

# **Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу**



**Назив студијског програма: Машинско инжењерство**

**Ниво студија: Мастер академске студије**

**Модул: Производно машинство**

**Предмет: CAD/CAM/CAE 2**

**Број индекса: 428/2018**

**Ненад Д. Станојловић**

## **АНАЛИЗА УТИЦАЈА НЕПРЕЦИЗНОСТИ ИЗРАДЕ АЛАТА ЗА КОМБИНОВАНО ИСТИСКИВАЊЕ НА ТАЧНОСТ ОБРАТКА СА ПРЕПОРУКАМА ЗА ЕЛЕМИНИСАЊЕ ГРЕШАКА**

**Мастер рад**

**Комисија за преглед и одбрану:**

1. Проф. др Весна Мандић - ментор

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Датум одбране: \_\_\_\_\_

Оцена: \_\_\_\_\_

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

уради анализу процеса комбинованог истискивања у смислу утицаја прецизности израде алата на тачност обратка. Истраживање треба спровести кроз циљане нумеричке експерименте изменом параметара геометрије алата насталих као непрецизност у изради алата на *CNC* машини или као измене услова контактнoг трења због незадовољавајућег квалитета површина алата израђених обрадом резањем.

Додатно, треба спровести тестирања *CNC* машине за израду алата применом *QC10 Ballbar* уређаја и његовог *PHS* експертског софтверског система за анализу грешака *CNC* машине и њихових утицаја на два основна параметара прецизности (циркуларност и позициона толеранција). Након спроведених експерименталних испитивања потребно је дати препоруке за корекције уочених грешака, а тиме и побољшање прецизности израде алата.

Препоручени оквирни садржај рада:

1. Увод
2. Нумеричка симулација процеса комбинованог истискивања
3. Утицајни параметри и план нумеричких експеримената
4. Анализа резултата нумеричких симулација
5. Израда алата на *CNC* машинама и утицај тачност израде
6. *QC10 Ballbar* уређај
8. Поступак и резултати мерења тачности *CNC* машине
7. Упоредна анализа резултата и препоруке
9. Закључна разматрања
- 10 Литература

Препоручена литература:

- [1] **Владо Вујовић**, *Технологија пластичности у машинству I део*, Нови Сад, 1990. год.
- [2] **Весна Мандић**, *Физичко и нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2012.
- [3] **Sabahudin Ekinović, Edin Begović, Emir Hekić**, *Ballbar QC10 Measuring Device - Fast Experimental Check of Machine Tools Accuracy*, Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Tecnology, Vol. 19, No. 1, pp. 29-32, 2015.
- [4] **Ivan Durica, Ivan Kuric**, *Diagnostics of CNC Machines with Renishaw Equipment, The International Conference of the Carpathian Euro-Region Specialists in Industrial Systems, 7<sup>th</sup> Edition*.

[5] **Jerzy Józwik, Paweł Pieśko, Grzegorz Krajewski**, *Ocena testu QC10 do kontroli off-line obrabiarek sterowanych numerycznie CNC*, Eksploatacja i Niezawodność, nr 3/2010, 2010.

[6] **Весна Мандић, Никола Јанковић**, *Извештај мерења перформанси CNC машине коришћењем QC10 Ballbar уређаја*, Центар за виртуелну производњу, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.

[7] **Austin H. Chen**, *Integrated Inspection for Precision Part Production*, Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2006.

[8] **Robert Cep, Marek Sadilek, Karel Kouril, Igor Budak, Miodrag Hadzistevic**, *Testing of machine tool accuracy by the QC10 Ballbar system*, Journal of production Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 23-26.

[9] **Ali Lasemi**, *An Integrated Approach for Precision Machinig of Freeform Surfaces*, Doctoral Thesis, University of Calgary, Calgary, 2014.

Крагујевац, датум:

Ментор:

Проф. Др Весна Мандић

## Садржај

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Резиме .....                                                                 | 1  |
| Abstract .....                                                               | 2  |
| 1. Увод .....                                                                | 3  |
| 1.1 Примена нумеричких симулација.....                                       | 4  |
| 1.2 Значај тачности машине за израду алата .....                             | 5  |
| 2. Нумеричка симулација процеса комбинованог истискивања .....               | 7  |
| 2.1 Метода коначних елемената.....                                           | 7  |
| 2.2 Избор коначног елемента .....                                            | 7  |
| 2.3 Утицај мреже коначних елемената на тачност симулације .....              | 8  |
| 2.4 Улазни подаци за нумеричку симулацију процеса .....                      | 9  |
| 2.4.1 Особине материјала и његово понашање .....                             | 9  |
| 2.4.2 Дефинисање геометрије .....                                            | 11 |
| 2.4.3 Генерисање мреже коначних елемената.....                               | 12 |
| 2.4.4 Модел контактнoг трења.....                                            | 13 |
| 3. Утицајни параметри и план нумеричких експеримената .....                  | 15 |
| 3.1 Утицајни параметри на тачност делова при обради хладним истискивањем ... | 15 |
| 3.2 Утицајни фактори у <i>net-shape</i> обради .....                         | 16 |
| 3.3 Утицајни фактори на прецизност резултата <i>FEM</i> анализе .....        | 19 |
| 3.3.1 Грешке припреме анализе.....                                           | 20 |
| 3.3.2 Грешке уноса података .....                                            | 22 |
| 3.3.2 Грешке интерпретације резултата .....                                  | 23 |
| 3.4 План нумеричких експеримената .....                                      | 23 |
| 3.4.1 Експеримент 1 .....                                                    | 24 |
| 3.4.2 Експеримент 2 .....                                                    | 24 |
| 3.4.3 Експеримент 3 .....                                                    | 27 |
| 4. Анализа резултата нумеричких симулација .....                             | 28 |
| 4.1 Модел нумеричке симулације.....                                          | 28 |
| 4.2 Резултати и анализа нумеричких експеримената.....                        | 31 |
| 4.2.1 Резултати експеримента 1 .....                                         | 31 |
| 4.2.2 Резултати експеримента 2 .....                                         | 34 |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.3 Резултати експеримента 3 .....                           | 39 |
| 5. Поступак израде алата и прецизност израде.....              | 40 |
| 5.1 Стандарди квалитета обраде и могуће грешке при обради..... | 41 |
| 5.2 Провера тачности CNC машина.....                           | 46 |
| 6. QC10 Ballbar уређај .....                                   | 48 |
| 6.1 Могућности и принцип рада .....                            | 51 |
| 6.2 Софтвер за подршку мерењу.....                             | 55 |
| 6.3 Приказ и анализа грешака .....                             | 64 |
| 6.4 Смернице и савети за спровођење теста .....                | 65 |
| 6.5 Примена резултата тестирања.....                           | 66 |
| 7. Студија случаја мерења тачности CNC машине.....             | 68 |
| 7.1 Дефиниција проблема.....                                   | 68 |
| 7.2 Резултати мерења .....                                     | 68 |
| 7.2.1 Обрада резултата трећег мерења у симулатору.....         | 79 |
| 7.3 Анализа резултата .....                                    | 82 |
| 8. Закључак.....                                               | 84 |
| 9. Литература.....                                             | 85 |

## Резиме

Тема овог рада се односи на анализу процеса комбинованог истискивања у смислу утицаја прецизности израде алата на тачност обратка. Истраживање је спроведено кроз циљане нумеричке експерименте изменом параметара геометрије алата насталих као непрецизност у изради на *CNC* машинама или као измене услова контактеног трења због незадовољавајућег квалитета обрађених површина алата обрадом резањем.

Додатно, представљен је *QC10 Ballbar* уређај и коришћење његовог *PHS* експертског софтверског система за анализу грешака *CNC* машине и њихових утицаја на два основна параметара прецизности (циркуларност и позициона толеранција), као и пример тестирања *CNC* машине за израду алата. Поред студије случаја индустријског тестирања изабране *CNC* машине и симулације корекција утврђених грешака коришћењем софтвера, дате су препоруке за отклањање грешака на *CNC* машини, а тиме и побољшање прецизности израде алата, што се одражава и на прецизност израде дела технологијом истискивања.

**Кључне речи:** *Хладно истискивање, нумеричка симулација, грешке израде алата, тачност CNC машина.*

## Abstract

The master thesis deals with the analysis of the combined extrusion process in terms of the influence of the precision of tool manufacturing on the accuracy of the workpiece. The research was conducted through targeted numerical experiments by changing the parameters of tool geometry resulting from inaccuracies of CNC machining or as changes in contact friction conditions due to unsatisfactory quality of machined tool surfaces.

Additionally, the QC10 Ballbar device and the use of its PHS expert software system for analyzing CNC machine errors and their effects on two basic precision parameters (circularity and positional tolerance) were presented, as well as an example of CNC machine testing for tool production. In addition to the case study of industrial testing of a selected CNC machine and simulation of corrections of detected errors using expert software, recommendations are given for troubleshooting CNC machines, and thus improving the precision of tool making, which is reflected in the precision of extrusion technology.

**Key words:** Cold extrusion, numerical simulation, manufacturing errors, accuracy of CNC machines.

## 1. Увод

Хладно истискивање је процес обраде метала хладним деформисањем, при коме се материјал који се налази улату, уз помоћ деформационе силе приморава да излази из алата, кроз зато предвиђене отворе. Материјал тече из алата у одређеном правцу, примајући облик који одговара отвору у алату (матрици).

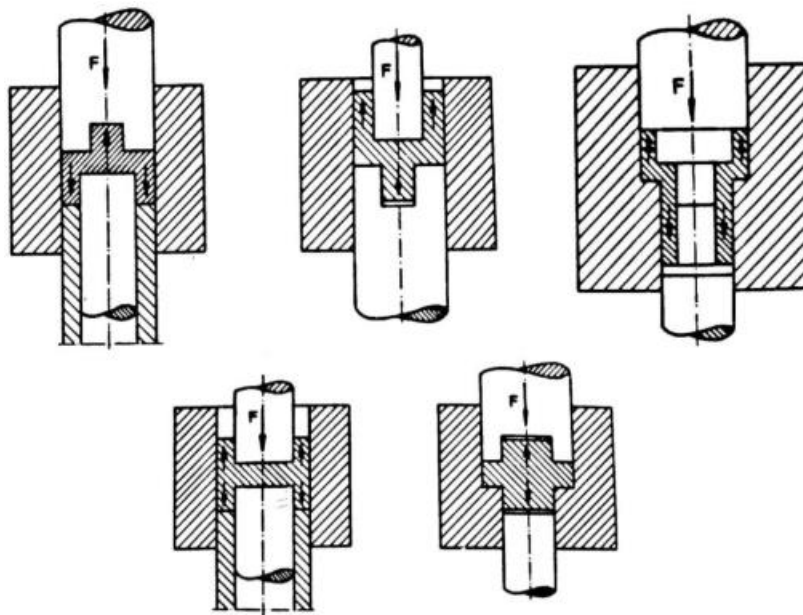
У зависности од правца и смера истицања метала из алата у односу на правац кретања притискивача, разликују се:

- истосмерно,
- супротносмерно и
- комбиновано истискивање

Истосмерно истискивање карактерише се тиме да је смер истискивања метала из алата исти са смером кретања притискивача, односно смером дејства деформационе силе.

Супротносмерно истискивање карактерише супротан смер истицања метала у односу на смер кретања притискивача.

Комбиновано истискивање се користи код израде делова сложених облика и заснива се на комбинацији истосмерног и супотног истискивања. У току самог процеса, течење материјала се одвија и у смеру кретања притискивача и у супротном смеру од овог кретања. Различите варијанте комбинованог истискивања приказане су шематски на слици 1.1. Комбиновано истискивање омогућава добијање делова сложених облика са различитим димензијама попречног пресека по дужини обратка [1].

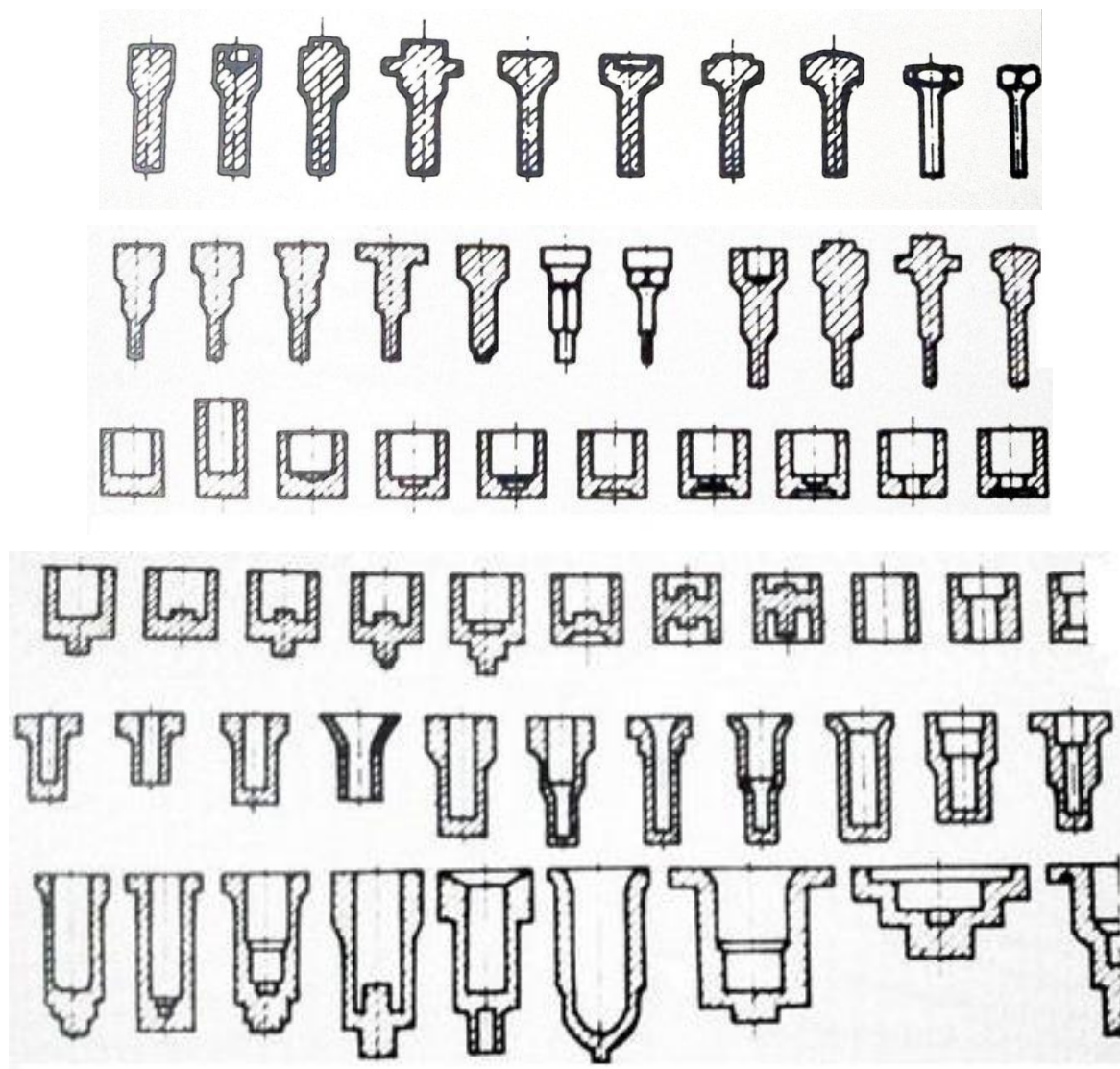


Слика 1.1: Шема комбинованог истискивања [1]

Да би се применио поступак израде челичних делова технологијом хладног истискивања треба узети у обзир неке од основних карактеристика оваквог технолошког поступка обраде, као што су: применљивост поступка с обзиром на геометријски облик припремка, деформационо ојачање (промена механичких особина

у току процеса деформације), тачност израде, квалитет обрађених површина, производност, недостаци поступка итд.

Примена хладног истискивања за обликовање челичних делова ограничена је с обзиром на геометријски облик, димензије обратка и врсту челика. На слици 1.2 приказани су примери геометријских облика делова који се успешно могу изградити хладним истискивањем. У зависности од геометријске форме, приказани примери израђују се истосмерним, супротносмерним или комбинованим поступком хладног истискивања. [1]



Слика 1.2: Примери примене хладног истискивања [1]

### 1.1 Примена нумеричких симулација

Нумеричке симулације у савремено доба су неопходан и неизбежан део пројектовања технологије израде неког дела, без обзира да ли се он производи пластичним деформисањем материјала или неком другом технологијом. Помоћу симулација на лакши и јефтинији начин се долази до информација које су неопходне за пројектовање технологије. Када ове информације нису доступне, до њих се долази применом других традиционалних метода, што представља додатни трошак и одлагање процеса

производње. Помоћу симулација може се истражити производни процес, као и открити евентуалне грешке у току пројектовања, предвидети потенцијалне грешке у току процеса обраде. Поред тога, детаљно се може анализирати структура самог материјала по завршетку процеса обраде у погледу заосталих напона, критичних зона за појаву дефекта и сл., што је значајно при пројектовању новог процеса обраде или унапређењу и модификовању већ постојеће технологије.

Најмоћнији и најшире примењивани алат за нумеричку симулацију је метода коначних елемената ( *FEM – Finite Element Method* ), а један од софтвера за нумеричку симулацију применом методе коначних елемената, који је коришћен за анализу која је описана у овом раду је *Simufact.forming*. Софтверски пакет *Simufact.forming* развијен је за симулацију различитих процеса обраде материјала деформисањем. Омогућава кориснику да препозна реалне ситуације из производње и даје увид у све аспекте процеса. Програм има моћан постпроцесор за визуелизацију резултата симулације. Омогућава анализу и симулацију готово свих врста процеса обликовања материјала, независно од: температуре процеса, машине, материјала обрада, врсте процеса и слично. Омогућава приказ течења материјала, попуњавања алата као и уочавање безконтактних зона. Користи се и за праћење напона, деформација, температура и притисака. Програмом се може предвидети хабање алата и проценити критеријуми лома. Успешан је у процени деформационе силе на алатима и напонских дистрибуција. Коришћењем методе коначних елемената долази се до најпрецизнијих резултата, а резултате симулације је могуће приказати у било ком тренутку процеса [2].

## 1.2 Значај тачности машине за израду алата

Тачност обраде истискивањем зависи од тачности и квалитета израде алата и тачности рада пресе. Може се оријентационо рећи да се толеранције обраде дебљине зида крећу у границама  $\pm 0.025 \text{ mm}$  за мање обратке, а за веће  $\pm 0.25 \text{ mm}$ , па и више. Аксијалност обратка одражава се у оквиру одступања од  $0.05 \text{ mm}$  на сваких  $300 \text{ mm}$  дужине. Концентричност обратка се одржава у оквиру одступања од  $0.050 - 0.127 \text{ mm}$ . Знатно је теже, код процеса хладног истискивања, одржавање тачности дужине обратка у тачно одређеним толеранцијама, посебно при комбинованом истискивању. У неким случајевима та одступања могу бити у границама  $\pm 0.25 \text{ mm}$ , док су код неких обрада одступања крећу у границама  $\pm 4 - 5 \text{ mm}$ .

Квалитет обрађених површина истискивањем зависи од квалитета обраде површина алата, а и од степена деформационог ојачања у току деформисања. Помоћу брушених и полираних радних површина елемената алата, могуће је добити површину обрада са хрпаваошћу ( $R_a$ ) у границама  $0.25 - 2 \mu\text{m}$ .

Сходно овоме може се рећи да хладно истискивање даје квалитет обрађених површина једнак квалитету површина израђених најфинијим обрадама скидањем струготине, због чега у великом броју случајева није потребна никаква додатна обрада, што значи да се хладним истискивањем добијају делови спремни за уградњу. [1]

Да би се то постигло, потребна је висококвалитетна и прецизна израда алата за хладно истискивање. С обзиром да обрадак поприма облик и димензије алата, самим тим ће његове димензије и квалитет зависити од димензија и квалитета радних делова алата који су у току деформисања у контакту са обратком. Из тог разлога потребни су квалитетна опрема за израду алата и прецизне машине.

С обзиром да је најзаступљенија израда алата на *CNC* машинама, неопходно је пре свега обезбедити прецизност и тачност машине у свим правцима кретања. С обзиром да је нова опрема скупа и да у домаћим фабрикама се осим нове користи и застарела опрема, у овом раду ће бити представљено како се, на економичнији начин, већ постојеће машине могу унапредити, тако да се добије висока прецизност кретања машине у дозвољеним толеранцијама, а самим тим и прецизна израда алата.

## 2. Нумеричка симулација процеса комбинованог истискивања

### 2.1 Метода коначних елемената

Метода коначних елемената (*Finite Elemental Method – FEM*) једна је од метода дискретне анализе, која се заснива на физичкој дискретизацији посматраног домена. Посматрани модел апроксимира се тако да модел са бесконачним бројем степени слободе транспонује се у модел са међусобно повезаним коначним елементима и са коначним бројем степени слободе. Суштина апроксимације модела методом коначних елемената обухвата следеће принципе [2]:

- Посматрани домен континуума дели се на поддомене коначних димензија који се називају коначним елементима и заједно чине мрежу коначних елемената;
- Коначни елементи су међусобно повезани у коначном броју тачака које се налазе на контури елемената и називају се чворови;
- Стање променљиве поља у сваком коначном елементу описује се помоћу интерполационих функција (или функција облика);
- Интерполационе функције су унапред задате функције за један тип коначног елемента и представљају везу између вредности променљиве поља у било којој тачки коначног елемента и вредности променљиве поља у чворовима.

Помоћу интерполационих функција (функције облика или апроксимативне функције) представља се поље променљивих у елементу и успоставља се веза између вредности функције у било којој тачки елемента и основних непознатих параметара у чворовима. Вредностима параметара у чворовима одређен је интезитет промена функције у елементу, а помоћу интерполационих функција дефинисан је само облик промене.

Као интерполационе функције у методи коначних елемената углавном се користе полиноми као што су: *Lagrange-ovi* полиноми, *Serendipitz* функције и *Hermite-ovi* полиноми.

Испуњење континуитета између појединих елемената зависи од избора интерполационих функција. Елементи су компатибилни или конформни ако су услови континуитета на границама између појединих елемената задовољени, односно некомпатибилни или неконформни ако услови нису задовољени.

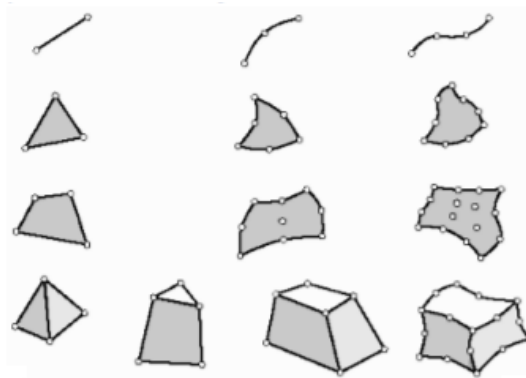
За решавање различитих проблема методом коначних елемената, постоје различити степени континуитета: континуитет функције -  $C0$  континуитет, континуитет функције и првих извода функције –  $C1$  континуитет, и континуитет функције и извода до  $m$ -тог реда –  $Cm$  континуитет. Елементи са вишим степеном континуитета дају тачнија решења од оних са нижим, с тим да је њихово дефинисање знатно сложеније [2].

### 2.2 Избор коначног елемента

Коначни елементи су елементи којима се континуум дели на дискретне делове, а процес поделе назива се дискретизација. У зависности од облика (слика 2.1), линеарности и реда разликују се више типова елемената. Врста проблема, геометрија,

захтевана прецизност расположивост у оквиру софтвера, природа физичког проблема и знање и искуство корисника су фактори који утичу на избор врсте коначног елемента.

Разматрана структура дели се на коначан број елемената који су међусобно повезани у одређеном броју тачака (чворови). Тако повезани коначни елементи образују мрежу коначних елемената (*FE* мрежу), а процес формирања мреже назива се *meshing*. Коначни елемент је карактеристичан по облику елемента, бројем и врстом чворова, бројем и врстом непознатих у појединим чворовима и врстом интерполационих функција. С обзиром на облик елемента постоје елементи са праволинијским и криволинијским контурама, а са обзиром на број степени слободе једнодимензиони, дводимензиони и тродимензиони [2].



**Слика 2.1:** Различити облици коначних елемената [9]

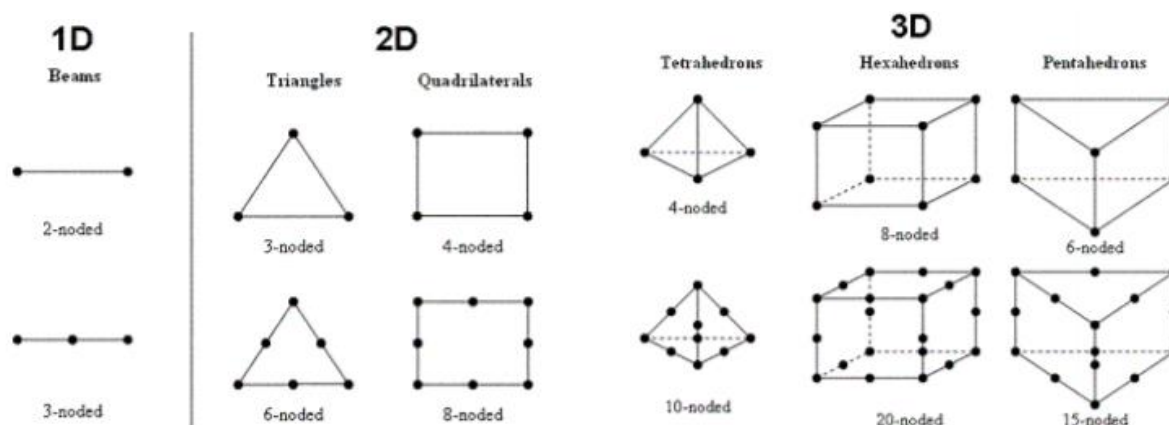
Поред облика, за сваки елемент битан је број и врста чворова, који се усвајају у карактеристичним тачкама елемента. Као основне непознате у методи коначних елемената, у чворовима се усвајају параметри, који су вредности функције, односно њених извода у чворовима. Они се називају често и степени слободе и у зависности од врсте чвора могу бити спољашњи и унутрашњи. Унутрашњи степени слободе нису основне непознате, већ се уводе ради побољшања апроксимације поља променљивих у елементу, а елиминишу се у току анализе. На тај начин, у коначном систему једначина остају само параметри у спољашњим чворовима као основне непознате које треба одредити [2].

### 2.3 Утицај мреже коначних елемената на тачност симулације

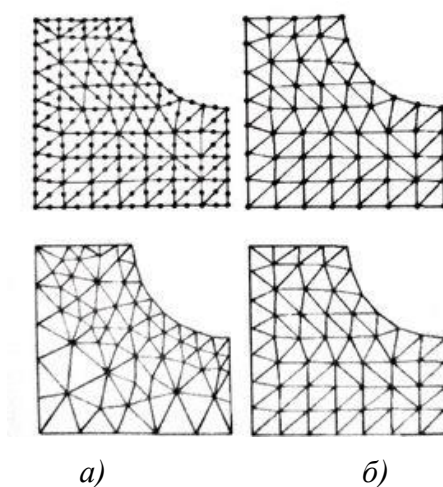
Мрежа коначних елемената на одређеном моделу формира се са циљем да се предвиди понашање тог модела по дејством неког спољашњег оптерећења. Да би се успешно предвидело, неопходан је правилан избор типа коначног елемента, као и његове величине. Софтвери у којима се ради анализа методом коначних елемената, имају модуле за аутоматско генерисање мреже који се назива *meshing* модул. Мрежа се формира избором троугаоних, четвороугаоних, тетраедарских или хексаедарских елемената (слика 2.2), а прецизност модела одређује се грешком слагања елемената при дискретизацији модела. Грешку слагања представља процентуална разлика између резултата једне или следеће итерације, када се у процесу формирања мреже промени величина или врста коначног елемента.

За решавање овог проблема користе се методе *h-element* и *p-element* (слика 2.3). Метода *h-element* користи принцип смањења величине елемената, на карактеристичним закривљеним површинама, прелазима и сл. да би се што је могуће прецизније представила реална геометрија модела. Метода *p-element* ради на принципу повећања

реда полинома, без мењања оригиналне мреже. *P-element* методом могуће је боље представљање кривих површина и повољнија је за велике напоне, али као таква захтева боље компјутерске карактеристике и потребно је више времена за прорачунавање. Ова метода се не може користити код нелинеарних модела материјала. Повећањем величине коначног елемента може се смањити укупан број коначних елемената, а с тим и време прорачуна, али то може погоршати тачност резултата. Због одређених предности и мана, многи софтвери користе обе методе за *remeshing* процес. За средњу густину мреже и величину елемената добре резултате могу обезбедити тетраедарски елемент са 10 чворова и хексаедарски елемент са 20 чворова (слика 2.2), с тим што је за тетраедарски елемент потребно мање времена за прорачун [2].



Слика 2.2: Коначни елементи према броју степени слободе [2]



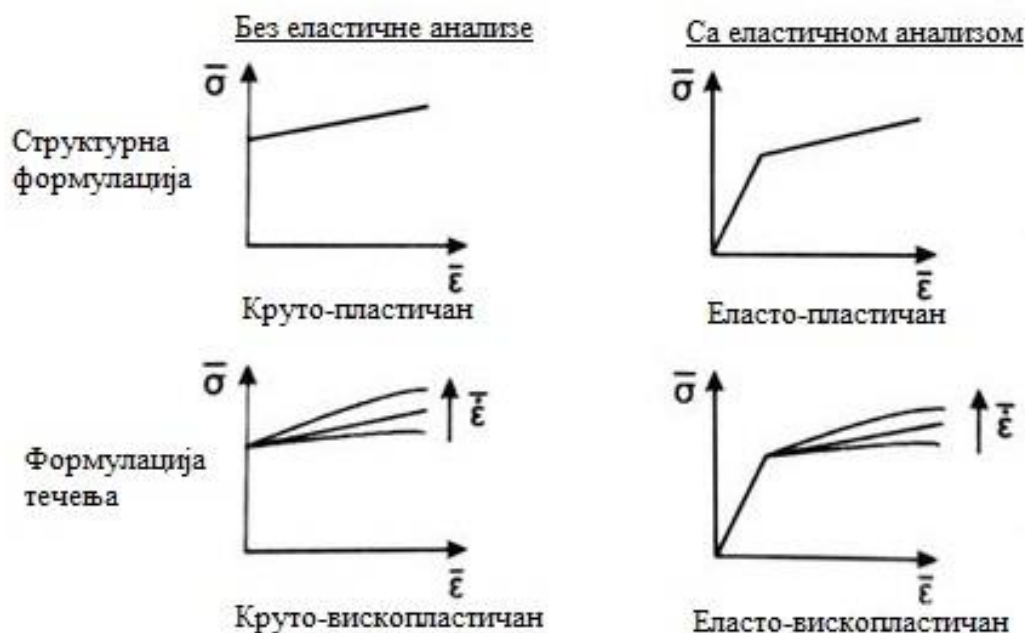
Слика 2.3: *h-element(a)* и *p-element(б)* [2]

## 2.4 Улазни подаци за нумеричку симулацију процеса

### 2.4.1 Особине материјала и његово понашање

Да би било могуће спровести анализу неког процеса обраде, потребно је дефинисати материјал обрада и алата и математички описати пластично течење материјала односно описати његово понашање при деформисању. Постоје два начина на основу која се може посматрати понашање материјала, а то су: структурна формулација као анализа деформисања чврстог тела и формулација течења која се заснива на основама

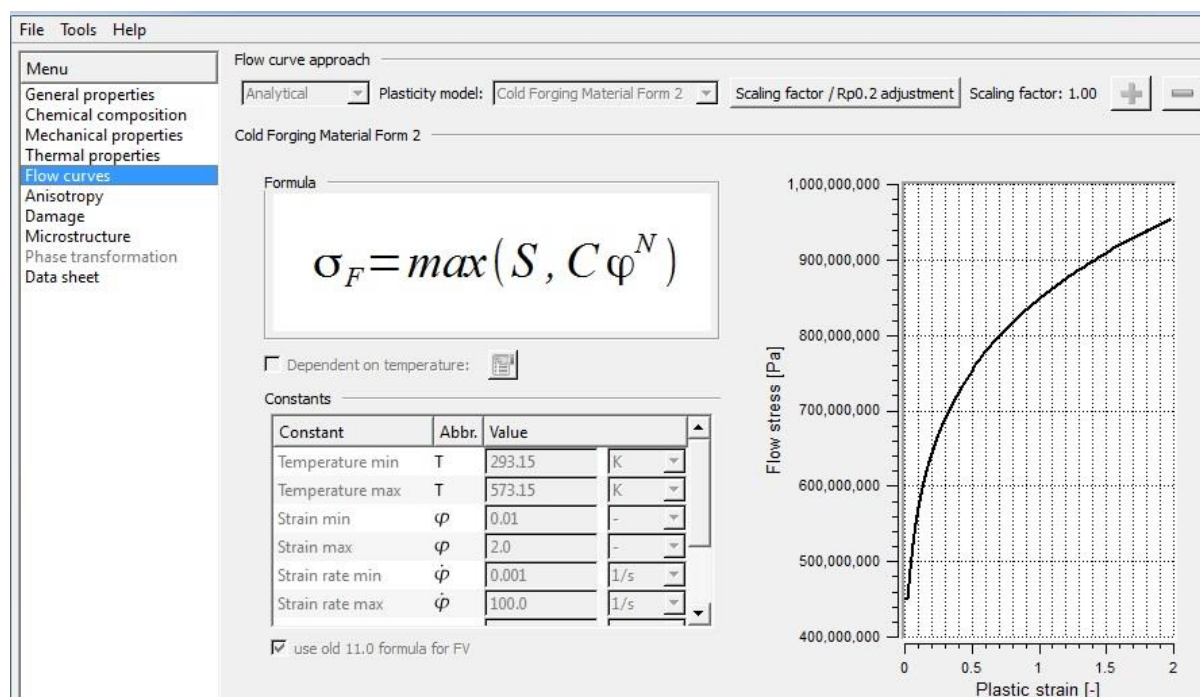
механике флуида. Формулација течења се користи за анализу топле запреминске обраде, где се при високом загревању материјала повећава зависност његових механичких особина на брзину деформације. За хладну обраду користи се структурна формулација, где је занемарљив утицај брзине деформације на карактеристике течења материјала. У зависности који се тип обраде симулира, а самим тим и које је понашање материјала неопходно, на слици 2.4 приказан је могућ избор понашања материјала у *FEM* софтверу [2].



Слика 2.4: Типови понашања материјала [2]

Помоћу кривих течења, које се експериментално одређују, могуће је и нумерички одредити течење материјала при пластичном деформисању, као и деформациону силу и енергију процеса. Погодност савремених софтвера за *FEM* анализе јесте поседовање база података материјала са дефинисаним стандардним карактеристикама материјала и кривих течења. То омогућава знатно убрзање припреме симулације. У супротном, за материјал који се не налази у бази података, мора се спровести експериментално испитивање којим се добија крива течења, па тек добијене карактеристике материјала унети у базу софтвера [2].

Треба нагласити да у сложеним анализама напрезања алата, није довољно као карактеристике материјала од којег је израђен алат, унети само обичне податке о кривим течења материјала, јер се на тај начин неће реално описати понашање материјала алата који је термички обрађен. Треба узети у обзир, да је материјал, иако се има крива течења, претрпео значајне измене у току термичке обраде алата у циљу побољшања механичких карактеристика (површинска тврдоћа и сл.). Према томе, у *Simufact.forming* софтверу, та чињеница је узета у обзир, тако да постоје у бази материјала подаци и математички опис понашања таквих материјала алата који се користе у процесима хладног истискивања. На слици 2.5 приказан је пример материјала из базе података софтвера *Simufact.forming*. Наведени материјал је дефинисан као материјал радног комада који се обрађује технологијом хладног истискивања, која је коришћен за нумеричка испитивања у овом раду [3].



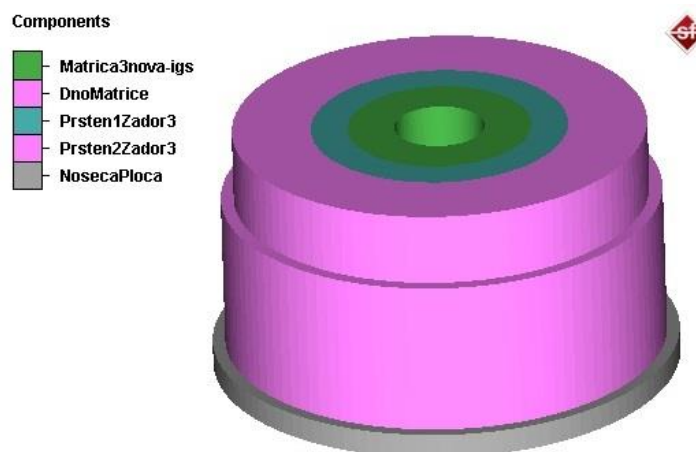
Слика 2.5: Подаци о материјалу радног комада Č4120 (17Cr3), Simufact.forming база података материјала

## 2.4.2 Дефинисање геометрије

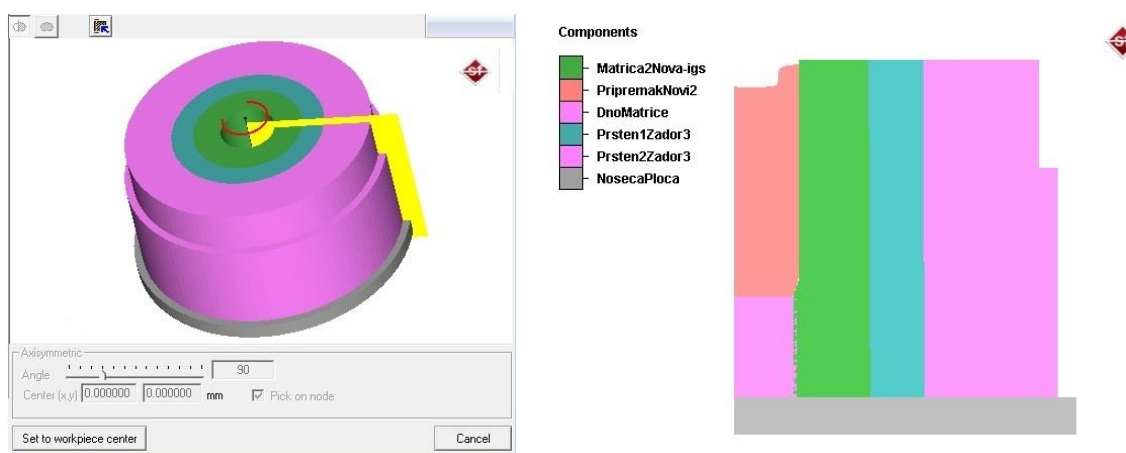
Делови који се могу израдити технологијама пластичног деформисања могу бити осносиметрични, као и делови сложених облика. Геометрију радног комада такође прати и геометрија алата и матрица. Према томе, у зависности од геометрије радног комада и алата и нумеричке симулације се могу изводити као дводимензионалне-2D (у условима осносиметричног деформационог стања) и тродимензионалне-3D.

