



**УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ
СА ПРИВРЕМЕНИМ СЕДИШТЕМ У
КОСОВСКОЈ МИТРОВИЦИ**

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Обрад Аничих

**АНАЛИЗА И МОДЕЛИРАЊЕ
ПАРАМЕТАРА РЕЗАЊА КОД ОБРАДЕ
СТРУГАЊЕМ ПРИМЕНОМ
ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА**

Косовска Митровица, 2018

**УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ
СА ПРИВРЕМЕНИМ СЕДИШТЕМ У
КОСОВСКОЈ МИТРОВИЦИ**

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА



Обрад Д. Аничич

**АНАЛИЗА И МОДЕЛИРАЊЕ
ПАРАМЕТАРА РЕЗАЊА КОД ОБРАДЕ
СТРУГАЊЕМ ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ
НЕУРОНСКИХ МРЕЖА**

Докторска дисертација

Косовска Митровица, 2018

**UNIVERSITY OF PRISTINA
TEMPORARY SETTLED IN
KOSOVSKA MITROVICA**

FAKULTY OF TECHNICAL SCIENCES



Obrad D. Aničić

**ANALYZING AND MODELLING OF
CUTTING PARAMETERS BY ARTIFICIAL
NEURAL NETWORKS DURING TURNING
PROCESS**

Doctoral Dissertation

Kosovska Mitrovica, 2018

Комисија за преглед и одбрану:

Ментор:

Проф. др Бранко Пејовић
Факултет техничких наука у Косовској Митровици

Чланови комисије:

Проф. др Богдан Недић
Факултет инжењерских наука у Крагујевцу

Доц. др Александар Тодић
Факултет техничких наука у Косовској Митровици

Датум одбране:

Сањао сам да би живот требао да буде радост. Пробудио сам се и схватио да је живот напор. Радио сам и увидео да је у напору радост.

Рабиндранат Тагоре

Никаква сила не чини човека великим и мудрим што чини снага рада- заједничког, сложеног, слободног рада.

Максим Горки

Правило за добро вођење људског ума у истраживању истине је метода (методологија).

Рене Декарт

„Млад човек не треба да жали што нема милионе да развије неку идеју. Размишљање не кошта ништа, а помаже да се створи идеја.“

Никола Тесла

ЗАХВАЛНИЦА

Ова дисертација настала је као резултат мог дугогодишњег научног и стручног рада односно усавршавања, као и успешне сарадње са професорима и колегама којима дугујем велику захвалност.

При изради овог рада имао сам несебичну помоћ свог ментора проф. др Бранка Пејовића, редовном професору, Факултет техничких наука у Косовској Митровици Универзитета у Приштини.

Желим и да се захвалим члановима комисије,

проф. др Богдану Недићу, редовном професору, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу Универзитета у Крагујевцу, којем се најсрдачније захваљујем за суштинске савете и свесрдну подршку при извођењу експеримената, доц. др Александру Тодићу, доценту, Факултет техничких наука у Косовској Митровици Универзитета у Приштини, који су ми пружили корисне савете и сугестије при изради ове докторске дисертације.

На пруженој подршци свим срцем се захваљујем и дугујем неизмерну захвалност својој породици оцу Драгославу, мајци Неранци и сестри Оливери, на константној и неусиљеној подршци током мог професионалног усавршавања и израде дисертације који су ми пружили безусловну подршку и охрабрење током писања докторске дисертације.

Посебно место у мом животу припада малом Ђорђу, који је био мој највећи извор енергије да истрајем у изради дисертације у тренуцима када ми је понестајало мотива.

Садржај

Резиме	1
Abstract	3
Преглед важнијих коришћених ознака	5
Списак слика	7
Списак табела	11
1. УВОДНО РАЗМАТРАЊЕ	14
1.1. Основни појмови	14
1.2. Досадашња истраживања	14
1.3. Мотиви дисертације	18
1.4. Предмет дисертације	19
1.5. Циљ истраживања	19
1.6. Очекивани резултати истраживања	20
1.7. Структура дисертације	21
2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ПРОЦЕСА ОБРАДЕ СКИДАЊЕМ	22
СТРУГОТИНЕ	
2.1. Процес резања	22
2.2. Силе при резању	25
2.3. Анализа сила резања	27
2.4. Природа процеса формирања струготине	34
2.5. Врсте и облици струготине	41
2.5.1. Класификација облика струготине	43
2.5.2. Елементи режима резања	45
2.5.2.1. Дубина резања	45
2.5.2.2. Корак	46
2.5.2.3. Ширина струготине	47
2.5.2.4. Дебљина струготине	47
2.5.2.5. Попречни пресек струготине	47
2.5.2.6. Брзина резања	48

2.6. Теорија и механизам формирања струготине	49
2.7. Топлота резања	53
2.7.1. Температура резања	55
2.8. Утицај материјала обрадка на процес формирања струготине	62
2.9. Утицај параметара обраде на процес формирања струготине	62
2.10. Морфологија струготине	64
2.11. Процес хабања резног алата код обраде скидањем струготине	64
2.11.1. Општи термини и појмови	64
2.11.2. Топлотни биланс, хабање и постојаност алата	65
2.11.3. Кратер настао хабањем	68
2.11.4. Општи принципи процеса хабања алата	69
3. АНФИС МЕТОДОЛОГИЈА	76
3.1. Вештачке неуронске мреже	76
3.2. Адаптивни неуро-фази систем (АНФИС)	77
3.2.1. Развој АНФИС модела	79
4. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА	82
4.1. Опис и услови експерименталних испитивања	82
4.1.1. Материјал предмета обраде	83
4.1.2. Резни алат	84
4.1.3. Машина	85
4.2. Експерименти	85
4.2.1. Мерење храпавости	87
4.2.2. Мерење отпора резања	87
4.2.3. Одређивање облика струготине и мерење дебљине сегмената струготине	88
4.2.4. Мерење температуре помоћу термовизије	91
4.2.4.1. Основи термовизије	91
4.2.4.2. Термовизијска камера и термовизијско снимање	91
4.2.4.3. Мерење температуре у зони резања	92
4.2.4.4. Експериментална процедура	94
4.2.5. Мерење хабања алата микроскопом	96

5. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА	97
5.1. Резултати првог експеримента	97
5.2. Резултати другог експеримента	117
5.3. Резултати експеримента хабања алата	136
6. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНАТА И РЕЗУЛТАТА АНФИС ПРЕДВИЂАЊА	141
6.1. Регресиона анализа	141
6.2. Примена АНФИС методологије за предвиђање вредности зависних параметара стругања	143
6.3. Резултати АНФИС модела-1	146
6.4. Резултати АНФИС модела-2	155
6.5. Резултати АНФИС модела-3	160
6.6. Резултати АНФИС модела-4	165
6.7. Резултати АНФИС модела-5	171
7. ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА И ГЛАВНИ ЗАКЉУЧЦИ	173
ЛИТЕРАТУРА	178

Резиме

Примена оптималних параметара режима резања током реализације процеса обраде скидањем струготине се намеће као обавеза, обзиром на неопходност најефикаснијег могућег управљања процесом обраде односно постизања најбољих резултата током обраде материјала резањем. Један од циљева ове дисертације је анализа зависности отпора резања (главни отпор резања, отпор продирања и отпор помоћног кретања) и облика струготине од различитих параметара режима резања по којима ће бити реализован процес обраде стругањем. Подаци неопходни за спровођење поменуте анализе су прикупљени током обраде стругањем као у пракси најзаступљеније врсте обраде резањем. Материјал коришћен током експеримента је челик за побољшање 30CrNiMo8 (стара ознака Č.5432 и ознаке 4340 по AISI систему). Током обраде варирани су брзина резања, корак резања и дубина резања, као параметри режима резања од највећег утицаја. У другом делу истраживања је и анализирана повезаност отпор резања (главни отпор резања, отпор продирања и отпор помоћног кретања) и параметара режима резања за различите облике струготине и храпавости површине материјала. Анализа је спроведена коришћењем три главне компоненте отпора резања. На основу добијених резултата закључено је да отпор продирања F_2 има најјачу узајамну повезаност струготином. Када је дубина резања у питању, најјача узајамна повезаност постоји са храпавошћу обрадом добијене површине. Обзиром на сложеност и комплексност, као и временску захтевност поступка одређивања облика струготине у ову сврху је коришћена вештачка неуронска мрежа са фази логиком. Такав тип мреже се зове адаптивни неуро-фази систем (*eng.* Adaptive Neural Fuzzy Interface System - ANFIS) и представља начин заобилажења потешкоћа које постоје код изразито нелинеарних серија података, чија анализа применом класичних метода захтева доста времена. То је уједно и главни разлог примене ANFIS методологије у овој дисертацији. Уместо представљања проблема у математичкој форми у циљу развијања стратегије обраде података, неуронске мреже користе принципе људског мозга и његове структуре. Добијена стратегија обраде података на принципима људског мозга се назива вештачка интелигенција, обзиром да користи принципе обраде података биолошких неуронских мрежа. ANFIS методологија је коришћена као алат за одређивање узајамних повезаности између параметара посматраних

током експеримента. Процес карактерише изразита нелинеарност, због чега би примена класичних метода рачунања довела до неприхватљивог утроска ресурса и материјала. Циљ одређивања узајамне повезаности параметара јесте одређивање оног параметра који има највећи утицај на формирање облика стругоине. Поред овог, дефинисан је и циљ који подразумева одређивање узајамне повезаности комбинације најутицајнијих параметара и различитих облика струготине, која би требала да представља оптималну комбинацију параметара која обезбеђује најповољнији облик струготине. То значи да се одређена комбинација параметара понаша као оптимална обзиром на најјачу узајамну повезаност са стругоином тј. њеним обликом. Може се рећи да је анализа урађена тако што је спроведено рангирање параметара режима резања у зависности од јачине њихове узајамне повезаности са различитим облицима струготине. Извршена је и анализа дебљине добијене струготине, обзиром на њен утицај на квалитет крајњег производа, као и анализа температуре у зони резања и њена узајамна повезаност са обликом струготине и хрпавошћу обрадом добијених површина. Резултати су показали да температура у зони контакта резног алата и обратка има јачу узајамну повезаност са обликом стругоином од глобалне максималне температуре која се јавља током процеса обраде материјала. На крају је извршена анализа постојаности односно хабања резног алата током испитивања, која је показала да током релативно кратке обраде, уз малу похабаност алата, није дошло до значајније промене отпора резања. Поред тога се може закључити да је током посматраних режима резања, праћењем облика струготине, дошло до хабања алата врло ниског нивоа.

Кључне речи: *обрада стругањем; параметри резања; облици струготине; неуро-фази логика; грешка предикције; грешка тренирања и тестирања; вештачка интелигенција; неуронска мрежа; АНФИС методологија; отпор резања; температуре у зони резања; хабање и постојаност алата; хрпавост површине.*

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Производно машинство

УДК: 621.911.4.022.08:004.42.032.2(043.3)

Abstract

The main aim of the study was to analyze the influence of six machining parameters on the chip shape formation and surface roughness as well during turning of Steel 30CrNiMo8 (Č.5432). Three components of cutting forces were used as inputs together with cutting speed, feed rate and depth of cut. It is crucial for the engineers to use optimal machining parameters to get the best results or to high control of the machining process. Therefore there is need to find the machining parameters for the optimal procedure of the machining process. Metal cutting by chip separations was used since it is the most common procedure of the metal manufacturing. Cutting speed, cutting step and depth of cutting are the parameters which were used as the main machining parameters during the cutting procedure. Since the cutting process is highly nonlinear process in this study artificial neural network was used. Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), as a specific type of artificial neural networks, was used to estimate the inputs influence on the chip shape formation and surface roughness. ANFIS network enables fast data processing without knowing of internal knowledge of physical interactions between cutting tool and working material. According to the results the cutting force in direction of the depth of cut has the highest influence on the chip form. The testing error for the cutting force in direction of the depth of cut has testing error 0.2562. This cutting force determines the depth of cut. According to the results the depth of cut has the highest influence on the surface roughness. Also the depth of cut has the highest influence on the surface roughness. Generally the depth of cut and the cutting force which provides the depth of cut are the most dominant factors for chip forms and surface roughness. Any small changes in depth of cut or in cutting force which provide the depth of cut could drastically affect the chip form or surface roughness of the working material. Six different chip shapes were obtained according to ISO standardization. Different cutting forces occurred for the different chip shapes. Also different surface roughness occurred for the all machining regimes and corresponding chip shapes. It was also evaluated temperature influence in cutting zone on the forms of chip shapes during turning of Steel Č.5432 (30CrNiMo8). Temperature distribution in cutting zone during machining process could affect the forms of chip shapes and surface roughness as well. Surface roughness could be considered as the most important indicator for the machining process quality. It is found that spot temperature is more influential than maximal temperature during the

machining process. In the end tool wear was analyzed to determine how much tool wear is during the experiments. It is very important to find the optimal machining conditions in order to increase the tool life and to improve product quality. Width of tool wear was measured by universal microscope. During experimental procedure one chip shape was obtained for the given machining parameters. Results were shown negligible tool wear for the given experimental conditions. In other words the tool wear is negligible for one chip shape. In order to increase tool wear one should obtain more chip shapes.

Keywords: *turning process; machining parameters; chip forms; neuro-fuzzy; prediction error; training and testing errors; artificial intelligence; neuro-fuzzy network; ANFIS model; cutting force; spot and maximal temperature; tool wear; surface roughness.*

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific subdiscipline: Production engineering

UDK: 621.911.4.022.08:004.42.032.2(043.3)

Преглед важнијих коришћених ознака

Ознака	Јединица	Опис
F_1	N	Главни отпор резања
F_2	N	Отпор продирања
F_3	N	Отпор помоћног кретања
a	mm	Дубина резања
v	m/min	Брзина резања
s	mm/o	Корак резања
Ra	μm	Средња аритметичка вредност храпавости површине
α	$^\circ$	Леђни угао
β	$^\circ$	Угао резног клина
ϕ	$^\circ$	Угао смицања
γ	$^\circ$	Грудни угао
λ	-	Степен сабијања струготине
ρ	$^\circ$	Угао трења (струготина-грудна површина алата)
b	mm	Ширина струготине
δ	mm	Дебљина струготине
B_L	mm	Ширина леђног појаса хабања алата
$B_{L(PL)}$	mm	Ширина појаса хабања алата на помоћној леђној површини
B_k	mm	Дужина кратера
B_Δ	mm	Скраћење врха алата
D	mm	Пречник обратка
n	o/min	Број обртаја
r	mm	Полупречник заобљења радијуса врха алата
V_s	mm/min	Брзина помоћног кретања
T	min	Постојаност алата
h	mm	Појас хабања алата

t_g	<i>min</i>	Главно време резања-период резања
T_R	<i>min</i>	Референтна постојаност алата
V_R	<i>m/min</i>	Референтна брзина резања
F	<i>N</i>	Отпор резања
F_δ	<i>N</i>	Сила смицања струготине
F_{sn}	<i>N</i>	Нормална сила у равни смицања
F_n	<i>N</i>	Нормална сила
F_t	<i>N</i>	Тангенцијална сила
C	-	Мерчантова константа
C_v	-	Константа
ε	-	Деформација
θ	$^{\circ}C$	Температура резања
θ_r	$^{\circ}C$	Собна температура
θ_m	$^{\circ}C$	Температура топљења
T_{\max}	$^{\circ}C$	Просечна максимална температура
$T_{\text{спот}}$	$^{\circ}C$	Просечна контактна температура
μ	-	Коефицијент трења
σ	N/m^2	Нормални напон
τ	N/m^2	Напон смицања
χ	$^{\circ}$	Нападни угао
ω	$^{\circ}$	Угао завојнице
$\mu(x)$	-	Функција припадности АНФИС методологије
a_i, b_i, c_i	-	Параметри АНФИС мреже
P_i	-	Експериментални подаци код АНФИС предикције
O_i	-	Прорачунати подаци код АНФИС предикције
RMSE	-	Грешка најмањих квадрата
R^2	-	Коефицијент детерминације
r	-	Пирсонов коефицијент

СПИСАК СЛИКА

Поглавље 2

- Слика 2.1. Основни принцип резања
- Слика 2.2. Примери ортогоналног и косог резања
- Слика 2.3. Отпора при ортогоналном резању
- Слика 2.4. Компоненте резултујуће отпора резања при обради стругањем
- Слика 2.5. Зоне хабања са параметрима хабања на резном клину стругарског ножа
- Слика 2.6. Облик функције хабања алата: $V_L=f(t)$
- Слика 2.7. Раван и зона смицања
- Слика 2.8. Утицајни фактори на процес образовања струготине
- Слика 2.9. Зона деформисања и линија текстуре
- Слика 2.10. Модел механизма стварања струготине
- Слика 2.11. Модел по Зореву
- Слика 2.12. Врсте струготине
- Слика 2.13. Елементи режима резања
- Слика 2.14. Величине које дефинишу попречни пресек струготине
- Слика 2.15. Попречни пресеци струготине
- Слика 2.16. 2D модел формирања струготине
- Слика 2.17. Зона одвајања материјала
- Слика 2.18. Процес формирања струготине
- Слика 2.19. Формирање струготине и температура резања
- Слика 2.20. Формирање струготине
- Слика 2.21. Топлотни извори, понори и процентуални удео одвођења топлоте при стругању
- Слика 2.22. Расподела температура по зонама код обраде стругањем; на слици су приказане а) леђна површина и б) грудна површина резног клина
- Слика 2.23. Температура у карактеристичним тачкама и средња температура резања
- Слика 2.24. Извори топлоте код ортогоналног процеса резања метала
- Слика 2.25. Облик и положај зона хабања на резном клину
- Слика 2.26. Хабање резног клина алата
- Слика 2.27. Кратер на стругарском ножу настао као последица хабања
- Слика 2.28. Изглед слободне површине струготине настале при обради алатом различитог степена похабаности: (а) нов алат, (б) похабан алат
- Слика 2.29. Линијски, запремински и масени параметри хабања резног алата
- Слика 2.30. Индиректни параметри хабања
- Слика 2.31. Принципијелни облик криве хабања
- Слика 2.32. Матрица хабања врха резног алата (плочица стругарског ножа)
- Слика 2.33. Основни појмови хабања стругарског ножа
- Слика 2.34. Хабање резног алата

Поглавље 3

- Слика 3.1. Шематски приказ неуронске мрежа са три слоја
- Слика 3.2. Слојеви АНФИС мреже
- Слика 3.3. АНФИС структура

Поглавље 4

- Слика 4.1. Структура обрадног система при експерименталним испитивањима
- Слика 4.2. Ромбоидна резна плочица CNMM 120408
- Слика 4.3. Троугаона резна плочица TNMM 160404-СМ
- Слика 4.4. Уређај за мерење храпавости Talysurf-6
- Слика 4.5. Шема експерименталне процедуре
- Слика 4.6. Универзални микроскоп UIM-21
- Слика 4.7. Микроскопска камера коришћена код експерименталног истраживања
- Слика 4.8. Добијени снимак: а) распоред температуре у зони резања и б) термална камера FLIR E50
- Слика 4.9. Положај термовизијске камере: а) мерење температуре у зони резања и б) процес резања

Поглавље 5

- Слика 5.1. Распоред отпора резања F_1 за $a = 0.3 \text{ mm}$
- Слика 5.2. Распоред отпора резања F_1 за $a = 1 \text{ mm}$
- Слика 5.3. Распоред отпора резања F_1 за $a = 1.5 \text{ mm}$
- Слика 5.4. Распоред отпора резања F_1 за $v = 72.49 \text{ m/mm}$
- Слика 5.5. Распоред отпора резања F_1 за $v = 91.89 \text{ m/mm}$
- Слика 5.6. Распоред отпора резања F_1 за $v = 114.35 \text{ m/mm}$
- Слика 5.7. Распоред отпора резања F_1 за $v = 144.98 \text{ m/mm}$
- Слика 5.8. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $a = 0.3 \text{ mm}$
- Слика 5.9. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $a = 1 \text{ mm}$
- Слика 5.10. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $a = 1.5 \text{ mm}$
- Слика 5.11. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $v = 72.49 \text{ m/mm}$
- Слика 5.12. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $v = 91.89 \text{ m/mm}$
- Слика 5.13. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $v = 114.35 \text{ m/mm}$
- Слика 5.14. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $v = 144.98 \text{ m/mm}$
- Слика 5.15. Промена дебљине струготине у зависности од брзине резања и корака резања и за $a = 0.3 \text{ mm}$
- Слика 5.16. Промена дебљине струготине у зависности од брзине резања и корака резања и за $a = 1 \text{ mm}$
- Слика 5.17. Промена дебљине струготине у зависности од брзине резања и корака резања и за $a = 1.5 \text{ mm}$
- Слика 5.18. Промена дебљине струготине у зависности од корака резања и брзине резања и за $a = 0.3 \text{ mm}$
- Слика 5.19. Промена дебљине струготине у зависности од корака резања и брзине резања и за $a = 1 \text{ mm}$
- Слика 5.20. Промена дебљине струготине у зависности од корака резања и брзине резања и за $a = 1.5 \text{ mm}$
- Слика 5.21. Топографија површине добијена за $a = 1.5 \text{ mm}$, $s = 0.1 \text{ mm/o}$ и $v = 78 \text{ m/min}$

- Слика 5.22. Распоред температуре у зони резања: Дуга замршена струготина (ознака 2.3 према ISO 3685) (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Слика 5.23. Распоред температуре у зони резања: Дуга уврнута струготина (ознака 4.1 према ISO 3685), (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Слика 5.24. Распоред температуре у зони резања: Кратка струготина (ознака 4.2 према ISO 3685), (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Слика 5.25. Распоред температуре у зони резања: Кратка замршена струготина (ознака 4.3 према ISO 3685), (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Слика 5.26. Распоред температуре у зони резања: Неодређена струготина (ознака 6.2 према ISO 3685), (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Слика 5.27. Распоред температуре у зони резања: Ситна струготина (ознака 7 према ISO 3685) (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Слика 5.28. Распоред отпора резања F_1 за $a = 0.3$ mm
- Слика 5.29. Распоред отпора резања F_1 за $a = 1$ mm
- Слика 5.30. Распоред отпора резања F_1 за $a = 1.5$ mm
- Слика 5.31. Распоред отпора резања F_1 за $v = 72.49$ m/mm
- Слика 5.32. Распоред отпора резања F_1 за $v = 91.89$ m/mm
- Слика 5.33. Распоред отпора резања F_1 за $v = 114.35$ m/mm
- Слика 5.34. Распоред отпора резања F_1 за $v = 144.98$ m/mm
- Слика 5.35. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $a = 0.3$ mm
- Слика 5.36. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $a = 1$ mm
- Слика 5.37. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $a = 1.5$ mm
- Слика 5.38. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $v = 72.49$ m/mm
- Слика 5.39. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $v = 91.89$ m/mm
- Слика 5.40. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $v = 114.35$ m/mm
- Слика 5.41. Распоред храпавости обрађене површине R_a за $v = 144.98$ m/mm
- Слика 5.42. Распоред контактне температуре у зони резања за $a = 0.3$ mm
- Слика 5.43. Распоред контактне температуре у зони резања за $a = 1$ mm
- Слика 5.44. Распоред контактне температуре у зони резања за $a = 1.5$ mm
- Слика 5.45. Распоред максималне температуре у зони резања за $a = 0.3$ mm
- Слика 5.46. Распоред максималне температуре у зони резања за $a = 1$ mm
- Слика 5.47. Распоред максималне температуре у зони резања за $a = 1.5$ mm
- Слика 5.48. Распоред а) контактне и б) максималне температуре у зони резања: Дуга замршена струготина (ознака 2.3 према ISO 3685) (s: 0.1 mm/o, v: 78 m/mm, a: 0.3 mm)
- Слика 5.49. Промена похабаности алата током времена резања за ромбоидну резну плочицу (a: 1 mm, s: 0.16 mm/o, v: 150 m/min)
- Слика 5.50. Промена сила резања током времена за ромбоидну резну плочицу (a: 1 mm, s: 0.16 mm/o, v: 150 m/min)
- Слика 5.51. Промена похабаности алата за троугаону резну плочицу (a: 1 mm, s: 0.16 mm/o, v: 150 m/min)
- Слика 5.52. Промена сила резања за троугаону резну плочицу (a: 1 mm, s: 0.16 mm/o, v: 150 m/min)

Слика 5.53. Похабаност а) ромбоидне и б) троугаоне резне плочице
(a: 1 mm, s: 0.16 mm/o, v: 150 m/min)

Поглавље 6

- Слика 6.1. Ток процеса одређивања узајамне повезаности између параметара
Слика 6.2. Ток процеса за анализу параметара применом АНФИС методологије
Слика 6.3. а) Шема експерименталне процедуре за АНФИС модел-1,
б) општи облик шеме
Слика 6.4. Облик струготине у зависности од корака резања и брзине резања

Слика 6.5. Облик струготине у зависности од дубине резања и брзине резања
Слика 6.6. Облик струготине у зависности од дубине резања и корака резања
Слика 6.7. Шема експерименталне процедуре (модел-2)
Слика 6.8. Грешке предикције пожељних и непожељних облика струготина за појединачне параметре (1-F₁, 2-F₂, 3-F₃, 4-a, 5-v, 6-s) на основу узајамне повезаности
Слика 6.9. Грешке предикције свих облика струготина за појединачне параметре (1-F₁, 2-F₂, 3-F₃, 4-a, 5-v, 6-s) на основу узајамне повезаности са струготином (s: 0.16-0.25 mm/o, v: 355-710 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
Слика 6.10. Грешке предикције свих облика струготина за комбинацију два параметра (1-F₁, 2-F₂, 3-F₃, 4-a, 5-v, 6-s) на основу узајамне повезаности са струготином (s: 0.16-0.25 mm/o, v: 355-710 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
Слика 6.11. Предвиђање облика струготине за комбинацију два параметра (2|6) (s: 0.16-0.25 mm/o, v: 355-710 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
Слика 6.12. АНФИС предикција облика струготине на основу контактне и максималне температуре у зони резања (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
Слика 6.13. АНФИС предикција а) максималне и б) контактне температуре на основу храпавости обрађене површине и отпора резања F₂ (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5,mm)

СПИСАК ТАБЕЛА

Поглавље 2

- Табела 2.1. Поређење врста струготина и њихових карактеристика
Табела 2.2. Општа класификација облика струготине на врсте и групе

Поглавље 4

- Табела 4.1. Хемијски састав легуре 30CrNiMo8 (Џ5432)
Табела 4.2. Улазни параметри услова обраде за експеримент 1 и 2

Поглавље 5

- Табела 5.1. Резултати експерименталних испитивања са ромбоидном плочицом за отпоре резања и квалитет обрађене површине
Табела 5.2. Добијени облици дуге струготине и отпори резања
Табела 5.3. Добијени облици кратке и неодређене струготине отпори резања
Табела 5.4. Типови струготина са основним параметрима
Табела 5.5. Облици струготине у првом експерименту
Табела 5.6. Сегменти струготине за дубини резања 0.3 mm
Табела 5.7. Сегменти струготине за дубини резања 1 mm
Табела 5.8. Сегменти струготине за дубини резања 1.5 mm
Табела 5.9. Резултати експерименталних испитивања са троугаоном плочицом отпора резања, температуре и квалитета обрађене површине
Табела 5.10. Типови струготина са основним параметрима
Табела 5.11. Облици струготине у другом експерименту
Табела 5.12. Промена похабаности алата и сила резања током времена резања за ромбоидну резну плочицу (a: 1 mm, s: 0.16 mm/o, v: 150 m/min)
Табела 5.13. Промена похабаности алата и сила резања за троугаону резну плочицу (a: 1 mm, s: 0.16 mm/o, v: 150 m/min)

Поглавље 6

- Табела 6.1. Параметри за отпор резања F_1
Табела 6.2. Параметри за отпор резања F_2
Табела 6.3. Параметри за отпор резања F_3
Табела 6.4. Параметри за храпавост обрађене површине R_a
Табела 6.5. Параметри за температуру T_{spot}
Табела 6.6. Параметри за температуру T_{max}
Табела 6.7. Облици струготине у првом делу истраживања
Табела 6.8. Параметри за први део истраживања

- Табела 6.9. Осам облика струготине за АНФИС модел-1 на основу стандарда ISO 3685
- Табела 6.10. Грешке тренирања и тестирања са појединачне параметре на основу узајамне повезаности са струготином (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Табела 6.11. Грешке тренирања и тестирања свих комбинација параметара на основу узајамне повезаности са струготином (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Табела 6.12. Параметри за други део истраживања
- Табела 6.13. Грешке предикције повољног и неповољног облика струготине за појединачне параметре (трн-тренирање, тст-тестирање) на основу узајамне повезаност (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Табела 6.14. Грешке предикције повољног и неповољног облика струготине за комбинације од два параметра (трн-тренирање, тст-тестирање) на основу узајамне повезаности са струготином (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Табела 6.15. Грешке предикције облика струготине за један и комбинацију два параметра (1-F₁, 2-F₂, 3-F₃, 4-a, 5-v, 6-s) на основу узајамне повезаности са струготином (s: 0.16-0.25 mm/o, v: 355-710 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Табела 6.16. Грешке АНФИС тренирања и тестирања предикције облика струготине на основу узајамне повезаности између појединачних параметара (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Табела 6.17. Предикција облика струготине на основу контактне и максималне температуре у зони резања (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Табела 6.18. Грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију контактне температуре у зони резања за појединачне параметре на основу њихове узајамне повезаности (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Табела 6.19. Грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију контактне температуре у зони резања за све комбинације од 2 параметра на основу њихове узајамне повезаности (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Табела 6.20. Грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију максималне температуре у зони резања за појединачне параметре на основу њихове узајамне повезаности (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Табела 6.21. Грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију максималне температуре у зони резања за све комбинације од 2 параметра на основу њихове узајамне повезаности (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Табела 6.22. Тачност АНФИС предикције максималне и контактне температуре на основу храпавости обрађене површине и отпора продирања F₂ (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)
- Табела 6.23. Грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију дебљине струготине за појединачне параметре применом ромбоидне резне

плочице на основу њихове узајамне повезаности, (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)

Табела 6.24. Грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију дебљине струготине за појединачне параметре применом троугаоне резне плочице на основу њихове узајамне повезаности, (s: 0.1-0.25 mm/o, v: 78-156 m/mm, a: 0.3-1.5 mm)

1. УВОДНО РАЗМАТРАЊЕ

1.1. Основни појмови

Струготина представља споредни производ класичних процеса обраде материјала скидањем струготине. Облик струготине може да представља индикатор квалитета класичних метода обраде материјала. Иако се струготина може сматрати као отпадни материјал сам облик струготине може да буде веома важан пошто различити облици струготине могу различито да утичу на квалитет процеса обраде материјала скидањем струготине. Према томе анализа облика струготине је од великог интереса за индустријски сектор. Облик струготине може да буде веома битан пошто разни облици струготине могу да утичу на процес обраде материјала на различите начине односно могу да смање квалитет добијеног производа ако је облик струготине неповољан. Такође облик и тип струготине могу да утичу на саму стабилност процеса обраде материјала. Праћење и предикција облика струготине за различите параметере резања је од великог интереса за индустријско истраживање, јер може да значајно смањи или повећа трошкове производње. Веома је важно развити ефективан метод за најбоље предвиђање и праћење облика струготине. Храпавост површине, постојаност алата и отпор продирања материјала се могу сматрати као веома битни фактори за квалитет добијеног машинског производа применом процеса обраде скидањем струготине.

1.2. Досадашња истраживања

Наука о резању материјала има за циљ да објасни и квалитет и радни век резних алата и машинске услове резања како би био сачуван интегритет површине и облика струготине радног материјала обрадка. Тренутно, машински инжењери имају на располагању различите облике обраде резањем [1, 2]. Облик струготине представља веома битан аспект у току машинског процеса пошто има велики утицај

на стабилност машинског процеса [3]. На пример, тракаста или дуга струготина може да има штетан утицај на процес уклањања материјала као и на сам квалитет добијеног производа док се са струготином мале величине може лако управљати, преносити и складиштити [4].

Различити параметри машинског процеса су утицајни на промену облика струготине. Како би спречили формирање неповољних облика струготине потребно је анализирати који машински односно резни параметри имају најутицајнији ефект на облик струготине да би извршили најбољу контролу струготине односно да би разумели креирање различитих облика струготине [5]. На пример предикција ломљивости струготине је такође веома важан задатак за широк опсег машинских услова. Резултати у раду [6] су показали какви се типови ломљивости струготине могу користити за одређене машинске услове.

У раду [7], је развијена основна тродимензионална анализа геометрије облика струготине с циљем да се добије веза између тродимензионалног и дводимензионалног облика струготине. У раду [8] су представљени резултати експерименталног истраживања применом завршне обраде стругањем и на основу резултата се дошло до закључка да је неопходно да се установи критеријум за потпуну аутоматичност за оптималне перформансе обраде одређеног резног машинског система. Струготина која се добија у току процеса обраде стругањем не би требала да се умрси како би био убрзан процес одвођења топлоте од резног алата и у пракси се јавља проблем складиштења и одвођења струготине па се додају делови који уситњавају струготину [9]. У раду [10] је закључено да постоји конзистентност између теоријских и експерименталних резултата код геометрије и запремине струготина за различите брзине резања и дубине резања. У раду [11] је развијен систем за компјутерско планирање процеса који има могућност предвиђања ломљивости струготине при процесу обраде стругањем. Основни функционални елементи за контролу струготине су ефикасно ломљење струготине и ефективно одвајање струготине. Контрола струготине је највише правила проблеме код континуалних машинских операција. Аутоматски систем за детекцију лома струготине приликом процеса обраде стругањем је развијен у раду [12]. Одвајање струготине због унутрашњих дефеката спајања и превеликог

савијања струготине због нехомогене локалне чврстоће материјала је анализирано у раду [13].

У претходним радовима је извршена анализа облика струготине с аспекта статистичке анализе. Међутим, не постоје обједињена истраживања, где је анализиран утицај главних параметара резања на облик и квалитет струготине што је главни научни допринос ове дисертације. У овој дисертацији је главни циљ представити комплексно истраживање с аспекта формирања и одређивања утицајних параметара на облик и квалитет струготине.

У претходним истраживањима су развијени и сензори за аутоматску детекцију и праћење облика струготине [14, 15]. Међутим, ти сензори обрађују велике количине података за мали временски период што доводи до честих грешака. У раду [14] је имплементиран сензор за праћење отпорних сила резања за екстракцију карактеристика и препознавање образаца облика струготине за време обраде стругањем како би биле побољшане перформансе неуронских мрежа за процес идентификације облика струготине. Праћење облика струготине применом сензора у току процеса стругања је урађено применом фузије сигнала сензора како би биле екстраковане карактеристике струготине за класификацију у пожељне и непожељне облике струготине [15]. У раду [16] су представљене активности колаборативног посла на задатку “Round Robin on Chip Form Monitoring” у научном центру Scientific-Technical Committee Cutting (STC-C). Праћење ломљивости струготине је један од важних фактора за аутоматску супервизију струготине. У раду [17] је представљена вештачка неуронска мрежа за идентификацију облика струготине применом измерених података. Морфологија струготине је један од важнијих параметара за одређивање степена обрадљивости материјала. Уочено је да су дебљина струготине и углови савијања мањи код суве обраде материјала него у условима обраде материјала при подмазивању [18]. Закључци у раду [19] су били да је транзиција од дебеле континуалне струготине до широке дисконтинуалне струготине проузрокована различитим типовима резних алата. Задебљања на струготини имају значајан ефект на оштећење алата као и сама дубина резања. Рад [20] је показао да постоји конзистентност између теоријских и експерименталних резултата када се посматра геометрија струготине као и запремина струготине за различите брзине резања и кораке резања. У раду [21] је развијен систем применом

рачунарске технике за укључување за процес предикције ломљивости струготине при процесу скидањем струготине. Основни функционални елементи за контролу струготине су ломљивост материјала и ефективно одвајања струготине од материјала.

Веома је битно анализирати облик струготине као и одговарајуће отпорне силе резања које могу да буде различите за другачије облике струготина [22]. Резултати у раду [23] су показали да висок степен појаве зубаца на струготини при већим брзинама и при знатној промени дебљине резања доводи до повећања механичког и термичког утицаја на процес обраде. Формирање струготине је важна карактеристика при обради метала и то може да покаже важне информације о операцијама резања [24]. Такође је показано да су отпори сила резања најчешће коришћени индикатори за праћење процеса резања материјала [24]. Због чињенице да се процес сечења материјала остварује кроз физичку интеракцију између ивице сечења резног дела и обрадка, сама карактеристика ивице сечења резног дела игра кључну улогу у утицају машинског процеса што одређује квалитет производа и радног века алата [25]. Постоји корелација измеђи отпора сила резања и облика струготине [26]. Формирање струготине као важан аспект механизма резања великом брзином је генерално прихваћена као резултат деформације материјала смицањем и трењем између алата и струготине [27, 28]. Пластична нестабилност тока струготине би могла да се узме у обзир код континулане струготине што је различито од нестабилности код смицања назубљене струготине [29]. Мањи отпори сила резања и бољи квалитет површине су добијени при нижим дубинама резања према раду [30].

На облик струготине као и на храпавост обрађене површине може да има утицај и температура у зони резања материјала. Због тога је, у овој дисертацији анализирана температура у зони резања као и њен утицај на облик струготине и на храпавост површине обрађеног материјала. Највећи фокус је био на контактни део између резног алата и обрадног материјала због тога што се ту јављају највећи скокови температуре [31, 32].

До сада постоје неколико истраживања у којима су анализиране појаве у зони резања [33]. На пример у раду [34] је анализирана температура струготине и њен утицај на морфологију струготине, силе резања и храпавост обрађене

површине. Модели термалних извора и поља температуре резања су предложени у раду [35] за анализу термичке равнотеже између извора топлоте и потрошње енергије при великим брзинама резања. У раду [36] је показано да температуре у зони смицања материјала опадају са опадањем дебљине струготине. Иако је моделирање облика струготине било предложено у неколико радова [37, 38, 39, 40, 41], до сада није рађена обједињена анализа облика струготине која би укључила и температуру резања. Управо је таква *обједињена анализа* облика струготине урађена у овој дисертацији.

Методе вештачке интелигенције не захтевају знање физичких процеса приликом формирања облика струготине и те методе могу да омогуће компактно решење и код сложенијих истраживања [42, 43, 44, 45, 46, 47, 48]. Адаптивни неурофази систем (АНФИС) [49-51] је један од представника метода вештачке интелигенције који може да се примени у различитим областима за различите анализе.

1.3. Мотиви дисертације

Стратегије за контролу облика струготине нису у потпуности разрађене у техничкој пракси. Према томе у овој дисертацији је главни циљ анализа узајамне повезаности машинских фактора и облика струготине чиме би се поједноставила контрола облика струготине. Другим речима, резултати дисертације треба да покажу који фактори највише, а који најмање утичу на формирање различитих облика струготине, на основу резултата корелације, чиме би се управљање обликом струготине значајно поједноставило, јер би главни фокус управљачких стратегија био само на најутицајнијим факторима. То би значајно могло да уштеди ресурсе и материјале при обради у пракси.

1.4. Предмет дисертације

За променљиве улазне параметре процеса: дубину резања, брзину резања и корак резања мењају се показатељи процеса обраде као што су: температура резања, силе резања, хабање алата и хрпавист обрађене површине.

За већи број експеримената биће извршена серија мерења ових показатеља, прикупљање и систематизација података, као и њихове симулације у циљу одређивања најповољнијих облика струготине за дати материјал и за одређене резне плочице.

1.5. Циљ истраживања

Основни циљ докторске дисертације је истраживање процеса и постављање адекватног рачунарског модела процеса обраде стругањем, који у себи укључује теоријска знања, искуствена знања дата у облику разних табела, препорука и емпиријских образаца, као и експерименталне резултате. Овај модел, који треба да се базира на методама вештачке интелигенције коришћењем неуро фази система, треба да послужи за креирање препоручених релација између параметара и налажења уопштеног модела обраде резањем што би било од значења за праксу.

У овој дисертацији је примењена АНФИС методологија за одређивање узајамних повезаности параметара резања и различитих облика струготине. У првом делу дисертације је анализирана корелација машинских односно параметара резања и повољних и неповољних облика струготине. У другом делу дисертације је анализирана корелација отпорних сила резања заједно са параметрима резања, различитих облика струготине и хрпавости површине материјала. Три главне компоненте отпора продирања у материјалу су коришћене и анализиран је њихов ефекат на квалитет добијене струготине. Такође је урађена и анализа утицаја дебљине струготине, јер су претходни радови показали да варијације у дебљини струготине могу да значајно наруше квалитет крајњег производа. Температура резања може да има велики негативни ефекат на радни век алата као и на квалитет

обрађеног дела. Због тога је потребно одредити који су фактори најутицајнији на температуру у зони резања. Анализиране су две температуре у зони резања и то температура додира између резног алата и обрадног материјала (контактна температура) и максимална температура у зони резања (температура струготине). На крају је испитана постојаност алата односно хабање алата при извођеним експериментима како би установили ниво похабаности алата за дате експерименте. Генерално, урађено је *комплексно истраживање* које би требало да обухвати *све аспекте формирања облика струготине* што није рађено до сада односно нико у истраживањима није имао овакав *обједињени приступ* проблематици која се обрађује.

1.6. Очекивани резултати истраживања

Научни допринос дисертације је развој новог модела за предикцију типа струготине, у зависности од технолошких параметара процеса резања применом метода вештачке интелигенције.

Предложена тема би требало да пружи нова теоријска сазнања и методе који би могли да се користе у поступцима моделирања и одређивања параметара, симулација и процеса обраде стругањем.

Развој алгоритма за генерисање неуро-фази система закључивања као могућности за обједињавање квалитативних и квантитативних информација у инжењерским системима, треба да допринесе лакшем формирању фази система и већој практичној применљивости и решавању проблема атрактивним и применљивим за конкретне инжењерске примене. Моделирање и корелација између параметара процеса обраде резањем применом неуро-фази система треба да послужи за практично срачунавање параметара процеса обраде стругањем у конкретним производним системима, посебно при формирању струготине.

1.7. Структура дисертације

Поглавље 1 дисертације представља уводна разматрања, где су представљени мотиви, циљеви и структура дисертације.

У **поглављу 2** представљен је теоријски део за процес формирања струготине, теоријска основа и за распоред температуре материјала и резног клина при обради стругањем и теоријска основа за хабање резног клина алата, јер је потребно установити похабаност алата у току експеримената.

У **поглављу 3** презентована је основна теорија АНФИС методологије, која ће бити примењена за анализу добијених резултата из експерименталног истраживања.

У **поглављу 4** представљен је опис и услови експерименталних истраживања са свим потребним подацима и карактеристикама. Током експерименталних истраживања биће извршено прикупљање података и резултата мерења како би касније ти подаци били примењени за даљу анализу. Експериментална истраживања ће обухватити све аспекте формирања струготине.

У **поглављу 5** представљени су експериментални резултати за формирање струготине на основу више различитих параметара резања. На бази добијених експерименталних резултата биће извршена анализа.

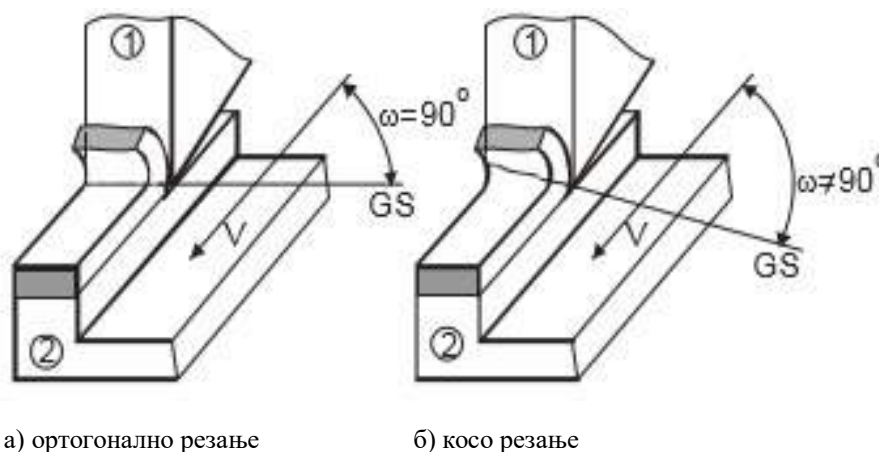
У **поглављу 6** представљени су резултати АНФИС методологије. На основу добијених експерименталних резултата мерења биће моделиран систем који треба да покаже како поједини параметри утичу на процес формирања струготине. Тај систем ће се заснивати на неуро-фази логици, јер тај приступ дозвољава одређена одступања и грешке при мерењу па је према томе доста "толерантан" на варијацију података.

У **поглављу 7** дати су закључци као и будући могући правци развоја на основу презентованих резултата су представљени предности и недостаци коришћене методологије и шта је потребно радити у будућим истраживањима везаним за формирање струготине.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ПРОЦЕСА ОБРАДЕ СКИДАЊЕМ СТРУГОТИНЕ

2.1. Процес резања

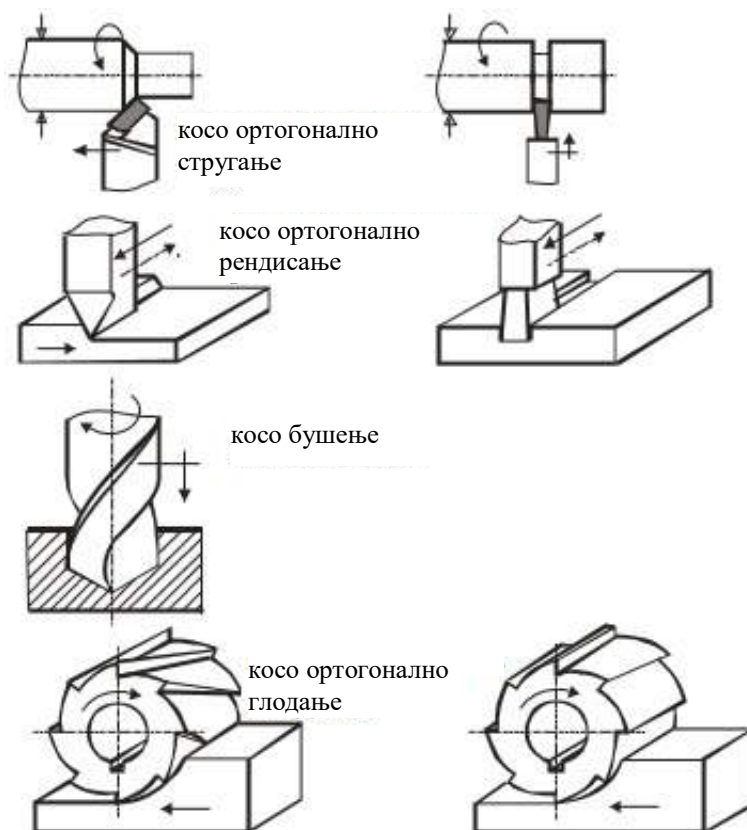
Резање је процес продирања резног алата у обрадак – предмет обраде. На слици 1. су приказане две врсте продирања резног клина алата у обрадак: ортогонално и косо резање. Косо резање постоји у случају када је правац релативног кретања алата или обрадка под одређеним углом у односу на сечиво резног клина алата различитим од 90° . За ортогонално резање се може рећи да је специјалан случај косог резања, када је правац релативног кретања алата или обрадка управан на сечиво резног клина алата, односно с њим заклапа угао од 90° [3]. Код обраде резањем преовлађује косо резање. Стругање у општем случају представља пример косог резања, осим у случајевима одсецања или усецања када је сечиво алата паралелно оси обрадка, тј. нападни угао износи 90° .



Слика 2.1. Основни принцип резања [3, 94]

Примери косог резања су бушење и глодање са глодалима са завојним зубима, док је глодање применом глодала са правим зубима пример ортогоналног резања. Рендисање је у општем случају косо резање, док при усецању жљебова

представља ортогонално резање. Провлачење је најчешће ортогонално резање, док обрада многосечним алатима, на пример тоцилима представља косо резање. На слици 2.2. су приказани неки од примера ортогоналног и косог резања.



Слика 2.2. Примери ортогоналног и косог резања

Процес резања се одвија по утврђеној кинематици релативног кретања алата у односу на обрадак и подразумева дефинисано главно и помоћно кретање. У зависности од поступка обраде, главно кретање реализује алат или обрадак и може бити кружно или праволинијско. Главно кретање је дефинисано брзином резања која представља пређени пут главне резне ивице алата у јединици времена. изражава се у m/min или код обраде брушењем у m/s . Брзина резања се дефинише у зависности од врсте обраде помоћу:

- броја обртаја n o/min и пречника предмета обраде или алата D mm , код кружног кретања и
- броја дуплих ходова n_L dh/min , код праволинијског кретања.

Помоћно кретање, као и главно кретање, може бити кружно или праволинијско. Дефинише се помоћу корака који представља померање алата или обратка за један обртај $s \text{ mm/o}$ померање за један зуб $s_l \text{ mm/z}$ код глодања, померање за дупли ход главног кретања $s \text{ mm/dh}$ код рендисања или померање за један ход алата $s \text{ mm/hod}$ код равног брушења.

У случају постојања кинематске зависности између главног и помоћног кретања, помоћно кретање се дефинише помоћу корака, док је брзина помоћног кретања изведена величина:

$$v_s = ns \text{ или } v_s = n_L s, \text{ mm/min} \quad (2.1.)$$

Уколико између главног и помоћног кретања не постоји кинематска зависност, помоћно кретање се дефинише брзином помоћног кретања, док је корак изведена величина:

$$s = \frac{v_s}{n}, \text{ mm/o} \quad (2.2.)$$

У оквиру кинематике кретања алата и обратка, главно и помоћно кретање дефинишу поступак обраде резањем, који може имати само једно главно и једно или више помоћних кретања. Сваки поступак обраде карактеришу следећи параметри:

- брзина резања: $v, \text{ m/min}$ или m/s ,
- корак: $s, \text{ mm/o}$ или mm/dh ,
- дубина резања: $a, \text{ mm}$,
- главно време резања: $t_g, \text{ min}$ и
- специфична производност: $q, \text{ cm}^3/\text{min}$.

Након успостављања контакта алата и обратка, долази до еластичног деформисања материјала, након чега долази до пластичног деформисања у једној локалној зони, тзв. „зони резања“. Последица пластичног деформисања је настанак струготине. Фактори који утичу на процес резања манифестују своје дејство посредством два главна фактора обраде, а то су брзина резања и силе резања [95]. Захваљујући постојању силе резања коју генерише погонски

систем машине алатке, резни клин алата продире у материјал. Сила која је по правцу и интензитету идентична сили резања, али је супротног смера се зове отпор резању и представља силу којом се материјал, захваљујући својим механичким особинама, супротставља процесу резања.

2.2. Силе при резању

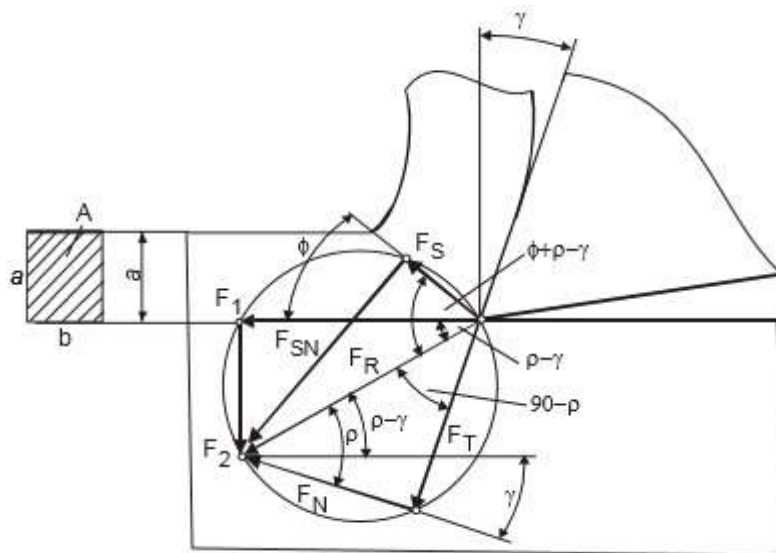
Сила резања је сила неопходна за пластично деформисање обратка тј. за његову обраду резањем. Зависи од великог броја фактора, а неки од њих су: хемијски састав обратка, тврдоћа обратка, микроструктура, карактеристике резног алата, стабилност машине, радни параметри процеса обраде и др.

Мерење интензитета силе резања, као и разумевање услова под којима се резање одвија су један од поузданијих начина за индиректно утврђивање хабања алата [53].

Поједностављени општи модел одређивања сила резања по Мерчанту код ортогоналног резања или код косог резања у нормалном пресеку, приказан је на слици 2.3, [53, 54, 96].

Сила резања F_R се може разложити на три међусобно управне компоненте, које леже на изабраним, карактеристичним правцима. У првом случају ортогоналног резања резултујућа сила резања F_R се може разложити на компоненту у правцу брзине резања и компоненту у правцу управном на обрађену површину:

- F_1 - главна сила резања, колинеарна са брзином резања и
- F_2 - сила продирања, управна на обрађену површину.



Слика 2.3. Силе при ортогоналном резању [53, 54, 96]

Резултујућа сила резања F_R се може разложити на компоненту F_t која делује у равни која се поклапа са грудном површином алата и компоненту F_n управну на грудну површину алата:

- F_t - тангенцијална сила, делује у равни грудне површине, то је уједно и сила трења између струготине и грудне површине алата и
- F_n - нормална сила, делује у равни управној на грудну површину и представља силу којом резни клин алата преко грудне површине делује на струготину.

Резултујућа сила резања F_R се може разложити на компоненту F_s која делује у равни смицања и компоненту F_{sn} управну на раван смицања:

- F_s - сила смицања и
- F_{sn} - нормална сила управна на раван смицања .

Познавање силе резања и њених компоненти има значајну улогу у процесу дефинисања обрадивости материјала, хабања резних елемената алата, димензионисања елемената машина, погонске снаге машине и других значајних карактеристика.

2.3. Анализа сила резања

Процес обраде материјала скидањем струготине истражује се с циљем идентификовања и упознавања законитости под којима се одвија. Препознате законитости су помоћ при избору оптималних параметара режима обраде. Истраживања овог процеса се могу поделити на теоријска и експериментална.

Теоријска истраживања процеса обраде скидањем струготине врше се у циљу одређивања законитости под којим се процес одвија. Међутим, обрадни процеси су сложени и међусобно различити, тј. одвијају се са различитим режимима, предмети обраде имају различиту геометрију, као и геометријском сложености коришћених алата и под утицајем су бројних фактора. Успостављање једног универзалног теоријског модела који би био апсолутно тачан изузетно је компликовано и до сада није реализовано.

При теоријским анализама сила резања најчешће се полази од једноставног случаја ортогоналног слободног резања и параметара резања који стварају тракасту струготину, као и модела резања у уској зони резања. Експериментална истраживања се одвијају у конкретним условима обраде резањем, при чему је могуће довољно тачно одредити зависности утицајних фактора и излазних параметара обраде, потребним за практичну употребу [97].

