

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: 342/2019

Никола Д. Десивојевић

Савремени системи мониторинга хабања резног алата

-Мастер рад -

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Богдан Недић, ред. проф., ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Мастер студије: **Машинско инжењерство**

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

Предмет: **Савремени обрадни системи**

Име и презиме: **Никола Десивојевић**

Бројиндекса: **342/2019**

ПРИЈАВА МАСТЕР РАДА

Тема рада: **Савремени системи мониторинга хабања резног алата**

Задатак: У оквиру мастер рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о савременим методама за прећење хабања алата. Потребно је истражити литературне податке о мониторингу процеса обраде глодањем са аспекта хабања алата, отпора резања, температуре резања, квалитета обрађене површине, ангажоване снаге машине, вибрација, итд. У посебном делу рада извршити експериментална испитивања могућности примене при CNC глодању различите мерне опреме за индиректно праћење хабања алата (у складу са расположивом опремом). Експериментална истраживања вршити на CNC глодалици.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Мониторинг хабања процеса обраде резањем,
3. Директне и индиректне методе праћења процеса хабања алата,
4. Експериментална истраживања,
5. Резултате мерења и анализи резултата,
6. Закључци,
7. Литература.

Крагујевац, 04.03.2020.

Ментор

Др Богдан Недић, редовни професор

Резиме

Обрада метала глодањем је један од најважнијих и најраспрострањенијих видова обраде метала. Како би се тај процес све више аутоматизовао и како би се смањили застоји машина, развијене су различите технологије мониторинга, које прате стање машине у сваком тренутку.

У овом раду дате су савремене методе мониторинга обраде глодањем, које користе РС за обраду података, чиме је тај вид мониторинга доста прецизнији и јефтинији од претходних решења, због развоја рачунарске технике.

Даље у раду су обрађене основе мониторинга, заједно са типовима процесних сензора, чија се подела обично врши у зависности од метода праћења хабања алата на директне и индиректне.

Управљање мониторингом је адаптивно управљање, преко АСО и АСС система, који поседују управљачку јединицу преко које се врши регулација улазних параметара на основу излазних.

Експериментални део рада се односи на праћење оптерећења главног вретена, које се повећава са повећањем хабања алата.

Кључне речи: мониторинг, адаптивно управљање, глодање, хабање алата, главно вретено

Summary

Milling is one of the most important and widespread manufacturing operations. In order to automate process and decrease machine deadlock, monitoring system was developed, which tracks machine condition in real time.

In this paper, modern methods of milling monitoring are given, which uses PC to process data, making that type of monitoring more accurate and cheaper than its previous solutions, because of constant development of computer technology.

Also, basics of monitoring are covered in this paper, alongside with types of process sensors that are basically divided, depending of monitoring method, into direct and indirect.

Monitoring control is adaptive control, through ACO and ACC systems, which possess control unit which regulates IN parameters depending on OUT parameters.

The experimental part of the work refers to monitoring the load on the main spindle, which increases with increasing tool wear.

Key words: monitoring, adaptive control, milling, tool wear, main spindle

Садржај

1. Уводна разматрања.....	1
2. Мониторинг хабања процеса обраде резањем.....	4
2.1. Механизми хабања алата.....	4
2.2. Облици хабања резног алата.....	5
2.3. Основи мониторинга процеса обраде резањем.....	7
2.4. Технике мониторинга.....	9
2.5. Системи за мониторинг процеса резања.....	10
2.5.1. Спољашњи системи.....	12
2.5.2. Модулни системи.....	13
2.5.3. Интегрисани системи.....	13
2.6. Методологија мониторинга.....	14
3. Директне и индиректне методе праћења процеса хабања.....	16
3.1. Праћење процеса хабања алата.....	16
3.2. Директне методе.....	17
3.2.1. Оптичке методе.....	17
3.2.2. Пнеуматски сензори.....	20
3.2.3. Радиоактивни сензори.....	21
3.3. Индиректне методе.....	22
3.3.1. Мерење сила резања.....	22
3.3.2. Акустична емисија.....	25
3.3.3. Вибрације.....	26
3.3.4. Температура.....	28
3.3.5. Струја мотора.....	29
3.3.6. Звук.....	30
3.3.7. Мерење похабаности бочне стране.....	31
3.3.8. Мерење храпавости обрађене површине.....	32
3.3.9. Процесуирање слика.....	33
4. Експериментална истраживања.....	35
5. Резултати мерења и анализа резултата.....	41
5.1. Испитивање утицаја хабања на оптерећење главног вретена.....	41
5.2. Развој модела за мониторинг процеса хабања алата.....	43
6. Закључци.....	49
7. Литература.....	51

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Развој савремених обрадних система омогућио је незамислива достигнућа у погледу продуктивности и флексибилности савремених машина за обраду метала. Производња је сведена на минималан број застоја и грешака. Ова достигнућа не би била могућа да се није упоредо развијао и мониторинг различитих параметара, који нам на време указује на неке неправилности или поремећаје у систему, и то у раним фазама настанка тих неправилности. На тај начин може се на време реаговати и спровести одређене интервенције, уз минималне временске губитке.

Мониторинг је редовно посматрање и бележење активности које се одвијају у оквиру неког пројекта или програма. То је процес рутинског прикупљања информација о свим аспектима пројекта. Вршити мониторинг значи надзирати како напредују пројектне активности.

Системи мониторинга процесом обраде метала резањем обезбеђују надзор: процеса резања, резног алата, обрадног система и управљање процесом резања. Мониторинг процеса резања подразумева праћење параметара процеса обраде, контролу стања и управљање процесом [1].

У зони резања постоје неколико променљивих процеса које се могу пратити, као што су силе резања, вибрације, акустична емисија, бука, температура, обрађена површина, итд. Ови параметри утичу на стање алата за резање и уклањање материјала. Променљиве које су потенцијално ефикасне за надгледање процеса обраде могу се мерити помоћу примена одговарајућих физичких сензора. Сигнали које детектују ови сензори су у аналогном и дигиталном облику при чему се они модификују и претварају у вредности које се могу читавати, и дају информације о стању алата и условима процеса. Затим се информација може саопштити људском оператеру или се приказује нумеричким управљачем алатних машина како би се дао предлог да се изврше одговарајуће адаптивне, односно корективне радње [2].

Појава РС рачунара и А/D претварача изазвала је значајне промене и у подручју истраживања технологије обраде резањем. Ове промене се односе пре свега на знатно квалитетније прихватање и обраду сигнала који се добијају на излазу мерних инструмената за силе, температуре, померања и др. Раније су за то коришћени аналогни мерни сигнали, а за регистровање резултата мерења углавном су коришћени писачи или осцилографи. Након тога следила би обрада тих записа, па су у том компликованом и временски дугом поступку настајале значајне грешке које је било могуће само претпоставити, али не и тачно одредити [3].

Данас имамо јако поуздане и тачне системе мониторинга који нам без грешке и временских губитака омогућавају реалан увид у стање система обраде. Рачунари, сензори, камере високих резолуција, уређаји за мерење сила и оптерећења, који су често интегрисани у саму машину, непрекидно нам дају информације на дисплеју, односно екрану управљачке јединице машине.

Код процеса обраде, велико трошење алата за резање може довести до ниског квалитета обраде радног комада у погледу тачности и храпавости површине. У још тежој ситуацији, радни комад може бити шкартиран, а систем машине оштећен. Према статистичким подацима, више од 75% кварова опреме у процесу производње узроковано је великим трошењем алата. Са економског становишта, у раду је приказано да се од 3 до 12% трошкова производње односи на стање резних алата. Стога је од кључне важности потребно развити систем праћења стања алата, како би се ефикасно проценио његов животни век. Прецизан и поуздан систем за праћење стања алата може да створи од 10 до 50% повећање брзине сечења, смањи до 75% застоја и обезбеди 30% уштеде код трошкова одржавања [4].

Истраживање овог система може се поделити на два главна дела: директне методе и индиректне методе. Директне методе захтевају много опреме за мерење услова алата, тако да повећавају трошкове рада. Због високих трошкова и нефлексибилности нису у великој мери распрострањене у индустрији. Са друге стране, индиректне методе представљају методе за надгледање стања алата за резање помоћу сензора повезаних са ефикасном аналитичком обрадом података. Захваљујући флексибилности, данас све више истраживачких и комерцијалних производа користи индиректне методе за праћење стања алата. На пример, комерцијални систем „*Kistler* и *Brankamp*“ у великој мери се користи у лабораторијама за подршку у предвиђању животног века алата и праћењу силе резања. Међутим, овај комерцијални систем није нашироко прихваћен у индустријском сектору, посебно у малим и средњим предузећима, због високе цене и некомпатибилне конфигурације. Због тога је неопходно развити јефтини систем за праћење стања алата, који ће бити у великој мери флексибилан и не захтевати честе људске интервенције [4].

Да би се осигурала тачност система за праћење, потребно је користити одговарајуће сигнале. На пример, вибрација се мења са порастом хабања алата, што је узроковано додиром алата и површине радног комада. Стога би вибрацијски сигнал требао бити меродаван за праћење стања резног алата. Један сигнал сензора није у стању да пружи довољно информација за предвиђање хабања алата. Због тога се приступило истраживању и проучавању мулти – сензорског решења, како би се прикупило довољно информација и елиминисала несигурност [4].

Различити сигнали са сензора могу показивати хабање алата из различитих перспектива. Сви ови подаци су независни и могу се допуњавати, како би се постигла тачнија прогноза. Међутим, изазов за коришћење мулти – сензорског решења је како ефикасно обрадити разне сензорске сигнале и открити корисне информације из скупа података. Систем за праћење у стварном времену реализован је да подржи високо прецизна предвиђања о хабању алата и квалитету производа. Струјни акцелерометар и

пиезоелектрични сензори интегрисани су у развијени систем за праћење стања алата за добијање различитих сигнала, на основу којих се процењује стање [4].

Поред тога, CNC обрадни процеси бирају се као студија случаја узимајући у обзир сложеност процеса обраде и заступљеност по питању коришћења. Овај дизајн система пружа јефтино и флексибилно решење за праћење стања резних алата, које је погодно и за мала и средња предузећа [4].

У оквиру другог поглавља овог рада дате су основне информације о мониторингу процеса обраде резањем са посебним освртом на мониторинг процеса хабања алата. Описани су механизми хабања и облици похабаности резних алата. Описани су системи и методологија мониторинга процеса обраде резањем.

У трећем поглављу мастер рада описане су директне и индиректне методе праћења процеса хабања резних алата. Оптички, пнеуматски и радиоактивни сензори су приказани у оквиру директних метода, а мерење сила и температуре резања, вибрација, акустичне емисије, струје мотора, звука, храпавости обрађене површине у оквиру индиректних метода. Посебно је описана метода снимања и процесирања слика похабаног алата.

Опрема коришћена за истраживања и услови коришћени за развој модела за мониторинг процеса обраде резањем са аспекта хабања алата је дата у четвртом поглављу.

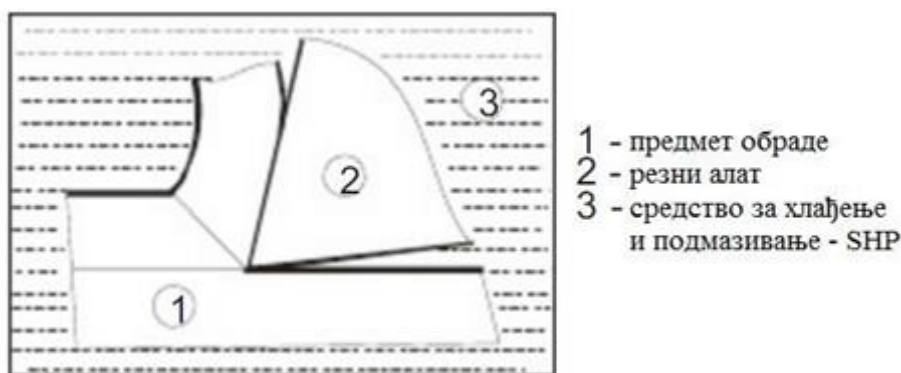
У петом поглављу су приказани резултати истраживања. Приказан је начин коришћења: динамометра за мерење сила резања, квалитета обрађене површине, тачности обраде, видео система за праћење хабања алата и индикатора ангажоване снаге машине.

На крају рада су дати резултати и преглед коришћене литературе.

2. МОНИТОРИНГ ХАБАЊА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ РЕЗАЊЕМ

Основни елементи трибомеханичког система у обради метала резањем су дати на слици 2.1 [1]:

- резни алат,
- предмет обраде,
- средина (најчешће испуњена средством за хлађење).



Слика 2.1 - Трибомеханички систем[1]

На контактним површинама грудне површине резног клина алата и струготине одвијају се триболошки процеси који утичу на квалитет обрађене површине, интензитет и карактер хабања алата, тачност обраде, итд. Контакт грудне површине и струготине утиче на неравномерност напона, промену температуре, као и на квалитет површине контакта. Клизање струготине по грудној површини је последица граничног трења (до кога веома ретко долази), као и потпуног микрозаваривања контактних површина [1].

Експерименталним испитивањем напона на контактним површинама је добијено да је промена нормалних напона на контактним површинама константна, а промена тангенцијалних напона дисконтинуална.

При механичким оптерећењима и у условима високих температура долази до формирања и раскидања заварених спојева између предмета обраде и резног алата, одакле се објашњава природа трења. Коефицијент трења зависи од температуре, брзине резања, итд.

2.1. Механизми хабања алата

Механизми хабања резних елемената алата се могу поделити на [1]:

- механичко хабање: абразивно хабање и микрорезање
- физичко-хемијско хабање: трибохемијско хабање, атхезионо хабање, дифузионо хабање, оксидно хабање и хабање услед замора.

Абразивно хабање је микрорезање површинских слојева резног клина алата. Микрорезање се јавља у условима појаве тврдих честица (укључака, карбида, оксида) у зони резања.

Трибохемијско хабање је резултат хемијског дејства средства за хлађење и подмазивање, утицаја околине, различитих процеса између материјала предмета обраде и алата и сл. Активне компоненте, у течном и гасовитом стању, доводе до формирања превлаке на површинским слојевима резног клина алата. Разарањем превлаке настаје и хабање алата.

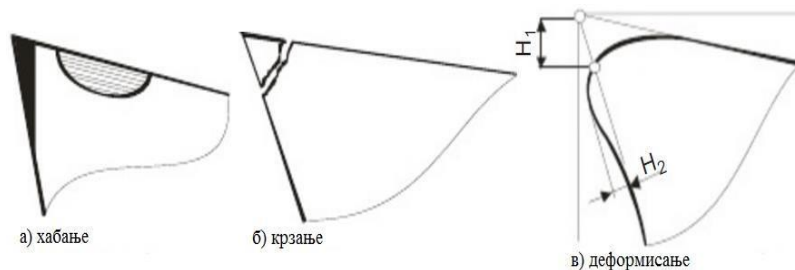
Атхезионо хабање је процес настанка и разарања фрикционих веза - заварених спојева на површинама у контакта алата и струготине. Атхезионо хабање је присутно на свим температурама, а његов интензитет расте са порастом температуре резања, посебно у условима појаве наслага.

Заморно хабање настаје у условима динамичких оптерећења. Манифестује се појавом микропукотина које прерастају у макропукотине и доводе до одвајања ситних делића алатног материјала.

2.2. Облици хабања резног алата

Хабање резних елемената алата представља губитак резне способности алата (слика 2.2) и резултат је [1]:

- пластичног деформисања резног врха алата,
- крзања, одламања или разарања резног клина алата и
- хабања резног клина алата.



Слика 2.2 - Основни облици губитка радне способности алата[1]

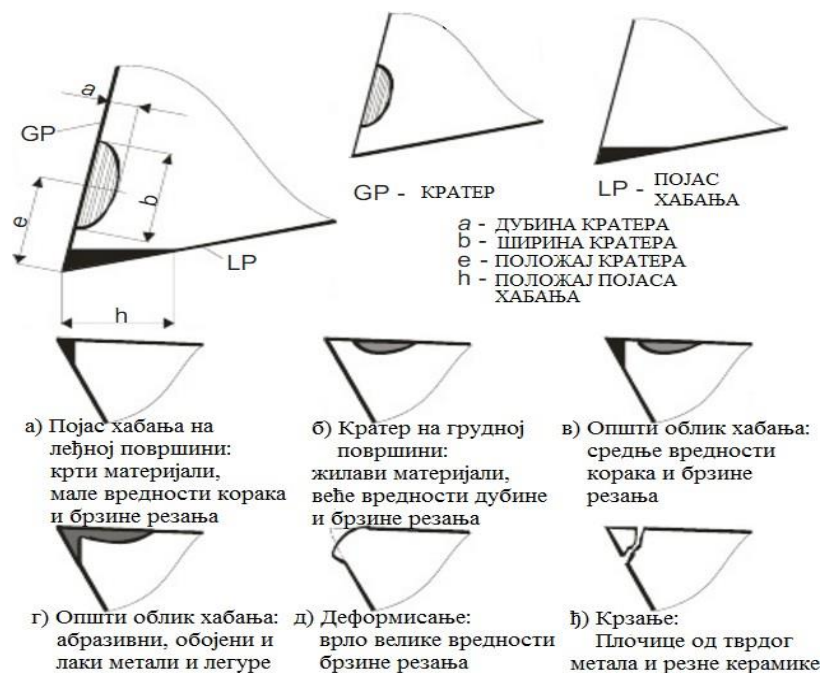
Пластично деформисање резног клина настаје при високим топлотним и механичким оптерећењима и манифестује се изменом облика контактних површина алата.

