

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Савремени обрадни системи

Број индекса: 308/2013

Милош З. Милисављевић

**Фактори који утичу на димензиону тачност при
глодању**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др Богдан Недић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

- изврши систематизацију и на одговарајући начин презентацију података о утицајним факторима на тачност израде делова глодањем. Потребно је описати технологију глодања, прорачуне параметара глодања и објаснити механизам резања. У посебном делу рада извршити одговарајућа експериментална истраживања утицаја ширине глодања на димензиону тачност.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Увода разматрања,
2. Утицајни фактори на тачност обраде,
3. Обимно глодање,
4. Експериментална истраживања,
5. Закључци,
6. Литература.

Препоручена литература:

- Проф. др Бранко Ивковић, Обрада метала резањем, Југословенско друштво за трибологију, Машински факултет у Крагујевцу, 1994.
- Проф. др Богдан Недић, проф. др Миодраг Лазић, Производне технологије, Обрада метала резањем (скрипта), Машински факултет у Крагујевцу, 2007.

У Крагујевцу
јул 2015. године

Ментор:

Проф. Др Богдан Недић

Пре свега хтео бих да се захвалим својим родитељима, Мирјани и Зорану, као и деди Мирославу, који су ме подржавали све ове године док сам студирао. Школовање у другом граду је јако тешко и на неки начин ме је одвојило од вас, али ја сам мислима увек био са вама, спокојан, знајући да сте увек ту за мене. То ме је и храбрило, давало ми снагу и вољу ка остваривању свог циља. Сада се сав ваш и мој труд исплатио и једино што могу да вам кажем је: „Хвала вам на свему.“

Посебне похвале упућујем запосленима фирме SCGM, шефу алатнице Радославу Прчићу који је са својим дугогодишњим радом допринео у објашњавању искуствених и стручних ствари, као и мајсторима Дејану Вељковићу и Урошу Аћимовићу који су допринели у реализацији практичног дела рада.

Сам рад је настао у договору са проф. др Богданом Недићем и представља једну широко област на коју се све више обраћа пажња. Живимо у добу где се тражи прецизност и тачност и грешке су недопустиве. Постоји много узрока који утичу на тачност, а наш задатак је да их откријемо на време и елиминишемо. Са овим радом такорећи сам „зачепркао“ један део области и дао добар увод да, можда убудуће, неко други надогради ову тему.

*... будући дипл. маш. инж.
Милош Милисављевић*

Abstract

In any kind of conventional machining operation, dimensional and geometrical accuracy of the machined part cannot be achieved without a precise control of cutting parameters as well as positioning accuracy. Generally, dynamic and static stiffness is not a problem as it can be too high thermal deformations of the machine structure. Also, the machining accuracy may depend on a number of factors (which will be described in detail in the further course of work), such as:

- method of clamping the work piece
- work piece material
- tool – mill (material, number of cuts, geometry, tool wear, deviation...)
- cooling (type, pressure, direction and course, temperature...)
- machine tool (construction type, accuracy, stability, rigidity, vibrations, thermal behavior)
- process (cutting conditions, cutting data, strategy/path...)
- environment (room temperature, other)

Besides theoretical explanations of the possible factors that may affecting on the accuracy, in this work will be presents a practical part, which is based on examination on 3-axis vertical milling machine MIKRON VCP1350. The probe are based on different depths of cut (climb and conventional milling) with identical modes of processing, same tools (helical end mill) and same work piece material.

Key words: *axial depth of cut, accuracy, factors.*

Резиме

У било којој врсти конвенционалне машинске операције глодањем, димензиона и геометријска тачност обрађеног дела не може се постићи без прецизне контроле параметара сечења, као и тачности позиционирања. Генерално, динамичка и статичка крутост код ових машина нису проблем, као што може бити превисока термална структурна деформација машине. Такође, тачност израде дела може зависити од низа фактора (који ће опширније бити описани у даљем току рада) као што су:

- начин стезања предмета обраде
- материјал дела
- алата – глодала (материјал, број резних ивица, геометрије, издржљивости на хабање, дилатација...)
- хлађена (тип хлађења, притисак, правац и смер, температура...)
- машине (тип конструкције машине, прецизност, стабилност, крутост, вибрације, термално понашање)
- процеса (режими обраде, подаци обраде, стратегија/путања...)
- окружења (температура просторије и друго)

Поред теоријских објашњења могућих фактора који утичу на тачност, у овом раду ће бити приказан практичан део, који је базиран на испитивању на 3-осној вертикалној глодалици MIKRON VCP1350. Испитивање је засновано на различитим аксијалним дубинама резања чеоним глодањем (истосмерним и супротносмерним), са идентичним режимима обраде, вретенастиг глодалом у алуминијуму као материјал предмета обраде.

Кључне речи: *ширина глодање, тачност, фактори.*

Номенклатура

- α - леђни угао
- β - угао клина
- γ - грудни угао
- ε_k – експонент
- φ - угао захвата
- ψ - угао контакта
- ω - угао спирале завојнице
- a_e - радијална дубина резања (у домаћој литератури се код обимног глодања обележава са a)
- a_p – аксијална дубина резања тј. ширина резања (у домаћој литератури се код обимног глодања обележава са b)
- C_k – јединични специфични отпор резања
- d_2 - држач алата
- d_3 - врат алата
- D – пречник алата
- f – брзина помоћног кретања
- f_n - корак по ротацији
- f_z - корак по зубу
- F_1 – компонента отпора резања
- F_2 – компонента отпора резања
- F_h - хоризонтална компонента отпора резања
- F_v – вертикална компонента отпора резања
- h_{ex} - максимална дебљина струготине (у домаћој литератури се обележава са h_{max})
- h_m - тренутна дебљина струготине
- k_s – специфични отпор резања
- l_1 - укупна дужина алата
- l_2 - дужина резног дела алата
- l_3 - дубина продирања (дужина препуста) алата
- n - ротација алата
- v – обимна брзина глодала
- z_n - број зуба (резних ивица алата)
- z_r - број зуба глодала који истовремено врше резање
- Q - однос уклоњеног материјала
- AlCuMg – алуминијум-бакра-магнезијум (дуралуминијум)
- TiAlN - титанијум-алуминијум-нитрид

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
2. УТИЦАЈНИ ФАКТОРИ	2
2.1 Крутост алата	3
2.2 Хабање и постојаност алата.....	4
2.3 Радијално бацање вретена, еластичне чауре и носача алата	6
2.4 Тачност позиционирања и поновљивост.....	7
2.5 Термичко понашање машине	7
2.6 Хлађење	10
2.7 Технолошки параметри резања (брзина, посмак и дубина резања)	12
2.8 Супротносмерно и истосмерно глодање	13
3. Чеоно ГЛОДАЊЕ.....	16
3.1 Параметри глодања	17
3.2 Прорачун параметара чеоног глодања	18
3.3 Механизам резања код равних глодала	23
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА УТИЦАЈА УСЛОВА ОБРАДЕ НА ТАЧНОСТ ОБРАДЕ.....	24
4.1 Услови обраде.....	24
4.2 Резултати експеримента.....	28
4.2.1 Призматичан део (истосмерно глодање).....	28
4.2.2 Призматични део (супротносмерно глодање)	31
4.2.3 Цилиндрични део (истосмерно глодање).....	34
4.2.4 Цилиндрични део (супротносмерно глодање).....	37
4.3 Анализа добијених резултата	40
5. ЗАКЉУЧАК.....	42
6. ЛИТЕРАТУРА.....	43

1. УВОД

Пре око 30 година, готово је било незамисливо да ће глодање бити универзалан поступак који ће заменити многе друге технологије као што су стругање и бушење. Током протеклих неколико година, са развојем машина, процес глодања се развио у методу која има широк спектар могућности. Развој алата је такође допринео новим могућностима у постизању веће продуктивности, поузданости и квалитета.

Да би се са обрађујуће површине скинуо предвиђени слој материјала глодањем, потребно је остварити релативно кретање алата у односу на обрађивани радни предмет. Глодање је у принципу сечење материјала које изводи ротирајући вишерезни алат, који има програмирано кретање у било којем правцу и смеру. Овакви захвати чине процес глодања да буде ефикасна и свестрана метода. Свака резна ивица уклања одређену количину материјала и оне истовремено нису све у захвату, тако да се добија променљив попречни пресек струготине, који скида појединачан зуб (резна ивица) за време обраде. Све ово чини глодање сложенијим поступком од других поступка обраде метала, као што су највише примењивани стругање и бушење.

Процес резања у овој врсти обраде изводи се:

- обимним глодањем
- чеоним глодањем
- одвалним глодањем [2].

Овим поступком се могу обрадити равне површине, призматични жљебови и зупчаници, навоји, уздужно и просторно профилисане површине.

Кроз рад су детаљно описани најутицајнији фактори који могу да утичу на димензиону тачност, као што су:

- технолошки параметри резања
- смер глодања
- тип хлађења
- термичко понашање машине
- хабање и постојаност алата итд.

Такође, у раду су описане врсте чеоног глодања са прорачунатим параметрима обраде и механизмима глодања. Након овога, следи практичан део у којем се могу видети резултати мерења коришћењем чеоног глодања равних површина са различитим смеровима глодања и практично објашњење добијених резултата.

2. УТИЦАЈНИ ФАКТОРИ

Утицајни фактори на тачност обраде су приказани на *слици 2.1*, груписани су у седам основних група који представљају независне процесне параметре према општој теорији обраде.



Слика 2.1 – Утицајни фактори у операцијама глодањем [3]

Тежина сваког од ових фактора може бити променљива у зависности од врсте процеса и операције која треба да се изврши. За овај тип испитивања, који је изведен, могу се занемарити следећи фактори:

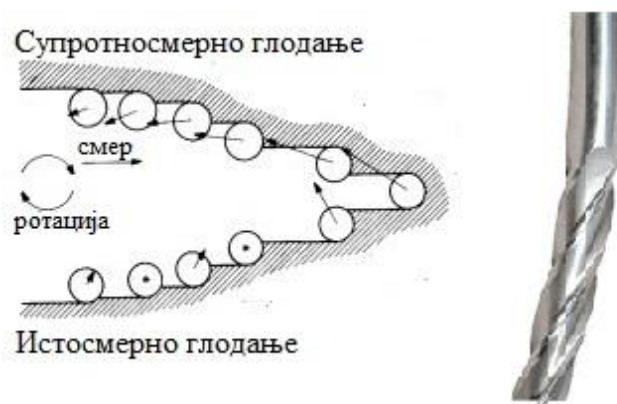
- крутост машине (нису потребне велике силе, пошто се испитивање изводило на меком материјалу – алуминијуму)
- поступак се изводио увек у истој врсти материјала и са истим типом глодала
- стезање, центрирање и остала подешавања (немају велики утицај, јер је испитивање базирано на различитим аксијалним дубинама резања тј. ширинама глодања)
- хлађење и окружење (хладило се са емулзијом и температура просторије је готово била идентична)
- ексцентрично бацање глодала (свако испитивање се изводило са новим глодалом, тако да не утиче на мерену величину)
- ексцентрично бацање вретена (сигурно да постоји, али у веома малим границама)

Све претходно наведене узроке можемо занемарити и рећи да нису релевантни, јер је испитивање базирано на макро нивоу и укупан збир ових грешака није велики.

2.1 Крутост алата

Крутост алата се највише односи на угиб алата (дефлексију) створени од стране радијалне силе резања. Већина силе резања се конвертује у резање чије је резултат настанак струготине. Неизбежно је да ће се одређени део силе резања утрошити на производњу топлоте, угиб алата, вибрације итд.

Засигурно, ово није случајна грешка при машинској обради. Величина и правац силе резања зависи од геометрије алата и смера обраде (слика 2.2). Такође, дефлексија алата ће довести до неке неминовне грешке у тачности израде. Наравно, ова појава постоји скоро па у свакој операцији глодањем, али оператер за машином или програмер мора да зна који материјал обрађује (по томе задаје режиме обраде, дубину резања...) и које ће глодало искористити да би дефлексију свео на минимум и држао у прихватљивом опсегу [4].



Слика 2.2 – Утицај смера обраде на дефлексију алата [4]

Претходна слика 2.2 садржи стрелице (векторе) који показују правац дефлексије алата док се креће дуж одређене путање. Може се запазити да је код супротносмерног глодања вектор силе дефлексије скоро паралелан са правцем кретања алата, да су вектори дужи, што указује на постојање веће силе резања. Код истосмерног глодања, вектор је скоро управан на правац кретања, а да су силе резања знатно мање.

За вретенаста глодала, повећање крутости подразумева:

- што мања дужина алата
- што краћи резни део алата (веће и круће централно језгро алата)

Са коришћењем алата мање укупне дужине и краћим резним делом, смањује се могућност величине дефлексије алата.

2.2 Хабање и постојаност алата

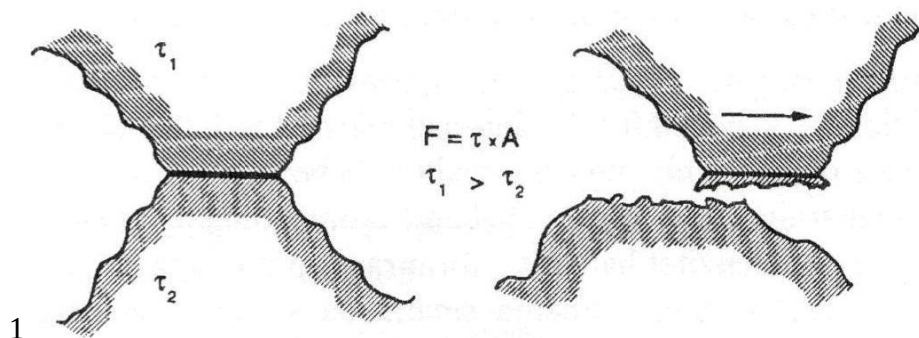
Све процесе обраде одвајањем материјала неизбежно прати и процес хабања резне ивице алата. Процес хабања настаје као последица оптерећења којим је алат изложен током процеса обраде (на резном алату се прогресивно губи материјал у контактним слојевима).

Ови процеси механизма хабања се могу поделити у две групе:

- као последица механичког оптерећења (адхезија и абразија)
- као последица хемијског деловања између алата, предмета обраде и околине (трибохемијско - оксидационо и корозионо хабање) [5].