Главна сила резања F_R се најчешће мери и експериментално одређује. На основу слике 2.3, могу се дефинисати релације:

$$F_R = \frac{F_1}{\cos(\rho - \gamma)}, \quad F_2 = F_1 \operatorname{tg}(\rho - \gamma), \quad (2.3.)$$

$$F_s = F \cos(\phi + \rho - \gamma) \quad \text{и} \quad F_{sn} = F \sin(\phi + \rho - \gamma). \quad (2.4.)$$

Комбиновањем наведених израза добијају се изрази за силу смицања и нормалну силу у равни смицања у зависности од главне силе резања:

$$F_s = F_1 \frac{\cos(\phi + \rho - \gamma)}{\cos(\rho - \gamma)} \quad \text{и} \quad F_{sn} = F_1 \frac{\sin(\phi + \rho - \gamma)}{\cos(\rho - \gamma)}. \quad (2.5.)$$

Тангенцијална и нормална сила су дефинисане изразима:

$$F_t = F_R \sin \rho = F_1 \frac{\sin \rho}{\cos (\rho - \gamma)} \text{ и } F_n = F_R \cos \rho = F_1 \frac{\cos \rho}{\cos (\rho - \gamma)}. \quad (2.6.)$$

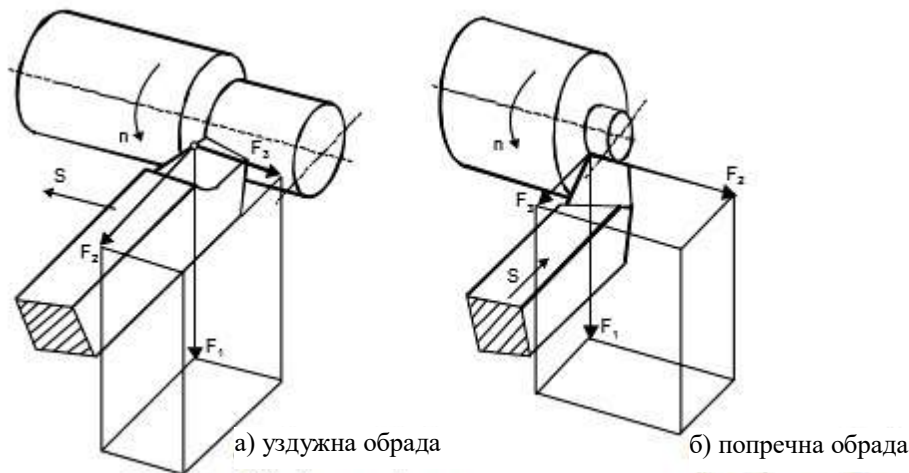
Ако се главна сила резања и сила продирања пројектују на тангенцијални и нормални правац, добијају се следећи изрази:

$$F_t = F_1 \sin \gamma + F_2 \cos \gamma \text{ и } F_n = F_1 \cos \gamma - F_2 \sin \gamma. \quad (2.7.)$$

Коришћењем добијених израза долази се до израза за коефицијент трења између струготине и грудне површине алата који гласи:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} = \frac{F_1 \sin \gamma + F_2 \cos \gamma}{F_1 \cos \gamma - F_2 \sin \gamma} \quad (2.8.)$$

На слици 2.4 су приказане компоненте силе резања при уздужном и попречном стругању.



Слика 2.4. Компоненте резултујуће силе резања при обради стругањем [2, 98]

Као што се из претходно приказаних једначина може видети, једначинама за прорачун се утврђује интензитет главне силе резања F_1 и зависност осталих компоненти силе резања од ње. Фактори који имају највећи утицај на интензитет главне силе резања су материјал обратка и параметри режима обраде, пре свих дубина a и корак s , па се за израчунавање интензитета главне силе резања најчешће користи израз:

$$F_1 = C_{K_1} \cdot a^{x_1} \cdot s^{y_1} \quad (2.9.)$$

где је: C_{K_1} - константа,

x_1 и y_1 - параметри обрадивости; зависе од карактеристика материјала обратка, геометрије алата и услова обраде

За прорачун главне силе резања се може користити и следећи израз:

$$F_1 = K_S \cdot A = K_S \cdot a \cdot s \quad (2.10.)$$

где је: K_S - специфичан оптпор резања MPa/mm^2 ; зависи од геометрије и материјала алата, материјала обратка, као и поступка обраде

$A = a \cdot s$ - површина попречног пресека струготине, mm^2

У многим случајевима експерименталних анализа силе резања, неопходно је да се идентификују нормална и тангенцијална компонента силе резања које делују на задњој страни алата. Код обраде са малим кораком, чак и при релативно великим брзинама резања, долази до генерисања топлоте [58]. Правилна комбинација велике брзине резања и малог корака неопходна је за минимизирање хрпавости обрађене површине. Сила резања иницијално се повећава са повећањем корака и дубине резања, а смањује са повећањем брзине резања. Смањење силе резања дешава се услед повећања температуре у равни смицања, што резултује смањењем смицања материјала.

Нежељена и неизбежна појава која настаје приликом обраде резањем и која у највећој мери зависи од материјала обратка јесте хабање (трошење) алата.

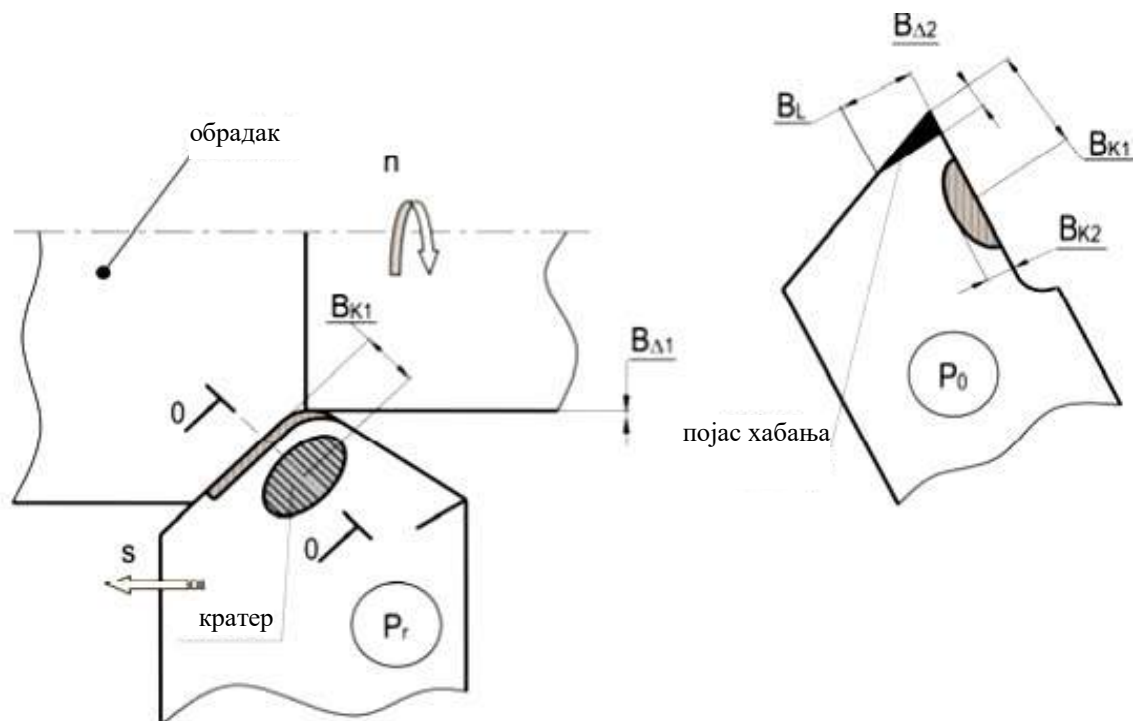
Негативна дејства процеса хабања алата на поједине карактеристике стања и техноекономске ефекте обрадних процеса последица су утицаја фактора преко којих се може утицати на интензитет, брзину и карактер хабања неког алата, а тиме и на основне карактеристике стања и најбитније излазне техноекономске ефекте обрадног процеса.

Неки од ових фактора су:

- врста и карактеристике материјала алата и обрадка,
- режим обраде (дубина резања, брзина резања, корак),
- геометрија алата
- средство за хлађење и подмазивање,
- температура резања θ ,
- крутост обрадног система и
- остали услови обраде.

Од врсте, квалитета и материјала стругарског ножа или плочице од тврдог метала која се механички учвршћује за носач зависи проток створене струготине, интензитет стварање наслага материјала обрадка на резној ивици, као и интензитет силе отпора резању. Правилно разумевање процеса резања, анализа сила које се јављају при резању и похабаности алата предмет је многих студија и истраживања. Експерименталним истраживањима треба утврдити међусобну зависност сила резања, у првом реду силе отпора резању, површинског трења израженог преко коефицијента трења, као и величине кратера насталог на резном алату као последица хабања. Као резултат експерименталних истраживања у овој области настали су различити математички модели који дају једнозначну повезаност и међусобне односе претходно наведених фактора који утичу на процес резања и хабање резног алата. Потребно је одредити расподелу притиска резног алата на материјал (за различите материјале или групе материјала), силе резања и коефицијент површинског трења како би се боље разумео, проценио и предвидео процес хабања алата [55]. Претходно објашњен метод разлагања и анализе сила резања пружа нови приступ у предвиђању хабања резног алата помоћу аналитичког модела који је заснован на мерењу интензитета силе резања. Често се анализом сила резања добијају и експериментални модели који дају информације о геометрији алата, односно вези геометрије алата и стварања струготине.

Процес хабања резног клина алата манифестује се кроз појаву зона хабања (слика 2.5). Међусобно се разликују по облику и локацији, обзиром да се јављају у два основна вида: као појас хабања на леђној и као кратер на грудној површини резног клина.



Слика 2.5. Зоне хабања са параметрима хабања на резном клину стругарског ножа [56, 57, 100, 101]

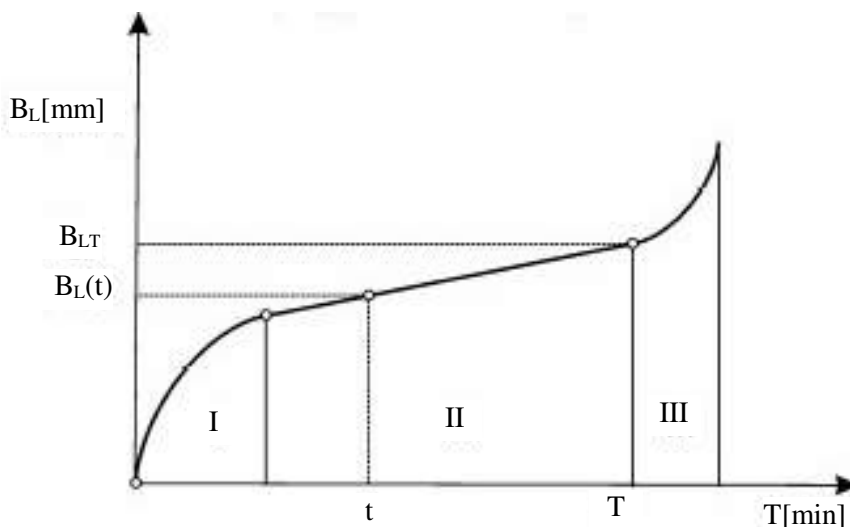
У зависности од технолошких услова и режима обраде, интензитет процеса хабања у овим областима је различит и може се описати на следећи начин:

- процес хабања је примаран и интензиван по леђној, док је секундаран и слаб по грудној површини резног клина,
- интензивно хабање грудне и слабо хабање леђне површине резног клина,
- интензивно хабање обе површине с тим што су појас и кратер одвојени и
- интензивно хабање обе површине с том разликом у односу на претходни случај која се огледа у томе што зоне хабања нису одвојене, већ се спајају у јединствену сложену зону хабања.

Када је предмет анализе хабање алата у зависности од времена може се рећи да постоје три зоне хабања материјала у току обраде стругањем. На слици 2.6 је приказана крива хабања алата у зависности од времена резања.

Карактеристичне зоне хабања које се на дијаграму могу уочити су:

- I зона хабања: иницијално или интензивно хабање,
- II зона хабања: устаљено или линеарно хабање и
- III зона хабања: прогресивно хабање или катастрофално хабање.



Слика 2.6. Облик функције хабања алата: $V_L=f(t)$ [56, 57, 101]

У технологији обраде резањем криве хабања алата имају вишеструки значај. Помоћу њих се одређује постојаност алата, као једна од кључних група функција обрадљивости материјала, оптимизација геометрије алата и услова обраде у различитим процесима обраде, степен обрадљивости материјала у односу на референтни материјал и резна способност једне врсте алата у односу на другу.

Хабање алата треба посматрати одвојено од трошења алата, с обзиром да је хабање само један од узрока трошења алата.

Поред хабања алата, један од узрока трошења алата је и крзање и одламање.

Ова два узрока трошења алата је понекада тешко разликовати, али се они ипак разликују обзиром да је хабање функција времена, док крзање и одломања нису нужно везани за време резања.

На процес хабања алата највећи утицај има брзина резања. Код повећања брзине резања значајно се повећава температура у контактної зони, што доводи до драстичног повећања хабања алата [59, 102].

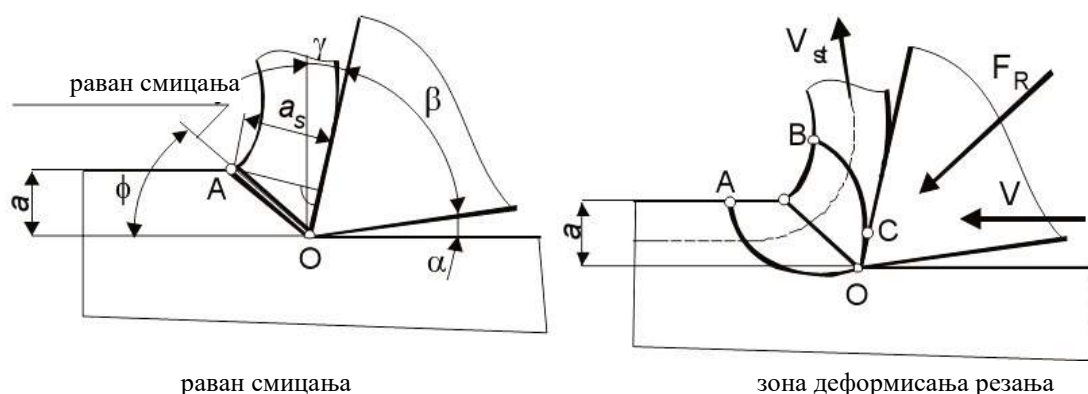
Према постојећим хипотезама у науци о резању, хабање алата се јавља у пет основних облика:

- абразивно хабање – настаје као последица абразивног деловања материјала обратка на алат,
- адхезионо хабање – настаје као последица узајамног адхезионог дејства материјала алата и обратка,
- дифузионо хабање – настаје као последица дифузионог растварања материјала алата у материјалу обратка,
- оксидационо хабање – настаје под утицајем хемијских реакција на резним површинама алата и
- хабање услед замора материјала.

Системи управљања процесом хабања алата постали су саставни део обрадних центара у савременим производним линијама. Систем за управљање хабањем алата са ТВ камером ради на принципу распознавања објеката тако што обрадни систем сам и аутоматски препознаје облик и положај зоне хабања, као и вредности параметара хабања сваког резног алата. Систем управљања хабањем алата помоћу сензора директно уграђених у конструкцију обрадног система. Овакав један систем реализује аутоматску и непрекидну контролу лома и хабања алата помоћу сензора (динамометра) уграђеног у лежај вретена машине алатке.

2.4. Природа процеса формирања струготине

Процес формирања струготине остварује се, у основи, локалним пластичним деформисањем материјала обратка. При продирању резног клина алата у обрадак, у делу обратка који се налази испред резног клина, јављају се сложена напрезања. Еластично деформисање које претходни пластичном је незнатно у односу на њега, па се процес резања може дефинисати и као локално пластично деформисање са раздвајањем по одређеним површинама. Раван у којој су напрезања на смицање максимална, што је приказано на слици 2.7, назива се раван смицања, а њен положај је одређен углом смицања φ . Већем углу смицања одговара мања дебљина струготине [2, 3, 60]. Зона ограничена криволинијским троуглом ОАВ представља зону резања или зону стварања струготине, у којој се непрекидно врши пластично деформисање и одвајање материјала.



Слика 2.7. Раван и зона смицања [2, 3, 103]

Процес формирања струготине има динамички карактер и јако је сложен. Параметри који утичу на процес формирања струготине су: карактеристике машине алатке, метод процеса резања, материјал обратка, материјал алата, геометријске карактеристике алата, технолошки параметри обраде, врста и начин довођења средства за хлађење и подмазивање и многи други.

Процес формирања струготине остварује се локалним пластичним деформисањем материјала обратка, на шта се утроши највећи рад у току процеса резања. При томе се јављају сложени механички, триболошки и термодинамички процеси који се дешавају у уској зони додира струготине и алата, оивичене

криволинијским троуглом. На слици 2.8 су приказани фактори који утичу на формирање струготине.



Слика 2.8. Утицајни фактори на процес образовања струготине [61, 62, 63, 104]

Процес формирања струготине може се посматрати кроз неколико фаза током којих материјал обрадкe трпи одређене промене. Уопштено, формирање струготине се своди на пластично деформисање материјала врхом алата. Након фазе пластичног деформисања наступа фаза током које се формирају иницијалне пукотине, након чега, услед повећања смичућих напона долази до смицања деформисаног материјала. Током завршне фазе долази до нагомилавања материјала, која се завршава тако што струготина одлази из зоне обраде у околину.

Посматрајући процес на макро нивоу, формирање струготине се одвија кроз три сукцесивне фазе:

- пластично деформисање материјала обрадкe - стварања струготине,
- одвођење струготине из зоне резања и
- савијање и ломљење струготине.

Процес настанка, одвођења и ломљења струготине у току обраде материјала сматра се континуалним процесом. Имајућу у виду сложеност процеса и промене у материјалу обратка које прате нагле промене оптерећења, а тиме и промене напона и вредности површинских притисака, затим променљиве вредности коефицијента трења и сила трења, може се закључити да процес настанка струготине има јако изражен динамички карактер. Сложеност појава које се дешавају у зони настанка струготине резултује непостојањем опште прихваћеног модела којим се може описати процес настанка струготине. Да би се описао динамички процес формирања струготине потребно је анализирати неколико развијених модела овог процеса.

Угао смицања φ је битан параметар којим се описује процес формирања струготине. Већем углу смицања одговара мања дебљина струготине. Такође, од његове величине зависи и сила резања, степен деформисања и количина развијене топлоте. Одређује се експериментално, а може се изразити преко Мерчантовог (*Merchant*) обрасца или преко степена сабијања струготине λ , као показатеља *степен деформисања струготине*, односно односа дебљине струготине и дубине резања [105, 106].

$$\lambda = \frac{a_2}{a_1} = \frac{l}{l_s} \quad (2.11.)$$

где је: a_2 - дебљина струготине у нормалном пресеку

a_1 - дубина резања у нормалном пресеку

l - одређен пут резања

l_s - дужина струготине која одговара путу l

Зависност између фактора сабијања струготине λ и угла смицања φ приказана је следећим изразом:

$$\lambda = \frac{a_2}{a_1} = \frac{OA \cdot \cos(\phi - \gamma)}{OA \cdot \sin \phi} = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{\sin \phi} \quad (2.12.)$$

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

$$\lambda = \frac{\cos \gamma}{\operatorname{tg} \phi} + \sin \gamma \rightarrow \phi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\cos \gamma}{\lambda - \sin \gamma} \right)$$

Многи истраживачи у свету су се бавили моделирањем процеса формирања струготине. Ли (*Lee*) и Шифер (*Schaffer*) су зону настанка струготине моделирали као скуп подељених зона у материјалу из којих су искључили ефекат отврдњавања материјала [107, 108]. На основу њиховог модела Шакрабати (*Chakrabaty*) је развио нелинеарни модел који је узимао у обзир отврдњавање материјала услед пластичног деформисања [109]. Сличне варијанте модела за дефинисање угла смицања су понудили Шо (*Shaw*) и Чулд (*Chuld*) који су у моделирање процеса укључили и коефицијент трења и величину леђног угла [110]. У принципу, сви наведени модели су се свели на Мерчантовом модел. Олеу (*Ohley*) је развио модел који се заснива на променљивим напонским стањима у зони смицања материјала [111]. Модел који су развили Ро (*Rowe*) и Спук (*Spuck*) описује угао смицања преко енергетских појава у зони настанка струготине, односно на границама зоне смицања [112]. Угао смицања су дефинисали преко односа трења у тачкама стварног контакта и укупног трења на додирним површинама алата и струготине, за који је следећим изразом дефинисан релативни напон смицања:

$$m \cdot \sin^2 \phi = \frac{1}{\chi} \cos \gamma \cos (2\phi - \gamma) \quad (2.13.)$$

где је: $m = \frac{\sigma_c}{\tau_c}$ - показатељ триболошких услова у равни смицања тј.

однос напона у равни смицања

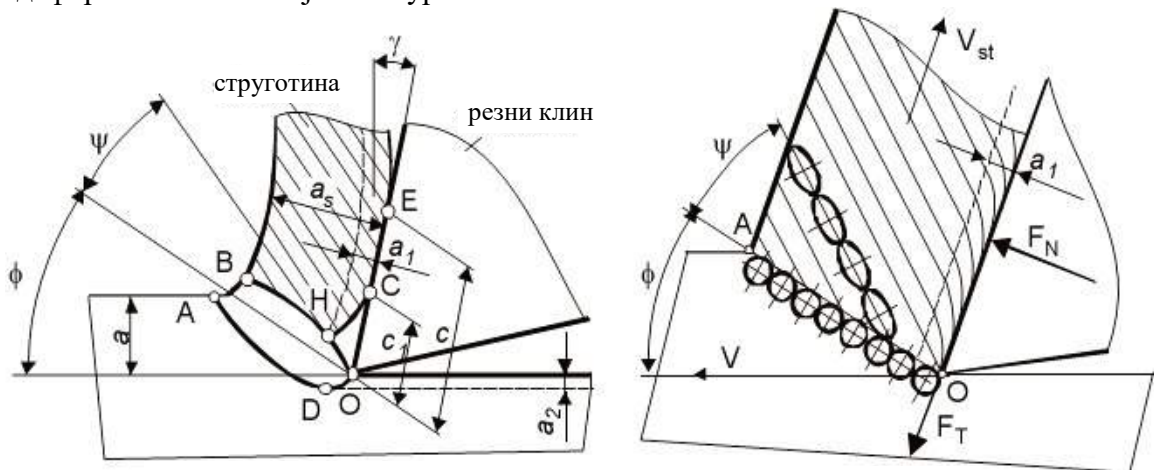
χ - карактеристика додирне дужине алата и струготине

Претходни модел је проширио Рут (*Wrught*), који је дефинисао угао смицања преко напона на равни смицања k_0 , који одговара материјалу који није претрпео отврдњавање и нема унутрашњих напрезања [112, 113]. Такође, модел узима у обзир и напон у равни смицања при појави отврдњавања материјала k_1 [114].

$$\cos (\phi_0 - \gamma) \sin \phi = \frac{k_0}{k_1} \left[\cos (45^\circ - \gamma) \sin (45^\circ + \gamma) \right] \quad (2.14.)$$

Де Шуфре (*De Chufree*) је наведени модел унапредио дефинисањем односа дужине додира алата и струготине и дебљине струготине [115, 116]. На основу анализе угла трења у материјалу, користећи принцип минимума енергије, дошао је до коефицијента сабијања материјала у току процеса формирања струготине, који је исказан преко напона у материјалу.

Процес деформисања се у реалности не одвија у једној равни - равни смицања, већ у једном слоју материјала око те равни, који се назива и зона смицања или зона деформисања (слика 2.9). Поред примарне зоне деформисања (I) - зона АДОHB, јавља се и секундарна зона деформација (II) - зона ОНС са кочионим слојем дебљине. Правац по коме се издужењем врши деформисање зрна материјала никада се не поклапа са правцем равни смицања, већ у односу на раван смицања заклапа одређени угао - угао текстуре ψ . На слици 2.9 је приказана зона деформисања и линија текстуре.



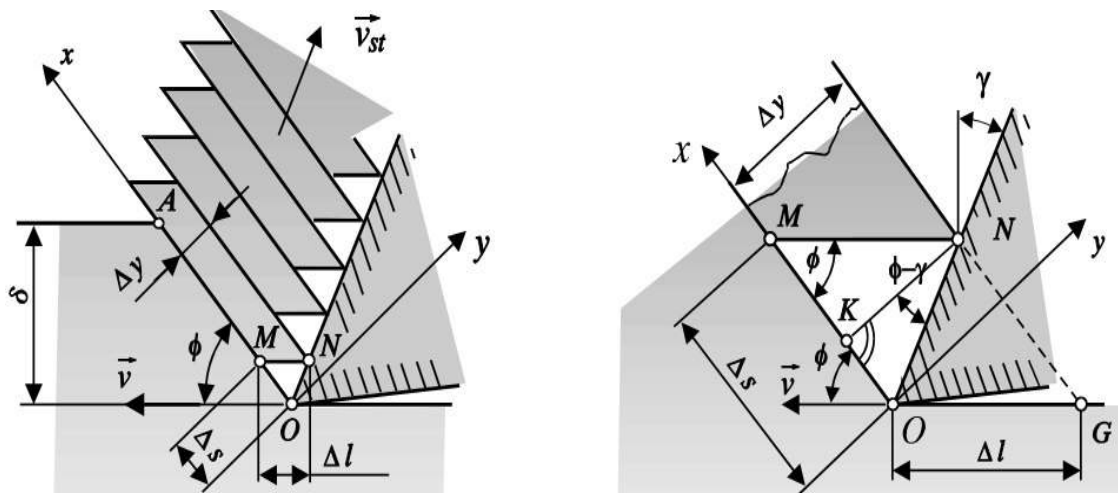
Слика 2.9. Зона деформисања и линија текстуре [61, 62, 63]

На дебљину зоне смицања односно дебљину зоне пластичног деформисања утиче врста материјала обрадка, као и услови под којима ће процес резања бити реализован. При великим брзинама резања и коришћењу алата са грудним углом мале или негативне вредности, дебљина зоне смицања је релативно мала, тако да се може апроксимирати са равни смицања. Процес формирања струготине може се посматрати кроз неколико фаза у којима материјал обрадка трпи одређене промене. На слици 2.10 је приказан модел смицања струготине у виду ламела, као

и механизам стварања струготине и у оквиру њега утицај угла смицања ϕ на дебљину струготине.

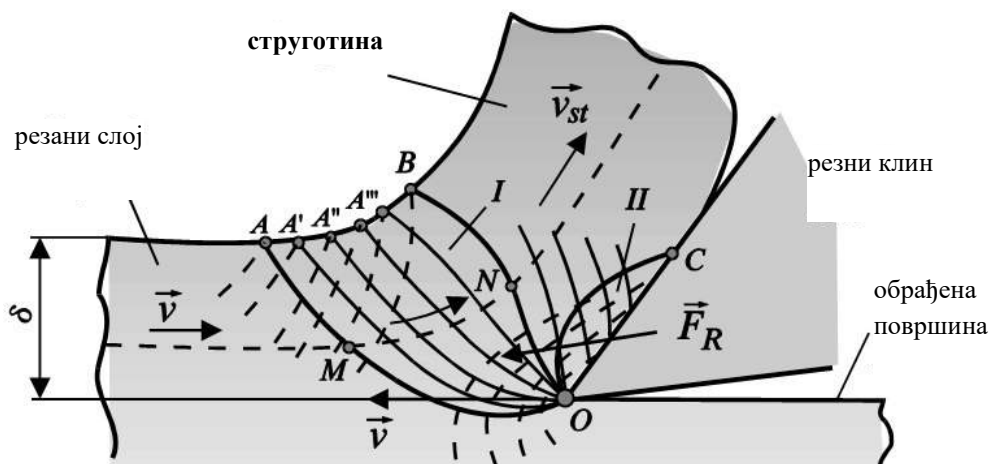
Испитивањима је утврђено да процес формирања струготине прати настанак ламеларних сегмената материјала коначне дебљине, који настају у равни смицања. Процес формирања струготине се одвија кроз низ узастопних процеса смицања ламела, приликом којег се могу дефинисати брзина клизања сегмената струготине и учесталост њиховог настанка. Оваква природа процеса указује на динамички карактер процеса настанка струготине.

Смицање струготине се не одвија у једној равни, већ се у процесу настанка струготине цео сегмент деформише. Поред смичућих напона који се у равнима смицања струготине јављају под утицајем смичуће силе, истовремено се јављају и нормални напони, који доприносе појави пластичног деформисања материјала обратка што се манифестује сабијањем материјала испред резног клина.



Слика 2.10. Модел механизма стварања струготине [61, 62, 63, 105]

Модел Zorev-a (Zorev), приказан на слици 2.11, којим се описује деформисање струготине је најближи стварном процесу настанка струготине [105-110]. Састоји се у постепеном претварању недеформисаног материјала у струготину. У зони деформисања се могу идентификовати површине истог степена деформисања смицањем. Без обзира што је овај модел најближи стварном процесу резања, његова примена је отежана због постојања великог броја ограничења.



Слика 2.11. Модел по Зореву [61, 62, 63, 110]

Окошума (*Okushima*) и Хутому (*Hutomi*) су за одређивање зоне деформисања користили модификовани модел Зорева [105-110]. Зона деформисања струготине се може описати помоћу два угла и то угла између правца којим се креће врх алата и правца АО - ϕ_1 , односно правца ОВ - ϕ_2 . Ови углови су дефинисани следећим изразима:

$$\phi_1 = \frac{K_1}{2} + \frac{\sigma}{2} + \frac{\gamma}{2} \text{ и } \phi_2 = \frac{K_2}{2} + \frac{\sigma}{2} + \frac{\gamma}{2} \quad (2.15.)$$

Коефицијенти K_1 и K_2 се рачунају применом *Okushima-Hutomi* образаца [105-110]:

$$K_1 = \arcsin \left[\frac{2}{h_1} \cdot \sin \rho + \sin (\rho - \gamma) \right] \text{ и } K_2 = \arcsin \left[\frac{2}{h_2} \cdot \sin \rho + \sin (\rho - \gamma) \right] \quad (2.16.)$$

где је: ρ - угао трења,

γ - грудни угао,

$h_1 = \frac{h}{a}$, $h_2 = \frac{h}{a_1}$ - коефицијенти,

a - дубина резања,

a_1 - дебљина струготине и

h - дужина додира струготине са грудном површином алата;
одређена експериментално

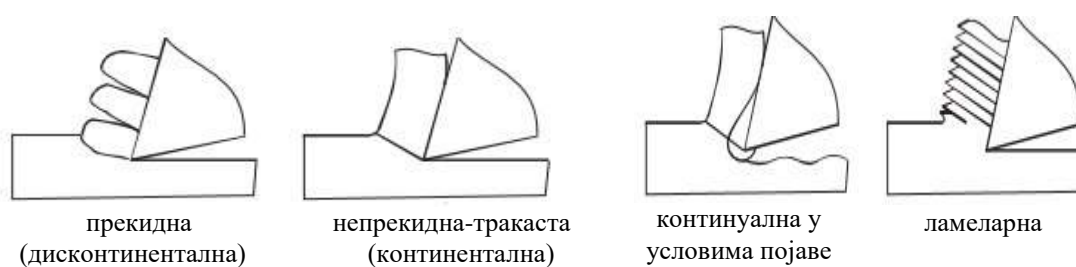
Кретању материјала по грудној површини алата супротстављају се нормалне силе у равни смицања, као и силе трења на грудној површини алата, услед чега се отпор пластичном деформисању знатно повећава, а долази и до ојачања материјала обратка. Како је показано бројним испитивањима, струготина се у току одвођења из зоне обраде закривљује односно савија, управо због утицаја сабијања материјала [105-110].

2.5. Врсте и облици струготине

У зависности од механизма и карактера образовања струготине, биће формирана струготина различитог облика и типа. Облик и тип струготине зависе од врсте материјала обратка, као и његових физичко-механичких карактеристика, пре свега пластичности и услова пластичног деформисања резног слоја: карактера напрезања (прекидно или непрекидно резање), времена, степена и брзине деформисања. Различити услови обраде, по спектру материјала обратка и њихових особина, методе обраде, као и други значајни фактори доводе до могућег настанка великог броја облика и типова струготине. У зависности од тога који је фактор доминантан, добија се одређени тип или врста струготине.

Могу се сврстати у три основна типа, што је приказано на слици 2.12. [3, 64, 65]:

- прекидна, дисконтинуална или кидана струготина,
- ламеларна или резана струготина и
- непрекидна, континуална или тракаста струготина.



Слика 2.12. Врсте струготине [3, 64, 65]

Прекидна или дисконтинуална струготина (кидана, ломљена или сегментна струготина) настаје током обраде ливеног гвожђе, ливене бронзе и других кртих материјала, као и при обради жилавих материјала, али малим брзинама резања и великим корацима. Процес формирања прекидне струготине прате ломови материјала нестационарне природе, међу којима се одвија процес пластичног деформисања дела материјала обратка, који се претвара у струготину. Уобичајени фактори који доводе до настанка оваквог типа струготине су:

- крт материјал обратка,
- мала брзина резања,
- мали нагибни угао алата и
- велика дубина резања.

Ламеларна струготина (резана или кратка струготина) настаје при нешто већим вредностима грудног угла алата него што је то случај код претходне. Ламеларна струготина се јавља у облику већих комада материјала, што директно зависи од самог материјала и стања оштрице резног алата. Ова врста струготине се најбоље одводи из зоне резања и најпожељнија је у процесу обраде.

Уобичајени фактори који утичу на настанак овог типа струготине су:

- жилав материјал обратка,
- велика сила трења на челу алата,
- висока температура у контакту обратка и алата и
- недостатак течности за хлађење и подмазивање.

Непрекидна или континуална струготина (тракаста струготина) је најжељенији облик струготине при обради већине врста материјала. Формирање ове врсте струготине је најчешће последица пластичног деформисања у зони смицања. Одвајање материјала се врши континуално у виду трака одређене дебљине, при чему је квалитет обрађене површине веома добар. Међутим, при обради на аутоматима овај тип струготине није пожељан, обзиром на опасност по безбедност радника узроковану њеним нагомилавањем [66, 67, 68, 69]. Фактори који утичу на настанак овог тип струготине су:

- велика жилавост материјал обратка,
- велики угао између алата и обратка,
- мала сила трења између алата и обратка,
- велика брзина резања,
- мала дубина резања,
- уобичајена и правилна употреба средства за хлађење и подмазивање и
- резни алат генерише мали отпор резању.

Табела 2.1 даје упоредни приказ карактеристика врста струготина на основу материјала, угла између алата и обратка, дубине, као и брзине резања [105-110].

Табела 2.1. Поређење врста струготина и њихових карактеристика [105-110]

врста/тип струготине	материјал	угао између алата и обратка	дубина резања	брзина резања
континуална	жилав	велик	мали	велика/средња
дисконтинуална	крт, жилав, тврд	средњи	велик	мала
ламеларна	жилав	мали/средњи	средњи	средња

2.5.1. Класификација облика струготине





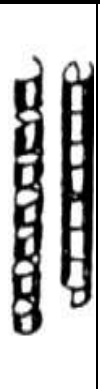
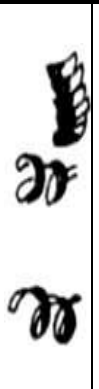





Детаљном анализом закључено је да се струготина може класификовати у десет врста. Табела 2.2 даје упоредни приказ ових десет врсти струготина.

Врсте струготине под бројевима 1), 2) и 3) су неповољне, под бројевима 6), 7) и 8) добре, док су преостале, 4), 5), 9) и 10) задовољавајуће. Дуга глатка струготина јавља се при већим дубинама резања, што значи да струготина има већи пресек, а алат нема ломач струготине. Згужвана струготина настаје при оптималној вредности корака помоћног кретања. Завојна струготина настаје у случајевима коришћења алата са минималним полупречником заобљења врха.

Завојно-цилиндрична струготина настаје при мањим дубинама резања и већим вредностима полупречника заобљења врха алата.

Када се у овим условима повећа дубина резања настаје цилиндрична струготину. Обзиром да имају облик дугих завојних трака, задње две анализирани врсте струготина карактерише отежано уклањање са машине алатке. Кратка цилиндрична, спирално цилиндрична и спирална струготина настају из цилиндричне струготине у случајевима обраде са повећаним кораком. Са даљим повећањем корака настају крупно и ситно дробљена струготина. Због велике учесталости дробљења долази до појаве допунског динамичког оптерећења машине алатке, што доводи до крзања сечива, а у одређеним случајевима и до лома алата. Поред тога, због облика струготине отежано је чишћење машине.

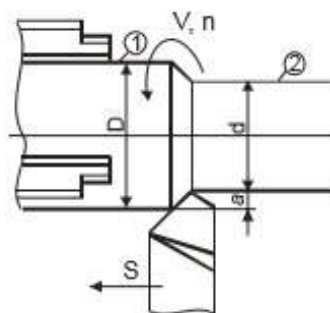
Табела 2.2. Општа класификација облика струготине на врсте и групе [70]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Облици струготине											
Назив струготине	Дуга глатка	Згужвана	Завојна	Завојна цилиндрична	Цилиндрична	Кратка цилиндрична	Спирална цилиндрична	Спирална	Крупна дробљена	Ситна дробљена	
	Неповољна					Добра					
	Задовољава										

2.5.2. Елементи режима резања

У циљу континуалног одвајања процеса стварања струготине на стругу, потребно је да постоји равномерно обртно кретање припремка и равномерно кретање сечива алата паралелно оси припремка или управно на њу. У том циљу је пре почетка процеса обраде резањем потребно дефинисати основне параметре режима резања од којих су неки приказани на слици 2.13. Основни параметри резања су:

- a - дубина резања mm ,
- s - корак mm/o ,
- b - ширина струготине mm ,
- δ - дебљина струготине mm ,
- A - попречни пресек струготине mm^2 ,
- v - брзина резања m/min ,
- F - отпори резања N и
- t_g - главно време обраде s .



стругање

Слика 2.13. Елементи режима резања [71, 72, 111]

2.5.2.1. Дубина резања

Дубина резања a представља растојање између обрађене површине обратка и необрађене површине припремка мерено у правцу нормалном на осу обратка код уздужне обраде, односно у правцу осе обратка код попречне обраде. Другим речима дубина резања представља дебљину слоја материјала који ће бити

уклањен током процеса резања [71]. У зависности од облика припремка, дубина резања се дефинише следећим изразима:

- при обради ротационих делова: $a = \frac{D-d}{2}$, *mm* и (2.17.)

- при обради призматичних делова: $a = h - h_1$, *mm*. (2.18.)

Ознаке које су коришћене у претходно наведеним изразима представљају следеће величине:

- D - пречник припремка,
- d - пречник изратка,
- h - висина припремка и
- h_1 - висина изратка

2.5.2.2. Корак

Корак или помак при стругању s представља вредност померања алата или обратка у правцу помоћног кретања за један обртај алата или обратка, за један зуб алата када је реч о глодању, за један дупли ход алата или обратка при рендисању или за један његов обртај при равном бушењу.

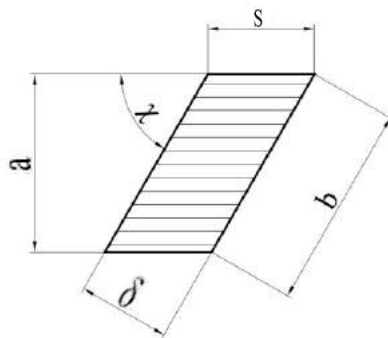
Можемо рећи да корак представља величину померања сечива алата у односу на осу обраде при једном обртају предмета обраде. Ово је померање у већини случајева праволинијско. У зависности од смера кретања стругарског ножа корак може бити:

- уздужни – правац кретања алата је паралелан оси обратка,
- попречни – правац кретања алата је управан на осу обратка и
- нагибни – правац кретања алата заклапа одређени угао са осом обратка [3].

На величину корака утиче велики број фактора везаних за карактеристике машине алатке, алата и обратка.

2.5.2.3. Ширина струготине

Ширина струготине b представља растојање између обрађене и необрађене површине мерено по површини резања тј. дужина сечива алата која је у захвату са материјалом. На слици 2.14 су приказане величине које дефинишу попречни пресек струготине [71].



Слика 2.14. Величине које дефинишу попречни пресек струготине [71, 72, 115]

2.5.2.4. Дебљина струготине

Дебљина струготине δ представља растојање између два узастопна положаја површине резања мерено у правцу управном на резну ивицу у равни грудне површине.

Дебљина струготине утиче на специфично оптерећење сечива стругарског ножа, као и на топлотно оптерећење. Променом нападног угла χ можемо утицати на промену дебљине струготине, а да при томе дубина резања и корак остану непромењени [71].

2.5.2.5. Попречни пресек струготине

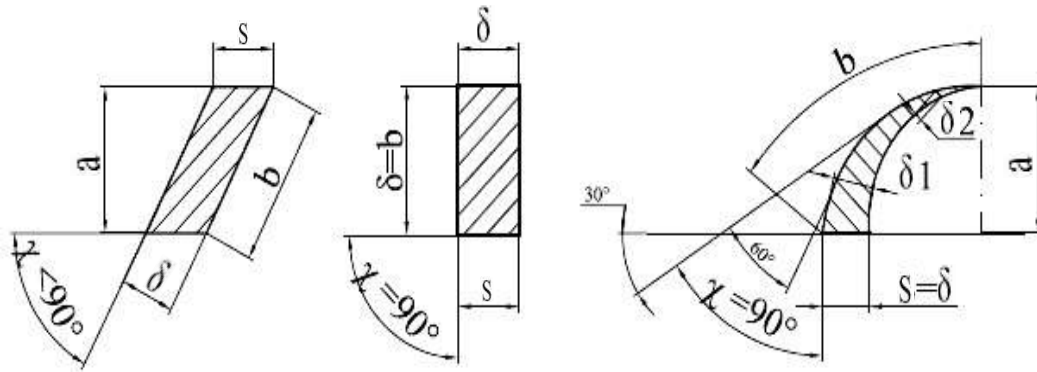
Попречни пресек струготине може бити нормалан и стваран. Нормалан пресек струготине A_n одговара производу дубине резања a и ширине струготине b , односно корака s и дебљине струготине δ :

$$A_n = a \cdot b = s \cdot \sin \chi \cdot \frac{\delta}{\sin \chi} = s \cdot \delta \quad (2.19.)$$

Стварни пресек струготине A_s је мањи од нормалног пресека A_n због постојања помоћног сечива ножа.

$$A_s = A_n - A_0 \quad (2.20.)$$

Површина неравнина A_0 не прелази вредност од 2% величине A_n . Облик попречног пресека струготине зависи од облика сечива и његовог положаја у односу на обрадак. На слици 2.15 су приказани попречни пресеци струготине.



Слика 2.15. Попречни пресеци струготине [71, 72, 73, 116]

2.5.2.6. Брзина резања

Под брзином резања v подразумевамо величину релативног померања врха резне ивице алата у односу на површину резања. При обради на стругу брзина резања представља обимну брзину обратка и најчешће се изражава у јединици m/min . При уздужној обради на стругу тачке сечива се налазе на међусобно различитим растојањима од осе обратка тј. на различитим пречницима, што условљава променљивост брзине резања дуж сечива. У случају контурног стругања или попречне обраде та променљивост је још више изражена, па се број обртаја, самим тим и брзина резања мења континуално у зависности од пречника обратка.

У претходно описаним случајевима променљивих растојања од осе ротације, самим тим и брзине резања, као меродавна брзином резања v се увек усваја она која одговара највећем пречнику обратка. При познатом броју обртаја

n o/min и пречнику обраде обратка D mm , брзина резања се рачуна по обрасцу:

$$v = \frac{D\pi n}{1000} \text{ m/min} \quad (2.21.)$$

За производне операције стругањем у случајевима појединачне и малосеријске производње, брзина резања се најчешће усваја из таблица препоручених вредности. При усвајању брзине резања из таблица у обзир се не узимају сви фактори који утичу на њену вредност, па се овај начин одређена брзина резања сматра приближним. Због тога се у условима серијске и масовне производње брзина резања одређује на основу проширених израза, који поред елемената режима обраде и постојаност алата, узима у обзир и читав низ корекционих фактора, K_i , којима се дефинише утицај геометрије алата, врсте материјала алата, критеријума затупљености и других величина које утичу на вредност брзине резања.

За уздужне обраде на стругу брзина резања се прорачунава помоћу следећег израза:

$$v = \frac{C_{V1}}{T^{mx1} \cdot S^{y1} \cdot (HB/200)^n} \cdot K_m \cdot K_a \cdot K_h \cdot K_r \cdot K \cdot K_p \cdot K_{shp} \text{ m/min} \quad (2.22.)$$

У случају попречне обраде на стругу, као што су операције одсецања и усецања, брзина резања прорачунава се коришћењем следећег израза:

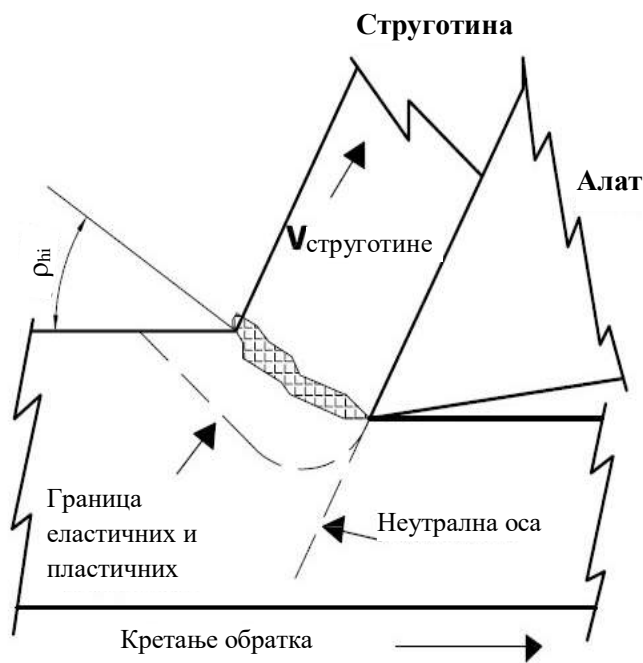
$$v = \frac{C_{V2}}{T^{mx2} \cdot S^{y2} \cdot (HB/200)^n} \cdot K_m \cdot K_a \cdot K_h \cdot K_r \cdot K \cdot K_p \cdot K_{shp} \text{ m/min} \quad (2.23.)$$

2.6. Теорија и механизам формирања струготине

Процес формирања струготине се у општем случају, без обзира на метод обраде одвија у три фазе:

- I фаза: фаза пластичног деформисања материјала резаног слоја
- II фаза: фаза слободног тока струготине по грудној површини и
- III фаза: фаза ломљења струготине помоћу ломача.

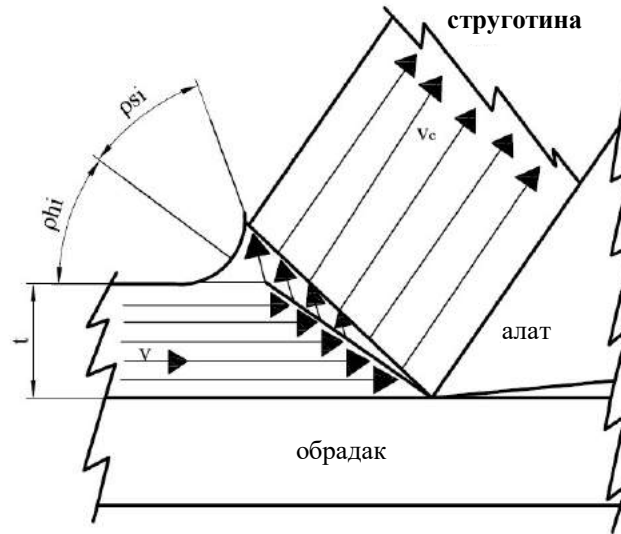
На слици 2.16 приказан је 2D модел формирања струготине, дат због своје једноставности и прегледности процеса формирања струготине.



Слика 2.16. 2D модел формирања струготине [72, 115]

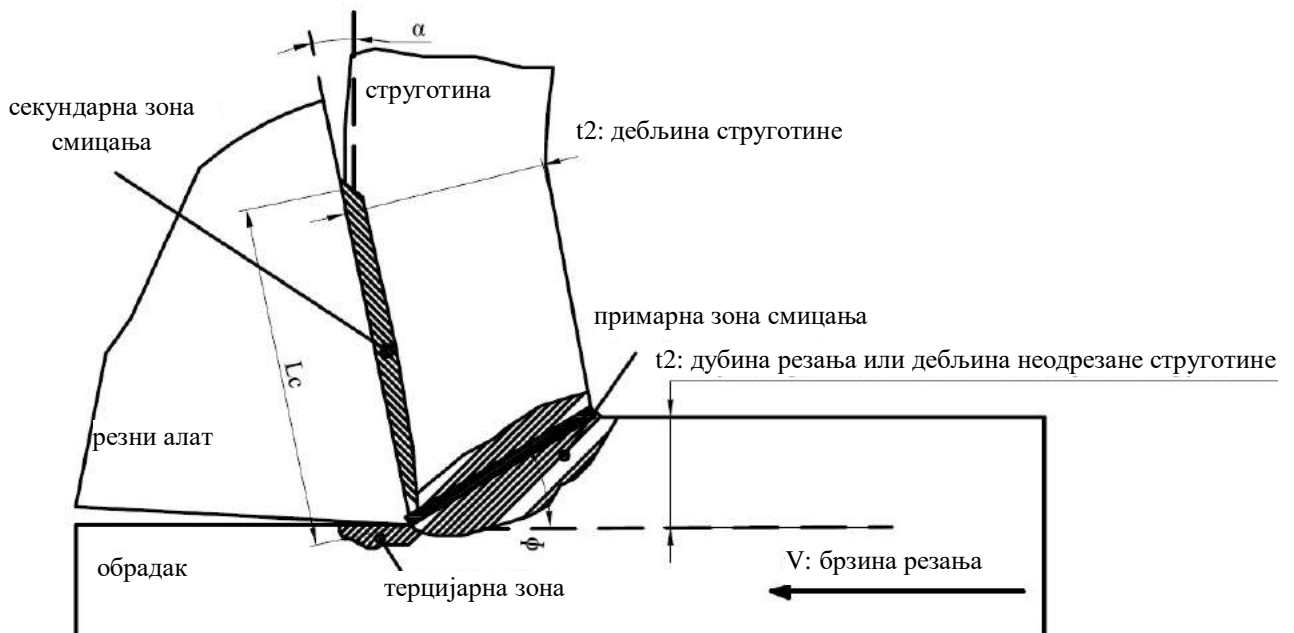
На слици 2.16 је приказано да је материјал непосредно испред резног алата савијен навише и бива пресован у ужој зони смицања, што је на цртежу и осенчено. Код већине анализа процеса формирања струготине, зона смицања се поједностављено приказује као раван смицања. Како резни алат иде напред материјал испред алата пролази кроз смичућу раван. Уколико је материјал обратка деформабилан тј. склон развлачењу, неће доћи до лома материјала при формирању струготине, па ће самим тим струготина бити континуална тј. тракаста. Као последица притиска резног алата на обрадак долази до напрезања и појаве напона на површини обратка, затим следи еластична деформација, а одмах након ње и пластична деформација што резултује одвајањем материјала и формирањем струготине.

На слици 2.17 су приказане зоне одвајања материјала током његово пластичног деформисања.



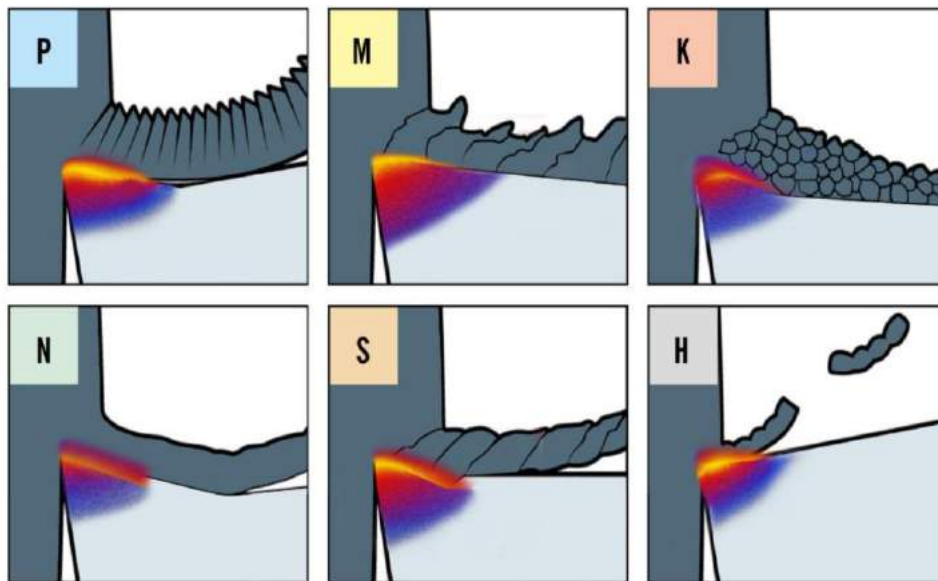
Слика 2.17. Зона одвајања материјала [72, 73, 107]

На слици 2.18 је приказана површина смицања-сечења, као и линије протока материјала. Део материјала се нагомилава, тече или клизи под утицајем ножа.



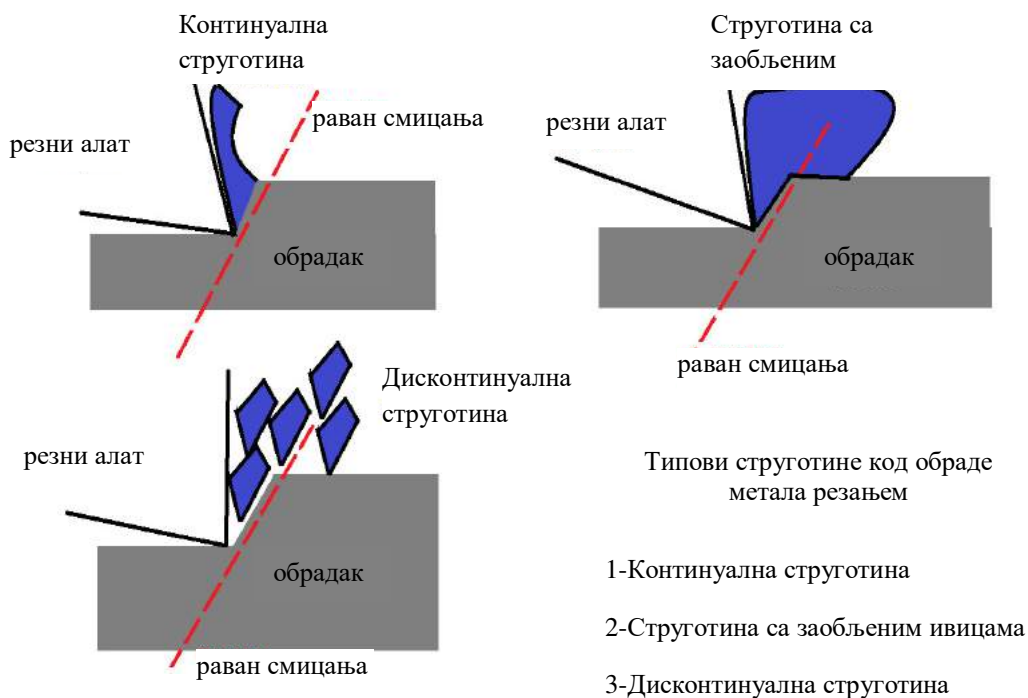
Слика 2.18. Процес формирања струготине [72, 73, 103]

На слици 2.19 је приказан процес формирање струготине за различите материјале обратка и температуре резања које се том приликом јављају.



Слика 2.19. Формирање струготине и температура резања [72, 73, 102]

Сваки материјал обратка различито утиче на процес формирања струготине, укључујући и тип струготине, што је приказано на слици 2.20, генерисање топлоте и варирање топлоте у зони резања.



Слика 2.20. Формирање струготине [72, 73, 100, 101]

2.7. Топлота резања

Појава топлоте у зони резања последица је претварања механичке енергије у топлотну. Топлота утиче на процес образовања струготине, пластично деформисање струготине и фактор сабијања струготине, отпоре резању, појаву наслага, интензитет развоја процеса хабања резних елемената алата и структуру и дебљину дефектног слоја.

