

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 45/2014

Милош С. Јанковић

Динамички карактер процеса формирања струготине завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Недић Богдан

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију информација о динамичком карактеру процеса настанка струготине. Потребно је да опише постојеће моделе за описивање овог процеса. Завршни рад већим делом треба да је заснован на експерименталним испитивањима којима треба да утврди постојање зависности између дебљине сегмената струготине и услова обраде (дубина, посмак и брзина резања).

На крају рада извршити поређење резултата експерименталних испитивања са вредностима прорачуна применом софтвера за прорачун динамичких карактеристика процеса резања.

Препоручена литература:

1. Богдан Недић, Динамика процеса резања, књига, Машински факултет, Крагујевац 2006.
2. Ацо Антић, Милан Зељковић, Александар Живковић, Слободан Табаковић, Утицај процеса формирања струготине на осциловање и динамику хабања алата, скрипта, техничких наука, Нови Сад 2010.
3. Богдан Недић, Миодраг Лазић, Производне технологије, скрипта, Машински факултет, Крагујевац 2007.

Крагујевац, август 2017.

Ментор:
Проф. др Богдан Недић

САДРЖАЈ

1. УВОД	4
2. НАСТАНАК И ОСНОВНЕ ВРСТЕ СТРУГОТИНЕ	6
2.1. ФАКТОР САБИЈАЊА СТРУГОТИНЕ.....	9
2.2. ПРОЦЕС НАСТАНКА СТРУГОТИНЕ	10
3. ДИНАМИЧКИ КАРАКТЕР ПРОЦЕСА И МОДЕЛИ ФОРМИРАЊА СТРУГОТИНЕ.....	17
3.1. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛИ ФОРМИРАЊА СТРУГОТИНЕ.....	19
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО	26
4.1. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА	32
4.2. ПОРЕЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ДОБИЈЕНИХ ПАРАМЕТАРА СА МАТЕМАТИЧКИМ МОДЕЛОМ СТРУГОТИНЕ	36
5. ЗАКЉУЧАК	38
6. ЛИТЕРАТУРА	40

Abstract

In this final work are explained the basic processes of metal processing by cutting, a description of the shaping model, the methods of obtaining the shavings as well as the impact of the shifting regime on shavings. Described is the practical part that consists of: separating the shavings into different regimes, shooting shavings under the optical camera, measurement of the thickness of the segments of the shavings (lamella) using an optical microscope and finally get tables and diagrams where is shown the influence of the regime change on the shavings.

Keywords: *the process of filing, cutting of metals, mathematical model*

Резиме рада

У овом завршном раду су објашњени основни поступци и процеси обраде метала резањем, дат је опис модела формирања струготине, начини добијања струготине као и утицај промене режима на струготину. Описан је практичан део који се састоји из: одвајања струготине различитим режимима, сликање струготина под оптичком камером, мерење дебљине сегмената струготина (ламела) помоћу оптичког микроскопа и на крају формирање табела као и дијаграма где је приказан утицај промене режима на струготину.

Кључне речи: процес настанка струготине, резање метала, математички модел

1. УВОД

Константан развој и усавршавање нумерички управљаних алатних машина је омогућио стварање техничких производних система који раде без додатних активности човека, самим тим се повећава тачност израде и производност. Машине које се адаптивно управљане имају могућност да врше: позиционирање алата, вођење алата по сложеним контурама, прилагођавање режима обраде, контролу предмета обраде и читав низ других активности које је човек код простијих машина, старијих генерација, сам обављао. Такође, на овај начин је постигнуто и знатно смањење времена израде. Развојем основних обрадних центара постиже се повећање флексибилности и производности. Самим повезивањем таквих обрадних центара са аутоматизованим системима, који су осмишљени за разне активности, стварају се услови за градњу фабрика у којима ће човек као радно тело имати минималне или никакве активности. Временом се све више пажње посвећује контроли функционисања система, дијагностици и развоју процеса и система који служе за управљање неким другим системима. Сви ови појмови и функције обједињени у један систем чине један савремени мониторинг, који за задатак има да контролише и управља сложеним производним системима.

Како би било омогућено успешно функционисање аутоматизованих система, потребно је поуздано и сигурно функционисање његових најосновнијих компоненти: машина, алат, обрадни процес. Да би обезбедили успешан мониторинг систем, потребно је спровести анализу отказа и правилан избор сензора. Учестаност и сама природа отказа дају нам информације о карактеристикама сензора потребних за систем. Иначе, избор одговарајућег сензора код пројектовања обрадних система представља најсложенији проблем јер сензори треба да буду економични и да поседују високу тачност и поузданост. До данашњег дана напорне и сложене активности које се баве проналажењем одговарајућег сензора за континуално мерење параметара хабања нису дале очекиване резултате и дошле до високо поузданог сензора. Зато се тежи ка проналажењу одговарајућег сензора и формирању система за праћење целокупног процеса и самог квалитета производа, а не само праћење понашања алата и промена стања при обради.

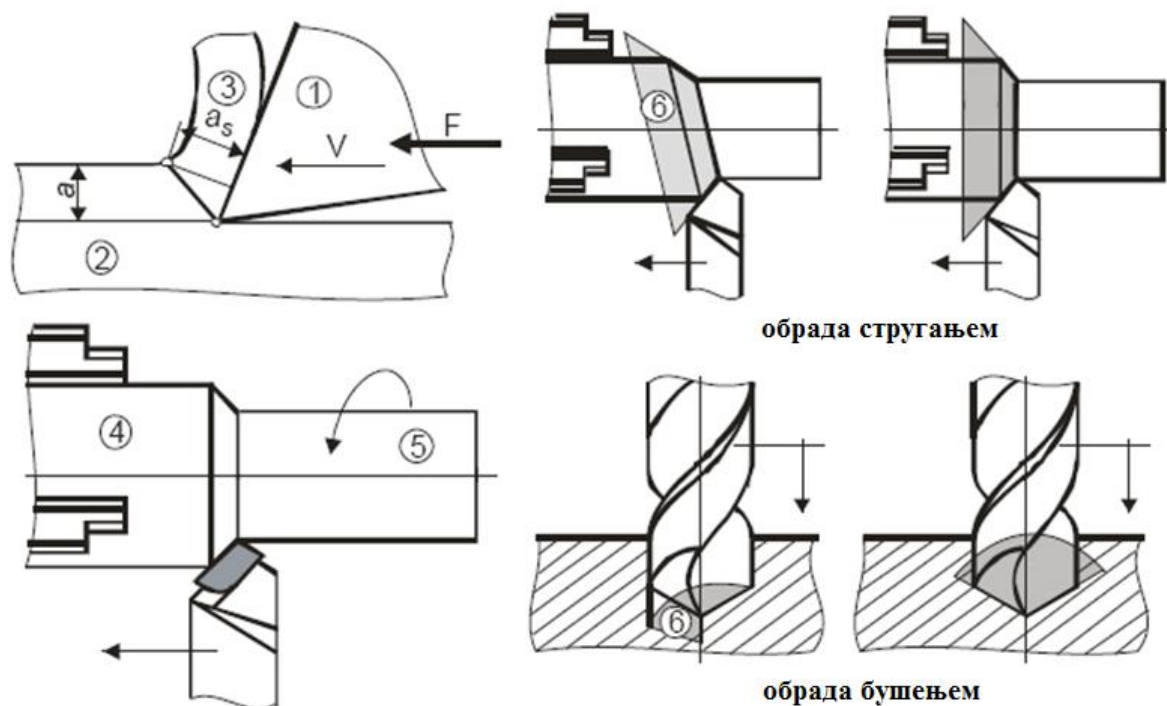
Обезбеђивањем потребних активности за спречавање настанка отказа, избегавају се велика оштећења предмета обраде, алата, елемената машине, смањује се шкарт и повећава искоришћеност производне опреме као и производност.

Динамика процеса резања обухвата истраживања у области динамике процеса обраде резањем, развоја метода за управљање процесом обраде резањем на основу динамичких карактеристика и формирања математичких модела динамичког понашања елемената обрадног система. Специфично је да се процес резања одвија у веома уској зони уз истовремено присуство сложених триболошких процеса на контактним површинама, великих пластичних деформација, генерисања велике количине топлоте и изражени динамички карактер понашања технолошког система. Због овакве сложености процеса резања изражена је непостојаност поузданих математичких модела на основу којих је могуће вршити предвиђања. Код обраде резањем разне осцилације се јављају на свим елементима целокупног система алат – предмет обраде – прибор – машина. Углавном ове осцилације зависе од режима обраде, геометрије алата, крутости елемената обрадног система, итд. Осцилаторна кретања алата и предмета обраде имају пресудни утицај на динамички карактер процеса резања као и на динамички карактер процеса формирања струготине. За изучавање динамичког понашања алата и предмета обраде као предуслов се подразумевају њихова математичка моделирања осцилаторног понашања.

На почетку рада, у другом поглављу описани су основни типови и врсте резања, процес настанка струготине као и основне врсте струготине. Познавање типова и врста резања је од великог значаја за одређивање карактера процеса формирања струготине. Такође је описан процес настанка сегмената струготине као и процес сабијања струготине приликом обраде. У трећем поглављу је дат математички модел за одређивање динамичког карактера процеса резања и зависност од услова обраде. Резултати експеримента у четвртом поглављу, приказани су сликама сегмената струготине као и димензије истих. На крају је дат закључак и литература која је коришћена за писање завршног рада.

2. НАСТАНАК И ОСНОВНЕ ВРСТЕ СТРУГОТИНЕ

Процес резања (слика 2.1) настаје продирањем резног клина алата (1), брзином V , у материјал предмета обраде (2). Продирањем резног клина алата, под дејством спољашње силе (силе резања F), долази до претварања вишка материјала дебљине a (дубина резања) у струготину дебљине a_s .

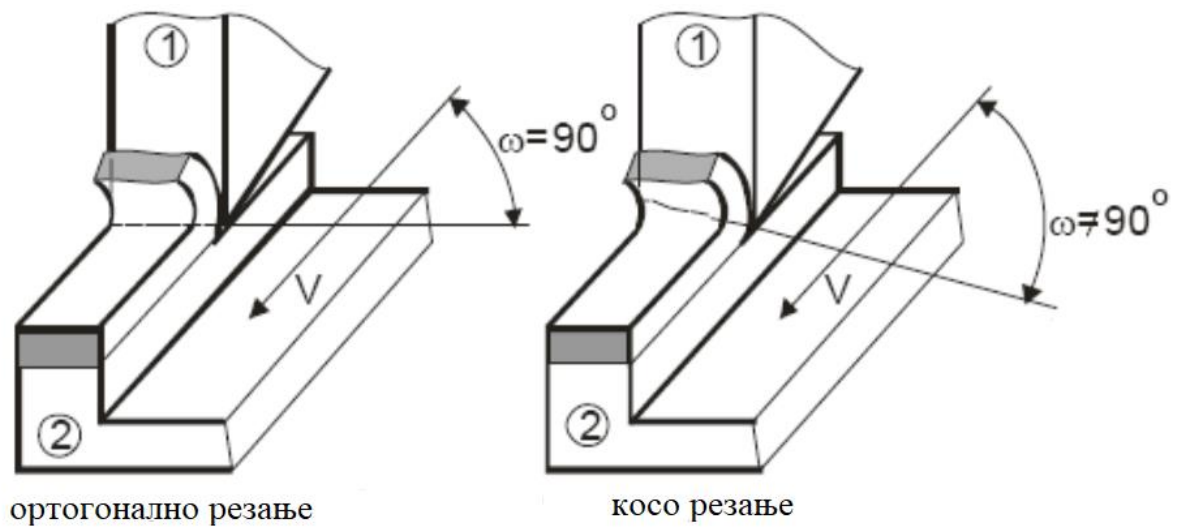


Слика 2.1 Пример обраде резања стругањем и бушењем [2]

У процесу резања се уочавају три основне површине:

- обрађивана површина (4)
- обрађена површина (5) и
- површина резања (6)

При продирању резног клина алата (1) у материјал предмета обраде (2) могу се појавити два случаја (принципа) резања: **ортогонално** и **косо резање** (слика 2.2.).



