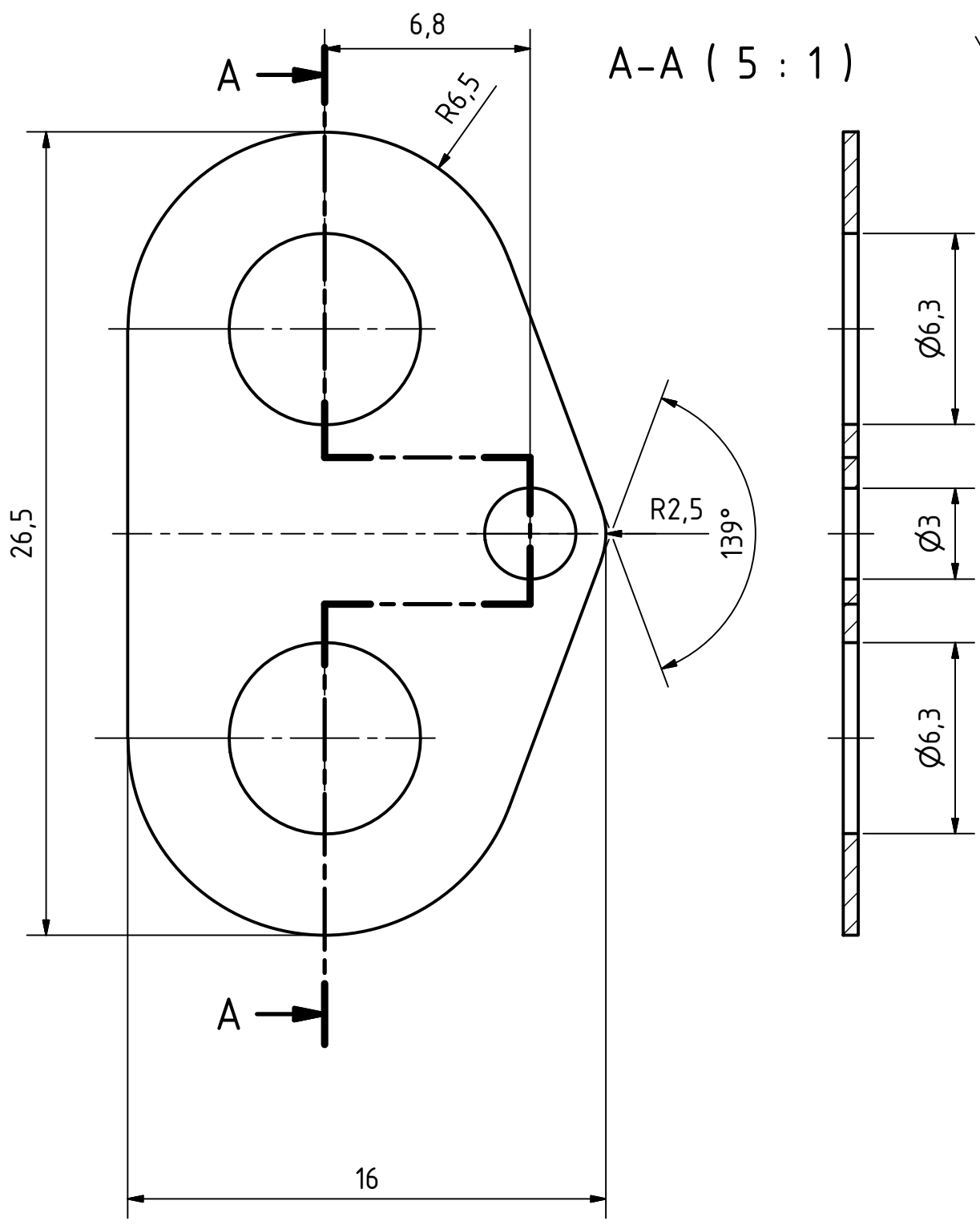




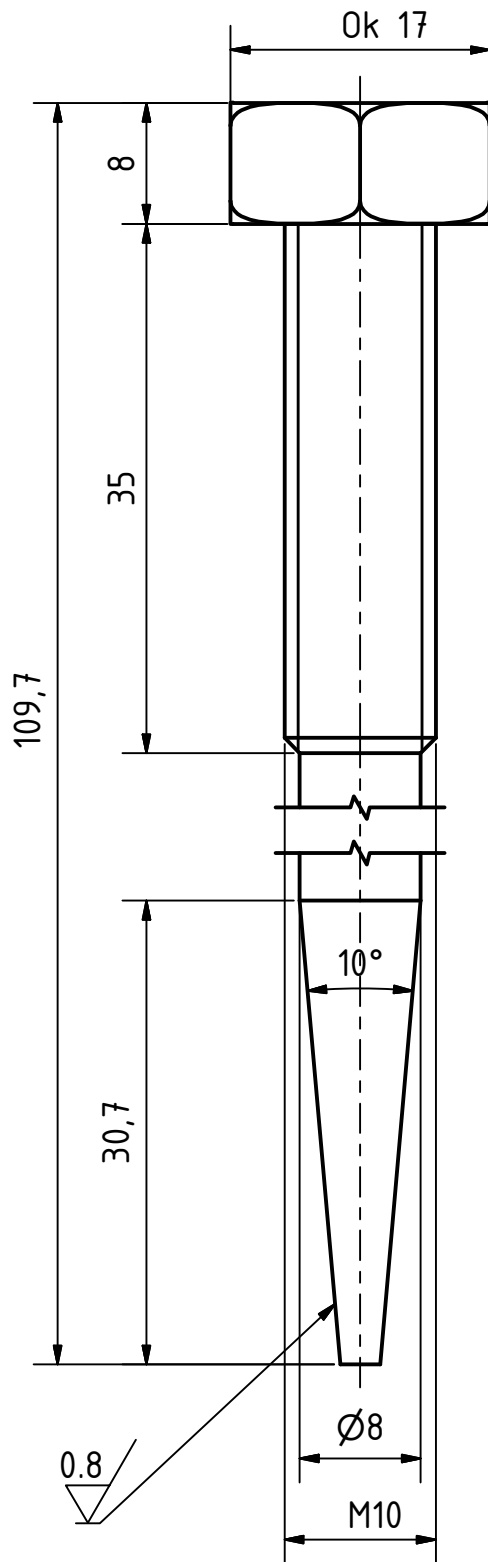
Veza sa:				Tol. sl. mera.		Povr.hrap.		Razmera: 5:1		Masa: N/A	
								Maferijal, poluproizvod, termička obrada Č1530, Ø7x9, poboljšano			
				Datum		Ime		<b>Osovinica 1</b>  FIN-BC.1.009      6 Kom.			
				Konst. 06/11/2012		Tadić B.					
				Crtao 08/11/2012		Bogdanović B.					
				Stand. 08/11/2012		Bogdanović B.					
				Konfr. 06/11/2012		Randjelović S.					
								List 1 A4			
R.br.	Izmena	Datum	Ime	Zamena za:				Zamenjeno sa:			



