

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: 324/2017

Немања Д. Јоцић

Високопродуктивни поступци обраде
-Мастер рад-

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Недић
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Мастер студије: **Машинско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Производно машинство**

Име и презиме: **Немања Јоцић**

Број индекса: **324/2017**

ПРИЈАВА МАСТЕР РАДА

Тема рада: **Високопродуктивни поступци обраде**

Задатак: У оквиру мастер рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о високопродуктивним поступцима обраде. Потребно је описати основне карактеристике високобрзинске обраде, обраде ротационим алатима и обраде у условима загревања предмета обраде. У посебном делу рада извршити за обраду стругањем ротационим алатом: моделирање уређаја за прихват обрадне главе за обраду глодањем на стругу, моделирање уређаја за глодалицу, симулацију топографије површине.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Основне високопродуктивних поступака обраде
3. Високобрзинска обрада,
4. Обрада стругањем ротационим алатима,
5. Обрада у условима додатног загревања предмета обраде,
6. Моделирање уређаја за прихват обрадне главе за извођење операција обраде ротационим алатима на стругу,
7. Закључци,
8. Литература.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 16.12.2019.

Резиме:

У овом раду разматране су основе високопродуктивних поступака обраде, уклањањем струготине ротационим алатима, при високим брзинама резања, па је у оквиру тога првенствено разматрано глодање у поменутих условима уз употребу одговарајућих материјала и алата који задовољавају такве режиме обраде, као и обраде у условима додатног загревања предмета обраде. На крају рада извршено је моделирање уређаја за обаљање обраде стругањем ротационим алатима

Abstract:

In this paperwork are described basics of high production manufacturing process, by removing material during the cutting by rotational toll in turn-mill procedure, optimization of production in High Speed Machining, and the machining in increased temperature environment.

Key words: *High-speed machining-HSM, High cutting speed, High Rotational Speed, Turn-Mill, Laser-assisted machining- LAM, Plasma-enhanced machining –PEM,*

Садржај	5
1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	6
2. ОСНОВЕ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ПОСТУПАКА ОБРАДЕ	7
3. ВИСОКОБРЗИНСКА ОБРАДА (HIGH-SPEED MACHINING - HSM).....	10
3.1 Елементи високобрзинске обраде	14
3.3 Примена високобрзинске обраде.....	19
3.4 Примери примене.....	20
3.5 Алатне машине и њихове компоненте у HSM поступку	23
3.6 Резни Алати у обради глодањем високобрзинским поступком	31
4. ОБРАДА СТРУГАЊЕМ РОТАЦИОНИМ АЛАТИМА	33
4.1 Основна кретања и параметри стругања ротационим алатима	33
4.2 Ортогонално стругање ротационим алатима	34
4.3 Тангентно стругање ротационим алатима	36
4.4 Паралелно стругање ротационим алатима	37
4.5 Маachine у обради ротационим алатима	39
4.6 Алати у поступку обраде стругањем ротационим алатима	41
4.7Топографија обрађене површине поступком стругања ротационим алатима	42
5.ОБРАДА У УСЛОВИМА ДОДАТНОГ ЗАГРЕВАЊА ПРЕДМЕТА ОБРАДЕ	44
5.1 Обрада у условима додатног загревања плазмом.....	45
5.2 Обрада у условима додатног загревања ласером.....	47
5.2.1 Употреба додатног загревања ласером код обраде на стругу	47
5.2.2 Употреба додатног загревања ласером код обраде на глодалици	49
5.3 Обраде у условима додатног загревања електричном индукцијом	50
5.4 Маachine у поступку обраде додатним загревањем.....	52
6.МОДЕЛИРАЊЕ УРЕЂАЈА ЗА ПРИХВАТ ОБРАДНЕ ГЛАВЕ ЗА ИЗВОЂЕЊЕ ОПЕРАЦИЈА ОБРАДЕ РОТАЦИОНИМ АЛАТИМА НА СТРУГУ	55
6.1 Електрично вретено	56
6.2. Елементни обрадне главе	57
7. ЗАКЉУЧЦИ	62
ЛИТЕРАТУРА:	64

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Обрада резањем већ дуго низ година налази практичну примену у обради метала уклањањем вишка материјала деловањем међусобно спрегнутих сила између алата и материјала, без обзира да ли се обрада материјала изводи на машини за коју је карактеристично главно кретање алата (код глодалица), односно главно, ротационо кретање материјала (код стругова). У оба случаја долази до контакта између алата (који је одређен специфичном резном геометријом и физичким карактеристикама материјала од кога је израђен) и материјала који се обрађује. Алат без обзира да ли ротира или не, делује одређеном силом која се јавља у контакту са предметом обраде. На овај начин алат резањем односи материјал обраде у складу са претходно дефинисаним режимом обраде као што су: брзина резања (кретања алата или материјала - енгл. *spindle speed*), корак (енгл. *feed rate*), дубина резања, угао контакта, угао захвата, итд. Том приликом долази од одвајања резног слоја материјала (струготине), при чему долази до загревања алата, али и материјала у зони обраде. Повишена температура у већини случајева делује неповољно на предмет обраде као и на сам алат због тога што доводи до хабања алата, веће хрупавости обрађене површине, а у неким случајевима и до оштећења предмета обраде. Како би се избегли нежељени ефекти услед деловања повишене температуре у зони обраде, обично се према карактеристикама материјала и сложености геометрије крајњег производа, усвајају алати одговарајуће геометрије и карактеристика материјала од којих је алат израђен. Поред тога, режим обраде оптимизује се тако да се уклањање струготине обавља у више пролаза, при мањим брзинама резања и при мањем захвату алата. Обично се у процес обраде укључује додатно хлађење као би се заједно са прецизно дефинисаним режимом обраде, деловање повишене температуре свело на оптималне вредности.

Претходно описан конвенционални поступак обраде одузима доста времена нарочито ако је у питању израда делова сложене геометрије, код којих је потребно извести неколико операција као што су на пример: уклањање велике количине материјала стругањем, грубо глодање, обрада дубоких отвора, контурно глодање, фино глодање, итд. Осим тога, проблем представљају савремене легуре високе тврдоће које у свом саставу садрже метале као што су титанијум, волфрам, хром, никл, итд. Ове легуре, о којима ће у даљем тексту бити више речи, због својих физичких и механичких карактеристика је готово немогуће обрађивати резањем конвенционалним поступцима. Са друге стране, поменути материјали су веома заступљени нарочито у ваздухопловној, ракетној и војној индустрији, због високе тврдоће, чврстоће и отпорности на високе температуре. Из тог разлога овакви материјали морају бити подвргнути претходним загревањем како би се смањила чврстоћа и тако олакшао процес обраде. Загревањем предмета обраде, постиже се и смањена склоност ка отврдњавању, мање силе и снага резања, смањен интензитет хабања, итд. Такође, треба напоменути да се већина поменутих материјала, као и неких других лако обрадивих материјала, обрађује високим брзинама резања. Посебно су значајни поступци при високим брзинама резања које могу достићи и до 20000 m/min (Регодић 2011), (Недић 2007).

2. ОСНОВЕ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ПОСТУПАКА ОБРАДЕ

Високопродуктивни поступци обраде обухватају конвенционалне поступке уклањања материјала као глодање и стругање. Оно што издваја ове методе у односу на традиционални приступ методама обраде је висока продуктивност у смислу уклањања материјала за знатно краће време, висок квалитет обрађене површине и целокупна оптимизација ових процеса обраде. У овом поглављу разматрани су различити услови који су од пресудног значаја за постизање високе продуктивности у процесу обраде.

Високопродуктивни поступци обраде подразумевају првенствено обраду материјала стругањем, при чему је за високопродуктивне поступке, карактеристична целокупна оптимизација процеса, како би се на што ефикаснији начин дошло до крајњег производа. Она обухвата поступке обраде као што су (Недић 2007):

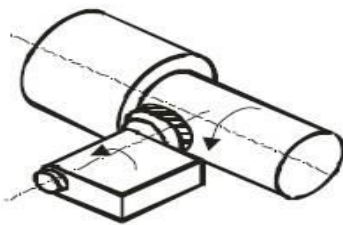
- обрада на повишеним температурама,
- обрада стругањем алатима за глодање и
- обрада при високим брзинама резања.

Обрада на повишеним температурама подразумева претходно загревање предмета обраде до одређене температуре чиме се смањује тврдоћа материјала, и на тај начин олакшава обрада. Овакав приступ обради познат је још од краја 19. века, али није био толико заступљен све до половине 20. века, када се појавила потреба за економичнијим решењем и употребом легура које су се користиле првенствено у ракетној и авио индустрији. Употреба тврдих, али у исто време лаких материјала, отпорних на високе температуре коришћених педесетих година двадесетог века за потребе Америчког свемирског програма, диктирала је другачије приступе обради ових материјала, па су се у складу са тим развијале и машине и алати који су допринели високој продуктивности и оптимизацији обраде. Захваљујући развоју аутоматизације, неконвенционалним поступцима обраде и другим технологијама, развијене су машине које омогућују загревање уске зоне предмета обраде до одређене температуре непосредно пре или у току процеса обраде.

Постоји више начина да се изврши претходно загревање материјала као што су: индукционо, загревање плазмом, ласерско, итд. Међутим, у пракси су најзаступљеније технологије обраде на повишеним температурама као што су: обрада резањем уз загревање плазмом (енгл. *Plasma-enhanced machining* - *PEM*) и обрада резањем уз загревање ласером (енгл. *laser-assisted machining* - *LAM*) (Copley 1990).

Обрада стругањем алатима за глодање одликује се повољним облицима струготине, због тога што у поступку обраде долази до лома струготине услед прекиданог резања, малим брзинама предмета обраде при значајном повећању брзине резања (Zhu 2016).

Главно обртно кретање обавља алат, најчешће чеоно или вретенасто глодало које се креће паралелно у правцу осе предмета обраде (праволинијско помоћно кретање), док предмет обраде обавља помоћно обртно кретање као што је приказано на слици 1.



Слика 1. Обрада стругањем алатом за глодање (Недић 2007)

Обрадом при високим брзинама резања постиже се значајно смањење отпора резања као и температуре предмета обраде и алата, првенствено због тога што се велики проценат генерисане топлоте одводи струготином. Друга предност оваквог начина обраде је побољшање квалитета обрађене површине и тачности обраде, због тога што се обрада одвија у опсегу изван области појаве вибрација, тако да предмет обраде не резонује заједно са алатом. Да би се остварила обрада у о режиму високобрзинске обраде неопходне су одговарајуће машине високе крутости и стабилности за које је карактеристичан висок број обртаја главног вретена који може достићи и до 100000 о/мин. Од оваквих машина се такође захтева висок степен крутости система помоћног кретање, као и осталих система заштите алата од општећења, система управљачке јединице, итд. Резни алати за употребу код обраде при великим брзинама резања морају задовољити одговарајуће услове конструкције као што су: крутост алата, мало радијално одступање, висока уравнотеженост, итд. Они такође морају задовољити услове постављања и стежања алата (позиционирање и поновљивост положаја алата, лака и брза замена, итд.), као и услове резне геометрије алата и материјала од којих је алат израђен. Алати се израђују од тврдых метала, резне керамике или поликристалног дијаманта, док је њихова геометрија оптимална (позитивни грудни угао, велика вредност леђног угла, итд.).

Високобрзински процеси резања се могу поделити према брзини резања на следеће поступке (Недић 2007):

- са високим брзинама резања (600 - 1800 m/min),
- са врло високим брзинама резања (1800 - 18000 m/min), и
- са ултра-високим брзинама резања (преко 18000 m/min).

Глодање високим брзинама све је више присутно у индустрији, првенствено из разлога високе продуктивности као и високог квалитета завршне обраде. Високобрзинским глодањем најчешће се обрађују предмети сложене геометрије као што су гравуре алата за ковање, ливење, пресовање, итд. На постојаност алата у условима глодања при високим брзинама утичу најразличитији параметри као што су: корак по зубу, ширина глодања, брзина резања, карактеристике материјала од којих је алат израђен, итд. Из тог разлога се код високобрзинског глодања користе алати примерени тој намени, при оптималним услови како би се постигли потребни резултати (Pasko 2000).

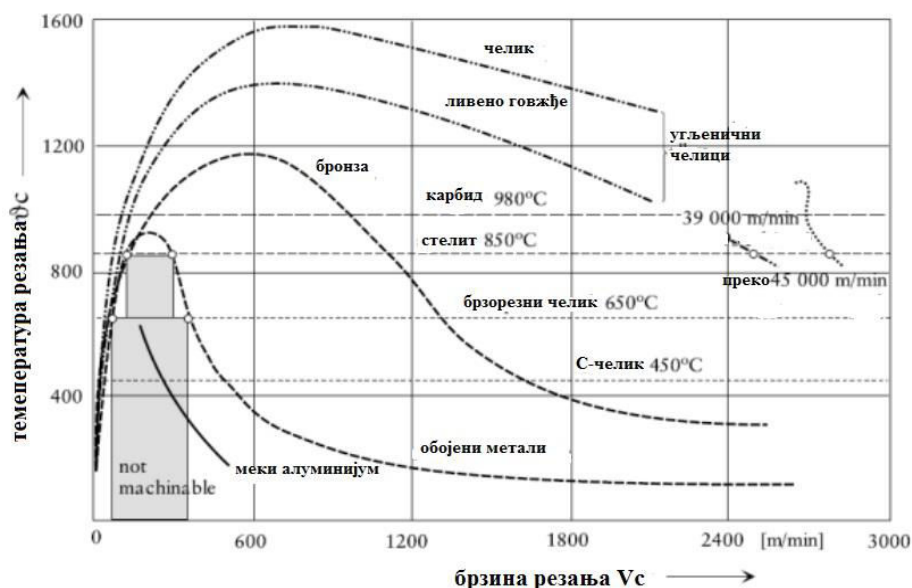
Високопродуктивни поступци обраде заједно са неконвенционалним поступцима обраде чине скуп нових поступака обраде за које је карактеристична оптимизација услова обраде и производња већих серија, за знатно краће време, при чему се тежи постизању циљног квалитета са минималним губицима и при мањем утрошку енергије. У случају неконвенционалних поступака обраде, предмет обраде обрађује се деловањем различитих процеса на предмет обраде. Они могу бити електрохемијски, ерозиони, али и поступци при којима се светлосна, магнетна и топлотна енергија доводи у зону предмета обраде. Овакав начин обраде је у већини случајева веома ефикасан, а квалитет производа добијеног на овај начин одговара претходно постављеним захтевима.

Међутим, неконвенционални поступци обраде не могу у потпуности заменити производне операције као што су глодање или обрада на стругу, како због захтева конструкције дела, тако и због захтева економске природе. Са друге стране, у различитим гранама индустрије, примену све више налазе материјали код којих је обраде резањем знатно отежана због физичких и механичких особина самог материјала. Одатле је уследила потреба за додатним побољшањем већ познатих поступака обраде као што су глодање и стругање, увођењем одређених побољшања које се у великој мери одражавају на целокупан поступак обраде. На првом месту су то параметри под којима се одвија поступак обраде, алати који се користе за ту намену, али и материјали предмета обраде у зависности од којих ће се бирати одговарајући алати и технолошки поступци обраде. Осим тога, развијене су и алатне машине којима је могуће знатно унапредити продуктивност и олакшати поступак обраде. То су углавном *CNC* машине, велике снаге и крутости на којима је могуће извршити обраду при већим брзинама резања али и остварити висок ниво управљивости помоћу претходно пројектованим програмима са тачно одређеним режимом обраде и релативним путањама кретања алата.

3.ВИСОКОБРЗИНСКА ОБРАДА (HIGH-SPEED MACHINING - HSM)

Високобрзинска обрада је један од важних процеса високопродуктивне обраде. У поређењу са класичним поступком обраде метала уклањањем струготине, брзина резања као и корак су у знатно прогресивне што се одражава на механизам резања. Високобрзинска обрада уз коришћење алата са карбидном резном површином *TCT* (енгл. *Tungsten Carbide Tipped*), при већим брзинама и повишеним температурама, показала се као ефикасна метода обраде метала уклањањем струготине, при чему је храпавост површине мала а површина обрађеног дела високог квалитета. Обрада при високим брзинама постаје све више популарна у индустрији задњих година, првенствено због тога што се на тај начин знатно скраћује време обраде, а самим тим и трошкови производње (Schulz 1992). У овом поглављу разматрани различит фактори потребни за оптимизацију поступка обраде и постизање оптималних услова погодних за обраду при високим брзинама резања. На крају поглавља приказани су различити примери примене високобрзинског поступка обраде, машине значајне за овај поступак са главним погонским и управљачким системима, као и захтеви у погледу алата намењених овом процесу обраде.

Прву дефиницију високобрзинске обраде предложио је Карл Соломон 1931. године. Према његовој претпоставци, ако се обрада изводи 5-10 пута брже у односу на конвенционални поступак већина генерисане топлоте у току обраде ће се одводити помоћу струготине, што ће довести до значајно мањег загревања дела који се обрађује. На слици 2, графички је приказан однос температуре и брзине резања за различите материјале (Pasko 2000).



Слика 2. Температура као функција брзине резања (Pasko 2000).

И ако није могуће у потпуности дефинисати ову теорију на основу експерименталних истраживања, потврђено је да долази до релативно нижих температура у подручју резне површине алата која продире у материјал при

одређеним брзинама резања за дате материјале. Утврђено је да се преко 95% генерисане топлоте одводи преко струготине. Са друге стране, постоји више различитих начина дефинисања високобрзинске обраде. Она се може дефинисати и као обрада великим корацима (*High feed machining* V_f), обрада при високом броју обртаја (*high rotational machining* n), обрада високим брзинама резања (*High cutting speed* v_c), итд. Из овога се може закључити да високобрзинска обрада није само обрада при високим брзинама резања, већ поступак у коме учествује више специфичних метода које се одликују прецизно дефинисаним параметрима као што су: корак, дубина резања, брзина резања, али и алати и машине саме по себи. Високобрзинска обрада се најчешће користи код обраде челичних легура при високим брзинама резања и при великим корацима, па се због комбинације ова два приступа често назива високопродуктивним поступцима обраде (Pasko 2000).

За високобрзинску обраду карактеристична је обрада глодањем код које је режим обраде знатно другачији у односу на конвенционални поступак. Према томе, може се рећи да је високобрзински поступак обраде у суштини високо-оптимизовани процес обраде глодањем где су остварени високопродуктивни резултати серијом мањих измена.

Два основна чиниоца које треба узети у обзир приликом оптимизације производног процеса високобрзинске обраде су топлота и брзина резања. Код високобрзинске обраде, генерисана топлота одводи се преко струготине, али да би се то постигло неопходно је постићи оптималне вредности корака по зубу. Наиме, ако се обрада изводи при великој брзини ротације алата, при чему је релативно мала брзина резања укључена у процес, тада резне површине алата неће бити у довољно великом захвату како би се уклонила доваљна количина материјала, па ће самим тим доћи и до прегревања алата. У овом случају, до тога долази из два разлога. Први је неадекватно уклањање површинског слоја материјала у коме је генерисана топлота, а други је повећање топлоте услед великог трења између резних површина алата и предмета који се обрађује. Како трибомеханички систем у обради резањем чине резни алат, предмет обраде и средина у којој се обрада изводи, услед недовољног одношења струготине, при чему нема довољног хлађења и подмазивања из спољне средине, долази до неповољног хабања алата и веће храпавости обрађене површине. У таквим условима долази до високих топлотних и механичких напрезања, формирања и раскидања фрикционих веза између материјала алата и предмета обраде. Како би се на адекватан начин превазишли проблеми везани за два поменута чиниоца, током година развили су се различити приступи оптимизације процеса обраде.