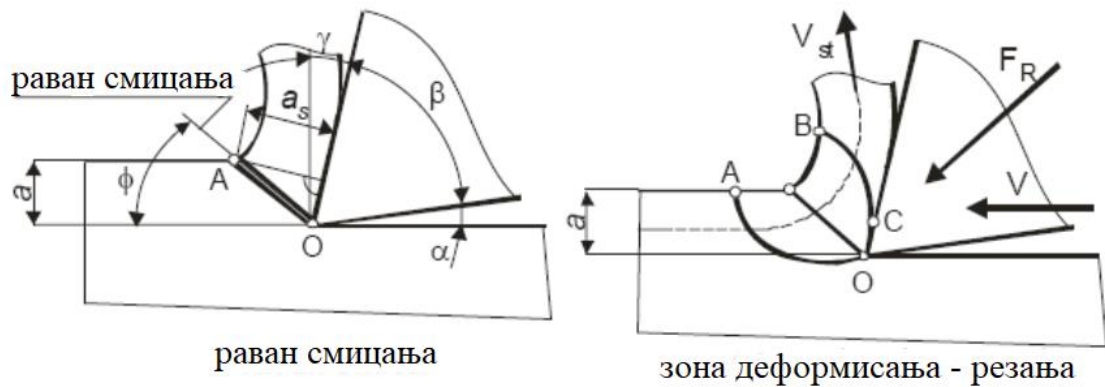
Слика 2.2 Графички приказ ортогоналног и косог резања [2]

Ортогонално резање настаје у случајевима када је главна резна ивица алата (главно сечиво) нормална на правац кретања алата или предмета обраде (правац релативног кретања). Код косог резања правац кретања алата или предмета обраде и главног сечива заклапају угао различит од 90° .

Неке од специфичних карактеристика типова резања су: принципи косог или ортогоналног резања заступљени су код свих врста обраде метала резањем мада су услови при којима се изводи обрада различити, стругање је у општем случају косо резање, при одсецању (усецању) и обради када је нападни угао 90° настаје ортогонално резање, при обимном глодању косо резање настаје при обради ваљкастим глодалима са завојним зубима док ортогонално настаје при глодању глодалима са правим зубима, рендисање је косо резање осим усецања жљебова када настаје ортогонално резање, при бушењу се јавља косо резање, провлачење е најчешће ортогонално резање, обрада многосечним алатима на пример тоцилима, спада у косо резање.

Формирање струготине се одвија кроз три сукцесивне фазе:

- Пластично деформисање материјала предмета обраде (стварања струготине)
- Одвођење струготине из зоне резања и
- Савијање и ломљење струготине. Ова фаза се не појављује увек.



Слика 2.3. Зона деформисања и равна смицања при резању [2]

Процес формирања струготине остварује се у основи, локалним пластичним деформисањем материјала предмета обраде. При продирању резног клина алата у материјал предмета обраде јављају се, у материјалу испред резног клина, сложена напрезања. Раван у којој су напрезања на смицање максимална се назива равна смицања, а њен положај је одређен углом смицања ϕ . Већем углу смицања одговара мања дебелина струготине.

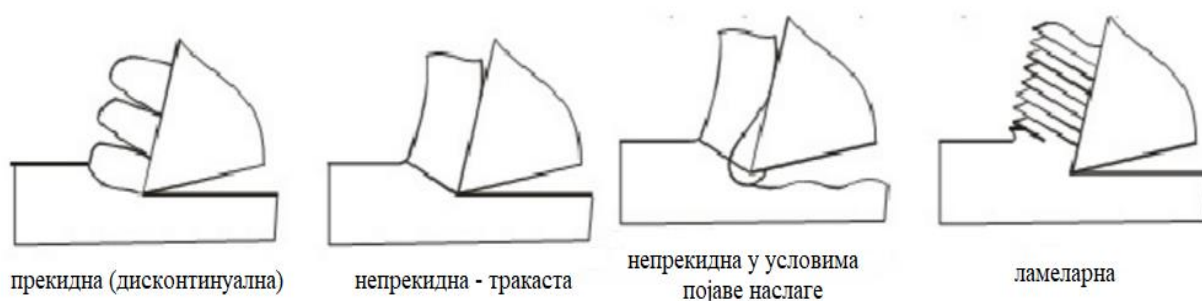
У стварности процес се не одвија у једној равни (равни смицања), већ у једном слоју око те равни, који се назива зона смицања или зона деформисања (слика 2.3.).

У зависности од механизма и карактера образовања струготине формира се струготина различитог облика и типа. Облик и тип струготине зависи од врсте и физичко –механичких особина материјала предмета обраде (пре свега пластичности) и услова пластичног деформисања резног слоја: карактера напрезања (прекидно или непрекидно резање), времена, степена и брзине деформисања. Шароликост услова обраде, по спектру обрађиваних материјала и њихових особина, методама обраде итд., доводи до великог броја облика и типова струготине (слика 2.4.), разврстана у четири основна типа:

- прекидна или дисконтинуална,
- непрекидна или континуална (тракаста),
- непрекидна у условима појаве наслагe и
- ламеларна.

Прекидна или дисконтинуална струготина (ломљена, сегментна итд.) настаје при обради ливеног гвожђа, ливене бронзе и других кртих материјала. Настаје и при обради жилавих материјала малим брзинама резања и великим корацима. Процес формирања прекидне струготине прате ломови материјала нестационарне природе између којих тече процес пластичног деформисања дела материјала који се претвара у струготину.

Непрекидна или континуална (тракаста) струготина је најчешће жељени облик струготине при обради већине материјала. Њено формирање је последица углавном пластичног деформисања у зони смицања, одвајање материјала се врши континуално у виду трака одређене дебљине. При томе је квалитет обрађене површине веома добар. При обради аутоматима овај облик струготине није пожељан.



Слика 2.4 Основне врсте струготине [3]

Непрекидна струготина у условима појаве наслага јавља се у условима резања погодним за стварање наслага на резним елементима алата. Дебљина струготине зависи од угла смицања. При мањим вредностима угла смицања вишак материјала се претвара у струготину веће дебљине и обрнуто. [2]

2.1. ФАКТОР САБИЈАЊА СТРУГОТИНЕ

Као параметри процеса деформисања материјала струготине користе се фактори деформисања струготине, фактор сабијања струготине, релативно клизање, брзина релативног клизања, квадратно издужење, релативна дилатација и стварни или логаритамски степен деформације.

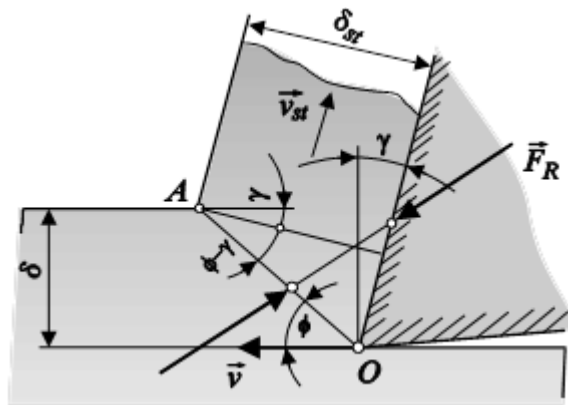
Степен деформације материјала који се претвара у струготину се изражава коефицијентима деформације (факторима деформисања струготине): факторима дебљине, ширине и дужине струготине и фактором површине пресека струготине. За идентификовање степена деформисања струготине најчешће се користи фактор

сабијања струготине који представља однос дебљине струготине (a_s) и дубине резања (a):

$$\lambda = \frac{a_s}{a} = 2 \div 5$$

Вредност фактора сабијања струготине се може дефинисати на бази вредности грудног угла и угла смицања (слика 2.5.).

$$\lambda = \frac{a_s}{a} = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{\sin \phi}$$



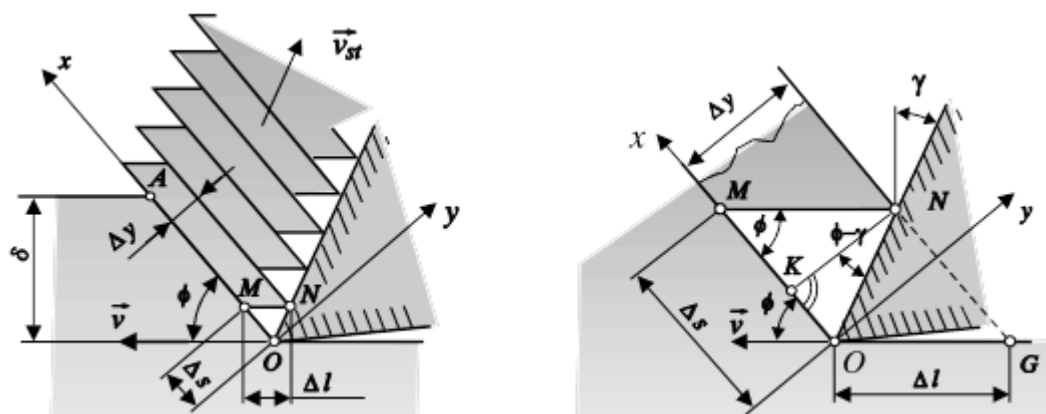
Слика 2.5. Графички приказ грудног угла и угла смицања [1]

2.2. ПРОЦЕС НАСТАНКА СТРУГОТИНЕ

Сегментно настајање ламела струготине састоји се од две фазе у којима се материјал обратка пластично деформише испред алата проузрокујући испупчења материјала на слободној површини струготине. Када се достигне критични ниво раста деформација формира се пукотина која се под притиском алата продужава до површине материјала обратка. Резултат деформације материјала у процесу настајања ламела струготине се састоји од умерено деформисаних сегмената струготине одвојених уским појасом у којем је изражена интензивна деформација материјала. Описани модел формирања ламела струготине приказан је на слици 2.6. (пример 1.) и на слици 2.10. (пример 2.) [4]

Један од битних механизма побуде који изазива вибрације у процесу обраде јесте стварање ламела струготине. Истраживањима је могуће одредити фреквенцију настанка ламела f_{seg} анализама видео снимака формирања струготине. Учестаност формирања ламела струготине линеарно расте са порастом брзине резања, а смањује се

повећањем дубине. Фреквенција настанка струготине може да буде у распону од 3,8 kHz до 250 kHz, при обради тврдых материјала, што доводи до великог осциловања сила на резној ивици алата. Утицај сегментације струготине на хабање алата и квалитет обрађене површине још није детаљно разјашњен, али је утврђено да утиче на интензитета сила у процесу резања и на постојаност алата. Кратерско хабање и појас хабања су примарни процеси хабања алата при брзинама резања у распону 50-800 m/min.