У случају нумеричке анализе у условима осносиметричног деформационог стања, FEM софтвери пружају могућност раванског приказа алата и обратка, као и добијених резултата нумеричких испитивања. Алата се увозе у софтвер као тродимензионални, а затим се бира раван у којој се посматра процес обраде. На слици 2.6 и 2.7 приказан је пример геометрије алата у 3D облику, избор равни пресека и приказ истог у 2D облику. За 2D геометрију алата и обратка, потребан је мањи број коначних елемената за формирање FE мреже, што знатно смањује време потребно за FE анализу процеса обраде.

За 3D симулације, геометрија алата и припремка је најпре формирана моделирањем у другим CAD/CAM софтверима, а затим се као таква увози у софтвер за FE анализу. Због сложеног облика радног комада, сложено је и деформационо стање, па самим тим није могуће вршити анализу процеса само у једној равни, већ се процес мора моделirati са тродимензионалним алатима и припремком. С обзиром да се задржава њихова пуна геометрија, потребно је више коначних елемената за формирање мреже, па је самим тим и процес нумеричке анализе дужи [2]. У поглављу 4 се на практичном примеру може видети, када је могуће радити 2D и када је потребно применити 3D симулацију.



Слика 2.6: 3D приказ алата, Simufact.forming



Слика 2.7: Избор равни пресека и приказ геометрије у 2D облику

### 2.4.3 Генерисање мреже коначних елемената

При изради делова технологијама пластичним деформисањем, долази до стварања великих пластичних деформација. У оваквим условима, заједно са обратком, деформисање трпи и већ формирана мрежа коначних елемената на припремку у току симулације процеса. При великој деформацији мреже, њена деформисаност постаје такође велика. При томе, резултати постају непрецизни и долази до немогућности даљег прорачунавања. Да би се наставио процес, неопходно је генерисати нову мрежу коначних елемената и пренети податке са старе на нову мрежу ради прецизности резултата.

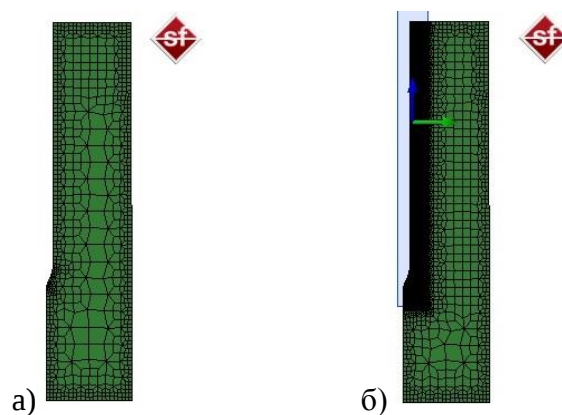
Процес генерисања нове мреже у току симулације је јако захтеван, па би било готово немогуће урадити га ручно. Из тог разлога, у савременим софтверима за нумеричке симулације тај поступак је аутоматизован, без интервенције корисника и зове се *remeshing*. Поступак формирања нове мреже састоји се из следећих активности:

- одређивање услова када је потребан *remeshing*;
- одређивање оптималне густине мреже, у зависности од сложености геометрије дела;
- регенерација мреже на основу дефинисане густине;

- трансфер информација, тј. стања параметара анализе, укључујући и граничне услове, са старе мреже на нову;
- наставак симулације.

Као што је већ поменуто, треба имати у виду квалитет мреже, односно број, врсту и величину коначних елемената који формирају мрежу, јер велики број елемената успорава симулацију и захтева боље карактеристике рачунара ( процесор и хардвер), али дају прецизније резултате. Треба изабрати оптималну густину мреже, узимајући у обзир потребно време и прецизност резултата.

У софтеру за симулацију, такође се пружа могућност кориснику да сам дефинише критичне зоне на геометрији алата и обратка, за које сматра да може доћи до проблема при аутоматском *remeshing-u* и прекиду симулације и у тим зонама захтева гушћу FE мрежу. То се постиже помоћу дефинисања такозваног *refinement box-a* [2]. На слици 2.8 приказан је пример формирања мреже и аутоматски *remeshing*, као и пример *refinement box-a* у софтверу *Simufact.forming*.



Слика 2.8: Аутоматско формирање мреже и *remeshing*: а) иницијална мрежа, б) *refinement box*

#### 2.4.4 Модел контактеног трења

При обради метала деформисањем на потребну деформациону силу и енергију за обраду, као и на само течење материјала, значајан утицај има контактено трење између алата и радног комада. Поред уношења података у софтвер о карактеристикама материјала, потребно је софтверу дати информације и о условима контактеног трења, како би симулирани процес обраде био описан исто, или приближно исто као и стваран, а са циљем добијања реалних и прецизних резултата. Као и за карактеристике материјала, добијање информација о коефицијентима/факторима контактеног трења врши се експериментално, најчешће методом сабијања прстена (*ring test*), којом се може одредити трење преко параметра  $\mu$  (коефицијент трења) или преко параметра  $m$  (фактор трења).

Поред одређивања вредности трења преко параметара  $\mu$  и  $m$ , потребно је да се у софтверу за симулацију изабере математички модел којим се описује трење. Математичко описивање контактеног трења врши се помоћу три закона:

1. *Amonton*-ов и *Coulomb*-ов закон:

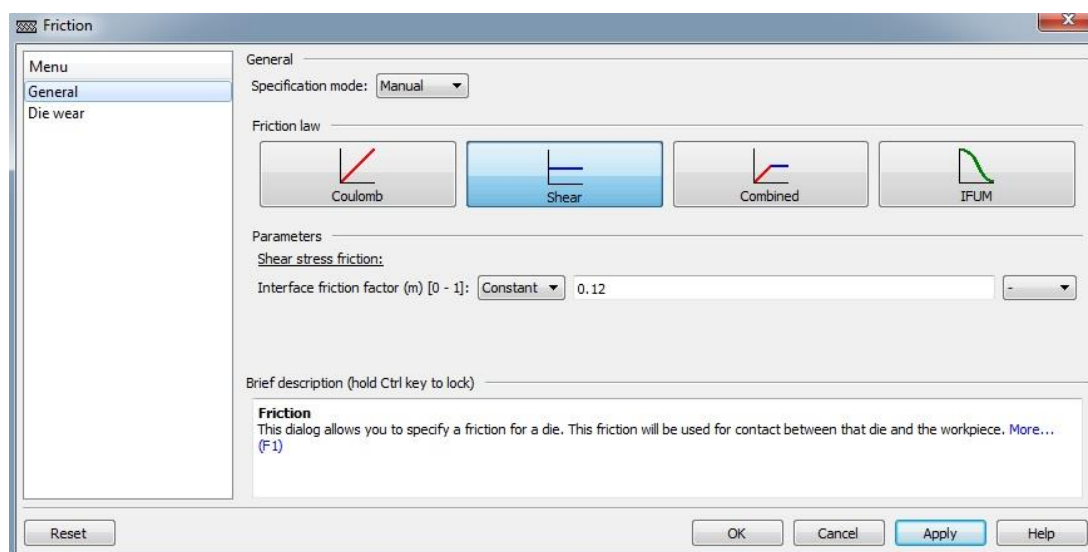
$$\tau = \mu p, \quad 0 \leq \mu \leq 0.577 \quad (2.1)$$

2. Закон константног трења:

$$\tau = m k, \quad 0 \leq m \leq 1 \quad (2.2)$$

3. Адхезионе теорије, које узимају у обзир реалну храпавост контактних површина.

У првом моделу (2.1) трење је пропорционално нормалном притиску, а мера пропорционалности је изражена преко коефицијента трења  $\mu$ . Важи само у областима малих нормалних притисака. Други модел трења (2.2) представља константни тангенцијални напон трења у контактним површинама, што је реално за случај при постојању великих нормалних притисака. Трећи модел описивања трења представља комбинацију прва два закона и његова предност је у томе што даје реалну представу контактних услова и у областима средњих напона [2]. На слици 2.10 приказан је пример за дефинисање контактних услова у софтверу *Simufact.forming*.



**Слика 2.10:** Дефинисање контактних услова у софтверу *Simufact.forming*

За нумеричке симулације процеса запреминског обликовања, боље резултате даје закон константног трења од *Coulomb*-овог, па се трење као улазни податак за симулацију даје преко параметра фактора трења  $m$  [2].

### 3. Утицајни параметри и план нумеричких експеримената

#### 3.1 Утицајни параметри на тачност делова при обради хладним истискивањем

Код обраде процесом истискивања, на тачност делова се пре свега одражава тачност израде алата, тачност рада пресе, као и подешавање и одабир оптималних режима везаних за само извођење процеса. Толеранције пречника обратка директно зависе од вредности ојачања матрице (слика 3.1), које утиче на степен ширења матрице, при деловању силе притискивача и појаве високих притисака у алату током процеса обраде.



**Слика 3.1:** Утицај преднапрезања матрице на пречник обратка [3]

На слици 3.2 приказана је варијација димензије пречника дела израђеног истискивањем. У процесу истискивања, готово је најтеже контролисати истицање материјала из алата, односно одржати тачност дужине обратка у задатим толеранцијама. Код једноставнијих делова могуће је одступања одржати у границама од  $\pm 0.25\text{mm}$ . С друге стране, код сложенијих делова, самим тим и сложенијег процеса истискивања, тешко је одржати одступања и у границама  $\pm 4\text{-}5\text{mm}$ . Велики број фактора утиче на овај проблем: када се димензија дужине добија у зависности од релативног положаја притискивача и матрице; када постоји одступање елемената пресе и алата од нормалног положаја; у великој мери на формирање дужине утиче величина хода притискивача, трење између материјала обратка и радних елемената алата, димензије и положај прелазних радијуса у отвору алата и др [3].

$$\Delta R = \Delta R_{\text{деф.}} - \Delta R_{\text{раст.}} + \Delta R_{\text{изв.}} - \Delta R_{\text{хл.}}$$

при чему је:

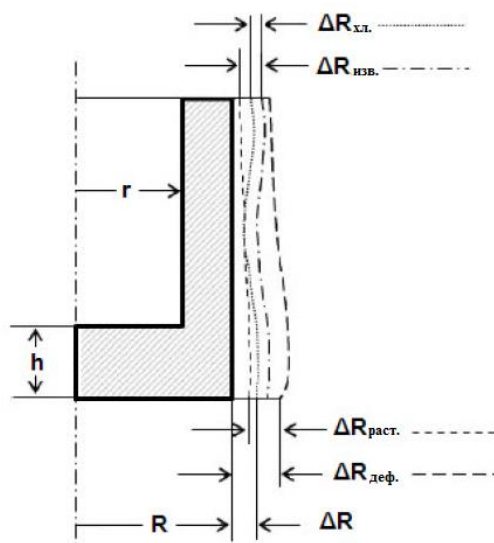
$\Delta R$  - коначна промена димензије спољашњег радијуса

$\Delta R_{\text{деф.}}$  - промена димензије при деформацији односно оптерећењу током процеса

$\Delta R_{\text{раст.}}$  – промена димензије при растеређењу дела

$\Delta R_{\text{изв.}}$  – промена димензије извађеног дела из алата

$\Delta R_{\text{хл.}}$  – промена димензије при хлађењу



Слика 3.2: Варијација димензије пречника дела израђеног процесом истискивања [3]

### 3.2 Утицајни фактори у *net-shape* обради

*Net-shape* обрада не представља нови вид производног процеса, већ унапређење процеса хладног запреминског обликовања метала. Циљ оваквог поступка јесте добијање готових делова спремних за уградњу (*net-shape*). У складу са тим, за разлику од уобичајених (конвенционалних) метода обраде, *net-shape* обрада поред већ усвојених метода моделирања процеса обухвата детаљнију и дубљу анализу самог процеса, односно ниједан фактор који може утицати на квалитет и тачност дела не сме бити занемарен, а све зарад постизања високог квалитета и тачности готових делова спремних за уградњу.

Утицајни фактори се могу сврстати у следеће групе [3]:

- **Фактори припремка**, који обухватају: варијације димензија припремка, напон течења материјала, деформабилност и ојачање материјала током процеса; квалитет површина и квалитет одсечене ивице припремка; хемијски састав материјала, претходна термичка обрада, итд;
- **Фактори алата**, у које спадају: конструкција алата и толеранције израде алата; хабање, монтажа, термо-механичке особине алата итд;
- **Фактори машине**: конструкција машине, кинематика, крутост, зазори и толеранције елемената вођења, степен аутоматизације итд;
- **Фактори технолошког поступка** које карактеришу: изабрана метода процеса, течење материјала, сила деформисања, као и брзина деформисања и степен деформације; начин и врста подмазивања, температура обратка и алата, број операција, фазе обликовања и прелазни облик дела између фаза;
- **Информациони менаџмент**: расподела и преглед информација, симултани инжињеринг, базе података, итд;

- **Људски ресурси** у смислу адекватних обуче за запослене који треба да прате трендове, развој и примену нових технологија;
- **Пројектовање и симулација процеса** је од кључног значаја за процену поузданости и сигурности изабраног модела, тачност решења, отклањање могућих грешки и пропуста, унапређење модела и др.

Приликом конструкције алата мора се водити рачуна о свим факторима који утичу на тачност процеса. Код прорачуна припремка, такође се мора водити рачуна о губицима услед термичке обраде. Ове толеранције обично износе стоти део милиметра. Вредности преднапрезања матрице итекако треба узети у обзир, јер се вредности ширења матрице у току процеса услед великих притисака крећу од стотих па чак и до десетих делова милиметра.

Еластична извијања алата и опреме за *net-shape* обраду која се јављају у току процеса такође утичу на могућност остваривања задатих толеранција. У многим случајевима, еластична извијања су мала и могу бити занемарена. Еластична повратност радног комада након растерећења је обично мала и занемарљива. На слици 3.3 приказан је алгоритам утицајних фактора од почетка до краја самог процеса, док је на слици 3.4 приказана шема утицаја одређених параметара карактеристичних за сваки период током процеса *net-shape* обраде [3].

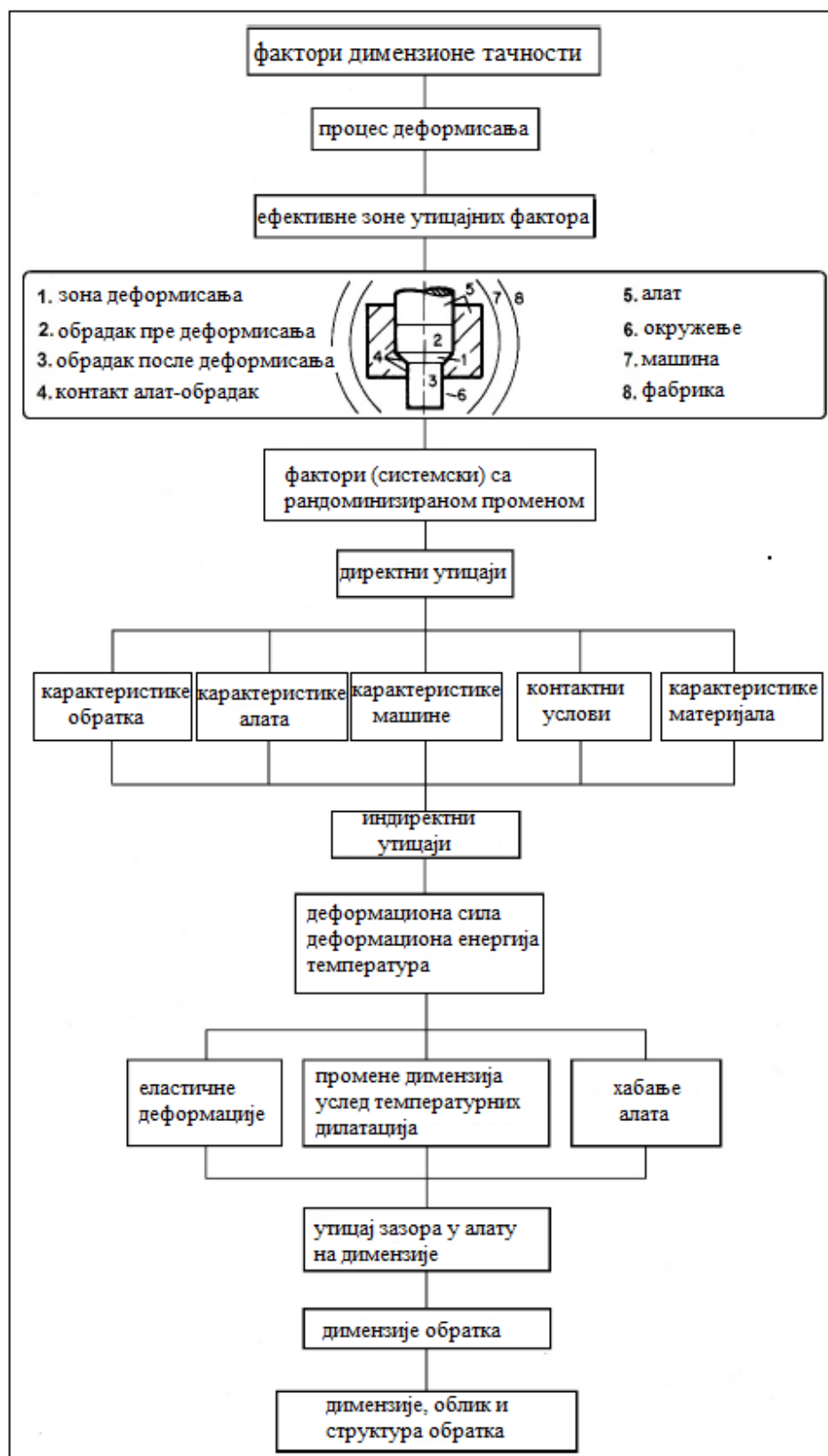
Деформабилност материјала је способност материјала да се пластично деформише без појаве пукотина или било каквог оштећења микроструктуре. Деформабилност материјала је битнији фактор код прецизног него код конвенционалног истискивања јер се за обезбеђивање веће тачности радног комада захтевају веће пластичне деформације. Вредности пластичних деформација могу бити веома велике само у појединим зонама. Шта више, деформабилност материјала се може смањити уколико се смањи температура материјала како би се постигла већа тачност обраде [3].

Процес *net-shape* обраде захтева прецизно израђене алате. Толеранције радног дела не могу бити уже од толеранције израде алата. У највећем броју случајева, због утицаја и других фактора, оне ће бити знатно шире. Квалитет израде алата зависи од коришћене методе за саму израду, док је након израде потребно детаљно прегледати алат, како не би дошло на самом почетку до грешке. Током радног века, тачност алата ће се смањити због хабања. Чак и минимално хабање алата може довести до великих одступања на радном комаду. Зато се мора узети у обзир цена замене или поправке алата приликом анализе да ли је овај поступак исплатив или не.

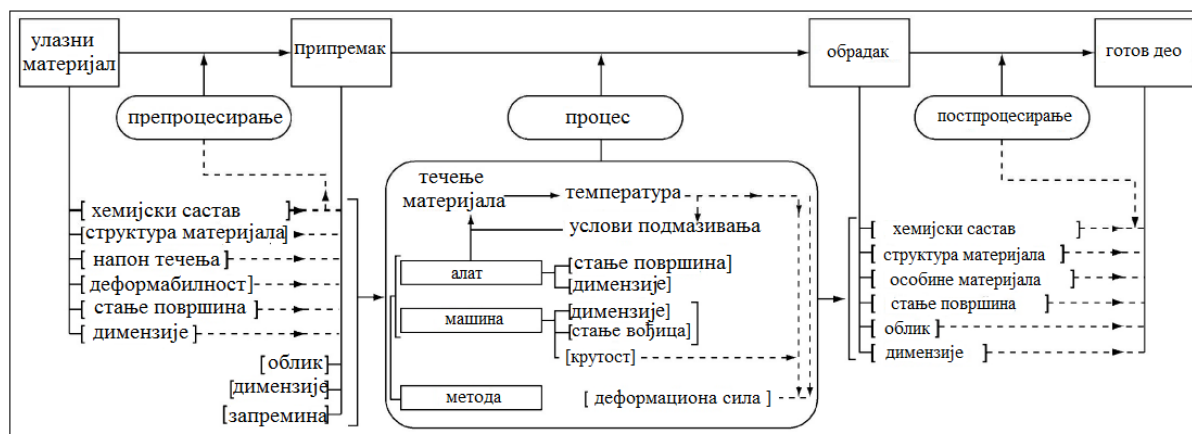
У случају *net-shape* обраде на једнопозиционим алатима припремак се добија одсецањем из шипке одговарајућег попречног пресека. Код обраде у вишепозиционим алатима припремак се добија као резултат претходних операција. У оба случаја, тачност припремка је од великог значаја за тачност финалног дела.

Код процеса *net-shape* обраде тачна запремина припремка има кључну улогу. Уколико је геометрија дела компликована, геометрија припремка мора бити одабрана тако да се обезбеди адекватан ток материјала током истискивања. Стога, *net-shape* обрада захтева прецизну припрему припремка. Припремак се добија одсецањем из шипке одговарајућег пречника, с тим да се мора водити рачуна о запремини припремка. У том случају, толеранције попречног пресека су диктиране методом обраде којом је шипка добијена, док су дужинске толеранције зависне од машине за одсецање. У појединим случајевима, оваквим приступом се не могу добити захтеване толеранције припремка. Тада се прибегава накнадној машинској обради самог припремка, што додатно поскупљује сам процес. Једно од решења јесте да се припремци одсецају из хладно

вучене шипке. Запремина припремка се може контролисати и мерењем тежине чиме се могу одстранити припремци који превазилазе дозвољене границе [3].



Слика 3.3: Алгоритам утицајних фактора на димензиону тачност готових делова применом net-shape обраде [3]



**Слика 3.4:** Шема утицаја одређених параметара карактеристичних за сваки период процеса *net-shape* обраде [3]

Површински квалитет припремка има такође битан утицај јер од њега може зависити и квалитет површине готовог дела. У појединим случајевима је битно исконтролисати хемијски састав као и микроструктуру полазног материјала. Микроструктура може да утиче на само течење материјала. Код *net-shape* обрада захтева се веома тачан прорачун запремине припремка. Уколико је запремина припремка већа него запремина гравуре алата, може доћи до превеликих одступања димензија готовг комада. С друге стране, уколико је запремина припремка мања, у одређеним сегментима може доћи до превелике деформације и оштећења радног комада а и алата, због недостатка материјала.

Од свих параметара битних за правилно извођење процеса *net-shape* обраде, најтеже је водити рачуна о утицају контактнoг трења, односно подмазивању. Такође, подмазивање се класификује као фактор који има највећи утицај на тачно извођење процеса. Подмазивање утиче на силу истискивања, униформност микроструктуре и површински квалитет дела. На габаритне димезије дела може утицати и дебљина слоја мазива нанетог на површину радног комада, јер ће габаритне димезије дела бити мање од унутрашњих димензија шупљине алата за дебљину слоја мазива. Дебљина слоја мазива у току процеса обраде није једнака на свим деловима контактне површине, што такође може проузроковати површинска одступања од задатих толеранзија. Мазиво је потребно нанети прецизно и подједнако. Нагомилавање средства за подмазивање у појединим зонама контактних површина такође може изазвати грешке у току процеса *net-shape* обраде. [3]

У пракси је узимање у обзир свих ових фактора изузетно компликовано, нарочито за делове сложене геометрије. Из тог разлога, у овом раду се приказује начини савременог пројектовања технологија који на бржи и јефтинији начин могу помоћи да се унапреде постојеће методе и да се одговори на све веће захтеве савремене индустрије.

### 3.3 Утицајни фактори на прецизност резултата *FEM* анализе

Данас постоји велики број софтвера за анализу процеса методом коначних елемената и већина њих има различите провере улазних података. Већиња њих има аутоматизовани процес припреме података (аутоматско предпроцесирање) чиме се знатно убрзава процес припреме симулације и поваћава тачности улазних података. Иако су и на тај

начин *FEM* софтвери високо аутоматизовани, постоји и даље могућност да се проузрокују грешке које утичу на тачност добијених резултата.

Грешке које се могу појавити могу се сврстати у две групе: грешке у прецизности резултата и грешке у симулацији. Грешка у прецизности резултата подразумева разлику у добијеним вредностима методом коначних елемената и стварних вредности у реалном процесу. Ову грешку некада није могуће тачно одредити, чак ни мерењем у реалним условима, јер и сам поступак мерења има своје грешке. Настанак грешке у симулацији процеса може да проузрокује човек, програм или рачунар, а последица може бити прекид извршења програма или добијање неадекватних симулационих резултата. Према томе се ове грешке, могу поделити на: грешке аналитичара, грешке програма и грешке рачунара.

Највећи извор потенцијалних грешака јесте аналитичар који може да начини свесне или несвесне грешке. Без обзира да ли је узрок сам аналитичар, програм или рачунар, свесне грешке настају са знањем аналитичара да постоји могућност појаве грешке али њену процену утицаја може извршити само на основу искуства. Разлог појаве оваквих грешака је немогућност потпуно реалног моделирања и симулација процеса због сложености или то може онемогућити сам програм због ограничених могућности. У односу на искуство корисника, неке свесне грешке се и могу компензовати на одређене начине. Ипак, много опасније су несвесне грешке, које могу настати из било ког разлога али аналитичар није свестан да ће оне уопште настати. Без обзира на величину грешке резултата и њен утицај, аналитичар ће тумачити резултате као да су тачне. С обзиром да се анализа неке структуре у неком од савремених софтвера може поделити на неколико фаза као што су: припрема анализе, унос података, прорачун и интерпретација резултата, самим тим је и свака од ових фаза потенцијални извор одређених грешака [4].

### 3.3.1 Грешке припреме анализе

Грешке у процесу припреме анализе не зависе од аналитичара, већ зависе од карактеристика, могућности и квалитета програма којим ће се вршити симулација. У фази припремне анализе аналитичар апроксимира реалну структуру моделом који садржи само релевантне делове структуре. Овакав модел се касније дискретизује низом коначних елемената који формирају мрежу. Модел при томе треба добро да апроксимира облик, геометрију и физичке карактеристике структуре, као и граничне и почетне услове. Сходно томе, грешке које се могу ту појавити су грешке идеализације и грешке дискретизације [4].

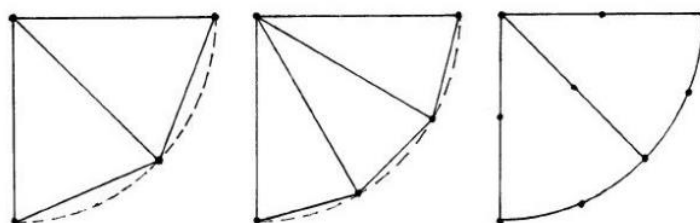
#### Грешке идеализације

Грешке идеализације карактеристичне су за сложене реалне структуре, јер није могуће у потпуности пресликати такву структуру и њено окружење на модел за симулацију. Грешке идеализације се могу поделити на:

- грешке апроксимације облика структуре,
- грешке апроксимације граничних услова,
- грешке апроксимације почетних услова,
- грешке апроксимације карактеристика материјала.

У случају сложених облика, тешко је у потпуности осликати модел коначним елементима као што је реални и на тај начин настају грешке апроксимације облика.

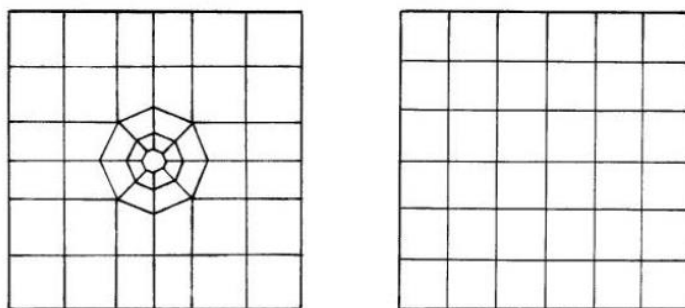
Линеарним елементима је теже пресликати сложене облике и неправилне површине. Коришћењем већег броја елемената мањих димензија, могуће је побољшати апроксимацију, али грешка још увек постоји. На слици 3.5 приказан је пример апроксимације четвртине круга линеарним коначним елементима.



**Слика 3.5:** Грешка апроксимације облика структуре: а) са два линеарна елемента; б) са три линеарна елемента; в) са два изопараметарска елемента [4]

Коришћењем изопараметарских коначних елемената (слика 3.5в)) могуће је потпуно избећи ову грешку али треба имати у виду оптерећење процеса анализе и време прорачуна.

Проблем апроксимације облика такође могу правити и мали отвори, испусти, прелази итд. који се могу налазити на посматаној структури која је у односу на њих већих димензија. За овакве детаље такође је потребан већи број коначних елемената сложенијих облика, што такође „поскупљује“ анализу. Оваква места су такође и извори великих локалних концентрација напона, која додатно може правити проблеме, па чак и довести до тога да није могуће спровести анализу до краја. Уколико то захтеви и технички услови дозвољавају, треба елиминисати овакве детаље. Пример оваког проблема приказан је на слици 3.6. Може се уочити да је модел 3.6а) знатно сложенији у погледу апроксимације од модела 3.6б), код којег је отвор занемарен.



**Слика 3.6:** Апроксимација облика са и без отвора [4]

### Грешке дискретизације

Као што је већ поменуто, дискретизација је дељење модела структуре, који има бесконачан број степена слободe, на дискретизован модел сачињен од одређеног броја коначних елемената, који има коначни број степена слободe. У процесу дискретизације потребно је:

- извршити избор врсте коначних елемената којим ће се вршити дискретизација;
- одредити величину и облик појединих елемената, односно положај чворова;
- извршити нумерацију елемената и чворова.

Први корак у дискретизацији посматраног модела је избор врсте коначних елемената којим ће се извршити дискретизација. Најчешће се мрежа састоји од више различитих

врста коначних елемената. Избор коначних елемената зависи од димензионалности проблема (линијски, равански, осносиметрични или запремински) и од геометријског облика структуре. Грешке које се могу јавити у овој фази анализе јесу комбиновање елемената различите врсте (нпр. осносиметрични и запремински) и изабрати елемент који не одговара облику структуре (нпр. примена запреминских елемената уместо танке љуске за дискретизацију танкозидних структура).

Грешка избора типа, односно врсте коначног елемента, одражава се и на грешку апроксимације променљиве поља, јер избором коначног елемента аутоматски се бира и интерполациона функција. Такође је већ поменуто да се променљива поља у коначном елементу описује помоћу интерполационих функција, које су најчешће полиноми. У зависности од врсте елемента, а самим тим и броја чворова у елементу, зависи и степен полинома. Боља описивање променљиве поља постиже се вишим степеном полинома али самим тим анализа је скупља јер је већи број степени слободе које треба прорачунавати. Исто тако се са коначним елементима који имају нижи степен полинома доводи и до веће грешке, као на пример при коришћењу исте густине мреже али са линеарном интерполационом функцијом. Из тог разлога када се помиње фина или груба мрежа, не треба само узимати у обзир густину мреже елемената него и степен полинома интерполационе функције [4].

### 3.3.2 Грешке уноса података

Припрема података може да се врши ручно, полуаутоматски или аутоматски. С обзиром да се ручна припрема података у данашње време уопште не користи, јер је склона великом броју грешака, које могу бити: грешке у прорачуну координата чворова, грешке у нумерацији чворова и елемената, грешке у дефинисању топологије елемената, грешка у дефинисању осталих података (оптерећење, гранични услови, материјал), грешке при уносу података (лапсуси) и грешке заокруживања настале ограниченим улазним форматом, овде ће се само посматрати грешке које могу настати при полуаутоматској или аутоматској припреми података, а која је данас најчешће у употреби. Полуаутоматски и аутоматски начини припреме података извршава препроцесор, помоћу којег се дефинише облик, геометрија структуре, оптерећење и гранични услови. Уколико је модел претходно добро припремљен, грешке које се могу појавити при оваквом начину припреме података су: грешке при уносу података (лапсуси) и грешке заокруживања настале ограничењем улазног формата [4].

При аутоматском уносу података, уколико се мрежа коначних елемената формира у неком другом CAD програму, може доћи до грешака при преносу података из CAD формата. Када се заврши припрема података, стартује се програм за симулацију. У овој фази аналитичар нема више никаквог утицаја, тако да грешке проузроковане од стране аналитичара нису више у оптицају. Грешке које могу настати у овој фази су грешке програма и грешке рачунара [4].

### Грешке програма

Програми за анализу применом методе коначних елемената засновани су на кодираним алгоритмима у неким од програмских језика и као такви, програми не генеришу само грешке које проистичу из природе методе коначних елемената, већ може проузроковати и грешке које се могу поделити на: грешке кодирања и грешке методе.

Грешке кодирања су последица пропуста у фази програмирања или имплементирања програма на одређеном рачунару. Овакве грешке су честе код нових издања програма, али се већина њих може открити у фази тестирања програма. Грешке кодирања могу

бити: лапсуси (bugs) и грешке инсталације, које најчешће потичу због различите интерпретације.

Грешке методе настају због апроксимативне природе методе коначних елемената. Мада су евидентна стална побољшања ове методе, грешке настале због природе методе и даље могу битно да утичу на тачност резултата. Грешке методе се могу поделити на [4]:

- грешке формулације методе коначних елемената
- грешке у интеграцији дистрибуисаних оптерећења (линијских, површинских и запреминских)
- грешке интерполације нелинеарних карактеристика материјала
- грешке интеграције нелинеарних карактеристика
- грешке решавања (посебно при нестационарним анализама када је процес решавања итеративан).

### Грешке рачунара

При обради реалних бројева долази до заокруживања бројева, односно одсецање вишка цифара, због тога што рачунар користи одређени меморијски простор којим је дефинисан број значајних цифара неког броја (нпр. седам). То одсецање није опасно све док се не ради о сабирању и одузимању обројева са великом разликом у реду величина, где се може изазвати слабоусловљеност система због заокруживања цифара. Грешка изазвана слабоусловљеношћу система може да буде врло велика и карактеристична је за моделе код којих су елементи врло мали или постоји велика разлика у димензијама елемената.

### 3.3.2 Грешке интерпретације резултата

О грешкама у резултату се може говорити и када се анализа изврши коректно, јер се под резултатом у крајњем случају подразумева аналитичарево виђење резултата. Треба имати у виду да постоји разлика када аналитичар интерпретира резултате и када то ради пост-процесор. С обзиром да се у савременој техници све више тежи да се избегне утицај људског фактора на настанак грешака, тако су и софтвери за *FEM* опремљени пост-процесорима, који смањују време анализе резултата и олакшавају израду извештаја и који дају праву слику о пољима променљивих. Међутим, такође и при визуелној интерпретацији резултата може доћи до грешака, због несавршености графичке опреме (нпр. коначан број боја на терминалу или плотеру) и узорковања величина поља у погрешним тачкама. [4]

### 3.4 План нумеричких експеримената

План нумеричких експеримената је дизајниран на такав начин да прикаже могући утицај грешака, које проузрукује непрецизност машине која се користи за израду алата, на прецизност и квалитет израде готових комада, технологијом хладног истискивања.

Општа прецизност машине се оцењује кроз вредности циркуларности и позиционе толеранције (погледати поглавље 6). Разматране су грешке које је *QC10 BALLBAR* идентификовао током експерименталног тестирања машине у студији случаја.

Као пример утицајних грешака узето је тестирање CNC глодалице *Mikron VCP 1350*, које је показало укупне грешке у два референта параметра тачности машине, и то:

- грешка позиционе толеранције: 104.8  $\mu\text{m}$
- грешка циркуларности: 90.2  $\mu\text{m}$

Изабране вредности грешака су највеће вредности грешака добијене током тестирања *QC10 BALLBAR* уређајем.