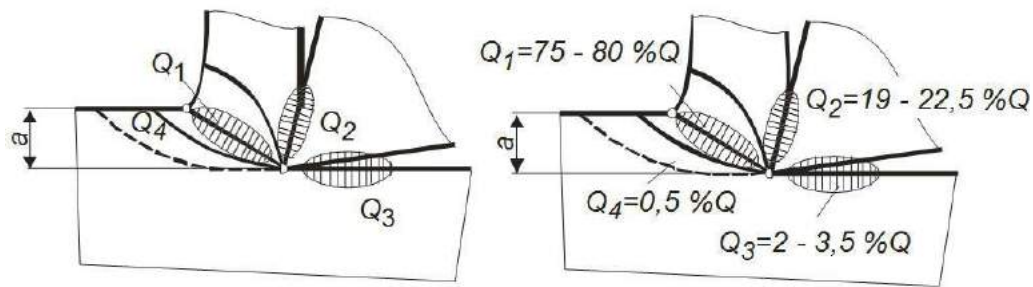
Више од 99,5% енергије односно механичког рада утроши се на деформисање материјала обратка и савладавање сила трења на контактним површинама резног клина алата, грудној и леђној и претвара у топлоту. Количина генерисане топлоте се може израчунати по следећем изразу [3, 74]:

$$Q = A = F_1 \cdot v, J \quad (2.24.)$$

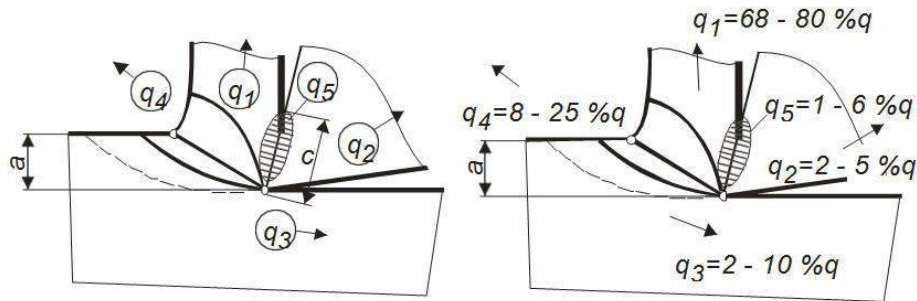
где је Q - генерисана топлота, A - механички рад, F_1 - сила трења, v – брзина резања. Генерисана топлота Q је резултат појаве четири топлотна извора у зонама, приказаних на слици 2.21:

- $Q_1 = (75 \div 80) \% Q$ - последица смицања у примарној зони деформисања, у којој се одиграва пластично деформисање материјала обратка и његово претварање у струготину,
- $Q_2 = (19 \div 22.5) \% Q$ - последица контакта грудне површине резног клина алата и струготине ширине b ,
- $Q_3 = (2 \div 3.5) \% Q$ - последица контакта леђне површине резног клина алата и обрађене површине и
- $Q_4 \approx 0.5 \% Q$ - зона еластичних деформација испод зоне смицања.

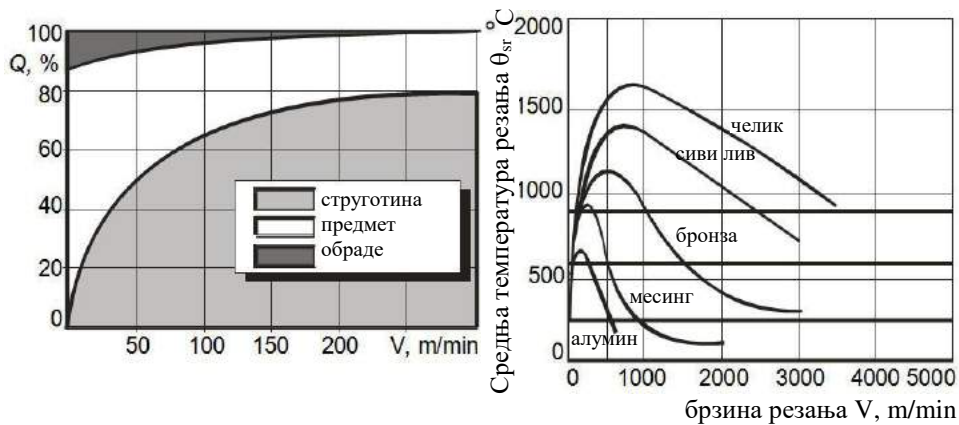
Кратка анализа топлотних извора показује да се највећа количина топлоте генерише у зони деформисања и у контакту грудне површине резног клина алата и струготине. Управо су то и области којима се, у анализи проблематике процеса резања и посвећује највећа пажња [2, 3].



а) Топлотни извори



б) Топлотни понори



в) Процентуални удео одвођења топлоте

Слика 2.21. Топлотни извори, понори и процентуални удео одвођења топлоте при стругању [2, 3]

Карактер одвођења односно дистрибуције топлоте зависи од методе обраде, брзине резања, топлотне проводљивости материјала обратка и алата, димензија обратка и алата и сл. Топлотни понори тј. елементи који одводе топлоту су приказани на слици 2.21 су:

$q_1 = (68 \div 80) \% q$ - струготина; одводи већи део топлоте генерисане у извору Q_1 и део топлоте генерисане у извору Q_2 ,

- $q_2 = (2 \div 5) \% q$ - резни алат; одводи већи део топлоте генерисане у извору Q_2 и део топлоте генерисане у извору Q_3 ,
- $q_3 = (2 \div 10) \% q$ - обрадак; одводи топлоту генерисану у извору Q_3 и део топлоте генерисане у изворима Q_2 и Q_3 ,
- $q_4 = (8 \div 25) \% q$ - околина односно средство за хлађење и подмазивање; одводи део укупне топлоте генерисане при резању; при обради без примене СХП, топлота бива одводена захваљујући ваздушном струјању у околину и
- $q_5 = (1 \div 6) \% q$ - површински слојеви алата; део топлоте се акумулира у површинским слојевима алата и изазива повећање њихове температуре.

Као што се из претходне анализе може видети, највећи део генерисане топлоте се одводи струготином. При малим брзинама резања количина генерисане топлоте коју одводи струготина и она коју одводи обрадак су приближно исте. Са повећањем брзине резања смањује се количина топлоте коју одводе обрадак и алатом [3].

Примена савремених поступака обраде високим брзинама резања омогућава да струготином бива одведено и до 95% генерисане топлоте, што значи да су алат и обрадак практично хладни. Познавањем топлотних извора и понора може се формирати и једначина топлотног биланса процеса резања која гласи [3]:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 \quad (2.25.)$$

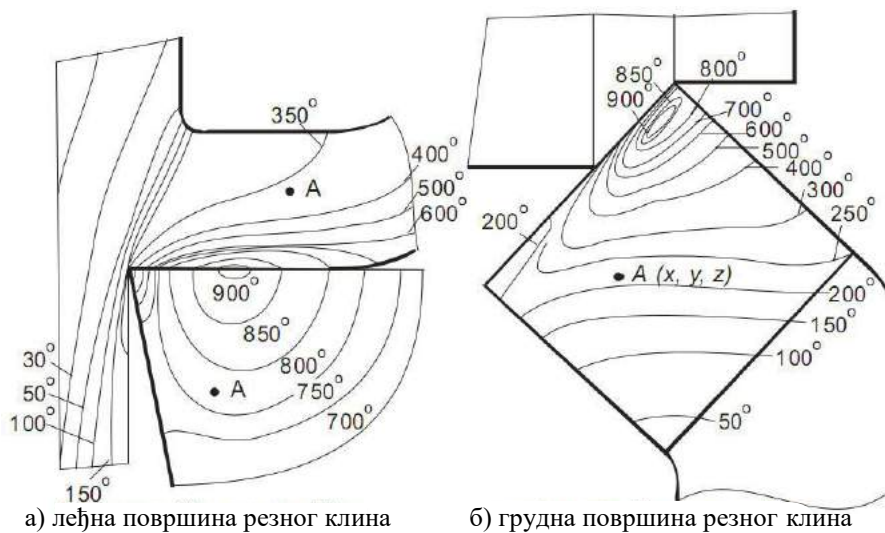
2.7.1. Температура резања

Са теоријске и практичне основе термовизија даје драгоцене информације које побољшавају и верификују тачност обраде модела. Топлотна анализа током које се мери расподела температуре алата, обратка или струготине током обраде резањем реализује се кроз три фазе: добијање термалне слике, претварање снимљене температуре у очигледну температуру и претварање очигледне температуре у праву температуру. Треба имати на уму да је при овако конципираној топлотној анализи присутан велики број извора грешака мерења које треба узети у обзир. За правилан процес мерења температуре алата или температуре обратка важно је разумети како извори грешака утичу на мерну

несигурност. Неки фактори који утичу на грешку мерења код термографског мерења су утицајнији и препознатљивији од других. Један од таквих фактора је неправилна спроведена или у потпуности неспроведена калибрација камере. Међутим, резање метала представља јединствени изазов за мерење због фактора и елемената као што су: велика брзина кретања, када је нпр. реч о обради стругањем, површине обратка и алата, потреба за великим увећањима, утицај микро црног ефекта и промена емисионих карактеристика.

Топлотно зрачење је електромагнетско зрачење емитовано у опсегу таласних дужина неких предмета у вези са температуром објекта. Температура објекта, заједно са другим факторима, одређује интензитет зрачења на свакој таласној дужини. Радиациону термографију као један од метода топлотне анализе карактерише употреба сензора за мерење топлотног зрачења коју емитује обрадак, с циље утврђивања његове температуре. Стварна температура односи се на стварну температуру обратка. Треба имати на уму да ово није обавезно, као ни дефинисање температуре коју је камера пријавила као стварну температуру, као и чињеницу да термалне камере заправо не мере температуру. Мере интензитет електромагнетског зрачења у распону таласних дужина током временског периода у оквиру топлотне анализе. Калибрација камере омогућава кориснику да измерени интензитет електромагнетског зрачења претвори у тачан податак о температури. Снимљена температура може бити конвертована у очигледну температуру, а она затим у праву температуру. Калибрација камере подразумева квалитативно и квантитативно разумевање физичких својстава обратка, карактеристике коришћене камере, као и могуће грешке приликом генерисања слике. Дефинисање тачне вредности температура које се јављају приликом резања је циљ у случају коришћења термалних камера, када су нам потребна истраживања у самој зони резања [75, 76].

Генерисана топлота у зони резања доводи до загревања обратка, струготине и резног алата, што резултује појавом температура и карактеристичних температурних поља приказаних на слици 2.22 на којој се може видети да се различите тачке струготине, као и грудне и леђне површине резног клина алата налазе на различитим температурама [75, 76, 3].



Слика 2.22. Расподела температура по зонама код обраде стругањем; на слици су приказане а) леђна површина и б) грудна површина резног клина [75, 76, 3]

У оба случаја контакта обратка и алата максимална температура је измерена у тачки која се налази на средини контакта. Температура било које тачке у зони резања зависи од координате те тачке (x, y, z) и времена (t) и представљена је функцијом $\theta = f(x, y, z, t)$, за разлику од температурских области ограничених карактеристичним температурним пољима односно изотермама које представљају криве константне температуре.

Поред температуре у било којој тачки, за проучавање процеса обраде резањем када је топлота у питању значајне су и следеће карактеристичне температуре приказане на слици 2.23:

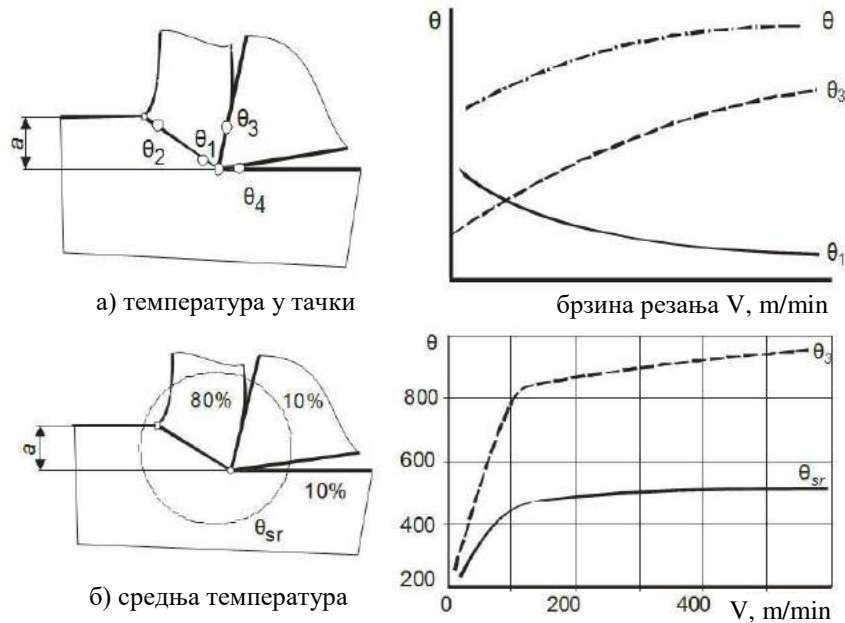
- Температуре у карактеристичним тачкама зоне резања.
- Средња температура резања.

Температура θ_1 , настаје као последица лома материјала односно раскидања структуре основног материјала обратка. Код жилавијих материјала проузрокована је сабијањем струготине и расте са порастом брзине резања. Зато се често назива и температуром брзине резања. Температура отпора резања θ_2 настаје у корену струготине као резултат сабијања и деформисања струготине. Температура θ_3 је температура у тачки контакта струготине и грудне површине резног клина алата.

Свој максимум достиже на половини контакта.

На контактної површини леђне површине резног клина алата и обрађене површине обратка јавља се контактна температура θ_4 .

Температура зоне резања је средња температура резања θ_{sr} .



Слика 2.23. Температура у карактеристичним тачкама и средња температура резања [3, 114, 116]

За одређивање вредности температуре резања постоји већи број мање или више тачних, прецизних и поузданих метода. Методе одређивања температуре резања могу се поделити у три групе:

- методе прорачуна методологије резања,
- методе аналогије и
- методе мерења температуре резања.

Методе мерења температура алата, струготине и обратка се могу сврстати у две групе, у зависности од тога да ли се температура мери у зони резања или у тачки, тачније у уском подручју алата, струготине или обратка, и то на:

- методе мерења средње температуре резања и
- методе мерења температуре у тачки тј. на појединим местима.

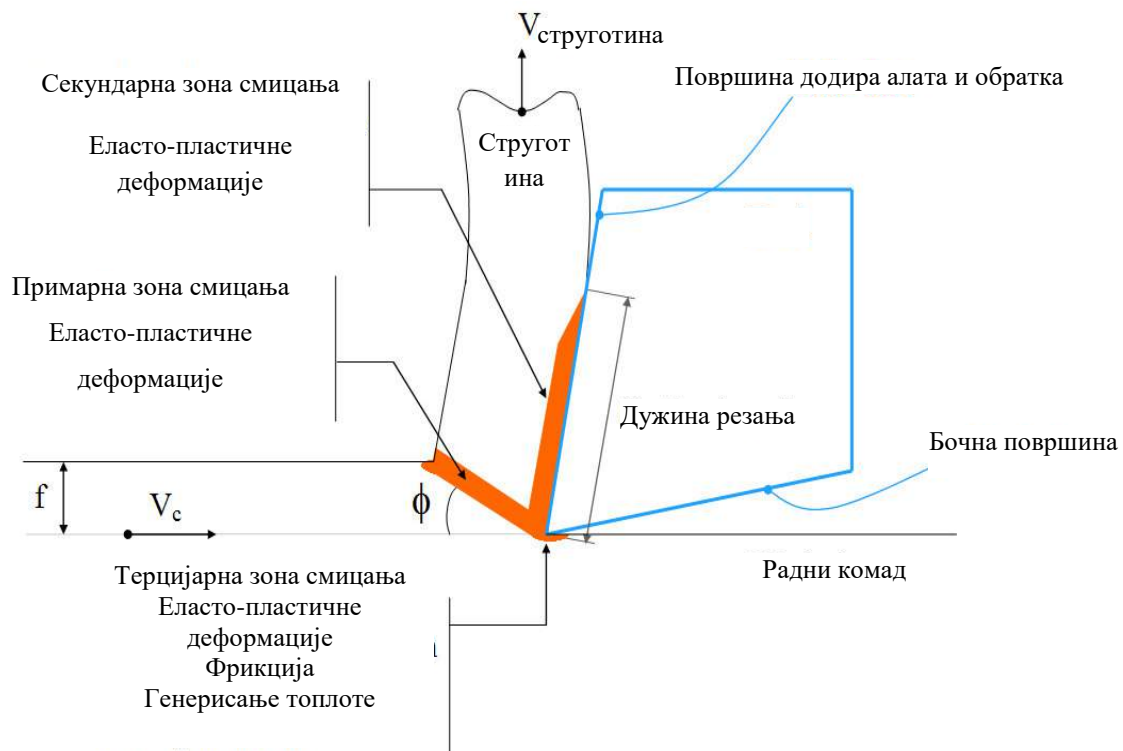
За мерење средње температуре резања најчешће се користе следеће методе: калориметарска метода, метода промене боје танког слоја оксида, метода

термоосетљивих боја или премаза и метода природних термопарова.

За мерење температуре резања у тачки примењују се следеће методе: метода вештачких термопарова, метода полувештачких термопарова, радијацијска или оптичка метода, метода микроскопске анализе, метода електротоплотне аналогичности и друге [3].

Примарни утицај температуре је онај који се рефлектује на хабање алата. Иако постоје разни механизми који описују процес хабања алата, опште је познато да до прогресивног хабања алата доводи температура генерисана у зони резања. Шта више, животни век алата одредиће максимална температура у зони резања тј. у тачки контакта алата и обрађеног материјала. Поред алата, на максималну температуру и температурни градијент утичу металуршке структурне промене у обрађеној површини и заостали напони у крајњем делу. Још један познати проблем се јавља у процесу резања, а то је ниска топлотна проводљивост материјала због чега може доћи до топлотних напрезања чије су последице замор и лом алата.

Прецизно познавање површине која зрачи током резања је изузетно тешко, обзиром да је она функција температуре површине, неравнине површине и могућих фазних прелаза. Опструкција коју доноси струготине је још један недостатак ове технике. Измерена температура је обично она која је измерена на горњој површини струготине, а не у њеној унутрашњости. Разлог је тај што алат често заклања и онемогућава адекватан приступ мерном месту. Други покушаји забележени у литератури, реализовани у циљу мерења температуре у зони резања метала могу се окарактерисати као металографске методе и процена температуре на основу боје струготине. Основни модел извора топлоте код ортогоналног процеса резања метала, је приказан на слици 2.24, где се подразумева енергија смицања која је створена у примарној зони смицања, енергија трења која је произведена на струготини у контактаној зони и топлота која се генерише између струготине, алата и обрађеног материјала [77, 78, 100].



Слика 2.24. Извори топлоте код ортогоналног процеса резања метала [77, 78, 100]

Генерисање топлоте има значајан утицај на трења које се појављује на релацији алат-струготина и алат-обрадак, па због тога има утицаја на нивоу саме силе резања. Пораст температуре обратка омекшава материјал, чиме се смањује сила резања и енергија потребна за реализацију смицања. Топлота генерисана као последица контакта алата и струготине утиче на отежавано стварање атмосфере потребне за смицање. Од значаја је и на хабање алата, а самим тим и на ограничење животног века алата. Високе температуре на обратку убрзавају механизам хабања до којег долази услед пластичног деформисања на обрађеној површини обратка. То доводи до значајног термичког оптерећења подлоге која може изазвати фазе трансформације, генерисати површинске промене и високе заостале напоне који имају негативан утицај на замарање и животни век машинских делова [78].

Обрада података почиње анализом генералних вредности, као што је тзв. "температура резања" односно средње температуре дуж контактне зоне алата и струготине. Циљ у овом случају је да се добије слика брзине промене и расподеле средње температуре током процеса резања [78].

Одређивање дела топлоте акумулисане у резном алату и струготини за време резања, као и дистрибуцију температура површине резног алата од посебног је значаја за контролисање утицаја на животни век алата, као и на квалитет обрађене површине.

Познавање температура односно температурног модела је неопходно у циљу разумевања, али и контроле целокупног процеса обраде резањем. Конвенционалне експерименталне методе попут термопарова обезбеђују само генералну информацију, која је проблематична с аспекта детаљнијег разматрања процеса резања, а посебно је отежано сагледавање температурног градијента у зони резања, тј. зони настајања струготине. Током рада машине алатке се загревају, обзиром да је током обраде резањем већина испоручене енергије трансформисана у топлоту и постала извор топлоте машине алатке или унутрашњи извор топлоте. Поред тога, вретено машине алатке је један од највећих унутрашњих извора топлоте. Топлота коју генерише има највећи утицај на деградацију прецизности резања односно обраде.

Предност термографије и оваквог начина прикупљања информација о температурама, температурном пољу и градијенту је знатно већа поузданост у односу на друге, класичне методе, које углавном прикупљају информације о температурама у зони резања тек након завршеног процеса обраде. Код термографије процес снимања се одвија у реалном времену и при констатним временским трајањем процеса обраде. Након завршеног снимања слике и подаци се помоћу одговарајућег апликативног софтвера обрађују и спремају за анализу и преглед. Дакле подаци до којих се дошло снимањем су заправо реакције сензора камере на побуде које долазе из зоне резања.

Експериментална испитивања, као и добијање термалне слике која се користи као параметар за одређивање стања алата треба реализовати у складу са смерницама и упутствима наведеним у стандарду ISO-18434-2008. Термалне слике се могу користити као параметар за оцену стања алата, све док разлика у вредности температура није мања од 20°C тј. док је обрада стабилна. Машинска обрада може да се настави и ако је разлика у температури мања од 80°C [79].

2.8. Утицај материјала обратка на процес формирања струготине

На основу хемијских и механичких карактеристика материјала обратка може се закључити да је 90% коришћених материјала из групе ливеног гвожђа, челика и нерђајућих челика.

Ливено гвожђе има најмањи отпор смицању што захтева и најмању снагу потребну за одвајање струготине деловањем резног алата. Ливено гвожђе тврдоће 150 Бринела и феритне структуре лако је за обраду, али током обраде може да дође до његовог лепљења за алат, нарочито при малим брзинама резања. Током обраде ливеног гвожђа тврдоће веће од (280÷300), *HV*, феритно-перлитног типа постоји тенденција генерисања веће количине топлоту, притиска и вибрација. Додатни фактор који при анализи особина ливеног гвожђа треба узети је стање ивица обратка, што ствара додатне захтеве при одабиру одговарајућег алата.

Челик се по карактеристикама отпора смицању налази између ливеног гвожђа и нерђајућег челика. Нерђајући челик има много мању топлотну проводљивост и већу растегљивост од конвенционалног челика.

При обради нерђајућег челика доминантне перформансе су веће трење, веће силе резања и високе температуре у зони резања. Ове карактеристике су нарочито типичне за аустенитне нерђајуће челике [80].

2.9. Утицај параметара обраде на процес формирања струготине

Поред материјала обратка на процес формирања струготине утичу и параметри обраде, као што су корак, дубина резања, нападни угао између алата и обратка, али и њихови међусобни односи и корелације у процесу обраде.

- *Корак алата:*

Корак алата је у тесној вези за геометријом ломача струготине, како би се могао контролисати процес формирања струготине. Геометрија ломача струготине одређује способност резне ивице алата да при разним корацима алата и дубинама резања ломи и одваја струготину. Ако је нпр. корак

алата мали ствараће се дуга, лепљива струготина која неће имати способност да се сама одваја од алата и обратка. Уколико је корак велики, приликом обраде ћемо добити кратку и дебелу струготину, што опет може да изазове њено нагомилавање у зони обраде. Нагомилана струготина може да изазове и оштећења обрађених површина, али и површина алата у смислу стварања кратера и хабања. При великом кораку и стварању описане струготине већи је и утрошак енергије уложене у производни процес. Идеална струготине ће бити формирана уколико дубина резања има максималну вредност, уз пажљиво изабран и подешен коарк у складу с геометријом алата и карактеристикама ломача струготине [80].

- *Нападни угао између алата и обратка:*

Нападни угао представља угао између резне ивице и правца корака тј. аксијалног и радијалног кретања стругарског ножа. Овај угао утиче на смер формирања и одвајања струготине, као и на дебљину и ширину струготине. Када је овај угао мањи нпр. 90° , прилаз обратку је нагао, па је за обраду потребна већа резна сила, а формира се краћа и шири струготина [84]. При углови величине $(30\div 45)^\circ$ биће формирана глатка и мека струготине уз мању силу резања.

- *Дубина резања (обраде):*

Дубина резања такође утиче на процес формирања струготине, на њен облик и смер стварања. Мала дубина резања доводи до формирања спиралне струготине, док већа дубина резања доводи до стварање кратке струготине у облику зареза.

Искуство, као и математичке анализе у досадашњем истраживању, су показале да се најбоља завршна обрада добија при већим радијусима заобљења алата и малим вредностима корака.

С друге стране се показало да велике вредности радијуса заобљења врха алата доводе до појаве вибрације и слабијег одвајања и ломљење струготине [80], па је због тога потребно направити оптималан избор параметара.

2.10. Морфологија струготине

Морфологија струготине, а поготову њеног корена струготине још један је важан параметар код дефинисања машинске обраде било ког материјала.

Морфологија струготине је често истраживано поље, а нарочито у погледу утицаја радног окружења на њен корен.

Из праксе је познато да се различити типови корена струготине формирају под различитим условима резања.

Различити експериментални резултати показују да на формирање корена струготине утиче и средство за подмазивање и хлађење.

На овом пољу нађене су различите варијације корена струготине.

У пракси, експериментом је утврђено да формирање корена струготине постаје повољније са минималном количином средства за подмазивање у односу на суву обраду тј. обраду без средства подмазивања и хлађења.

Са друге стране дебљина корена је при тзв. сувој обради дебљина корена струготине и углови клизања су мањи [81].

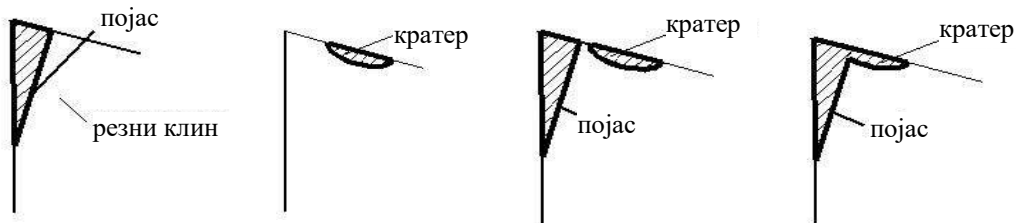
2.11. Процес хабања резног алата код обраде скидањем струготине

2.11.1. Општи термини и појмови

Хабање представља једну од најнегативнијих појава у зони резања. Као основни услови за настанак и интензиван развој процеса хабања алата сматрају се високи притисци и високе температуре у контакту алата, струготине и површине резања, као и високе релативне брзине. Манифестациони облици хабања су:

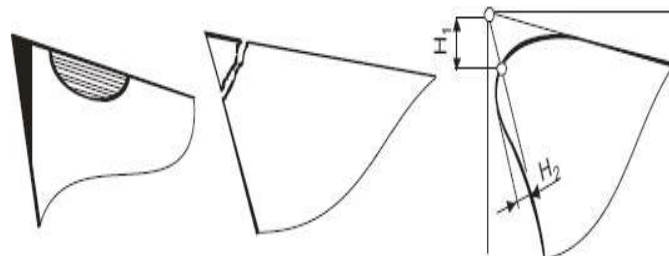
- бочно хабање,
- кратер настао хабањем - кратерно хабање и
- хабање врха резног алата.

Хабање резног клина алата представља губитак честица материјала алата заједно са струготином, обрађеном површином и средством за хлађење и подмазивање, што 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 [82]. Поменути облик и положај је приказан на слици 2.25.



Слика 2.25. Облик и положај у зони хабања на режном клину [82]

На слици 2.26 је приказано хабање резног клина алата при обради резањем. Могу се уочити две карактеристичне величине које се мере као показатељ хабања.



Слика 2.26. Хабање резног клина алата [82, 83, 103]

2.11.2. Топлотни биланс, хабање и постојаност алата

Укупна количина топлоте која се током обраде резањем ствара у обрадном систему, трансформацијом улазне енергије и конвекцијом или радијацијом тј. зрачењем у околину има утицај на следеће показатеље квалитета процеса обраде:

- тачност обраде преко температурних деформација елемената обрадног система и
- постојаност алата услед смањења радних способности и његовог резног дела при повишеним температурама.

На тачност и прецизност обраде у највећој мери утичу деформације елемената машине алатке, што је посебно значајно када се ради о прецизним машинама алаткама. Најчешћи узрочници тј. извори топлоте који се појављују у једном обрадном систему су тзв. унутрашњи извори топлоте. Неки од њих су: лежајеви вретена, резервоар уља и средства за хлађење и подмазивање, преносници главног и помоћног кретања, електромотор, клизне вођице и на крају сам процес обраде. Поред унутрашњих извора топлоте на температуру обрадног система утицај имају и конвекција (пренос) и радијација (зрачење) из околине која окружује посматрани обрадни систем. Укупна количина топлоте која се јавља у једном обрадном систему зависи од извршеног корисног рада, енергетских губитака, дејста силе трења, кретања вођица и преносника. Све ово доводи до акумулације топлоте у обрадном систему и његовог загревања, самим тим и до температурних деформација целог система. Укупан користан рад остварен у зони резања трансформише се у топлоту која загрева алат, обрадак и струготину. При раду резног алата у оквиру процеса резања, присутни су сви видови хабања: абразивно, адхезионо, дифузионо, хемијско и оксидационо. На брзину и интензитет процеса хабања утичу следећи параметри:

- материјал обратка,
- материјал резног алата,
- геометрија алата,
- брзина резања,
- корак,
- дубина резања,
- статичка крутост система,
- динамичко понашање система,
- примена средстава за хлађење и подмазивање и
- остали технолошки услови обраде (стање припремка, начин стезања обратка и резног алата и др).

У зависности од конкретног случаја и конкретних утицајних фактора, као и од тога који су фактори хабања доминантни, могу настати следећи случајеви хабања резног алата:

- интензивно хабање леђне и слабо хабање грудне површине,
- слабо хабање леђне и интензивно хабање грудне површине,
- приближно исто хабање и леђне и грудне површине и
- заобљење резне ивице алата.

На слици 2.27 су приказане геометријске карактеристике кратера на стругарском ножу насталог као последица деловања доминантних фактора хабања током процеса резања.



Слика 2.27. Кратер на стругарском ножу настао као последица хабања [82, 83, 115]

Процес хабање радних елемената резног клина алата карактерише непрекидност, као и манифестација у свим тренуцима процеса резања. Поред тога, у мањој или већој мери се појављује при свим технолошким условима и режимима обраде.

Хабање алата директно утиче на следеће параметре:

- тачност мера у процесу обраде и
- квалитет обрађене површине.

Скраћење врха резног алата директно утиче на појаву могућности грешке у мери обратка, док на квалитет обрађене површине посебан утицај има појас хабања на леђној површини резног алата. Ширина појаса хабања није константна, већ се на појединим местима јављају жљебови. На почетку процеса хабања се јавља први жљоб, да би се даље појавио други, трећи и тако редом. Растојање између жљебова једнако је величини корака.

Појас хабања, који је у контакту са површином резања, приближно је константан, док се на растојању које одговара контакту сечива и материјала обратка појављује улазни жљоб. Жљебови представљају тзв. концентрисано хабање и имају посебан и значајан утицај на величину храпавости обрађене површине.

Постојаност резног алата представља његову способност очувања резних карактеристика у одређеним експлоатацијским условима. Поред хабања на затупљење резног алата утиче и појава напрслина тј. бразди на грудној и леђној површини као и тзв. крзање сечива резног алата. Појава већих напрслина или одваљивања већих делова материјала са резног дела доводе до потпуног уништења и неупотребљивости резног алата [84].

2.11.3. Кратер настао хабањем

Кратер настао хабањем састоји се из конкавне секције на врху алата настале деловањем клизања (померања) струготине по површини. Кратер настао хабањем утиче на механику процеса повећавајући тренутни бочни угао резног алата и консеквентно чинећи процес резања лакшим. Истовремено, кратер настао хабањем слаби ивицу резног алата и повећава могућност за лом резног алата. Генерално, кратер настао хабањем резног алата је релативно мали, а приказан је на слици 2.28 у зависности да ли је алат нов или похабан. Може се видети да су за похабан алат, кратери на површини, који су настали хабањем, знатно већи.

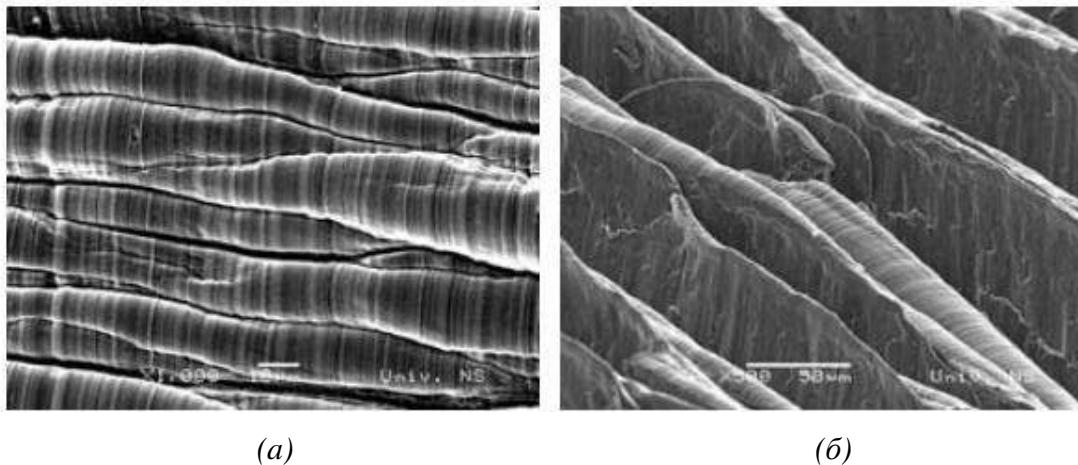
2.11.4. Општи принципи процеса хабања алата

Захтеви које мора да задовољи нека величина да би се могла сматрати параметром хабања су да на довољно поуздан начин, у времену и простору осликава процес хабања алата, као и да се брзо, лако и тачно може измерити. Процес хабања елемената резног клина алата може се пратити бројним параметрима који се могу поделити у две групе и то:

- директне и
- индиректне параметре хабања.

Директни параметри хабања су параметри којима се прати промена облика резног клина алата. То су:

- линијски параметри хабања B_i ,
- запремински параметри хабања V_i и
- масени параметри хабања M_i [3].

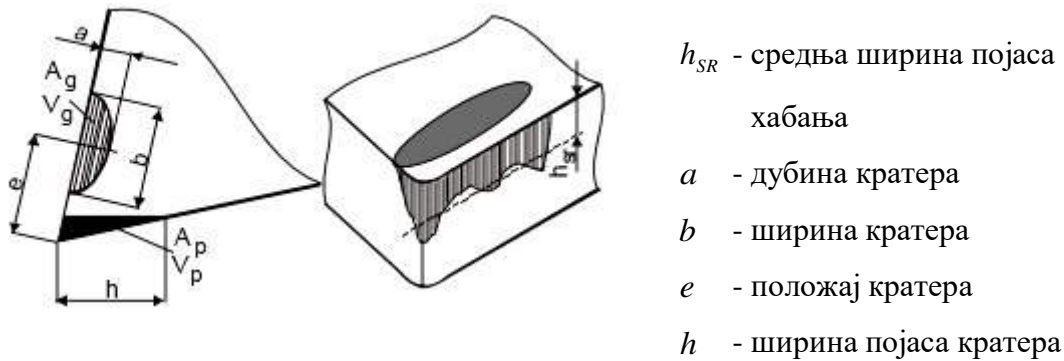


Слика 2.28. Изглед слободне површине струготине настале при обради алатом различитог степена похабаности: (а) нов алат, (б) похабан алат [83, 84, 111]

Линијски параметри B_i су основни параметри хабања. Њима се прате промене димензија кратера на грудној површини резног клина алата a , b и/или ширине појаса хабања на леђној површини h , што је приказано на слици 2.29.

Основни разлози квантификовања хабања алата линијским параметрима су:

- могућност дефинисања норми затупљености и потрошености алата,
- лакоћа мерења,
- директна повезаност са квалитетом конформности и
- могућност примене у адаптивно управљаним обрадним системима.



Слика 2.29. Линијски, запремински масени параметри хабања резног алата [3, 100, 111]

На слици 2.29 су приказани и површина попречног пресека кратера на грудној површини A_g и површина попречног пресека појаса хабања на леђној површини A_p .

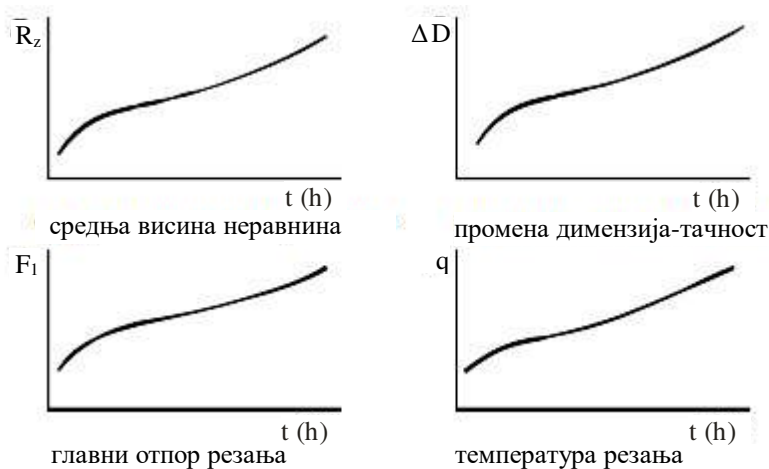
Хабања алата се као законитост знатно објективније може описати помоћу запреминских V_i и масених M_i параметара хабања. Запремински параметри хабања приказани на слици 2.29 су запремина похабаног материјала са грудне површине V_g и леђне површине резног клина V_p . Масени параметри хабања M_i су маса похабаног материјала са грудне површине резног клина, са леђне површине резног клина или укупна маса похабаног материјала [2, 3, 99].

Индиректни параметри хабања, приказани на слици 2.30 су параметри који се односе на праћење промена на предмету обраде, промена у процесу резања као што су промене хрпавости обрађене површине, димензија предмета обраде односно тачности обраде, отпора резања, температуре резања и сл.

За праћење хабања резних елемената алата користе се директне и индиректне методе.

Директне методе праћења хабања резних елемената алата су методе које обезбеђују мерење параметера хабања резних елемената алата. То су масене методе, микроскопске методе, методе отисака и радиоактивне методе.

Индиректне методе су методе праћења промена у времену параметара хртавости обрађене површине, димензија предмета обраде, отпора резања, температуре резања и других. То су методе праћења промена на предмету обраде и у процесу резања. Ретко се примењују и не могу обезбедити праћење процеса хабања, већ само указати на моменат затупљења алата.



Слика 2.30. Индиректни параметри хабања [2, 3, 99]

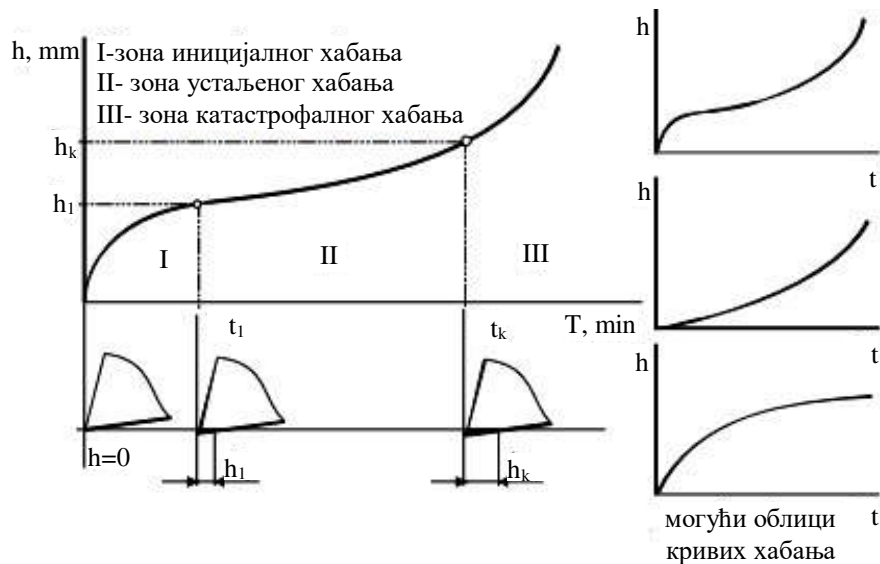
Процес хабања се математички моделира коришћењем функционалних зависности промене параметра хабања са временом. Три основне зависности које се том приликом примењују су: крива хабања, крива интензитета и крива отпорности на хабање. Развој процеса хабања резних елемената алата са временом се најчешће приказује кривом промене ширине појаса хабања на леђној површини резног клина алата, познатом под називом крива хабања. Крива хабања је приказана на слици 2.31. Крива хабања указује на три карактеристичне зоне хабања резних елемената алата.

Поменуте зоне су:

- зона иницијалног (почетног) или убрзаног хабања,
- зона устаљеног или нормалног хабања и
- зона наглог пораста ширине појаса хабања или катастрофалног хабања [3].

У зони иницијалног хабања његов интензитет је проузрокован високим специфичним топлотним и механичким оптерећењима, насталим као последица релативно мале масе резног клина алата, обзиром да је у том тренутку алат потпуно оштар.

У другој фази хабања алат поприма други облик, што за последицу има да је маса резног клина већа. То проузрокује смањење специфичних оптерећења, како топлотних, тако и механичких. Ова појава за последицу има успоравање интензитета развоја процеса хабања и настајање зоне устаљеног или нормалног хабања.

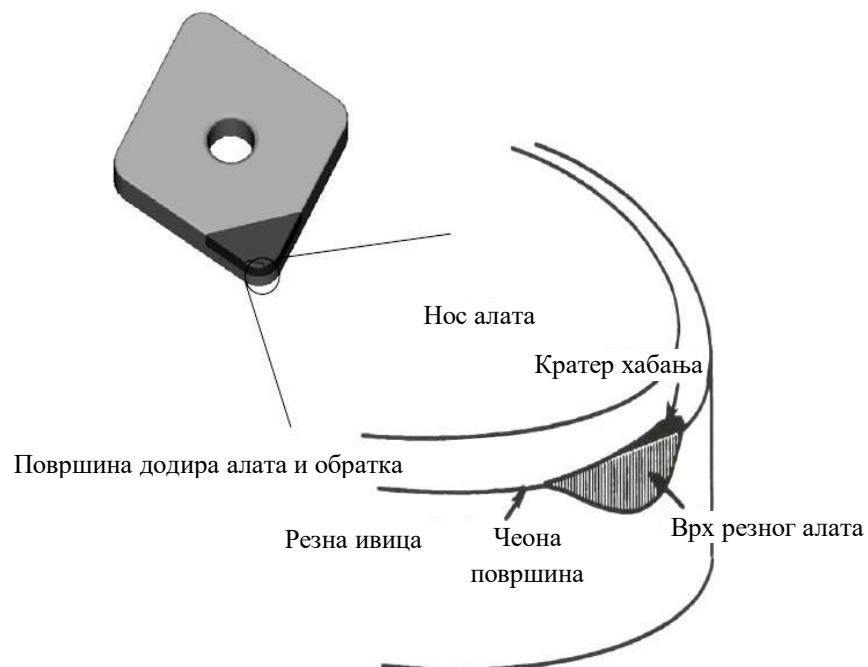


Слика 2.31. Принципијелни облик криве хабања [3, 99]

У трећој фази хабања коју карактерише катастрофално хабање долази до наглог пораста ширине појаса хабања. Резни клин алата се мења, па може доћи до појаве крзања, међукристалних и других промена, односно до трајне неупотребљивости алата.

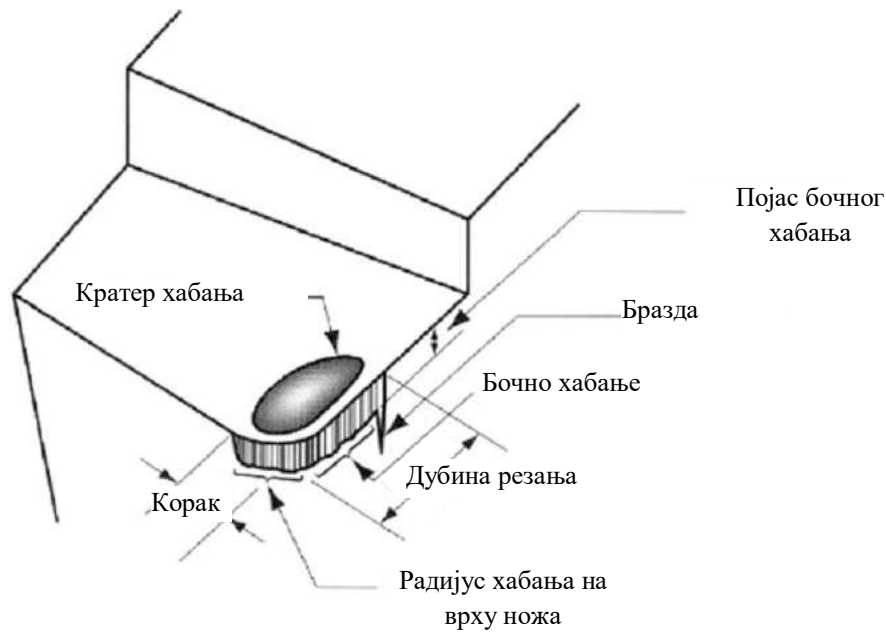
Век трајања алата је дефинисан као дужина времена резања током којег се алат може адекватно користити. Друга дефиниција трајања алата је корисно време које је протекло до тренутка достизања критеријумске вредности хабања. Предвиђање и детекција узрока хабања алата је врло значајна, баш као и детекција било каквих оштећења на обрађеној површини. Ово је значајно у циљу избегавања губитка производа, оштећења машина алатки и смањења продуктивности.

Век трајања алата се мора проценити у складу с брзином хабања алата за резање и површинском хrapавошћу радног комада. Висока температура у зонама резања утиче на појаву високе стопе хабања у свим врстама хабања. При већој брзини резања, генерише се већа топлота, мада треба имати на уму да сваки режим резања има своје специфичности и по питању хабања [85, 86, 99]. На слици 2.32 је приказана матрица хабања врха резног алата.



Слика 2.32. Матрица хабања врха резног алата (пличица стругарског ножа) [85, 86, 99]

Хабање алата је најнеповољнија карактеристика процеса обраде, јер негативно утиче на животног век алата, што такође утиче на тачност димензија, квалитет површине, самим тим и на економичност процеса обраде. Зато се надгледање хабања алата намеће као неопходност приликом реализације процеса резања. Основни појмови хабања стругарског ножа су приказани на слици 2.33.



Слика 2.33. Основни појмови хабања стругарског ножа [85, 86, 99]

Једна од најзаступљенијих врсти система за надгледање хабања алата је систем чији је рад заснован на примени сензора. Њихов рад се одвија у три корака:

- прикупљање података или сигнала,
- обрада сигнала и анализа и
- резултат стања алата.

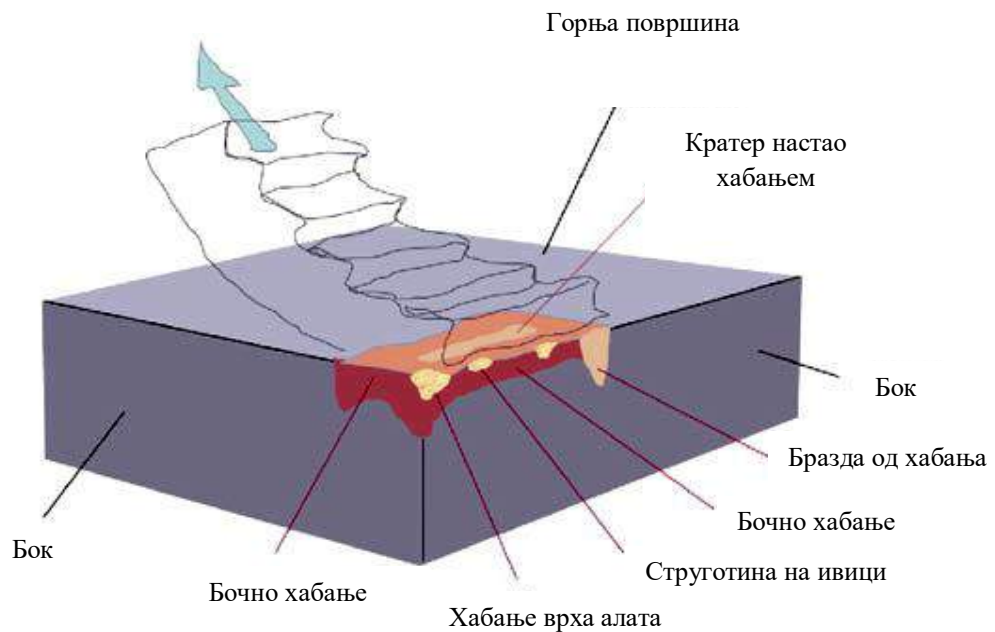
Обрада сигнала као веома важан корак у процесу праћења хабања алата реализује се у два корака, претходна обрада и пост-процесирање.

Процес обраде сигнала се спроводи применом различитих врста опреме, као што су појачавачи, филтери и друга слична опрема.

На слици 2.34 су приказани делови алата који се хабају током процеса обраде материјала скидањем струготине.

Могу се уочити карактеристични делови алата које се најчешће хабају. Ти делови алата су:

- горња површина алата и
- бокови алата.



Слика 2.34. Хабање резног алата [86, 87, 99, 106]

3. АНФИС МЕТОДОЛОГИЈА

3.1. Вештачке неуронске мреже

Вештачке неуронске мреже су засноване на принципу рада неурона људског мозга односно биолошких неуронских мрежа [88]. Представљају системе вештачке интелигенције за предвиђање. Људски мозак и нервни систем је сачињен од нервних ћелија, неурона. Неурон има четири основна дела:

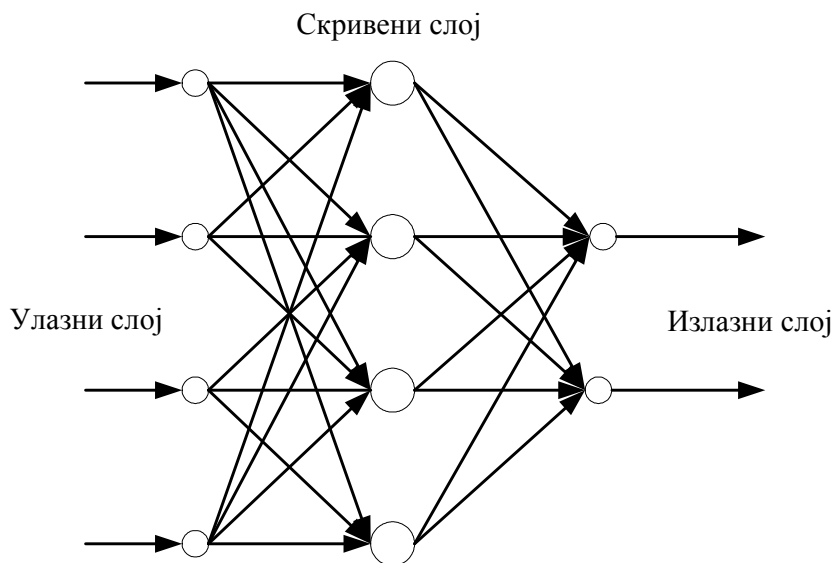
- улазни део ћелије,
- тело ћелије,
- излазни део ћелије, и
- синапсе.

Улазни део ћелије прима сигнале из спољашњег окружења преко чула. Тело ћелије обрађује те сигнале, добијајући на тај начин излазни импулс који представља излазни део ћелије. Тај импулс се преноси од једне до друге нервне ћелије док се не заврши његова обрада или се шаље излазном делу чиме се завршава његова обрада.

Принцип рада вештачког неурона се заснива на утврђивању оптималних вредности параметара тог неурона односно оптималних вредности тежинских коефицијената, а затим на примени истих за предвиђање вредности параметара неког посматраног проблема. Другим речима рад вештачке неуронске мреже представља једну врсту оптимизације вредности њихових тежинских коефицијената и њихову даљу примену у предвиђању. Математички се успостављање система вештачке неуронске мрежа може формулисати као оптимизација неке функције, где је потребно пронаћи минимум или максимум те функције у датим граничним условима.

Главна карактеристика вештачке неуронске мреже је њена архитектура. Сама архитектура неуронске мреже одређује о каквом се типу неуронске мреже ради. Архитектура неуронске мреже приказује начин међусобног повезивања неурона. Променом начина повезивања неурона може се мењати и сама функција неуронске мреже [89]. Главна особина архитектуре је број слојева. Први слој

представља улазни слој који прикупља улазне сигнале, а последњи слој представља излазни слој који даје излазне сигнале. Сви слојеви између улазног и излазног слоја се зову скривени слојеви који врше оптимизацију параметара функције односно подешавају тежинске коефицијенте. На слици 3.1 је дат приказ мреже са три слоја.



Слика 3.1. Шематски приказ неуронске мреже са три слоја

Значајна карактеристика неуронских мрежа, која их суштински раздваја од осталих мултиваријационих техника, је њихова способност да уче. Другим речима, неуронске мреже се адаптирају за дате услове тиме што врши оптимизацију односно тренирање њихових параметара односно тежинских коефицијената [89, 90].

3.2. Адаптивни неуро-фази систем (АНФИС)

Као што је речено у претходном поглављу вештачке неуронске мреже могу да уче односно да врше оптимизацију њихових параметара како би се што боље прилагодиле спољашњим условима. С друге стране главни недостатак вештачких неуронских мрежа је тај што не могу да сачувају односно да меморишу научено знање [90]. Да би добиле ту карактеристику, вештачке неуронске мреже се спајају са другим методама вештачке интелигенције како би се унапредиле особине

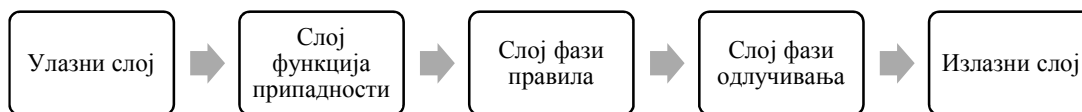
вештачких неуронских мрежа. Једна од таквих метода је фази систем одлучивања односно фази логика. Тај метод ради на принципу људског размишљања, где подаци и информације нису тачно дефинисане већ се користе такозване "фази" вредности. Те фази вредности се дефинишу помоћу одређених релација које се зову функције припадности. Улазни параметри у функцијама припадности представљају стварне односно реалне вредности, а излазни параметри представљају фази вредности за одређене улазне параметре.

Концепт фази теорије је први представио *Zadeh* [91, 92] и коришћен је да опише динамичке системе који су превише комплексни или са високим нелинеарностима за синтезу контролера или моделирање система и које је тешко описати применом конвенционалних математичких техника моделирања. *Mamdani* [93] је унапредио фази системе одлучивања и применио их је у реалности за фази управљање.