Слика 2.6. Модел формирања ламела струготине (пример 1.)[1]

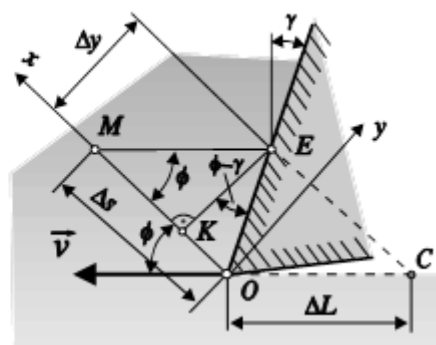
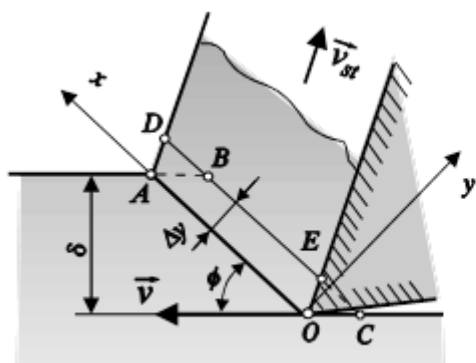
Учестаност формирања сегмената струготине се може одредити на основу познавања: величине релативног клизања $l_k = \frac{\Delta s}{\Delta y}$, времена $\Delta t = \frac{\Delta l}{v} = \frac{\Delta s}{v_s}$ и брзине струготине v_{st} .

$$f_{st} = \frac{l_k}{\Delta t} = \frac{\frac{\Delta y}{\Delta s}}{\frac{\Delta s}{v_s}} = \frac{v_s}{\Delta y} = \frac{\cos \gamma}{\cos(\phi - \gamma)} \frac{v}{\Delta y}, \text{ s}^{-1}$$

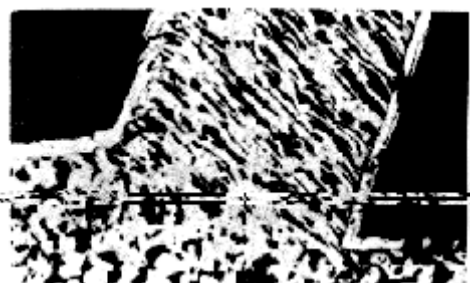
Користећи овај израз може се за претпостављене полазне услове вршити математичко моделирање вредности учестаности f_{st} формирања сегмената струготине.

Одговарајућа мерења, реализована у оквиру овог рада, су показала приближна поклапања прорачунатих и измерених вредности учестаности.

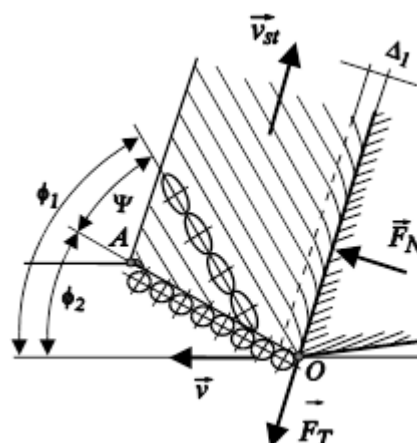
Моделом на слици 2.7. се успешно објашњава појава различитог положаја равни смицања и равни текстуре струготине одређене угловима ϕ_1 и ϕ_2 (слика 2.8. и слика 2.9.). Правац текстуре струготине представља правац максималне деформације корена струготине.



Слика 2.7. Деформисање сегмената струготине [1]



Слика 2.8. Положај равни смицања [1]



Слика 2.9. Угао текстуре струготине [1]

Полазећи од израза за величину релативног клизања $l_k = \Delta s / \Delta y$, односно $l_k = \tan \gamma_k$ (γ_k – угао клизања), долази се до једначине релативног клизања (слика 3.5.):

$$l_k = \frac{\Delta s}{\Delta y} = \cotg \phi + \tan(\phi - \gamma) = \frac{\cos \gamma}{\sin \gamma \cos(\phi - \gamma)}$$

Односно:

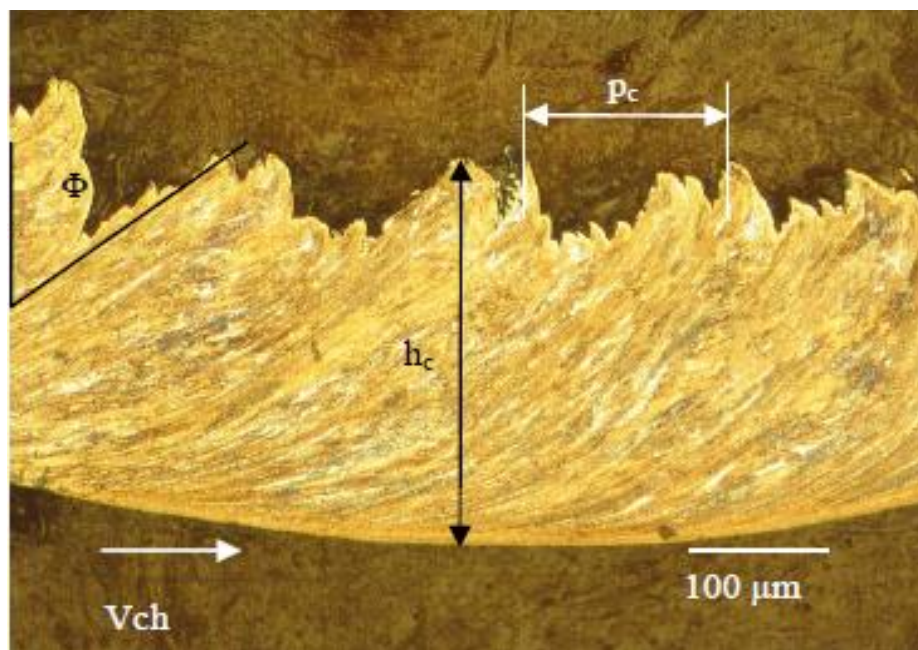
$$l_k = \frac{\lambda^2 - 2\lambda \sin \gamma + 1}{\lambda \cos \gamma}$$

Према овом моделу, силе које изазивају смицајне напоне у ламелама, сегментима струготине, изазивају истовремено и нормалне напоне. То значи да се процес резања може представити као раванско смицање праћено истовременим дејством великих нормалних (хидростатичких) напона. То објашњава појаву ојачања

Стварање ламела у процесу резања карактерише њихова фреквенција настајања. Фреквенција настајања ламела струготине се може израчунати на основу корака настајања ламела p_c , дубина резања (дебљина не деформисаног дела струготине) h , висине деформисаног дела струготине h_{ch} и брзине резања v_c применом израза:

$$f_{lam} = \frac{v_{ch} \cdot h_{ch}}{h \cdot P_c} = \frac{v_{ch}}{\lambda \cdot P_c}$$

13



Слика 2.11. Микроструктура струготине и њене карактеристичне величине мерење на микроскопу [4]

Карактеристичне величине приказане на слици су:

Φ - угао смицања ламела

P_c - корак настајања ламела

v_c - брзина резања

v_{ch} - брзина отицања струготине

На основу наведених параметара може се израчунати фреквенција настајања ламела која садржи и параметре режима обраде и њихов утицај на елементе механичке структуре обрадног система.

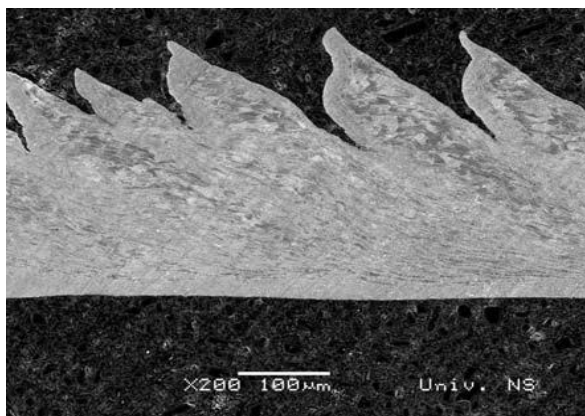
$$f_{lam} = \frac{v_c \cdot f \cdot \sin k}{h_c \cdot P_c}$$

Овај израз у себи садржи параметре везане за резну геометрију алата и технолошке параметре брзину, помак и дубину резања. На основу тога може се закључити да је фреквенција настајања ламела директно пропорционална брзини обраде и помаку а обрнуто пропорционална дубини. Пораст брзине резања директно утиче на фреквенцију настајања ламела струготине, повећање енергије које се огледа кроз повећано ослобађање топлоте и смањењз корака ламела, једном речју повећава се укупна динамика хабања. У изведеним експерименталним истраживањима са плочицом од тврдог метала и опсегом брзине од 200 до 250 m/min јављале су фреквенције сегментације струготине од око 8-100 kHz. Подручје средњих фреквенција настајања

ламела, на основу математичког израчунавања по формули Bähge приближава се измереним фреквенцијама осциловања дршке алата тј. сопственим фреквенцијама од 8,5 kHz до 88 kHz.

Већина истраживања обрадивости материјала усмерена је на механизам формирања струготине и карактеризацију хабања алата. Од значаја за проучавање ефекта хабања алата и морфологију стварања струготине имају и режими обраде. Примећено је да промена степена похабаности алата и услова обраде мења облик насталих ламела струготине.

Хабање алата, параметри процеса резања и њихов утицај на настанак и облик струготине су праћени при експерименталном испитивању извршеним на Департману за производно машинство на факултету техничких наука у Новом Саду. Облик струготине је мерен на микроскопу у зависности од степена похабаности алата, при различитим режимима обраде (брзина резања, помак и дубина резања). Мерење димензија струготине су: корак (размак између ламела), висина зуба (неравнине на слободном крају струготине), висина континуалног дела, укупна дебљина струготине и ширина ламела. Током обраде мерене су вибрације на дршци алата а фреквенција сегментације је израчуната на основу измерених параметара попречног пресека струготине на електронском микроскопу.

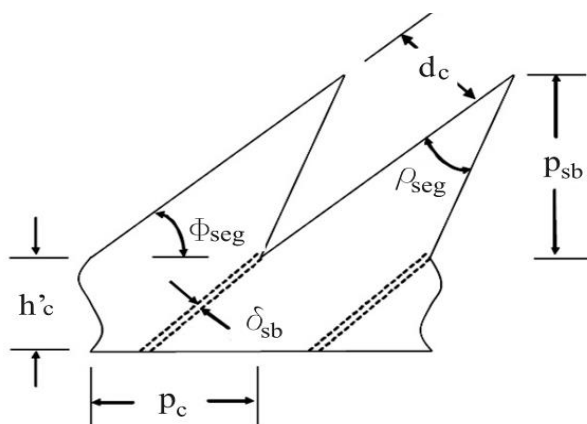


Слика 2.12. Микроскопски снимак попречног пресека струготине при обради похабаним алатом [4]

Слика 2.12. приказује попречни пресек струготине, при обради похабаним алатом снимљен на електронском микроскопу.

На слици 2.13. је приказана морфологија тестерастог облика струготине са карактеристичним димензијама: корак ламела (p_c), висина слободног дела ламела струготине (p_{sb}), висина континуалног (сабијеног) дела струготине (h'_c), ширина

смицања ламела (d_c), појас зоне смицања (δ_{sb}), угао у правцу иницијалне пукотине (Φ_{seg}) и угао слободног дела ламела (p_{seg}).



Слика 2.13. Карактеристичне димензије за израчунавање учестаности настајања струготине [4]

На основу резултата експериманталног испитивања наведени су закључци:

- Средња вредност сегментације слободног дела струготине (корак ламела) (p_c) и висине слободног дела (зуба) (p_{sb}) се повећавају са повећањем хабања алата.
- Корак сегментације, размак између ламела (p_c) расте са брзином резања.
- Висина континуалног дела струготине (h'_c) је већа код новог алата.
- Фреквенција сегментације се повећава са повећањем брзине резања а опада са повећањем степена похабаности алата.