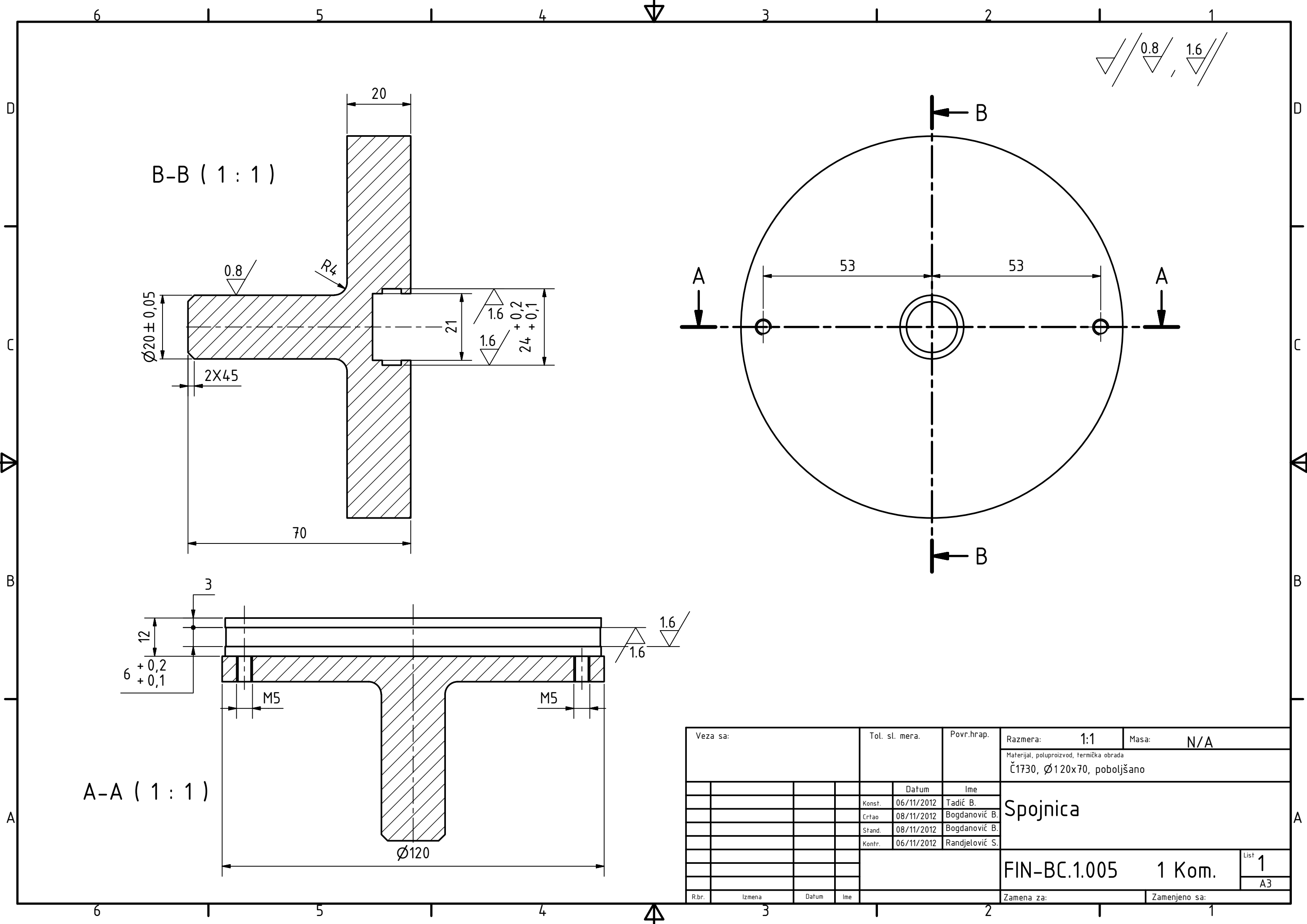
Veza sa:				Tol. sl. mera.		Povr.hrap.		Razmera: 5:1		Masa: N/A	
								Maferijal, poluproizvod, termička obrada			
								Č1530, Ø6x11, poboljšano			
				Datum		Ime		Osovinica 2			
				Konst.	06/11/2012	Tadić B.					
				Crtao	08/11/2012	Bogdanović B.					
				Stand.	08/11/2012	Bogdanović B.					
				Konfr.	06/11/2012	Randjelović S.					
								FIN-BC.1.008		3 Kom.	
										List 1	
										A4	
R.br.	Izmena	Datum	Ime					Zamena za:		Zamenjeno sa:	