Крзање, одламање и разарање резног клина је неповољан облик трошења алата, јер доводи до брзог отказа алата. Крзање је одвајање честица димензија до 0,3 mm, одламање је одвајање честица димензија 0,3 - 1 mm и разарање је одвајање честица димензија изнад 1 mm. Јавља се, углавном, код кртих алатних материјала.

Одлазак честица алатног материјала са струготином, обрађеном површином и средством за хлађење и подмазивање доводи до промене облика резног клина алата. Та промена се манифестује преко појаве: кратера на грудној и појаса хабања на леђној површини резног клина алата.

Постоје три основна типа хабања резног алата, слика 2.3 [1]:

- општи облик хабања (хабање леђне и грудне површине резног клина) – углавном је то при обради на већим дубинама резања, обради кртих материјала, примени средства за хлађење и подмазивање,
- хабање по грудној површини резног клина у виду кратера – настаје када је у питању алат од брзорезног челика без примена средства за хлађење и подмазивање,
- хабање леђне површине резног клина алата у виду појаса хабања – настаје при завршним обрадама.



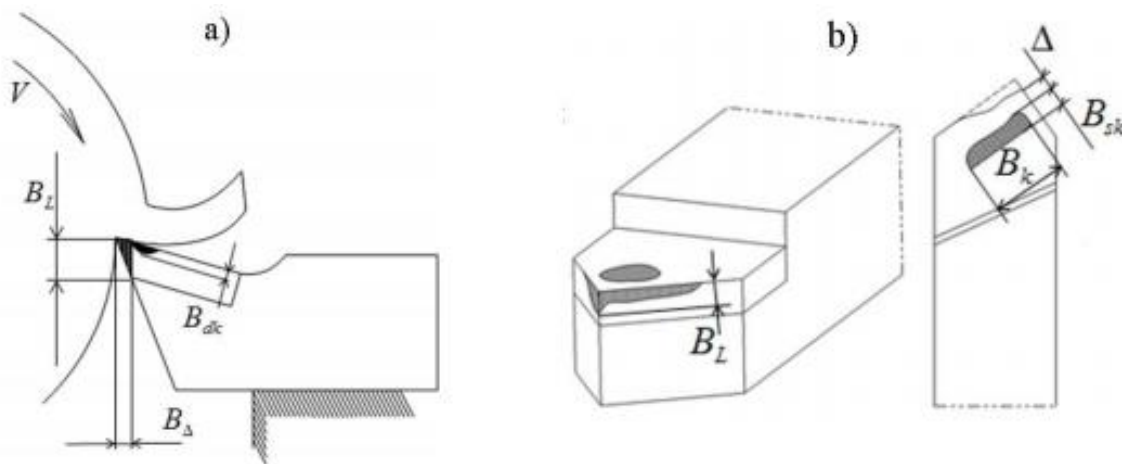
Слика 2.3 - Облици хабања резних елемената алата[1]

Хабање по леђној површини -такође настаје при обради жилавих материјала, али при малим дубинама (0.15 mm) и малим брзинама резања, као и кртих материјала, попут сивог лива, бронзе. Најчешће се уочава код стругарских ножева, одвалних глодала, провлакача, итд [1].

Хабање по грудној површини - настаје при обради жилавих материјала на већим брзинама, изнад 50 m/min, и уклањању већих додатака за обраду, изнад 0.5 mm. Хабање грудне површине, тј. кратера, дефинише дубина, ширина, дужина и растојање кратера од резних ивица. Хабање кратера доводи до слабије резне ивице што може проузроковати и лом алата [1].

2.3 Основи мониторинга процеса обраде резањем

При интеракцији алата и обратка долази до феномена који се манифестују у виду хабања алата што је приказано на слици 2.4.



Слика 2.4 - Места хабања стругарског ножа[16]

Хабање леђне површине алата дефинисано је ширином појаса хабања леђне површине алата B_L , док је хабање грудне површине алата дефинисано ширином кратера хабања B_{sk} , дубином кратера B_{dk} и дужином кратера B_k .

Методe мерења односе се на мерење поменутих величина. Узимајући у обзир наведена места хабања алата, посебан акценат се наглашава на утицај ширине појаса хабања леђне површине и због чега се ово место хабања узима као критеријум затупљености, односно постојаности алата [16]:

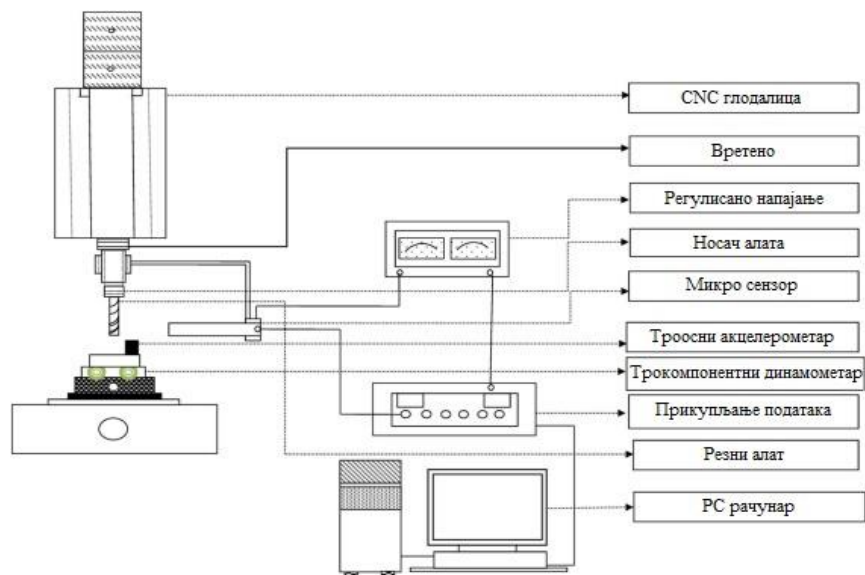
- Пораст сила-отпора резања. Осетљивост сила резања (силе продирања и главне силе резања, респективно) на појаву ширине леђног појаса хабања,
- промена ширине појаса хабања на леђној површини алата формира се у три фазе: иницијалног, равномерног и интензивног (прекомерног),
- Квалитет обрађене површине зависи од ширине појаса хабања на леђној површини алата односно трења између обрађене површине и леђне површине алата,
- Тачност обраде.

Главни циљеви ка којима се тежи у производној индустрији су смањење трошкова и побољшање производње. Производна индустрија користила је рачунарске нумеричке

управљачке машине са аутоматском променом алата и углавном се фокусирала на поступке замене алата. Током 1980-их до 1990-их, резни алат се мењао када дође до његовог хабања. Да би се резни алат заменио у тренутку када дође до хабања, био је потребан мрежни надзор хабања. Захтев за надгледањем у производном процесу укључује надгледање машине и динамике процеса обраде, обратка и алатних машина како би се осигурале оптималне перформансе.

Без мониторинга хабања алата у процесу обраде могу се појавити недостаци попут прекомерне потрошње енергије, нетачности у димензијама, изражене хрпавости површине радног предмета и оштећења резног алата. У већој мери, спроведено је истраживање у вези са развојем техника мониторинга. Бројни фактори омели су напредак у развоју техника мониторинга, укључујући неправилан одабир сензора.

Контрола ерозије обрадног алата је начин постизања најбољег квалитета производа за одржавање животног циклуса алата током процеса. Ако се у процесу догоди ризична ситуација, немогуће је знати шта је разлог ове ситуације и где се она догодила. Поред тога, систем мониторинга (слика 2.5) мора имати способност да упозори на сваку ризичну ситуацију која се може догодити током процеса производње. Да би се то постигло, неопходно је развити алармни систем



Слика 2.5 – Шема система за мониторинг хабања алата[10]

На слици 2.5 приказан је један систем на којем се спроводи мониторинг хабања алата. Ради се о CNC глодалици, при чијем се раду врши праћење различитих параметра који могу указати на почетак хабања алата. Шематски је приказано како се мониторинг спроводи.

Системи мониторинга процесом обраде метала резањем обезбеђују надзор: процеса резања, резног алата, обрадног система и управљање процесом резања. Мониторинг процеса резања подразумева праћење параметара процеса обраде, контролу стања и управљање процесом [1].

Разликују се три система мониторинга [1]:

- систем мониторинга димензија предмета обраде, стања обрадног система, алата или процеса раде са отвореном петљом. Системи приказују резултате мониторинга на екранима или активирају аларм. Процес се прекида до отклањања узрока промене стања.
- системи мониторинга и дијагностике, са отвореном петљом, прате и утврђују функционалну зависност отказа елемената обрадног система и његовог узрока.
- системи мониторинга са адаптивним управљањем процесом обраде раде са затвореном петљом и прилагођавају услове обраде програмској стратегији. Најједноставнији системи аутоматски заустављају машину или помоћно кретање у стању отказа. Сложенији системи су системи са адаптивним управљањем.

2.4. Технике мониторинга

Мерне технике за праћење поступака обраде традиционално су сврстане у два приступа:

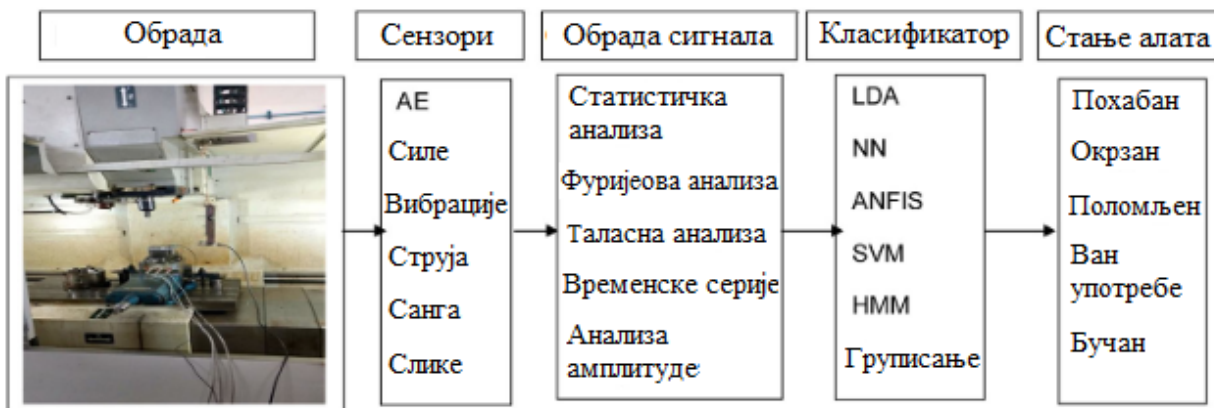
- Директно мерење: где стварна вредност променљиве која се мери даје висок степен тачности. Ова метода је интензивно примењена у истраживачким лабораторијама (због практичних ограничења приступа током машинске обраде, осветљења и употребе течности за резање) како би се подржала истраживања основних мерљивих појава током процеса обраде.
- Индиректно мерење: где се стварна вредност накнадно утврђује помоћу емпиријски одређених корелација. Мање је тачна од директне методе, али је мање сложена и погоднија је за практичну примену [6].

Индиректно мерење које се примењује за надгледање стања алата користи процену мерљивог сигнала који се извлачи кроз кораке обраде сигнала. Користи се за осетљиви и робусни приказ одговарајућег стања. Примери овог мерења су силе резања, вибрације, звучна емисија и струја мотора односно довода.

Тренутне технике контроле (слика 2.6) заснивају се на мерењу након процеса примене на готовим производима, што доводи до опсежног времена провере контроле квалитета и производње неисправних производа с повећањем трошкова производње. Оптимизација система укључује три основна елемента: исправан избор сензора за снимање сигнала у систему мониторинга, тачна обрада и карактеризација сигнала и поуздани модели предвиђања са мањим односно малим предвиђањем грешака [6].

Основни циљеви ових техника праћења стања алата могу се поделити на:

- рано откривање хабања резног алата,
- одржавање тачности обраде пружањем корективних реакција на хабање алата,
- превенција лома резног алата.



Слика 2.6 – Технике праћења стања алата

2.5. Системи за мониторинг процеса резања

Интензивни развој РС рачунара као и разних других изузетно поузданих, тачних и приступачних хардверских додатака, модула и картица, у последњих неколико година, условили су да мерни системи базирани на РС рачунарима преузимају примат над скупом и специјализованом мерном опремом. Уз нижу цену и бржу самоисплативост остварује се већа производност, бољи квалитет обраде, већа тачност обраде, итд. Системи за мерење и обраду података базирани на РС рачунарима данас се употребљавају за аутоматизацију мерних система како у лабораторијским тако и индустријским условима [7].

Основу РС рачунара чини системска (матична) плоча. Системска плоча представља штампано коло на коме се налази процесор, меморија, конектори за јединице функционалне намене и интерфејси за повезивање периферних уређаја. За повезивање периферних улазно-излазних адаптера и картица углавном се користе ISA (*Industry Standard Architecture Bus*) и PCI (*Peripheral Component Interconnect*) магистрале. PCI магистрале су новије генерације и омогућују брзи пренос података обзиром да се пренос података одвија непосредно уз процесорску магистралу [8].

У принципу, спрезање процеса са рачунаром и реализација улазних и излазних задатака захтевају познавање карактеристика како мерне опреме и актуатора, са једне стране, тако и одговарајућих кола за спрегу са рачунаром са друге стране. У почетним фазама пројектовања и развоја система за рад у реалном времену, формирање одговарајућег софтвера (а некад и сегмената хардвера) чинило је саставни део пројектовања. Временом, произвођачи мерне и рачунарске опреме уградили су низ стандардизованих функција у саму опрему, тако да се данас спрезање може остварити директним повезивањем компоненти. Мерна опрема и извршни органи прикључени на процес или постројење могу бити веома разноврсни. Упркос томе, као заједничка карактеристика јавља се чињеница да се помоћу те опреме врши конверзија физичких величина (температуре, протока, притиска итд.) у електричне сигнале или обратно. У принципу мерење било које физичке величине обавља се тако што се уз помоћ одговарајућег инструмента производи електрични сигнал чији је напон или струја

сразмерна физичкој величини која се мери. Исто тако управљање, односно погон извршних органа врши се помоћу електричног сигнала који проузрокује да извршни орган произведе неку жељену акцију [8].

Спрезање мерне опреме и извршних органа са рачунаром захтева да се обави још једна конверзија и то електричних сигнала у дигиталне величине, представљене у форми низа битова или обратно. Очигледно је да, с обзиром на разноврсност опреме не би било економично ни ефикасно ако би се за сваки појединачни мерни уређај или извршни орган развијао посебан систем за спрегу са рачунаром. У решавању овог проблема дошло се до стандардизације процесне опреме у смислу прецизирања типа и врсте електричног сигнала који они генеришу (мерна опрема) или примају (извршни органи). За овако стандардизоване сигнале развијени су одговарајући портови и кола за спрегу са рачунаром. Електрични сигнали који се производе или примају припадају једној од четири категорије: дигиталне величине, импулси и поворке импулса, аналогне величине и телеметријске величине [8].

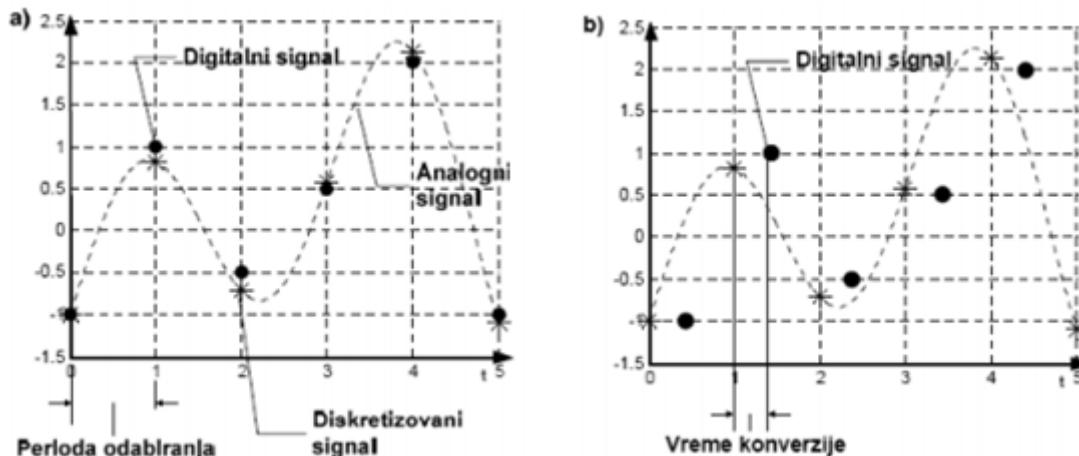
Читав низ мерења одвија се на тај начин што се помоћу мерних инструмената и претварача добија напонски или струјни сигнал, пропорционалан величини која се мери. Заједничка карактеристика сигнала у оба случаја је да су континуални. Потребно је истаћи да се термин "аналогни" за континуалне сигнале користи зато што је реч о континуалним електричним сигнаlima чија је промена аналогна одговарајућих физичких величина.

Даље конвертовање ове величине у дигиталну форму захтева две операције:

- Одабирање, дискретизацију сигнала по времену са неком утврђеном периодом одабирања,
- Квантизацију, дискретизацију сигнала по нивоу, односно одређивање оне дискретне величине, у низу дозвољених дискретних вредности, која је најближа вредности сигнала у тренутку одабирања.

Развој обраде метала резањем (подизање нивоа квалитета израде, поузданости и економичности) прате и захтеви у погледу заштите микроклиме и животне средине. У том циљу су развијени и адекватни системи мониторинга са великим бројем сензора процеса обраде, различитих типова, конструкције и намена.