3. ДИНАМИЧКИ КАРАКТЕР ПРОЦЕСА И МОДЕЛИ ФОРМИРАЊА СТРУГОТИНЕ

Потребно је рећи да обраду метала резањем карактерише динамичко понашање система алат – предмет обраде – стезни прибор – машина. Понашање овог система (динамичко) условљено је карактеристикама побудних сила и особинама стабилности (крутости) посматраног система. Настале осцилације су непланиране и непожељне појаве јер могу изазвати нетачност израде дела, смањење века трајања алата, како и оштећење елемената машина. Приликом обраде резањем присутне су, скоро увек, слободне, самопобудне, параметарске и принудне осцилације.

Слободне осцилације настају када на систем не делује никаква променљива принудна сила у функцији времена $F(t)=0$, док је стање равнотеже нарушено произвољним, импулсним силама (нпр. удар услед уласка резног клина у предмет обраде или растерећење услед изласка резног клина из материјала, нагла промена смера кретања у преноснику за помоћно кретање итд.).

Самопобудне осцилације су последица унутрашње нестабилности технолошког система (машина – алат – прибор – предмет обраде) и на основу тога изазваних сопствених осцилација. Не настају као последица деловања спољашњег периодичног оптерећења. Како обрадни систем карактерише његова крутост (еластичност), динамички карактер процеса формирања струготине и постојање узајамног дејства између елемената система и процеса дормирања струготине (нпр. трење), то су ови елементи узрок настанка самопобудних осцилација. Посебну групу ових осцилација представљају параметарске осцилације.

Параметарске осцилације су последица постојања променљивих параметара процеса: променљива крутост, маса или пригушење. Код обраде стругањем, услед променљиве крутости предмета обраде дуж с воје осе и променљиве брзине или дубине резања, долази до осцилаторног кретања чији су параметри (учестаности и амплитуде осциловања) у функцији времена.

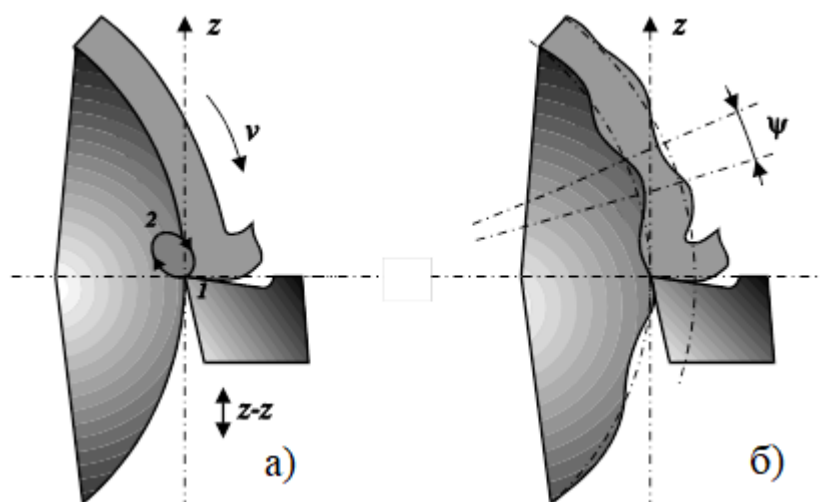
Принудне осцилације настају када на систем делује спољашње променљиво оптерећење $F(t) \neq 0$. Принудне осцилације, код обраде резањем, могу да потичу од неуравнотежених маса обртних елемената машина (зупчаника, осовина, спојница итд.), предмета обраде (променљив пресек струготине, различити додаци за обраду, прекидност предмета обраде итд.) или алата (ексцентричност алата на вратилу итд.).

Уколико се код осциловања система јављају параметарске осцилације, систем се описује нелинеарним диференцијалним једначинама другог реда за које до данас није нађено опште решење. Због тога се углавном оптерећење не тражи, већ се утврђује да ли је кретање система стабилно или није.

Систем изведен из равнотеже импулсном силом осцилује са пригушењем. Међутим, ако је настало осциловање знатно и по смеру супротно од дејства пригушења, може доћи и до раста амплитуде осцилација. У том случају се говори о самопобудним осцилацијама.

Врх алата код самопобудних осцилација описује затворену кривуљу најчешће у облику елипсе, слика 3.1а. За време осциловања врха алата од тачке 1 до тачке 2, промена силе резања има супротну вредност од промене угиба врха алата, док у другом полупериоду осциловања, од тачке 2 до тачке 1, промена силе резања и промена угиба имају исти правац. То значи да се у првом полупериоду осциловања енергија троши или апсорбује, док се у другом полупериоду енергија доводи систему који осцилује, преко силе резања. Како је у овом полупериоду дубина резања у просеку већа него у првом, то ће и сила резања бити већа. То значи да је доведена енергија систему већа од апсорбоване. “Вишак” енергије добијен из процеса резања представља енергију која подржава осциловање алата, тј. енергију самопобудних осцилација.

У највећем броју случајева услед претходно описаног осцилаторног кретања врха алата, обрада резањем се врши на таласастој површини добијеној претходном обрадом, слика 3.1б. Овако настала променљива дубина резања има за последицу одржавање променљивог отпора резања. У зависности од фазног положаја силе и таласасте површине (дефинисаног углом ψ) висина таласа се може смањити или повећати, односно осциловање система се смањује или даље повећава. Такав осцилаторни систем се назива регенеративним.



Слика 3.1 Настајање самопобудних осцилација услед регенеративног ефекта [1]

Крутост елемената као карактеристика обрадног система дефинише учестаности сопственог осциловања појединих елемената система и може се израчунати или експериментално одредити.

Основни проблем при разматрању динамичког карактера процеса резања је објашњење процеса формирања струготине. Питање које се поставља када се говори о обради резањем је: да ли су настале осцилације резултат самопобудних дејстава система алат – предмет обраде – прибор – машина или сам процес резања по себи има сопствену учестаност. На ово питање није нађен једнозначни одговор. Уколико би се располагало апсолутно крутим системом било би могуће разређење ове дилеме, али је практична реализација немогућа. [1]

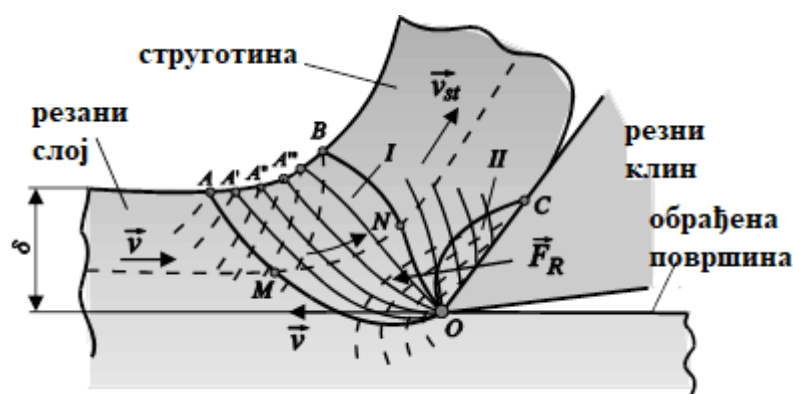
3.1. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛИ ФОРМИРАЊА СТРУГОТИНЕ

Обрада метала резањем се одвија у условима веома специфичних процеса пластичне деформације. У веома малој, уско локализованој, зони долази до резања материјала, изузетно великих пластичних деформација, сложених триболошких процеса на површинама контакта алата и струготине и контакта алата и предмета обраде и до генерисања велике количине топлоте. Сложеност процеса је основни разлог непостојања поузданих математичких модела за описивање и предвиђање механичких, термодинамичких, триболошких и других појава у зони резања.

Полазећи од науке о грађи материјала, теорије пластичности и резултата експерименталних испитивања, резање се може описати као низ процеса који се одвијају наизменично један за другим: процес еластичне деформације, процес

пластичне деформације резног слоја и процес резања, треба нагласити да су пластичне деформације доминантне и да се највећи део рада резања троши на пластично деформисање, док знатно мањи на савладавање отпора трења и занемарљиво мали део на еластичне деформације.

Процес резања започиње дејством резног клина који се креће брзином v и силом резања F_R , на материјал предмета обраде дебљине δ (слика 3.2.).



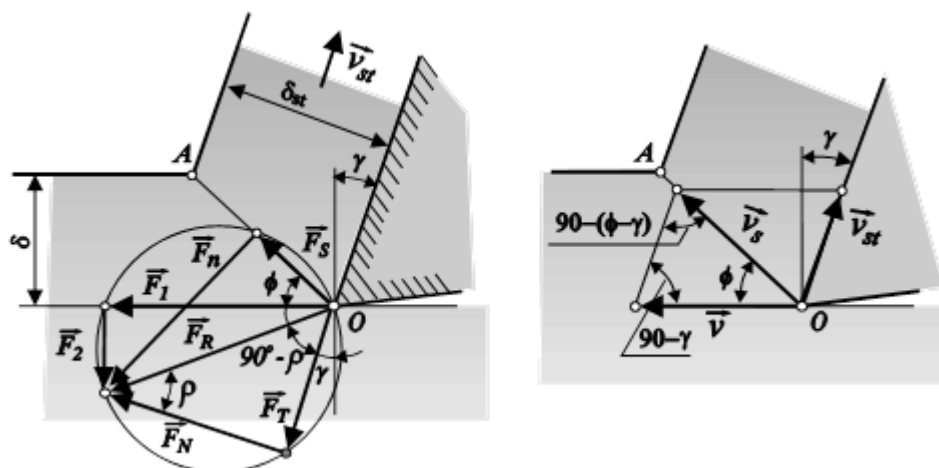
Слика 3.2. Модел формирања струготине [1]

Деформација материјала се врши у простору ограниченом линијама OABO (зона I). Процес пластичних деформација на смицање се одвија не у једној равни, већ у више криволинијских површина. Линија OA дели материјал предмета обраде на део у коме још није дошло до деформисања, смицања и део у коме је започело деформисање. Линија OB представља крајњу површину смицања у којима се процес деформисања завршава и почиње формирање струготине. Овај модел представља најновији, најсложенији и најкомплекснији модел формирања струготине.

Полазећи од Мерчантових претпоставки и раванском напонском и деформационом стању и разлагања силе резања на компоненте (слика 3.3.) може се израчунати угао смицања ϕ :

$$\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}(\gamma - \rho)$$

Где су γ - грудни угао и ρ - угао трења у равни смицања.



Слика 3.3. Одређивање угла положаја равни смицања [1]

Експерименталним путем су уочене разлике израчунатих и измерених вредности. Разлог за то је полазна претпоставка да су вредности напона на смицање τ_s и угла трења ρ независни од угла смицања.

Због тога је Мерчант касније увео измене у свој претходни модел усвајајући чињеницу да отпор смицању код поликристалних материјала није константан већ променљив и да не његову вредност првенствено утиче нормални напон σ који делује на раван смицања. На овај начин се долази до Мерчантовог услова пластичности при обради резањем помоћу кога се израчунава угао смицања:

$$2\phi + \rho - \gamma = C$$

где је C – Мерчантова константа која зависи од врсте материјала предмета обраде.

Поред овог модела за израчунавање угла смицања постоје и други (Sata, 1963. год., Oksi, 1962. год., итд.). Бројна експериментална испитивања указала су на могућност изражавања угла смицања помоћу израза:

$$\phi = C_1 - C_2 (\rho - \gamma)$$

где су C_1 и C_2 константе које зависе од услова у којима се процес резања одвија, врсте материјала предмета обраде и геометрије алата.