АНФИС (адаптивни неуро-фазу систем) мрежа има пет слојева као што је приказано на слици 3.2. Сваки од ових слојева има одређену улогу при оптимизацији АНФИС параметара на основу приложених експерименталних података. Најбитнија карактеристика АНФИС мреже је могућност аутоматског одређивања параметара мреже. Параметри АНФИС мреже се одређују у току процеса тренирања и тестирања те мреже. Експериментални подаци се фазификују при додавању у АНФИС мрежу односно ти подаци се нормализују у распону од 0 до 1 на основу унапред дефинисане функције припадности. У овом истраживању је коришћена функција припадности звонастог облика, јер она има најбоље карактеристике за регресију нелинеарних података. Та функција је следећег облика за један улазни параметар:

$$\mu(x) = bell(x; a_i, b_i, c_i) = \frac{1}{1 + \left[\frac{(x - c_i)^2}{a_i} \right]^{b_i}} \quad (3.1.)$$

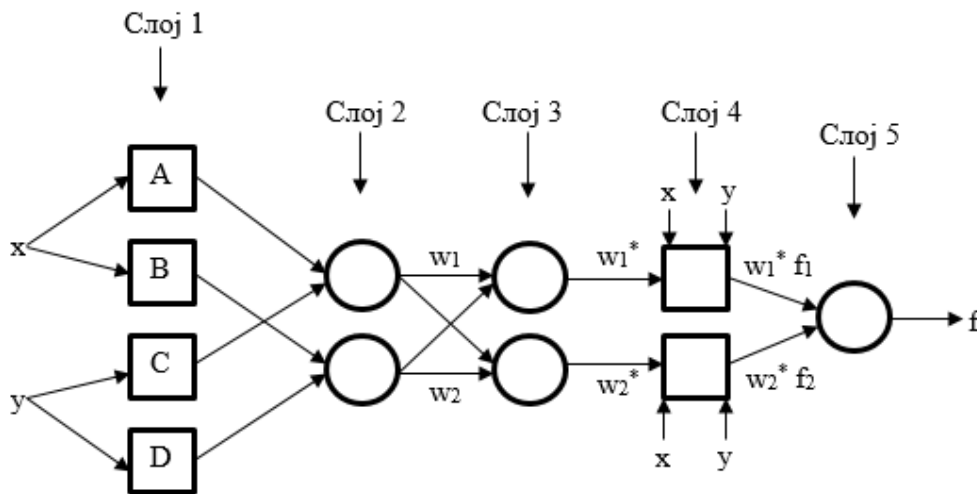
где су $\{a_i, b_i, c_i\}$ параметри АНФИС мреже, а x представља улазни параметар. Сваки улазни параметар има дефинисану функцију припадности.



Слика 3.2. Слојеви АНФИС мреже

3.2.1. Развој АНФИС модела

Фази скуп A , непразног скупа X , се представља колекцијом поређаних парова основног елемента скупа и његове функције припадности $\mu: x \rightarrow [0 1]$. Функције припадности повезују број $\mu_A(x): X \rightarrow [0 1]$ за сваки елемент x из скупа X . Фази одлучивање је базирано на скупу правила управљања која се зову фази правила са лингвистичким променљивама. Ова правила су изражена у облику кондиционалних реченица. Структура мреже АНФИС-а је сачињена од пет повезаних нивоа мреже, као што је приказано на слици 3.3.



Слика 3.3. АНФИС структура

У овој дисертацији је за креирање модела за предвиђање вредности излазних параметара струготине коришћен *Sugeno* АНФИС модел првог реда и фази *IF-THEN* правила *Takagi-Sugeno* типа:

$$\text{ако је } x \text{ једнако } A \text{ и } y \text{ једнако } C \text{ тада је } f_1 = p_1x + q_1y + r_1. \quad (3.2.)$$

У првом слоју сваки чвор неуронске мреже је адаптиван са функцијом адаптивности $O = \mu_{AB}(x)$ и $O = \mu_{CD}(x)$, где $\mu_{AB}(x)$ и $\mu_{CD}(x)$ представљају функције припадности.

Други слој (слој припадности) проверава тежине сваког улазног елемента према функцијама припадности из првог слоја. Сваки чвор у другом слоју није адаптиван и у овом слоју се множе сигнали, где сваки појединачни излаз из овог слоја представља снагу појединачног фази правила:

$$w_i = \mu_{AB}(x) * \mu_{CD}(y) \quad (3.3.)$$

Трећи слој се зове слој фази правила. Сваки чвор (неурон) у овом слоју обавља предусловно погађање фази правила, тј. рачуна ниво активације за свако правило и тиме рачуна тежине које се нормализују. Овај слој је такође неадаптиван и у сваком чвору рачунају се односи јачине правила према суми свих јачина правила као

$$w_i^* = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (3.4.)$$

Изази из овог слоја се зову нормализоване јачине фази правила.

Четврти слој се зове дефазификациони слој и даје излазне вредности на основу одлучивања помоћу фази правила. Сваки чвор у четвртом слоју је адаптиван са функцијом

$$O_i^4 = w_i^* x f = w_i^* (p_i x + q_i y + r_i) \quad (3.5.)$$

где $\{p_i, q_i, r\}$ представљају групу параметра који се зову последични параметри.

Пети слој се зове излазни слој који сумира све улазе из претходног слоја и трансформише резултате фази класификације у дискретне вредности. Сваки чвор у овом петом слоју није адаптиван и овај слој рачуна целокупан излаз као збир свих долазећих сигнала

$$O_i^4 = \sum_i w_i^* x f = \frac{\sum_i w_i f}{\sum_i w_i} \quad (3.6.)$$

Примењен је хибридни алгоритам учења за идентификацију параметра дате АНФИС архитектуре. У првом (директном) пролазу овог хибридног алгоритма, сигнали иду унапред све до слоја 4 где се идентификују консеквентни параметри помоћу метода најмањих квадрата. У повратном пролазу, односи грешака иду уназад и претпостављени параметри се адаптирају. У овој дисертацији је коришћен програмски пакет *Matlab* за процес тренирања и тестирања АНФИС мреже. Према сакупљеним улазно-излазним паровима података на основу експерименталних тестова, дата АНФИС мрежа би могла да одреди најутицајније параметре за одређени излазни параметар преко грешке предикције. Тачност АНФИС предикције је одређена на основу три индикатора и то грешке најмањих квадрата (RMSE), коефицијента детерминације (R^2) и Пирсоновог коефицијента (r). Та три индикатора су најосновнији критеријум да би се утврдила прецизност предикције неког система и могу се представити према следећим једначинама:

1) $RMSE$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}, \quad (3.7.)$$

2) R^2

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i) \cdot (P_i - \bar{P}_i) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i) \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)} \quad (3.8.)$$

3) r

$$r = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n O_i \cdot P_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n O_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n P_i \right)}{\sqrt{\left(n \sum_{i=1}^n O_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n O_i \right)^2 \right) \cdot \left(n \sum_{i=1}^n P_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n P_i \right)^2 \right)}} \quad (3.9.)$$

где су P_i и O_i су експериментални и прорачунати подаци, респективно, док је n број података. Ако су вредности за R^2 и r између 0.5 и 1, тада се може рећи да је корелација између параметара "јака". Ако су вредности за R^2 и r између 0.3 и 0.5, тада се може рећи да је корелација између параметара "средње" јачине. Ако су вредности за R^2 и r између 0.1 и 0.3, тада се може рећи да је корелација између параметара "слаба". Ако су вредности за R^2 и r између 0 и 0.1, тада се може рећи да не постоји корелација између параметара.

4. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

4.1. Опис и услови експерименталних испитивања

Ради одређивања облика стурготине, компоненти отпора резања, температуре у зони резања, хабања алата, а такође и ради развоја модела за мониторинг процеса обраде, реализована су одређена мерења у Лабораторији за обраду метала резањем на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Испитивања су вршена при обради стругањем предмета обраде од 30CrNiMo8 (Č5432) полазног пречника 84, *mm*, дужине 400, *mm*, у побољшаном стању тврдоће 40 *HRC*, на универзалном стругу D-480, Првомајска, снаге 10, *kW*, без присуства средства за хлађење и подмазивање.

Испитивања чији је циљ анализа узајамне повезаности параметара процеса обраде (режима обраде) су вршена са алатима са различитом геометријом резног дела (различити нападни угао и геометрија резне плочице) тако да су добијене информације о облику струготине и осталим излазним параметрима обраде и у зависности од коришћене геометрије резног дела алата. Коришћени алати су стругарски ножеви са изменљивим плочицама од тврдог метала троугаоног и ромбоидног облика.

Мерења су вршена према одговарајућем плану експеримента, који је обухватио широк опсег дубина, брзина и корака резања, који се користе у пракси. Корак *s*, се мења директно на машини, где се налазе његове стандардне вредности према геометријској промени. Дубина резања се мења тако што се одузме полазни пречник обратка од пречника на коме се врши обрада, и та добијена разлика подели са 2. Брзина резања *v*, се мења зависно од највећег пречина узорка који се обрађује и броја обртаја који је стандардан и налази се на машини. Овде се мора прорачунати тражена брзина резања према формули која повезује брзину резања, број обртаја и пречник узорка који се обрађује.

Структура обрадног система при експерименталним испитивањима је приказана на слици 4.1. То значи да су при експериментима улазни параметри били брзина, корак и дубина резања. Као излазни параметри посматрани су облик струготине и мерени су отпори резања, храпавост обрађене површине, температура

у зони резања (најважније за праксу), дебљина сегмената струготине и хабање алата.



Слика 4.1. Структура обрадног система при експерименталним испитивањима

4.1.1. Материјал предмета обраде

Експериментална тестирања су вршена на челику за побољшање 30CrNiMo8 (Č5432). Материјал узорка је у облику шипке ϕ 40x400, mm. Хемијски састав коришћеног челика приказан је у табели 4.1.

Табела 4.1. Хемијски састав легуре 30CrNiMo8 (Č5432)

Ознака легури	Хемијски састав легуре у процентима								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
30CrNiMo8 (Č5432)	0.28	0.25	0.47	0.012	0.026	1.97	1.86	0.37	0.027

4.1.2. Резни алат

Као резни алат за мерење отпорних сила резања и храпавости обрађене површине је коришћена ромбоидна резна плочица (слика 4.2), са следећим карактеристикама:

- PCLNR 2525M12 CORUN УЖИЦЕ
- CNMM 120408 ознака плочице
- 4025 ознака за квалитет превлаке
- P25 ознака квалитета тврдог метала
- CORUN УЖИЦЕ



Слика 4.2. Ромбоидна резна плочица CNMM 120408

Као резни алат за мерење температуре у зони резања (максималне и контактне температуре) је коришћена троугаона резна плочица (слика 4.3) са следећим карактеристикама:

- PTGNR 2525M16 CORUN УЖИЦЕ
- TNMM 160404-СМ ознака плочице
- 4С15 ознака за квалитет превлаке
- P15 ознака квалитета тврдог метала
- CORUN УЖИЦЕ



Слика 4.3. Троугаона резна плочица TNMM 160404-СМ

4.1.3. Машина

Испитивања су вршена при обради стругањем предмета обраде од 30CrNiMo8 (Џ5432) полазног пречника 84, *mm*, дужине 400, *mm*, у побољшаном стању тврдоће 40 *HRC*, на универзалном стругу D-480, Првомајска, снаге 10. *kW*, без присуства средства за хлађење и подмазивање.

4.2. Експерименти

Експерименти су подељени у три дела у оквиру испитивања. Експерименталним испитивањима су мерени храпавост обрађене површине и отпори резања у зависности од вредности улазних параметара резања према подацима у табели 4.2. Добијени резултати мерења храпавост обрађене површине и отпори резања биће представљени у поглављу 6. Поред мерења отпора резања и параметара храпавости површина утврђиван је облик струготине и дебљина сегмената струготине. У току експеримената усвојен је шири дијапазон улазних параметара s , v и a . Тај дијапазон улазних параметара је препоручен за праксу, јер је обухваћен широк опсег параметара. Табела 4.2 приказује да се корак резања креће од 0.1 до 0.25, *mm/o*, брзина резања се креће од 78 до 156, *m/min* и дубина резања се креће од 0.3 до 1.5, *mm*. Корак резања је мењан у три режима, брзина резања је мењана у четири режима, док је дубина резања мењана у три режима. На основу тих режима мерења формиране су улазне комбинације са тим параметрима на основу којих је добијена храпавост обрађене површине, отпори резања као и различити облици струготине, што ће бити представљено у поглављу 6. Трећим експерименталним испитивањима је вршено мерење хабања алата при обради истог

материјала као у претходним експериментима са алатом, ромбоидном и троугаоном плочицом и са карактеристикама које су већ описане у истим условима као и претходна два експеримента са следећим параметрима обраде:

$$a = 0.3 \text{ mm}; v = 145 \text{ m/min}; s = 0.1 \text{ mm/o}$$

Табела 4.2. Улазни параметри услова обраде за експеримент 1 и 2

Редни број	s mm/o	v m/min	a mm
1	0.1	156	0.3
2	0.1	123	0.3
3	0.1	100	0.3
4	0.1	78	0.3
5	0.16	156	0.3
6	0.16	123	0.3
7	0.16	100	0.3
8	0.16	78	0.3
9	0.25	156	0.3
10	0.25	123	0.3
11	0.25	100	0.3
12	0.25	78	0.3
13	0.1	156	1
14	0.1	123	1
15	0.1	100	1
16	0.1	78	1
17	0.16	156	1
18	0.16	123	1
19	0.16	100	1
20	0.16	78	1
21	0.25	156	1
22	0.25	123	1
23	0.25	100	1
24	0.25	78	1
25	0.1	156	1.5
26	0.1	123	1.5
27	0.1	100	1.5
28	0.1	78	1.5
29	0.16	156	1.5
30	0.16	123	1.5
31	0.16	100	1.5
32	0.16	78	1.5
33	0.25	156	1.5
34	0.25	123	1.5
35	0.25	100	1.5
36	0.25	78	1.5

4.2.1. Мерење храпавости

Мерење храпавости вршено је на мерном систему *Talysurf 4.3 (Taylor Hobson)* на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу у лабораторији за обраду метала резањем и трибологију. Такође и сва остала мерења су вршена у тој лабораторији. Мерни систем који је примењен, служи за мерење карактеристика микрогеометрије површина и приказан је на слици 4.4. Сви подаци за храпавост су снимљени у софтверу креираном на Факултету за ову намену. Средња аритметичка висина неравнина, *Ra*, као најрелеватнији индикатор који се користи за одређивање храпавости површине је коришћена за даљу анализу. Просечна вредност висина неравнина је рачуната за сваки обрадак. Уређај *Talysurf 6* је компјутеризован и има широк спектар могућности као што су:

- мерење основних и допунских параметара храпавости и валовитости,
- статистичка обрада резултата мерења параметара храпавости,
- приказивање резултата на екрану, њихово меморисање,
- просторно скенирање површине.

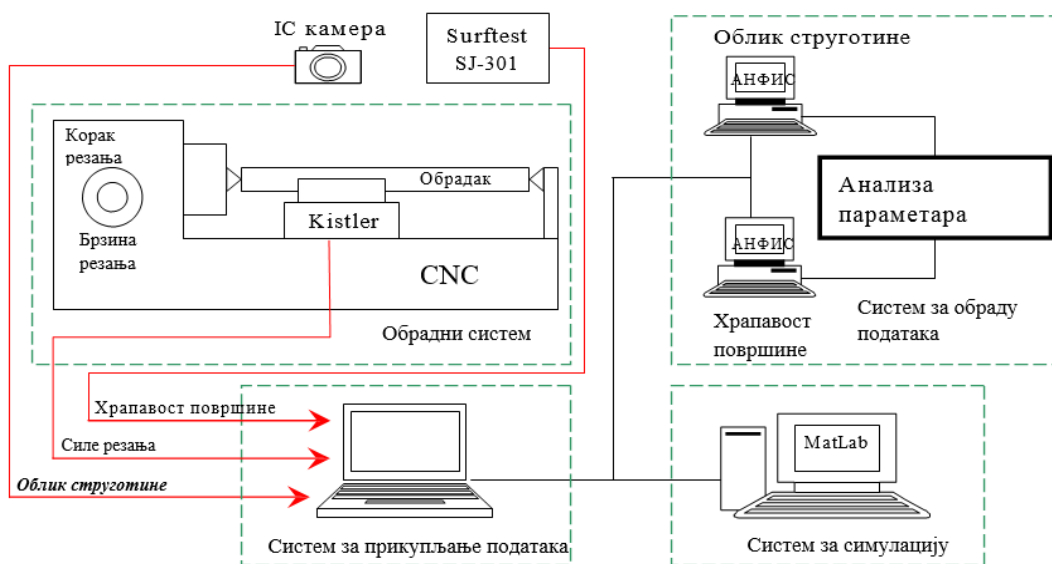


Слика 4.4. Уређај за мерење храпавости *Talysurf-6*

4.2.2. Мерење отпора резања

За мерење отпора резања коришћен је трокомпонентни динамометар *Kistler*. Дејством силе, пијезоелектрични давачи у динамометру генеришу напон, који се повећавају помоћу појачавача сигнала *Kistler 5007*. Као излаз из уређаја добија се појачан сигнал који даље иде у *AD* картицу, која претвара аналогни сигнал у

дигитални. Коначно, из *AD* картице, сигнал стиже до рачунара, где се врши мониторинг процеса и чување података. Помоћу софтверског пакета *National Instruments LabVIEW* врши се читање сигнала и аквизиција података. Програм је написан тако да омогућава приказ тренутних вредности сила F_1 , F_2 и F_3 (главна отпорна сила резања, отпорна сила продирања и отпорна сила помоћног кретања) нумерички, као и графички, чиме се остварује мониторинг процеса. По завршетку рада програма одређују се средње вредности ових величина. Слика 4.5 приказује дату експерименталну шему.



Слика 4.5. Шема експерименталне процедуре

Чување података се врши *Boolean* контролом, тако да је могуће чување више датотека у континуалном раду програма. Такође, сигнал са *AD* картице се пре чувања филтрира методом "покретне средине" и одређује се средња аритметичка вредност за сваку итерацију. Учесталост сигнала је подесива, а за потребе експеримента мерено је са учесталošћу од 500, *Hz*.

4.2.3. Одређивање облика струготине и мерење дебљине сегмената струготине

Утврђивање облика струготине је вршено визуелно поређењем добијене струготине са подацима из табела према стандарду *ISO 3685* [70] и у одговарајућој

табели је сваки облик струготине додењен облик дефинисан стандардом. Сваки сегменат струготине је снимљен дигиталном камером *Nikon*.

Применом универзалног микроскопа, који је коришћен код хабања, су одређене и дебљине добијених сегмената струготине (слика 4.6).

Циљ овог истраживања је пре свега одређивање дебљине сегмената струготине, односно ламела које се формирају приликом обраде резањем. На основу дебљине тих сегмената може се лакше одредити који је режим резања најпогоднији, (брзина, корак, дубина резања итд.) узимајући у обзир да на излазу имамо што бољи квалитет обрађене површине са минималним утрошеним временом обраде, као и са минималним утрошком средстава на почетку обраде.



Слика 4.6. Универзални микроскоп UIM-21

На самом почетку истраживања издвојено је 36 узорка струготина, које су добијене према режимима обраде у Табели 4.2. Од сваке врсте струготине је одсечен мали део, довољан за експеримент. Ситни комади струготине су уредно распоређени и означени бројевима од 1 до 36. Иначе, струготина је добијена обрадом резања помоћу ромбоидне и троугаоне плочице. У следећем кораку, сваки комадић струготине је посматран под микроскопском камером (слика 4.7), помоћу које, када се увелича део струготине, види свака ламела јасно и посебно одвојена једна од друге. Уз помоћ ове камере забележено је 36 слика сваког дела струготине

под одговарајућим снопом светлости ради боље слике. Струготина и њене ламеле су описани помоћу основних карактеристика као што су: назив струготине, s – корак, 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 4.7. Микроскопска камера коришћена код експерименталног истраживања

Камера се може повезати помоћу USB кабла са рачунаром и након тога се помоћу дугмета на кабал правити слике струготина. Увеличање струготина је могуће и до 400 пута. Такође, на камери се налази лампа која повећава квалитет слика због боље прегледности.

Параметри као што су дубина, брзина и корак приликом резања су дефинисани приликом саме обраде резањем, а што се тиче дужине сегмената струготине, она је дефинисана касније уз помоћ универзалног мерног микроскопа, где је мерена дужина од почетка једне струготине до краја. Тако је урађено за свих 36 комада, што спада у најважнији део у овом експерименту.

4.2.4. Мерење температуре помоћу термовизије

4.2.4.1. Основи термовизије

Термовизијски уређаји су настали због потребе повећања ефикасности при осматрању ноћу, као и у условима смањене дневне видљивости или лоших временских прилика. Термовизија представља снимање топлоте објеката. Сва тела емитују инфрацрвено зрачење (чак и лед). Праћење емитовања овог зрачења нашло је широку примену у праћењу различитих појава у различитим гранама индустрије.

Камере за термовизијско снимање су по спољашњем изгледу сличне *CCTV* (closed circuit television camera) камерама, али су посебно прилагођене да „виде“ онај део инфрацрвеног спектра који је за људско око невидљив.

Камерама које се данас највише примењују - такозваним *CCTV* камерама - потребна је светлост како би давале слику. Термалне камере, које се некада називају и инфрацрвене камере, способне су да региструју минималне разлике у температури и да их конвертују у јасну термалну слику на којој се могу уочити и најситнији детаљи. За разлику од других технологија као што су појачивачи осветљења, којима је потребна барем мала количина светлости да би дали слику, термална технологија може да види и у тоталном мраку. Њој светло уопште није потребно.

Ова технологија све више примене налази у системима надгледања и заштите. Иако је ова технологија била привилегија граничних патрола и осталих државних корисника, данас све више индустријских објеката користи моћ термалних камера за заштиту своје имовине и људства.

4.2.4.2. Термовизијска камера и термовизијско снимање

Снимање термалном камером даје видљиву слику иначе невидљиве инфрацрвене светлости која се емитује од свих објеката због топлотног стања, односно због присуства топлотне енергије. Индустријска примена инфрацрвене термографије је почела средином шездесетих година прошлог века, *FLIR* произвела прву опрему за ту намену модел: *FLIR E50* на основу чега је израз „термовизија” ушао у свакодневну употребу и данас се користи да значи термографско испитивање. Начини за коришћење ове технологије су неограничени, при чему је основна претпоставка на којој се она заснива рад ове технологије је да сви објекти

изнад апсолутне нуле ($-273, ^\circ\text{C}$) емитују невидљиви инфрацрвени спектар зрачења, који представља функцију више различитих карактеристика објекта, од којих само једна се односи на температуру. Са повећањем температуре објекта, повећава се и интензитет емитованог *IR* зрачења [74].

Термовизијска или *IR* камера представља уређај који генерише слику на основу инфрацрвеног спектра зрачења. Принцип рада се односи на то да се инфрацрвени спектар зрачења (невидљив људском оку) који емитује неки објекат, преводи у видљиву слику (термограм) на коме се добија податак о температури и класификују (разврставају) се површине које емитују различите количине инфрацрвеног зрачења (веће зрачење–светлије боје), док исте боје представљају изотермалне површине (површине са истом температуром) које емитују једнаке количине топлоте. Примена *IR* камера уско је повезана за случајеве, где промена термичке слике може указивати на неку аномалију. Међутим, са циљем детектовања енергетских губитака, нарочито у урбаним срединама, могућа је примена ове методе као део интегрисаног система прикупљања просторних података у комбинацији са техникама даљинске детекције и ласерског скенирања терена [74].

4.2.4.3. Мерење температуре у зони резања

За мерење температуре у зони резања коришћена је специјална термовизијска камера која је осетљива на зрачење тела које се налази на одређеној температури. Ова метода мерења температуре изабрана је због предности над осталим методама, јер има могућност регистровања скоковитих промена температуре, нема физичког контакта система и објекта чија се температура мери, нема негативног утицаја на материјал обратка и алата и може се мерити температура објеката којима је тешко прићи итд. Неповољна околност ове методе мерења је што струготина својим положајем може да закљони област чија се температура мери.

Када се за мерење температуре користи термовизијска камера неопходно је познавање тачне вредности коефицијента емисивности површине објекта. Емисивност или коефицијент емисивности је појам који представља способност материјала да емитује топлотно зрачење. Сваки материјал има другу емисивност, а

одређивање тачне емисивности неког материјала је веома тешко. Коефицијент емисивности зависи од чистоће површине чија се температура мери, постојања слоја који је оксидирао, таласне дужине и сваки од ових фактора утиче на поремећаје у добијању валидних резултата. Вредност коефицијента емисивности се креће од 0,00 (ништа не емитује) до 1,00 (потпуно емитује). У циљу избегавања овог проблема површина која се обрађује може се претходно премазати слојем чији је коефицијент емисивности познат [75, 78].

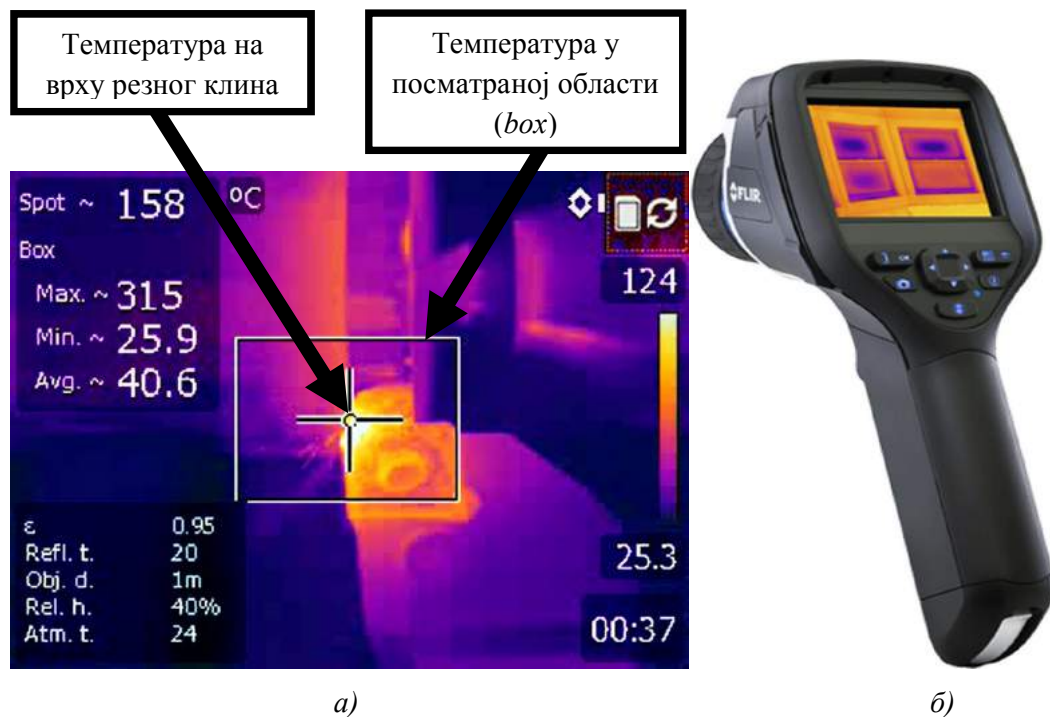
Снимање температуре током експеримената спроведено је посредством термовизијске камере *FLIR E50*. Карактеристике термовизијске камере *FLIR E50* су:

- 240×180 тачкасти детектор (43200 тачака),
- термална осетљивост $< 0,05$, °C,
- објектив просторног угла $25^\circ \times 19^\circ$,
- опција мењања објектива на терену са опцијским објективима 15° или 45° ,
- уграђена дигитална камера са *LED* светлима за осветљење тамних простора,
- осветљен, колор, велик *LCD* екран на додир, дијагонале 9, *cm*. ($3,5''$), резолуције 320×240 пиксела,
- фреквенција освежавања приказа слике 60, *Hz*,
- мерно подручје температуре (-20 , °C, до 650 , °C), тачност ± 2 , °C, или ± 2 , %, од читавања,
- ручни фокус, ласерски маркер,
- 4x дигитални зум,
- мерни принцип: три покретне тачке и три области (*hot/cold* маркери унутар области),
- израчунавање температурне разлике ΔT ,
- записивач звучног коментара за сваки снимак и могућност ручног уноса коментара преко дисплеја осетљивог на додир,
- снимање видео записа у меморију камере (*MPEG4*),
- видео излаз (*MPEG4*).

Експериментална испитивања спроведена су помоћу експерименталног уређаја помоћу *IR* камере за проучавање термичких и механичких аспеката резања код стругарске обраде. Извршена мерења током тестирања резања за различите услове резања су коришћена да се испита ваљаност претходних модела резања и обезбеде неопходни елементи за нови приступ моделирању температуре и њихове расподеле код процеса обраде метала скидањем струготине.

4.2.4.4. Експериментална процедура

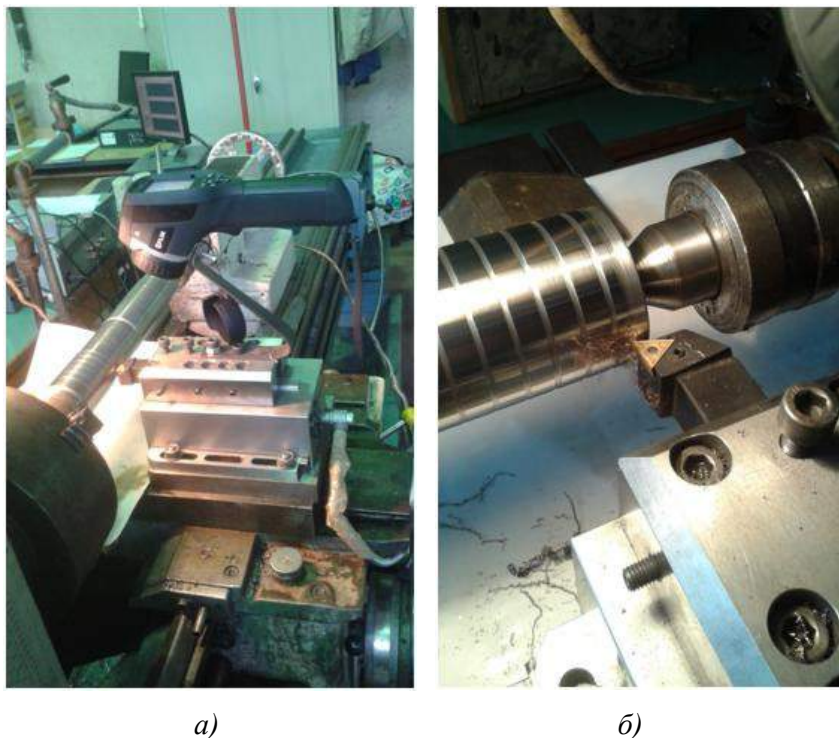
Температуре у зони резања су мерене у току процеса обраде материјала као што је приказано на слици 4.8 а). Термална камера *FLIR E50* је коришћена за процес мерења температуре у зони резања, слика 4.8 б).



Слика 4.8. Добијени снимак: а) распоред температуре у зони резања и б) термална камера *FLIR E50*

Приликом мерења помоћу термовизијске камере вршено је снимање и добијен је видео запис, а који је касније анализиран. Видео запис садржи 30 (тридесет) фрејмова у секунди који могу појединачно да се посматрају у ави

формату. Слика 4.9 а) приказује мерење температуре у зони резања, а слика 4.9 б) приказује процес резања применом дате троугаоне резне плочице. За анализу температуре у зони резања коришћена је максимална (температура струготине – $T_{\text{макс}}$) и температура додира алата и обрадка (контактна температура - $T_{\text{спот}}$) у зони резања. Контактна температура је температура у малом кружићу у крстићу видео записа, а максимална температура је максимална температура у означеном квадратићу на слици 4.8 а). То је мерена температура на мереном месту помоћу термовизијске камере. Може се рећи да је контактна температура - температура на врху резне ивице (види се на снимку место положаја кружића на слици 4.8 а)). Максимална температура је највећа температура у квадратићу и то је углавном температура струготине и то најчешће доње стране струготине која је нешто већа од горње стране. Поред тога, осциловање мерених температура је услед кретања струготине које је стохастичко, а такође долази и до гужвања и нагомилавања испред мереног места.



Слика 4.9. Положај термовизијске камере: а) мерење температуре у зони резања, б) процес резања

4.2.5. Мерење хабања алата микроскопом

На крају је *праћено хабање алата током експеримента*. Универзални микроскоп *UIM-21* (слика 4.6), коришћен је за мерење ширине појаса и трага хабања на контактної површини. Том приликом врши се упоређивање вредности промене висине површине која се хаба, а у односу на неку установљену референтну основу. Мера промене висине (дубине) површине која се хаба у односу на ту основу представља хабања материјала. За референтну основу коришћен је део површине који се не хаба, а налази се непосредно уз похабану површину. Ширина појаса хабања резне плочице је мерена алатним микроскопом *UIM-25*.

5. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА

5.1. Резултати првог експеримента

Резултати испитивања са ромбоидном плочицом (*први експеримент*) су приказани у Табели 5.1.

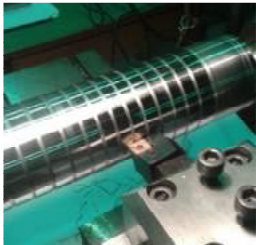
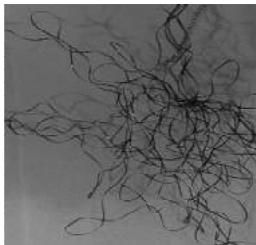
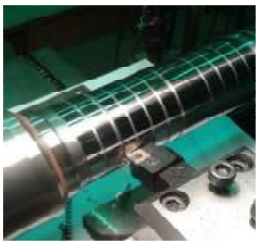
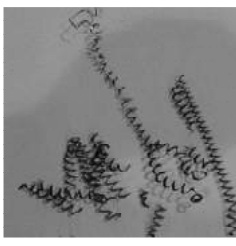
Табела 5.1. Резултати експерименталних испитивања са ромбоидном плочицом
за отпоре резања и квалитет обрађене површине

Редни број	s mm/o	v m/min	a mm	F1 N	F2 N	F3 N	Ra µm
1	0.1	156	0.3	116	128	55	0.86
2	0.1	123	0.3	123	130	57	0.9
3	0.1	100	0.3	128	128	56	0.91
4	0.1	78	0.3	132	128	56.5	0.96
5	0.16	156	0.3	160	168	66	0.99
6	0.16	123	0.3	166	165	67	0.95
7	0.16	100	0.3	172	163	66.5	0.93
8	0.16	78	0.3	177	159	66	0.97
9	0.25	156	0.3	226	212	79	2
10	0.25	123	0.3	232	205	77	2.02
11	0.25	100	0.3	236	200	77	2.01
12	0.25	78	0.3	237	200	75	2.07
13	0.1	156	1	328	200	188	0.72
14	0.1	123	1	327	191	188	0.84
15	0.1	100	1	335	190	193	0.83
16	0.1	78	1	345	192	197	0.78
17	0.16	156	1	441	252	225	1,1
18	0.16	123	1	448	238	222	1.05
19	0.16	100	1	453	235	223	1.06
20	0.16	78	1	465	227	230	1.02
21	0.25	156	1	627	318	270	1.86
22	0.25	123	1	635	315	270	1.85
23	0.25	100	1	650	313	278	1.84
24	0.25	78	1	660	318	295	1.94
25	0.1	156	1.5	454.6	199	323.6	2.2
26	0.1	123	1.5	465	195	313.8	1.95
27	0.1	100	1.5	470.6	192	312	2.08
28	0.1	78	1.5	473.2	190.8	303.4	1.76
29	0.16	156	1.5	622.4	246.8	368	2.19
30	0.16	123	1.5	629.2	245.2	369.4	2.06
31	0.16	100	1.5	642	245	373	2.14
32	0.16	78	1.5	656	243.4	375.8	2.24
33	0.25	156	1.5	879.6	315.2	430.6	2.01
34	0.25	123	1.5	891.5	314	436	2.74
35	0.25	100	1.5	904	313.2	440.6	2.02
36	0.25	78	1.5	915.2	313.6	445.2	2.05

Отпори резања су свакако један од најзначајнијих квалитативно-квантитативних показатеља процеса резања. У овом случају, моделирање отпора резања извршено је на основу већег броја експериментално добијених података за различите услове и режиме обраде.

Табела 5.2 приказује добијене облике дуге струготине и коресподентне максималне вредности сила резања као и одговарајуће параметре резања. Табела 5.2 је добијена систематским и детаљним праћењем процеса у току експеримената.


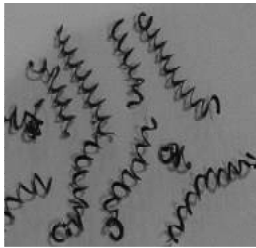






Табела 5.2. Добијени облици дуге струготине и отпори резања

Обрада	Струготина	Параметри
	2.3 Дуга замршена	
		$F_1 = 172 \text{ N}$ $F_2 = 163 \text{ N}$ $F_3 = 66.5 \text{ N}$ $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $v = 91.89 \text{ m/min}$ $a = 0.3 \text{ mm}$
	4.1 Дуга уврнута	
		$F_1 = 660 \text{ N}$ $F_2 = 318 \text{ N}$ $F_3 = 295 \text{ N}$ $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $v = 72.49 \text{ m/min}$ $a = 1 \text{ mm}$

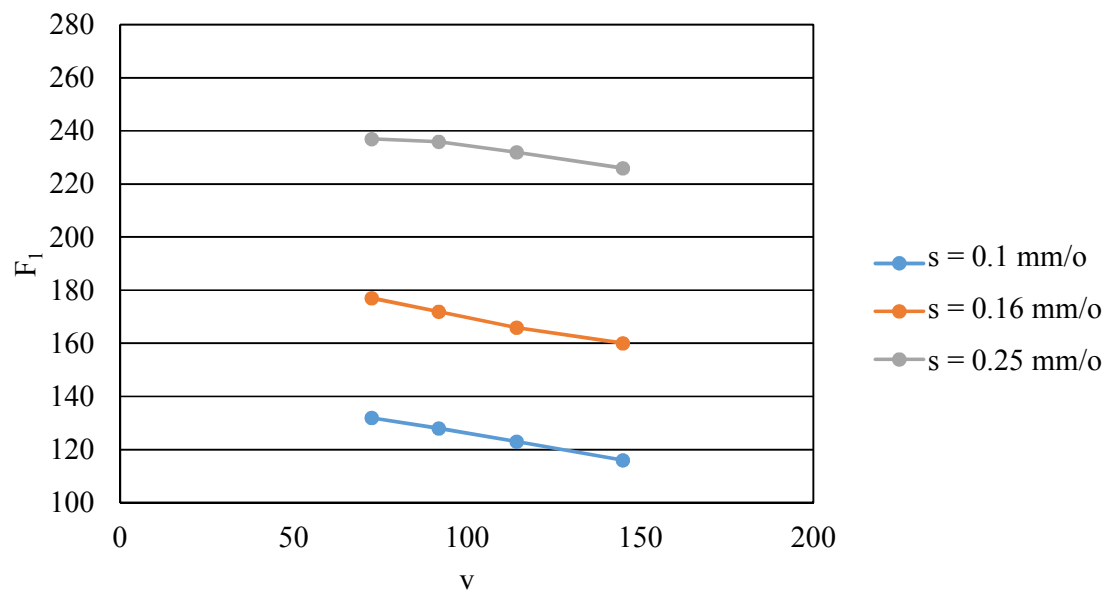
Табела 5.3 приказује добијене облике кратке и недоређене струготине и коресподентне максималне вредности сила резања као и одговарајуће параметре резања. Табела 5.3 је такође добијена систематским и детаљним праћењем процеса у току експеримената.

У даљем тексту је извршена детаљна анализа добијених сила за сваки добијени облик струготине.

Табела 5.3. Добијени облици кратке и неодређене струготине отпори резања

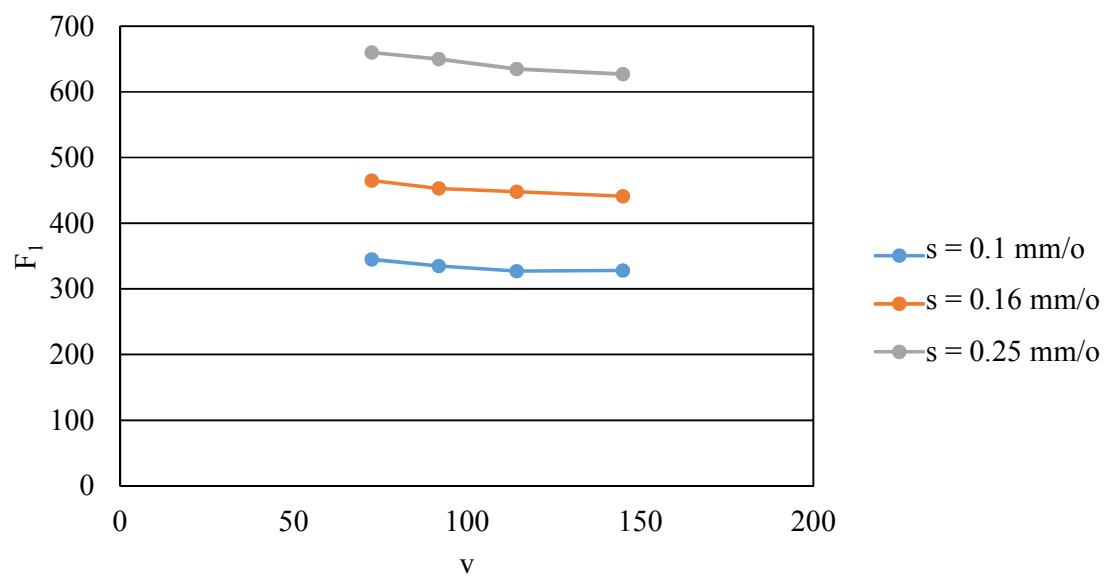
Обрада	Струготина	Параметри
	4.2 Кратка	
		$F_1 = 627 \text{ N}$ $F_2 = 318 \text{ N}$ $F_3 = 270 \text{ N}$ $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $v = 144.98 \text{ m/min}$ $a = 1 \text{ mm}$
	4.3 Кратка замршена	
		$F_1 = 656 \text{ N}$ $F_2 = 243.52 \text{ N}$ $F_3 = 375.8 \text{ N}$ $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $v = 72.49 \text{ m/min}$ $a = 1.5 \text{ mm}$
	7 Ситна	
		$F_1 = 879.6 \text{ N}$ $F_2 = 315.2 \text{ N}$ $F_3 = 430.6 \text{ N}$ $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $v = 144.98 \text{ m/min}$ $a = 1.5 \text{ mm}$
	6.2 Неодређена	
		$F_1 = 915.2 \text{ N}$ $F_2 = 313.6 \text{ N}$ $F_3 = 445.2 \text{ N}$ $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $v = 72.49 \text{ m/min}$ $a = 1.5 \text{ mm}$

Слика 5.1 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања $0.3, \text{ mm}$.



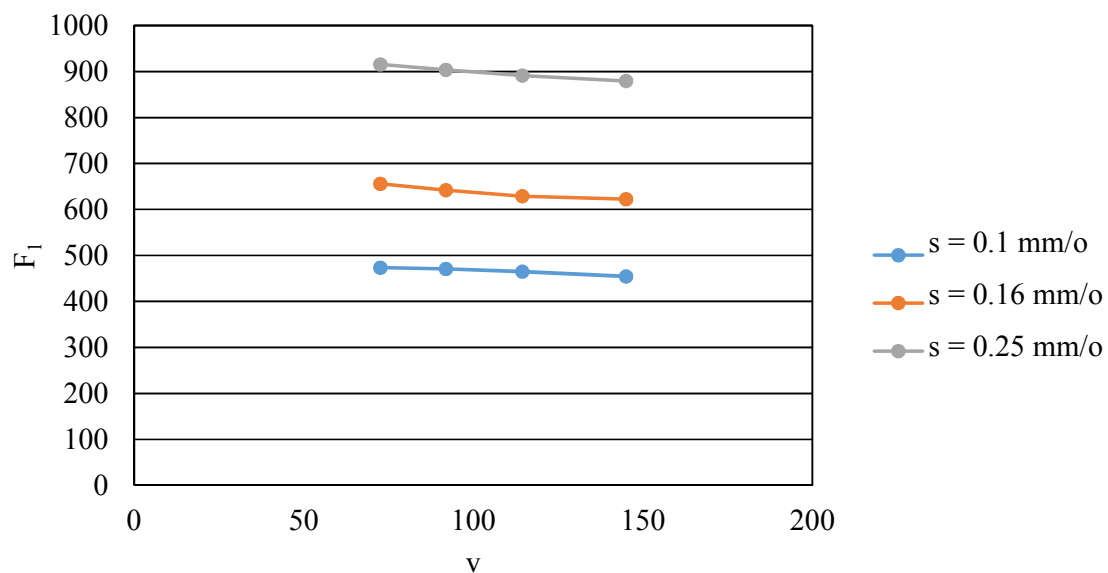
Слика 5.1. Распоред отпора резања F_1 за $a = 0.3 \text{ mm}$

Слика 5.2 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања $1, \text{ mm}$.



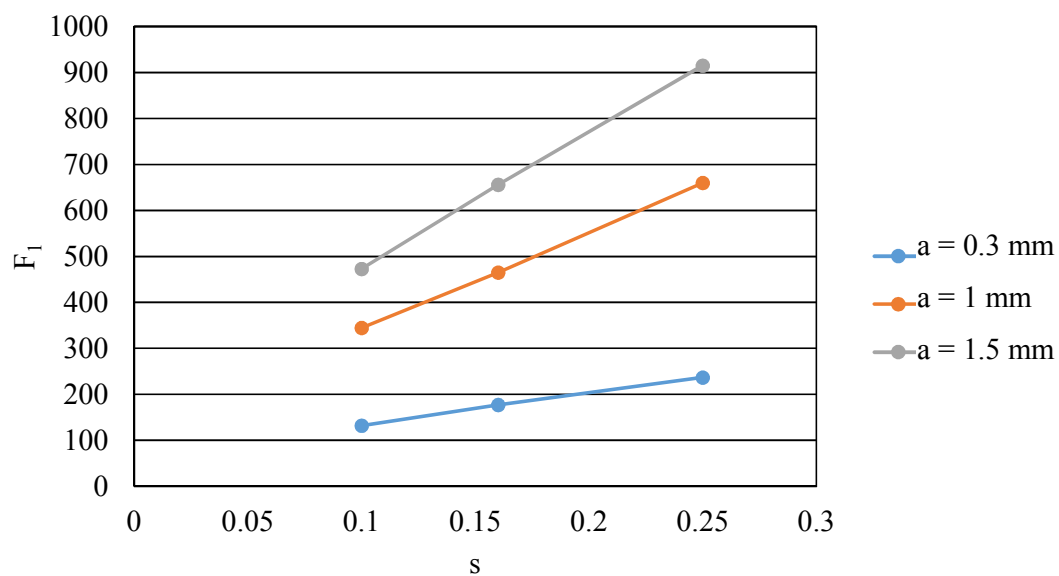
Слика 5.2. Распоред отпора резања F_1 за $a = 1 \text{ mm}$

Слика 5.3 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 1.5, *mm*.



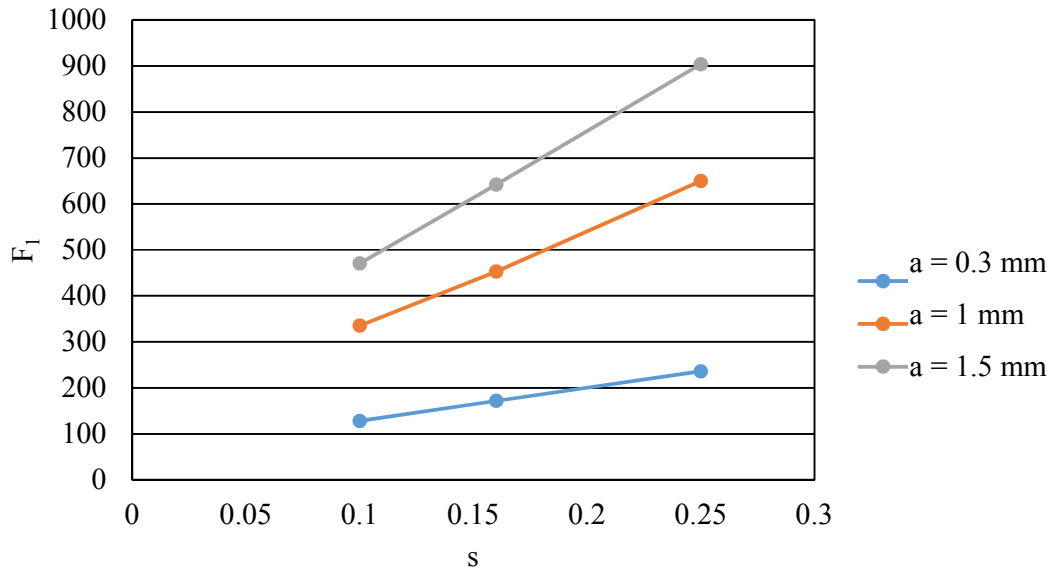
Слика 5.3. Распоред отпора резања F_1 за $a = 1.5$ *mm*

Слика 5.4 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања 72.49, *m/mm*.



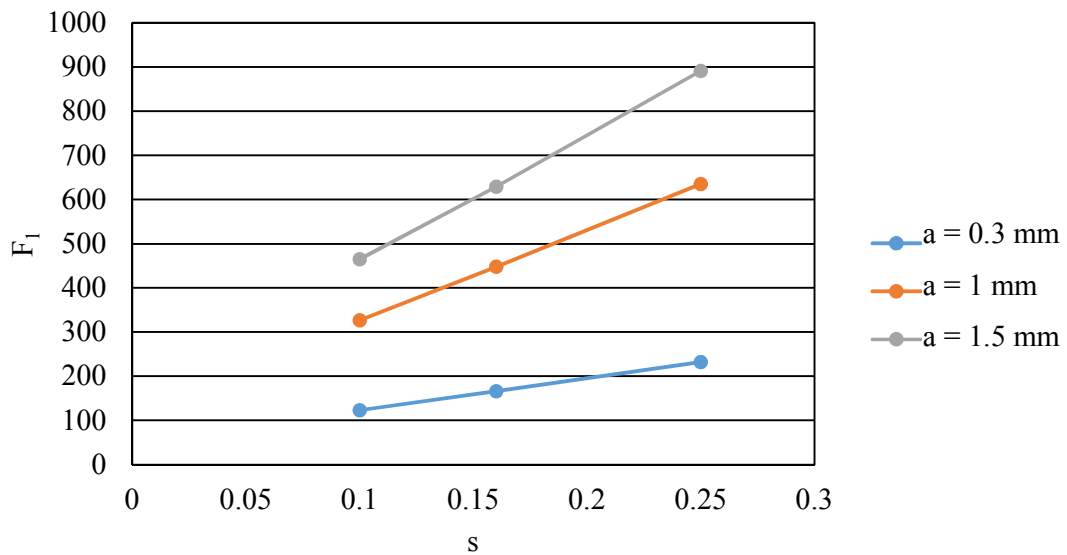
Слика 5.4. Распоред отпора резања F_1 за $v = 72.49$ *m/mm*

Слика 5.5 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања 91.89, m/mm .



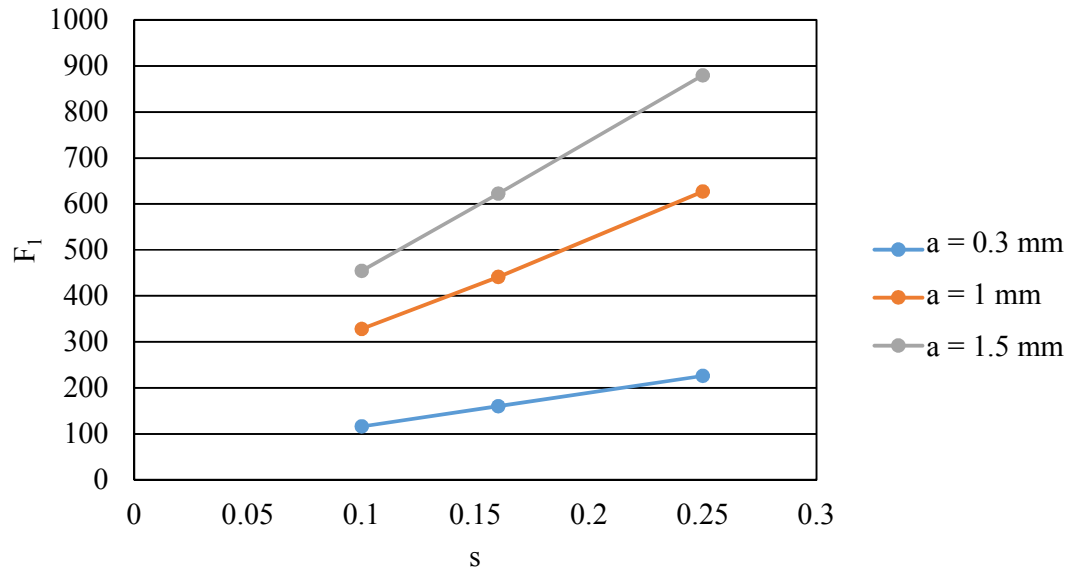
Слика 5.5. Распоред отпора резања F_1 за $v = 91.89$ m/mm

Слика 5.6 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања 114.35, m/mm .



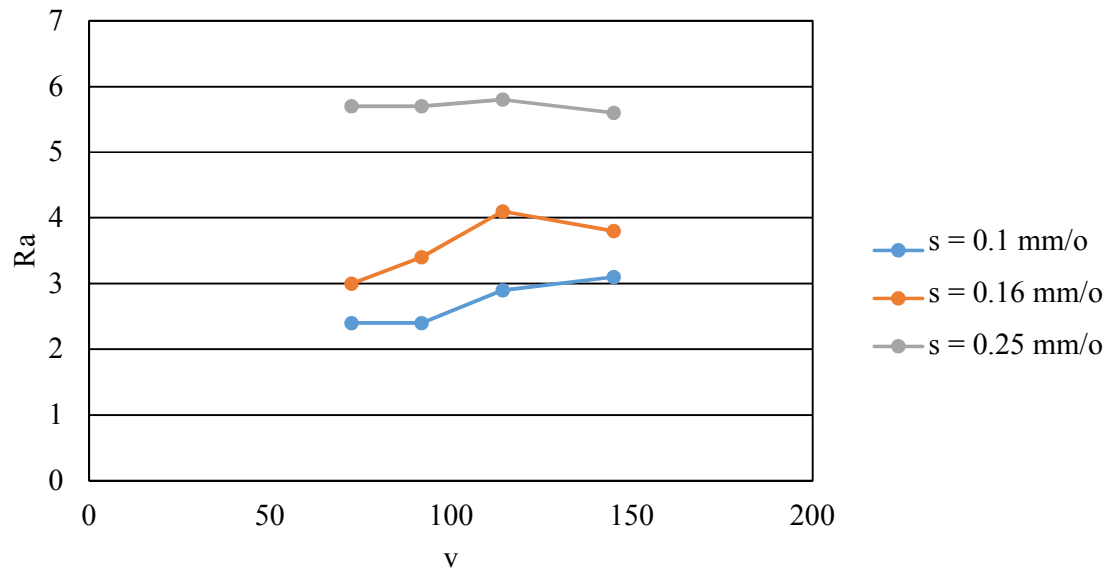
Слика 5.6. Распоред отпора резања F_1 за $v = 114.35$ m/mm

Слика 5.7 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања 144.98, m/mm .