У идеалном случају овај процес би требало да се одвија на начин приказан на слици 2.7. У практичној реализацији, међутим, ситуација је нешто другачија. Наиме, процес дискретизације и квантизације се одвија помоћу аналого-дигиталног конвертора, коме је потребно извесно време да би извршио процес конверзије. Због тога се дигитална вредност сигнала добија са извесним закашњењем.



Слика 2.7 - Аналогно-дигитална конверзија сигнала:

a) одабирање и квантизација у идеалном случају

b) практична реализација одабирања и квантизације помоћу A/D конвертора[8]

Постоје три основне врсте уређаја (хардверских додатака) за мониторинг, аквизицију података и управљање базираних на РС рачунарима [8]. То су:

- спољашњи системи,
- модулни системи и
- интегрисани системи.

2.5.1. Спољашњи системи

Спољашњи системи подразумевају прикључење посебног уређаја на РС рачунар. Ти уређаји могу се повезати са рачунаром уз [8]:

- Серијски порт. Уређаји се повезују преко јефтиних серијских веза – USB (*Universal Serial Bus*), али чији је пренос врло спор јер користи једну линију за пренос података. Овај услов може знатно ограничити перформансе система. Ради повећања сигурности преноса података прибегава се смањењу брзине узорковања или примени уређаја, тзв. “бафера”, који најпре прикупљају и потом преносе податке у рачунар.
- Паралелни порт. Уређаји повезани преко паралелних линкова постижу велике брзине преноса (неколико стотина kHz) користећи више линија за пренос података или DMA систем (специјализовани хардвер који служи за пренос података без посредства процесора). Недостатак им је што екстерни уређај за аквизицију података не може да буде далеко од рачунара (највише неколико метара).
- *Продужени BUS рачунара*. Уређаји повезани директно на BUS рачунара имају врло велику брзину преноса података, велике могућности проширења и високи конфор у раду. Могу да се конфигуришу за велики број улазно/излазних канала (више стотина) који су уз то мање контаминирани сметњама рачунара.

2.5.2. Модулни системи

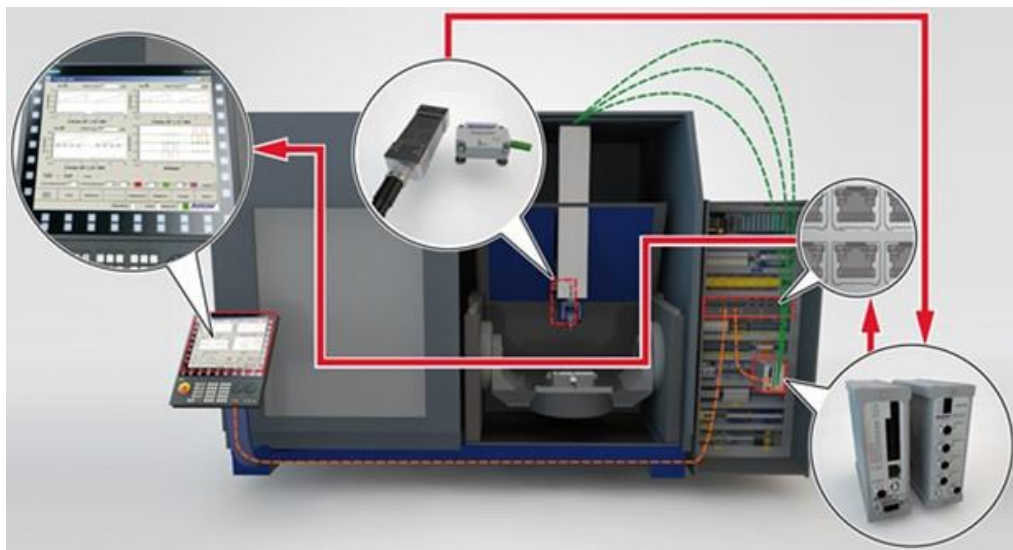
Модулни системи су подсистеми на штампаним плочама који се директно прикључују на BUS-слот PC рачунара (слика 2.8). Обично заузимају једно или два прикључна места (слота у рачунару) и омогућују велику брзину преноса, јер директно комуницирају са системским BUS-ом. Спадају у јефтиније варијанте информационих система за мониторинг, аквизицију података и управљање, мада поседују перформансе комплетног система. Највећи недостаци модулног система су велика контаминација сметњама из рачунара и у неком случајевима фиксна хардверска конфигурација.



Слика 2.8 – Модул за аквизицију сигнала система за мониторинг и управљање[8]

2.5.3. Интегрисани системи

Интегрисани системи (слика 2.9), поред уређаја за мониторинг, аквизицију података и управљање, у истом кућишту садрже и специјално дизајниран PC рачунар. Добре особине ових система су: компактност, квалитет, професионалност, велика отпорност на спољне (електромагнетне, радио и сл.) сметње, могућност проширења итд. Најчешће ови системи долазе до корисника потпуно спремни за примену (пуна хардверска и софтверска опремљеност), тј. треба само прикључити сензоре и систем је спреман за рад. Једини недостатак, мада само на први поглед, је њихова релативно висока цена.



Слика 2.9 - Интегрисани систем за мониторинг и управљање[9]

2.6. Методологија мониторинга

Према литератури, генеричка методологија за развој интелигентног система мониторинга процеса обраде састоји од шест кључних елемената:

Сензори - Процес обраде метала резањем се може окарактерисати различитим физичким величинама. Одговарајући сензори као што су динамометри, АЕ сензори, акцелерометри, сензори струје, снаге итд., трансформишу физичку величину у одговарајуће електричне сигнале. Важно је узети у обзир поузданост сензора, цену, његову врсту и примену како би се изабрао најприкладнији сензорски систем за дату сврху праћења. Учестаност сензора и употреба везана за системе за мониторинг машина је представљена на слици 2.10 [11].



Слика 2.10 - Учестаност употребе сензора у системима мониторинга машине[11]

Обрада сигнала - Обрада сигнала може бити мање или више сложена, састоји се у појачавању и филтрирању сигнала (са аналогним нископропусним, опсежним или високопропусним филтрима). Ограничења фреквенције узорка морају се узети у обзир како би се избегла неусаглашеност. Поред тога, дигитална обрада сигнала кроз дигитални филтер и операције класификације сигнала морају бити у стању да читају део сигнала који је од интереса [11].

Генерисање карактеристика - Сигнал сензора мора бити трансформисан у карактеристике које би могле да опишу сигнал адекватно. Много различитих карактеристика из временског домена, фреквенцијског домена, и таласног домена могу бити од користи у ту сврху [11].

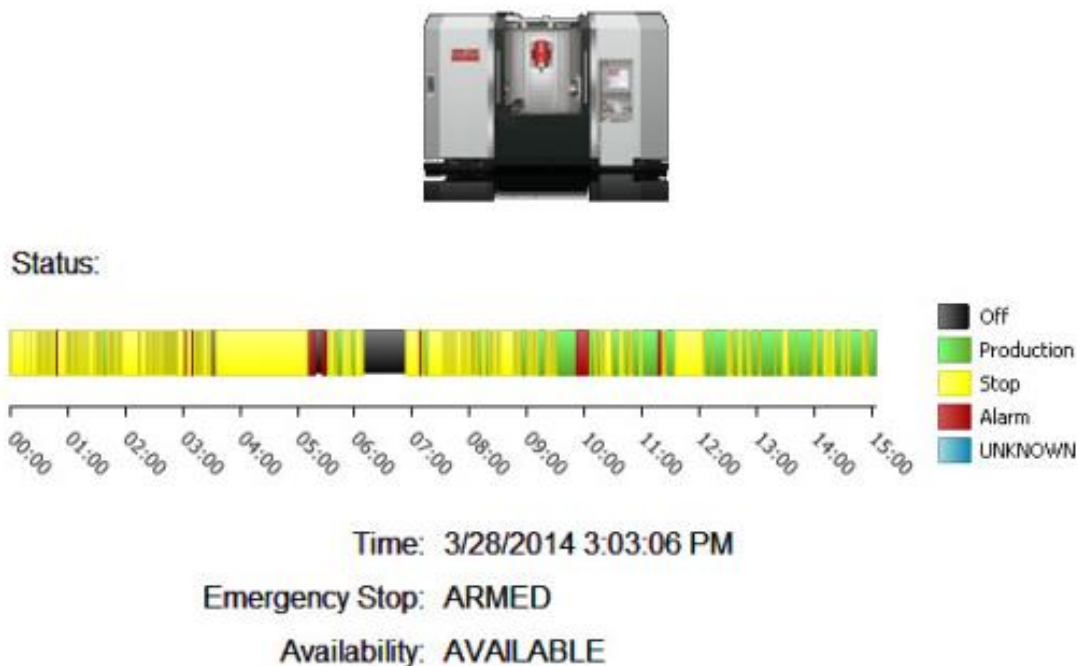
Одабир, издвајање особина - Да би се развио робусни и поуздани модел за надгледање, неопходно је користити најкарактеристичније особине које најбоље описују

поступак машинске обраде. Избор карактеристика и издвајање карактеристика су две методе које омогућавају најкорисније особине сензора које треба дефинисати [11].

Обрада експерименталног модела

- а) Дизајн експеримената: експериментална испитивања у обради за потребе моделирања су економски скупа и временски дуготрајна, тако да ефикасан дизајн експеримената треба да омогући праћење система који се примењују у индустрији.
- б) АИ техника: Системи за мониторинг захтевају поуздане моделе који су у стању да реализују сложене нелинеарне везе између перформанси променљивих процеса и променљивих процеса у обради. Адекватан избор технике АИ је пресудан за развој поузданог модела обраде. Овај избор зависи углавном од броја експерименталних узорака, стохастичке природе процеса, жељене тачности модела и експлицитне или имплицитне природе модела [11].

Интеграцијом оваквог интелигентног система мониторинга добијамо поуздане резултате при раду обрадног система. Извештај мониторинга пружа евиденцију сваке промене на екрану контролера. То укључује покретање, заустављање машине, стања аларма и промене режима између аутоматског, MDI, ручног, итд.



Слика 2.11 – Извештај са мониторинга процеса обраде[12]

У извештају са слике 2.11 записана је свака информација о некој промени која се догодила у неко одређено време. На овај начин имамо јасну слику да ли је обрадни систем ефикасан или не, па самим тим можемо преузети одређене активности да побољшамо систем.

3. ДИРЕКТНЕ И ИНДИРЕКТНЕ МЕТОДЕ ПРАЋЕЊА ПРОЦЕСА ХАБАЊА

3.1. Праћење процеса хабања алата

За праћење параметара хабања алата се користе пасивни и активни мерни системи. Код пасивних мерних система процес резања се прекида у жељеном тренутку и мери вредност параметара хабања. Активни мерни системи, нарочито индустријски сензори, генеришу сигнал вредности параметара хабања и димензија предмета обраде и квалитета обрађене површине у току одвијања процеса. Значај ових сензора је врло велики. Њихово увођење у производне технологије омогућава: могућност управљања процесима хабања алата, оптимизацију обрадних процеса, одржавање прописаног нивоа квалитета обрађене површине и тачности и аутоматизацију обрадних процеса. Увођењем сензора хабања у конвенционалне обрадне системе обезбеђује се благовремена замена алата, искључују високи трошкови прераних или касних замена алата, спречава смањење нивоа квалитета израде и лом алата [1].

Параметри хабања резног клина алата се мере непосредно у току одвијања процеса обраде применом директних процесних сензора (оптичких, електричних, радиоактивних, сензора померања и сл.). Сензори за индиректно мерење хабања су једноставније конструкције и обезбеђују непрекидно праћење процеса хабања алата. За њихову примену је потребно познавање корелационе зависности индиректних параметара процеса и параметара хабања алата. Основни недостатак индиректних сензора (храпавости обрађене површине, температуре резања, акустичне емисије, вибрација, отпора резања, сила и момената на главном вретену, снаге и струје погонског мотора и др.) је што корелациона зависност садржи и нежељене утицаје других фактора, што смањује тачност измерених вредности параметара хабања [1].

Хабање бока (као што је приказано на слици 3.1) настаје услед контакта између бочне површине алата и радног комада. Хабање бока одређено је максималном ширином хабања бока (VB_{max}) или средњом ширином хабања бока (VB_{sr}). Радни век резног алата у главном зависи од VB_{sr} . Резни алати пролазе кроз три фазе хабања [5]:

- почетно хабање (током првих неколико минута),
- устаљено хабање (квалитет алата за резање полако се погоршава) и
- катастрофално хабање (нагло, односно критично хабање).



Слика 3.1 - Хабање леђне површине алата у виду појаса хабања и зареза[5]

Упоредо са развојем обрадних система за обраду метала, развиле су се и напредне методе мониторинга процеса хабања алата. Као што је већ наведено, методе мониторинга се деле на директне и индиректне методе.

Директне методе - праћења хабања резних елемената алата су методе које обезбеђују мерење параметара хабања резних елемената алата. То су: масене, микроскопске, методе отисака, радиоактивне методе, оптичке, електричне, пнеуматске и неке друге методе [1].

Индиректне методе - су методе праћења промене: параметара храпавости обрађене површине, димензија предмета обраде, отпора резања, температуре резања и сл., у току времена. То су методе праћења промена на предмету обраде и у процесу резања. Сви наведени системи индиректног мерења до сада реализовани засновани су на принципу да хабање алата изазива повећање отпора резања [1].

3.2. Директне методе

3.2.1. Оптичке методе

Постоје следеће оптичке методе за испитивање хабања алата:

- ласерско мерење површине,
- фотодиоде за мерење рефлектоване светлости са ивица алата и
- оптичка фотоћелија за мерење утицаја истрошених и неисправних делова алата.

Систем за праћење стања алата заснован на видео запису користећи снимање рефлектованог ласерског зрака у грубом до приближном уском таласном опсегу [11]. Систем се састоји од ласерског извора фокусираног на обрађену површину предмета, тако да се његов рефлектовани зрак снима кроз дигитални фотоапарат. Снимљена слика се анализираа квалитет површине је карактерисан средњим и стандардним одступањем распршења и интензитета оптичких параметара. Закључено је да постоји директна корелација анализираних параметара са храпавошћу површине. Мерена храпавост

површине је била уско повезана са стањем похабаности резних површина. При овим испитивањима је такође закључено да је веома тешко одредити хабање алата посматрањем и мерењем храпавости површине.

Друга оптичка метода је заснована такође на примени ласера, при чему је ласерски сноп усмерен на резни алат. Представљени систем (слика 3.2) карактерише његова флексибилност мерења, велика просторна резолуција и добра тачност. Систем се састоји од извора светлости за осветљење алата, CCD камере, ласерске диоде (користи се у вези са проценом дубине оштећења) са линеарним пројектором, уређајем за снимање слике и рачунара [11].

Техника се посебно одликује својим одређивањем дубине оштећења уз помоћ пројектоване ласерске линије на површину алата. То је предност у поређењу са другим техникама, које могу измерити само 2D профиле.

ХАЛОГЕНА СВЕТОСТ

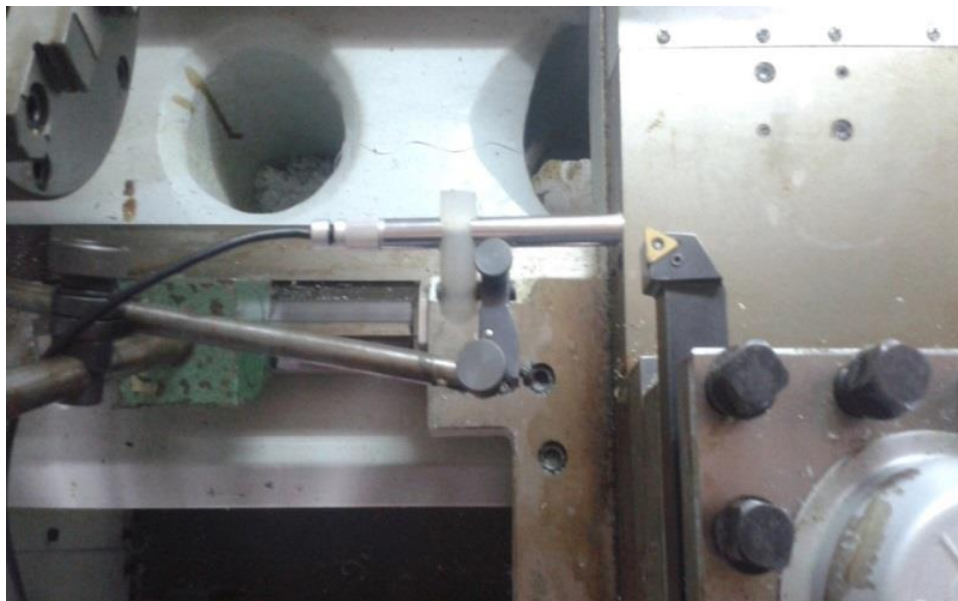


Слика 3.2 - Мерни сет постављен на алатној машини[11]

У оквиру развоја оптичких методе мониторинга спроведено је експериментално истраживање на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу, при реализацији мастер рада [7], при чему је коришћена микроскопска камера за снимање резног алата и одређивања његове похабаности хабања.

Експерименти су реализовани на различитим алатима са резним плочицама. Сачињени су различити CNC програми којима је симулирана обрада, а након кретања по сложеној путањи алати су довођени непосредно испред камере, увек на исто место ради снимања грудне или леђне површине резне плочице. CNC програмима је омогућено да се исти алат постави испред камере са леђном површином или са помоћном леђном површином [7].