Користећи дијаграм на слици 3.3. може се одредити брзина клизања струготине по грудној површини:

$$v_{st} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} v = \frac{v}{\lambda}$$

$$v_s = \frac{\cos \gamma}{\cos(\phi - \gamma)} v$$

где је: $\lambda = \frac{\delta_{st}}{\delta} = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{\sin \phi}$ фактор сабијања струготине.

Претходна разматрања су показала да је процес формирања струготине динамичког карактера. Испитивање динамичких појава код процеса обраде резањем, односно код процеса формирања струготине, су вршили многи истраживачи.

Landberg је вршио испитивања образовања сегмената струготине. При томе је утврдио да при малим брзинама резања учестаност осциловања измерене силе резања одговара учестаностима образовања сегмената струготине. Учестаност формирања сегмената f_{st} је одређивана на основу дужине сегмената струготине l_{st} уз познавање брзине резања v , дубине резања a и дебљине струготине. Средња вредност брзине струготине је:

$$v_{st} = \frac{v}{\lambda} = \frac{\delta}{\delta_{st}} v$$

а учестаност формирања струготине:

$$f_{st} = \frac{1000 v_{st}}{60 l_{st}} = \frac{1000}{60} \frac{v \delta}{\delta_{st} \cdot l_{st}} = \frac{1000}{60} \frac{v}{l_{st} \cdot \lambda} \quad , \quad s^{-1} \quad ,$$

где је λ фактор сабијања струготине.

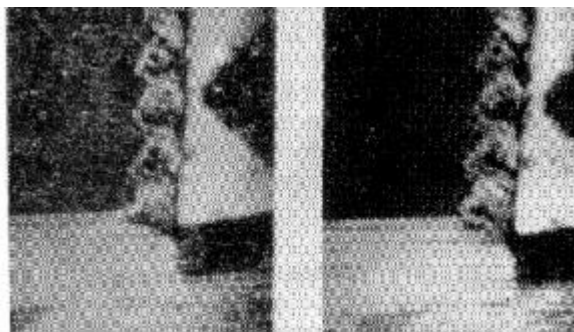
У табели 3.1. су дате неке од вредности које је добио Landberg за обраду челика при обради стругањем: корак 0,4 mm/o; дубина резања 3,3 mm; грудни угао 0°, леђни угао 6°15', средњи пречник предмета обраде 100,5 mm дужине 1270 mm.

Табела 3.1. Учестаности формирања сегмената струготине [1]

Брзина резања v m/min	Дужина сегмента струготине l_{st} mm	Средња дебљина струготине δ_{st} mm	Израчуната учестаност на основу броја сегмената s^{-1}
33	0.83	1,27	210
68	0.78	1,01	565
133	0.55	0,96	1640
173	0.50	0,86	2750
193	0.50	0,81	3230
259	0.50	0,89	4020

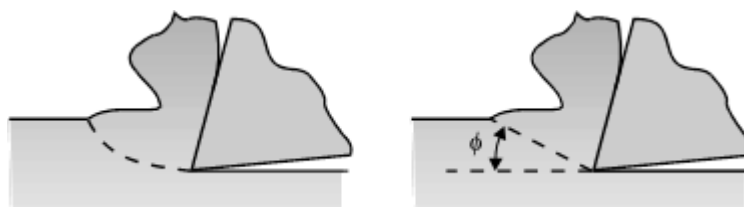
Landberg је закључио да је појава осциловања условљена, у основи, карактером процеса образовања струготине. Да би се појавиле самопобудне осцилације потребно је да учестаност формирања сегмената струготине буде блиска некој од учестаности сопственог осциловања елемената система алат – предмет обраде – прибор – машина. Ferrarezi је вршио испитивања којима је потврдио Landbergove резултате при чему је констатовао да крутост машине не утиче на учестаност формирања струготине.

Процес образовања струготине је најпогодније пратити користећи тв камеру са могућношћу добијања великог броја снимака у секунди (изнад 5000). На тај начин се може доћи до веома великог броја информација које могу послужити за развој модела формирања струготине (слика 3.4.).



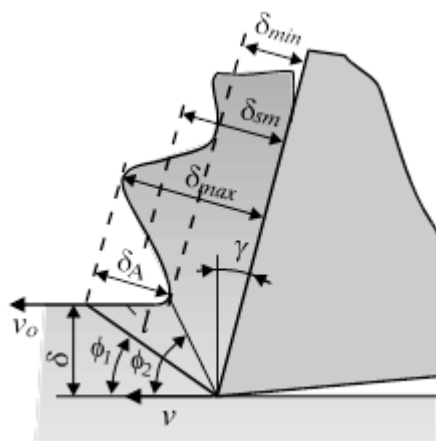
Слика 3.4. Формирање струготине [1]

Уочљиво је да је зона смицања искривљена. Међутим ради моделирања, са довољном тачношћу, зона смицања се може представити у виду равни под углом ϕ (слика 3.5).



Слика 3.5. Зона смицања и угао смицања [1]

На основу информација добијених снимањем зоне резања Albreht је поставио динамички модел формирања струготине и утврдио изразе за одређивање учестаности и амлитуде цикличног образовања струготине (слика 3.6.).



Слика 3.6. Динамички модел формирања струготине [1]

Услед кретања резног клина материјал у зони смицања, непосредно испред резног врха се помера брзином једнаком брзини резања. На другом крају зоне смицања материјал се креће брзином v_0 . Услед динамичког карактера процеса резања ове две брзине нису једнаке. У одређеном моменту времена материјал на слободној површини се креће мањом брзином него материјал близак резној ивици, $v_0 < v$. Зона смицања се може представити зоном омеђеном угловима ϕ_1 и ϕ_2 . Угао ϕ_2 је максимални угао смицања, а ϕ_1 минимални.

Слободни крај равни смицања ће се релативно померити за дужину l при брзини $(v-v_0)$ у времену T , односно:

$$l = T (v - v_0)$$

Са слике 3.6. је:

$$l = \delta (\operatorname{ctg} \phi_1 - \operatorname{ctg} \phi_2)$$

На основу ове две једначине добија се учестаност образовања сегмената:

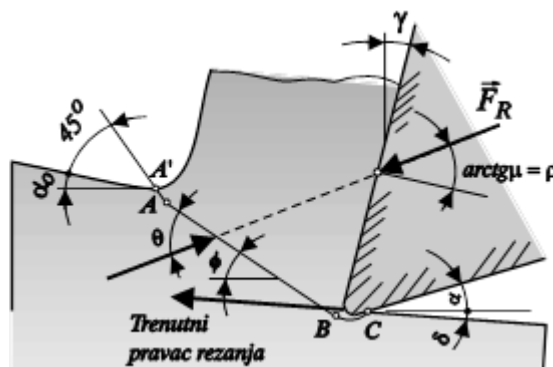
$$f_{st} = \frac{1}{T} = \frac{v-v_0}{\delta} \frac{1}{\operatorname{ctg} \phi_1 - \operatorname{ctg} \phi_2}$$

Амплитуда осциловања дебљине струготине се може одредити на основу геометрије са слике 3.7. :

$$\delta_A = \delta_{max} - \delta_{min} = \delta \cos \gamma (\operatorname{ctg} \phi_1 - \operatorname{ctg} \phi_2)$$

На основу добијених израза се може закључити да су v_0 , ϕ_1 и ϕ_2 карактеристике процеса резања за дате услове (материјал предмета обраде и грудни угао алата). Изрази показују да је учестаност пропорционална брзини резања, а обрнуто пропорционална дубини резања. Такође, амплитуда промене дебљине струготине је пропорционална дубини резања и није у зависности од брзине резања.

Као што је у претходном делу приказано, у највећем броју случајева за инжењерске прорачуне се може прихватити Мерчантов модел зоне смицања, тј. деформисање и смицање материјала предмета обраде у танком слоју, односно дуж равни смицања. Површи смицања су међусобно паралелне и највећим делом се могу апроксимирати равнима смицања (дуж АВ, слика 3.7.). У крајњим тачкама А и В површ смицања се простире ка врху резног клина алата и слободној површини струготине.



Слика 3.7. Раван смицања [1]

Овакав модел се може прихватити за релативно веће дубине резања, јер код малих дубина део површи ВС има одлучујући утицај на процес резања, услед велике дужине контакта леђне површине алата и обрађене површине предмета обраде (резни клин алата није оштар већ представља заобљену површ). [1]

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО

Експериментални део је обављен у лабораторији за обраду метала резањем и трибологију на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу. Циљ овог истраживања је пре свега одређивање дебљине сегмената струготине, односно ламела које се формирају приликом обраде резањем. На основу услова обраде тј. улазних параметара обраде (брзина, посмак, дубина резања, итд.), лакше је одредити дебљину сегмената струготине као и дефинисање динамичког карактера формирања струготине.

На самом почетку истраживања издвојено је 36 узорка струготине, који су добијени различитим режимима обраде. Од сваког узорка струготине одсечен је мали део, довољан за експеримент. Ситни комади струготине су уредно распоређени и означени бројевима од 1 до 36. Струготина је добијена обрадом резања помоћу троугаоне плочице па самим тим сваки комадић струготине има одговарајући префикс са бројем. Након овог корака, сваки комадић струготине је посматран под микроскопском камером (слика 4.1), помоћу које када се увелича део струготине види свака ламела јасно и посебно одвојена једна од друге. Уз помоћ ове камере забележене су 36 слике сваког дела струготине под одговарајућим снопом светлости ради боље слике. Ове слике су смештене у табелама 4.2. , 4.3. и 4.4. као и основни параметри сваке струготине. Испод слика су наведени подаци који ближе описују струготину и њене ламеле. У те податке спадају основни параметри као што су: назив струготине, s = посмак [mm/o] , a = дубина резања [mm] , v = брзина резања [m/min], δ = дебљина сегмента струготине [mm], која је одређена помоћу светлосног микроскопа, где је мерена дебљина сваке ламеле.



Слика 4.1 Микроскопска камера која је коришћена у експерименту

Камера се може повезати помоћу USB кабла са рачунаром и након тога се помоћу дугмета на каблу правити слике струготина. Увеличање струготина је могуће и до 400 пута. Такође на камери се налази лампа која повећава квалитет слика због лепше прегледности. Остале техничке спецификације су приказане у табели 4.1.

Табела 4.1. Техничке спецификације камере

Сензор	2.0MP CMOS сензор
Резолуција слике	1600x1200 пиксела, формат: BMP
Резолуција видеа	1600x1200 пиксела, формат: AVI, 20 FPS
Даљина фокуса	5mm
Увећање	1x - 400x
Осветљење	бела LED лампица
Дужина USB кабла	165cm
Пречник цеви	12mm
Дужина цеви	140mm
Тежина камере	100g

Параметри као што су дубина, брзина и посмак приликом резања су дефинисани приликом саме обраде резањем, а што се тиче дужине сегмената струготине, она је дефинисана касније уз помоћ универзалног мерног микроскопа

(слика 4.2) где је мерена дужина од почетка једне струготине до краја. Тако је урађено за свих 36 комада, што спада у најважнији корак у овом експерименту.



Слика 4.2 Универзални мерни микроскоп

За експериментална испитивања дебљине сегмента струготине при обради стругањем у лабораторији за обраду метала резањем на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу формиран је одговарајући мерни ланац мерним микроскопом и камером.