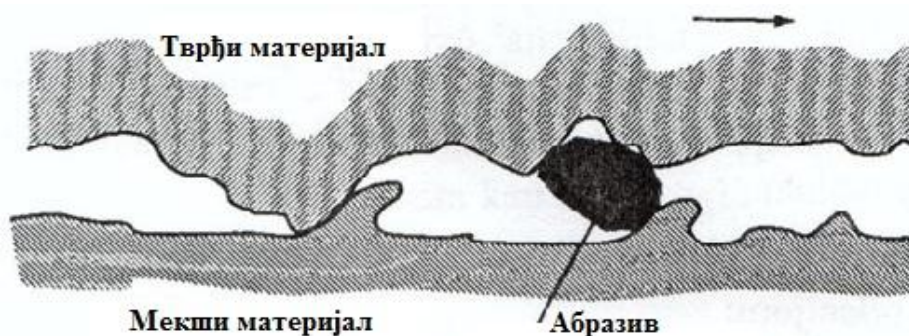
Адхезивно хабање. У процесу релативног кретања долази до микроставаривања контактних површина, а затим до разарања микроставарених спојева услед јаких адхезионих сила. Раскидање се одвија у зони мекшег материјала у контакту.

Адхезивно хабање (слика 2.3) не узрокује стварање продуката хабања, већ се манифестује као пренос материјала са једне површине на другу [6].



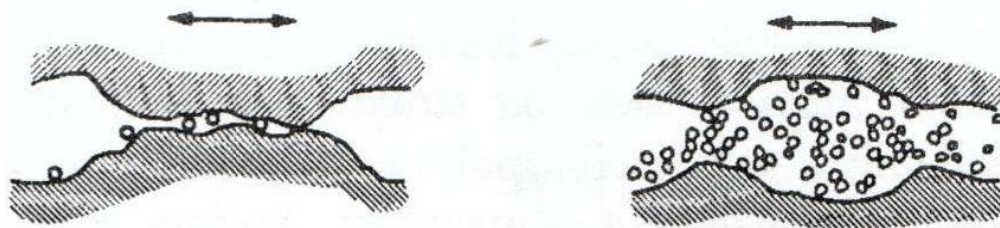
Слика 2.3 - Адхезивно хабање [6]

Абразивно хабање (слика 2.4) настаје кретањем неравнина тврђег тела кроз површински слој тела мање тврдоће при чему се остварује микрорезање и деформација материјала контактних слојева.



Слика 2.4 – Абразивно хабање [6]

У процесу остваривања контакта, обе контактне површине реагују са средином у којој се контакт остварује, односно мазиво као трећим елементом ових система, тако да се на њима стварају превлаке различитих врста. При клизању једног елемента по другом разарају се формиране хемијске превлаке и настају продукти *трибохемијског хабања*. [6]



Слика 2.5 – Оксидационо и корозионо хабање [6]

У процесу глодања, смањење животног века (напрснуће или лом) алата најчешће изазива струготина и она има много већи утицај него код бушења и стругања. Ово произилази због тога што је глодање најчешће прекидна операција, где резна ивица алата улази и излази у комад по неколико пута у секунди. Осим тога, дебљина струготине варира док глодало продире у материјал. Зато је пожељно да у процесу глодања постоји хлађење (емулзија или хладан ваздух), који не само што одводе генерисану топлоту у процесу резања, већ и избацују нагомилану струготину.

Као и у другим операцијама сечења, брзина резања је најутичајнија на животни век глодала, затим посмак и дубина резања. Са повећањем брзине резања, повећавају се и температуре у зони резања, што смањује тврдоћу алата и знатно лакше долази до хабања. Такође, са повећањем брзине, повећава се учестаност улаза резне ивице у комад (повећава се број удара у минути), као и енергија удара између алата и дела [7].

Животни век алата између замене или преоштравања може се дефинисати на неколико начина:

- актуелно време резања до отказа (ако је процес резања непрекидан)
- укупно време резања до отказа (ако је процес резања наизменичан)
- запремина материјала која је отклоњена током процеса резања до отказа алата
- број компоненти који је произведен до отказа алата [19]

У највећем броју случајева, након термичке обраде (побољшања), предмет обраде иде прво на брушење, па се тек онда враћа на завршне операције глодањем. Пошто брусне машине за стезање предмета обраде користе магнет, долази до намагнетисања и самог дела. Врло је важно демагнетисати део, јер у супротном, ако се са таквим намагнетисаним делом крене у извршавање финиша на глодалици, алат у контакту са делом се такође намагнетише и после тога долази до залепљивања струготине за резни део алата. Ово је најнеповољнији случај који може да се деси непажњом, јер струготина има велики утицај на хабање алата, а са повећањем хабања, смањује се постојаност алата.

Искусно се показало и данас се највише користе алати са *PVD (Physical Vapor Deposition)* превлакама и то су најчешће превлаке од *TiAlN* са дебљином слоја превлаке од 1.5 до 2 μm . Оваква глодала могу да обрађују каљене материјале до тврдоће 60 HRC. У 99% случајева алати са превлакама не трпе водено хлађење, јер им се смањује постојаност због термичког шока и најбоље је изводити операцију глодања само са ваздушним хлађењем.

Превлаке доносе бројне користи за повећање постојаности алата:

- висока температурска постојаност. Обрада високим брзинама је често обрада на високим температурама. Рezni алат се бира не само за отпорност на хабање, већ и за отпорност на хабање при повишеним температурама. Тако да превлака штити алат, понашајући се као температурска баријера
- клизни слој за одвођење струготине. Резање на високим температурама са *TiAlN* поспешује формирање корисног слоја алуминијум оксида. Овај слој је и тврд и гладак. Док тврдоћа поспешује отпорност на хабање, својство глаткоће има улогу мазива помоћу кога се врућа струготина одводи из зоне резања без адхезије и преноса топлоте
- абразиона отпорност. Ово својство чини алате са *TiAlN* превлакама погодне за обраду графита.

Хабање утиче на алат, тако што се временом смањује пречник и самим тим алат неће дати тачну димензиону вредност. Хабање алата може бити изражено и у кратком временском периоду (у једној операцији), ако се обрађују материјали који су тврди са неадекватним режимима обраде.

2.3 Радијално бацање вретена, еластичне чауре и носача алата

Радијално бацање се односи на грешке при обртању калибрисаног вратила које је стегнуто у вретено. Ово узима у обзир ефекат ротационе тачности вретена и одступање осе вратила од осе вретена због стецања. Бацање зуба алата се не разматра.

У сваком случају, што је већи број обртаја, захтеви за вретено у смислу сложености израде, балансирања, радијалног бацања и стандардних компоненти као што су лежачеви су повишени. Упрошћено речено, виши квалитет лежача доводи до геометријске савршености. Тиме се бацање своди на нижи ниво, а и повећава радни век вретена. Све ово има многу већу важност код HSM-а (*High Speed Machining*) где су ефекти недовољног баланса и бацања увећани, што доводи до прекомерног хабања вретена и резног алата [8].

Такође, треба обрадити пажњу и на склоп еластична чаура – носач алата. У еластичну чауру се стеже алат (искључиво вретенасто глодало), затим чаура се стеже у носач алата који се поставља у машину.

За еластичну чауру је прописано радијално бацање од 0.002 – 0.02 mm. Наравно, што је већа захтевана прецизност израде, скупљи је и део. Еластичну чауру треба усвојити на основу обраде, груба или фина, и по томе бирати максимално дозвољено бацање.

Исто тако, носач алата је карица која има велики утицај на укупну концентричност и баланс и могу се наћи у три стандарда (*ISO 30*, *ISO 40*, *ISO 50*).

2.4 Тачност позиционирања и поновљивост

Тачност позиционирања директно утиче на машинску тачност израде дела. Ове грешке се могу водити као случајне (насумичне) грешке и због тога се не могу надокнадити.



Слика 2.6 – Укупна тачност машине [9]

Повезани извори грешака тачности машине могу бити подељене на:

- **геометријске грешке** везане за основни дизајн и тачност израде машински делова
- **кинематске грешке** везане за грешке при релативном кретању машинских компоненти (обично се посматра интерполација покрета)
- **термалне грешке** везане за структурне деформације машинских компоненти као последица термичког градијента и варијација температуре
- **динамичке грешке** изазване механичким и инерционим силама које деформишу машинске компоненте

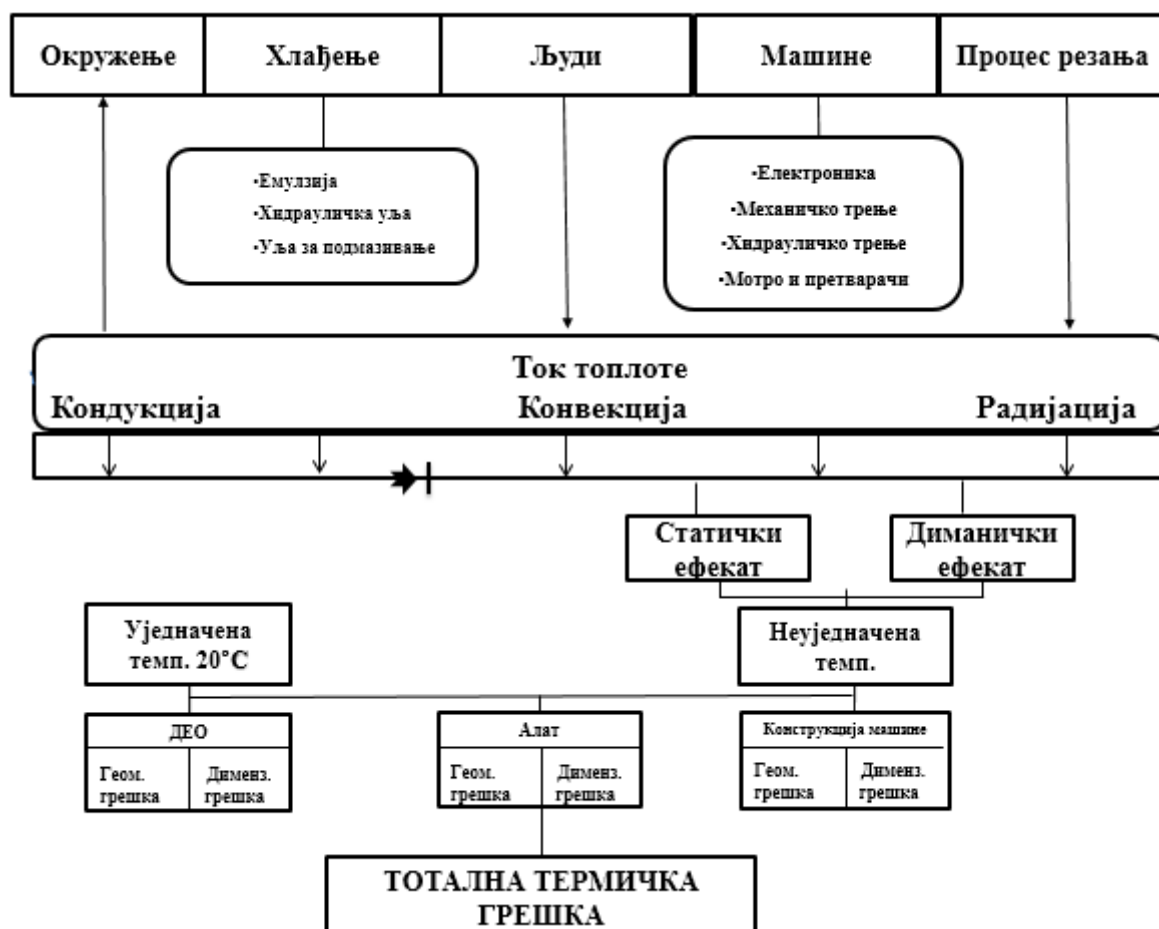
Геометријске и кинематске грешке често су строго повезане и тешко их је разликовати, док су динамичке грешке занемарљиве код великих машина које су генерално веома круте и карактеришу их ниска убрзања.

Велики је изазов одржати механичку тачност у окружењу које има велики број топлотних извора. Приликом пуштања машине у рад, она мора прво да се загреје, јер у супротном ће доћи до грешке у тачности и прецизности машине. Да би се одржала тачност и поновљивост, уобичајна пракса је да се креирају програми обраде са екстремно малим померањима од тачке до тачке, које машина учитава и затим се пушта да ради „у празно” [9].

2.5 Термичко понашање машине

Као што су многи аутори препознали, ово је најозбиљнији и најважнији извор машинске грешке. Интерни и екстерни извори топлоте доводе до термо-еластичних деформација машине и крајни резултат је димензиона и геометријска нетачност дела.

Различити топлотни извори у комбинацији са различитим механизмима за пренос топлоте доводе до уједначене температуре различите од 20°C или до неуједначите расподеле температуре у структури машине. Слика 2.7 такође илуструје концепт од којег се свака машинска операција састоји.



Слика 2.7 – Веза између изазваног термичког ефекта, феномена трансформације топлоте и ефекта који доприноси укупној термичкој грешци [3]

Извори топлоте се деле на:

- **спољне** (промене у окружењу услед сунчевог зрачења, осветљења...)
- **унутрашње** (промене услед кретања машине и промене у самом процесу)

Унутрашњи извори стварају и спроводе топлоту и изазивају варијацију целокупних делова машине, због различитих дистрибуција температуре, изазивајући дисторзију и савијање. Један од главних извора генерисања топлотне енергије је завојно вретено [3].

Компоненте машине алатке као што су: лежајеви, завојна вретена, вођице, услед кретања генеришу топлоту. Такође, мотори генеришу топлоту. Процес резања се исто мора имати у виду. Сва та топлота може изменити облик компоненти машине које се шире са повећањем топлоте и скупљају приликом снижавања исте. Што је већа брзина покретних делова, већа је и температура [8].

Преносници кретања на машини су такође извори топлоте који могу резултирати у значајној дисторзији (извијању) на алату. За локални пораст температуре су највише одговорни завојно вретено и навртка, где могу достићи температуру до око 80°C.

Други важан унутрашњи извор топлоте је сам процес резања, који у нормалној операцији обраде загрева алат, држач алата, предмет обраде и стезни прибор. Радни сто машине се загрева преко топле струготине настале у процесу резања.

Решења за проблем термичке деформације машине се могу груписати у три категорије:

- *редукција губљења снаге и изолација*
- *контрола температуре машине*
- *компензација* [3]

Редукција губљења снаге због унутрашњих извора топлоте и *њихова изолација* укључује редизајн машине или неких њених делова. Губитак снаге у лежајевима код вретена може се смањити са правилним избором подмазивања и коришћењем нових материјала за кугличне елементе. Хибридни лежајеви (*слика 2.8*) са керамичким куглама имају мање трење од конвенционалних лежајева под истим условима рада. Подмазивање лежајева преко малих отвора у спољашњем прстену лежаја повећава квалитет подмазивања и доводи до већих дозвољених брзина са мањим порастом температуре [3].



Слика 2.8 – Хибридни лежајеви са кугличним и ваљкастим котрљајним телима

Други битан аспект код вретена је преднапрезање лежајева. Лежајеви морају да се оптерете пре него што се изложе динамичком оптерећењу, што резултира стабилнијим и крућим динамичким карактеристикама. Изолација лежајева од вретена се показала као ефикасна метода за смањење издужења вретена. Постоје и вретена са подесивим преднапрезањем, али се примењују само на веома скупим машинама. У већини случајева машина ради са преднапрезањем које је произвођач наменио конкретном вретену. Ако је намера да се користе велике дубине резања са алатима већих пречника, потребно је значајно преднапрезање за радијалне лежајеве на вретену. У супротном вретено неће бити довољно круто да би дало прихватљиви ниво перформанси. Ако се користе високе брзине резања, најбоље је применити мале силе преднапрезања како би се добили што мањи отпори и трење свело на минимум [8].