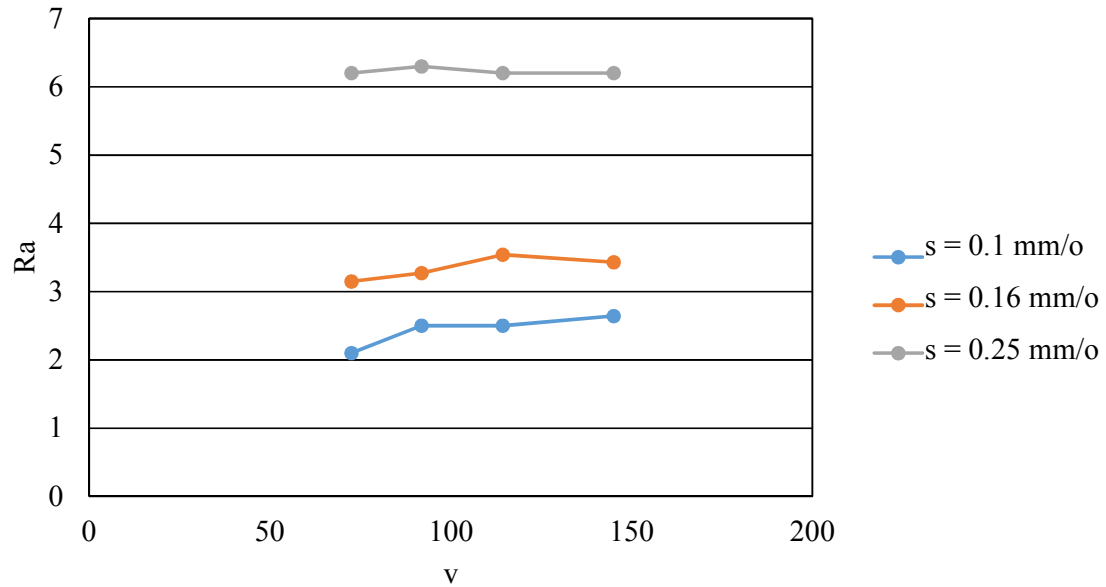
Слика 5.7. Распоред отпора резања F_1 за $v = 144.98$ m/mm

Слика 5.8 приказује промену храповости обрађене површине Ra у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 0.3, mm .



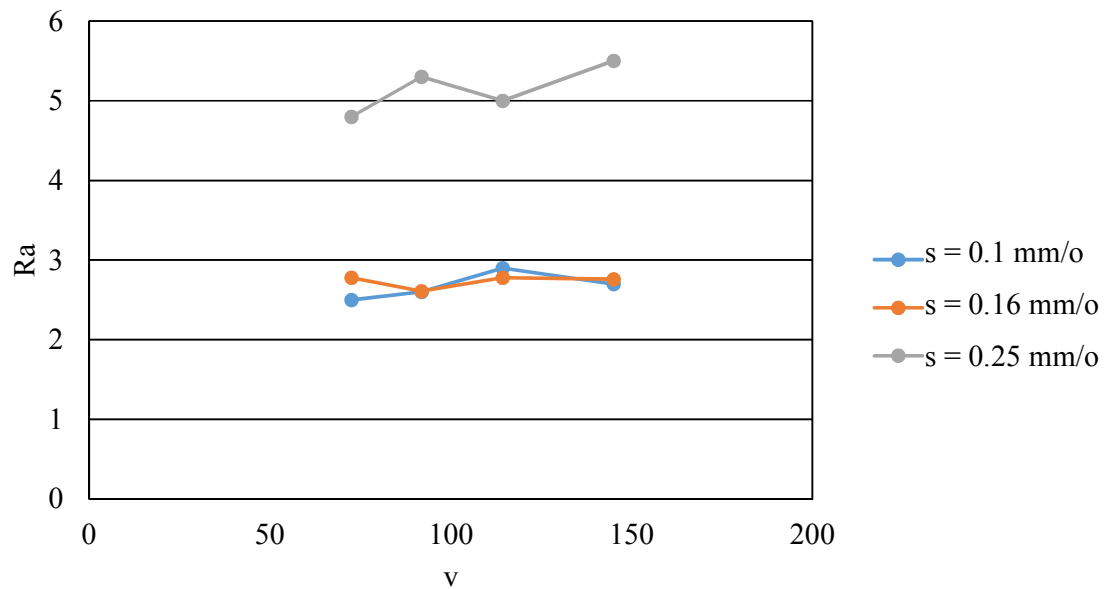
Слика 5.8. Распоред храповости обрађене површине Ra за $a = 0.3$ mm

Слика 5.9 приказује промену храпавости обрађене површине Ra у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 1, mm .



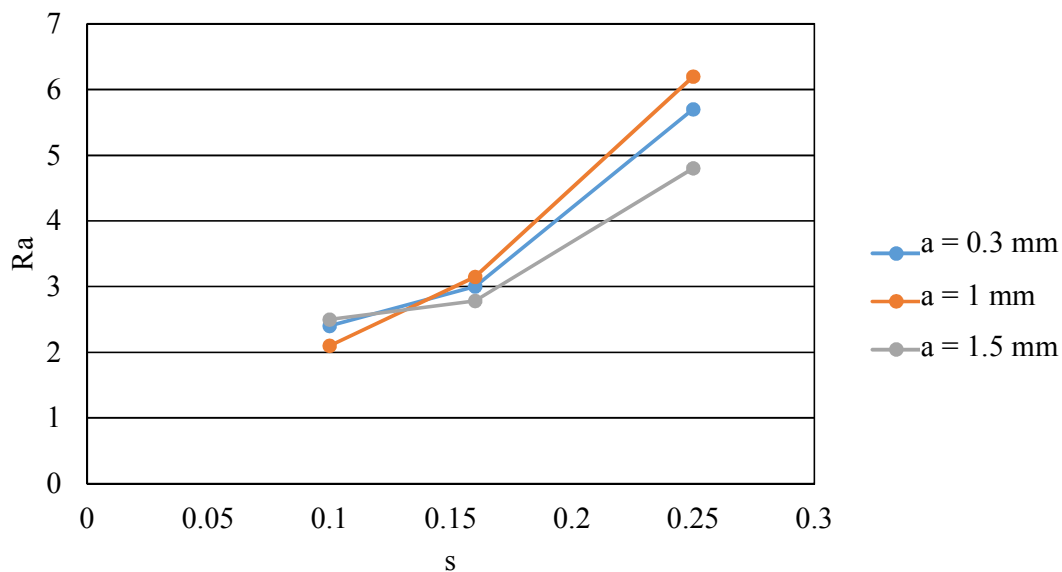
Слика 5.9. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $a = 1$ mm

Слика 5.10 приказује промену храпавости обрађене површине Ra у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 1.5, mm .



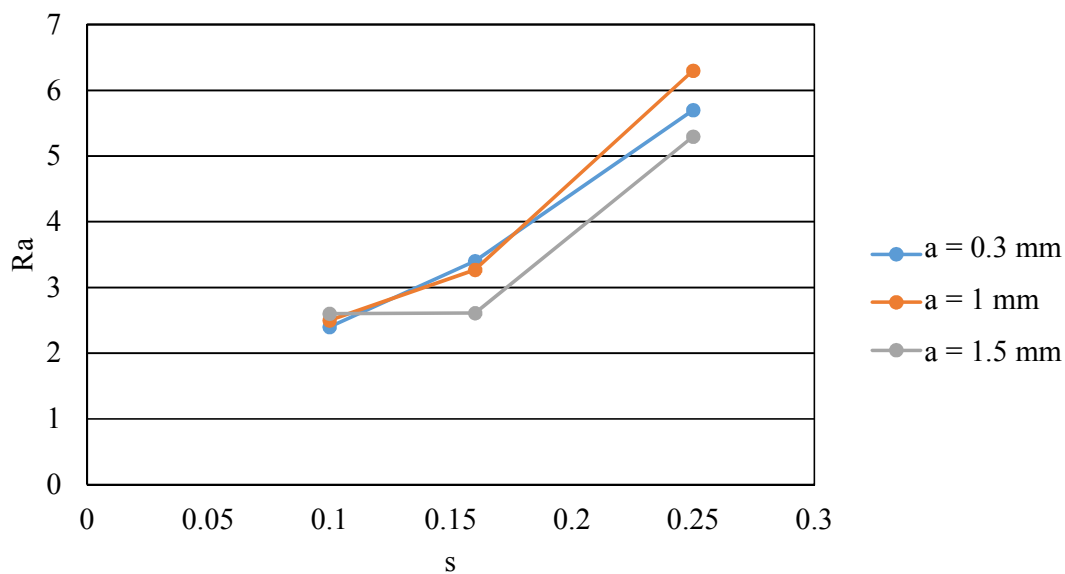
Слика 5.10. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $a = 1.5$ mm

Слика 5.11 приказује промену храпавости обрађене површине Ra у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања $72.49, m/mm$.



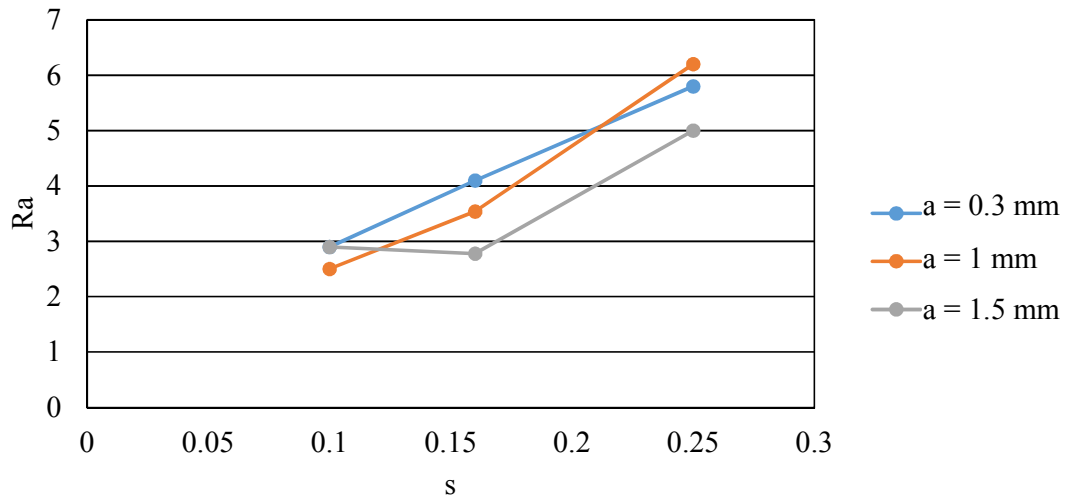
Слика 5.11. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $v = 72.49 m/mm$

Слика 5.12 приказује промену храпавости обрађене површине Ra у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања $91.89, m/mm$.



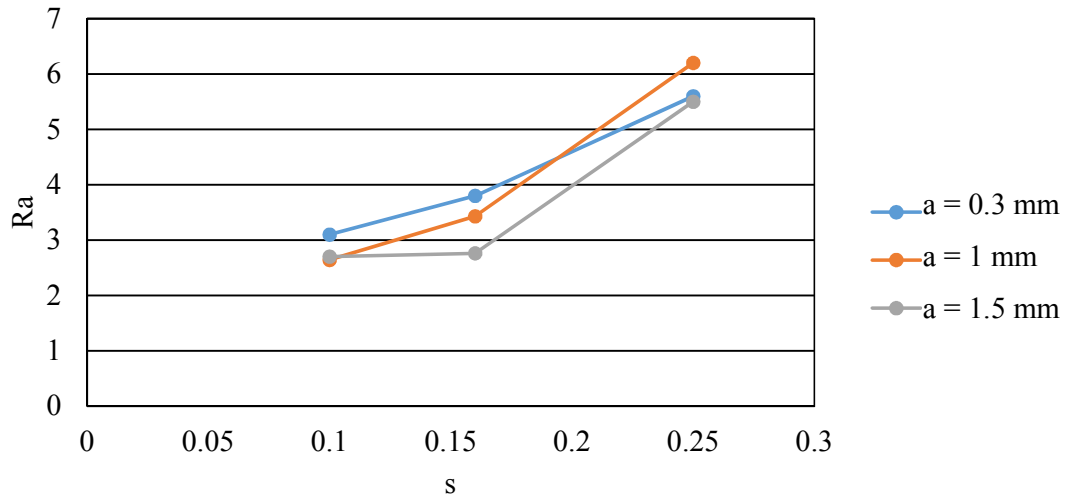
Слика 5.12. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $v = 91.89 m/mm$

Слика 5.13 приказује промену храпавости обрађене површине Ra у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања $114.35, m/mm$.



Слика 5.13. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $v = 114.35 m/mm$

Слика 5.14 приказује промену храпавости обрађене површине Ra у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања $144.98, m/mm$.



Слика 5.14. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $v = 144.98 m/mm$

За експериментална испитивања дебљине сегмента струготине при обради стругањем коришћен је мерни систем применом мерног микроскопа и камере. Табела 5.4 приказују облике струготине према стандарду *ISO 3685* [70] и

одговорајуће дебљине тих струготина. Сваки облик струготине је нумерисан од 1 до 10 са тим да неке вредности нису добијене у експериментима.

Табела 5.4. Типови струготина са основним параметрима

Редни број	a mm	s mm/o	v m/min	Облик струготине ISO 3685	Облик струготине од 1 до 10	δ mm
1	0.3	0.1	144.984	4.3/4.1	3	0.11
2	0.3	0.1	114.354	4.3/4.1	3	0.115
3	0.3	0.1	91.891	4.3/4.1	3	0.105
4	0.3	0.1	72.492	4.3/4.1	3	0.108
5	0.3	0.16	144.984	2.3	3	0.128
6	0.3	0.16	114.354	2.3/4.1	3	0.134
7	0.3	0.16	91.891	4.1/2.3	3	0.151
8	0.3	0.16	72.492	4.1	3	0.164
9	0.3	0.25	144.984	4.1/4.3	4	0.199
10	0.3	0.25	114.354	4.1/4.3	4	0.203
11	0.3	0.25	91.891	4.1	4	0.197
12	0.3	0.25	72.492	4.1	4	0.221
13	1	0.1	144.984	2.3	3	0.13
14	1	0.1	114.354	2.3	3	0.128
15	1	0.1	91.891	4.3	3	0.144
16	1	0.1	72.492	4.3	3	0.164
17	1	0.16	144.984	4.2	3	0.186
18	1	0.16	114.354	4.3/4.2	3	0.22
19	1	0.16	91.891	4.3	3	0.215
20	1	0.16	72.492	4.3	3	0.225
21	1	0.25	144.984	6.2	10	0.252
22	1	0.25	114.354	6.2	10	0.256
23	1	0.25	91.891	6.2	10	0.27
24	1	0.25	72.492	6.2	10	0.263
25	1.5	0.1	144.984	2.3	2	0.14
26	1.5	0.1	114.354	2.3	2	0.175
27	1.5	0.1	91.891	2.3	2	0.191
28	1.5	0.1	72.492	2.3	2	0.2
29	1.5	0.16	144.984	2.3/2.2	2	0.206
30	1.5	0.16	114.354	2.3/2.2	2	0.238
31	1.5	0.16	91.891	2.3	2	0.248
32	1.5	0.16	72.492	2.3	2	0.252
33	1.5	0.25	144.984	6.1/6.2	10	0.236
34	1.5	0.25	114.354	6.1/6.2	10	0.275
35	1.5	0.25	91.891	6.1/6.2	10	0.267
36	1.5	0.25	72.492	6.1/6.2	10	0.294









Дигитална камера је коришћена за снимање облика добијених струготина. Сlike за сваки облик струготине су добијене у свим тестовима и сачуване су за даљу анализу.

Сваки облик струготине је нумерисан према стандарду ISO 3685 [70] на следећи начин:

- 2.1 - Дуга равна струготина - 1
- 2.3 - Дуга замршена струготина - 2
- 3.1 - Равна струготина - 3
- 4.1 - Дуга уврнута струготина - 4
- 4.2 - Кратка струготина - 5
- 4.3 - Кратка замршена струготина - 6
- 6.2 - Неопређена струготина - 7
- 7 - Ситна струготина - 8

Према стандарду, осам облика струготине је добијено и генерисано у првом експерименту, за различите параметре резања. Табела 5.5 приказује облике струготине, који су добијени у првом експерименту. Осам облика струготине је добијено и анализирано у првом делу истраживања према датом стандарду, а затим је извршена класификација струготине и додељене су нумеричке вредности од 1-10, са тим да један одговара дугој глаткој струготини која се у зависности од услова обраде мења па постаје дуга згужвана, затим завојна са дугим завојницама, са кратким завојницама, постаје цилиндрична, а затим променном режима постаје кратка, долази до њеног ломљења, постаје кратка, односно кратка цилиндрична, спирално цилиндрична, спирална и на крају дробљења и ситно дробљења.

Табела 5.5. Облици струготине у првом експерименту

	Дуга	Кратка	Замршена
Струготина из групе 2	2.1 Дуга равна струготина 		2.3 Дуга замршена струготина 
Струготина из групе 3	3.1 Равна струготина 		
Струготина из групе 4	4.1 Дуга уврнута струготина 	4.2 Кратка струготина 	4.3 Кратка замршена струготина 
Струготина из групе 6		6.2 Неопређена струготина 	
Струготина из групе 7		7 Ситна струготина 	

Слике струготине у табелама 5.6, 5.7, и 5.8 показују да са повећањем брзине резања расте дебљина сегмената струготине. Може се закључити да је најмања дебљина сегмената код најмање дубине резања. Такође се види да се са повећањем корака смањује дебљина сегмената струготине.


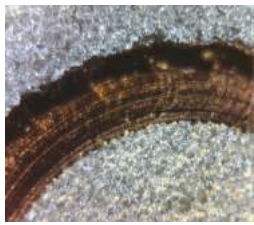



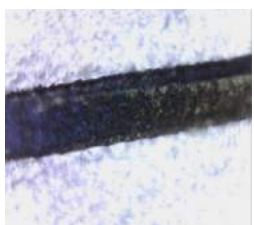






На основу микроскопских снимака и параметара у табелама 5.6, 5.7, и 5.8, можемо доћи до закључка да се при константним параметрима резања и променом једног параметара у првом случају брзине, повећава се дебљина струготине. Такође, као што можемо видети из приказаних микроскопских снимака у табелама 5.6, 5.7, и 5.8, променом параметра корака знатно утичемо на дебљину струготине, као и променом параметара дубине стругања.

На основу микроскопских снимака у табели 5.6, можемо видети да струготине у првој колони, при истим параметрима дубине и брзине резања, а при промени корака резања значајно се мења дебљина струготине, што показује на утицај корака резања на дебљину струготине.









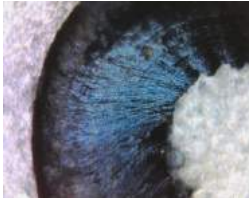



На основу микроскопских снимака у табели 5.7 можемо уочити директан утицај параметра дубине резања на дебљину струготине. Такође, на основу микроскопских снимака у табели 5.8 можемо уочити при константним параметрима дубине и корака у обради стругањем, значајна промена брзине резања има директан утицај на дебљину струготине. Долазимо до закључка да при константним вредностима параметара дубине и корака, а порастом брзине резања долази до значајног пораста дебљине струготине.

На основу микроскопских снимака у табелама 5.6, 5.7, и 5.8, прегледно је приказан утицај свих параметара стругања на дебљину струготине. Јасно закључујемо да сваки параметар има директан утицај на дебљину облика струготине и да променом било ког параметра стругања ће доћи то промене дебљине струготине. У табелама 5.6, 5.7, и 5.8 је посматран шири дијапазон улазних параметара v , s и a због детаљнијих и свеобухватнијих испитивања дебљине струготине.










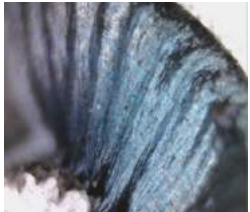


Табела 5.6. Сегменти струготине за дубини резања 0.3 mm

 <p> $s = 0.1 \text{ mm/o}$ $a = 0.3 \text{ mm}$ $v = 72.492 \text{ m/min}$ $\delta = 0.108 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.1 \text{ mm/o}$ $a = 0.3 \text{ mm}$ $v = 91.891 \text{ m/min}$ $\delta = 0.105 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.1 \text{ mm/o}$ $a = 0.3 \text{ mm}$ $v = 114.354 \text{ m/min}$ $\delta = 0.115 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.1 \text{ mm/o}$ $a = 0.3 \text{ mm}$ $v = 144.984 \text{ m/min}$ $\delta = 0.11 \text{ mm}$ </p>
 <p> $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $a = 0.3 \text{ mm}$ $v = 72.492 \text{ m/min}$ $\delta = 0.164 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $a = 0.3 \text{ mm}$ $v = 91.891 \text{ m/min}$ $\delta = 0.151 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $a = 0.3 \text{ mm}$ $v = 114.354 \text{ m/min}$ $\delta = 0.134 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $a = 0.3 \text{ mm}$ $v = 144.984 \text{ m/min}$ $\delta = 0.128 \text{ mm}$ </p>
 <p> $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $a = 0.3 \text{ mm}$ $v = 72.492 \text{ m/min}$ $\delta = 0.221 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $a = 0.3 \text{ mm}$ $v = 91.891 \text{ m/min}$ $\delta = 0.197 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $a = 0.3 \text{ mm}$ $v = 114.354 \text{ m/min}$ $\delta = 0.203 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $a = 0.3 \text{ mm}$ $v = 144.984 \text{ m/min}$ $\delta = 0.199 \text{ mm}$ </p>

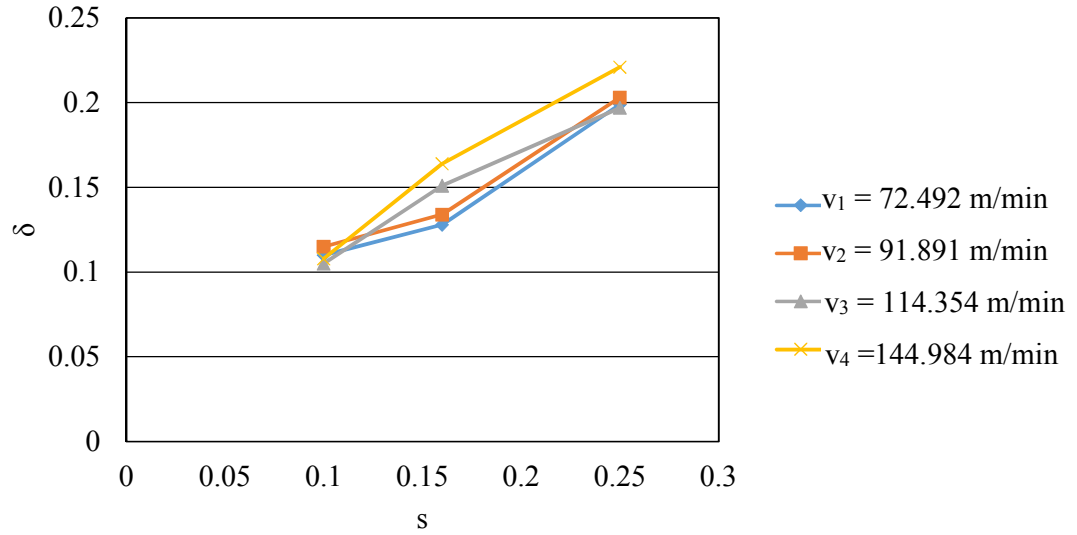
Табела 5.7. Сегменти струготине за дубини резања 1 mm

 <p> $s = 0.1 \text{ mm/o}$ $a = 1 \text{ mm}$ $v = 72.492 \text{ m/min}$ $\delta = 0.164 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.1 \text{ mm/o}$ $a = 1 \text{ mm}$ $v = 91.891 \text{ m/min}$ $\delta = 0.144 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.1 \text{ mm/o}$ $a = 1 \text{ mm}$ $v = 114.984 \text{ m/min}$ $\delta = 0.128 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.1 \text{ mm/o}$ $a = 1 \text{ mm}$ $v = 144.984 \text{ m/min}$ $\delta = 0.13 \text{ mm}$ </p>
 <p> $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $a = 1 \text{ mm}$ $v = 72.492 \text{ m/min}$ $\delta = 0.225 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $a = 1 \text{ mm}$ $v = 91.891 \text{ m/min}$ $\delta = 0.215 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $a = 1 \text{ mm}$ $v = 114.354 \text{ m/min}$ $\delta = 0.22 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $a = 1 \text{ mm}$ $v = 144.984 \text{ m/min}$ $\delta = 0.186 \text{ mm}$ </p>
 <p> $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $a = 1 \text{ mm}$ $v = 72.492 \text{ m/min}$ $\delta = 0.263 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $a = 1 \text{ mm}$ $v = 91.891 \text{ m/min}$ $\delta = 0.27 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $a = 1 \text{ mm}$ $v = 114.354 \text{ m/min}$ $\delta = 0.256 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $a = 1 \text{ mm}$ $v = 144.984 \text{ m/min}$ $\delta = 0.252 \text{ mm}$ </p>

Табела 5.8. Сегменти струготине за дубини резања 1.5 mm

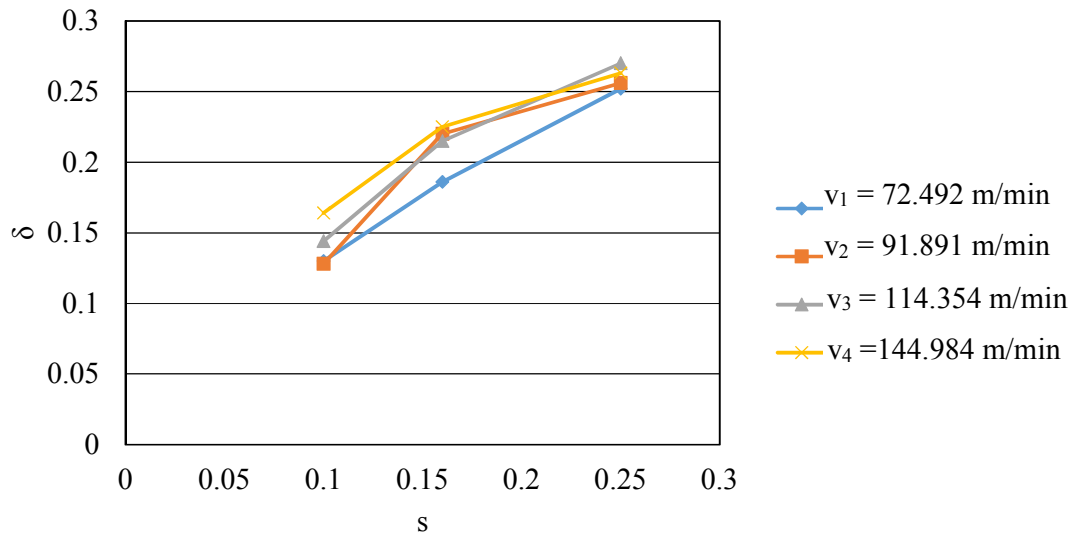
 <p> $s = 0.1 \text{ mm/o}$ $a = 1.5 \text{ mm}$ $v = 72.492 \text{ m/min}$ $\delta = 0.2 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.1 \text{ mm/o}$ $a = 1.5 \text{ mm}$ $v = 91.891 \text{ m/min}$ $\delta = 0.191 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.1 \text{ mm/o}$ $a = 1.5 \text{ mm}$ $v = 114.354 \text{ m/min}$ $\delta = 0.175 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.1 \text{ mm/o}$ $a = 1.5 \text{ mm}$ $v = 144.984 \text{ m/min}$ $\delta = 0.14 \text{ mm}$ </p>
 <p> $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $a = 1.5 \text{ mm}$ $v = 72.492 \text{ m/min}$ $\delta = 0.252 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $a = 1.5 \text{ mm}$ $v = 91.891 \text{ m/min}$ $\delta = 0.248 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $a = 1.5 \text{ mm}$ $v = 114.354 \text{ m/min}$ $\delta = 0.238 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.16 \text{ mm/o}$ $a = 1.5 \text{ mm}$ $v = 144.984 \text{ m/min}$ $\delta = 0.206 \text{ mm}$ </p>
 <p> $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $a = 1.5 \text{ mm}$ $v = 72.492 \text{ m/min}$ $\delta = 0.294 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $a = 1.5 \text{ mm}$ $v = 91.891 \text{ m/min}$ $\delta = 0.267 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $a = 1.5 \text{ mm}$ $v = 114.354 \text{ m/min}$ $\delta = 0.275 \text{ mm}$ </p>	 <p> $s = 0.25 \text{ mm/o}$ $a = 1.5 \text{ mm}$ $v = 144.984 \text{ m/min}$ $\delta = 0.236 \text{ mm}$ </p>

Слика 5.15 приказује промену дебљине струготине у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања су 0.3, *mm*.



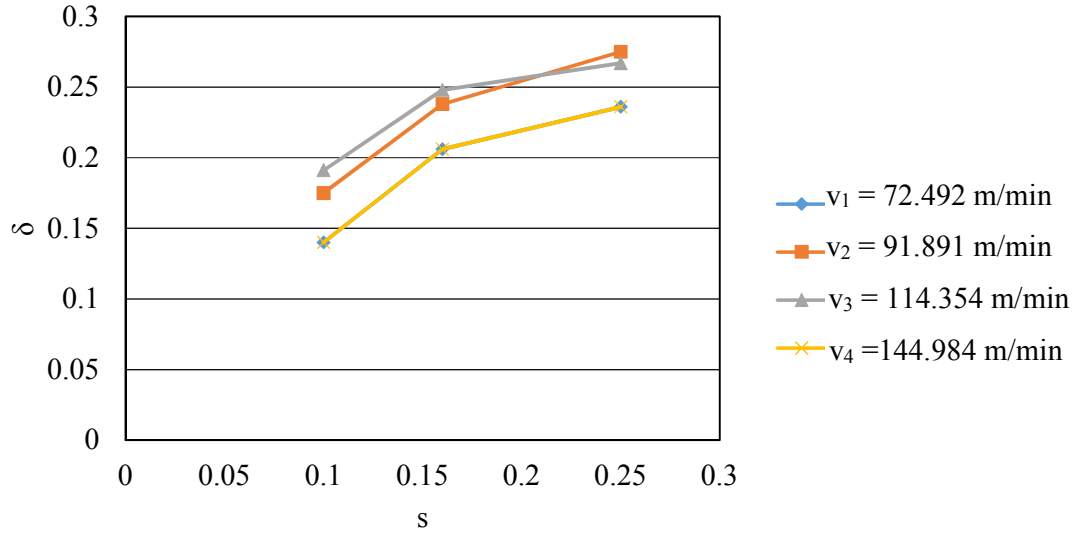
Слика 5.15. Промена дебљине струготине у зависности од брзине резања и корака резања и за $a = 0.3 \text{ mm}$

Слика 5.16 приказује промену дебљине струготине у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања су 1, *mm*.



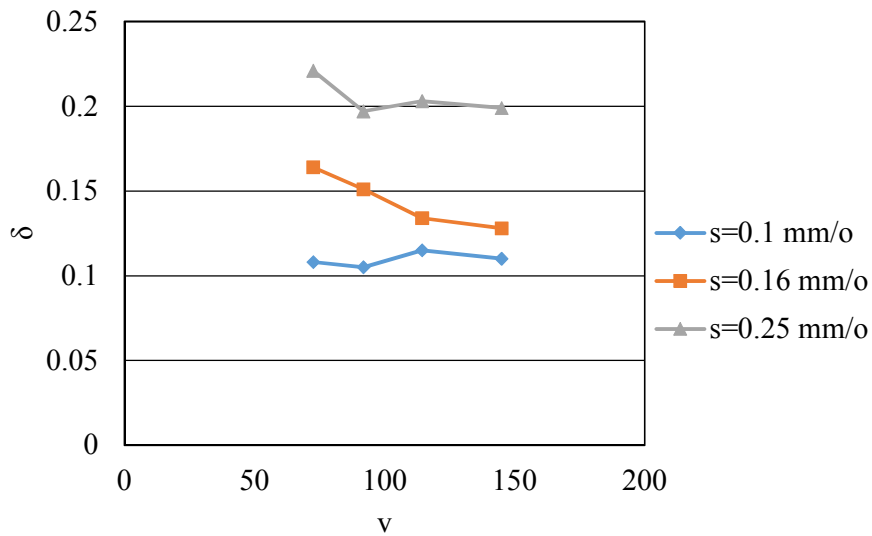
Слика 5.16. Промена дебљине струготине у зависности од брзине резања и корака резања и за $a = 1 \text{ mm}$

Слика 5.17 приказује промену дебљине струготине у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања су 1.5, mm.



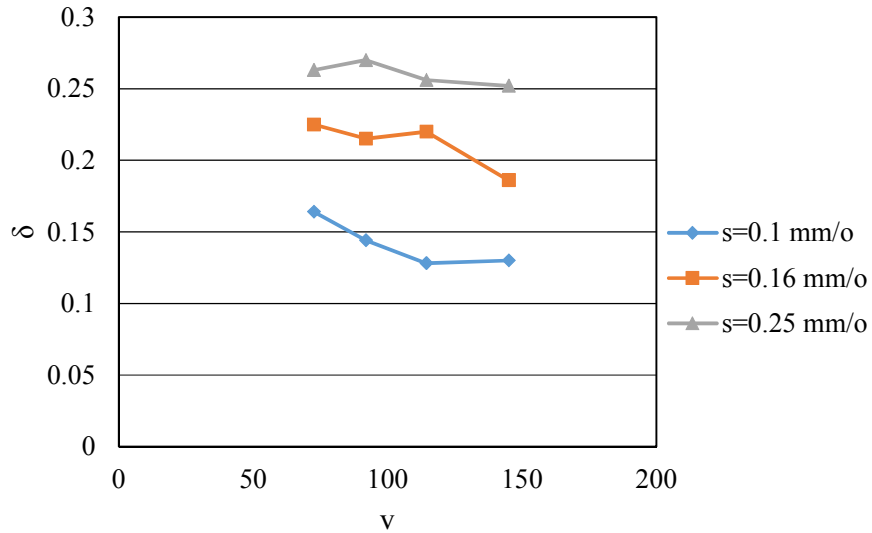
Слика 5.17. Промена дебљине струготине у зависности од брзине резања и корака резања и за $a = 1.5$ mm

Слика 5.18 приказује промену дебљине струготине у зависности од корака резања, брзине резања и за дубину резања су 0.3, mm.



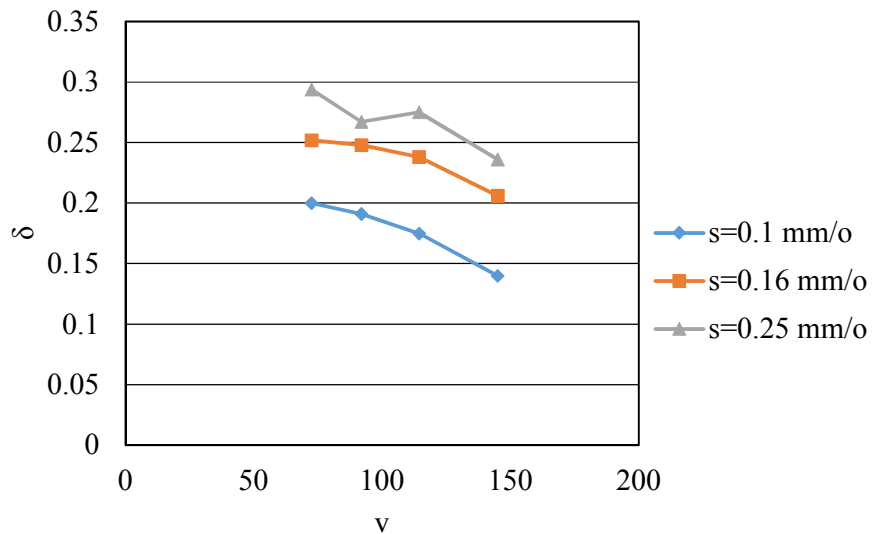
Слика 5.18. Промена дебљине струготине у зависности од корака резања и брзине резања и за $a = 0.3$ mm

Слика 5.19 приказује промену дебљине струготине у зависности од корака резања, брзине резања и за дубину резања су 1, *mm*.



Слика 5.19. Промена дебљине струготине у зависности од корака резања и брзине резања и за $a = 1 \text{ mm}$

Слика 5.20 приказује промену дебљине струготине у зависности од корака резања, брзине резања и за дубину резања су 1.5, *mm*.



Слика 5.20. Промена дебљине струготине у зависности од корака резања и брзине резања и за $a = 1.5 \text{ mm}$

5.2. Резултати другог експеримента

Резултати испитивања отпорних сила резања и температура у зони резања са троугаоном плочицом (*други експеримент*) су приказани у табели 5.8. Вредности добијених температура у зони резања из експерименталних мерења су приказане у табели 5.9, а режими резања су исти као у табели 5.1.

Табела 5.9. Резултати експерименталних испитивања са троугаоном плочицом отпора резања, температуре и квалитета обрађене површине

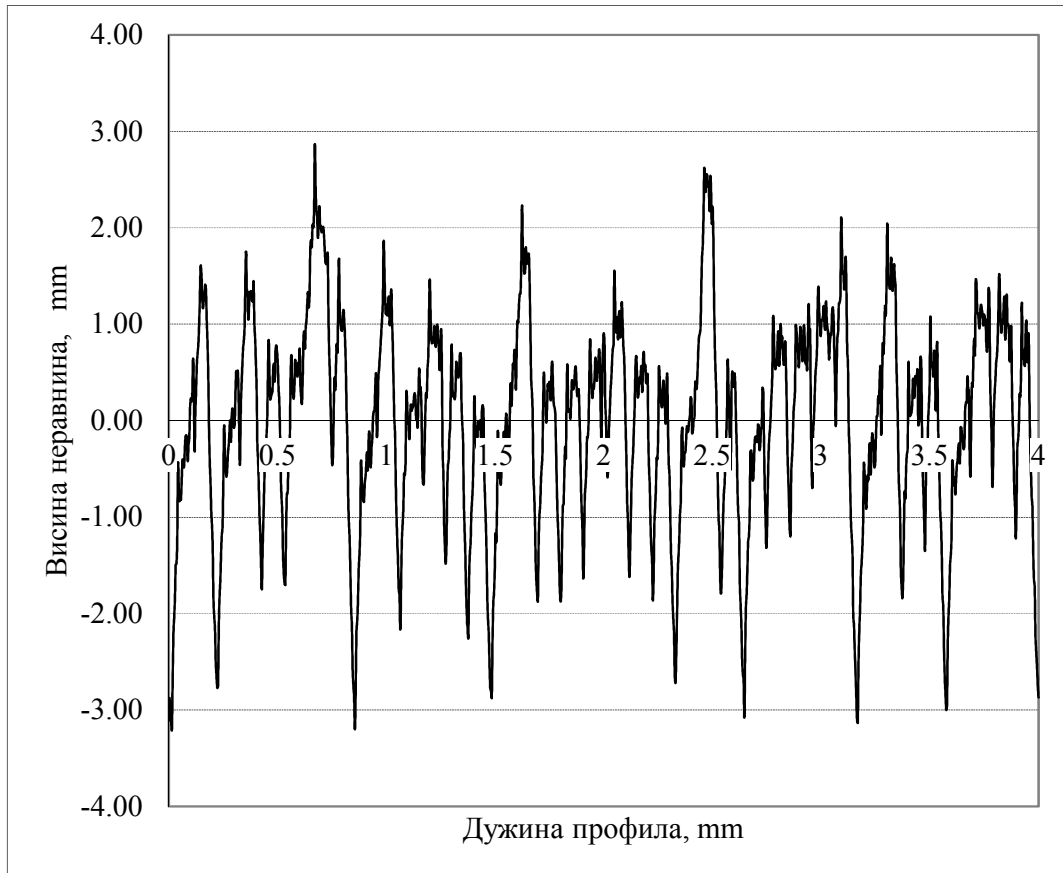
Редни број	s mm/o	v m/min	a mm	F1 N	F2 N	F3 N	Ra μ m	Tspot °C	Tmax °C
1	0.1	156	0.3	116	128	55	0.86	210	228
2	0.1	123	0.3	123	130	57	0.9	210	233
3	0.1	100	0.3	128	128	56	0.91	208	235
4	0.1	78	0.3	132	128	56.5	0.96	220	236
5	0.16	156	0.3	160	168	66	0.99	191	233
6	0.16	123	0.3	166	165	67	0.95	199	236
7	0.16	100	0.3	172	163	66.5	0.93	196	236
8	0.16	78	0.3	177	159	66	0.97	194	238
9	0.25	156	0.3	226	212	79	2	176	240
10	0.25	123	0.3	232	205	77	2.02	175	242
11	0.25	100	0.3	236	200	77	2.01	180	246
12	0.25	78	0.3	237	200	75	2.07	178	247
13	0.1	156	1	328	200	188	0.72	183	250
14	0.1	123	1	327	191	188	0.84	198	254
15	0.1	100	1	335	190	193	0.83	203	256
16	0.1	78	1	345	192	197	0.78	207	257
17	0.16	156	1	441	252	225	1,1	160	257
18	0.16	123	1	448	238	222	1.05	162	263
19	0.16	100	1	453	235	223	1.06	168	262
20	0.16	78	1	465	227	230	1.02	190	265
21	0.25	156	1	627	318	270	1.86	152	260
22	0.25	123	1	635	315	270	1.85	157	265
23	0.25	100	1	650	313	278	1.84	163	266
24	0.25	78	1	660	318	295	1.94	171	270
25	0.1	156	1.5	454.6	199	323.6	2.2	174	239
26	0.1	123	1.5	465	195	313.8	1.95	184	244
27	0,1	100	1.5	470.6	192	312	2.08	191	244
28	0,1	78	1.5	473.2	190.8	303.4	1.76	192	258
29	0.16	156	1.5	622.4	246.8	368	2.19	155	243
30	0.16	123	1.5	629.2	245.2	369.4	2.06	154	251
31	0.16	100	1.5	642	245	373	2.14	157	257
32	0.16	78	1.5	656	243.4	375.8	2.24	160	266
33	0.25	156	1.5	879.6	315.2	430.6	2.01	145	255
34	0.25	123	1.5	891.5	314	436	2.74	148	259
35	0.25	100	1.5	904	313.2	440.6	2.02	143	265
36	0.25	78	1.5	915.2	313.6	445.2	2.05	142	272

Табела 5.10 приказује облике струготине у другом експерименту на основу улазних параметара резања, као и одговарајуће дебљине струготине. Може се рећи да се при одређеним условима обраде (дубина, брзина, корак резања) добија одређени облик струготине за који су температуре резања различите. Добијени облици струготине су подељени према датом стандарду *ISO 3685* [70] као и бројчано од 1 до 10 ради даље анализе са тим да нису добијени сви облици струготине.

Табела 5.10. Типови струготина са основним параметрима

Редни број	s mm/o	v m/min	a mm	Облик струготине ISO 3685	Облик струготине од 1 до 10	δ mm
1	0.1	156	0.3	4.3/4.1	3	0.11
2	0.1	123	0.3	4.3/4.1	3	0.115
3	0.1	100	0.3	4.3/4.1	3	0.105
4	0.1	78	0.3	4.3/4.1	3	0.108
5	0.16	156	0.3	2.3	3	0.128
6	0.16	123	0.3	2.3/4.1	3	0.134
7	0.16	100	0.3	4.1/2.3	3	0.151
8	0.16	78	0.3	4.1	3	0.164
9	0.25	156	0.3	4.1/4.3	4	0.199
10	0.25	123	0.3	4.1/4.3	4	0.203
11	0.25	100	0.3	4.1	4	0.197
12	0.25	78	0.3	4.1	4	0.221
13	0.1	156	1	2.3	3	0.13
14	0.1	123	1	2.3	3	0.128
15	0.1	100	1	4.3	3	0.144
16	0.1	78	1	4.3	3	0.164
17	0.16	156	1	4.2	3	0.186
18	0.16	123	1	4.3/4.2	3	0.22
19	0.16	100	1	4.3	3	0.215
20	0.16	78	1	4.3	3	0.225
21	0.25	156	1	6.2	10	0.252
22	0.25	123	1	6.2	10	0.256
23	0.25	100	1	6.2	10	0.27
24	0.25	78	1	6.2	10	0.263
25	0.1	156	1.5	2.3	2	0.14
26	0.1	123	1.5	2.3	2	0.175
27	0.1	100	1.5	2.3	2	0.191
28	0.1	78	1.5	2.3	2	0.2
29	0.16	156	1.5	2.3/2.2	2	0.206
30	0.16	123	1.5	2.3/2.2	2	0.238
31	0.16	100	1.5	2.3	2	0.248
32	0.16	78	1.5	2.3	2	0.252
33	0.25	156	1.5	6.1/6.2	10	0.236
34	0.25	123	1.5	6.1/6.2	10	0.275
35	0.25	100	1.5	6.1/6.2	10	0.267
36	0.25	78	1.5	6.1/6.2	10	0.294

Висина неравнина обрађене површине при датом режиму обраде је приказана на слици 5.21.



Слика 5.21. Топографија површине добијена за $a = 1.5 \text{ mm}$,
 $s = 0.1 \text{ mm/o}$ и $v = 78 \text{ m/min}$

Слике 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 и 5.27. приказују распоред температуре у зони резања у току процеса резања за различите параметре резања и за различите облике струготина односно за режиме резања према табели 5.8. За различите параметре резања су добијени различити облици струготина. За сваки облик струготине је другачија дистрибуција температуре у зони резања.

Слика 5.22 приказује распоред контактне ($T_{\text{спот}}$) и максималне температуре ($T_{\text{макс}}$) за дугу замршену струготину. Максимална температура је максимална температура у квадратићу и то је углавном температура струготине и то најчешће са доње стране струготине која је нешто већа од горње стране. Контактна

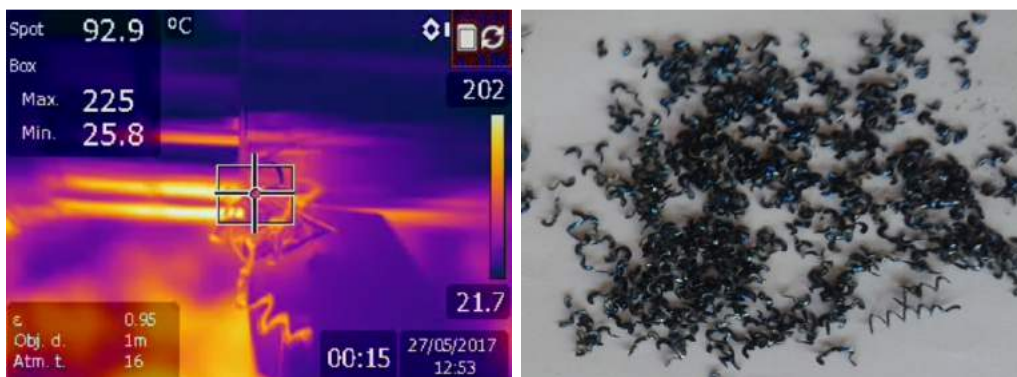
температура је температура у малом кружићу у крстићу видео записа, а максимална температура је максимална температура у означеном квадратићу на сликама.

Контактна температура је 186, °C, а максимална температура у зони резања је 230, °C, што се може видети на слици 5.22. Максимална температура се концентрише углавном у региони контакта између резног алата и обрадног материјала. Тада долази и до формирања одређеног облика струготине, у овом случају дуге замршене струготине.



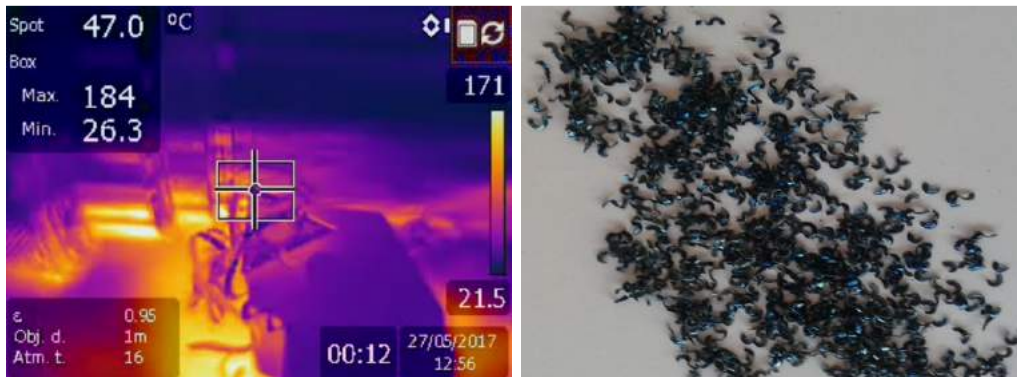
Слика 5.22. Распоред температуре у зони резања: Дуга замршена струготина (ознака 2.3 према ISO 3685) (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

Слика 5.23 приказује распоред контактне (Тспот) и максималне температуре (Тмакс) за дугу уврнуту струготину. Контактна температура је 92.9, °C, а максимална температура у зони резања је 225, °C, што се може видети на слици 5.23.



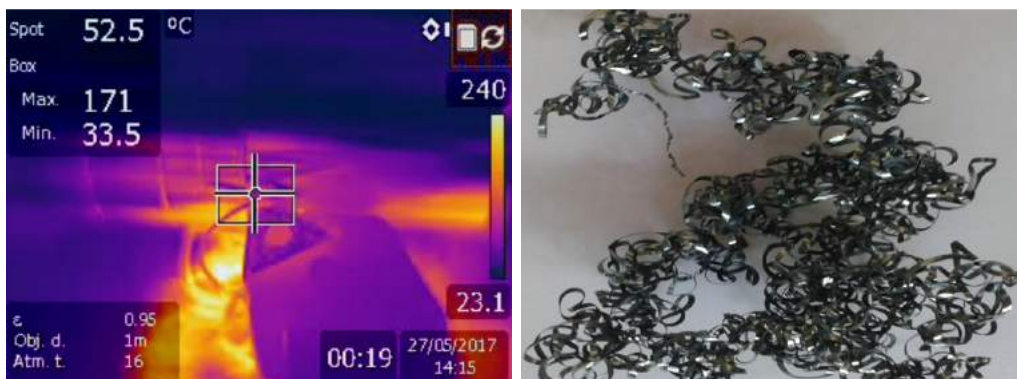
Слика 5.23. Распоред температуре у зони резања: Дуга уврнута струготина (ознака 4.1 према ISO 3685), (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

Слика 5.24 приказује дистрибуцију контактне и максималне температуре за кратку струготину. Контактна температура је 47, °C, а максимална температура у зони резања је 184, °C, што се може видети на слици 5.24.



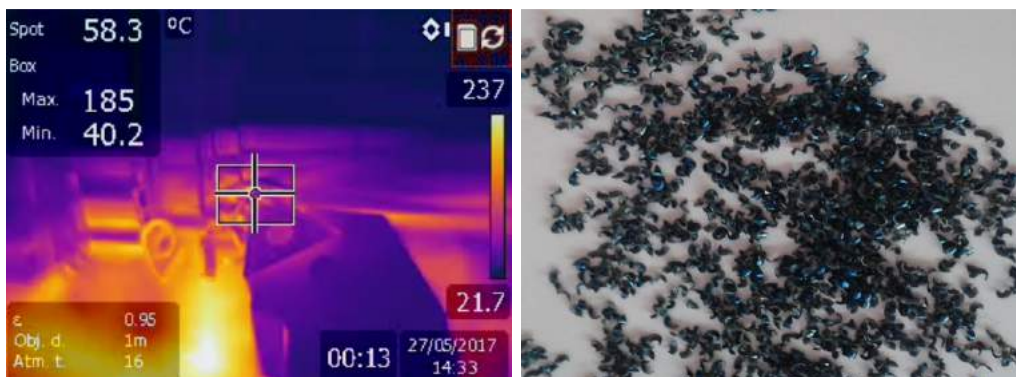
Слика 5.24. Распоред температуре у зони резања: Кратка струготина (ознака 4.2 према ISO 3685), (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

Слика 5.25 приказује дистрибуцију контактне и максималне температуре за кратку замршену струготину. Контактна температура је 52.5, °C, а максимална температура у зони резања је 171, °C, што се може видети на слици 5.25.



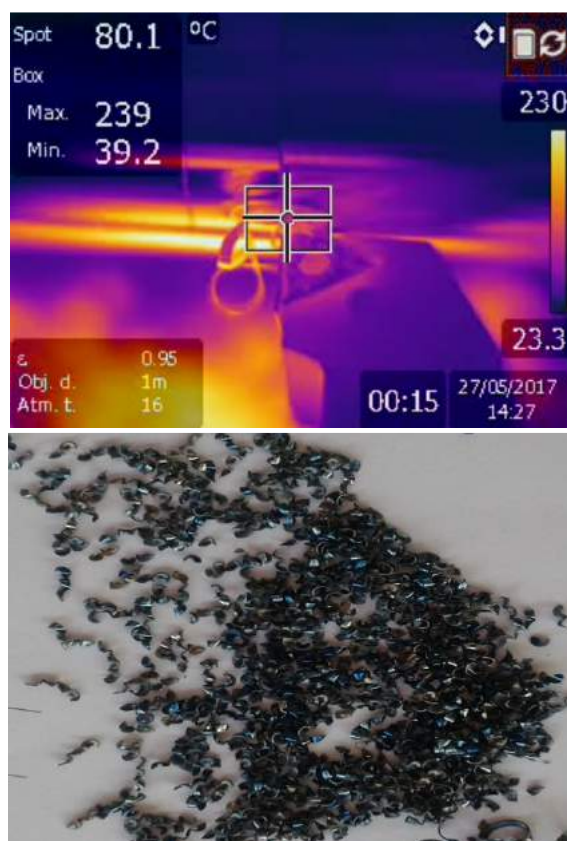
Слика 5.25. Распоред температуре у зони резања: Кратка замршена струготина (ознака 4.3 према ISO 3685), (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

Слика 5.26 приказује дистрибуцију контактне и максималне температуре за неодређену струготину. Контактна температура је 58.3, °C, а максимална температура у зони резања је 185, °C, што се може видети на слици 5.26.



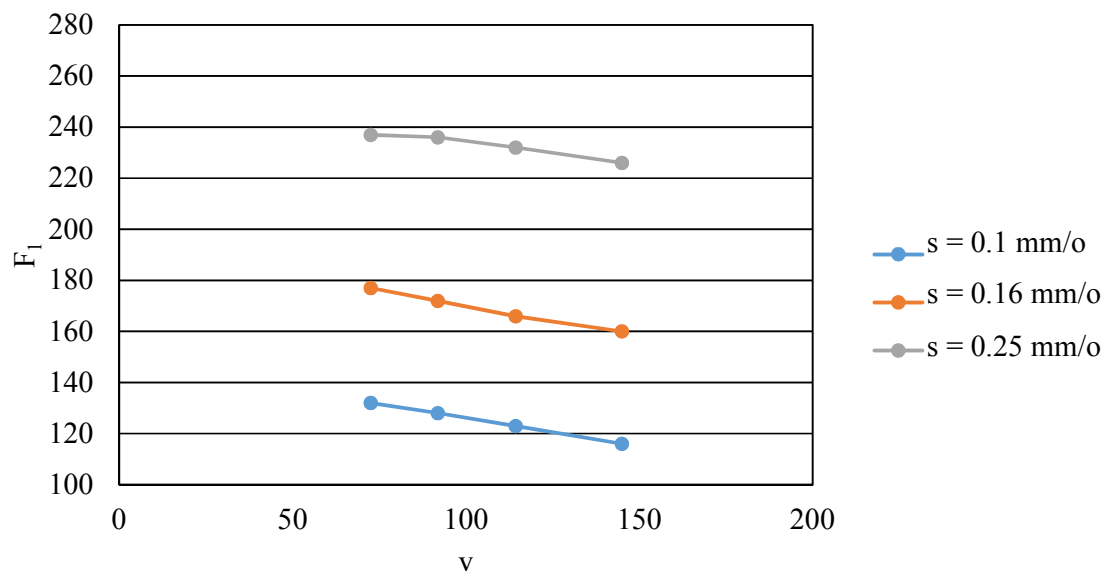
Слика 5.26. Распоред температуре у зони резања: Неодређена струготина (ознака 6.2 према ISO 3685), (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

Слика 5.27 приказује дистрибуцију контактне и максималне температуре за ситну струготину. Контактна температура је 80.1, °C, а максимална температура у зони резања је 239, °C, што се може видети на слици 5.27.