### 3.4.1 Експеримент 1

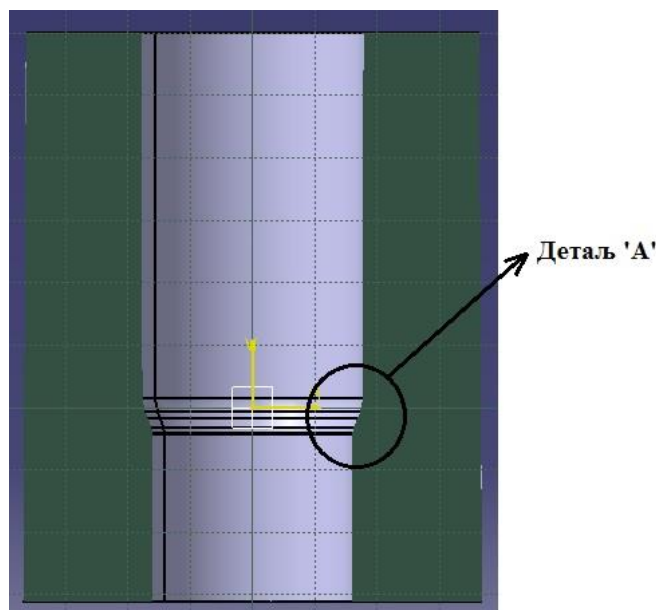
Први експеримент спроводи се са матрицом која је моделирана тако да симулира грешку позиционе толеранције добијене приликом израде на CNC машини. Грешка на моделираном алату, тј матрици, приказана је на сликама 3.7 и 3.8. Моделирана грешка има вредност 0.1mm.

У овом испитивању полази се од претпоставке да грешка позиционе толеранције може негативно утицати на толеранцију димензије истиснутих висина горњег и доњег дела на радном комаду. Такође, ова грешка може утицати и на позицију прелаза са већег пречника на мањи, што може проузроковати проблеме при монтажи, уколико је та позиција уско толерисана.

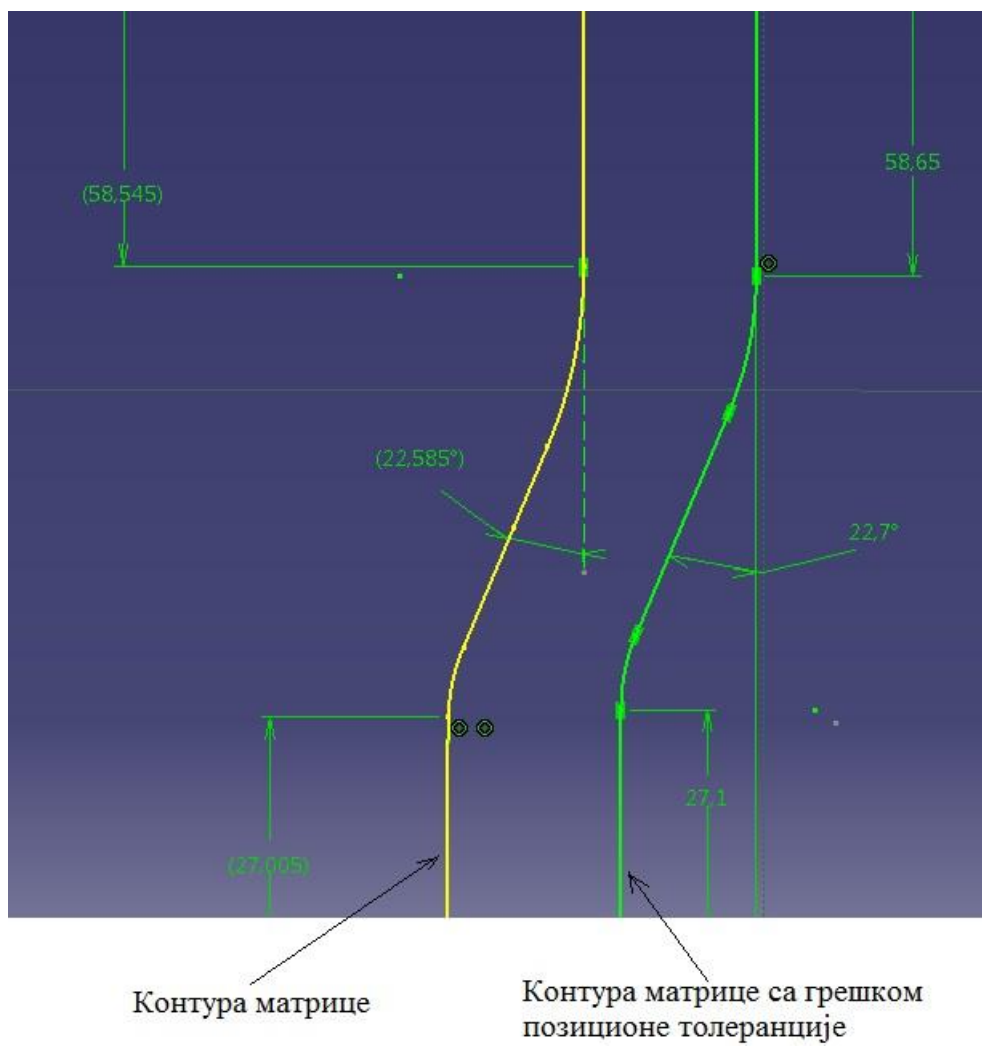
Овај део испитивања приказује утицај свих неправилности CNC машине које проузрокују грешку позиционе толеранције, а која ће у раду бити детаљно објашњена.

### 3.4.2 Експеримент 2

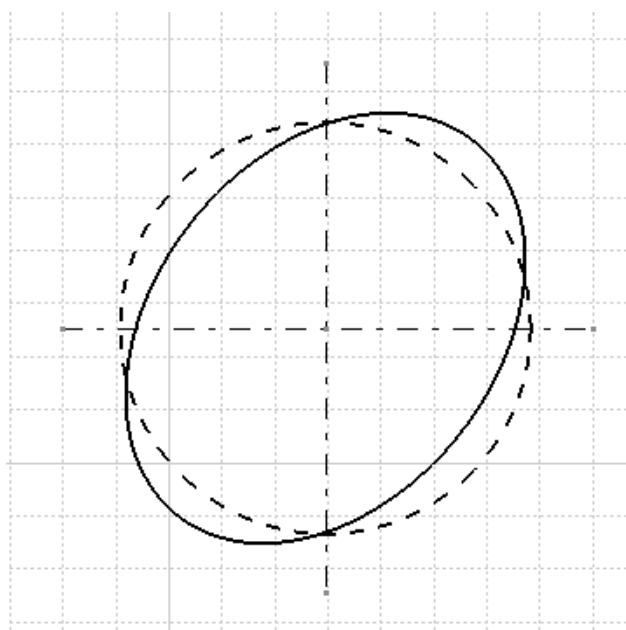
У овом експерименту се врши провера утицаја грешке циркуларности, при изради отвора у алтату, на финалне димензије радног предмета. Шема грешке приказана је на слици 3.9, а моделирана грешка приказана је на сликама 3.10, 3.11 и 3.12. Моделирана грешка има вредност 0.1 mm. Овај део испитивања приказује утицај свих неправилности CNC машине које проузрокују грешку циркуларности.



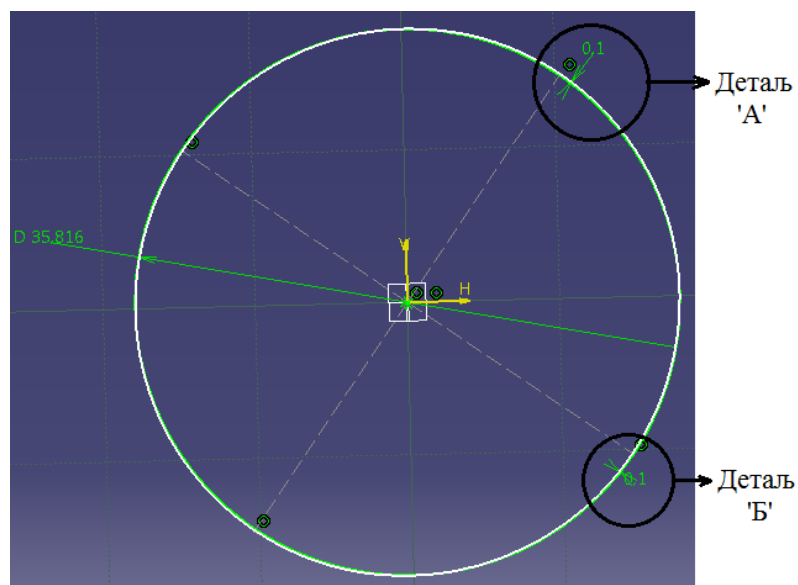
Слика 3.7: Матрица



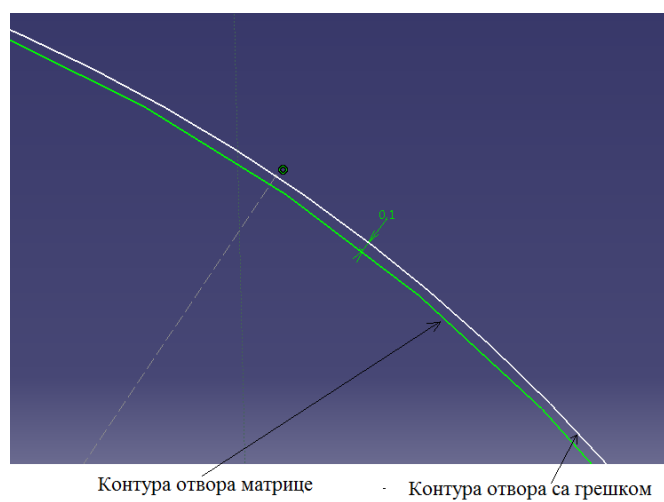
**Слика 3.8:** *Моделирана грешка матрице*



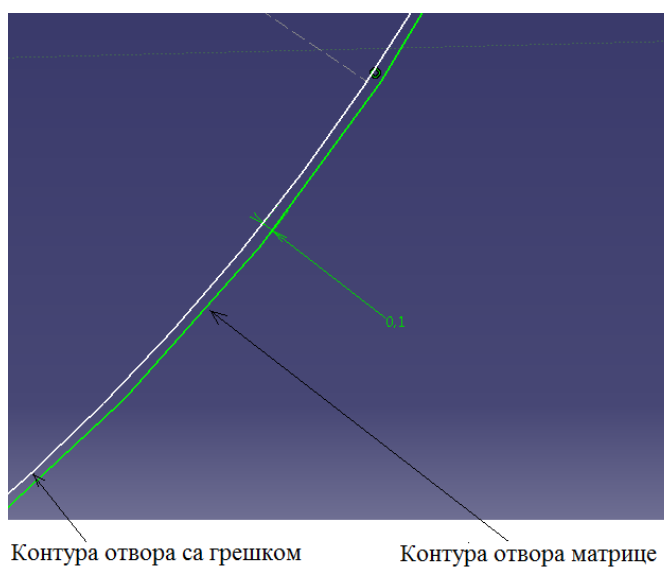
**Слика 3.9:** *Приказ грешке циркуларности*



**Слика 3.10:** Моделирана грешка циркуларности



**Слика 3.11:** Детаљ 'А'



**Слика 3.12:** Детаљ 'Б'

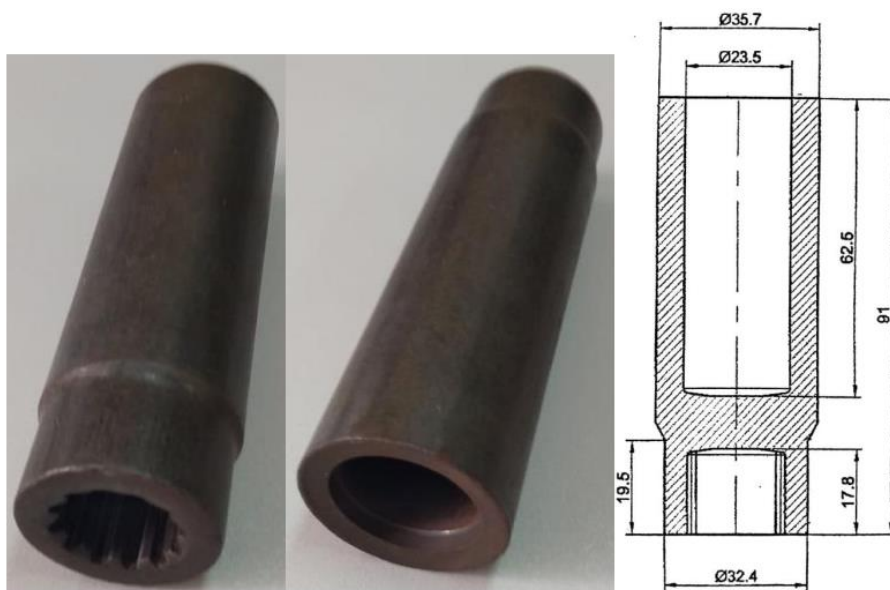
### 3.4.3 Експеримент 3

Трећи експеримент се односи на приказ утицаја храпавости површине алата услед лоше обрађених површина машинском обрадом, а коју *QC10 BALLBAR* уређај може да идентификује. Да би се приказао утицај поменутих неправилности, не врши се никаква физичка промена на алату као што је за прва два експеримента случај, већ се ови утицаји манифестују преко параметра контактеног трења у симулацији процеса. Прва вредност фактора трења је према пројектованим вредностима технологије и износи  $m=0.12$ , док друга вредност фактора трења представља вредност при обради уколико је лош квалитет обрађене површине алата и износи  $m=0.18$ .

## 4. Анализа резултата нумеричких симулација

### 4.1 Модел нумеричке симулације

Модел за нумеричке симулације, који је коришћен за план експеримената у овом раду, заснива се на технологији комбинованог хладног истискивања радног комада приказаног на слици 4.1. Модел симулације обраде приказаног дела узет је из завршног рада [3], а чини саставни део производног програма компаније “Слобода” из Чачка. У наведеном завршном раду представљена је технологија са оптималним параметрима за израду оваквог дела, а у овом раду је та оптимална технологија преко нумеричких симулација коришћена за нумеричке експерименте.



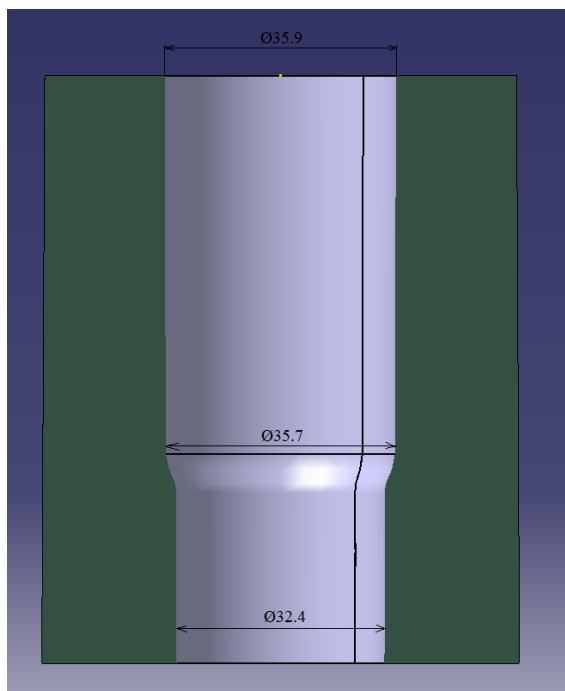
Слика 4.1: Облик и димензије готовог комада [3]

Процес израде се састоји из три операције. У првој операцији врши се сабијање припремка и почетно утискивање ради дефинисања почетног положаја притискивача у другој операцији. У другој операцији врши се супротносмерно истискивање горњег дела обратка, док се у трећој операцији врши комбиновано истискивање, при коме треба добити финални облик и димензије дела. Такође, за сваку операцију потребно је извршити преднапрезање матрице.

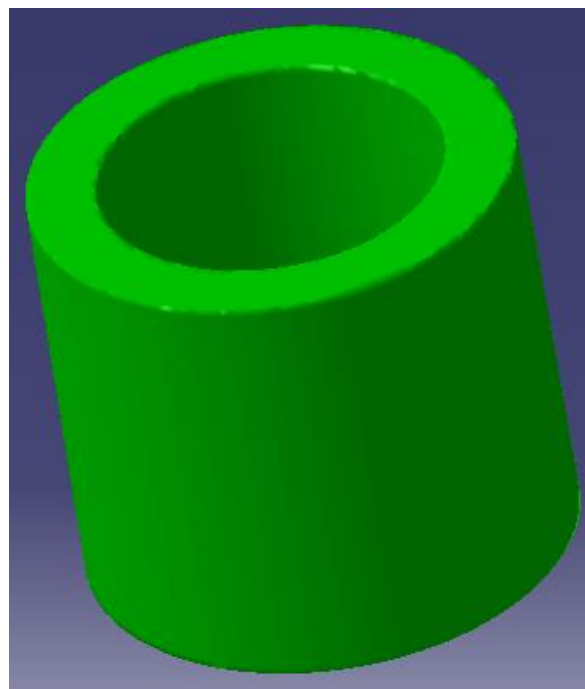
Алат за комбиновано истискивање састоји се од матрице, која је ојачана са два ојачавајућа прстена. За трећу операцију се у доњем делу матрице убацује зупчасти алат који служи за израду унутрашњег озубљења на обратку, што се може видети на слици 4.1. На наредним сликама приказана је геометрија алата.

Са слике 4.2 се може видети да је унутрашњи део матрице, израђен под веома благим конусом, ради олакшања истицања материјала, а и вађења дела из матрице. У табели 4.1 приказани су остали подаци потребни за нумеричку симулацију.

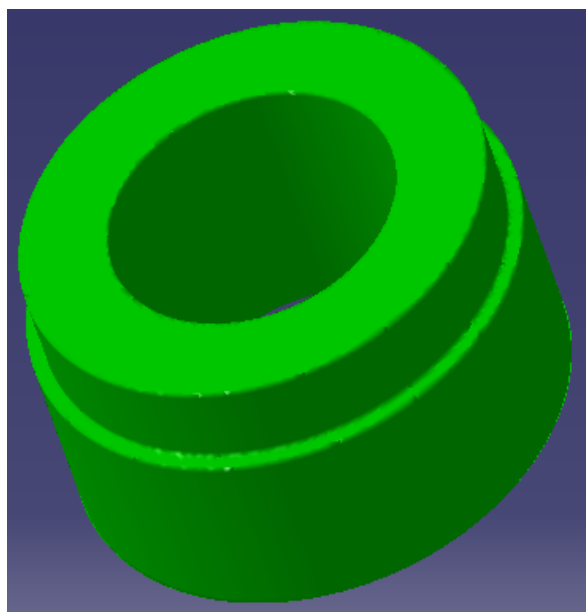
Притискивач, дно матрице и зупчасти алат су третирани као крута тела и за њих није формирана мрежа коначних елемената. Матрица и прстенови су третирани као деформабилни алати и њихова напрезања и понашање током процеса обраде се истовремено прате током самог процеса обликовања дела. На слици 4.6 приказана је геометрија алата и припремка, позиционирани и постављени у одговарајући положај, спремни за почетак симулације процеса, у simufact едитору [3].



Слика 4.2: CAD модел матрице у пресеку [3]



Слика 4.3: CAD модел првог ојачавајућег прстена [3]



Слика 4.4: CAD модел другог ојачавајућег прстена [3]



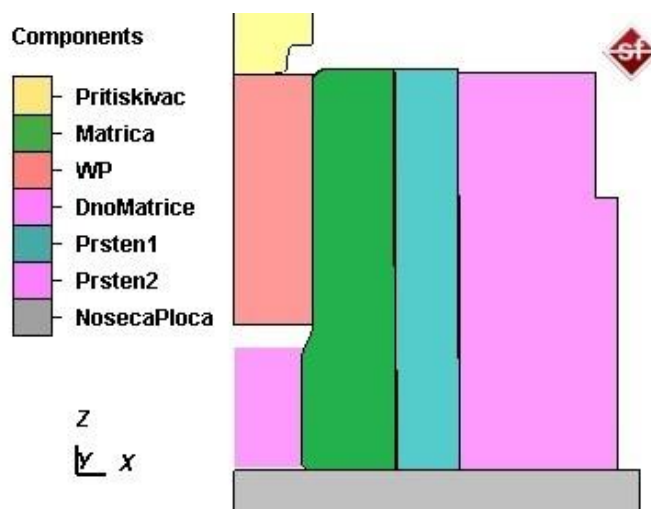
Слика 4.5: CAD модел зупчастог алата [3]

Као што је већ претходно поменуто да у овако сложеним анализама напрезања алата, није довољно као карактеристике материјала од којег је израђен алат, унети само обичне податке о кривим течења материја, јер се на тај начин неће реално описати понашање материјала у току симулације. Треба узети у обзир, да је материјал, иако се има крива течења, претрпео значајне измене у току термичке обраде алата у циљу побољшања механичких карактеристика (површинска тврдоћа и сл.). Према томе, у *Simufact.forming* софтверу, та чињеница је узета у обзир, тако да постоје у бази података о материјалима подаци и математички опис понашања таквих материјала у процесима хладног истискивања. Стога је еластично понашање матрица и прстенова описано следећим

материјалима из *Simufact* базе података материјала, према препоруци датој у литератури [10]:

- материјал матрице HM560
- материјал првог ојачавајућег прстена ASP
- материјал другог ојачавајућег прстена X37CrMoV5-1
- материјал припремка 16MnCr5

Контактно трење између обратка и алата описано је законом константног смичућег напона, па су за услове подмазивања поступком фосфатирања.



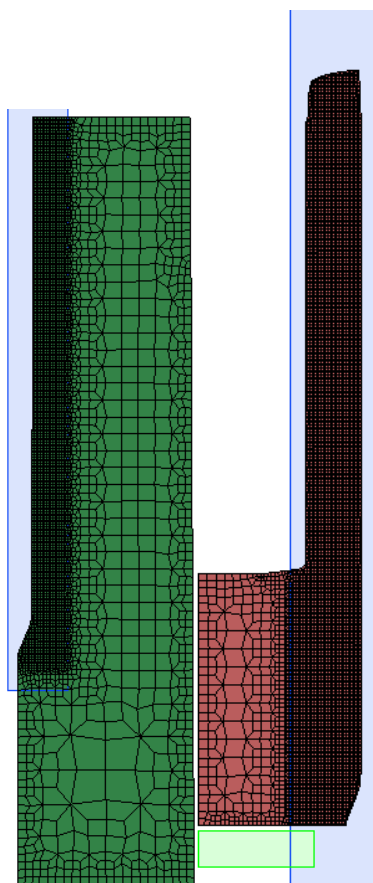
Слика 4.6: Положај монтираног алата и положај припремка у алату [3]

Табела 4.1: Улазни подаци [3]

|                          |                                                                   |                                                                                                                          |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Материјал обратка        | Č4120 (17Cr3)                                                     |                                                                                                                          |
| Материјал матрице        | Č7680 (HS6-5-2)                                                   | 61 – 63 HRc                                                                                                              |
| Материјал првог прстена  | Č5742 (56NiCrMoV7)                                                | 49 – 51 HRc                                                                                                              |
| Материјал другог прстена | Č5742 (56NiCrMoV7)                                                | 43 – 48 HRc                                                                                                              |
| Услови подмазивања       | Фосфатирање површине обратка, подмазивање за услове хладне обраде | $m = 0,12$ ( одговара коефицијенту трења $\mu = 0.07$ ),<br>$m = 0.6$ ( када су међусобно у контакту деформабилни алати) |
| Машина                   | Вишепозициона преса                                               |                                                                                                                          |
| Брзина деформације       | 10mm/s                                                            |                                                                                                                          |
| Димензије припремка      | Ø35.5mm x 57mm                                                    |                                                                                                                          |

Програм *Simufact.forming* намењен за нумеричке симулације и анализу процеса запреминског обликовања има модул за аутоматско генерисање мреже коначних елемената. Мрежа радног комада креира се опцијом *Mesh* где се дефинише тип мреже, број, величина и тип елемената мреже. Величина елемената мреже износи 1mm, а број

елемената програм прорачунава аутоматски, у зависности од запремине дела за које се креира мрежа. Тип модула за аутоматско генерисање мреже, (*Mesher*) је *Overlay Hex*, док је за тип елемената одређен *Hexahedral*. Регенерација мреже (*Remeshing*) је неопходна када се мрежа у току симулације толико деформише да даља анализа не може да се изведе без грешака. У овом случају, *Remeshing* је дефинисан преко *refinement box-a*, где је координатама задато у којим зонама се изводи регенерација мреже, јер се у тим зонама јављају највеће деформације или проблеми у симулацији. Приказ формиране мреже и *refinement box-a*, на матрици и обратку приказан је на слици 4.7.



Слика 4.7: Креирана мрежа и *refinement box*

Треба нагласити да је за испитивање утицаја грешке 'позиционе толеранције' могуће користити 2D симулацију ради скраћења времена прорачуна и добијања резултата, с обзиром да се грешка одражава у правцу осе радног комада. За испитивања грешке циркуларности, неопходно је радити 3D симулацију, како би било могуће остварити приказ утицајне грешке.

## 4.2 Резултати и анализа нумеричких експеримената

### 4.2.1 Резултати експеримента 1

За први експеримент, где се проверава утицај грешке 'позиционе толеранције' на финалне димензије готовог комада, користи се само трећа операција приказаног модела технологије, јер се грешка односи на позицију прелаза са већег на мањи

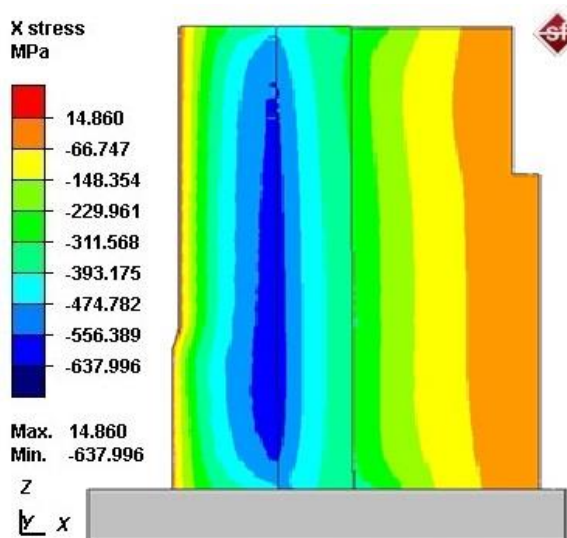
пречник, који долази до изражаја тек у трећој операцији. У овом делу испитивања посматра се да ли грешка у алату (слика 3.8) утиче на:

- расподелу радијалног напона у алату приликом преднапрезања матрице;
- расподелу радијалног напона у алату и обратку у току треће операције;
- расподелу ефективног напона, као и на финалне димензије готовог дела, што ће се утврдити мерењем 3D виртуелног обратка из софтвера *Simufact.forming* коришћењем софтвера *CATIA*.

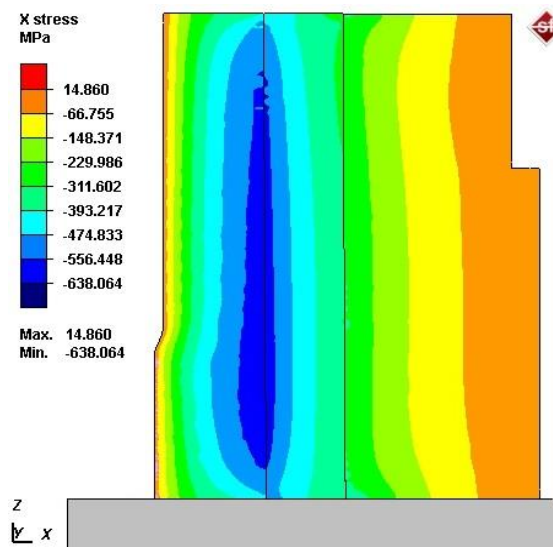
Да би се измерио виртуелни обрадак, довољно је узети узорак од једне четвртине реалног обратка, самим тим се такође смањује време прорачуна. Да би се лакше приказали, добијени резултати нумеричких експеримената биће упоређивани и анализирани са нумеричким резултатима оптималне технологије добијених у завршном раду [3].

На слици 4.8 приказане су добијене вредности преднапрезања матрице за трећу операцију у поређењу са вредностима преднапрезања оптималне технологије, слика 4.9, као и радијални напон (слике 4.10 и 4.11) и ефективни напон (слике 4.12 и 4.13) у трећој операцији.

На сликама 4.14 и 4.15 представљене су финалне димензије готовог виртуелног обратка у поређењу са готовим обратком добијеним са оптималним нумеричким параметрима приказане технологије.

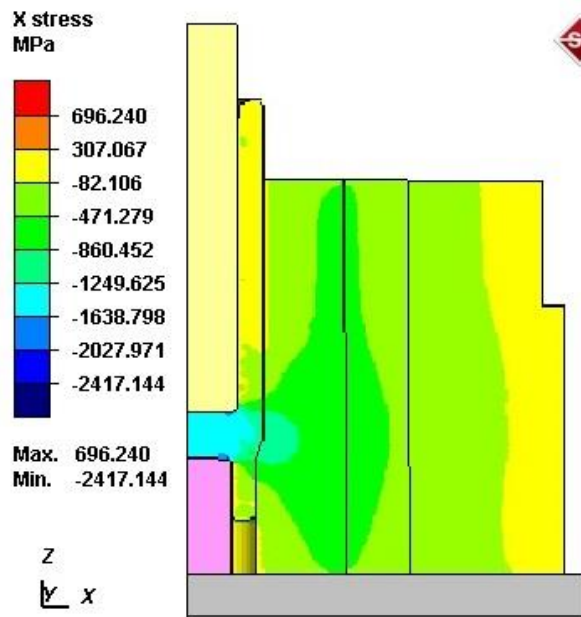


Слика 4.8: Радијални напон преднапрезања матрице за трећу операцију (грешка поз. толеранција)

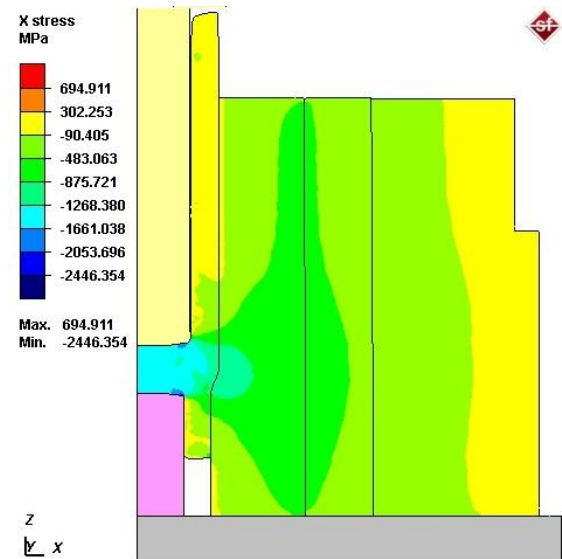


Слика 4.9: Радијални напон преднапрезања матрице за трећу операцију (оптимална технологија)

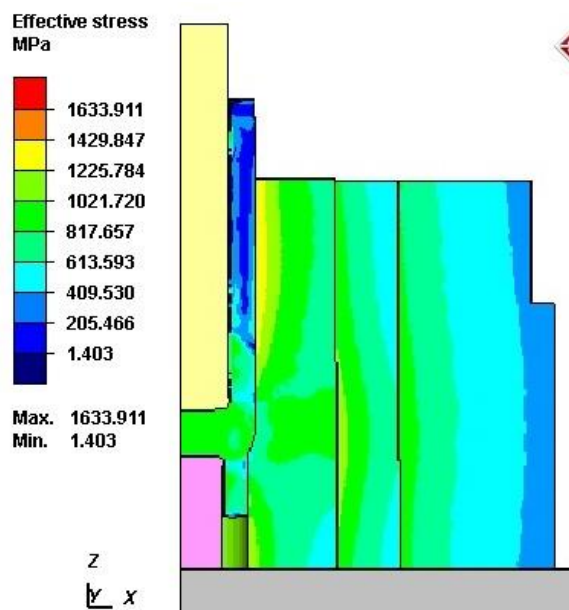
Као што се може видети на претходно приказаним сликама, вредности радијалног напона преднапрезања, као и радијалног и ефективног напона у току обраде су приближно исте, што значи да овакав тип грешке израде алата неће изазвати велике промене расподеле напона у алату и обратку током процеса обраде. Уколико се ради о алатима који имају неки сложенији облик гравуре који представља критичну зону која може изазвати појаву локалних напона великих вредности у тим зонама, мала грешка израде може изазвати повећање локалних напона у тим зонама, што за овај пример није случај.



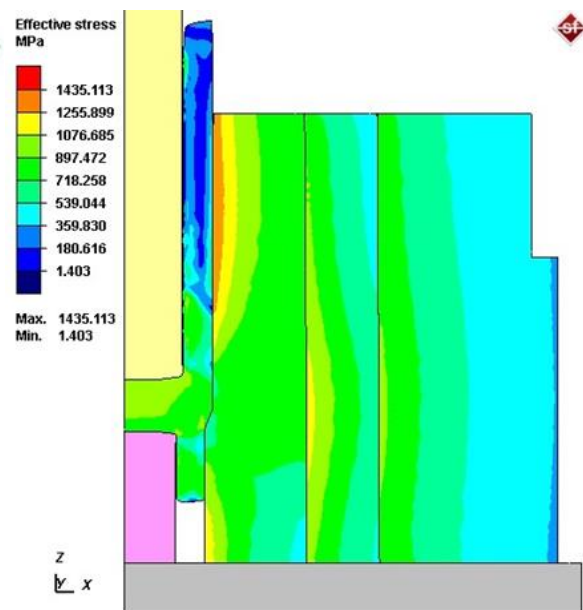
Слика 4.10: Радијални напон у трећој операцији обраде (грешка позициона толеранција)



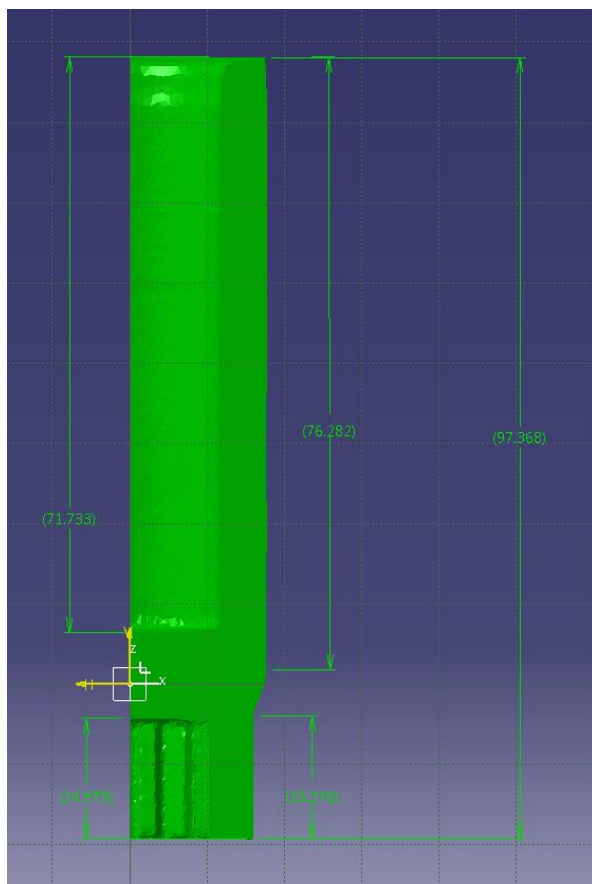
Слика 4.11: Радијални напон у трећој операцији обраде (оптимална технологија)



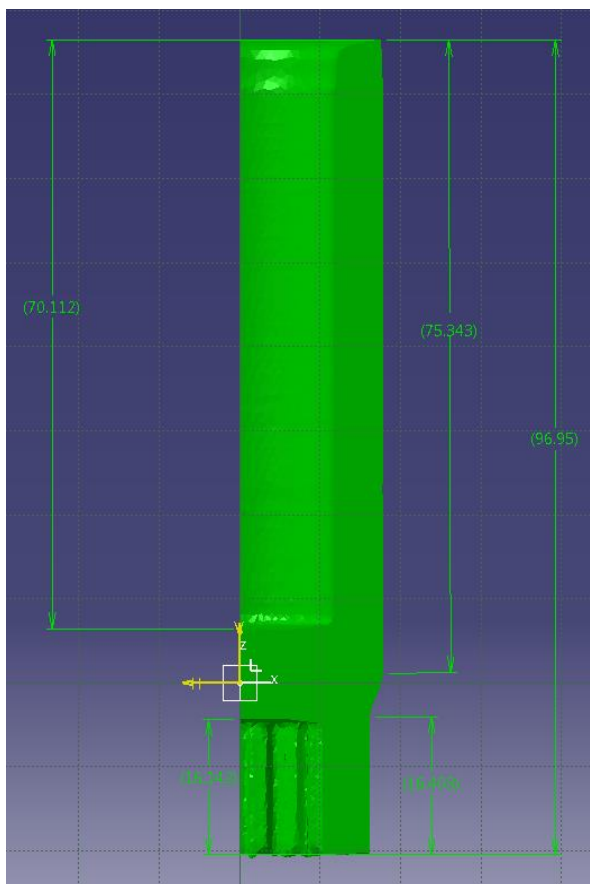
Слика 4.12: Ефективни напон у трећој операцији обраде (грешка позициона толеранција)



Слика 4.13: Ефективни напон у трећој операцији обраде (оптимална технологија)



**Слика 4.14:** Димензије обратка (грешка позициона толеранција)



**Слика 4.15:** Димензије обратка (оптимална технологија)

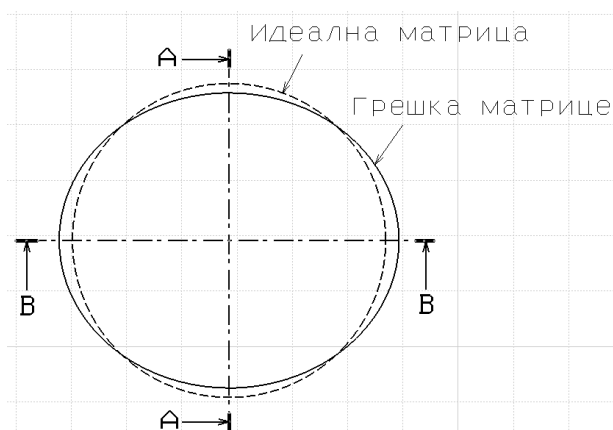
Међутим, упоређујући слике 4.14 и 4.15 могу се уочити велике промене у финалним димензијама готовог дела. Мале грешке при изради алата за технологије *net-shape* обраде, које се мере у десетим и стотим деловима милиметара, не смеју бити прихваћене јер могу изазвати велике промене у финалним димензијама и отежати њихову контролу (у овом случају контрола истиснуте висине дела) при изради готових делова спремних за уградњу. Уочава се да је грешка вредности 0.1 mm изазвала несразмерне промене у истиснутој висини дела, као и његове димензије дуж сопствене осе, до чак неколико милиметара.