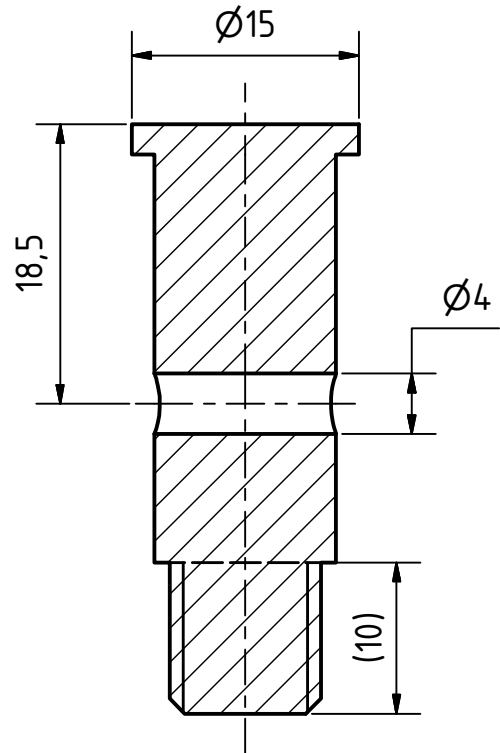
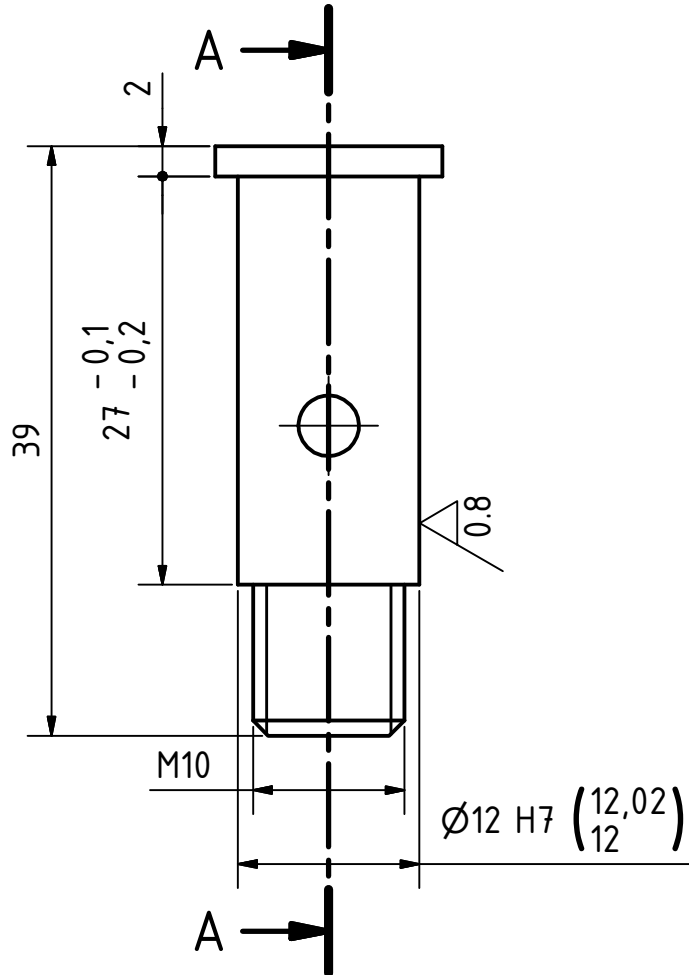


Veza sa:		Tol. sl. mera.		Povr.hrap.		Razmera: 5:1		Masa: N/A	
						Maferijal, poluproizvod, termička obrada			
						25x16			
				Datum		Ime			
				Konst.	06/11/2012	Tadić B.			
				Crtao	08/11/2012	Bogdanović B.			
				Stand.	08/11/2012	Bogdanović B.			
				Konfr.	06/11/2012	Randjelović S.			
						lim			
						FIN-BC.1.011		3 Kom.	
								List 1	
								A4	
R.br.	Izmena	Datum	Ime	Zamena za:			Zamenjeno sa:		