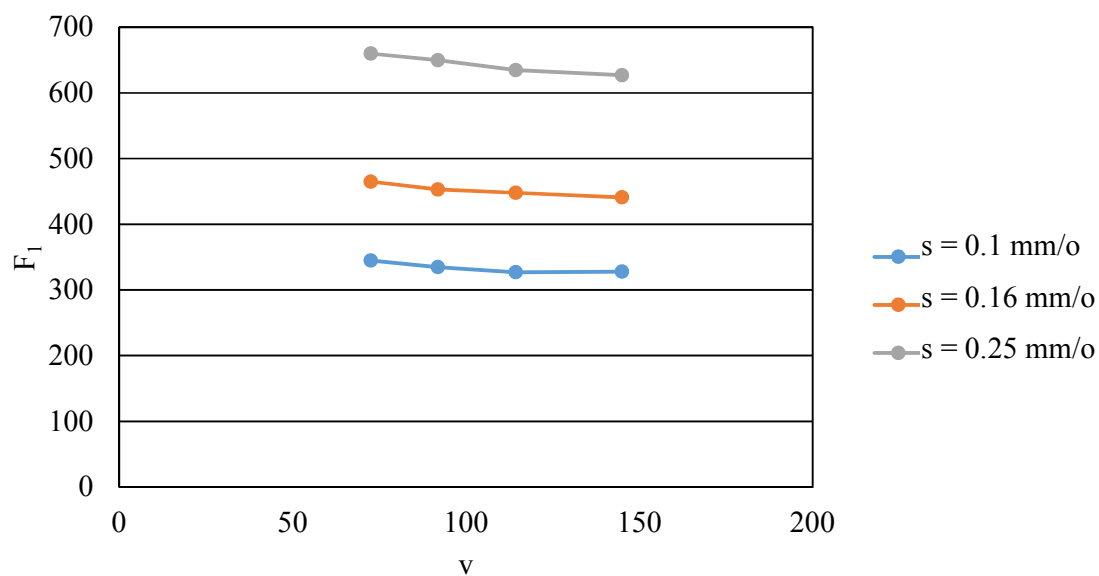
Слика 5.27. Распоред температуре у зони резања: Ситна струготина (ознака 7 према ISO 3685) (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

Слика 5.28 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 0.3, *mm*.



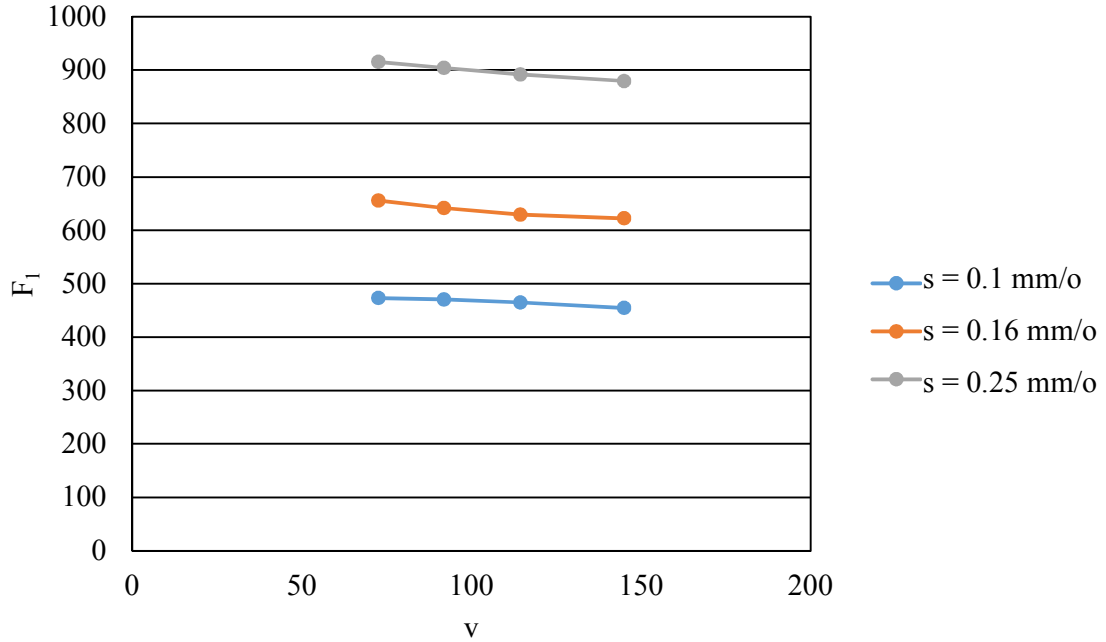
Слика 5.28. Распоред отпора резања F_1 за $a = 0.3$ *mm*

Слика 5.29 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 1, *mm*.



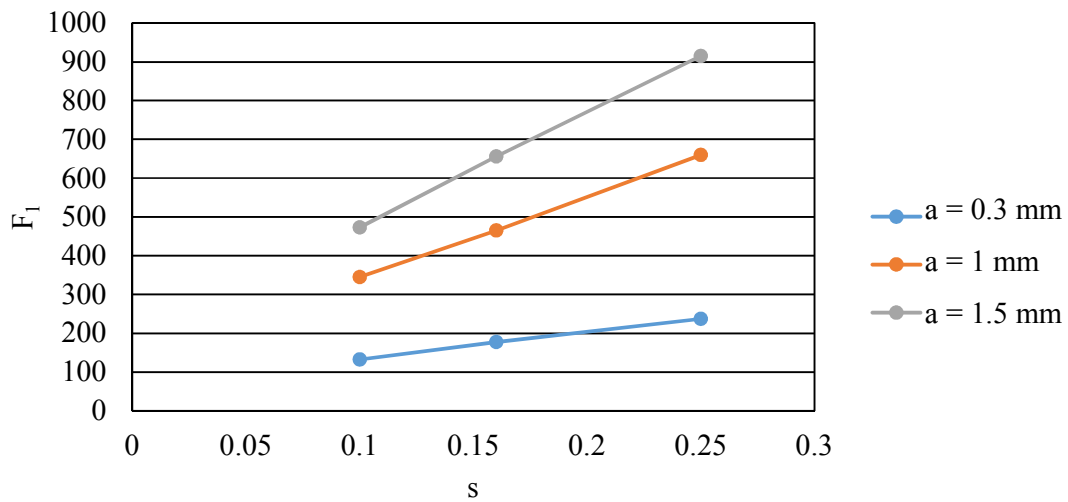
Слика 5.29. Распоред отпора резања F_1 за $a = 1$ *mm*

Слика 5.30 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 1.5, *mm*.



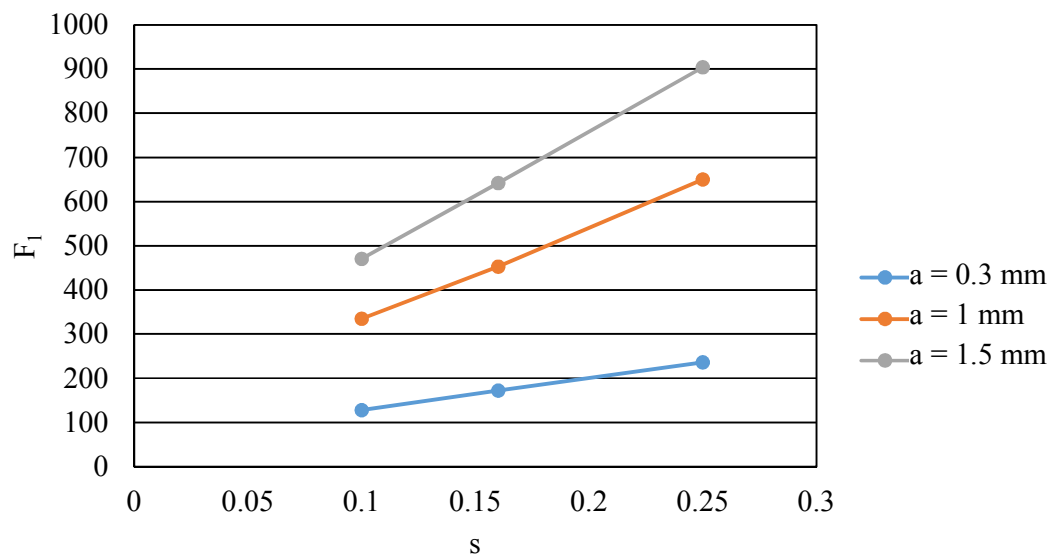
Слика 5.30. Распоред отпора резања F_1 за $a = 1.5$ *mm*

Слика 5.31 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања $v = 72.49$, *m/mm*.



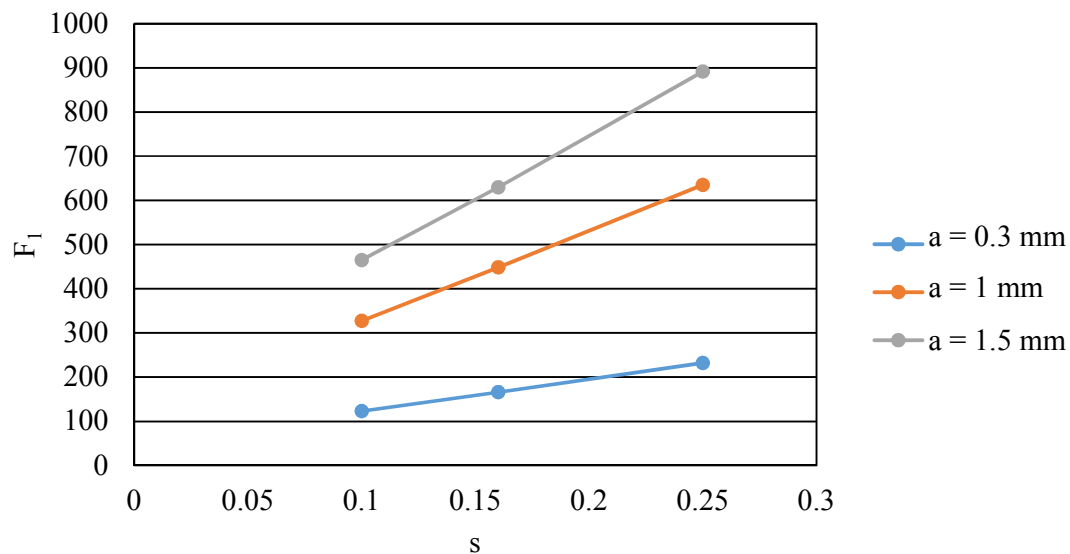
Слика 5.31. Распоред отпора резања F_1 за $v = 72.49$ *m/mm*

Слика 5.32 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања $v = 91.89, m/mm$.



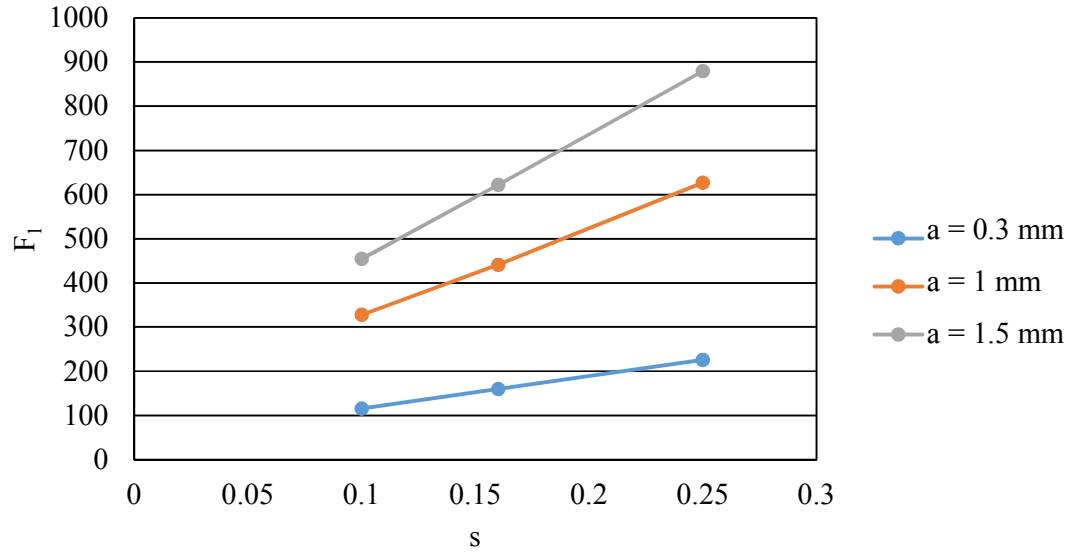
Слика 5.32. Распоред отпора резања F_1 за $v = 91.89 m/mm$

Слика 5.33 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања $v = 114.35, m/mm$.



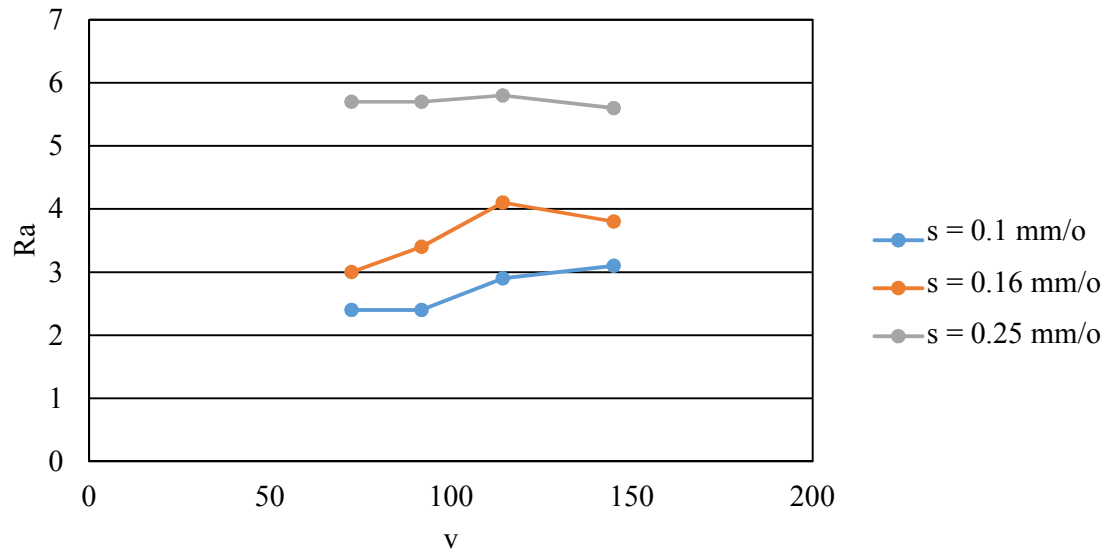
Слика 5.33. Распоред отпора резања F_1 за $v = 114.35 m/mm$

Слика 5.34 приказује промену отпора резања F_1 у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања $v = 144.98, m/mm$.



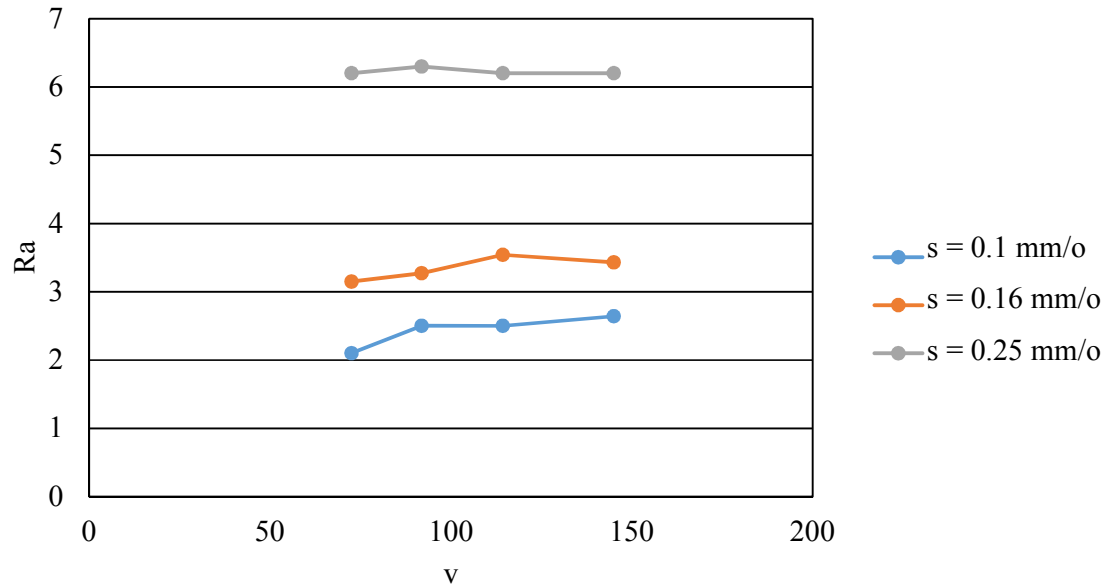
Слика 5.34. Распоред отпора резања F_1 за $v = 144.98 m/mm$

Слика 5.35 приказује промену храпавост обрађене површине Ra у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања $0.3, mm$.



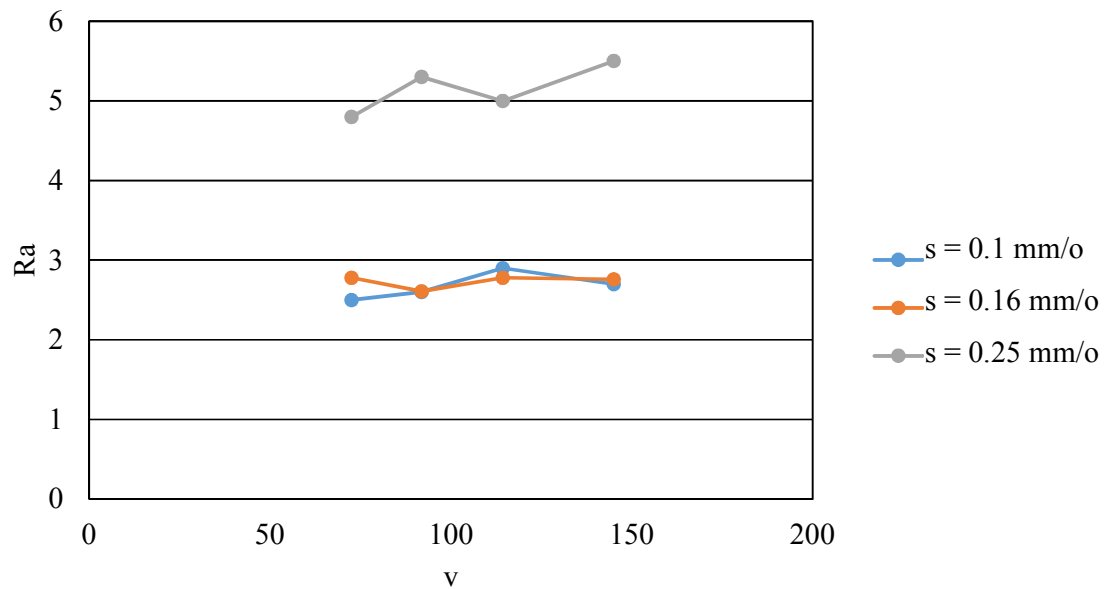
Слика 5.35. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $a = 0.3 mm$

Слика 5.36 приказује промену храпавост обрађене површине Ra у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања $1, mm$.



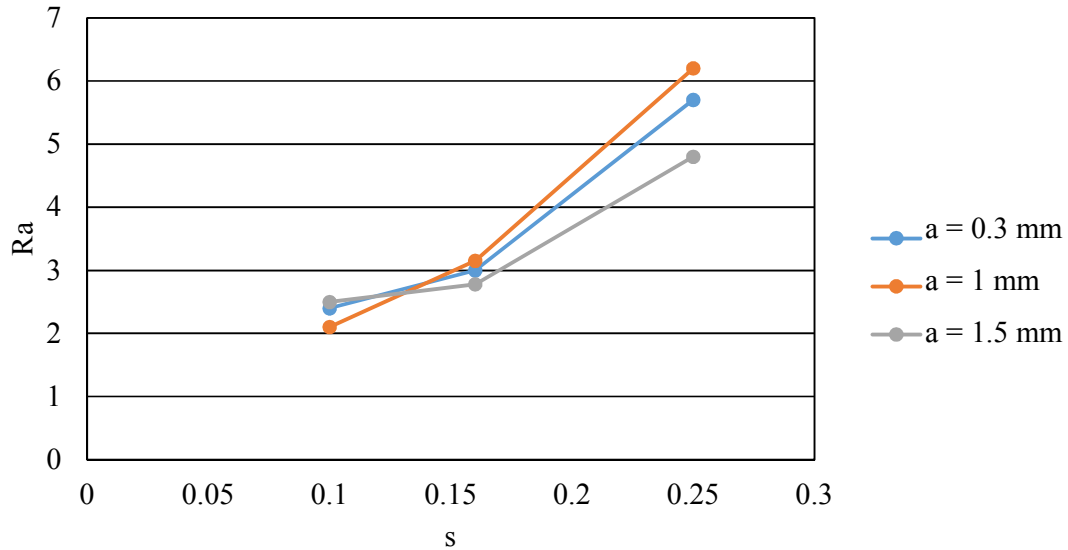
Слика 5.36. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $a = 1 mm$

Слика 5.37 приказује промену храпавост обрађене површине Ra у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања $1.5, mm$.



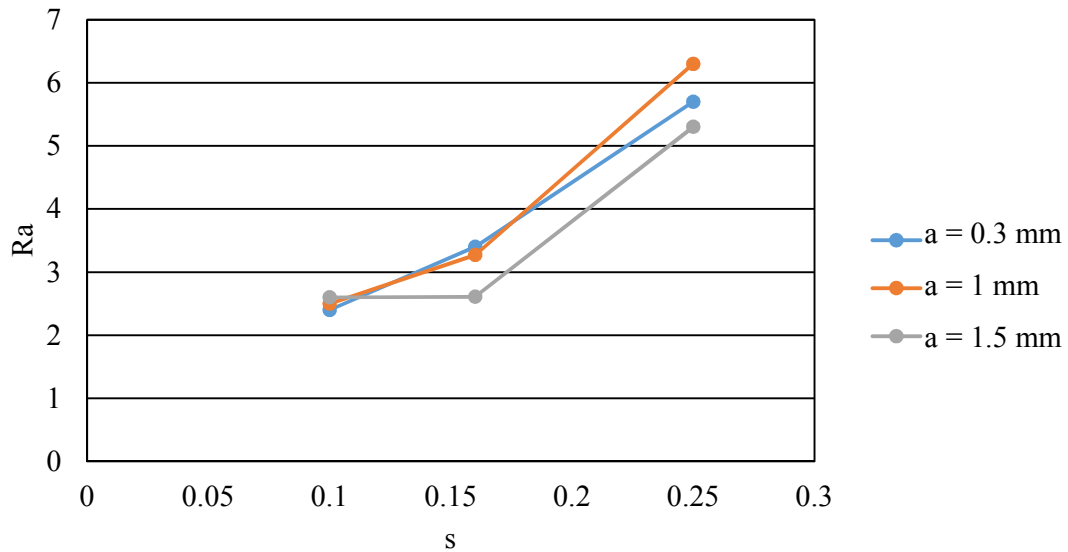
Слика 5.37. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $a = 1.5 mm$

Слика 5.38 приказује промену храпавост обрађене површине Ra у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања $v = 72.49, m/mm$.



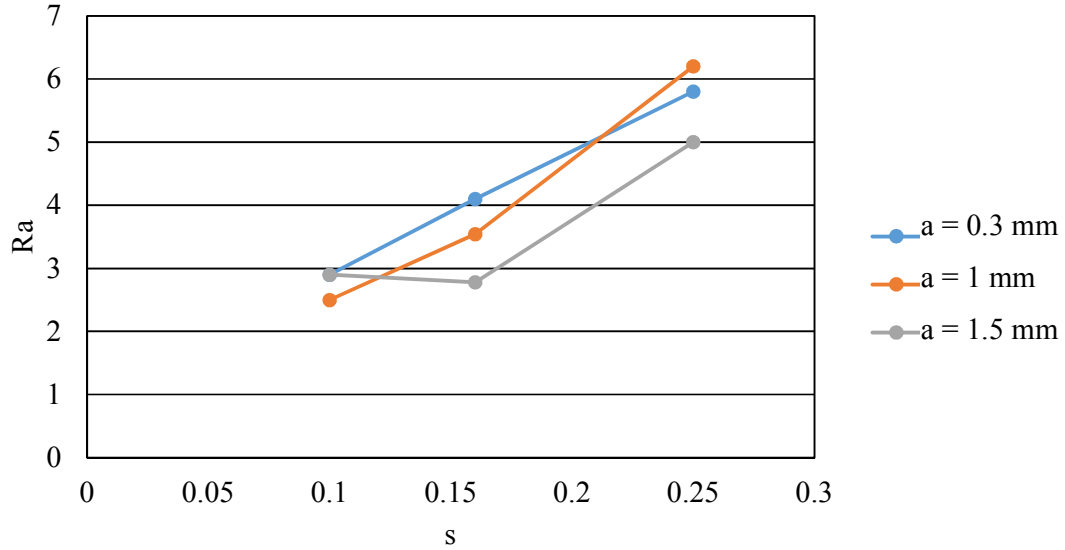
Слика 5.38. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $v = 72.49 m/mm$

Слика 5.39 приказује промену храпавост обрађене површине Ra у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања $v = 91.89, m/mm$.



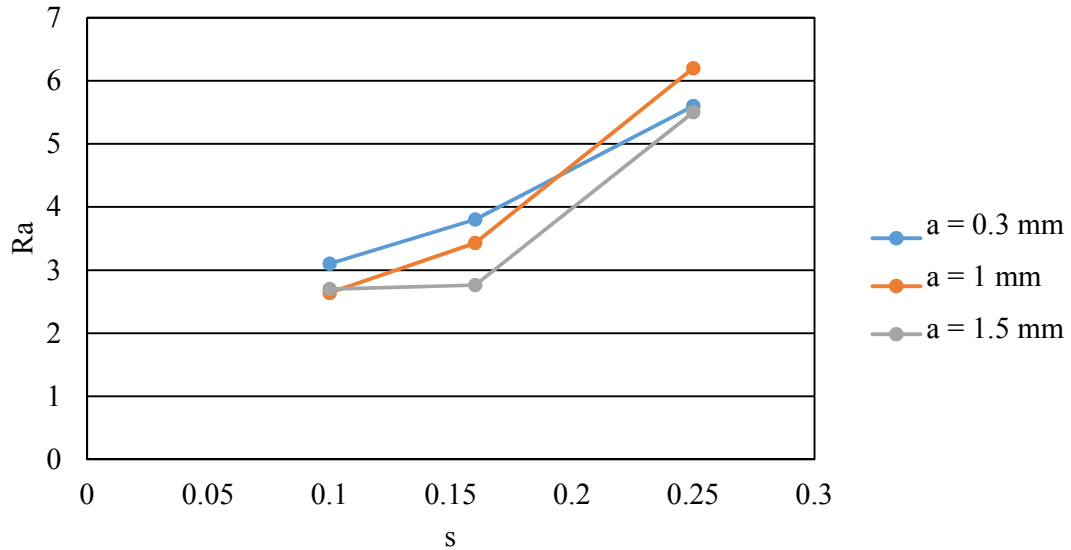
Слика 5.39. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $v = 91.89 m/mm$

Слика 5.40 приказује промену храпавост обрађене површине Ra у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања $v = 114.35, m/mm$.



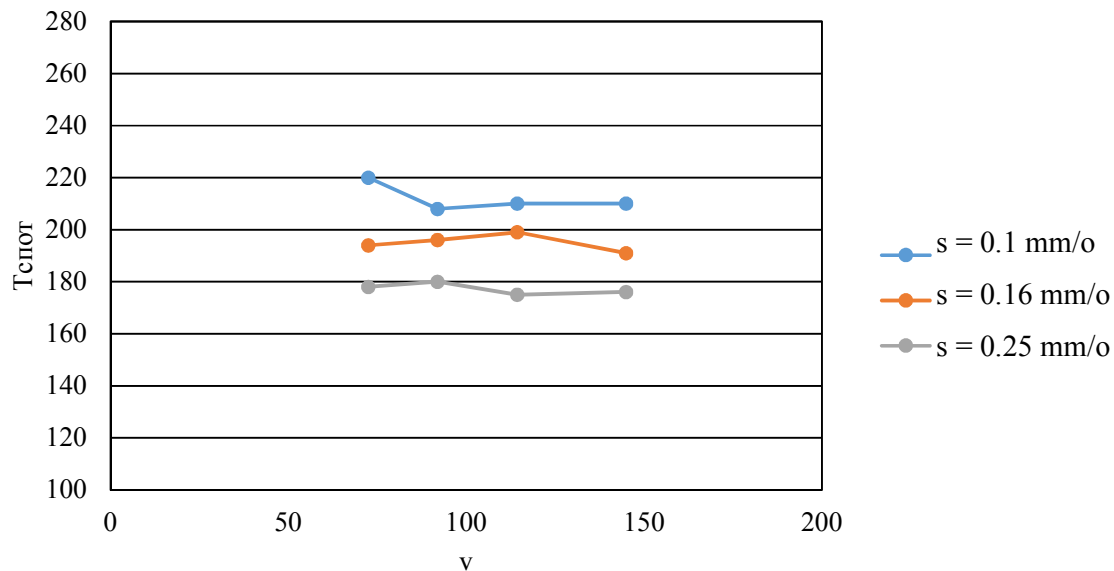
Слика 5.40. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $v = 114.35 m/mm$

Слика 5.41 приказује промену храпавост обрађене површине Ra у зависности од корака резања, дубине резања и за брзину резања $v = 144.98, m/mm$.



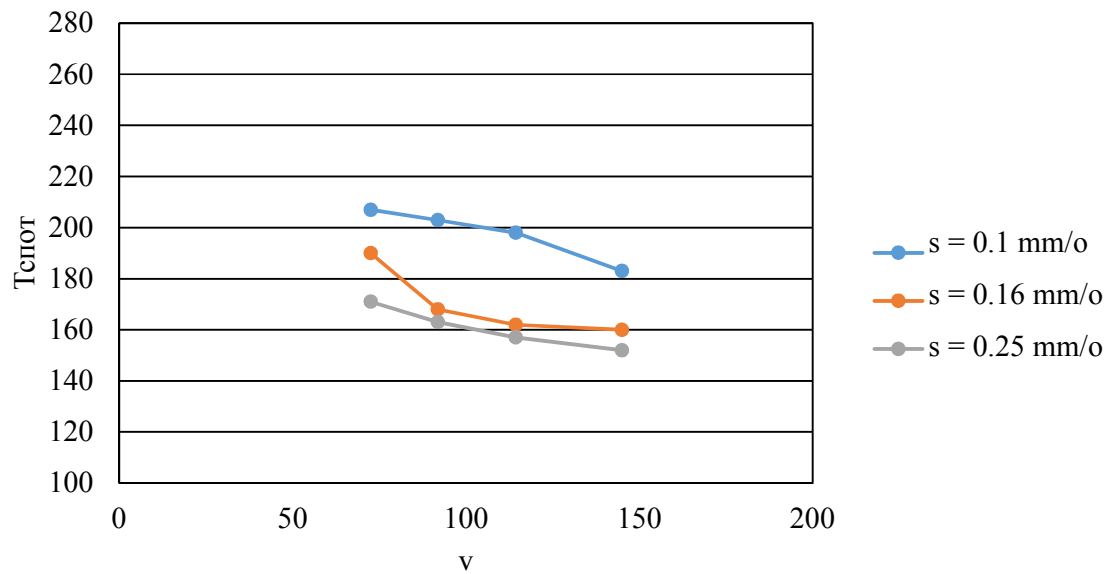
Слика 5.41. Распоред храпавости обрађене површине Ra за $v = 144.98 m/mm$

Слика 5.42 приказује промену контактне температуре у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 0.3, *mm*.



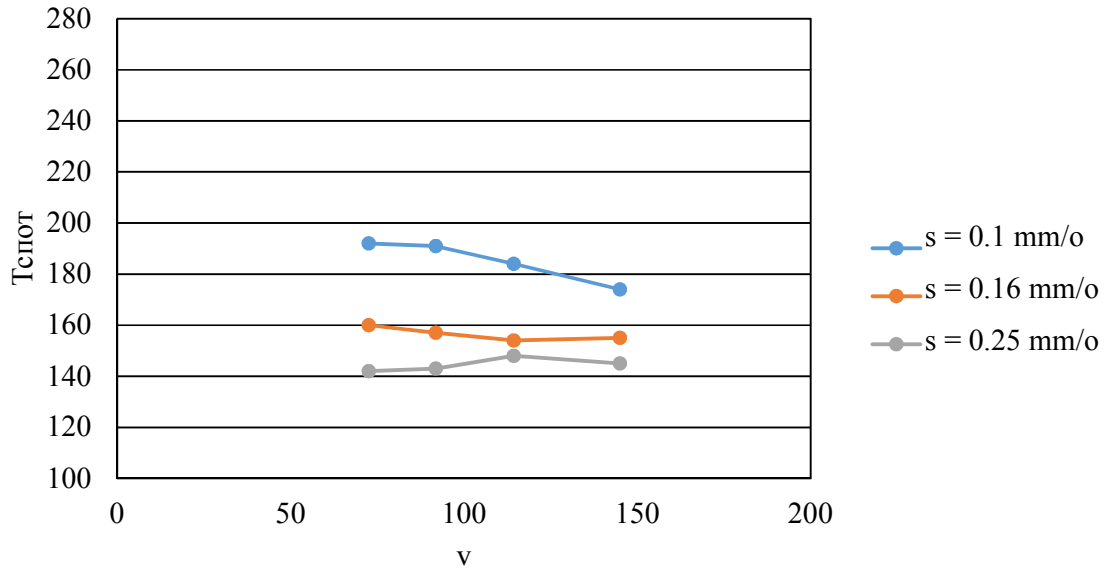
Слика 5.42. Распоред контактне температуре у зони резања за $a = 0.3 \text{ mm}$

Слика 5.43 приказује промену контактне температуре у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 1, *mm*.



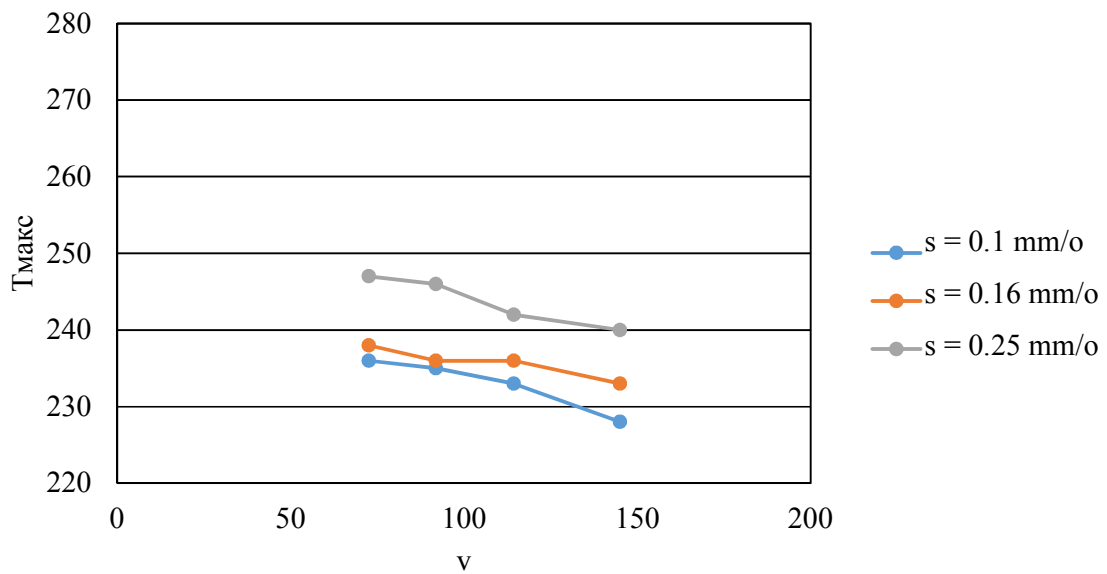
Слика 5.43. Распоред контактне температуре у зони резања за $a = 1 \text{ mm}$

Слика 5.44 приказује промену контактне температуре у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 1.5, *mm*.



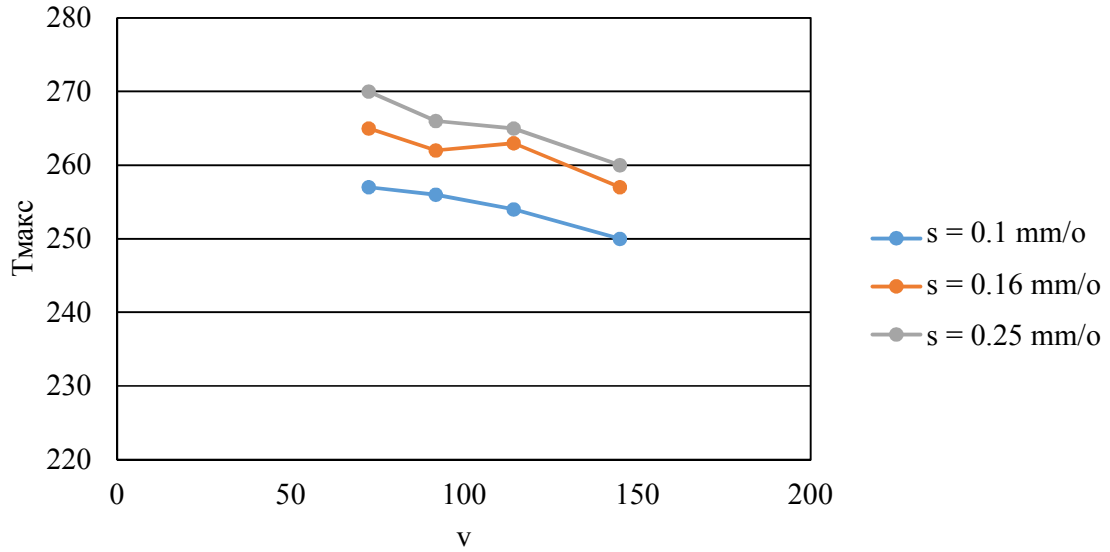
Слика 5.44. Распоред контактне температуре у зони резања за $a = 1.5 \text{ mm}$

Слика 5.45 приказује промену максималне температуре у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 0.3, *mm*.



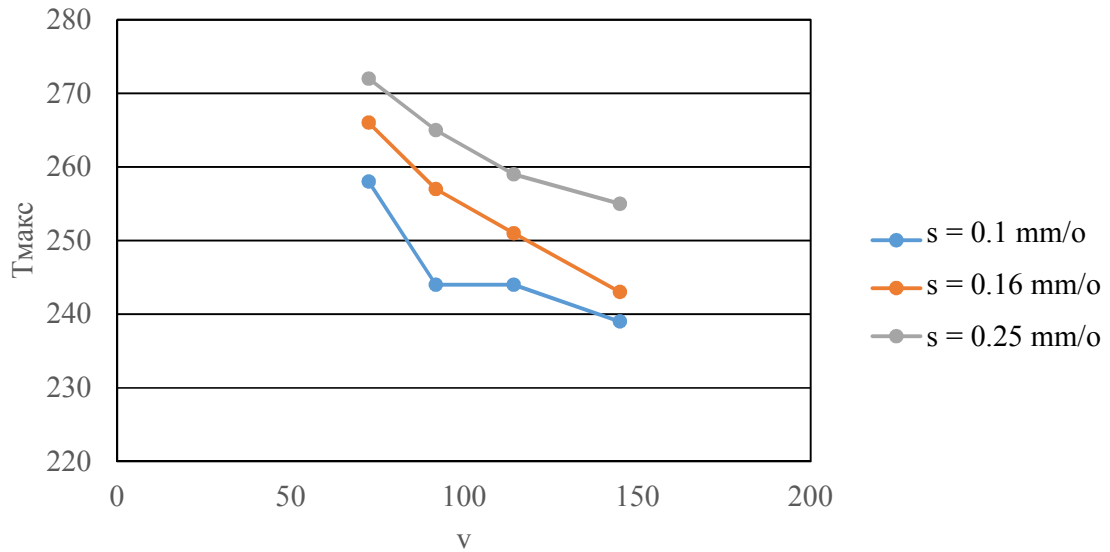
Слика 5.45. Распоред максималне температуре у зони резања за $a = 0.3 \text{ mm}$

Слика 5.46 приказује промену максималне температуре у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 1, *mm*.



Слика 5.46. Распоред максималне температуре у зони резања за $a = 1 \text{ mm}$







Слика 5.47 приказује промену максималне температуре у зависности од брзине резања, корака резања и за дубину резања 1.5, *mm*.



Слика 5.47. Распоред максималне температуре у зони резања за $a = 1.5 \text{ mm}$

Према стандарду *ISO 3685* [70], шест облика струготине је добијено и генерисано у другом експерименту, за различите параметре резања. Табела 5.11 приказује облике струготине, који су добијени у другом експерименту.

Табела 5.11. Облици струготине у другом експерименту

	Дуга	Кратка	Замршена
Струготина из групе 2			2.3 Дуга замршена струготина 
Струготина из групе 4	4.1 Дуга уврнута струготина 	4.2 Кратка струготина 	4.3 Кратка замршена струготина 
Струготина из групе 6		6.2 Неодређена струготина 	
Струготина из групе 7		7 Ситна струготина 	

Шест облика струготине је добијено и анализирано у другом делу истраживања према датом стандарду, а затим је извршена класификација струготине и додељене су нумеричке вредности од 1-10, са тим да један одговара дугој глаткој струготини која се у зависности од услова обраде мења па постаје дуга згужвана, затим завојна са дугим завојницама, са кратким завојницама, постаје цилиндрична, а затим променом режима постаје кратка, долази до њеног ломљења, постаје кратка, односно кратка цилиндрична, спирално цилиндрична, спирална и на крају дробљења и ситно дробљења. Може се приметити да у другом експерименту недостају два типа струготине за разлику од првог експеримента и то дуга равна струготина и равна струготина. Сваки облик струготине у другом експерименту је нумерисан према наведеном стандарду на следећи начин:

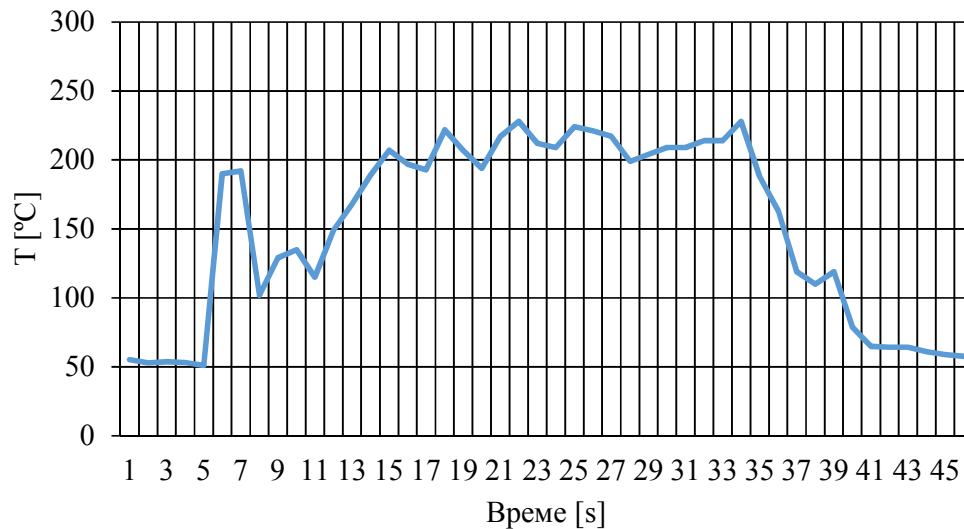
- 2.3 - Дуга замршена струготина - 2
- 4.1 - Дуга уврнута струготина - 4
- 4.2 - Кратка струготина - 5
- 4.3 - Кратка замршена струготина - 6
- 6.2 - Неодређена струготина - 7
- 7 - Ситна струготина – 8

Слика 5.48 приказују графике дистрибуције максималне и контактне температуре у зони резања у току процеса резања за дугу замршену струготину. Може се уочити нагли раст и максималне и контактне температуре при првом контакту резног алата и обрадног материјала. То је најкритичнији моменат који може да утиче *на радни век алата односно постојаност алата као и на квалитет обрађене површине*. Такође се може уочити за одређене облике струготина да постоји и скок температуре на самом крају процеса резања. Треба изабрати параметре резања при којима не постоје нагли раст температура, јер *велике промене температуре нису пожељне зато што то неповољно утиче на резни алат као и на обрађивану површину*. Ови графици су добијени на основу резултата у табели 5.10 и при условима у поглављу 4.1.

Након температурног пика следи нагли пад температуре како контактне тако и максималне, што се може објаснити одвајањем струготине од обратка, при чему она односи са собом део топлоте што проузрокује пад температуре у зони резања.

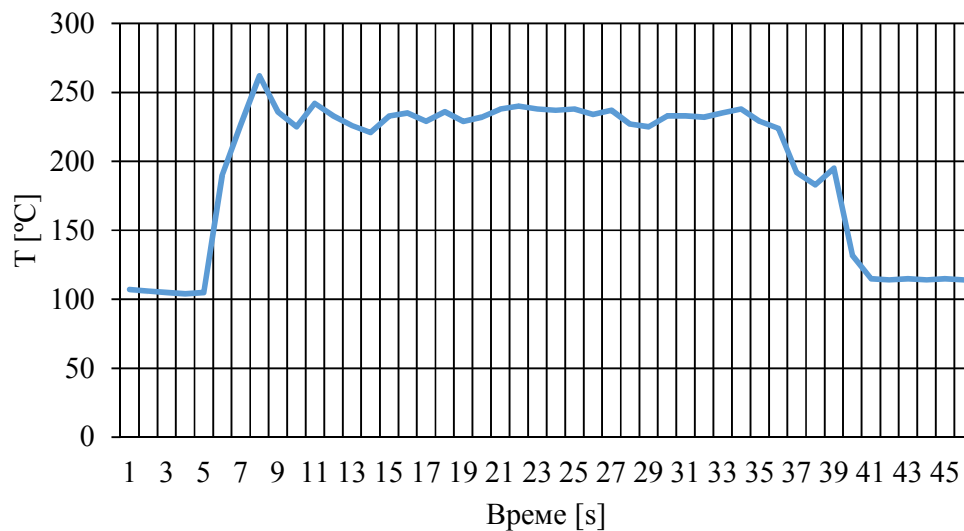
Применом термовизијске камере снимани су ави фајлови на основу којих су добијени дијаграми промене температуре у току времена испитивања.

Контактна температура



a)

Максимална температура

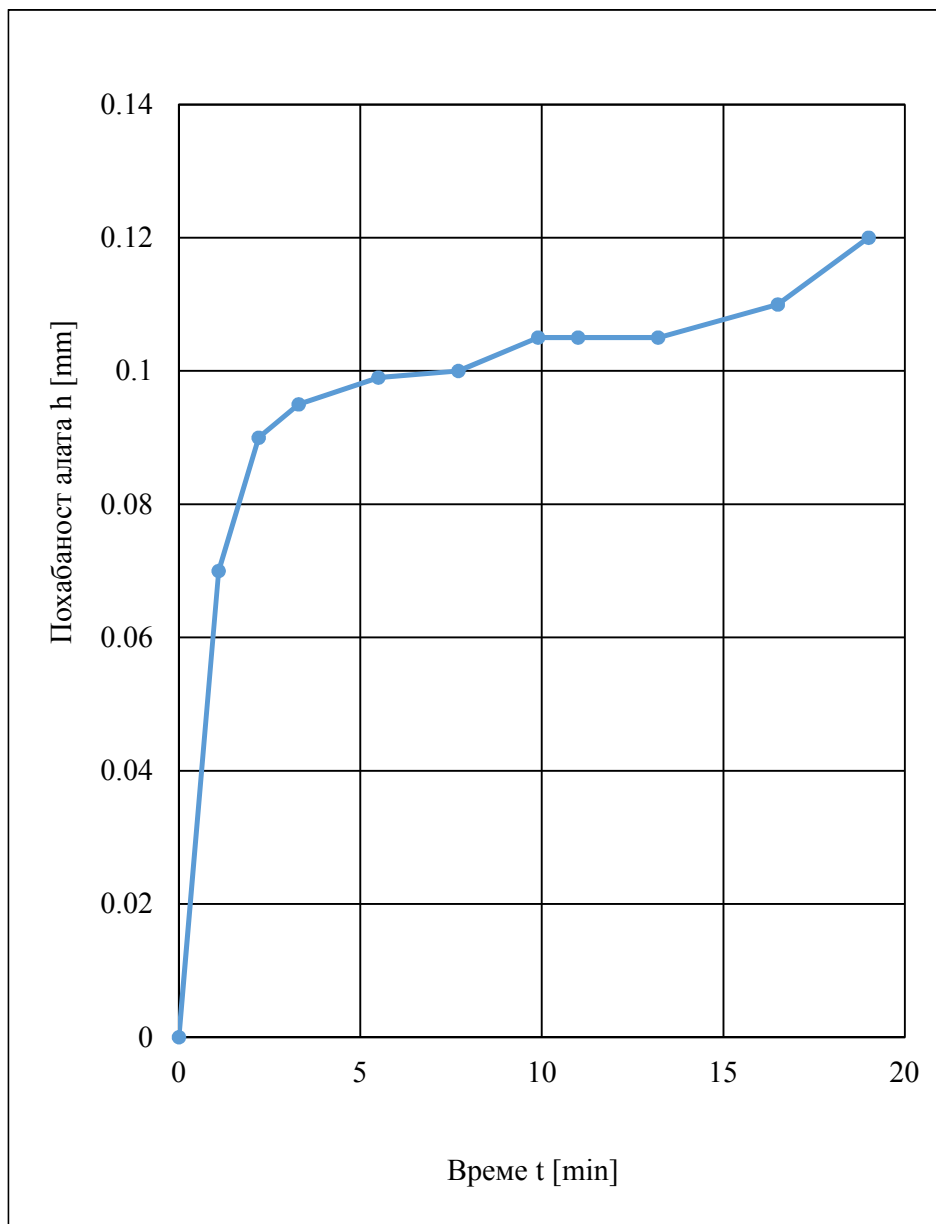


б)

Слика 5.48. Распоред а) контактне и б) максималне температуре у зони резања:
Дуга замршена струготина (ознака 2.3 према ISO 3685)
(s : 0.1 mm/o, v : 78 m/mm, a : 0.3 mm)

5.3. Резултати експеримента хабања алата

У току експеримената је праћено хабање алата. Слика 5.49 приказује похабаност ромбоидне резне плочице у зависности од времена резања. Може се видети да је похабаност алата великог интензитета на почетку процеса резања док касније, похабаност мање расте. Табела 5.12 приказује нумеричке вредности похабаности ромбоидне резне плочице.

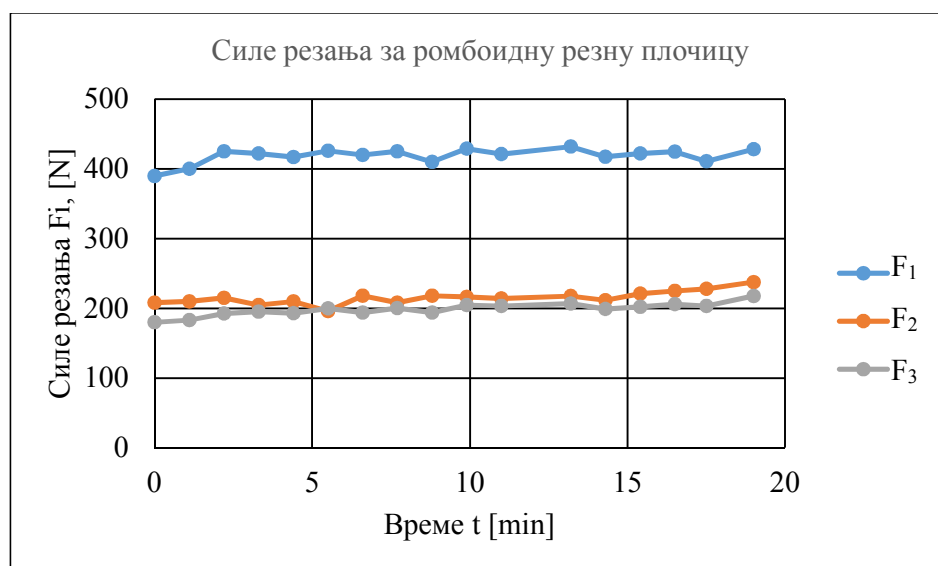


Слика 5.49. Промена похабаности алата током времена резања за ромбоидну резну плочицу (a : 1 mm, s : 0.16 mm/o, v : 150 m/min)

Табела 5.12. Промена похабаности алата и сила резања током времена резања за ромбоидну резну плочицу ($a: 1 \text{ mm}$, $s: 0.16 \text{ mm/o}$, $v: 150 \text{ m/min}$)

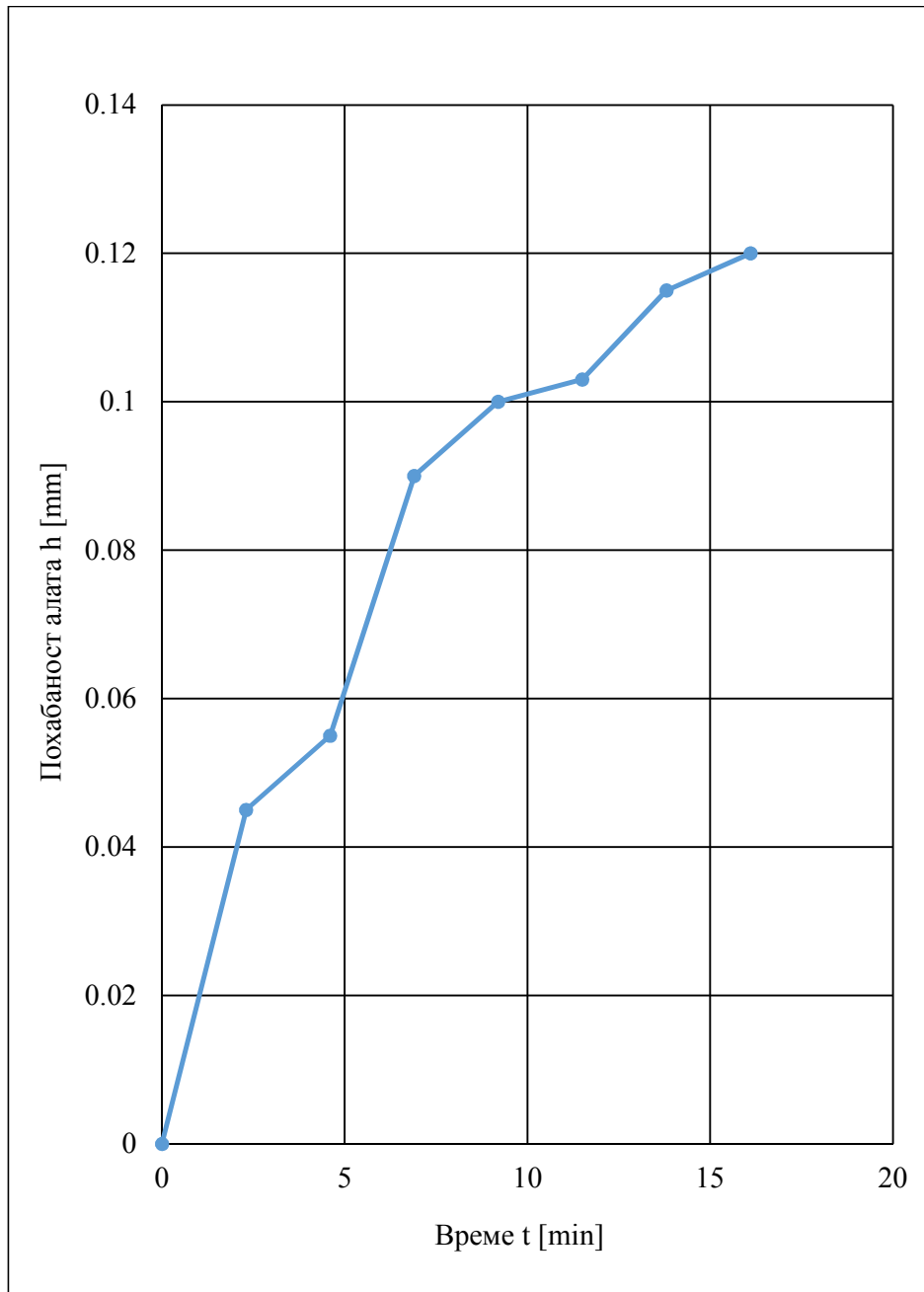
t	F ₁	F ₂	F ₃	h	Облик струготине
min.	N	N	N	mm	
0	390	208	180	0	
1.1	400	210	183	0.07	2.3
2.2	425	215	192.5	0.09	2.3
3.3	422	204.5	195	0.095	2.3
4.4	417	210	193	0.097	2.3
5.5	426	196	200	0.099	2.3
6.6	420	218	194	0.0995	2.3
7.7	425	208	200.5	0.1	2.3
8.8	410	218.2	194.1	0.1025	2.3
9.9	428.9	216.3	204.7	0.105	2.3
11	421.4	214.2	203.4	0.105	2.3
13.2	432	217.8	206.9	0.105	2.3
14.3	417.6	211.4	198.9	0.1053	2.3
15.4	422.1	221	202.1	0.1056	2.3
16.5	424.8	224.8	206	0.11	2.3
17.5	411	228.1	203.5	0.114	2.3
19	428.4	237.7	217.8	0.12	2.3

Слика 5.50 приказује промену сила резања током времена резања за дату ромбоидну резну плочицу. Може се приметити да се сва три отпора резања врло мало мењају током времена резања за дате експерименте.