#### 4.2.2 Резултати експеримента 2

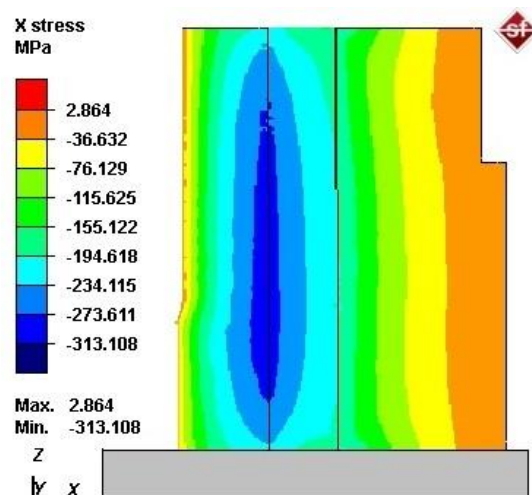
У овом експерименту, да би се приказао утицај грешке циркуларности на финалне димензије готовог комада, а и на саму технологију, користи се друга и трећа операција приказаног модела технологије, јер се грешка одражава на циркуларност готовог дела, код којег се пречник формира већ у другој операцији обраде. У овом делу испитивања посматра се да ли грешка у алату (слика 3.9) утиче на:

- расподелу радијалног напона у алату приликом преднапрезања матрице;
- расподелу радијалног напона у алату и обратку у току друге и треће операције;
- расподелу ефективног напона, као и на финалне димензије готовог дела, што ће се утврдити мерењем 3D обратка као и у претходном случају.

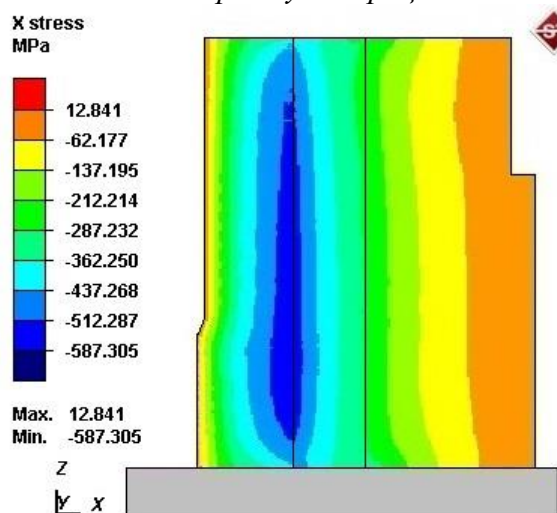
Да би се приказао утицај грешке на преднапрезање матрице, посматра се радијални напон у два пресека у односу на грешку матрице, као што је приказано на слици 4.16.



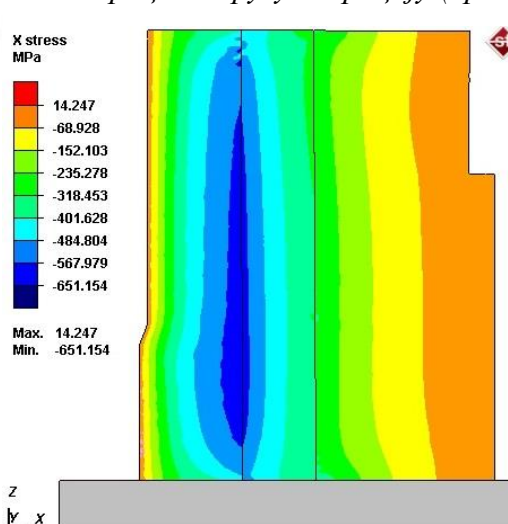
Слика 4.16: Посматрани пресеци у односу на грешку матрице



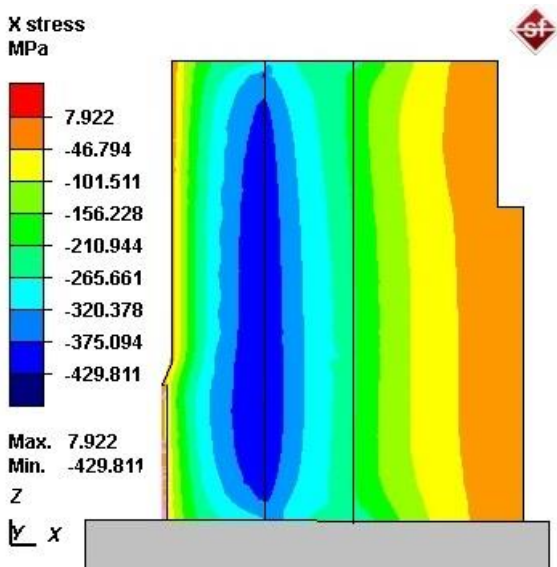
Слика 4.17: Радијални напон преднапрезања матрице за другу операцију (пресек A-A)



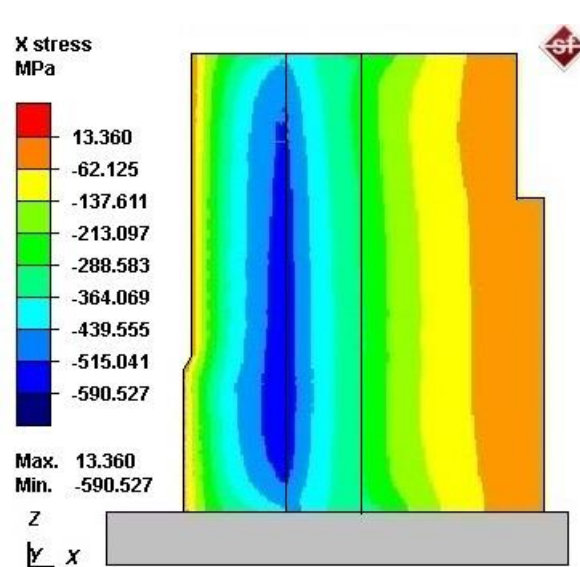
Слика 4.18: Радијални напон преднапрезања за другу операцију (пресек B-B)



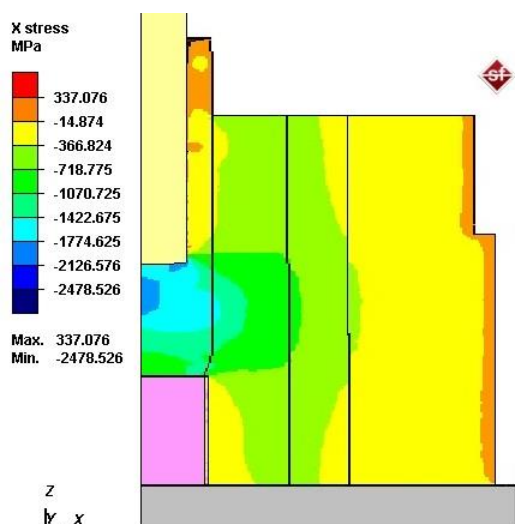
Слика 4.19: Радијални напон преднапрезања за другу операцију (оптимална технологија)



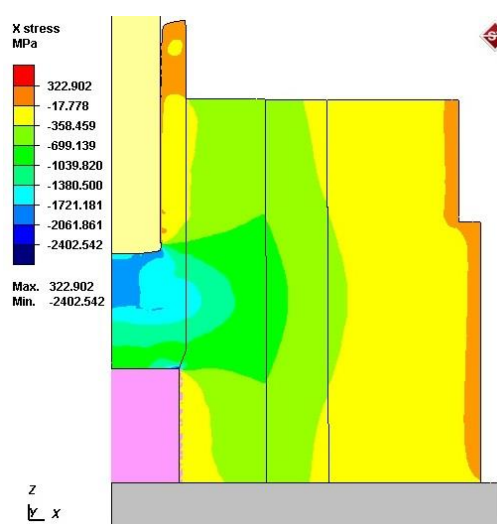
Слика 4.20: Радијални напон преднапрезања за трећу операцију (пресек A-A)



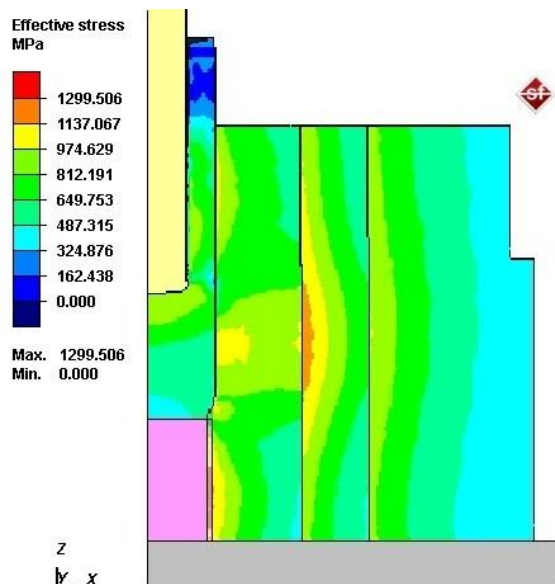
Слика 4.21: Радијални напон преднапрезања за трећу операцију (пресек B-B)



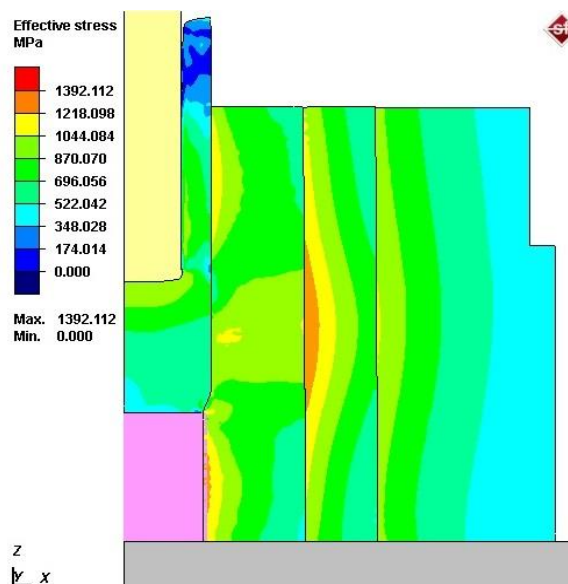
Слика 4.22: Радијални напон у другој операцији обраде (грешка циркуларности)



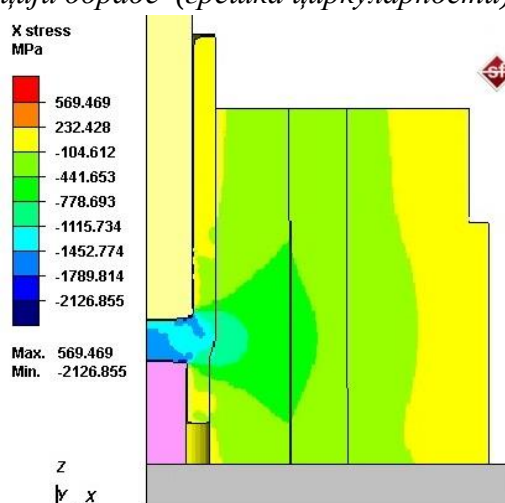
Слика 4.23: Радијални напон у другој операцији (оптимална технологија)



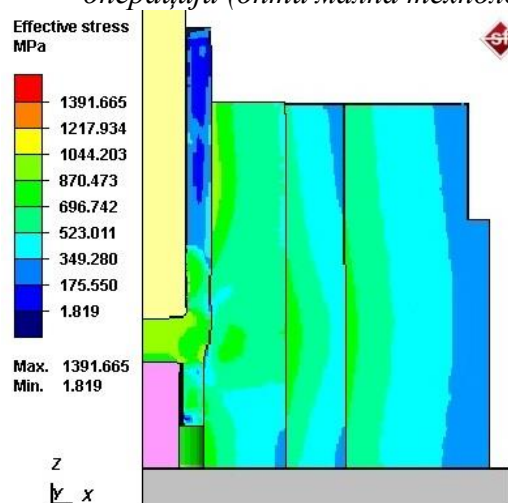
Слика 4.24: Ефективни напон у другој операцији обраде (грешка циркуларности)



Слика 4.25: Ефективни напон у другој операцији (опти мална технологија)



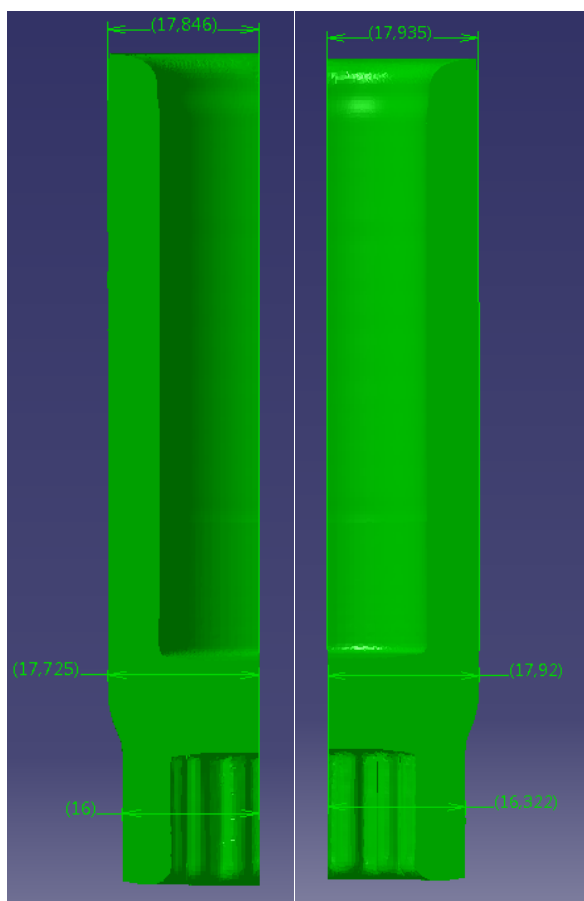
Слика 4.26: Радијални напон у трећој операцији обраде (грешка циркуларности)



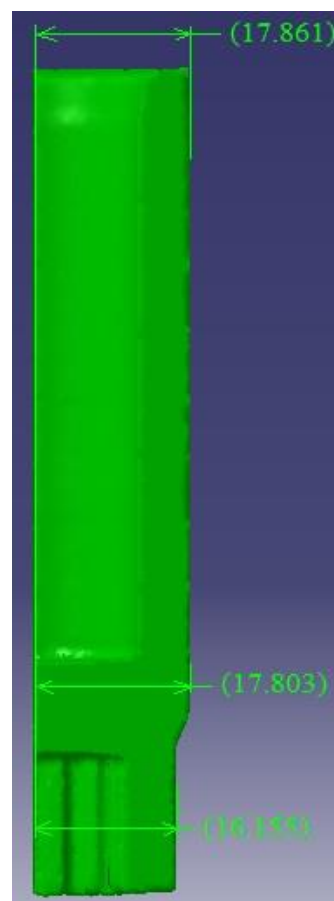
Слика 4.27: Ефективни напон у трећој операцији (грешка циркуларности)

На сликама 4.17 – 4.21 приказане су добијене вредности преднапрезања матрице са грешком циркуларности. Такође, ради упоређивања и анализе резултата, приказане су вредности преднапрезања матрице за другу операцију у стандардном случају (слика 4.19), као и вредности радијалног (слика 4.23) и ефективног напона (слика 4.25) у стандардном случају, док се вредности за трећу операцију могу упоредити са сликама које су приказане у првом експерименту.

На приказаним сликама се може уочити да напон преднапрезања није више једнако распоређен у алату, већ се разликују вредности напона у посматраним пресецима у односу на грешку матрице. Такође се може приметити да радијални и ефективни напон имају мале разлике у поређењу са стандардном технологијом, тако да ова грешка не проузрокује велике промене напона у алату током саме обраде. Међутим, с обзиром да се ће код овакве грешке у појединим пресецима напон бити мањи, а у другим зонама већи, то може проузроквати несиметрично ширење и скупљање приликом обраде где се јављају високу притисци, што додатно може отежати контролу добијеног пречника обратка, као и несиметричност обратка. У овом случају је грешка циркуларности приказана у облику правилне елипсе, међутим грешка циркуларности може бити у потпуности асиметрична или неправилног облика, па су самим тим и проблеми сложенији. На следећој слици приказани су измрени полупречници обратка. Полупречник обратка добијеног у матрици са грешком такође је измерен у два пресека као према слици 4.16.



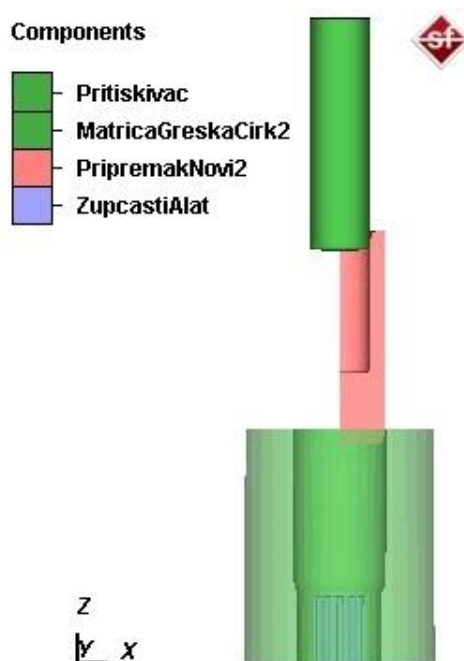
**Слика 4.28:** Полупречник обратка (грешка циркуларности)



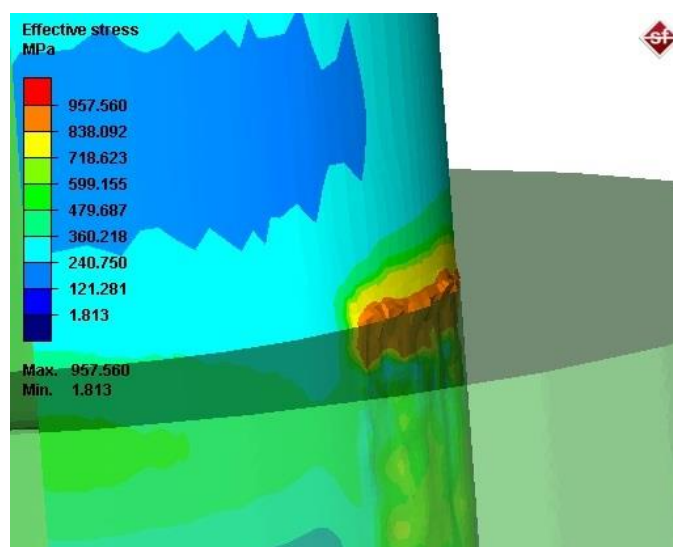
**Слика 4.29:** Полупречник обратка (оптимална технологија)

На слици 4.28 се може видети да су димензије полупречника различите по приказаним пресецима, што значи да је обрада несиметричан и да се грешка алата одразила на обрадак.

Овакав тип грешке може да проузрокује и неправилан положај обратка у алату при преласку у наредну операцију, као што је приказано на слици 4.30. С обзиром да су алати уско толерисаних димензија, колико је у другој операцији обрадак попримио одређени облик и димензије, довољна је оваква грешка са веома малом вредношћу у алату за трећу операцију, да обрадак неће моћи да заузме правилан положај у матрици пре обраде, што може разорити слој мазива, погоршати квалитет обрађене површине, проузроковати превремено хабање алата и појаву већих напона у тој зони уколико се обрада настави у таквом положају обратка у алату. На слици 4.31 приказан је дефект, изазван због неправилног положаја у алату.



Слика 4.30: Неправилан положај обратка у алату у трећој операцији

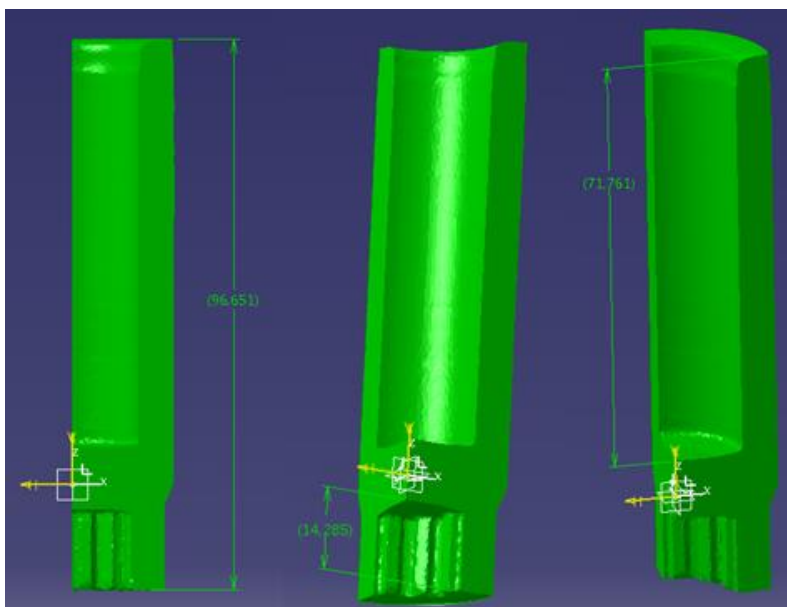


Слика 4.31: Дефекти током обликовања у трећој операцији на површини обратка

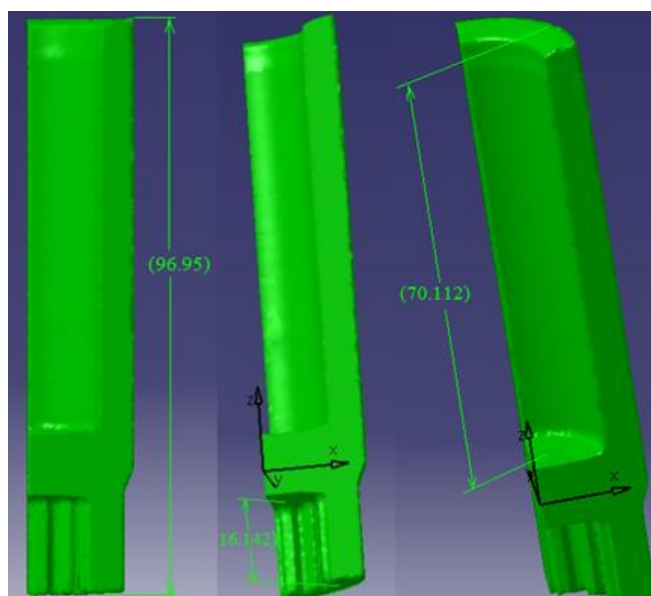
### 4.2.3 Резултати експеримента 3

Трење у процесима хладног истискивања у великој мери утиче на истискивање материјала и самим тим отежава контролу истиснутих димензија обратка. Да би се трење смањило у оваквим процесима, користи се подмазивање (фосватирање) [3]. Међутим и поред подмазивања, велика храпавост и лош квалитет обрађених површина алата може утицати на повећање трења. У овом делу испитивања, посматра се истиснута висина обратка, у поређењу са обратком добијеним у случају оптимално пројектоване технологије. Добијени резултати представљени су на слици 4.32.

Може се закључити да повећање трења изазвано лошим квалитетом обрађених површина алата на CNC машини утиче на промену истиснутих висина обратка.



Слика 4.32: Измерене висине обратка (експеримент 3)



Слика 4.33: Висине обратка (оптимална технологија)

## 5. Поступак израде алата и прецизност израде

С обзиром да се у последње време у индустрији све више конвенционалне методе обликовања замењују савременим високопрецизним методама запреминске обраде (*Net-shape*), које обезбеђују висок квалитет и тачност димензија, самим тим за испуњење таквих захтева и припрему таквих технологија неопходно је користити и другу савремену и прецизну опрему. Из тог разлога је израда алата за овакве врсте технологија незамислива без *CNC* машина и обрадних центара. Поступак израде алата подразумева неколико фаза:

- Анализа техничке документације
- Дефинисање технолошког поступка
- Пројектовање алата
- Избор материјала
- Избор машине, помоћних алата и прибора
- Симулација процеса израде
- Генерисање G кода

Циљ анализе техничке документације јесте постићи најлакши, најбржи и најјефтинији начин израде алата, са испуњем свих захтева од стране корисника. То понекад изискује и одређене измене и дораде техничких цртежа у циљу постизања оптималне израде, а без утицаја на експлоатационе карактеристике алата, а и самих делова који ће се њима изградити.

Технолошки поступак израде алата (матрице, ојачавајућих прстенова, притискивача) за хладно истискивање састоји из следећих операција [5]:

1. Обрада стругањем – при чему се узима у обзир предвиђени додатак за обраду брушењем
2. Каљење – за матрице каљење се врши у оквиру тврдоће од 61–63 HRC; за први ојачавајући прстен (међучаура) од 49–51 HRC; за други ојачавајући прстен (облога) од 4348 HRC.
3. Отпуштање – матрица, међучаура и облога (температура:  $T = 230^{\circ}\text{--}250^{\circ}$ , време:  $t = 24\text{h}$ )
4. Хоризонтално брушење на финалне димензије
5. Унутрашње и спољашње брушење на финалне димензије
6. Прецизна контрола

За овакве и сличне врсте обраде материјал који се користи за израду алата су легирани алатни челици за рад у хладном стању, а за хладно истискивање при великим притисцима често се употребљава и брзорезни алатни челици. У легиране алатне челике за рад у хладном стању убрајају се челици намењени за обликовање и механичку обраду до  $200^{\circ}\text{C}$ . Основни легирајући елемент код ове врсте челика је Cr, а по потреби се додају Mo, W и V. Ови челици се примењују за алате за процесане и пробијање, ударне алате, алате за пресовање и вучење, делове дробилица, млинова и багера, алате за пољопривреду и мерне алате. Примери легираних алатних челика за

рад у хладном стању су Š6441 (110WCrV5), Š4755 (X50CrMoW9-1-1), Š8140 (145V33) и Š4843 (80CrV2) [5].

Брзорезни алатни челици су топлотно постојани, тј. задржавају високу тврдоћу и отпорност према хабању на повишеним температурама (620 –650°C), које се појављују на површинама алата при резању великим брзинама. Ови челици дозвољавају 2–4 пута веће брзине резања, а постојаност је 10–30 пута већа од постојаности алата израђених од угљеничних челика. Брзорезни алатни челици спадају у високолегиране челике, а основни легирајући елементи су W и Mo, који обезбеђују топлотну постојаност. Додавањем Co и V повећава се топлотна постојаност брзорезних алатних челика, што им обезбеђује високу тврдоћу на повишеним температурама. Према степену утицаја легирајућих елемената брзорезни челици се деле на молибденске, волфрамске и кобалтне. Молибденски и кобалтни брзорезни челици (Š7680 (HS 6-5-2), Š7880 (HS 2-9-1) и Š9780 (HS 6-5-25)) се одликују високом отпорношћу према хабању и релативно добром жиљавошћу. Користе се за израду алата изложених ударима у току рада (ножеви и глодачи за грубу обраду, спиралне бургије). Волфрамски брзорезни челици (Š6880 (HS 18-0-1) и Š6980 (HS 18-1-2-5)) се користе за високо оптерећене алате при великим брзинама резања и за грубу обраду под најтежим условима [6].

На основу технолошког поступка врши се избор одговарајућих машина и опреме. С обзиром да се хладним истискивањем углавном израђују осносиметрични делови (слика 1.2), израда алата се врши на струговима. Када су у питању сложенији облици, а самим тим и сложенија гравура алата (комбинација више конуса и радијуса), примењују се CNC стругови. За хоризонтално брушење користе се равне брусилце, а за унутрашње и спољашње брушење користе се брусилце за округло брушење. За каљење и отпуштање најчешће су у употреби коморне електричне пећи.

Код израде алата на CNC машинама у случају сложенијих гравура алата, врши се симулација процеса обраде и програмирање путање алата у неким од CAM софтвера као што су CATIA, SolidCAM *umд*. Помоћу оваквих софтвера за аутоматско програмирање наком симулације процеса обраде генерише се G код који се пребацује у управљачку јединицу CNC машине.

## 5.1 Стандарди квалитета обраде и могуће грешке при обради

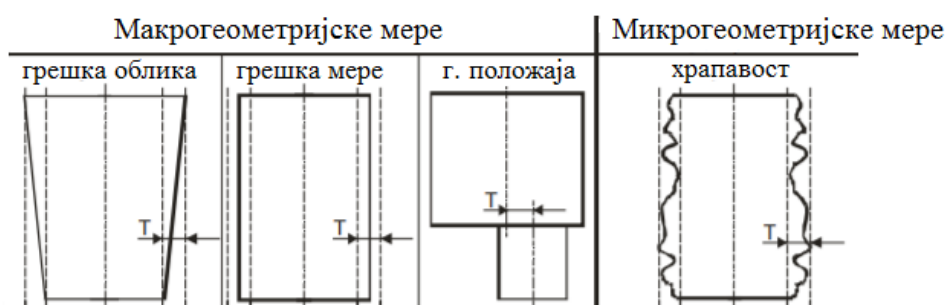
Технолошки квалитет обраде у машинству најчешће се односи на обраду односно израду машинских делова и елемената. Наведени квалитет одређен је дозвољеним одступањима прописаним нашим стандардима SRPS (српски прописи и стандарди; ранија ознака JUS) који су у потпуности усклађени са међународним стандардима ISO (*International Standard Organization*). Дозвољена одступања или толеранције прописане су за следеће факторе, тј. чиниоце квалитета и то [7]:

1. површинску храпавост
2. дужинске мере
3. геометријски облик и
4. положај

Површинска храпавост је груписана у дванаест класа (N1 до N12), а дефинисана је са SRPS.A1.020 као и другим пратећим стандардима. Толеранције дужинских мера груписане су у 16 група (IT1-IT16), а дефинисане су са SRPS.A1.110 и пратећим стандардима. Између површинске храпавости и толеранције дужинских мера

успостављена је директна међузависност прописана са *SRPS.A1.025*. Тolerанције облика и положаја дефинисане су са *SRPS.M.A1.243* помоћу 14 тзв. толеранцијских зона, као и пратећим стандардима [7].

Да би се постигао висок ниво квалитета обратка, треба испунити један од главних услова, а то је квалитет обраде који обухвата: тачност обраде и квалитет обрађених површина. Тачност обраде је степен подударности (блискости) обрађених делова и модела дефинисаног конструктивно-технолошком документацијом. Условљена је захтевима конструктивне документације (облик, димензије, класа тачности, одступања и сл.), функционалност, заменљивост делова и склопова итд. Основни циљ економичне производње, са минималним трошковима обраде, је производити делове само онолико тачно колико је потребно, а не колико је могуће. При обради резањем се јављају грешке у микроструктури - површинском слоју и геометријске грешке обраде (слика 5.1) [8].



Слика 5.1: Геометријске грешке обраде [8]

Микрогеометријске грешке се односе на храпавост обрађене површине, а макрогеометријске на тачност-одступања: облика, положаја и мера-димензија. Одступање облика је одступање стварног облика од идеалног. Дозвољена одступања облика су правост, равност, кружност, цилиндричност, облик линије и облик површине (слика 5.2). Одступања положаја површина су одступања међусобног положаја у односу на идеални. Дозвољена одступања положаја (слика 5.3) су одступања: правца (паралелност, управност и угао нагиба), места (локација, концентричност, коаксијалност и симетричност) и тачности обртања (тачност, кружност и равност обртања) [9].

Квалитет обрађене површине манифестује се преко два показатеља квалитета обрађених површина [8]:

- Геометријске карактеристике (одступање облика, валовитост и храпавост) и
- Физикохемијске карактеристике површинског слоја (структура, микротврдоћа, заостали напони)

Геометријски параметри подразумевају одступања од геометријски правилног макро и микро новоа. Физикохемијско стање површинског слоја оцењује се параметрима који карактеришу структуру, фазни и хемијски састав, деформације, напрезања и сл.

Основне карактеристике микрогеометрије обрађене површине (слика 5.4) су:

- валовитост и
- храпавост обрађене површине.

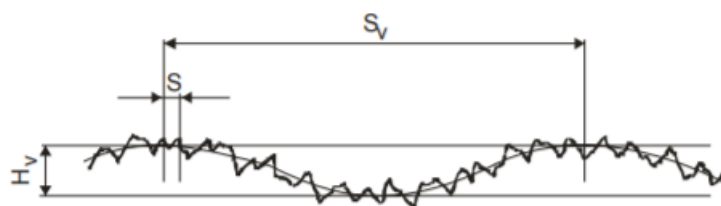
Валовитост обрађене површине је дефинисана неравнинама код којих је однос корака ( $S_v$ ) и висине неравнина ( $H_v$ ) изнад 40 ( $S_v / H_v \geq 40$ ).

| Пример | Објашњење                                                                                                |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | Одступање осе од правости не веће од 0,2 mm                                                              |
|        | Одступање површине од равности по целој дужини не веће од 0,2 mm и не веће од 0,1 mm на дужини од 100 mm |
|        | Одступање цилиндричности не веће од 0,02 mm и кружности било ког попречног пресека не веће од 0,01 mm    |
|        | Одступање профила не веће од 0,06 mm                                                                     |
|        | Одступање криве површине не веће од 0,05 mm                                                              |

Слика 5.2: Примери означавања толеранција облика [9]

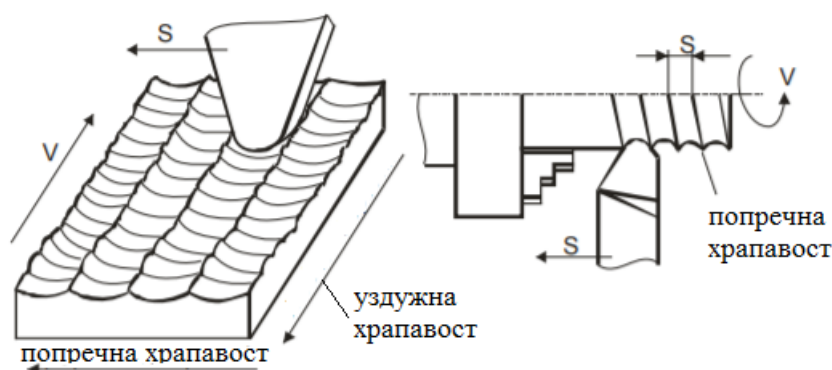
| Пример | Објашњење                                                                                                                                                |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | Одступање паралелности у односу на површину A не веће од 0,1 mm .<br>Одступање паралелности површина не веће од 0,2 mm .                                 |
|        | Одступање оса рупа не веће од 0,5 mm .                                                                                                                   |
|        | Радијално одступање површине при обртању у односу на осу не веће од 0,01 mm . Бочно бацање при обртању око осе по целој бочној равни не прелази 0,1 mm . |

Слика 5.3: Примери означавања толеранција положаја [9]



Слика 5.4: Валовитост и храпавост обрађене површине [8]

Храпавост обрађене површине чине неравнине код којих је однос корака ( $S = 2 - 800 \mu m$ ) и висине неравнина ( $H=0,03 - 400 \mu m$ ) испод 40. Храпавост обрађене површине је скуп свих неравнина које образују рељеф површине у границама одабраног исечка такве величине да су елиминисане грешке облика и валовитости. Храпавост површине зависи од услова резања, посебно облика алата, стања резних ивица алата, хабања резних елемената алата, наслаге, вибрација, крутости елемената технолошког система и сл. Разликује се попречна и уздужна храпавост [7].



Слика 5.5: Уздужна и попречна храпавост обрађене површине [8]

За праћење храпавости обрађене површине постоји више од 30 параметара. Према SRPS стандардима (SRPS M. A1. 020) параметри храпавости се деле на: основне и допунске. Три основна параметра храпавости су:

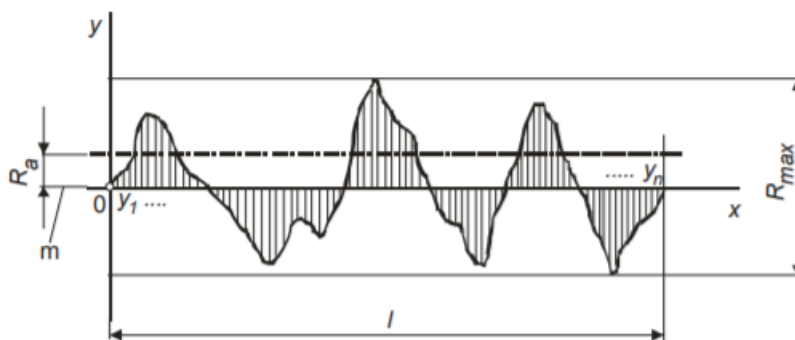
- $R_a$  - средње аритметичко одступање профила од средње линије профила (слика 5.6) – је средња аритметичка вредност одступања свих тачака ефективног профила ( $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ ) од средње линије профила у границама референтне дужине:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y| * dx \quad (5.1)$$

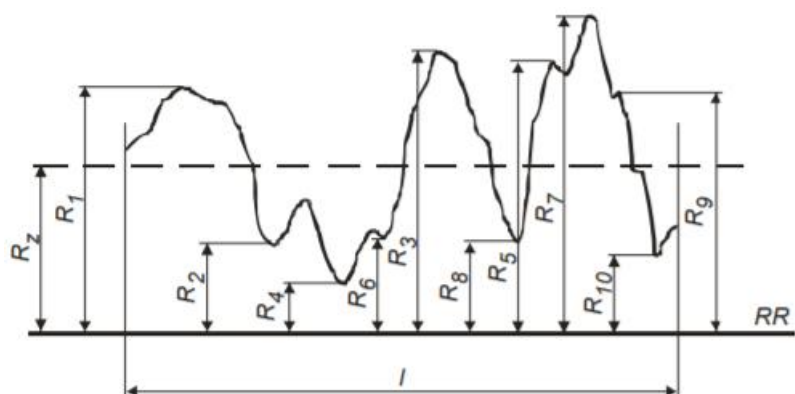
- $R_z$  - средња висина неравнина (слика 5.7) - је растојање две паралелне праве са средњом линијом профила, повучене тако да, у границама референтне дужине профила, додирују највишу и најнижу тачку профила:

$$R_z = \frac{R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9}{5} - \frac{R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10}}{5} \quad (5.2)$$

- $R_{max}$  - максимална висина неравнина (слика 5.7) - је разлика средњих аритметичких вредности пет највиших и пет најнижих тачака профила у границама референтне дужине.