На следећој слици приказан је положај микроскоп камере на CNC стругу, у односу на резни алат:



Слика 3.3 - Положај камере у односу на резни алат са троугаоном плочицом[7]

За снимање похабаности резних плочица коришћено је укупно осам резних плочица, од којих су шест плочица троугаоне плочице са шест резних ивица, при чему је снимање вршено само у карактеристичним похабаним деловима врха плочице. У овом раду су приказане две од осам снимљених плочица.

Резне плочице 1 и 2 су TNGA 160412-KR Sandvik Coromant са превлаком од TiN. Носач плочице је PTG NR 2525 M16. Резна плочица 1 је приказана на слици 3.4. Мерене су три резне ивице и фотографије похабаних делова су дате на слици 3.5 [7].



Слика 3.4 - Резна плочица 1[7]



Слика 3.5 - Похабане површине резне плочице 1[7]

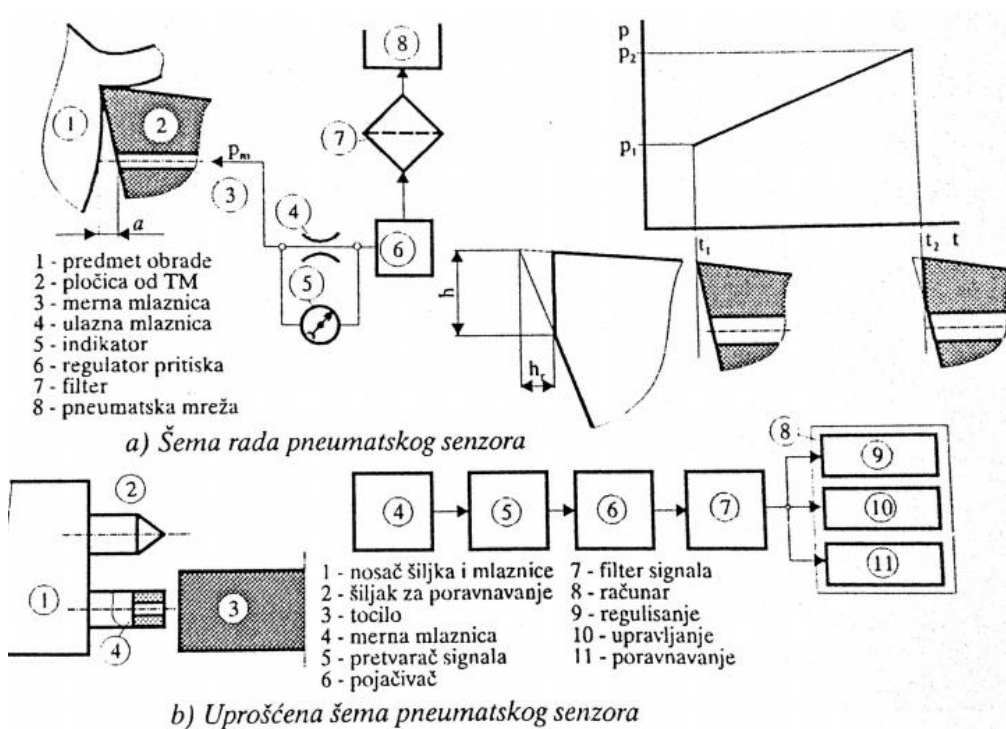
Резна плочица 2 и снимљени похабани резни врх су дати на слици 3.6.



Слика 3.6 - Резна плочица 2 и похабана површина[7]

3.2.2. Пнеуматски сензори

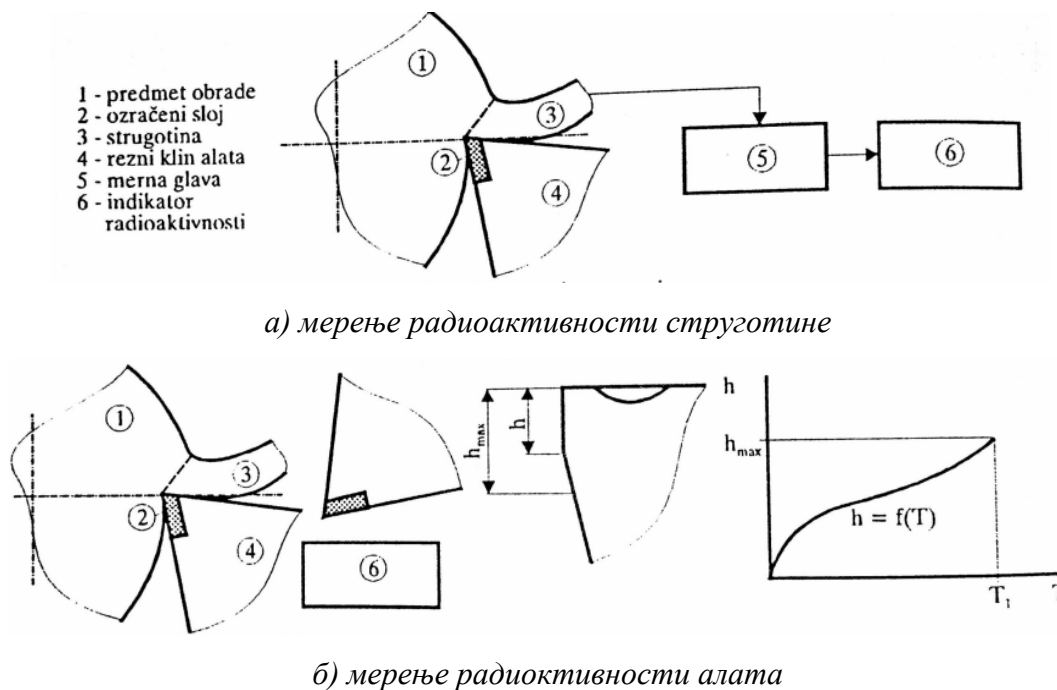
Пнеуматски сензор хабања алата је приказан на слици 3.7. Мерни млазник 4 и шиљак 2 за проверавање тоцила 3 налазе се на истом носачу 1. Растојање мерног млазника и тоцила, односно промена параметара хабања тоцила стоје у одређеној корелационој вези са променом притиска Δp . На слици 3.7 под б) приказана је структурна шема система, у којима се обавља конверзија мерног сигнала у електрични облик при чему је 4 - мерни млазник, 5 - претварач пнеуматског притиска и електрични сигнал, 6 - појачавач и 7 - филтер ниских фреквенција. Регулисање сигнала - 9 се обавља у електронском рачунару – 8, као и управљање – 10 и поравнање тоцила – 11. Овај сензор је намењен за мерење хабања тоцила у процесу брушења [13].



Слика 3.7 - Пнеуматски сензор хабања[13]

3.2.3. Радиоактивни сензори

Радиоактивни сензори се базирају на промени радиоактивности алата услед хабања. Мерна инструментација се састоји од детектора зрачења – сонде, бројачког комплета, штампача и писача (слика 3.8). У процесу обраде се мери радиоактивност алата пре обраде, за време и након обраде резањем. На основу познате зависности промене радиоактивности алата и параметара хабања, мерењем радиоактивности алата у процесу резања обезбеђено је и праћење промене параметара хабања [1].

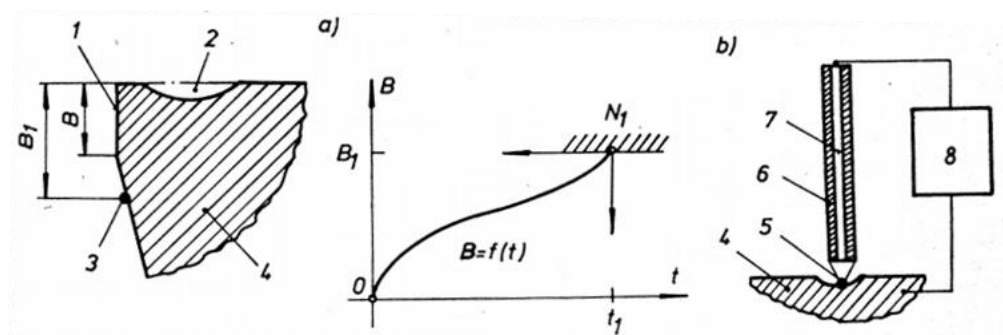


Слика 3.8 - Радиоактивни сензор хабања[1]

Озрачавањем делова грудне и леђне површине на резном клину 4, постиже се одређени степен радиоактивности ових површина. Постоји корелација између пада радиоактивности и прираштаја вредности параметара хабања у озраченим зонама. Струготина 3, која садржи озрачене честице са грудне зоне хабања, одводи се транспортним током, пролазећи кроз мерну главу 5 где се континуално мере и показују на индикатору 6 вредности пада радиоактивности, односно вредности параметара хабања на грудној површини резног клина. Озбиљна мана ових сензора је у одређеној опасности за радно место и околину у погону од могућих радиоактивних зрачења.

Друга конструкција радиоактивних сензора хабања алата јеприкажана на слици 3.9 и темељи се на микроизотопном методу. Овај метод карактерише се претходним депоновањем радиоактивног материјала, врло мале масе и радиоактивности, на оном месту који одговара допуштеној вредности параметара хабања B_1 . Престанак радиоактивних сигнала, који се непрекидно прате у процесу обраде помоћу Гајгеровог бројача, знак је достизања посебног детектора хабања $B = B_1$, или оштећења алата, или појава неисправности у мерном систему. Може се без тешкоћа утврдити који од ова три случаја је наступио, а затим наставити наредне операције. Депоновање се врши

електроварничењем. Извор генерише два струјна импулса при чему наноси превлаку од озрачене волфрамске шипке на алат [13].



Слика 3.9 - Шема хабања алата и радиоактивног сензора хабања са микроизотопном тачком[13]

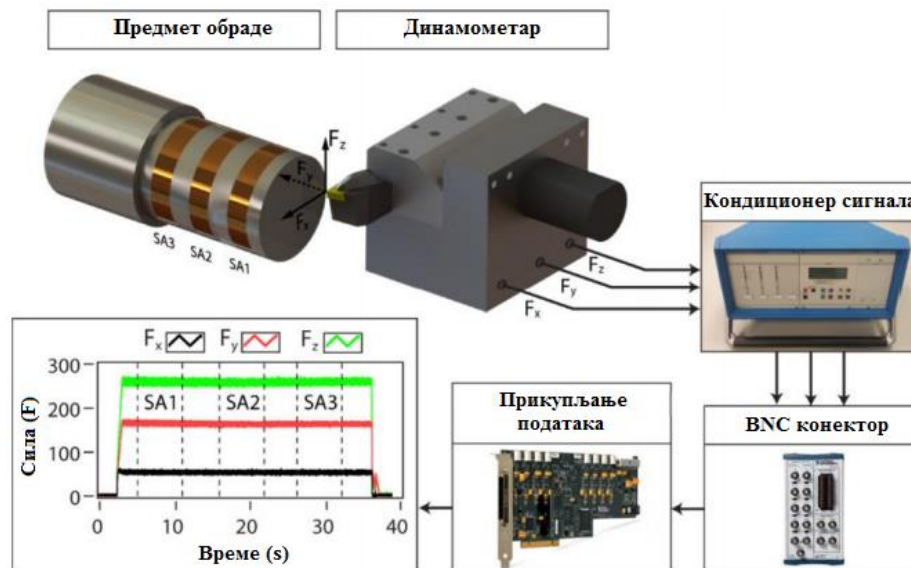
3.3. Индиректне методе

3.3.1. Мерење сила резања

На почетку обраде алат за сечење је оштар. Са ефектом високог притиска и температуре долази до губитка материјала, а услови контакта између алата и обратка се мењају у прогресивним пролазима обраде. Оштрина резног алата се смањује, а поступак сечења непрекидно постаје све тежи. Неизбежно је да постоји потреба за већом силом резања за уклањање струготине са површине материјала под истим условима сечења. Ова ситуација се односи на однос између хабања алата и силе резања у теорији. Поред тога, са повећаном додирном површином између алата и обратка као резултат хабања алата, исти притисак ствара већу силу резања. Истраживачи су намеравали да користе директан пропорционални однос између ових двопроектних променљивих мерења силе резања изведених кроз неколико метода у прошлости. Пример за мерење хабања на основу силе резања приказан је на слици 3.10 при обради на CNC стругу [14].

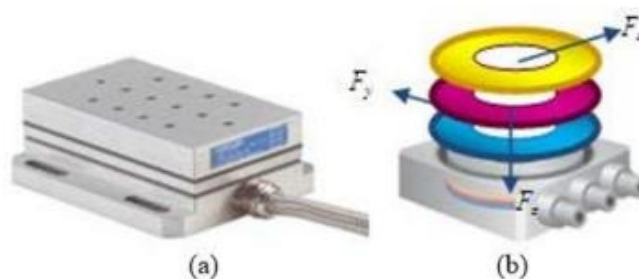
Погодно је измерити три компоненте сила резања током стругања, јер свака од њих може бити повезана са различитим врстама хабања алата. Различите врсте и механизми хабања могу се ширити на бочној или чеоној страни зависно од фактора оптерећења. Поред тога, силе резања су се углавном мериле у три димензије, и то тангенцијалној, аксијалној и радијалној оси. За јасну дефиницију између компонената хабања алата и сила резања јесте неопходно истражити сваку врсту хабања алата посебно.

Предности и недостаци: Динамометар је повољан сензор за ову врсту испитивања због своје осетљивости и високе поузданости при мерењу сила резања. Динамометар базиран на мерењима сила резања веома је популаран и правилан за поуздане примене. Сензор се налази испод зоне резања метала, па се могу открити чак и мале промене оптерећења [14].



Слика 3.10 - Пример за систем индиректног праћења стања алата заснованог на сили резања[14]

Иако је имао озбиљне инвестиционе трошкове, динамометар (слика 3.11) је био најпожељнији сензор у последњих 20 година при индиректним методама мониторинга. Динамометар је први избор за истраживања у условима коришћења система заснованих на сензорима при стругању што показује поузданост овог сензора у развоју индустрије [15].



Слика 3.11 – Динамометар компаније Kistler[15]

Степен променљивости, који се читава у силама резања током процеса резања метала захтева да се познају неке процене статичких и динамичких сила резања. Статичке силе резања су неопходне да би се омогућило да се брзина резања површине на материјалу за обраду задржи унутар доступне снаге алатне машине [15].

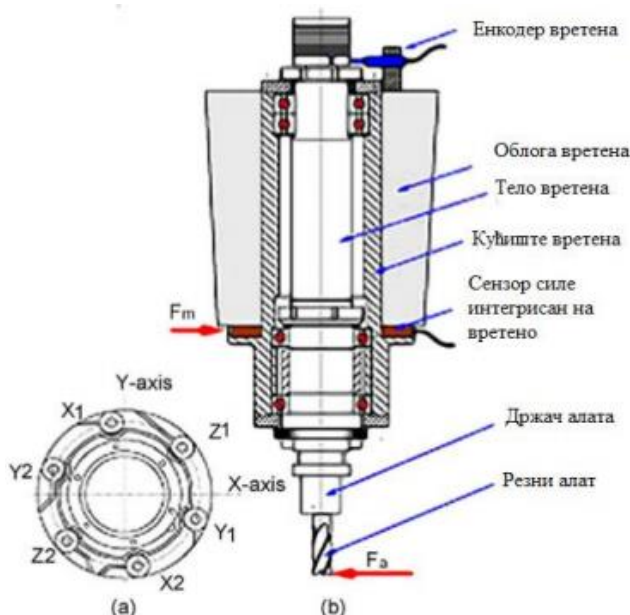
Последице преоптерећења алатне машине могу довести до случајева прекомерног опадања снаге због чега машина заостаје или неприхватљивих недостатака радног комада и алатне машине.

Мерење статичких сила резања или флукуација његових компоненти пружиле би драгоцене информације о статичком понашању процеса резања. Природа процеса резања је таква да се не може обављати без одступања и нестабилности. Спојеви и спојнице

алатне машине и ситне промене услова резања доводе до промене компонената статичке силе. Тешко је предвидети услове под којима се јавља или одабрати услове резања који су неопходни да се исправи овај феномен. Стога, да би се добила индикација о системским флукуацијама, потребно је знати динамичке силе и директно их израчунати [15].

Сензори силе и обртног момента обично користе сензорске елементе који претварају примењену силу или торзионо оптерећење у деформацију еластичног елемента. Два главна типа сензора су пиезоелектрични и деформациони сензори.

Директно мерење силе помоћу пиезоелектричних сензора могуће је када је претварач силе постављен у складу са путањом силе. У случајевима када је потребна већа изложеност мерењу, развијен је вишекомпонентни мерач силе који се широко користи у лабораторијским апликацијама. Доступни су и ротациони динамометри за резање који садрже елементе за откривање силе који могу да мере 3 компоненте силе и обртног момента. Подаци се преко телеметрије преносе са ротирајућег дела сензора на статор. Ротациони динамометри за резање могу да раде брзином до 20.000 o/min. Развијања попут интеграције сензора силе у конструкцију машине десила су се у последњих 10 година са концептима за бушење и глодање. Слика 3.12 приказује сензор силе интегрисан у вретено мотора [15].