На слици 2 може се уочити да температура у току обраде расте са повећањем брзине резања, али након тога нагло опада првенствено зато што долази до уклањања материјала у виду струготине која задржава преко 95% генерисане топлоте. У зависности од избора материјала предмета обраде и алата, фактор повећања топлоте ће варирати у складу са тим. Међутим, да би се при великој брзини резања остварило ефикасно уклањање материјала потребно је одредити одговарајућу дубину резања. Препорука је да се користе мање дубине резања при већим брзинама резања, тако да се током обраде, формира струготина која је дисконтинуална и која ће се у току обраде што је могуће брже

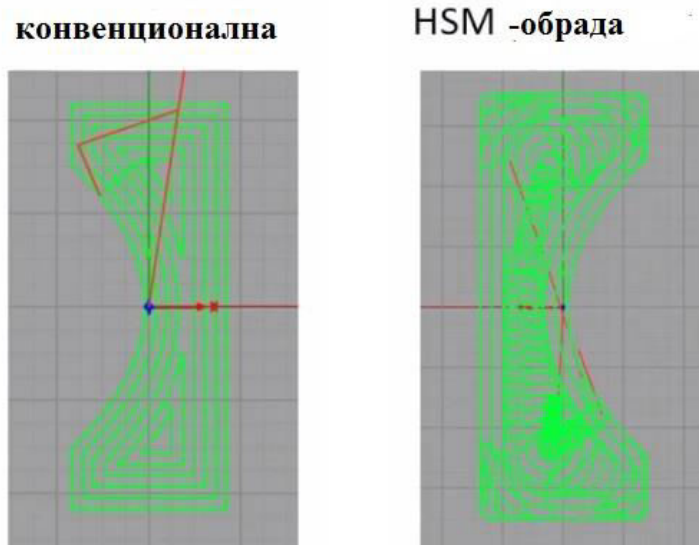
одстранити изван зоне обраде. Осим тога, излагање веће површине алата спољној средини додатно ће довести до хлађења алата.

За разлику од супротносмерног глодања, које се најчешће примењује код конвенционалног поступка обраде глодањем, истосмерно глодање у случају високобрзинске обраде даје боље резултате. Код супротносмерног глодања, уклањање струготине почиње када резна површина алата започне са уклањањем струготине, тако што се материјал уклања почевши од тањег ка дебљем слоју материјала. У том случају теже долази до лома струготине, појављују се веће количине наслага на алату, при чему је процес обраде знатно спорији. У случају истосмерног глодања, резни клин алата при уласку у захват са материјом предмета који се обрађује, уклања прво дебљи слоја материјала који се ка изласку смањује. Струготина је кратка, не задржава се у зони обраде јер долази до лакшег смицања материјала па самим тим је и хлађење много ефикасније, а процес обраде знатно продуктивнији. Како су напрезања предмета обраде код истосмерног глодања знатно већа, потребно је обратити посебну пажњу код прављења плана стезања предмета обраде.

Помоћно кретање алата и/или предмета обраде такође има велики утицај на продуктивност поступка обраде. Основни проблем код конвенционалног поступка обраде глодањем је путања алата која значајно одступа од задате путање, када алат у току обраде мења путању за 90° . У тренутку када глодало мења своју путању за 90° , нарочито код обраде унутрашњих површина (конкавних површина), угао захвата се мења што доводи до знатно повећаног динамичког оптерећења алата.

Оптерећења услед промене путање алата и ударна оптерећења која се јављају при обради глодањем не представљају проблем уколико се обрада изводи на стабилним машинама велике крутости и снаге при мањим брзинама резања, мањем броју обртаја главног вретена, итд. Међутим то представља велики проблем код високобрзинске обраде, код које су параметри резања много већи. Како би се додатно олакшао процес производње, а самим тим и убрзао, током година су развијени различити алгоритми помоћу којих је могуће оптимизовати путању алата тако да се по свим правцима кретања алата и/или предмета обраде одржи исти угао захвата. Помоћу напредних *CAD/CAM* програмских пакета и савремених *CNC* обрадних центара, кретање алата и/или предмета обраде могуће је оптимизовати тако да се одржи константан угао захвата алата код високобрзинске обраде што омогућава знатно веће брзине резања, краће време обраде уз високу тачност обраде.

На слици 3 приказана је разлика између кретања алата и/или предмета обраде приликом конвенционалне обраде глодањем и високобрзинске обраде са константним углом захвата алата.



Слика 3. Релативно кретање алата код конвенционалне и високбрзинске обраде (HSM) (Pasko 2000)

Као што је већ речено, високбрзинска обрада има значајне предности у односу на конвенционалну обраду глодањем. У табели 1 (Pasko 2000) приказане су разлике у брзини резања између конвенционалне и високбрзинске обраде.

Материјал предмета обраде		Ваљкаста глодала		Глодала са уметнутим зубима	
		Типична брзина резања [m/mm]	HSM брзина резања [m/mm]	Типична брзина резања [m/mm]	HSM брзина резања [m/mm]
Алуминијум		>305(WC)	>3050(WC)	>610	>3658
Ливено гвожђе	меко	152	366	366	1219
	дуктилно	107	244	244	914
челик	Легуре	76	244	213	366
	Тврдоће > 65HRC	24	122	30(WC) 91 (CBN)	46 (WC) 183(CBN)
Титанијум		38	61	46	91
Суперлегуре		46	76	84WC 213 (sialon)	366 (sialon)

Табела 1. конвенционална и HSM обработка: (WC- волфрам карбид), (CBN- борозан и елбор), (sialon –силицијум нитрат)

Како се високбрзинска обрада најчешће користи у производњи алата за запреминско обликовање (нпр. ковање, ливење, пресовање или бризгање пластичних маса и др.) код којих је потребно израдити просторну гравуру са одговарајућим толеранцијским димензијама, у табели 2 (Pasko 2000) дати су неки препоручени параметри резања за израду ових алата према врсти обраде.

Врста обраде	V_c , m/min	a_p , %	a_e , %	f_z , mm/по зубу
Груба	100	6-8	35-40	0,05-0,1
Полуфинална	150-200	2-4	20-40	0,05-0,15
Финална	200-250	0,1-0,2**	0,1-0,2**	0,02-0,2

** % од пречника глодала, mm

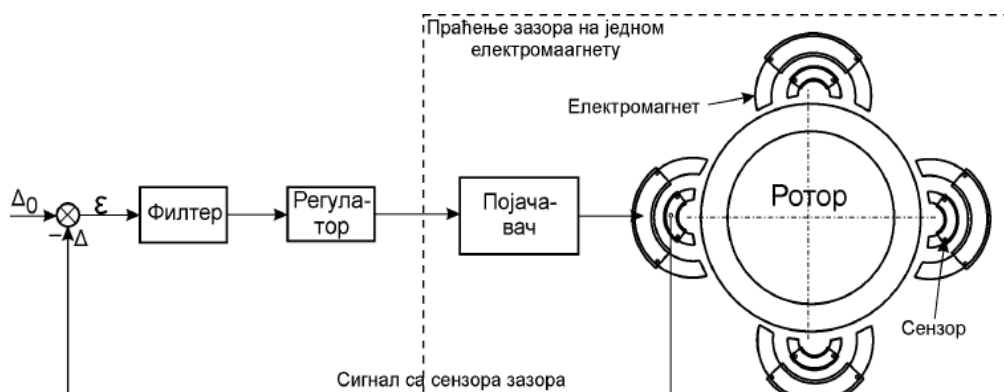
Табела 2. Типични параметри резања за карбидна глодала ($TiCN$ или $TiAlN$, тврдоће HRC 54-58)

Високобрзинска обрада, као један од високопродуктивних процеса обраде има значајне предности у односу на конвенционални приступ глодању.

3.1 Елементи високобрзинске обраде

Систем високобрзинске обраде чине више елемената који ако се на адекватан начин оптимизују доприносе укупном побољшању процеса обраде. Основне елементе чине (Кораћ, 2007):

- *одговарајућа машина* – мора задовољавати критеријуме као што су снага, крутост, стабилност, брзина обртаја главног вретена управљивости, итд. Основни проблеми код конструкције оваквих машина могу се срести код лежишта главног вретена које мора бити прилагођено великом броју обртаја. Једно од могућих решења је коришћење активног електромагнетног лежишта помоћу којег је могуће остварити висок индекс брзоходости и до $4 \cdot 10^6$. Концептуална шема приказана је на слици 11.



Слика 4. Активно електромагнетно лежиште (Кораћ, 2007)

- *одговарајући алат* – пројектован за ту намену (глодала од тврдог метала, или плочица ако се ради под глодачким главама), који мора бити повезан са главним вретеном помоћу носача алата предвиђени за ту намену (носачи са малим радијалним бацањем). Одабир алата се обавља према потребној операцији, карактеристикама алата, али и на основу карактеристика материјала који се обрађује.
- *одговарајући програм* – који мора бити пројектован и симулиран пре него што се отпочне са обрадом. Већина софтвера који се користе за ову намену (*Computer aided manufacturing - CAM*), припадају групи

(*Computer aided design – CAD*) софтвера којим је могуће извршити тродимензионално моделовање предмета обраде, а затим на основу тога, унети податке који се односе на карактеристике и параметре машине, режиме обраде, као и геометрију алата који ће се користити у складу са сваком од пројектованих операција. Након задавања путања алата, могуће је извести грешке у програму, али и могућности за даљу оптимизацију програма.

Оптимизација процеса високобрзинске обраде треба да обухвати четири области: оптимизовање стабилности алата, ефикасност путање алата, радне перформанси и једноставност у програмирању и извођењу операција (Кораћ, 2007):

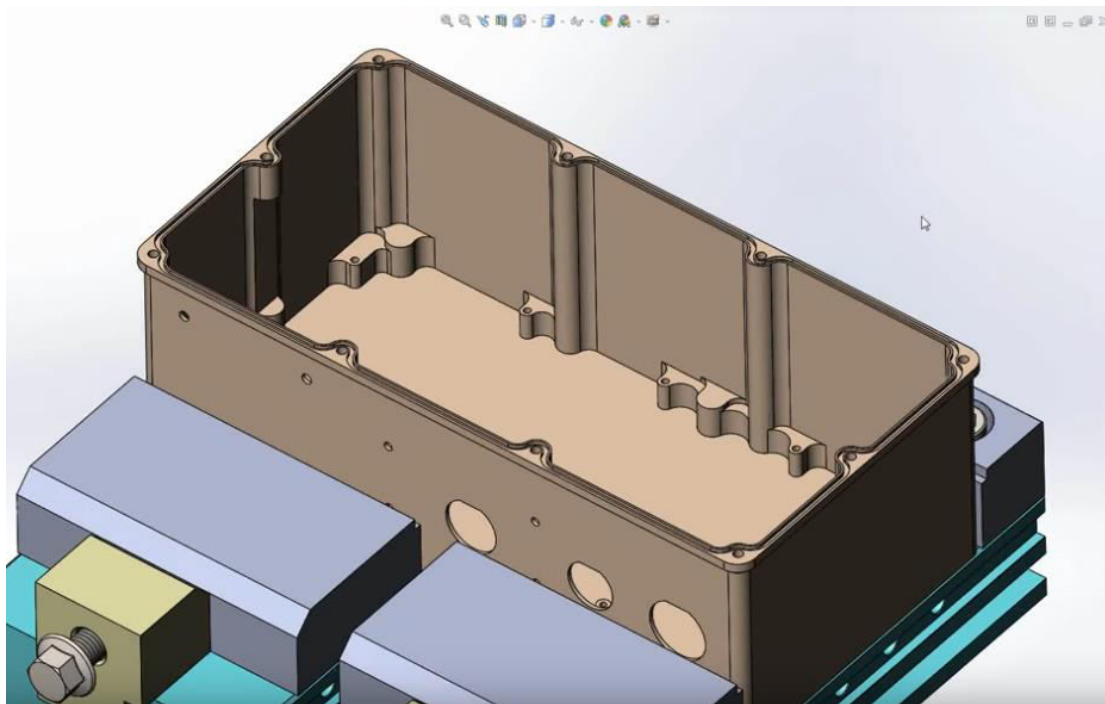
- *оптимизовањем стабилности алата* – постиже се смањење брзине линеарног кретања сваки пут када глодало прелази из линеарног брзог хода у контакт са предметом обраде, непосредно пре почетка извођења задате операције. На тај начин се смањују ударна напрезања која могу довести до прекомерног трошења алата, оштећења површине предмета обраде, нетачности обраде, па чак и до лома алата. Оптимизацију стабилности кретања алата изводи сам *HSM* софтвер према унапред унетим подацима.
- *ефикасност путање алата* – способност *HSM* софтвера да оптимизује кретање алата тако да се одржи брзина резања, што дужи контакт са предметом обраде и исто време што мањи „празан ход“ (кретање алата ван зоне обраде), је од великог значаја за побољшавање перформанси. Софтвер је такође у стању да потпуно аутономно одреди адекватну путању алата тако да се већи део материјала предмета обраде уклања алатом највећег пречника, тако да се смањује потреба за заменом алата све док се не појави реална потреба за тим. Када се једна операција потпуно заврши, а алат промени, наредна операција ће се обављати у складу са режимом обраде који је погодан за дату операцију и у складу са карактеристикама алата који се користи за то.
- *радне перформансе* - високобрзинска обрада оптерећује софтвер због великог броја података који се константо обрађују. Како би се на адекватан начин подржао рад сложених алгоритама који су укључени у процес израде програма, неопходно је да софтвер буде подржан са једне стране од самог *CAD/CAM* софтверског пакета, а са друге од саме машине и њене управљачке јединице. На крају, комуникација између машине и рачунара, као и самог рачунара на коме се израђује програм, морају задовољити захтеве оваквих софтвера у смислу брзине протока информација, обраде великих датотека, извођења сложених тродимензионалних симулација, итд.
- *једноставност руковања* је још једна од важних области која доприноси оптимизацији целокупног процеса високобрзинске обраде. Софтвер мора да омогући кориснику да лако и брзо програмира путању алата са сигурношћу да ће софтвер урадити онако како је задато сваки пут. Један од начина програмирања које је потребно да *HSM* софтвер подржи је допуштање корисницима да дефинишу геометрију алата на основу приручних табела и других информација. Други начин је да софтвер у себи већ поседује одговарајући сет инструкција које ће се обављати по

одређеном алгоритму, потпуно аутоматски и у складу са задатом операцијом.

У индустрији су заступљена различита софтверска решења којима је могуће задовољити захтеве *HSM-a*. Једно од таквих решења нуди француски развојни тим *DassaultSystème*, који је још од 1981. године присутан на светском тржишту, као један од лидера у развоју *3DCAD/ CAM* софтверских пакета. Најпознатији од ових софтвера је *CATIA 3D*, за којом следи *SolidWorks* који постаје све више заступљен у индустрији због своје једноставности и флексибилности у погледу најразличитијих конструкторских и оперативних задатака.

3.2 Пример израде NC програма за HSM обраду

На слици 5. приказан је процес израде програма потребног за оптимизацију високобрзинског процеса резања. Довољно је да се претходно моделовани предмет обраде, представи онако како треба да изгледа након обављених свих потребних операција, софтвер ће аутоматски генерисати димензије припремака према геометрији тродимензионалног модела.

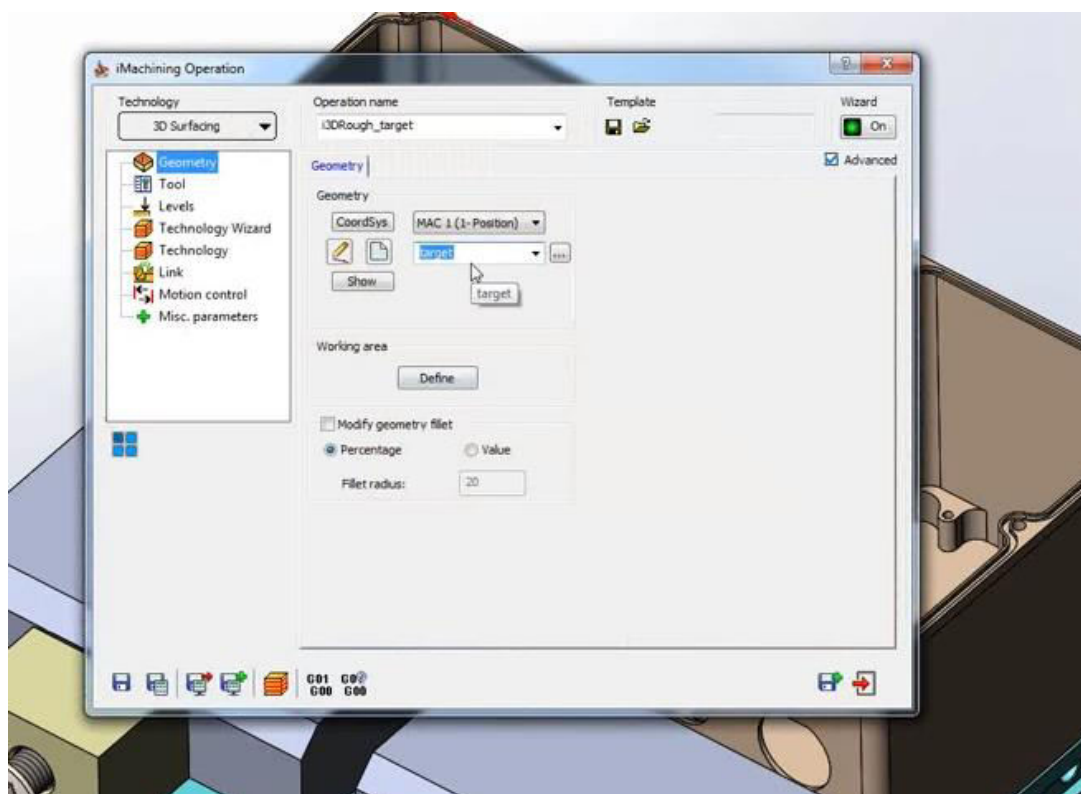


Слика 5. Тродимензионални модел предмета обраде у 3D CAD/ CAM софтверу *SolidWorks- SolidCam*

Софтвер аутоматски препознаје димензије модела и смешта га у одговарајуће стезне елементе под условом да су ти елементи претходно моделовани и сачувани у бази података. За сваку машину могу се направити тродимензионални модели стезних елемената, а једном када се они направе могуће је користити их у току израде различитих програма који ће се извршавати на одређеној машини. Уколико је потребно да се изради посебан план стезања, могуће је израдити програм и без претходно дефинисаних стезних елемената, али се у том случају морају задати извесна ограничења у смислу

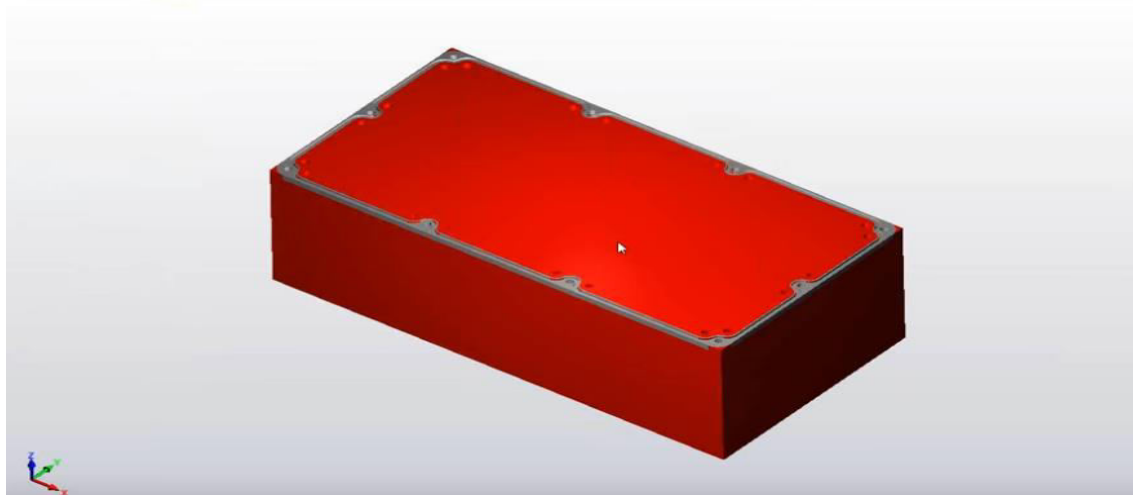
кретања алата и/или предмета обраде како не би дошло до оштећења алата и/или предмета обраде.

Следећи корак је уношење параметара за сваку операцију као што је приказано на слици 6. У посебно прозору уносе се димензије алата, режим обраде итд. Како је у конкретном случају приказано на слици 5. финални производ веома сложене геометрије, програм за његову израду састојаће се и низа операција за које је потребно доста времена ако се програмирању приступи на конвенционални начин који подразумева да се глодање обавља степенасто до прве равни која треба да остане до следеће операције, односно до следеће промене алата. Напредни софтвери као што је *SolidWorks* имају могућност да целокупан прамет обраде виде као једну целину и да у складу са тим оптимизују процес обраде тако што ће сложеним алгоритмом одредити најоптималније решење кретања алата и/или предмета обраде при коме ће се једним алатом уклонити што је више могуће материјала за што краће време. На слици 6 је такође приказано да је целокупан прамет обраде означен као “*target*”, што значи да ће се уклањање материјала обавити по свим правцима изузев граница које одређује крајњи производ као и стезни елементи.



Слика 6. Прозор Machining коме је потребно задати све потребне параметре.