Слика 5.6: Параметри храпавости површина [8]



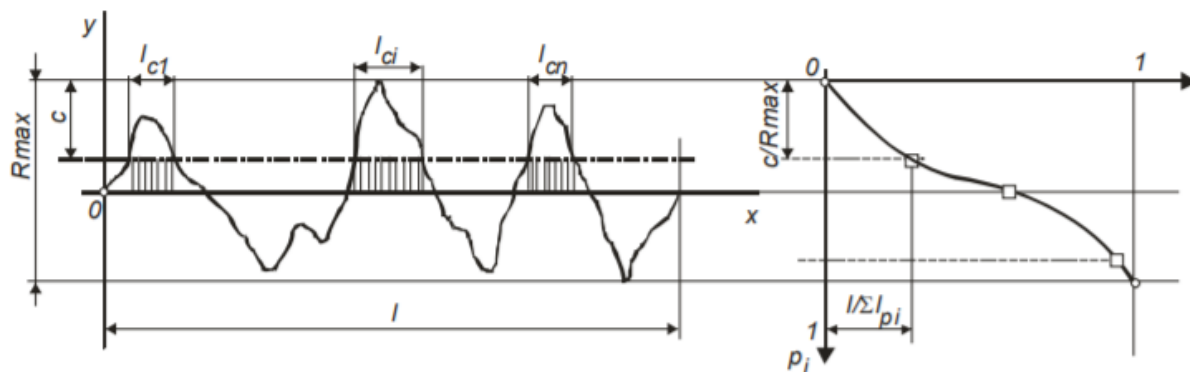
Слика 5.7: Средња висина неравнина [8]

Поред основних постоји и већи број допунских параметара храпавости. Према SRPS стандардима то су:

- дужина ношења профила,
- коефицијент ношења профила,
- крива ношења профила и сл.

Дужина ношења профила -  $l_c$  (слика 5.8) је збир дужина свих елементарних одсека на профилу, у границама референтне дужине, које одсеца права паралелна средњој линији профила на растојању ( $c$ ):

$$l_c = \sum_{i=1}^k l_{ci} \quad (5.3)$$



Слика 5.8: Дужина ношења профила и релативна крива ношења профила [8]

Коефицијент ношења профила –  $p_{nc}$  је однос дужине ношења профила и референтне дужине профила:

$$p_{nc} = \frac{l_c}{l} * 100, \% \quad (5.4)$$

Крива ношења профила, слика 5.8, најбоље говори о распореду материјала у храпавом слоју обрађене површине. Представља графичку интерпретацију зависности дужине ношења профила од положаја равни сечења (растојања равне површине од горње границе AA -  $p_i$ ).

Услед дејства топлотних и механичких оптерећења, у површинским слојевима обрађене површине долази до појаве нежељених ефеката као што су: појава микропукотина и заосталих напона, пластично деформисање и отврдњавање, промена микроструктуре и микротврдоће, појава местимично нагорелих површина итд [8].

## 5.2 Провера тачности CNC машина

Данашњи степен развоја индустријске производње изискује поштовање разних мера, прописа и стандарда за квалитет и тачност. Сама калибриција најразличитијих мерних инструмената који се користе у производњи је постала недовољна. Стална побољшања и унапређења на подручју CAD/CAM програма захтевају истовремена побољшања машина алатки и уређаја који учествују у процеси машинске израде. Код CNC машина захтеви који се односе на прецизност израде припремака, у већини случајева, посредно или непосредно, односе се углавном на геометријску тачност машина. Због тога је за успешно и рационално пројектовање производње потребно познавати геометријску и радну тачност најразличитијих CNC машина. Истовремено праћење димензијских и геометријских грешака и појава нетачности диктира потребну динамику одржавања. Тако су калибрације CNC машина алатки као део нормалног процеса производње у светским и домаћим компанијама у којим је постизање највећег квалитета и нула шкарта главни приоритети [10, 11].

Калибрисање различитих CNC машина могуће је постићи класичном методама, али и савременим методама. Уколико се користе класичне методе калибрације потребно је потрошити више времена на мерења и проверавања, што доводи до тога да је машина дуже времена ван погона. Такође, код класичне методе мерне резултате је често потребно прерачунавати и могућ је настанак субјективних грешака. Проналажење узрока поједине грешке је доста спорије од савремених метода, а самим тим је и спорије уклањање узрока тих грешака. Исто тако, поједина мерења класичном методом није могуће извести на начине који прописују одређени стандарди (на пример провера кретања две осе према стандарду ISO 230-4 и други стандарди).

Савремена метода калибрисања код CNC машина омогућава веома брзо мерење и дијагностиковање добијених мерних резултата, где је једном методом могуће добити више резултата, као што је случај код мерног система QC10 Ballbar код којег се из два мерења може добити чак и 21 резултат и то све за само 10 минута тестирања. Савремена метода умногоме смањује време тестирања и анализе резултата, где сваки учесник процеса обраде (технолози, производња, одржавање) могу добити на време потребне податке у врло кратком временском року и тиме је CNC машине доста мање ван производње. Служба одржавања лакше и брже извршава корекције на машини и прати повећавање грешака и према томе може планирати превентивно одржавање и поправке машина. Такође, савремена метода избегава стварање субјективних грешака у односу на класичну методу.

Калибрисање машина је потребно изводити барем једном годишње, а уколико су виши захтеви за квалитетом потребно је калибрацију вршити и више пута у току године. Нужно је калибрисање након сваког оштећења на машини, као и после сваког одржавања исте.

Мерење на машинама избегава субјективне грешке, заједно са подешавањем алата и радног комада смањује време подешавања и повећава продуктивност. Данас се може увидети да се адекватним подешавањем *CNC* машина може повећати њен капацитет од 20% до 35%. На три или четири *CNC* машине опремљене за мерење и подешавање добија се капацитети за једну нову машину, са пуно мање финансијских улагања [10].

## 6. QC10 Ballbar уређај

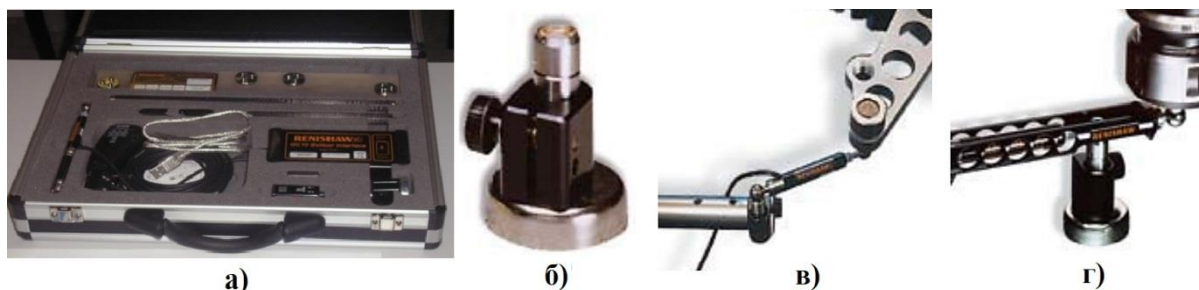
Мерни систем *QC10 Ballbar*<sup>1</sup> и одговарајући програми који се користе за тестирање развијени су у *RENISHAW* групи из В. Британије, у складу са стандардима *ISO 9001*, *ASME*, *JIS* и другим кључним стандардима које се користе за машине. Њихово коришћење омогућава [12]:

- повећање времена активности машине алатке и продуктивности,
- смањење шкарта приликом производње,
- обликовање програма превентивног и проактивног одржавања машина и
- идентификовање специфичних грешака машине.

Уређај *QC10 Ballbar* представља изузетно свестран алат дизајниран за употребу на великом броју машина алатки. Стандардни мерни систем се може користити за испитивање 3-осних *CNC* машина, као што су хоризонтални и вертикални обрадни центри. Уз додатак разне додатне опреме, овај мерни систем се може користити за тестирање много ширег опсега машина. Адаптер за струг (слика 6.1 десно и слика 6.2в) од 360° омогућава употребу овог мерног система на широком спектру *CNC* стругова. Као и код обрадних центара, овај додатак омогућава уређају да обаву пуну дијагнозу и проверу тих стругова. За тестирање малих машина, постоји комплет прибора за тестирање малих кругова (слика 6.1 лево и слика 6.2г), односно омогућава се тестирање *CNC* машина са краћим ходом осе. Такође, може се вршити побољшана анализа система серво управљања на већини типова машина [13, 14].



Слика 6.1: Додатак за мерење са малим пречником (лево), као и адаптером за мерење на *CNC* стругу (десно) [12]



Слика 6.2: а) Уређај *QC10 Ballbar* са *ZERO DURA®* калибратором б) *VTL* адаптер; в) адаптер за струг (360°), г) адаптер за мале пречнике [13]

<sup>1</sup> Набављен и користи се у Центру за виртуелну прозводњу факултета инжењерских наука у Крагујевцу

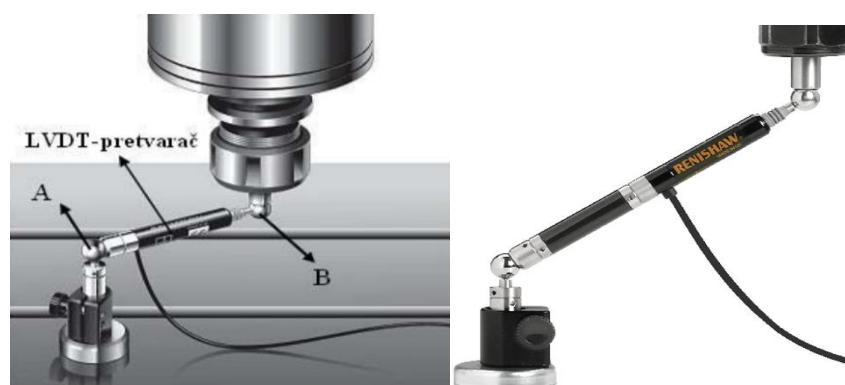
У табели 6.1 приказане су спецификације уређаја QC10 Ballbar.

**Табела 6.1.** Спецификације уређаја QC10 Ballbar [12]

|                                   |                                                                                                                               |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Резолуција                        | 0,1 $\mu\text{m}$                                                                                                             |
| Прецизност Ballbar сензора        | $\pm 0,5 \mu\text{m}$ (на 20 °C)                                                                                              |
| Максимална брзина записа мерења   | 250 вредности у секунди                                                                                                       |
| Продужеци сензора                 | 50 mm, 150 mm, 300 mm                                                                                                         |
| Температурни опсег рада уређаја   | 0-40 °C                                                                                                                       |
| Прецизност калибратора (на 20 °C) | $\pm 1 \mu\text{m}$ (50 mm)<br>$\pm 1 \mu\text{m}$ (100 mm)<br>$\pm 1 \mu\text{m}$ (150 mm)<br>$\pm 1,5 \mu\text{m}$ (300 mm) |

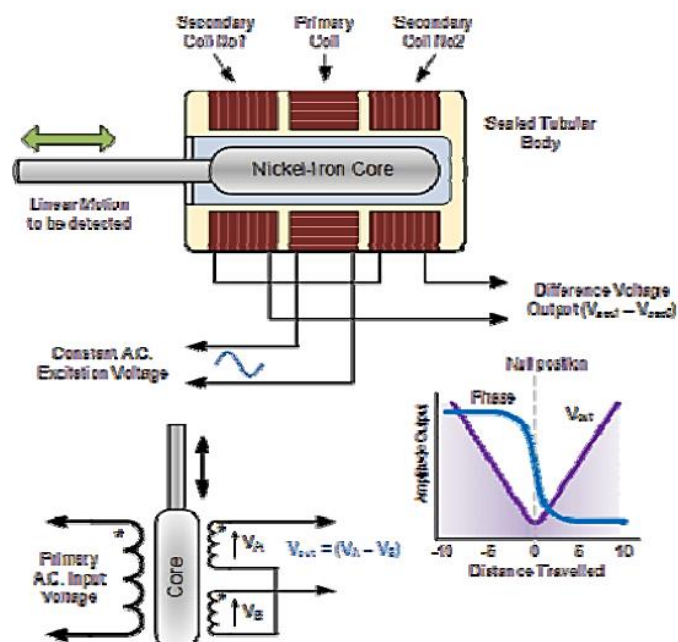
Једна од савремених и веома успешних метода за брзу и ефикасну дијагностику грешака код CNC управљаних машина алатки базира се на тзв. „кружном тесту“ где се употребљава мерни систем QC10 Ballbar (QC10 - Quick Check 10 min). Као што му име говори, уређајем се могу вршити брзе провере и тестирања које временски трају 10 min. Стандард ISO 230 описује уређај као ballbar претварач (енг. ball telescopic bar), односно као претварач који поседује телескопску шипку са куглицама на оба своја краја. Шипка је направљена од волфрам карбида. Мерни систем омогућава детекцију нерегуларности у CNC машини који су настали отказом контролера и серво система машине [11, 15].

Централни део система QC10 Ballbar (хардверски део) чини LVDT претварач (енг. Linear Variable Differential Transformer), тј. сензор који је постављен између две челичне куглице ( $\varnothing = 12,7 \text{ mm} \pm 2,5 \mu\text{m}$ ) на оба краја мерне палице (шипке) (R). Иста се поставља у магнетне носаче, која се причвршћују на радни сто машине (A), односно стегну у вретено машине алатке (B), што је приказано на слици 6.3 [15].



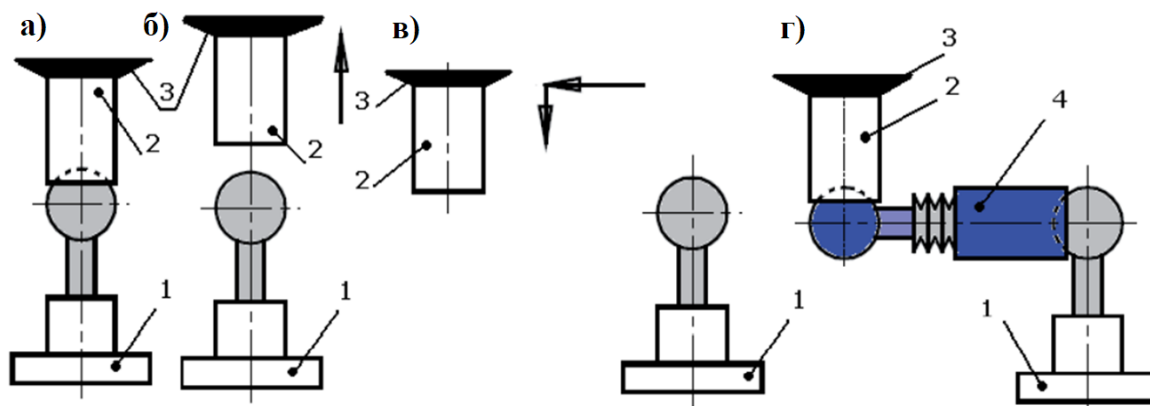
**Слика 6.3:** Мерни систем Ballbar QC10 (хардверски део) [10, 11]

Мерни систем QC10 Ballbar је компаратор који на оба своја краја има челичне куглице чијим померањем LVDT претварач региструје преко комуникацијског порта на компјутеру померање куглица једну у односу на другу. Претварач претвара механичко кретање куглица у одговарајући електрични сигнал [16, 17]. На слици 6.4 приказан је LVDT претварач.



Слика 6.4: LVDT (енг. Linear Variable Differential Transformer) претварач [16]

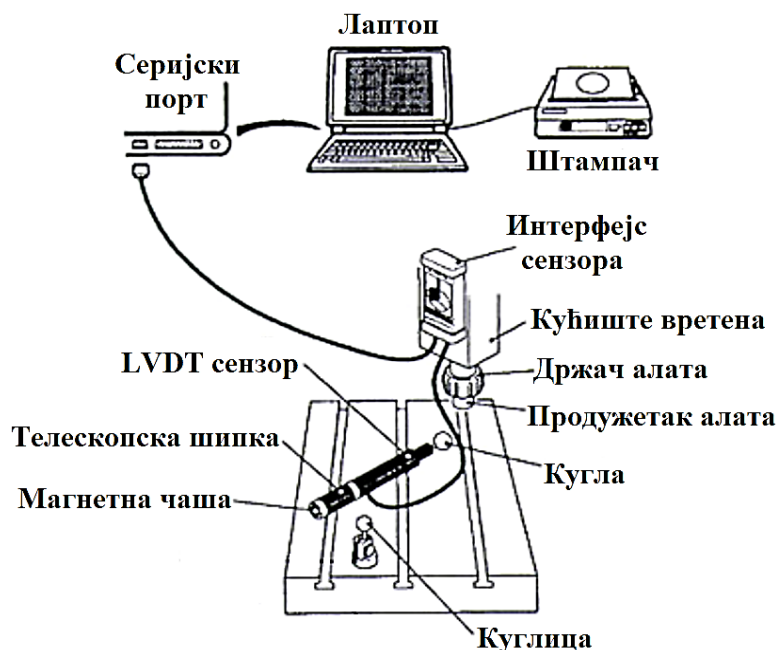
Код телескопске шипке, растојање између кугли је променљиво. Сензор унутар шипке мери растојање између центара те две кугле, тако што сензор LVDT ради на принципу електромагнетне индукције. Излазни напон LVDT сензора је у корелацији са линеарним положајем телескопског магнетног језгра у односу на завојнице које га окружују. Будући да нема физичког контакта између сензорских елемената (језгра и калема), сензор је робустан и не хаба се [17]. На слици 6.5 је приказан процес монтаже уређаја QC10 Ballbar.



Слика 6.5: Процес монтаже уређаја QC10 Ballbar: а) и б) центрирање, в) померање до почетне позиције, г) монтирање претварача. Позиције: 1 - магнетна база, 2 - наставак за алат, 3 - држач алата, 4 - мерни претварач [15]

Уређај QC10 Ballbar се монтира уз помоћ магнета на сталку и носачу. Кинематика омогућава кретање у облику кружнице. Током инсталирања уређаја на машину алатку, сензор (претварач) се повезује каблом за интерфејс који подржава пренос измерених вредности у рачунар (слика 6.6). Интерфејс је повезан серијским портом са рачунаром (десктоп или лаптоп), где је инсталиран одговарајући дијагностички софтвер. За апсолутно мерење уређај је опремљен ZERODUR<sup>®</sup> калибратором (слика 6.2а). Пре самог мерења потребно је у управљачки систем машине убацити програм за испуњење

цикличне интерполације са задатим радијусом [10, 18]. На слици 6.6 приказана је шема монтаже мерног система *QC10 Ballbar*.



Слика 6.6: Шема монтаже и инсталације мерног система *QC10 Ballbar* [18]

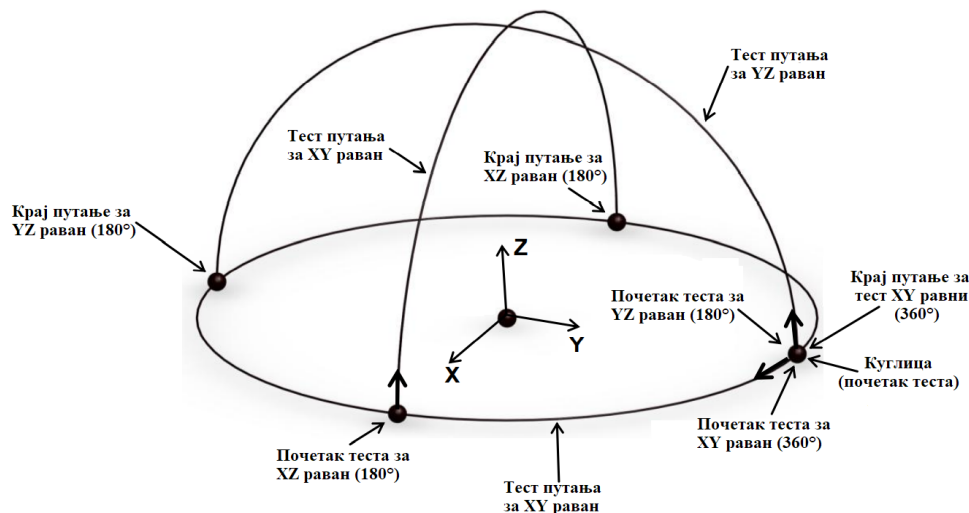
### 6.1 Могућности и принцип рада

С обзиром на врсту и смер теста потребно је написати *NC* програм, који је у суштини запис програмираног идеалног кружног кретања главног вретена (*B*) око центра куглице (*A*). Полупречник кружнице је могуће прилагодити за различите величине машина алатки избором дужине мерне шипке ( $R = 100, 150, 300$  и  $600$  mm).

Могући су и кружни ( $360^\circ$ ), полукружни ( $180^\circ$ ) или четвртински ( $90^\circ$ ) тестови у *XY*-, *XZ*-, и *YZ*-равнима (слика 6.7). Кружни ( $360^\circ$ ) тест је састављен из два дела [10]:

1. главно вретено (*B*) описује два пуна круга око центра куглице (*A*) у смеру кретања казаљке на сату (*CW* - *Clockwise*). Релативна позиција куглице *A* је зато **0, 0, 0**;
2. главно вретено (*B*) затим описује два пуна круга у обрнутом смеру казаљке на сату (*CCW* - *Counter Clockwise*).

Не препоручује се испитивање у луковима мањим од  $180^\circ$  јер мерни систем може давати непотпуне резултате. Мањи углови при тестирању се користе само тамо где ограничења простора спречавају тест од  $180^\circ$  или  $360^\circ$ . Такође, не би требало користити мерне лукове мање од  $90^\circ$ . Међутим, перформансе непотпуног круга ограничавају дијагностичке могућности мерног система само на графички приказ [15].



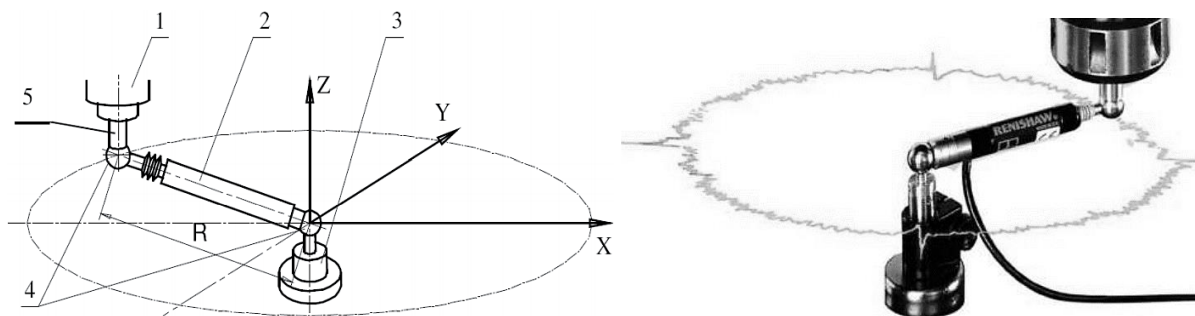
Слика 6.7: Кружни и полукружни тестови у XY-, XZ- и YZ-равнима [19]

Пратећи врло једноставну структуру QC10 Ballbar испитивања могуће је за 10 min проверити CNC машину алатку и дијагностификовати грешке, и то у шест корака [12]:

1. **Подешавање уређаја и параметара за тестирање** - постављање калибрисаног QC10 Ballbar уређаја на CNC машину, подешавање кретања једноставним G02 и G03 командама програма; HPS софтвер омогућава избор контролера, кретања и аутоматско генерисање дела програма за кретање QC10 Ballbar уређаја.
2. **Аквизиција података и мерења** - машина изводи два кружна кретања у правцу и супротно правцу кретања казаљки на часовнику, при чему Ballbar прецизно мери одступање од радијуса кружнице у току теста.
3. **Анализа** - резултати мерења се шаљу директно у рачунар преко стандардног RS232 линка, или преко USB порта. Renishaw Ballbar 5 HPS софтвер анализира резултате мерења у складу са ISO 230-4, ASME B5.54 - B5.57, JIS B6194 или GB/T17421.4 стандардима за перформансе CNC машина, где облик снимљеног кружног кретања алата показује основне изворе грешака машине.
4. **Дијагноза** - софтвер Ballbar 5 HPS поседује велики број опција и даје аутоматску анализу и дијагнозу специфичних грешака машине, ређајући и разврставајући их по процентуалној заступљености и утицају; општа прецизност CNC машине се оцењује кроз вредности циркуларности и позиционе толеранције, где је такође могуће и праћење „историје машине“ у току времена са графичким приказом.
5. **Процена за поправљање и елиминацију грешака** - софтвер Ballbar 5 HPS издваја неколико најутицајнијих грешака машине, где једноставним кликом на њу се отвара тзв. „hotlink“ за on-line user manual, у коме је дато детаљно објашњење за узрок грешке и предлози за њено елиминисање и максимално смањење. Осим тога, у софтверу постоји симулатор у коме је могуће унети те предложене измене параметара CNC машине неопходне за елиминисање грешки и тако направити процедуру за поправку и одржавање машине пратећи ефекте измена пре саме поправке.
6. **Извештај** - извештаји који су добијени на екрану се могу експортирати и штампати на неколико страних језика. Могући су различити прикази резултата у виду разних табела и графика који су погодни за праћење историје одржавања CNC машине.

Машина се креће по претходно испрограмираној путањи кружнице, где уређај *QC10 Ballbar* региструје свако, па и најмање одступање од идеалне кружнице и приказује одступање у вредностима позиционирања и циркуларности. Одступања су рашчлањена. Истовремено, при разврставању, проналазе се најугицајнији од 23 могућих узрока грешака за које је могуће применити предложене поступке за њихово отклањање [10].

На слици 6.8 је приказан принцип мерења уређајем *QC10 Ballbar*.



**Слика 6.8:** Принцип мерења уређајем *QC10 Ballbar*: 1 - вретено машине, 2 - телескопска шипка са LVDT претварачем, 3 - магнетно постоље, 4 - куглица, 5 - продужетак алата, R - радијус теста [15, 18]

Машина алатка на коју је инсталиран мерни систем *QC10 Ballbar* програмиран је за извођење два кружна кретања (у смеру кретања казаљке на сату и у супротном смеру казаљке на сату) у некој од изабраних равни машине. Током теста енкодер бележи одступања од правилне кружне програмиране путање. Преносни елемент се компресује и шири током кретања машине алатке, а промена номиналне дужине може се тачно измерити на путањи од приближно  $\pm 1\text{ mm}$ . Циљ овог поступка је да се утврди природа и величина измерених одступања, а такође указује и на могуће узроке нетачности.

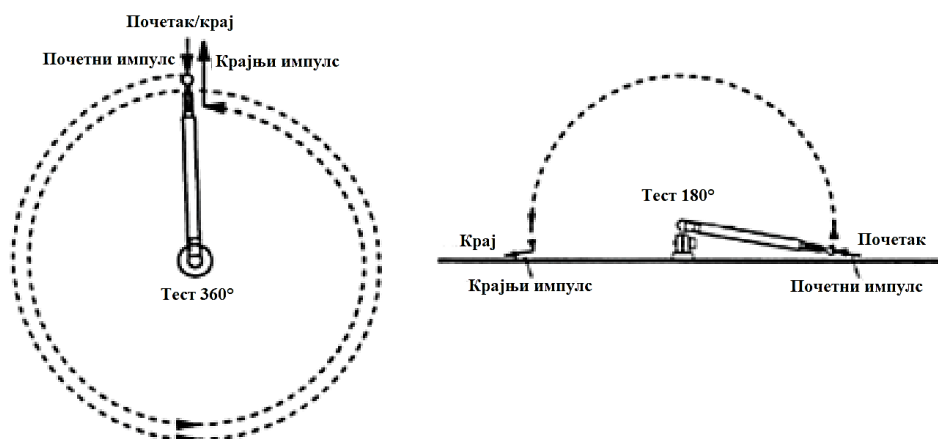
Ако је потребно, могуће је повећати номиналну дужину сензора додавањем наставка и на тај начин калибрисати веће површине машине. Уколико уређај *QC10 Ballbar* има краћу дужину, онда је у комбинацији са већом брзином окретаја алата и динамичким прикупљањем података његова примена идеална за откривање динамичких грешака у серво систему машине. Уколико је уређај *QC10 Ballbar* дужи, систем је осетљивији на откривање геометријских грешака са машином.

Користећи математичке методе, мерни систем *QC10 Ballbar* је у стању да дијагностикује више од 20 могућих узрока нетачности машине и може да прикаже најефикасније начине за уклањање тих грешака и нетачности. Подаци се приказују графички и у нумеричком формату. Појединачне грешке распоређене су према њиховој важности у погледу укупне тачности машине.

Приликом мерења не зна се угао ротације алата. Уместо тога се привидни угао ротације израчунава из обимне брзине хода кружног интерполационог кретања. Пре него што започне тест кружне интерполације, мерни систем мора бити синхронизован са машином алатком. Брзина обртаја, смер ротације и дужина полупречника на којима се врши мерење морају се правилно подесити. Тест се може изводити на различитим радијусима телескопске шипке користећи наставке, стога је неопходно проверити да ли је програм дизајниран за тачну дужину шипке и додатака [15, 20].

На почетку мерења стартни импулс се јавља када се изврши линеарно померање сензора у његов радни опсег. Када се догоди ова промена, софтвер започиње поступак прикупљања података. Крајњи импулс представља линеарно кретање сензора који гура

сензор из радног подручја. Ово зауставља прикупљање података. Величина кретања почетног и крајњег импулса је обично у опсегу од  $1 \div 1,5$  mm и оба треба да буду исте величине. Пут сензора је кружан са номинално константним радијусом [20]. На слици 6.9 приказан је почетни и крајњи импулс код тестирања на мерном систему QC10 Ballbar за  $180^\circ$  и  $360^\circ$ .



**Слика 6.9:** *Почетни и крајњи импулс код тестирања на мерном систему QC10 Ballbar за  $180^\circ$  и  $360^\circ$  [20]*

Током мерења постоје угаони прелази. Они представљају део лука који је ограничен крајем сензора. Појављују се непосредно пре и након извршавања теста, тј. померања шипке и сензора за прикупљање података. Значај ових прелаза јесу у томе што омогућавају мерном систему убрзавање померања до дефинисане брзине помицања, тј. пре него што се догоди лучно кретање, када се подаци записују, а затим успори пре извођења крајњег импулсног покрета за крај мерења. Ако се мерења изводе са прикупљањем података под углом од  $360^\circ$ , бирају се угаони прелази од  $45^\circ$  или  $180^\circ$ . Приликом избора прелаза од  $180^\circ$ , крај сензора се доводи на исто место које припада почетној тачки [20].

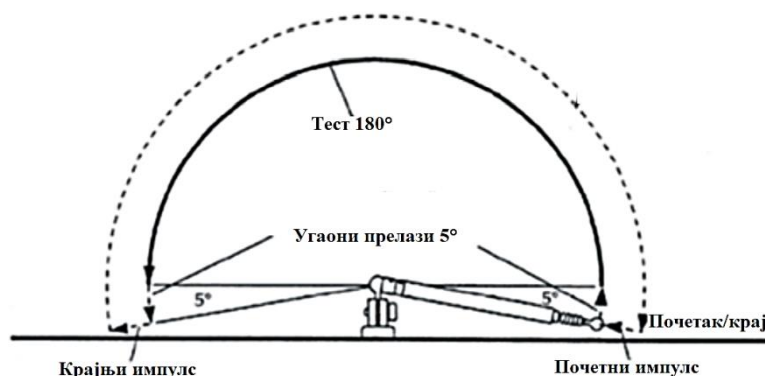
У зависности од доступног простора за тестирање машине, угаони прелази могу бити и мањи. Када се тестирају равни XZ или YZ на троосној CNC машини, уобичајно је да се користи лук за скенирање под углом од  $180^\circ$  (слика 6.10). Тада је неопходно дефинисати величине угаоних прелаза које су малих вредности ( $5^\circ \div 7^\circ$ ). Када се изводи угаоно кретање, подаци сензора се снимају софтвером. Међутим, када се поступак скенирања заврши, вредности из угаоних кретања које су дефинисане угаоним прелазима у ходу се бришу и стога нису укључене у резултујуће графиконе и резултате. Систем такође дозвољава варијанту да оба угаона прелаза нису дефинисана и да су због тога изостављена. Међутим, софтвер би почео да чита податке на стартном импулсу, након чега би се очекивало да се машина креће константном брзином. У стварности, међутим, уместо да се креће константном брзином машина прво убрзава до програмиране брзине кретања па се тек онда креће константом брзином [20].

За постизање тачности приликом мерења потребно је испунити неколико захтева за тачношћу [18]:

- Неопходно је осигурати чврсто стезање.
- Препоручује се додиривање што је могуће мање делова уређаја, као што је сензор и калибрациона јединица, где топлота руке може проузроковати нетачност при мерењу услед ширења топлоте. Неопходно је током руковања

уређајем користити рукавице, јер додир и пренос топлоте могу проузроковати повећање нетачности мерења за неколико микрометара

- Неопходно је калибрисати мерни систем на температуру околине у којој се врши мерење
- Чистоћа уређаја, куглице и магнетне базе треба да се проверава
- Треба проверити да ли је мерни систем довољно причвршћен пре почетка мерења.



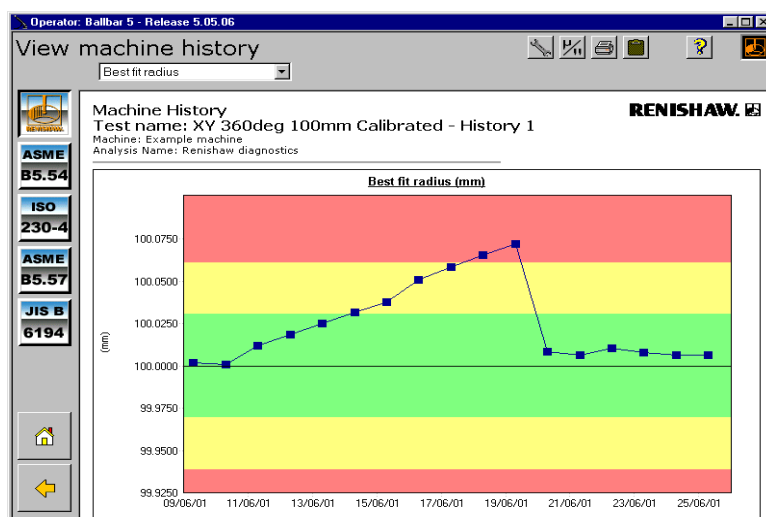
Слика 6.10: Лук скенирања од  $180^\circ$  са угаоним прелазом од  $5^\circ$  [20]

## 6.2 Софтвер за подршку мерењу

*Ballbar 5 HPS* представља *Microsoft® Windows®* компатибилан софтверски пакет за анализу перформанси *CNC* машине алатке, дизајниран за коришћење са *QC10 Ballbar* мерним системом. Кључне карактеристике овог софтвера су [12]:

- прецизно прикупљање података мерења,
- анализа и приказ резултата тестирања у складу са *ISO 230-4*, *ASME B5.54 - B5.57*, *JIS B6194* и *GB/T17421.4* стандардима,
- аутоматско прорачунавање величине посмака,
- анализа вредности позиционе толеранције и циркуларности,
- историја машине са графичким приказом перформанси у току времена праћења и одржавања машине,
- генератор дела програма за *QC10 Ballbar* тест и
- *Ballbar plot* симулатор, односно предвиђање ефеката измена грешака и одржавања, као и подешавања перформанси машине.

“Историја машине” представља функцију софтвера која омогућава праћење промена перформанси машине у току времена, као и упоређивање са вредностима стандарда или произвођача машине. На тај начин је могуће дефинисати програм превентивног и проактивног одржавања машине. Историја омогућава приказ резултата већих узастопних мерења за сваки параметар посебно на сопственом графику. Графички приказ перформанси за све тестове са *QC10 Ballbar* мерним системом дозвољава да се кликом на тачку мерења појаве све вредности тог мерења у прошлости [12]. На слици 6.11 приказан је прозор “историје машине”.