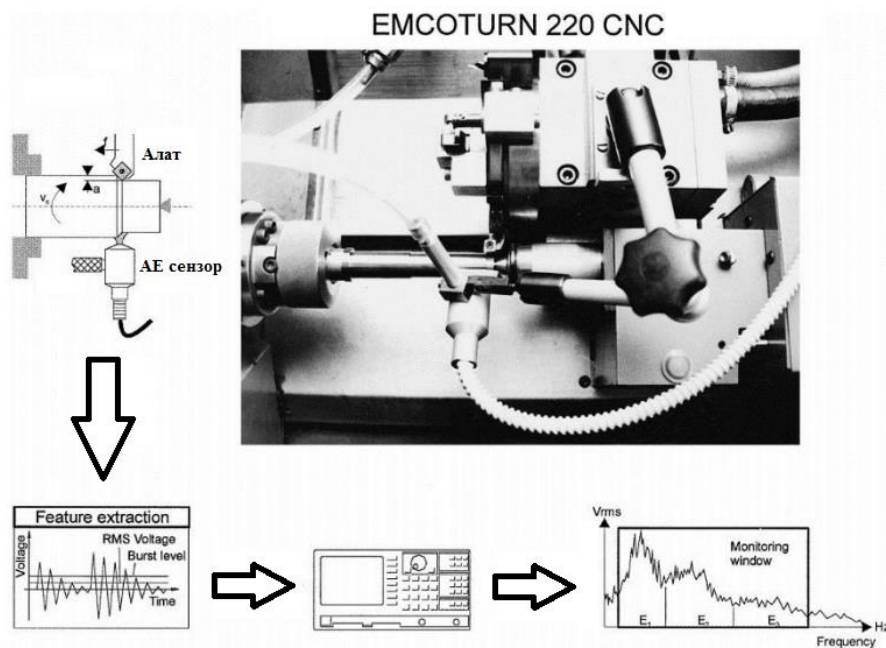


Слика 3.12 - Сензор силе интегрисан у вретено мотора[15]

Сензори површинског акустичког таласа (SAW) имају значајан потенцијал као сензори пасивног напрезања где бежично испитивање елиминише потребу да сензор има снагу. Својства феромагнетских материјала су испитана за употребу у технологији сензора силе. Нова ера динамометрије силе резања помоћу пиезоелектричних претварача омогућила је прецизно мерење резних сила [15].

3.3.2. Акустична емисија

Акустика је наука о звуку која укључује вибрације и буку, и која истражује ширење њихових таласа у чврстим, течним или гасним медијумима. Међутим, акустична емисија наводи зрачење таласа напрезања материјала подвргнутог спољном оптерећењу. Ова изложеност доводи до деформације материјала у различитим нивоима као што су разградња, ломљење или хабање. Другим речима, акустична емисија се може дефинисати као ослобађање енергије које се одвија у материјалу у микро скали, одвојено од других врста енергија, на пример вибрација, сила и звука. У машинској обради, а посебно током стругања, континуирани контакт између резног алата и обратка производи различите облике струготине који узрокују различите врсте хабања резног алата као резултат пластичне деформације. Интеракција између резног алата, обратка и струготине појављује се као главни извор акустичне емисије који се завршава са трењем, пуцањем алата, деформацијом у контактним зонама, сударом струготине, ломљењем струготине и заплетањем струготине. Међутим ефектима су лом алата и струготине и неки од типова хабања алата. Наиме, приликом лепљења материјала обратка по резним ивицама алата, генеришу се акустичне емисије велике амплитуде и сигнали, познатији као „АЕ бурст сигнали“. Са друге стране, континуирани сигнали акустичне емисије који имају малу амплитуду генеришу се скидањем струготине, хабањем алата и заплетањем струготине. Карактеризација сигнала АЕ пружа информације о врсти обраде и пратећим догађајима у процесу резања. Неколико карактеристика сигнала АЕ су се примењивале у прошлости да би се разликовао истрошен и некоришћен алат. Због тога су апликације АЕ постале најпопуларнији технолошки приступ у праћењу процеса обраде метала међу сензорским системима. На слици 3.13 приказан је мониторинг хабања алата заснован на АЕ [14].



Слика 3.13 - Пример система праћења стања алата заснован на акустичној емисији[14]

Предности и недостаци: Карактеризација АЕ сигнала пружа информације о механизму обраде и догађајима који уследе у зони резања. Мање и веће промене током поступка резања могу бити прецизно препознате преко АЕ сензора када је постављен на прави начин. Ово доноси очигледну предност у разликовању режима резања, јер погодни режими утичу повољно на обрадак и дуготрајност процеса резања, а неповољни угрожавају сам процес резања. Према употреби, скала осетљивости АЕ сензора треба да буде дефинисана. У много случајева, неки губици података доводе до касног откривања или пропуштања информација услед чега долази до оштећења алата и обратка. Посебно за новоразвијене материјале у индустрији, непознати механизми пластичних деформација и непознато понашање материјала, наводи истраживаче да користе сензоре АЕ [14].

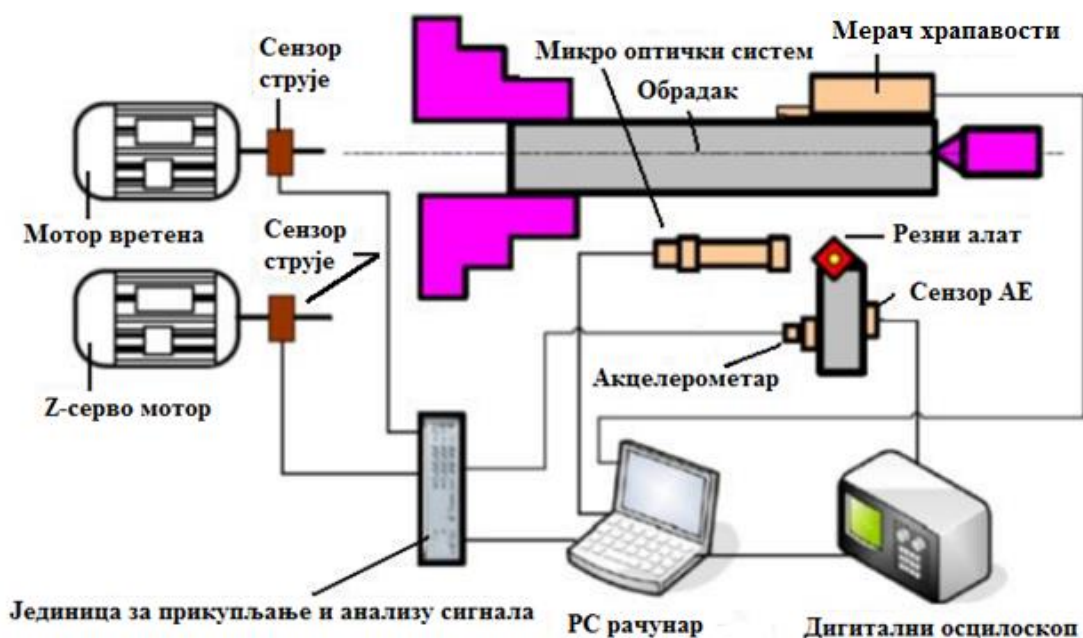
3.3.3. Вибрације

Да би се постигли жељени резултати из процеса обраде, и да би се променљиве процеса задржале под контролом и да би се избегли нежељени резултати, неопходни услови морају бити обезбеђени за остварење процеса на стабилан начин. С тим у вези, вибрације настају због недовољне крутости машине, грешака у радном предмету и грешака у току процеса обраде. Вибрација је непожељно стање које негативно утиче на процес обраде. Поред тога, у систему се континуирано јављају вибрације као и силе резања које се јављају током обраде. Зависе од многих фактора као што су удаљеност између резних ивица, угао положаја, геометрија обратка, угиб вретена, дубина резања, ширина струготине, брзина помоћног кретања, брзина резања и посебно похабаности алата. Узимајући у обзир преглед литературе, примећено је да се за праћење похабаности алата користе многе разноврсне технике. Ове методе могу бити, директне и индиректне. Прва техника је да измерите похабаност директно на алату завршетком поступка резања. И друга техника је да се различити параметри повезани са хабањем алата мере одговарајућим испитним инструментима. Ова мерења се вреднују помоћу различитих метода анализе и процене, и може се израчунати интензитет хабања у различитим временским интервалима. Методе процене заснивају се на модерним и актуелним приступима као што су нејасна логика, вештачке неуронске мреже, генетски алгоритми, као и статистичке методе. Иако су неколико студија о процесу моделирања уз помоћ вештачке интелигенције спроводили различити истраживачи, још увек није развијена практична метода за праћење похабаности алата у индустрији. Разна истраживања још увек врше праћење стања алата, контролу процеса обраде и обезбеђивање њихове оптимизације и предвиђања. На слици 3.14 приказан је систем мониторинга заснован на вибрацијама, уз мерења струје и храпавости површине [14].

У обради, вибрација се сматра једном од променљивих која најбоље одражава процес мониторинга похабаности алата. Стога се поступци праћења вибрација широко користе за дијагнозу и предвиђање тачности дела, храпавости површине, а посебно стања алата. Вибрације које се јављају током обраде су класификоване у две класе: као вибрације зависне од процеса резања и вибрација независне од процеса резања. Тип вибрација које се јављају као резултат похабаности алата током обраде су вибрације које

зависе од процеса резања. Стога надгледање похабаности алата захтева снимање и надгледање вибрација које зависе од процеса резања. Похабаност алата се повећава током резања и то доводи до повећања амплитуде вибрација [14].

Предности и недостаци: Једна од препознатљивих предности овог сензора је да пружа информације о једном од главних проблема у обради. Вибрације које се јављају током обраде, при промени унапред одређеног контакта резног алата и обрадка, оштећују структуру алата и имају негативан утицај на обрадак. Дакле, интеграција акцелерометра помаже у одржавању добре обраде и стабилизовању стања током непрекидних вибрација и нестабилности. Индустијски применљиви акцелерометри могу се лако монтирати на различите тачке машине при мерењу крутости. Посебно за завршно стругање и операције унутрашњег стругања, вибрације постају врло изазовно питање. Ове методе имају проценат заступљености од 19,6% међу свим индиректним методама праћења. С обзиром на велики допринос у производном ланцу, инвестициони трошак овог сензора може се занемарити у условима индустрије 4.0 [14].



Слика 3.14 - Пример индиректног мониторинга стања алата на основу вибрација, струје и храпавости површине[14]

Елемент пиезоелектричног сензора делује као опруга која има крутост C и повезује базу акцелерометра са вибрирајућим масама.

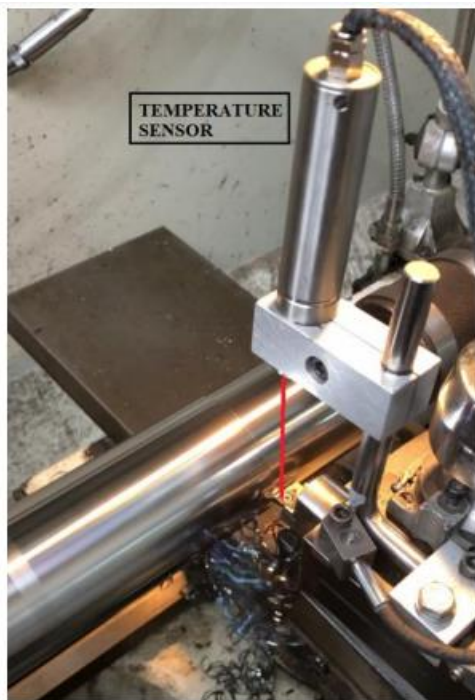
Фреквенцијски одзив сензора одређује се резонантном фреквенцијом сензора, која се уопштено може моделирати као једноставан систем с једним степеном слободе. Користећи овај систем, резонантна фреквенција (ω) сензора може се израчунати према формули:

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

3.3.4. Температура

У свим процесима обраде метала резањем, главни циљ је превазилажење смицајне чврстоће материјала радног предмета са резним алатима. Овај процес генерише велику количину топлоте у обратку. Пластична деформација обратка је олакшана овим порастом температуре, јер високе температуре смањују чврстоћу обратка, а ово смањење узрокује повећање способности пластичне деформације радног предмета. Поступак обраде метала резањем се јавља и као резултат пластичне деформације [14].

У процесима обраде већина енергије која се преноси на алатну машину претвара се у топлотну енергију. Добијене температуре се преносе између алата, обратка и струготине. Док су резни алат и обрадак у контакту, струготина се уклања са обратка уз присуство притиска и температуре. Док се присуство температуре повећава, као испособност пластичне деформације обратка, мониторинг хабања алата постаје све тежи. Слика 3.15 показује систем мониторинга процеса хабања резног алата заснован на температури као пример [14].



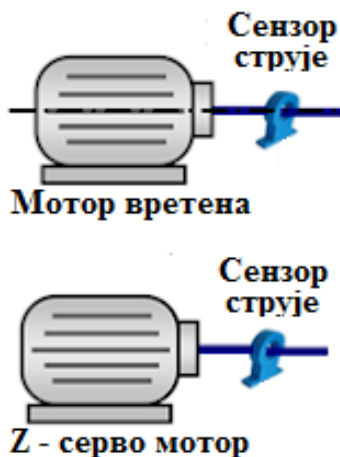
Слика 3.15 - Пример за индиректни систем мониторинга хабања алата заснован на температури[14]

Предности и недостаци: Мерење температуре може се постићи помоћу јефтиних сензора; то је једна од главних предности. Пошто се највећи део топлоте у току обраде одводи преко уклоњене струготине, а главни циљ је мерење температура на резном алату, прикупљање сигнала са подручја резања постаје готово немогуће док се обрада не заустави. Могуће је измерити температуру струготине, а затим добити приближну вредност температура резног алата и обратка користећи једначине прелаза. То може довести до грешке при добијању тачне вредности, што постаје недостатак када се обрада

одвија при високом опсегу температура. Сигнали сензора температуре алата прилично су ефикасни у откривању хабања алата и то у процентуалној вредности од 74%. С друге стране, научни радови који се баве испитивањем у оквиру ове студије говоре да постоји тенденција за све већим коришћењем мерења температуре у процесима мониторинга похабаности алата, а тренутно су ови системи мониторинга процентуално заступљени у индустрији са око 18% [14].

3.3.5. Струја мотора

Мониторинг процеса обраде стругањем на лицу места је тежак задатак због стохастичке природе самог хабања. То доводи до великих изазова у погледу постизања оптималних услова. Зависно од хабања резног алата мењају се унапред одређени услови резања и значајо утичу на саму обраду променљивих. Снага мотора и струја мотора су главни извори за обраду метала резањем и повезани су са променама на подручју резања, при чему могу лако детектовати хабање алата. У теорији се очекује да са порастом сила резања расте и интензитет хабања а ово директно утиче на снагу и струју мотора главног кретања. Међутим, искоришћење сензора струје у системима мониторинга је врло мало у поређењу са раније поменутиим сензорим: акустични, сензори вибрација и температуре.



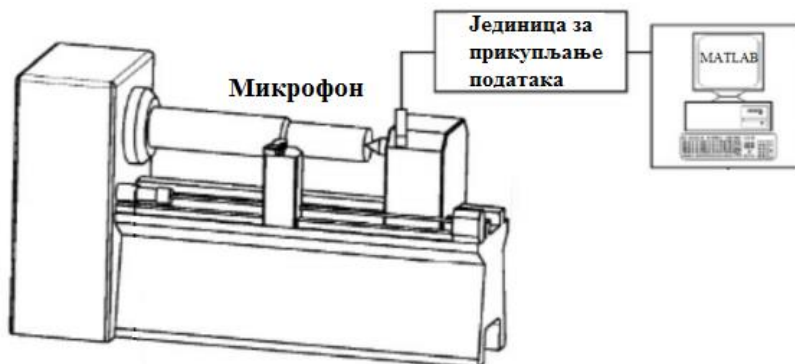
Слик 3.16 – Пример постављања сензора струје мотора[14]

Предности и недостаци: главни захтев за сензор је да буде близу зоне резања због повећане осетљивости. Главни недостатак мерења преко сензора струје је што се његова веза остварује преко струјног кабла. За разлику од осталих индиректних сензора система мониторинга, сензор струје се налази на даљини, што доводи до губитка прецизности. Услед поменутих недостатака овог сензора, у прошлости је био префериран ретко (8,1%) за откривање хабања резног алата. Поред тога, сензори струје су једни од првих који су се користили за мониторинг хабања алата још 1980-их. То овај сензор чини најранијом индиректном методом мониторинга, па је коришћен од стране многих истраживача. На крају се закључује да сензори мерења струје могу помоћи и подржати тачније сензорске

сигнале, као што су сензори силе или акустични сензори, како би се на време открила критична ситуација која може довести до лома алата [14].

3.3.6. Звук

У основи настали звук у свим врстама обраде метала резањем приликом обраде тврдих материјала великим брзинама може да се сними и анализира. Код глодања се одвија периодични улазак и излазак резних клинова у материјал јер су алати вишесечни, па се самим тим генерише испрекидан звук. Међутим, при стругању настаје непрекидни контакт између алата, обратка и струготине различитог облика, у зависности од услова резања и својстава материјала. Осим тога, нови алат за резање је ефикаснији за обраду метала у поређењу са истрошеним алатом. Ово отежава резање, јер долази до гњечења материјала обратка уместо резања, услед промењене геометрије алата. Оштећени алат утиче на промену звука. Мерење звука је у основи остварено уграђеним микрофоном (слика 3.17). Међутим, звучни сигнали имају неке недостатке. Раздвајање фреквенцијског опсега звукова који потичу од стварања струготине, хабања алата, лома алата имашине, јако је отежано и готово немогуће [14].