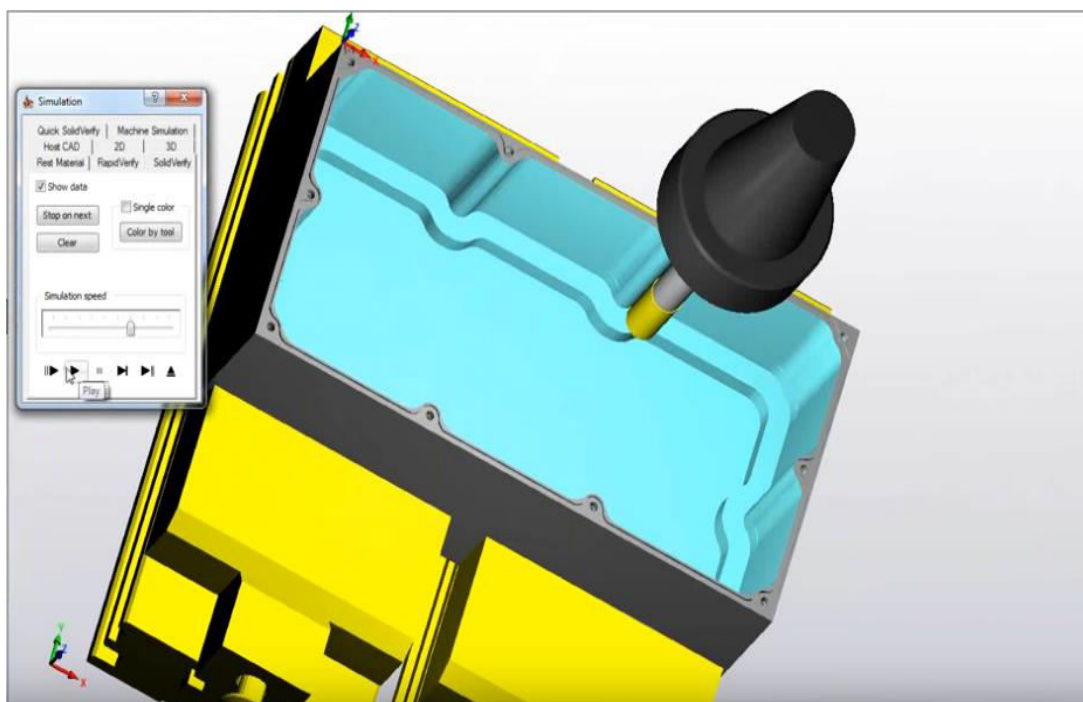
Процес програмирања је могуће у потпуности симулирати и обавити визуелну контролу као што је приказано на слици 7.



Слика 7. Дефинисана геометрија предмета обраде пре почетка симулације

На истој слици се може приметити да је алгоритам препознао целокупну геометрију предмета обраде као и геометрију крајњег производа, па складу са тим означио све површине које ће бити обрађене.

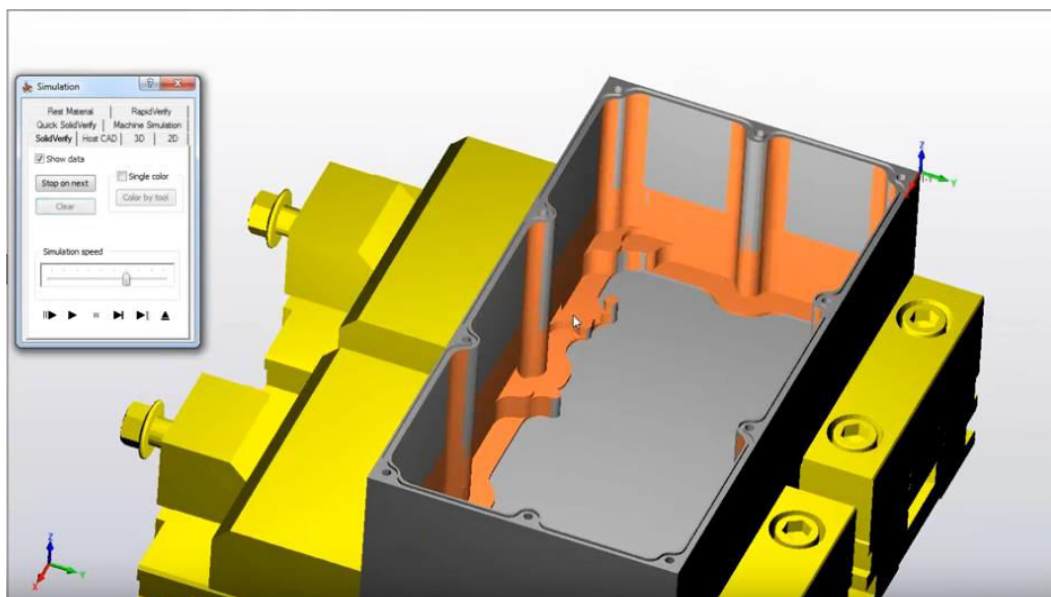
На слици 8. приказано је симулирање обраде једним алатом при чему је алат достигао максималну могућу дубину и уклонио већи део материјала у току једне операције.



Слика 8. Симулација процеса обраде

Наредна операција, приказана на слици 9, изводи се на исти начин, овога пута са алатом мањег пречника чији је задатак да обави фино глодање које ће геометрију предмета обраде довести до крајње границе у оквиру задатих толеранцијиних поља. Ова операција се обавља са оптимизованим параметрима режима обраде, што је од великог значаја, јер се на овај начин уклања велика количина материјала без потребе за сувишним операцијама, честим изменама

алата, непотребним кретањем алата када није у контакту са предметом обраде, итд.



Слика 9. Симулација финог глодања

Из свега до сада наведеног може се закључити да је вискобрзинска обрада у ствари метода високооптимизованог поступка обраде глодањем, при чему су мања побољшања у сваком од сегмената планирања и пројектовања обраде, довела до битних побољшања која се одражавају на поступак обраде у целини. Више од 80% оптимизација *HSM-a* обавља се помоћу софтвера, ако се узме у обзир да је већ извршен одабир алата, пратећих елемената и машине на којој ће се обавити процес резања. Како су наведени елементи, као варијабле, већ познати, даља оптимизација поступака зависи првенствено од избора режима обраде и других параметара кретања, које је могуће у потпуности оптимизовати кроз израду програма.

Израдне информације које софтвер генерише, представљају се у форми Г код-а, који ће бити препознат од стране управљачке јединице, глодалице за коју је овај програм намењен.

3.3 Примена вискобрзинске обраде

Вискобрзинска обрада омогућује скраћено време обраде, а у исто време повећава квалитет обрађеног предмета обраде, па је због тога најзаступљенија у следећим секторима индустрије

- аутомобилска и електро индустрија- користи овај поступак обраде због великог броја операција и геометријске сложености предмета обраде
- авио индустрија – која има потребу за производњом дугих танкозидних профила најчешће од алуминијумских легура
- производања алата за ливење, ковање у калупима, израда алата за израду делова од пластике.

Код алата за ливење високобрзинска обрада је нарочито заступљена због тога што је већина алата за ливење релативно малих димензија и сложене геометрије. У случају алата за ковање (ковачке гравуре у отвореним и затвореним калупима), високобрзинска обрада налази широку примену управо због уских толеранцијиних поља која су неопходна код ковачких алата. У односу на електрохемијску и електроерозивну обраду, код алата за ковање, високобрзинска обрада постиже бољи квалитет обрађене површине без губитка тврдоће материјала предмета обраде. Високобрзинска обрада је такође погодна за израду алата (електрода), које се користе код електроерозивне обраде.

3.4 Примери примене

Основна примена високобрзинске обраде првенствено је заступљена код израде алата за запреминско обликовање, као што су калупи намењени ковању, ливењу метала, бризгању пластике али и разни други производи у главном од материјала као што су легуре Al, Ti, Cu, али и од материјала као што је графит, пластичне масе итд.

Калупи за ковање

У случају алата за ковање високобрзинска обрада је од великог значаја са аспекта продуктивности, ако се узме у обзир да је потребно изградити ковачке гравуре у материјалу који је по својој прилици алатни челик високе тврдоће. Код обраде материјала оваквих карактеристика потребно је извршити адекватан одабир алати али режима и других параметара обраде, како би се постигли оптимални услови за израду оваквих алата.

Код израде калупа за ковање, с обзиром на геометрију ковачке гравуре, за високобрзинску обраду од посебног значаја је груба обрада приликом које се уклања већи део материјал за шта је потребно релативно доста времена ако се обраде изводи конвенционалним глодањем. Високобрзинска обрада у том смислу поседује знатне предности јер се за краће време може уклонити већи део материјал.

Пример алата за ковање приказан је на слици 10.



Слика 10. Калуп намењен топлом ковању (www.dixontool.com, 2020)

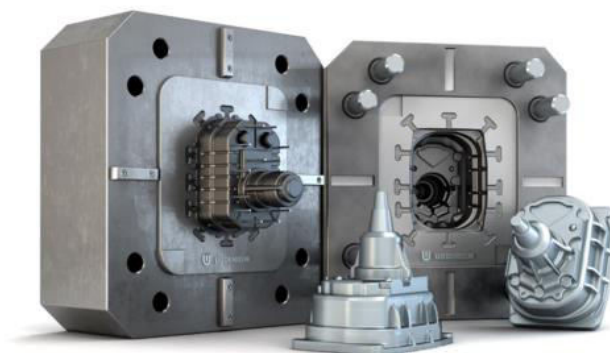
Калупи за ливење

То су обично калупи намењених ливењу делова од обојених метала и њихових легура, али и у процесу добијања пластичних делова добијених различитим методама. Калупи за ливење су такође захтевни за производњу и захтевају виску тачност приликом израде. Од посебног значаја су и толеранције површине код већине оваквих алата, јер од квалитета површине алата у неким случајевима зависи квалитет површине крајњег производа. Један од примера за то су алати за дување пластичних флаша, код који су карактеристични дубоки џепови глодани у материјалима какви су алатни челици. На слици 11 приказан је калуп за дување пластичних флаша.



Слика 11. Калупи за дување флаша (www.dmsplast.com, 2020)

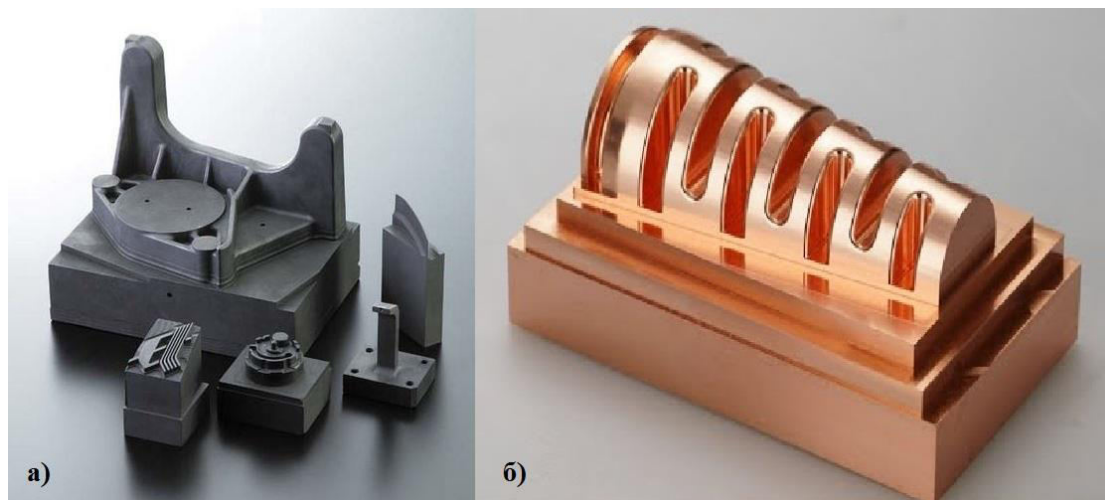
Већина калупа за ливење је сложене геометрије, такође од материјала код којих је обрада резањем релативно отежана и такође захтевају високе толеранције облика и површина при чему се груба обрада у току израде ових алата изводи операцијом отварања дубоких џепова у материјалу. Високобрзинска обрада такође представља оптимални приступак код израде оваквих алата, при чему се као и код израде калупа намењених ковању, морају одабрати адекватни алати, елементи носача алат итд. На слици 12 приказан је алат за ливење сложене конструкције.



Слика 12. Калуп за ливење (са www.indiamart.com, 2020)

Израда електрода за ЕДМ обраду

Високобринска обрада такође налази примену и код производње електрода за електроерозиону обраду. Електроде за ЕДМ обраду израђују се од материјала као што су бакар или графит који се може ефикасно обрађивати глодалима из пуног материјала TiCN (титанијум карбонитрид), превлаком. Сложеност геометрије и захтеви за виском тачношћу облика и квалитетом површина, ових алата, довели су до тога је високобрзински процес обраде најзатупљенији у изради алата за ЕДМ обраду. На слици 13 приказани су примери електроде за електроерозиону обраду.



Слика 13. Примери електрода за ЕДМ обраду: графитне а) и бакарна електрода б) (www.edm.kd-solution.com, 2020)

Израда прототипа (*Rapid Prototyping*)

Брза израда прототипова је процес који укључује различите технолошке израде тродимензионалног модела обично за потребе тестирање функционалности, перформанси итд. У случајевима када израду тродимензионалног модела није пожељно или оправдано изградити неком другом методом, високобрзинска обрада налази примену и у овом случају. Обрадом глодањем високобрзинским поступком израђују се тродимензионални модели најчешће од обојених метала и њихових легура али и од материјала као што је PTFE. На слици 14 приказан је модел израђен HSM поступком.



Слика 14. Модел добијен HSM поступком (www.interempresas.net, 2020)

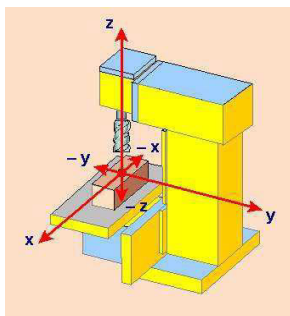
Израда модела високобрзинским поступком обраде постиже се знатна уштеда у времену обраде, одликује је висока флексибилност, висока тачност итд. У току израде прототипова високобрзинским поступком могу се остварити изузетно високе брзине резања при чему су отпори релативно мали, ако се уме у обзир да су материјали од којих се прототипи израђују релативно мале тврдоће.

Високобринска обрада је заправо високооптимизовани процес обраде глодањем што значи да је високобрзинским процесом обраде могуће произвести готово све што би се иначе произвело конвенционалним приступком обради глодањем, под условом да изабране машине по својим карактеристикама задовољавају захтеве високобрзинског поступка обраде. Заступљеност високобрзинске обраде у индустрији може варирати од захтева производње, карактеристика машина укључених у процес итд. Према томе, различите гране индустрије у мањој или већој мери примењују високобрзински процес обраде у складу са својим производним делатностима. Неке од њих су аутоиндустрија, авиоиндустрија, бродоградња итд. Са те стране посматрано примера је безброј.

3.5 Алатне машине и њихове компоненте у HSM поступку

За поступак обраде високим брзинама резања, користе се глодалице код којих су од посебног значаја системи главног и помоћног кретања, као и систем управљања. По конструкцији оне су најчешће вертикалне, али се могу користити и хоризонталне. Глодалице најчешће имају три (троосне - XYZ) или више слобода кретања. У случају глодалица под главним кретањем се подразумева ротационо кретање алата, чији број обртаја зависи од саме машине, али и од параметара програма.

Под помоћним кретањем сматра се транслаторно кретање алата одн. покретног стола у правцима X , Y и Z . Ово кретање је најчешће транслаторно, али у неким случајевима може бити и ротационо уколико одређена машина поседује више слобода кретања, па самим тим поседује и ротациони сто на коме се причвршћује материјал који се обрађује. Шематски приказ помоћних кретања код троосне глодалице приказан је на слици 15.



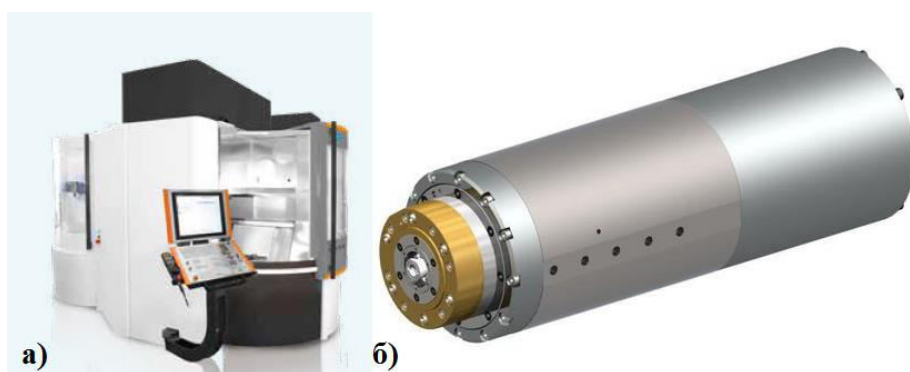
Слика 15. Шематски приказ помоћних кретања у координатном систему

Главно кретање (кртање главног вретена)

Обртно кретање вретена заједно са алатом који обавља обраду материјала у случају машина које одговарају високобрзинском поступку, остварује се помоћу погонског мотора са којим вретено остварује механичку везу. Пренос може бити остварен:

- зупчастим,
- ременим и
- директним преносом (без преносника)

За високобрзинску обраду од посебног су значаја вретена са директним преносом код којих је вретено повезано са погонском машином помоћу спојница. На овај начин могу се остварити виски бројеви обртаја (већи од 40000 о/мин). На слици 16 приказана је глодалица *Mikron MILL X 400* која користи вретено *HSK-E32* (приказано на слици 23б), снаге 15 kW које остварује и до 60000 о/мин.



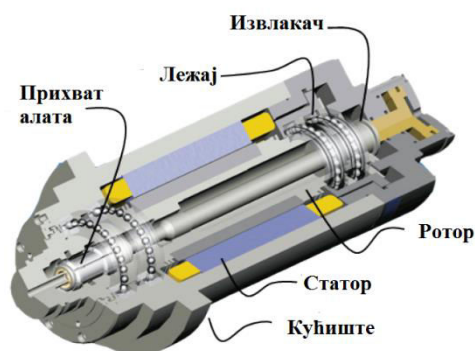
Слика 16. Глодалица *Mikron MILL X 400* а) и електрично вретено *HSK-E32* (GF Machining Solutions, 2019)

У случају машина са више слобода кретања примену налазе и артикулисани роботи који садрже вретено пројектовано за високе бројеве обртаја. Један такав примере је *Stäubli*, који се састоји од крутих елемената међусобно повезаних зглобовима. Главно кретање обавља вретно, које у овом случају достиже до 40000 о/мин (слика 17)



Слика 17. Артикулисани робот *HSM* поступку обраде у (www.staubli.com ,2020)

Већина вретена намењених високобрзинској обради поседују сличну конструкцију па се самим тим састоје од више основних компоненти које укључују кућиште вретена, вратило, систем лежајева интегрални погонски мотор и систем прихвата алата. Специјализована ХСМ машинска вретена неких произвођача могу достићи и до 200000 о/мин. Тако велики број обртаја постигнут је захваљујући напретку у технологији котрљних, хидрауличних и магнетних лежајева. Типична конструкција вретена великог броја обртаја приказана је на слици 18.

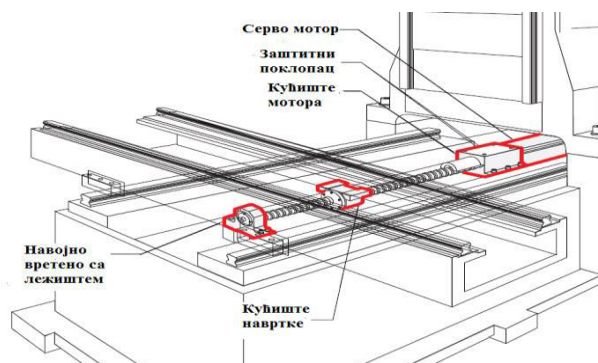


Слика 18. Пресек HSM вретена (Wroblewski, 2011)

Најчешће врсте лежајева које се могу срести код HSM вретена, су угаони контактни куглични лежајеви који се одликују карактеристикама ниског трења и способности да поднесу висока аксијална али и радијална оптерећења. Куглице код ових лежајева су обично израђене од силицијум нитрида што их чини погодним за примену код вретена која се крећу великим бројем обртаја, који је дефинисан фактором брзине DM (mm x o/min), кога чини производ пречника ротора и броја обртаја. HSM вретена могу се кретати брзинама изнад 0.5×10^6 DM, али су ограничена физичким карактеристикама лежајева.