Слика 5.50. Промена сила резања током времена за ромбоидну резну плочицу ($a: 1 \text{ mm}$, $s: 0.16 \text{ mm/o}$, $v: 150 \text{ m/min}$)

Слика 5.51 приказује похабаност троугаоне резне плочице у зависности од времена резања. Може се видети да похабаност алата расте током целог времена резања. Табела 5.13 приказује нумеричке вредности похабаности троугаоне резне плочице.



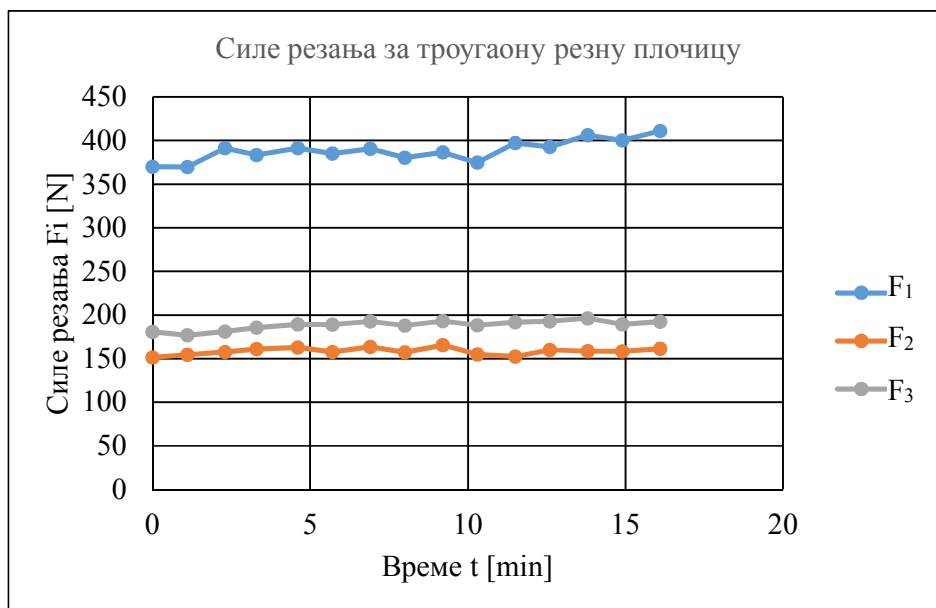
Слика 5.51. Промена похабаности алата за троугаону резну плочицу
($a: 1 \text{ mm}$, $s: 0.16 \text{ mm/o}$, $v: 150 \text{ m/min}$)

Табела 5.13. Промена похабаности алата и сила резања за троугаону резну плочицу

(a : 1 mm, s : 0.16 mm/o, v : 150 m/min)

t	F ₁	F ₂	F ₃	h	Облик струготине
min.	N	N	N	mm	
0	370.1	151.6	180.6	0	2.3 Првих 40 mm, остало 4.2+4.3
1.1	369.7	154.7	176.9	0.021522	2.3 Првих 40 mm, остало 4.2+4.3
2.3	391.4	157.6	181	0.045	2.3 Првих 40 mm, остало 4.2+4.3
3.3	383.7	161	185.7	0.049348	2.3 Првих 40 mm, остало 4.2+4.3
4.6	391.3	162.8	189.3	0.055	2.3 Првих 40 mm, остало 4.2+4.3
5.7	385.2	157.8	189	0.071739	2.3 Првих 40 mm, остало 4.2+4.3
6.9	390.9	163.6	192.7	0.09	2.3 Првих 40 mm, остало 4.2+4.3
8	380.5	157.3	188.1	0.094783	2.3 Првих 40 mm, остало 4.2+4.3
9.2	386.7	165.5	193.2	0.1	2.3 Првих 40 mm, остало 4.2+4.3
10.3	374.8	154.8	188.4	0.101435	2.3 Првих 30 mm, остало 4.2+4.3
11.5	397.5	152.4	191.9	0.103	2.3 Првих 30 mm, остало 4.2+4.3
12.6	392.8	160	193	0.108739	2.3 Првих 30 mm, остало 4.2+4.3
13.8	406.3	158.6	196.4	0.115	2.3 Првих 30 mm, остало 4.2+4.3
14.9	400.6	158.2	189.4	0.117391	2.3 Првих 25 mm, остало 4.2
16.1	411.1	161.5	192.5	0.12	2.3 Првих 25 mm, остало 4.2

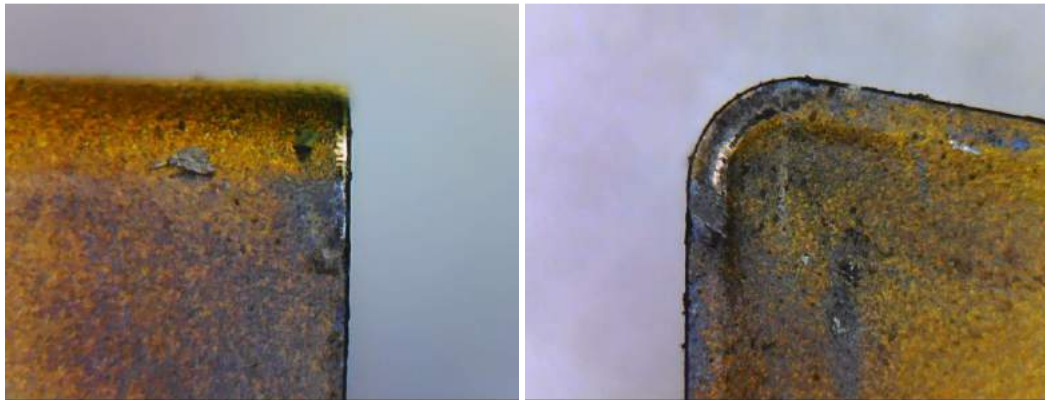
Слика 5.52 приказује промену сила резања током времена резања за дату троугаону резну плочицу. Може се приметити да се све три отпора резања врло мало мењају током времена резања за дате експерименте.



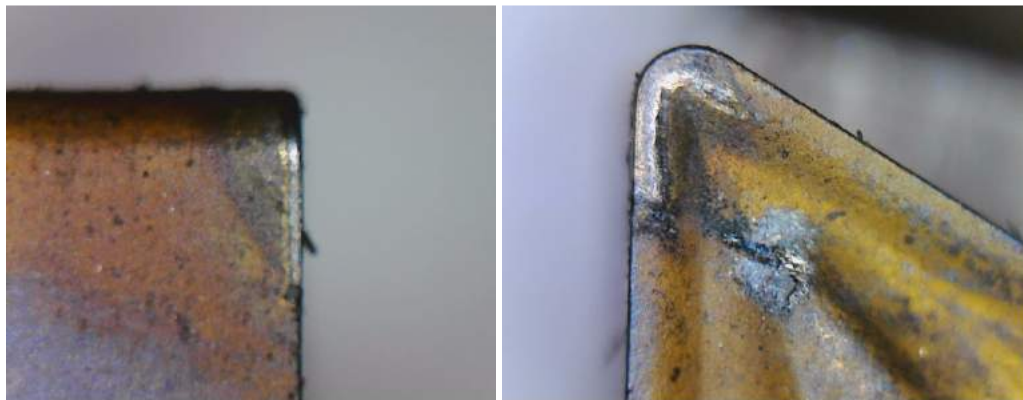
Слика 5.52. Промена сила резања за троугаону резну плочицу

(a : 1 mm, s : 0.16 mm/o, v : 150 m/min)

Слика 5.53 приказује похабаност ромбоидне и троугаоне резне плочице након датих експеримената.



a)



б)

Слика 5.53. Похабаност а) ромбоидне и б) троугаоне резне плочице
($a: 1 \text{ mm}$, $s: 0.16 \text{ mm/o}$, $v: 150 \text{ m/min}$)

Као што се може видети на горњим сликама, праћено је хабање алата односно ширине појаса хабања алата. На основу слика 5.50 и 5.52, може се закључити да у току истраживања, за релативно мало време обраде и мале похабаности алата није дошло до значајније промене сила резања. Може се запазити да се у посматраним режимима праћењем облика струготине не може закључити о нивоу похабаности алата. То значи да је потребно повећати време обраде да би се уочила значајнија промена (повећање) сила резања као и похабаност алата.

6. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНАТА И РЕЗУЛТАТА АНФИС ПРЕДВИЂАЊА

6.1. Регресиона анализа

Регресиона анализа је коришћена за одређивање отпорних сила резања, хрпавости обрађене површине и температуре у зони резања. Регресиона анализа за отпоре силе резања и хрпавости обрађене површине је коришћена за формирање математичких зависности за вредности из табеле 5.1. у облику:

$$F_i = C_i * a^x * s^y * v^z \quad (6.1.)$$

$$Ra = C_4 * a^x * s^y * v^z \quad (6.2.)$$

Експериментални подаци отпорних сила резања и хрпавости обрађене површине применом ромбоидне резне плочице су приказани у табели 5.1, где се може видети да је усвојен широк опсег параметара резања. Отпорне силе резања, као и хрпавост површине су одређене према параметарским моделима на основу једначинама 6.1 и 6.2 у систему за мерење сила и хрпавости обрађене површине у зависности од v , s и a . Параметри за силе резања као и за хрпавост обрађене површине су дати у табелама 6.1, 6.2, 6.3 и 6.4.

Табела 6.1. Параметри за отпор резања F_1

C₁	2426,769	104,5848	23,2038	0,000000	2213,737	2639,801
x	0,831	0,0064	130,2506	0,000000	0,818	0,844
y	0,726	0,0068	107,2719	0,000000	0,713	0,740
z	-0,070	0,0088	-7,8980	0,000000	-0,088	-0,052

Табела 6.2. Параметри за отпор резања F_2

C₂	499,8560	499,8560	87,58832	5,70688	0,000003	321,4445	678,2676
x	0,2651	0,2651	0,01557	17,02712	0,000000	0,2334	0,2968
y	0,5329	0,5329	0,02617	20,36472	0,000000	0,4796	0,5862
z	0,0433	0,0433	0,03592	1,20590	0,236697	-0,0299	0,1165

Табела 6.3. Параметри за отпор резања F_3

C₃	547,9822	547,9822	47,12650	11,62790	0,000000	451,9887	643,9757
x	1,1141	1,1141	0,01645	67,71982	0,000000	1,0806	1,1476
y	0,3798	0,3798	0,01249	30,40962	0,000000	0,3543	0,4052
z	-0,0320	-0,0320	0,01765	-1,81452	0,078983	-0,0680	0,0039

Табела 6.4. Параметри за хрпавост обрађене површине R_a

C₄	3,719375	3,719375	3,200088	1,162273	0,253720	-2,79899	10,23774
x	0,248234	0,248234	0,075580	3,284392	0,002480	0,09428	0,40219
y	0,536799	0,536799	0,128684	4,171440	0,000216	0,27468	0,79892
z	0,031518	0,031518	0,176463	0,178609	0,859371	-0,32793	0,39096

Вредности добијених температура у зони резања из експерименталних мерења су приказане у табели 5.8. Може се рећи да се у одређеним условима обраде (дубина, брзина, корак резања) добија одређени облик струготине за који су температуре резања мање или веће. Регресионом анализом вредности из табеле 5.8 коришћене су математичке зависности опште прихваћене у експоненцијалном облику, где је:

$$T_i = C_i * a^{c^2} * s^{c^3} * v^{c^4} \quad (6.3.)$$

Експериментални подаци за температуре резања обрађене површине применом троугаоне резне плочице су приказани у табели 5.8, где се може видети да је усвојен широк опсег параметара резања. Температура резања T_{spot} и T_{max} су одређене према параметарским моделима у систему за мерење температура, са параметрима. Параметри за дата температуре резања су дати у табелама 6.5 и 6.6.

Табела 6.5. Параметри за температуру T_{spot}

C₁	175,3291	21,81480	8,0372	0,000000	130,8938	219,7644
x	-0,1036	0,00927	-11,1732	0,000000	-0,1225	-0,0847
y	-0,2309	0,01757	-13,1446	0,000000	-0,2667	-0,1951
z	-0,0947	0,02548	-3,7177	0,000769	-0,1467	-0,0428

Табела 6.6. Параметри за температуру T_{\max}

C_2	382,4717	28,05843	13,63126	0,000000	325,3186	439,6249
x	0,0499	0,00575	8,67496	0,000000	0,0382	0,0616
y	0,0557	0,01032	5,40146	0,000006	0,0347	0,0767
z	-0,0653	0,01507	-4,33148	0,000137	-0,0960	-0,0346

Параметарске једначине силе резања и храпавости површине су одређене према следећим релацијама које су добијене применом вишефакторног плана експеримената:

$$F_1 = 2426,769 * a^{0,831} * s^{0,726} * v^{-0,070} \quad (6.4.)$$

$$F_2 = 499,856 * a^{0,2651} * s^{0,5329} * v^{0,0433} \quad (6.5.)$$

$$F_3 = 547,982 * a^{1,1141} * s^{0,3798} * v^{-0,0320} \quad (6.6.)$$

$$R_a = 3,71937 * a^{0,24823} * s^{0,53679} * v^{0,03151} \quad (6.7.)$$

Те једначине су имплементиране у мерни систем *Kistler* који даје параметре једначина на основу експерименталних мерења. Корелативне зависности су добијене коришћењем програма *STATISTIKA V.8*.

Температуре у зони резања су одређене према параметарским моделима. Ти параметри су добијени у току мерења температуре применом термалне камере *FLIR E50* односно софтвера, где се прате подаци мерења. Коначне вредности параметра су добијене рачунањем средње вредности добијених параметара у шест пролаза. Коришћене су исте релације као за одређивање сила резања које су добијене применом вишефакторног плана експеримената:

$$T_{\text{спот}} = 175,329 * a^{-0,1036} * s^{-0,2309} * v^{-0,0947} \quad (6.8.)$$

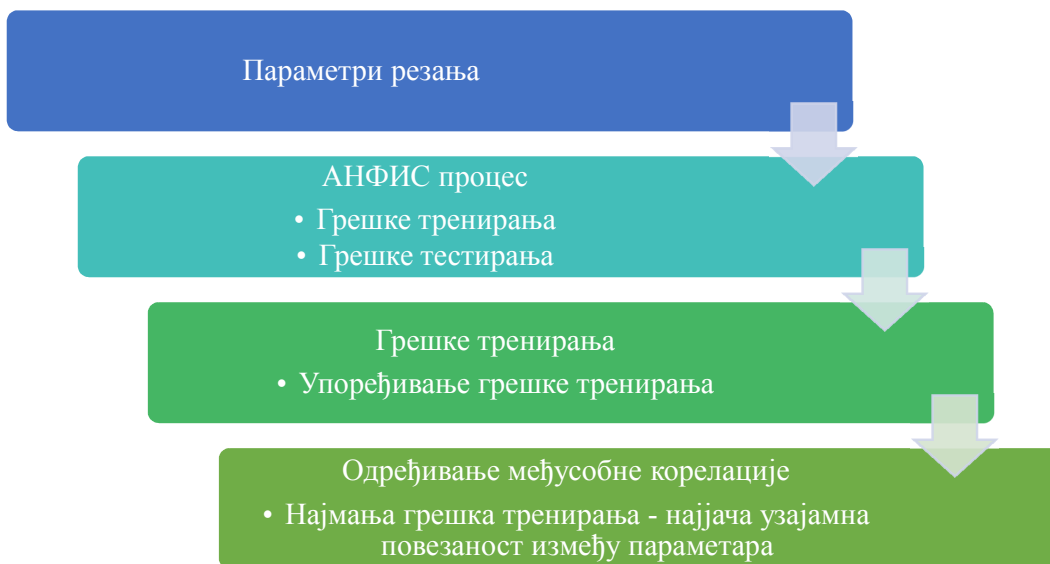
$$T_{\text{макс}} = 382,4717 * a^{0,0499} * s^{0,0557} * v^{-0,0653} \quad (6.9.)$$

6.2. Примена АНФИС методологије за предвиђање вредности зависних параметара стругања

Неуро-фази методологија је примењена за предвиђање вредности зависних параметара стругања, јер је тај метод погодан за податке са високом нелинеарношћу. Та методологија је састављена из два дела: неуронске мреже и фази систем одлучивања. Фази систем служи за креирање правила одлучивања на

основу дефинисаних функција припадности. Неуронска мрежа се успоставља одређивањем оптималних вредности функција припадности у току процеса оптимизације параметара мреже (тренирање мреже).

Слика 6.1 приказује ток процеса успостављања одговарајуће АНФИС методологије за предвиђање вредности зависних параметара на основу независних параметара резања. У првом кораку се додају основни параметри на основу дефинисаних делова истраживања, у дату АНФИС мрежу. Након тога АНФИС мрежа се тренира и тестира како би била постигнута најмања могућа грешка *одступања мерних података и предвиђених резултата*. У трећем кораку грешке тренирања се упоређују за сваки параметар посебно како би била одређена јачина узајамне повезаности између параметара на основу облика струготине у нашем случају *параметри са најмањом грешком одступања имају најјачу узајамну повезаности на основу облика струготине*. Другим речима што је мања грешка одступања за неки параметар то значи да ће тај параметар *имати најмање расипања при преносу на одређени параметар*. Са друге стране параметар са највећом грешком одступања ће имати највише расипања при преносу на одређени параметар са којим је у корелацији.



Слика 6.1. Ток процеса одређивања узајамне повезаности између параметара

Грешке тестирања се користе да се прати процес тренирања да не би неуронска мрежа била претренирана или недовољно тренирана. То значи да грешке тестирања треба да *прате грешке тренирања односно да не одступају једна од друге превише*. И на крају у четвртом кораку је дефинисан модел за предвиђање излазних параметара простим *упоређивањем грешака тренирања*. Параметар са најмањом грешком тренирања има најјачу узајамну повезаности на дати параметар односно на класификацију облика струготине. Насупрот томе параметар са највећом грешком тренирања има најслабију узајамну повезаност на дати параметар. Слика 6.2 приказује основни ток процеса за одређивање узајамне повезаности између параметара применом АНФИС мреже. АНФИС мрежа, на основу датих комбинација параметара, треба да одреди повезаност између појединачних параметара. Те повезаности ће бити представљене помоћу *RMSE* грешке и на основу величине те грешке могуће је установити јачину узајамне повезаности између појединачних параметара као и између комбинације одређених параметара.



Слика 6.2. Ток процеса за анализу параметара применом АНФИС методологије

Сви добијени експериментални резултати су подељени у две групе за процес тренирања и тестирања АНФИС мреже. Посебно су анализирани подаци за сваку појединачну групу истраживања. Један део података служи са тренирање (50% података), а други део за тестирање (50% података) АНФИС мреже. АНФИС мрежа је тренирана за све улазе и главни циљ је да се одреде грешке тренирања и грешке тестирања за све улазе посебно. Узајамна повезаност параметара као што је речено може се одредити простим *упоређивањем грешака тренирања*. Улазни параметар са најмањом грешком тренирања има најјачу корелацију на дати параметар односно на класификацију облика струготине. Улазни параметар са највећом грешком тренирања има најслабију узајамну повезаност на дати параметар односно на класификацију облика струготине.

6.3. Резултати АНФИС модела - 1

Слика 6.3 а) приказује експерименталну процедуру која је коришћена у првом делу истраживања, док слика 6.3 б) приказује општи облик шеме за дато истраживање применом АНФИС методологије.



Слика 6.3. а) Шема експерименталне процедуре за АНФИС модел-1,
б) општи облик шеме









Дигитална камера је коришћена за снимање облика добијених струготина. Сlike за сваки облик струготине су добијене у свим тестовима и сачуване су за даљу анализу. Може се приметити да је потребно сакупити податке применом експерименталне процедуре и такви подаци ће се користити као параметри у АНФИС мрежи.

Сваки облик струготине је нумерисан према стандарду *ISO 3685* [70] на следећи начин:

- 2.1 - Дуга равна струготина
- 2.3 - Дуга замршена струготина
- 3.1 - Равна струготина
- 4.1 - Дуга уврнута струготина
- 4.2 - Кратка струготина
- 4.3 - Кратка замршена струготина
- 6.2 - Неодређена струготина
- 7 - Ситна струготина

Према наведеном, осам облика струготине је добијено и генерисано у првом делу истраживања за различите параметре резања. Табела 6.7 приказује облике струготине, који су добијени у првом делу истраживања за АНФИС модел-1. Сви облици струготине су нумерисани према наведеном стандарду како би била урађена нумеричка анализа применом неуро-фази логике. Добијени облици струготине су класификовани и кодификовани нумерички према наведеном стандарду. Дате бројчане вредности према стандарду су коришћене у АНФИС мрежи приликом тренирања и тестирања.

Табела 6.7. Облици струготине у првом делу истраживања

	Дуга	Кратка	Замршена
Струготина из групе 2	2.1 Дуга равна струготина 		2.3 Дуга замршена струготина 
Струготина из групе 3	3.1 Равна струготина 		
Струготина из групе 4	4.1 Дуга уврнута струготина 	4.2 Кратка струготина 	4.3 Кратка замршена струготина 
Струготина из групе 6		6.2 Неодређена струготина 	
Струготина из групе 7		7 Ситна струготина 	

У првом делу истраживања анализирана је узајамна повезаност основних параметара резања, храпавости обрађене површине и различитих облика струготине на основу података у табели 6.8. Параметри су селектовани према литературним информацијама и то су уједно најчешће коришћени и најутицајнији параметри при обради стругањем.









Табела 6.8. Параметри за први део истраживања

	Назив параметара
Параметар 1	Дубина резања – a <i>mm</i>
Параметар 2	Брзина резања – v <i>m/min</i>
Параметар 3	Корак резања – s <i>mm/o</i>
Параметар 4	Храпавост површине – Ra μm
Параметар 5	Облици струготине - <i>ISO 3685 [70]</i>

У првом делу истраживања, циљ је био да се одреде узајамне повезаности четири параметра и добијених облика струготине. Добијени облици струготине су приказани у табели 6.9. Осам облика струготине је добијено и анализирано у првом делу истраживања према стандарду *ISO 3685 [70]*, а затим је извршена класификација струготине и додељене су нумеричке вредности од 1-10, са тим да један одговара дугој глаткој струготини која се у зависности од услова обраде мења па постаје дуга згужвана, затим завојна са дугим завојницама, са кратким завојницама, постаје цилиндрична, а затим променом режима постаје кратка, долази до њеног ломљења, постаје кратка, односно кратка цилиндрична, спирално цилиндрична, спирална и на крају дробљења и ситно дробљења.

Иако постоје више облика струготине према том стандарду у овом истраживању је добијено осам типова струготине за различите параметре резања. За друге облике струготина је потребно користити другачије параметре или друге материјале обрадка и алате.

Табела 6.9. Осам облика струготине за АНФИС модел-1 на основу стандарда ISO 3685 [70]

	Дивијени облици струготина			
Дуга струготина	1.1 Дуга равна струготина 	2.3 Дуга замршена струготина 	3.1 Равна струготина 	4.1 Дуга уврнута струготина 
Кратка струготина	4.2 Кратка струготина 	4.3 Кратка замршена струготина 	6.2 Неодређена струготина 	7 Ситна струготина 

Табела 6.10. приказује грешке тренирања и тестирања АНФИС мреже (грешка најмањих квадрата (RMSE)) за сваки параметар појединачно у првом делу истраживања односно за АНФИС модел-1. У табели 6.10 се може видети да најмању грешку тренирања има параметар 4 односно храпавост површине. Ради лакшег праћења најјаче узајамне повезаности између параметара у даљем тексту су најјаче узајамне повезаности болдоване у свим табелама са грешкама предикције. Грешка тестирања се користи за праћење перформанси АНФИС модела. Ако је грешка тестирања значајно већа од грешке тренирања то значи да резултати нису поуздани и да је потребно променити параметре АНФИС мреже. Грешка тренирања је битна за рангирање узајамне повезаности између параметара. То значи да храпавост површине има најјачу узајамну повезаност са обликом струготине. Другим речима, *уколико се успоставе вредности улазних параметара*

које доводе до тога да вредност храпавости површине буде мала, исте би требало да доведу до тога да дође до великих промена у облику струготине. Са друге стране параметар 3 или дубина резања има највећу грешку тренирања и према томе најслабију узајамну повезаност са обликом струготине. У даљем истраживању вршена је анализа комбинације 2 улазна параметра која представљају оптималну комбинацију односно комбинацију која има најјачу узајамну повезаност са струготином.

Табела 6.10. Грешке тренирања и тестирања са појединачне параметре на основу узајамне повезаности са струготином (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

Грешке предикције	
Параметри	Параметар 1 - v - тренирање RMSE: 0.3849, тестирање RMSE: 0.5092
	Параметар 2 - s - тренирање RMSE: 0.3849, тестирање RMSE: 0.4303
	Параметар 3 - a - тренирање RMSE: 0.4714, тестирање RMSE: 0.5092
	Параметар 4 - R_a - тренирање RMSE: 0.3801, тестирање RMSE: 0.6632

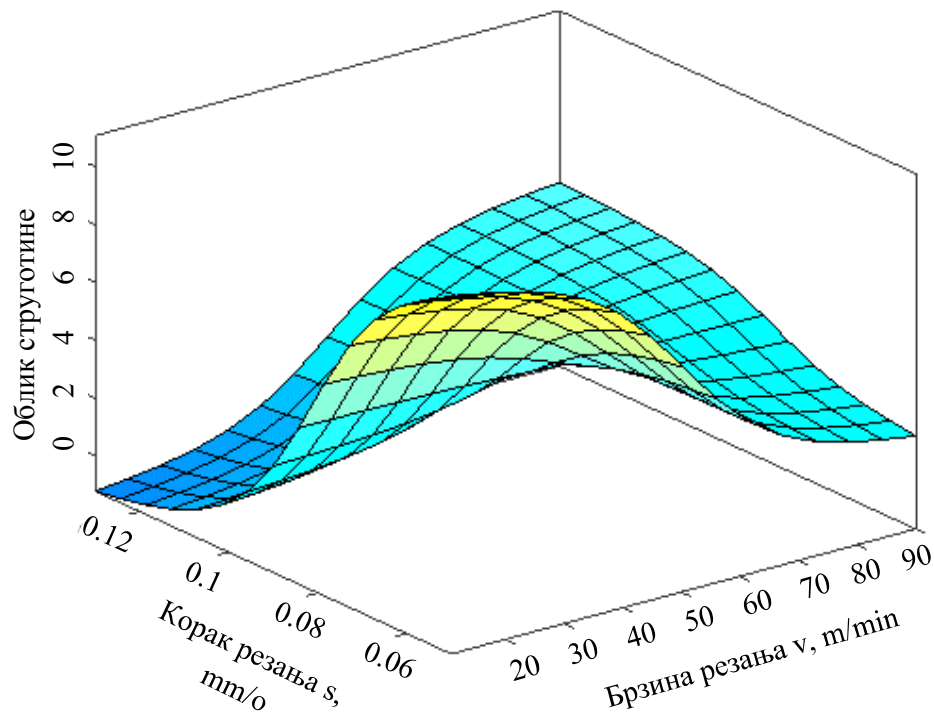
Табела 6.11 приказује грешке тренирања и тестирања за све комбинације од 2 улазна параметра (грешка најмањих квадрата ($RMSE$)) на основу података у табелама 5.1 и 5.8. Према тим добијеним грешкама, може се видети да комбинација параметра 3 и 4 односно комбинација дубине резања и храпавости површине има најјачу узајамну повезаност са струготином. *Ако се у исто време мењају параметри дубина резања и храпавост површине може доћи до највеће промене при формирању облика струготине.* На основу грешке предикције у табели 6.10, може се закључити да дубина резања има најслабију узајамну повезаност са струготином, али ако се дубина резања комбинује са храпавошћу површине тада може доћи до највеће промене при формирању облика струготине. У табели 6.11 се може видети да је *грешка тестирања значајно већа од грешке тренирања што значи да није препоручљиво користити више од два параметра, јер резултати губе на прецизности*, ако је превелико одступање грешке тренирања од грешке тестирања. Назив параметара је дат у табели 6.8 ради прегледности резултата.

Табела 6.11. Грешке тренирања и тестирања свих комбинација параметара на основу узајамне повезаности са струготином (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

	Грешке предикције
Комбинације два параметра	Параметар 1 - v / Параметар 2 - s -- тренирање RMSE: 0.0745, тестирање RMSE: 0.5799
	Параметар 1 - v / Параметар 3 - a -- тренирање RMSE: 0.1146, тестирање RMSE: 0.6013
	Параметар 1 - v / Параметар 4 - R_a -- тренирање RMSE: 0.0002, тестирање RMSE: 4.0535
	Параметар 2 - s / Параметар 3 - a -- тренирање RMSE: 0.0596, тестирање RMSE: 0.5647
	Параметар 2 - s / Параметар 4 - R_a -- тренирање RMSE: 0.1090, тестирање RMSE: 2.7756
	Параметар 3 - a / Параметар 4 - R_a -- тренирање RMSE: 0.0001 , тестирање RMSE: 0.9077

Слике 6.4, 6.5 и 6.6 приказују АНФИС површине одлучивања за формирање облика струготине на основу комбинације свих улазних параметара резања. Облик струготине је представљен нумеричким бројевима на основу стандарда *ISO 3685* у табели 6.9. Овај график је добијен применом *MATLAB* програма и његовог алата *Neuro Fuzzy Toolkit* на основу добијених експерименталних резултата у табели 5.1 и на основу услова дефинисаних у поглављу 4.1.

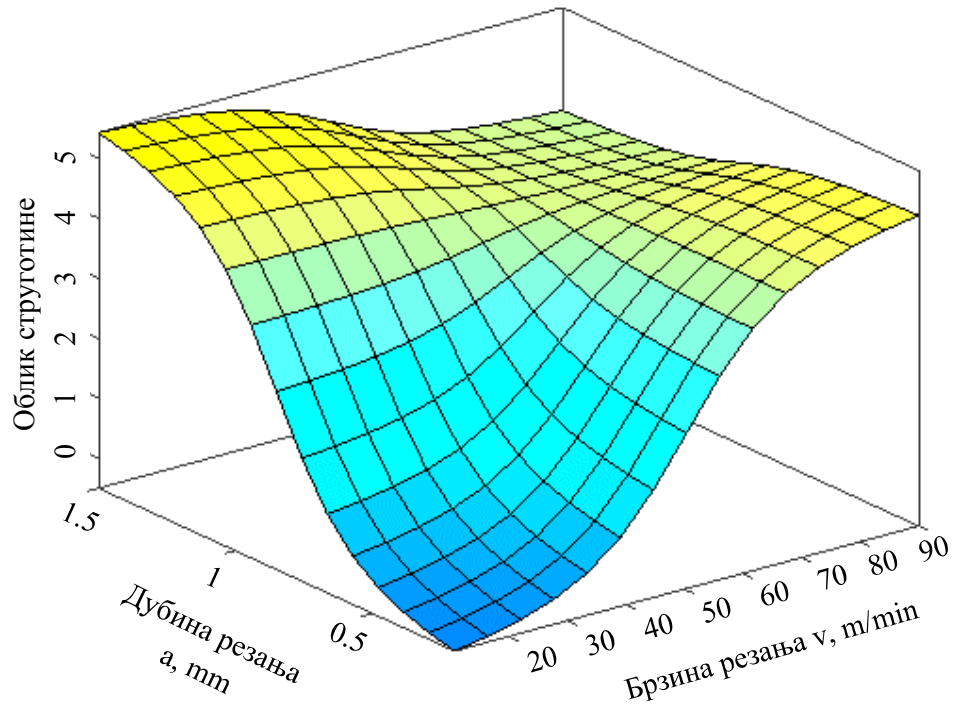
Слика 6.4 приказује узајамну повезаност облика струготине, брзине резања и корака. Може се уочити да се *сви облици струготине* могу добити варирањем ова два улазна параметра резања пошто површина одлучивања обухвата распон од 1.1 до 7. Овај график је добијен за дефинисане услове (s : 0.1-0.25, mm/o, v : 78-156, m/mm, $a = 0.9$, mm) дефинисане у табели 5.1, али се може уочити да АНФИС одступа од датих распона параметара резања, што је и логично, јер је немогуће урадити предикцију са нултом грешком.



Слика 6.4. Облик струготине у зависности од корака резања и брзине резања

Слика 6.5 приказује узајамну повезаност облика струготине, брзине резања и дубине резања. Може се уочити да на излазној површини одлучивања недостаје неодређен тип струготине 6.2 и ситна струготина 7 пошто површина одлучивања постиже максимално вредност 5.2. На основу резултата се закључује да *није могуће* добити неодређен облик струготине 6.2 и ситну струготину 7 при промени брзине резања и дубине резања. То могу да буду важни подаци за практичну употребу у области технологије обраде резањем односно за пројектовање нових технологија.

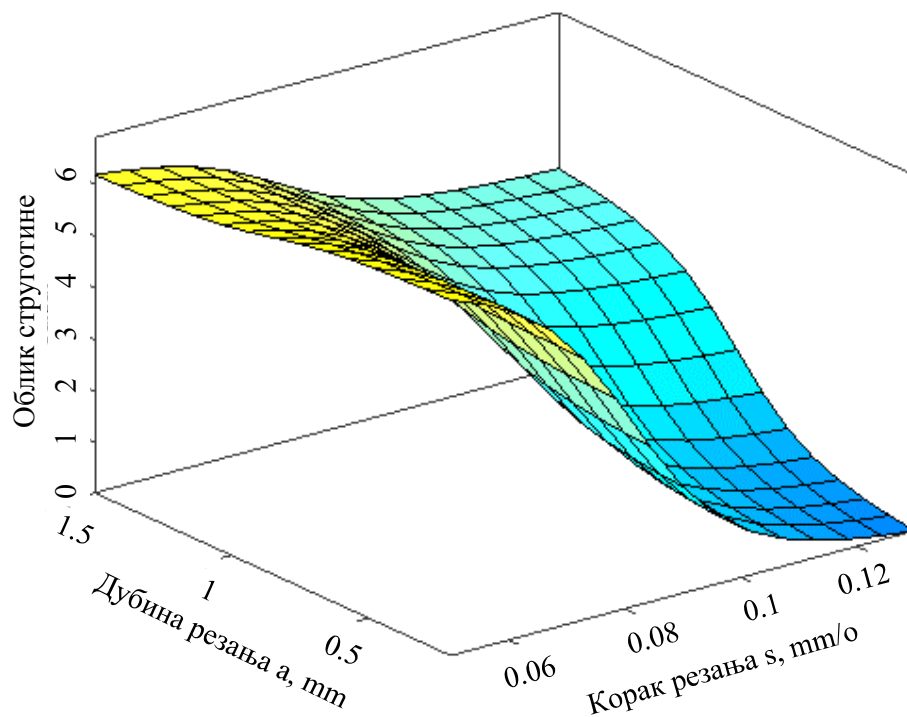
Овај график је добијен за дефинисане услове (s : 0.18 mm/o, v : 78-156 m/min, a : 0.3-1.5 mm) дефинисане у табели 5.1, али се може уочити да АНФИС одступа од датих распона параметара резања, што је и логично, јер је немогуће урадити предикцију са нултом грешком.



Слика 6.5. Облик струготине у зависности од дубине резања и брзине резања

Слика 6.6 приказује узајамну повезаност облика струготине, корака и дубине резања. Може се уочити да на излазној површини одлучивања недостаје неодређен облик струготине 6.2 и ситна струготина 7 пошто површина одлучивања постиже максимално вредност 6.1. На основу резултата се закључује да *није могуће* добити неодређен облик струготине 6.2 и ситну струготину 7 при промени дубине резања и корака резања.

Овај график је добијен за дефинисане услове (s : 0.1-0.25 mm/o, $v = 102$ m/mm, a : 0.3-1.5 mm) дефинисане у табели 5.1, али се може уочити да АНФИС одступа од датих распона параметара резања, што је и логично, јер је немогуће урадити предикцију са нултом грешком.



Слика 6.6. Облик струготине у зависности од дубине резања и корака резања

Приказани интервали свих параметара на сликама 6.4, 6.5 и 6.6 су добијени на основу експерименталних мерења у табели 5.1. Циљ је био да се покрије што већи интервал свих параметара како би била покривена сва могућа стања. Такође дату АНФИС мрежу је могуће дотренирати са новим подацима ако се не налазе у датим интервалима. АНФИС мрежа се може адаптирати новим експериментима и новим подацима тако што се једноставно изврши додатно тренирање са новим подацима већ трениране АНФИС мреже и то је један од најбитнијих предности АНФИС методологије. Такође на сликама 6.4, 6.5 и 6.6 су приказане *варијације облика струготине* на основу два улазна параметра док су остали параметри константни.

6.4. Резултати АНФИС модела-2

Други део истраживања укључује анализу *узајамне повезаности отпора резања и различитих облика струготине*.

Циљ је био одредити при којим условима настају повољни (пожељни) и неповољни (непожељни) облици струготине.

Табела 6.12. приказује шест параметара који су коришћени у другом делу истраживања односно за АНФИС модел-2. Циљ је био одредити узајамну повезаност тих параметара са добијеним пожељним и непожељним облицима струготине и са хрпавошћу обрађене површине материјала. Може се рећи да се у одређеним условима обраде (дубина, брзина, корак резања) добија одређени облик струготине за који су отпори резања и хрпавост површине мањи или већи.

Табела 6.12. Параметри за други део истраживања

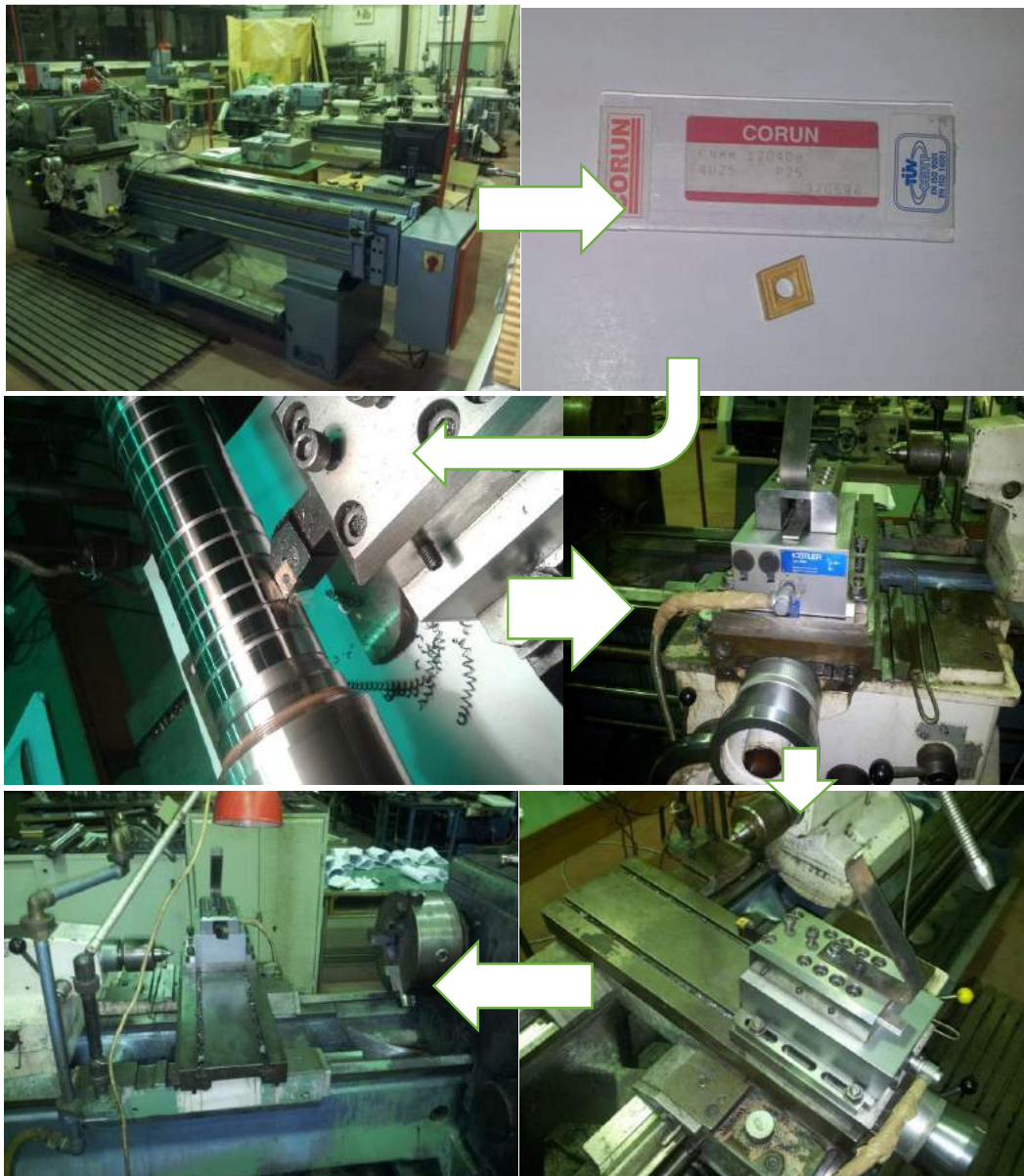
	Назив параметара
Параметар 1	Главна сила резања - $F_1 N$
Параметар 2	Сила продирања - $F_2 N$
Параметар 3	Сила помоћног кретања - $F_3 N$
Параметар 4	Дубина резања – $a mm$
Параметар 5	Брзина резања– $v m/min$
Параметар 6	Корак резања– $s mm/o$
Параметар 7	Хрпавост површине – $Ra \mu m$
Параметар 8	Облици струготине - <i>ISO 3685</i> [70]

Слика 6.7 приказује експерименталну процедуру која је коришћена за други део истраживања.

У другом делу истраживања је коришћено шест параметара (s , v , a , F_1 , F_2 и F_3) из табеле 5.1. за испитивање повољног и неповољног облика струготине. У овом делу истраживања је добијено шест различитих облика струготине. Према датом стандарду *ISO 3685* шест добијених типова струготине у другом делу истраживања се могу поделити у две групе (пожељне или непожељне) на следећи начин:

- 2.3 Дуга замршена струготина – Непожељан тип струготине,
- 4.1 Дуга уврнута струготина – Непожељан тип струготине,
- 4.2 Кратка струготина – Пожељан тип струготине,
- 4.3 Кратка замршена струготина – Непожељан тип струготине,
- 6.2 Неодређена струготина – Пожељан тип струготине,

- 7 Ситна струготина – Пожељан тип струготине.



Слика 6.7. Шема експерименталне процедуре (модел-2)

Може се уочити да постоје само три пожељна типа струготине од шест анализираних облика. То значи да се најбоље перформансе резања могу постићи када се добију пожељни типови струготине. Важно је напоменути да постоје и други облици струготине осим добијених у овом истраживању, али у датим експериментима нису добијени сви облици струготине који постоје према

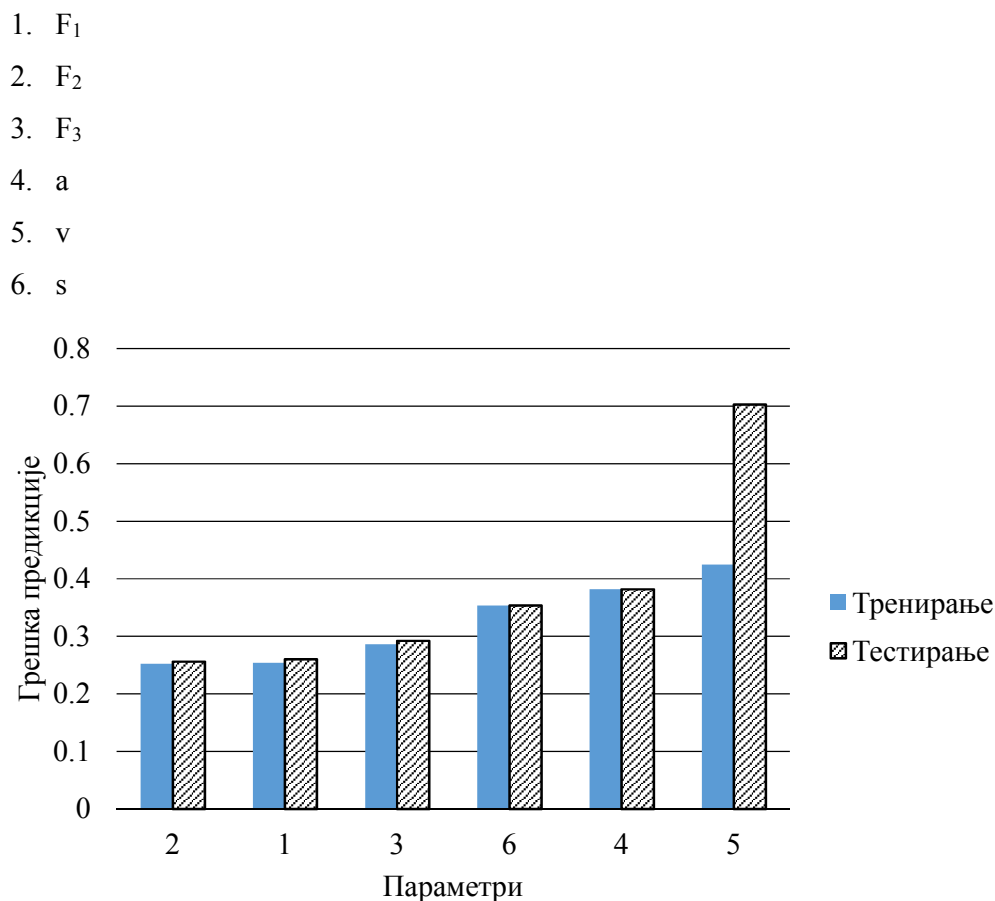
стандарду. АНФИС мрежа се може надоградити новим подацима у било ком тренутку након тренирања са постојећим подацима, што је велика предност.

Табела 6.13 приказује грешке предикције за облике повољног и неповољног облика струготине и храпавости обрађене површине на основу појединачних параметара. Према датим резултатима може се уочити да параметар 2 односно отпор продирања F_2 има најјачу узајамну повезаности са повољним и неповољним облицима струготине зато што је грешка тренирања најмања за тај параметар. Са друге стране улазни параметар 5 односно брзина резања има најслабију повезаности са повољним и неповољним облицима струготине пошто има највећу грешку тренирања. То значи да *мала промена отпора продирања F_2 може проузроковати велику промену у облицима струготине због њене најјаче узајамне повезаност*. Овде је битно напоменути да отпорне силе резања *не представљају физички улазни параметар*, јер су у овом случају коришћене како би биле одређене *узајамне повезаности* између појединачних параметара резања и облика струготине.

Табела 6.13. Грешке предикције повољног и неповољног облика струготине за појединачне параметре (трн-тренирање, тст-тестирање) на основу узајамне повезаност (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

Параметри					
F_1	F_2	F_3	s	v	a
трн=0.2543, тст=0.2606	трн=0.2525, тст=0.2562	трн=0.2866, тст=0.2925	трн=0.3819, тст=0.3819	трн=0.4249, тст=0.7024	трн=0.3536, тст=0.3536

Слика 6.8 приказује у облику стубастог дијаграма, грешке предикције пожељних и непожељних облика струготине за сваки параметар посебно применом АНФИС методологије. Може се видети да је најмања грешка предикције за параметар 2 односно отпора продирања F_2 . То значи да отпор помоћног кретања F_2 има најјачу узајамну повезаност са пожељним и непожељним облицима струготине. Пошто грешке тестирања прате грешке тренирања, може се закључити да су резултати добри. Параметри су нумерисани следећим редоследом:



Слика 6.8. Грешке предикције пожељних и непожељних облика струготина за појединачне параметре (1- F_1 , 2- F_2 , 3- F_3 , 4- a , 5- v , 6- s) на основу узајамне повезаности

У даљем истраживању је извршена анализа узајамне повезаности комбинације два параметра, повољног и неповољног облика струготине и храпавости површине.

Табела 6.14 приказује узајамну повезаност свих комбинација датих параметара и повољног и неповољног облика струготине. У овом случају отпорне силе резања су коришћене како би биле одређене *узајамне повезаности* између појединачних параметара резања и облика струготине, а не као физички улазни параметар.

Табела 6.14. Грешке предикције повољног и неповољног облика струготине за комбинације од два параметра (трн-тренирање, тст-тестирање) на основу узајамне повезаности са струготином (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

		Грешке предикције	
Комбинације два параметра	F_1, F_2	трн=0.0127, тст=0.7701	
	F_1, F_3	трн=0.0172, тст=1.3942	
	F_1, a	трн=0.1444, тст=0.1556	
	F_1, v	трн=0.1927, тст=0.3118	
	F_1, s	трн=0.1823, тст=0.1821	
	F_2, F_3	трн=0.0011, тст=0.2438	
	F_2, a	трн=0.0347, тст=0.2674	
	F_2, v	трн=0.2210, тст=0.4497	
	F_2, s	трн=0.1142, тст=0.2693	
	F_3, a	трн=0.0404, тст=0.2176	
	F_3, v	трн=0.2233, тст=0.3157	
	F_3, s	трн=0.1336, тст=0.4135	
	a, v	трн=0.3536, тст=0.7247	
	a, s	трн=0.2041, тст=0.2041	
v, s	трн=0.3333, тст=0.6616		

Може се видети у табели 6.14 да комбинације отпорних сила F_2 и F_3 (болдован ред) има најјачу узајамну повезаност са повољним и неповољним облицима струготине. То значи да комбинација отпорних сила F_2 и F_3 представља оптималну комбинацију за предикцију облика струготине што се може искористити у пракси.

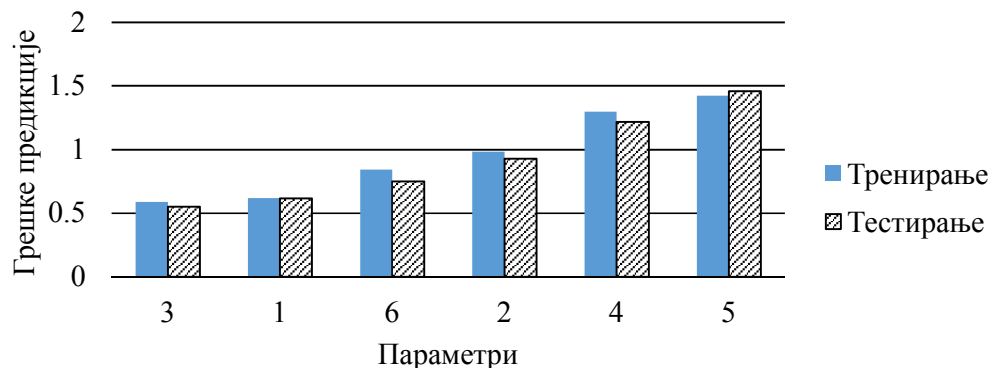
6.5. Резултати АНФИС модела-3

У трећем делу истраживања је анализирана узајамна повезаност параметара резања и различитих облика струготине.

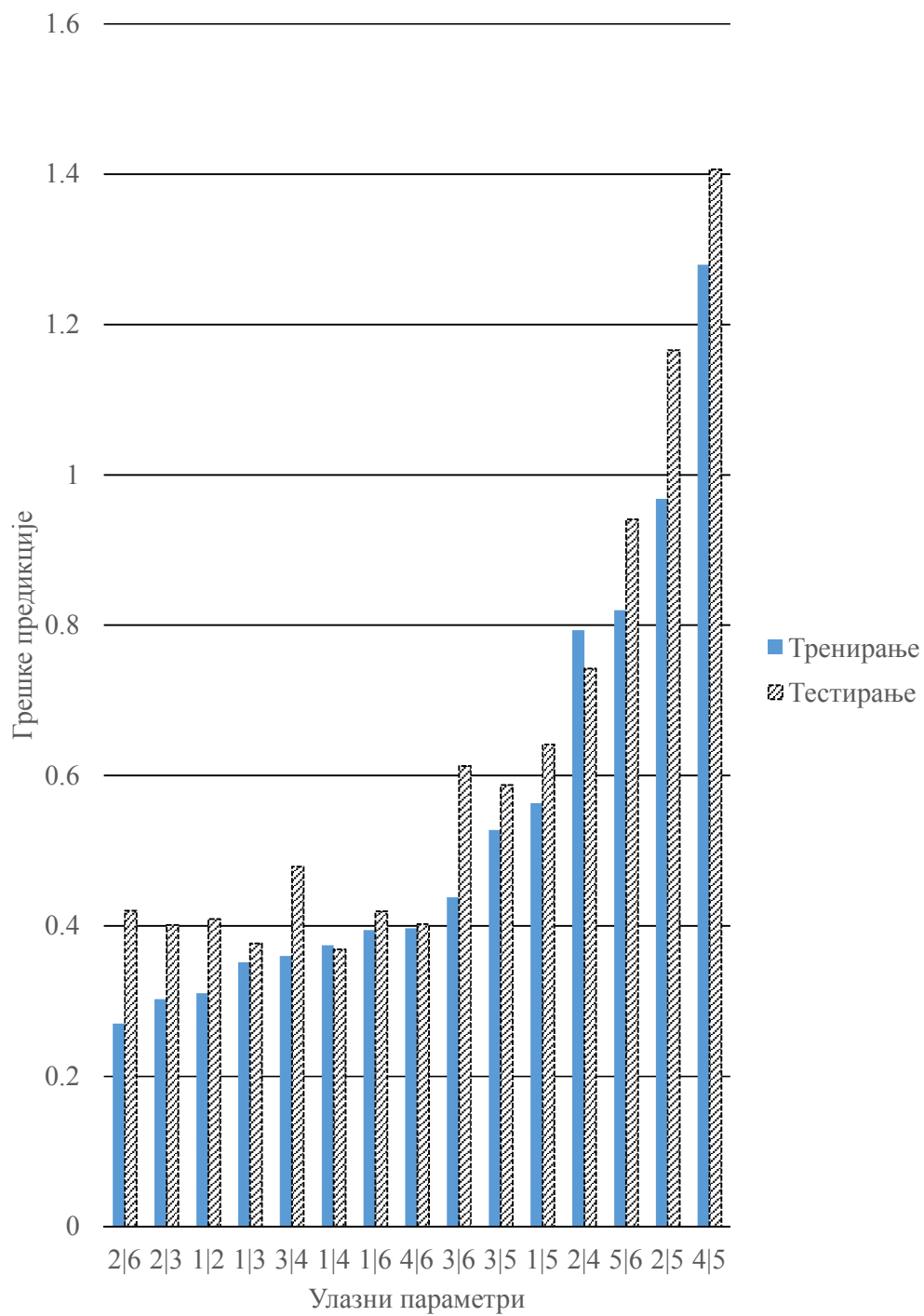
Слика 6.9 приказује грешке предикције свих облика струготине за сваки параметар посебно применом АНФИС методологије. Може се видети да је најмања грешка предикције за параметар 3 или за параметар отпор резања у правцу помоћног кретања. То значи да отпор помоћног кретања F_3 има најјачу узајамну повезаност са обликом струготине. Слика 6.10 приказује грешке предикције свих облика струготине за све комбинације два параметра применом АНФИС

методологије. Најмања грешка предикције је за комбинацију параметара 2 и 6, односно параметри F_2 и s . То значи да та комбинација има најјачу узајамну повезаност са обликом струготине, али само ако се посматра истовремено. Сlike 6.9 и 6.10 представљају и једну врсту рангирања параметара на основу њихове узајамне повезаности и облика струготине и омогућавају лакше сагледавање јачина узајамних повезаности. У овом случају отпорне силе резања су коришћене како би биле одређене узајамне повезаности између појединачних параметара резања и облика струготине, а не као физички улазни параметар. Параметри су нумерисани следећим редоследом:

1. F_1
2. F_2
3. F_3
4. a
5. v
6. s



Слика 6.9. Грешке предикције свих облика струготина за појединачне параметре (1- F_1 , 2- F_2 , 3- F_3 , 4- a , 5- v , 6- s) на основу узајамне повезаности са струготином (s : 0.16-0.25 mm/o, v : 355-710 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)



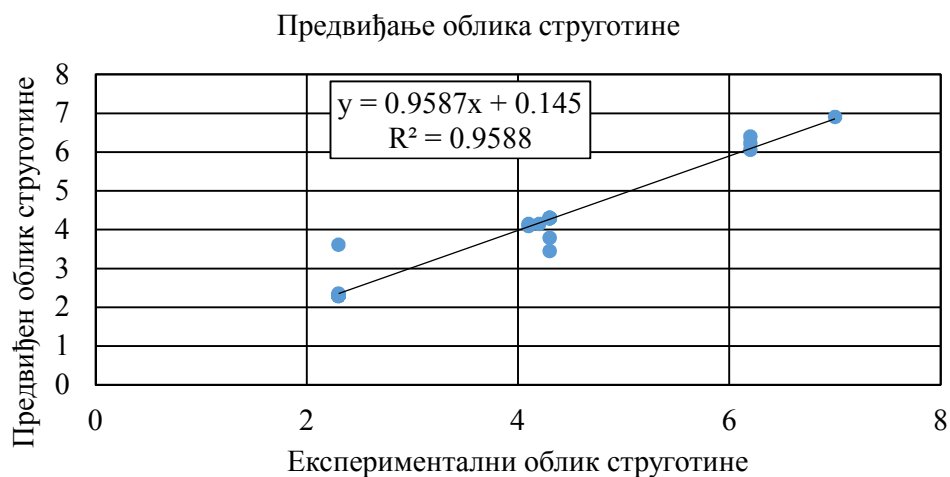
Слика 6.10. Грешке предикције свих облика струготина за комбинацију два параметра (1- F_1 , 2- F_2 , 3- F_3 , 4- a , 5- v , 6- s) на основу узајамне повезаности са струготином (s : 0.16-0.25 mm/o, v : 355-710 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

Табела 6.15 приказује нумеричке вредности за предикцију облика струготине за појединачне параметре и за све комбинације два параметра, ради поређења и анализе. Резултати у табели 6.15. су приказани графички на сликама 6.10 и 6.11.