Контрола температуре машине. Док се брзина и прецизност код машина повећавају, контрола топлоте постаје критична за одржавање у екстремно уским толеранцијама. Затворени тип контроле расхлађивања може да елиминише миграцију топлоте при великим брзинама обраде вретена и топлотну дисторзију машине. Хлађење

при нижим температурама повећава животни век алата и истовремено редукује оксидацију и испаравање [10].

Одређени број произвођача користе системе за хлађење који опструјавају око сервомотора и чак кроз само завојно вретено, али ће и даље бити термалних варијација. Ако се посматра машина која започиње свој рад са хладним стартом, нестабилност се јавља све до успостављања термички стабилног стања [8].

Технике за *компензацију* термалних понашања машине су углавном подељене на:

- **директне** (скретање или заносење се јавља између алата и радног комада и директно се мери)
- **индиректне** (користе модел, тако да су сигнали у корелацији са вредностима скретања и користе се за израчунавање померања преко математичког модела) [3].

Директна компензација је често тешка, јер то подразумева периодично мерење дисторзије машине током обраде. Ефикасан начин за директну компензацију је мерење уз помоћ ласерског зрака који успоставља позицију алата са радним столом предмета.

Индиректна компензација захтева мерење температуре у репрезентативним тачкама на структури машине у функцији времена. Ова температурска мерења сачињавају улази за математички модел који може бити теоријски и емпиријски. Израчуната дисторзија се онда компензује коришћењем CNC или неког другог уређаја са прецизним погоном. Иако је немогућа тачна компензација мерења у неколико тачака, подношљива грешка може бити када се нађу значајне температурске локације. Дакле, само оне локације које су значајне треба укључити, огроман број температурских тачака ће заправо значити повећан број сензора и времена прорачунавања.

Овај приступ се највише користи до сада у мерењу линеарног кретања и нагиба између вретена и радног стола, док се истовремено температура мери на машини и у радном окружењу.

2.6 Хлађење

Осим обраде на суво, свако друго активирање расхладног средства представља термички шок за целокупни систем машине. Током обраде, расхладно средство погађа радни сто машине и генерално температура расхладног средства и машине се разликују у тренутку активирања расхладног средства, а након тога температуре имају тенденцију да се изједначе.

Ако је расхладно средство хладније од машине, сама машина ће повећати температуру расхладне течности, по термодинамичком закону, тако да ће расхладно средство постати топлије [3].

Обрадом без СХП-а су веће температуре у зони резања, али су стабилније и боље је решење за алат од температуре која осцилује услед хлађења зоне резања. Алати обложени карбидним слојем добро подносе високе температуре, али нестабилно хлађење може довести до лома глодала. Такође, алати са превлакама од TiAlN (титанијум-алуминијум-нитрид) се понашају боље на високим температурама. Многа глодала данас могу да издрже високу температуру сечења и да буду веома доследни, али мало могу да трпе термичке промене [11].

Једна од штетних појава је та што струготина постаје тврђа од материјала коме је припадала (због високих температура у зони резања долази то повећања тврдоће). Заштита алата при обради на суво најбоље је извести помоћу ваздуха под притиском, који служи да одводи струготину из зоне резања.

Као што је претходно споменуто, примена *расхладних течности* има прекидно хлађење и ту чињеницу треба добро размотрити, јер расхладна течност може учинити више штете него користи. Ефекат хлађења можда није и најпогоднији, али је ефекат подмазивања у неким ситуацијама неопходан. Нарочита потреба за подмазивањем се јавља код обраде меких материјала (алуминијум, мекани нерђајући челици) где подмазивање омогућава клизање струготине дуж алата. Обрада споменутих материјала није могућа без *СХП-а*, јер би у супротном дошло до залепљивања струготине око резног алата (при великим брзинама резања, врела струготина се заварује око глодала) и крајни исход би био лом алата.

У данашње време све више је заступљено *хлађење хладним ваздухом*, који даје одличне резултате у погледу тачности обраде и постојаности алата. Хладни ваздушни распрскивач (*слика 2.9*) се користи код метала и пластике и има двоструку функцију, генерише и врућ и хладан ваздух. Хладан ваздух се примарно користи на локацијама где *СХП* није пожељан, док се врућ ваздух може користити у ситуацијама када треба одувати струготину из зоне резања (на суво).

Хладни ваздушни распрскивач је повезан за компресор и ради са компримованим ваздухом од 3-8 bar-а температура ваздуха која излази из компресора је око 20°C . Начин рада се заснива на принципу вртложне цеви, у којој су генерисана два супротна ротирајућа ваздушна тока. Користан хладан ваздух који излази може достићи температуру и до -41°C, а врућ ваздух на излазу може достићи до 100°C. Игличasti вентил омогућава подешавање јачине протока и количине хладног ваздуха који излази [12].



Слика 2.9 - Хладни ваздушни распрскивач [12]

Са оваквим типом хлађења, постојаност алата се повећава и до 70%, а квалитет површине је много бољи. Најбоље је користити два уређаја за хлађење, јер се у том случају боље одводи струготине из зоне резања и хлади се алат (јер температура у зони резања код нпр. каљених челика достиже до 1200°C).

2.7 Технолошки параметри резања (брзина, посмак и дубина резања)

У машинској обради, разни фактори као што су деформација предмета обраде и алата, термичке деформације, вибрације, нетачност саме машине утичу на крајњу прецизност обраде. Неки од тих фактора зависе и од избора параметара резања. Три кључна улазна параметра су:

- *посмак, корак или брзина помоћног кретања*
- *брзина*
- *ширина глодања (аксијална дубина резања)* [13].

Манипулацијом ова три параметра може се максимално повећати продуктивност. Овај избор зависи од тога шта се жели постигнути, већу продуктивност на рачун тачности дела и века алата или се тежи оптималном балансу, који треба да задовољи све ове карактеристике.

Брзина помоћног кретања (f) је брзина по којој алат улази у предмет обраде и обрнуто. При томе зуби глодала имају релативно кретање по трајекторијама које одговарају циклоидама, помакнуте су једна у односу на другу вредност за корака по зубу (fz). Порастом посмака повећава се и попречни пресек струготине, силе на зубу алата и храпавост обрађене површине.

Брзина (v) је пут који пређе резна ивица алата у односу на обрађивану површину у јединици времена. Ова брзина је условљена бројем обаде вретена на које је причвршћен алат (брзина резања је уствари угаона брзина вретена).

Аксијална дубина резања (a_p) представља колико широко и дубоко алат продире у предмет обраде. Треба тежити скинути што већу количину струготине уз прихватљиву тачност и квалитет обрађене површине, што се остварује вишеструким пролазима, при чему се за завршну фину обраду бира дубина резања са што мањим пресеком струготине.

Посмак, ширина и дубина резања заједно одређују **проценат уклањања материјала (ПУМ)**.

ПУМ= Посмак $\times$ Ширина $\times$ Дубина , на који утичу многе перформансе са аспекта машинске обраде:

- *животни век алата (постојаност)*
- *завршна површинска обрада*
- *димензиона тачност произведеног дела*
- *потребна снага машине* [13].

Постојаност алата се мери количином материјала коју је тај алат отклонио. Животни век алата, мерено у времену, се смањује са повећањем *ПУМ-а*. Такође, мерење века алата се одређује по броју квалитетних делова које је алат урадио, пре његове измене. Генерално, са повећањем посмака, смањује се животни век алата. Отклањањем веће количине материјала се ствара више топлоте која деградира радни комад и алат. Са смањењем посмака, век алата се продужава, јер обрађује са мањим оптерећењем. Због свега овога, треба размотрити и тип хлађења, јер је оно увек јефтиније од алата и може да произведе огромне уштеде тако што ће чувати алат и продужити му радни век.

Као што се зна, *завршна обрада* (фина обрада) највише зависи од последњег пролаза глодала. Да би се постигла жељена тачност и квалитет површине, последњи пролаз мора да скида што мање материјала. Са недовољно хлађења, квалитет површине ће се смањивати са повећањем брзине алат. Повећањем дубине резања се повећава сила резања која доводи до повишених вибрација и машина мора бити довољно крута да би ублажила вибрације које могу утицати на квалитет обрађене површине.

Укупна *тачност дела* се дефинише као мера испуњености свих димензија које су дате на цртежу од стране инжењера. Док се површинска тачност мери на малим исечцима, димензиона тачност се односи на велике секције или на комплетан део. *ПУМ* је кључна променљива која утиче на тачност дела. Док се *ПУМ* повећава, шансе за опадањем тачности расту. Најпростије речено, са повећањем *ПУМ-а*, много више снаге је потребно за отклањање материја. Уколико крутост алата није компатабилна са већом снагом мотора, могуће је појављивање дефлексије, која доводи до нетачности и непрецизности. Термичка питања се исто тако морају узети у обзир и неке од машина су веома подложне променама у њиховом окружењу. Доказано је да неке машине не производе делове истог квалитета током дана и током ноћи. Такође, материјал који се обрађује може бити подложен термичким променама. Исто тако и хлађење има утицај на тачност и све ово је опширније описано у претходном делу рада.

Снага машине је битан услов када се одабира машина за специјалну операцију. Постоје специјалне табеле које пружају смернице колико је потребно снаге за одређену апликацију. Док се *ПУМ* повећава, повећава се снага која треба све то да подржи. Битно је рећи да са различитим комбинацијама посмака и брзине, са истим *ПУМ* –ом, апликације са већим посмаком ће захтевати мању снагу.

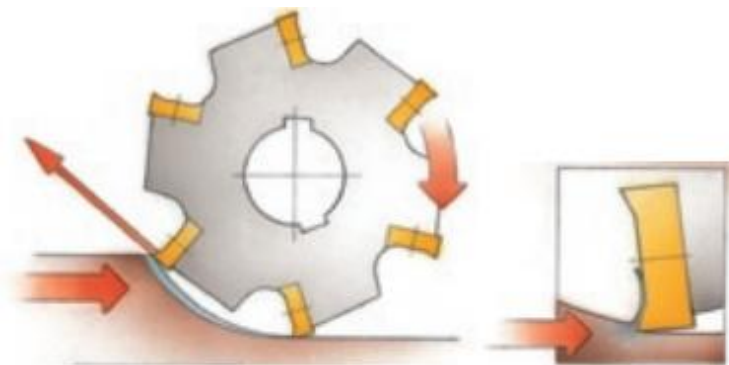
2.8 Супротносмерно и истосмерно глодање

При поступку глодања обрада предмета је могућа у смеру ротације алата или супротно од смера ротације и према томе разликују се две врсте глодања:

- *супротносмерно*,
- *истосмерно*.

Код *супротносмерног глодања* (слика 2.10) радни комад се креће у супротном смеру од ротације алата. При супротносмерном глодању вертикална компонента силе глодања тежи да предмет обраде подигне из стезног прибора (у процесу се јављају високе силе које имају тенденцију да одвоје резну ивицу и предмет обраде једну од друге). Предмет обраде мора бити присиљен на резање, стварајући трење, хабање и бучни ефекат (поготово код обраде побољшаних материјала).

Овај тип глодања се све мање користи и треба га избегавати у операцијама завршне обраде, јер пре свега супротносмерно глодање због сила које делују има тенденцију да повреди (уједе) контуру и за овај тип глодања је потребно велико искуство од стране радника, како би процес глодања извео успешно. Додатак за обраду мора бити много већи него код истосмерног глодања и највише се користи у операцијама претходне обраде (ослобађања).



Слика 2.10 – Шематски приказ супротносмерног глодања [1]

Карактеристике супротносмерног глодања:

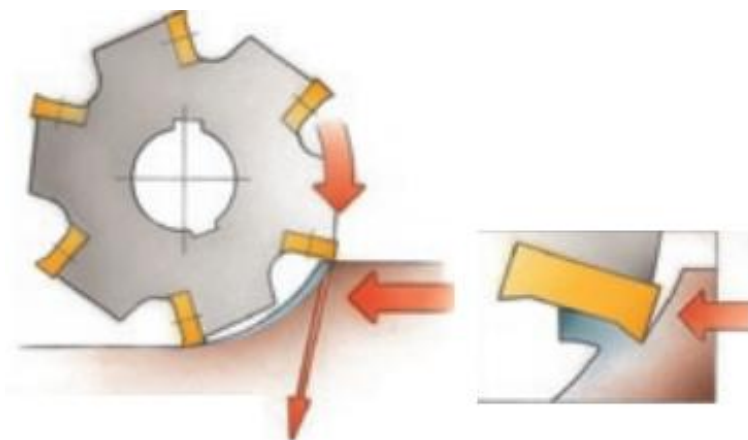
- дебљина струготине расте од нуле до максималне вредности
- резна ивица (зуб) глодала се среће са предметом обраде у дну
- узлазна сила која је формирана у овом процесу има тенденцију да подигне предмет обраде
- више снаге је потребно него код истосмерног глодања
- квалитет обрађене површине је гори, јер се стругодина ношена навише од резне ивице и пада испред алата (доста струготине се поново сече)
- крутост алата је мања него код истосмерног глодања
- препоручује се за грубу обраду
- дефлексија алата ће тежити да буде паралелна са правцем кретања алата [14].

Код обраде *истосмерним* глодањем (слика 2.11), смерови главног и помоћног кретања се поклапају. Истосмерно глодање, у принципу карактерише повољнији облик осциловања зуба глодала што се позитивно одражава на квалитет обрађене површине и постојаност алата. У принципу, истосмерно глодање посебно треба користити у операцијама завршне обраде. Дебљина струготине креће се од максималне величине и силе резања имају тенденцију да издигне предмет обраде.

Као што је у уводу овог рада напоменуте, да су неке ствари биле незамисливе пре око 30 година, то се само није односило на режиме обраде, већ и на смер обраде. Наиме, недостатак истосмерног глодања највећим делом је садржан у промени смера преносне силе код завојног вретена преносника за помоћно кретање, што је посебно било изражено код глодалица старијег типа (недостатак уређаја за елиминисање зазора). Пошто алат има тенденцију да издигне део, то значи да и радни сто треба да се избори са силама. Уколико алат вуче радни комад, посмак се ненамерно повећава што може довести до прекомерне дебљине струготине.

Некада су обичне алатне машине имале само завојно вретено и навртку. Навртка се израђивала од бронзе, а завојно вретено од челика. Навртка је намерно била израђивана од бронзе, јер је лакше и јефтиније израдити навртку, него навојно вретено. Навртка се током времена троши због процеса хабања и добија се зазор између навојног вретена и навртке, па је зато немогуће код таквих глодалица радити са истосмерним глодањем. Са постојећим зазором радни сто машине тежи да испадне из својег лежишта (јер истосмерно глодање не елиминише зазор).