Погонски елементи помоћног кретања

За линеарно кретање у смеровима XYZ код глодалица остварује се посредством серво мотора чији се рад преноси помоћу навојног вретне које остварује кретање навртке повезане за помични сто глодалице. На тај начин се обртно кретање претвара у линеарно. На слици 19. приказани су елементи помоћног кретања код серије глодалица *Haas VF*



Слика 19. Елементни помоћног кретања код глодалице Haas VF (Haas Technical Publications, 2013)

Навојна вретена

Навојна вретена са трапезиним навојем, у случају CNC глодалица које обављају високобрзинску обраду замењују кугласта навојна вретена која омогућају прецизни линеарни ход при стандардној толеранцији навоја од T7 са тачношћу $50\mu/300\text{mm}$. На слици 20 приказано је једно такво вретено са навртком. У пресеку су приказане куглице које остварују везу између вретена и навртке.



Слика 20. Вретено са навртком (Tibimotion, 2011)

Основна предност кугластих вретена у односу на вретена са трапезним навојем је висока прецизност линеарног хода при знатно мањем коефицијенту трења и при већим оптерећењима.

Спојнице

Спојнице су машински елементи који преносе обртни моменат између коаксијалних вратила у овом случају између вратила серво мотора и кугластог навојног вретена. Како нема редукције, смер обртног момента и интензитет остаје исти. На слици 21. приказана је еластична спојница



Слика 21. Еластична спојница (www.designworldonline.com , 2020)

За спајање кугластог навојног вретена и вратила серво мотора користе се флексибилне спојнице између којих се налазе метални еластични прстенови

који дозвољавају мања аксијална одступања, која се могу јавити услед нагле промене броја обртаја.

Лежајеви

Оба краја завојног вретена са куглицама морају бити подржана котрљним лежајевима угаоно контактнoг типа. Овакви лежајеви пројектовани су да издрже оптерећења како радијална тако и аксијална. Примери оваквих лежајева са лежиштем приказани су на слици 22.



Слика 22. Примери лежајева са лежиштем (www.ntn-snr.com, 2020)

На слици 23 приказан је погонски склоп помоћног кретања кога чине завојно куглично вретено са навртком, лежајеви спојница и на крају мотор који може би корачни, или чешће АС серво мотор.



Слика 23. Склоп елемената помоћног кретања (www.phidgets.com, 2020)

Елементи помоћног кретања остварују линеарно кретање стола који се ослања помоћу профилисаних шина на базу алатне машине. Елементи помоћног кретања такође доприносе крутости целокупног система које је од велике важности у процесу HSM обраде.

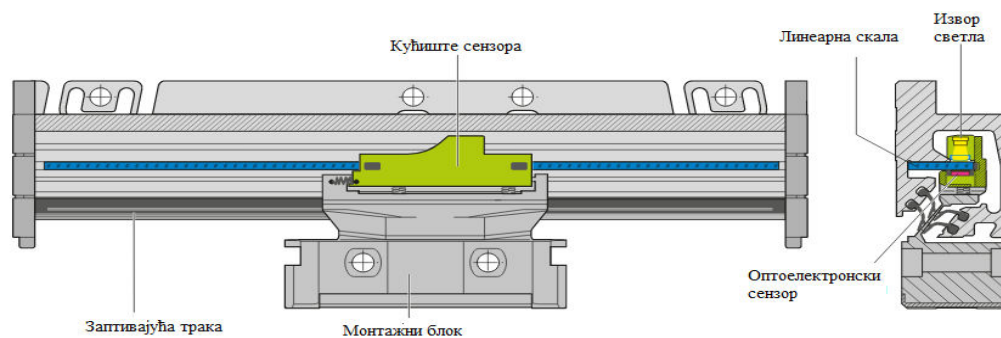
Мерноуправљачки систем и његове компоненте

Управљачки систем представља важан сегмент сваког нумеричког система који има пресудну улогу у преношењу и примању информација. Састоји се од управљачке јединице која је опремљена рачунарским компонентама повезаним са осталим системима и подсистемима машине. Основни задатак управљачке јединице је да приме команде од стране корисника помоћу графичког интерфејса и да их претвара у информације корисне за обраду. Управљачка јединица је приказана на слици 24.



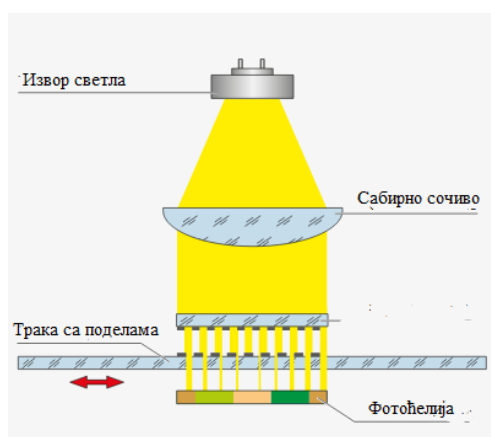
Слика 24. Управљачка јединица (Haas Technical Publications, 2013)

Одабир функција, управљање помоћним кретањем, као и покретање главног вретена и других функција је могуће извести задавањем одређених алфа нумеричких команди, од стране корисника, али у случају висобрзинске обраде, пожељно је да се обрада одвија по унапред предвиђено програму из разлога оптимизације процеса. Примање информација од стране машине обавља се путем сензора кретања који детектују и мере сваку одређену тачку и померање унутар машинског координатног система. За транслаторно кретање односно померање у правцима XYZ осе користе се линеарни енкодери који су заправо сензори и налазе се у затвореном кућишту причвршћеном за покретни сто машине. За непочан део машине причвршћен је оптоелектронски сензор који скенира, линеарну скалу која се налази у кућишту енкодера. Када се радни сто машине помери у позитивном или негативном смеру, оптоелектронски сензор ишчитава податке са траке, која садржи инкрименталну скалу. На слици 25. приказана је принципијална шема линеарног енкодера.



Слика 25. Шема линеарног енкодера, (Heidenhain, 2016)

Принцип рада ових енкодера је релативно једноставан. У кућишту енкодера које се помера заједно са радним столом, налази се транспарентна стаклена трака, на којој се налазе прецизне поделе (типично у размаку од $8\mu\text{m}$). Приликом линеарног кретања стола заједно са микрометарском траком, светлост пролази кроз транспарентне делове микрометарске скале, док нетранспарентне поделе на траци блокирају светлост. Одмах испод транспарентне микрометарске траке налази се фотоћелија која детектује свако блокирање светлосног снопа од стране транспарентне траке. На тај начин стварају се импулси високе учесталости који се шаљу управљачкој јединици (слика 26.)



Слика 26. Очитавање транспарентне скале, (Heidenhain, 2016)

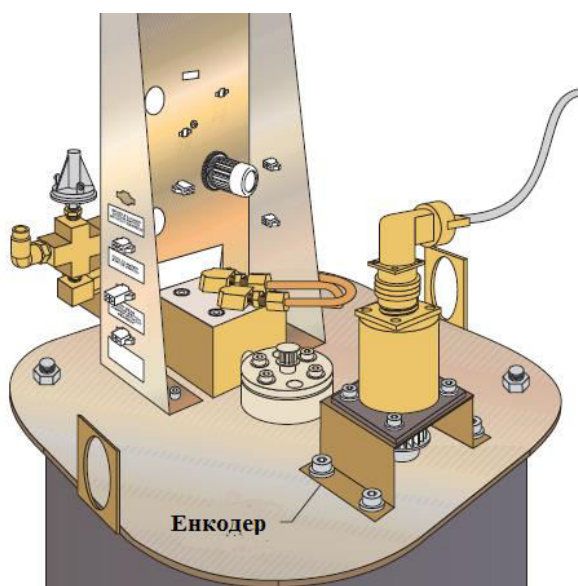
Излазне вредности добијају се у форми електричних импулса који се декодирају помоћу декодера а затим представљају у нумеричким вредностима разумљивим кориснику.

Други типичан пример оваквих енкодера је енкодер ротационог типа. Принцип рада је сличан као и код линеарног енкодера, али за разлику од линеарног, ротациони енкодери претварју обртно кретање главног или завојног вретена у електрични импулс. Фотоелемент у овом случају скенира циркуларне подеке који се шаљу, а затим конвертују. На слици 27 је приказан пример оваквог енкодера.



Слика 27. Ротациони енкодер (Haas Technical Publications, 2013)

Ротациони енкодери се најчешће користе за мерење броја обртаја главног вретена и механички се постављају тако да је могуће остварити ремени пренос главног вретна са вратилом енкодера. На слици 28. приказан је енкодер повезан са главним вretenом глодалице серије Haas VF.



Слика 28. Енкодер постављен у глави глодалице (Haas Technical Publications, 2013)

На слици у овом случају, ременик монтиран на главно вретено понаша се као погонски ременик, док се ременик постављен на вратило енкодера понаша као гоњени. На тај начин преноси се обртно кретање са главног вретена на вратило енкодера, које се даље претвара у електрични импулс.

3.6 Резни алати у обради глодањем високобрзинским поступком

Како су резни алати изложени промељивом механичком и термичком оптерећењу алатни материјали треба да поседују (Тадих, 2008):

- високу жилавост, отпорност на ударе и вибрације (динамичка оптерећења)
- високу тврдоћу односно отпорност на хабање

Решење ових захтева довело је до развоја различитих алатних материјала као што су:

- угљенични алатни челици
- легирани
- брзорезни
- тврди метали са и без превлаке
- алатна керамика
- супер тврди материјали (синтетички дијамант и др)

У случају високобрзинске обраде најчешће су заступљени резни алати од материјала као што су (Маес, 2020):

- брзорезни челици (за алате из пуног материјала са различитом превлаком)
- тврди метали
- резна керамика од које се израђују плочице за глодачке главе
- супер тврди материјали

Брзорезни челици су још увек најзаступљенији како код конвенционалне обраде глодањем тако и у поступку брзорезне обраде. Ти челици са високим процентом легирјућих елемената и од њиховог садржаја варира отпорност на механичка динамичка и температурна оптерећења. У случају високобрзинске обраде најчешће су присутни брзорезни челици повећане отпорности на високим температурама и они садрже већи проценат елементата као што су: молибден, ванадијум и кобалт.

Тврди метали чине спрегу тврдох карбида као што су: WC, TiC, TaC, NbC итд. и жилавих компоненти као што су Ni, Co и др. Тврди материјали подносе високе температуре (и до 1250 °C), и одликује их висока постојност и тврдоћа. Алати од тврдох метала су уједно и најпогоднији за високобрзинску обраду.

Резна керамика добија се синтеровањем (пресовањем) на температури између 1600 -1800 °C. Материјал који се пресује чини Al_2O_3 и везивних материјала као што су SiO_2 , B_2O_2 , TiC. Синтеровањем се добијају плочице различитог облика који се механички причвршћује за алате као што су глодачке главе. Резна керамика поседује својства као што је отпорност на хабање, висока тврдоћа и отпорност на високе температуре. Недостаци су ниска жилавост и висока осетљивости на ударана напрезања. Најчешће се користи код обраде високим корацима што захтева већу погонску снагу алатне машине, крутост и стабилност.

Супер тврди материјали су група материјала којима припадају материјали као што су природни дијамант, синтетички дијамант и кубни нитрид бора (борозан или елбор). За високобрзинску обраду од посебног значаја су израда плочица високе тврдоће и користи се код операција глодањем материјала као што је каљени челик.

Различити облици глодала

За високобрзински процес обраде, када су у питању алати важе иста правила као и код алата намењених конвенционалном глодању. Алати односно глодала се могу грубо поделити у две групе које чине глодала из пуног материјала и глодала са променљивим плочицама од тврдог материјала. Према начину постављана на алатну машини глодала се могу поделити на глодала са дршком и отвором. Глодала са дршком могу бити: цилиндрична, конична профитна итд. Глодала са отвором могу бити: котураста, ваљкаста, чеона итд. Према начину израде глодала се могу поделити на глодала са глоданим зубима и глодала са поструганим зубима. Код глодала са поструганим зубима жлеб се добија глодањем, док се коначан облик профила зуба глодала добија обрадом на стругу (постругивањем) или брушењем. Глодала се такође могу поделити на глодала из пуног материјала и глодала код којих се плочице причвршћују механички на глодачку главу. Такође више различитих подала према броју зуба, смеру обртања, са завојним зубима итд. На слици 29. приказани су примери глодала са измењивим плочицама.



Слика 29. Глодала са измењивим плочицама (www.garantwis.com, 2020)

При одабиру глодала у поступку високобрзинске обраде, од велике је важности правилан одабир глодала које мора бити од одговарајућег материјала, према одговарајућој обради (за грубу или за фину обраду), са одговарајућим бројем зуба, одређене геометрије и према материјалу који се обрађује. Критеријуме за одабир глодала препоручује произвођач и наводи их у каталозима алата, где се поред осталих података налазе и препоручене брзине резања. Кроз високооптимизовани процес обраде као што је високобрзински поступак, могуће је искористити максималне перформансе алата које препоручује произвођач.

4. ОБРАДА СТРУГАЊЕМ РОТАЦИОНИМ АЛАТИМА

Стругање ротационим алатима је релативно нови високопродуктивни поступак обраде код кога је обртно кретање карактеристично за главно кретање алата, али и помоћно кретање предмета обраде. Другим речима, стругање ротационим алатима се може описати као обрада глодачким алатима на стругу. Са друге стране, исти ефекат се може постићи и код глодалица које поседују више степена слободе кретања и код којих је могуће извести обртно помоћно кретање предмета обраде уколико постоји могућност ротационог кретања стола на коме је причвршћен предмет обраде. Међутим, овакав поступак обраде предмета веће дужине у већини случајева није погодан за извођење на *CNC* глодалицама које имају више степени слободе првенствено због природе стезних елемената, али и због карактера напрезања које се могу јавити у том случају. Из тог разлога, развијене су посебне машине (енгл. *Turn-Mill*), које комбинују ротационо кретање предмета обраде (помоћно) и главно кретање (ротационо кретање алата), карактеристично за глодалице. Тиме се постиже да у процесу обраде долази до мањих температурних оптерећења при мањим отпорима резања. За обраду стругањем ротационим алатима, је такође карактеристично формирање кратке (дисконтинуиране) струготине која доприноси лакшем уклањању генерисане топлоте, мањем хабању резних елемената као и смањену појаву формирања наслага на резним површинама алата (Schubert 2010).

4.1 Основна кретања и параметри стругања ротационим алатима

Како би се разумео процес обраде ротационим алатима, пре свега се мора размотрити процес настанка струготине. У односу на конвенционални приступ, уклањање сувишног материјала је остварено помоћу кретања алата али и материјала предмета обраде. Као резултат тога, у процесу обраде укључена су два основна параметра:

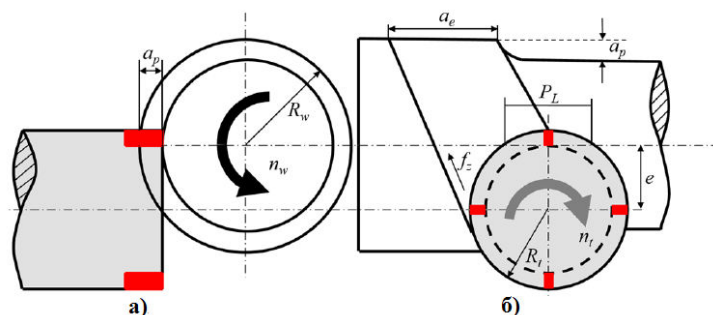
- радијални корак
- и аксијални корак

Радијални корак подразумева ротационо кретање глодала заједно са ротационим кретањем предмета обраде. Оба кретања дефинише обимна брзина. У случају аксијалног корака, у питању је транслаторно кретање алата у правцу осе предмета обраде (Choudhury 2012), (Filho 2012). Комбиновањем ова два корака добија се завојна путања алата приказана на слици 30.

Остали параметри коришћени код обраде стругањем ротационим алатима такође су приказани на слици 30, су (Zhu 2016):

- a_p – дубина резања,
- f_z – корак по зубу алата,
- a_e – корак по обртају предмета обраде,
- e – ексцентричност,
- n_t – број обртаја алата,

- R_t – радијус алата,
- R_w – радијус предмета обраде,
- n_w – број обртаја предмета обраде и
- P_L – дужина алата.

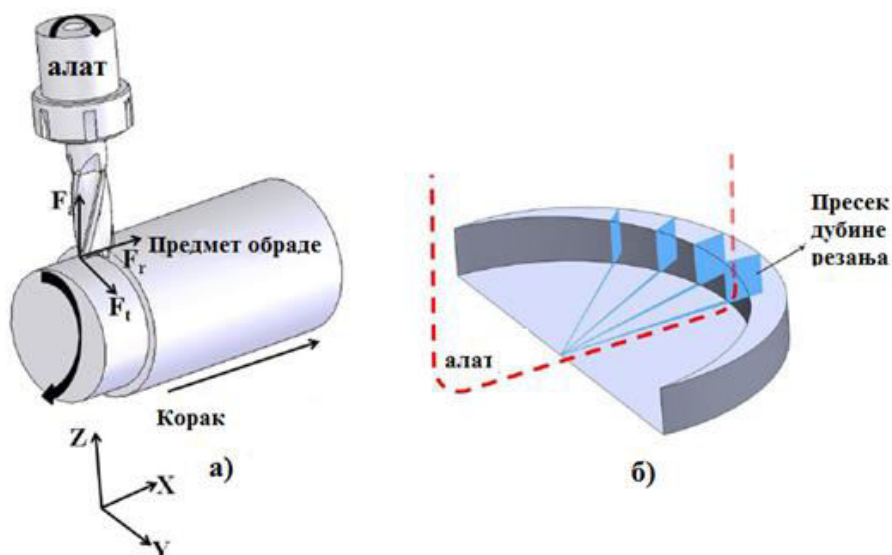


Слика 30. Кинематика ортогоналног стругања ротационим алатима (Zhu 2016)

Слика 30 такође показује да се обрада на стругу ротационим алатима може дефинисати као конвенционални поступак обраде глодањем ако се изузме ротационо кретање предмета обраде. У том случају радијални корак може се посматрати као корак по зубу, док се аксијални корак може посматрати као дубина резања.

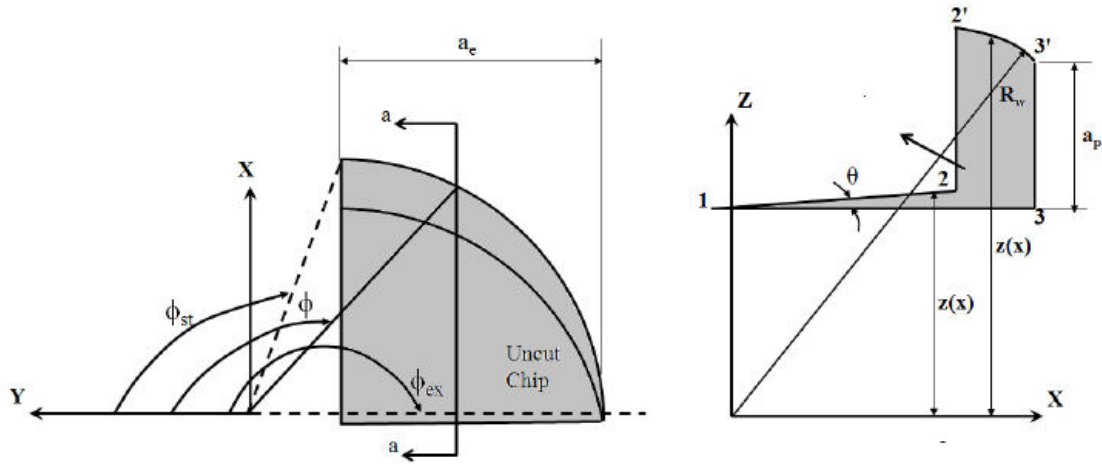
4.2 Ортогонално стругање ротационим алатима

Код ортогоналног стругања ротационим алатима, оса алата је нормална на осу предмета обраде (слика 31). Дубина резања (слика 31б), је од великог значаја за моделовање процеса обраде и може се добити ако се узме у обзир почетна и крајња позиција алат у оквиру једне револуције алата.



Слика 31. а) ортогонално стругање алатима за глодање
б) дубина резања код ортогоналног стругања алатима за глодање (Zhu 2016)

На слици 32 шематски је приказана дубина резања. Тачке 1, 2 и 2' формирају почетну позицију резног алата док тачке 1, 3 и 3' означавају крајњи положај алата за резање у току једне потпуне ротације алата. Ширина резања се у том случају може дефинисати релацијом између линије 1-2, 1-3, 2-3 и углом θ које заклапају линије 1-2 и 1-3.