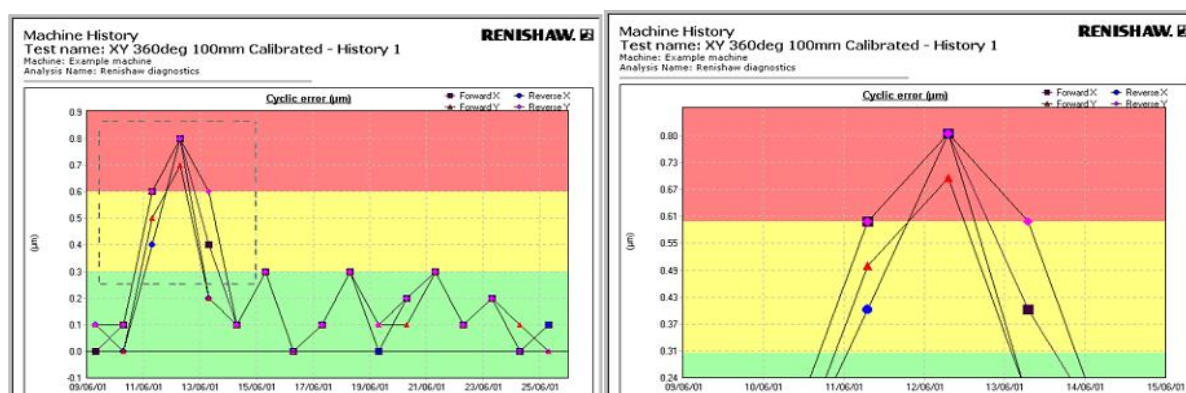


Слика 6.12: Прозор “историје машине” [21]

У овом прозору се може бирати шаблон приказа хистограма, а затим се изабере неки или сви тестови у директоријуму машине. Функција историје машине омогућава графичке приказе варијација у перформансама машине током времена. Тако се јасно може видети како су перформансе машине варијале, па чак постоји могућност и да се „испитују“ појединачне тачке унатраг до оригиналног извештаја о испитивању [13]. Функција историје машине омогућава [13]:

- увиђај у то како се перформансе машине погоршавају током њене употребе,
- да се унапред предвиде захтеви одржавања како би се смањио непланирани застој у раду машине и производње,
- прегледање ефеката корекција грешака, одржавања и сервиса машине,
- анализа историје машине како би се уочили понављајући проблеми и ефикасност претходних поправки и одржавања.

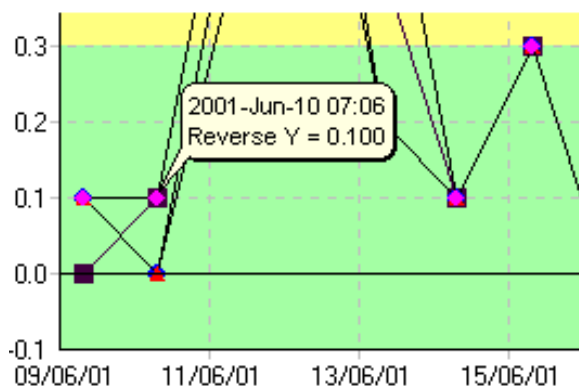
Уколико корисник жели да прегледа одређено подручје на хистограму може кликнути и превући мишем преко подручја, односно области графикана које жели да прегледа, а затим отпусти тастер миша. Софтвер ће увећати одабрану област и приказати детаљније информације [21]. На слици 6.12 је приказан прозор хистограма пре и након увећавања, односно зумирања.



Слика 6.12: Прозор “историје машине” пре и након увећања [21]

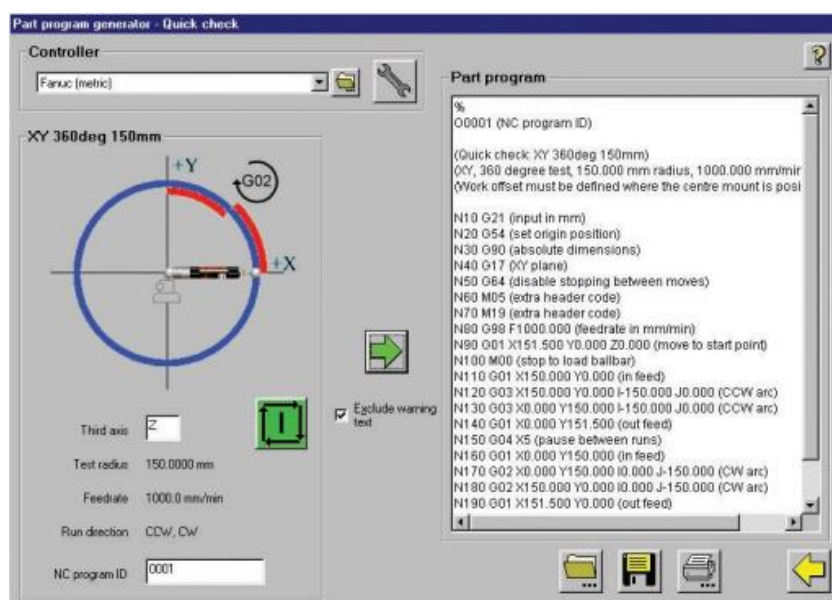
Софтвер омогућава постављање показивача миша преко било које тачке на графикону чиме ће подаци за ту тачку бити приказани. Ове информације укључују датум и време

теста и приказ вредности. Двоклик на тачку на графикону приказује податке за ту тачку [21].



Слика 6.13: Приказ информација тачке на графикону [21]

Могуће је за изабрану машину и контролер аутоматски генерисати програм за кретање машине и алата за *QC10 Ballbar* тест у генератору програма. Тада се генерисани програм може прегледати на екрану, експортирати и пребацивати на машину [12]. На слици 6.14 приказан је прозор генератора програма.



Слика 6.14: Прозор генератора програма [21]

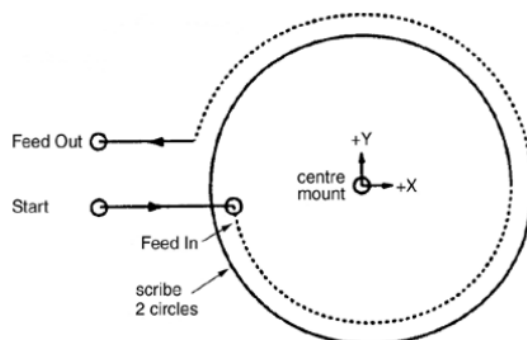
Генератор програма омогућава аутоматско генерисање програма за одређени одабрани *QC10 Ballbar* тест. Да би креирао програм, све што корисник треба да уради је да одабере постојећи образац за тест, да изабере унапред дефинисани *CNC* контролер и на крају да кликне на дугме „генериши“. Свако ко користи овај генератор програма мора да се увери да је програм погодан за машину/контролр на којем се користи [19, 21].

На следећој слици приказан је практичан пример *NC* програма за тестирање машине *QC10 Ballbar* уређајем.

```

PART PROGRAM
G54;                      (apply work offsets)
G90;                      (absolute dimensions)
M05;                      (spindle off)
G17;                      (movement in xy plane)
G98 F1000;                (set feedrate, mm/min)
G01 X-101.5 Y0.0 Z0.0;    (move to start point)
M00;                      (pause to fit ballbar)
G01 X-100.0 Y0.0;         (perform feed in)
G03 I100.0 J0.0;          (360 degree CCW arc)
G03 I100.0 J0.0;          (360 degree CCW arc)
G01 X-101.5 Y0.0;         (perform outfeed)
G04 X3.0;                 (pause to change software
                           direction)
G01 X-100.0 Y0.0;         (perform feed in)
G02 I100.0 J0.0;          (360 degree CW arc)
G02 I100.0 J0.0;          (360 degree CW arc)
G01 X-101.5 Y0.0;         (perform outfeed)
M30;                      (program end)

```



Слика 6.15: NC програм за тестирање CNC глодалице [21]

*Ballbar plot simulator* (слика 6.15) је моћан алат за доношење одлука за корективне акције приликом одржавања и калибрисања машине, односно уклањању евидентираних грешака. Симулатор омогућава кориснику да види резултате *QC10 Ballbar* тестирања на екрану и онда да променама геометријских, кинематских и динамичких параметара машине види „шта ако“ резултате на *Ballbar* графику и прати њихов свеукупни утицај на вредности циркуларности и позиционе толеранције машине. Могуће је памтити различите „ситуације“ у посебан фајл, без утицаја на оригиналне резултате мерења [12]. Практичан пример коришћења симулатора детаљније је приказан у поглављу 7.

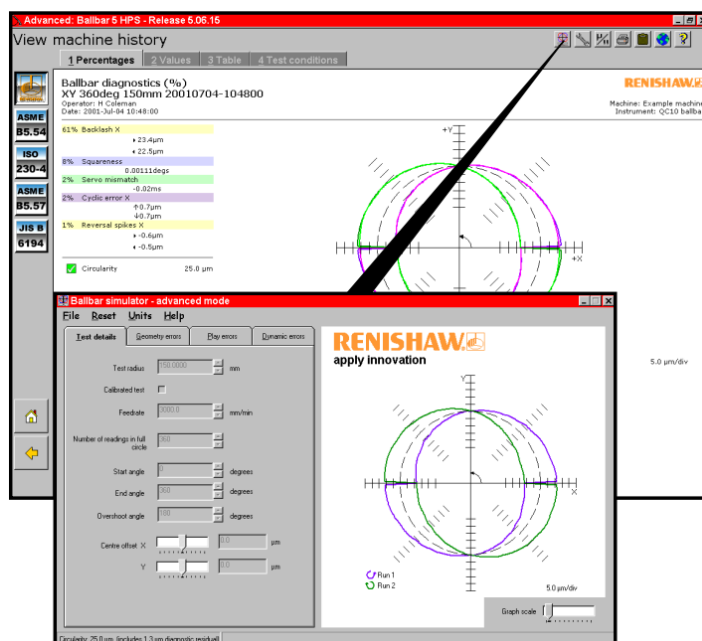
*Ballbar 5 HPS* софтверски пакет води корисника приликом коришћења кроз припрему теста и кроз само тестирање. Измерене вредности се лако виде, чак и у току самог извођења теста, приказивањем на екрану у реалном времену [10]. На сликама 6.16 – 6.27 приказани су карактеристични прозори *Ballbar 5 HPS* софтверског пакета.

На слици 6.16 приказан је почетни екран при уласку у софтвер, при чему се нуди избор три модула за рад:

- покретање новог теста машине,
- преглед претходних резултата тестирања, као и
- преглед историје машине.

При одабиру модула за покретање новог теста машине отвара се екран где се може креирати нова машина за тестирање, као што је приказано на слици 6.17. Након дефинисања података машине отвара се екран приказан на слици 6.18. Ту се креира нови тест или прави списак више тестова спроведених за претходно дефинисану машину.

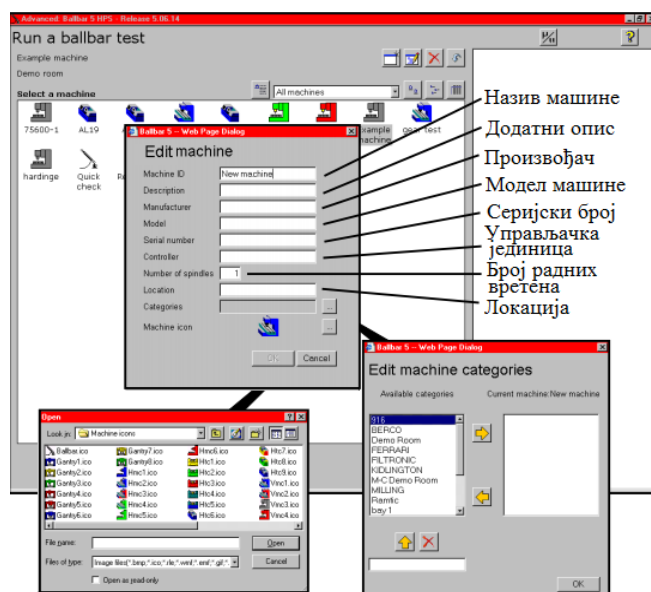
На сликама 6.19 и 6.20 приказана су два глана екрана у софтверу, помоћу којих се врши подешавање параметара *Ballbar* теста.



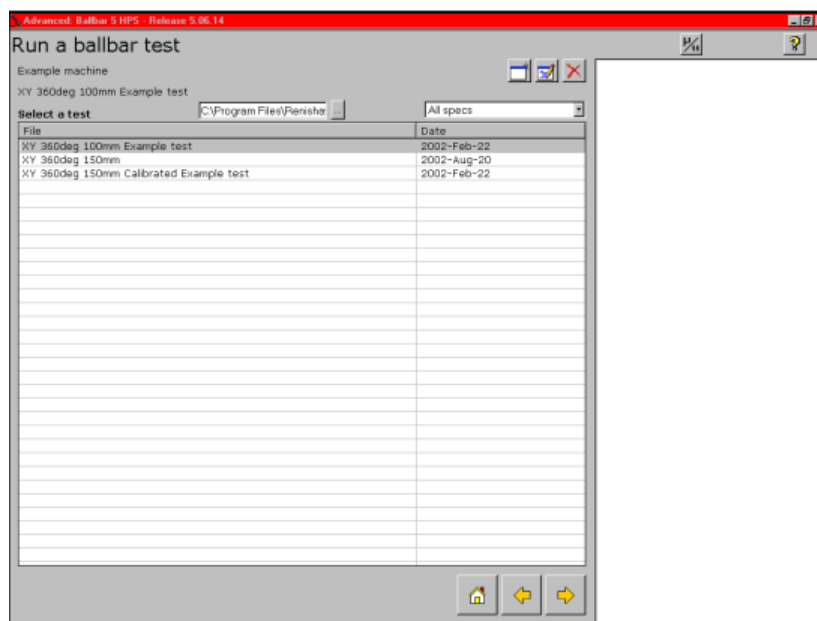
Слика 6.15: Прозор *Ballbar plot simulator* [21]



Слика 6.16: Основни екран *Ballbar 5 HPS* софтвера [21]

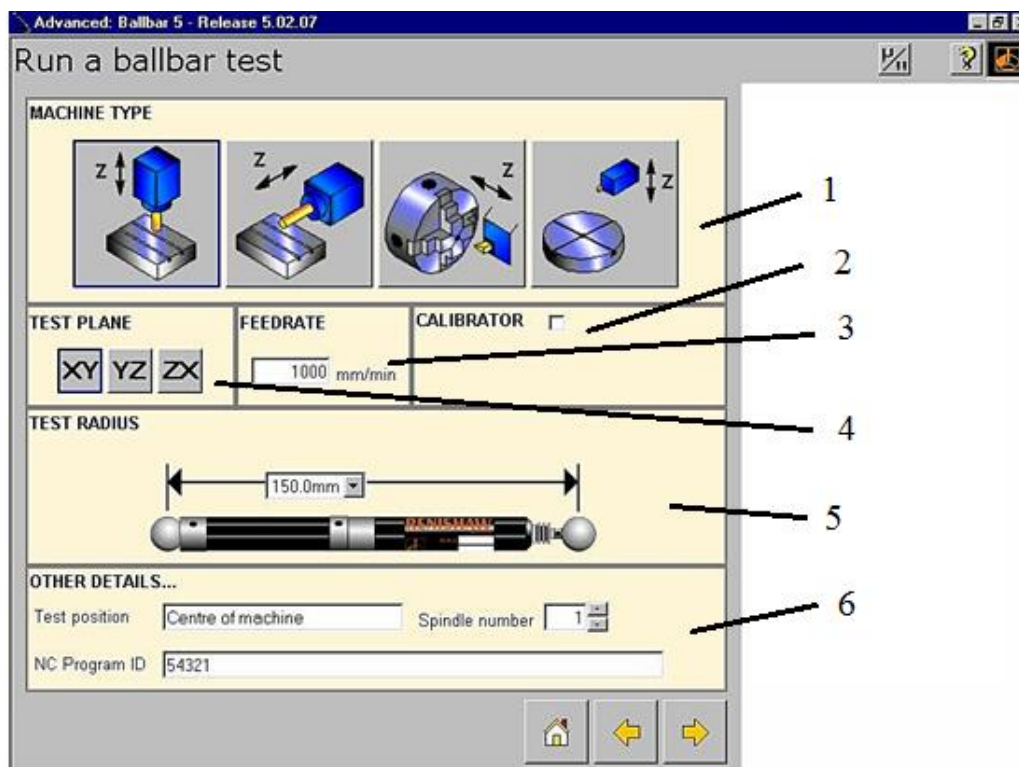


Слика 6.17: Дефинисање машине за тест



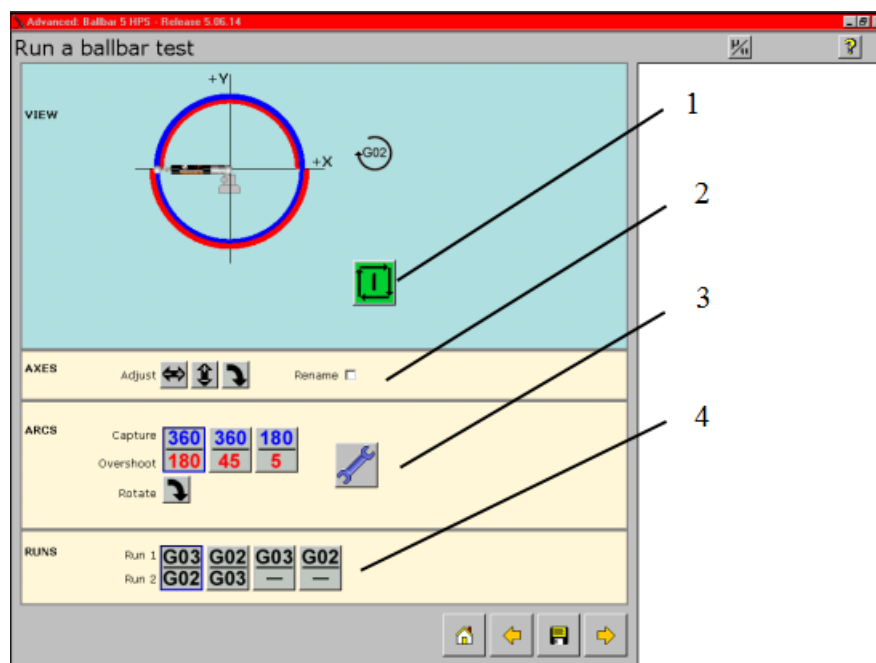
Слика 6.18: Креирање новог теста

На првом екрану за подешавање параметара (слика 6.19) врши се избор типа машине у смислу положаја радног стола и вретена машине (1). Затим се врши избор равни у којој се врши тестирање (4), задавање брзине помоћног кретања (3) и чекирање да се користи калибратор са задавањем коефицијента експанзије радијус теста (2). На позицији (5) врши се унос вредности изабраног радијус теста и у пољу (6) уносе се допунске информације као што су: позиција на радном столу у којој се врши тест машине, број вретена и под којим називом ће се сачувати креирани програм.



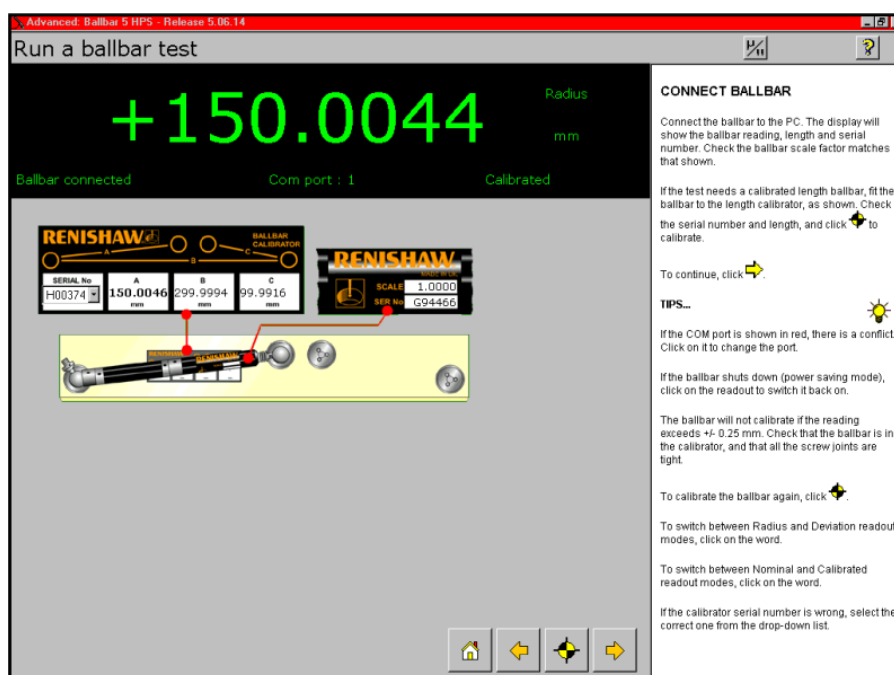
Слика 6.19: Параметри Ballbar теста

Притиском на стрелицу „напред“ отвара се наредни екран за подешавање параметара (слика 6.20) у ком се дефинише почетни положај уређаја помоћу тастера (2), затим се врши подешавање позиције у којој се врши „увлачење/извлачење“ сензора (3), затим се бира редослед смера окретања и притиском на дугме (1) врши се симулација теста према подешеним параметрима на приказаном екрану. Након тога, стрелицом напред прелази се у екран за креирање програма (слика 6.14).



Слика 6.20: Параметри Ballbar теста

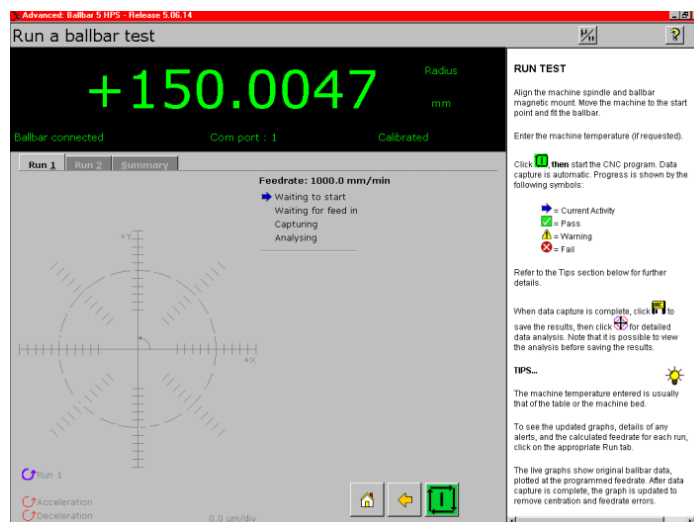
Када се заврше претходно приказана подешавања прелази се на калибрацију Ballbar радијус-шипке (слика 6.21). Каблом се повезује сензор за калибрацију и рачунар, а затим се куглице Ballbar радијус-шипке постављају на места сензора за калибрацију (такође приказано на слици 6.21).



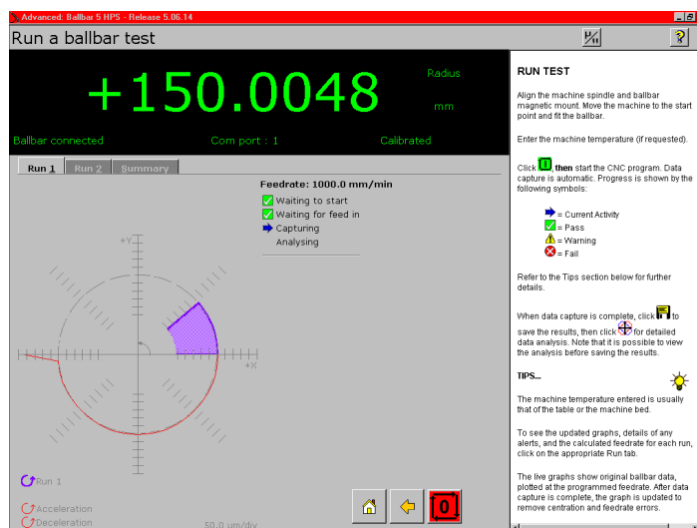
Слика 6.21: Калибрација Ballbar радијус-шипке

После калибрације, врши се постављање *Ballbar* носача на радну машину (слика 6.5). Након тога се покреће теста у следећим корацима:

1. Стартује се програм машине како би машина заузела почетну позицију, а затим паузирала програм – „M00“
2. Поставља се *Ballbar* шипка у лежишта носача
3. Проверава се да ли су сви прекидачи за поништавање постављени на 100%
4. Покреће се софтвер притиском на зелено дугме (слика 6.22), при чему ће софтвер приказати упит „Чека се улазак“ (слика 6.23). Притиском на дугме се покреће циклус на алатној машини.

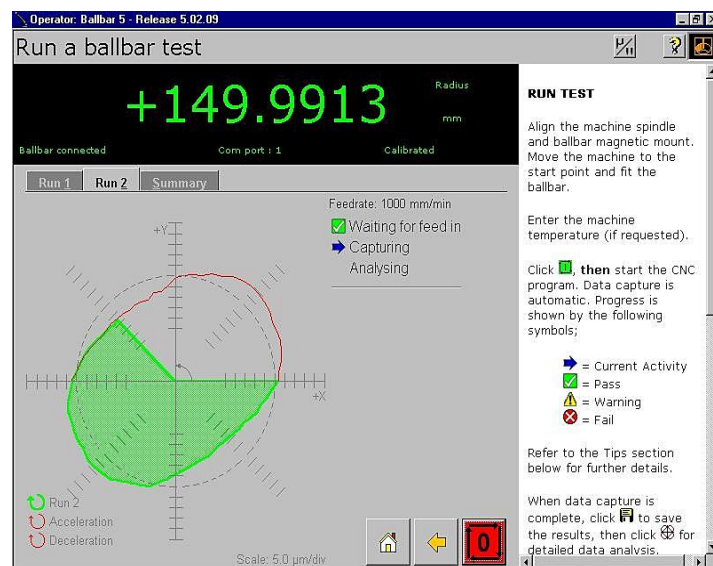


Слика 6.22: Екран пре покретања софтвера

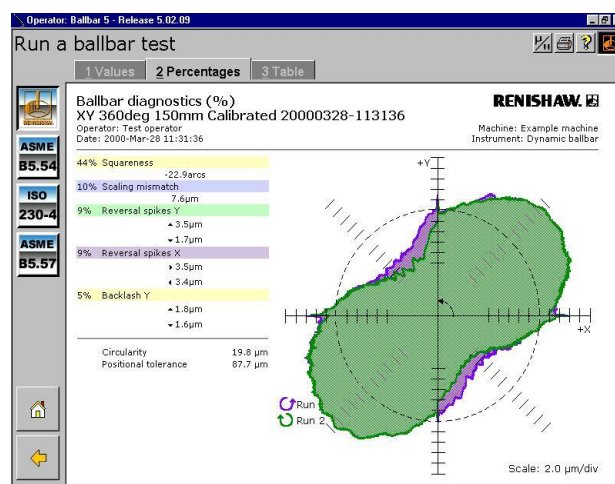


Слика 6.23: Стартована симулација у софтверу и чекање на стартовање циклуса на машини

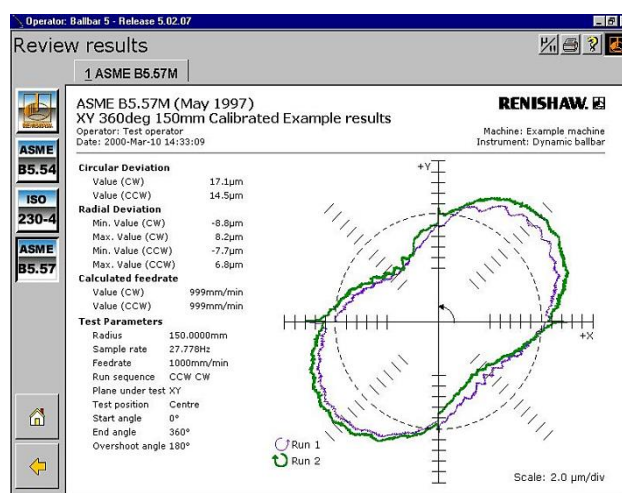
На слици 6.24 приказан је изглед екрана док је у току ротирање *Ballbar* уређаја на машини. На слици 6.25 приказан је изглед резултата који су приказани преко *Renishaw* стандарда, а на слици 6.26 изглед резултата који су приказани преко *ASME* стандарда.



Слика 6.24: Приказ прикупљања података мерења

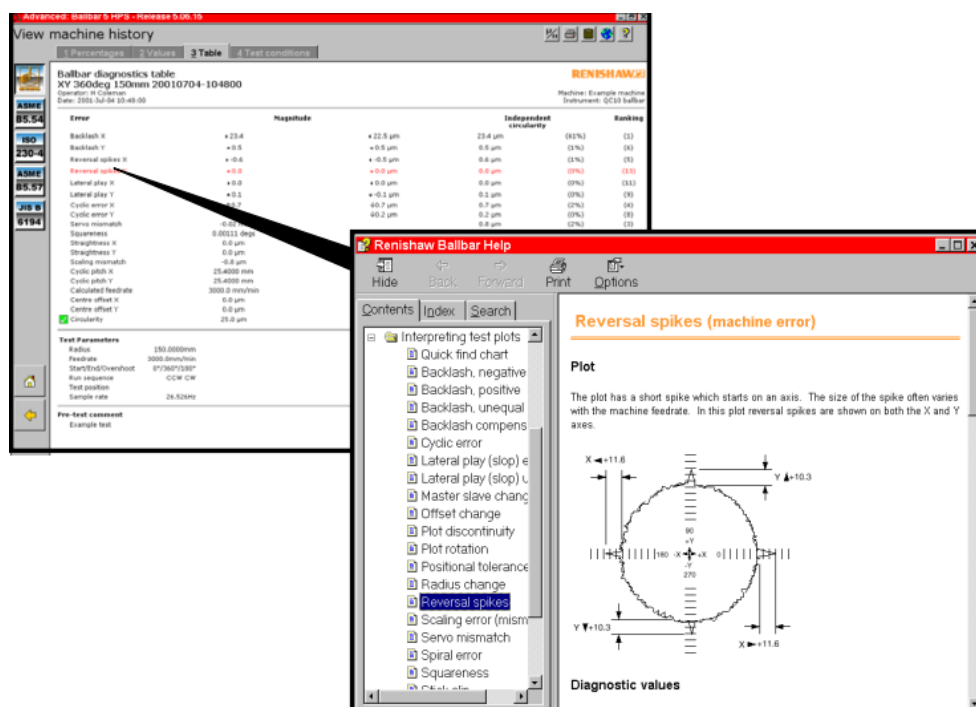


Слика 6.25: Резултати мерења, Renishaw стандард



Слика 6.26: Табеларни приказ резултата, ASME стандард

Кликом на неку од грешки на списку откривених грешака (слика 6.27) отвара се екран „On-line help” за појашњење грешке.



Слика 6.27: Екран за помоћ при тумачењу грешака

Софтвер омогућава да подесимо појединачне толеранције перформанси упозорења и отказа за сваку карактеристику машине и добијемо тренутна обавештења током QC10 Ballbar теста уколико перформансе премашују претходно подешене толеранције [12].

Софтвер Ballbar 5 представља врло моћан експертски систем који поред визуелног приказа сваке појединачне грешке нуди и њихово разјашњење. Прецизније речено, софтвер сам даје преглед за сваку грешку појединачно, затим узроке и последице које настају услед дате грешке и на крају и акције које је потребно предузети да би се та грешка отклонила [3].

### 6.3 Приказ и анализа грешака

Све појединачне грешке које Ballbar уређај може да идентификује манифестују се кроз вредности грешке циркуларности и грешке позиционе толеранције. Најбитнији дијагностички параметар је „Circularity“, односно грешка циркуларности и она представља збирну грешку свих дијагностификованих грешака на машини. У пракси то значи да ће машина у најгорем случају достићи вредност толеранције која одговара вредности овог параметра. На пример, ако је вредност „Circularity“ 20 µm, на машини се са сигурношћу могу израђивати делови тачности 2/100 mm). На оваквој машини се са великом вероватноћом могу израђивати и делови веће тачности, обзиром да „Circularity“ представља највећу могућу вредност грешке која се може јавити на испитиваној машини.

Циркуларност се дефинише као разлика између највећег и најмањег радијуса који је измерен помоћу QC10 Ballbar у току теста (користећи резултате који су измерени и приликом окретања компаратора у смеру супротном од смера казаљке на сату и

приликом окретања у смеру казаљке на сату). Што је већа вредност грешке циркуларности, лошије су перформансе машине [10, 21].

Вредност грешке позиционе толеранције (*Positional Tolerance*) је процена раванске, бидирекционе позиционе прецизности машине, унутар области која је покривена *Ballbar* тестом без оптерећења. Та вредност се директно односи на толеранцију која је обележена на инжењерским цртежима, према томе вредност позиционе толеранције се користи за процену способности машине да обради одређени комад са релативном позицијом фичера у односу на неки други у толеранцији која је обележена на цртежу.

Вредност грешке позиционе толеранције се рачуна математичким путем, комбиновањем ефеката следећих дијагностичких параметара [10, 21]:

- зазор у правцима обе осе (*Backlash*),
- бочни зазор у правцима обе осе (*Lateral Play*),
- циклична грешка обе осе (*Cyclic Error*),
- управност обе осе (*Straightness*),
- грешка размере на обе осе (*Scaling Error*) и
- квадратичност између оса (*Squareness*).

За неке од дијагностификованих грешака узрок је *грешка машине*, док је за друго узрок *грешка теста*. *Машинске грешке* представљају грешке или недостатке у машини која се тестира, док су *грешке теста* недостаци у *Ballbar* мерном систему или у начину спровођења тестирања [10, 21].

## 6.4 Смернице и савети за спровођење теста

Пре снимања података и њиховог коришћења у дијагностичке сврхе, морају се узети у обзир бројни фактори који ће помоћи успешно спровођење тестова. То су веома важни концепти, јер дијаграми који су настали као резултат лоших или нетачних поступака извођења испитивања могу имати неочекиване резултате. Тиме ће се вероватно добити нетачна дијагноза грешке.

Да би се избегли описани проблеми и постигли најбољи могући резултати од софтвера *Ballbar*, тестови се морају извршити према следећим смерницама [21]:

- Увек извршити пробни рад програма који је добијен преко генератора програма пре него што се причврсти *QC10 Ballbar* за машину.
- Обавезно затегнути све спојеве на *Ballbar* склопу уређаја пре тестирања. Лабави зглобови могу довести до исписивања дијаграма „троструко уво (*Tri – Lobe*)“
- Проверити да ли су *Ballbar* и држач алата очишћени од разних нечистоћа, масти и прљавштвина, а посебно се уверити да ли је струготина уклоњена са магнетних подручја склопа уређаја *Ballbar* јер се веома лако оштећују. Такви проблеми могу довести до дијаграма „троструко уво (*Tri – Lobe*)“
- Пре тестирања се корисник мора уверити да је централни носач правилно и чврсто центриран
- Увек сачекати неколико минута да се температура *Ballbar* уређаја изједначи са температуром околине током монтаже и између извођења више тестова.

Колебања температуре могу изазвати настанак „спиралне грешке (*Spiral Error*)“ на дијаграму.

- Извршити „суво покретање“ теста са постављеним *Ballbar* уређајем како би се проверило да ли кабл негде запиње или да уређај неће бити неочекивано оштећен додиром са осталим деловима машине или било којих других објеката. Ово ће такође омогућити проверу да ли се уређај помера изван свог радног опсега
- Обавезно следити исправан поступак испитивања - померити уређај до почетне тачке, започети прикупљање података, активирати главни програм са брзином обртања
- Уколико се машина која се испитује користи за обраду великих делова, користити дужу шипку за *Ballbar* уређај, где се тако може извршити тестирање целог радног простора машине. Међутим, треба имати на уму да ће најкраћа дужина *Ballbar* – а нагласити чисте динамичке грешке машине
- Користити велику брзину кретања машине, јер ће ово нагласити динамичке ефекте на машини. Стандард *ASME B5.54* препоручује динамичка испитивања при 10% и 80% брзине машине. Смањивање грешака при већим брзинама би требало да умањи грешке добијене у свакодневној употреби машине.
- Проверити да ли је брзина машине иста као она подешена у софтверу *ballbar* током тестирања и добијања података.
- Уверити се да је контрола прекорачења брзине машине на контролеру подешена на 100%

## 6.5 Примена резултата тестирања

Јасно је да је веома корисно упоредити резултате грешке позиционе толеранције, које се добију помоћу *ballbar* софтвера, и толеранције на радионичким цртежима. Међутим, да би се постигли најбољи резултати, потребно је приликом коришћења резултата обратити пажњу на следеће:

- *Ballbar* тест се изводи на машини која није под оптерећењем. Због тога резултат грешке позиционе толеранције не укључује грешке које су проузроковане машинским или алатним одступањима која зависе од механичких и термичких оптерећења радног комада и машине. Приликом финалне обраде комада потребно је користити ниже вредности брзине помоћног кретања како би се минимизовале те грешке.
- Резултати грешке позиционе толеранције не укључује грешке које су проузроковане лошим серво спојем и грешком преокретних шиљака, и због тога их не треба користити за процену прецизности машине која може да обрађује комплексне интерполиране профиле при високим брзинама обраде. Овекве грешке се такође могу минимизовати уколико се приликом завршне обраде користе ниже вредности брзине помоћног кретања.
- Резултат грешке позиционе толеранције укључује грешке зазора обе осе. Ако се критични радни комад обрађује користећи унидирекциони приступ онда ће се избећи грешке зазора.