Данас, код модерних глодалица се користе рециркулациона вретена, где је зазор између завојног вретена и навртке увек нула. Завојно вретено је индукционо каљено, а затим брушено и по њему клизи линеарни лежај (навртка) са рециркулационим куглицама.



Слика 2.11 – Шематски приказ истосмерног глодања [1]

Карактеристике истосмерног глодања:

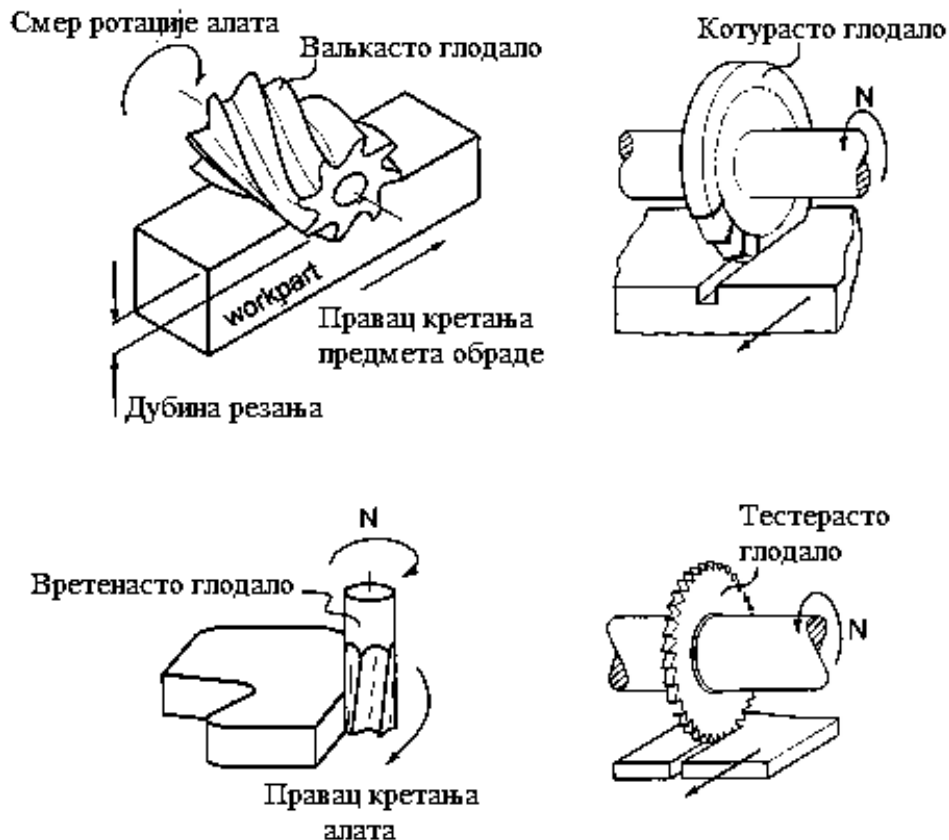
- резна ивица (зуб) алата се среће са предметом обраде у врху
- струготина пада иза глодала (мање струготине поновно долази у процес)
- крутост алата је већа уз 50% дужег животног века алата
- мања снага је потребно
- истосмерно глодање испољава притисну силу, која побољшава држање комада
- притисна сила смањује буку при обради
- дефлексија алата ће тежити да буде управна на правац кретања, тако да може смањити или повећати ширину реза које утиче на тачност [14].

3. ЧЕОНО ГЛОДАЊЕ

Глодање се широко користи у различитим индустријским гранама (аутомобилској, авио, производној индустрији) где се добијају 2D контуре коришћењем различитих типова обимног глодала.

У обради глодањем, алати се међусобно разликују највише по односу између њиховог пречника и ширине (слика 3.1). Према овом критеријуму сва глодала којим се изводи глодање деле се на четири групе и то:

- ваљкаста глодала код којих је ширина глодала већа, једнака или мало мања од пречника
- котураста глодала код којих је однос између ширине глодала и пречника увек мањи од јединице
- вретенаста глодала на којима се резни елементи налазе и по обимној и по чеоној површини
- тестераста глодала изузетно мале ширине намењена операцијама сечења материјала [2].

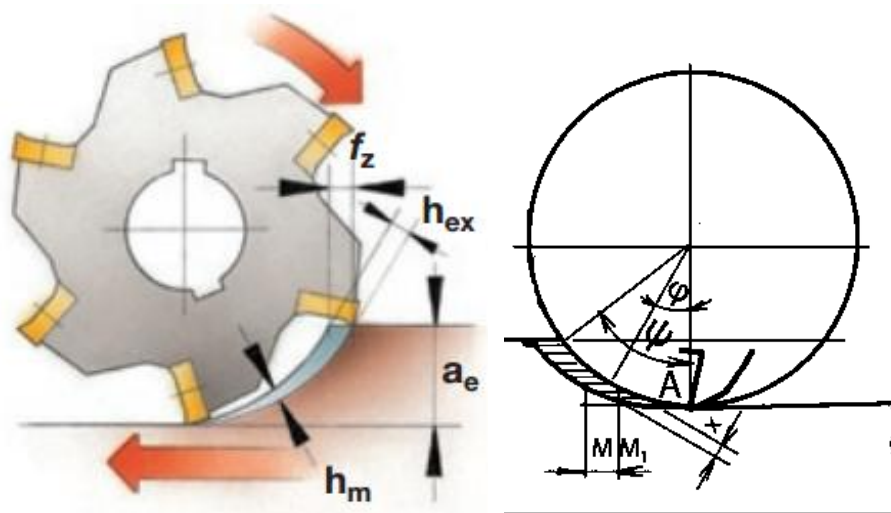


Слика 3.1 – Основни типови глодала [15]

3.1 Параметри глодања

Поред брзине резања (v), брзине помоћног кретања (f) и аксијалне дубине резања тј. ширина глодања (a_p) (у домаћој литератури се обележава са b), који су описани у претходном делу, на слици 3.2 се могу видети основни параметри глодања:

- максимална дебљина струготине (h_{ex}) (у домаћој литератури се обележава са h_{max})
- тренутна дебљина струготине (h_m)
- радијална дубина резања (a_e) (у домаћој литератури се обележава са a)
- посмак по зубу (f_z)
- посмак по ротацији (f_n)
- број (зуба) резних ивица (z_n)
- ротација алата (n)
- угао контакта (ψ)
- угао захвата (φ) [1] [16].



Слика 3.2 – Приказ појединих параметара код обимног глодања [1] [17]

Максимална дебљина струготине (h_{ex} - mm) је најважнији показатељ ограничења за алат у конкретној операцији. Резна ивица на алату је дизајнирана и тестирана да ради са препорученим вредностима дебљине струготине. Дебљина струготине и попречни пресек се мења од нуле до неке максималне вредности (важи и обрнуто, у зависности од смера глодања).

Тренутна дебљина струготине (h_m) је корисна вредност за одређивање специфичних сила резања и прорачуну снаге који се рачуна на основу односа који је тип резног алата примењен.

Радијална дубина резања (a_e - mm) је ширина резања која је обухваћена пречником алата. Код обимног глодања, ширина резања је једнака ширини резног слоја (струготине)

Корак по зубу (f_z - $mm/zubi$) је вредност која се користи за израчунавање помоћног кретања. Пошто је глодало вишесечни алат, то је линеарно растојање које глодало пређе док је један резни зуб у захвату. Вредности посмака по зубу се израчунава по препорученим вредностима дебљине струготине.

Корак по ротацији ($f_n - \text{mm}/^\circ$) је помоћна вредност која указује колико се алат помери у току једне ротације. Ова вредност се користи за прорачун посмака.

Број резних ивица (зуба) (z_n) варира од алата до алата. Са којим бројем зуба ће се алат користити зависи од материјала који се обрађује, габарита дела, жељеног квалитета површине...

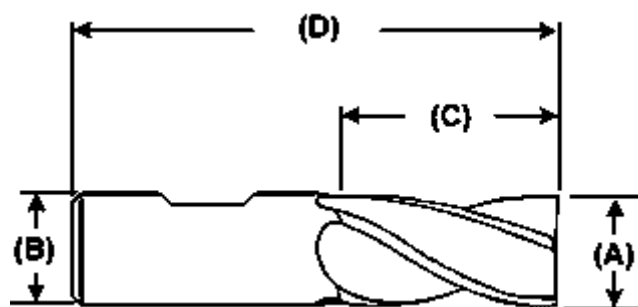
Ротација алата ($n - \text{°}/\text{min}$) је број ротације глодала које вретено направи у једном минути. Ово је вредност која се задаје на основу препоручених вредности које се дају за одређен материја [1].

Угао контакта (ψ) је целокупни угао тј. лук који одговара додиру алата и предмета обраде.

Угао захвата (φ) дефинише тренутни положај зуба глодала у захвату [16].

3.2 Прорачун параметара чеоног глодања

Пре него што се крене у било какав прорачун, потребно је се упознати са алатом и његовом геометријом (слика 3.3).



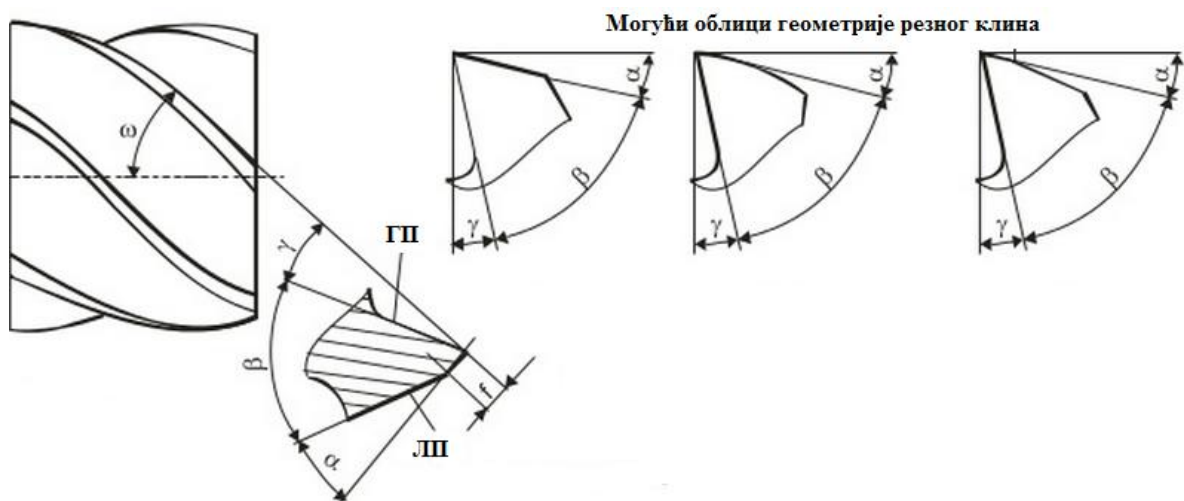
Слика 3.3 – Основне габаритне мере вретеног глодала [18]

Где је:

- A – пречник реза алата
- B – пречник стабла алата (дршка)
- C – дужина реза алата
- D – укупна дужина алата [18].

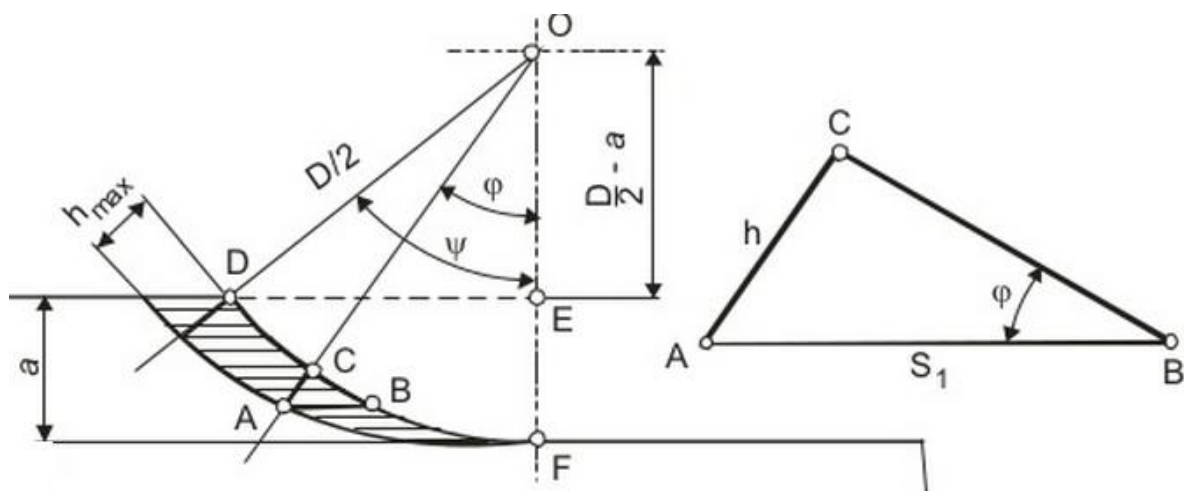
Поред основних габаритних мера, геометрију алата чине још и:

- геометрија реза клина
 1. леђни угао – α
 2. угао клина – β
 3. грудни угао – γ
- угао спирале завојнице ω
- број резних ивица (зуба) алата [16].



Слика 3.4 – Геометрија резних елемената глодала [16]

Као што је већ речено, ширина струготине код обимног глодања је једнака ширини глодања, док тренутна дебљина струготине (слика 3.5) за производни угао захвата следи из троугла ABC:



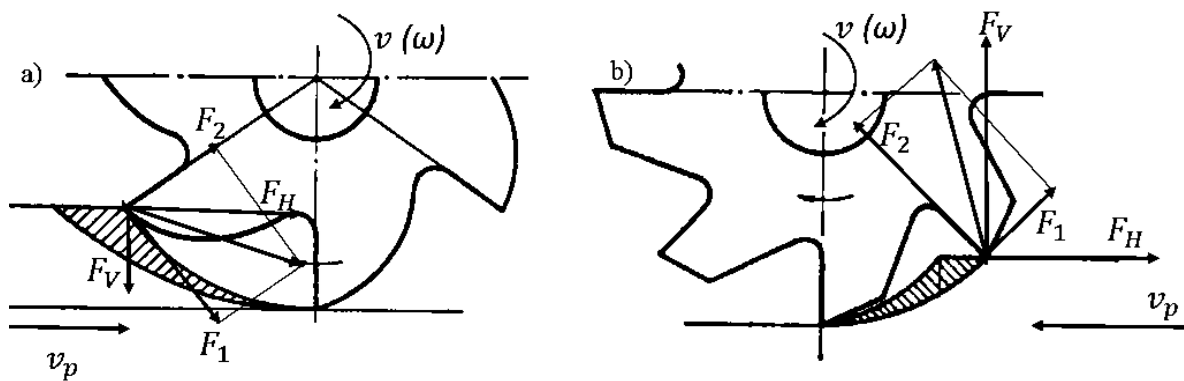
Слика 3.5 – Основни геометријски параметри процеса резања при глодању

Из овога се закључује да дебљина струготине зависи од положаја зуба глодала у предмету обраде и одређена је углом φ тј.

$$X = S_1 \cdot \sin \rho$$

Вектор брзине помоћног кретања v_p је у најнижој тачки додира алата и предмета обраде и при:

- супротносмерном глодању има исти правац као вектор брзине, али супротан смер (слика 3.6a)
- истосмерном глодању има исти и правац и смер као вектор брзине (слика 3.6b) [2].