Слика 32. Поменљива дубина резања код ортогоналног стругања ротационим алатима (Zhu 2016)

Линија 1-2 представља чеони део алата у почетној позицији и може се изразити као:

$$z(x) = \tan \theta \cdot x + \frac{(R_w - a_p)}{\cos \theta}$$

где је:

$$\theta = \frac{2\pi}{m \cdot r_n}$$

при чему је x позиција на X оси, m број зуба, а r_n однос n_t/n_w . Чеони део алата у крајњој позицији приказаној на слици 32 одговара линији 1-3 и може се изразити као:

$$z(x) = (R_w - a_p)$$

Угао 2'-3' на површини предмета обраде може се изразити као:

$$z(x) = \sqrt{(R_w^2 - x^2)}$$

Како постоје две међусобно повезане површине одређују геометрију дубине резања, крајња позиција алата одређују површине 1,2 и 3 приказане на слици 32 што се може изразити као:

$$\begin{aligned} x_1 &= (R_w - a_p) \cdot \sin \frac{\theta}{2}, \\ x_2 &= \left(\left((R_w - a_p) + \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \cdot \tan \theta \right) \cdot \sin \theta \right) \cdot \cos \theta \\ x_3 &= R_t \end{aligned}$$

где је R_t радијус глодала.

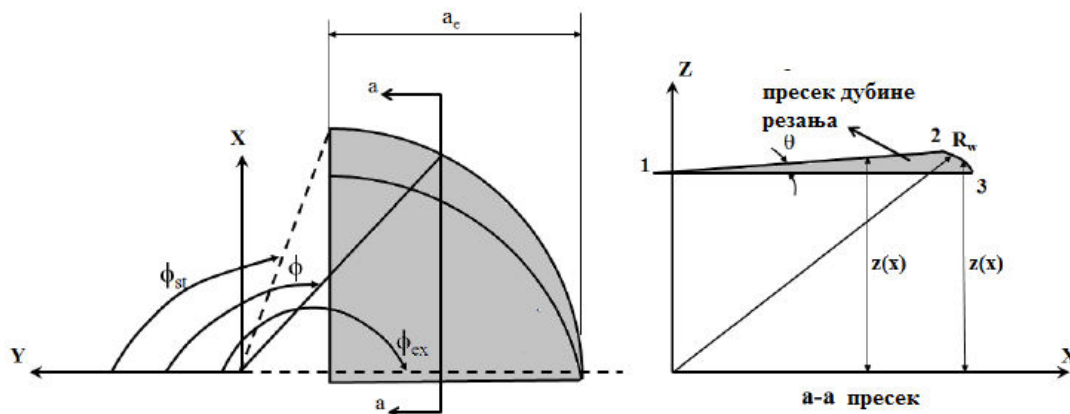
4.3 Тангентно стругање ротационим алатима

Тангентно стругање ротационим алатима је операција код које оса алата остварује тангенту на пречник предмета обраде. За разлику од ортогоналног стругања, код тангентног стругања материјал се уклања периферно као што је приказано на слици 33а. Одређивање геометрије дубине резања се може утврдити на сличан начин као код ортогоналног стругања.



Слика 33. а) Тангентно стругање ротационим алатима и б) дубина резања (Zhu 2016)

Слично као код ортогоналног стругања, на слици 33б приказан је пресек дубине резања. Линије 1-2, 1-3 и угао 2-3 на слици 34 одређују границе геометрије дубине резања, угао θ се може одредити на исти начин као и код ортогоналног стругања (Neagu 2005).



Слика 34. Пресек дубине резања код тангентног стругања ротационим алатима (Zhu 2016)

Линија 2-1 представља почетну позицију алата при чему линија 1-3 представља крајњу позицију након једне ротације алата, при чему се линија 1-2 може изразити као (Schulz 1990):

$$z(x) = \tan\theta x + \frac{R_w - \left[\sqrt{R_t^2 - y^2} - (R_t - a_p) \right]}{\cos\theta}$$

При чему је линија 1-3:

$$z(x) = R_w - \left[\sqrt{R_t^2 - y^2} - (R_t - a_p) \right]$$

док се угао 2-3 може дефинисати као:

$$z(x) = \sqrt{R_w^2 - x^2}$$

Слично као и код ортогоналног стругања, дубину резања одређују две међусобно повезане површине, што је приказано на слици 34, при чему је прва до тачке 2 а друга се налази између тачака 2 и 3. Локација ових тачака се може одредити према (Schulz 1990):

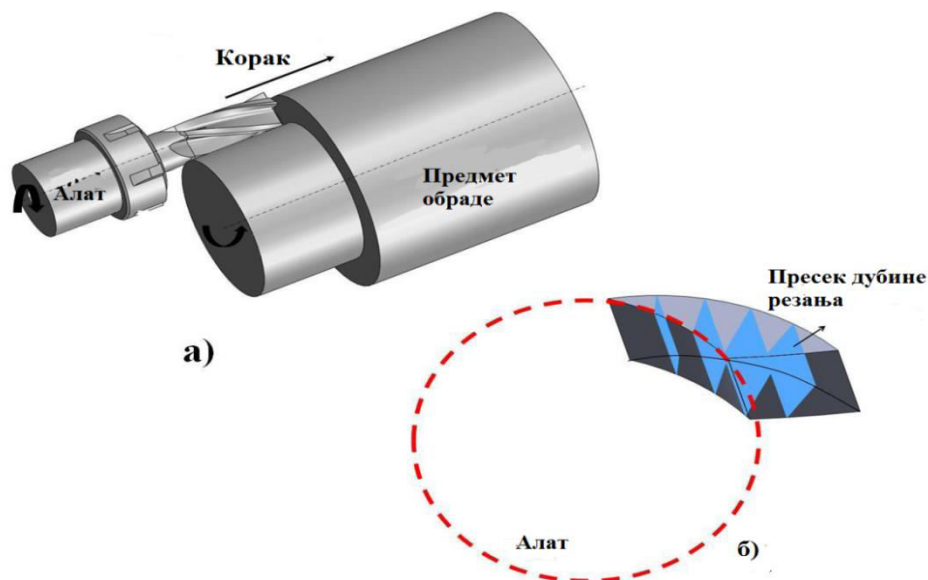
$$x_1 = - \left(\frac{\sin \theta (R_w - [\sqrt{R_t^2 - y^2} - (R_t - a_p)])}{\cos \theta + 1} \right)$$

$$x_2 = \cos \theta \sqrt{R_w^2 - \left(R_w - [\sqrt{R_t^2 - y^2} - (R_t - a_p)] \right)^2} - \left(\sin \theta \left(R_w - [\sqrt{R_t^2 - y^2} - (R_t - a_p)] \right) \right)$$

$$x_3 = \sqrt{R_w^2 - \left(R_w - [\sqrt{R_t^2 - y^2} - (R_t - a_p)] \right)^2}$$

4.4 Паралено стругање ротационим алатима

У случају параленог стругања осе алата и предмета обраде су међусобно паралелне што је основни разлог периферног уклањања материјала. На слици 35 приказано је паралелно стругање ротационим алатима.

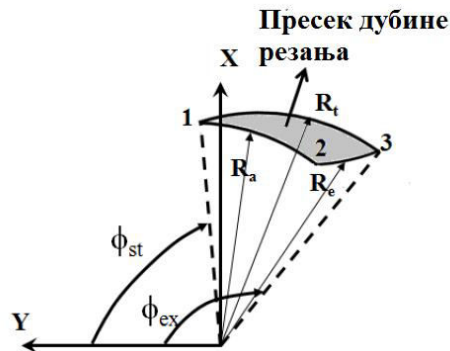


Слика 35 а). Паралено стругање ротационим алатима и б) пресек дубине резања (Zhu 2016)

Постоје две основне површине код паралелног стругања ротационим алатима. Прва је одређена углом 1-2 и 1-3, док је друга површина одређена

углом 1-3 и 2-3 (слика 36). Дебљина струготине у код прве површине одређена као (Schulz 1990):

$$h = R_t - R_a$$



Слика 36. Пресек дубине резања код паралелног стругања ротационим алатима (Zhu 2016)

при чему је:

$$R_a = \frac{2(R_w + R_t - a_p) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos((\pi - \theta) + \varphi)}{2} + \frac{\sqrt{(2(R_w + R_t - a_p) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos((\pi - \theta) + \varphi))^2 - 4((2(R_w + R_t - a_p) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right))^2 - R_t^2)}}{2}$$

Дебљина струготине код друге површине може се изразити као:

$$h = R_t - R_e$$

при чему је:

$$R_e = R_t - a_p + \frac{2 \tan^2(\varphi)(R_t - a_p) - 2 \cdot R_w}{2(1 + \tan^2(\varphi)) \cdot \cos(\varphi)} - \frac{\sqrt{(2 \tan^2(\varphi)(R_t - a_p) - 2 R_w)^2 - 4(1 + \tan^2(\varphi)) \cdot \tan^2(\varphi)(R_t - a_p)^2}}{2(1 + \tan^2(\varphi)) \cos(\varphi)}$$

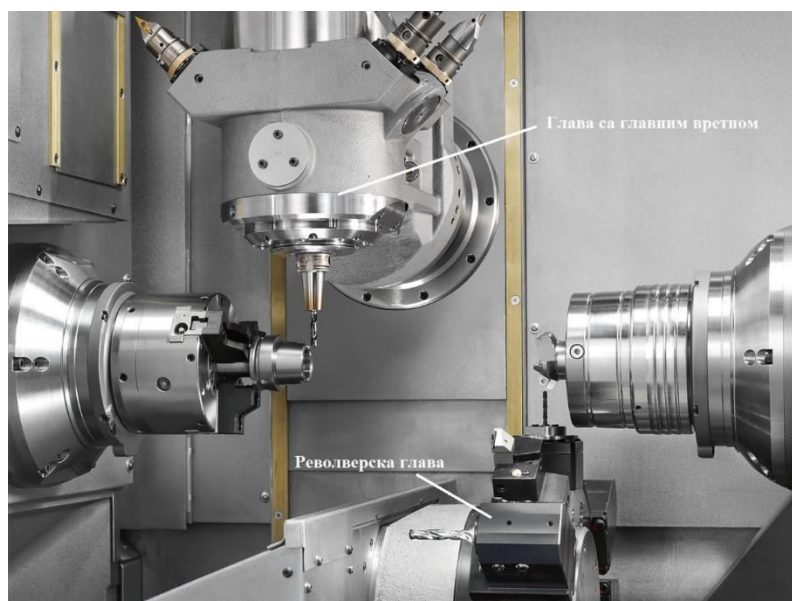
4.5 Машине у обради ротационим алатима

Машине у обради стругањем ротационим алатима су у основи обрадни центри који комбинују помоћно ротационо кретање премета обраде, карактеристично за струг, и главно кретање алата на исти начин као код вертикалне глодалице. Савремени обрадни центри овакве врсте могу имати две или више слобода кретања. Обрада стругањем ротационим алатима је позната дуги низ година, а данас се у индустријским погонима за ту сврху углавном користе рачунарски управљиви обрадни центри, који омогућавају висок степен аутоматизације и контроле процеса производње. На слици 37. приказан је један овакав обрадни центар.



Слика 37. Index G220 (us.index-traub.com, 2020)

Обрадни центар (слика 37), *Index G220* је петоосна алатна машина код које главно кретање алата обавља глава са електричним вртеном, које поред линераног помоћног кретање (X, Y, Z), може обављати ротацију око X коаксијалне осе. Обрадни центар такође поседује револверску главу на којој је могуће монтирати различите стругарске ножеве, али и ротационе алате захваљујући посебним измењивим вртенима. Помоћно кретање, у случају обраде ротационим алатима, изводи вретно заједно са предметом обраде на исти начин као главно кретање код конвенционалних стругова. У конкретном случају, приказаном на слици 38. постоје два таква вретена од којих се једно може користити за манипулацију предметом обраде или обављање неке друге операције.



Слика 38. Главно вретено и други елементи машине Index G220 (us.index-traub.com, 2020)

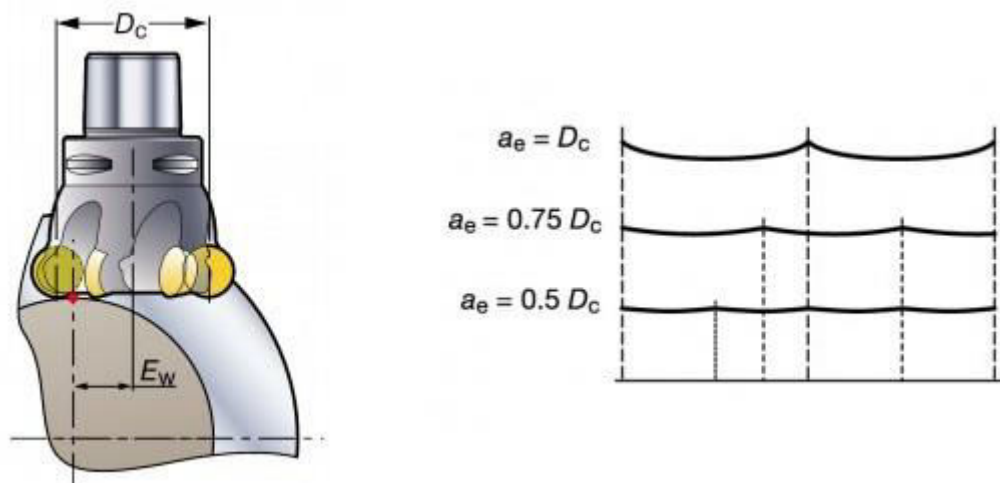
Постоје више различитих конструкцијских решења када су ови обрадни центри у питању: са револверском главом или без, са више слобода кретања, са додатним вратилом итд. Главне карактеристике обрадних центара код којих је могуће осим операција стругањем изводити и различите операције ротационим алатима, као што су пре свега паралелно (коаксијално), тангентно и ортогонално стругање, али и глодање жлебова, бушење попречних рупа итд.

Са аспекта високопродуктивне обраде постоји више технолошких захтева за употребом оваквих машина, од којих су првенствено (*Calleja 2014*):

- *Веће дубине резања при већем броју обртаја* – у процесу грубе обраде када је потребно уклонити већу количину сувишног материјала, малим брзинама предмета обраде при значајном повећању брзине резања.
- *Прекидно резање* – којим се постиже повољан облик струготине (кратка, испрекидана), мање загревање алата и предмета обраде па самим тим и мање хабање алата. Резање материјала ротационим алатима (глодање), је по свом карактеру прекидног типа, што значи да до лома струготине долази пре него што дође до формирања континуалне струготине, карактеристичне за конвенционалну обраду на стругу.
- *Мање хабање резног алата* - је од нарочитог значаја код обраде тврдих легура, код којих би у случају конвенционалне обраде стругањем дошло до прекомерног хабања резног алата, услед константног контакта алата и предмета обраде и генерисања сувишне температуре.

4.6 Алати у поступку обраде стругањем ротационим алатима

У поступку обраде стругањем ротационим алатима, користе се различити типови глодала која се иначе користе у поступку обраде глодањем. У зависности од типа производне операције, материјала предмета обраде, брзине резања и других параметара може се извршити одабир адекватног алата у складу са препорукама произвођача. Најчешће су то алати са променљивим плочицама различите резне геометрије, али могу бити и различити алати из пуног материјала. И ако су критеријуми за избор алата у поступку обраде стругањем слични оним у поступку глодањем, треба узети у обзир ексцентричност алата као и пречник предмета обраде. *Sandvik Coromant* препоручује позиционирање осе алата релативне на осу предмета обраде варира од 0 до 50% ефективног пречника алата. Како би се смањили отпори приликом резања у том случају препоручује се висока ексцентричност чиме се смањују отпори приликом резања. Међутим, и ако висок степен ексцентричности доводи до смањења отпора приликом резања, она се може негативно одразити на квалитет површине. У том случају *Sandvik Coromant* препоручује мање пречнике ротационог алата са ширином реза a_e , мањом од 40%, од укупног пречника алата DC (слика 39)



Слика 39. Позиционирање глодала у односу на предмет обраде
(www.sandvik.coromant.com, 2020)

Међутим, како је потребно повећати продуктивност производног процеса уз прихватљив квалитет обрађене површине *Sandvik Coromant* препоручује одабирање алата већег пречника и повећање односа радијалног контакта – a_e/DC .

4.7 Топографија обрађене површине поступком стругања ротационим алатима

Комбиновањем производних процеса као што је обрада глодањем и обрада стругањем на једној машини као резултат има формирање површина различитиог квалитета на једном предмету обраде. У случају ортогоналне обраде стругањем ротационим алатима укључује четири основна кретања а то су (Zhu 2013):

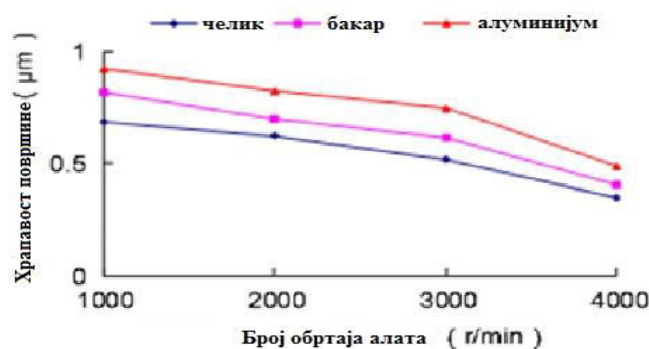
- ротација алта
- ротација предмета обраде
- аксијални корак и
- радијални корак

Постоје више параметара и случају стругања ротационим алатима него у појединачним поступцима као што су обрада стругањем или глодањем. Неки од тих параметара су: брзина резања, корак по зубу глодала, дубина резања итд. Такође постоје и остали параметри карактеристични за ортогонално глодање на стругу као што су: радијус предмета обраде, ексцентричност, радијус глодала итд.

За дефинисање топографије обрађене површине може се користити математички као и експериментални модел. Према математичком моделу, топографија се може дефинисати према храпавости или облику површине. У том случају контура попречног пресека предмета обраде се може представити као полигонални облик изражен као функција геометријског места тачака (Zhu 2013):

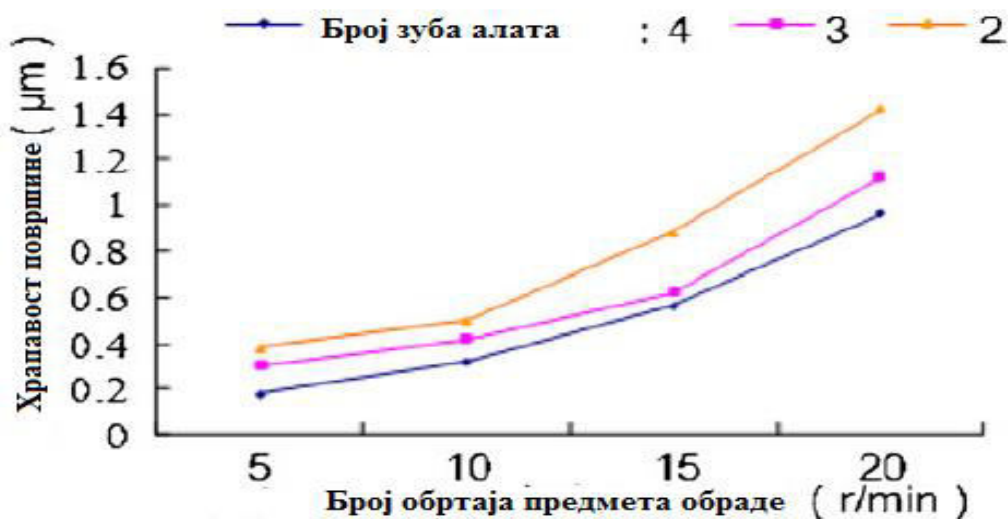
$$f(\theta) = \frac{1}{2} \left[1 - \left| \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right| + \left| \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right| \right]$$

У случају експерименталног модела, топографија површине и храпавост може се одредити помоћу 3Д контурографа или приручног мерача храпавости. Више експерименталних истраживања указују на то да се храпавост површине за различите материјале смањује пропорционално повећању броју обртаја ротационог алата. Квалитет обрађене површине може такође варирати од тврдоће материјала. На слици 40 графички је приказан утицај повећања броја обртаја алат на храпавост површине за различите материјале (Zhu 2013).



Слика 40. Утицај брзине резања на храпавост површине (Zhu 2013):

Храпавост површине премога обраде такође опада са смањењем аксијалног корака и повећањем броја зуба алата што је приказано на слици 41.