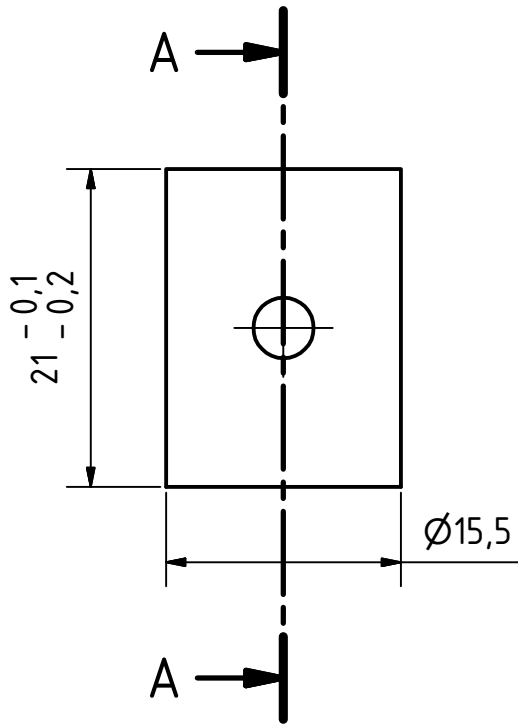
Veza sa:				Tot. sl. mera.		Povr.hrap.		Razmera: 2:1		Masa: N/A	
								Materijal, poluproizvod, termička obrada Č4732, Ø20x110, kaljeno 50+5 HRC			
				Datum		Ime		<b>Navrtka</b>  FIN-BC.1.004      1 Kom.			
				Konst.	05/11/2012	Tadić B.					
				Crtao	08/11/2012	Bogdanović B.					
				Stand.	08/11/2012	Bogdanović B.					
				Konfr.	05/11/2012	Randjelović S.					
								List 1 A4			
R.br.	Izmena	Datum	Ime					Zamena za:		Zamenjeno sa:	



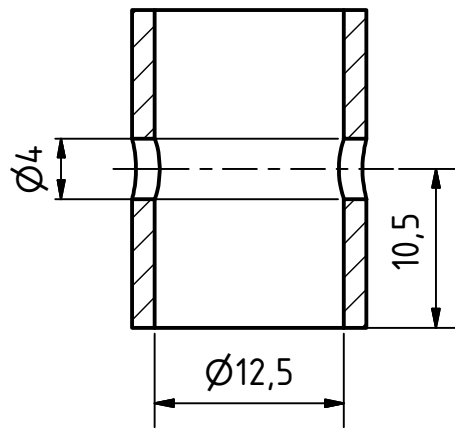


A-A ( 2 : 1 )

Veza sa:				Tol. sl. mera.		Povr.hrapp.		Razmera: 2:1		Masa: N/A	
								Materijal, poluproizvod, termička obrada Č1530, Ø15x40, poboljšano			
				Datum		Ime		<b>Osovinica 3</b>  FIN-BC.1.006      2 Kom.			
				Konst.	06/11/2012	Tadić B.					
				Crtao	08/11/2012	Bogdanović B.					
				Stand.	08/11/2012	Bogdanović B.					
				Konfr.	06/11/2012	Randjelović S.					
								List 1 A4			
R.br.	Izmena	Datum	Ime					Zamena za:		Zamenjeno sa:	



A-A ( 2 : 1 )



Veza sa:				Tol. sl. mera.		Povr.hrap.		Razmera: 2:1		Masa: N/A	
								Maferijal, poluproizvod, termička obrada Č1530, $\varnothing 16 \times 21$ , poboljšano			
				Datum		Ime		Čaura  FIN-BC.1.003      2 Kom.			
				Konst.	05/11/2012	Tadić B.					
				Crtao	08/11/2012	Bogdanović B.					
				Stand.	08/11/2012	Bogdanović B.					
				Konfr.	05/11/2012	Randjelović S.					
								List 1		A4	
R.br.	Izmena	Datum	Ime	Zamena za:				Zamenjeno sa:			