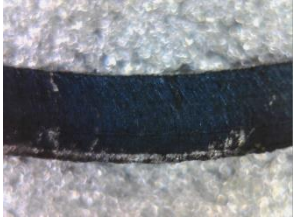
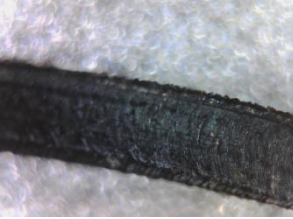
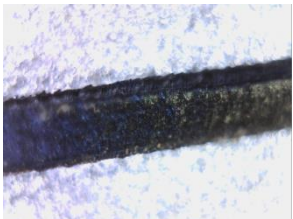
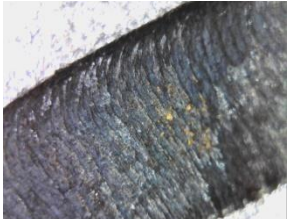
Испитивања су вршена при обради стругањем предмета обраде од 30CrNiMo8 (Č5432) пречника 70 mm, дужине 400 mm, у побољшаном стању тврдоће 40 HRC, на универзалном стругу D-480, Првомајска, снаге 10KW, без присуства средства за хлађење и подмазивање.

Стругарски нож – Т : PTG NR 2525M16 – ознака ножа, CORUN Ужице

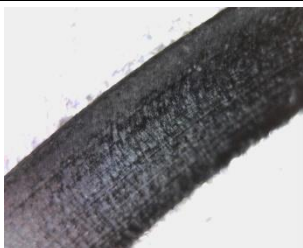
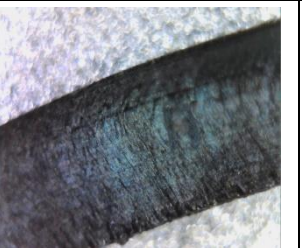
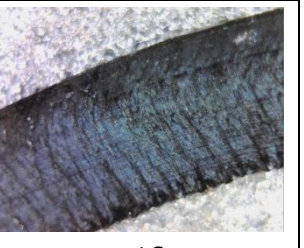
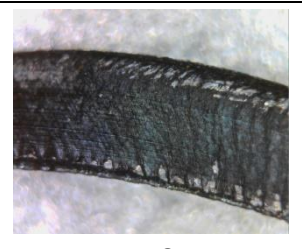
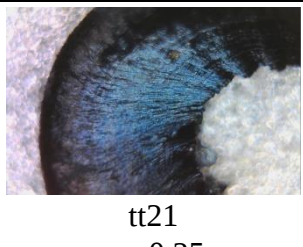
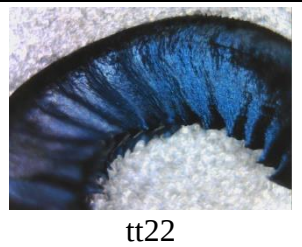
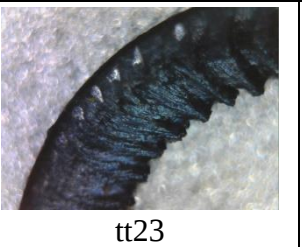
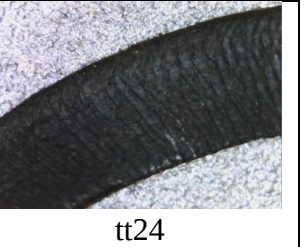
Плочица : TNMM 160404-CM – ознака плочице, CORUN Ужице

4C15 – ознака квалитета превлаке, P15- ознака квалитета тврдог метала.

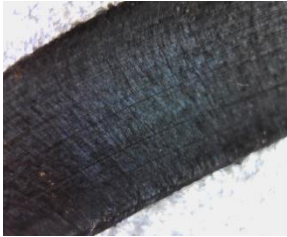
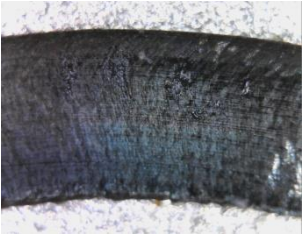
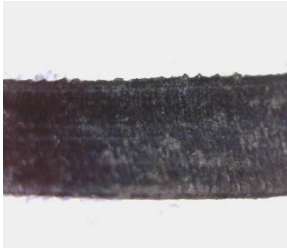
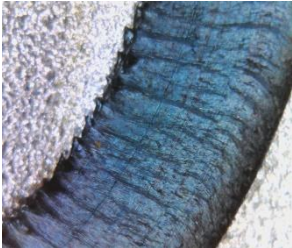
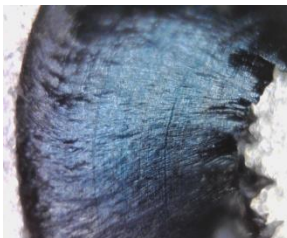
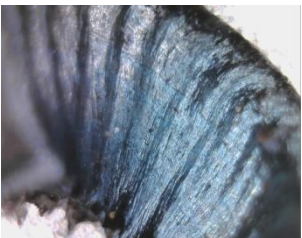
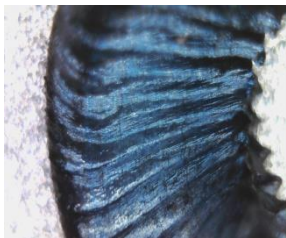
Табела 4.2. Слике делића струговина и њихови основни параметри (1-12)

 tt1 $s = 0,1$ $a = 0,3$ $v = 72,492$ $\delta = 0,108$	 tt2 $s = 0,1$ $a = 0,3$ $v = 91,891$ $\delta = 0,105$	 tt3 $s = 0,1$ $a = 0,3$ $v = 114,354$ $\delta = 0,115$	 tt4 $s = 0,1$ $a = 0,3$ $v = 144,984$ $\delta = 0,11$
 tt5 $s = 0,16$ $a = 0,3$ $v = 72,492$ $\delta = 0,164$	 tt6 $s = 0,16$ $a = 0,3$ $v = 91,891$ $\delta = 0,151$	 tt7 $s = 0,16$ $a = 0,3$ $v = 114,354$ $\delta = 0,134$	 tt8 $s = 0,16$ $a = 0,3$ $v = 144,984$ $\delta = 0,128$
 tt9 $s = 0,25$ $a = 0,3$ $v = 72,492$ $\delta = 0,221$	 tt10 $s = 0,25$ $a = 0,3$ $v = 91,891$ $\delta = 0,197$	 tt11 $s = 0,25$ $a = 0,3$ $v = 114,354$ $\delta = 0,203$	 tt12 $s = 0,25$ $a = 0,3$ $v = 144,984$ $\delta = 0,199$

Табела 4.3. Слике делића струговина и њихови основни параметри (13-24)

 tt13 $s = 0,1$ $a = 1$ $v = 72,492$ $\delta = 0,164$	 tt14 $s = 0,1$ $a = 1$ $v = 91,891$ $\delta = 0,144$	 tt15 $s = 0,1$ $a = 1$ $v = 114,984$ $\delta = 0,128$	 tt16 $s = 0,1$ $a = 1$ $v = 144,984$ $\delta = 0,13$
 tt17 $s = 0,16$ $a = 1$ $v = 72,492$ $\delta = 0,225$	 tt18 $s = 0,16$ $a = 1$ $v = 91,891$ $\delta = 0,215$	 tt19 $s = 0,16$ $a = 1$ $v = 114,354$ $\delta = 0,22$	 tt20 $s = 0,16$ $a = 1$ $v = 144,984$ $\delta = 0,186$
 tt21 $s = 0,25$ $a = 1$ $v = 72,492$ $\delta = 0,263$	 tt22 $s = 0,25$ $a = 1$ $v = 91,891$ $\delta = 0,27$	 tt23 $s = 0,25$ $a = 1$ $v = 114,354$ $\delta = 0,256$	 tt24 $s = 0,25$ $a = 1$ $v = 144,984$ $\delta = 0,252$

Табела 4.4. Сlike делића струговина и њихови основни параметри (25-36)

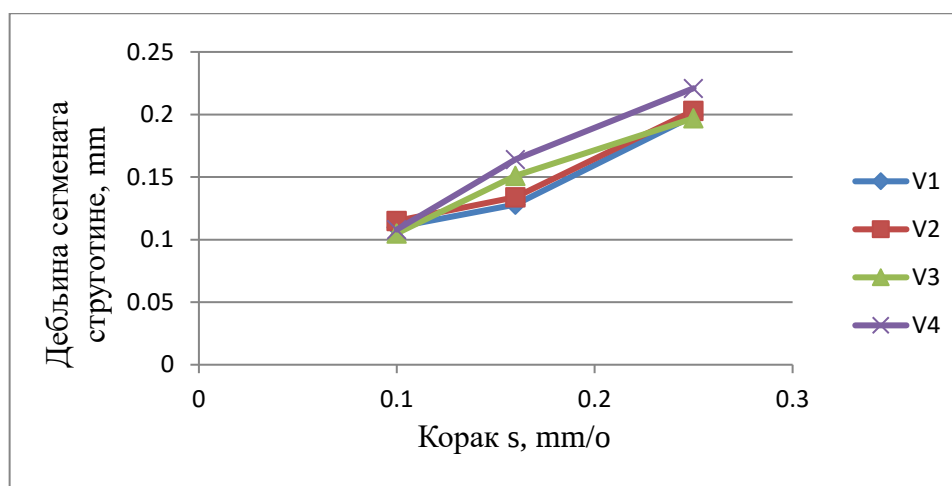
 tt25 $s = 0,1$ $a = 1,5$ $v = 72,492$ $\delta = 0,2$	 tt26 $s = 0,1$ $a = 1,5$ $v = 91,891$ $\delta = 0,191$	 tt27 $s = 0,1$ $a = 1,5$ $v = 114,354$ $\delta = 0,175$	 tt28 $s = 0,1$ $a = 1,5$ $v = 144,984$ $\delta = 0,14$
 tt29 $s = 0,16$ $a = 1,5$ $v = 72,492$ $\delta = 0,252$	 tt30 $s = 0,16$ $a = 1,5$ $v = 91,891$ $\delta = 0,248$	 tt31 $s = 0,16$ $a = 1,5$ $v = 114,354$ $\delta = 0,238$	 tt32 $s = 0,16$ $a = 1,5$ $v = 144,984$ $\delta = 0,206$
 tt33 $s = 0,25$ $a = 1,5$ $v = 72,492$ $\delta = 0,294$	 tt34 $s = 0,25$ $a = 1,5$ $v = 91,891$ $\delta = 0,267$	 tt35 $s = 0,25$ $a = 1,5$ $v = 114,354$ $\delta = 0,275$	 tt36 $s = 0,25$ $a = 1,5$ $v = 144,984$ $\delta = 0,236$

4.1. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

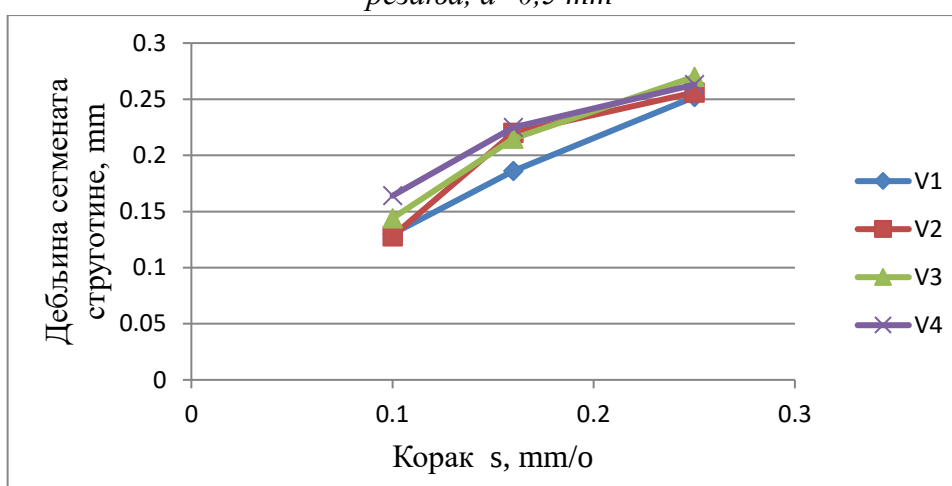
Након дефинисања претходно поменутих параметара следило је убацивање у табелу. За сваку струготину је уписан редни број, облик струготине, посмак, број обртаја по минути приликом резања, дубина резања, брзина резања као и дебљина сваког сегмента струготине. Преглед свих ових података може се видети на слици 4.3.