Слика 41. Утицај броја зуба алата као параметра обраде (Zhu 2013):

Анализом ових резултата може се закључити да се побољшање квалитета обрађене површине може побољшати повећањем брзине резања и коришћењем алата са више резних површина. Према томе, обрада ротационим алатима на стругу може бити добра алтернатива код обраде предмета великог пречника и при малом броју обртаја предмета обраде (Zhu 2013).

5. ОБРАДА У УСЛОВИМА ДОДАТНОГ ЗАГРЕВАЊА ПРЕДМЕТА ОБРАДЕ

Загревањем потпомогнута обраде, појавила се као алтернативни процес обраде који пружа побољшану обрадивост код материјала предмета обраде код којих је отежана обрада резањем. Овакав начин обраде метала, познат је још од краја деветнаестог века, и тада је примећено да се метали лакше пластично деформишу када су загрејани на одређеној температури што олакшава машинску обраду резањем. Међутим, обраде у условима додатног загревања предмета обраде доживела је експанзију средином двадесетог века, када су у употребу ушле легуре које се одликују високом температурном стабилношћу и повећаном тврдоћом, првенствено за потребе авио и војне индустрије а касније, развојем технологије и процеса обраде и за остале гране индустрија (Konig, 1990), (Talantov 1980), (Amin 2004).

Загревањем предмета обраде постиже се разлика у тврдоћи материјала алата и материјала обраде, што доводи до мањих напрезања у контакту алата и предмета обраде, побољшања завршне обраде као и мање хабање алата. У овом поглављу представљени су три различита приступа обради материјала у условима додатног загревање помоћу плазме, ласера, и електричном индукцијом. На крају поглавља разматране су особине алата у поступку обраде уз додатно загревање и уређаји потребни да би се загревање обавило и квалитет обрађене површине.

Производна индустрија, током развија овог приступа обраде, развила је разне приступе загревања предмета обраде као што су (Konig, 1990):

- *загревање високофреквентом електричном струјом* - која се помоћу калема индукује на предмет обраде при чему долази до загревања материјала предмета обраде, непосредно испред и/или у зони обраде.
- *зрачењем у снопу плазме* (енгл. *Plasma enhanced machining – PEM*), којом се постиже довољно висока температура, али не као код поступка обраде плазмом, већ се генерисани сноп плазме који се „расипа“ и загрева материјал предмета обраде, при чему се достиже довољно висока температуру погодну за обраду резањем и
- *загревање ласерским снопом* – (енгл. *laser assisted machining - LAM*), има знатне предности у односу на остале поступке додатног загревања материјала, јер се фокусирањем ласерског снопа непосредно испред алата остварује константно загревање непосредно испред алата, чиме се постиже олакшано пластично деформисање и резање искључиво у зони контакта алата и материјала предмета обраде.

Сви ови приступи обраде у условима додатног загревања су погодни за неке операција, док за друге нису. Тако на пример загревање електричним снопом, коме је потребан вакуум за рад, у неким случајевима је економски неисплативо, али се може успешно применити у случајевима када је потребно уклонити дебљи слој материјала са минималним губицима и високим

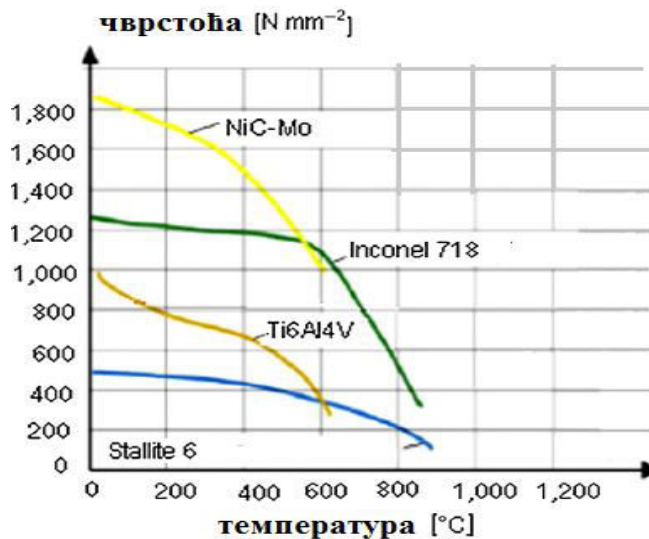
квалитетом обрађене површине. Са друге стране, примена ласера за потребе додатног загревања материјала предмета обраде, налази примену како код обраде глодањем, тако и код обраде резањем на стругу.

Ласер је такође погодан како за метале тако и за неметале, као што је керамика. Загревање ласером се може се прилагодити код високо прецизних операција резања малих површина, првенствено због флексибилности фокусирања снопа. Недостатак употребе ласера за потребе загревања предмета обраде огледа се у случајевима када је потребно извршити неку од грубих обрада резањем, при чему је потребно загрејати већу површину предмета обрада. У том случају ласерски снап треба бити усмерен на већу површину предмета обраде, за шта су потребни ласери веће снаге. За операције те врсте, загревање ласером је неекономично из разлога потрошње велике енергије, али и високе цене ласерских уређаја велике снаге.

5.1 Обрада у условима додатног загревања плазмом

Један од начина побољшања обрадивости легура високе тврдоће, затезне чврстоће и других физичких особина, је употреба снопа плазме као извора загревања предмета обраде непосредно или у току обраде резањем. Интензивним учешћем топлотне енергије помоћу одговарајућег извора топлоте, драматично смањује површинску тврдоћу материјала предмета обраде, када се његово загревање доведе до одређене температуре, у зависности од физичких особина одређеног материјала предмета обраде. Тако омекшан материјал је лак за обраду у условима конвенционалних процеса обраде, какви су обрада резањем на стругу или глодалици. Успешна примена обраде резањем у условима загревањем плазмом, захтева локализовано и контролисано загревање материјала обраде само до одређене температуре која је погодна за обраду резањем, и то непосредно испред алата, односно у зони обраде материјала. Загревање плазмом је један од водећих метода када је потребно процес обраде резањем извести у условима претходног загревања, због тога што се загревањем плазмом постиже одговарајући интензитет генерисане топлоте потребне како би се на ефикаснији начин извршила обрада резањем, нарочито код обраде тешко обрадивих легура на струговима, где је неопходан високи интензитет генерисане топлоте.

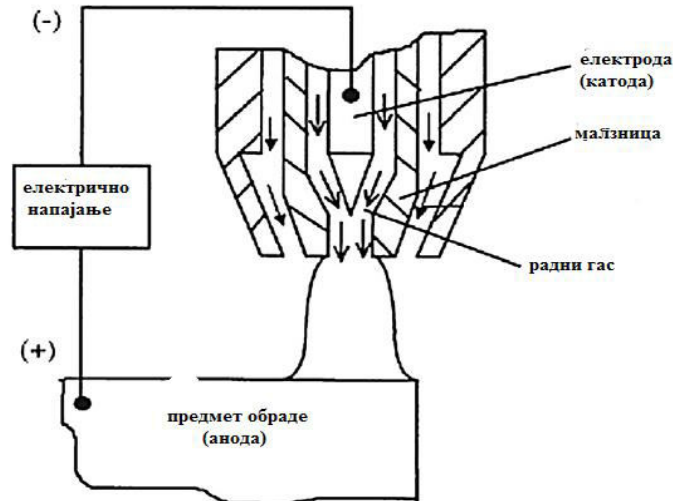
На слици 42 је приказан графикон из кога се види значајан пад чврстоће појединих легура претходно загрејаних плазмом.



Слика 42 Опадање чврстоће са повећањем температуре за дате легуре (Brecher, 2010)

Машине које користе плазму као примарни извор загревања предмета обраде, показале су се знатно економичнијим решењем у односу на машине које за то сврху користе ласерски сноп. Способност генерисања и преноса жељеног степана локализованог загревања на предмет обраде је присутна у условима додатног загревања плазмом. Температура предмета обраде је значајан фактор у формирању струготине јер утиче на пластичну деформацију материјала. Велика количина енергије која настаје услед деформисања и сила трења готово искључиво се претвара у топлотну енергију што доводи до појаве високе температуре у зони обраде. Температура загрејаног предмета обраде је од посебне важности када се ради о обради резањем претходно загрејаног предмета обраде. Утицај загревања материјала предмета обраде из спољне средине и њено распрострањање мора бити унапред позната, као и степен загревања који треба достићи без разарања материјала предмета обраде. Оштећења предмета обраде услед повишене температуре могу се свести на минимум уколико се њено деловање локализује (Leshock 2001).

Употребом лука плазме за потребе смањења тврдоће материјала предмета обраде непосредно у зони испред резног алата, ослобађа се висока енергија. Пропуштањем гасова преко електричног лука створеног између катоде (коју чини електрода од волфрама) и аноде (предмета обраде), формира се буктиња јонизованог гаса која загрева предмет обраде до одређене температуре непосредно испред зоне у којој се обавља процес резања. Формирање плазме приказано је на слици 43.



Слика43. Формирање плазме (Leshock 2001).

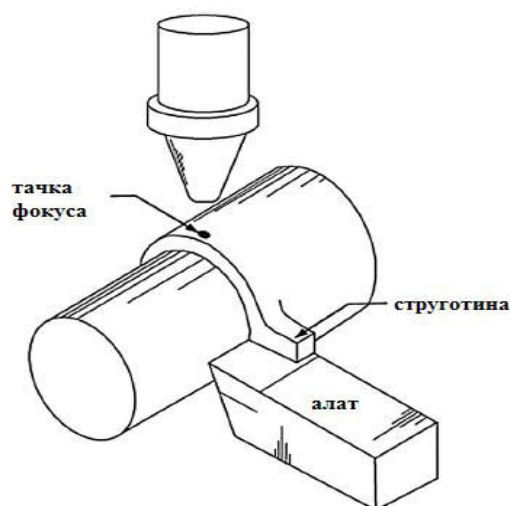
Фибер-оптички сензори су у стању да прате процес загревања предмета обраде у жељеном опсегу помоћу сонде која се поставља на адекватно место између млазнице плазме и резног алата. Помоћу високо локализоване енергије при малом протоку гаса кроз електричног лука је погодна за обраду у условима додатног загревања. Електрична проводљивост суперлегура подесних за обраду при додатном загревању омогућују достизање температуре и до 16000K (Leshock 2001).

5.2 Обрада у условима додатног загревања ласером

Ласер као средство помоћу којег се може остварити додатно загревање у зони обраде има значајне предности у односу на друге изворе топлоте потребне за извођење производних операција у условима додатног загревања. Неке од значајни предности у односу на остале методе су: кохерентност ласерског снопа, способност фокусирања на изузетно малу површину на предмету обраде, веома јак интензитет, способност обликовања енергије и једноставност аутоматизације производног процеса.

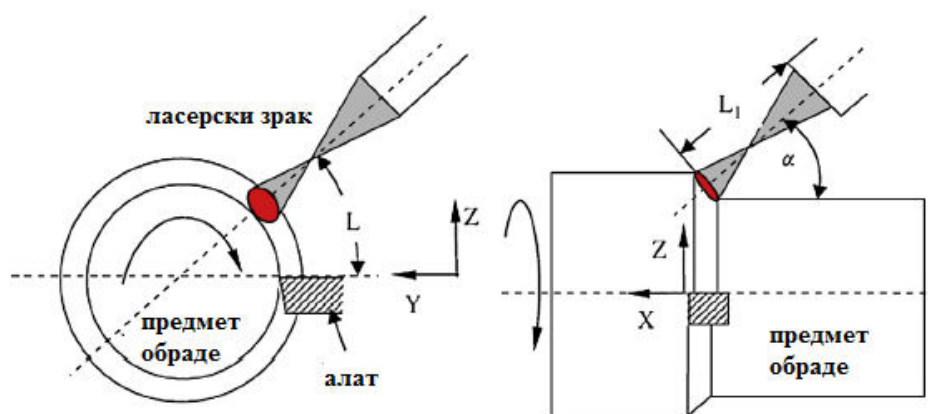
5.2.1 Употреба додатног загревања ласером код обраде на стругу

Употреба ласерског снопа за потребе додатног загревања предмета обраде код стругова је релативно једноставна ако се узме у обзир линеарност кретања резног алата. Основни фактори које треба узети у обзир код додатног загревања помоћу ласера су варијације у позицији ласерског снопа, величина тачке на коју делује, угао под којим је ласер фокусиран на предмет обраде и растојање између резног алата и ласерског снопа (Steen 2003). Ласер се обично поставља нормално у односу на површину предмета обраде код већине производних операција на обраде на стругу, као што је приказано на слици 44 (Sun 2010).



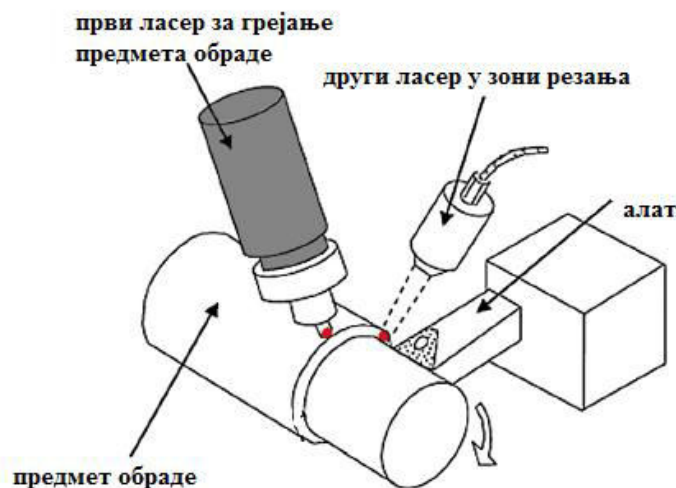
Слика 44. Ласер фокусиран на површину предмета обраде (Sun 2010).

Величина тачке на коју се ласерски сноп фокусира, мора бити таква да у потпуности прекрије заобљену површину како би се оствариле подједнако смањење сила резања по свим осама као што је приказано на слици 45.



Слика 45. Релативан положај ласерског снопа у односу на алат и предмет обраде (Mater 2008),

Међутим, чак и делимично покривање заобљене површине у близини контакта предмета обраде и резне површине алата, може довести до знатног оштећења алата. Из тога разлога предмет обраде се у пракси често додатно загрева помоћу више ласерских снопова усмерених на предмет обраде, чиме се постиже жељена температура у складу са дубином резања (слика 46) (Weck 2004).



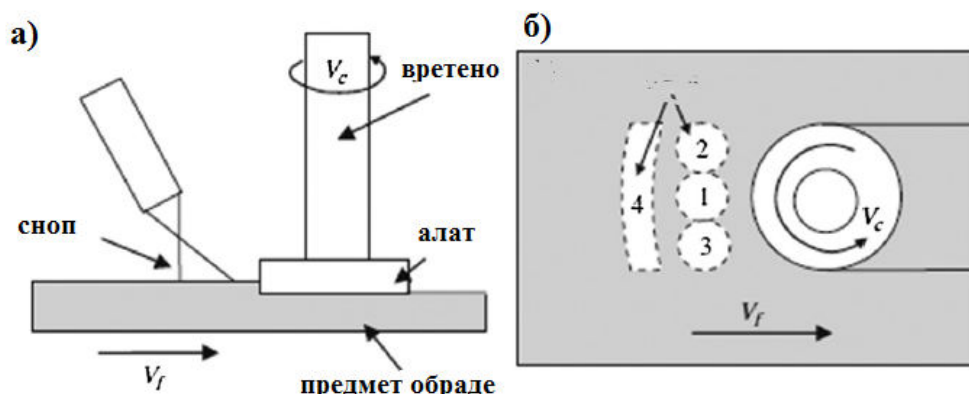
Слика 46. Додатно загревање уз помоћ више ласерских снопова (Weck 2004),

Позиција ласерског снопа релативна у односу на алат је од критичног значаја за обраду при додатном загревању ласерским снопом. Дистанца између ласерског снопа и алата, заједно са брзином резања, одређује временски интервал између загревања предмета обраде и процеса резања што се одражава на расподелу топлоте у зони резања. Веће смањење оптерећења приликом резања се може постићи загревањем предмета обраде помоћу ласерског снопа фокусираног ближе резном алату приликом обраде тврдих челичних легура, комерцијално чистог титанијума, као и легура са великим уделом хрома. Ипак, уколико је ласерски снап фокусиран сувише близу резној ивици алата, сасвим је извесно да ће доћи до прекомерног хабања алата и лошег квалитета обрађене површине. Због тога ласерски снап у зони резања мора бити на оптималној удаљености од резног алата (Weck 2004).

5.2.2 Употреба додатног загревања ласером код обраде на глодалици

Употреба ласера за загревање предмета обраде у случају обраде глодањем је знатно компликованија у односу на употребу код обраде на стругу, првенствено због карактера кретања алата и његове ротације. У случају чеоног глодања најједноставнији начин постављања ласерског уређаја је непосредно испред глодала, и то тако да ласерски уређај чини интегрисани део склопа главног вретена, при чему ће ласерски снап заједно са алатом и/или предметом обраде обављати помоћно кретања (слика 47а). Други значаји проблем код употребе додатног загревања ласером у случају глодања је покривеност површине предмета обраде. Како се код обраде глодањем користе алати различитог пречника, геометрије и облика и могу варирати за сваку појединачну операцију. Уређај који обавља загревање предмета обраде помоћу ласерског снопа мора бити довољно флексибилан како би испратио захтеве за сваку појединачну операцију. Ово правило не важи само за растојање ласерског снопа од алата, његовог угла, итд., већ се односи и на адекватну покривеност површине предмета обраде на коју се фокусира ласерски снап. Из тог разлога, ласерски уређај мора бити у стању да генерише више ласерских снопова и да их

фокусира на више тачака у складу са ширином резања (слика 47б, површине 1, 2, 3 и 4) (Komanduri 1984).



Слика 47. Употреба ласера у обради глодањем (Komanduri 1984).

Различите превлаке или бојење предмета обраде могу побољшати процес обраде јер се тиме поспешује апсорпција ласерског зрачења нарочито када су у питању титанијум или легуре богате никлом као што је *Inconel 718*. Током година спроведена су различита експериментална истраживања која су показала да *Nd-YAG* пулсни ласери имају значајно већу ефикасност апсорпције у односу на *CO₂* ласере, првенствено због краће таласне дужине у односу на *CO₂* ласере (Komanduri 1984).

И ако су машине које користе ласер као примарни извор загревања знатно скупље и захтевније у односу на машине које користе друге изворе загревања, њихова економичност је ипак оправдана ако се узме у обзир да је потрошња енергије ласера само као извора загревања далеко мања у односу на друге методе. Томе треба додати и чињеницу да се загревањем ласером може постићи генерисање топлоте на изузетно малу површину, у строго контролисаним условима загревања. У односу на неконвенционалну обраду ласером, када је у питању глодање, ласер само као извор загревања али не као средство обраде такође остварује мањи утрошак енергије, па самим тим и мање трошкове производног процеса, под условом да је операцију глодањем могуће извршити резним алатима уз претходно загревање ласером.

5.3 Обраде у условима додатног загревања електричном индукцијом

Индукционо загревање остварује се помоћу индукцијског калема кроз који протиче високофреквентна наизменичан електрична струја, које се затим индукује у материјалу предмета обраде. Високофреквентна електрична струја индукована у материјалу предмета обраде за последицу има загревање материјала у коме је индукована. На овај начин постиже се загревање до потребне температуре без контакта између индукцијског калема и предмета обраде (слика 48).

Када се индукциони калем постави непосредно испред алата и изнад предмета обраде, приликом протока електричне струје кроз њега, понаша се као

примарни калем код електричних трансформатора. У том случају предмет обраде понаша се на исти начин као секундарни калем електричног трансформатора. Електрична струја индукована у материјалу предмета обраде наилази на отпор, што за последицу има загревање предмета обраде (Amin 2004).



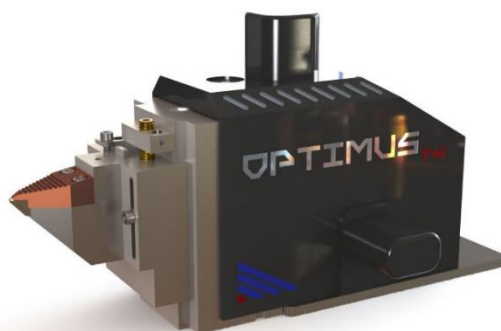
Слика 48. Индукцијски калем у зони предмета обраде (Manufacturing and Materials Engineering Department, IUM, Malaysia, 2009.)