- Зато што грешка позиционе толеранције укључује грешку размере, есенцијално је да се *ballbar* калибрише исправно, и да се примени одговарајућа термичка компензација. Корисније би било да се уведе фактор температурне компензације и фактор експанзије радног комада него машине. Грешке приликом калибрације и температурне компензације ће се одразити на грешку размере (биће већа), а на тај начин и на грешку позиционе толеранције.
- Грешка позиционе толеранције је веома осетљива на грешке у серво уређају, и то може да изазове смањење задатог радијуса са повећањем брзине помоћног кретања. Тестови који се изводе при већим брзинама помоћног кретања ће вероватно показати већу грешку размере, а према томе и већу грешку позиционе толеранције. Због тога је веома важно да се тест изведе при одговарајућој вредности брзине помоћног кретања. Препоручује се да то буде вредност која износи 10% максималне вредности брзине помоћног кретања машине. Алтернативно, могу се користити вредности брзине помоћног кретања, приликом извођења теста, које су приближне вредностима које се користе приликом фине завршне обраде.
- Резултати грешке позиционе толеранције се односе само на област равни која је затворена са кругом који се описује током *ballbar* теста. Због тога се препоручује да се радијус тест круга одабере тако да одговара величини типичног радног комада и да се његов центар поклопи са центром радног комада. Такође, у зависности од величине радног комада, препоручује се да се уради више тестова у паралелним и нормалним равнима пре доношења било каквог закључка, посебно ако радни комади садрже критичне тродимензионе толеранције.
- Резултат позиционе толеранције се односи на прецизност података фичера који се налази унутар тест зоне, и укључује фичере који су на растајању до величине пречника који је коришћен приликом теста. Генерално, фичери који су ближе један другом ће имати боље резултате позиционе толеранције од измерених.
- Добијени резултати позиционе толеранције не укључују грешке алата, стезног прибора и радног стола (нпр., похабани алат или нетачан офсет алата). *Ballbar* позициона толеранција се односи само на фичере који се обрађују на машини са истим позиционирањем приликом обраде. Не односи се на фичере који се обрађују са другачијим позиционирањем, или на друге машине, пошто они примарно зависе од прецизности прибора и позиционирања.
- Ако се појави нискофреквентна циклична грешка у комбинацији са грешком размере у истој оси, софтвер може да мало прецени вредности грешке позиционе толеранције [10].

## 7. Студија случаја мерења тачности CNC машине

У овом поглављу биће приказана студија случаја са резултатима тестирања CNC машине коришћењем *QC10 Ballbar* уређаја. Мерење и тестирање је реализовао Центар за виртуелну производњу, Факултета инжењерских наука у Крагујевцу у компанији УНИОР из Крагујевца.

### 7.1 Дефиниција проблема

Потребно је било извршити мерење перформанси CNC глодалице **Mikron VCP 1350** (слика 7.1), у једној равни (XY) са више понављања, коришћењем *RENISHAW* уређаја *QC10 Ballbar*. Након мерења, анализом добијених резултата, и одступања од стандарда и прописане тачности машине, у софтверу *BALLBAR 5* треба моделирати промене параметара грешки, за процену тачности машине [12].



Слика 7.1: Мерење перформанси CNC глодалице Mikron VCP 1350 [12]

### 7.2 Резултати мерења

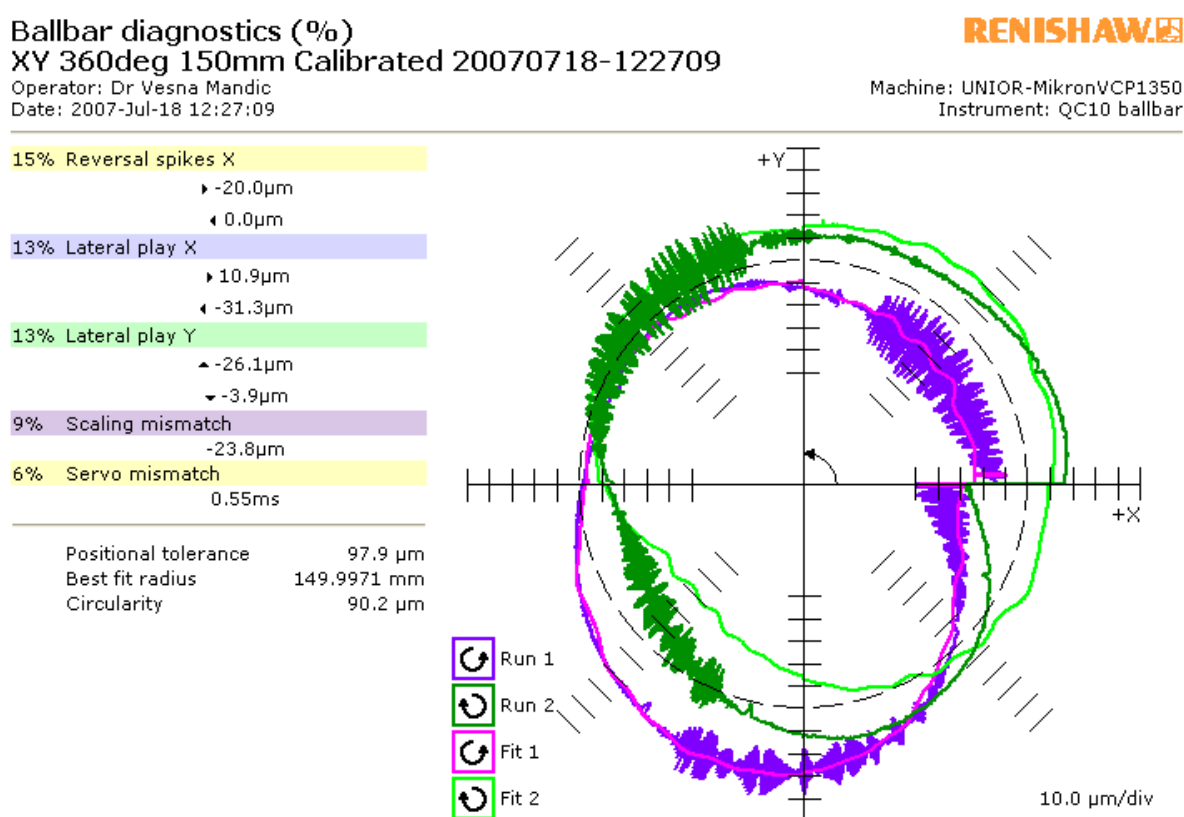
Тестирање машине је обухватило три мерења. Два мерења су урађена на истом месту на средини радног стола, како би се потврдило да није дошло до неких грешака током тестирања и треће мерење је урађено ближе десној ивици радног стола. Сва три мерења показала су приближно исте резултате. Софтвер *Ballbar 5*, издваја пет најугицајнијих грешака. Међутим, с обзиром да су урађена три мерења за исту машину, размотрене су апсолутно све грешке које софтвер може да идентификује. На основу тога издвојене су само оне грешке које имају преко 5% утицаја. Тиме је у анализи обухваћено 70% укупних грешака машине, чије су вредности вариране и у симулатору. Остале грешке су имале процентуални удео у свим грешкама мањи од 5%, па самим тим и њихова корекција не би значајно допринела повећању тачности рада машине. Добијени резултати мерења перформанси глодалице приказани су у табели 7.1.

Табела 7.1: Резултати мерења

|                                         | Прво мерење | Друго мерење | Треће мерење |
|-----------------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| Позициона толеранција ( $\mu\text{m}$ ) | 97.9        | 104.8        | 104.3        |
| Циркуларност ( $\mu\text{m}$ )          | 90.2        | 87.5         | 80.7         |

На следећим сликама приказани су резултати мерења који обухватају: извештај из софтвера *Ballbar 5*; табеле са вредностима сваке откривене грешке појединачно и са анализом узрока, последице и препорученим корективним акцијама за ту грешку; уз добијене вредности, приказана је и пратећа употреба симулатора добијених резултата, за бољи преглед резултата и лакшу процену за калибрацију машине.

На сликама 7.2, 7.3 и 7.4 приказани су резултати мерења у *Ballbar* софтверу. Резултати су приказани у *Renishaw* стандарду.



Слика 7.2: Извештај резултата после првог мерења [12]

### Ballbar diagnostics (%) XY 360deg 150mm Calibrated2 20070718-125905

Operator: Dr Vesna Mandić  
Date: 2007-Jul-18 12:59:05

**RENISHAW**

Machine: UNIOR-MikronVCP1350  
Instrument: QC10 ballbar

#### 17% Reversal spikes X

► -21.1µm  
◄ 1.4µm

#### 14% Lateral play X

► 11.7µm  
◄ -32.1µm

#### 12% Lateral play Y

▲ -22.6µm  
▼ -7.2µm

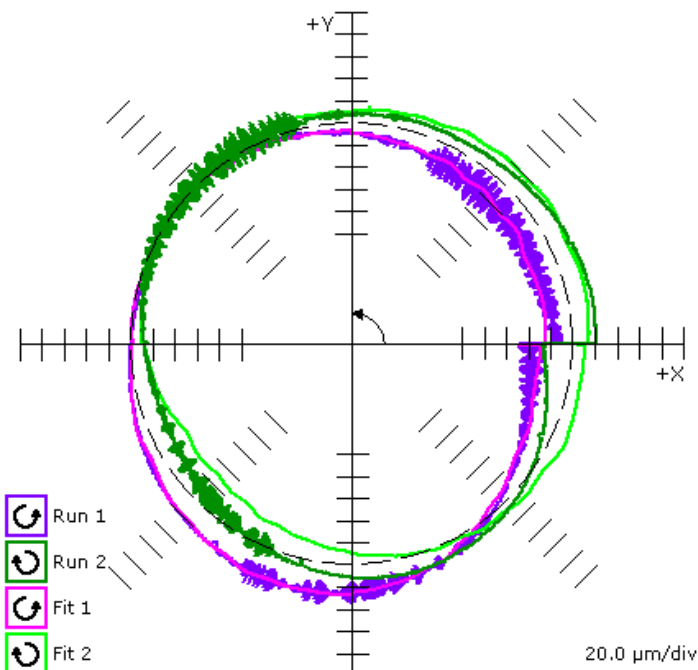
#### 8% Scaling mismatch

-22.0µm

#### 5% Straightness X

14.4µm

Positional tolerance 104.8 µm  
Best fit radius 150.0098 mm  
Circularity 87.5 µm



Слика 7.3: Извештај резултата после поновљеног мерења [12]

### Ballbar diagnostics (%) XY 360deg 150mm Calibrated6 20070718-134418

Operator: Dr Vesna Mandić  
Date: 2007-Jul-18 13:44:18

**RENISHAW**

Machine: UNIOR-MikronVCP1350  
Instrument: QC10 ballbar

#### 15% Reversal spikes X

► -21.5µm  
◄ -6.0µm

#### 15% Lateral play X

► 16.6µm  
◄ -37.4µm

#### 13% Reversal spikes Y

▲ 4.4µm  
▼ -14.6µm

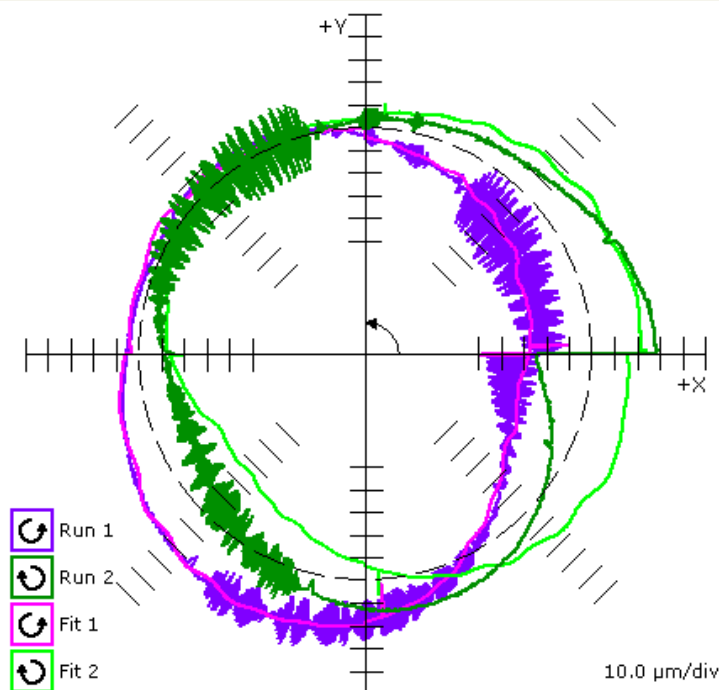
#### 11% Lateral play Y

▲ -17.6µm  
▼ -13.2µm

#### 7% Servo mismatch

0.68ms

Positional tolerance 104.3 µm  
Best fit radius 149.9907 mm  
Circularity 80.7 µm



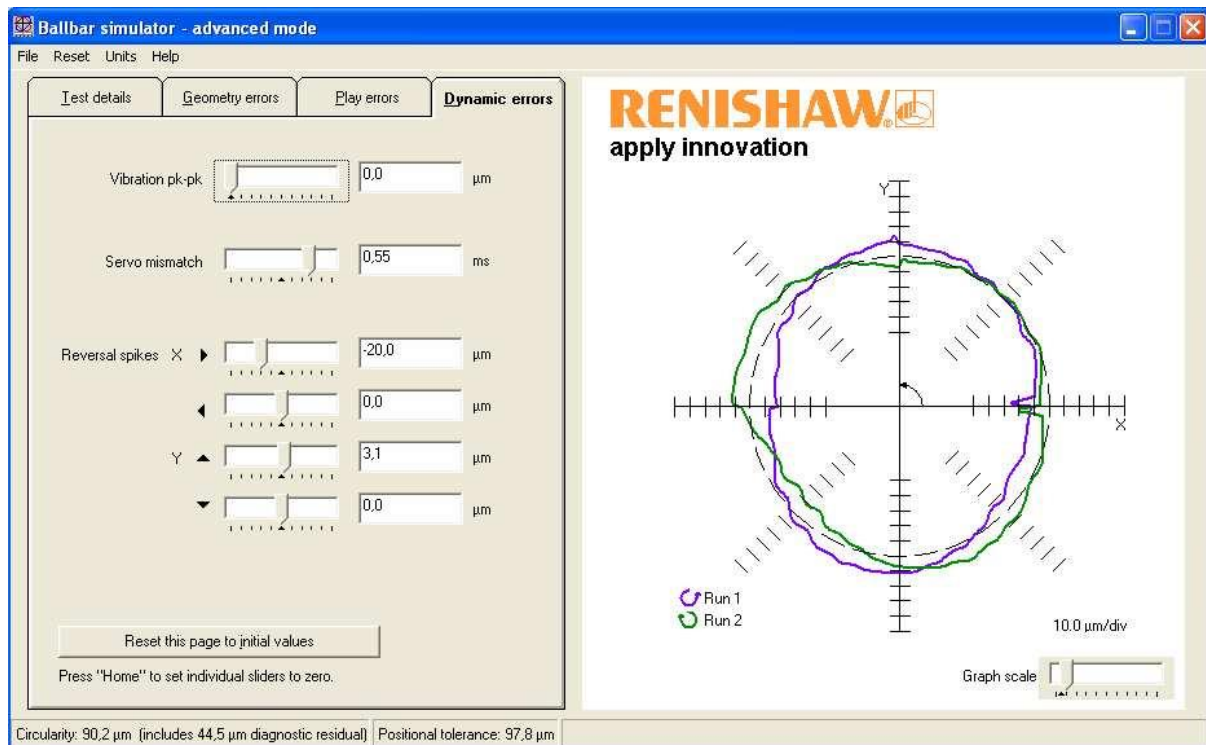
Слика 7.4: Извештај резултата после трећег мерења [12]

У табели 7.2 приказане су добијене вредности грешке „Преокретни шиљци“.

**Табела 7.2: Вредности грешке „Преокретни шиљци“ (Reversal Spikes) [12]**

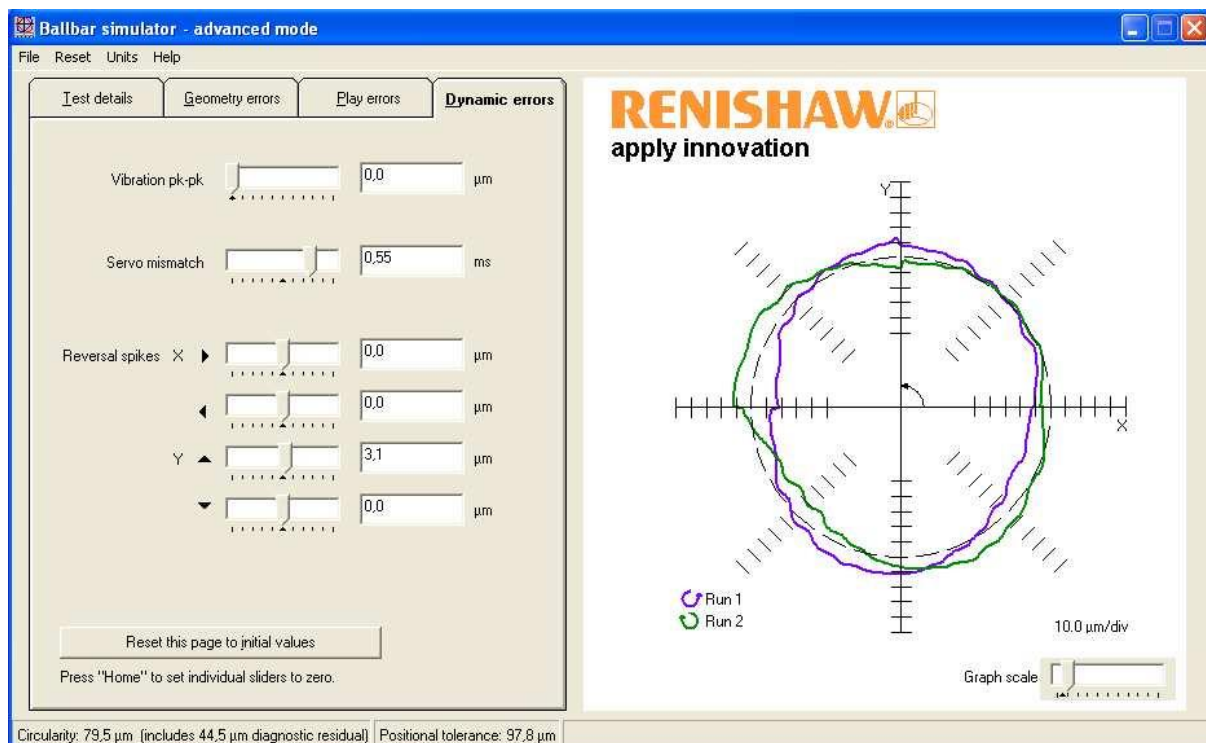
|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                       |                    |  |                |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|--|----------------|
| <b>1.</b>        | <b>Преокретни шиљци по X оси – Reversal Spikes X</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                       |                    |  | <b>15.67 %</b> |
| <b>1. Мерење</b> | ► - 20.0 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ◄ 0.0 $\mu\text{m}$   | 20.0 $\mu\text{m}$ |  | 15 %           |
| <b>2. Мерење</b> | ► - 21.1 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ◄ 1.4 $\mu\text{m}$   | 22.5 $\mu\text{m}$ |  | 17 %           |
| <b>3. Мерење</b> | ► - 21.5 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ◄ - 6.0 $\mu\text{m}$ | 21.5 $\mu\text{m}$ |  | 15 %           |
| <b>2.</b>        | <b>Преокретни шиљци по Y оси – Reversal Spikes Y</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                       |                    |  | <b>6 %</b>     |
| <b>1. Мерење</b> | ▲ 3.1 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ▼ 0.0 $\mu\text{m}$   | 3.1 $\mu\text{m}$  |  | 2 %            |
| <b>2. Мерење</b> | ▲ 3.7 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ▼ 0.0 $\mu\text{m}$   | 3.7 $\mu\text{m}$  |  | 3 %            |
| <b>3. Мерење</b> | ▲ 4.4 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ▼ -14.6 $\mu\text{m}$ | 19.0 $\mu\text{m}$ |  | 13 %           |
| <b>Узрок</b>     | <p>Када се оса погони у једном смеру и мора да промени смер и настави кретање у супротном смеру, уместо благог прелаза може да наступи пауза у преокретној тачки. Може постојати неколико узрока овом проблему:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• примењен је неодговарајући момент на оси погонског мотора у преокретној тачки који узрокује заостајање пошто силе трења мењају смер,</li> <li>• време одговора серво уређаја на машини није одговарајуће за компензацију зазора. То значи да машина не може да компензује зазор на време узрокујући заустављање осе.</li> </ul> <p>Одговор серво уређаја је преслаб и узрокује кратко кашњење осе које мања смер кретања.</p> |                       |                    |  |                |
| <b>Последица</b> | Последица преокретних шиљака је да на кружно интерполираној путањи долази до појаве тзв. степеница.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                       |                    |  |                |
| <b>Акција</b>    | Извршити одстрањивање шиљка ако машина има контролер са том могућношћу. У супротном треба применити одговарајући режим рада машине при ком ће последице преокретних шиљака бити минималне. Грешку је могуће елиминисати софтверски.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                       |                    |  |                |

На слици 7.5 приказан је добијени дијаграм стања машине након тестирања, а на слици 7.6 приказан је дијаграма стања машине након симулације уклањања грешке „Преокретни шиљци“ у симулатору.



Слика 7.5: Дијаграм стања пре отклања грешке преокретних шиљака у симулатору [12]

Отклањањем грешке преокретних шиљака и то само по х оси утиче се на смањење грешке циркуларности са вредности 90,2  $\mu\text{m}$  на вредност 79,5  $\mu\text{m}$ . Тиме се грешка циркуларности смањује за 10,7  $\mu\text{m}$ . Отклањање грешке преокретних шиљака нема утицаја на позициону толеранцију.



Слика 7.6: Дијаграм стања после отклања грешке преокретних шиљака у симулатору [12]

У табели 7.3 приказане су добијене вредности грешке „Бочни зазор“.

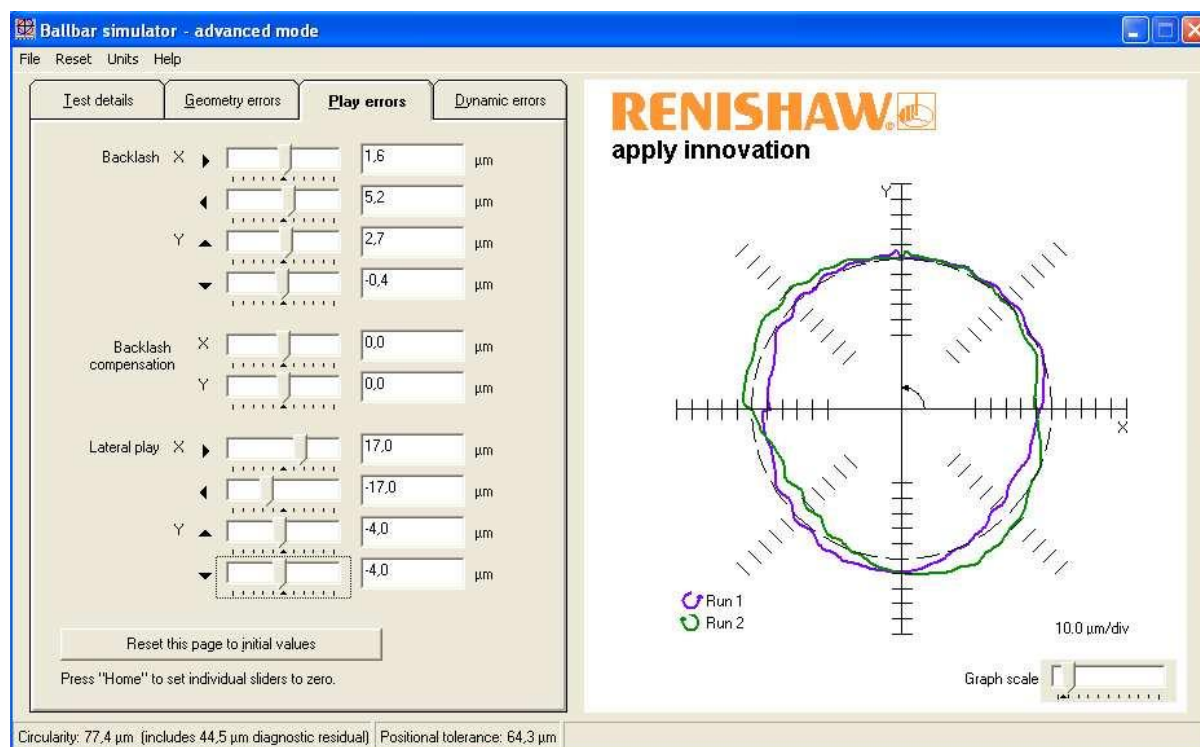
**Табела 7.3: Вредности грешке „Бочни зазор“ (Lateral Play) [12]**

| 3.        | Бочни зазор по Х оси – Lateral Play X                                                                                                                                                             |                        |                    | 14 % |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------|------|
| 1. Мерење | ► 10.9 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                              | ◄ - 31.3 $\mu\text{m}$ | 18.3 $\mu\text{m}$ | 13 % |
| 2. Мерење | ► 11.7 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                              | ◄ - 32.1 $\mu\text{m}$ | 18.7 $\mu\text{m}$ | 14 % |
| 3. Мерење | ► 16.6 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                              | ◄ - 37.4 $\mu\text{m}$ | 21.3 $\mu\text{m}$ | 15 % |
| 4.        | Бочни зазор по Y оси – Lateral Play Y                                                                                                                                                             |                        |                    | 12 % |
| 1. Мерење | ▲ - 26.1 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                            | ▼ - 3.9 $\mu\text{m}$  | 17.9 $\mu\text{m}$ | 13 % |
| 2. Мерење | ▲ - 22.6 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                            | ▼ - 7.2 $\mu\text{m}$  | 16.5 $\mu\text{m}$ | 12 % |
| 3. Мерење | ▲ - 17.6 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                            | ▼ - 13.2 $\mu\text{m}$ | 15.5 $\mu\text{m}$ | 11 % |
| Узрок     | Главни узрок бочног зазора је у вођицама машине. Уколико се ова грешка јави на х оси, значи да је проблем у оси која је нормална на њу – у.                                                       |                        |                    |      |
| Последица | Машина ће правити отворе који нису интерполирани правилним кругом. Приликом кретања алата у правцу Х осе долази и до његовог радијалног померања у правцу осе која је нормална на правац кретања. |                        |                    |      |
| Акција    | Извршити корекцију на вођицама машине или их заменити. Корекцију у овом случају увек треба вршити на компонентама које се налазе на оси нормалној на правац кретања. Грешка се уклања механички.  |                        |                    |      |

Отклањањем грешке бочног зазора по Х оси утиче се на смањење грешке циркуларности са 79,5  $\mu\text{m}$  на 79,1  $\mu\text{m}$ , што јесте занемарљив добитак. Међутим, кориговањем ове грешке утиче се на побољшање позиционе толеранције и то са вредности 97,8  $\mu\text{m}$  на вредност 82,5  $\mu\text{m}$ , што је побољшање за 15,3  $\mu\text{m}$ .

Отклањањем грешке бочног зазора по Y оси утиче се на смањење грешке циркуларности са 79,1  $\mu\text{m}$  на 77,4  $\mu\text{m}$ , Кориговањем ове грешке утиче се на побољшање позиционе толеранције и то са вредности 82,5  $\mu\text{m}$  на вредност 64,3  $\mu\text{m}$ , што је побољшање за 18,2  $\mu\text{m}$  [12].

На слици 7.7 приказан је дијаграм стања машине након симулације отклањања грешке „Бочни зазор“.

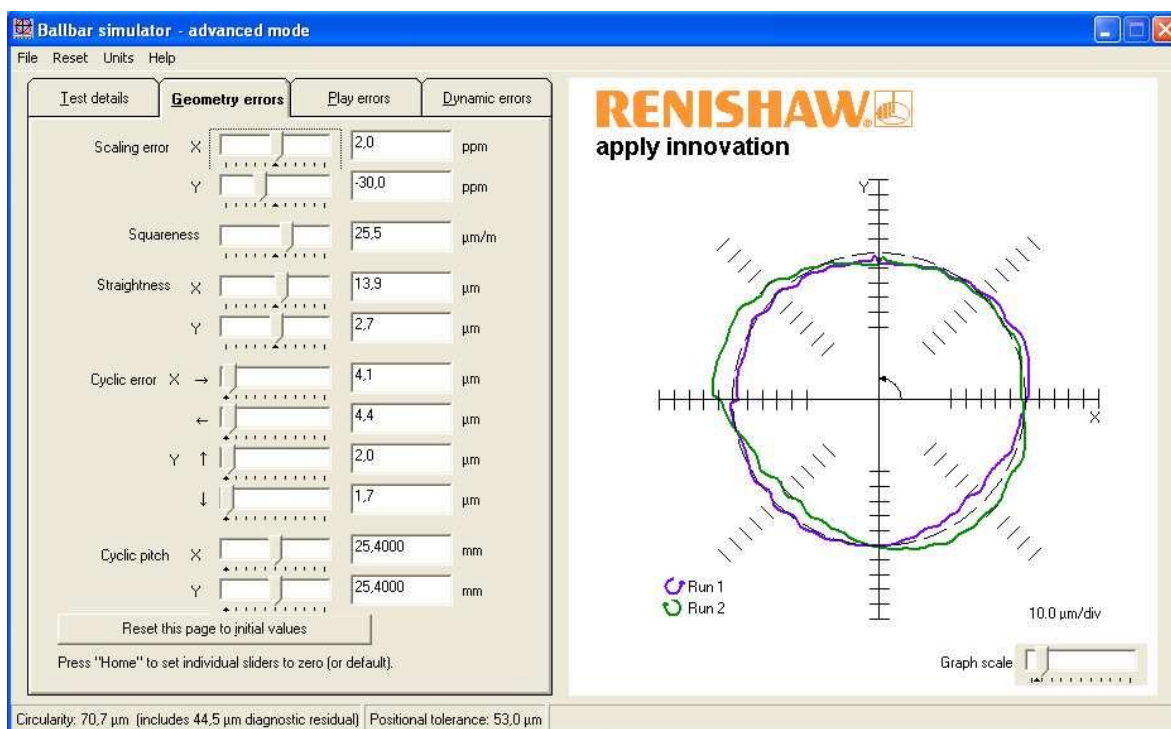


Слика 7.7: Дијаграм стања после отклањања грешке бочног зазора у симулатору [12]  
У табели 7.4 приказане су добијене вредности дефекта „Грешка размере“.

Табела 7.4: Вредности дефекта „Грешка размере“ (Scaling Mismatch) [12]

| 5.        | Грешка размере - Scaling Mismatch                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |         |  | 7,33 % |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------|--|--------|
| 1. Мерење | - 23.8 µm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 11.9 µm |  | 9 %    |
| 2. Мерење | -22.0 µm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  | 11.0 µm |  | 8 %    |
| 3. Мерење | -15.8 µm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  | 7.9 µm  |  | 5 %    |
| Узрок     | <p>Кретање оса машине није усклађено. Једна оса се креће брже од друге, и уместо да се интерполира правилан круг, добија се овалан облик криве. Узроци су:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>погрешно подешени параметри за компензацију линеарне грешке,</li> <li>мерна летва може да буде неправилно постављена,</li> <li>елементи кугличног вретена могу да буду прегрејани, итд.</li> </ul>                             |  |         |  |        |
| Последица | Последица грешке размере је да ће делови израђени на машини имати димензионалне грешке.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |         |  |        |
| Акција    | <p>Проверити да ли су вредности параметара компензације линеарне грешке исправно подешене.</p> <p>Проверити да ли су мерне летве правилно напрегнуте.</p> <p>Проверити стање кугличног вретена и да његови елементи нису прегрејани. Ако је потребно сервисирати их или заменити.</p> <p>Проверити стање вођица машине. Ако је потребно, исправити их или заменити.</p> <p>Грешка се алтернативно може елиминисати и софтверски.</p> |  |         |  |        |

Отклањањем грешке размере (слика 7.8) утиче се на смањење грешке циркуларности са 77,4  $\mu\text{m}$  на 70,7  $\mu\text{m}$ , што представља побољшање од 6,7  $\mu\text{m}$ . Такође, отклањањем ове грешке утиче се и на позициону толеранцију и то тако што се коригује са вредности 64,3  $\mu\text{m}$  на вредност 53,0  $\mu\text{m}$ , чиме се позициона толеранција побољшава за 11,3  $\mu\text{m}$ .



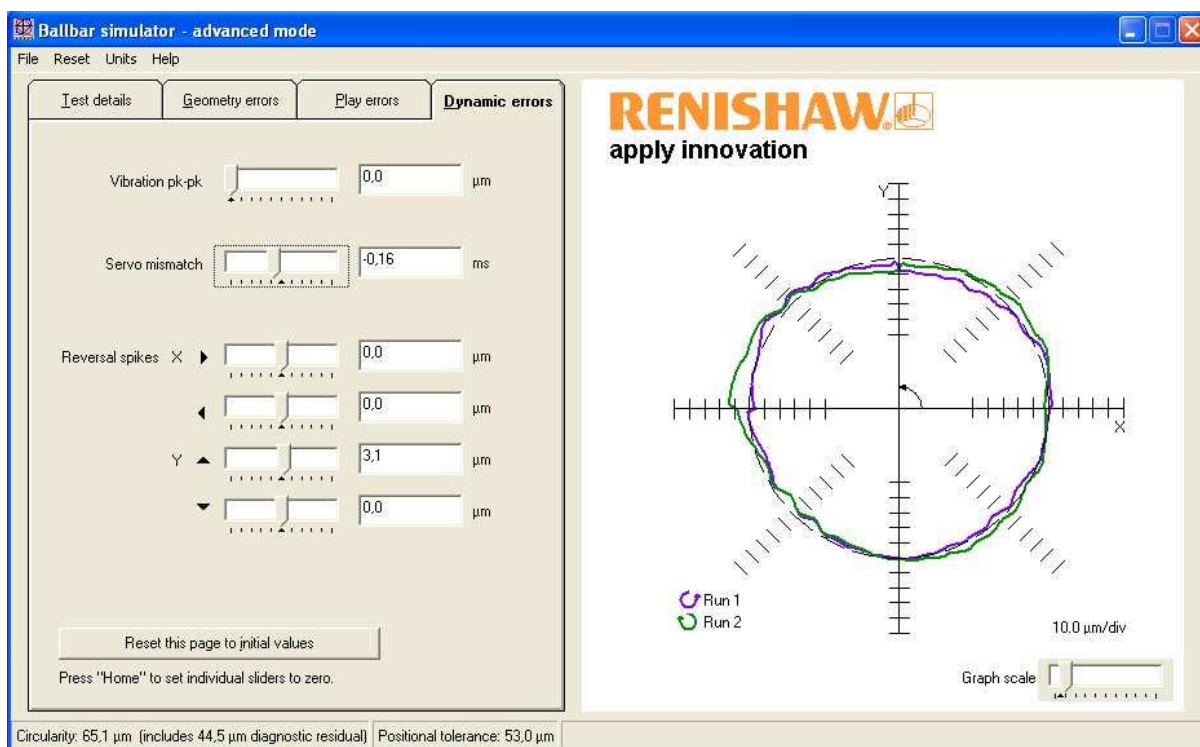
Слика 7.8: Дијаграм стања после отклања грешке размере у софтверу [12]

У табели 7.5 приказане су добијене вредности грешке „Лош сервоспој“.

Табела 7.5: Вредности грешке „Лош сервоспој“ (Servo Mismatch) [12]

| 6.        | Лош сервоспој - Servo Mismatch                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |                    | 6 % |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------|-----|
| 1. Мерење | 0.55 ms                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  | 7.9 $\mu\text{m}$  | 6 % |
| 2. Мерење | 0.48 ms                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  | 7.1 $\mu\text{m}$  | 5 % |
| 3. Мерење | 0.68 ms                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  | 10.1 $\mu\text{m}$ | 7 % |
| Узрок     | Лош сервоспој настаје када је приаштај серво петље осе неусклађен.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |                    |     |
| Последица | Последица лошег сервоспоја је да интерполиране кружнице неће бити правилног облика. Што се користи веће оптерећење тиме се грешка повећава.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |                    |     |
| Акција    | Подешавајући контролер машине треба уравнотежити приаштај серво петље оса. Треба повећати приаштај осе која заостаје или смањити приаштај осе која предњачи. Да би избегли ову грешку треба кориговати режим рада. Уколико је ова грешка најдоминантнија потребно је извршити још неколико мерења са различитим брзинама резања како би се утврдили оптимални режими обраде при којима би тачност била задовољавајућа. Грешка се компензује софтверским подешавањем. |  |                    |     |

Отклањањем грешке лошег сервоспоја (слика 7.9) утиче се на смањење грешке циркуларности. Она се са вредности 70,7  $\mu\text{m}$  смањује на 65,1  $\mu\text{m}$ , што представља корекцију тачности за 5,6  $\mu\text{m}$ . Отклањање грешке лошег сервоспоја нема утицаја на позициону толеранцију.



Слика 7.9: Дијаграм стања после отклањања грешке лошег сервоспоја у симулатору [12]

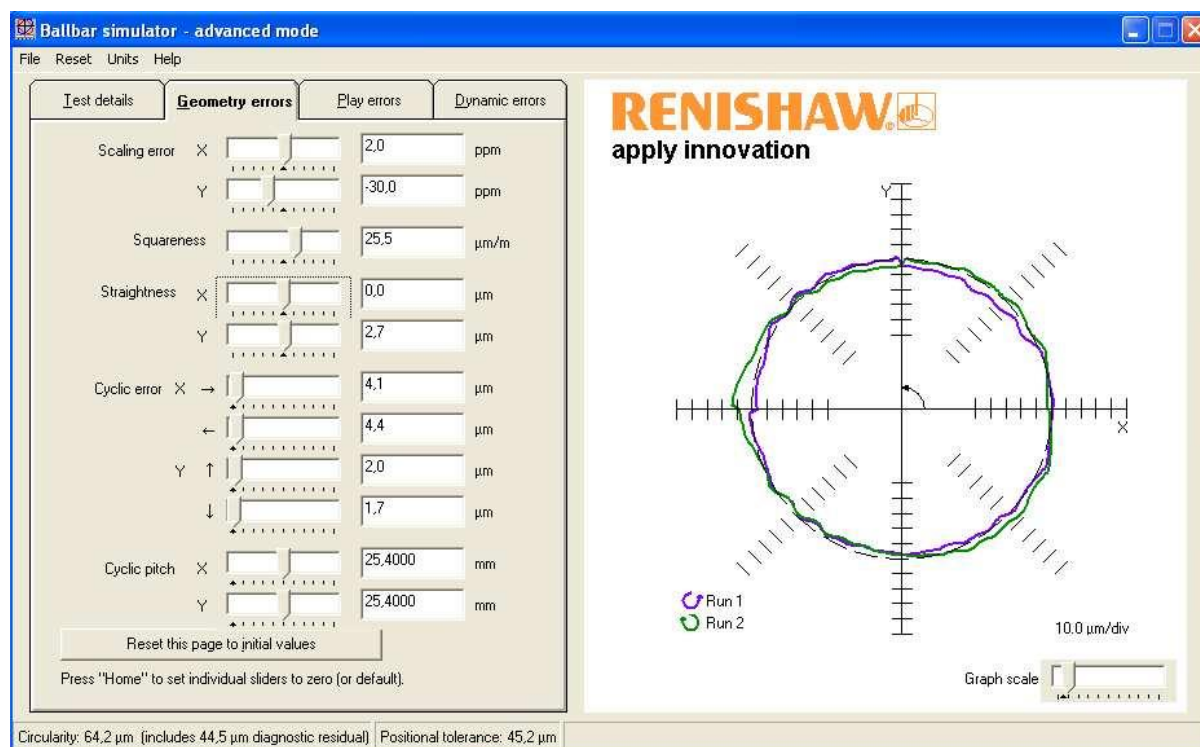
У табели 7.6 приказане су добијене вредности дефекта „Грешка управности“.