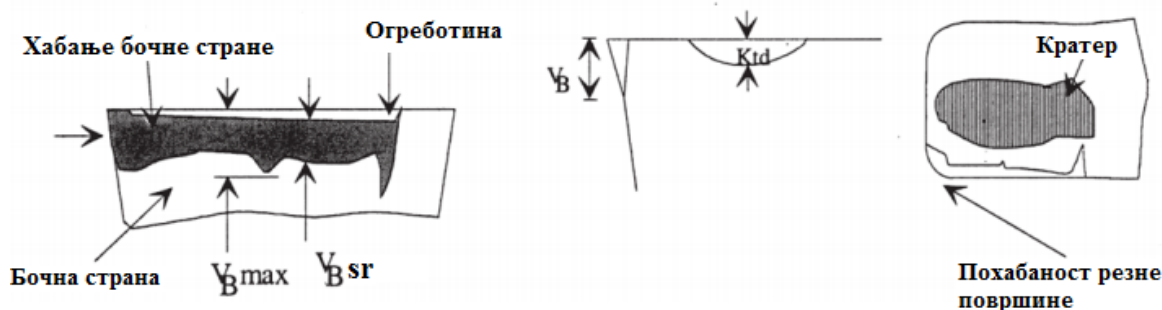


Слика 3.17 - Пример за систем индиректног праћења стања алата заснован на звуку[14]

Предности и недостаци: микрофон некако подсећа на ухо оператера, а чуло слуха оператера је одувек коришћено као једна од метода мониторинга. Са обзиром на континуирани успех заснован на звуку, пружају прилично добре предности. Међутим, у поређењу са акустичним сензором, време реакције је веома дуго, што чини микрофон мање поузданим. Због саме сложености обрадног система, тренутак лома алата се открива нешто касније. Ово чини методу звука неповољном и слабије коришћеном. Користи се претежно уз подршку неких других система мониторинга. У прошлости, неколико истраживача су интегрисали сензор звука у струг у сврху праћења сила резања. Ова метода је заступљена процентуално 8.1% у индустрији. Посебан тип микрофона намењен за машинску обраду доводи до бољих резултата овог сензора. Постоји сличност између акустичне емисије и овог типа мониторинга помоћу звука, а њиховом комбинацијом се могу лако идентификовати ране фазе настанка хабања резног алата у процесу обраде. Метода мониторинга помоћу звука је мање популарна код глодања [14].

3.3.7. Мерење похабаности бочне стране

Хабање алата се углавном јавља у два главна подручја резног алата: грудна површина и бочна површина. Стога се хабање алата генерално дели на хабање у виду кратера и хабање бочне стране (Слика 3.18). Процена хабања алата примењује се према стандарду ISO 3685 [14].



Слика 3.18 - Врсте хабања: кратер и бочно хабање према стандарду ISO 3685:1993[14]

Хабање бочне површине је врста хабања узрокована трењем које настаје између врха резног алата са одређеним нападним углом и нове обрађене површине која одговара овом углу. Ширину похабаности бочне стране алата означава V_B . Главни фактори који утичу на ово хабање могу бити: механички, хемијски, дифузни, итд.

Изведен је експериментални поступак на стругу, при чему је обрађиван челик AISI 5140, при чему је интегрисано 5 различитих сензора за испитивање утицаја ефеката сила резања, вибрација, акустичне емисије (АЕ), температуре и струје на похабаност бока резног алата. Према резултатима, температура и АЕ сигнали су на хабање бока алата ефикасни 74%. Затим је истраживано како обрада челика AISI 52100 утиче на похабаност бочне стране резне плочице од тврдог метала која је на себи имала превлаку од кубног бор-нитрида. Према резултатима, примећено је да превлака бор-нитрида знатно смањује хабање бочне стране алата. Затим је током процеса обраде стругањем нерђајућег челика 304L, вршено испитивање упоређивањем АЕ сигнала и сила резања да би се предвидело хабање бочне стране алата. Добијени резултати су показали да су једни у други сензори добри у предвиђању хабања бочне стране алата [14].

Предности и недостаци: пошто се хабање алата неизбежно развија на резној плочици од тврдог метала, треба је држати под контролом да би се разумео механизам за избегавање прекомерних нивоа хабања. У овом правцу, једна од главних предности је изводљивост директног мониторинга хабања код индиректних сензора без заустављања рада машине. Због повећања хабања бочне стране алата на главној ивици и одговарајуће квантификације према стандардима, откривање хабања нуди виталне информације о преосталом расположивом веку трајања резног алата. Међутим, софистицираност система због бројних параметара и променљивих резањотежава тачну процену хабања алата. Да

би се потврдило напредовање процеса хабања, ово је неопходно, што доводи до високих инвестиционих трошкова за поуздану и одрживу производњу [14].

3.3.8. Мерење храпавости обрађене површине

У инжењерској пракси, жељени површински облици делимично се изражавају као номинална површина. Храпавост површине састоји се у поновљеним одступањима од номиналне површине дела, а ова одступања су следећа:

1. Валовитост (неправилности са мерним опсезима већим од храпавости површине);
2. Дефекти (огреботине, пукотине, концентрација напона и грешке у поравнању);
3. Храпавост површине (просек вертикалних одступања неравнина површине).

Ра представља аритметичку храпавост. Ова метода користи аритметичку средину засновану на апсолутној вредности одступања од линије профила, и изражава се путем формуле:

$$R_a = \int_0^{L_m} \frac{|y|}{L_m} dx$$

Где је:

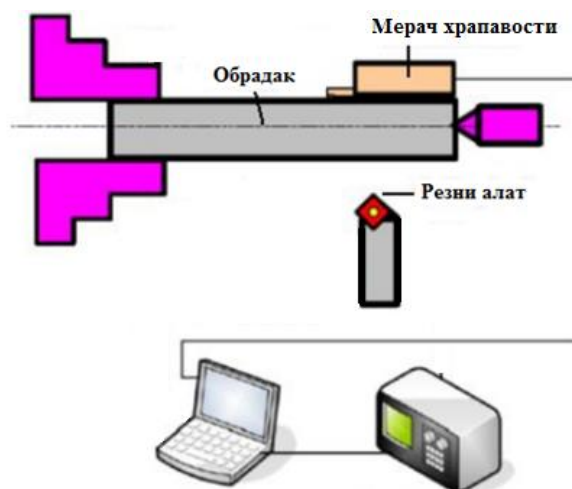
- R_a – средње аритметичко одступање профила од средње линије профила,
- L_m – дужина оцењивања,
- y – одступање од номиналне површине.

Иако постоји много метода за мерење храпавости површине, игласти уређаји и уређаји који користе оптичке методе (ласер, дифузија светлости итд.) спадају у најчешће коришћене методе. Осим тога, недавно су развијене технике у којима се 3D графика површине примењује за мерење храпавости.

Узимајући у обзир технолошки развој последњих година, може се видети да је напредак усмерен у погледу унапређења квалитета производа. На слици 3.19 приказан је систем мониторинга похабаности резног алата заснован на храпавости обрађене површине радног предмета. Очекивања у погледу квалитета су врло велика, посебно у областима попут аутомобилске и авионске индустрије, а храпавост површине је један од важних критеријума који треба да испуни ове услове. Храпавост површине је важан излазни параметар, посебно за делове произведене у процесу машинске обраде метала. Сврха обраде није само обликовање дела већ и остваривање траженог и функционалног квалитета површине. Храпавост је врло важна променљива процеса у обради стругањем као крајњи циљ. Радијус врха алата за обраду, дубина захвата и брзина резања могу се сврстати међу факторе који значајно утичу на храпавост при стругању. Поред ових фактора, на храпавост утичу и материјал предмета обраде, као и крутост саме машине, од чега зависи појава вибрација. Понекад је квалитет обрађене површине један од

најбитнијих захтева за функционалност неког механизма, што се најбоље види код клизних механизма, где је пожељно минимално трење [14].

Параметри који утичу на храпавост површине могу се поделити у две главне групе, и то као зависно и независно променљиве. Док параметри као што су акустична емисија, вибрације, температура и силе резања представљају зависно променљиве, тако су брзина резања, дубина резања, материјал обратка, и материјал алата променљиве које независно утичу на храпавост површине.



Слика 3.19 – Систем мониторинга процеса обраде заснован на мерењу храпавости[14]

3.3.9. Процесуирање слика

Обрада слика је поступак препознавања образаца који функционишу са стратегијом о мерењу текстуре слика у различитим областима примене, попут статистичке анализе података, учење применом технологије и обрада сигнала. Овим системима једноставно треба камера за поделу слике на сегменте за интензивну анализу, јер се понављају текстуре на слици. Примарни изазов за методу препознавања узорка путем обраде слика је како сегментирати целу слику и одредити границе. Након тога је потребно описати карактеристике сваког сегмента за даљу анализу и доношење одлука. У мерењу похабаности алата у концепту овог рада, похабано подручје на алату за резање мора се разликовати од непохабаног подручја. Једном када су текстуре идентификоване као похабане или непохабане током обраде, ниво похабаности описан је у функцији времена обраде. На слици 3.20 приказан је принцип мониторинга заснован на обради слике [14].

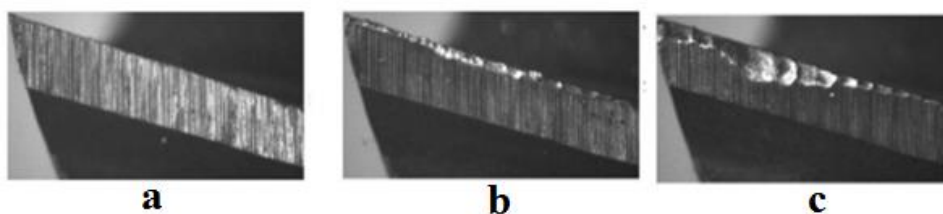
За мониторинг похабаности резног алата на принципу процесуирања слике при обради на стругу коришћен је челик AISI 4340 у условима резања где је алат постигао катастрофално оштећење, при чему се испоставило да је ова метода погодна за препознавање оштрих, средње тупих и тупих алата. Затим је вршено испитивање на EN24T материјалу за препознавање обима хабања алата путем технологија обраде слика. Аутори су изјавили да, иако је ова метода имала потенцијала у процени стања алата на

основу слике, још увек су постојали проблеми које је требало превазићи. Затим је испитиван процес обраде слике путем неуронске мреже приликом стругања С45 челика за процену века трајања резног алата. Овај приступ је пружио високе резултате детектовања грешака за прекомерне вредности хабања алата а тачност предвиђања била је задовољавајућа и одговарајућа за индустријске примене. Затим је одређивање века трајања резног алата вршено путем дигиталне обраде слике. Ово откриће је пружио смањене трошкове алата коришћењем новог критеријума хабања [14].



Слика 3.20 – Мониторинг хабања алата путем процесуирања слике[14]

Предности и недостаци: за разлику од претходно поменутих сензорских система, процесуирање слика се примењује након завршетка обраде. Ова ситуација представља недостатак јер спречавање лома алата и прекомерног хабања алата постаје тешко и готово немогуће. Међутим, када је обрада заустављена из различитих разлога, поред методе обраде слика, може се користити и метода мерења храпавости. Овај приступ пружа додатне информације о алату и може бити користан за потврду прикупљених података сензора. Значајно је да добро структуриран софтвер може предвидети ситуацију са алатом са високом стопом успешности, што далеко побољшава квалитет обрађене површине [14].



Слика 3.21 - Слике резног врха алата направљене током процеса обраде приказују стање алата: а) нов алат, б) први знаци хабања алата, с) последња фаза хабања[7]

Коришћењем мерног система, добијене су слике врха резног клина алата у току обраде (слика 3.21). За време експеримента, алат је у осам пролаза уздужно обрађивао комад. Фотографије су направљене након сваких 200mm дужине обраде предмета. Параметри процеса обраде су били: брзина помоћног кретања 50mm/min, брзина резања 22 m/min, број обртаја алата 500 o/min, ширина резања 6 mm и дубина резања 2mm.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

Експериментална истраживања са циљем развоја мониторинга хабања резног алата код обраде глодањем извршена су у школској радионици Средње школе „Добрица Ерић” у Книћу, на CNC глодалици и на истој глодалици на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Прва испитивања у школској радионици Средње школе „Добрица Ерић” у Книћу, на CNC глодалици су имала за циљ праћење хабања алата у условима експлоатације и мерење оптерећења главног вретена. Коришћен је један алат – вретенасто глодало Ø10 од тврдог метала са превлаком TiAlN, ново, које до тада није било употребљено. Испитивања су вршена при обради серије истих делова, при чему су параметри обраде увек били исти: облик комада, димензије, материјал, режими резања, хлађење, итд.

Експериментална истраживања изведена су на CNC глодалици HAAS MiniMill, при чему је коришћен један носач алата и један алат, слика 4.1.



Слика 4.1 – HAAS MiniMill CNC глодалица

За стезање и позиционирање цилиндричног припремка коришћена је стезна глава са чељустима, слика 4.2. Као средство за хлађење и подмазивање (SHP) коришћена је

емулзија HYSOL T-15, са препорученом радном концентрацијом од 7%. Емулзија значајно побољшава услове рада, јер одводи топлоту и струготину из зоне резања, чиме продужава век трајања алата.

Основни технички подаци HAAS MiniMill CNC машине:

- ход осе X 406 mm
- ход осе Y 305 mm
- ход осе Z 320 mm
- дужина стола 730 mm
- ширина стола 305 mm
- максимално оптерећење на столу 230 kg
- конус вретена SK 40
- бр. алата у магацину 10
- максимална брзина резања 21,2 m/min
- максимални број обртаја вретена 10000 o/min
- снага мотора вретена 11,2 kW
- тежина машине 2300 kg

Испитивање је вршено у условима серијске обраде цилиндричних припремака, при чему је праћено стање алата, односно промена индикатора снаге на машини.



Слика 4.2 – Стезни прибор коришћен у експерименту

Важно је напоменути да је машина на којој се експеримент изводи потпуно нова, па су резултати самим тим поуздани. Стезни прибор, и носач алата су такође нови. Режији обраде су били увек константни.

Друга експериментална истраживања изведена су на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, такође на НААС глодалици. У овом случају, истовремено је коришћено 5 различитих система за индиректно праћење похабаности алата (слика 4.3).



Слика 4.3 – Машина, мерна и рачунарска опрема

На слици 4.3 приказана је машина са инсталираном опремом за мерење излазних параметара процеса обраде глодањем. Припремак на којем је вршена обрада је био од легуре алуминијума AlMg4.5Mn (EN AW 5083) постављен на динамометар. На слици 4.4 је приказан динамометар "Kistler - Тип 9265A1". Поред динамометра коришћени су мерни појачивач "Kistler - тип Ca5001" са AD претварачем и рачунаром са одговарајућим софтвером и апликацијом у *Labview* за мерење сила резања код обраде глодањем, слика 4.5. На слици 4.6 су приказани положаји мерног уређаја *ISR-C002 INSIZE* за мерење параметара топографије (храпавости) површине и микроскоп камера *Vividia 2.0 MP Handheld USB Digital Endoscope/Microscope*.

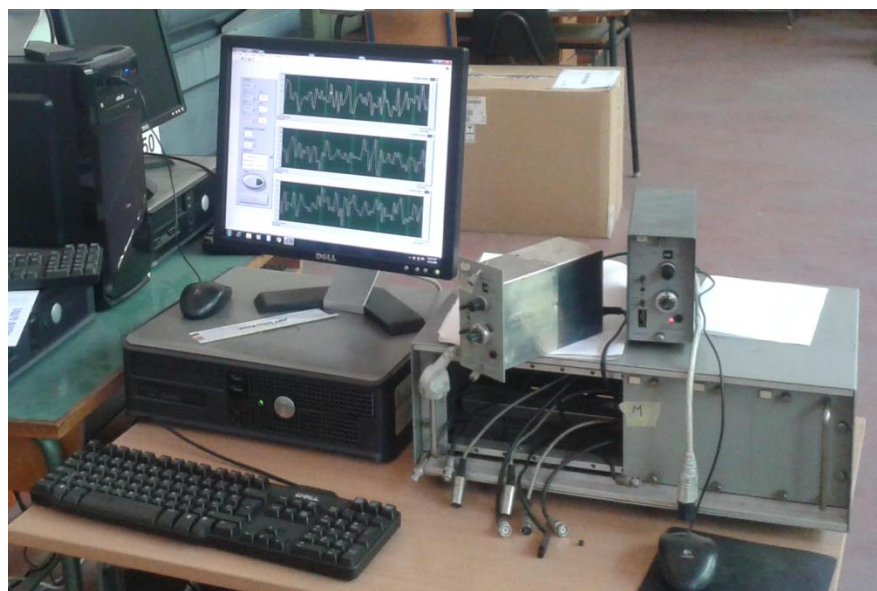
Микроскоп камера за овај експеримент је постављена у положај у коме се врши снимање резних ивица. Камера се не помера (учвршћена је за сто глодалице), док се алат доводи увек у исти положај у односу на камеру, како би се снимила резна ивица алата и њена похабаност. Камера има могућност повећања до 250x и повезана је USB-ом са рачунаром помоћу кога се врши видео надзор, приказује тренутна слика коју камера снима у реалном времену у посебном прозору. Неке техничке карактеристике микроскоп камере су приказане у табели 4.1.