Табела 6.15. Грешке предикције облика струготине за један и комбинацију два параметра (1- F_1 , 2- F_2 , 3- F_3 , 4- a , 5- v , 6- s) на основу узајамне повезаности са струготином (s : 0.16-0.25 mm/o, v : 355-710 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

	Један параметар	Два параметра
Грешке предикције	1 -- тренирање: 0.6170, тестирање: 0.6153	1 2 -- тренирање: 0.3106, тестирање: 0.4091
	2 -- тренирање: 0.9837, тестирање: 0.9287	1 3 -- тренирање: 0.3516, тестирање: 0.3766
	3 -- тренирање: 0.5893, тестирање: 0.5507	1 4 -- тренирање: 0.3746, тестирање: 0.3690
	4 -- тренирање: 1.2968, тестирање: 1.2181	1 5 -- тренирање: 0.5632, тестирање: 0.6414
	5 -- тренирање: 1.4231, тестирање: 1.4592	1 6 -- тренирање: 0.3944, тестирање: 0.4195
	6 -- тренирање: 0.8435, тестирање: 0.7518	2 3 -- тренирање: 0.3028, тестирање: 0.4011
		2 4 -- тренирање: 0.7933, тестирање: 0.7424
		2 5 -- тренирање: 0.9682, тестирање: 1.1661
		2 6 -- тренирање: 0.2705, тестирање: 0.4204
		3 4 -- тренирање: 0.3601, тестирање: 0.4789
		3 5 -- тренирање: 0.5279, тестирање: 0.5874
		3 6 -- тренирање: 0.4381, тестирање: 0.6129
		4 5 -- тренирање: 1.2795, тестирање: 1.4065
		4 6 -- тренирање: 0.3967, тестирање: 0.4024
		5 6 -- тренирање: 0.8199, тестирање: 0.9409

Слика 6.11 приказује предикцију облика струготине за комбинацију параметра 2 и 6 (F_2 и s), јер је то комбинација параметра са најјачом узајамном повезаношћу са обликом струготине, где је графички представљена линеарна функција у облику једначине $y=ax+b$ која приказује колико је одступање предвиђених вредности применом АНФИС методологије за облике струготине од линеарних вредности. Једначина дате линеарне регресионе линије је добијена у програму *Excel*. Такође је и коефицијент детерминације R^2 добијен у програму *Excel*. Што је коефицијент R^2 ближе јединице то значи да је добијена предикција применом АНФИС мреже боља. На основу једначине регресије и коефицијента одлучивања R^2 може се закључити да је предикција облика струготине доста добра. Ипак, на основу одступања појединих тачака (експерименталних података) од регресионе линије може се закључити да и даље постоје одређене грешке АНФИС предвиђања, али пошто је коефицијент детерминације већи од 0.95, што представља праг успешности предикције, долазимо до закључка да су резултати предвиђања задовољавајући за дате експерименталне податке. Вредности на хоризонталној оси представљају експерименталне податке који су добијени за облике струготине у табели 6.9. Вредности на вертикалној оси представљају предвиђене вредности за облике струготине применом АНФИС методологије и то представља верификацију примењене методе.



Слика 6.11. Предвиђање облика струготине за комбинацију два параметра (2|6)
(s : 0.16-0.25 mm/o, v : 355-710 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

6.6. Резултати АНФИС модела-4

У четвртом делу истраживања су укључене температуре у зони резања за анализу добијања различитих облика струготине.

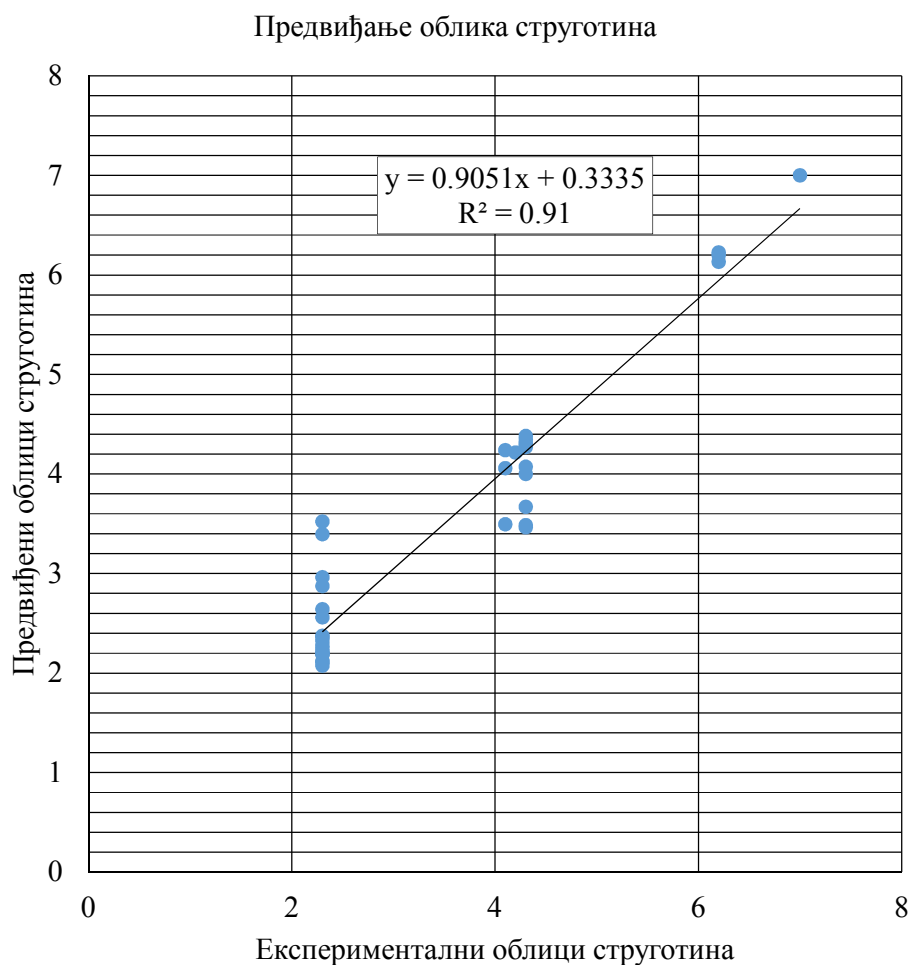
Табела 6.16 приказује грешке АНФИС предикције облика струготине за све параметре појединачно укључујући температуру у зони резања. Може се уочити да температуре у зони резања немају највећу узајамну повезаности са струготином и са хрпавошћу обрађене површине. Најјачу узајамну повезаности са струготином има отпор продирања F_2 . Ако се посебно упореде контактна температура и максимална температура може се видети да већу корелацију са струготином има контактна температура од максималне температуре, јер је грешка тренирања за контактну температуру мања од грешке тренирања за максималну температуру.

Табела 6.16. Грешке АНФИС тренирања и тестирања предикције облика струготине на основу узајамне повезаности између појединачних параметара
(s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

Грешке предикције	
Параметри	1. F_1 - тренирање=1.9391, тестирање=1.9485
	2. F_2 - тренирање=0.6393, тестирање=0.6322
	3. F_3 - тренирање=2.6809, тестирање=2.6507
	4. $T_{\text{макс}}$ - тренирање=2.9342, тестирање=2.8327
	5. $T_{\text{спот}}$ - тренирање=2.4781, тестирање=1.9855
	6. a - тренирање=1.6777, тестирање=1.6777
	7. v - тренирање=3.0225, тестирање=3.1009
	8. s - тренирање=2.9059, тестирање=2.9059

Слика 6.12 приказује АНФИС предикцију облика струготине на основу контактне и максималне температуре у зони резања. То значи да се преко АНФИС може предвидети облик струготине на основу контактне и максималне температуре у зони резања што је битно за практичну употребу. Предвиђени резултати су приказани на ординати на слици 6.12. Ради упоређивања предвиђених резултата за експерименталним резултатима на хоризонталним осама, на слици 6.12 су приказани експериментални подаци за облик струготине. На основу једначине регресије и коефицијента детерминације R^2 може се закључити да је тачност предвиђања облика струготине и хрпавости површине изузетно велика,

јер је коефицијент одлучивања близу јединице. Коришћени експериментални подаци за предвиђања на слици 6.12, си дати у табели 5.9.



Слика 6.12. АНФИС предикција облика струготине на основу контактне и максималне температуре у зони резања (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

Табела 6.17 приказује предикцију облика струготине на основу контактне и максималне температуре у зони резања. Може се уочити веома висока прецизност предикције на основу три статистичка индикатора.

Табела 6.17. Предикција облика струготине на основу контактне и максималне температуре у зони резања (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

	Облик струготине
r	0.9539
R²	0.91
RMSE	0.4123

Табеле 6.18 и 6.19 приказују грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију контактне температуре у зони резања за појединачне параметре и за све комбинације од 2 параметра. На основу резултата се може закључити да дубина резања има најјачу узајамну повезаност са контактном температуром у зони резања. Ако се комбинују два параметра може се видети да комбинација храпавости обрађене површине и отпор продирања F_2 има најјачу узајамну повезаност са контактном температуром у зони резања.

Табела 6.18. Грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију контактне температуре у зони резања за појединачне параметре на основу њихове узајамне повезаности (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

	Грешке предикције
Параметри	Ra - тренирање=18.8482, тестирање=18.0912
	F ₁ - тренирање=16.4461, тестирање=19.0780
	F ₂ - тренирање=14.6824, тестирање=15.6353
	F ₃ - тренирање=19.6896, тестирање=21.8581
	a - тренирање=14.5279, тестирање=16.7252
	v - тренирање=22.4984, тестирање=35.1124
	s - тренирање=22.1402, тестирање=25.1102

Табела 6.19. Грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију контактне температуре у зони резања за све комбинације од 2 параметра на основу њихове узајамне повезаности (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

	Грешке предикције
Комбинације параметра	Ra, F ₁ - тренирање=9.1815, тестирање=24.2590
	Ra, F₂ - тренирање=5.5950, тестирање=18.9248
	Ra, F ₃ - тренирање=9.5325, тестирање=23.4954
	Ra, a - тренирање=12.5307, тестирање=21.8045
	Ra, v - тренирање=17.5758, тестирање=26.2522
	Ra, s - тренирање=14.6034, тестирање=18.7024
	F ₁ , F ₂ - тренирање=8.4269, тестирање=16.7033
	F ₁ , F ₃ - тренирање=11.3540, тестирање=19.1609
	F ₁ , a - тренирање=10.9681, тестирање=18.2069
	F ₁ , v - тренирање=14.0556, тестирање=25.9912
	F ₁ , s - тренирање=11.1965, тестирање=17.7589
	F ₂ , F ₃ - тренирање=7.8983, тестирање=19.1291
	F ₂ , a - тренирање=7.4701, тестирање=14.0839
	F ₂ , v - тренирање=13.0997, тестирање=31.3968
	F ₂ , s - тренирање=9.1837, тестирање=14.8233
	F ₃ , a - тренирање=10.8194, тестирање=15.7688
	F ₃ , v - тренирање=17.5263, тестирање=33.3930
	F ₃ , s - тренирање=9.6396, тестирање=27.0300
a, v - тренирање=12.1706, тестирање=29.5690	
a, s - тренирање=11.6010, тестирање=14.6370	
v, s - тренирање=20.2937, тестирање=37.7476	

Табеле 6.20. и 6.21. приказују грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију максималне температуре у зони резања за појединачне параметре и за све комбинације од 2 параметра. На основу резултата се може закључити да главна отпор резања F_1 има најјачу узајамну повезаност са максималном температуром у зони резања. Може се видети да најслабију узајамну повезаност, на максималну температуру у зони резања, има брзина резања. Ако се комбинују два параметра може се видети да је комбинација храпавости обрађене површине и отпор продирања F_2 комбинација са најјачом узајмном повезаношћу са максималном температуром у зони резања.

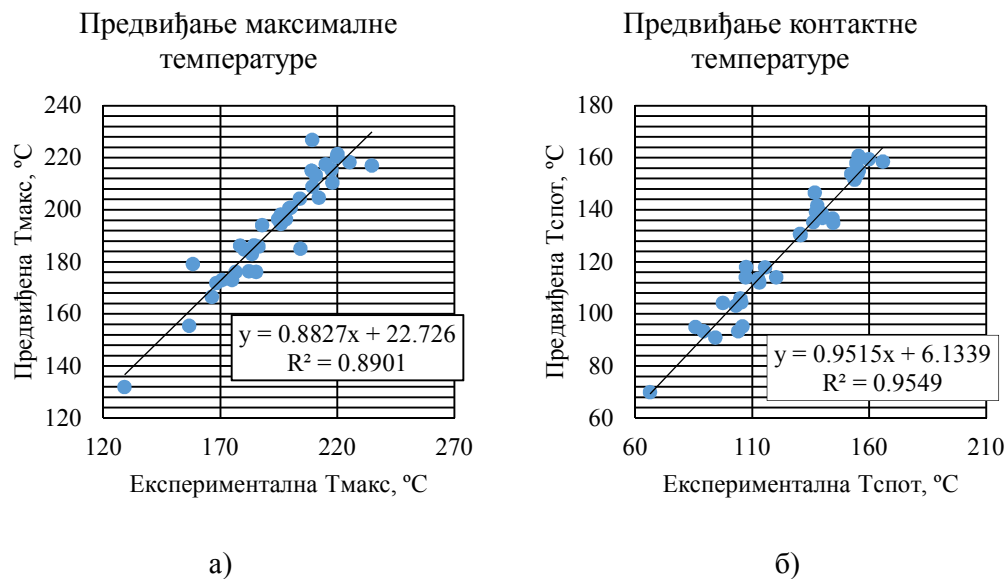
Табела 6.20. Грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију максималне температуре у зони резања за појединачне параметре на основу њихове узајамне повезаности (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

	Грешке предикције
Улазни параметри	Ra - тренирање=21.0929, тестирање=18.6718
	F₁ - тренирање=17.4702, тестирање=20.8165
	F ₂ - тренирање=20.7409, тестирање=20.6557
	F ₃ - тренирање=18.3209, тестирање=20.7708
	a - тренирање=18.6607, тестирање=19.5132
	v - тренирање=21.2347, тестирање=41.4476
	s - тренирање=19.9333, тестирање=22.1424

Табела 6.21. Грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију максималне температуре у зони резања за све комбинације од 2 параметра на основу њихове узајамне повезаности (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

	Грешке предикције
Комбинације параметара	Ra, F ₁ - тренирање=12.0026, тестирање=53.4115
	Ra, F₂ - тренирање=8.2454, тестирање=27.2370
	Ra, F ₃ - тренирање=13.0457, тестирање=45.5746
	Ra, a - тренирање=14.5069, тестирање=45.7200
	Ra, v - тренирање=19.7625, тестирање=33.2427
	Ra, s - тренирање=16.8590, тестирање=29.4389
	F ₁ , F ₂ - тренирање=12.3063, тестирање=23.6973
	F ₁ , F ₃ - тренирање=12.4506, тестирање=31.3235
	F ₁ , a - тренирање=13.7918, тестирање=24.0363
	F ₁ , v - тренирање=14.2542, тестирање=25.6031
	F ₁ , s - тренирање=13.5958, тестирање=21.8304
	F ₂ , F ₃ - тренирање=10.9693, тестирање=26.6693
	F ₂ , a - тренирање=13.2429, тестирање=17.3197
	F ₂ , v - тренирање=18.5047, тестирање=36.2482
	F ₂ , s - тренирање=11.7247, тестирање=20.7499
	F ₃ , a - тренирање=13.2611, тестирање=21.3994
	F ₃ , v - тренирање=15.2767, тестирање=27.9279
	F ₃ , s - тренирање=12.9968, тестирање=29.9004
	a, v - тренирање=16.9072, тестирање=40.3550
	a, s - тренирање=15.2465, тестирање=19.6107
v, s - тренирање=17.5451, тестирање=48.6954	

Слика 6.13 приказује АНФИС предикцију максималне и контактне температуре на основу храпавости обрађене површине и отпор продирања F_2 пошто је то комбинација два улазна параметра са најјачом узајамном повезаношћу са температуром у зони резања. Вредности на апсцисама на слици 6.13 а) и б) представљају измерене вредности максималне и контактне температуре у зони резања на основу табеле 5.9, док вредности на ординатама представљају предвиђене вредности максималне и контактне температуре у зони резања применом АНФИС методологије. Може се запазити да постоји добро слагање између измерених и предвиђених вредности.



Слика 6.13. АНФИС предикција а) максималне и б) контактне температуре на основу храпавости обрађене површине и отпор продирања F_2 (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5,mm)

Табела 6.22 приказује тачност АНФИС предикције максималне и контактне температуре на основу храпавости обрађене површине и отпор продирања F_2 на основу три статистичка индикатора.

Табела 6.22. Тачност АНФИС предикције максималне и контактне температуре на основу храпавости обрађене површине и отпор продирања F_2 (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

	Тмакс, °C	Тспот, °C
r	0.9434	0.9771
R²	0.8901	0.9549
RMSE	7.3316	5.2438

Може се уочити висока тачност предикције температура у зони резања на основу три индикатора тачности.

6.7. Резултати АНФИС модела-5

У петом делу истраживања је анализирана дебљина струготине односно анализирана је узајамна повезаност параметара резања и дебљина струготине. Експериментални подаци за овај део истраживања су у табели 5.6, 5.7 и 5.8. Табеле 6.23 и 6.24 приказују грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију дебљине струготине за појединачне параметре.

Табела 6.23. Грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију дебљине струготине за појединачне параметре применом ромбоидне резне плочице на основу њихове узајамне повезаности, (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 m/mm, a : 0.3-1.5 mm)

	Грешке предикције
Параметри	a - тренирање=0.0226, тестирање=0.0351
	s - тренирање=0.0242, тестирање=0.0415
	v - тренирање=0.0267, тестирање=0.0517

На основу резултата у табели 6.23 се може закључити да дубина резања има најјачу узајамну повезаност за дебљину струготине применом ромбоидне резне плочице.

Табела 6.24. Грешке АНФИС тренирања и тестирања за предикцију дебљине струготине за појединачне параметре применом троугаоне резне плочице на основу њихове узајамне повезаности, (s : 0.1-0.25 mm/o, v : 78-156 t/mm, a : 0.3-1.5 mm)

	Грешке предикције
Параметри	a - тренирање=0.0443, тестирање=0.0470
	s - тренирање=0.0330, тестирање=0.0388
	v - тренирање=0.0514, тестирање=0.0668

На основу резултата у табели 6.24 се може закључити да корак резања има најјачу узајамну повезаност за дебљину струготине применом троугаоне резне плочице што може да представља важан податак за практичну примену.

7. ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА И ГЛАВНИ ЗАКЉУЧЦИ

Струготина представља један од најважнијих квалитативних индикатора обраде материјала скидањем струготине. Струготина представља отпадни материјал који се јавља током обраде материјала резањем. Без обзира на своју природу у могућности је да одређеним својим карактеристикама, као што је нпр. облик, значајно утиче на стабилност процеса обраде материјала скидањем струготине. Анализа облика струготине је од великог значаја за развој индустријског сектора. Предикција и праћење облика струготине при различитим вредностима параметара резања од великог је интереса за индустријско истраживање, с обзиром да у значајној мери може да утиче на смањење или повећање трошкова производње.

Размотрени су веома битни фактори од значаја на процес формирања струготине: параметри резања (v , s , a), температура резања, отпор резања, као и квалитет обрађене површине. У циљу дефинисања зависности процеса формирања струготине од параметара, испланирани су оригинални експерименти, а као њихов резултат су добијене вредности посматраних параметара, коришћењем одговарајуће опреме: термовизијска камера за мерење температуре струготине, динамометар са појачивачем, за мерење отпора резања и уређај за мерење храпавости обрадом добијене површине. Вредности улазних параметара дефинисане су тако да покривају широк дијапазон препоручених режима резања.

Експериментално добијени резултати су систематизовани, приказани табеларно и графички да би након детаљних анализа, спроведених применом АНФИС мреже, били изведени и закључци о зависности формирања струготине од наведених параметара променљивих вредности. Поред тога, графичком анализом су установљени трендови промене праћених показатеља процеса обраде резањем у зависности од различитих улазних величина.

Главни циљ првог дела истраживања је била анализа повезаности параметара резања и храпавости обрадом добијених површина и формирања различитих облика струготине.

На крају је спроведена анализа температуре у зони резања и њена корелација са обликом струготине и хрпавошћу обрадом добијених површина. Резултати су показали да температура у зони контакта резног алата и обратка има корелацију јачу од оне која карактерише глобалну максималну температуру која се јавља у току процеса обраде резањем. То значи да би температуре резања могле да послуже као индикатор настанка различитих облика струготина што се може искористити у пракси.

Анализом добијених резултата се долази до закључка да је температура резања нижа у случају стварања кратке, неодређене и ситне струготине, која се може окарактерисати као пожељни облик струготине у односу на ону која се јавља при стварању непожељне струготине: дугу замршену и уврнуту и кратку замршену струготину. Објашњење лежи у чињеници да пожељне струготине настају при већим вредностима корака што резултује краћим временом контакта обратка и алата, а самим тим је и трење као генератор топлоте у зонама смицања мање изражена.

Закључује се да су параметри обраде, при којима се добија пожељна струготина, повољнији због мањег загревања алата па су као последица тога, искључена критична термо-напонска стања и могуће промене геометрије алата условљене дуготрајним радом под топлотним оптерећењем. Период успостављања приближно константне температуре што представља равнотежно стање температурног поља је краткотрајан и углавном траје до 15s. Као последица нестационарности процеса провођења топлоте овај период је краћи код пожељних струготина. Након одређеног времена биће успостављена приближно константна температура са благим варијацијама, које су последица хрпавости површина обратка и алата и одступања од идеалног контакта дуж линије на грудној површини алата. Нагли пораст температуре, тзв. температурни пик, карактерише кратку и неодређену струготину, а настаје због сталног контакта струготине и алата по дубини резања. То, међутим, није случај код дуге, замршене и уврнуте струготине. Након температурног пика следи нагли пад температуре, како контактне тако и максималне што се може објаснити одвајањем струготине од обратка, при чему она са собом односи део топлоте што проузрокује пад температуре у зони резања.

Такође, реализација обраде резањем при мањој брзини резања захтева више времена ради постизања максималне вредности температуре.

У циљу анализе добијених експерименталних података примењена је вештачка интелигенција, односно АНФИС мреже с обзиром на значајано олакшану систематизацију добијених података и резултата. Све су ово разлози због којих је решење проблема потражено у коришћењу система заснованих на техникама вештачке интелигенције.

Спроведена истраживања и резултати рада показали су да се моделирањем и симулацијом процеса обраде стругањем, може остварити предвиђање различитих параметара резања са аспекта добијене струготине применом АНФИС мреже. Упоредивање експерименталних резултата и резултата добијених симулацијама показало је да се различити параметри резања могу предвидети без експеримента што може значајно да смањи трошкове производње.

Успешно извршеним моделирањем података и постављањем основа једног свеобухватног и комплексног система за предикцију параметара процеса, остварен је и научни допринос овог рада у примени система који користе технике вештачке интелигенције на пољу процеса добијања струготине машинском обрадом.

С обзиром на различиту природу фактора од утицаја, одређивање облика струготине се може окарактерисати као сложен и комплексан процес. У овом истраживању је примењена метода вештачке интелигенције чиме се избегава аналитичка процедура која је дуготрајна и скупа због њене превисоке нелинеарности при добијању струготине током процеса резања. Главни циљ је елиминисање улазних параметара процеса које карактерише слаба корелација са облицима струготина. На тај начин се поједностављује анализа процеса добијања струготине, с обзиром да би остали само параметри са значајним утицајем на процес, али би био и олакшан процес управљања обрадом материјала скидањем струготине са аспекта добијања најквалитетнијег облика струготине.

Различити типови струготина настају при различитим вредностима отпор резања. Резултати добијени овим истраживањем могу се користити у пракси, с обзиром да инжењерима и пројектантима процеса обраде скидањем струготине омогућавају предикцију фактора које треба највише калибрисати у циљу добијања пожељних и избегавања непожељних облика струготине.

У току експеримената је праћено и хабање алата односно промена ширине појаса хабања алата. На основу добијених резултата се може закључити да током истраживања, при релативно краткотрајној обради и малој похабаности алата, није дошло до значајније промене отпора резања. Праћење облика струготине не даје могућност закључивања о нивоу похабаности алата па је стога, потребно променити режиме и време обраде, како би хабање алата могло да се значајније манифестује.

Резултати истраживања су довели до закључка да похабан, истрошен алат неповољно утиче на квалитет струготине, с обзиром да ће постојећи кратер, тј. оштећење грудне површине алата, утицати на величину додирне површине алата и струготине, чиме се повећава трење и настаје лошија струготина.

Према искуству производне праксе и на основу истраживања у тој области, усвојене су препоруке о правилном избору геометрије алата, што доводи до стварања повољне врсте струготине.

Сам процес настајања струготине је суштински исти за већину машинских обрада (стругање, бушење, глодање, провлачење, брушење, хоновање, леповање), па се поступак примењен у овој дисертацији може применити и на све остале врсте машинске обраде уз уважавање карактеристика сваке од њих.

Добијени резултати у овом раду представљају значајан помак ка анализи процеса обраде материјала скидањем струготине, с обзиром да би нека будућа анализа, као и поступак пројектовања оптималних услова процес обраде материјала скидањем струготине, могао да буде значајно поједностављен.

У овом раду су испитане све најважније функције обрадивости материјала, због чега добијени резултати могу да буду од практичног значаја.

С друге стране, добијање релевантних података није лак и јефтин поступак, због чега је за такав подухват обично потребно доста времена, експеримената и улагања у истраживачки рад. Најпрецизнији подаци се добијају мерењем улазних и излазних величина у самом процесу производње у реалном времену, коришћењем низа сензора и других мерних инструмената што додатно компликује и поскупљује целокупни поступак, под условом да машина овакве системе не поседује. Време потребно за припрему је прилично дуго што такође представља недостатак система заснованих на вештачкој интелигенцији.

Системи засновани на вештачкој интелигенцији се у данашње време, користе готово свуда, посебно тамо, где је рад применом класичних рачунарских програма отежан. Технике вештачке интелигенције генерално још увек нису достигле праву афирмацију, па самим тим ни на пољу машинства. У блиској будућности очекује се експанзија интересовања за ову област, јер се појављује све већи број проблема који се на овај начин могу знатно ефикасније решити.

Будућа истраживања у области моделирања процеса обраде са аспекта добијене струготине могу се поделити у неколико различитих праваца: имплементација у различитим врстама обраде резањем, испитивање већег броја излазних перформанси обраде и њихово поређење са експерименталним испитивањима, као и превазилажење проблема који се јављају услед претходно поменутих ограничења у зависности од добијеног типа струготине.

Добијени резултати у овом раду могу да буду од значаја за примену у пракси у области технологије обраде резањем, односно при пројектовању нових технологија. Даље истраживање би се могло бавити испитивањем ширег опсега улазних параметара резања и другим материјалима обрадка, као и другим врстама алата са различитим геометријама. АНФИС мрежа се у циљу њеног усавршавања, може надоградити новим подацима о новим облицима струготине у било ком тренутку након тренирања са постојећим подацима што је битна предност. Такође, класични методи за одређивање оптималних облика струготине би били изузетно скупи, док се применом АНФИС мреже тај поступак може значајно убрзати и појефтинити. АНФИС методологија има могућност одређивања односно предикције параметара резања, храпавости обрађене површине, температуре резања, отпора резања, као и облика струготина, што је и показано у овом истраживању.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Јоко Станић, (1994). Теорија процеса обраде, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд.
- [2] Милисав Калајџић, (1991). Технологија машиноградње I, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд.
- [3] Туфекчић, Д., Брдаревић, С. (1995). Обрада резањем и алатне машине. С. Брдаревић Тузла.
- [4] Sánchez, E. R. A. C. J., & Marcos, S. M. (2006). Chip arrangement in the dry cutting of aluminium alloys. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 16, 1-2.
- [5] Gziut, O., Kuczmaszewski, J., & Zagórski, I. (2015). Impact of depth of cut on chip formation in az91hp magnesium alloy milling with tools of varying cutting edge geometry. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 9(26).
- [6] Astakhov, V. P., Shvets, S. V., & Osman, M. O. M. (1997). Chip structure classification based on mechanics of its formation. *Journal of Materials Processing Technology*, 71(2), 247-257.
- [7] Kharkevich, A., & Venuvinod, P. K. (1999). Basic geometric analysis of 3-D chip forms in metal cutting.: Part 1: determining up-curl and side-curl radii. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39(5), 751-769.
- [8] Jawahir, I. S., Qureshi, N., & Arsecularatne, J. A. (1992). On the interrelationships of some machinability parameters in finish turning with cermet chip forming tool inserts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 32(5), 709-723.
- [9] Ralston, P. A. S., Stoll, K. E., & Ward, T. L. (1992). Fuzzy logic control of chip form during turning. *Computers & industrial engineering*, 22(3), 223-230.
- [10] Zhu, L., Li, H., & Liu, C. (2016). Analytical modeling on 3D chip formation of rotary surface in orthogonal turn-milling. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(4), 590-604.
- [11] Balaji, A. K., Ghosh, R., Fang, X. D., Stevenson, R., & Jawahir, I. S. (2006). Performance-based predictive models and optimization methods for turning

- operations and applications: part 2—assessment of chip forms/chip breakability. *Journal of manufacturing Processes*, 8(2), 144-158.
- [12] Andreasen, J. L., & De Chiffre, L. (1993). Automatic chip-breaking detection in turning by frequency analysis of cutting force. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 42(1), 45-48.
- [13] Pwu, H. Y., & Hocheng, H. (1998). Chip formation model of cutting fiber-reinforced plastics perpendicular to fiber axis. *Journal of manufacturing science and engineering*, 120(1), 192-196.
- [14] Karam, S., & Teti, R. (2013). Wavelet transform feature extraction for chip form recognition during carbon steel turning. *Procedia CIRP*, 12, 97-102.
- [15] Segreto, T., Simeone, A., & Teti, R. (2012). Chip form classification in carbon steel turning through cutting force measurement and principal component analysis. *Procedia CIRP*, 2, 49-54.
- [16] Teti, R., Jawahir, I. S., Jemielniak, K., Segreto, T., Chen, S., & Kossakowska, J. (2006). Chip form monitoring through advanced processing of cutting force sensor signals. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 55(1), 75-80.
- [17] Viharos, Z. J., Markos, S., & Szekeres, C. (2003). ANN-based chip-form classification in turning. In *Proceedings of the XVII. IMEKO World Congress—Metrology in the 3rd Millennium* (pp. 1469-1473).
- [18] Ramana, M. V., Rao, G. K. M., & Rao, D. H. (2014). CHIP morphology in turning of Ti-6Al-4V ALLOY under different machining conditions. *J. Prod. Eng*, 17(1), 27-32.
- [19] Khidhir, B. A., & Mohamed, B. (2010). Study of cutting speed on surface roughness and chip formation when machining nickel-based alloy. *Journal of mechanical science and technology*, 24(5), 1053-1059.
- [20] Ozel, T., Llanos, I., Soriano, J., & Arrazola, P. J. (2011). 3D finite element modelling of chip formation process for machining Inconel 718: comparison of FE software predictions. *Machining Science and Technology*, 15(1), 21-46.
- [21] Wang, X., Da, Z. J., Balaji, A. K., & Jawahir, I. S. (2007). Performance-based predictive models and optimization methods for turning operations and applications: Part 3—optimum cutting conditions and selection of cutting tools. *Journal of Manufacturing Processes*, 9(1), 61-74.

- [22] Mabrouki, T., Courbon, C., Zhang, Y., Rech, J., Nélias, D., Asad, M., ... & Salvatore, F. (2016). Some insights on the modelling of chip formation and its morphology during metal cutting operations. *Comptes Rendus Mécanique*, 344(4), 335-354.
- [23] Cui, X., Zhao, B., Jiao, F., & Zheng, J. (2016). Chip formation and its effects on cutting force, tool temperature, tool stress, and cutting edge wear in high-and ultra-high-speed milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1-4), 55-65.
- [24] Zhang, S., Li, J., Zhu, X., & Lv, H. (2013). Saw-tooth chip formation and its effect on cutting force fluctuation in turning of Inconel 718. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(6), 957-963.
- [25] Denkena, B., Köhler, J., & Mengesha, M. S. (2012). Influence of the cutting edge rounding on the chip formation process: Part 1. Investigation of material flow, process forces, and cutting temperature. *Production Engineering*, 6(4-5), 329-338.
- [26] Cui, X., Zhao, J., & Tian, X. (2013). Cutting forces, chip formation, and tool wear in high-speed face milling of AISI H13 steel with CBN tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-13.
- [27] Xu, D., Feng, P., Li, W., Ma, Y., & Liu, B. (2014). Research on chip formation parameters of aluminum alloy 6061-T6 based on high-speed orthogonal cutting model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(5-8), 955-962.
- [28] Cui, X., & Guo, J. (2017). Effects of cutting parameters on tool temperatures in intermittent turning with the formation of serrated chip considered. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1220-1229.
- [29] Ma, W., Chen, X., & Shuang, F. (2017). The chip-flow behaviors and formation mechanisms in the orthogonal cutting process of Ti6Al4V alloy. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 98, 245-270.
- [30] Kahwash, F., Shyha, I., & Maheri, A. (2015). Machining unidirectional composites using single-point tools: analysis of cutting forces, chip formation and surface integrity. *Procedia Engineering*, 132, 569-576.

- [31] Hwang, J., & Chandrasekar, S. (2011). Contact conditions at the chip-tool interface in machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(2), 183-193.
- [32] Maruda, R. W., Krolczyk, G. M., Nieslony, P., Wojciechowski, S., Michalski, M., & Legutko, S. (2016). The influence of the cooling conditions on the cutting tool wear and the chip formation mechanism. *Journal of Manufacturing Processes*, 24, 107-115.
- [33] Ke, Q., Xu, D., & Xiong, D. (2017). Cutting zone area and chip morphology in high-speed cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(1), 309-316.
- [34] Cui, X., Guo, J., Zhao, J., & Yan, Y. (2015). Chip temperature and its effects on chip morphology, cutting forces, and surface roughness in high-speed face milling of hardened steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(9-12), 2209-2219.
- [35] An, H. P., Rui, Z. Y., Wang, R. F., & Zhang, Z. M. (2014). Research on cutting-temperature field and distribution of heat rates among a workpiece, cutter, and chip for high-speed cutting based on analytical and numerical methods. *Strength of Materials*, 46(2), 289-295.
- [36] Denkena, B., de Leon, L., & Köhler, J. (2010). Influence of scaled undeformed sections of cut on strain rate, cutting force and temperature. *Production Engineering*, 4(5), 457-464.
- [37] Teti, R., Jawahir, I. S., Jemielniak, K., Segreto, T., Chen, S., & Kossakowska, J. (2006). Chip form monitoring through advanced processing of cutting force sensor signals. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 55(1), 75-80.
- [38] Tangjitsitharoen, S., & Moriwaki, T. (2008). Intelligent monitoring and identification of cutting states of chips and chatter on CNC turning machine. *Journal of Manufacturing Processes*, 10(1), 40-46.
- [39] Fang, X. D., Fang, Y. J., & Hamidnia, S. (1997). Technical Briefs. *Journal of manufacturing science and engineering*, 119, 433.
- [40] Zhang, B., & Bagchi, A. (1994). Finite element simulation of chip formation and comparison with machining experiment. *Journal of engineering for industry*, 116(3), 289-297.

- [41] Landeta, J. F., Valdivielso, A. F., de Lacalle, L. L., Girot, F., & Pérez, J. P. (2015). Wear of form taps in threading of steel cold forged parts. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(3), 031002.
- [42] Arnaiz-González, Á., Fernández-Valdivielso, A., Bustillo, A., & de Lacalle, L. N. L. (2016). Using artificial neural networks for the prediction of dimensional error on inclined surfaces manufactured by ball-end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(5-8), 847-859.
- [43] Brezocnik, M., & Kovacic, M. (2003). Integrated genetic programming and genetic algorithm approach to predict surface roughness. *Materials and manufacturing processes*, 18(3), 475-491.
- [44] Chungchoo, C., & Saini, D. (2002). On-line tool wear estimation in CNC turning operations using fuzzy neural network model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(1), 29-40.
- [45] Abdullah, K. U. R. T., & SEKER, U. (2012). Investigation of the effects of different chip breaker forms on the cutting forces using artificial neural networks. *Gazi University Journal of Science*, 25(3), 803-814.
- [46] Yildiz, A. R. (2013). Cuckoo search algorithm for the selection of optimal machining parameters in milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-7.
- [47] Arnaiz-González, Á., Fernández-Valdivielso, A., Bustillo, A., & de Lacalle, L. N. L. (2016). Using artificial neural networks for the prediction of dimensional error on inclined surfaces manufactured by ball-end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(5-8), 847-859.
- [48] Bustillo, A., de Lacalle, L. N. L., Fernández-Valdivielso, A., & Santos, P. (2016). Data-mining modeling for the prediction of wear on forming-taps in the threading of steel components. *Journal of Computational Design and Engineering*, 3(4), 337-348.
- [49] Jang, J. S. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(3), 665-685.
- [50] Jović, S., Arsić, N., Vukojević, V., Anicic, O., & Vujičić, S. (2017). Determination of the important machining parameters on the chip shape

- classification by adaptive neuro-fuzzy technique. *Precision Engineering*, 48, 18-23.
- [51] Anicic, O., Jović, S., Aksić, D., Skulić, A., & Nedić, B. (2017). Machining process influence on the chip form and surface roughness by neuro-fuzzy technique. *Applied Physics A*, 123(4), 284.
- [52] Б. Недић „Динамика процеса резања“, Машински факултет Крагујевац, Србија, 2006.
- [53] Anicic, O., Jovic, S., Tasic, S., Vulovic, A., & Jovanovic, M. (2017). Temperature detection in cutting zone for different forms of chip shapes during machining process. *Sensor Review*.
- [54] Anicic, O., Jovic, S., Stanojevic, IN., Marsenic, M., Pejovic, B., & Nedic, B. (2018). Estimation of tool wear according to cutting forces during machining procedure. *Sensor Review*.
- [55] Anicic, O., Jovic, S., Camagic, I., Radojkovic, M., & Stanojevic, M. (2018). Measuring of cutting forces and chip shapes based on different machining parameters. *Sensor Review*.
- [56] Artozoul, J., Lescalier, C., Bomont, O., & Dudzinski, D. (2014). Extended infrared thermography applied to orthogonal cutting: Mechanical and thermal aspects. *Applied Thermal Engineering*, 64(1), 441-452.
- [57] Ивковић Б., Обрада метала резањем, избор економичних режима обраде, Б издање, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1985.
- [58] Lipatov, A. A., Chigirinskii, Y. L., & Kormilitsyn, S. I. (2010). Determining the cutting forces at the rear tool surface. *Russian Engineering Research*, 30(11), 1158-1160.
- [59] Suresh, R., Basavarajappa, S., & Samuel, G. L. (2012). Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool. *Measurement*, 45(7), 1872-1884.
- [60] Лазих М., Технологија обраде метала резањем, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 2002.
- [61] Лазих М., Обрада метала резањем, монографија, Машински факултет, Крагујевац, 2002.

- [62] Г.Л. Глобочки „Обрада резањем - теорија, моделирање и симулација“, Машински факултет Бања Лука, БиХ, 2010.
- [63] Ehmman, K. F., Kapoor, S. G., DeVor, R. E., & Lazoglu, I. (1997). Machining process modeling: a review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119(4B), 655-663.
- [64] Станић Ј., Теорија обраде метала 1, Машински факултет, Београд, 1986
- [65] Ковач П., Миликић Д., Резање метала, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1998.
- [66] Altintas, Y. (2012). *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Cambridge university press.
- [67] Хорват О., Механичка технологија, обрада скидањем струготине, Техничка књига, Загреб, 1965.
- [68] Станковић, П., Машине алатке и индустријска производња машина – обрада метала резањем, Грађевинска књига, Београд, 1963
- [69] Маринковић, В., Аутоматизовани избор оптималних режима резања у операцијама обраде на стругу (спољашње уздужно стругање, унутрашње уздужно стругање).
- [70] Standard, I. S. (1986). O, Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools. *ISO/DIS*, 8688.
- [71] Недић, Б., Лазић, М.(2007): Производне технологије, Машински факултет Крагујевац.
- [72] Ковач, П., Миликић, Д. (1998): Резање метала, Универзитет у Новом Саду, ФТН, Нови Сад.
- [73] Ковач, П. (2011): Методе планирања и обраде експеримента, ФТН, Нови Сад.
- [74] Сушић З, Нинков Т, Булатовић В, Васић Д. “Примена ИР камера у индустријским апликацијама”. Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад.
- [75] Миликић, Д. (1980): Нова метода за мерење температура при обради резањем и могућности њене технолошке и сензорске примене, Докторска дисертација, ФТН, Нови Сад.

- [76] Whittenton, E. P. (2012). An introduction for machining researchers to measurement uncertainty sources in thermal images of metal cutting. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 12(3), 195-214.
- [77] Dinc, C., Lazoglu, I., & Serpenguzel, A. (2008). Analysis of thermal fields in orthogonal machining with infrared imaging. *Journal of materials processing technology*, 198(1), 147-154.
- [78] Artozoul, J., Lescalier, C., Bomont, O., & Dudzinski, D. (2014). Extended infrared thermography applied to orthogonal cutting: Mechanical and thermal aspects. *Applied Thermal Engineering*, 64(1), 441-452.
- [79] Prasad, B. S., Prabha, K. A., & Kumar, P. G. (2017). Condition monitoring of turning process using infrared thermography technique—An experimental approach. *Infrared Physics & Technology*, 81, 137-147.
- [80] Миликић, Д., Гостимировић, М., Секулић, М. (2008): Основе технологије обраде резањем, Универзитет у Новом Саду, ФТН, Нови Сад.
- [81] Ramana, M. V., Rao, G. K. M., & Rao, D. H. (2014). CHIP morphology in turning of Ti-6Al-4V ALLOY under different machining conditions. *J. Prod. Eng*, 17(1), 27-32.
- [82] Ковачевић, С., Прилог решавању проблема утицаја хабања алата на постојаност алата, *Машинство*, бр.2, (1980).
- [83] Милутиновић, М., Тановић, Љ., Утицај хабања леђне површине алата на постојаност, 34th International conference on production engineering-Nis, proceedings, 33-36, (2011).
- [84] Димитријевић Миленко, Димић Владимир, Технологија обраде на нумерички управљаним машинама, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, 1993, стр. 43-47.
- [85] Антић А, Петровић П. Б, Зељковић М. Динамика обрадног система и њене импликације на индиректно препознавања стања резног алата. Универзитет у Новом Саду. Универзитет у Београду. Conference Paper · September 2008. XXXII Саветовање производног машинства са међународним учешћем, Нови Сад, Србија, 18.-20.09.2008.

- [86] Adesta, E. Y. T., Hazza, A., Faizi, M. H., Riza, M., & Agusman, D. (2010). Tool life estimation model based on simulated flank wear during high speed hard turning. *European Journal of Scientific Research*, 39(2), 265-278.
- [87] Станић, Ј. (1994): Теорија процеса обраде, Машински факултет, Београд.
- [88] Таникић, Д., Манић, М., Примена неуронских мрежа за одређивање параметара процеса, ММА 2003 флексибилне технологије, Нови Сад 2003. год., с. 23-24.
- [89] Манић, М., Таникић, Д., Прорачун параметара машинске обраде резањем применом неуронских мрежа, YUINFO 2003, Копаоник, 2003. год.
- [90] Таникић, Д., Манић М., Девеџић Г., Примена система заснованих на вештачкој интелигенцији при моделирању процеса обраде резањем, 31. Саветовање производног машинства СЦГ, Крагујевац 2006. год., с. 425-436.
- [91] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- [92] Zadeh, L. A. (1996). Towards a theory of fuzzy systems. *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers by Lotfi A. Zadeh*, 83-104.
- [93] Mamdani, E. H. (1974, December). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. In *Proceedings of the institution of electrical engineers* (Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588). IET.
- [94] Станић, Ј., Николић, Д., Јовановић, Т., Гајовић, В., Машинска обрада – Приручник за прорачун меродавних режима машинске обраде резањем, Привредни преглед, Београд, 1983.
- [95] Станић, Ј. (1983): Увод у теорију техноекономске оптимизације процеса, Машински факултет Београд.
- [96] Урошевић, С. (1984): Производно машинство, Научна књига, Београд.
- [97] Станић, Ј., Калајџић, М., & Ковачевић, Р. (1983). Мерна техника у технологији обраде метала резањем. Грађевинска књига.
- [98] М. Лазић, Б. Недић, (2007), Обрада метала резањем, Машински факултет Крагујевац, Србија, 2007.
- [99] Станковић, П. П. (1976). Машинска обрада: Обрада метала резањем. Грађевинска књига.
- [100] П. Ковач, Д. Милкић, (1998), Обрада резањем, ФТН Нови Сад, Србија, 1998.

- [101] Љ. Тановић и В. Петраков, (2007), Теорија и симулација процеса обраде, Машински факултет Београд, Србија, 2007.
- [102] Gegg, B. C., Suh, C. S., & Luo, A. C. (2011). *Machine Tool Vibrations and Cutting Dynamics*. Springer Science & Business Media.
- [103] Trent, E. M., & Wright, P. K. (2000). *Metal cutting*. Butterworth-Heinemann.
- [104] Hayajneh, M. T., Astakhov, V. P., & Osman, M. O. M. (1998). An analytical evaluation of the cutting forces in orthogonal cutting using a dynamic model of the shear zone with parallel boundaries. *Journal of Materials Processing Technology*, 82(1), 61-77.
- [105] Cotterell, M., & Byrne, G. (2008). Dynamics of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 57(1), 93-96.
- [106] Astakhov, V. P. (1998). *Metal cutting mechanics*. CRC press.
- [107] Astakhov, V. P., & Shvets, S. V. (1998). A system concept in metal cutting. *Journal of materials processing technology*, 79(1), 189-199.
- [108] Lechniak, Z., Werner, A., Skalski, K., & Kędzior, K. (1998). Methodology of off-line software compensation for errors in the machining process on the CNC machine tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 76(1-3), 42-48.
- [109] Das, M. K., & Tobias, S. A. (1967). The relation between the static and the dynamic cutting of metals. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 7(2), 63-89.
- [110] Bagci, E. (2011). 3-D numerical analysis of orthogonal cutting process via mesh-free method. *International Journal of Physical Sciences*, 6(6), 1267-1282.
- [111] Ozel, T., Sima, M., & Srivastava, A. K. (2010). Finite element simulation of high speed machining Ti-6Al-4V alloy using modified material models. *Transactions of the NAMRI/SME*, 38, 49-56.
- [112] Bäker, M. (2003). An investigation of the chip segmentation process using finite elements. *Technische Mechanik*, 23(1), 1-9.
- [113] Kalhori, V. (2001). *Modelling and simulation of mechanical cutting* (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).

- [114] Marusich, T. D., & Ortiz, M. (1995). Modelling and simulation of high-speed machining. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 38(21), 3675-3694.
- [115] Özel, T. (2006). The influence of friction models on finite element simulations of machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(5), 518-530.
- [116] Medyanik, S. N., Liu, W. K., & Li, S. (2007). On criteria for dynamic adiabatic shear band propagation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(7), 1439-1461.

БИОГРАФИЈА



Обрад Аничих, *дипл. инж. маш.* рођен је 27. 11. 1979. године у Сјеници. После завршене основне и средње Машинске техничке школе „14. октобар“ у Краљеву дипломирао је на Вишој машинској школи у Трстенику 30. 06. 2000. године и стекао звање **машински инжењер**.

Звање **дипломирани инжењер машинства** стекао је на ФТН у К. Митровици на одсеку: Машинском-производно машинство одбранивши 09. 01. 2007. године тезу под називом: „*Логички аутоматизовани системи са примерима*“ код ментора проф. др Драгана Љамића.

Након тога уписао је основне академске студије на ТФ у Чачку 2007. године. Дана, 23. 04. 2007. године дипломирао је на одсеку: Техника и Информатика и

стекао звање **професор техничког образовања** одбранивши тезу под називом: „*Логички системи и примена атоматизације производње у систему квалитета*“ код ментора проф. др Предрага Ружичића.

Обрад Аничих запослио се у предузећу Д.О.О. „Радијатор инжењеринг“ Краљево, где је радио од 2003. до 2004. године.

Радну каријеру наставио је у основним школама у Краљеву на радном месту **професор техничког и информатичког образовања и Информатике и рачунарства**.

Има велико педагошко искуство у настави, остварено кроз дугогодишњи рад у свим врстама и на свим нивоима наставе у својој области.

Својим педагошким и искуственим радом долази до екстремно високих и запажених резултата у својој каријери, а посебна места заузима на Републичким и Међународним такмичењима.

Поред својих редовних обавеза у настави Обрад Аничих је написао већи број радова и аутор или коаутор је у доста научних радова, који су публиковани у домаћим и међународним часописима и скуповима.

Положио је за лиценцу наставника-васпитача 20. 04. 2010. год. у Београду уз посебну похвалу.

Има смисла за тимски рад и остварује коректне професионалне и колегијалне односе. Поседује позитивне моралне карактеристике.

Изузетне има организационе способности и развијене вештине, а самим тим и добро влада савременим информационим рачунарским технологијама и техникама.

Уписао је докторске студије ФТН у Косовској Митровици 2014. године на студијском програму: **машинско инжењерство**.

Наставним планом и програмом докторских академских студија положио је све предвиђене испите са високом оценом.

Научно стручна активност кандидата верификована је кроз објављене радове из области машинства и шире како се наводи у наставку:

***6 (шест)** научних радова са SCI листе категорије **M21** у *врхунском међународном часопису*, од којих је на **4** рада аутор и на **2** рада коаутор;

***2 (два)** научна рада са SCI листе категорије **M22** у *истакнутом међународном часопису*, од којих је на **1** раду аутор и на **1** раду коаутор;

***5 (пет)** научна рада са SCI листе категорије **M23** у *међународном часопису*, од којих је на **3** рада аутор и на **2** рада коаутор;

***22 (двадесетдва)** научних радова категорије **M33** *саопштених на међународним научно-стручним скуповима и конференцијама и публикованих у зборницима радова у целости*, од којих је на **11** радова аутор и на **11** радова коаутор;

***1 (један)** научни рад категорије **M53** *саопштених у часописима националног значаја и рад је у научном часопису*, где је аутор у том раду;

***3 (три)** научних радова категорије **M63** *саопштених на домаћим научно-стручним скуповима и конференцијама и публикованих у зборницима радова у целости*, од којих је на **2** рада аутор и на **1** рад коаутор.

Докторска дисертација кандидата **Обрада Аниччића, дипл. инж. маш.**, под насловом **"АНАЛИЗА И МОДЕЛИРАЊЕ ПАРАМЕТАРА РЕЗАЊА КОД ОБРАДЕ СТРУГАЊЕМ ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА"** представља резултат научно - истраживачког рада кандидата у актуелној научној области која се односи на анализу моделирања и параметара резања код обраде стругањем применом вештачких неуронских мрежа. Експериментална истраживања радио је на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.

Тема докторске дисертације припада научној области Машинско инжењерство у оквиру поља техничких наука, при чему је научно инересантна и значајна.

Области интересовања: широка област интересовања за неуронске мреже и вештачка интелигенција, заштита животне средине и људског здравља, производно машинство, процена ризика при транспорту високо - токсичних материја, оптимизација НХБ заштите у условима РХБ контаминације, процена и прогноза НХБ удеса и НХБ тероризма у миру, еколошки менаџмент у заштити и унапређењу радне и животне средине, управљање чврстим и медицинским отпадом, развијање комуникационе компетентности субјеката у систему заштите животне средине, менаџмент ризика у теорији и пракси, систем квалитета у производном машинству, примена ласера у радној и животној средини, зрачење у животној средини, информатичка подршка у техници ...

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Обрад Аничих, дипл. инж. маш.

број индекса 1/2014

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

"Анализа и моделирање параметара резања код обраде стругањем применом вештачких неуронских мрежа"

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанта



У Косовској Митровици, _____

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Обрад Аничих, дипл. инж. маш.

Број индекса 1/2014

Студијски програм Машинско инжењерство

Наслов рада

**"Анализа и моделирање параметара резања код обраде
стругањем применом вештачких неуронских мрежа"**

Ментор Проф. др Бранко Пејовић, редовни професор

Потписани/а Обрад Аничих

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици.

Потпис докторанта



У Косовској Митровици, _____

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици унесе моју докторску дисертацију под насловом:

"Анализа и моделирање параметара резања код обраде стругањем применом вештачких неуронских мрежа"

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанта



У Косовској Митровици, _____

1. Ауторство - Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.