Слика 3.6 – Отпори резања при супротносмерном и истосмерном глодању

Резултујући отпори резања при обимном глодању разлаже се на две основне компоненте:

- компоненте у правцу главног кретања (главни отпори резања)
- компоненте у правцу управном на правац главног кретања (радијална компонента)

Главни отпор резања, односно обимна компонента силе резања делује у правцу тангенте на резни елемент глодала (зуб глодала). При кретању зуба кроз материјал, врх зуба описује циклоиду која се са довољном тачношћу може апроксимирати кружним луком полупречника $D/2$ (D – пречник алата). Обимна компонента отпора резања мења се са променом површине пресека струготине односно са променом дебљине струготине и то од нуле до неке максималне вредности и обрнуто [2].

Максимални отпор резања у правцу главног кретања F_1 јавља се при појави максималне дебљине струготине:

$$h_{max} = s_1 \cdot \sin \psi$$

Максимална дебљина струготине зависи од величине помоћног кретања, дубине резања и пречника глодала. До израза за њену величину долази се на основу познавања угла ψ .

На основу троугла OED (слика 3.5) се лако може добити величина угла ψ из косинусне теореме:

$$\cos \psi = \frac{\frac{D}{2} - a}{\frac{D}{2}} = 1 - \frac{2 \cdot a}{D}$$

Из основне тригонометријске формуле $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$ следи:

$$\sin \psi = \sqrt{1 - \cos^2 \psi} = 2 \cdot \sqrt{\frac{a}{D} - \left(\frac{a}{D}\right)^2}$$

$$h_{max} = s_1 \cdot \sin \psi \rightarrow h_{max} = 2 \cdot S_1 \cdot \sqrt{\frac{a}{D} - \left(\frac{a}{D}\right)^2}$$

Максимална вредност главног отпора резања F_1 при обимном глодању добија се као производ специфичног отпора резања и максималног пресека струготине:

$$F_{1mah} = k_s \cdot A ; A = h_{max} \cdot b$$

Према *Kroneberg*-у специфични отпор резања k_s зависи од пресека струготине и израчунава се према обрасцу [2]:

$$k_s = C_k \cdot A^{-\frac{1}{\varepsilon_k}}, \text{ за алуминијум } C_k = 110,$$

где је:

- C_k – јединични специфични отпор резања (специфични отпор резања за површину пресека струготине 1 mm^2 . Ова константа зависи од врха резног клина β , врсте и тврдоће материјала који се обрађује, типа хлађења итд.
- ε_k – експонента која се одређује експерименталним путем [2] [19].

Пошто се овај експеримент изводио на алуминијуму, а у литератури [2] експонент за алуминијум није дефинисан, истраживањем других литература се могу наћи разновразни обрасци по којима се израчунава специфичан отпор резања k_s .

Други израз за специфичан отпор резања k_s дао је *Hipler* [19]:

$$k_s = C_k \cdot A^{-0.25}$$

Претходни израз не дефинише експонента ε_k , тако да су остварени сви услови за израчунавање максималног отпора резања F_1 .

Такође, *Martellotti* је извео сличан образац за израчунавање главног отпора резања [19]:

$$F_1 = k_s \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \psi,$$

где је:

- a_p – аксијална дубина резања
- f_z – посмак по зубу (описана у поглављу 3.1).

Посмак по зубу f_z се израчунава према обрасцу [20]:

$$f_z = \frac{f}{z \cdot n}$$

где су нам сви параметри познати:

- посмак f и број обртаја алата (вретена) n , које задаје програмер и
- број зуба глодала z

Број зуба глодала који истовремено врше резање z_r зависи од дубине резања, пречника глодала и укупног броја зуба глодала [2]:

$$z_r = \frac{\psi}{\theta} = \left[z \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot a}{D} \right) \right] \cdot \frac{1}{360} \rightarrow \theta = \frac{360^\circ}{z}$$

Израз за обимну брзину глодала се рачуна преко обрасца [2]:

$$v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1000} \left[\frac{m}{min} \right]$$

Однос уклоњеног материјала је дат изразом [19]:

$$Q = \frac{f_z \cdot z \cdot n \cdot a_p \cdot a_e}{1000} \left[\frac{cm^3}{min} \right]$$

Познавањем величине главног отпора резања F_1 (слика 3.6) омогућава прорачун погонске снаге машине и избор електромотора за погон главног кретања. Од величине радијалне компоненте резултујућег отпора резања F_2 , која делује на леђну површину резних елемената (зуба) глодала, зависи интезитет развоја процеса хабања и постојаности алата. Осим тога, на алат делује резултујући отпор резања, тако да његова деформација или деформација вратила на коме се алат налази зависи од обе компоненте отпора резања.

Однос између компоненти отпора резања F_2 и F_1 зависи од поступка глодања (супротносмерно, истосмерно) и од дебљине струготине односно дубине резања и пречника глодала. У литератури се налазе бројни подаци за величину главног отпора резања F_1 , јер је ову компоненту отпора резања лако мерити. За одређивање величине радијалне компоненте F_2 , најчешће се препоручује усвајање односа између ње и компоненте F_1 и то:

- у обради супротносмерним глодањем $F_2/F_1 = 0.7$
- у обради истосмерним глодањем $F_2/F_1 = 0.45$

Пошто на алат такође делује и резултујући отпор резања, он се разлаже на вертикалну F_v и хоризонталну компоненту F_h .

Вертикална компонента отпора резања F_v , при супротносмерном глодању, мења смер са повећањем односа дубине резања и пречника глодала a/D . При малим дубинама резања вертикална компонента отпора резања притискује предмет обраде на радни сто машине. Код већих дубина резања, међутим, она има супротан смер и тежи да подигне предмет обраде са радног стола.

При истосмерном глодању смер дејства вертикалне компоненте је непроменљив. У овом случају она при свим дубинама резања притискује предмет обраде на радни сто машине.

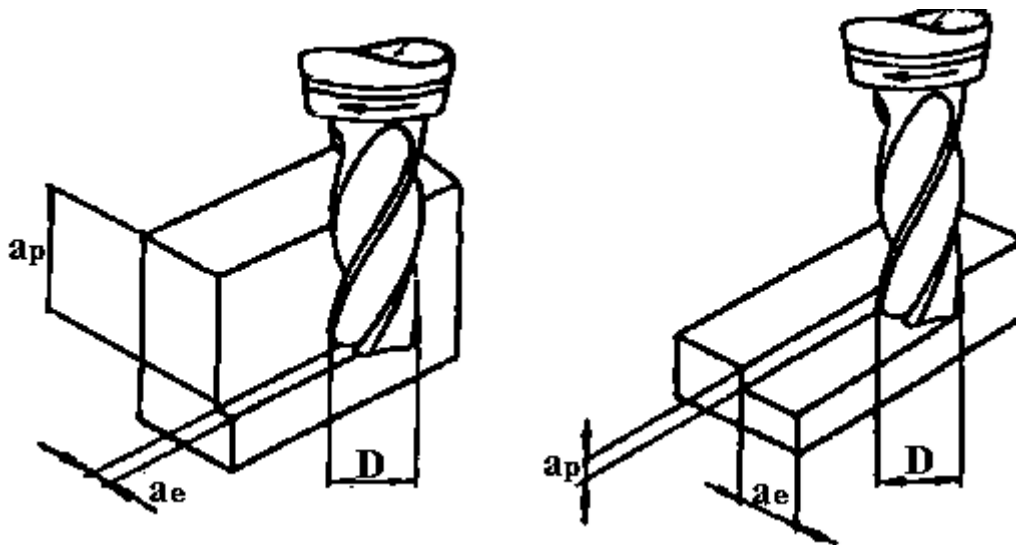
Хоризонтална компонента отпора резања F_h дејствује, при супротносмерном глодању, у смеру помоћног кретања. При обради истосмерним глодањем хоризонтална компонента отпора резања дејствује у супротном смеру од смера помоћног кретања [2].

3.3 Механизам резања код равних глодала

Код равних вртенастих глодала зуби су распоређени и по челу и по обиму алата. Приликом њихове употребе оса ротације алата је управна на површину предмета обраде (слика 3.7). Сматра се да при обради равним алатом, обимни зуби више режу него што то раде чеони.

Стандард ISO 8688-2 је дао препоруке за критеријум резања код равних глодала:

- ако је $a_p > a_e$ онда зуби који су распоређени по обиму имају доминантан утицај при резању
- ако је $a_p < a_e$ онда зуби распоређени по челу алата имају доминантан утицај при резању



Слика 3.7 – Однос аксијалне и радијалне дубине резања

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА УТИЦАЈА УСЛОВА ОБРАДЕ НА ТАЧНОСТ ОБРАДЕ

У овом делу рада биће приказано и описано комплетно испитивање, почевши од машине, алата, начина мерења, типа глодања, материјал, режима обраде итд.

4.1 Услови обраде

- Тип алатне машине (глодалице)

Машина на којој се изводио експеримент је троосна вертикална глодалица *MIKRON VCP1350* са три CNC контролисане осе. Ова вертикална глодалица има осу обртања у правцу Z осе, док X оса представља дужину радног стола, а Y оса прати кретање стола напред и назад. Сва кретања по осама обезбеђују завојна вретена са навртком, а као мерни систем се користи линеарни енкодер.

Табела 1. Карактеристике глодалице *MIKRON VCP1350*

Карактеристике	Мерне јединице	Опсег
X оса	mm	1350
Y оса	mm	900
Z оса	mm	700
Макс. бр. обртаја	°/min	12000
Контролна јединица		Heidenhain TNC 426 M
Магацин алата	капацитет	60

- Тип алата (глодала)

За испитивање се користило вретенасто глодало пречника $\varnothing 8\text{ mm}$ ознаке *Atorn VHM W45 z=4 DIN6535*, које је се користи за профилно глодање и израду жлебова и укопа. Материјал који може да обрађује по ISO стандарду је нерђајући метал, алуминијум и легуре титанијума.

Карактеристике глодала:

- пречник $D = 8\text{ mm}$
- дужина резног дела $l_2 = 19\text{ mm}$
- дубина продирања (дужина препуста) $l_3 = 25\text{ mm}$
- дужина $l_1 = 63\text{ mm}$
- врат $d_3 = 7.7\text{ mm}$
- држач $d_2 = 8\text{ mm}$
- угао завојнице $\omega = 45^\circ$
- број зуба $z = 4$

- **CAD/CAM**

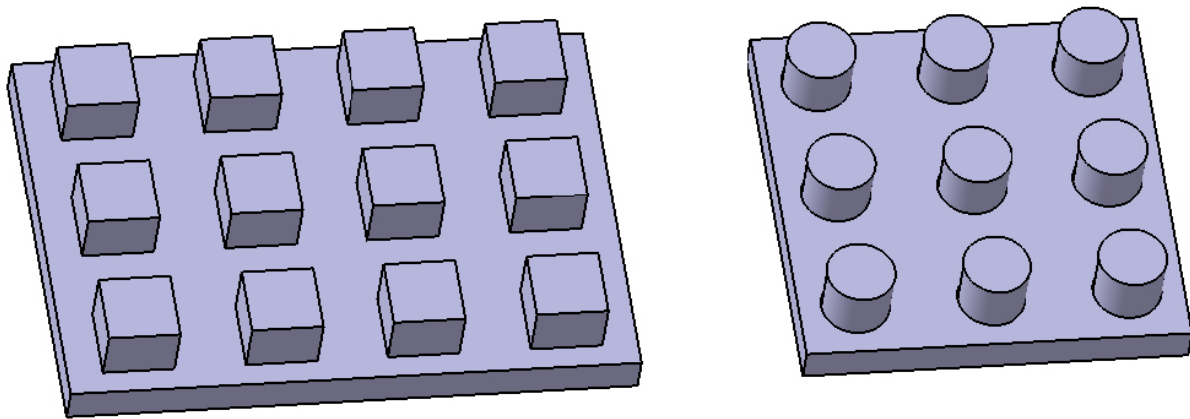
Све стазе (путање кретања) алата, као и модели делова који су коришћене у овом експерименту су добијене употребом софтвера *CATIA V5R20*.

- **Средство за хлађење и подмазивање**

Као СХП користила се емулзија са 4% уља. Што се тиче овог експеримента, емулзија је више коришћена као средство за подмазивање него за хлађење, јер брзине резања нису биле велике. Као што се зна, за меке легуре је обавезно примењивати СХП, јер у супротном би дошло до залепљивања струготине за алат, прегревања алата и на самом крају и до лома глодала.

- **Геометрија узорака**

Површине које су се машинирале биле су равне са призматичним и цилиндричним обликом са различитим дубина резања (слика 4.1).



Слика 4.1 – Изглед геометрије узорака

- **Стратегија глодања**

Стратегије које су се користиле за експеримент су супротносмерно и истосмерно глодање.

- **Мерна машина**

Добијени делови су се мерили на CNC мерној машини *TESA Micro-Hite 3D Manual Machine Version 454*.

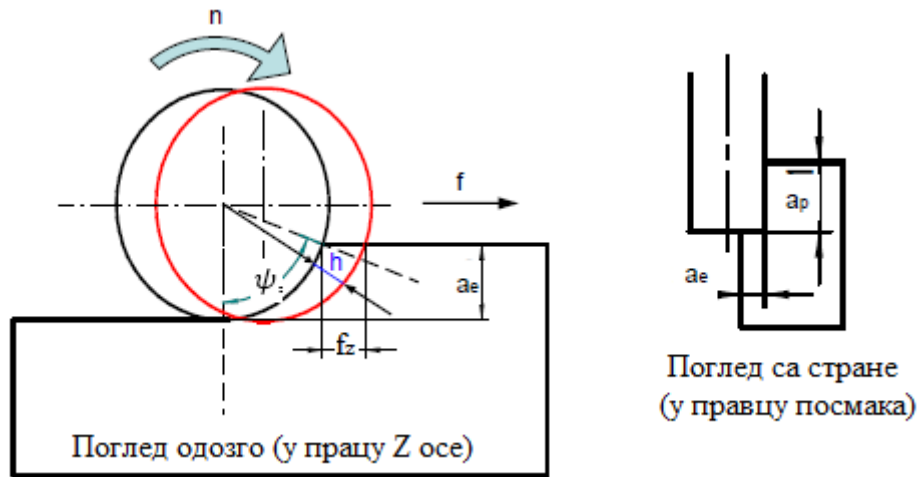
Место мерења је тачно на половини од максималне висине изданака тј. мерна машина је програмирана да мери на дубини од 6 mm од Z осе.

- **Материјал**

Материјал који се користио за експеримент је дуралуминијум (*AlCuMg*) који се добро обрађује, јер је тврд и даје добар квалитет обрађиване површине. Овај тип алуминијума је највише заступљен у авио индустрији.

- **Режими обраде**

Испитивање је засновано на различитим аксијалним дубинама (ширина) резања профилним глодањем (истосмерним и супротносмерним) са идентичним режимима обраде.



Слика 4.2 – Профилно глодање са равним глодалом

1. Призматичан део

Стратегија за овај део је направљена из тзв. ослобађања и финишних пролаза на меру. Из четвртасте плоче димензија (135x100x20) прво су се ослободили призматични делови (изданци), тако да свако од њих има димензије (20x20x12). Затим се приступило финишном машинирању, који је сада из једног пролаза радио призматичне изданке директно на меру са 20x20 на 15x15 са различитим аксијалним дубинама резања за сваки изданак посебно (од 12 mm, па све до 0.2 mm).

Табела 2. Параметри резања код призматичног дела

Параметар	Вредност
Број обртаја алата (n)	3000 °/min
Брзина помоћног кретања (f)	1000 mm/min
Посмак по зубу (f_z)	0.08 mm/zubu
Број зуба алата (z)	4
Радијална дубина (a_e)	2.5 mm
Аксијална дубина (a_p)	(12; 6; 4; 3; 2; 1.5; 1; 0.8; 0.6; 0.5; 0.4; 0.2) mm
Угао контакта (ψ)	8.10°

2. Цилиндрични део

Стратегија за овај део је такође направљена из ослобађања и завршних пролаза на меру. Из четвртасте плоче димензија (95x95x20) прво су се ослободили цилиндрични делови (изданци), тако да свако од њих има димензије (Ø20x12). Затим се приступило завршном машинирању, који сада из једног пролаза ради цилиндричне изданке директно на меру са Ø20 на Ø15 са различитим аксијалним дубинама резања за сваки изданак посебно (од 12 *mm*, па све до 0.2 *mm*).

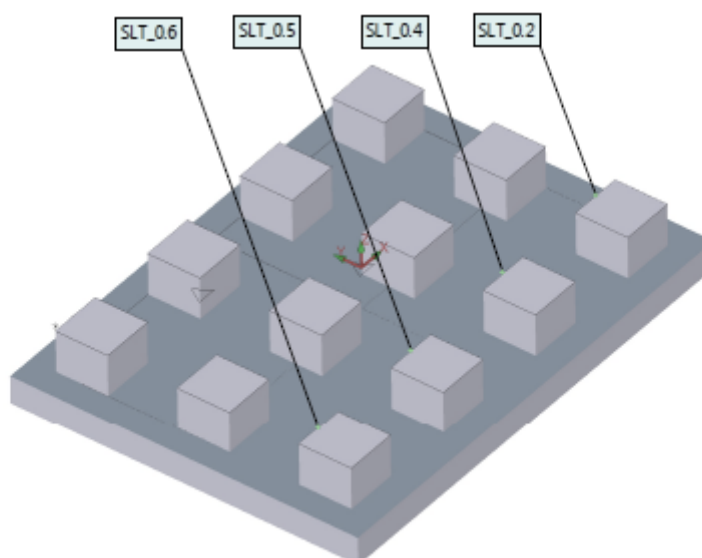
Табела 3. Параметри резања код цилиндричног дела

Параметар	Вредност
Број обртаја алата (n)	3000 °/min
Посмак (f)	1000 mm/min
Посмак по зубу (f_z)	0.08 mm/zubu
Број зуба алата (z)	4
Радијална дубина (a_e)	2.5 mm
Аксијална дубина (a_p)	(12; 6; 4; 3; 2.5; 2; 0.8; 0.5; 0.2) mm
Угао контакта (ψ)	8.10°

4.2 Резултати експеримента

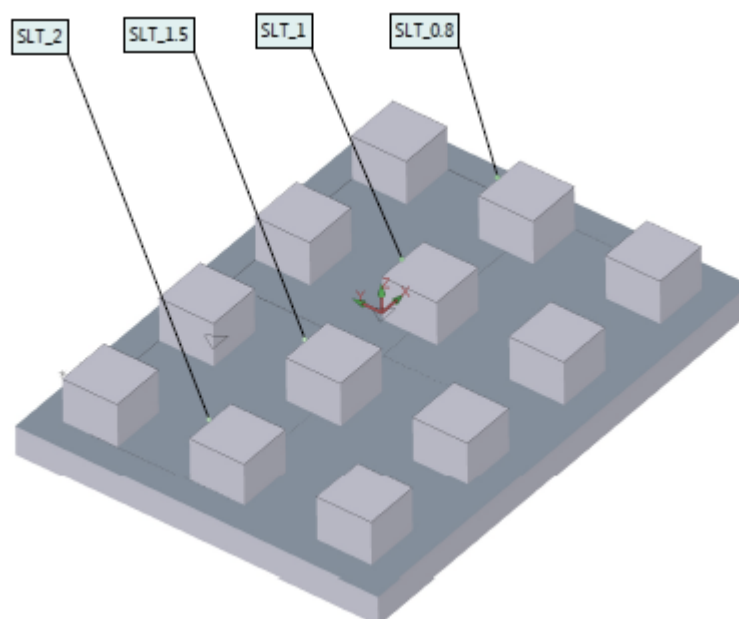
На наредним сликама су табеларно приказани резултати мерења, призматичних и цилиндричних делова, који су генерисани коришћењем CNC мерне машине.

4.2.1 Призматичан део (истосмерно глодање)



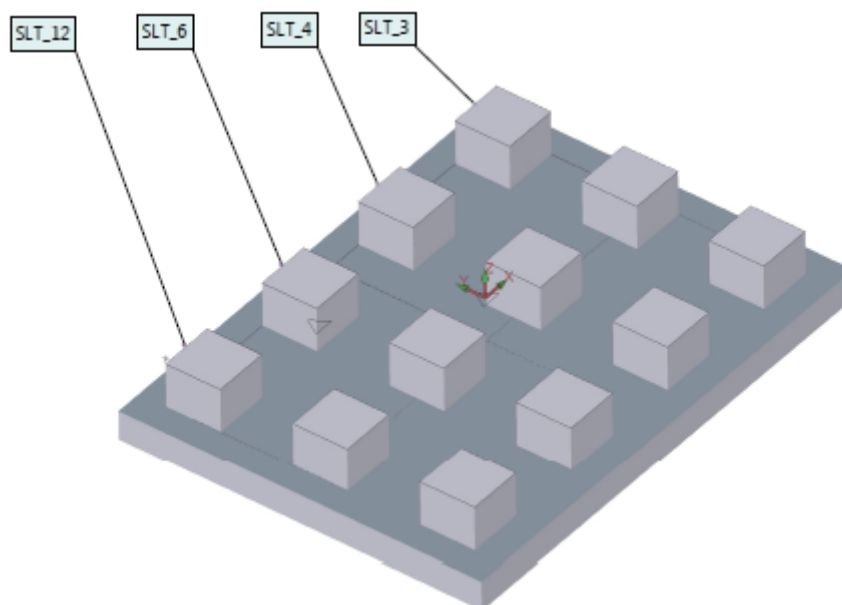
		PART NAME : MilosM		June 05, 2015	10:16
		REV NUMBER :	SER NUMBER :	STATS COUNT : 1	
#	MM	SEQ_1 - SLT_0.2			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.03	0.03	
L		15.00	15.03	0.03	
#	MM	SEQ_2 - SLT_0.4			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.03	0.03	
L		15.00	15.04	0.04	
#	MM	SEQ_3 - SLT_0.5			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.04	0.04	
L		15.00	15.04	0.04	
#	MM	SEQ_4 - SLT_0.6			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.03	0.03	
L		15.00	15.04	0.04	

Слика 4.3 – Мерење призматичног дела код истосмерног глодања са аксијалним дубинама резања 0.2; 0.4; 0.5; 0.6



⊕	MM	SEQ_5 - SLT_0.8		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.03	0.03
L		15.00	15.04	0.04
⊕	MM	SEQ_6 - SLT_1		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.03	0.03
L		15.00	15.04	0.04
⊕	MM	SEQ_7 - SLT_1.5		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.04	0.04
L		15.00	15.05	0.05
⊕	MM	SEQ_8 - SLT_2		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.05	0.05
L		15.00	15.05	0.05

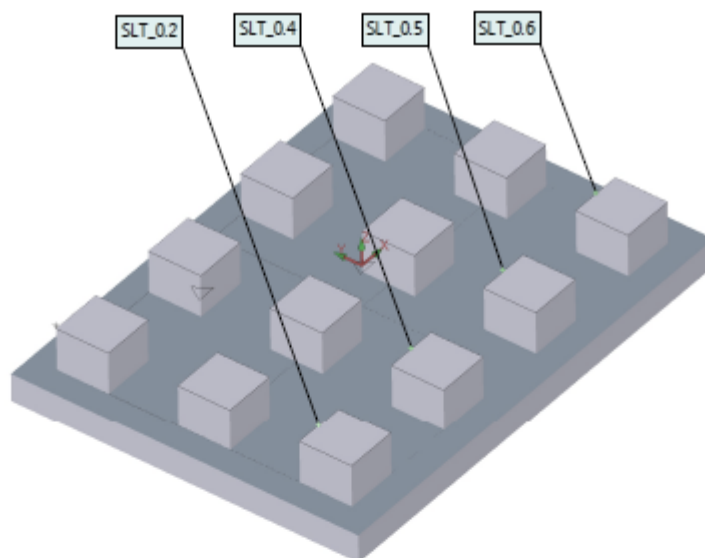
Слика 4.4 - Мерење призматичног дела код истосмерног глодања са аксијалним дубинама резања 0.8; 1; 1.5; 2



⊕	MM	SEQ_9 - SLT_3		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.07	0.07
L		15.00	15.08	0.08
⊕	MM	SEQ_10 - SLT_4		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.06	0.06
L		15.00	15.07	0.07
⊕	MM	SEQ_11 - SLT_6		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.08	0.08
L		15.00	15.09	0.09
⊕	MM	SEQ_12 - SLT_12		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.09	0.09
L		15.00	15.10	0.10

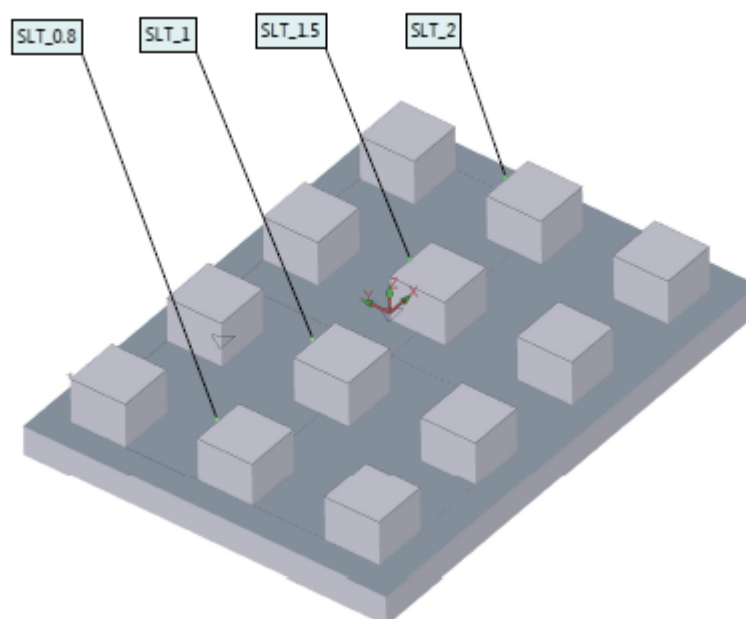
Слика 4.5 - Мерење призматичног дела код истосмерног глодања са аксијалним дубинама резања 3; 4; 6; 12

4.2.2 Призматични део (супротносмерно глодање)



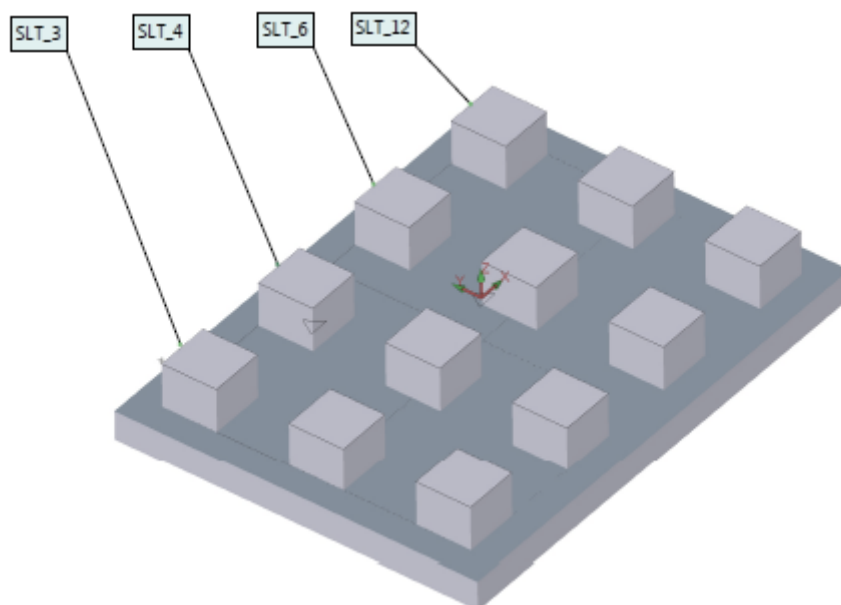
		PART NAME : MilosM		June 12, 2015	14:52
		REV NUMBER :	SER NUMBER :	STATS COUNT : 1	
⊞	MM	SEQ_1 - SLT_0.6			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.03	0.03	
L		15.00	15.04	0.04	
⊞	MM	SEQ_2 - SLT_0.5			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.03	0.03	
L		15.00	15.04	0.04	
⊞	MM	SEQ_3 - SLT_0.4			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.04	0.04	
L		15.00	15.04	0.04	
⊞	MM	SEQ_4 - SLT_0.2			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.04	0.04	
L		15.00	15.04	0.04	

Слика 4.6 - Мерење призматичног дела код супротносмерног глодања са аксијалним дубинама резања 0.2; 0.4; 0.5; 0.6



⊕	MM	SEQ_5 - SLT_2		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.02	0.02
L		15.00	15.03	0.03
⊕	MM	SEQ_6 - SLT_1.5		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.03	0.03
L		15.00	15.03	0.03
⊕	MM	SEQ_7 - SLT_1		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.03	0.03
L		15.00	15.03	0.03
⊕	MM	SEQ_8 - SLT_0.8		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.03	0.03
L		15.00	15.04	0.04

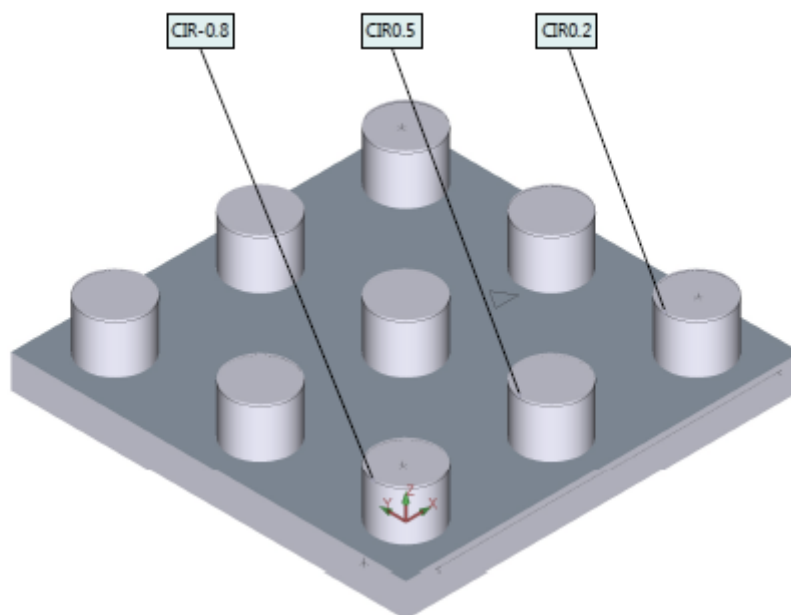
Слика 4.7 - Мерење призматичног дела код супротносмерног глодања са аксијалним дубинама резања 0.8; 1; 1.5; 2



⊕	MM	SEQ_9 - SLT_12		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.03	0.03
L		15.00	15.03	0.03
⊕	MM	SEQ_10 - SLT_6		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.02	0.02
L		15.00	15.03	0.03
⊕	MM	SEQ_11 - SLT_4		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.02	0.02
L		15.00	15.02	0.02
⊕	MM	SEQ_12 - SLT_3		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.02	0.02
L		15.00	15.02	0.02

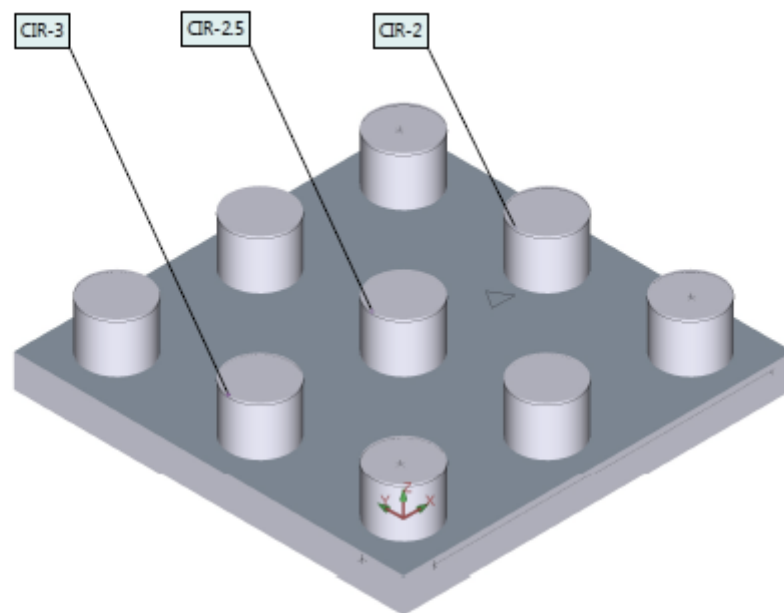
Слика 4.8 - Мерење призматичног дела код супротносмерног глодања са аксијалним дубинама резања 3; 4; 6; 12

4.2.3 Цилиндрични део (истосмерно глодање)



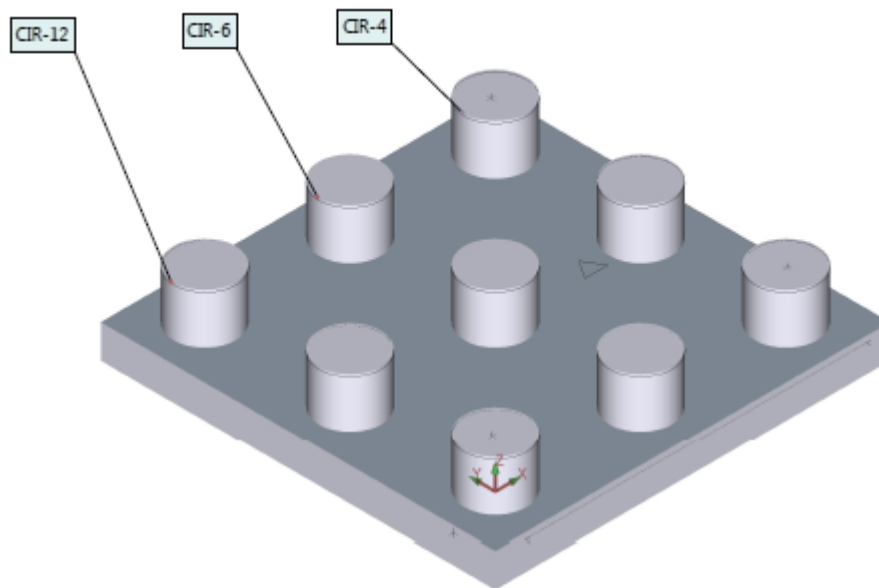
 SCGM		PART NAME : CilinderD15		June 15, 2015	08:22
		REV NUMBER :	SER NUMBER :	STATS COUNT : 1	
⌀	MM	LOC1 - CIR0.2			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.04	0.04	
⌀	MM	LOC2 - CIR0.5			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.04	0.04	
⌀	MM	LOC3 - CIR-0.8			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.04	0.04	

Слика 4.9 - Мерење цилиндричног дела код истосмерног глодања са аксијалним дубинама резања 0.2; 0.5; 0.8;



⌀	MM	LOC4 - CIR-2		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.04	0.04
⌀	MM	LOC5 - CIR-2.5		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.05	0.05
⌀	MM	LOC6 - CIR-3		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.05	0.05

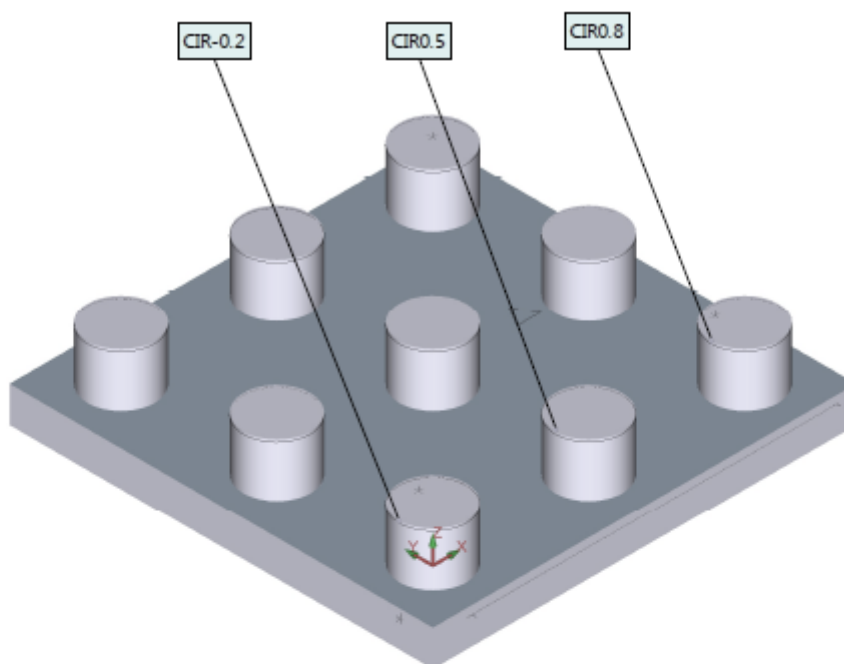
Слика 4.10 - Мерење цилиндричног дела код истосмерног глодања са аксијалним дубинама резања 2; 2.5; 3;



⊕	MM	LOC7 - CIR-4		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.05	0.05
⊕	MM	LOC8 - CIR-6		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.06	0.06
⊕	MM	LOC9 - CIR-12		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.07	0.07

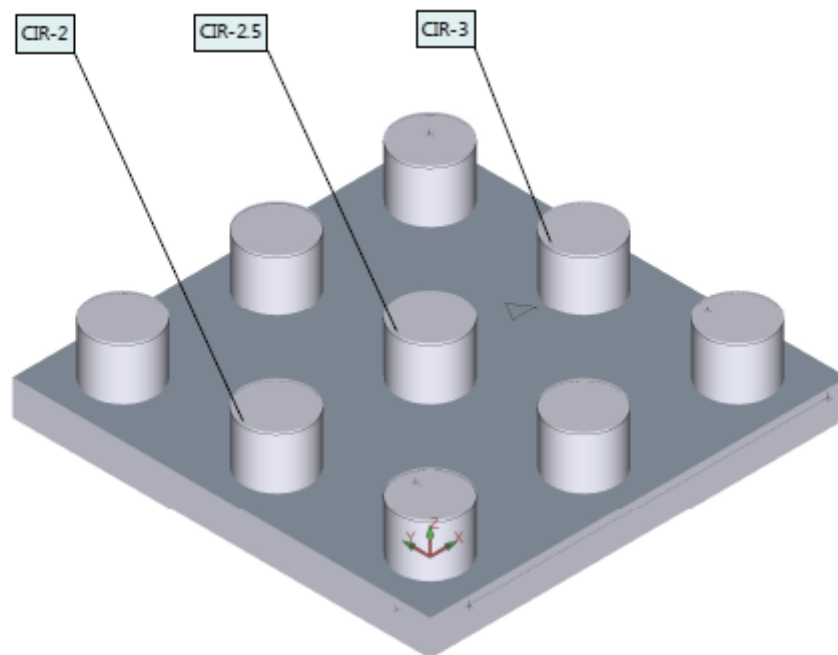
Слика 4.11 - Мерење цилиндричног дела код истосмерног глодања са аксијалним дубинама резања 4; 6; 12;

4.2.4 Цилиндрични део (супротносмерно глодање)



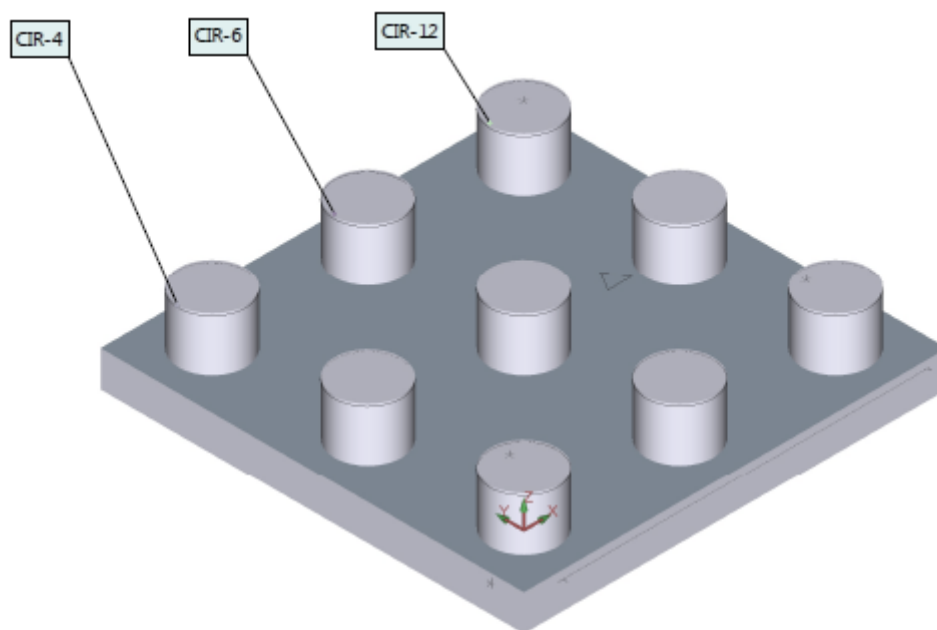
 SCGM		PART NAME :		June 17, 2015	09:29
		REV NUMBER :	SER NUMBER :	STATS COUNT : 1	
⊕	MM	LOC1 - CIR-0.2			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.04	0.04	
⊕	MM	LOC2 - CIR0.5			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.04	0.04	
⊕	MM	LOC3 - CIR0.8			
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	
D		15.00	15.04	0.04	

Слика 4.12 - Мерење цилиндричног дела код супротносмерног глодања са аксијалним дубинама резања 0.2; 0.5; 0.8;



⊕	MM	LOC4 - CIR-2		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.04	0.04
⊕	MM	LOC5 - CIR-2.5		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.03	0.03
⊕	MM	LOC6 - CIR-3		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.04	0.04

Слика 4.13 - Слика 4.14 - Мерење цилиндричног дела код супротносмерног глодања са аксијалним дубинама резања 2; 2.5; 3;

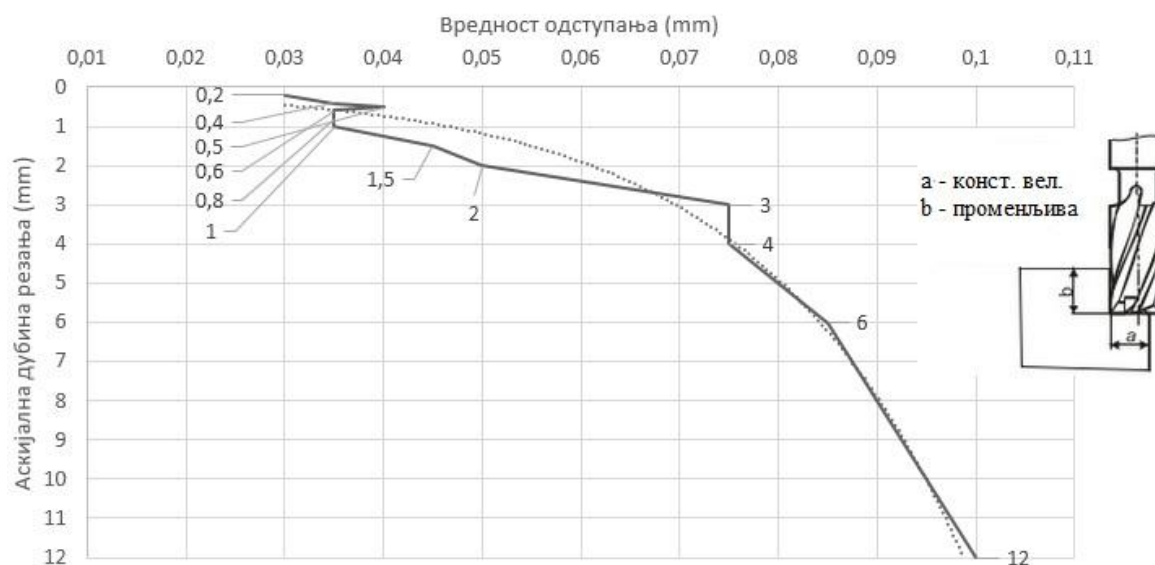


⊕	MM	LOC7 - CIR-4		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.04	0.04
⊕	MM	LOC8 - CIR-6		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.04	0.04
⊕	MM	LOC9 - CIR-12		
AX		NOMINAL	MEAS	DEV
D		15.00	15.03	0.03

Слика 4.15 - Мерење цилиндричног дела код супротносмерног глодања са аксијалним дубинама резања 4; 6; 12;

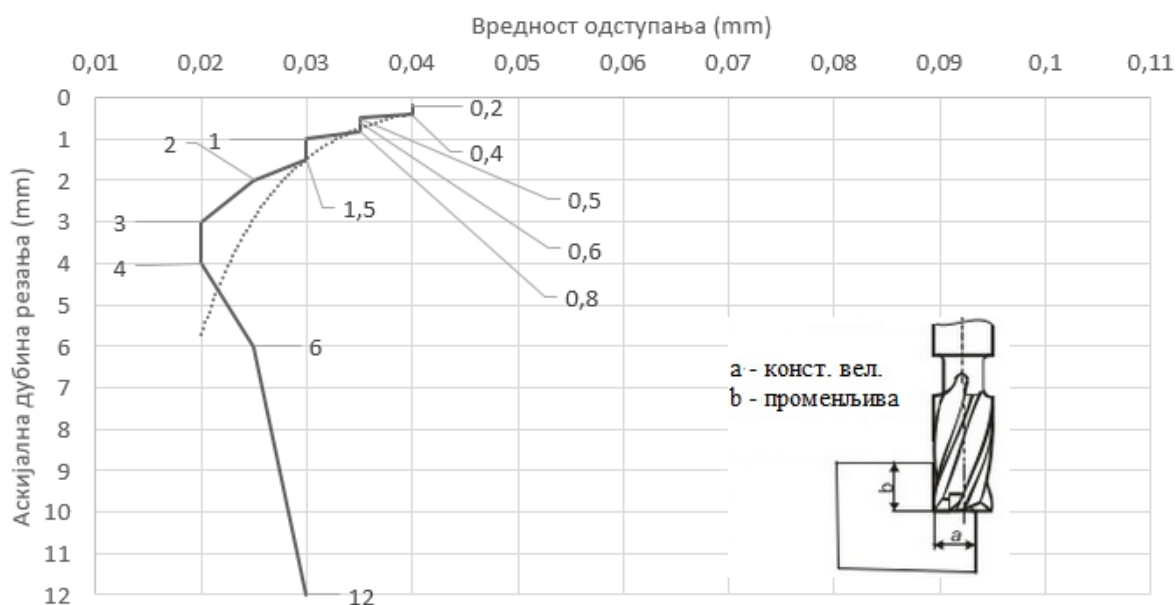
4.3 Анализа добијених резултата

Призматично - истосмерно



Слика 4.16 – Дијаграмски приказ резултати мерења призматичног дела код истосмерног глодања

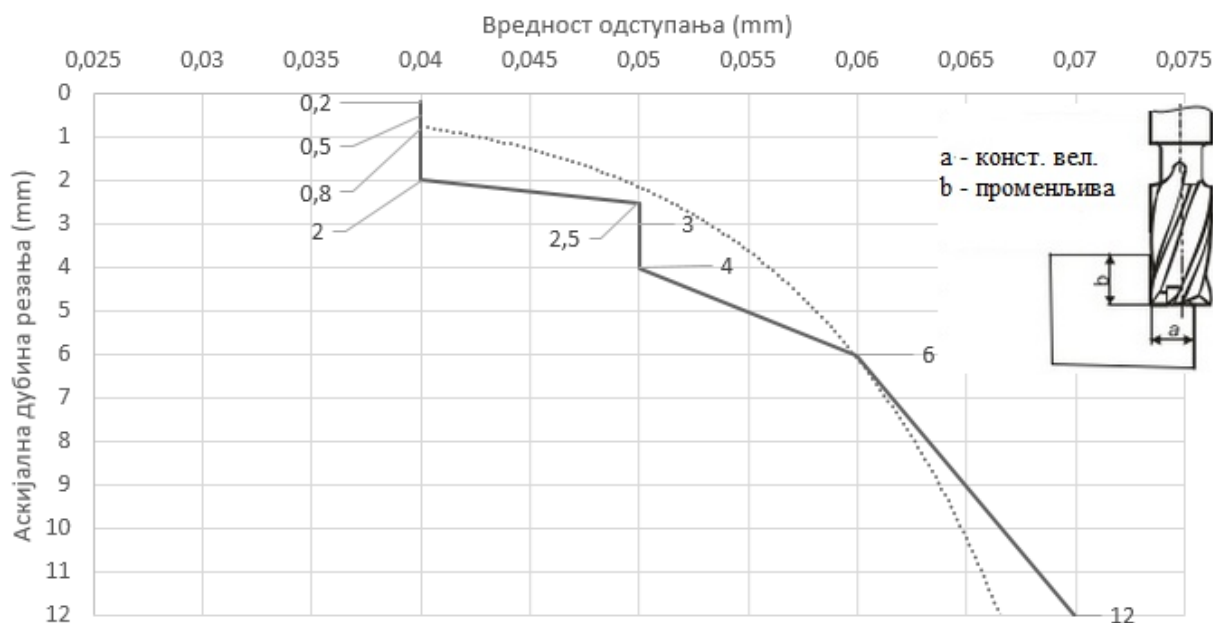
Призматично - супротносмерно



Слика 4.17 – Дијаграмски приказ резултати мерења призматичног дела код супротносмерног глодања

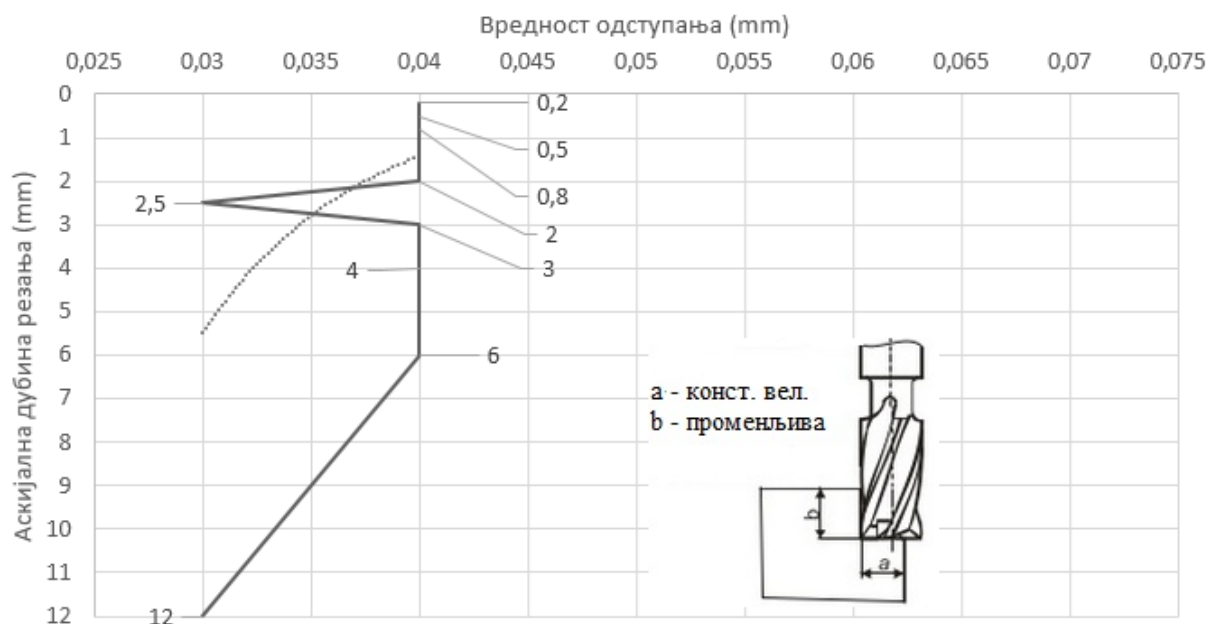
Са слике 4.16 и 4.17 се може јасно уочити да код истосмерног глодања са повећањем дубине резања се повећава и одступање од номиналне мере, док за супротносмерно глодање важи обрнуто. Ово се објашњава тиме што код истосмерног глодања алат са повећањем дубине резања све више тежи да бежи (одбија се) од контуре, а код супротносмерног глодања алат са повећањем дубине резања тежи да повреди контуру, јер се глодало извија ка контури (сила резања вуче глодала ка контури предмета обраде).

Цилиндрично - истосмерно



Слика 4.18 – Резултати мерења цилиндричног дела код истосмерног глодања

Цилиндрично - супротносмерно



Слика 4.19 – Резултати мерења цилиндричног дела код супротносмерног глодања

За слике 4.18 и 4.19 исто важи као и за претходни случај. Такође се може закључити да путања (криволинијска или праволинијска) нема толики утицај на тачност, већ највише имају смер глодања, дубина (аксијална) и ширина (радијална дубина) резања. Управо из разлога што код истосмерно глодања алат увек одбија од контуре, оно се данас више примењује него супротносмерно, јер оператер/програмер увек има сигурност да алат неће повредити жељену меру и да увек може компензовати грешке настале у процесу глодању.

5. ЗАКЉУЧАК

Кроз овај рад се могу видети скоро сви фактори који утичу на димензиону тачност при глодању, како на макро тако и на микро нивоу. Може се рећи да су сви фактори променљиви, а неки од њих и повезани једни са другима тј. постоји међусобна зависност. Кренувши од операције позиционирања Z осе на машини која се изводи са паралелним граничним мерилима (рапортерима) може доћи до грешке, јер они дају поуздану меру само на температури од 21°C . Овај пример се сврстава под микро нивое, који у овом раду нису описивани, али наравно збир свих микро грешака даје неку укупну грешку која може угрозити тачност израде. Наравно, не сме се заборавити и људски фактор, који спада у случајне грешке које се не могу предвидети када ће се догодити.

Конкретно, кроз рад су описани фактори који се у реалним условима могу уочити, пратити и свести на минимум. Сви ови фактори представљају једну јако широку област, тако да сваки појединачни фактор може представљати једну засебну тему и целину за испитивање. У суштини, срж рада се заснива на испитивању дубине резања и смерова глодања тј. како они могу да утичу на димензиону тачност. Сам практичан део је конципиран тако да ширина глодања буде много већа него уобичајно, где се у реалним условима овако нешто не ради, јер увек после операције ослобађања следи обрада на предмеру, па тек онда на меру. Са оваквим режимима обраде можемо видети једну зависност између дубине и ширине резања које итекако утичу на димензиону тачност. Резултати испитивања су то и показала, где се види да код истосмерног глодања, са повећањем аксијалне дубине резања, повећава се и одступање од задате мере. Међутим, то се не може рећи и за супротносмерно глодање, јер код њега, са повећањем дубине резања, алат има афинитет да повреди контуру и управо из тих разлога све се мање примењује у пракси. Овакво испитивање је могуће извести и у челику, одступања би била знатно већа, као и трошење алата. Уз све ово, режими обраде би морали драстично да се смање, јер у супротном алат не би издржао тј. дошло би до лома глодала.

Оваква и слична испитивања могу се извести на различитим материјалима и са варијацијом главног и помоћног кретања алата, уз фиксне дубину и ширину резања. Такође, не сме се заборавити хлађење, које сигурно једним делом утиче на тачност. Све у свему, комбинације могу бити разне и има их много, јер све што се замисли треба покушати да се одради и тако може донети одговоре који ће знатно олакшати даљи рад при самом процесу.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/Metalworking_Products_061/tech_d_1.pdf , 20.05.2015.
- [2] Проф. др Бранко Ивковић, Обрада метала резањем, Југословенско друштво за трибологију, Машински факултет у Крагујевцу, 1994
- [3] [http://orbit.dtu.dk/en/publications/accuracy-of-depth-of-cut-in-micro-milling-operations\(0db0d874-809e-4dea-99a0-c19ec8ed6a40\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/accuracy-of-depth-of-cut-in-micro-milling-operations(0db0d874-809e-4dea-99a0-c19ec8ed6a40).html) , 23.05.2015.
- [4] <http://www.cnccookbook.com/CCNCNCMillFeedsSpeedsDeflect.htm> , 24.05.2015.
- [5] https://www.fsb.unizg.hr/kas/ODIOO/Trosenje_ooc.pdf , 24.05.2015.
- [6] Проф. др Слободан Митровић, Основи трибологије, Презентација: Хабање - теорија хабања и механизми, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, 2012
- [7] http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-73862002000100002 , 02.06.2015.
- [8] <http://www.solfins.com/download/glodalica.pdf> , 02.06.2015.
- [9] <ftp://ftp.nist.gov/pub/mel/michalos/Publications/2014/JournalPaper/bib/70331295.pdf> , 03.06.2015.
- [10] <http://www.turmoilcoolers.com/TurmoilCatalog.pdf> , 04.06.2015.
- [11] <http://www.mmsonline.com/articles/where-dry-milling-makes-sense> , 08.06.2015.
- [12] <http://www.ariana-industrie.de/en/products/accessories/cold-air-nozzle.html> , 11.06.2015.
- [13] http://www.quakerchem.com/wp-content/uploads/pdf/skill_builders/no12_feeds_speeds_depth_cut.pdf , 12.06.2015.
- [14] <http://www.cnccookbook.com/CCNCNCMillFeedsSpeedsClimbConventional.htm> , 15.06.2015.
- [15] http://me.emu.edu.tr/me364/ME364_machining_milling.pdf , 15.06.2015.
- [16] Проф. др Богдан Недић, проф. др Миодраг Лазић, Производне технологије, Обрада метала резањем (скрипта), Машински факултет у Крагујевцу, 2007.
- [17] http://www.vizijadanas.com/obrada_metala_glodanjem.html , 15.06.2015.
- [18] <http://www.endmill.com/pages/training/design.html> , 18.06.2015.
- [19] http://doras.dcu.ie/18300/1/Mohammed_Alauddin_20130306170124.pdf , 18.06.2015.
- [20] <https://www.fdtool.com/speedsfeeds.html> , 18.06.2015.