Табела 4.1 Техничке карактеристике камере

Сензор	2.0MP CMOS сензор
Резолуцијаслике	1600x1200 пиксела, формат: BMP
Резолуција видеа	1600x1200 пиксела, формат: AVI, 20 FPS
Даљинафокуса	мин 5mm
Увећање	1x - 250x
Осветљење	8 белих LED лампи
Пречник	12mm
Дужина	140mm
Тежинакамере	100g



Слика 4.4 - Диамометар "Kistler - Тип 9265A1" са предметом обраде

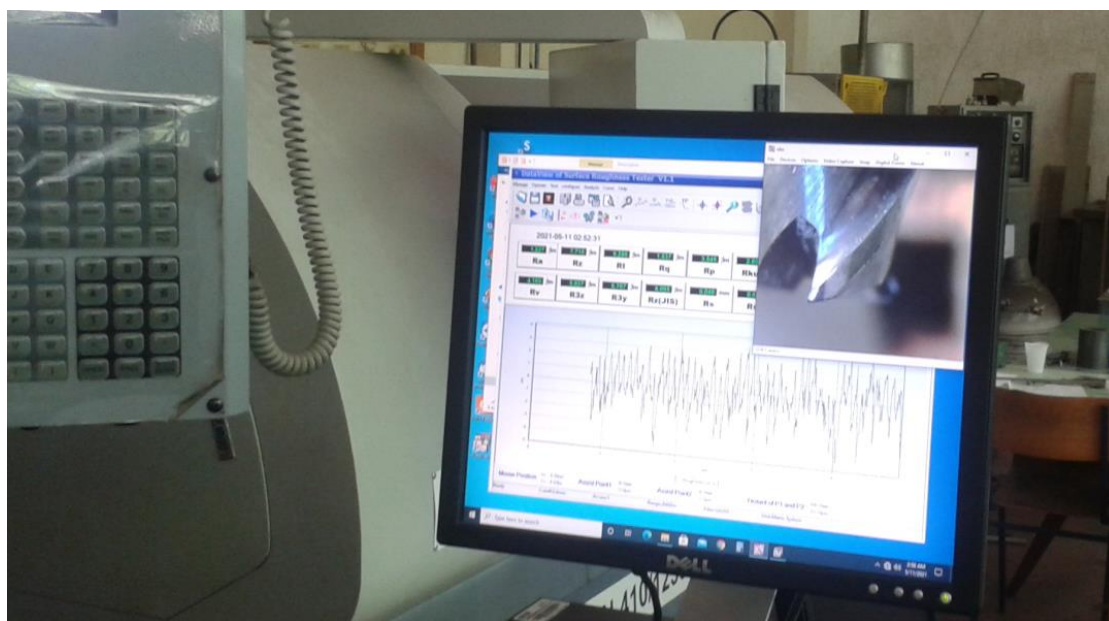


Слика 4.5 - Појачивач "Kistler - Тип Ca5001" са рачунаром и апликацијом у Labview за мерење сила резања



Слика 4.6 - Положај уређаја за мерење храпавости површине и микроскоп камере

Мерни уређај уређаја *ISR-C002 INSIZE* за мерење параметара храпавости површине је постављен у специјални носач и причвршћен у носач главног вретена машине. На тај начин је омогућено да се наком обраде глодањем, мерни пипак доведе у положај за мерење коришћењем задате путање у NC коду. На слици 4.7 је приказан монитор рачунара са делом екрана са видео записом са микроскоп камере и део екрана са софтвером за анализу и приказ резултата мерење храпавости обрађене површине.



Слика 4.7 - Монитор рачунара са видео снимком глодала и измереном храпавошћу површине

За мерење тачности обраде у магацин алата и стезну главу је постављен мерни пипак. Коришћена машина на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу нема аутоматску измену алата из магацина већ се то мора ручно радити. За мерење тачности обраде и утицаја хабања алата на сто машине је постављена контролна површина за умеравље мерног пипка увек након новог постављања. У NC коду се задаје путања мерног пипка а применом монитора управљачке јединице читава положај мерне тачке. Поређењем димензија припремка пре обраде, задате путање алата и димензија након обраде може се добити информација о нетачности обраде. На тај начин се може одредити утицај похабаности алата на тачност обраде. На слици 4.8 је приказан положај мерног пипка у стезној глави и магацину машине и у току мерења.



Слика 4.8 – Мерни типак

За мерење оптерећења главног вретена машине на управљачкој јединици машине се налази аналогни показивач, слика 4.9.

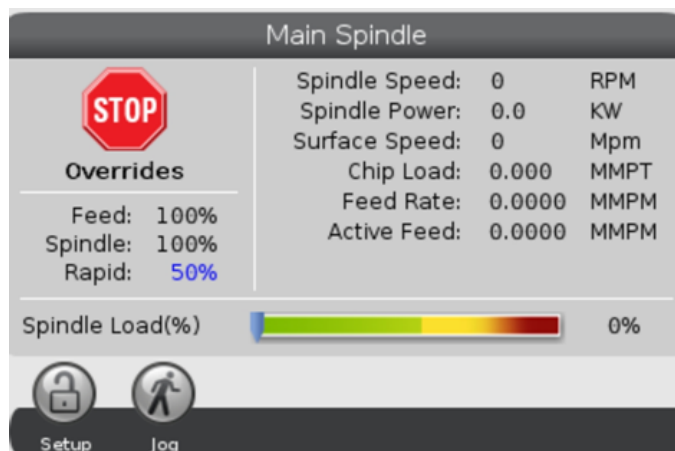


Слика 4.9 – Аналогни показивач оптерећења главног вретена

5. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА И АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

5.1. Испитивање утицаја хабања на оптерећење главног вретена

У првом експерименталном истраживању су добијени резултати анализом података добијених са посебног дисплеја на управљачкој јединици машине HAAS MiniMill, слика 5.1. Глодалом је вршена обрада 100 истих комада при истим режимима. Праћена је промена оптерећења главног вретена. Констатовано је да током обраде долази до постепеног повећања које је изазвано повећањем похабаности алата.



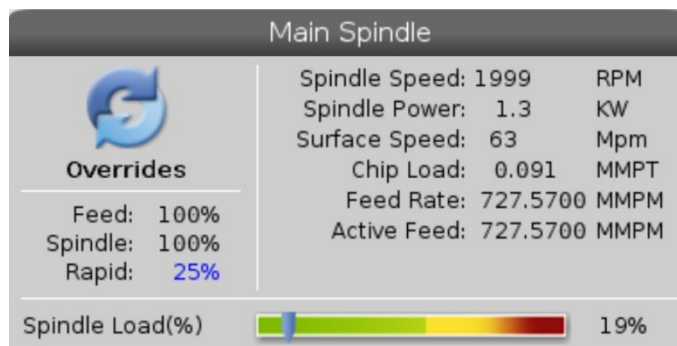
Слика 5.1 – Део дисплеја за праћење оптерећења главног вретена

Треба напоменути да је овај систем интегрисан у управљачку јединицу CNC глодалице и да се приказује оптерећење у процентима (слика 5.1). Као што се може видети, постоји индикатор скала са променом боје, од зелене до жуте и тамно црвене. Са повећањем оптерећења скала се из поља зелене боје помера ка пољу жуте и црвене боје. Уколико дође до великог затупљења алата, оптерећење се приближава жутој зони и алат се мора заменити. Не сме се дозволити да се уђе у жуту зону оптерећења, јер је тада алат веома похабан. Његово даље коришћење може изазвати трајно оштећење алата, припремка па чак и машине. Обавезно је заменити алат новим или постојећи наоштрити.

Ово мерење има своје недостатке, јер се услед хабања лежајева или недостатка подмазивања улежиштења вретена може јавити повећано оптерећење, које није изазвано хабањем алата. Други недостатак је што је за различите алате и пречнике другачија вредност оптерећења, односно почетна вредност. Због тога се подаци добијени са овог

индикатора морају посматрати условно. То значи да је потребно увек очитати вредност на почетку обраде са новим алатом и пратити промене у условима истих режима обраде.

При почетку обраде у оквиру реализованих испитивања, глодало је било потпуно ново, фабрички наоштрено. Оптерећење се кретало у границама између 18-19 процената (зелено поље, слика 5.2).



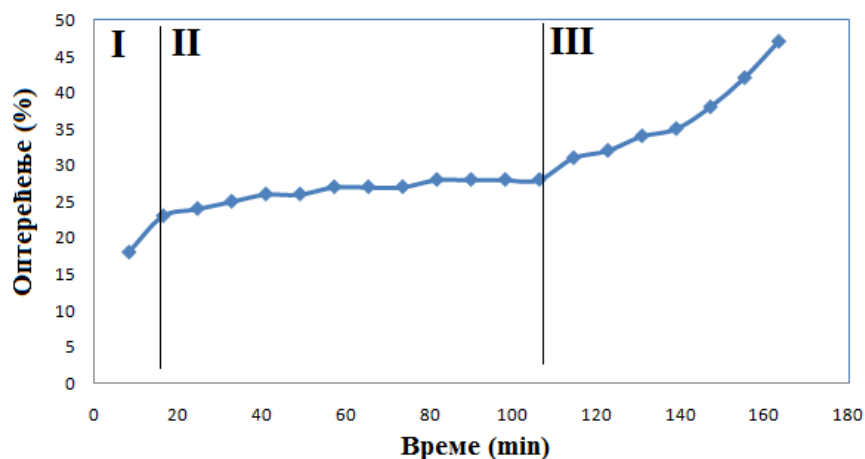
Слика 5.2 – Оптерећење вретена на почетку обраде.

Као што се види са слике, режими обраде су били:

- број обртаја: 2000 о/min,
- брзина помоћног кретања: 727,57 mm/min и
- дубина резања: 0,8 mm по пролазу.

Ови режими су били константни у току извођења експеримента.

Време које је алат провео у обради за један комад је 1,63 min, односно 163 min за обраду 100 комада. На основу праћења и бележења резултата оптерећења на сваких 5 обрађених комада, дошло се до следећег дијаграма на слици 5.3.



Слика 5.3 – Дијаграм добијених резултата

Анализом података са дијаграма може се закључити да постоји његово велико подударење са кривом хабања алата. Због потребе задржавања идентичних услова обраде није вршено скидање алата са машине и мерење похабаности. Са дијаграма се јасно могу

уочити фазе хабања као код криве хабања. У првој фази, оптерећење је најмање, али брзо долази до повећања услед хабања оштрих ивица резног клина алата, односно јавља се иницијално хабање. Затим долази фаза, у току које се уочава дужи стабилан период рада, период устаљенох хабања. Затим долази до треће фазе, где се хабање интензивније повећава, што је знак да алат губи резне способности и да је потребна његова замена. Почетак жуте зоне на индикатору је био знак да се мора зауставити обрада са коришћеним алатом и извршити његова замена.

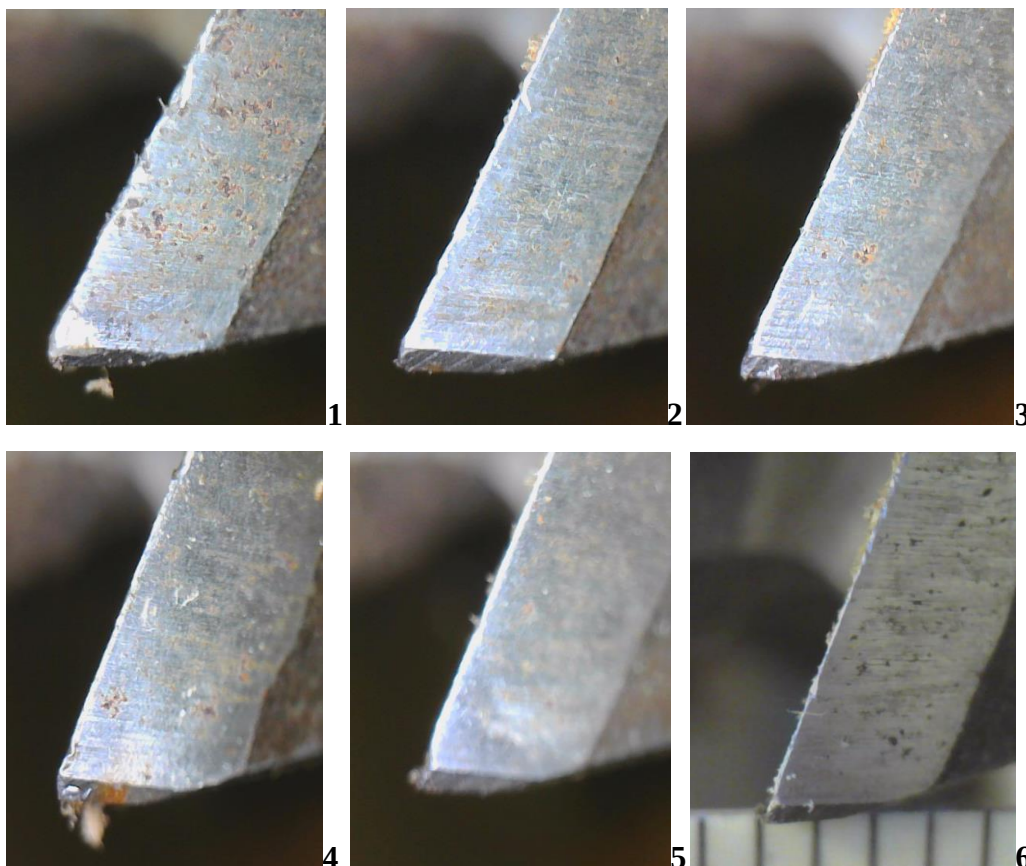
5.2 Развој модела за мониторинг процеса хабања алата

У истраживањима на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу извршена су два експеримента. У првом је постављена камера (слика 5.4) на сто глодалице и креиран је NC код који омогућује позиционирање алата увек у исти положај у односу на камеру. За овај експеримент коришћено је чеono глодало пречника 50 mm са 6 зуба. Није вршена обрада глодањем. Након доласка глодала испред камере, ручно је морала да се врши ротација глодала, ради позиционирања појединачних зуба испред камере. Циљ је био анализа могућности позиционирања глодала увек на исто место и снимање сваког појединачног зуба. У даљем развоју овог модела предвиђена је израда специјалне подеоне плоче постављене на носач алата која би омогућила веома једноставно и брзо позиционирање зуба глодала ради снимања стања похабаности, а други корак развоја овог модела разматра коришћење брзе камере и малог броја обртаја глодала, чиме би се омогућио брзо снимање свих зуба глодала, препознавање појединих зуба и идентификација похабаности.

На слици 5.5 су приказани поједини зуби посматраног чеоног глодала. Може се закључити да се добијају снимци леђних површина зуба глодала са којих се могу одредити геометријске димензије, познавајући одговарајућу размеру. Такође, може се закључити да један зуб глодала има мању висину (зуб 5), односно у аксијалном правцу је краћи.



Слика 5.4 – Положај камере и глодала



Слика 5.5 – Леђна површина свих 6 зубачеоног глодала

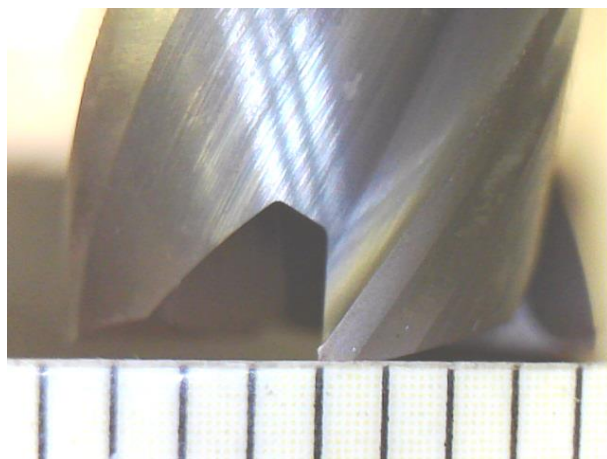
У другом делу испитивања на Факултету инжењерских наука коришћено је вретенасто глодало пречника 10mm, HSS.E, са 3 зуба. Вршена је обрада алуминијумског припремка постављеног на динамометар. Режији при којима је обрада вршена су били:

- ширина глодања: 0.5 mm,
- дубина глодања: 10 mm,
- број обртаја: 1000 o/min,
- брзина помоћног кретања: 100 mm/min,
- дужина обраде 100 mm.

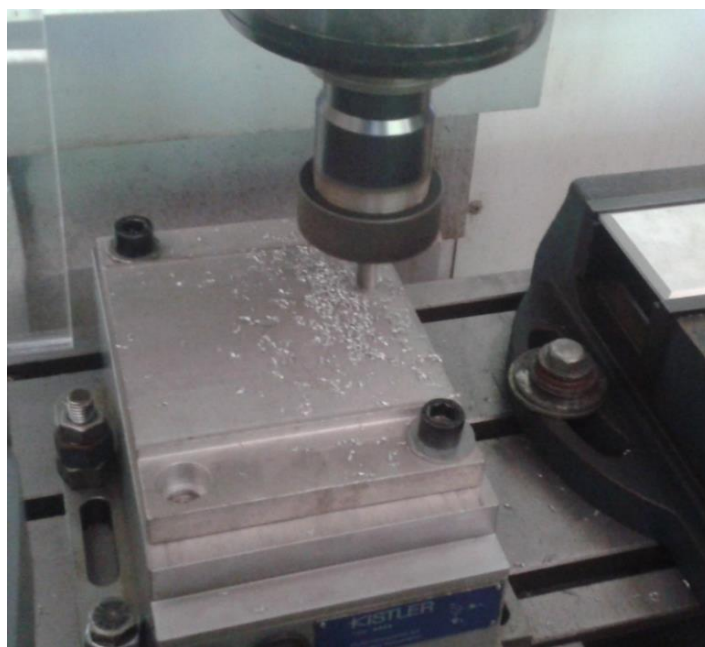
На слици 5.6 приказан је зуб новог глодала. Облик, положај и димензије сва три зуба су били идентични.

Израда жлеба ширине 10 mm је вршена са 20 пролаза, слика 5.7. На самом почетку обраде, при првом пролазу извршено је читавање свих мерених величина: параметара храпавости површине, сила резања и оптерећења вретена.