Назив фајла	Р. Бр..	Облик струготине	Oblik strugotine	s	n	a	Дебљина б	v
tt4	1	4.3/4.1	3	0.1	710	0.3	0.11	144.984
tt3	2	4.3/4.1	3	0.1	560	0.3	0.115	114.354
tt2	3	4.3/4.1	3	0.1	450	0.3	0.105	91.8916
tt1	4	4.3/4.1	3	0.1	355	0.3	0.108	72.4922
tt8	5	2.3	3	0.16	710	0.3	0.128	144.984
tt7	6	2.3/4.1	3	0.16	560	0.3	0.134	114.354
tt6	7	4.1/2.3	3	0.16	450	0.3	0.151	91.8916
tt5	8	4.1	3	0.16	355	0.3	0.164	72.4922
tt12	9	4.1/4.3	4	0.25	710	0.3	0.199	144.984
tt11	10	4.1/4.3	4	0.25	560	0.3	0.203	114.354
tt10	11	4.1	4	0.25	450	0.3	0.197	91.8916
tt9	12	4.1	4	0.25	355	0.3	0.221	72.4922
tt16	13	2.3	3	0.1	710	1	0.13	144.984
tt15	14	2.3	3	0.1	560	1	0.128	114.354
tt14	15	4.3	3	0.1	450	1	0.144	91.8916
tt13	16	4.3	3	0.1	355	1	0.164	72.4922
tt20	17	4.2	3	0.16	710	1	0.186	144.984
tt19	18	4.3/4.2	3	0.16	560	1	0.22	114.354
tt18	19	4.3	3	0.16	450	1	0.215	91.8916
tt17	20	4.3	3	0.16	355	1	0.225	72.4922
tt24	21	6.2	10	0.25	710	1	0.252	144.984
tt23	22	6.2	10	0.25	560	1	0.256	114.354
tt22	23	6.2	10	0.25	450	1	0.27	91.8916
tt21	24	6.2	10	0.25	355	1	0.263	72.4922
tt28	25	2.3	2	0.1	710	1.5	0.14	144.984
tt27	26	2.3	2	0.1	560	1.5	0.175	114.354
tt26	27	2.3	2	0.1	450	1.5	0.191	91.8916
tt25	28	2.3	2	0.1	355	1.5	0.2	72.4922
tt32	29	2.3/2.2	2	0.16	710	1.5	0.206	144.984
tt31	30	2.3/2.2	2	0.16	560	1.5	0.238	114.354
tt30	31	2.3	2	0.16	450	1.5	0.248	91.8916
tt29	32	2.3	2	0.16	355	1.5	0.252	72.4922
tt36	33	6.1/6.2	10	0.25	710	1.5	0.236	144.984
tt35	34	6.1/6.2	10	0.25	560	1.5	0.275	114.354
tt34	35	6.1/6.2	10	0.25	450	1.5	0.267	91.8916
tt33	36	6.1/6.2	10	0.25	355	1.5	0.294	72.4922

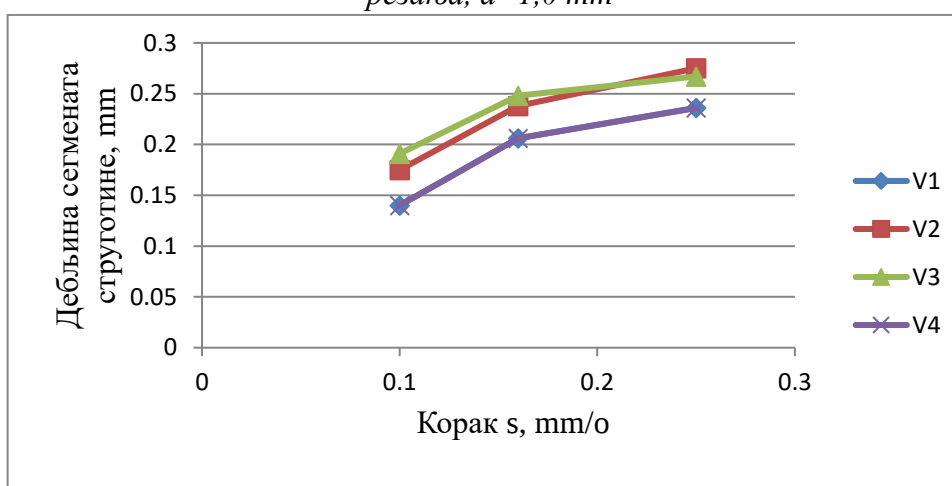
Слика 4.3. Типови струготина са основним параметрима добијених у експерименту



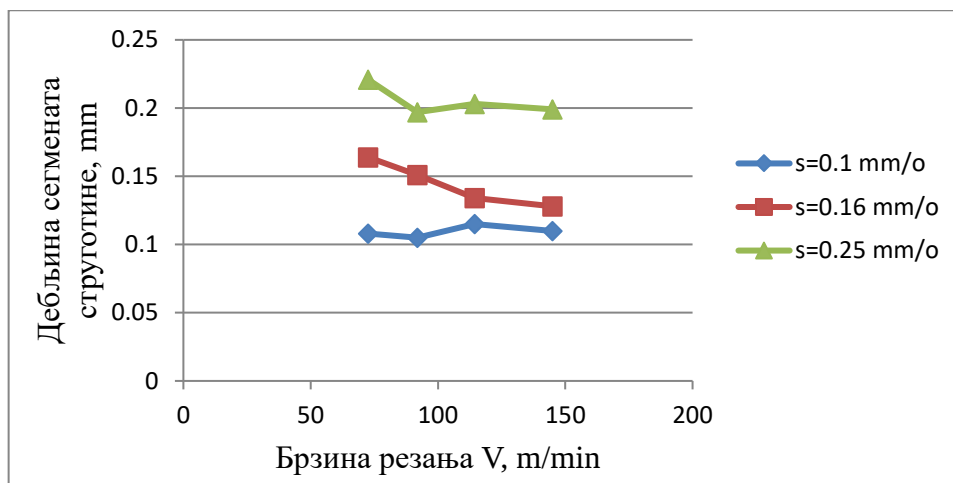
Слика 4.4. Дијаграм дебљине сегмената струготине у зависности од корака и брзине резања, $a=0,5 \text{ mm}$



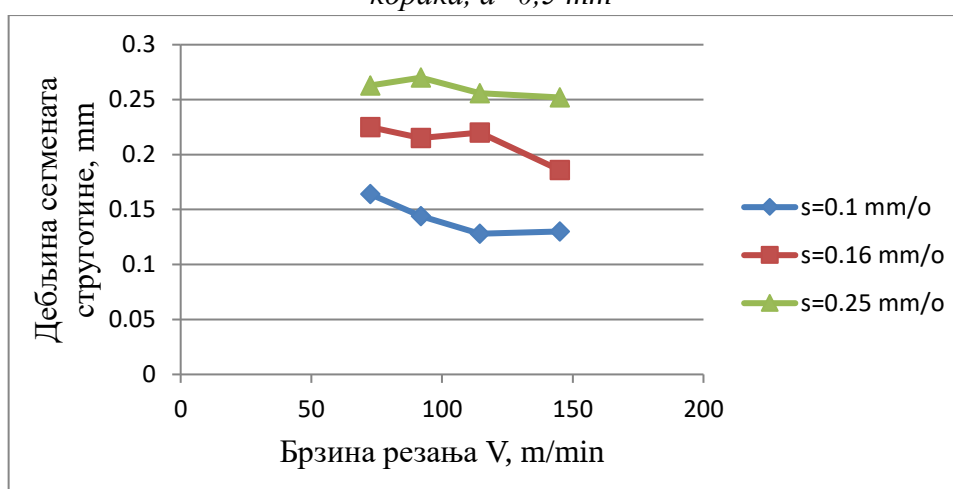
Слика 4.5. Дијаграм дебљине сегмената струготине у зависности од корака и брзине резања, $a=1,0 \text{ mm}$



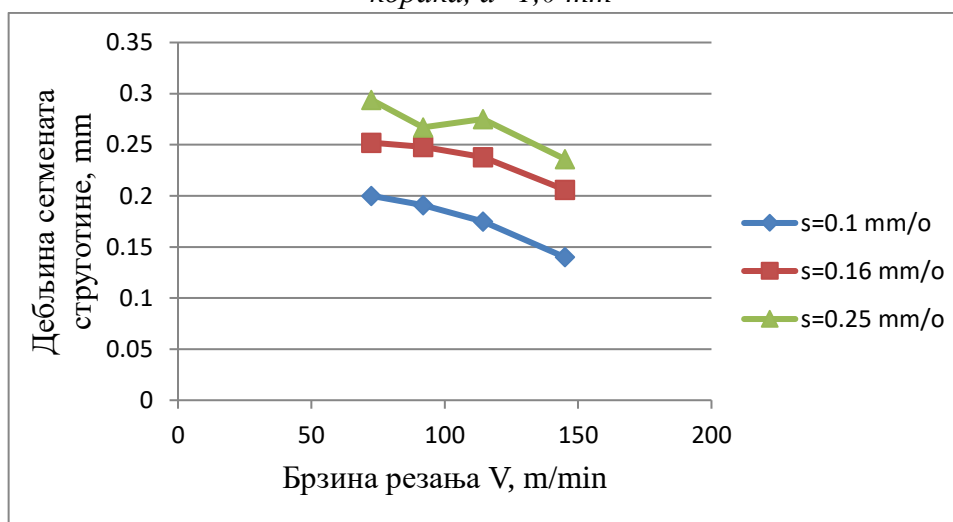
Слика 4.6. Дијаграм дебљине сегмената струготине у зависности од корака и брзине резања, $a=1,5 \text{ mm}$



Слика 4.7. Дијаграм дебљине сегмената струготине у зависности од брзине резања и корака, $a=0,5 \text{ mm}$



Слика 4.8. Дијаграм дебљине сегмената струготине у зависности од брзине резања и корака, $a=1,0 \text{ mm}$



Слика 4.9. Дијаграм дебљине сегмената струготине у зависности од брзине резања и корака, $a=1,5 \text{ mm}$

На основу резултата мерења, добијени су дијаграми који приказују зависност дебљине сегмента струготине од посмака за различите вредности брзина резања и зависност дебљине сегмента струготине од брзине резања за различите вредности посмака (слике 4.4. , 4.5. и 4.6.) и (слике 4.7. , 4.8. и 4.9).

На прва три дијаграма види се да криве које представљају дебљину сегмената струготине при промени корака и брзине резања расту. Како се вредност брзине резања и корака повећава, тако криве које представљају дебљину сегмената струготине расту. То се уочава на сва три дијаграма брзина.

Остала три дијаграма графички приказују криве које представљају дебљину сегмената струготине у зависности од брзине резања при три различа корака. На првом дијаграму (слика 4.7.) види се да са променом брзине резања и са променом корака, криве које представљају дебљину сегмента струготине остају прилично константне изузев криве означене црвеном бојом која на брзини од 100-150 m/min благо опада.