Табела 7.6: Вредности дефекта „Грешка управности“ (Straightness) [12]

| 7.        | Управност по X оси – Straightness X                                                                                                                                                                                |  |                    |  | 4.3 %  |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------|--|--------|
| 1. Мерење | 13.9 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                                                 |  | 18.3 $\mu\text{m}$ |  | 5 %    |
| 2. Мерење | 14.4 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                                                 |  | 18.7 $\mu\text{m}$ |  | 5 %    |
| 3. Мерење | 7.8 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                                                  |  | 21.3 $\mu\text{m}$ |  | 3 %    |
| 8.        | Управност по Y оси – Straightness Y                                                                                                                                                                                |  |                    |  | 0.67 % |
| 1. Мерење | 2.7 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                                                  |  | 1.3 $\mu\text{m}$  |  | 1 %    |
| 2. Мерење | 1.6 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                                                  |  | 0.8 $\mu\text{m}$  |  | 1 %    |
| 3. Мерење | - 0.1 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                                                                |  | 0.0 $\mu\text{m}$  |  | 0 %    |
| Узрок     | Грешка управности је узрокована услед закривљености вођица машине. Вођице могу да буду локално савијене или услед закривљености целе машине. Ово може да буде резултат похабаности вођица или лошег темеља машине. |  |                    |  |        |
| Последица | Обрада комада на машини ће бити лоша.                                                                                                                                                                              |  |                    |  |        |

|               |                                                                                                                     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Акција</b> | Сервисирати или заменити вођице машине ако је неопходно. Извршити нивелацију машине.<br>Грешка се уклања механички. |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Отклањање грешке управности по Х оси (слика 7.10) утиче на грешку циркуларности смањујући је са вредности 65,1  $\mu\text{m}$  на вредност 64,2  $\mu\text{m}$ , што јесте занемарљива корекција. Отклањање ове грешке коригује и вредност позиционе толеранције са 53,0  $\mu\text{m}$  на 45,2  $\mu\text{m}$ , што представља побољшање за 7,8  $\mu\text{m}$ . Отклањање грешке управности по Y оси нема значајнији утицај на смањење грешке циркуларности и позиционе толеранције.



**Слика 7.10:** Дијаграм стања после отклањања грешке управности у симулатору [12]

У табели 7.7 приказане су добијене вредности дефекта „Грешка зазора“.

**Табела 7.7:** Вредности дефекта „Грешка зазора“ (Backlash) [12]

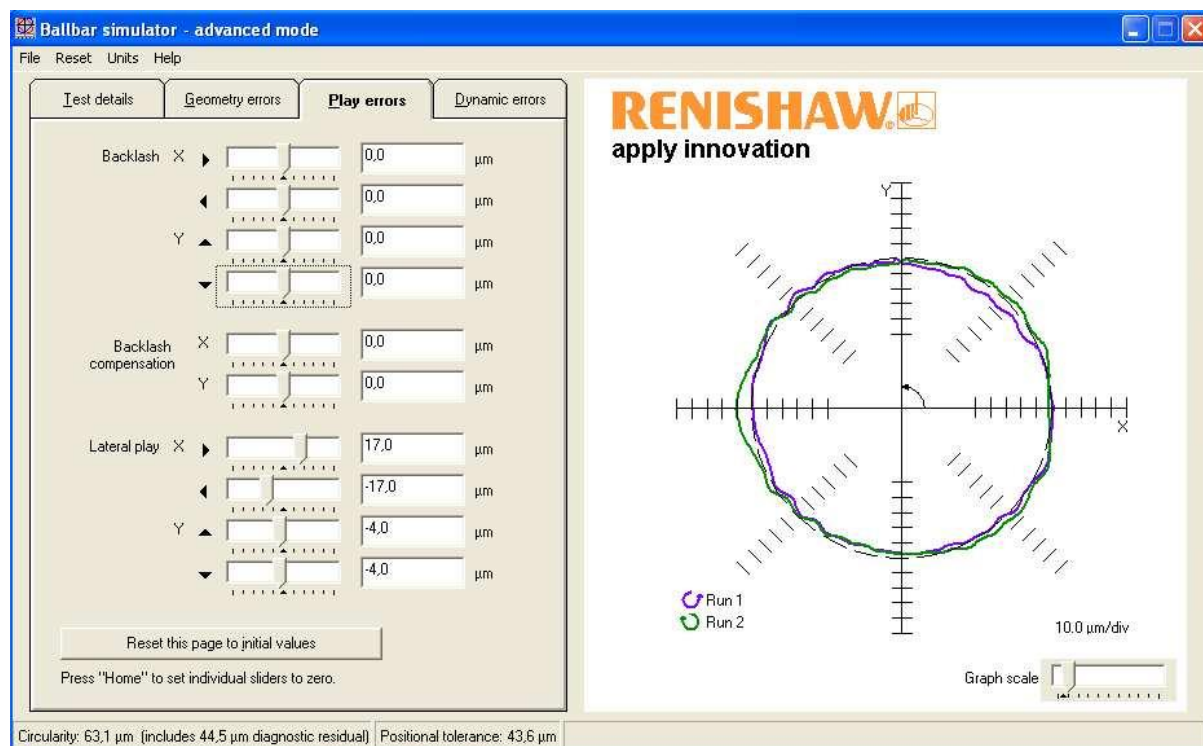
|                  |                                                                                                                                                                       |                       |                   |  |               |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|--|---------------|
| <b>9.</b>        | <b>зazor по Х оси – Backlash X</b>                                                                                                                                    |                       |                   |  | <b>3 %</b>    |
| <b>1. Мерење</b> | ► 1.6 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                   | ◄ 5.2 $\mu\text{m}$   | 5.2 $\mu\text{m}$ |  | 4 %           |
| <b>2. Мерење</b> | ► 0.2 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                   | ◄ 4.4 $\mu\text{m}$   | 4.4 $\mu\text{m}$ |  | 3 %           |
| <b>3. Мерење</b> | ► - 2.7 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                 | ◄ 2.9 $\mu\text{m}$   | 2.9 $\mu\text{m}$ |  | 2 %           |
| <b>10.</b>       | <b>зazor по Y оси – Backlash Y</b>                                                                                                                                    |                       |                   |  | <b>2.33 %</b> |
| <b>1. Мерење</b> | ▲ 2.7 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                   | ▼ - 0.4 $\mu\text{m}$ | 2.7 $\mu\text{m}$ |  | 2 %           |
| <b>2. Мерење</b> | ▲ 2.4 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                   | ▼ - 1.4 $\mu\text{m}$ | 2.4 $\mu\text{m}$ |  | 2 %           |
| <b>3. Мерење</b> | ▲ 4.2 $\mu\text{m}$                                                                                                                                                   | ▼ -1.4 $\mu\text{m}$  | 4.2 $\mu\text{m}$ |  | 3 %           |
| <b>Узрок</b>     | Може да постоји зазор у вођицама машине који изазива скок када се мења смер кретања машине. Типичан узрок је похабаност кугличне навртке завојног вретена. Ова грешка |                       |                   |  |               |

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | је често узрокована грешком енкодера. Грешка се често јавља уколико се врши промена енкодера на машини, а при чему се не врши његово подешавање и прилагођавање новој машини.                                                                                                                                                                                          |
| <b>Последица</b> | Последица зазора је да на кружно интерполираној путањи долази до појаве избочења.                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Акција</b>    | Заменити похабане компоненте машине (ово се првенствено односи на погонске елементе и вођице машине). Као алтернативно решење може се користити компензација зазора на контролеру да би се компензовало присуство зазора у похабаним компонентама машине. Ако је у питању грешка на енкодеру, успешно се одстрањује корекцијом одговарајућих параметара на енкодерима. |

Отклањање грешке зазора по X оси утиче на корекцију циркуларности са 64,2  $\mu\text{m}$  на 64,1  $\mu\text{m}$ , што је безначајно. Отклањање ове грешке утиче на позициону толеранцију коригујући је са 45,2  $\mu\text{m}$  на 43,9  $\mu\text{m}$ , што је побољшање за 1,3  $\mu\text{m}$ .

Отклањање грешке зазора по Y оси утиче на корекцију циркуларности са 64,1  $\mu\text{m}$  на 63,1  $\mu\text{m}$ , што је побољшање за 1  $\mu\text{m}$ . Отклањање ове грешке утиче на позициону толеранцију коригујући је са 43,9  $\mu\text{m}$  на 43,6  $\mu\text{m}$ , што представља безначајно побољшање.

Изглед дијаграма стања машине након симулације отклањања грешке зазора приказан је на слици 7.11.



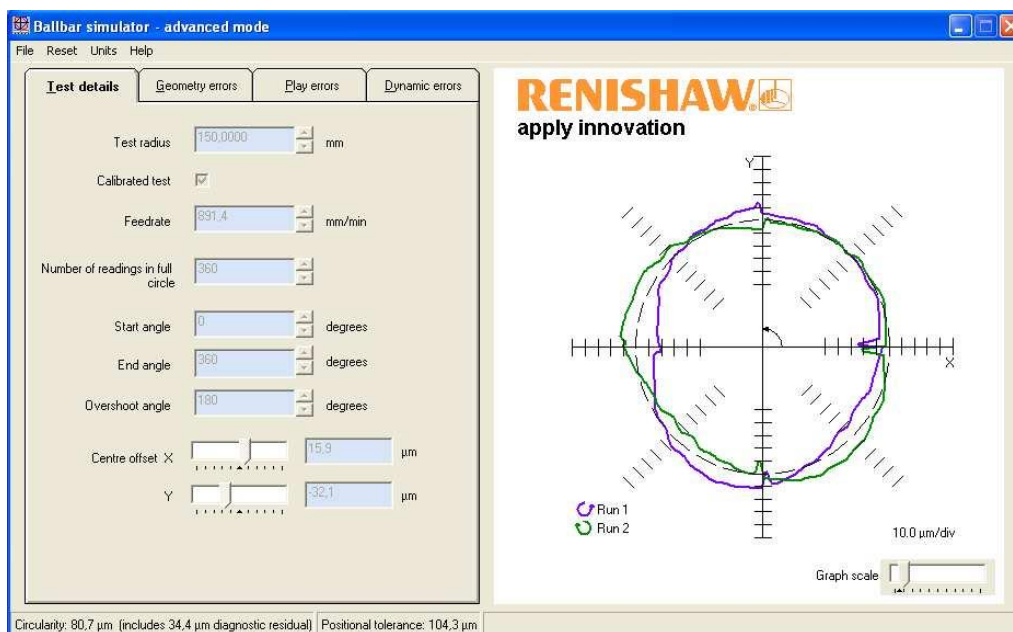
**Слика 7.11:** Дијаграм стања после елеминисања грешке зазора у симулатору [12]

### 7.2.1 Обрада резултата трећег мерења у симулатору

Почетне вредности грешке циркуларности и позиционе толеранције су:

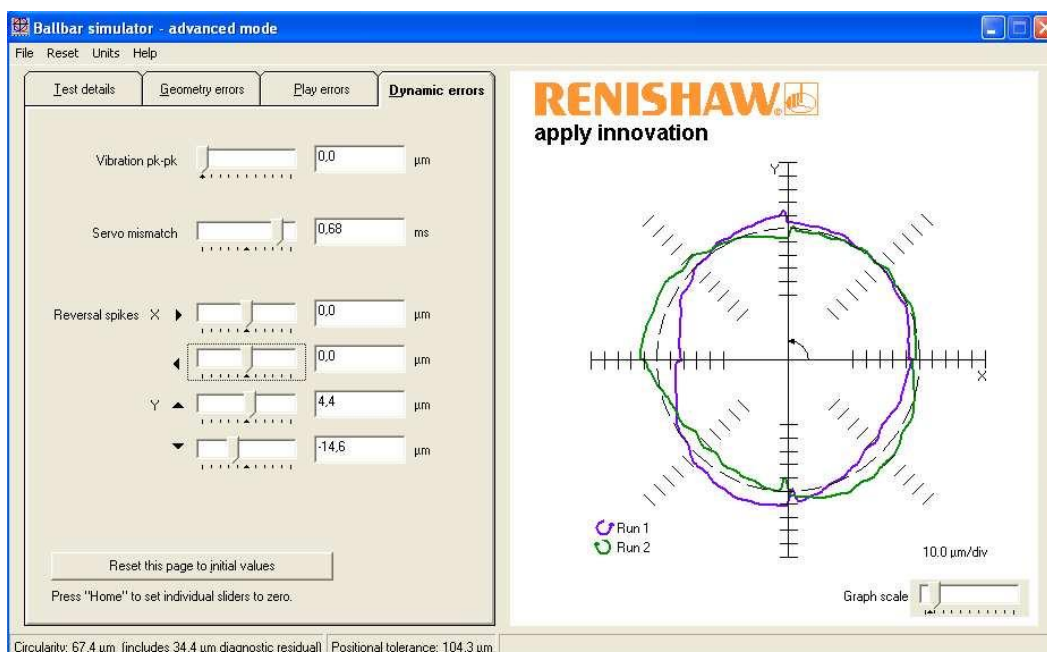
- циркуларност: 80,7  $\mu\text{m}$
- позициона толеранција: 104,3  $\mu\text{m}$

На слици 7.12 приказан је дијаграм стања машине са укупним вредностима откривених грешака.



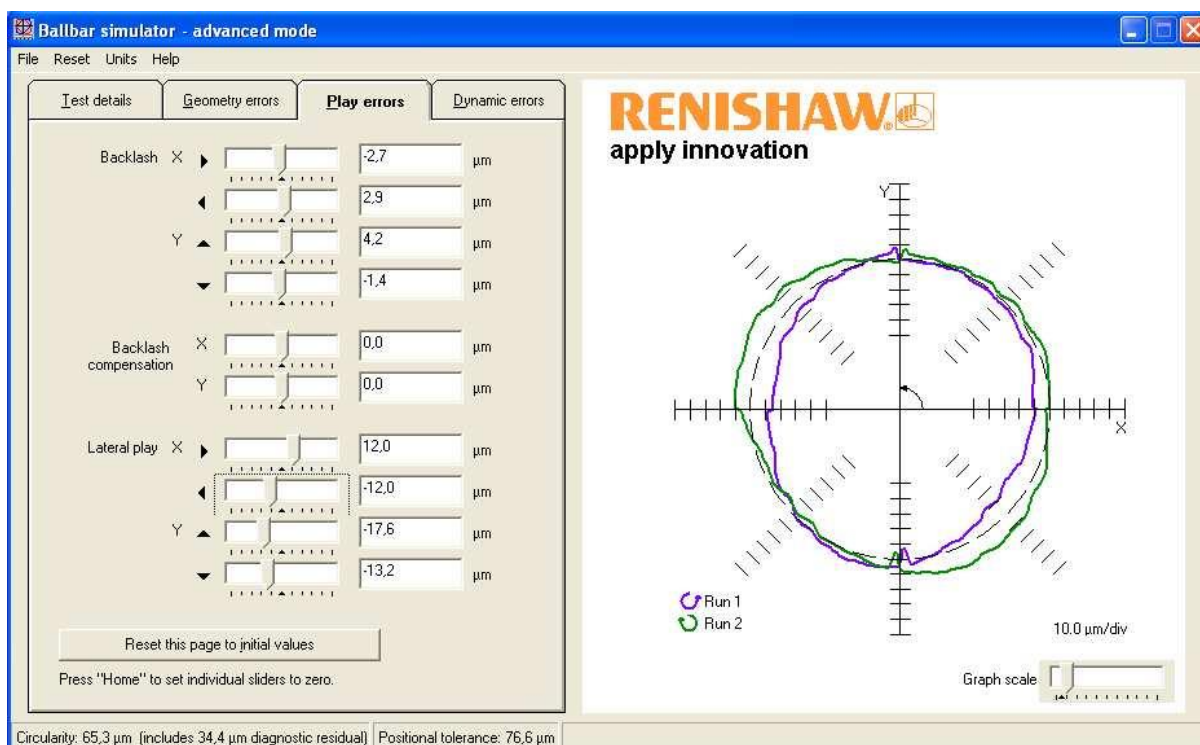
Слика 7.12: Дијаграм стања са почетним вредностима [12]

Отклањањем грешке „Преокретни шиљци“ по X оси (слика 7.13), смањује се грешка циркуларности за 13.3 $\mu\text{m}$ , док отклањање грешке нема утицаја на смањење грешке позиционе толеранције. Утицај грешке по Y оси је занемарљиво.

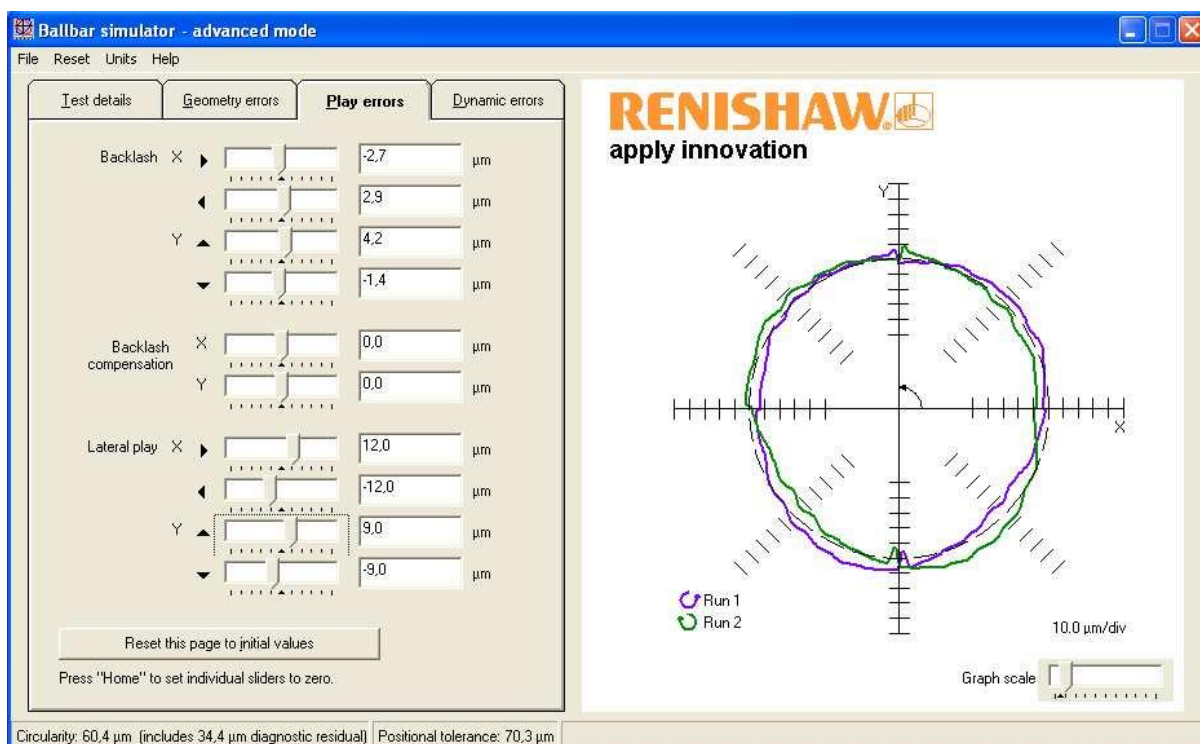


Слика 7.13: Дијаграм стања након елиминисања грешке Преокретни шиљци по X оси – Reversal Spikes X [12]

На слици 7.14 приказан је дијаграм стања након уклањања грешке „Бочни зазор“. Уклањањем ове грешке по Х оси, смањује се грешка циркуларности за  $2.1\mu\text{m}$ , а грешка позиционе толеранције за  $27.7\mu\text{m}$ . Смањем ове грешке по Y оси (слика 7.15), смањује се грешка циркуларности за  $4.9\mu\text{m}$ , а грешка позиционе толеранције за  $6.3\mu\text{m}$ .

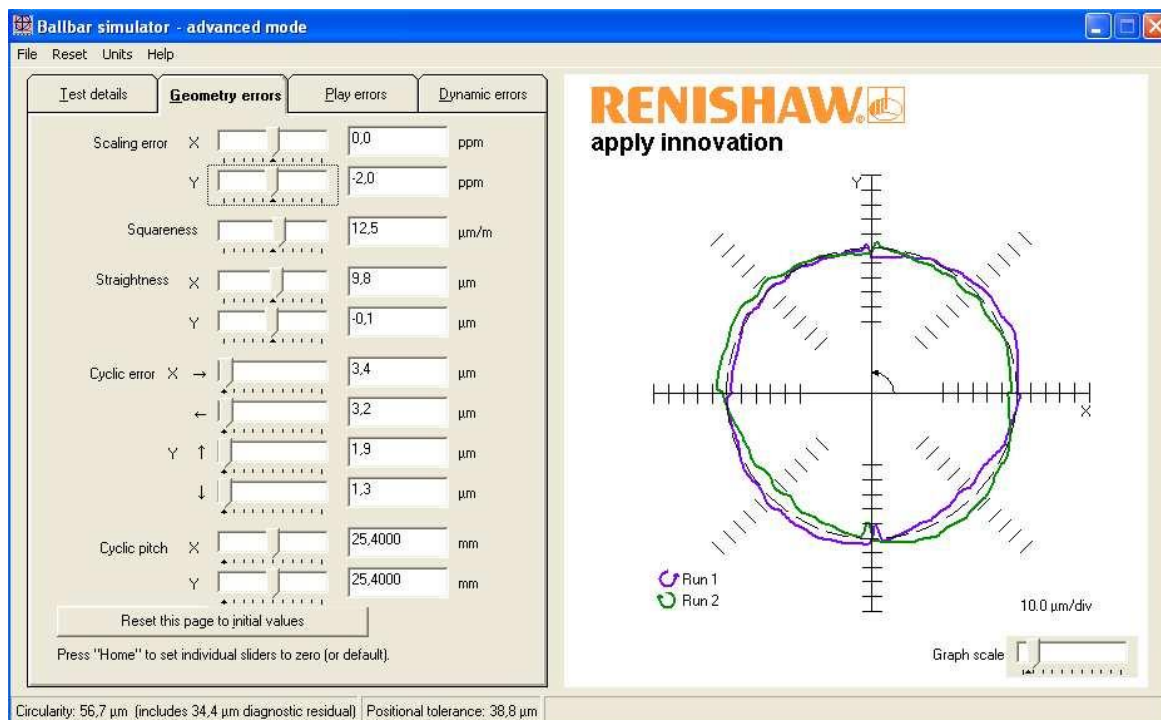


Слика 7.14: : Дијаграм стања након елеминисања грешке Бочни зазор по Х оси – Lateral Play X [12]

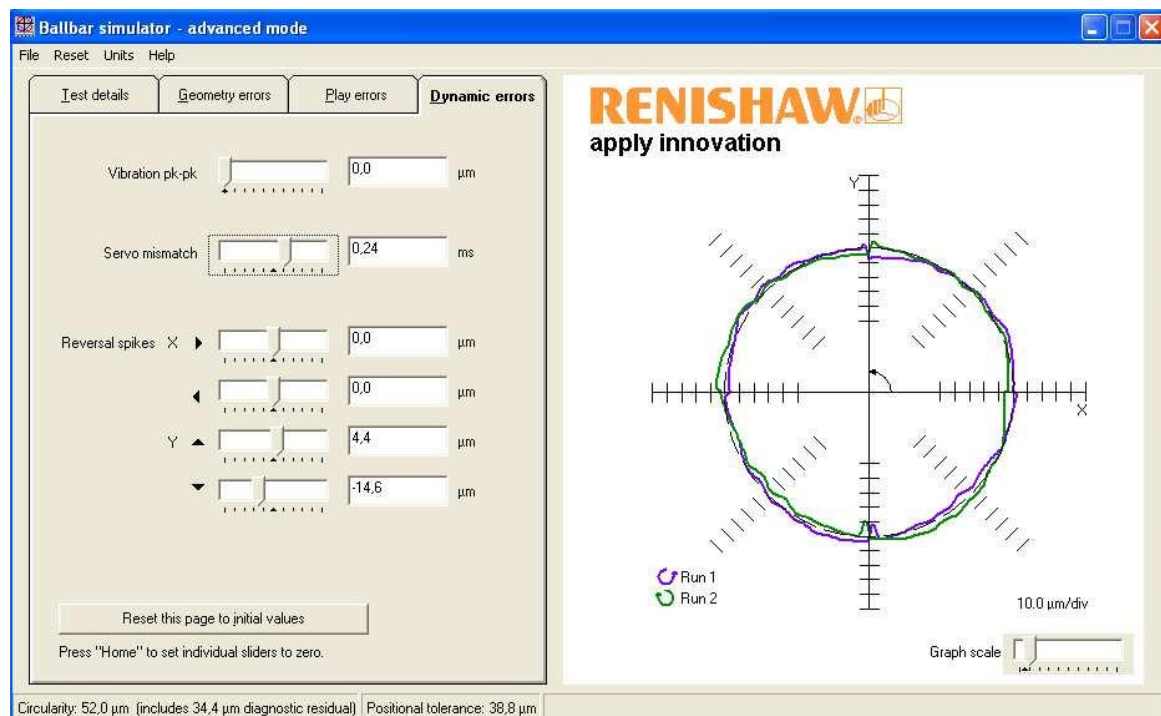


Слика 7.15: Дијаграм стања након елеминисања грешке Бочни зазор по Y оси – Lateral Play Y [12]

Дијаграм стања након симулације отклањања „Грешке размере“ приказан је на слици 7.16, а изглед дијаграма стања након симулације отклањања грешке „Лош сервоспој“ приказан је на слици 7.17. Отклањањем грешке размере смањује се грешка циркуларности за  $3.7\text{ }\mu\text{m}$ , а грешка позиционе толеранције за  $31.5\text{ }\mu\text{m}$ . Отклањањем лошег сервоспоја грешка циркуларности се смањује за  $4.7\text{ }\mu\text{m}$ , док грешка позиционе толеранције остаје непромењена.

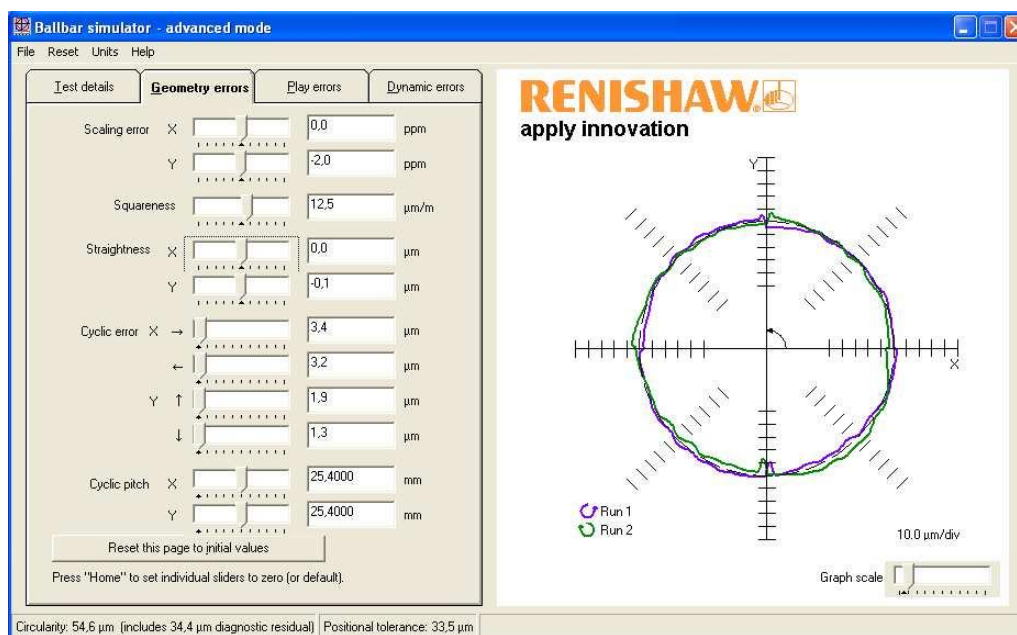


Слика 7.16: Дијаграм стања након елеминисања грешке Размере - *Scaling Mismatch* [12]



Слика 7.17: Дијаграм стања након елеминисања грешке Лош сервоспој – *Servo Mismatch* [12]

Оклањањем грешке „Управности“ по X оси (слика 7.18), грешка циркуларности повећава своју вредност за  $2.6 \mu\text{m}$ , док се грешка позиционе толеранције смањује за  $5.3 \mu\text{m}$ . Грешка управности по Y оси има занемарљив утицај на повећање тачности машине.



Слика 7.18: Дијаграм стања након елеминисања грешке Управност по X оси – Straightness X [12]

### 7.3 Анализа резултата

Из претходно анализираних студија случаја може се закључити који су пресудни фактори који утичу на грешку машине и како се они могу ублажити. Међутим, треба нагласити да грешке машине имају синергијски ефекат, а то значи да најутичајније грешке треба прво отклонити, јер без тога остале корекције имаће занемарљив значај.

Највећи утицај на грешку која се јавља при раду машине има похабаност вођица. У симулатору који поседује софтвер *Ballbar 5*, симулиран је утицај сваке грешке појединачно и дошло се до закључка да се грешке позиционе толеранције и циркуларности смањују на половину своје првобитне вредности. Анализом трећег мерења, може се закључити да се грешке позиционе толеранције и циркуларности смањују на трећину од своје првобитне вредности.

При овоме треба знати да се у оквиру грешке циркуларности налази и тзв. дијагностички заостатак који је укључен у оквиру грешке циркуларности. То су грешке које софтвер није успео прецизно да идентификује и класификује ни у једну од наведених група грешака, тако да је могуће да ће се препорученим корекцијама и ове грешке смањити, што ће бити утврђено тек након поновног мерења. Може се закључити да је грешка циркуларности код првог мерења максимално  $63,1 \mu\text{m}$ , а минимално  $18,6 \mu\text{m}$ . Код трећег мерења максимална грешка циркуларности је  $54,6 \mu\text{m}$ , а минимална  $20,2 \mu\text{m}$ . Више идентификованих грешака наводе на закључак да је главни узрок грешке на конкретној машини похабаност вођица машине.

Због економичности, а и из практичних разлога, прво се отклањају грешке које је могуће кориговати софтверски у контролеру машине, а тек након тога и се отклањају

механичке грешке, по потреби. Међу грешкама које је могуће кориговати софтверски, наводе се: преокретни шиљци, зазор, лош сервоспој и грешке размере. Ако ове корекције не задовоље потребе тачности, онда је потребно извршити и механичке корекције [12].

## 8. Закључак

Остварење многобројних предности и погодности обраде хладним истискивањем (уштеда у материјалу, времену производње, могућност добијања високог квалитета и тачности произведених делова, побољшане механичке карактеристике итд.), изискује веома детаљну анализу свих параметара и услова оваквог типа обраде. Савремени програмски пакети, који се заснивају на примени методе коначних елемената, заузимају значајну улогу и у данашње време знатно олакшавају и унапређују детаљно пројектовање и анализирање различитих сложених и захтевних процеса обраде запреминског обликовања.

У овом раду је употребљен један такав софтвер (*Simufact.forming*) и уз помоћ њега је приказано како се грешке у алату при његовој изради (кључан фактор који је незаобилазан при раализацији пројекта производње оваквим технологијама), одражавају на финалну димензију и квалитет обрадака који ће се тим алатом и технологијом израђивати. Може се закључити, из приложених нумеричких експеримената, да ће се грешке при изради алата, које се на први утисак чине да су прихватљиве и занемарљиве, итекако одразити касније и на сам обрадак и то у већој вредности него што је вредност саме грешке. То не значи да се свака грешка мора уклонити, али се њен утицај, уз помоћ симулација и оваквих софтвера, може предвидети и у пројектовање технологије укључити потребне корекције.

С обзиром да је код израде већине алата практично незаобилазна механичка обрада, прецизност израде ће искључиво зависити од квалитета и прецизности опреме за механичку обраду, уколико се искључи утицај људског фактора. Према томе, код *CNC* машина, прецизност обрађених комада се у већини случајева, посредно или непосредно, односи на геометријску тачност машина. Због тога је за успешно, квалитетно и прецизно спровођење машинске обраде за израду алата за истискивање, неопходно познавати и геометријску и радну тачност *CNC* машина. У овом раду је приказан и *QC10 Ballbar* уређај, као подршка том проблему.

*QC10 Ballbar* уређај представља један од савремених и веома успешних метода за брзу и ефикасну дијагностику грешака код *CNC* машина, који даје низ предности у односу на класичне методе, као што су: брза и једноставна дијагностика, чиме се постиже велика уштеда времена и новца; директно откривање узрока индетификованог проблема, чиме се олакшава његово проналажење и отклањање; помоћ у софтверском компезовању одређених грешака, без механичких интервенција итд. Међутим, за препознавање правог узрока нетачности (грешке), као и искоришћење свих погодности и предности *Ballbar* уређаја, захтева се одређено знање и искуство контролера, а све због великог броја информација о грешкама машине које даје овај уређај.

С обзиром на константна унапређења *CAD/CAM/CAE* софтвера за подршку у пројектовању савремене производње, даље се инплицира и на унапређења машина и опреме, уз помоћ које се све што је теоријски замишљено реализује у пракси. Само се на тај обостран начин усавршавања, како софтвера тако и радне опреме, може испунити све већи критеријум захтеваних резултата.

## 9. Литература

- [1] **Владо Вујовић**, *Технологија пластичности у машинству I део*, Нови Сад, 1990. год.
- [2] **Весна Мандић**, *Физичко и нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2012.
- [3] **Ненад Станојловић**, *Анализа димензионе тачности делова код комбинованог истискивања*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2018.
- [4] **М.Којић, Р.Славковић, Н.Грујовић, М.Живковић**, *Метода коначних елемената 1*, Крагијевац, 1998.
- [5] „Слобода“, Друштвено предузеће наменске производње, *Поступак за израду и монтажу вишеделних матрица*, Припрема производње, 1992.
- [6] **Стјепан Кожух**, *Специјални челици – скрипта*, Металуршки факултет, Свеучилиште у Загребу, Сисак, 2010.
- [7] <http://www.cqm.rs/2010/pdf/37/45.pdf>, приступљено 1. 12. 2020. год.
- [8] **Богдан Недић, Миодраг Лазић**, *Обрада метала резањем*, Машински факултет Крагујевац, 2007.
- [9] **Светислав Јовичић, Ненад Марјановић**, *Основи конструисања*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, САД Лабораторија, 2011.
- [10] **Весна Мандић**, *Наставни материјал – Центар за виртуелну производњу*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2008.
- [11] **Мирко Соковић, Марко Цедилник, Јанез Копач, Тоне Вречић**, *Системи за контролу геометријске тачности и калибрацију CNC-машина*, Оригинални научни рад, Техничка дијагностика бр. 3, 2007.
- [12] **Весна Мандић, Никола Јанковић**, *Извештај мерења перформанси CNC машине коришћењем QC10 Ballbar уређаја*, Центар за виртуелну производњу, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
- [13] [QC10 system brochure - RENISHAW - PDF Catalogs | Technical Documentation | Brochure \(directindustry.com\)](#), приступљено 13.12.2020. год.
- [14] **Ivan Durica, Ivan Kuric**, *Diagnostics of CNC Machines with Renishaw Equipment, The International Conference of the Carpathian Euro-Region Specialists in Industrial Systems, 7<sup>th</sup> Edition.*
- [15] **Jerzy Józwik, Paweł Pieśko, Grzegorz Krajewski**, *Ocena testu QC10 do kontroli off-line obrabiarek sterowanych numerycznie CNC*, Eksploatacja i Niezawodność, nr 3/2010, 2010.
- [16] **Sabahudin Ekinović, Edin Begović, Emir Hekić**, *Ballbar QC10 Measuring Device - Fast Experimental Check of Machine Tools Accuracy*, Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Tecnology, Vol. 19, No. 1, pp. 29-32, 2015.
- [17] **Austin H. Chen**, *Integrated Inspection for Precision Part Production*, Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2006.
- [18] **Robert Cep, Marek Sadilek, Karel Kouril, Igor Budak, Miodrag Hadzistevic**, *Testing of machine tool accuracy by the QC10 Ballbar system*, Journal of production Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 23-26.

- [19] **Ali Lasemi**, *An Integrated Approach for Precision Machinig of Freeform Surfaces*, Doctoral Thesis, University of Calgary, Calgary, 2014.
- [20] **Zbyněk Lukáš**, *Měření přesnosti obráběcího stroje pomocí systému Renishaw Ballbar QC10*, Bakalářské práce, Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Ostrava, 2018.
- [21] Ballbar 5 HPS software, User Manual.