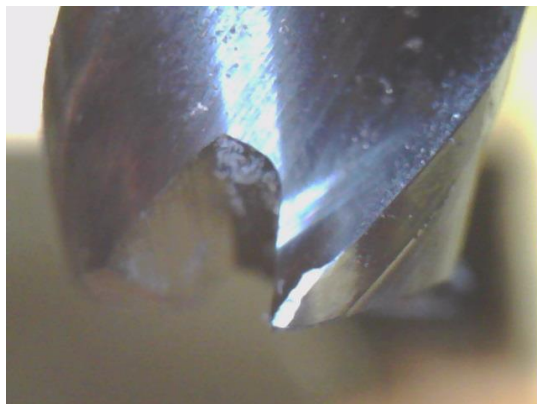
У току задњег пролаза обраде мерене су силе резања и оптерећење вретена, а након обраде измерена је храпавост обрађене површине и димензије дубине жлеба мерним пипком. Вретенасто глодало је доведено испред камере и извршено је снимање свих зуба глодала, слика 5.8.



Слика 5.6 – *Леђна површина вретенастог глодала пречника 10 mm*

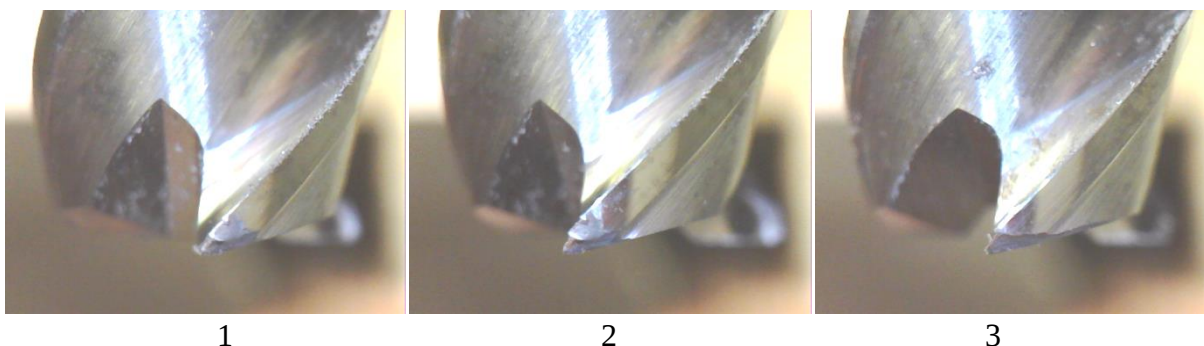


Слика 5.7 – *Обрада вретенастим глодалом, израда жлеба са више пролаза*



Слика 5.8 – *Наслага алуминијума на резном врху алата после обраде*

Као што се види са слике 5.8, на зубу се налази наслага алуминијума, што се јавља у већини случајева при његовој обради. Појава наслага отежава обраду и интензивира хабање алата. Легуре алуминијума су због своје мале тврдоће често веома добре за обраду, међутим услед неодговарајућих услова обраде могу се појавити проблеми наслага, хабања алата или чак немогућности обраде. На слици 5.9 су приказани похабани зуби коришћеног глодала.



Слика 5.9 – Похабани зуби глодала

Мерењем ширине похабаног појаса на леђној површини сва три зуба глодала констатовано је да постоје одређене разлике у похабаности и да средња ширина хабања највише похабаног зуба износи 0,18 mm. Повећано хабање овог зуба у односу на остала је најчешће услед неједнаког радијалног одступања резне ивице глодала, што има за последицу неједнак попречни пресек струготине коју сваки зуб понаособ захвата и односи.

Мерењем сила резања на почетку обраде, при првом пролазу и при задњем пролазу констатоване су вредности приказане у табели 5.1.

Табела 5.1. Силе резања за ново и похабано глодало

	h, mm	F _x , N	F _y , N	F _z , N	Оптерећење вретена, %
1	0	192.1	144.7	56.2	11
2	0,18	240.3	168.2	80.4	14

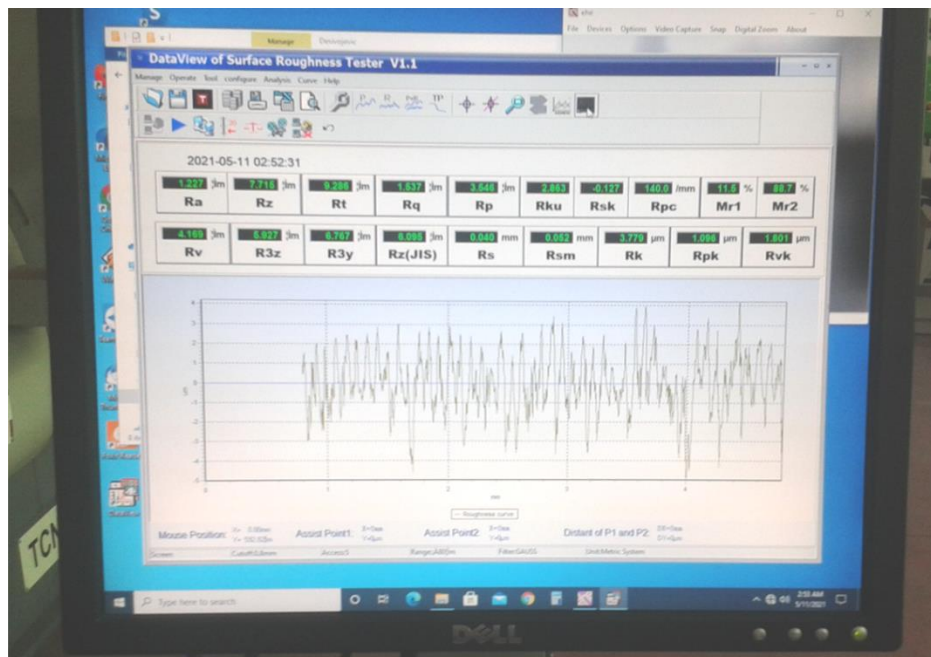
Из ове табеле се види да је дошло до повећања сила резања, односно да се праћењем промене сила резања може идентификовати хабање резног алата.

У табели 5.1 су приказани резултати мерења и оптерећења вретена глодалице, при чему је констатовано да је дошло до малог повећања оптерећења. Међутим, коришћени услови обраде захтевају мало оптерећење вретена глодалице, тако да се за коришћене услове не може овај параметар поуздано користити. Промена оптерећења вретена је интересантна за праћење код тежих услова обраде (већа дубина и ширина глодања и већа брзина помоћног кретања) и тешкообрадивих материјала (нпр. побољшани челици и др.).

На слици 5.10 је приказано мерење након првог пролаза обраде алуминујума, а на слици 5.11 резултати мерења. Након задњег пролаза обраде глодањем извршено је поново мерење и резултати мерења основних параметара храпавости су дате у табели 5.2.



Слика 5.10 – Мерење параметара храпавости након првог пролаза обраде глодањем



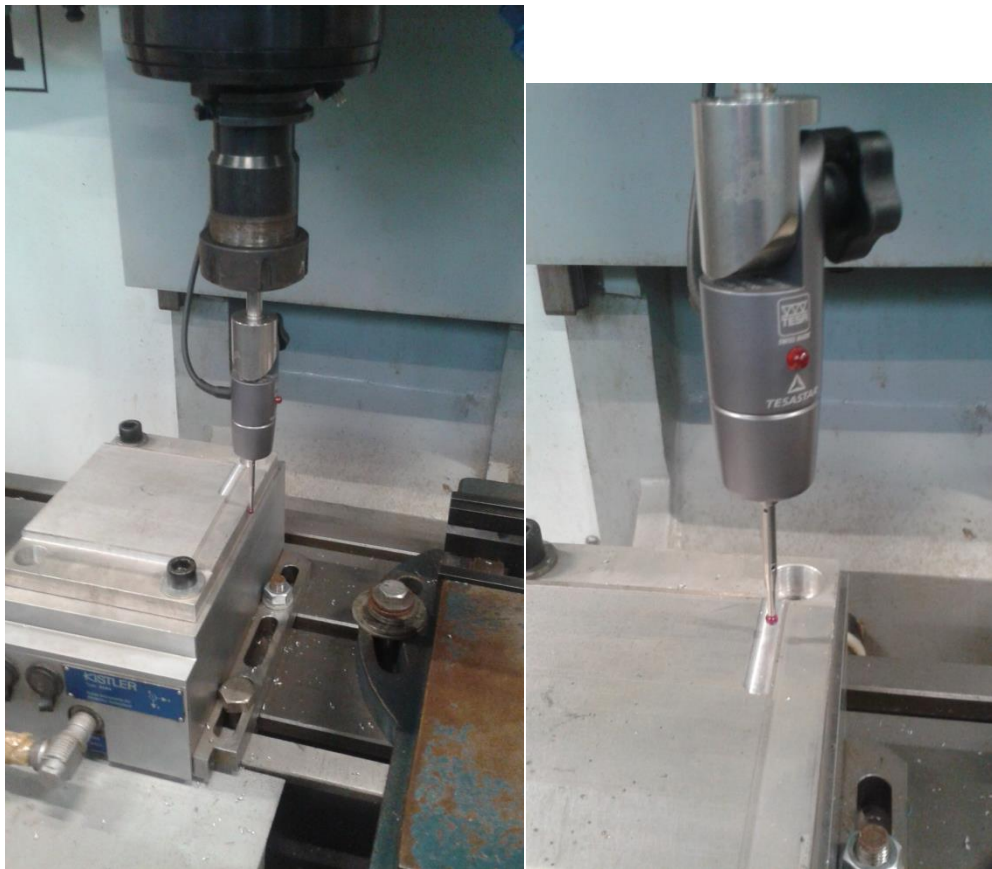
Слика 5.11 – Резултати мерења параметара храпавости након првог пролаза обраде глодањем

Табела 5.2. Параметри храпавости површине за обраду са новим и похабаним глодалом

	h, mm	Ra, μm	Rz, μm	Rmax, μm	Dubina obrade, mm
1	0	1.227	7.715	9.286	0
2	0,18	1.662	9.821	13.557	9.34

Из табеле 5.2 може се видети да је дошло до повећања храпавости обрађене површине, односно да је дошло до погоршања квалитета обраде. Разлог за то је хабање леђне површине резног клина алата и појава наслаге.

Мерењем димензија растојања између површина након првог и последњег пролаза (19 пролаза) добијена је вредност 9.34 mm. NC програмом и NC кодом је задата вредност од 9.5 mm (19 пролаза по 0.5 mm). На основу ове величине се може закључити да постоји одређена нетачност обраде која је проузрокована не само хабањем алата, већ и повећањем сила резања и еластичних деформација система машина - предмет обраде - алат. На слици 5.12 је приказано мерење мерним пипком површине након првог пролаза обраде. Пре почетка мерења као полазна површина (референтна површина) је коришћена површина радног стола глодалице.



Слика 5.12 – Мерење мерним пипком обрађене површине

6. ЗАКЉУЧЦИ

У савременој индустрији која не трпи застоје, грешке и временске губитке, јако је битно обезбедити правилну методу мониторинга процеса хабања резног алата. Посебно је то значајно у великосеријским производњама у индустријским гранама као што су аутомобилска индустрија и друго. Из тих разлога развој технологије и CNC машина прати и развој различитих метода мониторинга. Мониторинг хабања алата све више добија на значају, па се појављују нове машине са фабрички интегрисаном неком методом за праћење. Све више се производи опрема за мониторинг, као што су специјалне камере, динамометри, акустични уређаји и микрофони. На овај начин је могућност застоја или неке хаварије сведена на минимум.

Системи мониторинга процесом обраде метала резањем обезбеђују надзор: процеса резања, резног алата, обрадног система и управљање процесом резања. Мониторинг процеса резања подразумева праћење параметара процеса обраде, контролу стања и управљање процесом. Применом мониторинга система обезбеђује се on-line идентификација динамичких карактеристика процеса резања, посебно карактера промене излазних параметара у зависности од услова обраде, хабања алата и осетљивости појединих сензора којима се идентификују статичке и динамичке компоненте отпора резања, снага резања, вибрације и убрзања, акустична емисија, термонапон и бука.

Некада се оператер машине ослањао на своја чула како би идентификовао неки фактор који би указивао на хабање алата и затупљеност. Најпре је чулом слуха пратио да ли долази до неке промене звука од оног оптималног. Затим би чулом вида обратио пажњу на резне ивице алата не би ли установио појаву хабања. По некад би додиром прешао преко резних ивица алата, при чему се могло установити да ли је алат још увек оштар. Данас се оператер у главном ослања на сензоре и уређаје за непосредни и посредни мониторинг. Ово је јако важно у условима савремене индустрије, јер нам омогућава уочавање настанка хабања у својим раним фазама.

У посебном поглављу овог рада, анализирани су научни радови. Приказани су начини добијања слике након чега се врши анализа хабања методом обраде слике резног врха алата и методе за обраду слике са циљем препознавања величине похабаности. Могућност процене похабаности алата у великој мери утиче на повећање аутоматизације и флексибилности производног процеса. Аутоматска измена похабаног алата новим алатом из магацина са више истих алата, чини савремени обрадни систем са АС системом за управљање. Аутоматска измена алата значајно утиче на смањење времена застоја машине, при чему не утиче на радни век алата.

Експерименталним истраживањима применом савремене мерне опреме на CNC машини утврђено је да се ефикасно могу применити индиректне методе идентификације станја, односно похабаности алата. Коришћене индиректне методе су праћење оптерећења главног вретена, мерење хртавости обрађене површине, мерење сила резања и мерење тачности обраде. Посебно коришћена метода је везана за примену видео записа, односно слике резног врха алата. Експерименти су показали да се у пракси успешно могу користити ове методе. Ради њихове конкретне примене потребно је претходно извршити испитивања за конкретне услове обраде. За сада се не могу успоставити и генерализовати закључци о постојању корелације између хабања алата и индиректних показатеља похабаности алата (квалитет обрађене површине, тачност обраде, силе резања и др.). За сваки конкретан услов обраде (или типског представника обрадака) се мора унапред дефинисати веза хабања и мереног параметра.

Потребно је даље наставити истраживања поменутих метода, како би се системи за праћење додатно унапредили и прилагодили за примену у савременој индустрији. У зависности од сложености дела или операција у току обраде ће се бирати примењена метода. Посебна пажња треба да буде на развоју on-line методе мерења и праћења хабања алата применом видео система.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Миодраг Лазих**, *Обрада метала резањем*, Монографија, Машински факултет, Крагујевац, 2002.
- [2] **Teti Roberto, Jemielniak Krzysztof, O'Donnell Garret, Dornfeld David**, *Advanced monitoring of machining operations*, LMAS, UC Berkeley, 2010.
- [3] **Павел Ковач, Марин Гостимировић, Миленко Секулић, Борислав Савковић**, *Програмско и техничко решење виртуелне инструментације за мерење отпора резања при чеоном глодању*, Документација техничког решења, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2010.
- [4] **X.Y. Zhang, X. Lu, S. Wang, W. Wang, W.D. Li**, *A multi – sensor based online tool condition monitoring system for milling process*, 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2018.
- [5] **S. Dutta, S.K. Pal, S. Mukhopdhyay, R. Sen**, *Application of digital image processing in tool condition monitoring*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2013.
- [6] **C.H. Lauro, L.C. Brandão, D. Baldo, R.A. Reis, J.P. Davim**, *Monitoring and processing signal applied in machining processes – a review*, Department of Mechanical Engineering, University of Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810 – 193 Aveiro, Portugal, Department of Mechanical Engineering, Federal University of São João del Rei (UFSJ), Praça Frei Orlando n 170, Centro, 36.307 – 352 São João Del Rei, Brazil, 2014.
- [7] **Стефан Мијаиловић**, *Мониторинг Процеса обраде стругањем*, мастер рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2019.
- [8] **Павел Ковач, Марин Гостимировић, Миленко Секулић, Борислав Савковић**, *Програмско и техничко решење виртуелне инструментације за мерење отпора резања при чеоном глодању*, Документација техничког решења, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2010.
- [9] Интернет страница: **JVE Journals**, *Vibration monitoring of CNC machinery using MEMS sensors*, <https://www.jvejournals.com/article/20788> приступљено 17.04.2021.
- [10] **T. Mohanraj, S. Shankar, R. Rajasekar, N. R. Sakthivel, A. Pramanik**, *Tool condition monitoring techniques in milling process*, a review article, 2020.
- [11] **Павел Ковач, Марин Гостимировић, Миленко Секулић, Илдико Манкова**, *A review of machining monitoring systems*, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2011.
- [12] **Ben Edrington, Bingyan Zhao, Adam Hansel, Masahiko Mori, Makoto Fujishima**, *Machine monitoring system based on MTCConnect technology*, 3rd International

Conference on Through-life Engineering Services, 2014.

- [13] **Јоко Станић, Милисав Калајџић, Радован Ковачевић**, *Мерна техника у технологији обраде метала резањем*, Грађевинска књига, Београд, 1983.
- [14] **Mustafa Kunto Źglu, Abdullah Aslan, Danil Yurievich Pimenov, Üsame Ali Usca, Emin Salur, Munish Kumar Gupta, Tadeusz Mikolajczyk, Khaled Giasin, Wojciech Kaplonek, Shubham Sharma**, *A Review of Indirect Tool Condition Monitoring Systems and Decision-Making Methods in Turning: Critical Analysis and Trends*, 2020
- [15] **Милан Симоновић**, *Методе праћења стања алата током машинске обраде*, Научно – истраживачки рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2019.
- [16] **Милан Д. Милутиновић**, *Истраживање постојаности стругарског ножа у производним условима ортогоналног резања*, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2015.