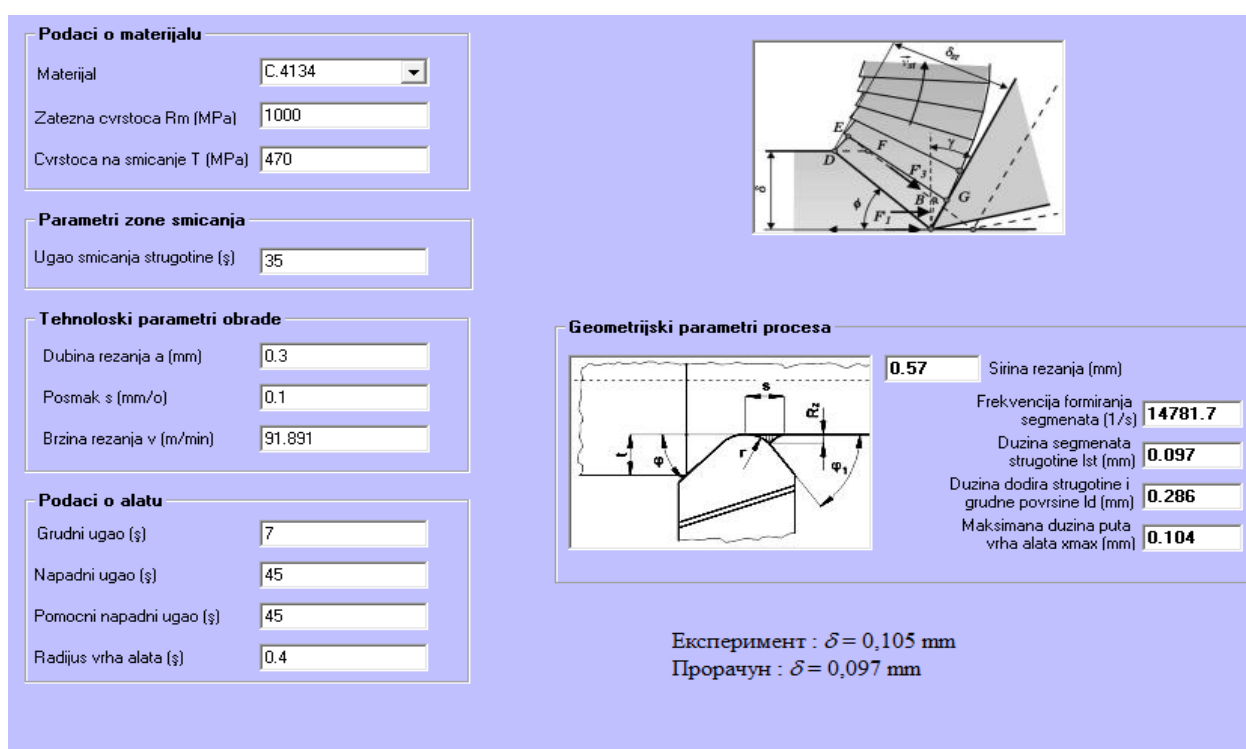
Код другог дијаграма (слика 4.8.) ситуација је скоро иста, зелена крива је прилично константна, док црвена нагло опада за вредност брзине 100-150 m/min и за вредност корака 0,25 - 0,2 mm/o. Док плава крива неко време благо опада па наставља константно.

Трећи дијаграм који графички приказује дебљину сегмената струготина (слика 4.9) је специфичан по томе што код њега све три криве опадају како се мењају вредности оса. Примећујемо да са повећањем брзине ове три криве опадају, а са друге стране вредност дебљине сегмента струготине такође опада.

Дијаграми су доста битни јер приказују како се понашају одређени параметри у зависности од других параметара. Тако се лакше одређује којим режимом је најпогодније обављати процес резања. Пошто су параметри у великој међусобној зависности, мора се пазити како промена једног параметра утиче на други да би на крају добили што већи квалитет обраде.

4.2. ПОРЕЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ДОБИЈЕНИХ ПАРАМЕТАРА СА МАТЕМАТИЧКИМ МОДЕЛОМ СТРУГОТИНЕ

Након добијања резултата мерења сегмента струготине експерименталним путем, извршено је поређење са вредностима добијеним у програму који се зове DynaChip. Овај програм је направљен на бази једноставног математичког модела прорачуна димачких карактеристика процеса обраде стругањем. У прорачун се уносе основни подаци као што су: врста челика од кога је материјал предмета обраде, затезна чврстоћа материјала, чврстоћа на смицање, угао смицања струготине, дубина резања, посмак, брзина резања, грудни угао, нападни угао, помоћни нападни угао, радијус врха алата. Подаци на излазу из овог програма су: ширина резања, фреквенција формирања сегмената, дужина сегмената струготине, итд. Примена овог програма је урађена на неколико примера реализованих експерименталним испитивањима. На сликама 4.10. , 4.11. и 4.12 су приказани резултати прорачуна дебљине сегмената струготине, као и вредности добијене експерименталним путем.



Слика 4.10. Резултати прорачуна и експерименталних испитивања за пример 1
 $a = 0,3 \text{ mm}$, $s = 0,1 \text{ mm/o}$, $v = 92 \text{ m/min}$

Podaci o materijalu

Materijal	C.4134
Zatezna čvrstoća Rm (MPa)	1000
Čvrstoća na smicanje T (MPa)	470

Parametri zone smicanja

Ugao smicanja strugotine (°)	35
------------------------------	----

Tehnološki parametri obrade

Dubina rezanja a (mm)	1
Posmak s (mm/o)	0.16
Brzina rezanja v (m/min)	72.492

Podaci o alatu

Grudni ugao (°)	7
Napadni ugao (°)	45
Pomoćni napadni ugao (°)	45
Radius vrha alata (mm)	0.4

Geometrijski parametri procesa

1.48	Sirina rezanja (mm)
	Frekvencija formiranja segmenata (1/s)
0.227	Duzina segmenata strugotine l (mm)
0.955	Duzina dodira strugotine i gudne površine ld (mm)
0.345	Maksimalna duzina puta vrha alata x_max (mm)

Эксперимент : $\delta = 0,225 \text{ mm}$
Прорачун : $\delta = 0,227 \text{ mm}$

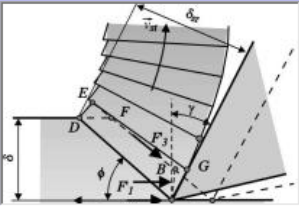
Слика 4.11. Резултати прорачуна и експерименталних испитивања за пример 2
 $a = 1 \text{ mm}$, $s = 0,16 \text{ mm/0}$, $v = 73 \text{ m/min}$

Podaci o materijalu	
Materijal	C.4134
Zatezna cvrstoca Rm (MPa)	1000
Cvrstoca na smicanje T (MPa)	470

Parametri zone smicanja	
Ugao smicanja strugotine (ϕ)	35

Tehnoloski parametri obrade	
Dubina rezanja a (mm)	1
Posmak s (mm/o)	0.25
Brzina rezanja v (m/min)	114.354

Podaci o alatu	
Grudni ugao (γ)	7
Napadni ugao (δ)	45
Pomocni napadni ugao (δ_1)	45
Radius vrha alata (r)	0.4



Geometrijski parametri procesa	
Sirina rezanja (mm)	1.51
Frekvencija formiranja segmenata (1/s)	5518.5
Duzina segmenata strugotine l _{st} (mm)	0.224
Duzina dodira strugotine i grudne površine l _d (mm)	0.955
Maksimalna duzina puta vrha alata x _{max} (mm)	0.345

Эксперимент : $\delta = 0,256 \text{ mm}$
 Прорачун : $\delta = 0,224 \text{ mm}$

Слика 4.12. Резултати прорачуна и експерименталних испитивања за пример 3
 $a = 1 \text{ mm}$, $s = 0,25 \text{ mm/0}$, $v = 114 \text{ m/min}$

5. ЗАКЉУЧАК

Проучавање динамике процеса обраде резањем на основу динамичких карактеристика параметара резања представљало је стални изазов за многе истраживаче од првих проучавања па све до данас. Истраживања из ове области су усмерена на неколико основних циљева :

- утицај динамичких карактеристика машине на излазне ефекте процеса
- утицај услова обраде и карактеристика елемената обрадног процеса на динамички карактер параметара резања
- математичко моделирање и симулација динамичког понашања елемената обрадног система
- развој система за управљање обрадним системом а основу динамичких карактеристика параметара резања.

Пре проналажења параметара и модела за управљање процесом резања, извршена је анализа динамике процеса формирања струготине, а затим моделирање осцилаторног кретања алата и предмета обраде и експериментално су одређени параметри њиховог осциловања. Добијене вредности су помогле за планирање експеримента и избор параметара за идентификацију и надзор динамике процеса резања.

Након анализирања математичких модела формирања струготине у раду су приказани примери примене софтвера реализованог на основу релативно новог модела који у себи садржи параметре за опис динамичког карактера резања. Полазећи од Мерчантове претпоставке о раванском напонском и деформационом стању и услова пластичности при обради резањем формирану су изрази за брзину смицања, брзину струготине и фактор сабијања струготине.

На почетку експерименталног рада су направљене слике делова струготине за различите услове обраде. Прегледом слика може се закључити да се са променом параметара обраде резањем мењају дебљине сегмента струготине. Види се да што је мањи посмак код обраде резањем то је мања израженост ламела (сегмената) струготине док код струготина добијених већим посмаком, јасно се види свака ламела. На пример, код делића струготине који носи ознаку tt1 и посмак 0,1 mm/o се види да нема

изражених сегмената тј. ламела, док се код примера tt12 са посмаком 0,25 mm/o јасно види свака ламела.

Из дијаграма добијених на основу параметара резања и дебљине сегмената струготине се виде међусобне зависности истих. На прва три дијаграма, приказане су криве које графички представљају зависност дебљине сегмената струготине од корака и брзине резања. Може се закључити да криве са променом брзине резања и променом корака расту у сва три случаја. Код трећег дијаграма, који представља криве дебљине сегмената струготине, чак долази до преклапања две криве што показује да су параметри резања слични. На остала три дијаграма су дате криве које графички приказују дебљину сегмената струготине у зависности од брзине резања при три различита корака. Закључује се да су криве константне или опадају, што показује да са повећањем брзине резања а смањењем посмака, криве дебљине сегмента струготине мењају смер нагло на доле. Код сва три дијаграма, случај се понавља.

Поређењем вредности дебљине сегмената струготине добијених експерименталним путем и вредности добијених помоћу програма закључује се да су одступања вредности дебљине сегмената струготине веома мала. Иако је програм којим је вршен прорачун дебљине сегмената струготине креиран на основу једноставног математичког модела формирања струготине може се закључити да добијени резултати прорачуна веома мало одступају од резултата добијених експерименталним путем.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Богдан Недић, Динамика процеса резања, књига, Машински факултет, Крагујевац 2006.
- [2] Мирослава Стевановић, Процес стварања струготине, презентација, Техничка школа, Смедерево 2013-2014.
- [3] Милош Ракоњац, Струготина, скрипта, Технички факултет, Чачак 2009.
- [4] Ацо Антић, Милан Зељковић, Александар Живковић, Слободан Табаковић, Утицај процеса формирања струготине на осциловање и динамику хабања алата, скрипта, техничких наука, Нови Сад 2010.
- [5] Богдан Недић, Миодраг Лазић, Производне технологије, скрипта, Машински факултет, Крагујевац 2007.