Загревањем предмета обраде на овај начин смањују се температурни губици због тога што се температура у предмету обраде расипа једнако кроз предмет обраде. Повишена температура која се јавља у материјалу предмета обраде не настаје директним деловањем извора топлоте као што је то случај код загревања плазмом, или зрачењем на тачку помоћу ласера, већ је она производ кретања наелектрисаних честица кроз материјал предмета обраде. Повећање топлоте такође се јавља и у индукцијском (примарном) калему, па се он пројектује тако да је могуће кроз њега спровести средство за хлађење. Индукцијски калем је најчешће направљен од бакарне цеви, која има релативно низак електрични отпор, који опада сразмерно загревању материјала од кога је направљен (у овом случају бакра). Уколико дође до прекомерног загревања индукцијског калема, неке од карактеристика индуковане струје у материјалу предмета обраде се могу изгубити током поступка обраде. Из тога разлога, индукцијски калем је пројектован тако да је могуће извршити његово хлађење и на тај начин контролисати поступак додатног загревања материјала предмета обраде, у којој мери ће поступак додатног загревања предмета обраде бити енергетски ефикасан, зависи од више фактора. Првенствено су то физичке карактеристике материјала који се обрађује, његова запремина, електрични отпор, итд. Томе треба додати карактеристике индукцијског калема као што су: број намотаја, пречник бакарне цеви, електрични потенцијал, учесталост електричне струје, итд. (Amin 2004).

Како већина ових фактора може варирати од случаја до случаја, потребно је спровести одговарајућа експериментална истраживања на том пољу.

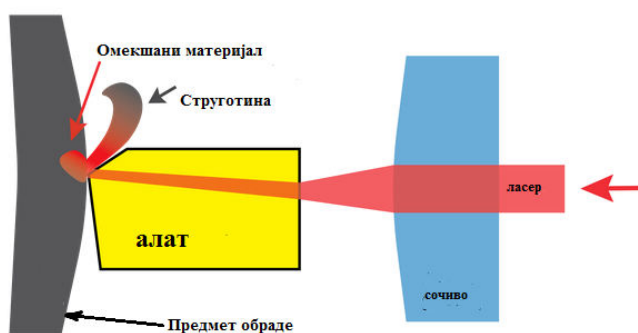
5.4 Машине у поступку обраде додатним загревањем.

Као што је досада веће речено, машине у обради додатним загревањем су у основи алатне машине намењене процесима обраде као што су глодање и стругање (Sanchez 2015). Оно што издваја машине које се користе у процесу обраде са додатним загревањем су различити уређаји којима се изводи загревање предмета обраде. Постоји више начина којима се може извести загревање предмета обраде, и углавном су то уређаји који користе плазму, ласер или електричну индукцију. Што значи да је обраду могуће извршити на већини алатних машина намењених глодању или стругању под условом да је могуће извршити загревање предмета обраде у току самог процеса обраде (Bich 2018). Један пример за то је уређај који користи ласер као средство загревања предмета обраде и намењен обради на стругу (слика 49).



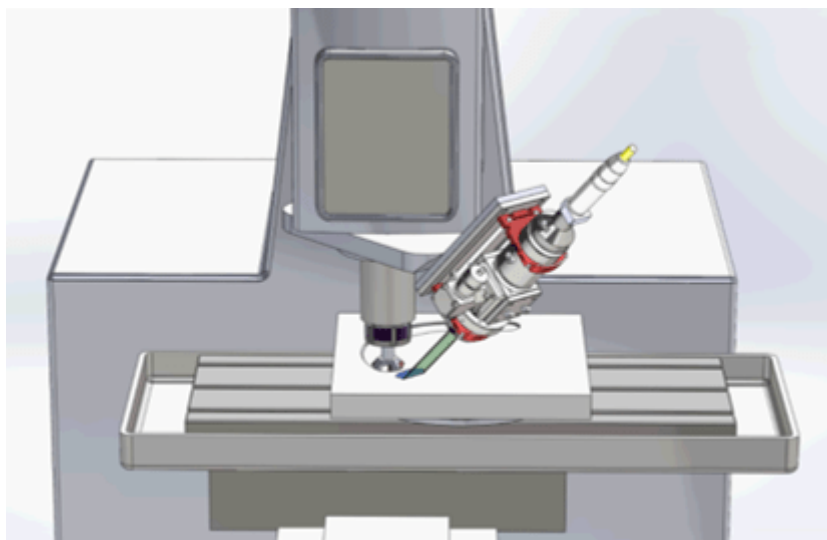
Слика 49. Optimus T+1 (www.micro-lam.com, 2020)

Уређај приказан на слици 49. је тако конфигуриран да успоставља спровођење ласерског снопа кроз дијамтски транспарентни алат. На тај начин омогућено је загревање предмета обраде у самој тачки контакта са алатом. Топлотни губици су сведени на минимум, при чему су остварени услови за обраду резањем кртих материја као што је стакло. На слици 50 је приказана принципијелна шема оваквог уређаја.



Слика 50. Принципијелна шема уређаја Optimus T+1 (www.micro-lam.com, 2020)

У случају алатних машина намењених обради глодањем, загревање предмета обраде ласером је могуће извршити посредством зрачења предмета обраде непосредно испред зоне у којој се врши обраде. Изглед ласерског уређаја постављеног на главу електричног вретена алатне машине илустрован је на слици 51.



Слика 51. Ласерски уређај на алатној машини. (www.micro-lam.com, 2020)

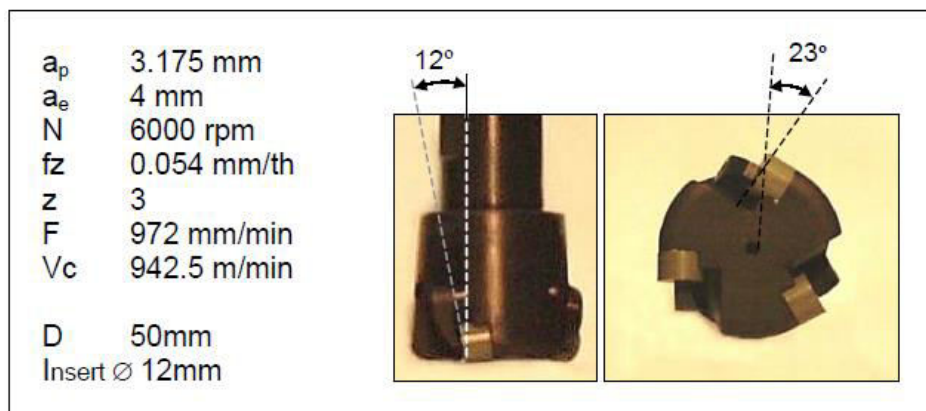
На сличан начин се може извршити постављање уређаја који ће загревање предмета обраде обављати помоћу плазме.

Алатне машине у поступку обраде додатним загревањем се по својој конструкцији не разликују од већине конвенционалних и нумеричких обрадних центара, а уређаји за загревање предмета обраде је могуће имплементирати на различите начине (Bich 2018).

Алати у поступку додатним загревањем предмета обраде

Било да се ради о обради глодањем или стругањем, алати у поступку обраде додатним загревањем предмета обраде се по својој геометрији не разликују од алата који се користе за поменуте процесе. Оно што их издваја су материјали од који се израђују ови алати, који морају одговорити на захтеве у смислу задржавања физичких особина на повишеним температурама.

Један пример таквог алата који се може користити у обради материјала као што је *Inconel 718*, глодањем при повишеним температурама је глодачка глава са измењивим керамичким плочицама *CC670 Sandvik*. Плочице су израђене од композитне керамике (Al_2O_3 ојачане кратким влакнима CSi), које су устају да задрже своја механичка и физичка својства на температурама до $2000\text{ }^{\circ}C$ (Lacalle 2018) Алат са оптималним параметрима резања материјала у условима повишене температуре приказан је на слици 52.

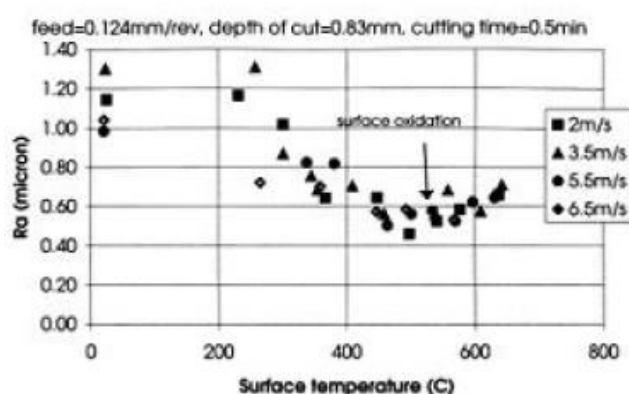


Слика 52. Tool and cutting conditions for Inconel 718 (Lacalle 2018)

Основни фактор који доводи до хабања алата је повишена температуре у току обраде, која доводи до појаве заварени спојева између честица метала и резне површине алата. Како би се хабање алата свело на прихватљиве границе, у процесу конвенционалне обраде стругањем или глодањем, бирају се адекватни параметри за одређену обраду. У случају тешко обрадљивих материјала који захтевају претходно загревање, осим одабира алата који је у стању да поднесе повишену температуру, морају се узети у обзир различити фактори као што је тврдоћа материјала предмета обраде, његова пластичност након загревања до одређене температуре итд (Lacalle 2018).

Храпавост обрађене површине

Побољшање храпавости површине након обраде поступком додатног загревања материјала предмета обраде варира у зависности од површинске температуре и брзине резања. На слици 53 су приказани резултати експерименталних истраживања храпавости површине за узорке изложене температурама у опсегу од 20° C до 700° C за брзине резања 2, 3.5, 5.5 и 6.5 m/sec (Jani 2014)



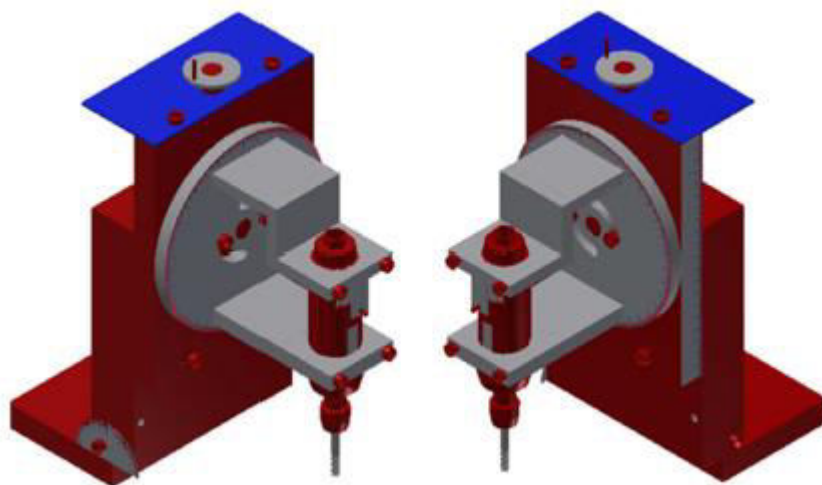
Слика 53. Условљеност температуре предмета обраде и храпавости (Jani 2014)

У свим случајевима може се учити побољшање квалитета површине уколико се поступак обраде обавља на температурама нижим од 530° C, док на већим температурама долази до појаве оксида на површини материјала која утиче на храпавост површине. У поступку обраде као извор загревања коришћена је плазма (Jani 2014).

6. МОДЕЛИРАЊЕ УРЕЂАЈА ЗА ПРИХВАТ ОБРАДНЕ ГЛАВЕ ЗА ИЗВОЂЕЊЕ ОПЕРАЦИЈА ОБРАДЕ РОТАЦИОНИМ АЛАТИМА НА СТРУГУ

Алатне машине које комбинују кретање премета обраде и главно кретање ротационог алата су већ дуго низ година заступљене у различитим гранама индустрије где налазе своју примену у сложеним технолошким условима. Овакве алатне машине првенствено се користе код израде делова сложене геометрије, цилиндричног или ексцентричног попречног пресека са уздужним жлебовима и другим конфигурацијама, али и за операције као што су: ортогонално, тангентно, и паралелно стругање. Машине намењене овако великом опсегу операција захтевају веома сложена решења у смислу конструкције која омогућавају висок степен слободе кретања, за која је потребно обезбедити сложене системе рачунарског управљања. Са друге стране, стругање ротационим алатима је могуће извести додавањем електричног вретена постављеног на носач алата, без додатне модификације алатне машине.

Постоје више техничких решења којима је омогућено извођење операција стругање ротационим алатима, као што је монтажна обрадна глава развијена за потребе тестирања различитих услова обраде. Склоп овог уређаја приказан је на слици 54.



Слика 54. Обрадна глава (Yohanes 2017)

Уређај приказан на слици користи пнеуматско вретено снаге 0.45 kW са максималним броје обртаја од 25 000 о/мин.

У овом поглављу представљено концептуално решење које омогућује извођење обраде стругањем ротационим алатима на конвенционалном стругу у складу са неким од основних захтева.

6.1 Електрично вретено

Електрично вретено задужено за обављање ротационог кретања алата мора бити довољно малих димензија и релативно мале масе како би се поставио на попречни супорт аутоматског струга. Такође је потребно да вретено поседује довољну снагу и да оствари одговарајући број обртаја. За потребе моделовање уређаја представљеног у овом раду, усвојено је електрично вретено *Mechatron ATC – 8022*, које по својим карактеристикама одговара уређају за извођење поступка обраде ротационим алатима на стругу. На слици 55 приказано је једно овакво електрично вретено.



Слика 55. Електрично вретено ATC – 8022 произвођача *Mechatron GmbH* (www.mechatron-gmbh.de, 2020)

Карактеристике вретена приказаног на слици дате су у табели 3.

Снага	2 kW
Број обртаја	42 000 o/min
Радни напон	230VAC / 10A
Носач алата	HSK-E25
Хлађење	водено
Сензори	Индуктивни
Димензије	336.7 mm x 80mm
Укупна маса	7.7 kg
Лежајеви	4x угаоно контактни

Табела 3. Карактеристике вретена

Контролу броја обртаја вретена обавља активно фреквентни регулатор *VFD* у опсегу до 700 Hz који помоћу индуктивног сензора прима информације о тренутном положају у коме се налази ротор вретена, као и праћење задатог броја обртаја. На тај начин постигнута је контрола броја обртаја како на малим тако и на великим бројевима обртаја. Произвођач препоручује *VFD* уређај *Omron MX2* у класи до 2.2 kW. Изглед поменутог фреквентни регулатор приказан је на слици 56.

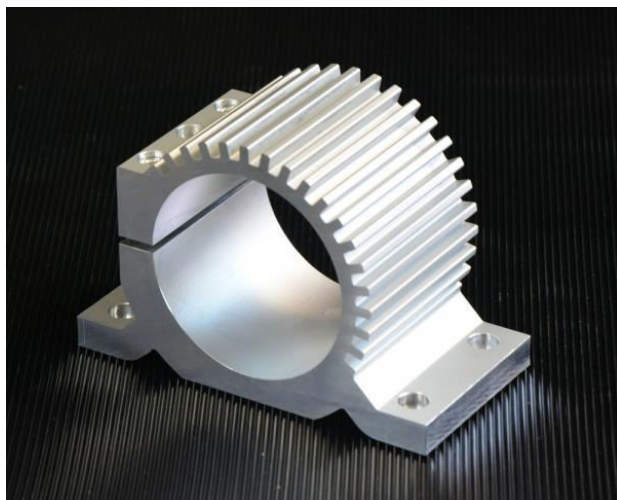


Слика 56. Фреквентни регулатор *Omron MX2* ([www .omron.eu](http://www.omron.eu) 2020)

Прихватање носача алата код вретена *Mechatron ATC – 8022* обавља се помоћу система са компримованим ваздухом, док је хлађење изведено циркулацијом расхладног средства директно кроз статор електромотора.

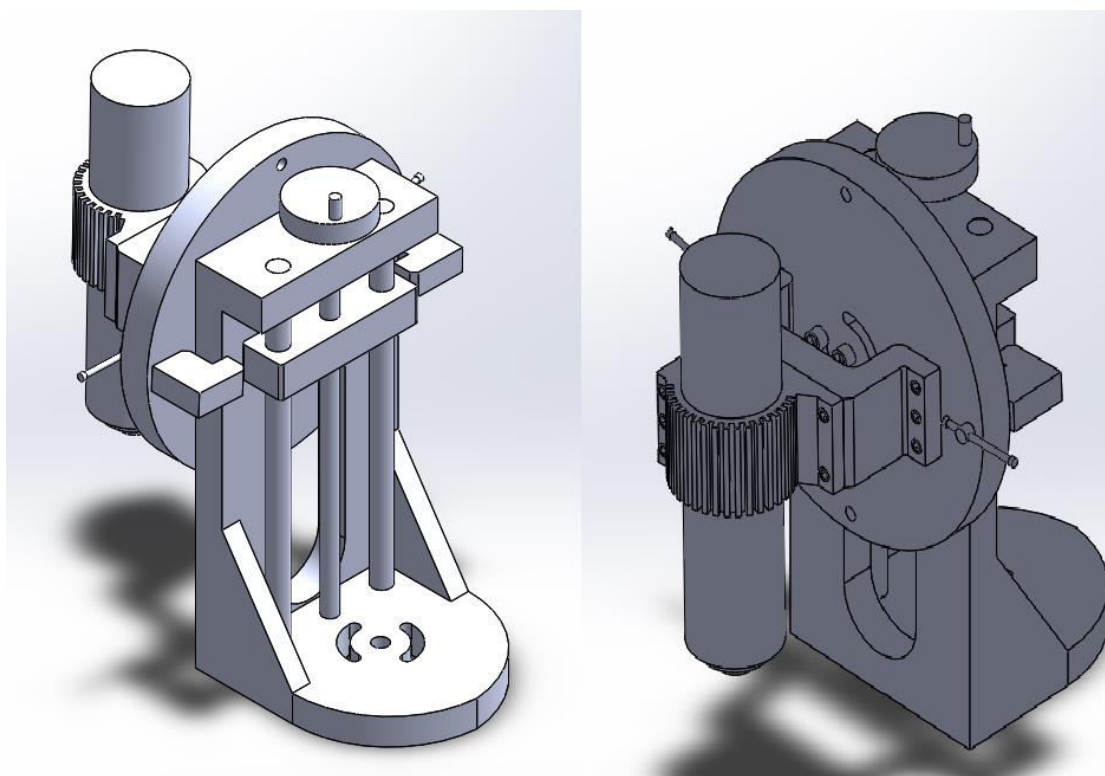
6.2. Елементни обрадне главе

Обрадна глава намењена обради стругањем ротационим алатима мора задовољити захтеве у смислу слобода кретање, крутости и стабилности у раду. Механичка раздвојива веза између вретена и елемената обрадне главе извршена је помоћу носача вретена којег је спецификовао произвођач електричног вретена. Носач је пројектован тако да задовољи уска поља толеранције између вретена и носача, да пружи одговарајућу стабилност и да потпомогне пасивном хлађењу вретена. Овакав носач вретена приказан је на слици 57.



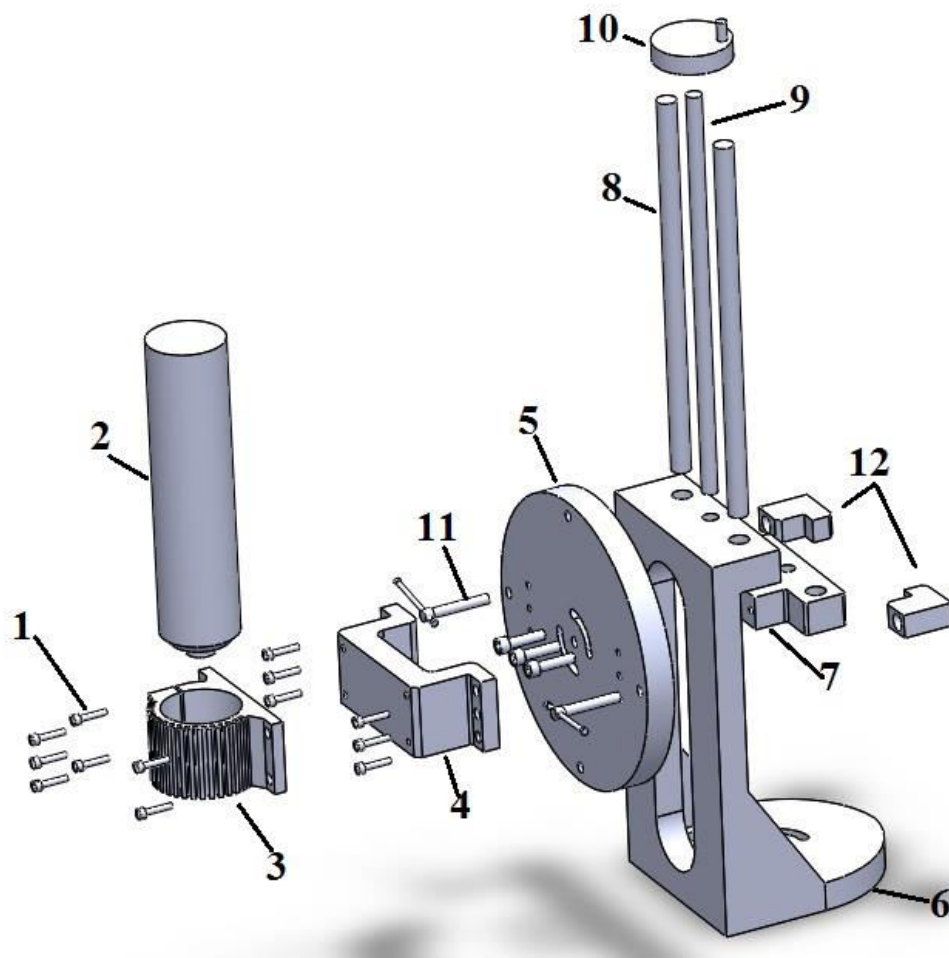
Слика 57. Носач вретена Mechatron H80S-B

Носач вретена постављен је на окретну плочу која дозвољава постављање вретена у одговарајући положај како би се остварио одговарајући контакт између алата и предмета обраде. Упрошћени модел главе са вретеном приказан је на слици 58.



Слика 58. Модел обрадне главе

Склоп обрадне главе чине елементи помоћног линеарног и обртног кретања конструисани око вретена са носачем. Изглед склопа приказан је на слици 59.

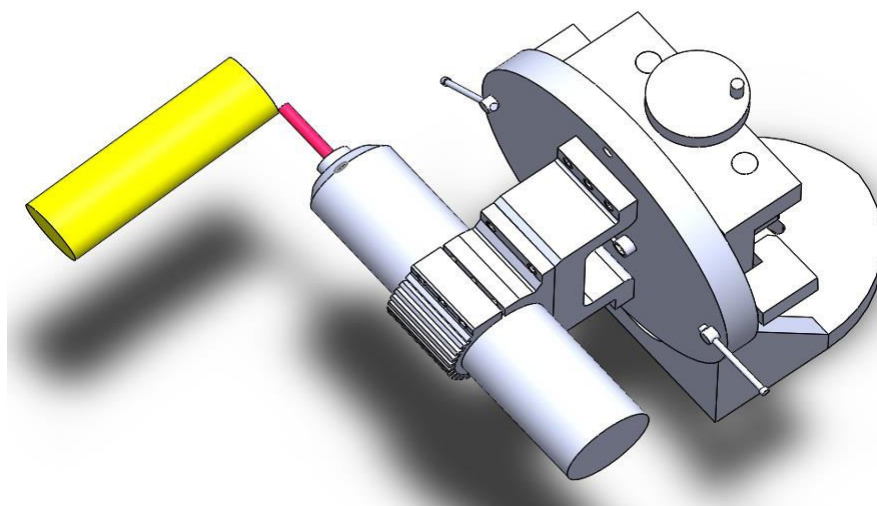


Слика 59. Склоп обрадне главе: 1) вијци, 2) вретено, 3) носач вретена, 4) подножје носача, 5) обртна плоча, 6) тело обртне главе, 7) клизач, 8) линеарне вођице, 9) навојно вретено, 10) ручни точак навојног вретена, 11) вијак са ручицом и 12) стезне шапе.

Електрично вретено је повезано механичком вијачином везом за обртну плочу 5) која омогућава ротирање окретање вретена заједно са носећим елементима у опсегу од 180° . Окретна плоча је такође повезана за клизач 7) у коме се налазе клизни лежајеви, као и навртка трапезног навојног вретена. Окретањем ручног точка 10), обавља се окретање навојног вретена 9) чиме се обртно кретање вретена претвара у линеарно. Клизач 7) у коме се налази навртка која привлачи односно гура клизач 7), вођен је помоћу цилиндричних вођица 9). На тај начин омогућено је прецизно померање у смеровима Z осе. Обртну плочу је након позиционирања потребно причврстити помоћу стезних шапа 12), које су повезана за тело обртне главе помоћу вијака са ручицама 11) Како је обрадну главу могуће поставити на носач алата аутоматског струга, затезањем односно отпуштањем вијака могуће је позиционирање обрадне главе у односу на предмет обраде. На тај начин омогућено је извођење три основне операције у поступку обраде ротационим алатима на стругу, при чему кретање у смеровима оса XU , обавља уздужни односно попречни супорт. Предност оваквог система је висока стабилност.

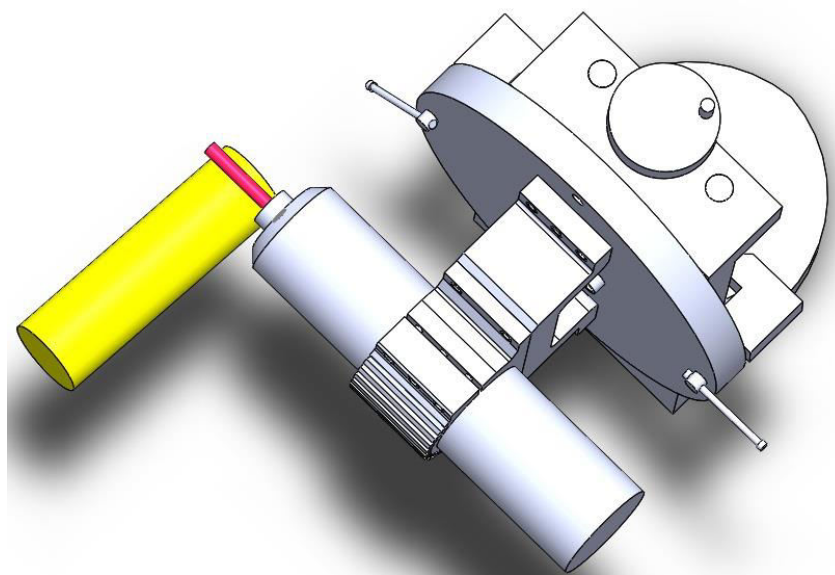
Помоћу обрадне главе постављене на струг могуће извести три основне операције ортогоналног, тангентног и паралелног стругања у зависности од тога како је обрадна глава постављена у односу на предмет обраде.

У случају ортогоналног стругања, обрадну главу треба поставити тако да је оса алата нормална у односу на осу предмета обраде (слика 60). Дубина резања је веома значајна за моделовање процеса обраде и може се добити ако се узме у обзир почетна и крајња позиција алата у оквиру једне револуције алата. (Zhu 2016)



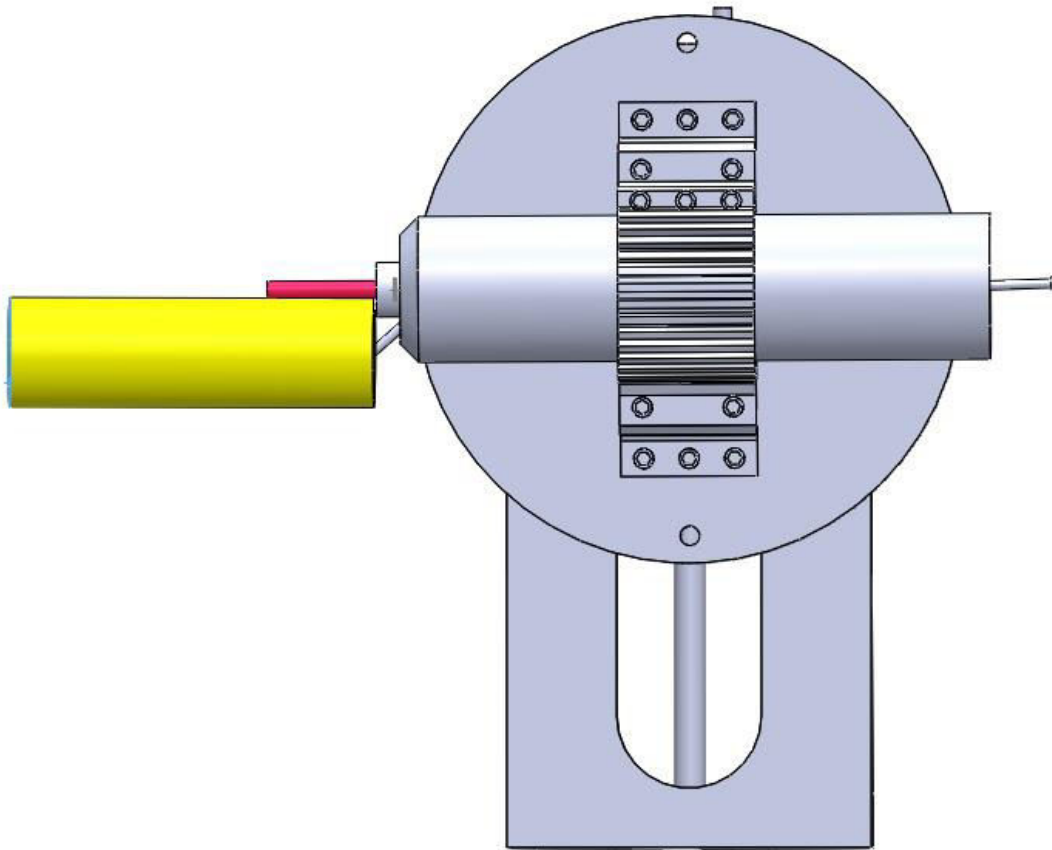
Слика 60. Ортогонално стругање

Када је потребно извести операцију тангентног стругања, обрадну главу треба довести у такву позицију да оса алата у контакту са предметом обраде остварује тангенту, као што је приказано на слици 61. Код тангентног стругања материјал се уклања периферно. (Zhu 2016)



Слика 61. Тангентно стругање

Код паралелног стругања (слика 62) осе алата и предмета су међусобно паралелне што се може остварити заокретањем обрадне главе, тако да се постигне потребна позиција. (Zhu 2016)



Слика 62. Паралелно стругање

Већину делова потребних за склапање обрадне главе могуће је изградити машинском обрадом, а машинске елементе у саставу линеарног кретања је могуће усвојити због тога што су у питању стандардне компоненте.

7. ЗАКЉУЧЦИ

Неконвенционални поступци обраде не могу у потпуности заменити производне операције као што су глодање или обрада на стругу, како због захтева конструкције дела, тако и због захтева економске природе. Са друге стране, у различитим гранама индустрије, примену све више налазе материјали код којих је обраде резањем знатно отежана због физичких и механичких особина самог материјала. Одатле је уследила потреба за додатним побољшањем већ познатих поступака обраде као што су глодање и стругање, увођењем одређених побољшања које се у великој мери одражавају на целокупан поступак обраде. На првом месту су то параметри под којима се одвија поступак обраде, алати који се користе за ту намену, али и материјали предмета обраде у зависности од којих ће се бирати одговарајући алати и технолошки поступци обраде.

Високопродуктивни поступци обраде чине групу побољшаних конвенционалних метода код којих је остварена висока продуктивност у току обраде кроз побољшање поступка обраде. По заступљености у индустрији најширу примену имају високобрзински поступци, затим обрада на стругу ротационим алатима и на крају поступци обраде у условима додатног загревања.

Високобрзински поступак представља знатно прогресивнију методу обраде глодањем код које су брзина резања неколико пута веће у односу на конвенционално глодања. Високе брзине резања захтевају услове као што су стабилност и крутост алатне машине, стабилност предмета обраде и низ других параметара који утичу на квалитет обрађене површине и продуктивност. Већи део оптимизације процеса је могуће урадити већ у току пројектовања процеса. Оптимизација обухвата генерисање програма који ће се извести на одређеној машини, одабир адекватног алата, план стезања предмета обраде и одабир режима обраде. Машине које се користе у поступку високобрзинске обраде, су рачунарски нумерички управљиви обрадни центри који имају три или више слобода кретања. За њих су карактеристична главна кретања алата који може достићи и до 200 000 о/мин.

Обрада стругањем ротационим алатима је такође значајан високопродуктивни процес обраде у производњи делова сложене геометрије, и као унапређени поступак стругање код кога ротациони алат уклања материјал у правцу уздужног пресека предмета обраде. Овакав начин обраде има знатне предности у односу на конвенционалну обраду на стругу, првенствено због дубине резања које се може постићи у једном пролазу у току грубе обраде, што није могуће остварити у току конвенционалне обраде на стругу јер би у том случају дошло до прекомерног оптерећења алата (стругарског ножа), што би неминовно довело до прекомерног хабања па чак и пуцања алата. У случају обраде ротационим алатима, код које алат ротира знатно већим бројем обртаја у односу на предмет обраде, отпори при резању су знатно мањи па је уклањање материјала знатно лакше. Струготина која се том приликом одваја од предмета обраде је кратка (прекидног карактера), што је још једна предност ако се узме у обзир да више од 90% топлоте генерисане у процесу обраде остаје у струготини,

чиме се знатно побољшава хлађење алата, па су и услови за стварање заварених спојева између резних површина и струготине знатно мањи. Површина предмета обраде након обраде ротационим алатима на стругу, може бити различитог квалитета, али треба рећи да је она у великој мери условљена бројем обртаја ротационог алата. На већим обртајима површина је бољег квалитета нарочито код ортогоналног стругања, што се може додатно побољшати коришћењем алата са више резних површина.

Обрада у условима додатног загревања подразумева поступак код се предмет обраде загрева у току саме обраде како би се побољшала његова обрадивост. Овакав начин обраде је могуће извести на већини савремених алатних машина уз додавање уређаја за генерисање топлоте у површинским слојевима материјала предмета обраде. Материјал се обично загрева помоћу плазме, ласера или магнетном индукцијом. Додатно загревање је од посебног значаја код тешко обрадивих материјала, који добро подносе високе температуре. Алати који се користе у овом поступку обраде не разликују се пуно у односу на резне алате намењене конвенционалним поступцима обраде. Оно што их издваја је материјал од кога се израђују. У питању су плочице добијене поступком синтеровања композитне керамике ојачане кратким влакнима. Матрицу чине најчешће материјали као што је алуминијум оксид, док ојачање представљају кратка влакна силицијум карбида. Оваква комбинација материјала, гради композитну керамику специфичне затезне чврстоће и модула еластичности која је у стању да задржи своја механичка и физичка својства на температурама изнад 1500° С. Овакве карактеристике материјала чине га веома погодним за израду резних плочица које се могу користити у поступку обраде у условима додатног загревања. Топлота којој је изложен предмет обраде знатно олакшава поступак обраде, али такође има различите утицаје на различите материјале, што се одражава на топографију површине. Најбољи резултати у погледу квалитета површине постижу се испод граница ствара оксидне превлаке на материјалу обраде.

Високопродуктивни процеси обраде су веома захтевни у погледу услова у којима се обрада одвија, машина и алата. Најчешће су то захтеви у погледу снаге алатне машине, њене стабилности и крутости, али управљивости. Када се ради о обради ротационим алатима на стругу, неке од основних операција је могуће извршити на конвенционалном стругу уз употребу уређаја каква је обрадина глава описана у овом раду. Овакав уређај мора одговорити на захтеве у смислу стабилности, крутости и снаге електричног вретена. Пожељно је, да је целокупан уређај релативно малих димензија и масе, али довољне снаге електричног вретена која је у стању да постигне значајан број обртаја. Коришћењем оваквог уређаја процес обраде на стругу је знатно бржи и једноставнији, што доводи до веће продуктивности у поступку обраде. Обрадна глава намњена обради ротационим алатима на стругу, чини стабилан систем којег је могуће поставити на већину конвенционалних стругова, и на тај начин обавити основне поступке обраде као што су: ортогонално, тангентно и паралелно стругање.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Б. Недић, М. Лазић: „Обрада метала резањем“, скрипта, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2007
2. Д. Регодић: „Технички системи“, Универзитет Сингидунум, Београд 2011
3. Copley S. M., *Laser Shaping of Materials, Lasers in Materials Processing*. In Conference Proceedings of the American Society for Metals, Los Angeles, CA, 1990, pp 82–92.
4. L. Zhu, H. Li, Ch. Liu, (2016): *Analytical modeling on 3D chip formation of rotary surface in orthogonal turn-milling*, ScienceDirect.
5. Pasko R., Przybylski L., Slodki B., (2000): *High Speed Mmachining (HSM)*, International Workshop CA Systems And Technologies.
6. Schulz H., Moriwaki T., (1992): *High speed machining*, Ann. of the CIRP, t. 41, nr 2, s. 637 –642.
7. A. Schubert, A. Nestler, R. Funke (2010): *Influence of cutting edge geometry and cutting parameters on surface finish in turn milling*, Materialwissenschaft und Werkstofftechni (2010)
8. E. Budak, A. Çomak, E. Öztürk, (2013): *Stability and high performance machining conditions in simultaneous milling*, CIRP Annals – Manufacturing Technology 62.
9. König W., Wagemann A., *Machining of Ceramic Components* 1990: Process-Technological Potentials. In Machining of Advanced Materials, NIST Special Publication, Vol. 847.
10. Talantov N. V., Amin Chereomushnikov, (1980); *Temperature Deformation Laws of Chatter Formation during Metal Cutting Process*. In Abstracts of the papers presented at the 5th Soviet National Conference, Teplophysika Technologichieskih Processov, Volgograd, p 92.
11. Amin A. K. M. N., Abraham I., Khairusshima N., (2004): *Performance of Circular Carbide Inserts in End Milling of Carbon Steel Under Preheating Condition*. In *Proceedings of the ICAMT*.
12. Leshock Carl E., Kim Jin-Nam Shin, Yung C. (2001): *Plasma Enhanced Machining of Inconel 718: Modeling of Workpiece Temperature with Plasma Heating and Experimental Results*. Int. J. Mach. Tools Manuf.
13. Steen, W. (2003) *Laser Material Processing*, 3rd ed.; Springer: New York,.
14. Sun S., Brandt M., Dargusch, M. S., (2010). *Thermally Enhanced Machining of Hard-to-Machine Materials – A Review*. Int. J. Mach. Tools Manuf.

15. Wu, J. F., Guu, Y. B. (2004): *Laser Assisted Machining Methods and Device*, US Patent 7,002,100 B2
16. Weck M., Zeppelin W. V., Hermanns C. (1994): *Laser – A Tool for Turning Centers. In Laser Assisted Net Shape Engineering*, Proceedings of the LANE'94. Vol. 1; Geiger, M., Vollertsen, F., Eds.; Meisenbach: Bamberg,
17. Komanduri, R.; Flom, D. G.; Lee, M. (1984) Highlights of DARPA Advanced Machining Research Program. In American Society of Mechanical Engineers, Production Engineering Division (Publication) PED 12.
18. Y. Altintas, (2012): *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*, second ed., Cambridge University Press, New York.
19. S. K. Choudhury, J. B. Bajpai (2005): *Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish*, Journal of Materials Processing Technology. 170.3 487-493.
20. C. Filho, J. Martins (2012): *Prediction of cutting forces in mill turning through process simulation using a five-axis machining center*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 58.1-4 71-80.
21. C. Neagu, M. Gheorghe, A. Dumitrescu (2005), *Fundamentals on face milling processing of straight shafts*, Journal of materials processing technology. 166.3 (2
22. H. Schulz, G. Spur (1990) *High speed turn-milling—a new precision manufacturing technology for the machining of rotationally symmetrical workpieces*, CIRP Annals-Manufacturing Technology. 39.1 107-109.
23. J. Kopač (2007): *Journal of Achievements in Materials and manufacturing Engineering, High precision machining of high speed machines*, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana
24. L.Zhu, H. Li. W. Wang (2013): *Research on rotary surface topography by orthogonal turn-milling*. Springer-Verlag London.
25. Yohanes (2018): *Development of Turn-milling in Conventional Lathe Machine*, Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace
26. Jani. D. (2014): *“Thermally Enhanced Machining: Introduction, Potential Advantage and Future Scope”*, National Conference on Emerging Trends in Mechanical Engineering at GCET, Vallabh Vidyanagar
27. Lacalle L.(2015): *Plasma assisted milling of heat-resistant super alloys*, Department of Mechanical Engineering – University of the Basque Country Faculty of Engineering of Bilbao Alameda de Urquijo s/n. 48013 Bilbao
28. Bich M.,Chien D, Long B. Toan N. (2018): *Cutting force model for thermal assisted machining of steel based on the Taguchi method*, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam.