



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
DEPARTMAN ZA PROIZVODNO MAŠINSTVO




---

***MODELOVANJE PROCESA OBRADJE STRUGANJEM  
TERMIČKI OBRADENOG ČELIKA***


DOKTORSKA DISERTACIJA

Mr MIRFAD TARIĆ dipl.maš.ing

Novi Sad, 2018.

	УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА 21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6
	<b>КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА</b>

Редни број, <b>РБР:</b>																
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>																
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска публикација															
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Текстуални штампани материјал															
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација															
Аутор, <b>АУ:</b>	мр Мирфад Тарић, дипл.инж.маш															
Ментор, <b>МН:</b>	др Павел Ковач, редовни професор															
Наслов рада, <b>НР:</b>	Моделовање процеса обраде стругањем термички обрађеног челика															
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски															
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски/Енглески															
Земља публикавања, <b>ЗП:</b>	Република Србија															
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	АП Војводина															
Година, <b>ГО:</b>	2015.															
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Ауторски репринт															
Место и адреса, <b>МА:</b>	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6															
Физички опис рада, <b>ФО:</b> <small>(поглавља/страна/цитата/табела/слика/графика/прилога)</small>	9/262/177/121/173/0/3															
Научна област, <b>НО:</b>	Машинско инжењерство															
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Процеси обраде скидањем материјала															
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Обрада стругањем, обрадивост, моделирање, вештачка интелигенција															
<b>УДК</b>																
Чува се, <b>ЧУ:</b>	Библиотека ФТН, Нови Сад															
Важна напомена, <b>ВН:</b>																
Извод, <b>ИЗ:</b>	<p>У раду је извршено експериментално истраживање процеса обраде стругањем у циљу сазнања о обрадивости термички обрађеног челика. Извршено је моделирање функција обрадивости преко измерених карактеристика стања процеса: сила резања, храпавости обрађене површине, температуре у процесу резања и хабања алата. Моделирање функција обрадивости је извршено помоћу факторног плана експеримента, као и применом вештачких неуронских мрежа. Анализиран је утицај режима резања, геометрије алата, врсте материјала алата и хабања алата на поменуте излазне параметре процеса.</p>															
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	21.05.2018.															
Датум одбране, <b>ДО:</b>	---.2018.															
Чланови комисије, <b>КО:</b>	<table border="0"> <tr> <td>Председник:</td> <td>Др Богдан Недић, ред. професор</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Др Гордана Глобочки Лакић, ред. проф</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Др Милован Лазаревић ванр. професор</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Члан:</td> <td>Др Борислав Савковић, доцент</td> <td>Потпис ментора</td> </tr> <tr> <td>Члан, ментор:</td> <td>Др Павел Ковач, ред. професор</td> <td></td> </tr> </table>	Председник:	Др Богдан Недић, ред. професор			Др Гордана Глобочки Лакић, ред. проф			Др Милован Лазаревић ванр. професор		Члан:	Др Борислав Савковић, доцент	Потпис ментора	Члан, ментор:	Др Павел Ковач, ред. професор	
Председник:	Др Богдан Недић, ред. професор															
	Др Гордана Глобочки Лакић, ред. проф															
	Др Милован Лазаревић ванр. професор															
Члан:	Др Борислав Савковић, доцент	Потпис ментора														
Члан, ментор:	Др Павел Ковач, ред. професор															

	УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА 21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6	
	<b>КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА</b>	
Accession number, <b>ANO:</b>		
Identification number, <b>INO:</b>		
Document type, <b>DT:</b>	Monographic publication	
Type of record, <b>TR:</b>	Textual material, printed	
Contents code, <b>CC:</b>	Doctoral Thesis	
Author, <b>AU:</b>	Mirfad Taric MSc in Mechanical Engineering	
Mentor, <b>MN:</b>	Prof. dr Pavel Kovač, Ph.D.	
Title, <b>TI:</b>	Modeling of the heat treated steel turning process	
Language of text, <b>LT:</b>	Serbian	
Language of abstract, <b>LA:</b>	Serbian/English	
Country of publication, <b>CP:</b>	Republic of Serbia	
Locality of publication, <b>LP:</b>	AP Vojvodina	
Publication year, <b>PY:</b>	2018.	
Publisher, <b>PB:</b>	Authors reprint	
Publication place, <b>PP:</b>	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6	
Physical description, <b>PD:</b> <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	9/262/177/121/173/0/3	
Scientific field, <b>SF:</b>	Mechanical Engineering	
Scientific discipline, <b>SD:</b>	Material removal processes	
Subject/Key words, <b>S/KW:</b>	Turning, machinability, modeling, artificial intelligence	
<b>UC</b>		
Holding data, <b>HD:</b>	FTS Library	
Note, <b>N:</b>		
Abstract, <b>AB:</b>	<p>The experimental study of the process of turning is carried out in order to learn about the machinability of thermally treated steel. The modeling of the machinability functions through the measured characteristics of the process state is carried out: the cutting force, the roughness of the machined surface, the temperature in the cutting process and tool wear. The modeling of the machinability functions was done using the experimental factor design, as well as the application of artificial neural networks. Tool geometry, tool material and wear influence on output parameters was analysed</p>	
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB:</b>	21.05.2018.	
Defended on, <b>DE:</b>	--.--.2018.	
Defended Board, <b>DB:</b>	President:	Prof. Bogdan Nedić Ph.D.
		Prof. Gordana Globočki Lakić , Ph.D.
		Asoc. Prof. Lazarević Milovan, Ph.D.
	Member:	Asist. Prof. Borislav Savković, Ph.D.
Member, Mentor:	Prof. Pavel Kovač, Ph.D.	Menthor's sign

## ZAHVALNICA

Zahvaljujem se svom poštovanom mentoru redovnom prof. dr Pavel Kovaču na konstruktivnim sugestijama, strpljenju, uloženom trudu i poklonjenom vremenu. Zahvaljujem mu što je svoje iskustvo i znanje nesebično podelio sa mnom i što je ciljanim savetima kao i argumentovanim raspravama usmeravao moja razmišljanja, zaključivanja i permanentnim praćenjem te konkretnoj pomoći podržao realizaciju doktorske disertacije. Zahvalan sam redovnom prof. dr Bogdanu Nediću na nemerljivoj pomoći tokom izvođenja eksperimenata u Laboratoriju za obradu metala rezanjem na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, na veoma sadržajnim i korisnim primedbama i ostalim članovima komisije redovnom prof. dr Gordani Glabočki-Lakić, vanredno prof. dr Milovanu Lazareviću i docentu dr Borislavu Savkoviću na izuzetnoj saradnji i veoma korisnim primedbama koje su kvalitet doktorske disertacije podigle na viši nivo. Veliko hvala asistentu Draganu Rodiću na konkretnoj pomoći pri izradi doktorske disertacije na čemu sam mu posebno zahvalan. Hvala mom prof. dr. Dušanu Ješiću na sveukupnoj podršci tokom izrade doktorske disertacije. Također, zahvaljujem se mom bratu Enisu Tariću dipl.ing. koji je bio podsticaj i ohrabrenje tokom izrade doktorske disertacije.

Na kraju, najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici supruzi Suadi i sinovima Denisu i Nedimu na beskrajnoj podršci i razumevanju tokom izrade doktorske disertacije.

Ovaj rad posvećujem supruzi Suadi i sinovima Denisu i Nedimu.

**PREGLED OZNAKA I AKRONIMA**

Oznaka	Naziv	Jedinica
HRC	Tvrdoća po Rockwellu C	-
HV	Tvrdoća po Vickersu	-
$F_1$	Glavni otpor rezanja	N
$F_2$	Otpor prodiranja	N
$F_3$	Otpor pomoćnog kretanja	N
CBN	Kubni bor nitrid	-
PCBN	Polikristalni kubni bor nitrid	-
TM	Tvrđi metali	-
$a$	Dubina rezanja	mm
$a_{sr}$	Srednja dubina rezanja	mm
$a_{max}$	Maksimalna dubina rezanja	mm
$a_{min}$	Minimalna dubina rezanja	mm
$a_1$	Dubina rezanja u normalnom preseku	mm
$s$	Pomak	mm/o
$s_{sr}$	Srednji pomak mašine	mm/o
$s_{max}$	Maksimalni pomak mašine	mm/o
$s_{min}$	Minimalni pomak mašine	mm/o
$v$	Brzina rezanja	m/min
$v_{sr}$	Srednja brzina rezanja	m/min
$v_{max}$	Maksimalna brzina rezanja	m/min
$v_{min}$	Minimalna brzina rezanja	m/min
$v_s$	Brzina pomoćnog kretanja	m/min
$\alpha$	Leđni ugao	°
$\beta$	Ugao reznog klina	°
$\gamma$	Grudni ugao	°
$\kappa$	Napadni ugao	°
$\kappa_1$	Pomoćni napadni ugao	°
$\lambda$	Ugao nagiba sečiva	°
$r$	Radijus sečiva pločice	mm
$r_\varepsilon$	Zaobljenje vrha noža	mm
$\varepsilon$	Ugao vrha noža	°
$A\gamma$	Grudna površina alata	-
$A\alpha$	Leđna površina alata	-
GS	Glavno sečivom alata	-
PS	Pomoćno sečiva alata	-

$R_a$	Srednje aritmetičko odstupanje profila od srednje linije	$\mu\text{m}$
$R_z$	Srednja visina neravnina u 10 tačaka	$\mu\text{m}$
$R_t$	Maksimalna visina neravnina	$\mu\text{m}$
$R_L$	Neravnine na leđnoj površini alata	$\mu\text{m}$
$R_G$	Neravnine na grudnoj površini alata	$\mu\text{m}$
VB	Širina pojasa habanja na leđnoj površini	mm
KT	Dubina kratera na grudnoj površini	mm
$T$	Postojanost alata	min
$\sigma_1, \sigma_2$	Glavni naponi	$\text{N/mm}^2$
$Q$	Temperatura rezanja	$^{\circ}\text{C}$
$k$	Broj uticajnih faktora	-
$C$	Parametri obradljivosti	-
$N$	Ukupan broj eksperimentalnih tačaka	-
$n_0$	Broj ponovljenih centralnih eksperimentalnih tačaka	-
$p_i$	$i$ -ti parametar obradljivosti	-
$f_i$	Stepen slobode kretanja $i$ -tog faktora, uticajni $i$ -ti faktor	-
$x_i$	Kodirane vrednosti uticajnih faktora	-
$F_{ri}$	Računska vrednost Fišerove (Fisher) raspodele za $i$ -ti stepen slobode kretanja	-
$w_i$	Interval varijacije $i$ -tog faktora	-
$S_{LF}$	Disperzija srednjih vrednosti eksperimentalnih rezultata u odnosu na liniju regresije	-
$S_E$	Disperzija eksperimenata	-
$y_u$	Izmerena vrednost karakteristike stanja procesa $u=(1, N)$	-
$S_i$	Suma članova $i$ -tog reda ( $i = 0, \dots$ )	-
SHP	Sredstvo za hlađenje i podmazivanje	-
E	Jungov (Young) modul elastičnosti	$\text{N/mm}^2$
DKSTM	Dvoslojni supertvrđi kompozitni materijal	-
FTP	Formiranje trouglastog profila	-
DTP	Deformisanje trouglastog profila	-
NM	Veštačka neuronska mreža	-
FEM	Metod konačnih elemenata (Finite Element Method)	-
DAQ	Sistem za akviziciju podataka (Data Acquisition system)	-
A/D	Analogno - digitalni pretvarač	-
USB	Univerzalna serijska magistrala (Universal Serial Bus)	-
CAD	Računarom podržano projektovanje (Computer Aided Design)	-
Rm	Zatezna čvrstoća	$\text{N/mm}^2$

<b>1. UVOD</b>	<b>8</b>
<b>1.2. Predmet istraživanja</b>	8
<b>1.3. Cilj istraživanja</b>	8
<b>1.4. Hipoteze istraživanja</b>	9
<b>1.5. Naučno istraživačke metode</b>	10
<b>1.6. Struktura rada</b>	10
<b>2. PREGLED ISTRAŽIVANJA U OBLASTI OBRAD TEŠKOBRADLJIVIH ČELIKA</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Pregled oblasti istraživanja</b>	12
<b>2.2. Alatni materijala za obradu teškoobradljivih čelika</b>	15
2.2.1. Tvrdi metalni karbidi	16
2.2.1.1. Vrste tvrdog metala	17
2.2.1.2. Tvrdi metali bez volframa	19
2.2.1.2. Fizičko – mehaničke osobine tvrdog metala	19
2.2.2. Polikristali sa osnovom bornitrida	19
2.2.3. Dvoslojni kompozitni supertvrđi materijali	20
2.2.3.1. Fizičko – mehanička svojstva	22
2.2.3.2. Svojstva i primena CBN-a i PCD-a	22
<b>2.3. Termička obrada čelika</b>	24
<b>2.4. Primena i karakteristike kaljenih čelika</b>	25
2.4.1. Osobina kaljenih čelika i osnovni uzroci za njihovu lošu obradljivost rezanjem	26
<b>2.5. Otpori rezanja pri obradi kaljenih materijala</b>	27
<b>2.6. Temperatura rezanja</b>	28
<b>2.7. Habanje alata</b>	34
2.7.1. Habanja alata pri obradi kaljenih čelika	39
2.7.2. Matematičko modelovanje vremenskog toka funkcije habanja	39
<b>2.8. Hrapavost obrađene površine</b>	42
2.8.1. Definisane hrapavosti obrađene površine	45
2.8.2. Istraživanja u oblasti hrapavosti obrađene površine	46
2.8.3. Modeli hrapavosti obrađene površine	48
<b>3. MODELOVANJE PROCESA OBRAD REZANJEM</b>	<b>50</b>
<b>3.1. Značaj modelovanja procesa obrade</b>	<b>52</b>
3.1.1. Ciljevi modelovanja procesa obrade	52
<b>3.2. Metode modelovanja procesa obrade rezanjem</b>	<b>56</b>
3.2.1. Analitički modeli	58
3.2.2. Empirijski modeli	59
3.2.3. Mehanistički modeli	61
3.2.4. Numerički modeli	61
3.2.5. Hibridni modeli	62
	63

<b>3.3. Modeli zasnovani na veštačkoj inteligenciji</b>	<b>63</b>
3.3.1. Modeli na bazi veštačkih neuronskih mreža	64
3.3.2. Delovi neuronske mreže	67
3.3.3. Aktivacijske (prenosne) funkcije	67
3.3.4. Funkcija tipa praga	68
3.3.5. Funkcija linearna po delovima	68
3.3.6 Sigmoidna funkcija	69
3.4.1. Rad veštačke neuronske mreže	70
3.4.1.1 Faza učenja ili treniranje mreže	71
3.4.1.2. Testiranje mreže	73
3.4.1.3. Algoritmi učenja	73
3.4.2.1. Učenje korekcijom greške	77
<b>4. MODELOVANJE POMOĆU FAKTORNOG PLANA EKSPERIMENTA</b>	<b>76</b>
<b>4.1. Modelovanje višefaktornim planovima drugog reda</b>	<b>77</b>
4.1.1. Centralni kompozicioni planovi drugog reda	77
<b>4.2. Trofaktorni model drugog reda</b>	<b>80</b>
4.2.1. Regresiona analiza	80
4.2.2. Kodiranje i izbor faktora eksperimenta	81
4.2.3. Određivanje koeficijenta regresije	81
4.2.4. Dekodiranje trofaktornog modela drugog reda	84
4.2.5. Disperziona analiza.	84
4.2.6. Ocena tačnosti matematičkog modela	86
<b>5. USLOVI PRI IZVOĐENJU EKSPERIMENTA</b>	<b>87</b>
<b>5.1. Mašina alatka</b>	<b>87</b>
5.2. Karakteristike alata	88
5.3. Obradak	90
5.4. Režimi obrade	92
5.5. Merenje hrapavosti obrađene površine	93
5.6. Merenje temperature rezanja	99
5.7. Merenje sile rezanja u procesu struganja	102
5.8. Merenje habanja reznih pločica	103
5.9. Rezultati merenja	103
<b>6.0 MODELOVANJE IZLAZNIH PERFORMANSI PROCESA OBRADJE</b>	<b>108</b>
<b>6.1. Prikaz podataka dobijenih trofaktornim planom</b>	<b>108</b>
<b>6.2. Realizacija modela pomoću metoda veštačke inteligencije</b>	<b>186</b>
6.3. Treniranje i testiranje neuronske mreže	108
6.4. Prikaz rezultata modelovanja neuronskim mrežama	188
6.5. Rezultati ispitivanja habanja alata	213
<b>7. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA</b>	<b>218</b>
<b>7.1. Otpori rezanja</b>	



---

7.2. Temperatura rezanja	221
7.3. Parametri hrapavosti	223
7.4. Otpori rezanja	224
7.5. Temperatura rezanja	225
7.6. Hrapavost obrađene površine	227
7.7. Matematički modeli otpora rezanja, parametara hrapavosti i temperatura rezanja	228
7.8. Uticaj alatnog materijala	231
7.9. Matematički modeli otpora rezanja, parametara hrapavosti i temperatura rezanja	232
7.10. Uticaj režima obrade	233
7.11. Uticaj temperature rezanja	234
7.12. Uticaj habanja alata	237
<b>8. ZAKLJUČAK</b>	<b>238</b>
8.1. Pravci budućih istraživanja	239
LITERATURA	240
PRILOG	251

---

## 1. UVOD

Korišćenje savremenih alata za obradu rezanjem materijala, koji zbog svojih specifičnih karakteristika omogućuju smanjenje vremena obrade po proizvodu, mogu biti jedan od načina kako da se ti troškovi smanje. Izbor materijal alata najviše zavisi od materijala koji će se obrađivati kao i samih operacija koje će se izvoditi. Kao trend se pokazala i sve veća zastupljenost visokih brzina obrada koje zahtevaju izdržljivije odnosno trajnije materijale, a kao najbolji odgovor na to pokazali su se keramički materijali, materijali od tvrdog metala, kubni bor nitrid (CBN) i dijamant. Dosadašnja istraživanja u oblasti obrade teškoobradljivih čelika tvrdoće iznad 50 HRC zasnivaju se na primeni novih kvalitetnih alatnih materijala. Pri kontaktu spregnutih površina alata i obratka kao rezultat interakcije između njih, a uzimajući u obzir širinu pojasa habanja alata, dolazi do povećanja otpora rezanja i pogoršanja kvaliteta obrađene površine. U oblasti obrade tvrdih materijala postoje preporučene klase kvaliteta reznog alata na bazi tvrdog metalnog karbida (oslojenog i neoslojenog) kao i kubnog bor nitrda koje ima smisla primenjivati pod određenim uslovima. Kada je reč o literaturnim izvorima obrade ovih materijala, oni su bazirani uglavnom na preporukama proizvođača alata u domenu režima obrade u kojima se oni primenjuju. Nema dovoljno podataka u domenu analize uticaja kvaliteta reznih pločica, geometrije alata i režima obrade na izlazne karakteristike čelika povećane tvrdoće kao što su termički obrađivani (kaljeni) čelici. Polje primene modelovanja obrade je izuzetno široko pa i ovde je potrebno dati određen prilog.

### 1.2. Predmet istraživanja

Obrada struganjem je jedna od najvažniji i najčešće korištenih procesa obrada metala rezanjem koja se koristi u proizvodnoj industriji. Temelji na kojima počiva današnja proizvodnja su: visoki zahtevi tržišta, nova proizvodna tehnologija bazirana na znanju, napredne proizvodne i informacione tehnologije, novi materijali i savremeni obradni i proizvodni sistemi. Proces obrade kaljenih čelika savremenim alatnim materijalima sve više je zastupljeno u mnogim industrijskim pogonima kao što su vojnoj industriji, automobilskoj industriji, avio industriji, namenskoj industriji itd. Primena procesa obrade je efikasna u pogledu produktivnosti i daje dobar kvalitet obrađene površine. Zadnjih nekoliko godina veliki broj naučnika se bavi istraživanjem procesa obrade rezanjem, a sve u cilju nalaženja zavisnosti između ulaznih parametara obrade (režima rezanja) i izlaznih performansi procesa obrade struganjem kaljenih (termički obrađenih) čelika. Ovde će se izvršiti analiza mogućnosti i opravdanosti primene različitih metoda modelovanja izlaznih performansi procesa obrade struganjem.

### 1.3. Cilj istraživanja

Cilj istraživanja u ovom radu je da se učini napredak u smeru određivanja matematičkih modela izlaznih performansi procesa: otpora rezanja, temperature rezanja, kvaliteta obrađene površine i parametara habanja alata u funkciji parametara režima ( $v$ ,  $s$ ,  $a$ ) zasnovanih na primeni

metoda veštačke inteligencije i faktornog plana eksperimenta primenjenih na proces obrade rezanjem termički obrađenih (kaljenih) čelika savremenim reznim alatima sa različitom reznom geometrijom. Na osnovu analize fenomena koji se javljaju u procesu struganja sa aspekta nastanka visoke temperature, habanja alata, itd. doći će se do novih saznanja u pogledu odvijanja samog procesa obrade.

Ciljevi istraživanja se mogu posmatrati sa naučnog i praktičnog aspekta.

Opšti naučni cilj predstavlja prilog predviđanju otpora rezanja, temperature rezanja i kvaliteta obrađene površine u funkciji dubine, brzine i koraka pri obradi struganjem kaljenog čelika tvrdoće 55 HRC. To podrazumeva da teorijske osnove procesa struganja, planiranje eksperimenata, izvođenje eksperimenata struganja i obrada eksperimentalnih rezultata rezultiraju ka matematičkim modelima i primeni metoda veštačke inteligencije. Osim navedenog, na osnovu analize fenomena koji se javljaju u procesu struganja sa aspekta nastale strugotine, visoke temperature i habanja alata, doći će se do novih saznanja u pogledu pojašnjenja samog procesa.

Na osnovu dobijenih eksperimentalnih podataka dobivenih u laboratorijskim uslovima dobiće se podaci o obradljivosti kaljenih čelika koji se mogu implementirati u proizvodnim uslovima. Pošto se ovde radi o savremenim alatima očekuje se da izvedena istraživanja nađu široku primenu u industriji koja u svom proizvodnom programu imaju proizvode visoke tvrdoće, automobilske, namenskoj industriji i drugim granama industrije.

#### 1.4. Hipoteze istraživanja

1. Na osnovu analize literaturnih podataka pretpostavka je da je moguće uspešno izvršiti obradu struganjem kaljenih materijala umesto brušenjem. Zatim odrediti koji alatni materijal, TM ili CBN, daje bolje izlazne performanse procesa, kao što su sile rezanja, parametri hrapavosti obrađene površine i temperature rezanja u funkciji parametara režima rezanja ( $v$ ,  $s$ ,  $a$ ).

2. Odrediti odgovarajuću geometriju alata za oba alatna materijala koji odgovara obradi kaljenog čelika

3. Napraviti odgovarajući plan eksperimenta pomoću kojeg će se izvršiti modelovanje pomenutih izlaznih performansi procesa u funkciji parametara režima rezanja. Odrediti takođe i matematičke modele uz primenu veštačke inteligencije (neuronske mreže) i uporediti koje metode modelovanja će dati adekvatnije matematičke modele.

4. Ispitati i uticaj habanja na izlazne performanse procesa obrade struganjem kaljenog materijala.

5. Odrediti pouzdane matematičke modela za izabrane ulazne i izlazne parametre koji se mogu uspešno primeniti u pogonima obrade metala rezanjem.

## 1.5. Naučno istraživačke metode

Istraživačke metode koje će se primenjivati u ovom radu obuhvataju primenu opštih i posebnih metoda istraživanja.

Rad na predloženoj tezi zahteva primenu savremenih istraživačkih postupaka. U istraživanju će se primeniti poznate i priznate naučne metode, uz metode analize i sinteze i to:

1. Analitički pristup kojim će se izvršiti određivanje sila rezanja na osnovu eksperimentalnih podataka, statistička provera uticajnosti pojedinih parametara modela kao i adekvatnost i tačnost modela
2. Metode planiranja i izvođenja eksperimenata, akvizicije podataka i digitalne obrade signala i određivanje odgovarajućih matematičkih modela.
3. Metode za empirijsku identifikaciju parametara u modelima za sile rezanja, hrapavost obrađene površine, temperaturu rezanja i habanje alata
4. Metode modelovanja pomoću metoda veštačke inteligencije.

## 1.6. Struktura rada

Ovaj rad je podeljen u osam poglavlja.

U prvom poglavlju dat je ukratko uvod, predmet istraživanja, zatim ciljevi i hipoteze istraživanja i naučno istraživačke metode.

U drugom poglavlju dat je pregled stanja istraživanja u oblasti obrade kaljenih-teškoobradljivih čelika. U drugom poglavlju dat je pregled stanja istraživanja u oblasti habanja i postojanosti strugarskog noža pri ortogonalnom rezanju. Ukratko su objašnjeni važniji modeli stvaranja strugotine. Sistematizovane su metode merenja habanja alata (direktni i indirektni).

Dalje u drugom poglavlju date su karakteristike teškoobradljivih materijala gde je moguće izvesti obradu na strugu uz postizanje visoke tačnosti i male hrapavosti obrađene površine kao zamena za skuplju obradu brušenjem gde se postižu značajni tehno-ekonomski efekti. Date su karakteristike teško obradljivih materijala.

U trećem poglavlju prikazano je modeliranje procesa rezanjem na osnovu metoda veštačke inteligencije, a primenjene su neuronske mreže. Najpre se govori o modeliranju uopšte a onda o primeni različitih metoda, a na kraju je prikazano modeliranje pomoću neuronskih mreža uopšte.

U četvrtom poglavlju je prikazano modelovanje pomoću centralnog kompozicionog trofaktornog plana eksperimenta drugog reda. Pokazano je kako je izvršena regresiona i disperziona analiza plana. Regresiona analiza je obuhvatila definisanje regresionog modela, kodiranje i dekodiranje eksperimenta i određivanje koeficijenata regresije pomoću metode

najmanjih kvadratnih odstupanja u matičnom obliku. Disperziona analiza je obuhvatila ocenu signifikantnosti parametara, ocenu adekvatnosti modela i ocenu tačnosti modela.

U petom poglavlju su prikazani uslovi pri izvođenju eksperimenta. Primenjena mašina alatka, priprema obratka za ispitivanje, primenjen nosač alata i rezne pločice od različitog materijala i sa različitom reznom geometrijom. Takođe je definisan i izbor režima rezanja. Dalje je prikazana korišćena merna instrumentacija i način merenje svih izlaznih parametara, odnosno otpora rezanja, temperature rezanja, hrapavosti obrađene površine i habanja alata.

U šestom poglavlju su prikazani modeli izlaznih parametara dobijeni pomoću obrade podataka trofaktornim centralnim kompozicionim planom. Ocena adekvatnosti modela, signifikantnosti ulaznih parametara i tačnosti modela. U drugom delu su prikazani modeli dobijeni pomoću veštačkih neuronskih mreža. Prikazana je i zavisnost merenih vrednosti od modelskih vrednosti. Dat je i grafički prikaz uticaja ulaznih parametara na izlazne performanse procesa obrade. Na kraju su prikazani rezultati ispitivanja habanja alata i određene odgovarajuće zavisnosti.

U sedmom poglavlju izvršena je analiza rezultata ispitivanja po obe vrste primenjenih modela u smislu adekvatnosti dobijenih modela kao i analiza grafičkog prikaza dobijenih zavisnosti i uticajnosti ulaznih parametara modela na pomenute izlazne performanse procesa obrade.

U osmom poglavlju dati su zaključci doktorske disertacije na osnovu sprovedenih rezultata istraživanja, njihove analize i diskusije. Na kraju poglavlja dati su predlozi za buduća istraživanja.

U devetom poglavlju dat je pregled literature koja je korištena u radu.

Na kraju rada je dat prilog

---

## **2. PREGLED ISTRAŽIVANJA U OBLASTI OBRADJE TEŠKOBRADLJIVIH ČELIKA**

### **2.1. Pregled oblasti istraživanja**

Na osnovu velikog broja literaturnih izvora, istraživanja u oblasti obrade teškoobradljivih čelika odvijaju se u sledećim pravcima: primena novih vrsta reznih alata i utvrđivanje njihove postojanosti, analiza uticaja elemenata režima obrade na kvalitet obrade, analiza sila koje se javljaju pri obradi kao i analiza reznog alata sa aspekta reznog materijala, njegove geometrije i habanja kao i njegov uticaj na proces obrade. U novije vreme za optimizaciju izlaznih parametara proizvodnih procesa, pa i predviđanje kvaliteta obrađene površine itd., sve više se koriste veštačke neuronske mreže (ANN modeli) i neuro fazi sistemi (ANFIS modeli).

Tvrda obrada je postavljena kao vodeća tehnologija u mašinskoj tehnologiji za različite mašinske komponente napravljene od ojačanog čelika kao što su ozubljena vratila, ležajevi i hidraulične komponente koja zamenjuje obradu brušenjem [1, 2]. Većina naučnika i inženjera smatra da tvrda obrada pokriva probleme kao što je mehanika rezanja, nastajanje strugotine, habanje alata, integritet obrađene površine i tačnost obrade. Balans energije pri tvrdoj obradi je bio cilj istraživanja u radovima [1, 2, i 17].

Na osnovu analize obrade kaljenih čelika sa aspekta kvaliteta obrađene površine uz primenu matematičkog modelovanja, zaključili su Viktor i dr. [4] da je celishodnije primenjivati obradu struganjem u odnosu na obradu brušenjem. U istraživanju su koristili alate na bazi keramike i CBN imajući u vidu njihovu hemijsku stabilnost prema ugljeniku. Pored toga analizirali su i uticaj prekidnog / neprekidnog rezanja na rezni alat. Pri neprekidnom rezanju vršeno je poređenje alata od CBN i oksidno-karbidne keramike, a pri prekidnom rezanju poređenje između CBN i SiC keramike. Alati na bazi CBN su dali bolje rezultate u odnosu na keramiku kod oba načina obrade.

Ispitivanja prevlaka na bazi AlTiSiN (nACo®), AlCrSiN (nACRo®), AlTiN i TiAlCrN, analiziranje njihovog habanja, sile koje se javljaju pri rezanju i kvalitet obrađene površine vršeno je u radu [5]. Utvrđeno je da su najbolje prevlake od AlTiSiN i AlTiN za rezanje teško obradivih materijala, poput austenitnih nerđajućih čelika, jer se sa njima postižu najbolji pokazatelji obradljivosti: ravnomernije habanje, manja hrapavost i manji otpori rezanja. Rezultati su poslužili za modelovanje procesa obrade.

Analiza mehanizma habanja polikristalnog kubnog bor nitrida (PCBN) pri struganju kaljenih čelika SS2244 (DIN 42CrMo4), SS2511 (DIN 16MnCr5) i SS2260 (DIN X100CrMoV51), sa fokusom na međusobno delovanje između CBN/veziva i materijala obrađivanog dela vršena je u [6]. Analiza modela je pokazala da se kao rezultat interakcije između alata i obratka na reznim površinama alata javljaju različiti oblici habanja. Kao posledica abrazivnog habanja na površinama alata nastaju brazde, što se objašnjava prisustvom metalnog veziva. Ovde je nađeno i prisustvo difuzionih procesa habanja na površinama alata.

Istraživanja sile pri rezanju i razvoj modela za predviđanje optimalnih sila tokom završne mašinske obrade kaljenog čelika EN31 (AISI 52100, 60±2 HRC ) alatom CBN je vršeno u [7]. Primenjen je plan eksperimenata i određeni su odgovarajući matematički modeli sila rezanja i hrapavosti obrađene površine.

Kumar i dr. [8] su istraživali uticaj režima obrade, pri struganju čelika SAE8620, EN8, EN19, EN24 i EN47, na hrapavost obrađene površine uz primenu matematičkog modelovanja. Studija je pokazala da na hrapavost obrađene površine direktno utiču brzina rezanja i pomak, odnosno da sa povećanjem brzine i smanjenjem pomaka dolazi do smanjenja površinske hrapavosti.

Optimizaciju režima rezanja zasnovanih na Taguchi metodi za minimiziranje hrapavosti površine ( $R_a$  i  $R_z$ ) radili su Ilhan i dr. [9]. Eksperimenti su izvedeni na kaljenim čelicima AISI 4140 (51 HRC) sa alatima presvučenim karbidnim slojem i bez primene sredstva za hlađenje i podmazivanje. Analiziran je uticaj režima rezanja ( $v$ ,  $s$  i  $a$ ) na kvalitet obrađene površine. Rezultati ove studije ukazuju na to da korak ima najveći uticaj na parametre hrapavosti  $R_a$  i  $R_z$ , a razvijeni modeli se mogu koristiti u industrijskoj praksi.

Uticaj brzine rezanja ( $v = 50, 70$  i  $100$  m/min ) na promenu tvrdoće i zaostalih napona u površinskom sloju pri struganju kaljenog čelika za kotrljajuće ležajeve 100Cr6 (Č4146, 61 HRC) alatom od CBN istraživano je u [10]. Uočeno je povećanje tvrdoće površinskog sloja do dubine od  $120 \mu\text{m}$  i prisustvo zaostalih napona do dubine  $100 \mu\text{m}$ .

Analiziranje habanje površinskog sloja alata od CBN pri obradi struganjem kaljenog čelika radili su u radu [34]. Konstatovano je da je stanje površinskog sloja reznog alata u mnogome uslovljeno uticajem generisane toplote u zoni rezanja. Radi ostvarivanja odgovarajuće postojanosti alata, potrebno je utvrditi granične zone uticaja toplote pri kojima nastaju promene hemijskog sastava i mehaničkih svojstava u površinskom sloju materijala alata. Izvedena istraživanja su pokazala da PCBN – Kiborit počinje da oksidira na temperaturi  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  i da dalji rast temperature dovodi do intenzivne oksidacije materijala u vidu isparenja oksida bora i uklanjanja slobodnog azota bora.

Analizirajući obradu kaljenog čelika za cementaciju 16MnCrS5 (Č 4381,  $62 \pm 2$  HRC) alatima sa reznim pločicama tvrdog metala K10, kubnog bornitrida PCBN i oksidno-karbidne keramike  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ , Jovičić je u [32] pokazao da su najmanje veličine komponenti otpora

rezanja bile pri radu sa raznim pločicama od oksidno-karbidne keramike, a zatim kubnog bornitrida. Znatno veće komponente otpora rezanja dobijene su pri obradi alatima sa tvrdim metalom kvaliteta K10, a to kao posledica manje brzine rezanja.

U istraživanjima Poduraev [31], je uz primenu matematičkih modela došao do zaključka da su otpori rezanja pri obradi kaljenih čelika (62-64 HRC) znatno veći u odnosu na nekaljene, s tim da je otpor prodiranja  $F_2$  veći od glavnog otpora rezanja  $F_1$ . Pri obradi je korišćen alat od PCBN. Ustanovljeno je da sa povećanjem brzine rezanja dolazi do smanjenja otpora rezanja, a to je kao posledica rasta temperature i omekšavanja obrađivanog materijala. Takođe je u radu [31] pokazano, da na postojanost alata znatan uticaj ima i hemijski sastav materijala i njegova struktura, pošto intenzitet habanja zavisi od abrazivnog dejstva tvrdih karbida koji se nalaze u materijalu obratka. Za utvrđivanje kriterijuma zatupljenja alata, a time i postojanosti je uzeta širinu pojasa habanja na lednoj površini  $VB = 0,3$  mm i dubinu kratera na grudnoj površini  $KT = 0,05$  mm. Utvrđeno je da je približno ista postojanost alata pri obradi čelika X210CrW12 (Č 4650) i 90MnV8 (Č 3840) po oba kriterijuma, dok je postojanost alata pri obradi čelika za cementaciju 16MnCr5 (Č 4320) i poboljšanje 50CrMo4 (Č 4733) po prvom kriterijumu veća za oko 80 – 90 %, a po drugom kriterijumu zatupljenje alata je veće za 4 -7 puta.

Habanje alata od tvrdog metala P10 naglo se povećava sa porastom tvrdoće materijala obratka, dok se kod alata na bazi CBN smanjuje do tvrdoće oko 50-55 HRC navodi Jovičić [32]. Intenzitet habanja i postojanost različitih alatnih materijala se međusobno razlikuje pri obradi kaljenih čelika i zavise od tvrdoće i hemijskog sastava materijala obratka. Promena parametara hrapavosti obrađene površine  $R_a$  pri završnoj obradi na strugu kaljenog čelika 50CrMo4 (Č4733, 55 HRC) alatom od CBN kreće se u dijapazonu  $R_a = 0,5 - 1,0$   $\mu\text{m}$ , što ukazuje da je u toku dužeg vremena obrade habanje alata bilo neznatno, odnosno održavana je dobra geometrija alata.

Metod konačnih elemenata koristi se za modelovanje naponskog stanja korena strugotine formiranog u zoni rezanja materijala obrade od kaljenog čelika, rezanog sa pločicama od kubnog bor nitrida zasnovanog na super tvrdom polikristalnom stanju materijala alata i korišćen je u radu [57].

Model baziran na numeričkoj metodi gde se koristi metoda konačnih razlika za određivanje temperature alata i strugotine prikazali su Lazoglu, i Altintas, [58]. Razmatrana je i zona smicanja pri nastajanju strugotine i toplotni fluks koji pri tome nastaje. Prikazani model je razmatran u stacionarnom i ne stacionarnom stanju.

U radu [59] demonstriran je potencijal veštačke inteligencije odnosno neuronskih mreža za optimizaciju parametara procesa obrade. Operacija struganja je definisana kao više kriterijumski problem optimizacije sa tri konfliktna kriterijuma (produktivnost, troškovi operacije i kvalitet procesa). Pomenuti kriterijumi su predstavljeni kao funkcija brzine rezanja, pomaka i dubine rezanja. Modifikovani neuronski algoritam je korišćen za optimizaciju parametara struganja i eksperimentalni rezultati su dati kao dokaz. Dakle, neuronske mreže se smatraju veoma moćnim



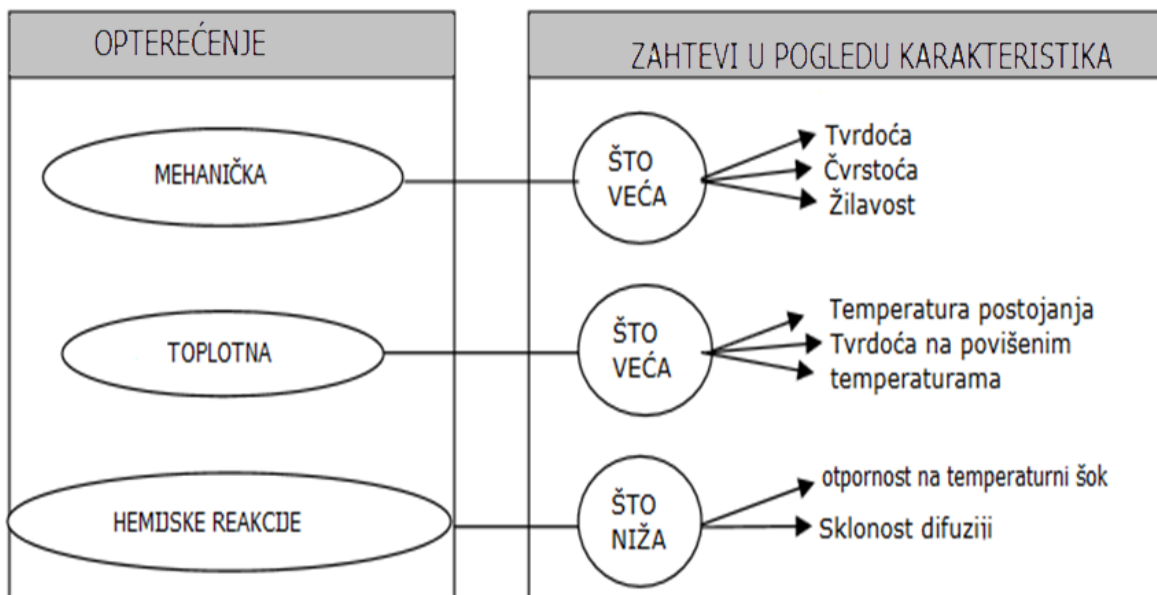
alatom za rešavanje problema više kriterijumske optimizacije parametara režima rezanja, pa bi ovaj prilaz trebalo koristiti za brzo određivanje optimalnih uslova pri obradi.

Primena modela ortogonalnog rezanja za poređenje rezultata dobijenih eksperimentalnim putem i rezultata dobijenih računarskom analizom se nalazi kod Messnera [60]. Model je omogućio dobijanje sila i temperatura, kao i zaostalih napona koji se javljaju pri rezanju. U nastavku autor vrši modelovanje pomoću metode konačnih elemenata.

## 2.2. Alatni materijali za obradu teško obradljivih čelika

Visoki specifični pritisci i temperature rezanja, intenzivno trenje i mali presek strugotine radi potrebe ostvarivanja visokog kvaliteta obrađene površine pri završnoj obradi kaljenih čelika, uslovljavaju da materijal alata poseduje sledeće osobine: otpornost na visoku toplotu i otpornost na habanje na visokim temperaturama rezanja (posebno odsustvo difuznih procesa i hemijske reakcije sa materijalom obratka), visoku otpornost na pritisak i dobru žilavost, dobru čvrstoću sečiva i mogućnost ostvarivanja vrlo oštrog alata (sa malim poluprečnikom zaobljenja sečiva, radi mogućnosti zahvatanja male dubine rezanja). Složeni procesi koji vladaju pri rezanju uslovljavali su da alatni materijali moraju zadovoljiti različite zahteve kao što su visoka tvrdoća i otpornost na habanje, postojanost tvrdoće pri visokim temperaturama, dobro ponašanje pri toplotnoj obradi, žilavost zbog sprečavanja loma alata, otpornost na oksidaciono habanje itd.

Pregled vrsta opterećenja kao i zahteva u pogledu karakteristika materijala reznih alata prikazani su na slici 1. [140]. Razvojem materijala reznih alata visoke tvrdoće i toplotne postojanosti, danas se praktično mogu struganjem obrađivati teško obradljivi (kaljeni) čelici.



Slika 1. Vrste opterećenja i zahtevi u pogledu potrebnih karakteristika alatnih materijala [140]

Ove zahteva danas ispunjavaju sledeći alatni materijali [31]:

- (1) Tvrđi metali visoke otpornosti na habanje i žilavosti (sitnozrnasti WC kvaliteta K) kao i tvrđi metali bez volframa (tj. Cermet- na bazi TiC i TiN, sa Ni kao vezivom).
- (2) Alatna keramika poboljšane žilavosti i dobre otpornosti na habanje (posebno mešana keramika  $-Al_2O_3 + TiC$  i oksidna keramika armirana vlaknima silicijum karbida -  $Al_2O_2 + ZrO_2 + SiC$ ).
- (3) Materijali na bazi kubnog bornitrida (CBN) - kompaktne rezne pločice polikristalne strukture (PCBN) i rezne pločice od tvrdog metala sa slojem polikristalnog kubnog bornitrida. Na tržištu se nalaze različiti kvaliteti u zavisnosti od sadržaja CBN i veziva kao i proizvođača (borazon, elbor, amborite, wurbon i sl).

Pri tome efikasnost procesa obrade (postojanost alata, kvalitet obrađene površine) je vezana između ostalog i sa procesom obrade (struganje, glodanje) uslovima obrade (brzina rezanja, korak, dubina rezanja, uslovi hlađenja podmazivanja) kao i karakteristike materijala i geometrija alata.

Preporučena geometrija alata pri obradi kaljenih čelika i čelika velike tvrdoće je sa negativnim grudnim uglom i uglom nagiba sečiva (kod primene kvadratnih reznih pločica -S,  $\gamma_o = -6^\circ$ ,  $\lambda_o = -6^\circ$ ,  $\alpha_o = 6^\circ$ ), sa rubom na grudnoj površini pored sečiva (obavezno kod keramičkih reznih pločica). Sa povećanjem tvrdoće materijala obratka treba povećati i veličinu negativnog grudnog ugla, uz istovremeno povećanje i leđnog ugla [31].

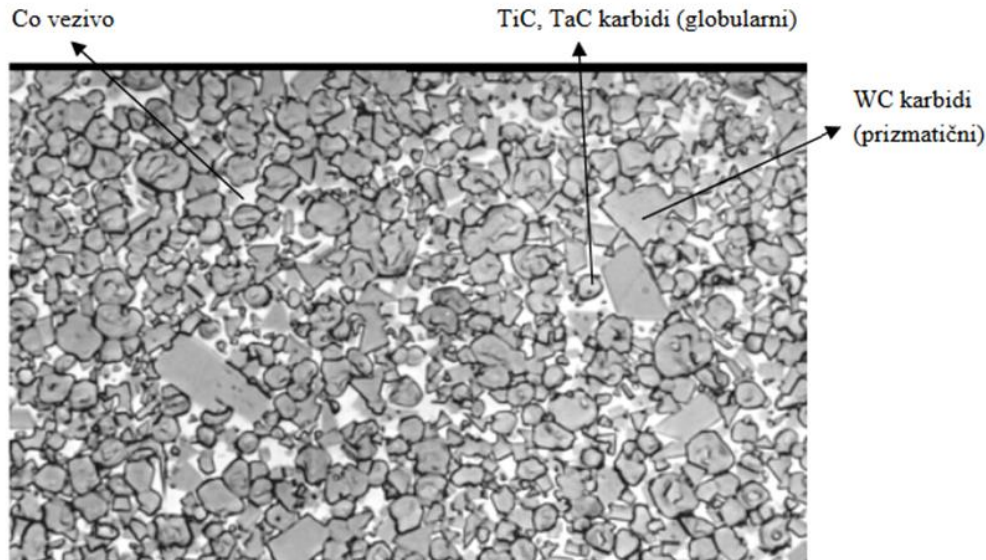
Bolji rezultati se ostvaruju korišćenjem kružnih reznih pločica - R, u odnosu na rezne pločice kvadratnog oblika. Kod kružnog oblika pločica pri istoj dubini rezanja veća je dužina sečiva u kontaktu sa materijalom obratka, a radi toga je manje specifično opterećenje sečiva i veća postojanost.

### 2.2.1. Tvrđi metalni karbidi

Tvrđi metalni karbidi (TM) – predstavljaju rezni materijal koji se danas najviše koristi u metaloprerađivačkoj industriji. To je sinterovani materijal sastavljen od karbida volframa, titana, tantala, niobija, molibdena i vezivne metalne osnove, najčešće kobalta. Skoro sve vrste tvrdog metala sadrže volframov karbid (WC), sa ili bez dodatka titanovog (TiC) i/ili tantalovog (TaC) karbida. Tvrđi metal spada u grupu veoma tvrdih materijala otpornih na habanje koji su postojani na visokim temperaturama. kod kojih mogu da se primene velike brzine rezanja i dobije visok kvalitet površine koja se obrađuje. Mikro struktura tvrdih metala sastoji se od visokog učešća karbida volframa, titana i tantala, koji su međusobno povezani najčešće kobaltom. Na slici 2. prikazana je mikro struktura tvrdog metala. U početku je ova vrsta materijala bila razvijena kao volframov karbid (WC) u vezivu od kobalta (Co).

Tvrđi metali se mogu koristiti kao nepresvučeni i presvučeni. Prednosti presvučenog tvrdog metali najviše dolaze do izražaja pri velikim brzinama obrade gde se pojavljuju visoke temperature u zoni rezanja koje i uzrokuju difuzione procese. Vezivno sredstvo difundira, zrnca

karbida takođe menjaju svoj položaj, ostavljajući iza sebe promenjenu geometriju reznog dela alata, posebno zatupljenje glavnog sečiva i krater na grudnoj površini. Nisu sve alatne mašine u stanju postići i brzine rezanja na kojima bi se mogli pojaviti procesi difuzije, što zbog zastarelosti, što zbog nedostatka snage, a u takvim uslovima se i dalje koriste nepresvučeni tvrdi metali [61, 62].



Slika 2. Mikro struktura tvrdog metala.

Tvrđi metalni karbidi su u osnovi mešavina prahova volfram karbida (WC) sa prilično mekim vezivom – kobaltom (Co). Volfram karbid se često dopunjuje ili zamenjuje titan karbidom (TiC), tantal karbidom (TaC), niobijumom (Ni), vanadijumom (V) i molibdenom (Mo), dok se kobalt na sličan način legira sa niklom (Ni) ili nikl molibdenom (NiMo). Mešavina tvrdog metala sadrži zapreminski 60 – 95 % tvrdih karbidnih komponenti dok je ostalo vezivni materijal.

#### 2.2.1.1. Vrste tvrdih metalanih karbida

Tvrđi metalni karbidi za razne alate razvrstani su u tri osnovne grupe u zavisnosti od vrste materijala koji se obrađuje sa po više sorti u svakoj grupi (JUSK.A9.020). Oznake ovih grupa su P, K i M, dok brojni deo oznake označava kvalitet tvrdog metala prema fizičko-mehaničkim osobinama.

Grupu tvrdih metala sa oznakom P karakteriše povišen sadržaj TiC+TaC, grupa K ima visok sadržaj volfram karbida (WC) i oko 2 % (TiC+TaC) dok grupa M ima oko 10 % (TiC+TaC) i veliki sadržaj WC.

U tabeli 1. dati su podaci o hemijskom sastavu i mehaničkim osobinama (tvrdoća i čvrstoća na savijanje) tvrdog metala na bazi WC. Proizvođači tvrdih metala imaju svoje komercijalne oznake za pojedine sorte tvrdih metala koji se zbog razlike u sastavu, strukturi i veličini karbidnog zrna se često dosta razlikuju u fizičko mehaničkim osobinama.

Tabela.1. Hemijski sastav i osobine tvrdog metala

	Oznaka		Sastav (%)				Osobine		
	ISO	US	WC	Co	TiC	(TaNb)C	g/cm <sup>3</sup>	Tvrdoća HV	Čvrstoća na savijanje N/mm <sup>2</sup>
P	P01	C8	50	6	35	7	8,5	1900	1100
	P05	C7	78	6	16	-	11,4	1820	1300
	P10	C7	69	8	15	8	11,5	1740	1400
	P15	C6	78	7	12	3	11,7	1660	1500
	P20	C6	79	8	8	5	12,1	1580	1600
	P25	C6	82	8	6	4	12,9	1530	1700
	P30	C5	84	9	5	2	13,3	1490	1850
	P40	C5	85	10	5	-	13,4	1420	1450
	P50	-	78	16	3	3	13,1	1250	2300
M	M10	-	85	6	5	4	13,4	1590	1800
	M20	-	82	8	5	5	13,3	1540	1900
	M30	-	86	10	4	-	13,6	1440	2000
	M40	-	84	10	4	2	14,0	1380	2100
K	K01	C4	97	3	-	-	15,2	1850	1450
	K05	C4	95	4	-	1	15,0	1780	1550
	K10	C3	92	6	-	2	14,9	1730	1700
	K20	C2	94	6	-	-	14,8	1650	1450
	K30	C1	91	9	-	-	14,4	1400	2250
	K40	C1	89	11	-	-	14,1	1320	2500

### 2.2.1.2. Tvrđi metali bez volframa

U cilju smanjenja i izbegavanja zavisnosti od deficitarnog volframa razvijeni su tvrđi metali bez WC. Oni se sastoje od TiC i TiN kao i vezivnog materijala na bazi Ni-Mo legure. Ovi materijali se uspešno primenjuju pri završnoj obradi ugljeničnih i legiranih čelika, ali ne i pri obradi specijalnih legura i visokolegiranih čelika. Tvrđi metali bez volfram karbida su krtiji i skloni su krzanju sečiva i primenjuje se pri završnoj obradi kada je manje opterećenje alata

### 2.2.1.2. Fizičko – mehaničke osobine tvrdog metala

Promenom sastava tvrdog metala menjaju se i njegova svojstva u funkciji zahteva odgovarajućih oblasti primene. Na njih utiču: vrsta karbida, veličina karbidnog zrna, količina vezivnog materijala i vrsta prevlake. Pri izboru tvrdog metala, za neku oblast primene, neophodno je utvrditi odnose koji postoje između različitih osobina. Poboljšanje otpornosti na habanje, tvrdoće, čvrstoće na pritisak i krtosti putem promene sastava tvrdog metala, što dovodi do smanjenja žilavosti i obratno. Zbog toga najčešće pri izboru tvrdog metala postoji kompromis između zahteva u pogledu žilavosti i otpornosti na habanje.

**Otpornost na habanje** - Otpornost na habanje je najvažnije i najznačajnije svojstvo tvrdog metala i njime se definiše postojanost na habanje. Ne postoje standardne metode merenja otpornosti na habanje, mada svaki proizvođač primenjuje neku od razvijenih metoda:

- a) Habanje se definiše kao zapremina pohabanog materijala,
- b) Kvalitet tvrdog metala je najmanja postojanost prema habanju i propisuje se nominalna vrednost (indeks) 100.

**Tvrdoća** - Tvrdoća tvrdog metala obično se meri Vickersovom metodom. Tvrđi metal sa krupno zrnastim WC (sa 2 % Co) ima tvrdoću 1800 HV što je za oko 40% veća tvrdoća u odnosu na najtvrđi čelik. Sastav tvrdog metala utiče na promenu tvrdoće tako da ona opada sa rastom sadržaja kobalta i povećanjem veličine zrna WC.

**Čvrstoća** - Svojstvo čvrstoće se definiše preko čvrstoće savijanja i čvrstoće na pritisak. Čvrstoća savijanja se povećava sa rastom sadržaja Co do 25 % (zapreminski) a sa daljim uvećanjem opada. Kod tvrdih metala, sa sitnozrnastim WC i malim sadržajem Co opada čvrstoća na savijanje. Čvrstoća na pritisak raste kod kvaliteta tvrdog metala sa malim sadržajem Co i sitno zrnastim WC u odnosu na tvrđi metal sa većim sadržajem Co i krupno zrnastim WC.

**Krtost** - Pod krtošću se podrazumeva otpornost materijala prema elastičnoj promeni oblika pri opterećenju. Definisane krtosti se iskazuje preko modula elastičnosti. Na promenu modula elastičnosti znatno veći uticaj ima sadržaj Co u odnosu na veličinu zrna WC.

**Žilavost** - Žilavost tvrdog metala se menja u zavisnosti od sastava tako da se sa povećanjem sadržaja Co povećava i žilavost. Pri malom sadržaju Co sorte tvrdog metala sa sitno zrnastim WC imaju manju žilavost.

**Toplotna provodljivost** - Provođenje toplote kod tvrdog metala je za oko dva puta veće nego kod nelegiranih čelika. Za WC/Co legure, kreće se od 80 - 120 W/mK, a za ostale tvrde metale 20 - 80 W/mK.

**Električna provodljivost** - Tvrđi metal je dobar provodnik odnosno ima niske vrednosti električnog otpora. Obično se vrednosti za WC/Co kreću od 15 - 20  $\mu\Omega$ , a za druge tvrde metale 20 - 100  $\mu\Omega$ .

### 2.2.2 Polikristali sa osnovom bornitrida

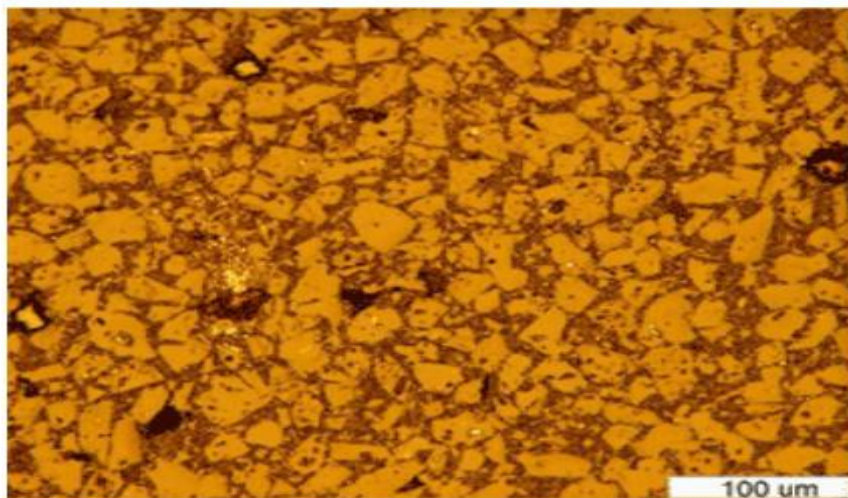
Polikristalni kubni bor nitrid (PCBN, obično CBN) je rezni alatni materijal pogodan za obradu teškoobradljivih (kaljenih) čelika struganjem, pogotovo prilikom proizvodnje preciznih obrataka u malim serijama jer ima veliku tvrdoću, visoku otpornost na habanje abrazijom i zadržava svoju tvrdoću i hemijsku stabilnost na visokim temperaturama generisanim suvom obradom. Korišćenje CBN alata kod tvrdog struganja za grubu i polu-završnu obradu je prepoznato kao tehnološki i ekonomski fleksibilan proces. Zbog slabe toplotne provodljivosti CBN-a toplota generisana tokom procesa rezanja je odvedena sa odvojenom česticom iz zone rezanja, eliminišući upotrebu SHP-a. Pored toga, suva završna obrada je najefikasnija u realizaciji procesa zbog strožijih propisa o zaštiti životne sredine i povećanja troškova vezanih za odlaganje SHP-a. [161].

Grupa visoko tvrdih materijala koji se primenjuju u obradi rezanjem materijala čine polikristalni dijamant (PCD) i kubni bor nitrid (CBN). Njihova tvrdoća i do 5 puta može nadmašiti prosečnu tvrdoću rezne keramike [63]. Uporedno sa otkrićem sinteze dijamanta, naučnici su otkrili da bor (B) i azot (N) mogu imati površinski centriranu (FCC) kubnu rešetku poput dijamanta. Jedinjenja borovog nitrida su poznata od 1920-ih godina, ali takođe kao mekan materijal, s heksagonalnom strukturom rešetke kao i grafit. Nakon brojnih eksperimenata sintezom CBN-a dobivena su vrlo tvrda jedinjenja kubne strukture, i gustine približne kao i dijamant. Nakon dalje procene utvrđeno je da je CBN gotovo savršen konkurent dijamantu u smislu materijala za izradu alata za obradu rezanjem. Za razliku od mnogih tvrdih metala, cermeta i keramike, zrnca CBN-a i dijamanta su direktno sinterovana bez dodavanja vezivne komponente. Kako su radne površine većine reznih alata uglavnom dvodimenzionalne sinterovani dijamant ili sinterovani CBN uglavnom se upotrebljavaju kao tanki slojevi (0,2 - 1 mm debljine) na pločicama od tvrdog metala. Takva kombinacija ima nekoliko prednosti, karakteriše je viša žilavost i niža cena u odnosu na pločice celokupno izrađene od PCD-a ili CBN-a. Mikrostruktura CBN-a prikazana je na slici 2.

U novije se vreme CBN-u dodaju i različita veziva uz dodatak različitih karbida s ciljem promene svojstava, iako BCBN (binderless cubic boron nitrid) odnosno kubni bor nitrid bez veziva

karakterišu neke vrlo bitne prednosti što ga čini povoljnijim odabirom ako se primenjuje za visoku brzinu obrade skidanjem materijala [63]:

- Velika toplotna provodljivost i izvrsna otpornost na toplotu, stoga je i minimizirana mogućnost toplotnih pukotina i krzanja na sečivu alata.
- Pogodan je za prekidne obrade, ima izvrsna mehanika svojstva (tvrdoća, čvrstoća) jer je izgrađen od čestica čija veličina ne prelazi  $0,5 \mu\text{m}$  i koje su čvrsto povezane jedna s drugom, bez veziva ili agensa i katalizatora na granicama zrna.
- Može se rezati i lemiti kako bi se dobili oblici pogodni za primenu za struganje i glodanje, kao i za izradu specijalnih lemljenih alata.



Slika 2. Mikrostruktura CBN-a [64]

Polikristali sa osnovom kubne modifikacije bornitrida se koriste za rezne alate namenjene za obradu čelika i legura na bazi železa. Oni imaju nešto nižu tvrdoću u odnosu na dijamant a odlikuju se visokom termičkom postojanošću na temperaturska ciklična dejstva i što je veoma važno imaju hemijsku inertnost ka železu koga sadrži većina materijala. Ovi materijali se mogu klasifikovati u sledeće podgrupe:

- a) Polikristal koji se sastoji iz sitnih čestica CBN sjedinjenih tankim slojevima metalnog veziva,
- b) Polikristal dobijen sintezom heksagonalnog bornitrida uz prisustvom katalizatora a jedan od najpoznatijih predstavnika ove grupe je *Elbor - R*,
- c) Polikristal dobijen sintezom bornitrida bez prisustva katalizatora,

- d) Kompozitni super tvrdi materijal dobijen sinterovanjem praha CBN sa dodacima dijamanta, oksida, karbida i drugih teško topljivih jedinjenja u uslovima visokih pritisaka. Ovaj materijal se primenjuje pri obradi bez udara, i
- d) Super tvrdi materijal koji se sastoji od dve – tri modifikacije bornitrida bez dodataka. Ovaj materijal se odlikuje visokim fizičko mehaničkim svojstvima i koristi se pri obradi kaljenog čelika, gvožđa i obojenih metala.

### 2.2.3. Dvoslojni kompozitni supertvrđi materijali

Najveći nedostatak polikristalnih supertvrđih materijala je visoka cena i složenost učvršćivanja na držaču alata. Poslednjih godina intenziviran je razvoj supertvrđih materijala sa što boljim fizičko - mehaničkim svojstvima i nižom cenom izrade. To je uslovalo industrijsku proizvodnju dvoslojnih supertvrđih kompozitnih materijala (DKSTM) dobijenih po pravilu sinterovanjem. Principijelno svojstvo ovog materijala je da se sinterovanje praha izvodi pri veoma visokom pritisku i temperaturi, na podlozi od tvrdog metala. DKSTM ima više prednosti u poređenju sa jednorodnim po zapremini supertvrđim materijalom: uprošćena tehnologija učvršćivanja reznog dela alata na držač alata, povećana je čvrstoća na udar a primena sloja supertvrđog materijala male debljine čini ih ekonomičnijom, obzirom da se pri oštrenju i preoštravanju alata značajno umanjuju bez povratni gubici veoma skupog supertvrđog materijala.

#### 2.2.3.1. Fizičko – mehanička svojstva

Dijamant (prirodni –D i sintetički- SD), kubni bornitrid (CBN) kao i polikristali na njihovoj osnovi pripadaju grupi supertvrđih materijala. Dijamant poseduje najveću tvrdoću od poznatih u prirodi metala i minerala, i ima visoku hemijsku i korozivnu postojanost. Termo postojanost prirodnih dijamanta je 700 – 750 °C, sintetički 600 – 700 °C, a iznad ovih temperature dijamant je hemijski aktivan u kontaktu sa železom i legurama na njihovoj osnovi. Dijamant je anizotropan po tvrdoći i čvrstoći što se objašnjava nejednakim brojem atoma u različitim kristalografskim ravnima. Koeficijent lunarnog širenja dijamanta je nekoliko puta manji u odnosu na tvrdi metal a oko 10 puta manji u odnosu na brzorezni čelik. U tabeli 2. data su fizičko-mehanička svojstva alatnih materijala za obradu rezanjem.



Tabela 2. Fizičko-mehanička svojstva alatnih materijala [158]

Materijal	Gustina g/cm <sup>3</sup>	Mikro tvrdoća (GPa)	Modul elasti. E(Gpa)	Čvrstoća na pritisak (Gpa)	Čvrstoća na Savijanje (GPa)	Toplotna provodljiv- ost λW/Mk (273K)	Koefici. linearnog širenja αx
Dijamant	3,48-3,56	100	900	2,0	0,21-0,49	146,3	0,9-1,45
CBN	3,45-3,47	90	720	0,5	-	41,8	2,5-4,7
Silicijum karbid	3,12-3,20	30-33	365	1,5	0,05-0,15	15,5	6,5
Titan karbid TiC	4,9	32	322	3,85	0,06-0,66	24,2	7,42
Volfram karbid WC	15,6	17,5	722	3,0	0,52-0,56	29,3	5,2-7,3
Tvrđi metal T15K6	11,0-11,7	28-30	520	3,9	1,15	27,2	6,0
Tvrđi metal	14,4-14,8	15,5- 16,9	540	4-5	1,6	58,5	5,0
Keramika CM332	3,9	20-23	380	0,9-1,5	0,3-0,45	4,18	7,9-8,2
Brzorezni čelik P18	8,5-8,7	13-14	220	36	3,7	24,2	11

Pri izboru alatnog materijala mora se voditi računa o tvrdoći obrađivanog materijala i njegovim hemijskim svojstvima kako bi se predupredili neželjeni procesi koji se mogu pojaviti pri interakciji. Jasno je da rezni alata radi u cikličnim promenljivim temperaturnim režimima, pa je zbog toga najidealniji materijal za rezni alat onaj materijal koji istovremeno poseduje i dovoljnu čvrstoću i tvrdoću.

U tabeli 3. prikazani su najčešće korišteni materijali na području obrade rezanjem i njihove fizičke osobine (na sobnoj temperaturi). S obzirom na navedene podatke, objašnjen je smisao kao i ideja o idealnom reznom materijalu koji bi objedinjavao svojstva lomne žilavosti i čvrstoće na savijanje brzoreznog čelika, visoku tvrdoću i otpornost na popuštanje koja karakteriše keramičke materijale.

Tabela 3. Fizička svojstva reznih materijala [66, 67]

	Brzorezni čelik	Tvrđi metal	Oksidna rezna keramika	Si3N4 rezna keramika	CBN	PCD
Gustina (g/cm <sup>3</sup> )	8,0-9,0	6,0-15,0	3,9-4,5	3,2-3,6	3,45	3,5
Tvrdoća (HV10/30)	700-800	1200-1800	1450-2100	1350-1600	3500	7000
Čvrstoća na savijanje (kN/mm <sup>2</sup> )	2500-4000	1300-3200	400-800	600-950	500-800	600-1100
Lomna žilavost (mN/mm <sup>2</sup> )	15-30	10-17	4-6	5-7	-	-
zatezna čvrstoća (kN/mm <sup>2</sup> )	2800-3800	3500-6000	3500-5500	-	-	9000
Modul elastičnosti (kN/mm <sup>2</sup> )	260-300	470-650	300-450	300-380	680	840
Koef. toplotnog širenja (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	9-12	4,6-7,5	5,5-8,0	3,0-3,8	1,2	0,8
Toplotna Provodljivost (W/mK)	15-48	20-80	10-38	30-60	445	780-1200

### 2.2.3.2. Svojstva i primena CBN-a i PCD-a

Već je rečeno kako je dijamant najtvrdi poznati materijal u prirodi, no uz to poseduje i karakteristike visoke toplotne povodljivosti, niskog koeficijenta toplotne ekspanzije, i nizak koeficijent trenja, što su ujedno karakteristike i CBN-a. Određene fizičke karakteristike navedenih materijala prikazane su u tabeli 2. Primena PCD-a ograničava se na obradu odvajanje neželjeznih legura, tvrde i meke gume, stakla, polimera i kamena. Na primer, potpuno je inertan pri obradi lakih metala kao što su aluminijum i cink. Za obradu železnih materijala se ne upotrebljava zbog visokog afiniteta ugljenika prema železu, ali i zbog relativno niskih temperatura pri kojima

sagoreva (900 °C), te mu se područje primene uglavnom svodi na temperature do max. 650 °C. Nedostaci su mu takođe i niska zatezna čvrstoća i čvrstoća na savijanje koje iznose 3000 N/mm<sup>2</sup> odnosno 600 N/mm<sup>2</sup>. Usprkos navedenim nedostacima, dijamant je vrlo raširen rezni materijal, pogotovo u automobilskoj i avionskoj industriji. Aluminijumove legure, kompoziti s metalnom matricom i vlaknima ojačani polimeri najbolje se obrađuju upravo PCD reznim pločicama. CBN je takođe inertan prema navedenim materijalima, no s obzirom na nižu tvrdoću ipak ne može konkurisati PCD-ina tom području primene. Za razliku od PCD-a, CBN omogućuje obradu svih vrsta materijala, pa tako i železnih legura pri temperaturama koje nadmašuju 1000°C. Takođe je manje reaktivan i pri obradi legura nikla i kobalta. Još jedna prednost CBN-a u odnosu na PCD jest značajno manja sklonost oksidaciji. Podaci o Knoopovoj tvrdoći pojedinih reznih materijala prikazani su u tabeli 4, [61].

Tabela 4. Poređenja Knoopove tvrdoće različitih reznih materijala [61].

Materijal	Tvrdoća po Knoopu (kg/mm <sup>2</sup> ), 25°C
PCD	6000 - 11000
CBN	4000 – 5000
Borov karbid (B <sub>4</sub> C)	2200
Volframov karbid (WC)	2200
Aluminijumov oksid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2000
Silicijumov karbid (SiC)	1800 – 3900
Visokotvrđi čelici	400 - 800

### 2.3. Termička obrada čelika

U praksi se izbor materijala vrši prema njegovim mehaničkim i fizičkim osobinama. Često se tražena osobina koja zadovoljava visokokvalitetni i skupi materijal (visokolegirani metali, superlegure itd.) mogu postići izborom jeftinijeg manje kvalitetnog materijala prilagođenog toplotnom i mehaničkom obradom. Ova celina se bavi razmatranjem čelika čijom se termičkom obradom njegove osobine mogu znatno menjati. Termička obrada se najviše izvodi na čeliku [68].

Osobine i ponašanje čelika u proizvodnim procesima u toku eksploatacije zavise od sastava, strukture, načina prerade i termičke obrade kojoj mogu biti podvrgnuti. Važna mehanička svojstva kao što su zatezna čvrstoća, tvrdoća, žilavost i plastičnost mogu se podešavati u širokom rasponu, promenom hemijskog sastava, promenom veličine kristalnog zrna, te stvaranjem novih faza u procesu termičke obrade. Termičkom obradom nazivaju se procesi koji se sastoje od zagrevanja do određenih temperatura, zadržavanja na tim temperaturama određeno vreme, a zatim hlađenja određenom brzinom. Promena strukture i stvaranje novih faza u procesu termičke obrade čelika događaju se u čvrstom stanju, a baziraju se na: svojstvu alotropske modifikacije železa, na promeni rastvorivosti ugljenika i legirajućih elemenata u rešetki železa te na sposobnosti atoma da se difuzno premeštaju na povišenim temperaturama. Čelik je najvažniji konstrukcioni materijal u gotovo svim područjima tehnike. Široka primena čelika u savremenoj civilizaciji zasniva se na njegovim dobrim svojstvima (velika čvrstoća, tvrdoća, elastičnost, otpornost prema koroziji i

toploti, toplotna povodljivost i dr.), a tih svojstava nemaju drugi, jednako pristupačni i razmjerno jeftini materijali. Osobine čelika mogu se menjati legiranjem, termičkom obradom (npr. kaljenjem, žarenjem, otpuštanjem), površinskom obradom (cementiranjem, cijanizacijom, nitriranjem), hladnim oblikovanjem ili nanošenjem prevlake, pa se tako čelici mogu prilagoditi svakoj vrsti primene. Čelik se može oblikovati u toplome ili hladnome stanju, valjanjem, presovanjem, kovanjem, rezanjem i sl.

Cilj termičke obrade čelika jeste da se promene neke njihove mehaničke i fizičko-hemijske osobine, pre svega faznim i strukturnim promenama materijala u čvrstom stanju; te su promene uglavnom funkcija temperature i vremena [69, 70]

#### 2.4. Primena i karakteristike kaljenih čelika

Veoma brz razvoj automobilske, avionske, raketne i nuklearne industrije, nametnuo je potrebu korišćenja novih materijala specifičnih karakteristika. U ovom periodu proizveden je niz novih legura koje se odlikuju velikom zateznom čvrstoćom, otpornošću na visoke temperature i tvrdoćom, koje su, našle primenu i u drugim granama industrije, naročito pri izradi određenih vrsta alata. Danas se široko primenjuju legirani čelici za izradu delova koji su u određenim uslovima izloženi temperaturi do 1000°C, legure na bazi nikla do 1350°C, a legure na bazi kobalta do 1450°C.

Teško topive legure na bazi molibdena i niobiuma zadržavaju svoja mehanička svojstva na temperaturi do 1800°C, a na bazi volframa i do 2300°C. Obrada delova od ovakvih materijala konvencionalnim postupcima obrade je veoma teška pa čak i nemoguća. Veliki deo ovih materijala imaju povišena mehanička i specifična fizička svojstva koje smanjuje njihove tehnološke karakteristike sa stanovišta oblikovanja i obrade. To znači, da su ovi materijali teško obradljivi u gotovo svim obradnim procesima pa i pri obradi rezanjem. Primena novih materijala uslovljava usavršavanje postojećih i razvoj novih tehnika i tehnologija za njihovu obradu.

Problem efikasne obrade teškoobradljivi materijala su tema i danas mnogobrojnih istraživanja, s obzirom na stalno uvođenje novih materijala kao i razvoj novih postupaka obrade, mašina alatki i materijala za rezne alate. Razvoj novih materijala za rezne alate na bazi tvrdih metala i kubnog bornitrida poboljšanih karakteristika omogućio je efikasnu i ekonomičnu obradu konstrukcijskih i alatnih čelika u termički obrađenom stanju (tvrdoće od 30-67 HRC i velike čvrstoće). Na ovaj način je moguće izvesti obradu na strugu, uz postizanje visoke tačnosti i male hrapavosti obrađene površine, kao zamena za skuplju obradu brušenjem. Pri tome se postižu značajni tehnološko-ekonomski efekti, među kojima su najvažniji [32]:

- Smanjenje vremena i troškova obrade (u odnosu na završnu obradu brušenjem),
- Izvodljiva je obrada struganjem više površina u jednom stezanju, što je pri brušenju retko moguće, izbegavaju se efekti koji se javljaju pri obradi brušenjem (pojava

strukturnih promena usled pregrevanja površinskog sloja, zaostali naponi i naprsline) i poboljšavaju se eksploatacijske karakteristike delova.

Obradu rezanjem čelika velike čvrstoće i tvrdoće karakterišu sledeće karakteristike [32]:

- Mali stepen plastičnog deformisanja materijala pri formiranju strugotine, tako da se radi rezanja najvećim delom troši na elastično deformisanje i trenje po kontaktnim površinama alata,
- Odsustvo naslage na grudnoj površini alata, ukazuje na intenzivnije habanje po leđnoj u odnosu na habanja na grudnoj površini alata,
- Mala površina kontakta između strugotine i grudne površine alata, a zbog velike čvrstoće i tvrdoće materijala obratka javljaju se visoka mehanička i termička opterećenja alata (visoka temperatura i velike vrednosti otpora rezanja).
- Otpor rezanja je oko 1,5-2 puta veći nego pri obradi čelika u termički neobrađenom stanju, a pri tome je otpor prodiranja  $F_2$  veći od glavnog otpora rezanja  $F_1$ . Radi toga se obrada kaljenih čelika može izvoditi efikasno samo na mašinama povećane krutosti (posebno u pravcu otpora prodiranja).
- Obradu je potrebno izvoditi pri povećanoj brzini rezanja, koja uslovljava visoku temperaturu rezanja, dovoljnu da se obezbedi znatnije sniženje čvrstoće i tvrdoće materijala obratka u zoni smicanja (kao dokaz visoke temperature rezanja jeste formiranje usijane strugotine). Radi vrlo velikog toplotnog i mehaničkog opterećenja alata obrada kaljenih čelika se može efikasno izvoditi samo korišćenjem vrlo kvalitetnih materijala alata.

#### 2.4.1. Osobina kaljenih čelika i osnovni uzroci za njihovu lošu obradljivost rezanjem

Obrada teškoobradljivih (kaljenih) čelika struganjem nudi prednosti kao što su: visoka fleksibilnost, kompletna obrada u jednom stezanju i mogućnost optimizacije postupaka obrade sa uštedama energije, kraće vreme izrade, veća proizvodnost, smanjenje broja potrebnih mašina, poboljšan integritet obrađene površine, eliminacija SHP sredstva (u mnogim slučajevima), smanjenje broja završnih operacija, povoljnije oblike strugotine, kao i eliminisanje eventualnih termičkih deformacija obratka usled termičke obrade.

Mašine alatke moraju da poseduju krutost sposobnu da apsorbuje veliku dinamičku silu prodiranja, koja može biti dva puta veća nego kod tipičnih obrada struganjem. Sa metalurškog stanovišta, materijali sa malim odstupanjem tvrdoće (manjim od 2 HRC jedinice) po dubini rezanja, omogućavaju najbolji proces obrade

Kao najčešće upotrebljavani kaljeni čelici pri obradi rezanjem (čelici velike čvrstoće i tvrdoće) u najvećoj meri zavise od hemijskog sastava koji termičkom obradom obezbeđuje potrebna eksploatacijska svojstva ovih materijala, kao na primer otpornost na visokoj temperaturi, visoka čvrstoća i tvrdoću itd.

Struktura materijala sa vrlo tvrdim karbidima i nitridima obezbeđuju visoki sadržaj legirajućih elemenata (Cr, Ni, Co, Mo, W, Ti) prisutne su i intermetalne faze tipa  $\text{Ni}_3\text{Al}$  i  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  usled čega se pri obradi javlja intenzivno abrazivno habanje alata, što je posledica niske postojanosti odnosno smanjenja rezne sposobnosti pri obradi rezanjem.

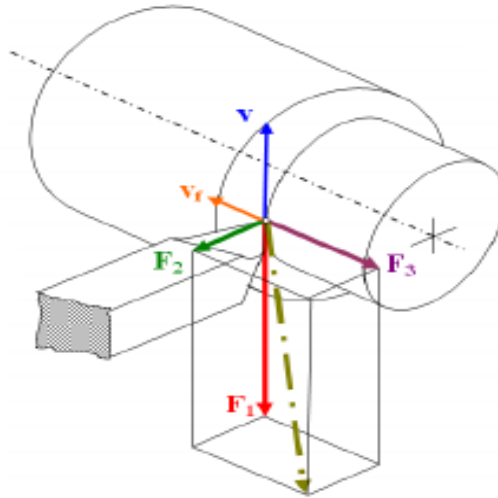
Pored toga vrlo važan uzrok loše obradljivosti ovih materijala jeste i zadržavanje njihove polazne tvrdoće i čvrstoće i pri visokim temperaturama i zbog toga se javljaju veliki otpori i temperature rezanja a time i jako mehaničko i termičko opterećenje alata. Posledica visoke temperature rezanja je niska toplotna provodljivost kaljenih čelika (čelika velike čvrstoće i tvrdoće). To znači da se mala količina toplote iz zone rezanja odvodi preko obratka odnosno javlja se intenzivno zagrevanje reznog dela alata i time snižava reznu sposobnost alata odnosno njegovu postojanost.

Pojedine vrste visokolegiranih kaljenih čelika, imaju izraženu sklonost ka pojavi ojačanja u procesu rezanja usled čega nastaje povećanje otpora i temperature rezanja, a time i povećanje habanja alata. Kao posledica ojačanja materijala u zoni rezanja kao i pojave naslaga na radnoj površini alata pojavljuje se neravnomernost u procesu formiranja strugotine, a kao posledica nastaju vibracije pri rezanju i dinamičko opterećenje reznog alata (intenzivno krzanje sečiva i povećanje habanja alata).

## 2.5. Otpori rezanja pri obradi kaljenih materijala

U procesu obrade rezanjem javljaju se sile (otpori) rezanja koji se, mogu razložiti na tri ortogonalna pravca (slika 3):

- $F_v = F_1$  glavni otpor rezanja (tangencijalni, u pravcu brzine glavnog kretanja),
- $F_p = F_2$  otpor prodiranju (radijalni),
- $F_s = F_3$  otpor pomoćnom kretanju (aksijalni).



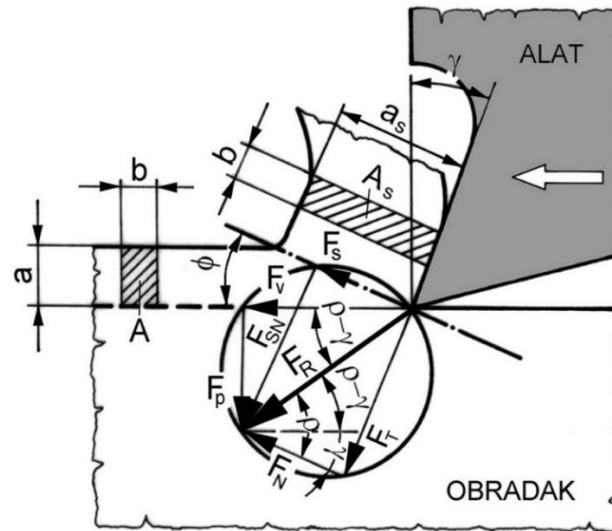
Slika 3. Razlaganje otpora rezanja pri struganju na ortogonalne komponente

Rezultujuća sila  $F_R$  (slika 4) razlaže se na [142]:

- tangencijalnu silu (silu trenja)  $F_T$  (u ravni grudne površine) i normalnu  $F_N$  (u ravni normalnoj na grudnu površinu reznog klina)
- silu u ravni smicanja (silu smicanja)  $F_S$  i normalnu silu  $F_{SN}$  (u ravni normalnoj na ravan smicanja),
- glavnu silu (glavni otpor rezanja)  $F_v$  (u pravcu brzine rezanja) i silu (otpor pomoćnom kretanju)  $F_s$  (u pravcu pomoćnog kretanja). Pri ortogonalnom rezanju komponenta  $F_{xn}$  postaje  $F_s$ .

Polazeći od pretpostavki koje je uveo Merčant [142] i plana otpora u zoni rezanja (slika 4.), moguće je napisati sledeće matematičke zavisnosti za otpore rezanja:

$$F_R = \frac{F_v}{\cos(\rho-\gamma)} = \frac{F_T}{\sin\rho} = \frac{F_N}{\cos\rho} = \frac{F_S}{\cos(\phi+\rho-\gamma)} = \frac{F_{SN}}{\sin(\phi+\rho-\gamma)} \quad (1.1)$$



Slika 4. Najvažnije komponente otpora rezanja u normalnoj ravni [142] .

Komponente otpora rezanja značajne za proračun snage toplotnih izvora prikazane su na slikama 3 i 4, a računaju se na osnovu izraza [141, 142]:

$$F_T = F_v \frac{\sin \rho}{\cos(\rho - \gamma)} = \mu F_N, \quad (1.2)$$

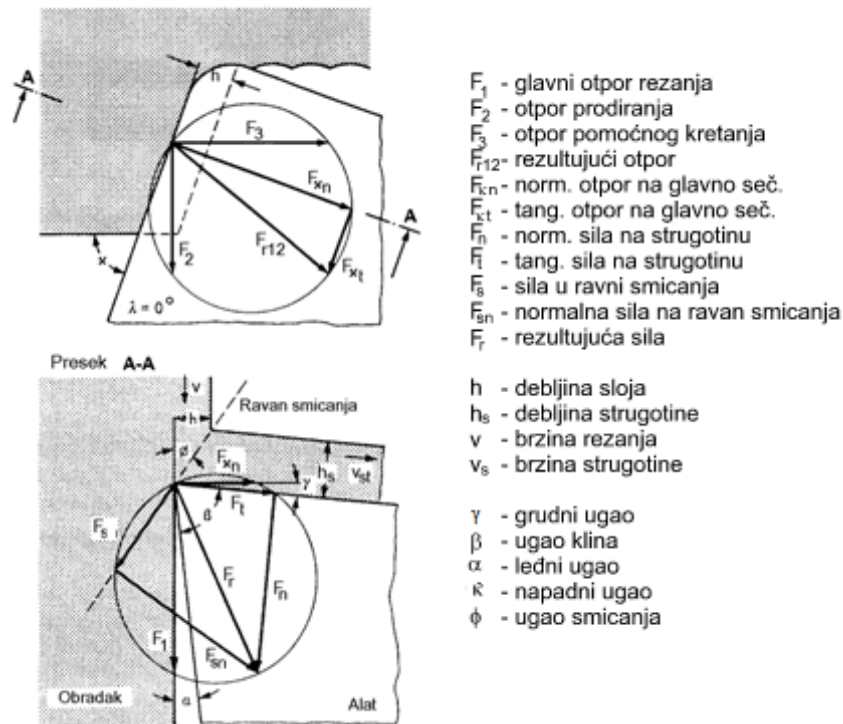
$$F_N = F_v \frac{\cos \rho}{\cos(\rho - \gamma)}, \quad (1.3)$$

$$F_S = F_v \frac{\cos(\phi + \rho - \gamma)}{\cos(\rho - \gamma)} \quad (1.4)$$

$$F_{SN} = F_v \frac{\sin(\phi + \rho - \gamma)}{\cos(\rho - \gamma)} \quad (1.5)$$

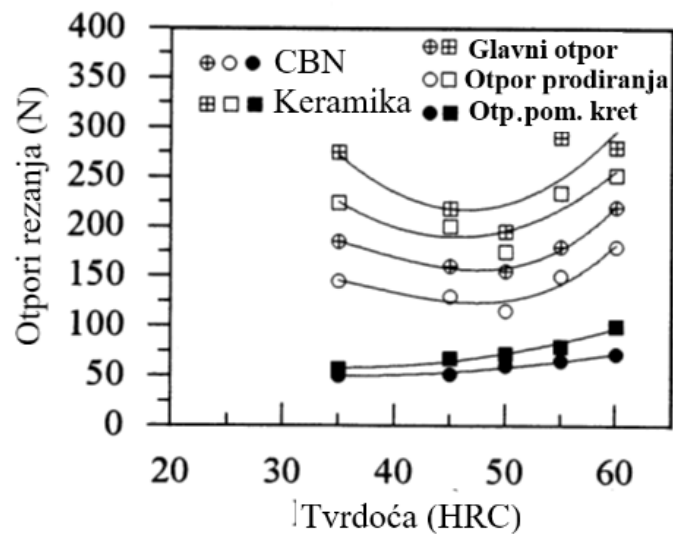
Ako je napadni ugao  $\kappa \neq 0$  (sl. 5.), javljaju se sve tri komponente otpora: tangencijalna  $F_v = F_1$ , radijalna  $F_p = F_2$  i aksijalna  $F_s = F_3$ .





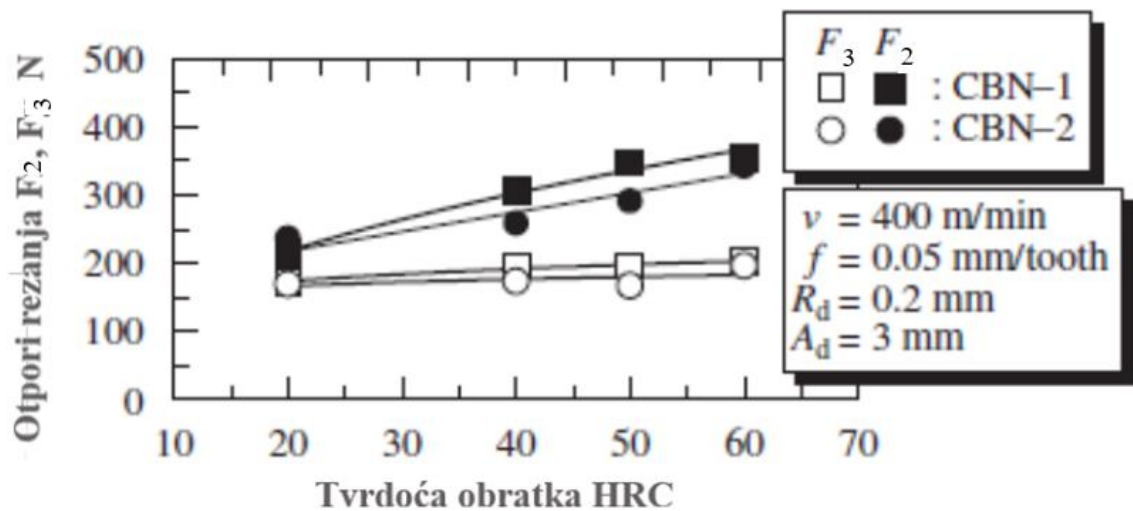
Slika 5. Komponente otpora rezanja – koso rezanje [141]

Zavisnost promene komponenti otpora rezanja od tvrdoće materijala obratka u dijapazonu 35 do 60 HRC ispitivan je materijal alata od keramike i CBN i prikazana je na slici 6., najmanje vrednosti sila  $F_1$  i  $F_2$  se postižu pri obradi struganjem materijala tvrdoće 45 HRC, pokazano je u [153].



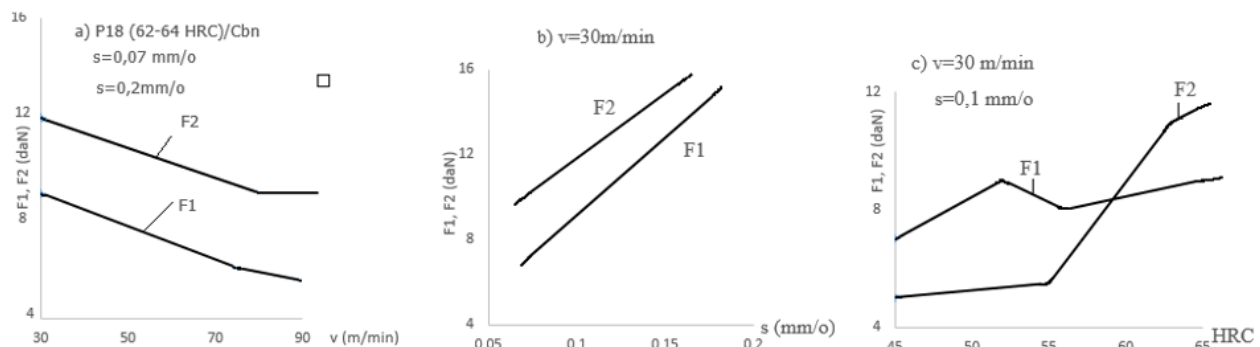
Slika 6. Promena komponenti otpora rezanja u zavisnosti od tvrdoće materijala obratka [153]

Zavisnost promene komponenti otpora rezanja od tvrdoće materijala obratka u dijapazonu 20 do 60 HRC ispitivan je za materijal dva tipa alata od CBN i otpora pomoćnog kretanja i otpora prodiranja prikazana je na slici 7., pokazano je u [115]. Sa povećanjem tvrdoće obratka obe komponente otpora rastu, pri tome više raste otpor prodiranja.



Slika 7. Uticaj tvrdoće obratka na otpore rezanja dva tipa alata od CBN [115]

Otpor rezanja pri obradi kaljenih čelika je znatno veći nego kod obrade čelika u termički neobrađenom stanju, s tim da kod završne obrade otpor prodiranja  $F_2$  veći od glavnog otpora rezanja  $F_1$ . Kao primer na slici 8. prikazane su zavisnosti komponenti otpora rezanja  $F_1$  i  $F_2$  od brzine rezanja (a), koraka (b) i tvrdoće materijala (c) dobijeni pri obradi na strugu brzoreznog čelika P18 (odgovara Č.6880) pločicama od CBN-a. Geometrija alata je bila  $\gamma_o=0^\circ$ ,  $\alpha_o=8^\circ$ ,  $\kappa=45^\circ$ .

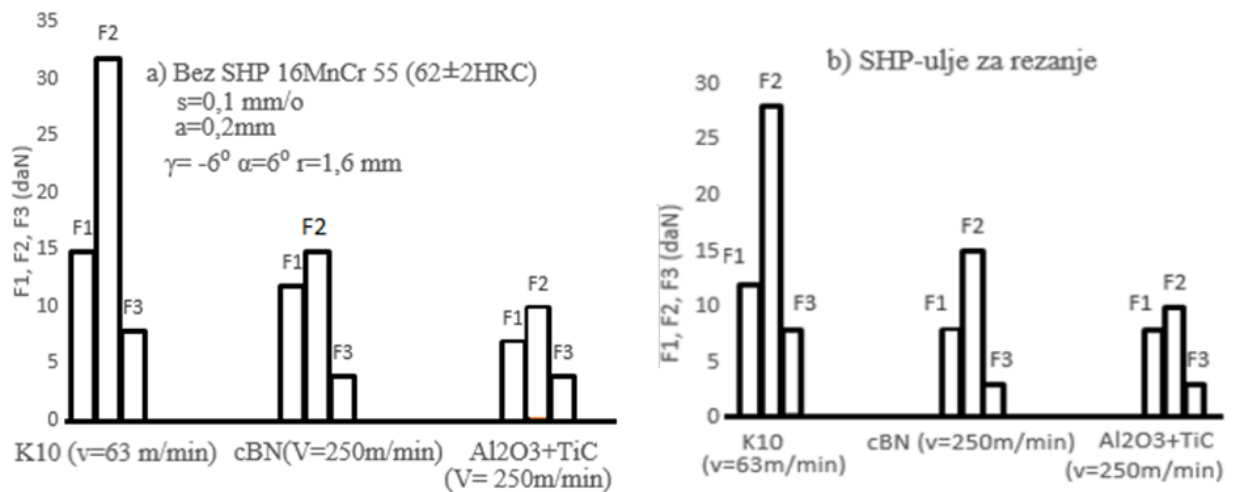


Slika 8. Zavisnosti komponenti otpora rezanja  $F_1$  i  $F_2$  od brzine rezanja (a), pomaka (b) i tvrdoće materijala obratka (c) pri obradi brzoreznog čelika na strugu alatom od CBN [32].

Sa povećanjem brzine rezanja smanjuju se komponente otpora rezanja zbog porasta temperature i omekšanja materijala obratka, dok sa porastom koraka rastu i komponente otpora rezanja. Sa povećanjem tvrdoće materijala obratka komponenta otpora rezanja  $F_1$  ostaje približno konstantna dok se komponenta  $F_2$  znatnije povećava, i pri prekoračenju tvrdoće od oko 58 HRC postiže se  $F_1 > F_2$ .

Veličine komponenti otpora rezanja zavise i od vrste materijala alata, a s obzirom na razlike njihovih fizičko-mehaničkih osobina (posebno koeficijenta trenja na kontaktnim površinama alata).

Na slici 9. [56] dato je poređenje veličine komponenti otpora rezanja  $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$  dobijene pri obradi na strugu kaljenog čelika za cementaciju 16MnCrS5 (odgovara Č4381) tvrdoće 62 HRC alatima sa reznim pločicama od tvrdog metala K10, kubnog bornitrida PKB i mešane keramike  $Al_2O_3 + TiC$ , i to: bez hlađenja (a) i pri hlađenju uljem za rezanje (b).

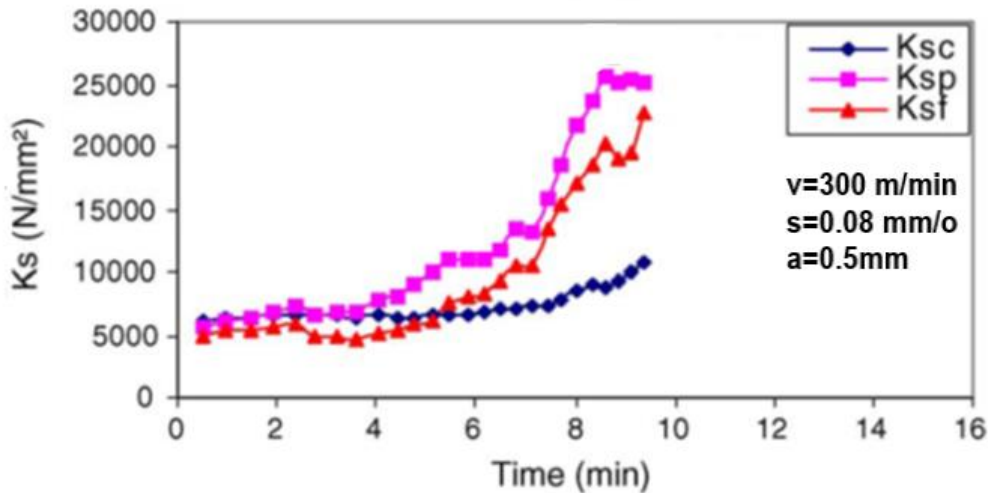


Slika 9. Upoređivanje komponenti otpora rezanja  $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$  dobijenih pri obradi na strugu čelika za cementaciju u kaljenom stanju alatima sa pločicama tvrdog metala, kubnog bornitrida i mešane keramike [56]

Vidi se da su najmanje veličine komponenti otpora rezanja bile pri radu noževima sa raznim pločicama od mešane keramike, a zatim kod kubnog bornitrida (CBN).

Znatno veće komponente otpora rezanja dobijene su pri obradi alatima sa tvrdim metalom K10 što se objasniti obradom sa manjom brzinom rezanja. Pored toga, uočava se da je neznatan uticaj hlađenja na komponente otpora rezanja, u odnosu na obradu bez hlađenja slika 9.

Na slici 10. je prikazana zavisnost specifičnog otpora rezanja pojedinih komponenti od vremena rezanja za uslove  $v = 300$  m/min;  $a = 0,5$  mm;  $s = 0,08$  mm/o, struganje na suvo, materijal alata CBN, materijal obratka čelik tvrdoće 52 HRC, [132]



Slika 10. Zavisnost specifičnog otpora rezanja od vremena rezanja, struganje na suvo, materijal alata CBN, materijal obratka čelik tvrdoće 52 HRC [132]

## 2.6. Temperatura rezanja

Na početku procesa rezanja toplota se povećava do neke maksimalne vrednosti, a istovremeno se toplota počinje odvoditi preko strugotine, obratka, alata i okoline. Nastupa ravnotežno stanje između nastale i odvedene količine toplote kao rezultat kvazistacionarnog toplotnog polja. Toplota je u pojedinim tačkama alata, strugotine i obratka bila konstantna. Visoka temperatura rezanja, koja vlada u zoni rezanja, pogoduje oslobađanju latentne energije [149]. Toplotna energija koja se pri ovome generiše može biti osetna ili latentna. Osetna toplota se manifestuje kroz porast temperature, dok se latentna toplota akumulira u obliku reverzibilne transformacije u materijalu, kao što su pojave transformacija mikrostrukture ili topljenje.

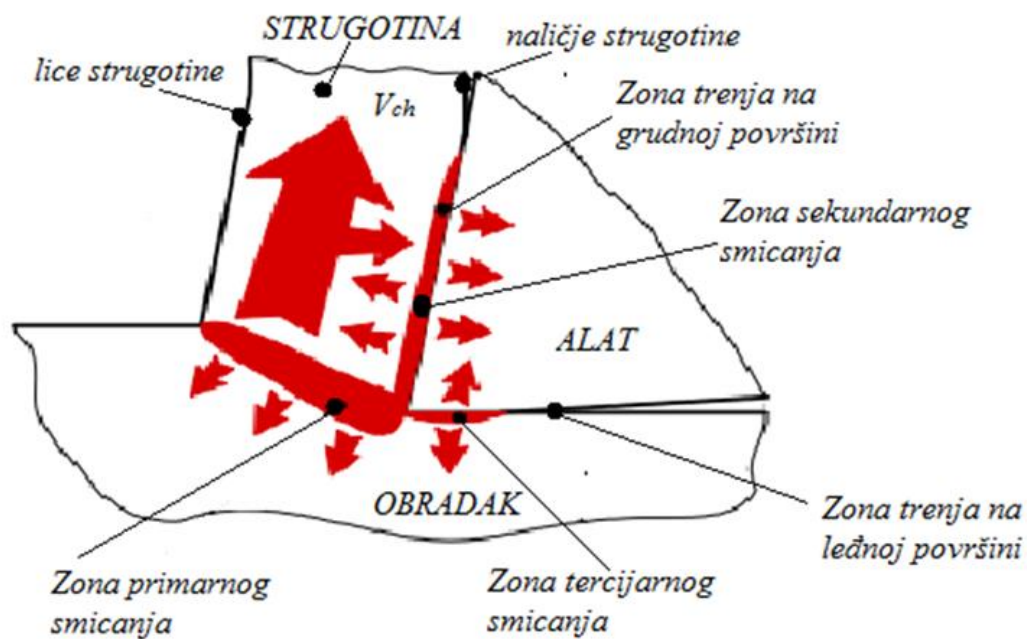
U zoni rezanja razlikuju se pet zona i to: primarnog, sekundarnog i tercijarnog smicanja, i zone trenja na grudnoj i leđnoj površini (slika 11.). Primarna zona smicanja je jedan paralelogram čija se snaga izvora opisuje homogenom raspodelom. Sekundarna i tercijarna zona smicanja imaju nehomogenu raspodelu snage toplotnih izvora, po dubini, koja opada udaljavanjem od graničnih površina. Dve zone trenja imaju takođe promenljivu snagu po dužini kontakata.

Energija koja se troši u procesu rezanja može se podeliti na:

- energiju (rad) utrošenu na elastičnom deformisanju materijala,

- energiju (rad) utrošenu na plastično deformisanju materijala,
- energiju (rad) utrošenu na odvajanje materijala,
- energiju (rad) utrošenu na savlađivanje sila trenja i
- kinetičku energiju.

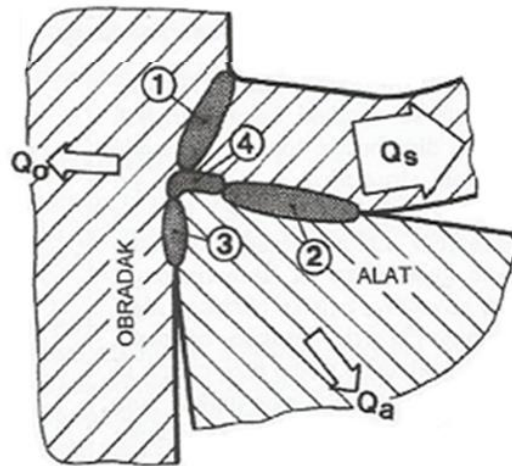
Najveći deo energije se troši na plastično deformisanje materijala u procesu formiranja strugotine u zonama smicanja. Druga po veličini komponenta se troši na savlađivanje otpora trenja. Deo energije u procesu utrošen pri formiranju novih površina na elastično deformisanje i odvajanje materijala obično se zanemaruje [145, 146]. Takođe se zanemaruje deo kinetičke energije koji se troši na promenu pravca impulsa materijala u primarnoj zoni smicanja [147, 148].



Slika 11. Osnovne zone deformisanja i trenja u procesu nastajanja strugotine [144].

U praksi su vrlo važni podaci o temperaturnom polju i temperaturama u pojedinim delovima zone rezanja, naročito na alatu, nego podaci o količinama toplote. Skoro celokupna dovedena mehanička energija transformiše se u zoni rezanja, putem elastičnih i plastičnih deformacija, trenja na kontaktnim površinama alata i unutrašnjeg trenja u materijalu u toplotnu energiju. Pri tome se pretpostavlja da se rezanje odvija bez vibracija, a da je kinetička energija strugotine i potencijalna energija elastičnog deformisanja kristalne rešetke u obratku, alatu i strugotini zanemarivo mala. Pretvaranje mehaničke energije u toplotnu se odvija u četiri karakteristične zone kako je prikazano na slici 12. [113], pri čemu se pojedine zone delimično preklapaju.

Pomoću Langražeovih jednačina u radu [74] je opisan proces rezanja preko 3D toplotno-elastično-plastičnog modela pomoću kojeg se metodom konačnih razlika određuju toplotni izvori pri rezanju, takođe prikazuje i relacije za određivanje prenosa toplote za 3D model. Ovde je razmatrana i deformacija strugotine i uticaj temperature rezanja na gustinu materijala alata i sile pri rezanju.

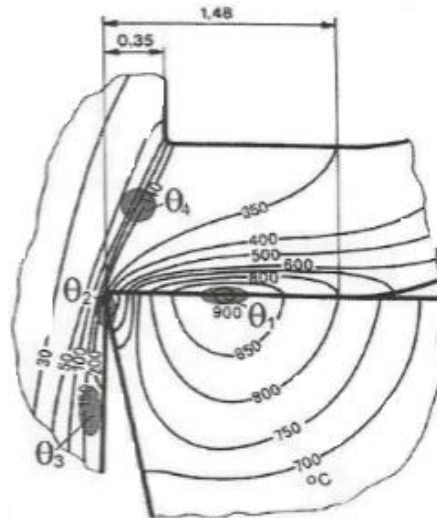


Slika 12. Šema nastajanja i distribucija toplotne energije pri rezanju [113]. 1-toplotna deformacija u ravni smicanja; 2-toplota trenja na grudnoj površini; 3-toplota trenja na leđnoj površini; 4-toplota deformacije i unutrašnjeg trenja u kočionom sloju

U zoni smicanja-1 i u kočionom sloju-4 vrši se deformacija materijala obratka. Toplota trenja nastaje u zonama kontakta grudne površine alata i strugotine-2 i leđne površine alata i obratka-3, kao i kočionom sloju-4 zbog unutrašnjeg trenja slojeva materijala strugotine. Ove zone deformacije i trenja predstavljaju toplotne izvore pri rezanju [113, 119]. Količina toplote koja nastaje u pojedinim izvorima ni do sada nije tačno određena. Prema Firegeu (G. Vieregge) [118], pri obradi konstruktivnog čelika debljine strugotine veće od 0,4mm, 60-80 % rada rezanja se troši na plastičnu deformaciju, 0-4 % na razdvajanje, 0-8 % na trenje po leđnoj površini, a ostatak (8-28 %) na trenje po grudnoj površini. Od navedenih toplotnih izvora se toplotna energija odvodi preko strugotine  $Q_s$ , alata  $Q_a$ , i obratka  $Q_o$  i to provođenjem, zračenjem i konvekcijom, slika 12. Više od 99,5 % energije (mehaničkog rada) utrošeno na deformisanje materijala obratka i savlađivanje sila trenja na kontaktnim površinama reznog klina alata (grudnoj i leđnoj) pretvara se u toplotu [120, 164].

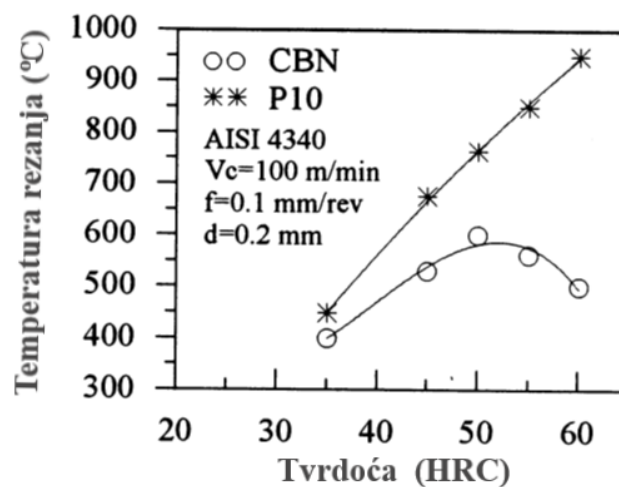
O metodama za merenje temperatura pri obradi rezanjem i mogućnosti njene tehnološke i senzorske primene pri definisanju mehaničkih i toplotnih karakteristika materijala alata i obradka govori se u [121]. U ovom radu daje se ocena nedavno razvijene polu-empirijske metode za predviđanje postojanosti, kontaktne dužine strugotine i temperature. Ovi parametri i empirijske relacije se koriste da bi se izračunala temperatura rezanja i postojanost alata. Autor kroz eksperimentalne rezultate verifikuje ove metode i koristi rezultate za predviđanje deformacije

alata. Na kraju se porede eksperimentalni rezultati sa rezultatima dobijenim analitičkim putem. Na osnovu kalorimetrijskih merenja utvrđeno je da se daleko najveći deo razvijene toplotne energije odvodi preko strugotine, znatno manji deo preuzima obradak, dok se preko alata odvodi najmanje toplotne energije koja nastaje pri rezanju. Temperaturno polje na alatu, obratku i strugotini je prikazano na slici 13.



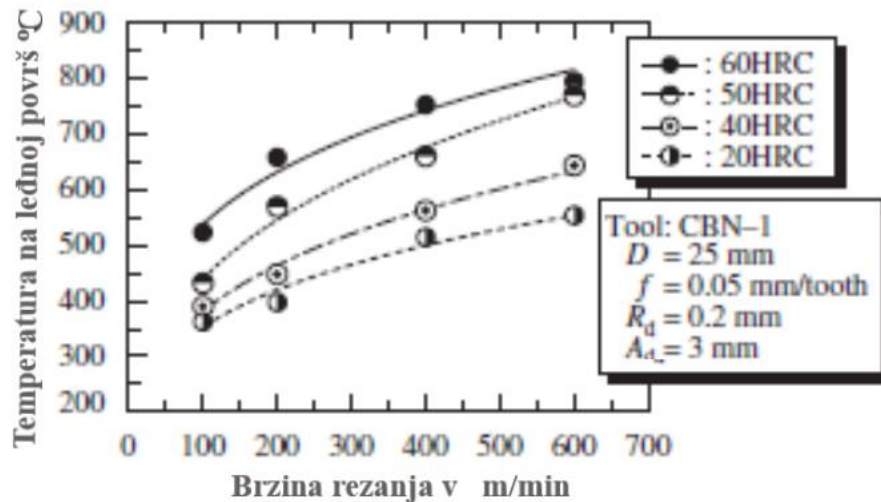
Slika 13. Uspostavljanje temperaturnog polja na alatu, obratku i strugotini [113].

Istraživanja promene temperature rezanja u zavisnosti od tvrdoće obradka urađeno je za dve vrste alatnog materijala tvrdi metal P10 i CBN. Dobijen je stalni porast temperature rezanja pri obradi sa alatom od TM P10 sa porastom tvrdoće materijala dok je pri obradi sa alatom od CBN dobijena je maksimalna temperatura pri obradi obratka tvrdoće oko 50 HRC slika 14, [153].

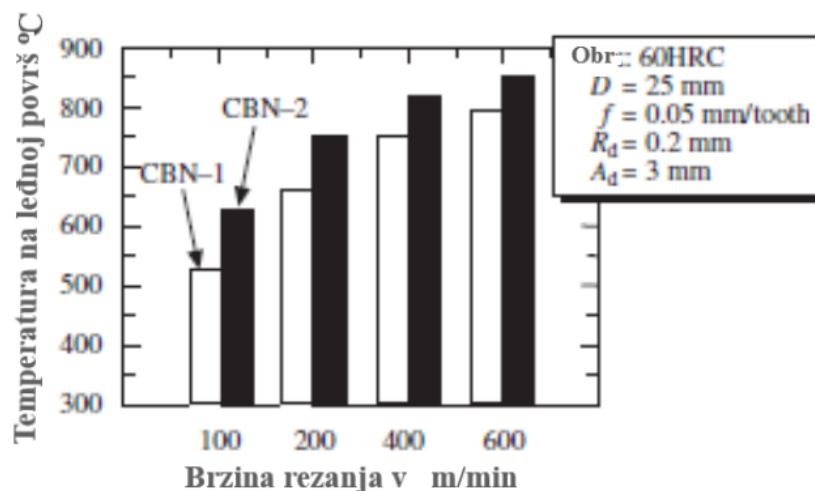


Slika 14. Zavisnost temperature rezanja od tvrdoće obratka pri obradi sa alatima od TM i CBN, [153]

Na slici 15 je prikazana zavisnost temperature na leđnoj površini alata od brzine rezanja pri obradi materijala obratka različite tvrdoće od 20 HRC do 60 HRC alatom od CBN. Dobijeno je značajno povećanje temperature rezanja sa povećanjem brzine rezanja, a takođe i veliko povećanje temperature je dobijeno sa povećanjem tvrdoća obratka [115]. Uticaj brzine rezanja na temperaturu na leđnoj površini pri obradi alatima od dve vrste CBN i obratka od čelika 50 HRC, dobiven je porast habanja sa povećanjem brzine rezanja od 100 600 m/min, prikazano je na slici 16.



Slika 15. Zavisnost temperature na leđnoj površini alata od brzine rezanja pri obradi materijala obratka različite tvrdoće alatom od CBN, [115]



Slika 16. Uticaj brzine rezanja na temperaturu na leđnoj površini pri obradi alatima od dve vrste CBN, [115]



## 2.7. Habanje alata

Gubitak reznih svojstava alata je posledica neminovnog habanja (trošenja) alata u procesu rezanja. Pojava habanja alata je još uvek kompleksan, nedovoljno i nepotpuno istražen fenomen, uprkos veoma obimnim i raznovrsnim eksperimentalnim i teorijskim istraživanjima. Habanje alata je nepoželjan i nepovratan proces za alat, pri čemu se smanjuju njegova rezna svojstva. U obradi metala rezanjem, na habanje ledne površine alata utiču: materijal alata i obratka, kontaktna naprezanja i temperatura rezanja. Pohaban alat utiče izlazne na karakteristike procesa: kvalitet obrađene površine i uslovljava promenu komponenata otpora rezanja na osnovu kojih se može oceniti postojanost alata. Poznavanje faktora koji utiču na habanje alata od izuzetne je važnosti za modelovanje procesa rezanja i određivanje postojanosti alata. Kod habanja reznog alata, prisutni su svi vidovi habanja: plastična deformacija, krzanje, abrazino, adheziono, difuzno, i oksidaciono habanje. Ulazni parametri koji utiču na habanje alata mogu se podeliti u tri osnovne grupe:

- parametri vezani za obradak,
- parametri vezani za alat i
- parametri vezani za uslove obrade

Važniji parametri kojima se karakteriše obradak, a imaju uticaj na habanje alata, mogu se svrstati u dve grupe :

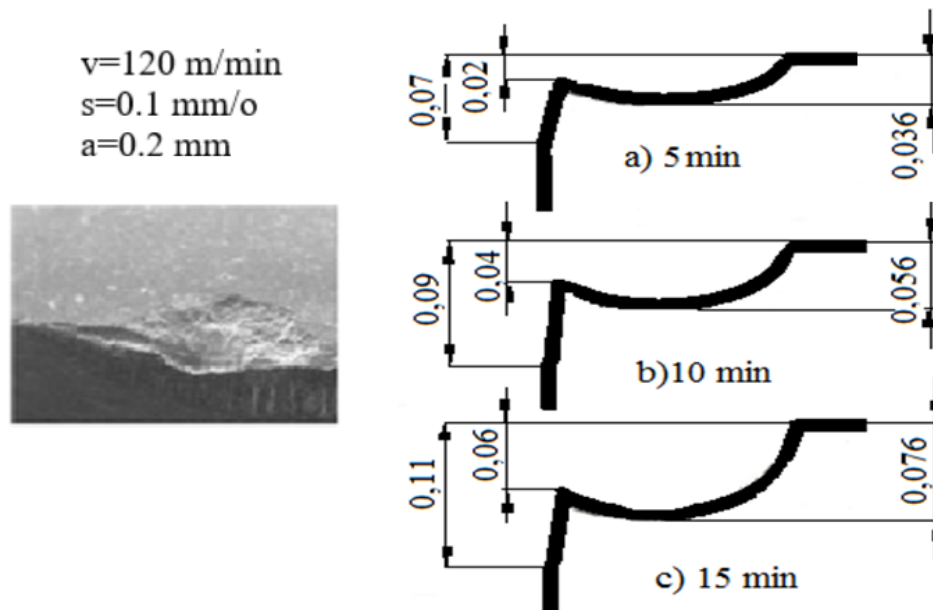
- fizičko-hemijska svojstva obratka,
- geometrijska obeležja obratka

Od fizičko-hemijskih svojstava značajan uticaj imaju tvrdoća, čvrstoća, žilavost, hemijska stabilnost, inertnost površine, toplotna povodljivost, način dobijanja sirovog komada, toplotna obrada, mikrostruktura i geometrija. Pri tome se mehanička svojstva materijala obratka kao što su tvrdoća, čvrstoća i žilavost izdvajaju kao najvažniji i najuticajniji parametri. Bolja mehanička svojstva uzrokuju upotrebu reznog alata u težim uslovima (veća naprezanja alata), što je praćeno intenzivnijim habanjem. Istraživanja vezana za habanje alata pokazuju da sile rezanja i površinska hrapavost i temperatura rezanja imaju tendenciju rasta sa habanjem alata pri teškoobradljivim (kaljenim) čelicima. Na slici 17. prikazano je habanje rezne pločice od CBN.

### 2.7.1. Habanja alata pri obradi kaljenih čelika

Kod obrade rezanjem pri završnoj obradi kaljenih čelika intenzivnije je habanje po lednoj površini nego habanje po grudnoj površini alata. Intenzitet habanja i postojanost alata od pojedinih vrsta materijala alata razlikuju se međusobno kod obrade kaljenih čelika. Prilikom kontakta s drugim materijalom, alati za obradu rezanjem izloženi su ekstremnom trenju. Razvijaju se sile visokog intenziteta (nekad više od 15 kN) i visoke temperature (i preko 1000 °C). Kao rezultat toga javlja se habanje sečiva alata [112]. Ukupno habanje rezne pločice je posledica abrazionog habanja

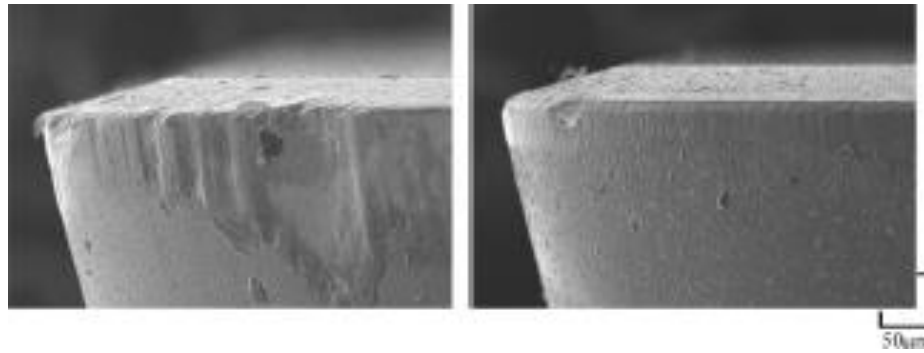
i habanja usled krzanja delića rezne pločice u oblasti sečiva i vrha alata i drugih vidova habanja. Usled male dužine kontakta strugotine i grudne površine alata, habanje na grudnoj površini je uz samo sečivo (slika 17), tako da se duže vreme zadržava dobra oštrina sečiva što je vrlo važno za završnu obradu. Kao kriterijum za zatupljenost rezne pločice pri završnoj obradi kaljenih čelika uglavnom se usvaja dozvoljena širina pojasa habanja na leđnoj površini alata je u granicama  $VB = 0,2 - 0,3 \text{ mm}$  [71, 56, 32].



Slika 17. Šematski prikaz pohabanosti alata posle vremena obrade od 5, 10, i 15 min. Izgled habanja po grudnoj površini alata je posle 15 minuta rezanja, dobijeno pri obradi na strugu brzoreznog čelika S6-5-2-5 tvrdoće 65 HRC, alatom od CBN [71]

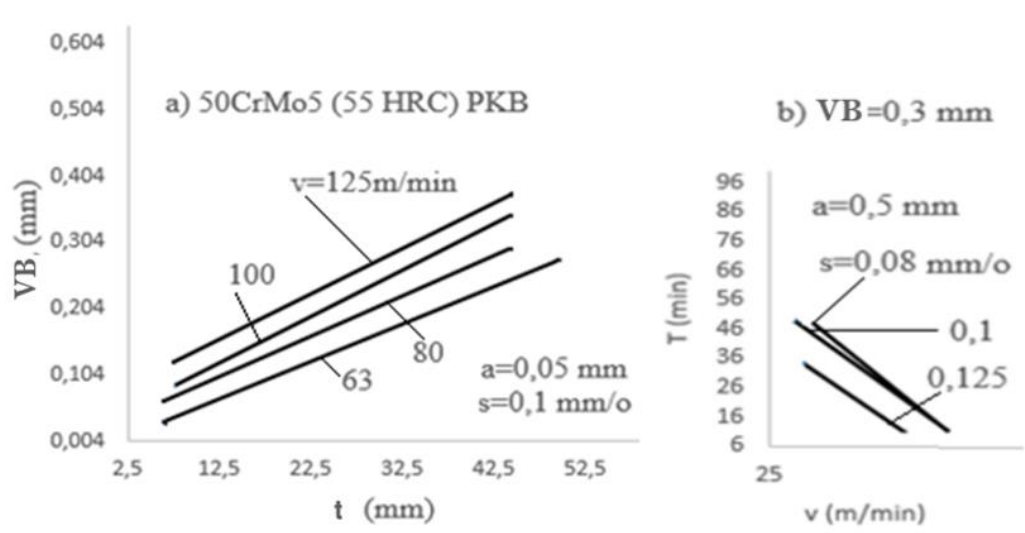
Intenzitet habanja i postojanost reznih pločica znatno zavise od vrste i karakteristika materijala reznih pločica, obratka kao i elemenata režima obrade.

SEM snimak habanja presvučene alatne pločice od TiN levo, a desno TiAlN/AlCrN, K10 sa  $v=70 \text{ m/min}$  i dužini rezanja 112 m [153] obradak ugljenični čelik JIS S55C 60 HRC je prikazan na slici 18.



Slika 18. SEM snimak habanja presvučene alatne pločice od TiN levo i desno TiAlN/AlCrN, K10 sa  $v=70 \text{ m min}^{-1}$   $s=0.05 \text{ mm/o}$  i dužini rezanja 112 m, [153] obradak ugljenični čelik JIS S55C 60 HRC

Pri obradi rezanjem kaljenih čelika sa povećanjem elemenata režima obrade ( $v$ ,  $s$  i  $a$ ) povećava se i temperatura rezanja, što prouzrokuje povećanje intenziteta habanja rezne pločice a time i smanjenje njihove postojanosti. Na slici 19. [56] prikazane su zavisnosti širine pojasa habanja po leđnoj površini (VB) u zavisnosti od vremena rezanja za različite brzine rezanja ( $v$ ). Takođe i zavisnost postojanosti alata ( $T$ ) od brzine rezanja ( $v$ ) za različite pomake ( $s$ ), dobijene pri obradi na strugu kaljenog čelika za poboljšanje 50CrMo4 (Č.4733) tvrdoće 55 HRC alatima sa reznim pločicama od PKB, kvadratnoga oblika ( $r=0,8 \text{ mm}$ ,  $\gamma = 6^\circ$ ,  $\lambda=6^\circ$ ,  $\alpha=6^\circ$ ).



Slika 19. Krive habanja (a) i T/V prave (b) za obradu na strugu kaljenog čelika 50CrMo5 alatima sa reznim pločicama od PKB [56]

Sa slike se može uočiti da je relativno veliko početno (inicijalno) habanje, a nije ni izražena pojava naglog gubitka rezne sposobnosti alata koje je karakteristično kod alata od TM. Kod obrade nekih kaljenih čelika alatima sa raznim pločicama od mešane keramike habanje alata se neznatno

menja pri povećanju brzine rezanja od 100-200 m/min, ali je postojanost različita zbog pojave loma alata.

U procesu rezanja dolazi sprezanja alat-obradak i stvaranja kontaktnih procesa koji se karakterišu trenjem i habanjem (tribologija rezanja). Kako se pri odvijanju procesa rezanja ostvaruju stalni kontakti između grudne površine alata i strugotine sa jedne i sa druge strane, između leđne površine i obrađene površine to će se procesi trenja i habanja upravo manifestovati na tim dodirnim mestima. Pošto na proces rezanja deluje niz faktora determinističke i stohastičke prirode koji dovode u zoni kontakta do razvoja fizičko-mehaničkih, hemijskih i drugih pojava to će i mehanizam trenja i habanja biti vrlo složen. Ne može se govoriti o nekom egzaktnom matematičkom opisivanju procesa trenja i habanja već samo o određenim hipotezama, kojima se opisuju kontaktni procesi.

### 2.7.2. Matematičko modelovanje vremenskog toka funkcije habanja

Pri svakom odvijanju procesa rezanja dolazi do razvoja triboloških procesa odnosno procesa trenja i habanja na kontaktnim površinama spregnutog para alat - obradak. Ovi procesi će odlikuju velikim brzinama relativnog kretanja, visokim specifičnim pritiscima i temperaturama u zonama kontakta. Svi pojedinačno, ali mnogo više združeno, utiču na stvaranje specifičnih fizičko-hemijski pojava, koje određuju nivo tribološkog stanja i način ponašanja procesa rezanja. Opisivanje tog stanja i ponašanja se vrši preko vremenske funkcije habanja ili kraće funkcije habanja. Opšta teorija o jedinstvenom matematičkom opisu funkcije habanja alata nije još razvijena, već se primenjuju parcijalne teorije. Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja se pokazalo da habanje alata kao funkcija vremena ima karakterističnu krivu, slika 20.

Funkcija habanja alata može da se predstavi *tipičnom krivom habanja* alata koju čine tri faze habanja (slika 20.): *faza inicijalnog* ili *intenzivnog habanja I* (prva faza), *faza ravnomernog* ili *približno linearnog habanja II* (druga faza) i *faza progresivnog habanja III* (treća faza) koja se završava razaranjem radnih elemenata reznog klina (zatupljenjem alata).

Uslovna veličina parametra habanja  $B$  (slika 20), se najčešće predstavlja izrazom:

$$B = k \cdot t^\beta \quad (2.6)$$

gde je koeficijent  $\beta$  funkcija brzine rezanja,  $k$  konstanta i vreme rezanja (za određeni par materijala: alat - obradak).

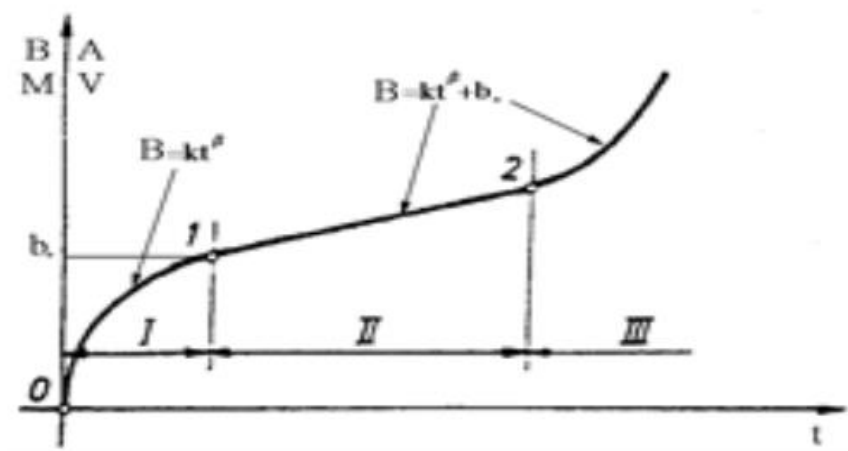
Kako se habanje alata deli u tri faze pa gore predložena jednačina dobro aproksimira prvu fazu, slika 20.

Drugu i treću fazu tačnije aproksimira jednačina oblika:

$$B = k \cdot t^\beta + b_o, \quad (2.7)$$

pri čemu se granice pojedinih faza određuju kao *prevojne tačke* (tačke infleksije) iz uslova:

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_I = \left(\frac{dB}{dt}\right)_{II} \quad \text{i} \quad \left(\frac{dB}{dt}\right)_{II} = \left(\frac{dB}{dt}\right)_{III} \quad (2.8)$$



Slika 20. Tipična kriva habanja alata

Očigledno za eksponent  $\beta$  važi:

I fazu  $\beta_I < 1$

II fazu  $\beta_{II} \geq 1$

III fazu  $\beta_{III} > \beta_{II}$ .

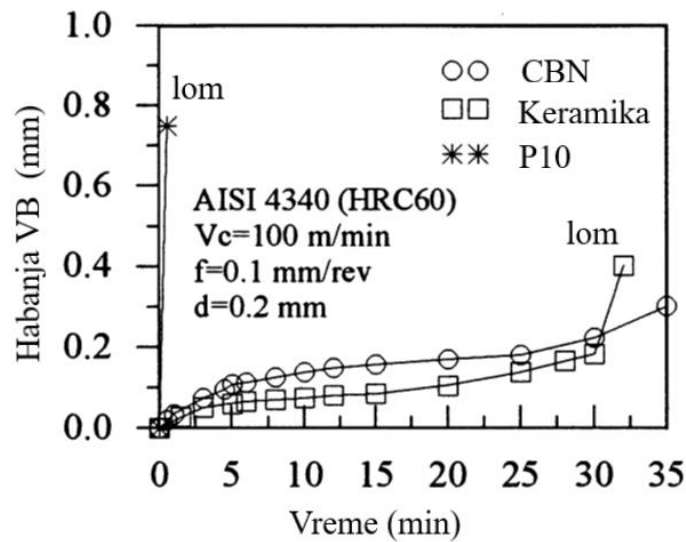
U novije vreme su se za predstavljanje vremenske promene parametara habanja koriste i jednačine oblika *polinoma* trećeg i višeg reda:

$$VB = a + b \cdot t + c \cdot t^2 + d \cdot t^3 \quad (2.9)$$

Prednost ovakvih modela je u tome što jedinstvena jednačina važi za sve tri faze habanja, a može se primeniti na sve parametre habanja  $VB$ ,  $KB$ ,  $KT$ ... (slika 20), [79].

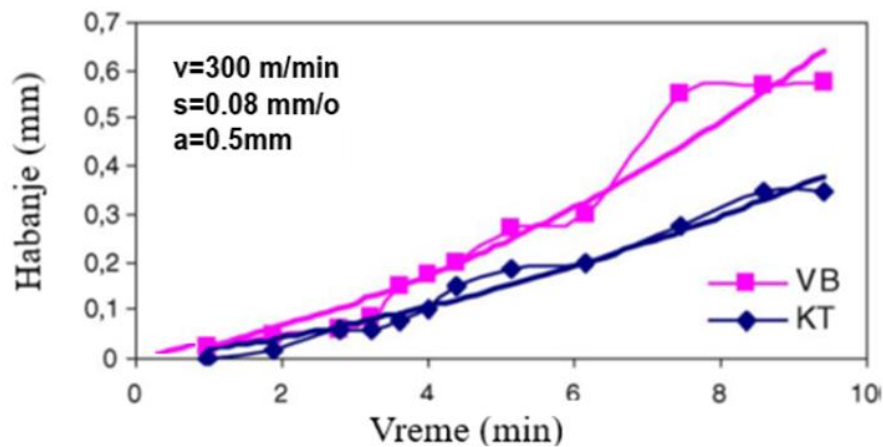
Parametri habanja u tribologiji rezanja u zavisnosti od karakteristike (mere) pohabanih zona mogu biti linijski  $B_i$  zapreminski  $V_i$  i maseni  $M_i$  [79].

Zavisnost širine pojasa habanja  $VB$  od vremena rezanja čelika tvrdoće 60 HRC alatima od TM P10, keramike i CBN je prikazana na slici 21. Može se videti vrlo intenzivno habanje TM i vrlo brzo njegov lom, dok se keramika i CBN približno habaju, a CBN je pokazao na kraju najmanje habanje jer se keramički alat odlomio [153].



Slika 21. Zavisnost širine pojasa habanja VB od vremena rezanja čelika tvrdoće 60 HRC alatima od TM P10, Keramike i CBN, [153]

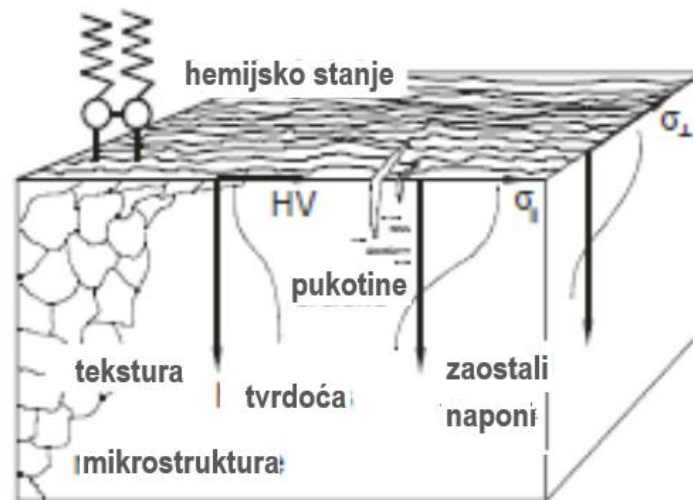
Razvoj širine pojasa habanja i dubine kratera u zavisnosti od vremena rezanja pri brzini  $v=300 \text{ m/min}$ , dubini  $a = 0.5 \text{ mm}$  i pomaku  $s = 0.08 \text{ mm/o}$ , struganje na suvo, materijal alata CBN, materijal obratka čelik tvrdoće 52 HRC i 1900 Mpa, prikazan je na slici 22., [132].



Slika 22. Razvoj širine pojasa habanja i dubine kratera u zavisnosti od vremena rezanja pri struganje na suvo, materijal alata CBN, materijal obratka čelik tvrdoće 52 HRC [132]

## 2.8. Hrapavost obrađene površine

Površinski sloj obrađene površine se karakteriše oštećenjima usled mehaničkog i termičkog delovanja alata kao i hemijskog dejstva okruženja u kome se obrada vrši. To su mikroneravnine, hemijsko stanje sloja, promene teksture zrna, mikrostrukture i tvrdoće materijala, zatim zaostali naponi i pukotine, slika 23. Ovo dejstvo alata i okoline se menja po dubini materijala i sa vremenom, a na kraju se gubi. Ove promene su analizirane pod nazivom integritet obrađene površine [77].



Slika 23. Integritet obrađene površine [77]

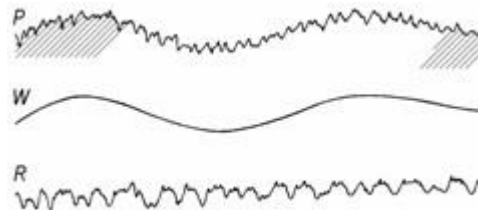
Površine mašinskih delova dobijeni pri obradi rezanjem nikada ne mogu biti idealno glatke, one uvek imaju mikroneravnine koje nastaju kao posledica obrade. Ove mikrogeometrijske nepravilnosti površina obrađenih delova nazivaju se hrapavost obrađene površine.

Ako se posmatra obrada rezanjem, mnogo je uticajnih faktora na hrapavost obrađene površine. Uticajni faktori bi se mogli razvrstati u nekoliko grupa: faktori određeni obratkom (hemijski sastav, mehanička svojstva, stanje površine,...), faktori određeni izabranom mašinom (stabilnost, radne karakteristike, preciznost,...), faktori određeni izabranim alatom (vrsta materijala alata, geometrija alata, stanje rezne površine,...), faktori određeni izabranim režimima obrade (dubina rezanja, pomak i brzina rezanja) i faktori određeni sredstvom za hlađenje i podmazivanje (hemijski sastav, viskoznost, način i položaj dovodenja hlađenja,...) [152]. Neravnine na površini mašinskog dela ne mogu se izbeći jer nastaju kao posledica primene odgovarajućeg postupka izrade. Obradene površine pri obradi rezanjem nisu idealno glatke geometrijske površine, mikroskopski gledano predstavljaju hrapave površine.

Kvalitet obrađenih površina utiče na:– smanjenje trenja kod kliznih površina – sprečavanje pojave koncentracije napona– hermetičnost– otpornost na koroziju– estetski izgled proizvoda. Za određenu površinu se u odnosu na njenu funkciju definiše optimalan kvalitet obrade.

### 2.8.1. Definisavanje parametara hrapavosti obrađene površine

Površinska hrapavost je skup mikogeometrijskih nepravilnosti na površini obratka, a prouzrokovane su postupkom obrade ili nekim drugim uticajima. Profil površine predstavlja presek realne površine sa određenom ravninom. Profil hrapavosti (R) je osnova za merenje parametara hrapavosti profila. Profil valovitosti (W) je profil koji proizlazi iz primarnog profila (P) hrapavosti, slika 24.



Slika 24. Vrste profila hrapavosti (P, W i R)

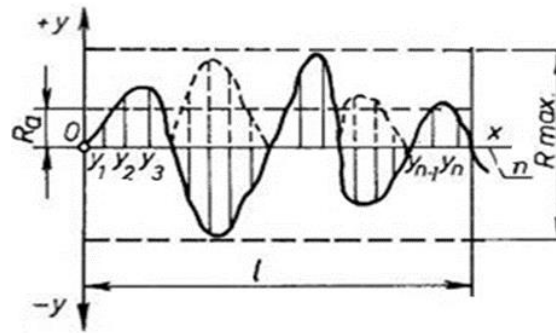
Referentna dužina  $l$  (dužina uzorka) je dužina u pravcu X ose koja se koristi za utvrđivanje nepravilnosti koje karakterišu profile koji se mere. Maksimalna visina profila,  $R_{max}$  je zbir visine najveće izbočine profila  $Y_p$  i najveće dubine udubljenja profila  $Y_v$  na dužini vrednovanja. Srednja visina elemenata profila,  $R_z$  je srednja vrednost elementa profila  $Y_p$  – najviših i  $Y_v$  – najnižih tačaka profila na referentnoj dužini, slika 25 i 26 [116].



Slika 25. Srednja visina neravnina u 10 tačaka  $R_z$

$$R_z = \frac{(Y_{p1} + Y_{p2} + Y_{p3} + Y_{p4} + Y_{p5}) - (Y_{v1} + Y_{v2} + Y_{v3} + Y_{v4} + Y_{v5})}{5} \quad (2.10)$$





Slika 26. Srednje aritmetičko odstupanje  $R_z$  i maksimalna visina neravnina  $R_{max}$

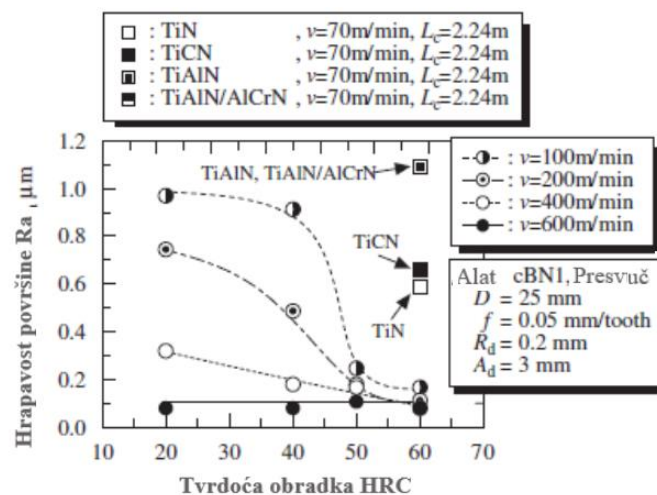
Srednja aritmetička vrednost odstupanja  $R_a$  svih tačaka efektivnog profila u odnosu na srednju liniju  $n$ , na referentnoj dužini  $l$ , i računa se po obrascu:

$$R_a = \frac{\sum_1^n |y|}{n} \quad (2.11)$$

Srednja aritmetička vrednost odstupanja profila  $R_a$  predstavlja srednje odstupanje od profila koje se najčešće koristi kao parametar za određivanje kvaliteta obrade površine (klase hrapavosti), slika 26.

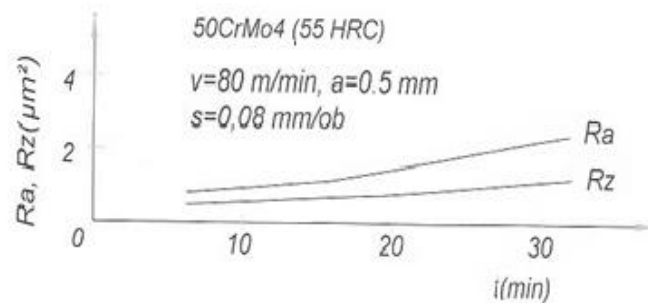
### 2.8.2. Istraživanja u oblasti hrapavosti obrađene površine

Varijacija hrapavosti obrađene površine pri obradi alatom od CBN i presvučenim alatom za različite tvrdoće obratka i različitim brzinama rezanja pokazuje značajno smanjenje hrapavosti obrađene površine sa povećanjem tvrdoće obratka, slika 27, [115].



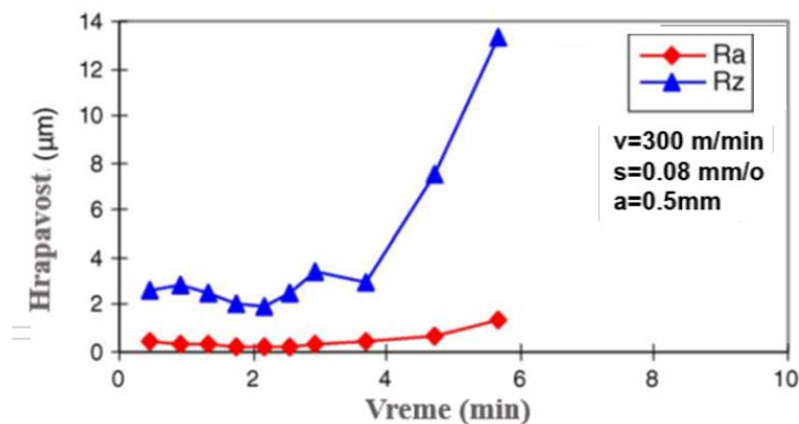
Slika 27. Varijacija hrapavosti obrađene površine pri obradi alatom od CBN i presvučenim alatima za različite tvrdoće obratka različitim brzinama rezanja [115]

Pri završnoj obradi kaljenih čelika alatima sa reznim pločicama od kubnog bornitrida i alatne keramike ostvaruje se vrlo mala hrapavost obrađene površine, koja se inače može postići samo brušenjem. Naime, pošto se u ovom slučaju ne javlja habanje na pomoćnoj leđnoj površini u vidu ravnomerno raspoređenih žlebova kao kod završne obrade čelika alatima od tvrdog metala, hrapavost obrađene površine pri obradi kaljenih čelika alatima sa reznim pločicama od kubnog bornitrida i alatne keramike se ne menja znatnije u toku vremena obrade. Pri tome hrapavost obrađene površine zavisi od elemenata režima rezanja, kao i od karakteristika alata (materijal, geometrija) i materijala obratka. Na slici 28. prikazana je promena parametara hrapavosti obrađene površine  $R_a$  i  $R_z$  u toku vremena, dobijena pri završnoj obradi na strugu kaljenog čelika 50CrMo4 (Č 4733) tvrdoće 55 HRC sa reznim pločicama CBN ( $\gamma_0=0$ ,  $\lambda_s=-6^\circ$ ,  $\alpha_0=6^\circ$ ,  $r=0,8$  mm) [56].



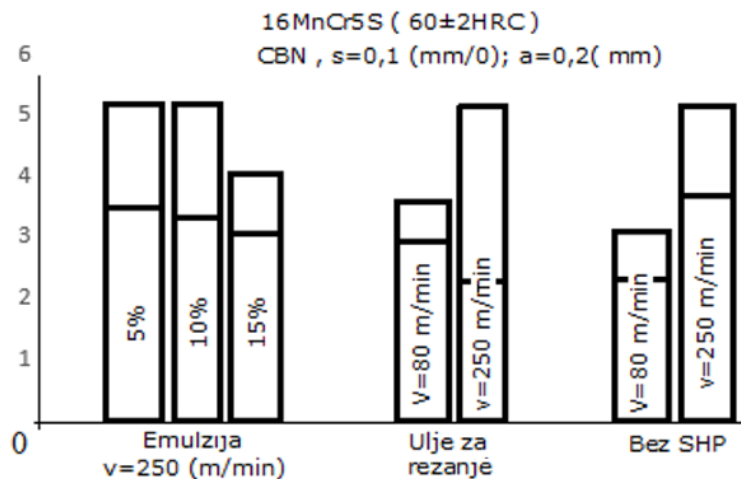
Slika 28. Promena parametara hrapavosti obrađene površine pri obradi na strugu kaljenog čelika 50 CrMo4 sa alatom od CBN [56]

Promena hrapavosti obrađene površine sa vremenom rezanja, materijal alata CBN, materijal obratka čelik tvrdoće 52 HRC i 1900 MPa;  $v = 300$  m/min,  $a = 0,5$  mm;  $s = 0,08$  mm/o, slika 29, [132]



Slika 29. Promena hrapavosti obrađene površine sa vremenom rezanja, materijal alata CBN, materijal obratka čelik tvrdoće 52 HRC i 1900 MPa, [132]

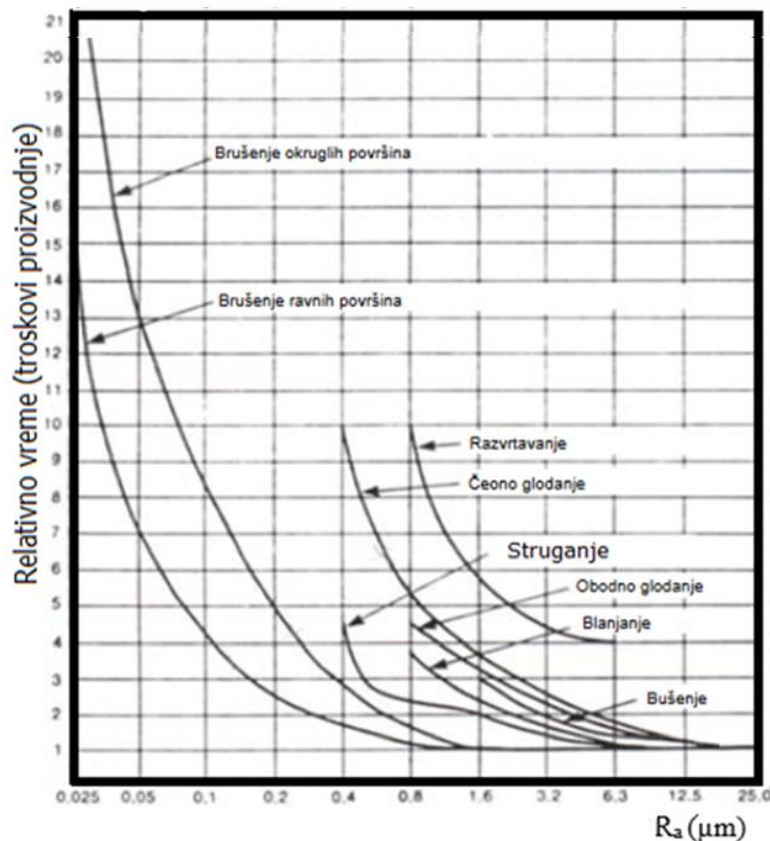
Pri obradi istog kaljenog čelika alatima od CBN uz primenu SHP uočava se mala promena hrapavosti, tj. neznatan uticaj SHP. Pri hlađenju emulzijom različite koncentracije (5, 10, i 20 %) i uljem za rezanje, ostvarena je približno ista hrapavost obrađene površine kao i pri radu bez hlađenja (slika 30.). Pri obradi na strugu kaljenih čelika hlađenjem emulzijom (20 %) ostvaruje se znatnije povećanje postojanosti alata, a nešto manje pri hlađenju uljem za rezanje (u odnosu na rad bez hlađenja).



Slika 30. Uticaj SHP na promenu hrapavosti  $R_z$  pri obradi na strugu kaljenog čelika 16MnCr5S alatom od CBN [56]

Trenje i habanje su neminovne pojave [23, 25] spregnutih tela alata i obratka i one se odražavaju na kvalitet obrađene površine [39]. Porast habanja alata ne povlači uvek povećanje mikroneravnina na obrađenoj površini. Objašnjenje za ovakvu pojavu se nalazi u činjenici da na obrađenoj površini ostaju risevi od oštih ivica tek naoštrenog alata, a da u toku procesa rezanja prvo dolazi do habanja upravo tih ivica, što dovodi do „prirodne“ optimizacije geometrije reznog dela alata. Ova optimizacija alata u toku daljeg rezanja obezbeđuje najcelishodnije uslove vođenja procesa što utiče na poboljšanje kvaliteta obrađene površine. Pri završnom struganju obrataka od teškoobradljivih materijala sa oštrim alatom, neravnine su oštre i visoke, da bi posle određenog rada one postale niže i zaobljenije, što se objašnjava sa pojavom „prirodne“ optimizacije reznog dela alata. Pri daljem struganju teškoobradljivih materijala neravnine se uvećavaju sa povećanjem širine pojasa habanja na leđnoj površini alata i dolazi do pojave karakterističnog habanja alata na pomoćnoj leđnoj površini u vidu koncentrisanog habanja [19, 41] koje se definiše preko širine žljebova različite dužine  $B_i$  na tragu pomaka  $s$ . U radovima [42, 43] je razvijeno više modela korelacionih veza između teorijske visine neravnina i habanja alata.

Hrapavost utiče na nekoliko funkcionalnih karakteristika delova, kao što su površinsko trenje, refleksija svetla, prenos toplote, sposobnost distribucije i držanja maziva i slično. Istraživači zbog toga pokušavaju razviti robustan i precizan model koji pokazuje korelaciju između parametara obrade rezanjem i hrapavosti obrađene površine obratka [111]. Smanjenje hrapavosti može dovesti do velikog porasta troškova obrade (slika 31.)



Slika 31. Troškovi proizvodnje i hrapavost obrađene površine pri različitim postupcima obrade [111]

### 2.8.3. Modeli hrapavosti obrađene površine

Poznato je, da na pripremcima istog hemijskog sastava i mehaničko-fizičkih osobina, pri obradi različitim metodama, režimima i uslovima obrade dobijaju se mašinski delovi različitih eksploatacijskih pokazatelja. Ovo se objašnjava činjenicom, da kod različitih procesa ostvaruju se

viši ili niži kvaliteti obrade koji utiču na eksploatacijske karakteristike obrađenog dela. Zato zahtevi za kvalitetom obrade a posebno kvalitetom obrađene površine, imaju značajnu ulogu na pouzdanost i vek trajanja mašinskog dela. Za postizanje visokog kvaliteta obrađene površine, neophodno je znati osnovne faktore koji utiču na hrapavost. Najuticajniji faktori su: režimi rezanja, geometrija i stanje reznog dela alata, oscilacije mašinskog sistema, osobine materijala obratka i SHP.

Regresionu analizu za dobijanje modela površinske hrapavosti, i to pri obradi struganjem materijala EN-19 sa pločicama od tvrdog metala su koristili Raghunandan B.V., i dr. [162]. Na osnovu podataka dobijenih primenom Tagučij dizajna eksperimenta, koristeći softver MINITAB 13 u regresionoj analizi, oni su došli do modela koji povezuje srednje aritmetičko odstupanje hrapavosti površine  $R_a$ , brzinu rezanja, korak i dubinu rezanja.

Ocena kvaliteta obrađene površine se vrši preko [88] parametra hrapavosti, koji se mogu predstaviti opštom funkcionalnom zavisnošću implicitnog oblika:

$$R_i = R_i(v, s, a, R_\epsilon, \kappa, \alpha, \gamma, B, p, HB, SHP, \dots), \quad (2.12)$$

gde:  $(v, s, a)$  – definišu režim obrade rezanjem,  $(R_\epsilon, \kappa, \alpha, \gamma)$  – geometriju reznog dela alata,  $B$  – stanje reznih elemenata alata,  $p$  – poroznost obratka,  $HB$  tvrdoću obratka,  $SHP$  – uslove obrade itd.

Za opisivanje funkcije srednjeg aritmetičkog odstupanja profila  $R_a$  ili srednje visine neravnina  $R_z$ , kod procesa završnog struganja se primenjuje [89, 90] više matematičkih modela koji baziraju na regresionim jednačinama.

Najčešće se primenjuju modeli koji su u funkciji sledećih faktora:

- elementa režima rezanja  $(v, s, a)$ , [89, 91]

$$R_a = C_R \frac{a^x s^y}{v^m} \quad (2.13)$$

- elementa režima rezanja  $(v, s, a)$ , i poluprečnika zaobljenja vrha noža  $r_\epsilon$

$$R_a = C_R \frac{a^x s^y}{v^m r_\epsilon^z} \quad (2.14)$$

- elementa režima rezanja  $(v, s, a)$ , i geometrije reznog dela noža [37]

$$R_z = C_R \frac{a^{m_a} s^{m_s} (\kappa \kappa_1)^{m_k}}{R_\epsilon^{z_R}} \quad (2.15)$$

### **3. MODELOVANJE PROCESA OBRADRE REZANJEM**

#### **3.1. Značaj modelovanja procesa obrade**

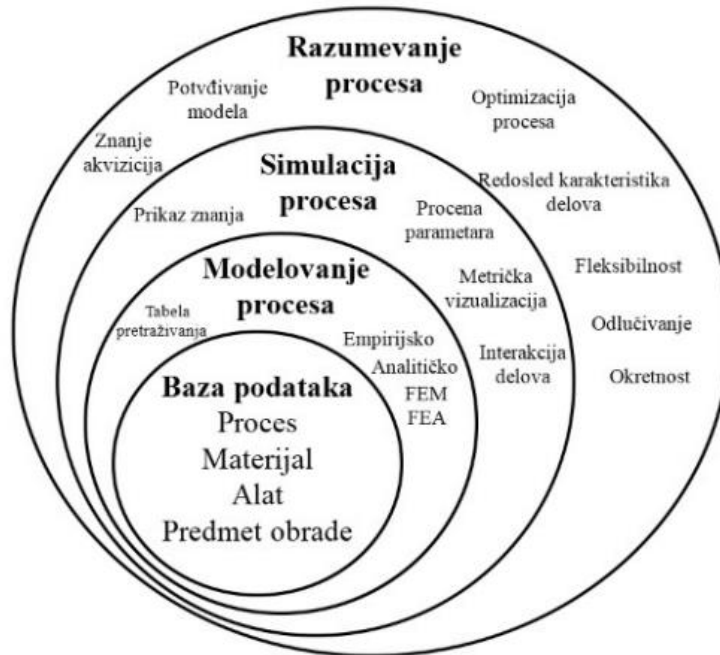
Nova dostignuća tehnologije kod alatnih mašina zajedno sa razvijenim alatnim materijalima za rezanje, a sve u cilju poboljšane proizvodnje u smislu produktivnosti, kvaliteta proizvoda i smanjenje troškova, zahtevaju određene modele izvedbe za primenu u procesu planiranja sistema za proces obrade rezanjem. Da bi postigli značajan određeni nivo kvaliteta kod delova / proizvoda, važan je izbor: (1) optimalnih uslova za rezanje; (2) sredstva za hlađenje /vrsta maziva; (3) alata za rezanje, itd. Osnovni cilj modelovanja sastoji se u tome da se podaci o ponašanju nekog sistema dobiju ne proučavanjem samog sistema, nego se ponašanje sistema proučava tako da se napravi model, pa se zatim, eksperimentisanjem na takvom modelu dolazi do saznanja o ponašanju postojećeg sistema.

Razvoj naprednih modela omogućuju da se zadovolje ubrzani zahtevi u smislu produktivnosti, kvalitete proizvoda i smanjenje troškova proizvodnje [123]. Modelovanje procesa predstavlja podršku za efikasnije obavljanje aktivnosti koje čine jedan proces . U kreiranju modela procesa potrebno je najpre definisati cilj ili ciljeve procesa [117]. Model je približni prikaz sistema ili procesa koji služi za razumevanje sistema, i njegovo menjanje ili upravljanje njime. Modeli omogućuju: opis kompleksnih fenomena njihovo bolje razumevanje i komunikaciju onih koji rešavaju probleme [108]. Obrada rezanjem ima važnu ulogu u industrijskoj proizvodnji. Nove savremene alatne mašine kao i alati za rezanje zajedno sa savremenim inženjerskim materijalima zahtevaju modele za određivanje performansi procesa obrade rezanjem, koje se mogu koristiti u sistemima za planiranje mašinskih operacija. Značaj modelovanja postupaka obrade rezanjem je važna zato što sve komponente koje su izrađene od postupaka obrade rezanjem su zastupljene u svakoj vrsti izrađenih proizvoda.

Matematičkim modelom se pomoću odgovarajućih matematskih postupaka i operacija, na osnovu određenih podataka, opisuje ponašanje sistema. Da bi matematski model služio svrsi, mora da bude konceptijski definisan, da je jednostavan za korišćenje, da se može stalno dograđivati odnosno razvijati u skladu novih saznanja i zahteva. Osnovna svrha primene matematičkih modela je opisivanje ponašanja realnog sistema u celini ili njegovim pojedinim segmentima u određenim uslovima [92]. Zbog tehničkog i ekonomskog značaja tehnologija obrade rezanjem izveden je veliki broj istraživanja a sve u cilju modelovanja samog procesa obrade radi povećanja kvaliteta, zatim povećanja produktivnosti a samim tim i smanjenju troškova obrade. Prema istraživanjima Armarega [93], u SAD je izvršen pravilan izbor alata manje u 50 % slučajeva, dok nominalna brzina rezanja se koristi u 58 % slučajeva, dok se 38 % alata koristi do njegove maksimalne postojanosti. Ovde se radi o činjenici da operater na mašinama alatkama ima iskustva ili se koristi sa priručnicima. Ovakvi slučajevi ukazuju na potrebu da se više koriste prvenstveno naučni pristupi u cilju poboljšanja performansi procesa obrade. Svrha modelovanja procesa obrade rezanjem je da se predvide realni rezultati procesa, zatim da se steknu nova znanja o pojedinim

fazama procesa pri projektovanju samog procesa i da se izvedu zaključci o praćenju i upravljanju procesom.

Prema Merchant-u na slici 32. prikazan je razvoj proizvodnje tj. ciklus od projektovanja do proizvodnje koja sadrži bazu podataka o procesu, alatu, materijalu i predmetu obrade. Evidentno da podaci o procesu i odgovarajući modeli usmeravaju odluke koje su vezane za projektovanje i proizvodnju za postizanje ciljeva uz povećanje nivoa složenosti.

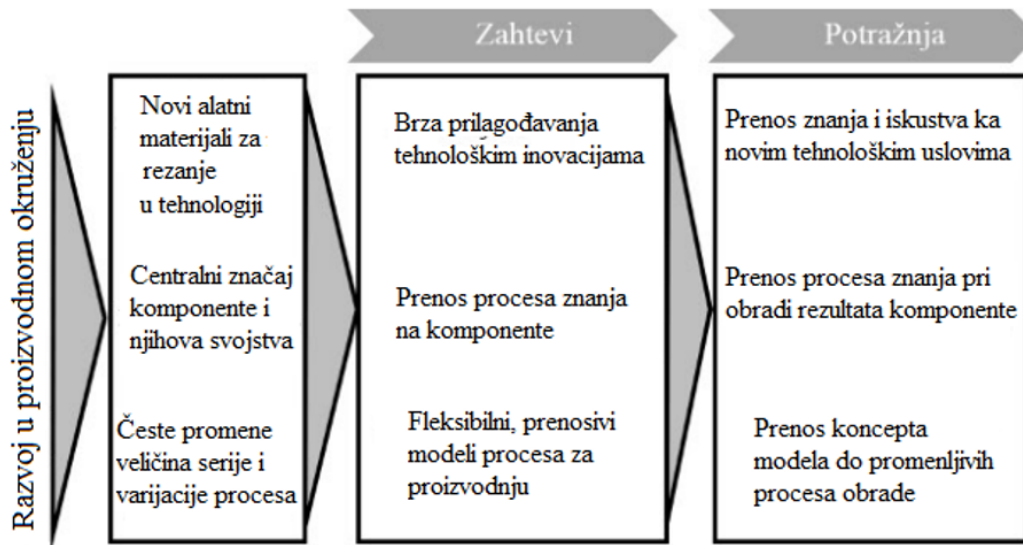


Slika 32. Podaci o procesu i model sa povećanjem nivoa složenosti [156]

Na slici 33 prikazani su razvojni trendovi u proizvodnji, stvaranje zahteva za modelovanje koji ispunjavaju brojne zahteve.

Svrha takvog modelovanja je [157, 165]:

1. Pronaći načine optimizacije procesa brzo i realno,
2. Da se omoguće realne prognoze rezultata procesa,
3. Da se dobiju nova znanja o samom procesu i
4. Izvođenje mogućnosti praćenja i kontrole procesa.



Slika 33. Razvojni trendovi u proizvodnji, stvaranje zahteva za modelovanje [157]

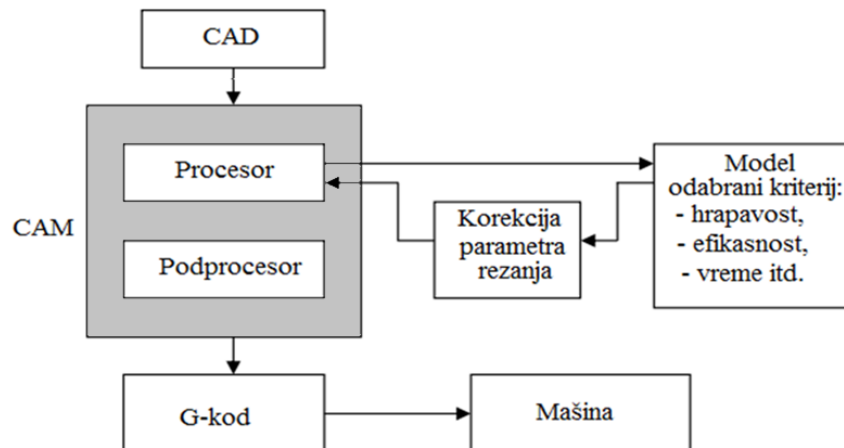
Modelovanje procesa obrade je skoro uvek kompleksan zadatak jer treba uzeti sledeće aspekte: poznavati obradni proces, empirijske formule za realna ograničenja, poznavanje odgovarajućih matematičkih modela. Matematičkim modelom se pomoću odgovarajućih matematičkih postupaka i operacija, na osnovu određenih podataka, opisuje ponašanje sistema. Da bi matematički model služio svrsi, mora da bude konceptijski definisan, da je jednostavan za korišćenje, da se može stalno dograđivati odnosno razvijati u skladu novih saznanja i zahteva. Osnovna svrha primene matematičkih modela je opisivanje ponašanja realnog sistema u celini ili njegovim pojedinim segmentima u određenim uslovima. Naime, modelovanje i simuliranje se najčešće upotrebljava za proučavanje složenih sistema, pa je bitno da se isključe svi oni elementi koji čine model složenijim, a ne doprinose značajnije kvalitetu dobijenih odgovora. Imajući u vidu činjenicu da proces modelovanja "leži" u osnovi svake računarske simulacije, neophodno je definisati ovaj proces sa posebnom pažnjom.

Osnovni cilj modeliranja procesa i sistema je definiranje matematičkih modela i drugih prikaza, koji će u odgovarajućem stepenu tačnosti adekvatno opisati proučavani proces/sistem. Određeni modeli sa simulacijom su efikasni za adaptivno upravljanje procesima obrade, zatim smanjenja ili eliminisanja greške. Glavne izlazne karakteristike procesa obrade rezanjem metala modeluju se: sile rezanja, temperatura rezanja, postojanost alata, opterećenje alata, obratka i pribora, proizvodnost obrade itd.

Potrebe za egzaktnim predstavljanjem procesa kao i sistema su sve veći sa razvojem modernih i inteligentnih obradnih sistema. Na ovaj način se ovakav pristup oslanja na sigurno predviđanje tačnosti oblika i dimenzija kao i obradene površine i svojstva površinskog sloja obratka. Postojeće metode za upravljanje proizvodnim operacijama zasnovane su na iskustvima proizvodnih inženjera postaju zastarele treba ih menjati metodama koje su zasnovane na nauci i znanju. Zato se uvode CAD/CAM/CAPP sistemi kao podrška u procesu planiranja i upravljanja



fleksibilnim obradnim sistemima. Posebno je zanimljivo primena modela u CAD/CAM softveri (Slika 34.). Data predložena rešenja efikasno može uzrokovati poboljšanju funkcionalnosti CAD/CAM paketa. Zahvaljujući tome postalo je moguće znatno skraćenje vremena tehnološkog procesa što je uzrok smanjenja troškova proizvoda [94].



Slika 34. Primena modela kao dodatni model CAD/CAM paketu [94]

Činjenica je da se stanje na tržištu menja i da proizvodne kompanije moraju da ostvare ne samo produktivnost i kvalitet, već visok stepen fleksibilnosti radi zadovoljenja zahteva kupaca. Očekivati je da će buduća proizvodnja nesumnjivo zahtevati brzo i pouzdano prilagođavanje tehnološkim inovacijama što je od značaja za opstanak na tržištu. Pri formiranju modela postavlja se pitanje o usaglašavanju realnog sistema i njegove interpretacije u matematičkom obliku. Najbolji način na odgovor na ovo pitanje daje simulacija kojom se vrši analiza ponašanja modela. Modelovanje, simulacija i optimizacija predstavljaju ključne tehnike za podršku proizvodnji u 21. veku i nijedna druga tehnika ne pruža veći potencijal za poboljšanje proizvoda, usavršavanje obradnog procesa, redukcija vremena od projektovanja do proizvodnje i redukcija troškova. Dokazano je zadnjih godina da alati za simulaciju koji koriste mehaničke i toplotne modele imaju relevantnu prednost u određivanju elemenata režima obrade.

### 3.1.1. Ciljevi modelovanja procesa obrade

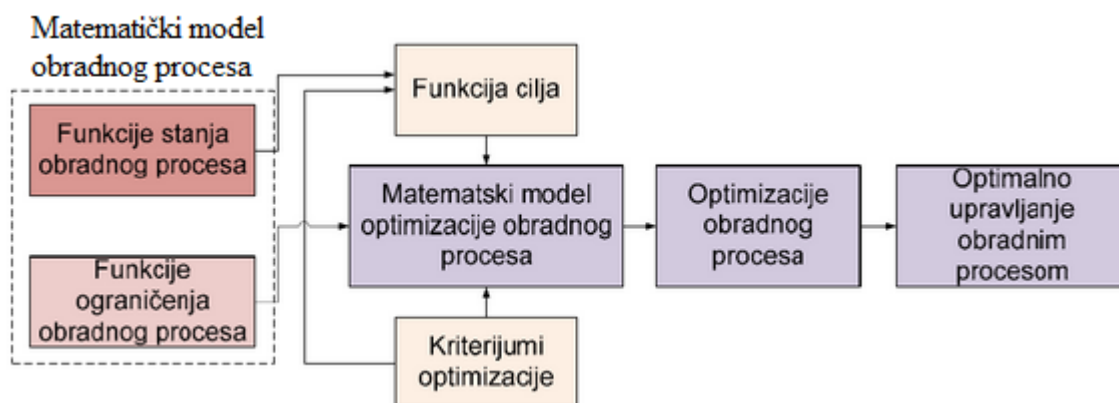
Glavni su ciljevi modelovanja procesa obrade povećanje proizvodnosti, ekonomičnosti, ukupni kvalitet proizvoda ili pojedinih segmenata kvalitete (obrađene površine, postojanosti alata, itd.) i smanjenje utroška materijala, energije, vremena obrade i troškova obrade po jedinici proizvoda. Teško je teorijski pomoću analitičkih modela pouzdano odrediti parametre procesa obrade, kao što su: trošenje alata, optimalni geometrijski oblik, deformacione pojave u alatu, granični stepen deformacije, tribološki procesi, opterećenje alata, jer je u svakom procesu obrade prisutno više uticajnih faktora i njihovih interakcija. Zato je primena eksperimenta i analiza tako dobijenih rezultata nezamenjiva u razvoju novih i usavršavanju postojećih obradnih procesa i

sistema. Analitičko definisanje dovoljno pouzdanih matematskih modela je vrlo složeno i zahteva aproksimacije, što utiče na tačnost dobijenih rezultata, [159]. Budući da su procesi obrade stohastičkog karaktera puno tačnije rezultate daje stohastičko modelovanje zasnovano na korišćenju statističkih metoda i eksperimentalnih rezultata. Gotovo sve metode podrazumevaju poznavanje matematskog modela procesa, što je uslov za inovaciju i revitalizaciju procesa ili sistema. Matematičkim modelovanjem moguće je ostvariti povećanje produktivnosti procesa, odnosno iskorišćenost obradnog sistema, poboljšanje kvaliteta proizvoda, smanjenje troškova pripreme, itd. Stabilizacija procesa obrade može se vršiti u više pravaca i to kroz: povećanje tačnosti dimenzija obratka, umanjenja hrapavosti obrađenih površina, umanjenja vibracija i utrošene energije, umanjenje opterećenja alata ili komponenti mašine za obradu, umanjenja troškova obrade, povećanje veka trajanja alata, itd.

Kod optimizacije režima procesa polazi se od matematskog modela koji opisuje određeni proces obrade. Postavi se odgovarajući kriterij za režime procesa obrade i traži se kombinacija elemenata procesa obrade iz područja mogućih rešenja, kako bi odgovarajuća funkcija cilja dobila ekstremnu vrednost (minimum ili maksimum). Jedan od kriterija može biti maksimalni profit, maksimalna produktivnost ili minimalni troškovi, minimalno vreme obrade, maksimalna postojanost alata obrade, itd. [159].

U teoriji obradnih procesa, u pogledu spoznaje funkcije cilja kao jednog od osnovnih polaznih elemenata matematičkog modelovanja i upravljanja ovim procesima izdvajaju se tri slučaja:

- matematski model funkcije cilja ili funkcija optimizacije nije poznata,
- poznat je, ili se može analitičkim putem izvesti, oblik i struktura funkcije cilja, ali su nepoznati parametri (efekti) modela funkcije,
- poznati su i oblik i parametri modela funkcije cilja datog procesa.



Slika 35. Struktura matematičkog modela obradnog procesa [159]

Model obradnog procesa čine (slika 35) četiri komponente:

- funkcija stanja obradnog procesa  $F_{si}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ),
- funkcije ograničenja (funkcije veza ili granični uslovi) obradnog procesa  $F_{gi}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ),
- kriterij optimizacije i funkcija cilja  $F_{Ci}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ),

Dok prve dve komponente (funkcijama stanja i funkcijama ograničenja) definišu matematički model obradnog procesa, trećom komponentom (kriterijum optimizacije), zajedno sa prve dve, postavljaju se okviri matematičkog modela obradnog procesa.

Za slučaj obrade rezanjem materijala navode se neke od funkcija ograničenja a vezano za mogućnosti obradnog sistema i zahteva obrade:

- minimalna i maksimalna dozvoljena vrednost pomaka mašine,
- minimalna i maksimalna dozvoljena vrednost broja obrtaja mašine,
- maksimalna dozvoljena vrednost snage mašine,
- propisana tačnost dimenzija predmeta obrade,
- propisani kvalitet obrađene površine, itd.

Sva ograničenja mogu se izraziti u obliku jednačina i nejednačina u kojima se nalaze pored ostalih veličina i veličine iz skupa ulaznih veličina.

Prvim i drugim slučajem bavi se teorija adaptivne (eksperimentalno-statističke) optimizacije, dok je treći slučaj predmet analitičkih (determinističkih) metoda optimizacije obradnih procesa.

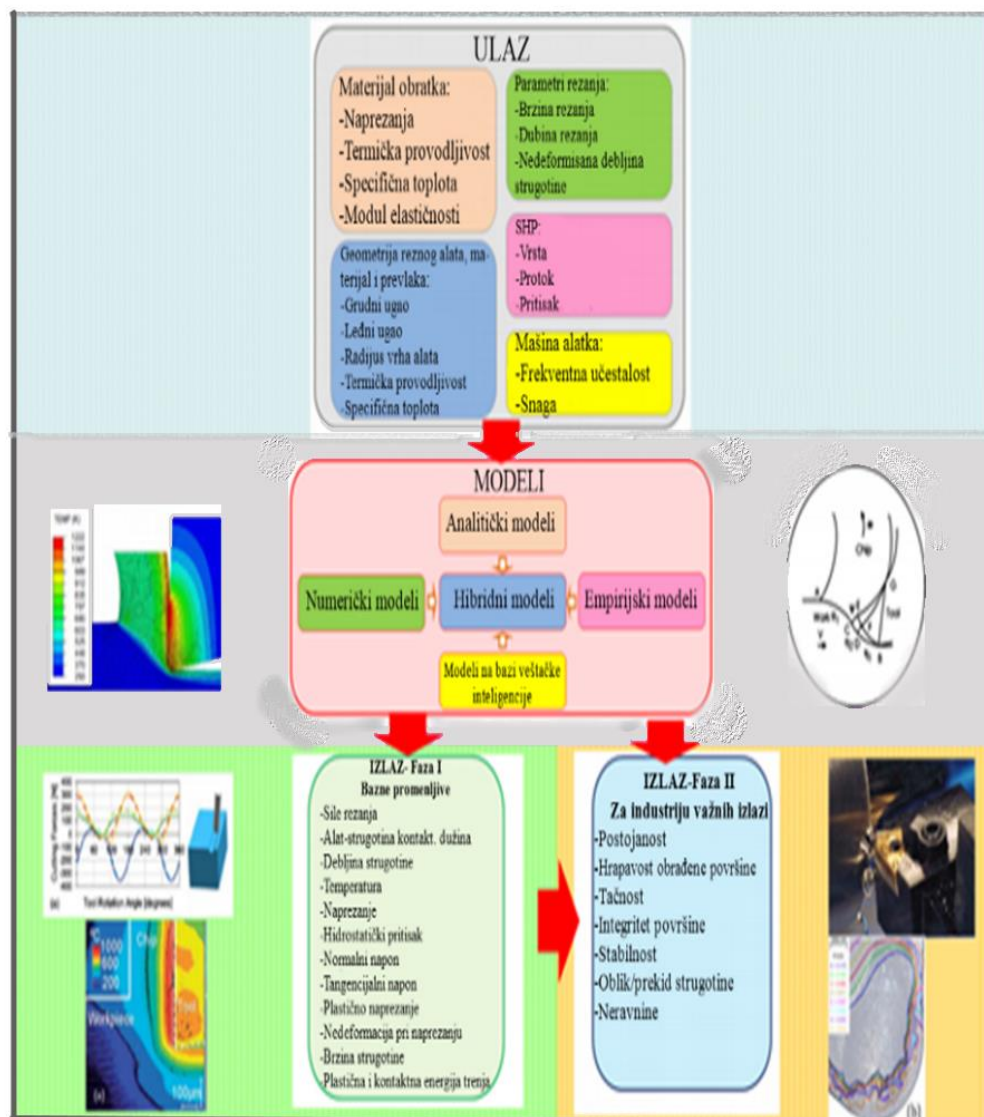
U teoriji optimizacije obradnih procesa, kao dekomponovanih tipskih jedinica kompleksnog tehnološkog procesa, može se izdvojiti više kriterija odnosno funkcija cilja:

- troškovi,
- vreme izrade,
- stepen iskorišćenja kapaciteta,
- ekonomičnost,
- rentabilnost, itd.

Ponekad se u analizi obradnih procesa kao kriterijum optimizacije, odnosno funkcija cilja, uzimaju komponente vektora karakteristika stanja procesa, vektor regulisanih veličina kao, na primer: postojanost alata, utrošak energije, kvalitet obrađene površine itd.

### 3.2. METODE ZA MODELOVANJE PROCESA OBRADRE REZANJEM

Model je pojednostavljeni prikaz realnog sistema napravljen da bi poslužio boljem razumevanju i / ili boljem proučavanju posmatranog sistema i eksperimentisanjem sa njim. Dakle, model se može definisati kao apstraktan sistem koji je ekvivalentan realnom sistemu. Model se koristi za objašnjenja u demonstracije procesa obrade rezanjem, zatim proračune kao i za istraživanje procesa obrade rezanjem. Svrha modelovanja je da se definišu matematički modeli koji su neophodni za optimizaciju kao i upravljanje obradom rezanja. Cilj modelovanja sastoji se u tome da se podaci o ponašanju nekog sistema dobiju ne proučavanjem samog sistema, nego se ponašanje sistema proučava tako da se napravi (kreira) model, pa se zatim, eksperimentisanjem na takvom modelu dolazi do saznanja o ponašanju postojećeg sistema.



Slika 36. Dvofazni pristup modelovanja za proces obrade

Izgradnja matematičkih modela koji će u odgovarajućem stepenu tačnosti adekvatno opisati obradni proces u cilju simulacije, analize i prognozu obradnog procesa u početnoj fazi, definisanje matematičkih modela koji su relevantni za obradu rezanjem kao i iznalaženju optimalnih rešenja, izgradnja modela obradnog procesa za dati sistem, naučna istraživanja i praktična primena u realnim uslovima. Poslednjih godina istraživači su razvili mnoge tehnike modelovanja na polju rezanja metala. Na slici 36. dat je dvofazni pristup modelovanju procesa obrade.

Tabela 5. Mogućnosti i ograničenja različitih pristupa modelovanja [95]

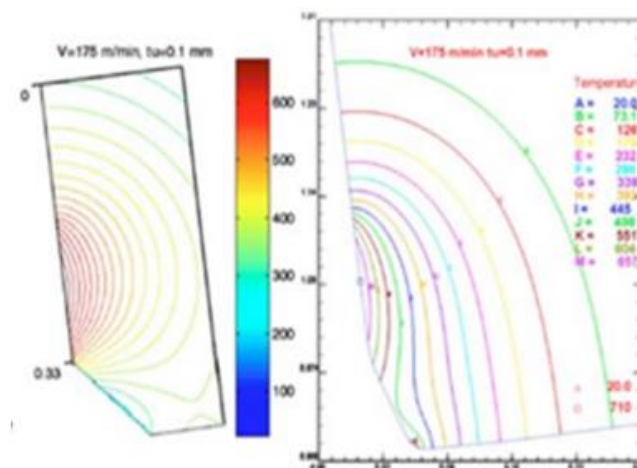
	Analitički	Numerički	Empirijski	Hibridni
Princip	Teorija klizne linije i /ili princip minimalne energije	Mehanika kontinuuma koristeći FEM, FDM i bez mrežni FEM	Dobijanje krivih u zavisnosti od eksperimentalnih podataka	Prednosti mešavina od dva ili više pristupa
Mogućnosti	Predviđanje sile rezanja, geometrije strugotine, dužine kontaktna alata i strugotine, prosečno naprezanje, napon i temperatura	Predviđanje sile rezanja, geometrija strugotine, naprezanje napon i temperatura	Odnosi se na većinu mašinskih operacija za merljive procese samo za promenljive	Daje meta-modele za srodne modele koji će biti integrisani
Ograničenja	Obično se ograničava na 2D analize sa jednim ili višereznim sečivom ili postoje i 3D modeli	Model materijala, trenja kao ulaz, računarska ograničenja, npr. zahvata	Validno samo za raspon eksperimenta	Ograničeni na jače modele tj. analitički, numerički, empirijski, itd.
Prednosti	Sposobnost da se brzo razvijaju praktični alati	Mogućnost za povezivanje parametara važni za industriju	Praktična, brza i direktna procena za važne parametre industrije	Poboljšava mogućnosti i tačnosti osnovnog modela
Nedostaci	Jedinstven za svaki obradni problem	Dugo računsko vreme	Opsežni eksperimenti, dugotrajni i skupi	Potreba za opsežnim eksperimentalnim podacima i /ili simulacijama

Modelima je moguće poboljšati performanse sistema u eksploataciji, na taj način da se modeluju izabrani delovi sistema i na osnovu tako postavljenih modela vrši analiza i donose zaključci o aktivnostima koje treba poduzeti na realnom sistemu.

U literaturi [109, 95] se najviše koriste sledeće vrste modela: empirijski, mehanistički, analitički, numerički, model zasnovan na veštačkoj inteligenciji i hibridni modeli. U tabeli 5. date su karakteristike različitih pristupa modelovanju.

### 3.2.1. Analitički modeli

Analitički modeli su matematički modeli bazirani na osnovnim zakonima i principima matematike i fizike kojima se opisuje obradni proces. Ovi modeli se mogu podeliti u tri kategorije [48]: modeli sa egzaktnim rešenjem, modeli sa numeričkim rešenjem i modeli sa stohastičkim rešenjem. Modeli sa egzaktnim rešenjem su obično zasnovani na početnim hipotetičkim pretpostavkama i u mnogim slučajevima ne daju realna rešenja. Numerički modeli su složeni matematički modeli koji imaju veoma široku primenu u inženjerskim naukama. Rešenja se dobijaju numeričkim metodama kao što je metod konačnih elemenata (engleski finite element method - FEM), metoda konačnih razlika (finite difference method - FDM), metod graničnih elemenata (Boundary element method - BEM) i drugi. Stohastički modeli su po prirodi verovatnosni modeli, odnosno izlaz je po prirodi slučajan za opseg ulaznih vrednosti. U literaturi se može naći veliki broj analitičkih modela kojima se vrši predikcija ponašanja sistema u različitim uslovima procesa obrade.



Slika 37. Analitički model sa temperaturskim poljem [153]

Najveći broj istraživanja baziran je na modelima sa egzaktnim rešenjem i numeričkim modelima sa ciljem određivanja geometrijskih karakteristika alata u procesu obrade kao i proizvodnosti. Analitičko modelovanje se koristi za dobijanje modela: sila rezanja [96],

temperaturu rezanja [97], napon i deformacija, formiranja strugotine [98], loma strugotine, zaostalih napona u površinskom sloju obrađene površine, formiranja pucni, habanja alata... Analitički modeli omogućuju brza rešenja ali su ograničena svojom kompleksnošću. Rowe i Spick su razvili model na osnovnim pretpostavkama koje su slične pretpostavkama Merchant-ovog modela. Njihova osnovna hipoteza je da će pošto nema spoljašnjih ograničenja, ravan smicanja zauzima takav položaj u kome je uneta energija u sistem minimalna. Proces rezanja metala je visoko nelinearan termo-mehanički proces pri čemu se termodinamički efekat ogleda kroz lokalizovano zagrevanje i porast temperature u površinskom sloju obratka, što utiče na brzu plastičnu deformaciju i trenje duž kontakta alat- strugotina, kao i alat-obradak. Analitičko modelovanje se izvodi na osnovu teorijskih znanja uz korišćenje određenih zakonitosti procesa kao i samog sistema i procedura definisanja matematičkog modela.

Tačnost analitičkih modela može se utvrditi samo poređenjem dobijenih analitičkih i eksperimentalnih vrednosti istraživanih parametara procesa i sistema. Analitički modeli su se intenzivno razvili, ali njihova praktična primena je ograničena jer uzimaju u obzir uži izbor režima obrade, geometrije alata, materijal obratka i ograničenost eksperimentalne tačnosti slika 37. Ograničenja su posledica greški koje su uključene kod određivanja termičkih i mehaničkih karakteristika materijala obratka i materijala alata pri visokim temperaturama rezanja i velikih naprezanja.

### 3.2.2. Empirijski modeli

Eksperimentalne metode su korisne za modelovanje novih i složenih procesa i sistema. Modelovanje je zasnovano na podacima dobijenim realizacijom eksperimentalnog ispitivanja gde se mere performanse procesa u zavisnosti od promene ulaznih promenljivih u izabranom opsegu. Koristeći skup ulaznih i izlaznih promenljivih razvija se matematički model. Empirijsko modelovanje od svih drugih modelovanja je najjednostavniji i zato se najviše koriste u industriji. Koriste statističke modele koje važe za opseg izvedenih eksperimenata koje nisu zasnovane na fizičke procese. Tehnika empirijskih model zasnovana je na plan eksperimenta za različite ulazne parametre procesa obrade struganjem kao npr., parametre obrade rezanjem, geometrije alata, i dr. Ovakav pristup modelovanja oslanja se na laboratorijske uslove, što smanjuje oblast primene jer mala promena uslova ispitivanja dolazi do relevantnih promena u modelu. Kienzle [110] je razvio empirijski modeli bazirani na velikom broju eksperimenata. Jednačine koje su dobijene pri proračunu ne uzimaju u obzir sve parametre u procesu rezanja i aproksimativne su.

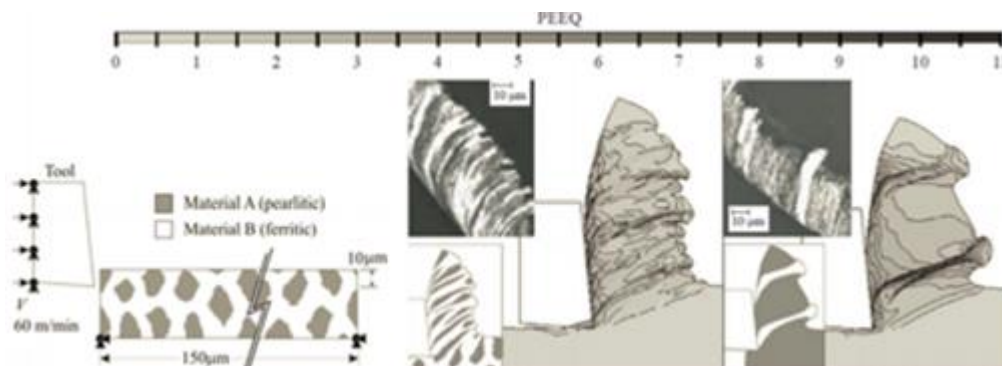
### 3.2.3. Mehanistički modeli

Mehanistički modeli olakšavaju pravilan izbor režima obrade, parametara putanje alata, kompenzaciju ugiba alata kao i upravljanje vibracijama. Mehanistički modeli pokušavaju povezati sile rezanja sa geometrijom strugotine pomoću konstanti koje su dobijene eksperimentalno i one se najviše koriste u praksi. Konstante zavise od više faktora kao što su: uslova rezanja, geometrije

alata kao i svojstva materijala. Mehanistički modeli se koriste u virtualnim aplikacijama obrade rezanjem. Ovi modeli ne daju određivanje ugla ravni smicanja, kao što čine to analitički modeli. Veliki broj mehanističkih modela je razvijen za modelovanje 3D procesa rezanja kao što je struganje, glodanje i bušenje.

### 3.2.4. Numerički modeli

Numeričko modelovanje je zasnovano, na različitim tehnikama modelovanja, kao što su metoda konačnih elemenata (FEM), metoda konačnih razlika (FDM), metoda graničnih elemenata (BEM). Numeričke metode zahtevaju puno vremena za modelovanje ali pružaju veliki broj podataka. Po definiciji, metod konačnih elemenata je metod za približno rešavanje takozvanih prostornih problema. Prostorni problemi su matematički problemi koji opisuju ponašanja ograničenog dela prostora pomoću parcijalnih diferencijalnih jednačina u funkciji vremena i prostora. U realnom telu, promenljive, kao na primer napon i temperatura, su funkcije svake generičke tačke. Stoga, matematički problemi ove vrste sadrže neograničen broj nepoznatih. Metod konačnih elemenata je metod za računarsku analizu problema u mehanici, mehanici fluida, termodinamici i dr. U proizvodnji, najviše u oblasti obrade metala rezanjem, metod konačnih elemenata se pokazao kao nezamenljiva alatka u istraživačkom razvoju kao i u industrijskoj primeni slika 38.



Slika 38. FEM model za određivanje: formiranja strugotine i lomljenja strugotine [153]

Osnovni princip metoda konačnih elemenata je podela kontinuuma (prostora) na konačan broj delova, odnosno elemenata. Tako se od početnog, veoma složenog problema, dobija konačan broj diskretizovanih i nezavisnih problema [150].

Metoda konačnih elemenata (FEM) poslednjih nekoliko godina postao je glavni alat za modelovanje kao i simulaciju procesa obrade rezanjem. Primena modela zasnovanom na metodi konačnih elemenata (FEM) mogu se brže odrediti mnogi izlazni rezultati procesa obrade rezanjem



u odnosu na dugotrajne i skupa eksperimentalnih istraživanja. Ova metoda našla je primenu za dobijanje modela napona i deformacija, stepena deformacija i raspodele temperatura u primarnoj, sekundarnoj i tercijalnoj zoni rezanja, sila, formiranje strugotine, loma i morfologije strugotine zaostalih napona u površinskom sloju obrađene površine, postojanosti alata kao i deformacije obratka. Dve osnovne matematičke formule kontinuuma zasnovane su na metodi konačnih elemenata: Langražova i Ojlerova. Langražova mreža se deformiše u vremenu sa materijalom, dok je Ojlerova mreža fiksna u prostoru (upravljanje zapreminom), što predstavlja i glavni nedostatak.

U početku su se FEM modeli bavili modelovanjem ortogonalnog rezanja, uz pretpostavku da je rezna ivica alata oštra. Poslednjih godina tehnike FEM modelovanja proširene na realnu geometriju alata, odnosno uzimaju u obzir činjenicu da je rezna ivica alata zaobljena kao i habanje alata. Metoda konačnih razlika (FDM) se može primeniti za prenos toplote u zoni rezanja, pri čemu se mogu generisati temperaturna polja u strugotini.

### 3.2.5. Hibridni modeli

Hibridni modeli kombinuju modele analitičke, empirijske i metode veštačke inteligencije u cilju predikcije performansi procesa obrade rezanjem, koje su važne za savremenu industriju. Na taj način hibridni modeli koriste prednost pojedinih tehnika, time se dobijaju dosta tačniji modeli. Za razvoj hibridnih modela potrebni su podaci koji su dobijeni na bazi eksperimentalnih istraživanja ili simulacija. Ovi modeli se koriste za modelovanje sila rezanja [102], oblika i loma strugotine [103], distribucije temperature u zoni rezanja [104], zaostalih napona u površinskom sloju obrađene površine, itd.

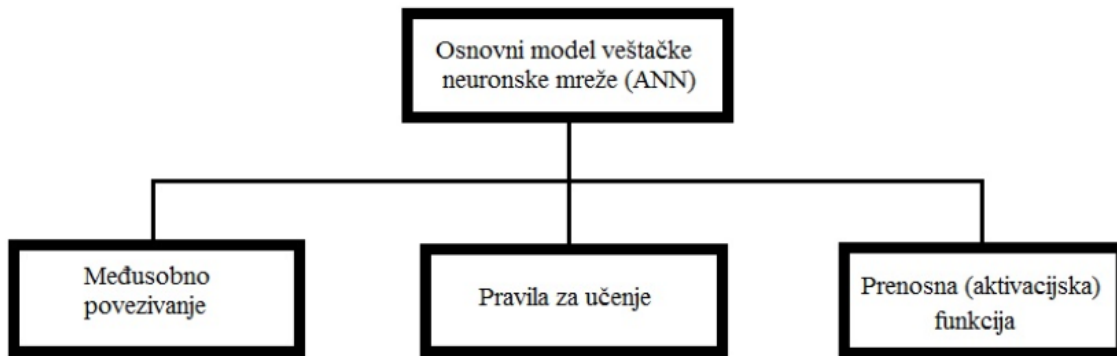
## 3.3. MODELI ZASNOVANI NA VEŠTAČKOJ INTELIGENCIJI

Poslednjih godina programi kompjuterske tehnike su pokazale veliki potencijal u rešavanju složenih nelinearnih problema u modelovanju proizvodnih procesa, zatim obrade signala i upravljanja itd. Inteligencija je veština koja karakteriše ljudska bića [75]. U istraživanjima procesa obrade rezanjem, alati veštačke inteligencije imaju široku primenu za prediktivno modelovanje, dijagnozu stanja alata, adaptivno upravljanje kao i detekciju grešaka. Ključni element ovog modela je struktura sastava za obradu podataka. Ona se sastoji od velikog broja međusobno povezanih elemenata (neurona) koji skladno rade u svrhu što boljeg rešavanja konkretnog problema. Veštačke neuronske mreže imaju sposobnost poput ljudi učiti na primerima, skupovima podataka i na taj način vrlo brzo izlaze na kraj sa problemima koji se teško rešavaju tradicionalnim pristupkom. Učenje u biološkim sistemima podrazumeva prilagođavanje na sinaptičkim vezama koje postoje među neuronima, a to pravilo vredi i za veštačke neuronske mreže

Kod veštačke inteligencije alati koriste dve faze. Prva faza sistema je sistem učenja, na osnovu podataka koje mu se sukcesivno prezentuju (to su podaci dobijeni od sistema za akviziciju podataka). Druga faza sistema generalizuje podatke, odnosno daje odgovor na pitanja koje se u fazi učenja ne postavlja.

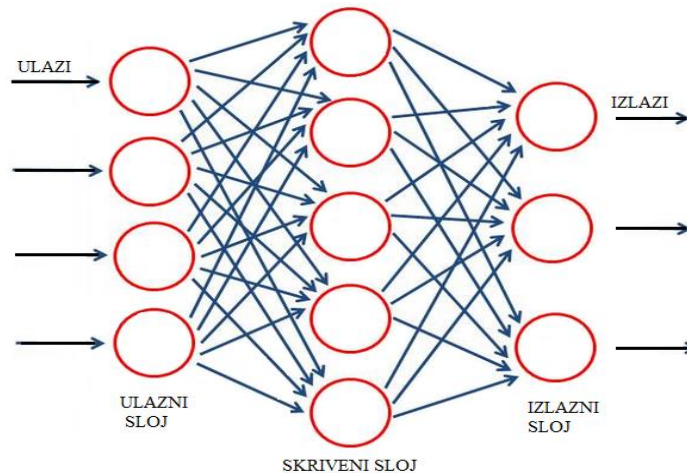
### 3.3.1. Modeli na bazi veštačkih neuronskih mreža

Neuronske mreže se mogu opisati kao relativno novi koncept korišten u analizi podataka, čija se široka primena ogleda u tehničkim, društvenim, ekonomskim naukama i mnogim drugim područjima. Pod pojmom „neuronske mreže“ podrazumevaju se veštačke neuronske mreže. Veštačke neuronske mreže (Artificial Neural Networks skraćeno ANN) su računarski modeli zasnovani na postojećim saznanjima o načinu funkcionisanja ljudskog mozga. Neuronska mreža u računarskim naukama predstavlja veoma povezanu mrežu elemenata koji obrađuju podatke. One su sposobne da izađu na kraj sa problemima koji se tradicionalnim pristupom teško rešavaju. Jedna od važnijih osobina neuronskih mreža je njihova sposobnost da uče na ograničenom skupu primera. Zbog toga što se uglavnom govori o modelima neuronskih mreža realizovanim na računarima [76]. Na slici 39. prikazan je osnovni model veštačke neuronske mreže [125].



Slici 39. Osnovni model veštačke neuronske mreže (ANN)

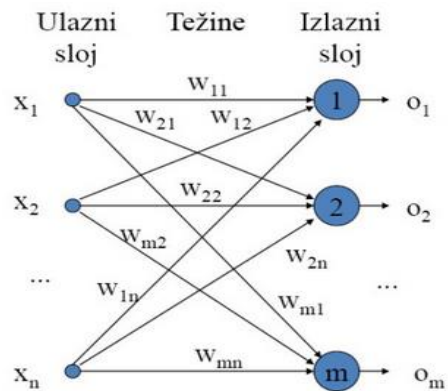
Prednost ANN u odnosu na druge tehnike modelovanja je sposobnost da modeluju kompleksne nelinearne procese sastavljen od više jednostavnih procesora (jedinica, neurona), svaki od njih ima lokalnu memoriju u kojoj pamti podatke koje obrađuje. Te jedinice su povezane komunikacionim kanalima (vezama). Podaci koji se ovim kanalima razmenjuju su obično numerički. Jedinice obrađuju samo svoje lokalne podatke i ulaze koje primaju preko konekcije. ANN su se pokazale kao odličan u modelovanju procesa obrade rezanjem: sila rezanja [99], hrapavost obrađene površine [100], temperaturu rezanja [101], habanja alata, postojanosti alata, itd. ANN se uspešno koristi u optimizaciju procesa obrade i atraktivnu alternativu za istraživače pri modelovanju procesa obrade. ANN mreže su sistemi koji koriste stečena znanja iz iskustva, mogu da akumuliraju i steknu znanja. Sastoji se od ulaznog sloja koji se koristi da prezentuje podatke mreži, zatim izlaznog sloja koji daje odgovor ANN i može imati jednog ili više skrivenih slojeva između ulaza i izlaza (slika 40.). Ulazni i izlazni slojevi su izloženi okruženju, dok skriveni sloj nema kontakt sa okruženjem.



Slika 40. Način rada neuronskih mreža

Mreža se obučava sa jednim setom podataka a testira se sa drugim kako bi se dostigla optimalna topologija i težinski faktori. Testiranje jedne prirodne neuronske mreže kod čoveka traje oko 20 godina, a to je predugo za eksperiment sa neizvesnim rezultatima [77]. Jedna neuronska mreža može biti korištena za predikciju (predviđanja). ANN često uspešno rešava probleme koji su previše kompleksni za konvencionalne tehnologije (na primer, problem koji nema algoritamsko rešenje ili za koji je algoritam previše komplikovan da bi bio pronađen) i one su često dobra pratnja problemima koje ljudi rešavaju. Postoje određena ograničenja i pretpostavke kod ANN koje treba pomenuti. Neuronska mreža je jedan oblik implementacije sistema veštačke inteligencije, koji predstavlja sistem koji se sastoji od određenog broja međusobno povezanih čvorova koje nazivamo veštačkim neuronima. Telo neurona naziva se čvor ili jedinica. Svaki od neurona ima lokalnu memoriju u kojoj pamti podatke koje obrađuje. Podaci koji se ovim kanalima razmenjuju su obično numerički. Arhitektura neuronske mreže predstavlja specifično povezivanje neurona u jednu celinu. Struktura neuronske mreže se razlikuje po broju slojeva. Prvi sloj se naziva ulazni, a poslednji izlazni, dok se slojevi između nazivaju skriveni slojevi. Najčešće ih ima tri. Prvi sloj, tj. ulazni je jedini sloj koji prima podatke iz spoljašnje sredine, sledeći (skriveni) prosleđuje relevantne podatke do trećeg (izlaznog) sloja. Na izlazu trećeg sloja dobijamo konačan rezultat. Složenije neuronske mreže imaju više skrivenih slojeva. Slojevi su međusobno potpuno povezani.

Slojevi komuniciraju tako što se izlaz svakog neurona iz prethodnog sloja povezuje sa ulazima svih neurona narednog sloja. Znači, svaki čvor ima nekoliko ulaza i jedan izlaz. Jačina veze kojom su neuroni povezani naziva se težinski faktor.



Slika 41. Izgled jedno slojne neuronske mreže

Značaj neuronskih mreža je u tome što mogu paralelno da obrađuju podatke, čije komponente su nezavisne jedne od drugih. Istovremeno radi više procesorskih jedinica, da bi rezultati njihove obrade prešli na sledeće jedinice (neurone). Procesorske jedinice u jednoj neuronskoj mreži su jednostavne i mogu obavljati samo jednu ili eventualno nekoliko računarskih operacija i međusobno su povezani tako da u jednoj neuronskoj mreži postoji mnogo više veza nego procesorskih jedinica. Broj ovih veza između neurona predstavlja snagu neuronske mreže, slika 41. Neuronske mreže se koriste u situacijama kada nisu poznata pravila prema kojima bi bilo moguće dovesti u vezu ulazne i izlazne podatke iz željenog sistema.

Neuronske mreže se ne programiraju, već se treniraju, tako da je potrebno dosta vremena za njihovo obučavanje, pre nego što počnu da se koriste. Obučavanje se vrši tako što se ažuriraju težinski koeficijenti da bi se sledeći put dobio izlaz bliži zadatoj vrednosti. Kada se obučavanje završi, težinski koeficijenti ostaju isti i mreža se može primeniti za predviđeni zadatak [126].

Trening se sastoji iz toga da korisnik zadaje ulazne i izlazne vrednosti, a program pokušava da dobije odgovarajuću izlaznu vrednost. Pri tome program, u početku, pravi određene greške, a odgovarajućom promenom težinskih koeficijenata, smanjuje se razlika između dobijene i zadate izlazne vrednosti.

Neuronske mreže se mogu klasifikovati prema:

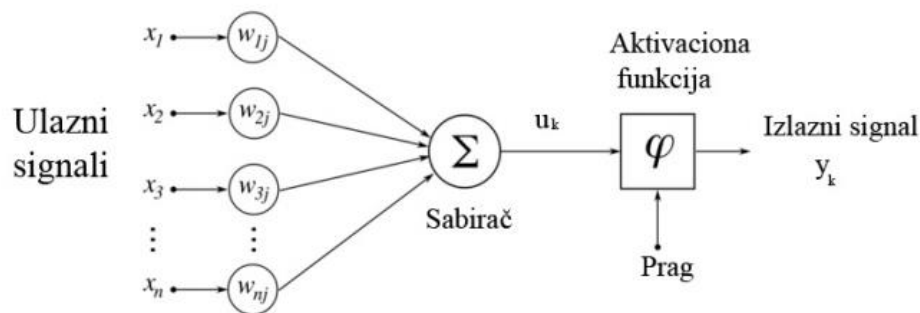
1. Broju slojeva (jedno slojne i višeslojne)
2. Vrsti veza između neurona
3. Vrsti obučavanja neuronskih mreža
4. Smeru prostiranja informacija (feedforward (nepovratne) i feedback (povratne))
5. Vrsti podataka

Neuronska mreža se može realizovati na dva načina:

1. Hardverska realizacija: fizičko povezivanje čvorova
2. Softverska realizacija: logičko (virtuelno) povezivanje čvorova

### 3.3.2. Delovi neuronske mreže

Kao kod svake nove tehnologije, i ovde je potrebno napraviti da bi se shvatio principi filozofija rada. Neuronska mreža je napravljena po uzoru na biološko nervno tkivo. Svako od nas u mozgu ima oko sto milijardi neurona, a na svaki od tih neurona dovodi se oko 10.000 signala sa drugih neurona. Sve to čini veoma složenu mrežu, iz koje stižu naše refleksne radnje, instinkti, svest, znanje, sećanje na razne događaje i iskustva, pa i naše celokupno psihičko biće. Šematski prikaz modela veštačkog neurona prikazano na slici 42. Neuron ima više ulaza i jedan izlaz. Svaki od ulaza (nacrtana su četiri, a može da ih bude manje ili mnogo više) dovodi signal sa nekog od prethodnih neurona, i taj signal se množi sa tzv. težinskim koeficijentom. Svi ulazi (a za svaki od njih postoji zaseban težinski koeficijent) se sabiraju, simbol  $\Sigma$  (suma) nacrtan u levoj polovini neurona. Takav zbir je ulazni parametar za prenosnu (aktivacionu) funkciju neurona, obeležen slovom  $\varphi$ . Izlaz iz neurona je samo jedan, a može da se vodi na više neurona u sledećem „sloju“ mreže.



Slika 42. Model veštačkog neurona

### 3.3.3. Aktivacijske (prenosne) funkcije

Aktivacijske funkcije dele se na: linearne i nelinearne.

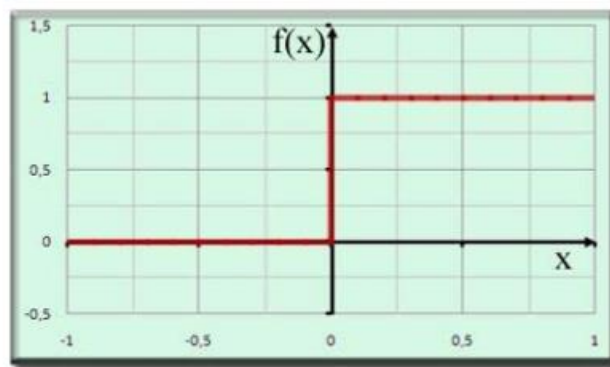
- Linearne aktivacijske funkcije – izlaz sabirača (sumatora) množi se nekim faktorom (pojačanjem) i tako dobiva izlaz neurona.
- Nelinearne aktivacijske funkcije – mogu poprimiti različite oblike, a najrasprostranjenije su: funkcije praga, sigmoidne, hiperbolične i harmoničke funkcije.

### 3.3.4. Funkcija tipa praga

Funkcija praga (step function) je korištena u modelu perceptora. Funkcije skoka ili praga (threshold function, hard-limiter) preslikava sve vrednosti iznad određene granice (praga) u neku fiksnu vrednost. Sve vrednosti ispod te iste granice preslikavaju se u nulu. Uobičajeno se za prag koristi vrednost 0, a sve vrednosti iznad praga se preslikavaju u vrednost 1. Korišćenjem tako definirane aktivacijske funkcije dobija se binarni izlaz iz neurona (slika 43). Izlaz se računa prema jednačini (3.1) [127].

Nelinearne aktivacijske funkcije prevode izlaz sabirača (sumatora) na izlaz neurona preko nelinearnog pojačanja. Na taj način funkcija praga osetljivosti daje na izlazu neurona 1, ako je izlaz sumatora veći od zadanog broja (prag osetljivosti), što odgovara ispaljivanju impulsa kod biološkog neurona. Ukoliko neuron nije aktivan, onda je na izlazu neurona 0.

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

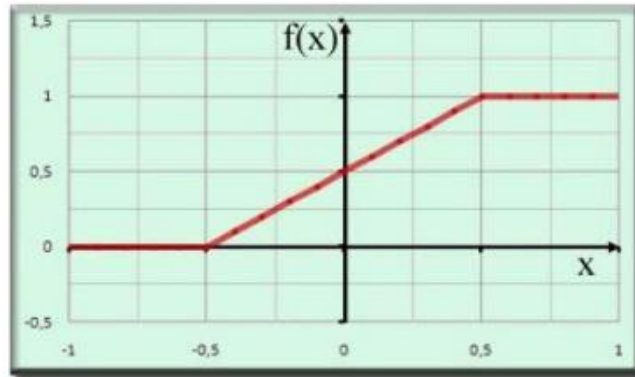


Slika 43. Aktivacijska funkcija skoka ili praga

### 3.3.5. Funkcija linearna po delovima

Aktivacijska funkcija koja je linearna po delovima (piecewise linear function) dobiva se ako je izlaz ADALINE inače ograničen na određeni interval. Tako je samo jedan deo preslikavanja linearan, dok periodi ispod i iznad zadane granice prelaze u minimalne, odnosno maksimalne vrednosti. Funkcija ima dve granice za ulaz i dve fiksne vrednosti za izlaz izvan granica. Kod pomenute funkcije se uobičajeno uzimaju -0,5 i +0,5 kao granice ulaza te 0 i 1 za vrednosti izlaza. Takva se funkcija može videti na slici 44 i zadaje se prema jednačini (3.2) [127].

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0.5 \\ x + 0.5, & -0.5 < x < 0.5 \\ 0, & x \leq -0.5 \end{cases} \quad (3.2)$$



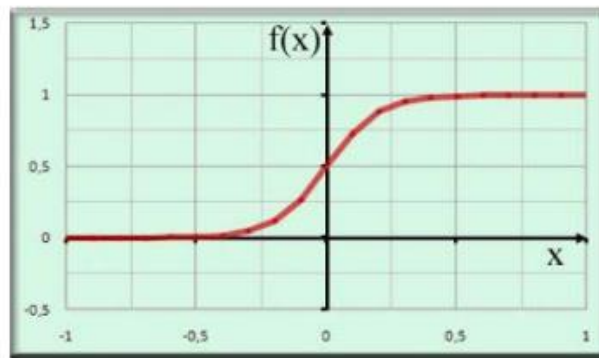
Slika 44. Linearna aktivacijska funkcija

### 3.3.6. Sigmoidalna funkcija

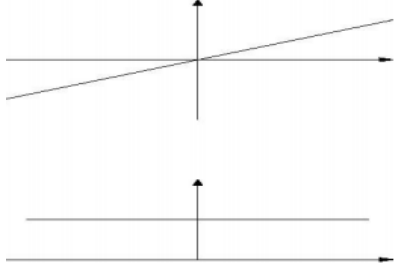
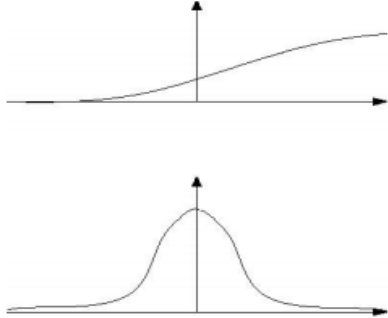
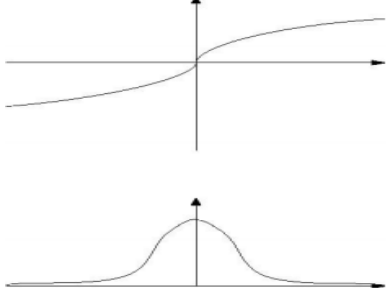
Sigmoidalna funkcija definisana je kao [127]:

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-ax}} \quad (3.3)$$

uz parametar  $a$  koji određuje nagib funkcije. Sigmoidalna funkcija ponekad se naziva i logističkom funkcijom. Sigmoidna funkcija (sigmoid function, slika 45.) ima parametar nagiba " $a$ " slika. Povećanjem nagiba smanjuje se prostor linearnosti pa treba biti oprezan s podešavanjem tog parametra. Najčešće se upotrebljavaju *logsig* i *tansig* funkcije slika 46. Sigmoidna funkcija je zapravo vrlo slična funkciji praga, ali se dozvoljava područje nesigurnosti unutar određenog intervala i upravo se zato takva funkcija najčešće koristi. Najčešći oblik prenosne funkcije jest sigmoidalna funkcija. Za razliku od prethodnih funkcija, ova je funkcija derivabilna što je, bitna prednost pri postupku učenja veštačke neuronske mreže.



Slika 45. Sigmoidna aktivacijska funkcija

NAZIV FUNKCIJE	IZRAZ ZA FUNKCIJU	GRAFIČKI PRIKAZ FUNKCIJE
PURELIN	$\psi(v) = g_a \cdot v$ $\psi'(v) = g_a$	
LOGSIG	$\psi(v) = \frac{1}{1 + e^{-gav}}$ $\psi'(v) = \frac{e^{-gav}}{(1 + e^{-gav})^2} = g_a \cdot \psi(1 - \psi)$	
TANSIG	$\psi(v) = \frac{1}{1 + e^{-gav}} - 1$ $\psi'(v) = \frac{4e^{-gav}}{(1 + e^{-gav})^2} = g_a \cdot (1 - \psi^2)$	

Slika 46. Tipovi aktivacionih funkcija

### 3.4.1. Rad veštačke neuronske mreže

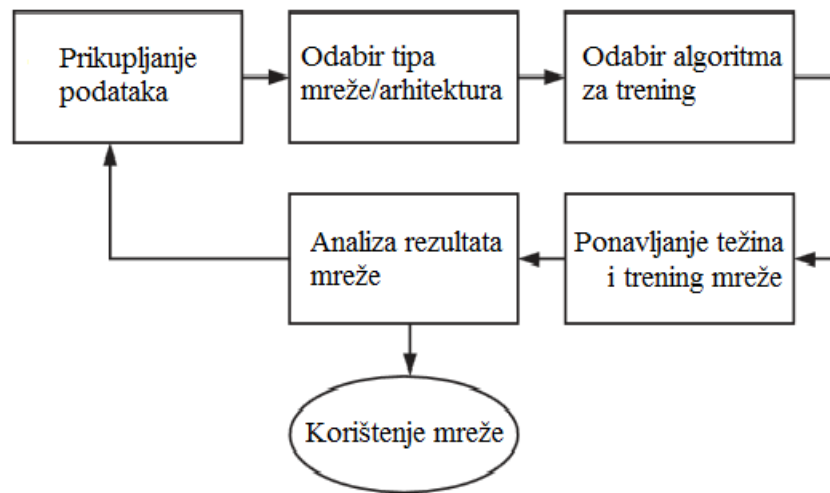
Rad veštačke neuronske mreže odvija se u dve osnovne faze:

1. faza učenja ili treniranja mreže,
2. faza testiranja



### 3.4.1.1. Faza učenja ili treniranje mreže

Učenje je proces menjanja težina u mreži, a odvija se kao odgovor na podatke iz spolja koji su predstavljeni u ulaznom sloju i u nekim mrežama izlaznog sloja. Podaci koji se predstavljaju u izlaznom sloju su željene vrednosti izlaznih promenljivih. Ukoliko su one poznate, radi se o tzv. nadgledanom učenju (npr. mreža širenje unatrag). Ukoliko je ulazni vektor jednak izlaznom vektoru, radi se o auto asocijativnim mrežama, a ukoliko je različit, radi se o hetero asocijativnim mrežama. Kod nekih mreža željeni izlaz ne mora biti predstavljen mreži. U tom slučaju radi se o tzv. ne nadgledanom učenju (npr. Kohonenova mreža) [129]. Slika 47. prikazuje neuronske mreže proces obuke (trening). To je postupak koji počinje prikupljanjem podataka da bi obuka (trening) bio efikasniji [124].

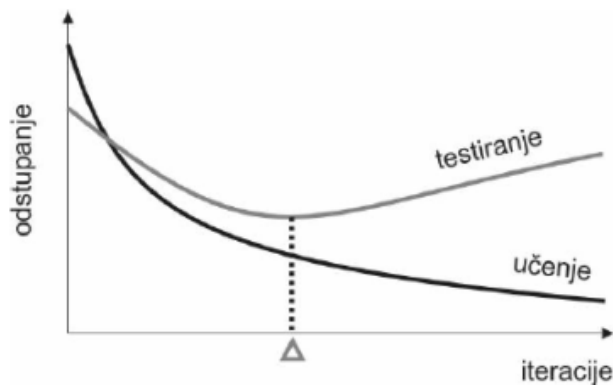


Slika 47. Dijagram toka procesa za obuku neuronske mreže (trening) [124]

Kod učenja podrškom ne postoji učitelj koji određuje kolika je greška za određeni par ulaz-izlaz, nego sudac koji samo kaže koliko je određeni korak u učenju dobar (daje ocenu ili podršku) [128]. Pre samog učenja potrebno je definisati model (ulazne i izlazne promenljive), i prikupiti podatke iz prošlosti na kojima će se primeniti mreža. Prikupljene podatke treba podeliti u dva pod uzorka (uzorak za treniranje i uzorak za testiranje), a ukoliko se za vreme učenja planiraju koristiti optimizacione tehnike za optimiziranje dužine učenja i strukture mreže, potrebno je ukupan uzorak podeliti na tri pod uzorka (za treniranje, testiranje i konačnu validaciju). Pravila za ovu podelu nema, osim što se preporučuje najveći deo podataka ostaviti za treniranje mreže, a manji deo podataka za testiranje i validaciju (npr. 70 % za treniranje, 10 % za testiranje i 20 % za validaciju).

Nakon što je definisan model, pripremljeni ulazni podaci i izabran algoritam neuronske mreže, i pravilo učenja i potrebne funkcije, mrežu treba učiti ili trenirati na pripremljenim podacima, kako bi ona prepoznala vezu između podataka i bila u mogućnosti na osnovu ulaznih

vrednosti predviđati izlaze. Sama faza učenja je proces podešavanja težina u mreži, koje se odvija u više iteracija ili prolaza kroz mrežu. Jedna iteracija predstavlja učitavanje jednog posmatranja iz podataka (jednog ulaznog i izlaznog vektora), ali se zbog povećanja brzine učenja ponekad preporučuje učitati više posmatranja odjednom, pri čemu se broj posmatranja koji se obrađuju u jednoj iteraciji zove epoha. U svakoj iteraciji računaju se nove težine, a kod nadgledanih algoritama i nova greška. Obično se mreža trenira u nekoliko hiljada iteracija [129]. Veštačku neuronsku mrežu moguće je, naime, pretrenirati - nakon određenog broja iteracija mreža gubi svojstvo generalizacije (svojstvo dobre klasifikacije za nepoznate ulaze). Stalnim praćenjem izlaza iz mreže dobijenog pomoću primera iz skupa za testiranje moguće je otkriti iteraciju u kojoj dobijeni izlaz najmanje odstupa od željenog odziva (slika 48.). Tačnost i preciznost obrade podataka moguće je na kraju proveriti nad trećim skupom primera – skupom za validaciju [130].



Slika 48. Odstupanje stvarnog izlaza kroz iteracije [130]

Najvažnije pitanje u ovoj fazi jest koliko dugo treba trenirati mrežu kako bi ona dala što bolji rezultat, odnosno najmanju grešku. Ne postoje egzaktna pravila za dužinu treniranja, te odgovor na ovo pitanje treba potražiti vlastitim eksperimentisanjem ili primenom optimizacionih tehnika kao npr. tehnika unakrsnog testiranja. Ova se tehnika može opisati u nekoliko koraka:

- mreža se najpre trenira na određenom broju iteracija (npr. 10 000),
- tako naučena mreža se testira na uzorku za testiranje te zapamti dobiveni rezultat i mreža.
- mreža se zatim nastavlja trenirati na još tolikom broju iteracija (npr. još 10 000), te se dobijeni rezultat upoređuje s prethodno pohranjenim. Ukoliko je u ponovnom učenju dobijen bolji rezultat, zapamti se novi rezultat i nova mreža.
- postupak se ponavlja sve dok se rezultat prestane poboljšavati, a najbolja zapamćena mreža ulazi u daljni postupak validacije [129].

### 3.4.1.2. Testiranje mreže

Testiranje mreže je druga faza rada neuronske mreže, i ona je odlučujuća za ocenjivanje mreže. Razlika između faze učenja i faze testiranja je u tome što u ovoj drugoj fazi mreža više ne uči, a to znači da su težine fiksne na vrednostima koje su dobijene kao rezultat prethodne faze učenja. Takvoj mreži se predstavljaju novi ulazni vektori koji nisu učestvovali u procesu učenja, a od mreže se očekuje da za predstavljen novi ulazni vektor proizvede izlaz. Ocenjivanje mreže obavlja se izračunavanjem greške ili nekog drugog merila tačnosti (npr. stope tačnosti), na način da se izlaz mreže upoređuje sa stvarnim izlazima.

Dobijena greška mreže na uzorku za validaciju je rezultat kojim se tumači uspešnost ili neuspešnost neuronske mreže i njena korisnost u primeni za predviđanje na budućim podacima. Najčešća greška koja se računa kod neuronskih mreža je srednja kvadratna greška (Root mean square error), prema jednačini Error!

$$RMS\ ERR = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (t_i - o_i)^2} \quad (3.4)$$

Greška se upoređuje prema broju izlaznih promenljivih  $i$  u odnosu na broj slučajeva u uzorku na kojem se računa [129].

### 3.4.1.3. Algoritmi učenja

Neuronska je mreža u potpunosti određena tek kada je uz njenu strukturu definisan i algoritam učenja. Algoritam učenja podešava parametre mreže s ciljem postizanja njenog željenog vladanja. [131].

Osnovna podela algoritma učenja :

- Učenje korekcijom greške (Back propagation, Gauss Newton, Levenberg Marquardt)
- Kompetitivno učenje
- Hebbovo učenje
- Boltzmannovo učenje
- Thorndikeovo učenje

#### 3.4.2.1. Učenje korekcijom greške

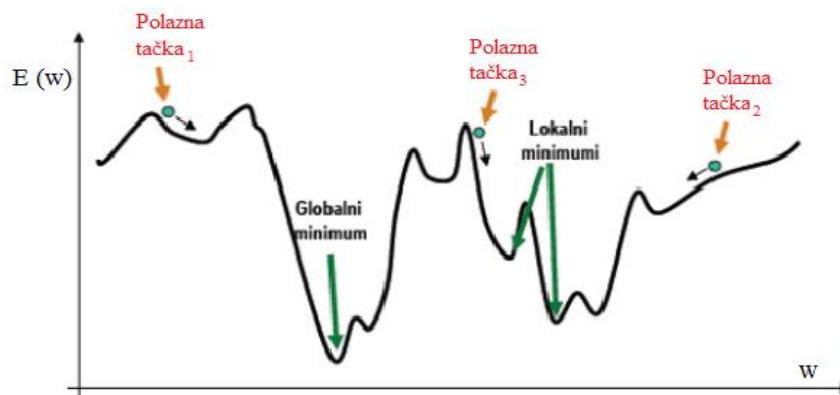
##### Backpropagation

Jedan od najčešćih algoritama učenja ANN [136, 137, 138] je algoritam povratnog prostiranja (Backpropagation algorithm) koji iterativnim postupkom određuje težinske koeficijente između slojeva u mreži.

Učenje back propagation algoritmom je optimizacijski problem koji se može dobro okarakterisati nazivom metoda silaznog gradijenta. Pomoću greške na izlazu podešavaju se težine od skrivenog do izlaznog sloja i tako redom do ulaznog sloja sa ciljem minimiziranja izlazne greške. Greška se tako propagira unazad i istovremeno se podešavaju težine. Kod ovakvog učenja problem je što su se težine, koje su se namestile za prvi primer, na kraju promenile u sasvim drugom smeru zbog čega je potrebno izvesti više prolaza kroz sve primere. Takvim algoritmom radimo gradijentni spust u lokalni minimum [139].

Problem lokalnog minimuma može se pokazati i u dvodimenzionalnoj ravni, slika 49.

Kretanjem korak po korak u smeru  $E(w)$  koja označava niže vrednosti greške daje nam naziv silazni gradijent. Međutim, značajna je razlika ako krenemo iz polazne tačka 1 ili iz polazne tačke 2. Ulazom u lokalni minimum algoritam detektuje za porast greške ako se nastavi kretati u bilo kojem smeru, i ne zna izaći iz lokalnog minimuma. Za rešenje ovog problema backpropagation algoritam se proširuje momentnim članom (backpropagation s momentom) koji unosi inerciju za smer kretanja što je prethodno pridonosio smanjenju greške.



Slika 49. Grafički prikaz algoritma učenja Backpropagation - lokalni i globalni minimumi.

Greška je razlika između željenog i dobijenog odziva neurona  $j$  u koraku  $n$ , a zadana je jednačinom – relacijom (3.5).

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (3.5)$$

Pri tome  $d_j(n)$  predstavlja željeni odziv neurona  $j$  u koraku  $n$ , a  $y_j(n)$  dobijeni odziv neurona  $j$  u koraku  $n$ .

Cilj učenja korekcijom greške je da se minimizira funkcija greške osnovna na greškama  $e_j(n)$  tako da se dobijeni odziv svih neurona približava željenom odzivu u nekom statističkom smislu. Najčešće se koristi srednja kvadratna greška kao funkcija greške određena jednačinom (30).

$$J = E \left[ \frac{1}{2} \sum_j e_j^2 (n) \right] \quad (3.6)$$

Pri tome  $E [.]$  predstavlja statistički operator očekivanja, a sumiranje se radi za sve neurone u izlaznom sloju mreže. Problem s minimizacijom funkcije  $J$  je da je potrebno znati statistička svojstva slučajnog procesa  $e_j (n)$ . Zbog toga se kao procena greške koristi trenutna vrednost greške u nekom koraku  $n$  kao funkcija koja se minimizira i data je jednačinom.

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_j e_j^2 (n) \quad (3.7)$$

Ovakav pristup daje približno rešenje.

### Kompetitivno učenje

Kompetitivno učenje je učenje bez nadzora. Neuroni se takmiče za priliku da se aktiviraju, a samo jedan neuron može biti aktivan u bilo kojem trenutku. Kompetitivno učenje se primenjuje za probleme klasifikacije. Tri osnovna elementa kompetitivnog učenja su :

- Skup jednakih neurona koji imaju slučajno raspoređene težine
- Ograničenje " jačine " svakog neurona tj. težina u mreži
- Mehanizam koji omogućava takmičenje neurona za pravo na odziv na danu pobudu, tako da je samo jedan neuron (ili jedan po grupi) aktivan u jednom momentu [135].

Primenjuje se samo onda kada regresione tehnike ne uspevaju da obezbede adekvatne modele. Nedostaci ANN modelovanja su: kvalitet izlaza zavisi od obima ulaznih podataka, oskudan je odnos ulaznih podataka u odnosu na broj izlaznih promenljivih pa može doći do pogrešnih zaključaka, može doći do prekida obuke mreže pre nego što greška mreže dostigne optimalnu ili približno optimalnu tačku i identifikaciju uticajnih parametara i njihova značajnost pomoću veštačke inteligencije nije moguća. Za ANN se koriste mnogi softverski alati a jedan od njih najpopularniji je softverski paket Matlab, koji u sebi ima ugrađen Neural Network Toolbox (NNT) za kreiranje neuronskih mreža. Primena Matlab-a za kreiranje neuronske mreže koji vrši predikciju obrtnog momenta, glavne i aksijalne sile rezanja. Glavna ograničenja za upotrebu veštačkih neuronskih mreža je što zahtevaju veliki set eksperimentalnih podataka.

Veliki broj radova, koji je naveden u pregledu literature, pokazuje da se u velikoj meri neuronske mreže primenjuju i u modelovanju različitih parametara obradnih procesa tako da će ovaj način modelovanja biti primenjen i ovoj doktorskoj disertaciji. Pomoću neuronskih mreža se dobijaju pouzdani modeli koji se mogu koristiti u projektovanju proizvodnih procesa u industriji tako da se veruje da će to biti slučaj sa modelima u disertaciji. Eksperimentalni podaci dobijeni po trofaktornom planu eksperimenta će se iskoristiti u modelovanju pomoću neuronskih mreža u cilju postavljanja modela i za njegovu njegovu proveru.

#### 4. MODELOVANJE POMOĆU FAKTORNOG PLANA EKSPERIMENTA

Modelom se iskazuju bitne važne karakteristike nekog procesa ili sistema. Matematički model sastoji se od sistema jednačina, stanja i algoritamskih pravila. Cilj matematičkog modeliranja je:

- proračunavane i analiza procesa ili sistema u cilju dobijanja, novih i potpunijih znanja i zakonitosti o proučavanom procesu ili sistemu;
- otkrivanje mehanizama međusobnog dejstva unutar proučavanog procesa;
- provera postavljenih hipoteza o zakonitostima i mehanizmima unutrašnjih međudejstava u sistemu ili procesu;
- prognoziranje stanja i ponašanja procesa, sistema i pojava;
- optimizacija na osnovu postavljenih kriterijuma optimizacije;
- upravljanje procesima ili sistemima u prostoru i vremenu [105].

Karakteristike višefaktornih eksperimentalnih planova su minimalni skup tačaka eksperimenta unutar eksperimentalnog hiperpostora (višestruko niži troškovi i kraće vreme trajanja skupih eksperimentalnih ispitivanja) kao i maksimalni skup informacija o efektima matematičkog modela procesa koji je formiran zahvaljujući istraživanju prema kibernetском pristupu.

Prva etapa eksperimentalnih istraživanja je prikupljanje, proučavanje i analiza svih relevantnih informacija o objektu istraživanja. Rezultati prve etape su: spisak uticajnih faktora (rangiran prema stepenu uticaja), granica rasipanja i druga obeležja faktora, kriterijumi i parametri u skladu sa postavljenim ciljem i slično. Ukoliko je broj uticajnih faktora veliki, neophodno je odvojiti manji broj značajnih od većeg broja manje uticajnih, primenom odgovarajućih metoda.

Najrasprostranjeniji eksperimenti su eksperimenti kod kojih se faktori variraju u dva nivoa (maksimalna i minimalna vrednost), pri čemu se srednja vrednost faktora ne tretira kao nivo variranja.

Plan matrice trofaktornog plana mora zadovoljavati uslove simetričnosti, normalnosti i ortogonalnosti. Ortogonalnost plana je jedna vrlo značajna karakteristika eksperimentalnog plana. Matematički se definiše:

$$\sum x_{iu}x_{ju} = 0, ; i \neq j \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, k \quad (4.1)$$

Ova karakteristika plana znači da se informaciona matrica  $M$  i disperziona matrica  $C=M^{-1}$  pretvara u dijagonalnu. To znači da se koeficijenti regresije ocenjuju nezavisno jedan od drugog. Time se uprošćava proračun ovih koeficijenata. Neki plan se naziva rotatabilan ako je disperzija vrednosti višestruke regresije funkcija rastojanja od centra plana. To znači da je disperzija konstanta u svim tačkama podjednako udaljenim od centra eksperimentalnog plana. Kriterijum

kom pozitivnosti određenog eksperimentalnog plana omogućuje da se eksperimentalni plan rastavi na sukcesivni niz planova. Prvi ciklus počinje sa jednostavnijim planom – planom prvog reda. Drugi i naredni ciklus su složeniji planovi - planovi drugog reda i narednih redova. Pri tome se pri obradi eksperimentalnih rezultata na kraju nekog plana ili ciklusa koriste i rezultati planova prethodnog ciklusa [106].

Na osnovu pregleda literature prikazano u prethodnim poglavljima može se videti da je ova metodologija u značajnoj meri zastupljena u modelovanju različitih parametara obradnih procesa i biće korišćena u modelovanju i u ovom radu. Eksperimentalni podaci dobijeni po trofaktornom centralnom kompozicionom planu koristili bi u zatim u modelovanju izlaznih parametara procesa pomoću neuronskih mreža. Za tim će se dati uporedna analiza dobijenih modela pomoću obe metodologije. U nastavku će biti prikazano modelovanje pomoću višefaktornih planova eksperimenta.

#### **4.1. Modelovanje višefaktornim planovima drugog reda**

Za nelinearne polinomne funkcije odziva drugog reda Box i Wilson su postavili poseban metod [107] u osnovi kojeg je sadržan centralni kompozicioni plan.

Pomoću ovog plane može se:

1. Identifikovati optimalna oblast sa optimalnom tačkom na nepoznatoj površini funkcije odziva.
2. Matematički modelirati optimalna oblast adekvatnim polinomom drugog ili višeg reda.
3. Definisati tolerancijske granice optimalnog područja svake od promenljivih višefaktornog objekta.

##### 4.1.1. Centralni kompozicioni plan drugog reda

Centralni kompozicioni plan drugog reda je jedan od osnovnih pojmova u teoriji regresionih modela drugog reda.

Kompozicija ovog plana je sledeća. Ako se u prvom ciklusu pokaže da su regresioni modeli prvog reda

$$\hat{y} = b_0 x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i, \quad (4.2)$$

nepotpuni koristi se model sa međusobnim uticajima,

$$\hat{y} = b_0 x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i<j}^k b_{ij} x_i x_j \quad (4.3)$$

Ako se takođe pokaže neadekvatnim, modeliranje se nastavlja izborom jednog ili više modela drugog reda,

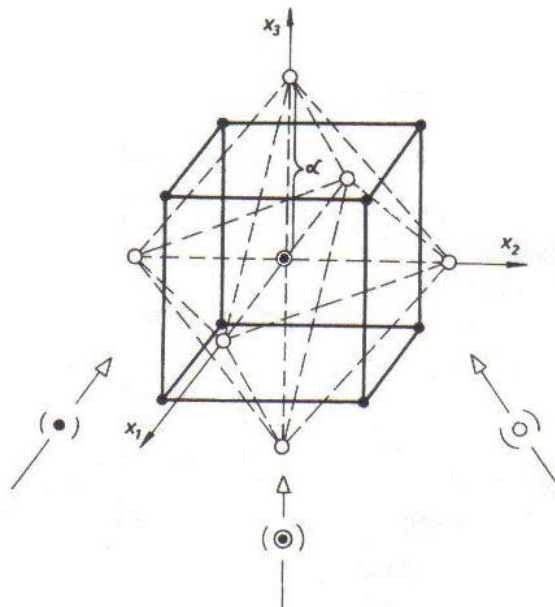
$$\hat{y} = b_0 x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j \quad (4.4)$$

sve do modela koji se pokaže adekvatnim.

U strukturi ovih modela nalaze se članovi međusobnih uticaja prvog reda  $x_i x_j$  i članovi drugog reda  $x_i^2$ , bez trostrukih međusobnih uticaja faktora.

U cilju izbegavanja odstupanja usled sistematskih poremećaja, kompletan skup eksperimentalnih opita se izvodi slučajnim redosledom. Često je moguće izvesti ograničene grupe opita unutar više homogenih stanja. Moguće je veću tačnost postići deljenjem planova u blokove i uvođenjem opita unutar bloka slučajnim redosledom.

Mogućnost komponovanja ovih planova može da se vidi ne slici 50. U prvom ciklusu se najčešće polazi od jednostavnih modelskih oblika i ortogonalnih planova nižeg reda. Zatim se nastavlja ukoliko se pokaže ovakav model neadekvatnim sa drugim ciklusom i uzima se model sa međusobnim uticajima. Pošto između višefaktornih planova prvog i višeg reda postoji međusobna povezanost, planovi višeg reda se komponuju tako da se ceo skup postojećih eksperimentalnih tačaka koristi u planu višeg reda. Ostaje onda samo da se izvedu dopunski eksperimenti u skladu sa planovima drugog reda. Na taj način se ostvaruje kontinuitet istraživanja kroz uzastopne cikluse. Takođe se na ovaj način postižu niži troškovi i kraće vreme istraživanja.





$$X = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}$$

Slika 50. Mogućnost komponovanja planova drugog reda

Da bi plan drugog reda bio centralni kompozicioni i rotacioni, vrednosti  $\alpha$  u planu, treba da se biraju prema tabeli 6. U donjem delu tabele su date vrednosti ako se eksperimenti izvode po blokovima i vrednosti za  $\alpha$ , kako bi se ispunio uslov ortogonalnosti blokova.

Tabela 6. Broj eksperimentalnih tačaka i izbor vrednosti  $\alpha$  za centralni kompozicioni plan

Centralni kompozicioni rotatabilni plan	k	2	3	4	5
	$n_k = 2^k$	4	8	16	32
$n_\alpha = 2k$	4	6	8	10	
$n_o$	5	6	7	10	
$\alpha = n_k^{1/4}$	1,414	1,682	2,0	2,378	
N ukupno	13	20	31	52	
Ortogonalni blokovi	$n_o$	4	6	6	8
	$\alpha$	1,414	1,633	2,0	2,366
	N ukupno	12	20	30	50
	Broj blokova	2	3	3	5

Ako se eksperimenti ponavljaju samo u centralnoj tački, ukupan broj eksperimentalnih tačaka u simetričnom planu drugog reda biće:

$$N = 2^k + 2k + n_o = n_k + n_\alpha + n_o, \quad (4.5)$$

pri čemu je :

- $n_k$  – broj tačaka temena hiperkuba,  
 $n_a$  – broj tačaka u centralnim osama,  
 $n_o$  – broj tačaka u centru.

Iako potpuni ortogonalni planovi eksperimenta sadrže vrlo mali broj eksperimentalnih tačaka u odnosu na jednofaktorne planove, ipak broj eksperimentalnih tačaka naglo raste kada se povećava broj faktora eksperimenta. Zbog toga modeliranje planova sa velikim brojem faktora postaje vrlo skupo i dugotrajno. Zbog toga se uzimaju parcijalni planovi eksperimenta za modele prvog reda pri čemu matrica plana eksperimenta zadržava svoja optimalna svojstva (ortogonalnost, invarijantnost, itd.) i ne gubi bitno svoj informativni sadržaj.

## 4.2. Trofaktorni model drugog reda

### 4.2.1. Regresiona analiza

Matematički model u stvarnim koordinatama ima oblik:

$$R = cF_1^{p_1} F_2^{p_2} F_3^{p_3} \exp[p_{11}(\ln F_1)^2 + p_{22}(\ln F_2)^2 + p_{33}(\ln F_3)^2 + p_{12} \ln F_1 \ln F_2 + p_{13} \ln F_1 \ln F_3 + p_{23} \ln F_2 \ln F_3] \quad (4.6)$$

gde je:

$$c = \exp(p_0); \quad (4.7)$$

$$R = \exp(\hat{y}) \quad (4.8)$$

Logaritmovanjem ove jednačine dobija se:

$$\hat{y} = p_0 + p_1 \ln F_1 + p_2 \ln F_2 + p_3 \ln F_3 + p_{11}(\ln F_1)^2 + p_{22}(\ln F_2)^2 + p_{33}(\ln F_3)^2 + p_{12} \ln F_1 \ln F_2 + p_{13} \ln F_1 \ln F_3 + p_{23} \ln F_2 \ln F_3 \quad (4.9)$$

dok je model u kodiranim koordinatama:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (4.10)$$

Koeficijenti  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ii}$  se određuju metodom najmanjih kvadrata na osnovu formule u matematičkom obliku:

$$B = (X' \cdot X)^{-1} \cdot X' \cdot Y \quad (4.11)$$

gde je:

B - matrica koeficijenata  $b_i, b_{ij}, b_{ii}$  koji se određuju

X-matrica plana eksperimenta

X' - transponovana matrica matrice X

(X'X)<sup>-1</sup> - inverzna matrica proizvoda matrice X 'X

Y - matrica logaritmovanih vrednosti merene veličine

#### 4.2.2. Kodiranje i izbor faktora eksperimenta

$\sqrt{2}$  Da bi se pojednostavila obrada podataka pomoću jednačine (6.9) vrši se kodiranje faktora eksperimenta pomoću jednačine:

$$x_i = 1 + 2 \frac{\ln F_{iu} - \ln F_{i1}}{\ln F_{i1} - \ln F_{i2}}; i=1,2; u = 1 - 3; \quad (4.12)$$

gde je:

$F_{i5}$  - kodirano  $x_i = -\sqrt{2}$  najniža vrednost faktora

$F_{i2}$  - kodirano  $x_i = -1$  niža vrednost faktora

$F_{i3}$  - kodirano  $x_i = 0$  srednja vrednost faktora

$F_{i1}$  - kodirano  $x_i = +1$  viša vrednost faktora

$F_{i4}$  - kodirano  $x_i = +\sqrt{2}$  najviša vrednost faktora

Za srednju vrednost faktora važi:

$$F_{i3}^2 = F_{i1} \cdot F_{i2} \quad (4.13)$$

Broj eksperimenata uključujući i srednji nivo zbog provere tačnosti  $k = 3$  faktornog eksperimenta uvećava se za  $n_0 = 4$   $n_\alpha = 12$ , pa je:

$$N = 2^k + n_0 + n_\alpha = 2^3 + 4 + 12 = 24 \quad (4.14)$$

#### 4.2.3. Određivanje koeficijenta regresije

U korišćenom matematičkom modelu se nalaze koeficijenti drugog reda, dvostruki međusobni uticaji, a bez trostrukih međusobnih uticaja, pri čemu je  $\alpha = \sqrt{2}$ .

Plan matrice eksperimenta za model drugog reda ima sledeći oblik:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix}
 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\
 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\
 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\
 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\
 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\
 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

Inverzna matrica proizvoda matrica  $\mathbf{X}$  i  $\mathbf{X}'$  jeste:

$$(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} = \frac{1}{48} \begin{bmatrix}
 10 & 0 & 0 & 0 & -4 & -4 & -4 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -4 & 0 & 0 & 0 & 4 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 -4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 -4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 4 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6
 \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

Množenjem matrica  $\mathbf{X}'$  i  $\mathbf{Y}$  dobija se matrica kolona:

$$X \cdot Y = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{24} y_i \\ -y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8 + \sqrt{2}(-y_{13} + y_{14} - y_{19} + y_{20}) \\ -y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8 + \sqrt{2}(-y_{15} + y_{16} - y_{21} + y_{22}) \\ -y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + \sqrt{2}(-y_{17} + y_{18} - y_{23} + y_{24}) \\ \sum_{i=1}^8 y_i + 2(-y_{13} + y_{14} - y_{19} + y_{20}) \\ \sum_{i=1}^8 y_i + 2(-y_{13} + y_{14} - y_{19} + y_{20}) \\ y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8 \\ y_1 - y_2 + y_3 - y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8 \\ y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Koeficijenti regresije su:

$$b_0 = \frac{1}{48} \left[ 10 \sum_{i=0}^{24} y_i - 4 \left( 3 \sum_{i=1}^8 y_i + 2 \sum_{i=13}^{24} y_i \right) \right]$$

$$b_1 = \frac{1}{48} * 3 \left[ -y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8 + \sqrt{2}(-y_{13} + y_{14} - y_{19} + y_{20}) \right]$$

$$b_2 = \frac{3}{48} \left[ -y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8 + \sqrt{2}(-y_{15} + y_{16} - y_{21} + y_{22}) \right]$$

$$b_3 = \frac{3}{48} \left[ -y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + \sqrt{2}(-y_{17} + y_{18} - y_{23} + y_{24}) \right]$$

$$b_{11} = \frac{1}{48} \left[ -4 \sum_{i=1}^{24} y_i + 6 \sum_{i=1}^8 y_i + 8(y_{13} + y_{14} + y_{19} + y_{20}) + 2 \sum_{i=13}^{24} y_i \right]$$

$$b_{22} = \frac{1}{48} \left[ -4 \sum_{i=1}^{24} y_i + 6 \sum_{i=1}^8 y_i + 8(y_{15} + y_{16} + y_{21} + y_{22}) + 2 \sum_{i=13}^{24} y_i \right]$$

$$b_{33} = \frac{1}{48} \left[ -4 \sum_{i=1}^{24} y_i + 6 \sum_{i=1}^8 y_i + 8(y_{17} + y_{18} + y_{23} + y_{24}) + 2 \sum_{i=13}^{24} y_i \right]$$

$$b_{12} = \frac{1}{48} (y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8)$$

$$b_{13} = \frac{1}{48} (y_1 - y_2 + y_3 - y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8) \quad (4.18)$$

$$b_{23} = \frac{1}{48} (y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8)$$

## 4.2.4. Dekodiranje trofaktornog modela drugog reda

Računski model sa kodiranim faktorima eksperimenta ima oblik:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \quad (4.19)$$

posle uvrštavanja vrednosti za kodirane faktore  $x_i$  (8.10), uz uprošćenja (8.11) dobija se:

$$\hat{y} = p_0 + p_1 \ln F_1 + p_2 \ln F_2 + p_3 \ln F_3 + p_{11} (\ln F_1)^2 + p_{22} (\ln F_2)^2 + p_{33} (\ln F_3)^2 + p_{12} \ln F_1 \ln F_2 + p_{13} \ln F_1 \ln F_3 + p_{23} \ln F_2 \ln F_3 \quad (4.20)$$

Pri čemu je:

$$\begin{aligned} p_0 &= b_0 + b_1 a_1 + b_2 a_2 + b_3 a_3 + b_{11} a_1^2 + b_{22} a_2^2 + b_{33} a_3^2 + b_{12} a_1 a_2 + b_{13} a_1 a_3 + b_{23} a_2 a_3 \\ p_1 &= A_1 (b_1 + 2b_{11} a_1 + b_{12} a_2 + b_{13} a_3) \\ p_2 &= A_2 (b_2 + 2b_{22} a_2 + b_{12} a_1 + b_{23} a_3) \\ p_3 &= A_3 (b_3 + 2b_{33} a_3 + b_{13} a_1 + b_{23} a_2) \\ p_{11} &= b_{11} A_1^2 \quad p_{22} = b_{22} A_2^2 \quad p_{33} = b_{33} A_3^2 \\ p_{12} &= b_{12} A_1 A_2 \quad p_{13} = b_{13} A_1 A_3 \quad p_{23} = b_{23} A_2 A_3 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Anti logaritmovanjem se dobija matematički model u stvarnim koordinatama:

$$R = c F_1^{p_1} F_2^{p_2} F_3^{p_3} \exp \left[ p_{11} (\ln F_1)^2 + p_{22} (\ln F_2)^2 + p_{33} (\ln F_3)^2 + p_{12} \ln F_1 \ln F_2 + p_{13} \ln F_1 \ln F_3 + p_{23} \ln F_2 \ln F_3 \right] \quad (4.22)$$

$$c = \exp(p_0); \quad R = \exp(\hat{y})$$

## 4.2.5. Disperziona analiza.

Za ocenu signifikantnosti suma kvadrata i disperzioni odnosi će biti:

$$\begin{aligned} S_{b_0} &= \frac{48}{10} b_0^2 S_{b_0}^2 = \frac{S_{b_0}}{1} F_{r_0} = \frac{S_{b_0}^2}{S_E^2} \\ S_{b_i} &= \frac{48}{3} b_i^2 S_{b_i}^2 = \frac{S_{b_i}}{1} F_{r_i} = \frac{S_{b_i}^2}{S_E^2} \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$S_{b_{ii}} = \frac{48}{4} b_{ii}^2 S_{b_{ii}}^2 = \frac{S_{b_{ii}}}{1} F_{r_{ii}} = \frac{S_{b_{ii}}^2}{S_E^2}$$

$$S_{b_{ij}} = \frac{48}{6} b_{ij}^2 S_{b_{ij}}^2 = \frac{S_{b_{ij}}}{1} F_{r_{ij}} = \frac{S_{b_{ij}}^2}{S_E^2}$$

Pošto su svi stepeni slobode  $f_1=f_i=1$ , disperzija u eksperimentalnim tačkama gde ima ponavljanja se računa:

$$S_{EA} = \sum_{u=9}^{12} (y_u - y_{sr})^2 \quad (4.24)$$

$$y_{sr} = \frac{1}{4} \sum_{u=9}^{12} y_u$$

$$S_{EB} = \left[ y_{13} - \left( \frac{y_{13} + y_{19}}{2} \right) \right]^2 + \left[ y_{19} - \left( \frac{y_{13} + y_{19}}{2} \right) \right]^2 + \left[ y_{14} - \left( \frac{y_{14} + y_{20}}{2} \right) \right]^2 + \left[ y_{19} - \left( \frac{y_{14} + y_{20}}{2} \right) \right]^2 + \dots \quad (4.25)$$

$$S_E = S_{EA} + S_{EB} \quad (4.26)$$

$$S_E^2 = \frac{S_E}{f_E}$$

Ponavljjanje u nultoj tački i dva ponavljanja u dve tačke plana

$$f_E = n_0 - 1 + 2(n_u - 1) = 4 - 1 + 2(2 - 1) = 3 + 2 = 5 \quad (4.27)$$

Rezidualna suma jeste:

$$S_R = \sum_{i=1}^{24} \left( y_i - \hat{y}_i \right)^2 \quad (4.28)$$

$$S_R^2 = \frac{S_R}{f_R} \quad ; \quad f_R = N - \frac{(k+1)(k+2)}{2} = 24 - \frac{4 \cdot 5}{2} = 14 \quad (4.29)$$

$$S_a^2 = \frac{S_R - S_E}{f_a} \quad (4.30)$$

$$f_a = f_R - f_E = 9 \quad (4.31)$$

Za signifikantnost parametara tablična vrednost koeficijenta Fišerove raspodela je:  $F_{t(1.5)} = 6,61$

Za adekvatnost modela tablična vrednost koeficijenta Fišerove raspodela je:

$$F_a = \frac{S_a^2}{S_E^2}, F_{t(9,5)} = 4,47 \quad (4.32)$$

#### 4.2.6. Ocena tačnosti matematičkog modela

Ocena tačnosti se vrši pomoću intervala poverenja:

$$y_R \pm t_{\alpha f} \sqrt{\sigma(y)^2} \quad (8.27) \quad (4.33)$$

Tablična vrednost prema Studentovoj raspodeli je:

$$t_{\alpha f} = t_{0,05,14} = 2,145$$

Za centralnu tačku standardna devijacija je:

$$\sigma(y)^2 = \frac{10}{48} S_R^2 \quad (4.34)$$

Dok je za tačke na rogljevima modela;

$$\sigma(y)^2 = \frac{1}{48} (10 + 3 + 3 + 3 + 3 * 4 + 3 * 6 - 2 * 3 * 4 + 2 * 3 * 1) = \frac{31}{48} S_R^2 \quad (4.35)$$

Za tačke izvan kuba standardna devijacija jeste:

$$\sigma(y)^2 = \frac{1}{48} [10 + 4 * 3 + 4 * 4 * 4 - 2(1 * 2)^2 * 4] = \frac{54}{48} S_R^2 \quad (4.36)$$



## 5. USLOVI PRI IZVOĐENJU EXPERIMENTA

### 5.1. Mašina alatka

Mašina alatka na kojoj je vršena obrada rezanjem je univerzalni strug – Prvomajska DK480. Univerzalni strug – Prvomajska DK480 je instaliran u Laboratoriju za obradu metala rezanjem na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu. Prikaz mašine dat je na slici 51. Pomenuta mašina alatka ima sledeće karakteristike:

Snagu elektromotora 10 KW,

maksimalni prečnik obrade je 320 mm,

maksimalna dužina obrade je 2000 mm,

Vrednosti pomaka navedenog struga su prikazani u tabeli 7.

Tabela 7. Pomaci na strugu

s	0.045, 0.05, 0.056, 0.063, 0.071, 0.08, 0.09, 0.1, 0.112, 0.125, 0.14, 0.16, 0.18,
(mm/o)	0.2 0,224, 0.25, 0.28, 0.315, 0.355, 0.4, 0.45, 0.5, 0.56, 0.63, 0.71, 0.8, 0.9, 1.0

Vrednosti brojeva obrtaja koji postoje na mašini su u tabeli 8.

Tabela 8. Brojevi obrtaja

n	45, 56, 71, 90, 112, 140, 180, 224, 280, 355,
(o/min)	450, 560, 710, 900, 1120, 1400, 1800



Slika 51. Univerzalni strug – Prvomajska DK480

## 5.2. Karakteristike alata korišćenog pri obradi

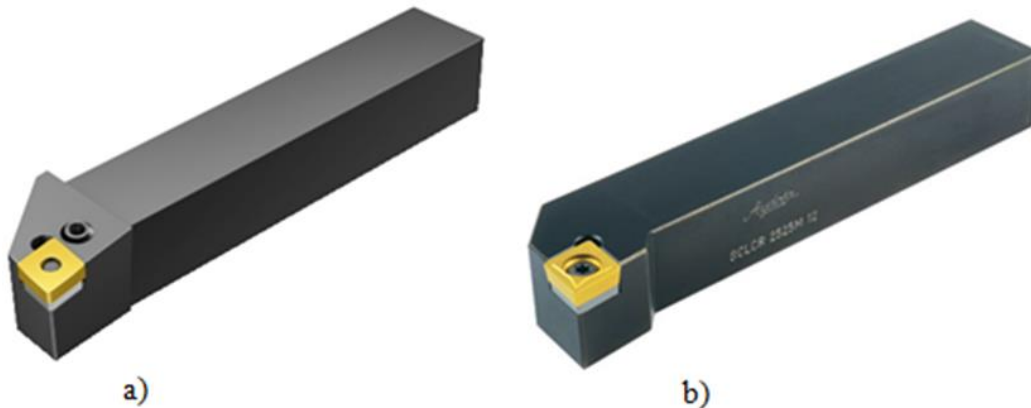
Na osnovu literaturnih izvora i dostupnosti alata, odabrane su dve vrste materijala alata i to: dve vrste pločica; od tvrdog metala P 30 (TM) oznaka CCMW 12 04 04 i CNMA 12 04 04 proizvođača ORION iz Nemačke [114], i dve vrste pločice od kubnog bornitrida (CBN) oznaka: CNMA 12 04 04 ABC 25/F i CCMW 12 04 04 od proizvođača ATRON iz Nemačke. Ove dve vrste pločica su odabrane zbog različitih grudnih uglova. Na slici 52. su prikazane rezne pločice navedenih oznaka korišćenih u eksperimentu.



Slika 52. Rezne pločice od TM (a, c) i CBN (b, d)

Oznake reznih pločica prema standardu DIN 4983 bliže definišu geometriju, i to: oblik pločice C → romb; leđni ugao N →  $\alpha = 0^\circ$ , C →  $\alpha = 7^\circ$ ; klasa tolerancije M; tip pločice → sa otvorom oblika A, W i G; dužina reznog sečiva → 12.7 mm (12); debljina rezne pločice → 4.76 mm (04); radijus vrha alata → 0.4 mm (04). Sve pločice imaju grudni ugao ( $\gamma = 0^\circ$ ) nula.

Kako je reč o dve vrste geometrije pločice sa leđnim uglom od  $\alpha = 0^\circ$  i  $\alpha = 6^\circ$  neophodno je izabrati odgovarajuće nosače alata u koje će se postaviti rezne pločice i ostvariti pomenuti grudni uglovi. U skladu sa DIN 4983 odabrana su dva nosača oznaka PCLNR 25 25 M12 i SCLCR 25 25 M12, prikazani na sl.53.



Slika 53. Nosač alata PCLNR 25 25 M16 (a) i SCLCR 25 25 M12 (b) [114]

Oznake nosača alata prema standardu DIN 4983 bliže definišu: sistem stezanja  $P \rightarrow$  preko otvora; oblik pločice  $C \rightarrow$  romb; napadni ugao noža  $L \rightarrow \kappa = 91^\circ$ ,  $\kappa_1 = 5^\circ$ ; ledjni ugao  $N \rightarrow \alpha = 0^\circ$ ,  $C \rightarrow \alpha = 7^\circ$ ; smer rezanja  $R \rightarrow$  desno; poprečni presek tela  $\rightarrow$  visina 25 mm; poprečni presek tela  $\rightarrow$  širina 25 mm; dužina nosača alata  $M \rightarrow$  150 mm; dužina koja odgovara reznom sečivu pločice je 12 mm.

Imajući u vidu odabrane rezne pločice i nosače alata može se zaključiti da će se eksperiment izvoditi sa pločicama od CBN i TM, za dva slučaja pri različitim geometrijskim uslovima obrade prikazanim u tabela 9 i tabela 10.

Tabela 9. Geometrija reznog alata 1

$\gamma$	$\alpha$	$\lambda$	$\kappa$	$\kappa_1$	$r$
$0^\circ$	$7^\circ$	$-6^\circ$	$91^\circ$	$5^\circ$	0,4
Pločice: CBN $\rightarrow$ CCMW 12 04 04; TM $\rightarrow$ CCMW 12 04 04					

Tabela 10. Geometrija reznog alata 2

$\gamma$	$\alpha$	$\lambda$	$\kappa$	$\kappa_1$	$r$
$-6^\circ$	$6^\circ$	$-6^\circ$	$91^\circ$	$5^\circ$	0,4
Pločice: CBN $\rightarrow$ CNMA 12 04 04; TM $\rightarrow$ CNMA 12 04 04;					

## 5.3. Obradak

Pre izvođenja eksperimenta izvršena je priprema obratka. Obradak je termički obrađivani čelik 90MnCrV8 (Č 3840) čija je radna tvrdoća 55 HRC, kružnoga preseka Ø34 mm i dužine 500 mm. Da bi se rezanje lakše izvodilo i zbog verodostojnijih rezultata merenja obradak je stegnut u steznu glavu jednim krajem, a drugim krajem se oslanja na šiljak. Skinut je određeni sloj materijala sa obratka kako bi se izbeglo bacanje-ovalnost a rezultati bili verodostojniji. Dužinu šipke od 500 mm potrebno je podeli na 24 polja dužine od 10 mm na kojima bi se izvodila uzdužna obrada reznim pločicama (TM i CBN) bez prisustva sredstava za hlađenja i podmazivanje (SHP) kao što je prikazano na slici 55. Svako polje je planirano za jednu eksperimentalnu tačku. Na ovaj način omogućena je obrada u jednom stezanju, a time su obezbeđeni isti uslovi za sve eksperimentalne tačke.

Materijal obratka je legirani alatni čelik za rad u hladnom stanju 90MnCrV8 (Č 3840) ili tzv. *Merilo* alatni čelik za univerzalnu primenu. Ima veliku tvrdoću i minimalne deformacije; koristi se pretežno za merne alate, noževe za makaze, spiralne burgije, alate za rezanje navoja, razvrtače, kontrolnike, alate za prosecanje limova, ima visoku prokaljivost i dimenziono je stabilan pri termičkoj obradi.

Tabela 11. Označavanje, hemijski sastav i mehaničke osobine obratka

Čelik	Slovna SRPS EN oznaka		Brojčana SRPS EN oznaka		JUS oznaka		
		90MnCrV8		1.2842		Č3840	
Grupa čelika: Legirani alatni čelik za rad u hladnom stanju: alatni čelik ili tzv. <i>Merilo</i> , Mn-V ili Mn-Cr-W							
Standardi: EN ISO4957 Legirani alatni čelik za rad u hladnom stanju							
<b>Hemijski sastav (%)</b>							
C	Si	Mn	Cr	V	P	S	
0,85-0,95 (0,9)	0,1-0,4 (0,35)	1,8-2,2 (2,0)	0,2-0,5 (0,45)	0,05-0,2 (0,15)	Max 0,03 -	Max 0,03 -	
<b>Fizička svojstva ( mehanička i termička svojstva)</b>							
Tvrdoća (pri isporuci)	max. 230 HB						
Jačina materijala Rm	cca 780 N/mm <sup>2</sup>						
Radna tvrdoća	55 HRC						
Termički koeficijent širenja 10 <sup>-6</sup> mm/(m·k)	20-100 °C	20-200 °C	20-300 °C	20-400 °C	20-500 °C	20-600 °C	20-700 °C
	12.1	13.3	13.8	14.3	14.1	14.2	14.6
Termički koeficijent provodljivosti w/(m·k)	20 °C		350 °C			700 °C	
	32,8		32			31,5	



#### 5.4. Režimi obrade

Režim obrade je obuhvatio sledeće elemente :

- brzinu rezanja  $v$  (m/min),
- pomak  $s$  (mm/o) i
- dubinu rezanja  $a$  (mm).

Variranje faktora eksperimenta se vršilo u 5 nivoa vrednosti, tako da je srednja vrednost između dva susedna nivoa geometrijska sredina tih vrednosti, a najviši i najniži nivo su udaljeni za vrednost  $\alpha = \pm 1,41$ . Izabrani nivoi faktora su prikazani u tabeli 12.

Tabela 12. Nivoi parametara eksperimenta

Nivoi (Funkcije pripadnosti)	Brzina rezanja $v$ (m/min)	Brzina rezanja $v$ (m/s)	Pomak $s$ (mm/o)	Dubina rezanja $a$ (mm)
Najveća +1,41	180	3	0,25	0,7
Velika +1	160	2,66	0,2	0,5
Srednja 0	120	2	0,1	0,22
Mala -1	90	1,5	0,05	0,1
Najmanja -1,41	80	1,33	0,045	0,07

Režimi obrade prema centralnom kompozicionom planu eksperimenta, prikazani su u tabeli 13. za oba tipa obrade struganjem reznim pločicama od TM i reznim pločicama od CBN za dva slučaja kada je grudni ugao  $\gamma = 0^\circ$  i kada je  $\gamma = -6^\circ$ .

Tabela 13. Režimi rezanja pri izvođenju eksperimentalnih ispitivanja prema centralnom kompozicionom trofaktornom planu

Redni broj	Kod faktora				Faktor		
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	v (m/min)	s (mm/o)	a (mm)
1	1	-1	-1	-1	90	0,05	0,10
2	1	1	-1	-1	160	0,05	0,10
3	1	-1	1	-1	90	0,20	0,10
4	1	1	1	-1	160	0,20	0,10
5	1	-1	-1	1	90	0,05	0,50
6	1	1	-1	1	160	0,05	0,50
7	1	-1	1	1	90	0,20	0,50
8	1	1	1	1	160	0,20	0,50
9	1	0	0	0	120	0,10	0,22
10	1	0	0	0	120	0,10	0,22
11	1	0	0	0	120	0,10	0,22
12	1	0	0	0	120	0,10	0,22
13	1	-1,41	0	0	80	0,10	0,22
14	1	1,41	0	0	180	0,10	0,22
15	1	0	-1,41	0	120	0,045	0,22
16	1	0	1,41	0	120	0,25	0,22
17	1	0	0	-1,41	120	0,10	0,07
18	1	0	0	1,41	120	0,10	0,70
19	1	-1,41	0	0	80	0,10	0,22
20	1	1,41	0	0	180	0,10	0,22
21	1	0	-1,41	0	120	0,045	0,22
22	1	0	1,41	0	120	0,25	0,22
23	1	0	0	-1,41	120	0,10	0,07
24	1	0	0	1,41	120	0,10	0,70

### 5.5. Merenje hrapavosti obrađene površine

Osim mašine alatke, reznog alata i obratka, koji su korišteni za prethodno merenje sile rezanja, čine još Talysurf 6 uređaj za merenje hrapavosti obrađene površine. Uređaj Talysurf 6 (slika 55.) je kompjuterizovani merni sistem za merenje i analizu hrapavosti koji daje osnovne karakteristike mikogeometrije kontaktnih površina, koji omogućuje merenje širokog spektra parametara koji opisuju karakteristike tehničkih površina: merenje osnovnih i dopunskih parametara hrapavosti i valovitosti, statističku obradu rezultata merenja parametara hrapavosti, prikazivanje rezultata na ekranu, njihovo memorisanje, štampanje i crtanje, prostorno skeniranje površine.



Slika 55. Merni sistem za Talysurf-6 povezan sa računarom i primer merenja

Očitavanje parametara hrapavosti kod mernog uređaja Talysurf 6 vrši se nakon proračuna pomoću računara na ekranu, štampanjem ili zapisivanjem na termo osetljivoj traci. Personalni računar je sa mernim uređajem Talysurf-6 povezan pomoću serijske veze COM-3. Umesto štampača postavljen je računar koji je povezan pomoću specijalnog adaptera sa mernom mašinom. Osnovni delovi mernog uređaja Talysurf-6 povezanog sa računarom je šematski prikazan na slici 56.

Na ovaj način je omogućen prijem i zapis signala koji merni uređaj i njen računar šalju štampaču na dalju obradu ovako dobijenih podataka. Talysurf 6 čine sledeći elementi:

- Kompjuterski sistem TALYDATA 2000 sa monitorom, pojačivač signala sa merne igle,
- EPSON HX-20 mini kompjuter sa tastaturom i mini matričnim štampačem,
- EPSON FX-80 štampač (ploter) sa rad sa termoosetljivim papirom perforiranim sa bočnih strana,
- 120 mm nosač sa pogonom i mernom iglom,
- Postolje sa vertikalnim stubom i pogonom za pomeranja duž vertikalne ose radi pozicioniranja merne igle,
- Linearni pisač i 160 mm poprečni nosač sa nezavisnim pogonom.

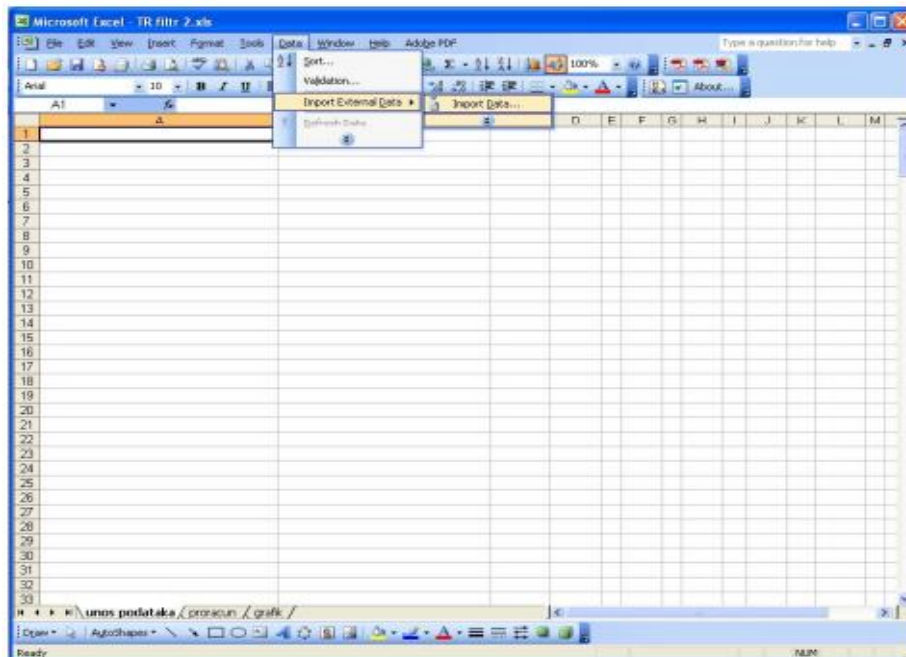
Parametri topografije površine koji su mereni uređajem Talysurf-6 date su u tabeli 14.



Tabela 14. Parametri topografije površine koji su mereni uređajem Talysurf-6.

Rt1-Rt5, $\mu\text{m}$	Maks. visine profila na referentnim dužinama, na dužini ocenjivanja
Ra, $\mu\text{m}$	Srednje aritmetičko odstupanje profila na dužini ocenjivanja
Rq, $\mu\text{m}$	Srednje kvadratno odstupanje profila na dužini ocenjivanja
Ry, $\mu\text{m}$	Maksimalna visina profila, maksimalna Rti vrednost
Rtm, $\mu\text{m}$	Srednja Rti vrednost
Rv, $\mu\text{m}$	Najveća dubina udubljenja profila
Rp, $\mu\text{m}$	Najveća visina ispupčenja profila
Sm, $\mu\text{m}$	Srednji korak ispupčenja profila
$\Delta q, ^\circ$	Srednji kvadratni ugao nagiba profila
Rsk	Koeficijent asimetrije profila, mera simetrije krive raspodele amplituda
Rku	Kurtosis, mera zaoštrenosti krive raspodele amplituda
S, $\mu\text{m}$	Srednji korak lokalnih ispupčenja profila
R3z, $\mu\text{m}$	Srednja vrednost rastojanja trećeg po visini ispupčenja i trećeg po dubini udubljenja na referentnoj dužini profila
Rpm, $\mu\text{m}$	Srednja vrednost Rpi određenih na referentnim dužinama
R3y, $\mu\text{m}$	Najv. rast. trećeg po visini ispupčenja i trećeg po dubini udubljenja na refer. dužini

Tekstualni podaci iz datoteke se mogu upotrebiti tek nakon učitavanja u program Microsoft Office Excel i kreiranu softversku aplikaciju. Učitavanje se vrši pomoću naredbi Data - Import External Data – Import Data... i izbora tekstualne datoteke (slika 56).



Slika 56. Učitavanje datoteke sa podacima

Odgovarajućim izborima i podešavanjima konačno se učitava tekstualna datoteka, slika 57. Primer konačnog izveštaja je prikazan na slici 58.

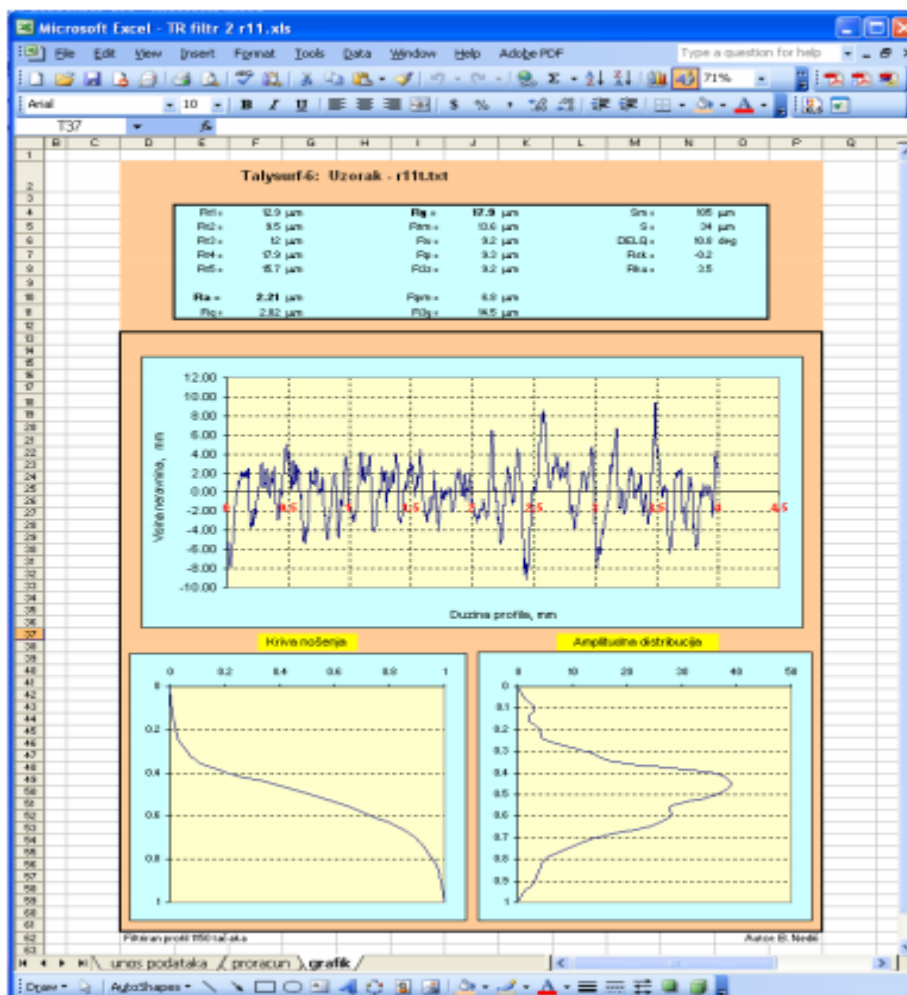
 A screenshot of Microsoft Excel showing the final imported data. The spreadsheet is divided into two main sections. The top section, starting from row 11, contains a table with columns for 'DATA' and 'PARAMETERS'. The 'DATA' section has columns for N=1 through N=5. The 'PARAMETERS' section lists various parameters with their values.
 

DATA		N=1	N=2	N=3	N=4	N=5
11	AVESKO0.B	mm	NORMAL			
12	ID	I 0-775	D			
13		I BTrip	I 81EGE UM			
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
33						
34						
35						
36						
37						

PARAMETERS		
300	Rp1	12.9 um
301	Rp2	9.5 um
311	Rp3	12 um
312	Rp4	17.9 um
313	Rp5	95.7 um
314	Rp6	2.21 um
315	Rp7	2.82 um
316	Rp8	17.9 um
317	Rp9	13.6 um
318	Rp10	9.2 um
319	Rp11	9.3 um
320	Sin	185 um
321	DELTA	30.0 deg
322	Rp12	61.2 um
323	Rp13	3.5 um
324	S	24 um
325	Rp14	9.2 um
326	Rp15	6.9 um
327	Rp16	14.5 um
328		

Slika 57. Konačan izgled učitane tekstualne datoteke



Slika 58. Konačni izgled izveštaja

Šema merenje parametara hrapavosti obrađene površine u procesu struganja je prikazana na slici 69.



Slika 69. Šema merenje parametara hrapavosti obrađene površine u procesu struganja

## 5.6. Merenje temperature rezanja

Merenje temperature u zoni rezanja je vršeno u kratkom vremenskom intervalu jer je dužina obrade bila 10 mm, tako da je vreme merenja temperature prilagođeno režimima obrade. Uslovi merenja temperature u zoni rezanja su bili jednaki i kamera je bila fiksirana na nosaču alata.

Pored mašine alatke, reznog alata i obratka koji su korišteni za merenje sile rezanja, za merenje temperature u zoni rezanja pri obradi na strugu alatima od tvrdoga metala (TM) i kubnog bor nitrida (CBN) čine i uređaj za merenje temperature u zoni rezanja termovizijska kamera „FLIR E50“ prikazana na slici 60.



Slika 60. Termovizijska kamera „FLIR E50“

FLIR-ovu E seriju termovizijskih kamera odlikuje vrlo robustan dizajn, napredne komunikacijske mogućnosti i relativno visoka rezolucija termovizijske slike. Neke od važnih funkcionalnosti modela iz FLIR E serije su:

- 3,5” ekran osjetljiv na dodir
- rezolucija infracrvene slike od 160×120 do 320×240 piksela
- digitalna i termovizijska slika, preklapanje slike (slika u slici)
- snimanje termovizijskih video isečaka (samo E60)
- Wi-Fi konekcija sa mobilnim uređajima kao što su iPhone, iPod ili i Pad
- dodavanje glasne poruke slikama (nemaju svi modeli)
- automatsko generisanje izveštaja
- mogućnost Bluetooth povezivanja sa strujnim kleštima za primene u elektroodržavanju
- laserski pokazivač
- svetlo za digitalnu kameru za snimanja pri slabijem osvetljenju

- 1- 4x kontinuirani digitalni zoom

Termovizijska kamera poseduje sledeće karakteristike:

Laka termovizijska kamera (825 g) za industrijske korisnike sa prikazom infracrvene (IC) slike, vidljive slike, slike u načinu "slika u slici" (Picture-in-picture) i slike u načinu temperaturne fuzije (Fusion).

Rezolucije 240×180 piksela (ukupno piksela 43 200). izabrana termička osetljivost iz baze podataka iz tabele za čelik jednaka 12. Termička osetljivost sa rezolucijom <math>0,05^{\circ}\text{C}</math>

Prostorni ugao  $25^{\circ}\times 19^{\circ}$ .

Mogućnost zamene objektiva na terenu sa opcijским 45° ili 15° objektivom.

Ugrađena 3.1 MP digitalna video kamera sa LED lampama za osvetljenje tamnih prostora.

Velik, kolor, osvetljen LCD touch screen displej veličine 9 cm dijagonalno (3,5") sa rezolucijom 240 × 320 tačaka

Frekvencija prikaza slike 60 Hz Temperaturno merno područje  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $650^{\circ}\text{C}$  i tačnost  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  ili  $\pm 2\%$  od očitavanja.

Ručni fokus, laserska pokazna tačka.

Digitalno uvećanje x4.

Merni način: 3 pomične tačke i 3 opsega (hot/cold markeri unutar opsega).

Izračunavanje  $\Delta T$  temperaturne razlike.

Snimač zvučnog komentara uz svaki snimak/sliku i mogućnost ručnog unosa komentara preko displeja osetljivog na dodir.

Video snimanje u memoriju kamere (MPEG4).

Video (MPEG4) izlaz Wi-Fi veza na iPad/iPhone FLIR Viewer aplikacije.

Komplet sadrži: Instrument FLIR E50 FLIR TOOLS, programski paket USB i video kabl, memorijsku karticu, AC adapter/punjač.

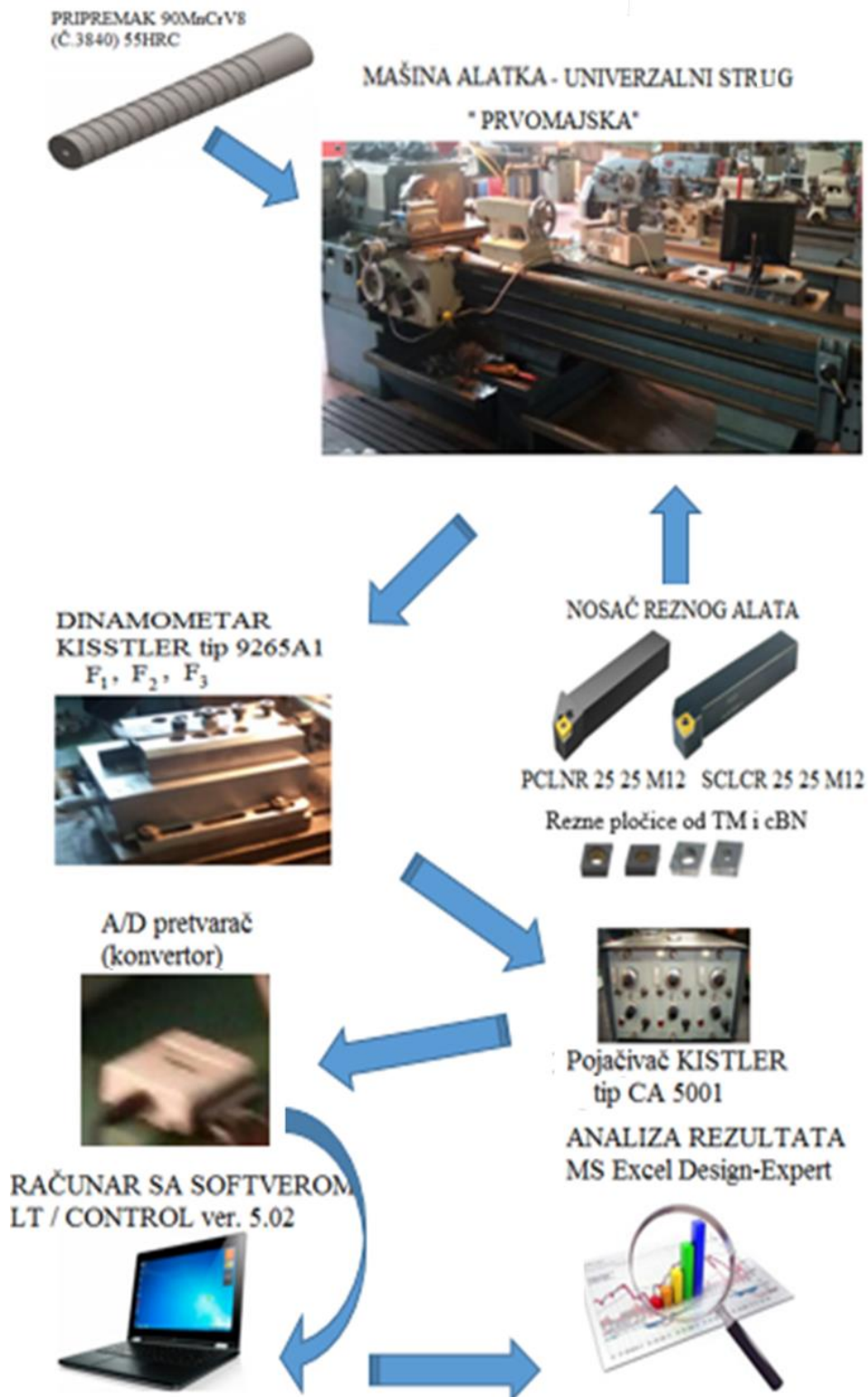
Dodatna oprema: 15 i 45° sočiva, zaštitu od sunca, adapter i oprema adaptera, Bluetooth slušalice i još mnogo toga.

Šema merenja temperature rezanja pomoću termovizijske kamere „FLIR E50“ je prikazana na slici 61.



Slika 61. Merenje temperature rezanja pomoću termovizijske kamere „ FLIR E50 “

## 5.7. Merenje sile rezanja u procesu struganja



Slika 62. Merenje sile rezanja u procesu struganja reznim pločicama od TM i CBN



Merenje sile rezanja u procesu struganja vršeno je pomoću dinamometra Kistler 9265 A1, koji je bio postavljen umesto postojećeg nosača alata. Strugarski nož sa pločicom je postavljen u dinamometar. Signal sa dinamometra je pojačivan sa pojačalom Kistler tip CA 5001. Signal je onda pomoću A/D pretvarača uveden u računar gde su se podaci memorisali i obrađivali. Šema merenja otpora rezanja je prikazana na slici 62. Merene su tri ortogonalne komponente otpora:  $F_1$ ,  $F_2$ , i  $F_3$ .

#### 5.8. Merenje habanja reznih pločica

Univerzalni merni mikroskop UIM – 21, slika 63., korišćen je za merenje širine pojasa habanja na kontaktnoj površini reznih pločica od TM i reznih pločica od CBN-a, kao i za analizu dobijenih rezultata. Prilikom merenja vršeno je upoređivanje vrednosti promene širine pojasa habanja, a u odnosu na neku ustanovljenu referentnu osnovu. Mera promene širine površine koja se haba u odnosu na tu osnovu predstavlja linijski intenzitet habanja. Kao referentna osnova korišćen je deo površine koji se ne haba, a nalazi se neposredno uz pohabanu površinu.



Slika 64. Univerzalni merni mikroskop UIM – 21

#### 5.9. Rezultati merenja

U tabelama 15 do 18 su prikazani rezultati merenja prema planu eksperimenta za materijal alata TM i CBN i geometriju alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ).

Tabela 15. Plan eksperimenta i rezultati merenja, rezna pločica TM CCMW 12 04 04 ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. broj	Plan - matrica				Promenljivi faktori			Rezultati merenja					
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	v m/min	s mm/o	a mm	$F_1$ [N]	$F_2$ [N]	$F_3$ [N]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{tm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Q [ $^\circ\text{C}$ ]
1.	1	-1	-1	-1	90	0,05	0,10	75	520	90	0,51	3,2	230
2.	1	1	-1	-1	160	0,05	0,10	73	480	92	0,53	2,8	280
3.	1	-1	1	-1	90	0,20	0,10	96	390	87	1,17	4,8	268
4.	1	1	1	-1	160	0,20	0,10	99	405	89	1,2	4,8	350
5.	1	-1	-1	1	90	0,05	0,50	220	980	700	0,75	6,2	242
6.	1	1	-1	1	160	0,05	0,50	230	1160	780	0,85	6,1	285
7.	1	-1	1	1	90	0,20	0,50	360	1250	801	2,01	7,6	286
8.	1	1	1	1	160	0,20	0,50	355	1440	689	2,1	7,6	350
9.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	120	390	152	0,93	4,5	277
10.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	121	420	151	0,77	4	283
11.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	136	520	189	0,91	4,4	264
12.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	138	566	192	0,76	4,3	266
13.	1	-1,41	0	0	80	0,10	0,22	140	700	220	0,69	3,56	245
14.	1	1,41	0	0	180	0,10	0,22	176	894	201	0,71	4	298
15.	1	0	-1,41	0	120	0,045	0,22	90	535	198	0,43	2,4	254
16.	1	0	1,41	0	120	0,25	0,22	238	1020	332	1,91	8,01	293
17.	1	0	0	-1,41	120	0,10	0,07	56	340	49	1,06	6,6	290
18.	1	0	0	1,41	120	0,10	0,70	356	1120	1002	0,98	5,5	310
19.	1	-1,41	0	0	80	0,10	0,22	138	704	218	0,7	3,93	240
20.	1	1,41	0	0	180	0,10	0,22	170	916	222	0,65	3,5	290
21.	1	0	-1,41	0	120	0,045	0,22	99	528	173	0,39	2,5	250
22.	1	0	1,41	0	120	0,25	0,22	251	1115	200	1,82	8,3	286
23.	1	0	0	-1,41	120	0,10	0,07	60	316	42	1,04	2,8	282
24.	1	0	0	1,41	120	0,10	0,70	350	1140	360	1,38	6,2	336

Tabela 16. Plan eksperimenta i rezultati merenja, rezna pločica CBN CNMA 120404 ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. broj	Plan - matrica				Promenljivi faktori			Rezultati merenja					
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	v m/min	s mm/o	a mm	$F_1$ [N]	$F_2$ [N]	$F_3$ [N]	$R_a$ [ $\mu m$ ]	$R_{tm}$ [ $\mu m$ ]	Q [ $^\circ C$ ]
1.	1	-1	-1	-1	90	0,05	0,10	29	54	19	0,61	3,7	104
2.	1	1	-1	-1	160	0,05	0,10	27	55	18	0,36	2,1	119
3.	1	-1	1	-1	90	0,20	0,10	104	155	48	0,81	4,5	121
4.	1	1	1	-1	160	0,20	0,10	98	160	45	0,62	3,5	169
5.	1	-1	-1	1	90	0,05	0,50	115	135	114	0,71	5,1	108
6.	1	1	-1	1	160	0,05	0,50	114	129	113	0,47	4,8	118
7.	1	-1	1	1	90	0,20	0,50	310	330	200	0,8	4,2	143
8.	1	1	1	1	160	0,20	0,50	290	294	204	0,73	4,1	138
9.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	80	152	60	0,53	2,8	121
10.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	84	154	63	0,48	2,9	130
11.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	90	138	70	0,33	1,8	131
12.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	82	137	56	0,34	1,8	120
13.	1	-1,41	0	0	80	0,10	0,22	78	135	60	0,42	2,2	105
14.	1	1,41	0	0	180	0,10	0,22	60	127	46	0,65	3,1	137
15.	1	0	-1,41	0	120	0,045	0,22	50	93	48	0,27	2,1	113
16.	1	0	1,41	0	120	0,25	0,22	150	225	62	1,8	8,1	139
17.	1	0	0	-1,41	120	0,10	0,07	40	80	22	0,6	6,6	130
18.	1	0	0	1,41	120	0,10	0,70	176	270	246	0,7	3,9	156
19.	1	-1,41	0	0	80	0,10	0,22	78	134	60	0,47	2,9	115
20.	1	1,41	0	0	180	0,10	0,22	70	130	50	0,65	3,5	145
21.	1	0	-1,41	0	120	0,045	0,22	35	90	30	0,33	2,15	102
22.	1	0	1,41	0	120	0,25	0,22	150	222	64	1,9	8,2	145
23.	1	0	0	-1,41	120	0,10	0,07	43	90	25	0,73	6,2	130
24.	1	0	0	1,41	120	0,10	0,70	178	265	250	0,45	2,5	165

Tabela 17. Plan eksperimenta i rezultati merenja, rezna pločica TM CCMW 12 04 04 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. broj	Plan - matrica				Promenljivi faktori			Rezultati merenja					
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	v m/m in	s mm/o	a mm	$F_1$ [N]	$F_2$ [N]	$F_3$ [N]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{tm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Q [ $^\circ\text{C}$ ]
1.	1	-1	-1	-1	90	0,05	0,10	55	141	46	0,61	2,7	122
2.	1	1	-1	-1	160	0,05	0,10	54	138	41	0,53	2,5	150
3.	1	-1	1	-1	90	0,20	0,10	116	300	60	1,18	7,1	200
4.	1	1	1	-1	160	0,20	0,10	110	401	80	1,1	5,7	230
5.	1	-1	-1	1	90	0,05	0,50	170	350	285	0,86	4,2	189
6.	1	1	-1	1	160	0,05	0,50	155	360	195	0,98	6,8	245
7.	1	-1	1	1	90	0,20	0,50	280	710	440	1,28	6,8	230
8.	1	1	1	1	160	0,20	0,50	240	680	245	1,17	5,8	280
9.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	120	280	130	1,41	6,2	183
10.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	121	300	133	1,42	6,6	184
11.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	130	390	186	1,48	5,1	190
12.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	132	400	190	1,49	6,7	196
13.	1	$-\sqrt{2}$	0	0	80	0,10	0,22	116	255	102	1,19	6,4	200
14.	1	$\sqrt{2}$	0	0	180	0,10	0,22	130	650	225	0,85	4,6	210
15.	1	0	$-\sqrt{2}$	0	120	0,045	0,22	92	398	177	0,81	4,1	160
16.	1	0	$\sqrt{2}$	0	120	0,25	0,22	194	710	190	1,72	6,7	208
17.	1	0	0	$-\sqrt{2}$	120	0,10	0,07	57	152	46	0,89	4,3	161
18.	1	0	0	$\sqrt{2}$	120	0,10	0,70	250	770	340	1,57	5,8	203
19.	1	$-\sqrt{2}$	0	0	80	0,10	0,22	120	300	111	1,77	5,6	202
20.	1	$\sqrt{2}$	0	0	180	0,10	0,22	131	600	260	1,11	6,4	195
21.	1	0	$-\sqrt{2}$	0	120	0,045	0,22	98	398	180	0,63	4,9	165
22.	1	0	$\sqrt{2}$	0	120	0,25	0,22	200	650	200	1,91	7,9	210
23.	1	0	0	$-\sqrt{2}$	120	0,10	0,07	53	141	42	0,78	4,2	160
24.	1	0	0	$\sqrt{2}$	120	0,10	0,70	265	784	360	1,45	7,5	250

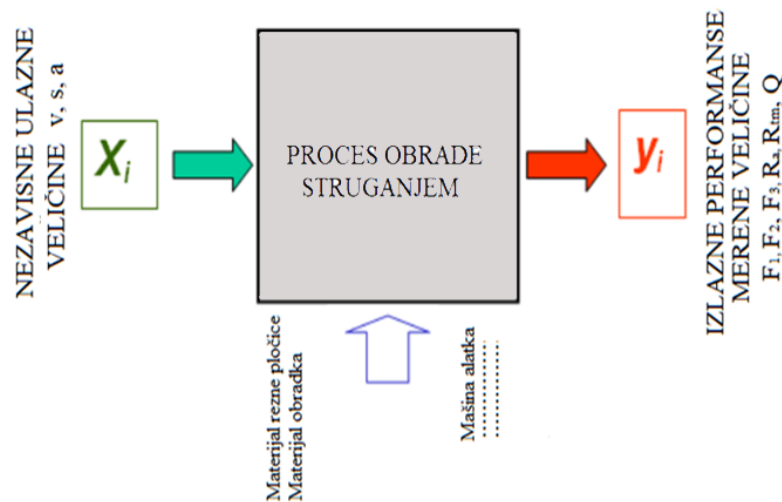
Tabela 18. Plan eksperimenta i rezultati merenja, rezna pločica CBN CCMW 12 04 04 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. broj	Plan - matrica				Promenljivi faktori			Rezultati merenja					
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	v m/min	s mm/o	a mm	$F_1$ [N]	$F_2$ [N]	$F_3$ [N]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{tm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Q [ $^\circ\text{C}$ ]
1.	1	-1	-1	-1	90	0,05	0,10	44	101	40	0,67	3,9	100
2.	1	1	-1	-1	160	0,05	0,10	42	112	40	0,59	3,4	105
3.	1	-1	1	-1	90	0,20	0,10	65	141	38	0,79	4,2	120
4.	1	1	1	-1	160	0,20	0,10	60	134	38	0,69	3,6	135
5.	1	-1	-1	1	90	0,05	0,50	150	162	160	0,62	3,5	154
6.	1	1	-1	1	160	0,05	0,50	144	160	170	0,71	4,4	187
7.	1	-1	1	1	90	0,20	0,50	290	300	190	0,78	3,9	167
8.	1	1	1	1	160	0,20	0,50	190	280	189	0,69	3,8	201
9.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	95	138	68	0,93	4,7	153
10.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	94	129	66	0,88	3,9	155
11.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	87	121	55	0,83	4,7	141
12.	1	0	0	0	120	0,10	0,22	90	121	54	0,9	4,4	140
13.	1	-1,41	0	0	80	0,10	0,22	110	140	74	1,02	5,6	165
14.	1	1,41	0	0	180	0,10	0,22	83	124	56	0,91	4,6	170
15.	1	0	-1,41	0	120	0,045	0,22	55	85	52	0,87	4,7	130
16.	1	0	1,41	0	120	0,25	0,22	180	224	80	1,31	6,7	151
17.	1	0	0	-1,41	120	0,10	0,07	52	118	26	0,58	3,5	96
18.	1	0	0	1,41	120	0,10	0,70	200	230	186	0,76	4,2	180
19.	1	-1,41	0	0	80	0,10	0,22	111	136	74	1,03	5	160
20.	1	1,41	0	0	180	0,10	0,22	82	124	55	0,92	5	169
21.	1	0	-1,41	0	120	0,045	0,22	60	89	55	0,54	3,1	128
22.	1	0	1,41	0	120	0,25	0,22	180	224	78	1,21	6,6	156
23.	1	0	0	-1,41	120	0,10	0,07	40	91	26	0,59	3,5	108
24.	1	0	0	1,41	120	0,10	0,70	211	220	175	0,76	4,2	164

## 6.0. MODELOVANJE IZLAZNIH PERFORMANSI PROCESA OBRADE

U ovom delu rada je izvršena analiza rezultata merenja i formirani matematički modeli izlaznih veličina pomoću faktornog plana eksperimenta i metodom veštačke inteligencije.

Plan eksperimenta za uspešno obavljanje eksperimenta bi obuhvatao: prepoznavanje problema, izbor ulaznih parametara i funkcije pripadnost (nivo), izbor plana eksperimenta, izvođenje eksperimenta, zatim statistička obrada dobijenih eksperimentalnih podataka i na kraju zaključak i buduća istraživanja. Na slici 64. prikazan je proces obrade struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa ulaznim parametrima obrade i izlaznim performansama (mernim veličinama) procesa obrade.



Slika 64. Proces obrade struganjem reznim pločicama od TM i CBN

### 6.1. Prikaz podataka dobijenih eksperimentalnim trofaktornim planom

Obrada podataka po trofaktornom planu eksperimenta drugog reda izvršena je za glavni otpor rezanja  $F_1$ , otpor prodiranja  $F_2$ , otpor pomoćnog kretanja  $F_3$ , temperaturu u zoni rezanja  $Q$ , kao i za dva parametra hrapavosti obrađene površine:  $R_a$  - srednju aritmetičku hrapavost i  $R_{tm}$  - maksimalnu visinu neravnina. Ovih pet parametara ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $Q$ ,  $R_a$  i  $R_{mt}$ ) su modelirani kao izlazne veličine na osnovu ulaznih veličina elemenata režima rezanja ( $v$ ,  $s$ ,  $a$ ), prema eksperimentalnim vrednostima prikazanim u tabelama 15, 16, 17 i 18.

Trofaktorni model za glavni otpor rezanja ( $F_1$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

$$\text{Model je oblika: } F_1 = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.1)$$

Tabela 19. Merene i računске vrednosti za glavni otpor rezanja  $F_1$  pri obradi reznom pločicom od TM sa ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Glavni otpor rezanja $F_1$ [N]	Model bez međusobnog uticaja		
		$F_{1rac}[N]$	$F_{1min}[N]$	$F_{1max}[N]$
1.	75	58.48	51.32	66.63
2.	73	64.10	56.26	73.04
3.	96	100.61	86.42	112.20
4.	99	107.94	94.73	122.99
5.	220	202.38	177.62	230.60
6.	230	221.85	194.70	252.78
7.	355	340.79	299.09	388.31
8.	360	373.58	327.87	425.66
9.	120	145.96	139.08	157.08
10.	121	145.96	139.08	157.08
11.	136	145.96	139.08	157.08
12.	138	145.96	139.08	157.08
13.	140	136.81	117.91	162.70
14.	176	155.72	134.26	185.27
15.	90	108.11	87.04	120.11
16.	238	205.98	181.88	250.98
17.	56	60.34	52.30	72.17
18.	356	356.45	302.70	417.71
19.	138	136.81	117.91	162.70
20.	170	155.72	134.26	185.27
21.	99	108.11	87.04	120.11
22.	251	205.98	181.88	250.98
23.	60	60.34	52.30	72.17
24.	350	356.45	302.70	417.71

$$\text{Model je oblika: } F_1 = C v^{p_1} s^{p_2} a^{p_3} \quad (6.1)$$

U tabeli 19. su dati podaci o merenim i računskim vrednostima za uslove obrade alatom od TM sa geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 20. dati su vrednosti koeficijenta regresije u modelu, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Na slici 65. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za glavni otpor rezanja  $F_1$

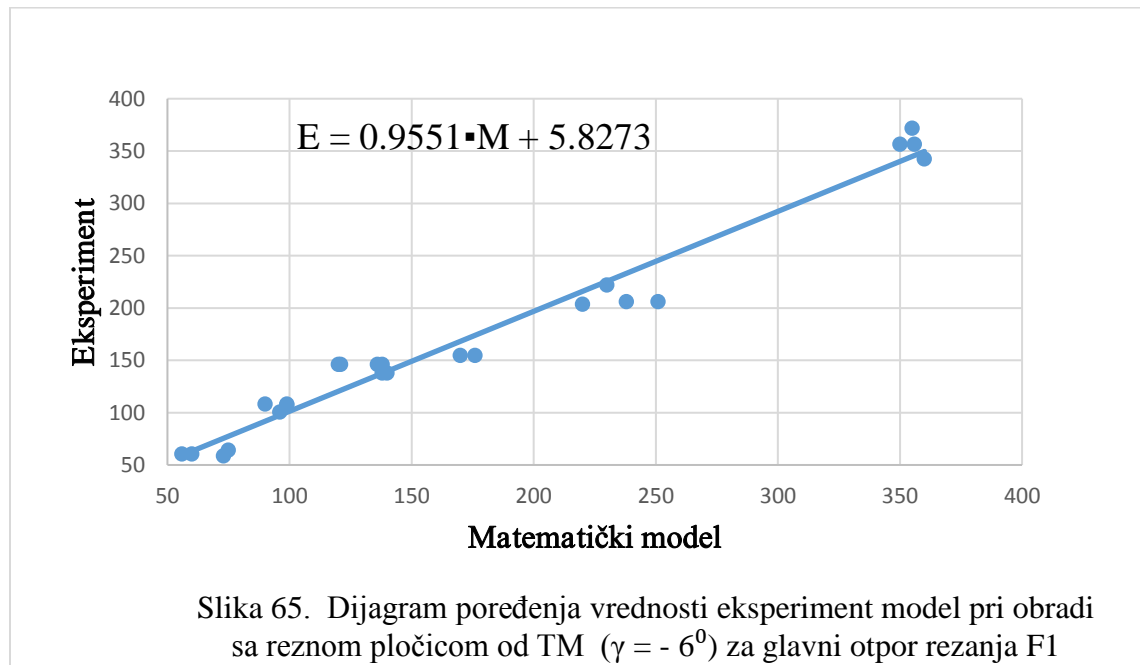


Tabela 20. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za glavni otpor rezanja  $F_1$  pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

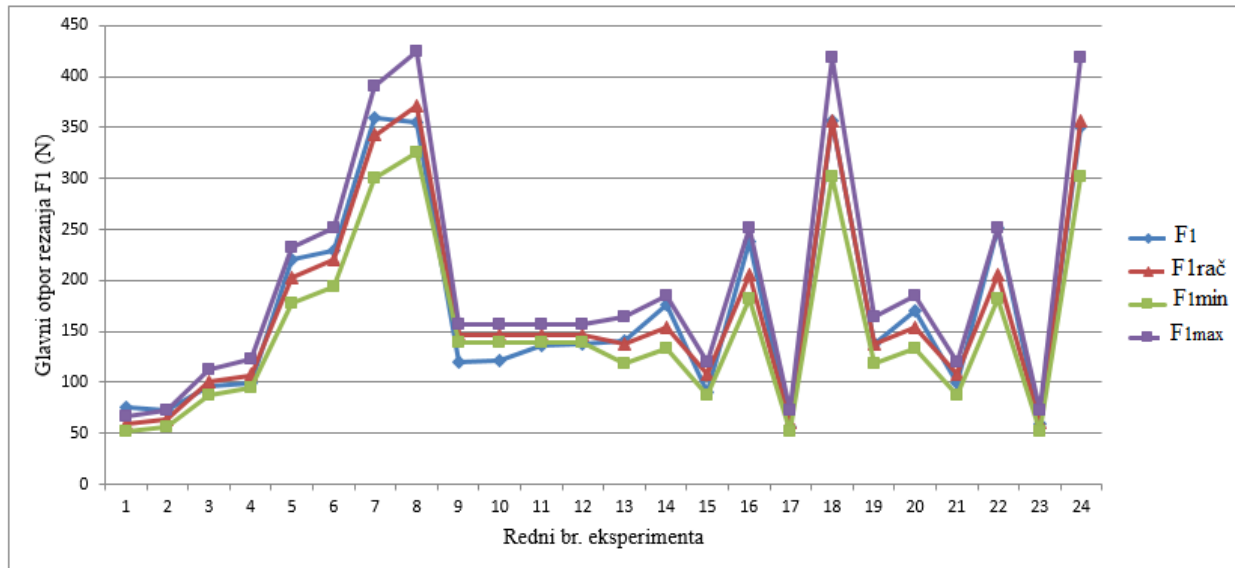
Model	Koeficijenti				
	Regresije		Signifikantnosti		
	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti	
Model bez međusobnog uticaja	$C$	565.6459	$F_t$	6,61	
	$p_0$	6.3380	$F_{r0}$	141288.40	
	$p_1$	0.14182	$F_{r1}$	6.28 (*)	
	$p_2$	0.37591	$F_{r2}$	256.22	
	$p_3$	0.77141	$F_{r3}$	1454.30	
	Adekvatnost			$F_a$	4.32

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a za adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$



Pošto je  $F_{r1} < F_t$ , ( $v$ ) nije uticajno na  $F_1$ ;  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (s, a) su uticajni na glavni otpor rezanja  $F_1$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih izmerenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 19. na slici 66. dobijen je dijagram poređenja vrednosti eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata PCLNR 25 25 M16, za glavni otpor rezanja  $F_1$ .



Slika 66. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za glavni otpor rezanja ( $F_1$ )

Trofaktorni model za otpor prodiranja ( $F_2$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$F_2 = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.22)$$

U tabeli 21. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade reznom pločicom od TM sa reznom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 22. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 21. Merene i računске vrednosti za otpor prodiranja  $F_2$  pri obradi reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Otpor prodiranja $F_2$ [N]	Model bez međusobnog uticaja		
		$F_{2rac}$ [N]	$F_{2min}$ [N]	$F_{2max}$ [N]
1.	520	350.08	263.74	464.68
2.	480	396.00	298.34	525.64
3.	390	461.06	337.45	594.56
4.	405	506.68	381.72	672.55
5.	980	888.37	669.27	1179.19
6.	1160	1004.90	757.06	1333.87
7.	1250	1136.66	856.33	1508.76
8.	1440	1285.76	968.66	1706.67
9.	390	664.62	587.92	765.61
10.	420	664.62	587.92	765.61
11.	520	664.62	587.92	765.61
12.	566	664.62	587.92	765.61
13.	700	609.33	433.60	872.03
14.	894	724.94	516.17	1038.09
15.	535	576.66	397.43	799.27
16.	1020	782.21	563.16	1132.58
17.	340	342.63	244.89	492.50
18.	1120	1298.45	913.94	1838.04
19.	704	609.33	433.60	872.03
20.	916	724.94	516.17	1038.09
21.	928	576.66	397.43	799.27
22.	1115	782.21	563.16	1132.58
23.	316	342.63	244.89	492.50
24.	1140	1298.45	913.94	1838.04

Na slici 67. dat je dijagram poređenja vrednosti eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA 120404 ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata PCLNR, za otpor prodiranja  $F_2$ .

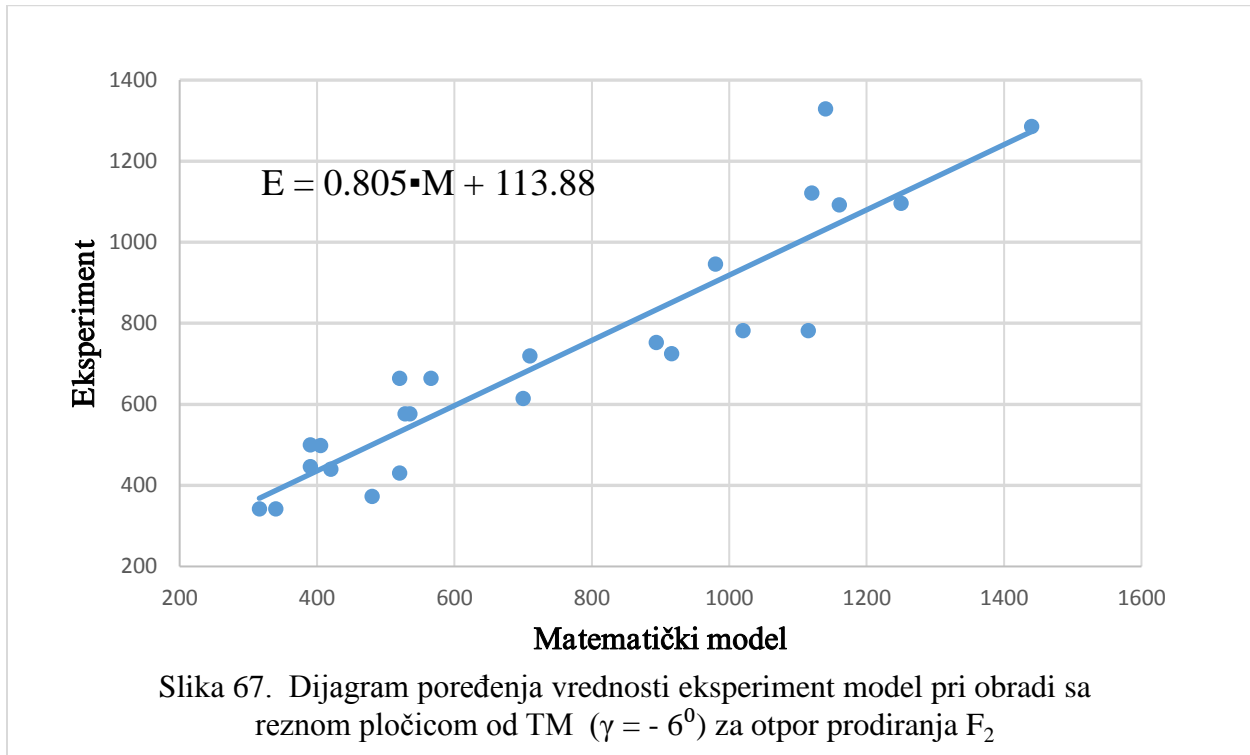


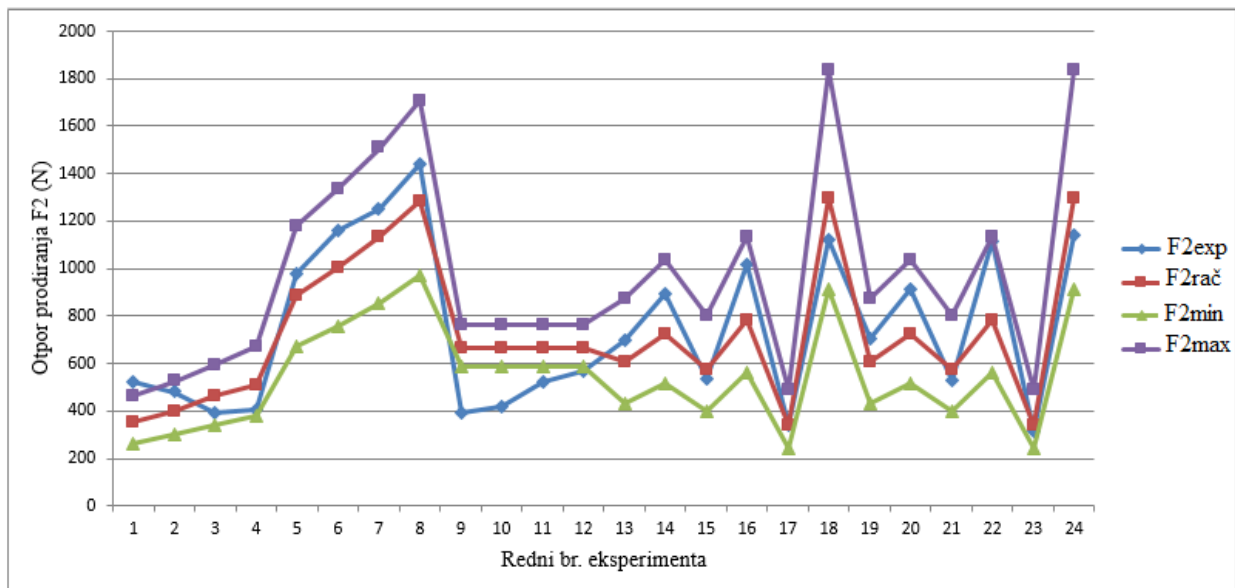
Tabela 22. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za otpor prodiranja  $F_2$  pri obradi reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	861.8504	$F_t$	6.61
	$p_0$	6.75908	$F_{r0}$	53066.93
	$p_1$	0.21422	$F_{r1}$	3.17 (*)
	$p_2$	0.17779	$F_{r2}$	12.68
	$p_3$	0.57860	$F_{r3}$	181.05
	Adekvatnost		$F_a$	4.390

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{r_i} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r_1} < F_t$  ( $v$ ) nije uticajno na  $F_2$ ,  $F_{r_2} > F_t$  i  $F_{r_3} > F_t$ , a elementi režima ( $v$  s, a) su uticajni na otpor prodiranja  $F_2$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih izmerenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 21., a na slici 68. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za otpor prodiranja  $F_2$ .



Slika 68. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za otpor prodiranja ( $F_2$ )

Trofaktorni model za otpor pomoćnog kretanja ( $F_3$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika:  $F_3 = C v^{p_1} s^{p_2} a^{p_3}$  (6.3)

U tabeli 23. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatima od TM sa geometrijom alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 24. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 23. Merene i računске vrednosti za otpor pomoćnog kretanja ( $F_3$ ) pri obradi reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Otpora pomoćnog kretanja $F_3$ [N]	Model bez međusobnog uticaja		
		$F_{3rac}$ [N]	$F_{3min}$ [N]	$F_{3max}$ [N]
1.	90	70.60	56.40	88.39
2.	92	69.73	55.70	87.29
3.	87	86.57	69.36	108.70
4.	89	85.75	68.50	107.36
5.	700	595.71	475.84	745.79
6.	780	588.33	469.94	736.55
7.	801	732.61	585.19	917.18
8.	689	723.54	577.94	905.82
9.	152	221.20	203.54	250.98
10.	151	221.20	203.54	250.98
11.	189	221.20	203.54	250.98
12.	192	221.20	203.54	250.98
13.	220	223.15	172.82	300.84
14.	201	219.26	169.80	295.59
15.	198	196.35	147.99	257.63
16.	332	253.61	198.29	345.18
17.	49	48.50	37.92	66.01
18.	1002	1025.38	773.93	1347.25
19.	218	223.15	172.82	300.84
20.	222	219.26	169.80	295.59
21.	173	196.35	147.99	257.63
22.	346	253.61	198.29	345.18
23.	47	48.50	37.92	66.01
24.	1010	1025.38	773.93	1347.25

Na slici 69. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$

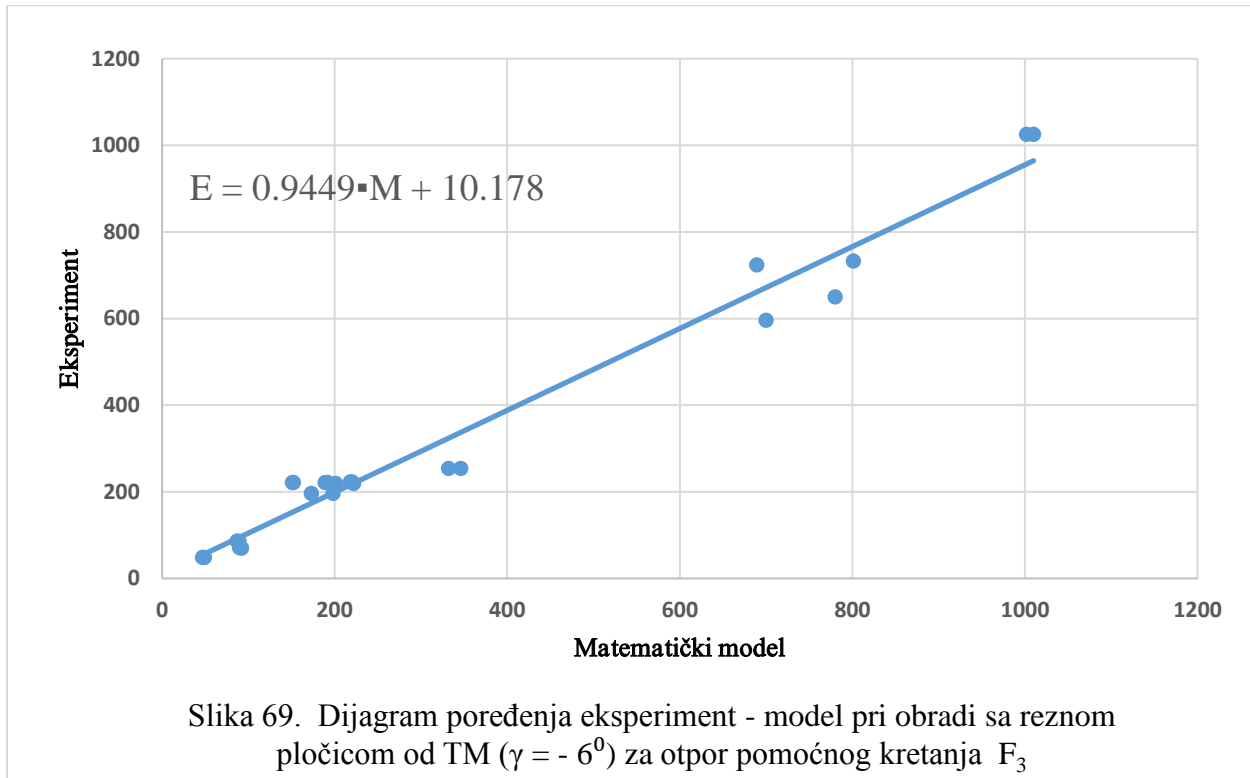


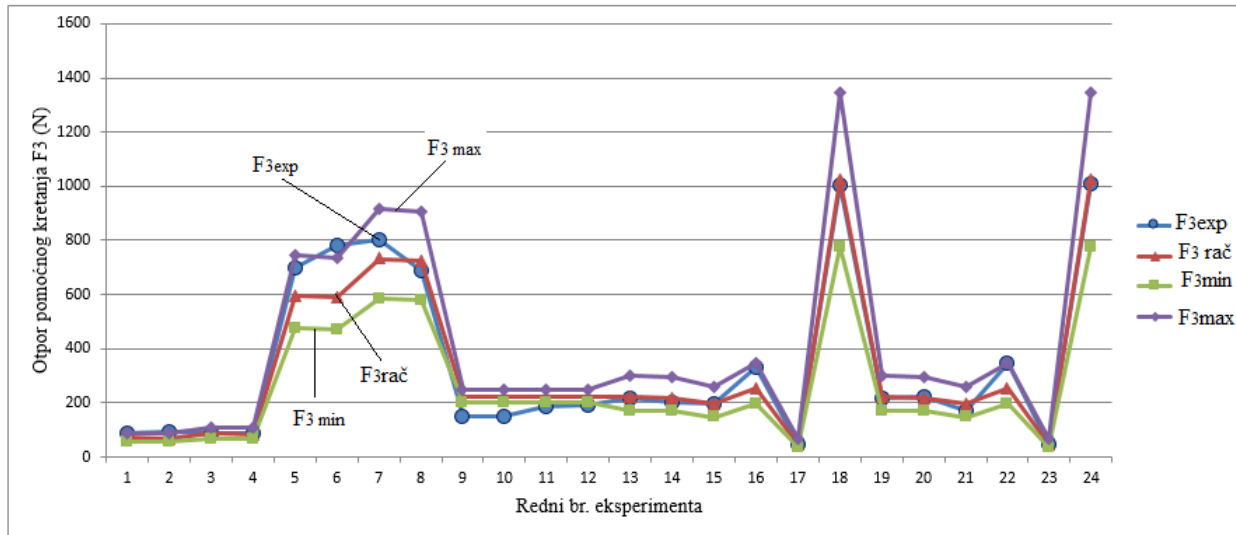
Tabela 24. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za otpor pomoćnog kretanja ( $F_3$ ) pri obradi reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	2572.8403	$F_{r0}$	58255.16
	$p_0$	7.85277	$F_{r1}$	0.05 (*)
	$p_1$	-0.02166	$F_{r2}$	14.14
	$p_2$	0.14922	$F_{r3}$	1502.94
	$p_3$	1.32511	$F_t$	6,61
	Adekvatnost		$F_a$	4,37184

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a za adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} < F_t$  ( $v$ ) nije uticajno na  $F_3$ , dok  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (s i a) su uticajni na  $F_3$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih izmerenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 23. na slici 70. prikazan je dijagram pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$ .



Slika 70. Grafički prikaz dobijenih vrednosti otpora pomoćnog kretanja ( $F_3$ )

Trofaktorni model za temperaturu u zoni rezanja ( $Q$ ) pri obradi reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

$$\text{Model je oblika: } Q = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.4)$$

U tabeli 25. su date merene i računске vrednosti za uslove obrade reznom pločicom od TM sa geometrijom alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 26. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 25. Merene i računске vrednosti za temperaturu u zoni rezanja ( $Q$ ) pri obradi reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Temperatura u zoni rezanja $Q$ [°C]	Model bez međusobnog uticaja		
		$Q_{rac}$ [ $\mu m$ ]	$Q_{min}$ [ $\mu m$ ]	$Q_{max}$ [ $\mu m$ ]
1.	230	232.08	217.01	248.20
2.	280	275.56	257.67	294.69
3.	268	267.65	250.27	286.24
4.	350	317.79	297.16	339.86
5.	242	246.30	230.31	263.40
6.	285	292.44	273.45	312.75
7.	286	284.05	265.60	303.77
8.	350	337.26	315.36	360.68
9.	277	279.60	271.15	288.67
10.	283	279.60	271.15	288.67
11.	264	279.60	271.15	288.67
12.	266	279.60	271.15	288.67
13.	245	247.74	228.09	269.18
14.	298	315.57	290.78	343.17
15.	254	257.56	232.83	274.78
16.	293	307.24	284.86	336.17
17.	290	268.02	246.93	291.42
18.	310	291.82	268.59	316.98
19.	240	247.74	228.09	269.18
20.	290	315.57	290.78	343.17
21.	250	257.56	232.83	274.78
22.	286	307.24	284.86	336.17
23.	282	268.02	246.93	291.42
24.	336	291.82	268.59	316.98



Na slici 71. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za temperaturu u zoni rezanja ( $Q$ ).

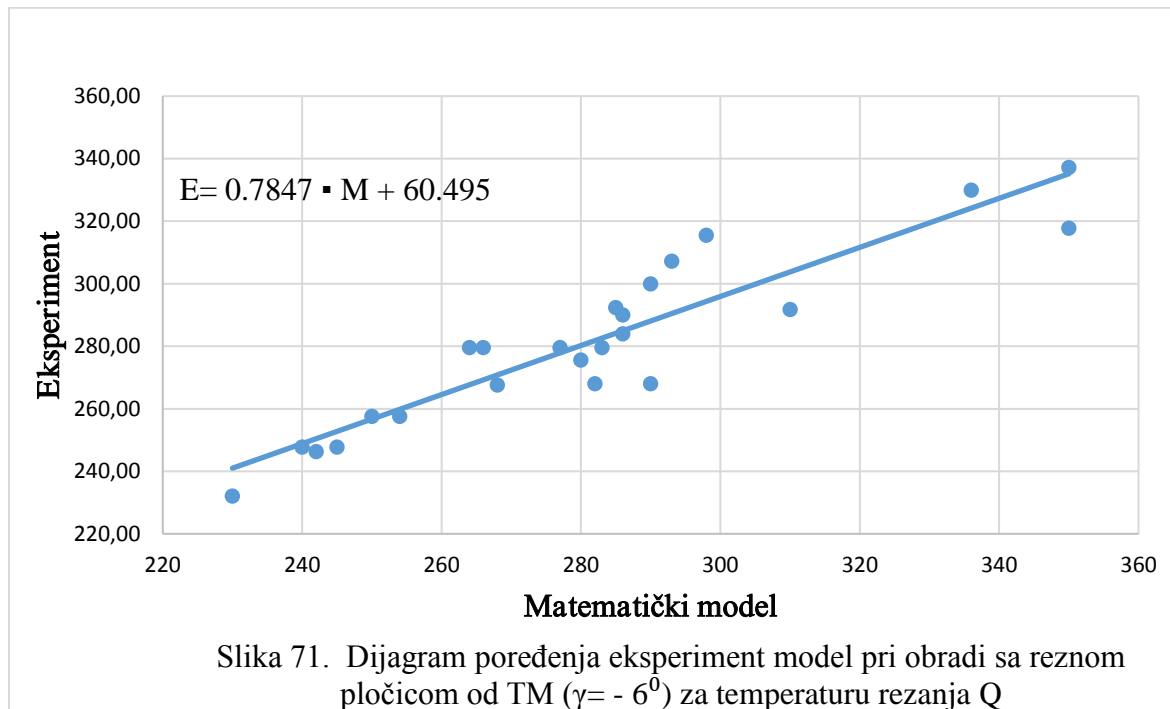


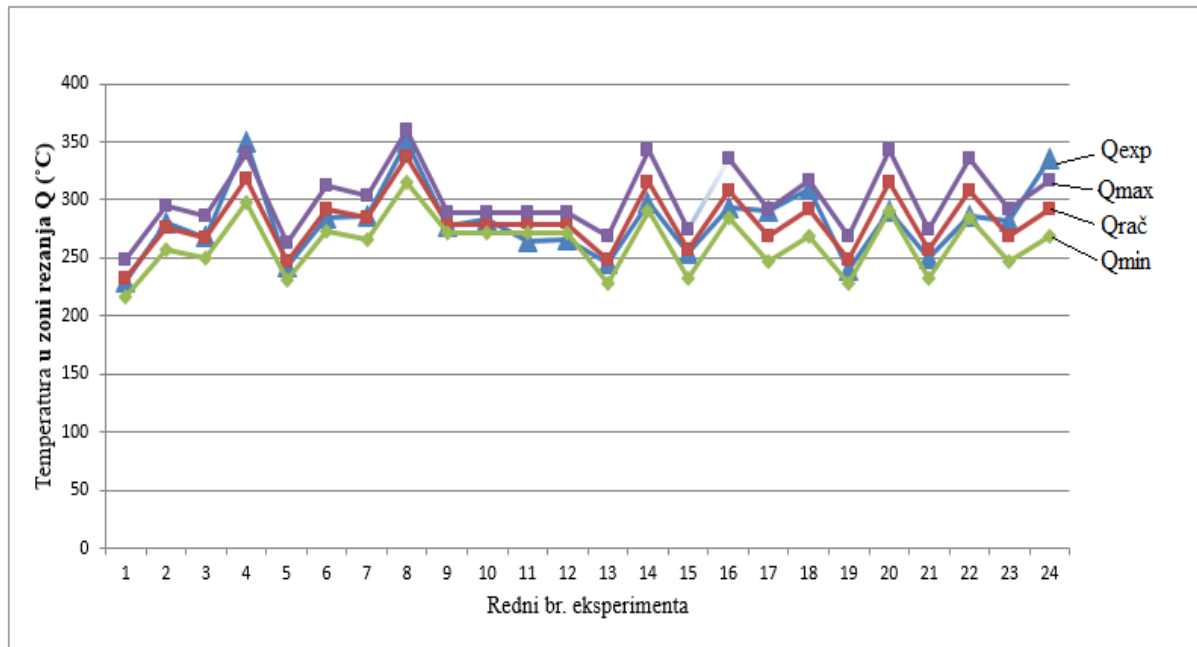
Tabela 26. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za temperaturu u zoni rezanja ( $Q$ ) pri obradi pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	89,7785	$F_t$	6,61
	$p_0$	4,49735	$F_{r0}$	679937,42
	$p_1$	0,29845	$F_{r1}$	105,27
	$p_2$	0,10286	$F_{r2}$	72,60
	$p_3$	0,03694	$F_{r3}$	12,62
	Adekvatnost		$F_a$	4,20467

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} > F_t$ ,  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (v, s, a) su uticajni na temperaturu rezanja  $Q$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih izmerenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 25. na slici 72. prikazan je dijagram pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za temperaturu rezanja  $Q$ .



Slika 72. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za temperaturu u zoni rezanja  $Q$

Trofaktorni model za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika:  $R_a = C v^{p_1} s^{p_2} a^{p_3}$  (6.55)

U tabeli 27. su dati podaci o merenim i računskim vrednostima za uslove obrade rezne pločice od TM sa geometrijom alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 28. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ).

Tabela 27. Merene i računске vrednosti srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ) pri obradi reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ) [ $\mu m$ ]	Model bez međusobnog uticaja		
		$R_{a\text{ rac}}$ [ $\mu m$ ]	$R_{a\text{ min}}$ [ $\mu m$ ]	$R_{a\text{ max}}$ [ $\mu m$ ]
1.	0.53	0.49	0.39	0.62
2.	0.51	0.48	0.38	0.61
3.	1.20	1.30	1.03	1.65
4.	1.17	1.27	1.00	1.61
5.	0.85	0.65	0.51	0.82
6.	0.75	0.63	0.50	0.80
7.	2.01	1.73	1.36	2.19
8.	2.10	1.68	1.32	2.13
9.	0.93	0.91	0.81	1.01
10.	0.77	0.91	0.81	1.01
11.	0.91	0.91	0.81	1.01
12.	0.76	0.91	0.81	1.01
13.	0.69	0.92	0.69	1.24
14.	0.71	0.89	0.66	1.20
15.	0.43	0.52	0.34	0.61
16.	1.91	1.73	1.35	2.43
17.	1.06	0.74	0.55	1.00
18.	0.98	1.11	0.83	1.49
19.	0.65	0.92	0.69	1.24
20.	0.70	0.89	0.66	1.20
21.	0.39	0.52	0.34	0.61
22.	1.82	1.73	1.35	2.43
23.	1.04	0.74	0.55	1.00
24.	1.38	1.11	0.83	1.49

Na slici 73. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata PCLNR 25 25 M16 za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ).

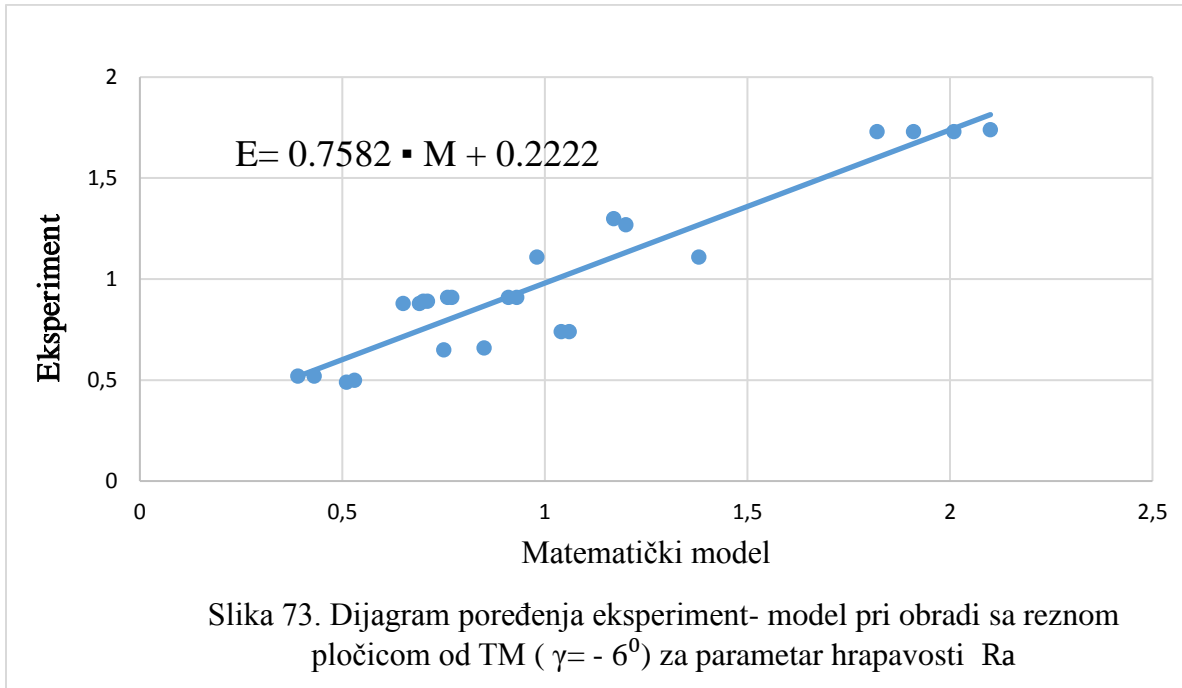


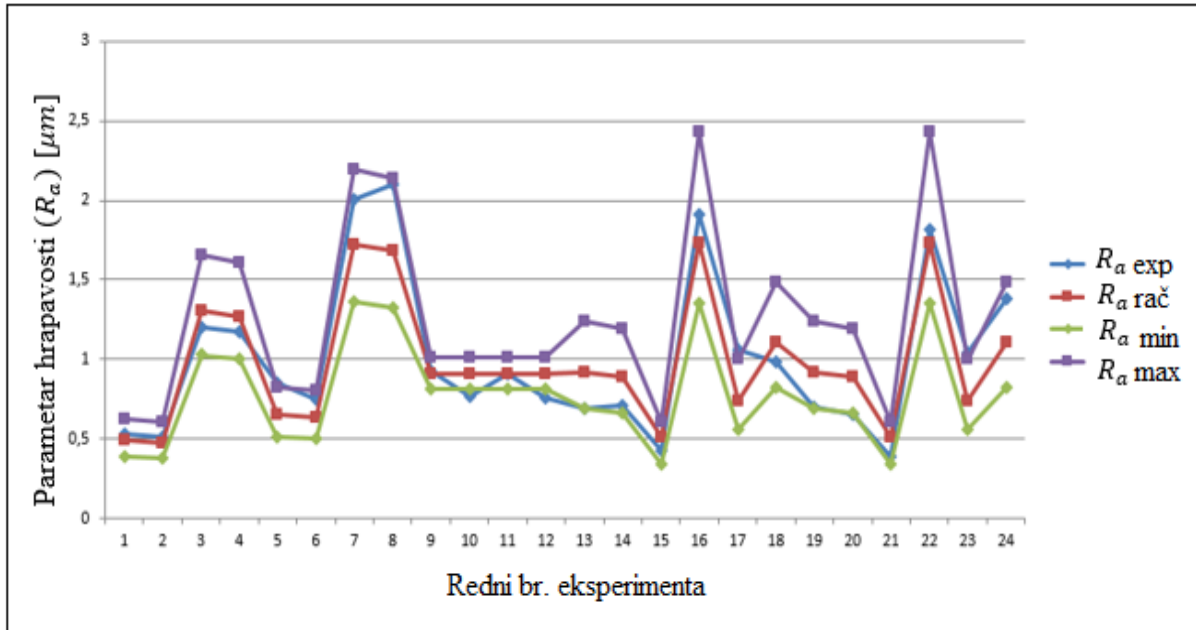
Tabela 28. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za parametar hrapavosti ( $R_a$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	7.4431	$F_t$	6,61
	$p_0$	2.00729	$F_{r0}$	16.37
	$p_1$	-0.04552	$F_{r1}$	0.20 (*)
	$p_2$	0.70557	$F_{r2}$	278.55
	$p_3$	0.17458	$F_{r3}$	22.99
	Adekvatnost		$F_a$	4,33219

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$ ; (\*) - Nesignifikantni parametri

Pošto je  $F_{r1} < F_t$  (v) nije uticajno na  $R_a$ , dok  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (s i a) su uticajni na  $R_a$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih izmerenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 27. na slici 74. prikazan je dijagram pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za hrapavost površine  $R_{mt}$ .



Slika 74. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za parametar hrapavosti ( $R_a$ )

Trofaktorni model za parametar hrapavosti ( $R_{tm}$ ) pri obradi na strugu reznom pločicom od TM ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

$$\text{Model je oblika: } R_{tm} = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.6)$$

U tabeli 29. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade rezne pločice od TM sa geometrijom alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 30. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 29. Merene i računске vrednosti za parametar hrapavosti ( $R_{tm}$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Maksimalna hrapavost $R_{tm}$ [ $\mu m$ ]	Model bez međusobnog uticaja		
		$R_{tm\ rac}$ [ $\mu m$ ]	$R_{tm\ min}$ [ $\mu m$ ]	$R_{tm\ max}$ [ $\mu m$ ]
1.	3.2	2.81	2.15	3.67
2.	2.8	2.76	2.11	3.61
3.	4.8	5.10	3.90	6.67
4.	4.8	5.01	3.83	6.55
5.	6.2	4.20	3.22	5.50
6.	6.1	4.13	3.16	5.40
7.	7.6	7.63	5.84	9.98
8.	7.6	7.49	5.73	9.80
9.	4.5	4.57	4.05	5.20
10.	4.0	4.57	4.05	5.20
11.	4.4	4.57	4.05	5.20
12.	4.3	4.57	4.05	5.20
13.	3.56	4.63	3.34	6.47
14.	4.0	4.51	3.25	6.30
15.	2.4	3.24	2.16	4.19
16.	8.01	6.78	5.02	9.73
17.	6.6	3.43	2.48	4.80
18.	5.5	6.11	4.38	8.49
19.	3.93	4.63	3.34	6.47
20.	3.5	4.51	3.25	6.30
21.	2.5	3.24	2.16	4.19
22.	8.3	6.78	5.02	9.73
23.	2.8	3.43	2.48	4.80
24.	6.2	6.11	4.38	8.49

Na slici 75. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa raznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata PCLNR 25 25 M16 za hrapavost površine ( $R_{tm}$ ).

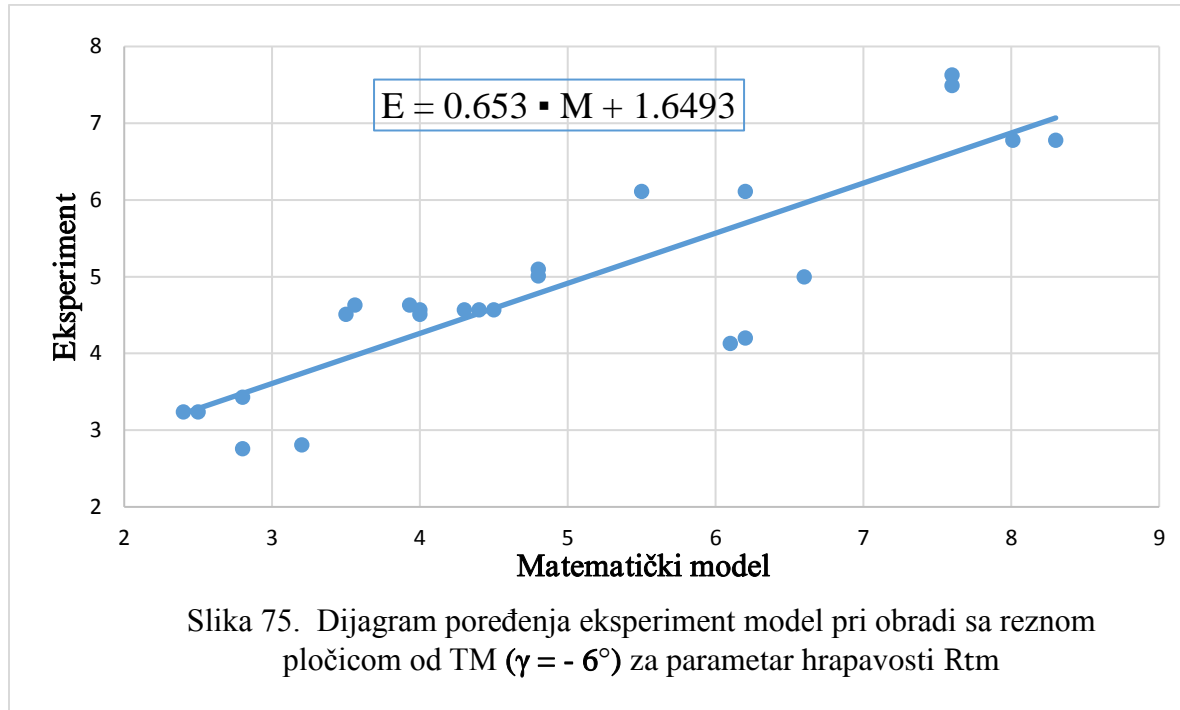


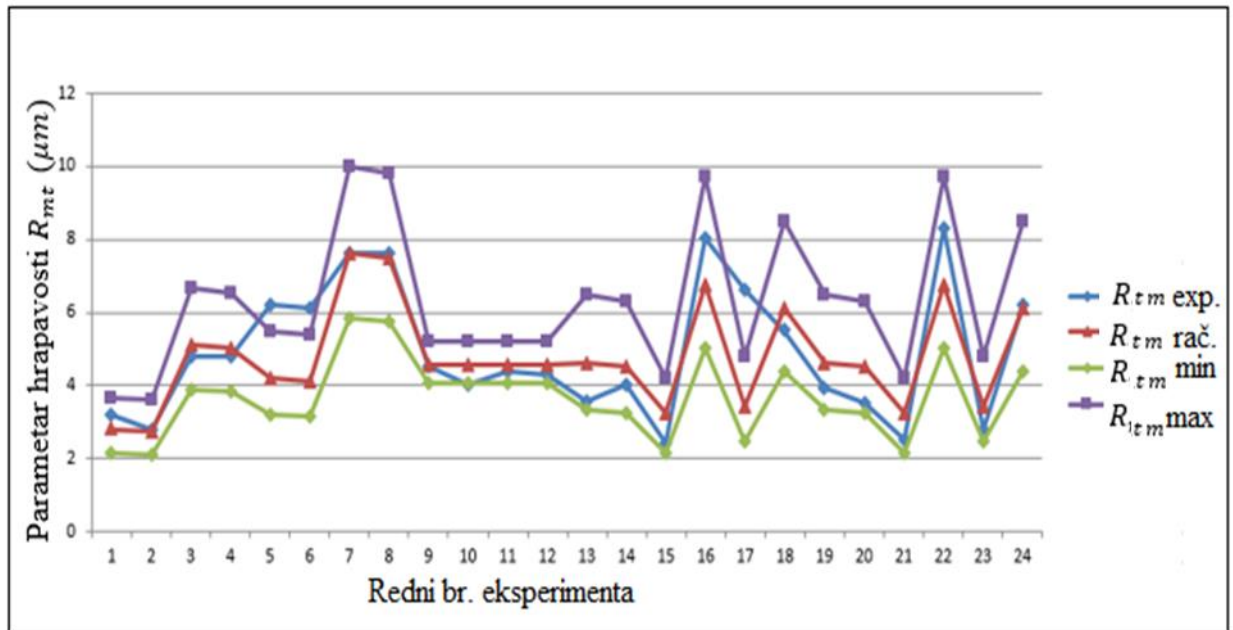
Tabela 30. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za parametar hrapavosti  $R_{tm}$  pri obradi reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	20,9827	$F_t$	6,61
	$p_0$	3,04370	$F_{r0}$	1372,91
	$p_1$	-0,03234	$F_{r1}$	0,03*
	$p_2$	0,43005	$F_{r2}$	35,04
	$p_3$	0,25051	$F_{r3}$	16,03
	Adekvatnost		$F_a$	1,65230

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$ ; (\*) - Nesignifikantni parametri

Pošto je  $F_{r1} < F_t$  (v) nije uticajno na  $R_{tm}$ , dok  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (s i a) su uticajni na  $R_{tm}$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 29. na slici 76. prikazan je dijagram pri obradi sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata PCLNR 25 25 M16 za maksimalnu hrapavost  $R_{mt}$ .



Slika 76. Grafički prikaz dobijenih vrednosti iz maksimalnu hrapavosti  $R_{tm}$

Trofaktorni model za glavni otpor rezanja ( $F_1$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$F_1 = C v^{p_1} s^{p_2} a^{p_3} \quad (6.7)$$

U tabeli 31. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade rezne pločice od CBN sa geometrijom alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 32. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.



Tabela 31. Merene i računске vrednosti za glavni otpor rezanja ( $F_1$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Glavni otpor rezanja $F_1$ [N]	Model bez međusobnog uticaja		
		$F_{1rac}$ [N]	$F_{1min}$ [N]	$F_{1max}$ [N]
1.	29	30.64	25.31	37.10
2.	27	27.97	23.10	33.87
3.	104	84.38	69.69	102.17
4.	98	77.02	63.61	93.25
5.	115	95.57	78.93	115.72
6.	114	87.23	72.04	105.62
7.	310	263.16	217.34	318.64
8.	290	240.20	198.38	290.83
9.	80	84.81	78.47	93.80
10.	84	84.81	78.47	93.80
11.	90	84.81	78.47	93.80
12.	82	84.81	78.47	93.80
13.	78	90.45	72.28	115.87
14.	60	79.53	63.52	101.84
15.	50	47.32	33.11	53.07
16.	150	165.66	138.69	222.33
17.	40	37.76	30.32	48.60
18.	176	192.18	151.45	242.79
19.	78	90.45	72.28	115.87
20.	70	79.53	63.52	101.84
21.	35	47.32	33.11	53.07
22.	150	165.66	138.69	222.33
23.	43	37.76	30.32	48.60
24.	178	192.18	151.45	242.79

Na slici 77. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata PCLNR 25 25 M16 za glavni otpor rezanja  $F_1$ .

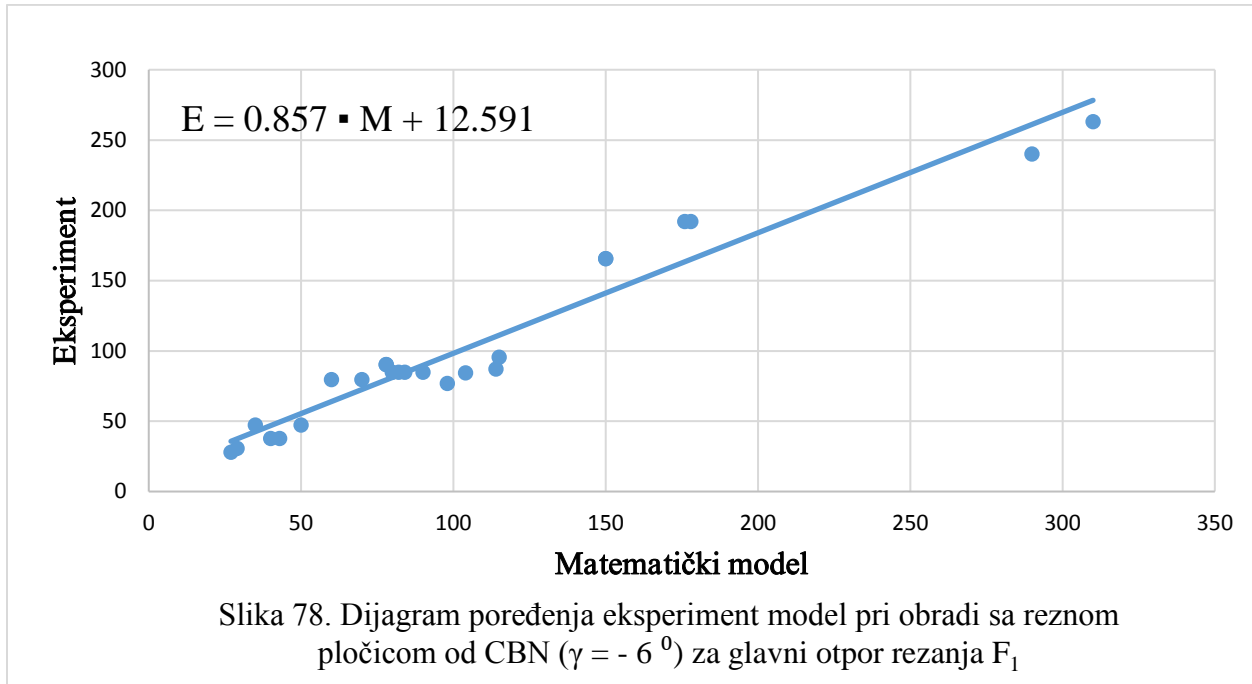


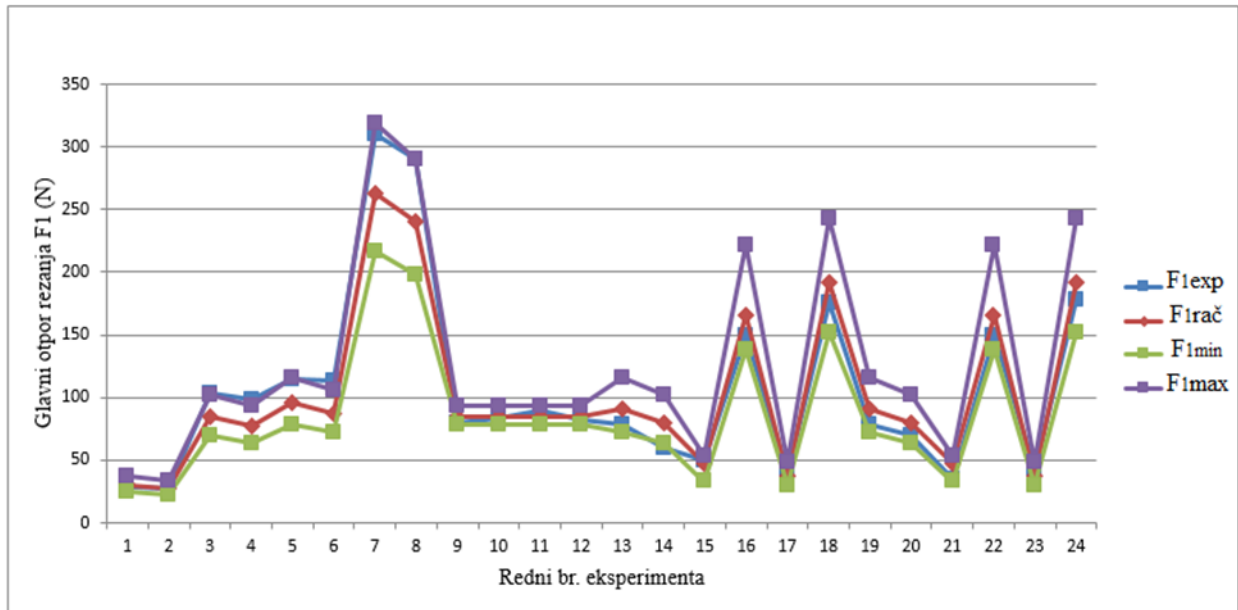
Tabela 32. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti model za glavni otpor rezanja  $F_1$  pri obradi reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	2842,9748	$F_t$	6,61
	$p_0$	7,95261	$F_{r0}$	50818,15
	$p_1$	-0,15868	$F_{r1}$	3,56 (*)
	$p_2$	0,73066	$F_{r2}$	438,44
	$p_3$	0,70672	$F_{r3}$	552,86
	Adekvatnost		$F_a$	4,07572

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$ ; (\*) - Nesignifikantni parametri

Pošto je  $F_{r1} < F_t$  ( $v$ ) nije uticajno na  $F_1$ , dok  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (s i a) su uticajni na  $F_1$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 31. na slici 78. prikazan je dijagram pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata PCLNR 25 25 M16 za glavni otpor rezanja  $F_1$ .



Slika 78. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za glavni otpor rezanja ( $F_1$ )

Trofaktorni model za otpor prodiranja ( $F_2$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$F_2 = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.8)$$

U tabeli 33. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade reznom pločicom od CBN sa geometrijom alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 34. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 33. Merene i računске vrednosti za otpor prodiranja ( $F_2$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Otpor prodiranja $F_2$ [N]	Model bez međusobnog uticaja		
		$F_{2rac}$ [N]	$F_{2min}$ [N]	$F_{2max}$ [N]
1.	54	64.33	57.45	72.03
2.	55	62.43	55.76	69.90
3.	155	142.57	127.33	159.63
4.	160	138.35	123.56	154.91
5.	135	143.72	128.48	160.76
6.	129	137.73	123.13	154.06
7.	330	318.50	284.74	356.26
8.	294	305.24	272.88	341.43
9.	152	139.44	133.41	148.11
10.	154	139.44	133.41	148.11
11.	138	139.44	133.41	148.11
12.	137	139.44	133.41	148.11
13.	135	143.68	126.16	166.33
14.	127	135.32	118.79	156.62
15.	93	88.17	69.74	91.95
16.	225	235.95	214.90	283.33
17.	80	79.06	69.65	91.83
18.	270	247.45	215.17	283.69
19.	134	143.68	126.16	166.33
20.	130	135.32	118.79	156.62
21.	90	88.17	69.74	91.95
22.	222	235.95	214.90	283.33
23.	90	79.06	69.65	91.83
24.	265	247.45	215.17	283.69

Na slici 79. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata PCLNR 25 25 M16 za otpor prodiranja  $F_2$ .

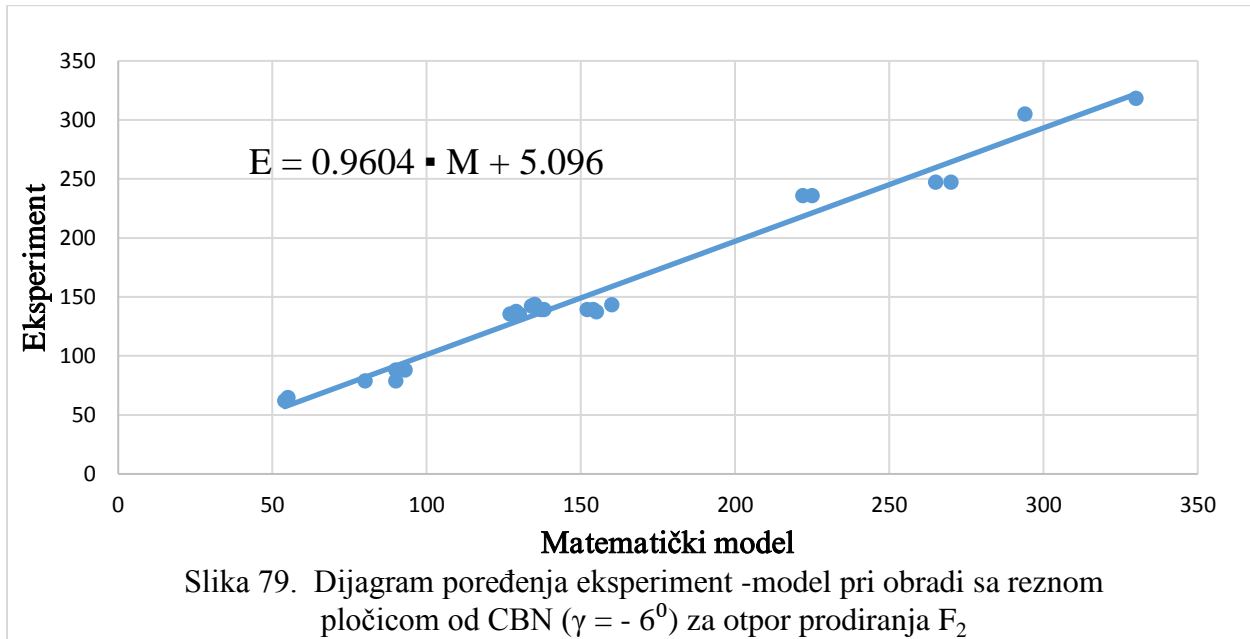


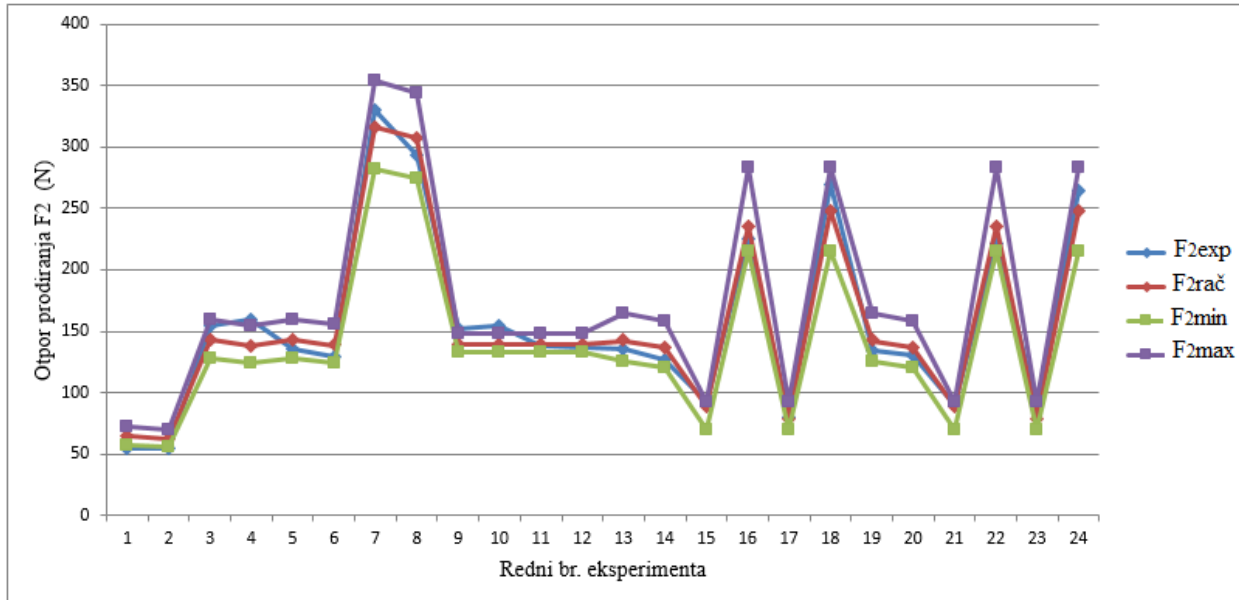
Tabela 34. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za otpor prodiranja  $F_2$  pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
<i>Model bez međusobnog uticaja</i>	$C$	1421.4808	$F_t$	6,61
	$p_0$	7.25945	$F_{r0}$	188910.65
	$p_1$	-0.05217	$F_{r1}$	1.16 (*)
	$p_2$	0.57403	$F_{r2}$	815.13
	$p_3$	0.49554	$F_{r3}$	818.76
	Adekvatnost		$F_a$	4.308

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$ ; (\*) - Nesignifikantni parametri

Pošto je  $F_{r1} < F_t$  ( $v$ ) nije uticajno na  $F_2$ , dok  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (s i a) su uticajni na  $F_2$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 33. na slici 80. prikazan je dijagram pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), za otpor prodiranja  $F_2$ .



Slika 80. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za otpor prodiranja ( $F_2$ )

Trofaktorni model za otpor pomoćnog kretanja ( $F_3$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$F_3 = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.9)$$

U tabeli 35. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatnim (rezne pločice) od CBN sa geometrijom alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) a u tabeli 36. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 35. Merene i računске vrednosti za otpor pomoćnog kretanja ( $F_3$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Otpora pomoćnog kretanja $F_3$ [N]	Model bez međusobnog uticaja		
		$F_{3rac}[N]$	$F_{3min}[N]$	$F_{3max}[N]$
1.	19	21.42	16.87	27.19
2.	18	19.52	15.38	24.78
3.	48	37.26	29.35	47.29
4.	45	33.96	26.75	43.11
5.	114	112.04	88.26	142.23
6.	113	102.13	80.45	129.64
7.	200	194.91	153.55	247.42
8.	204	177.67	139.96	225.53
9.	60	60.66	55.19	68.94
10.	63	60.66	55.19	68.94
11.	70	60.66	55.19	68.94
12.	56	60.66	55.19	68.94
13.	60	64.75	49.07	88.39
14.	46	56.83	43.04	77.54
15.	48	44.10	31.07	55.97
16.	62	87.47	67.98	122.46
17.	22	18.69	14.26	25.69
18.	246	199.41	148.09	266.77
19.	60	64.75	49.07	88.39
20.	50	56.83	43.04	77.54
21.	30	44.10	31.07	55.97
22.	64	87.47	67.98	122.46
23.	25	18.69	14.26	25.69
24.	250	199.41	148.09	266.77

Na slici 81. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$

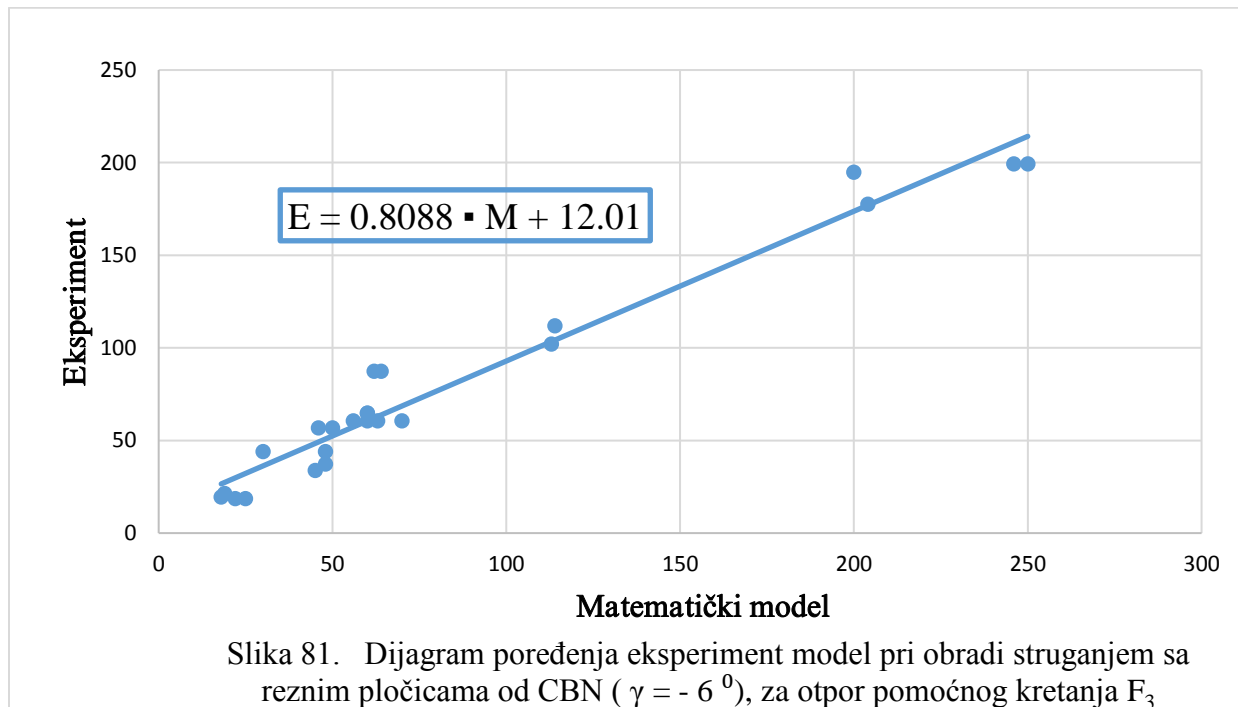


Tabela 36. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za otpor pomoćnog kretanja ( $F_3$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

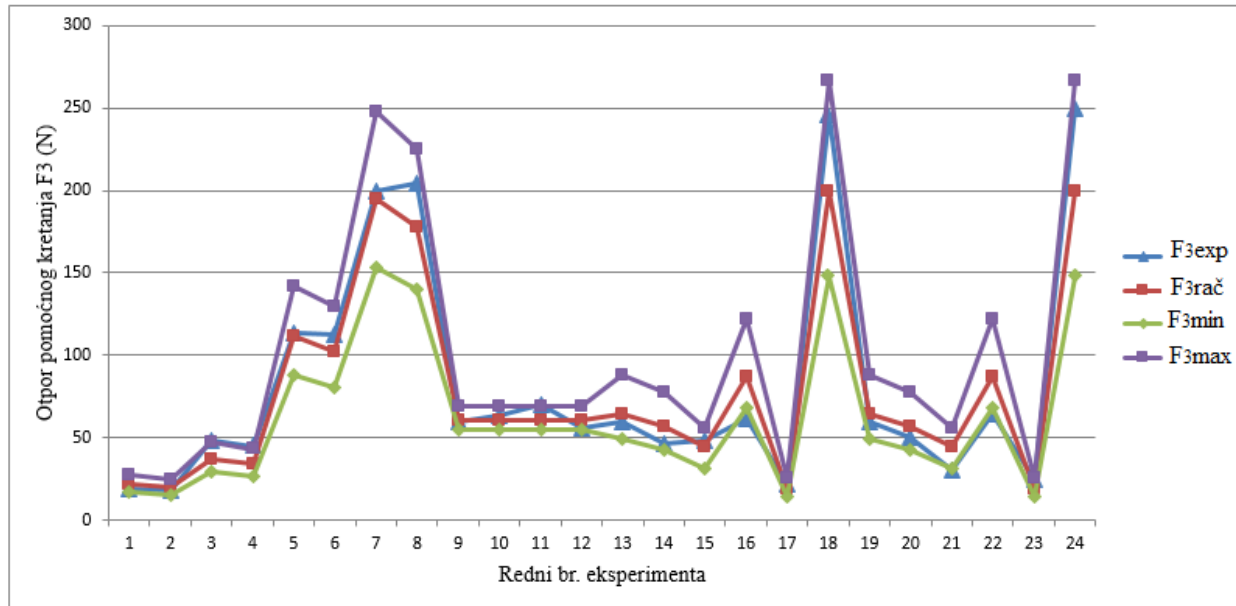
Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	1560,2933	$F_t$	6,61
	$p_0$	7,35263	$F_{r0}$	23226,70
	$p_1$	-0,16103	$F_{r1}$	1,96 (*)
	$p_2$	0,39939	$F_{r2}$	69,84
	$p_3$	1,02816	$F_{r3}$	623,85
	Adekvatnost		$F_a$	3,31815

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$  (\*) - nesignifikantni parametri



Pošto je  $F_{r1} < F_t$  (v) nije uticajno na otpor  $F_3$ , dok  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima rezanja (s i a) su uticajni na  $F_3$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 35. na slici 82. prikazan je dijagram pri obradi sa reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$ .



Slika 82. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za otpor pomoćnog kretanja ( $F_3$ )

Trofaktorni model za temperaturu u zoni rezanja Q pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$Q = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.10)$$

U tabeli 37. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatima od CBN sa geometrijom alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 38. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 37. Merene i računске vrednosti za temperaturu u zoni rezanja Q pri obradi reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Temperatura u zoni rezanja Q [°C]	Model bez međusobnog uticaja		
		$Q_{rac}$ [ $\mu m$ ]	$Q_{min}$ [ $\mu m$ ]	$Q_{max}$ [ $\mu m$ ]
1.	104	102.65	93.08	113.21
2.	119	119.65	108.49	131.95
3.	121	127.43	115.54	140.53
4.	160	148.53	134.68	163.80
5.	108	110.49	100.19	121.85
6.	118	128.78	116.78	142.03
7.	143	137.16	124.37	151.26
8.	138	159.87	144.96	176.31
9.	121	128.01	122.39	134.09
10.	130	128.01	122.39	134.09
11.	131	128.01	122.39	134.09
12.	120	128.01	122.39	134.09
13.	105	114.91	101.87	129.70
14.	137	142.61	126.52	161.09
15.	113	113.02	97.44	124.05
16.	139	147.67	132.29	168.42
17.	130	121.48	107.78	137.22
18.	156	134.97	119.60	152.27
19.	115	114.91	101.87	129.70
20.	145	142.61	126.52	161.09
21.	102	113.02	97.44	124.05
22.	145	147.67	132.29	168.42
23.	130	121.48	107.78	137.22
24.	104	134.97	119.60	152.27

Na slici 83. dat je dijagram poređenja eksperiment-model za temperaturu Q pri obradi sa reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata PCLNR 25 25 M16.

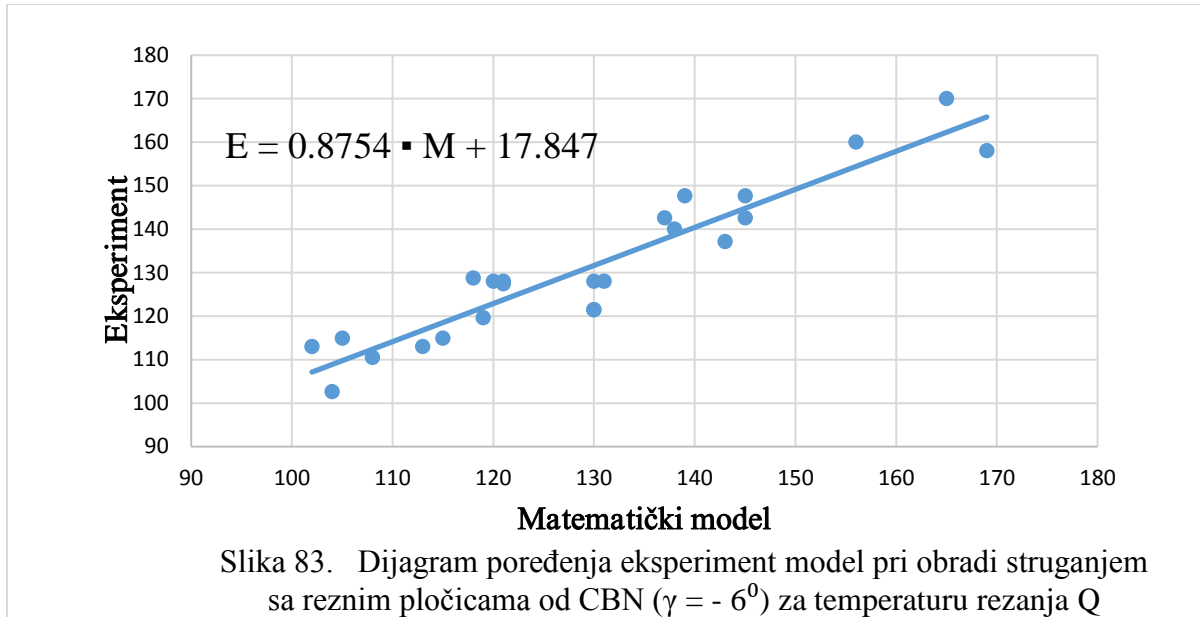


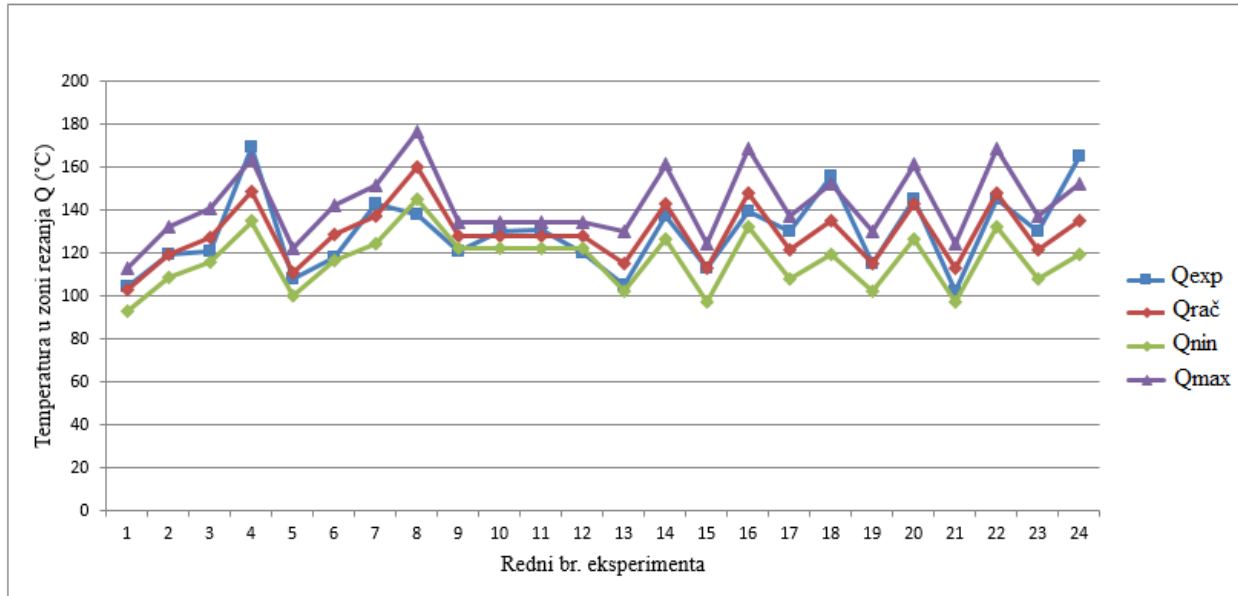
Tabela 38. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti model za temperaturu rezanja Q pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
<i>Model bez međusobnog uticaja</i>	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	54,8983	$F_t$	6,61
	$p_0$	4,00548	$F_{r0}$	214918,52
	$p_1$	0,26632	$F_{r1}$	35,71
	$p_2$	0,15597	$F_{r2}$	71,11
	$p_3$	0,04572	$F_{r3}$	8,24
	Adekvatnost		$F_a$	4.6062

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{r_i} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} > F_t$ ,  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (v, s, a) su uticajni na Q, a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih izmerenih i računskih vrednosti temperature rezanja  $Q$  koje su date u tabeli 37. na slici 84. prikazan je dijagram pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ).



Slika 84. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za temperaturu u zoni rezanja  $Q$

Trofaktorni model za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

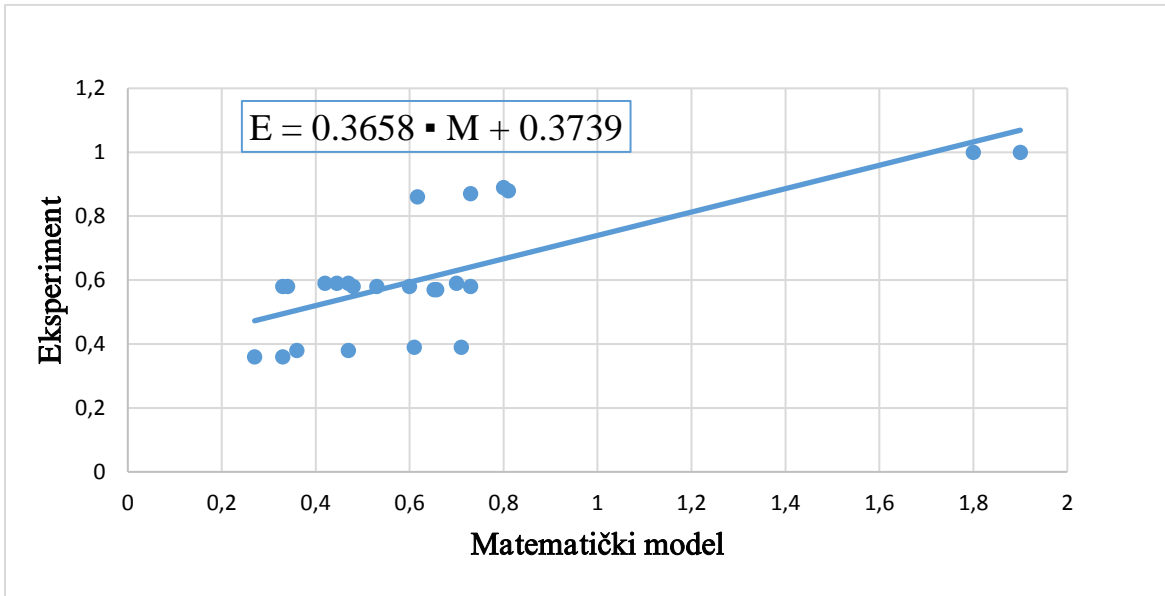
$$\text{Model je oblika: } R_a = C v^{p_1} s^{p_2} a^{p_3} \quad (6.11)$$

U tabeli 39. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatima od CBN sa geometrijom alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 40. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$ .

Tabela 39. Merene i računске vrednosti za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Srednja aritmetička hrapavost ( $R_a$ ) [ $\mu m$ ]	Model bez međusobnog uticaja		
		$R_{a\text{ rac}}$ [ $\mu m$ ]	$R_{a\text{ min}}$ [ $\mu m$ ]	$R_{a\text{ max}}$ [ $\mu m$ ]
1.	0.61	0.39	0.26	0.58
2.	0.36	0.38	0.25	0.56
3.	0.81	0.88	0.59	1.31
4.	0.617	0.86	0.58	1.27
5.	0.71	0.39	0.26	0.58
6.	0.47	0.38	0.26	0.57
7.	0.8	0.89	0.60	1.32
8.	0.73	0.87	0.58	1.29
9.	0.53	0.58	0.48	0.70
10.	0.48	0.58	0.48	0.70
11.	0.33	0.58	0.48	0.70
12.	0.34	0.58	0.48	0.70
13.	0.42	0.59	0.36	0.96
14.	0.658	0.57	0.35	0.93
15.	0.27	0.36	0.20	0.53
16.	1.8	1.00	0.64	1.69
17.	0.6	0.58	0.35	0.94
18.	0.7	0.59	0.36	0.95
19.	0.47	0.59	0.36	0.96
20.	0.652	0.57	0.35	0.93
21.	0.33	0.36	0.20	0.53
22.	1.9	1.00	0.64	1.69
23.	0.73	0.58	0.35	0.94
24.	0.445	0.59	0.36	0.95

Na slici 85. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), za srednju aritmetičku hrapavost površine  $R_a$ .



Slika 85 Dijagram poređenja eksperiment model pri obradi struganjem sa reznim pločicama od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ) za pa hrapavosti  $R_a$

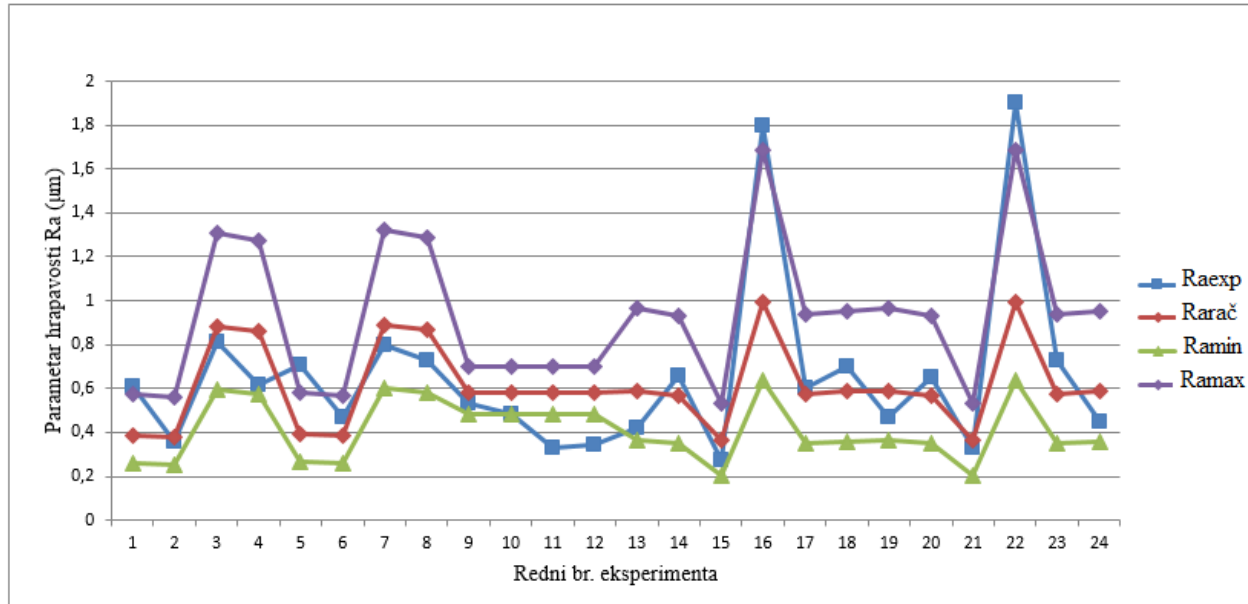
Tabela 40. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ) pri obradi pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti				
	Regresije		Signifikantnosti		
	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti	
<i>Model bez međusobnog uticaja</i>	$C$	2,8264	$F_t$	6,61	
	$p_0$	1,03899	$F_{r0}$	143,19	
	$p_1$	-0,04471	$F_{r1}$	0,05 (*)	
	$p_2$	0,58975	$F_{r2}$	53,95	
	$p_3$	0,00716	$F_{r3}$	0,01(*)	
	Adekvatnost			$F_a$	3,2288

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$ ; (\*) - Nesignifikantni parametri

Pošto je  $F_{r1} < F_t$  (v) nije uticajno na  $R_a$ , i  $F_{r3} < F_t$  (a) nije uticajno na  $R_a$ , dok  $F_{r2} > F_t$  i element režima (s) je uticajan na  $R_a$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu merenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 39. na slici 86. prikazan je dijagram pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata PCLNR 25 25 M16 za za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$ .



Slika 86. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ )

Trofaktorni model za maksimalnu hrapavost ( $R_{mt}$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$R_{tm} = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.12)$$

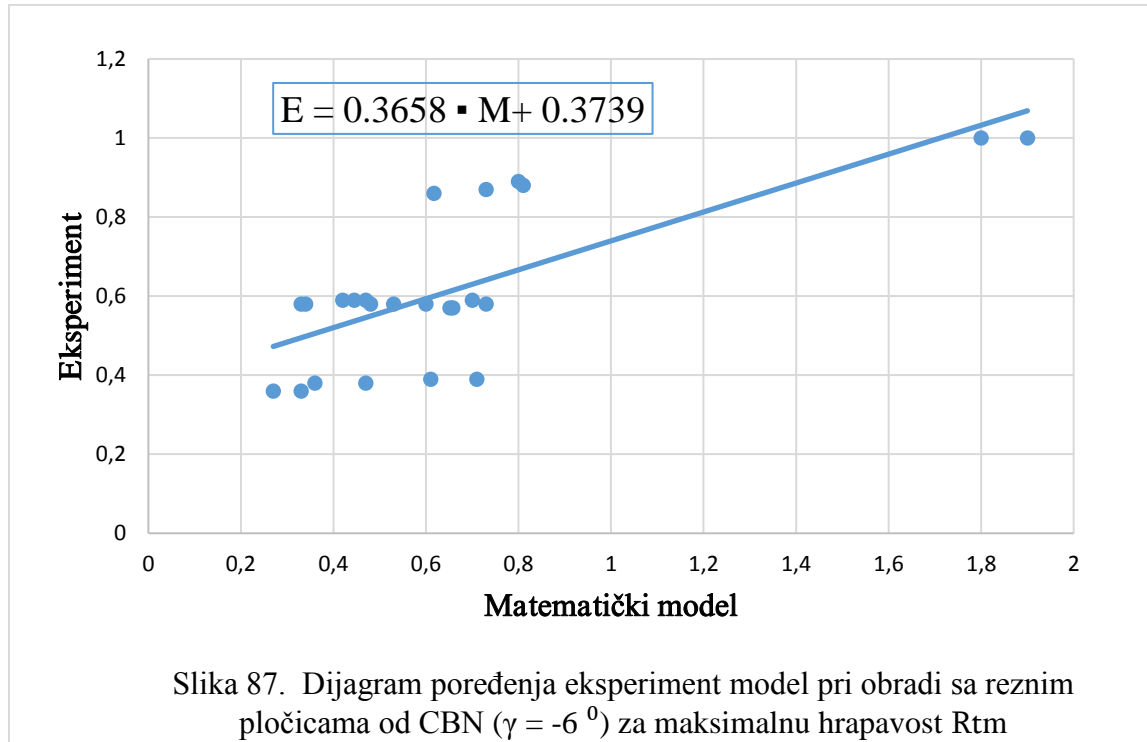
U tabeli 41. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade reznim pločicama od CBN CNMA sa geometrijom alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 42. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 41. Merene i računске vrednosti maksimalnu hrapavost ( $R_{tm}$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Maksimalna hrapavost $R_{tm}$ [ $\mu m$ ]	Model bez međusobnog uticaja		
		$R_{tm\ rac}$ [ $\mu m$ ]	$R_{tm\ min}$ [ $\mu m$ ]	$R_{tm\ max}$ [ $\mu m$ ]
1.	3.7	2.86	1.79	4.59
2.	2.1	2.80	1.75	4.49
3.	4.5	4.81	3.00	7.71
4.	3.46	4.71	2.94	7.54
5.	5.1	2.59	1.62	4.16
6.	4.8	2.54	1.58	4.07
7.	4.2	4.36	2.72	6.98
8.	4.1	4.26	2.66	6.83
9.	2.8	3.50	2.80	4.35
10.	2.9	3.50	2.80	4.35
11.	1.8	3.50	2.80	4.35
12.	1.8	3.50	2.80	4.35
13.	2.2	3.55	1.98	6.35
14.	3.1	3.45	1.92	6.16
15.	2.1	2.59	1.35	4.33
16.	8.1	4.93	2.82	9.02
17.	6.6	3.75	2.09	6.71
18.	3.9	3.26	1.82	5.83
19.	2.9	3.55	1.98	6.35
20.	3.48	3.45	1.92	6.16
21.	2.15	2.59	1.35	4.33
22.	8.2	4.93	2.82	9.02
23.	6.2	3.75	2.09	6.71
24.	2.48	3.26	1.82	5.83



Na slici 87. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata PCLNR 25 25 M16, za maksimalnu hrapavost obrađene površine  $R_{tm}$ .



Slika 87. Dijagram poređenja eksperiment model pri obradi sa reznim pločicama od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ) za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$

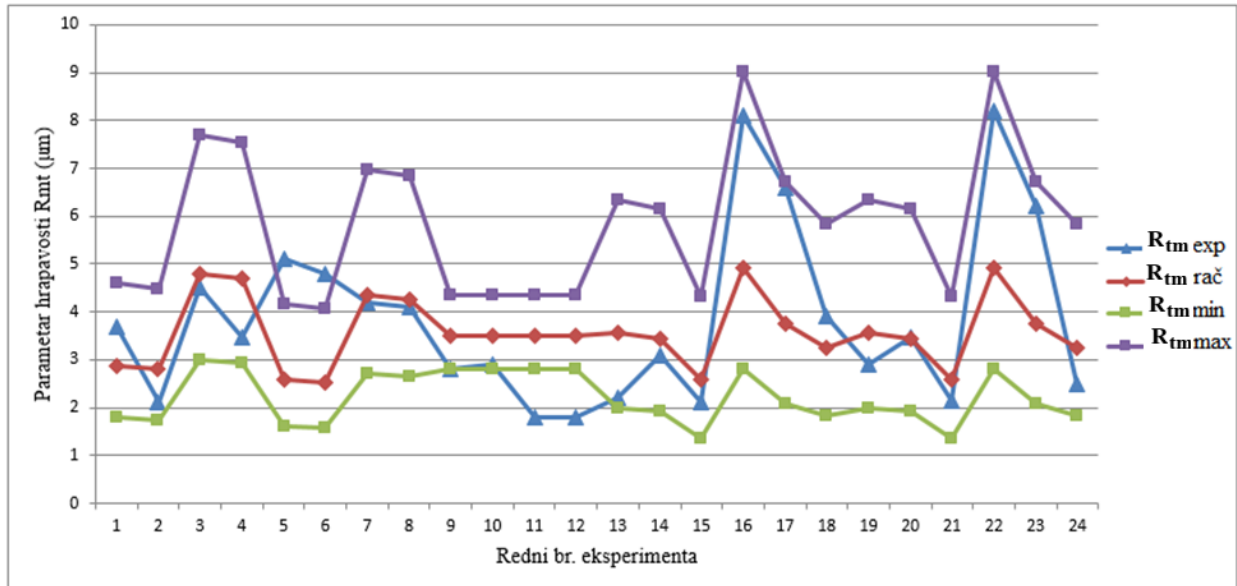
Tabela 42. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$  pri obradi pločicom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	9,0036	$F_t$	6,61
	$p_0$	2,19762	$F_{r0}$	655,65
	$p_1$	-0,3717	$F_{r1}$	0,03 (*)
	$p_2$	0,37380	$F_{r2}$	18,75
	$p_3$	-0,06148	$F_{r3}$	0,682 (*)
	Adekvatnost		$F_a$	4,0491

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} < F_t$ , i  $F_{r3} < F_t$  elementi režima (v, a) nisu uticajni na  $R_{tm}$ , a  $F_{r2} > F_t$  (s) je uticajno na  $R_{tm}$ , i  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih izmerenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 41. na slici 88. prikazan je dijagram pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN CNMA ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata PCLNR 25 25 M16, za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$ .



Slika 88. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$

Trofaktorni model za glavni otpor rezanja ( $F_1$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$F_1 = C v^{p_1} s^{p_2} a^{p_3} \quad (6.13)$$

U tabeli 43. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatnim od TM CCMW ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 44. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i ocena adekvatnosti modela.

Tabela 43. Merene i računске vrednosti za glavni otpor rezanja  $F_1$  pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Glavni otpor rezanja $F_1$ [N]	Model bez međusobnog uticaja		
		$F_{1rac}[N]$	$F_{1min}[N]$	$F_{1max}[N]$
1.	55	57.39	52.22	63.07
2.	54	57.15	52.00	62.81
3.	116	100.19	91.16	110.11
4.	110	99.78	90.79	109.66
5.	170	160.17	145.74	176.02
6.	155	159.51	145.14	175.30
7.	280	279.62	254.43	307.31
8.	240	278.48	253.39	306.05
9.	120	125.11	120.97	132.10
10.	121	125.11	120.97	132.10
11.	130	125.11	120.97	132.10
12.	132	125.11	120.97	132.10
13.	116	125.47	112.85	142.44
14.	130	124.75	112.19	141.62
15.	92	90.76	75.88	95.78
16.	194	180.82	166.86	210.62
17.	57	60.28	54.45	68.74
18.	250	261.74	232.50	293.48
19.	120	125.47	112.85	142.44
20.	131	124.75	112.19	141.62
21.	98	90.76	75.88	95.78
22.	200	180.82	166.86	210.62
23.	53	60.28	54.45	68.74
24.	265	261.74	232.50	293.48

Na slici 89. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CCMW ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata SCLCR 25 25 M12 za glavni otpor rezanja  $F_1$

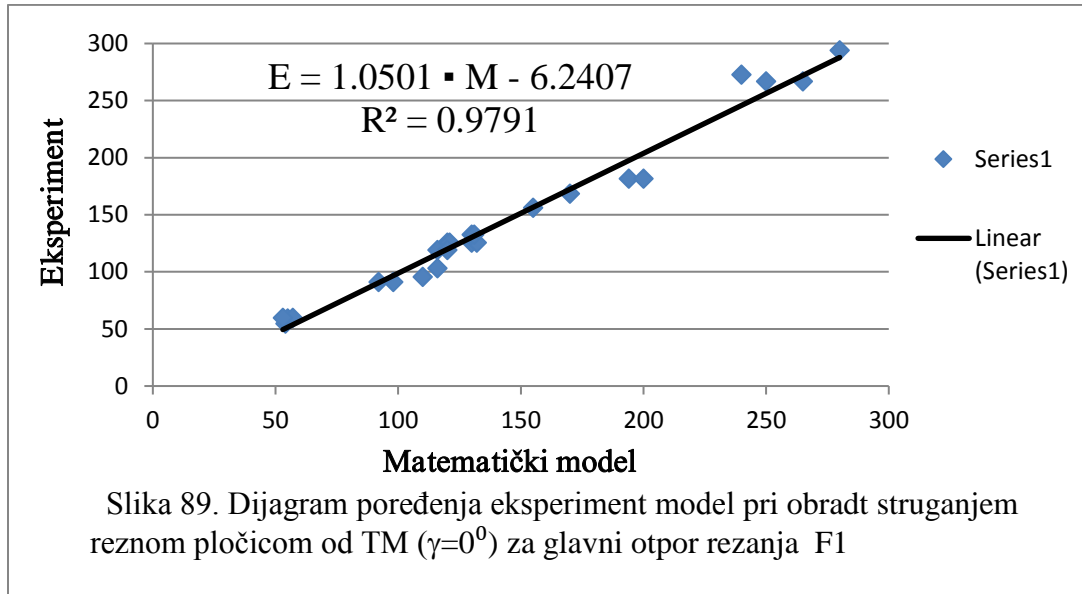


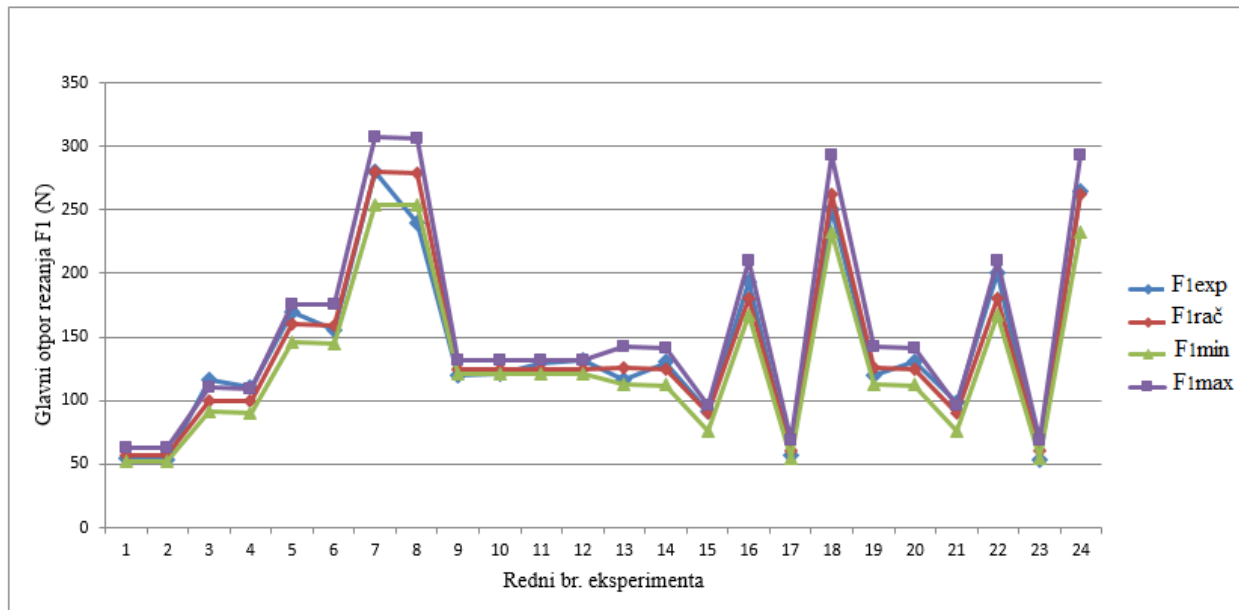
Tabela 44. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za glavni otpor rezanja  $F_1$  pri obradi reznom pločicom od TM CCMW ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
<i>Model bez međusobnog uticaja</i>	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	857.9038	$F_t$	6,61
	$p_0$	6.75449	$F_{r0}$	259473.19
	$p_1$	-0.00713	$F_{r1}$	0.03 (*)
	$p_2$	0.40196	$F_{r2}$	573.33
	$p_3$	0.63773	$F_{r3}$	1945.15
	Adekvatnost		$F_a$	4.3077

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ ; Za adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} < F_t$ ,  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  element režima (v) nije uticajano, a elementi režima (s i a) su uticajni na otpor  $F_1$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih izmerenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 43. na slici 90. dat je dijagram poređenja eksperiment model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA 120404 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), za glavni otpor rezanja  $F_1$



Slika 90. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za glavni otpor rezanja ( $F_1$ )

Trofaktorni model za otpor prodiranja ( $F_2$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$F_2 = C v^{p_1} s^{p_2} a^{p_3} \quad (6.14)$$

U tabeli 45. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatima od TM CCMW 120404 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 46. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i ocena adekvatnosti modela.

Tabela 45. Merene i računске vrednosti za otpor prodiranja ( $F_2$ ) pri obradi reznom pločicom od TM CCMW ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Otpor prodiranja $F_2$ [N]	Model bez međusobnog uticaja		
		$F_{2rac}$ [N]	$F_{2min}$ [N]	$F_{2max}$ [N]
1.	141	144.14	106.69	194.74
2.	138	198.43	146.88	268.09
3.	300	256.92	191.29	345.07
4.	401	359.45	267.63	482.78
5.	350	388.15	289.00	521.33
6.	360	543.06	404.33	729.39
7.	680	696.50	518.57	935.47
8.	710	974.46	725.53	1308.80
9.	280	369.78	325.53	428.60
10.	300	369.78	325.53	428.60
11.	390	369.78	325.53	428.60
12.	400	369.78	325.53	428.60
13.	255	291.85	204.72	423.86
14.	650	468.51	329.17	681.53
15.	398	264.05	171.69	355.47
16.	710	544.22	392.49	812.64
17.	152	181.87	128.24	265.51
18.	770	757.59	525.48	1087.98
19.	300	291.85	204.72	423.86
20.	600	468.51	329.17	681.53
21.	398	264.05	171.69	355.47
22.	650	544.22	392.49	812.64
23.	141	181.87	128.24	265.51
24.	784	757.59	525.48	1087.98

Na slici 91. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA 120404 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata SCLCR 25 25 M12 za otpor prodiranja  $F_2$ .

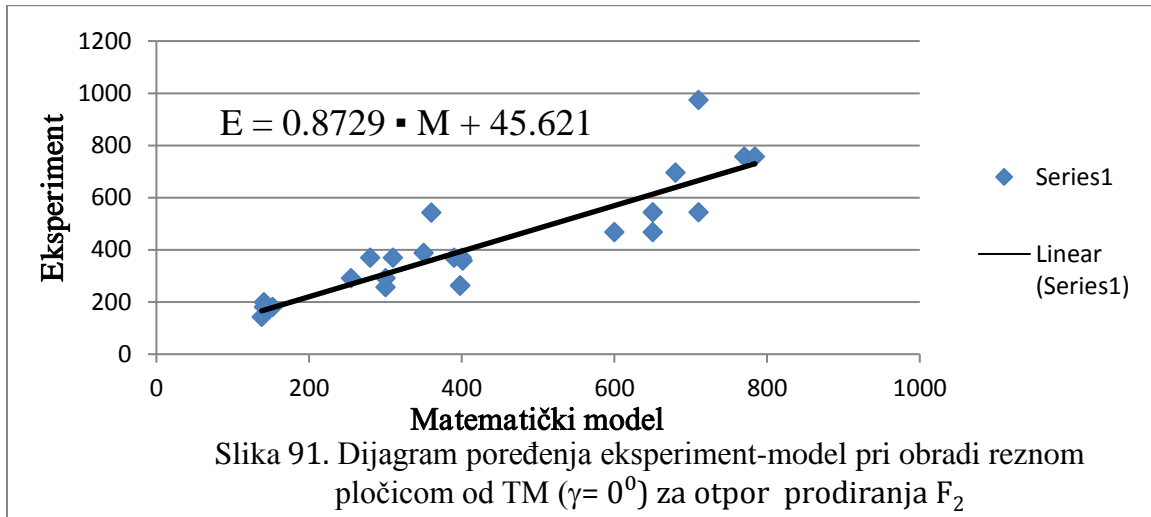


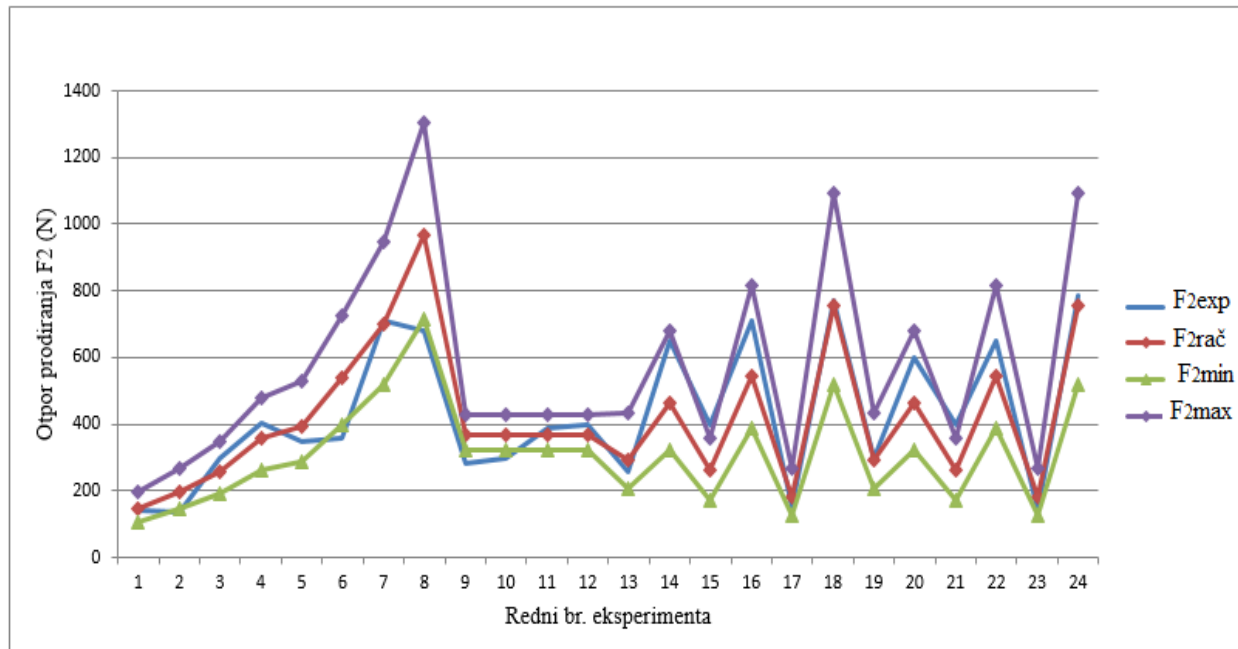
Tabela 46. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za otpor prodiranja  $F_2$  pri obradi reznom pločicom od TM CCMW ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	174.3623	$F_t$	6,61
	$p_0$	5.16114	$F_{r0}$	38201.77
	$p_1$	0.55557	$F_{r1}$	18.55
	$p_2$	0.42175	$F_{r2}$	62.07
	$p_3$	0.61967	$F_{r3}$	180.60
	Adekvatnost		$F_a$	4,3024

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} > F_t$ ,  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (v, s, a) su uticajni na otpor prodiranja  $F_2$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih izmerenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 46. na slici 92. dat je dijagram poređenja eksperiment- model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata SCLCR 25 25 M12 za otpor prodiranja  $F_2$



Slika 92. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za otpor prodiranja ( $F_2$ )

Trofaktorni model za otpora pomoćnog kretanja ( $F_3$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$F_3 = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.15)$$

U tabeli 47. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatima od TM CCMW ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 48. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i ocena adekvatnosti modela.



Tabela 47. Merene i računске vrednosti za otpor pomoćnog kretanja ( $F_3$ ) pri obradi reznom pločicom od TM CCMW ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Otpora pomoćnog kretanja $F_3$ [N]	Model bez međusobnog uticaja		
		$F_{3rac}[N]$	$F_{3min}[N]$	$F_{3max}[N]$
1.	46	53.84	38.67	74.96
2.	41	65.18	46.82	90.76
3.	60	67.81	48.70	94.41
4.	80	82.10	58.97	114.31
5.	285	252.45	181.32	351.49
6.	195	305.66	219.53	425.58
7.	440	317.97	228.37	442.71
8.	245	384.99	276.51	536.03
9.	130	141.74	127.81	162.16
10.	133	141.74	127.81	162.16
11.	186	141.74	127.81	162.16
12.	190	141.74	127.81	162.16
13.	102	102.40	75.83	142.34
14.	225	196.18	145.61	273.31
15.	177	124.10	89.26	167.55
16.	190	165.09	123.70	232.20
17.	46	47.20	35.24	66.14
18.	340	430.64	313.37	588.22
19.	111	102.40	75.83	142.34
20.	260	196.18	145.61	273.31
21.	180	124.10	89.26	167.55
22.	200	165.09	123.70	232.20
23.	42	47.20	35.24	66.14
24.	360	430.64	313.37	588.22

Na slici 93. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$ .

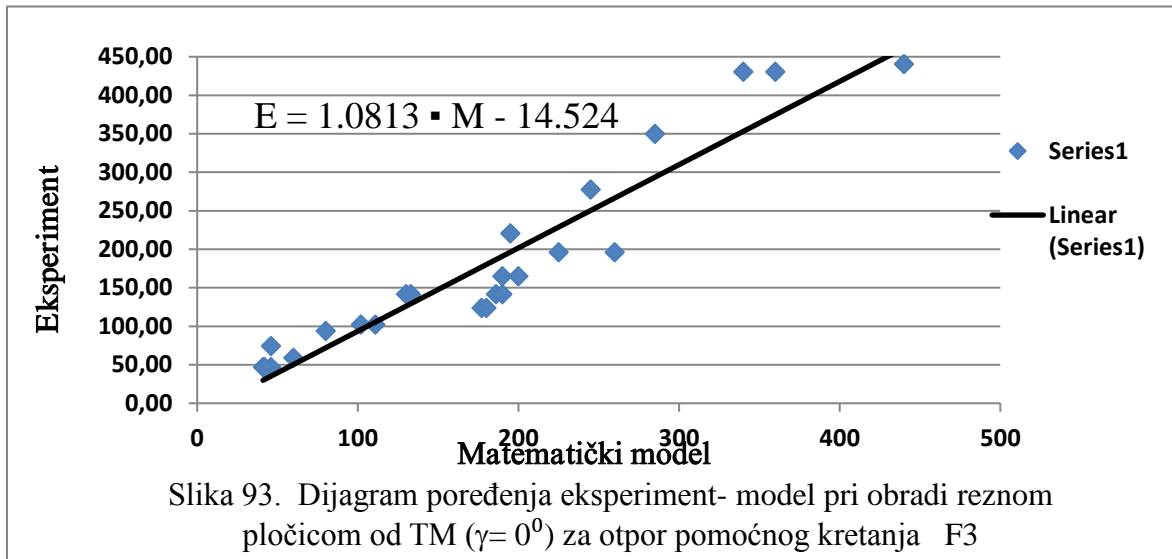


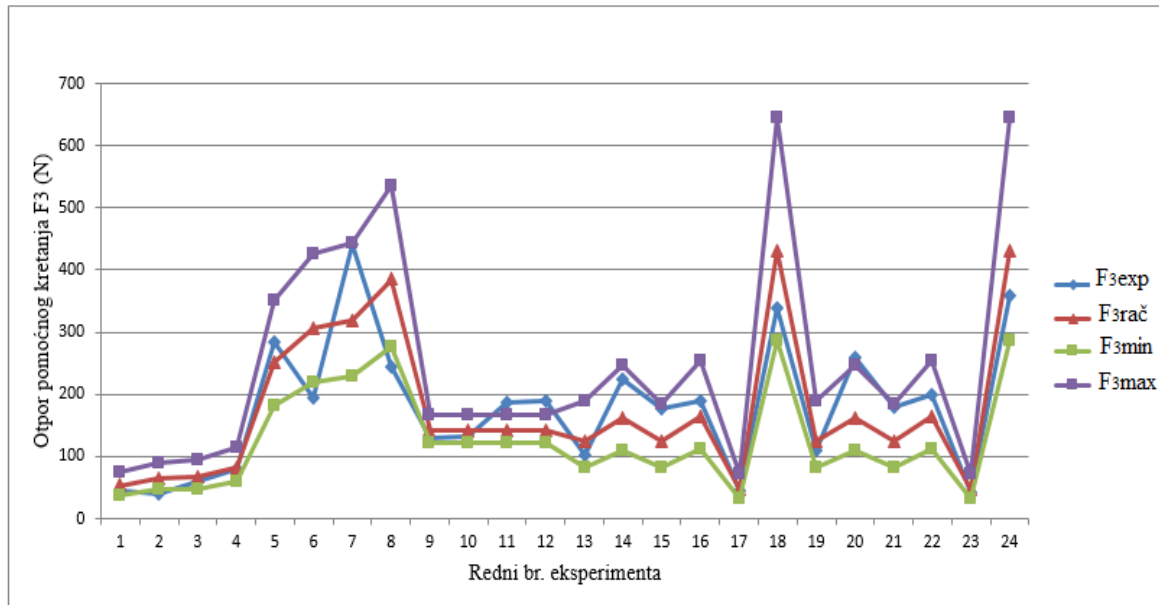
Tabela 48. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za otpor pomoćnog kretanja ( $F_3$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	181.1774	$F_t$	6,61
	$p_0$	5.19948	$F_{r0}$	21339.30
	$p_1$	0.33243	$F_{r1}$	7,62
	$p_2$	0.16645	$F_{r2}$	7.67
	$p_3$	0.96013	$F_{r3}$	343.87
	Adekvatnost		$F_a$	4.11488

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} > F_t$ ,  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (v, s, a) su uticajni na  $F_3$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 47. na slici 94. dat je dijagram poređenja eksperiment model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata SCLCR 25 25 M12 za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$ .



Slika 94. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za otpor pomoćnog kretanja ( $F_3$ )

Trofaktorni model za temperaturu u zoni rezanja Q pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

$$\text{Model je oblika: } Q = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.16)$$

U tabeli 49. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za temperaturu rezanja Q alatima od TM CCMW ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 50. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i ocena adekvatnosti modela.

Tabela 49. Merene i računске vrednosti za temperaturu u zoni rezanja Q pri obradi reznom pločicom od TM CCMW ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Temperatura u zoni rezanja Q [°C]	Model bez međusobnog uticaja		
		$Q_{rac}$ [ $\mu m$ ]	$Q_{min}$ [ $\mu m$ ]	$Q_{max}$ [ $\mu m$ ]
1.	122	141.68	127.91	156.94
2.	150	157.01	141.75	173.92
3.	200	181.10	163.50	200.60
4.	230	200.69	181.18	222.30
5.	189	187.09	168.90	207.23
6.	245	207.32	187.17	229.65
7.	230	239.14	215.89	264.89
8.	280	265.01	239.24	293.54
9.	183	193.23	184.75	203.23
10.	184	193.23	184.75	203.23
11.	190	193.23	184.75	203.23
12.	196	193.23	184.75	203.23
13.	200	179.73	158.84	204.42
14.	210	207.73	183.67	236.38
15.	160	167.75	143.59	184.80
16.	208	227.26	203.18	261.49
17.	161	158.55	140.33	180.60
18.	203	235.99	207.90	267.57
19.	202	179.73	158.84	204.42
20.	195	207.73	183.67	236.38
21.	165	167.75	143.59	184.80
22.	210	227.26	203.18	261.49
23.	160	158.55	140.33	180.60
24.	250	235.99	207.90	267.57

Na slici 95. dat je dijagram poređenja eksperiment - model za temperaturu pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata SCLCR 25 25 M12

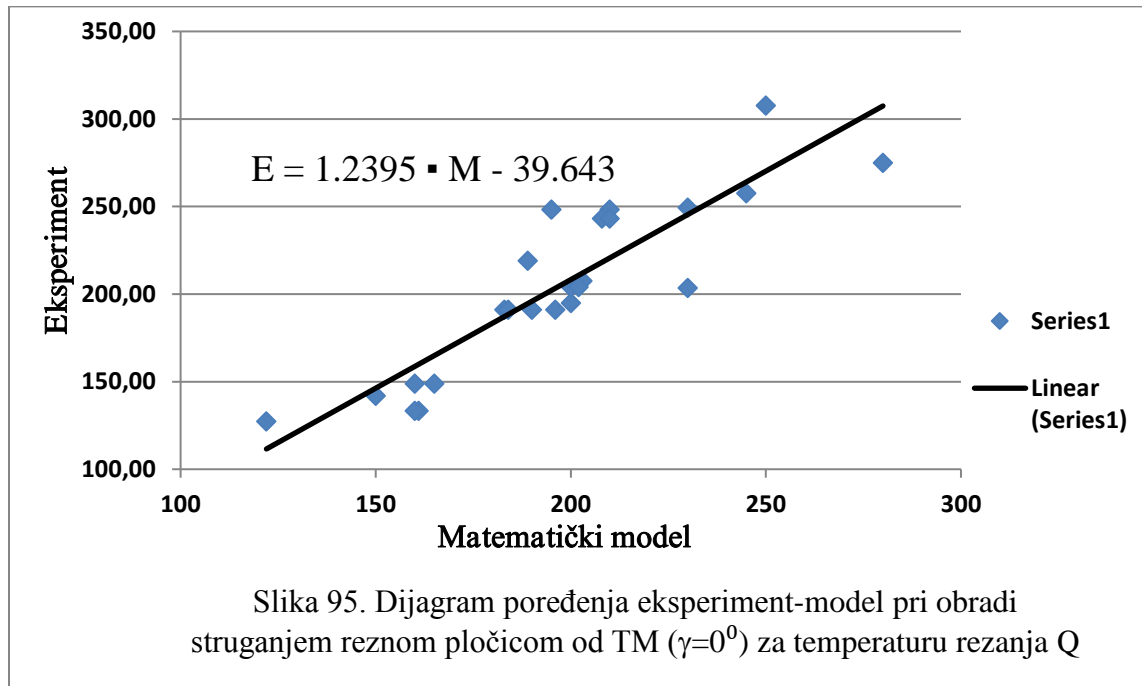


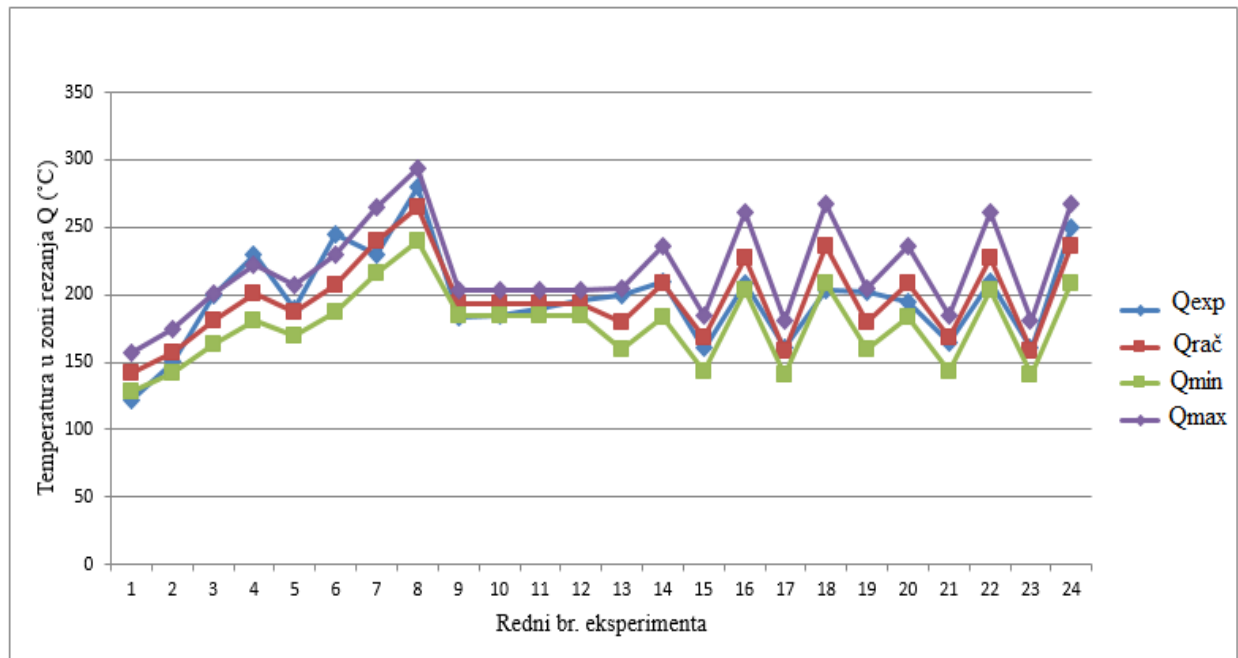
Tabela 50. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za temperaturu u zoni rezanja Q pri obradi reznom pločicom od TM CCMW ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	160,5185	$F_t$	6,61
	$p_0$	5,07841	$F_{r0}$	214140,53
	$p_1$	0,17852	$F_{r21}$	13,58
	$p_2$	0,17706	$F_{r2}$	77,53
	$p_3$	0,17271	$F_{r3}$	99,42
	Adekvatnost		$F_a$	3,4575

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} > F_t$ ,  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (v, s, a) su uticajni na temperaturu rezanja  $Q$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih izmerenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 49. na slici 96. dat je dijagram poređenja eksperiment- model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata SCLCR 25 25 M12 za temperaturu u zoni rezanja  $Q$



Slika 96. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za temperaturu u zoni rezanja ( $Q$ )

Trofaktorni model za parametar hrapavosti ( $R_a$ ) pri obradi reznom pločicom od TM CCMW ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$R_a = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.17)$$

U tabeli 51. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ) reznom pločicom od TM sa geometrijom alata ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 52. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 51. Merene i računске vrednosti za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Srednja aritmetička hrapavost ( $R_a$ ) [ $\mu m$ ]	Model bez međusobnog uticaja		
		$R_{a\ rac}$ [ $\mu m$ ]	$R_{a\ min}$ [ $\mu m$ ]	$R_{a\ max}$ [ $\mu m$ ]
1.	0.61	0.76	0.59	0.97
2.	0.53	0.65	0.50	0.82
3.	1.18	1.35	1.06	1.72
4.	1.10	1.15	0.90	1.46
5.	0.86	1.08	0.84	1.37
6.	0.98	0.91	0.71	1.17
7.	1.28	1.91	1.50	2.44
8.	1.17	1.62	1.27	2.07
9.	1.41	1.11	0.99	1.24
10.	1.42	1.11	0.99	1.24
11.	1.48	1.11	0.99	1.24
12.	1.49	1.11	0.99	1.24
13.	0.85	1.24	0.92	1.69
14.	1.19	0.99	0.73	1.34
15.	0.81	0.79	0.55	1.00
16.	1.72	1.62	1.23	2.26
17.	0.89	0.86	0.64	1.17
18.	1.57	1.42	1.05	1.92
19.	1.11	1.24	0.92	1.69
20.	1.77	0.99	0.73	1.34
21.	0.63	0.79	0.55	1.00
22.	1.91	1.62	1.23	2.26
23.	0.78	0.86	0.64	1.17
24.	1.45	1.42	1.05	1.92

Na slici 97. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$

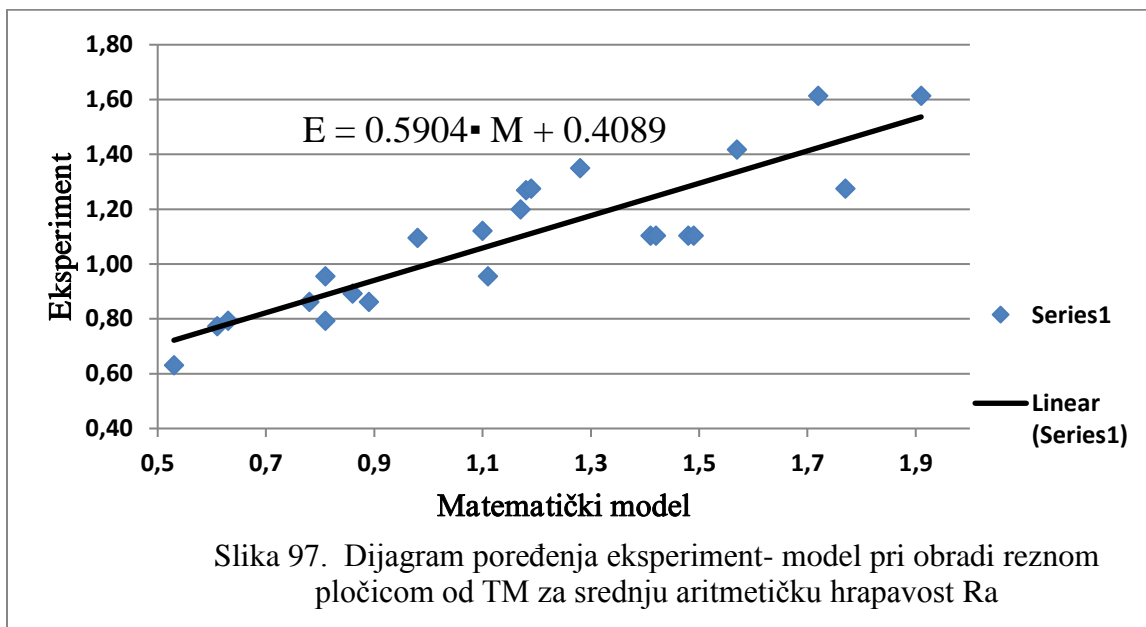


Tabela 52. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti model za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

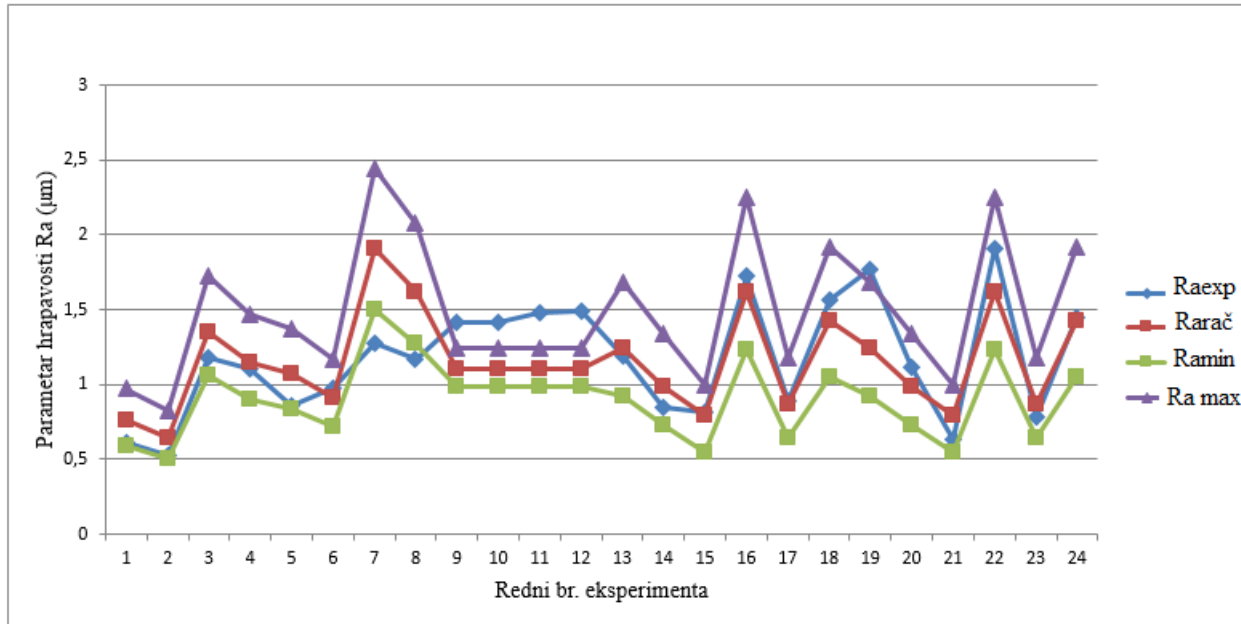
Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
<i>Model bez međusobnog uticaja</i>	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	15.5019	$F_t$	6,61
	$p_0$	2.74096	$F_{r0}$	15.62
	$p_1$	-0.28368	$F_{r1}$	6.34 (*)
	$p_2$	0.41463	$F_{r2}$	78.61
	$p_3$	0.21597	$F_{r3}$	28.75
	Adekvatnost		$F_a$	3.694

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} < F_t$ ,  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (v) nije uticajan a (s i a) su uticajni na srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.



Na osnovu eksperimentalnih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 45. na slici 98. dat je dijagram poređenja eksperiment- model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata SCLCR 25 25 M12, za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$ .



Slika 98. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ )

Trofaktorni model za maksimalnu hrapavosti ( $R_{mt}$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$R_{tm} = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.18)$$

U tabeli 53. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatima (rezne pločice) od TM CCMW sa geometrijom alata ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 54. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i ocena adekvatnosti modela.

Tabela 53. Merene i računске vrednosti za parametar hrapavosti ( $R_{tm}$ ) pri obradi reznom pločicom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Maksimalna hrapavost $R_{tm}$ [ $\mu m$ ]	Model bez međusobnog uticaja		
		$R_{tm\ rac}$ [ $\mu m$ ]	$R_{tm\ min}$ [ $\mu m$ ]	$R_{tm\ max}$ [ $\mu m$ ]
1.	2.7	3.74	2.98	4.69
2.	2.5	3.62	2.89	4.55
3.	7.1	5.78	4.60	7.25
4.	5.7	5.60	4.46	7.03
5.	4.2	5.21	4.15	6.54
6.	6.8	5.05	4.02	6.34
7.	6.8	8.05	6.42	10.11
8.	5.8	7.81	6.22	9.80
9.	6.2	5.38	4.89	5.97
10.	6.6	5.38	4.89	5.97
11.	5.1	5.38	4.89	5.97
12.	6.7	5.38	4.89	5.97
13.	4.6	4.84	3.72	6.32
14.	6.4	5.99	4.61	7.84
15.	4.1	4.19	3.05	5.17
16.	6.7	7.18	5.64	9.58
17.	4.3	4.25	3.28	5.56
18.	5.8	6.84	5.24	8.90
19.	6.4	4.84	3.72	6.32
20.	5.6	5.99	4.61	7.84
21.	4.9	4.19	3.05	5.17
22.	7.9	7.18	5.64	9.58
23.	4.2	4.25	3.28	5.56
24.	7.5	6.84	5.24	8.90

Na slici 99. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata SCLCR za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$ .

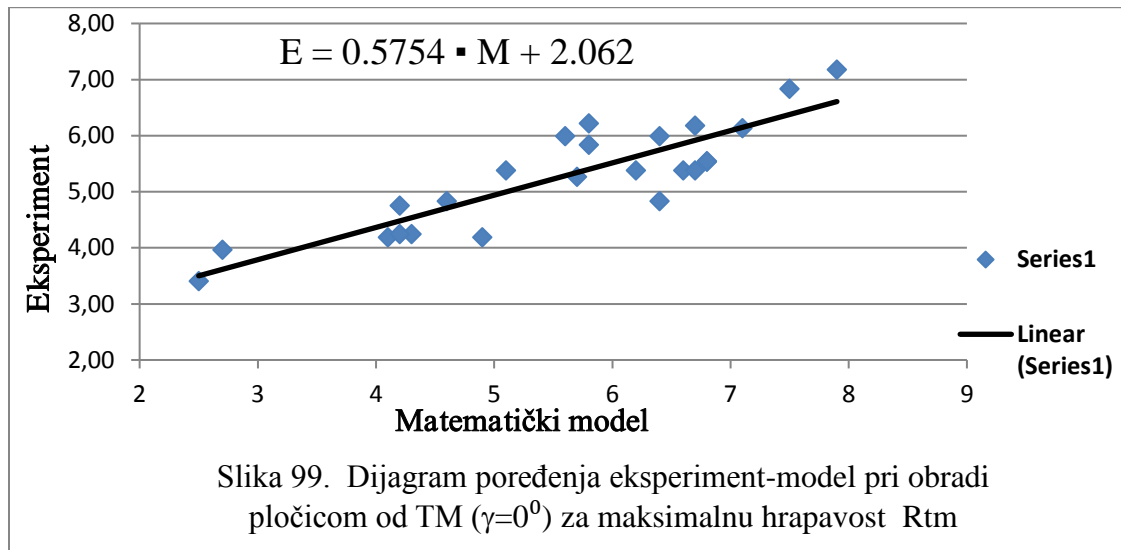


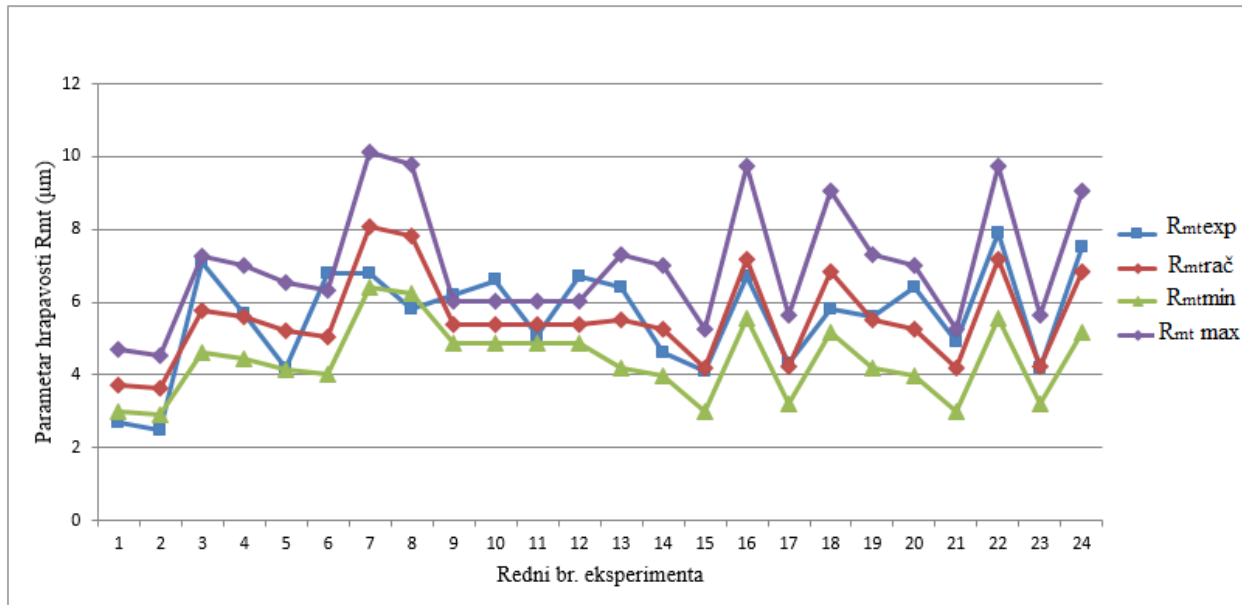
Tabela 54. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti model maksimalnu hrapavost ( $R_{tm}$ ) pri obradi reznom pločicom od TM CCMW 120404 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	19.7153	$F_t$	6,61
	$p_0$	2.98140	$F_{r0}$	3091.33
	$p_1$	-0.05475	$F_{r1}$	0.18 (*)
	$p_2$	0.31413	$F_{r2}$	34.35
	$p_3$	0.20658	$F_{r3}$	20.02
	Adekvatnost		$F_a$	2.294

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ . Za adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} < F_t$ ,  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  element režima (v) nije uticajan, a ostali elementi režima (s i a) su uticajni na  $R_{tm}$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih izmerenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 53. na slici 100. dat je dijagram poređenja eksperiment model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$



Slika 100. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$

Trofaktorni model za glavni otpor rezanja ( $F_1$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN  
( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$F_1 = C v^{p_1} s^{p_2} a^{p_3} \quad (6.19)$$

U tabeli 55. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatima od CBN CCMW 120404 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 56. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i ocena adekvatnosti modela.

Tabela 55. Merene i računске vrednosti glavnog otpora rezanja  $F_1$  pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Glavni otpor rezanja $F_1$ [N]	Model bez međusobnog uticaja		
		$F_{1rac}[N]$	$F_{1min}[N]$	$F_{1max}[N]$
1.	44	43.37	37.60	50.02
2.	42	36.33	31.50	41.90
3.	65	80.15	69.50	92.45
4.	60	67.14	58.22	77.44
5.	150	139.80	121.21	161.24
6.	144	117.11	101.53	135.07
7.	290	258.37	224.01	298.00
8.	190	216.44	187.66	249.63
9.	95	95.74	90.65	103.55
10.	94	95.74	90.65	103.55
11.	87	95.74	90.65	103.55
12.	90	95.74	90.65	103.55
13.	110	108.47	92.09	130.94
14.	83	84.51	71.68	101.93
15.	55	67.22	52.62	74.83
16.	180	143.69	125.44	178.37
17.	52	41.63	35.51	50.50
18.	200	222.17	185.89	264.32
19.	111	108.47	92.09	130.94
20.	82	84.51	71.68	101.93
21.	60	67.22	52.62	74.83
22.	180	143.69	125.44	178.37
23.	40	41.63	35.51	50.50
24.	211	222.17	185.89	264.32

Na slici 101. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi sa reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za glavni otpor rezanja  $F_1$ .

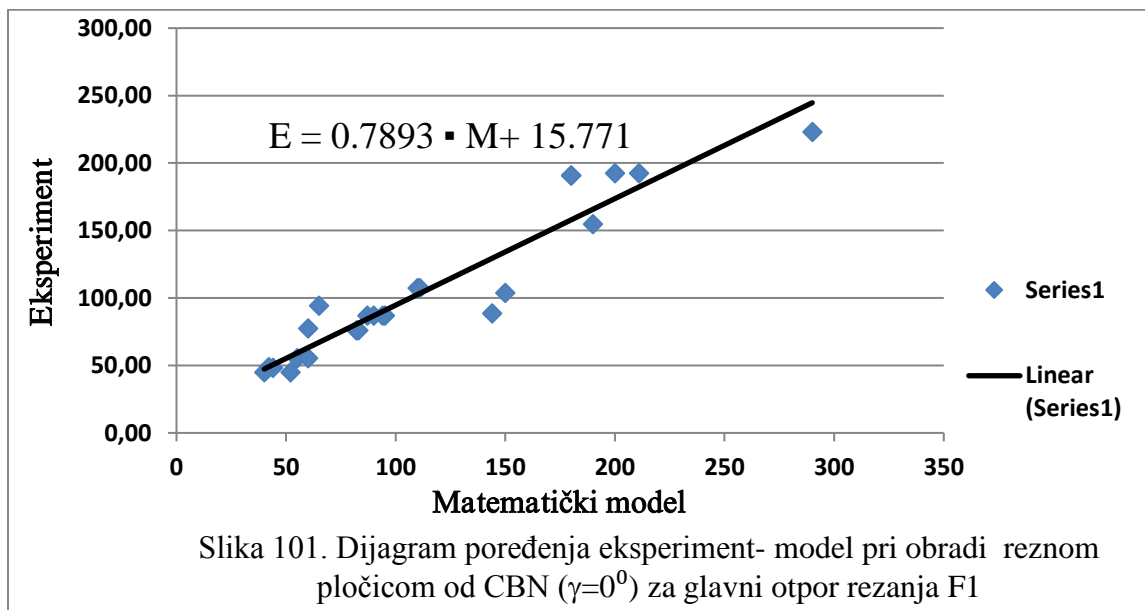


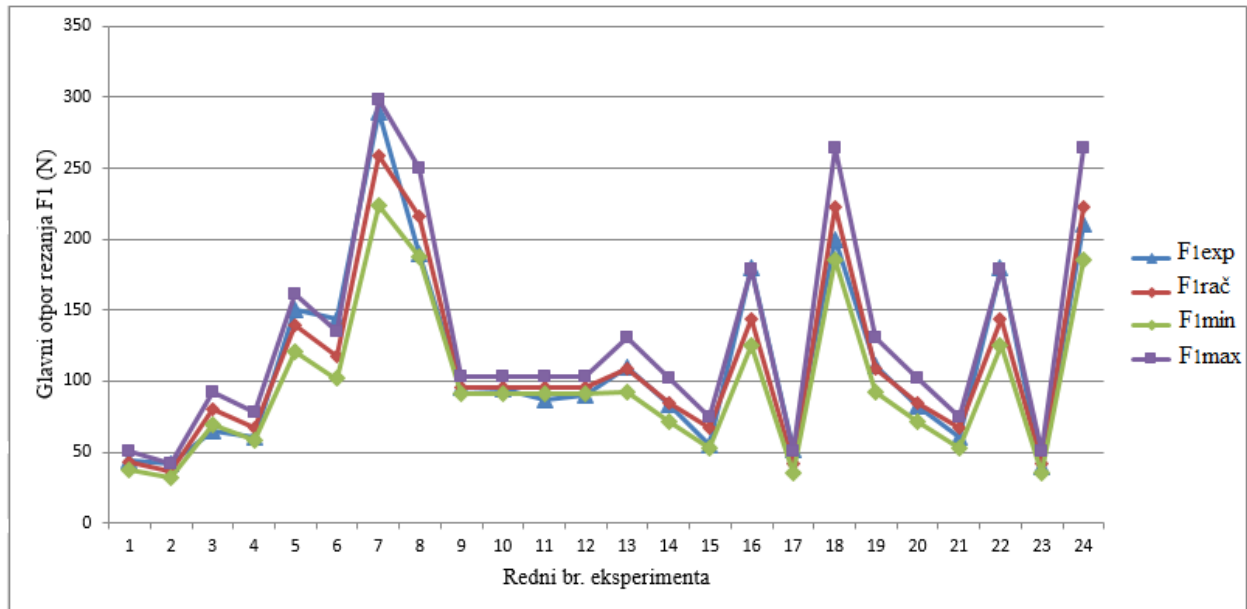
Tabela 56. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za glavni otpor rezanja  $F_1$  pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	3486,3422	$F_t$	6,61
	$p_0$	8,15661	$F_{r0}$	101105,22
	$p_1$	-0,30780	$F_{r1}$	25,27
	$p_2$	0,44306	$F_{r2}$	303,92
	$p_3$	0,72724	$F_{r3}$	1103,65
	Adekvatnost		$F_a$	4,29266

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} > F_t$ ,  $F_{r2} > F_t$ ,  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (v, s, a) su uticajni na glavni otpor rezanja  $F_1$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu eksperimentalnih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 55. na slici 102. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za glavni otpor rezanja  $F_1$ .



Slika 102. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za glavni otpor rezanja ( $F_1$ )

Trofaktorni model za otpor prodiranja ( $F_2$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$F_2 = C v^{p_1} s^{p_2} a^{p_3} \quad (6.20)$$

U tabeli 57. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatima od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 58. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 57. Merene i računске vrednosti za otpor prodiranja ( $F_2$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Otpor prodiranja $F_2$ [N]	Model bez međusobnog uticaja		
		$F_{2rac}$ [N]	$F_{2min}$ [N]	$F_{2max}$ [N]
1.	101	84.93	72.44	99.56
2.	112	81.48	69.50	95.52
3.	141	146.55	125.01	171.80
4.	134	140.60	119.94	164.83
5.	162	149.30	127.35	175.03
6.	160	143.25	122.19	167.93
7.	300	257.63	219.76	302.03
8.	280	247.18	210.85	289.78
9.	138	144.06	134.53	156.04
10.	129	144.06	134.53	156.04
11.	121	144.06	134.53	156.04
12.	121	144.06	134.53	156.04
13.	140	148.33	122.62	181.52
14.	124	139.92	115.65	171.20
15.	85	105.22	80.97	119.86
16.	224	206.61	175.14	259.27
17.	118	96.43	79.91	118.29
18.	230	216.15	177.46	262.70
19.	136	148.33	122.62	181.52
20.	124	139.92	115.65	171.20
21.	89	105.22	80.97	119.86
22.	224	206.61	175.14	259.27
23.	91	96.43	79.91	118.29
24.	220	216.15	177.46	262.70



Na slici 103. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi sa reznom pločicom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), za otpor prodiranja  $F_2$

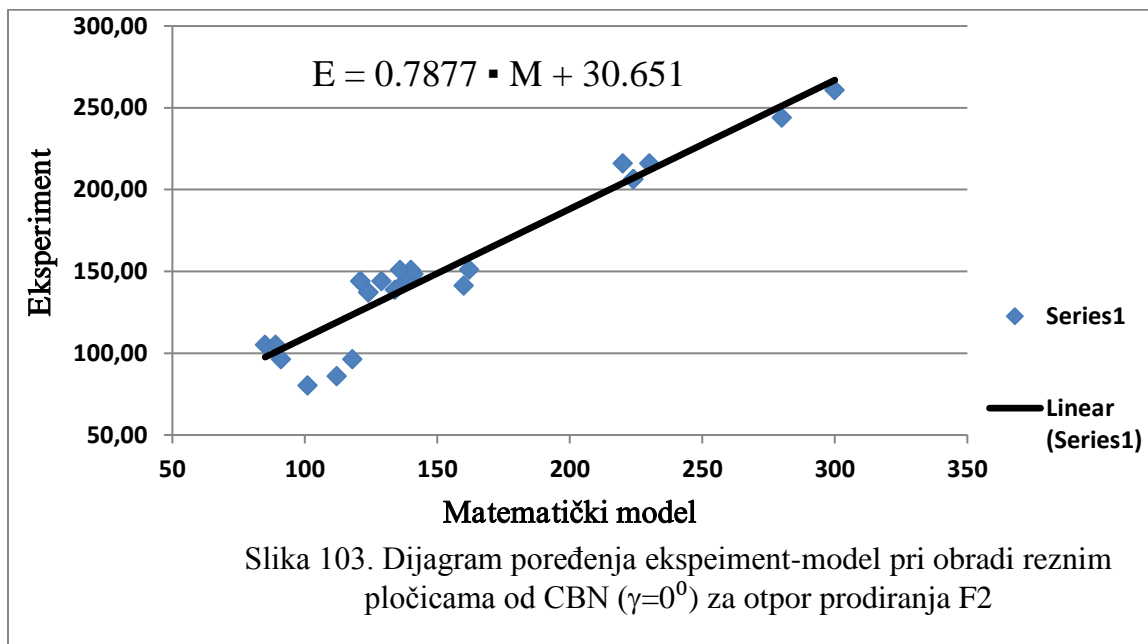


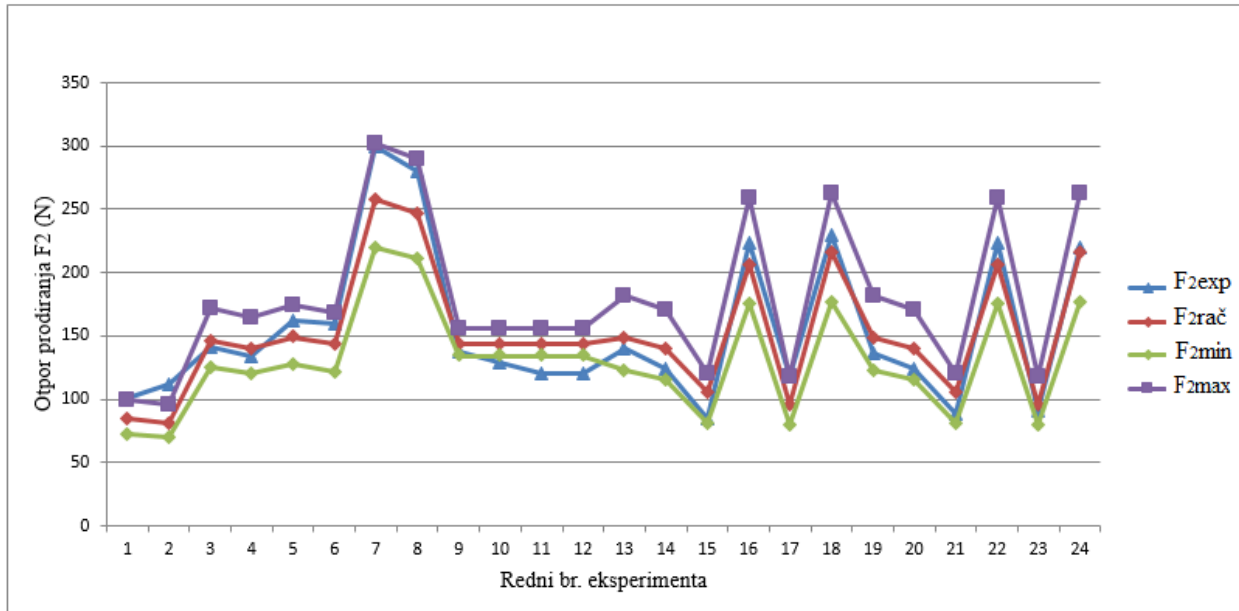
Tabela 58. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za otpor prodiranja  $F_2$  pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	855.4927	$F_t$	6,61
	$p_0$	6.75168	$F_{r0}$	99246.42
	$p_1$	-0.07196	$F_{r1}$	3.115 (*)
	$p_2$	0.39354	$F_{r2}$	198.84
	$p_3$	0.35054	$F_{r3}$	212.64
	Adekvatnost modela		$F_a$	4.29621

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$ ; (\*) - Nesignifikantni parametri

Pošto je  $F_{r1} < F_t$  ( $v$ ) nije uticajno na otpor  $F_2$ , dok  $F_{r2} > F_t$ , i  $F_{r3} > F_t$  elementi režima ( $s$  i  $a$ ) su uticajni na  $F_2$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu merenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 51. na slici 104. dat je dijagram poređenja eksperiment- model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za otpor prodiranja  $F_2$ .



Slika 104. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za otpor prodiranja ( $F_2$ )

Trofaktorni model za otpora pomoćnog kretanja ( $F_3$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$F_3 = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.21)$$

U tabeli 59. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatima (rezne pločice) od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 60. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 59. Merene i računске vrednosti za otpora pomoćnog kretanja ( $F_3$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Otpor pomoćnog kretanja $F_3$ [N]	Model bez međusobnog uticaja		
		$F_{3\text{ rac}}[N]$	$F_{3\text{ min}}[N]$	$F_{3\text{ max}}[N]$
1.	40	33.02	27.36	39.86
2.	40	30.04	24.88	36.26
3.	38	38.75	32.10	46.77
4.	38	35.24	29.20	42.54
5.	170	139.49	115.56	168.37
6.	160	126.87	105.11	153.15
7.	190	163.66	135.59	197.55
8.	180	148.86	123.32	179.68
9.	68	69.10	64.22	76.54
10.	66	69.10	64.22	76.54
11.	55	69.10	64.22	76.54
12.	54	69.10	64.22	76.54
13.	74	73.88	59.44	94.57
14.	56	64.64	51.98	82.70
15.	52	63.02	49.65	78.99
16.	80	76.80	62.24	99.02
17.	26	24.79	20.07	31.93
18.	186	194.75	153.96	244.95
19.	74	73.88	59.44	94.57
20.	55	64.64	51.98	82.70
21.	55	63.02	49.65	78.99
22.	78	76.80	62.24	99.02
23.	26	24.79	20.07	31.93
24.	175	194.75	153.96	244.95

Na slici 105. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata SCLCR 25 25 M12, za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$

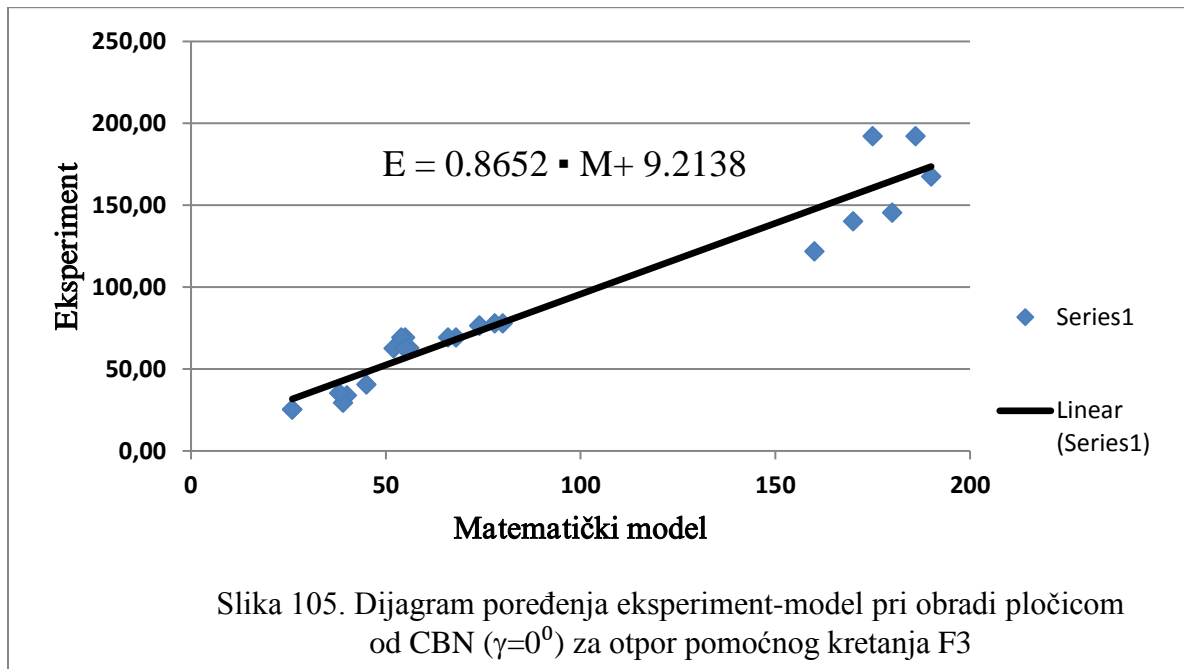


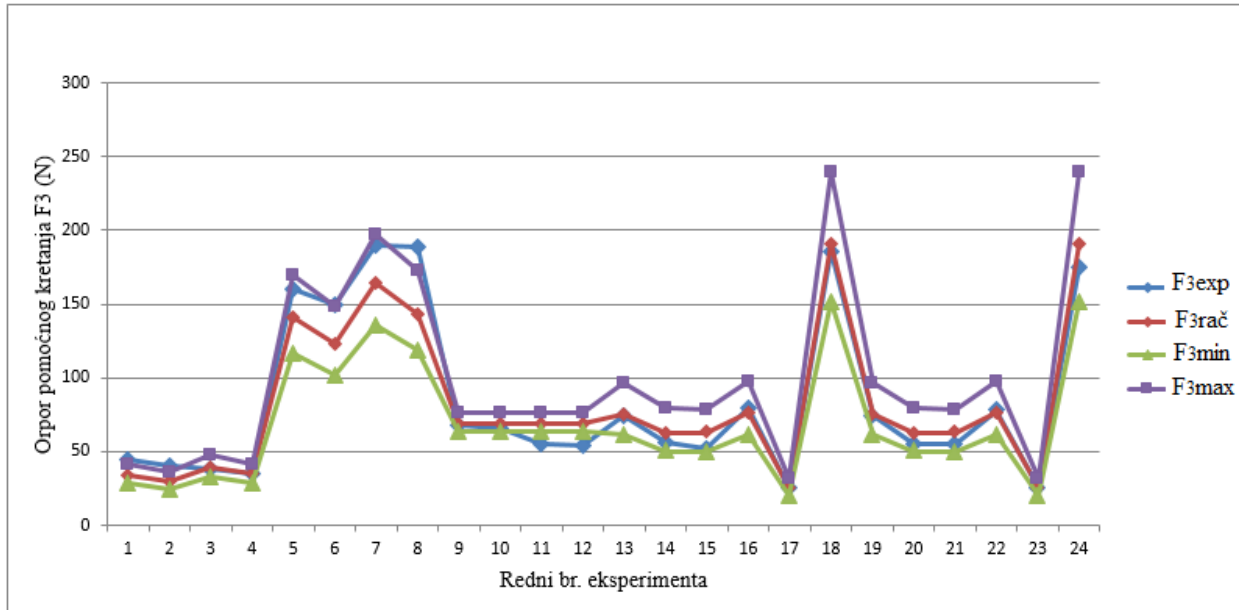
Tabela 60. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za otpor pomoćnog kretanja ( $F_3$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	769.1679	$F_t$	6,61
	$p_0$	6.64531	$F_{r0}$	47976.31
	$p_1$	-0.16478	$F_{r1}$	3.98 (*)
	$p_2$	0.11528	$F_{r2}$	11.31
	$p_3$	0.89518	$F_{r3}$	918.85
	Adekvatnost		$F_a$	4.08763

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} < F_t$ ,  $F_{r2} > F_t$  i  $F_{r3} > F_t$  element režima (v) nije uticajan, a elementi režima (s i a) su uticajni na  $F_3$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu merenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 59. na slici 106. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$ .



Slika 106. Grafički prikaz dobijenih vrednosti otpora pomoćnog kretanja ( $F_3$ )

Trofaktorni model drugog reda za temperaturu u zoni rezanja ( $Q$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

$$\text{Model je oblika: } Q = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.22)$$

U tabeli 61. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatima od CBN CCMW ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 62. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i ocena adekvatnosti modela.

Tabela 61. Merene i računске vrednosti za temperaturu u zoni rezanja Q pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Temperatura u zoni rezanja Q [°C]	Model bez međusobnog uticaja		
		$Q_{rac}$ [ $\mu m$ ]	$Q_{min}$ [ $\mu m$ ]	$Q_{max}$ [ $\mu m$ ]
1.	100	106.06	95.68	117.57
2.	105	115.26	103.98	127.77
3.	120	121.37	109.49	134.53
4.	135	131.90	118.99	146.21
5.	154	158.57	143.05	175.77
6.	187	172.32	155.46	191.02
7.	167	181.45	163.69	201.13
8.	201	197.19	177.89	218.58
9.	153	144.03	137.84	151.73
10.	155	144.03	137.84	151.73
11.	141	144.03	137.84	151.73
12.	140	144.03	137.84	151.73
13.	165	135.83	120.09	154.83
14.	170	152.73	135.08	174.16
15.	130	133.27	115.79	149.28
16.	151	157.45	140.10	180.63
17.	96	108.19	95.84	123.57
18.	180	192.34	169.26	218.22
19.	160	135.83	120.09	154.83
20.	169	152.73	135.08	174.16
21.	128	133.27	115.79	149.28
22.	156	157.45	140.10	180.63
23.	108	108.19	95.84	123.57
24.	164	192.34	169.26	218.22

Na slici 107. dat je dijagram poređenja eksperiment - model za temperaturu rezanja  $Q$  pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA 120404 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

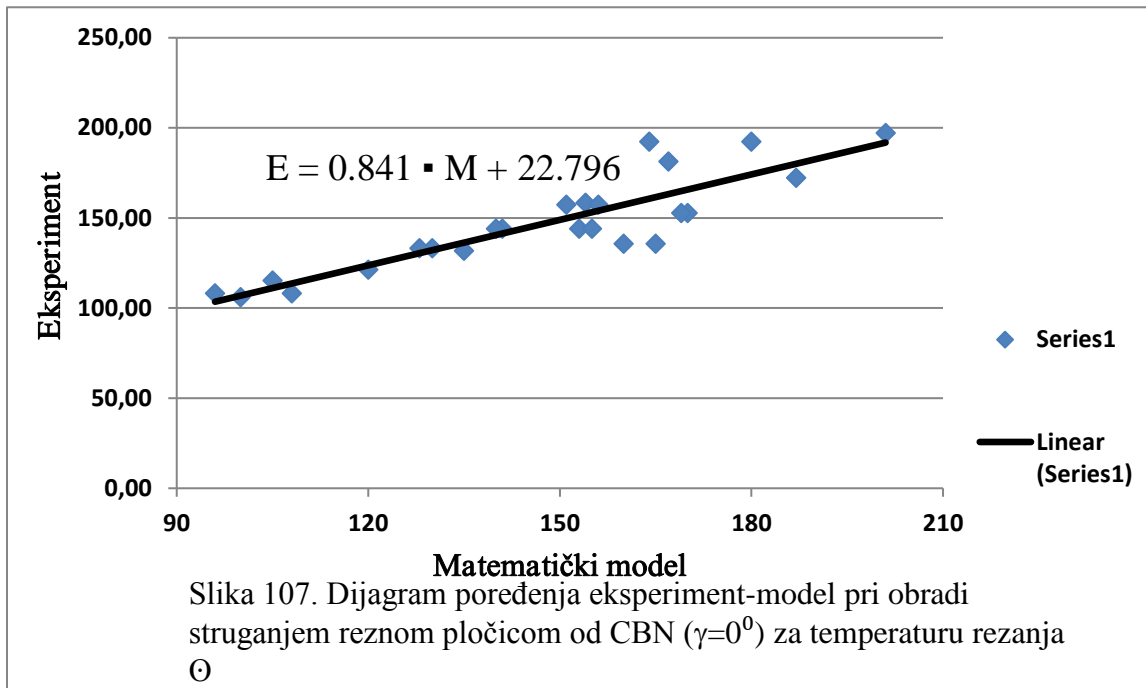


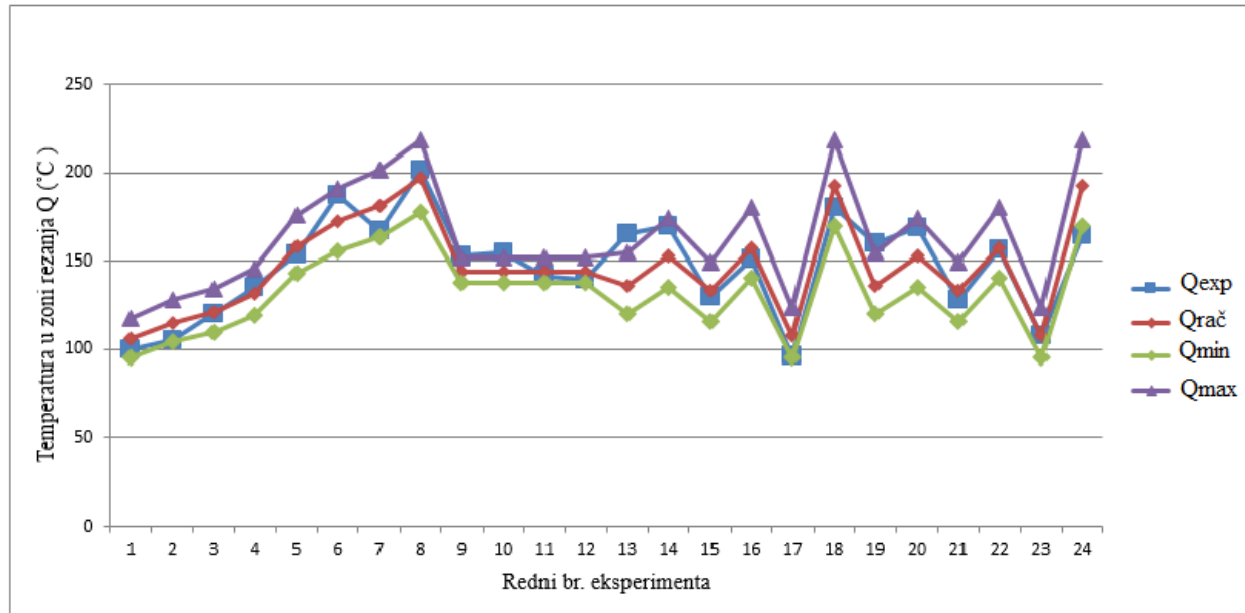
Tabela 62. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za temperaturu u zoni rezanja  $Q$  pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	131,6211	$F_t$	6,61
	$p_0$	4,87993	$F_{r0}$	201566,59
	$p_1$	0,14462	$F_{r21}$	9,40
	$p_2$	0,09724	$F_{r2}$	24,67
	$p_3$	0,24987	$F_{r3}$	219,59
	Adekvatnost		$F_a$	3,72530

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ , a adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} > F_t$ ,  $F_{r2} > F_t$ ,  $F_{r3} > F_t$  elementi režima (v, s i a) su uticajni na temperaturu rezanja Q, a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu merenih i računskih vrednosti temperature rezanja Q koje su date u tabeli 61. na slici 108. dat je dijagram poređenja eksperiment-model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6$



Slika 108. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za temperaturu u zoni rezanja Q

Trofaktorni model za parametar hrapavosti ( $R_a$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$R_a = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.23)$$

U tabeli 63. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatima od CBN sa geometrijom alata ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 64. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i ocena adekvatnosti modela.



Tabela 63. Merene i računске vrednosti za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Srednja aritmetička hrapavost ( $R_a$ ) [ $\mu m$ ]	Model bez međusobnog uticaja		
		$R_{a\text{ rac}}$ [ $\mu m$ ]	$R_{a\text{ min}}$ [ $\mu m$ ]	$R_{a\text{ max}}$ [ $\mu m$ ]
1.	0.67	0.68	0.54	0.86
2.	0.59	0.63	0.50	0.80
3.	0.79	0.90	0.71	1.13
4.	0.69	0.84	0.66	1.06
5.	0.62	0.75	0.60	0.95
6.	0.71	0.70	0.56	0.89
7.	0.78	1.00	0.79	1.26
8.	0.69	0.93	0.74	1.17
9.	0.93	0.79	0.71	0.89
10.	0.88	0.79	0.71	0.89
11.	0.83	0.79	0.71	0.89
12.	0.9	0.79	0.71	0.89
13.	1.02	0.83	0.63	1.11
14.	0.91	0.76	0.57	1.01
15.	0.87	0.68	0.49	0.87
16.	1.31	0.96	0.73	1.29
17.	0.58	0.74	0.55	0.98
18.	0.76	0.86	0.64	1.14
19.	1.03	0.83	0.63	1.11
20.	0.92	0.76	0.57	1.01
21.	0.54	0.68	0.49	0.87
22.	1.21	0.96	0.73	1.29
23.	0.59	0.74	0.55	0.98
24.	0.76	0.86	0.64	1.14

Na slici 109. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od TM CNMA 120404 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i nosačem alata SCLCR 25 25 M12 za parametar hrapavosti  $R_a$ .

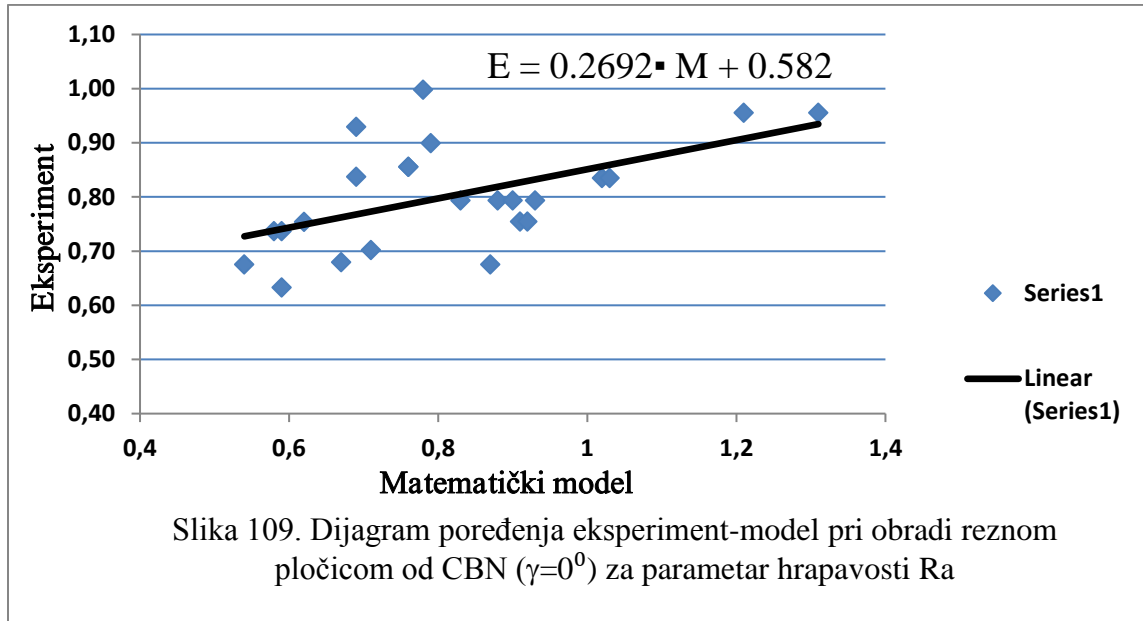


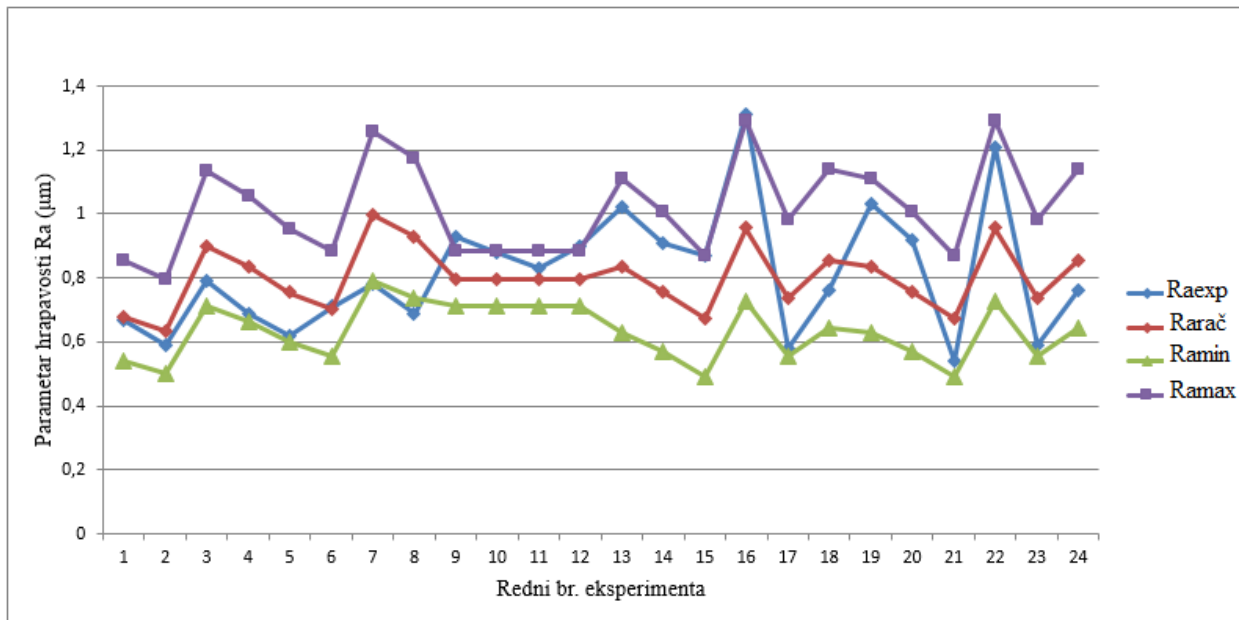
Tabela 64. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti modela za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti				
	Regresije		Signifikantnosti		
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti	
	$C$	2,5258	$F_t$	6,61	
	$p_0$	0,92657	$F_{r0}$	96,68	
	$p_1$	-0,12398	$F_{r1}$	1,55 (*)	
	$p_2$	0,20217	$F_{r2}$	24,00	
	$p_3$	0,06486	$F_{r3}$	3,33 (*)	
	Adekvatnost			$F_a$	4,29214

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ ; Za adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

Pošto je  $F_{r1} < F_t$ ,  $F_{r2} > F_t$ ,  $F_{r3} < F_t$ , elementi režima (v i a) nisu uticajni, a (s) je uticajan na parametar hrapavosti  $R_a$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu merenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 63. na slici 110. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN CNMA 120404 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$ .



Slika 110. Grafički prikaz dobijenih vrednosti srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ )

Trofaktorni model za maksimalnu hrapavost ( $R_{tm}$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model je oblika: 
$$R_{tm} = C v^{p1} s^{p2} a^{p3} \quad (6.24)$$

U tabeli 65. su dati podaci o mernim i računskim vrednostima za uslove obrade alatima (rezne pločice) od CBN sa geometrijom alata ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a u tabeli 66. dati su koeficijenti regresije, rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela za maksimalnu hrapavost ( $R_{tm}$ ).

Tabela 65. Merene i računске vrednosti za maksimalnu hrapavost ( $R_{tm}$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. Br.	Merene vrednosti	Računske vrednosti		
	Maksimalna hrapavost $R_{tm}$ [ $\mu m$ ]	Model bez međusobnog uticaja		
		$R_{tm\ rac}$ [ $\mu m$ ]	$R_{tm\ min}$ [ $\mu m$ ]	$R_{tm\ max}$ [ $\mu m$ ]
1.	3.9	3.80	3.09	4.68
2.	3.4	3.63	2.95	4.47
3.	4.2	4.68	3.81	5.76
4.	3.6	4.47	3.64	5.51
5.	3.5	4.12	3.35	5.08
6.	4.4	3.94	3.20	4.85
7.	3.9	5.08	4.13	6.25
8.	3.8	4.85	3.94	5.97
9.	4.7	4.29	3.90	4.73
10.	3.9	4.29	3.90	4.73
11.	4.7	4.29	3.90	4.73
12.	4.4	4.29	3.90	4.73
13.	5.6	4.43	3.43	5.73
14.	4.6	4.16	3.22	5.37
15.	4.7	3.81	2.87	4.79
16.	6.7	4.92	3.85	6.43
17.	3.5	4.05	3.14	5.24
18.	4.2	4.55	3.52	5.87
19.	5	4.43	3.43	5.73
20.	5	4.16	3.22	5.37
21.	3.1	3.81	2.87	4.79
22.	6.6	4.92	3.85	6.43
23.	3.5	4.05	3.14	5.24
24.	4.2	4.55	3.52	5.87

Na slici 111. dat je dijagram poređenja eksperiment - model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN CNMA 120404 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), za maksimalnu hrapavost obrađene površine  $R_{tm}$ .

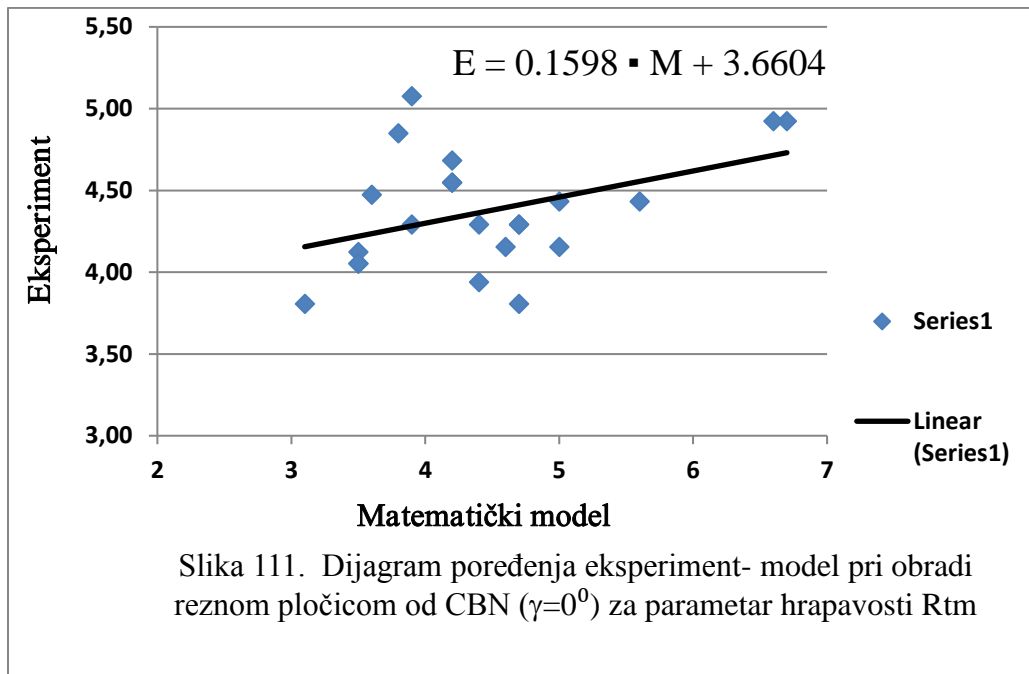


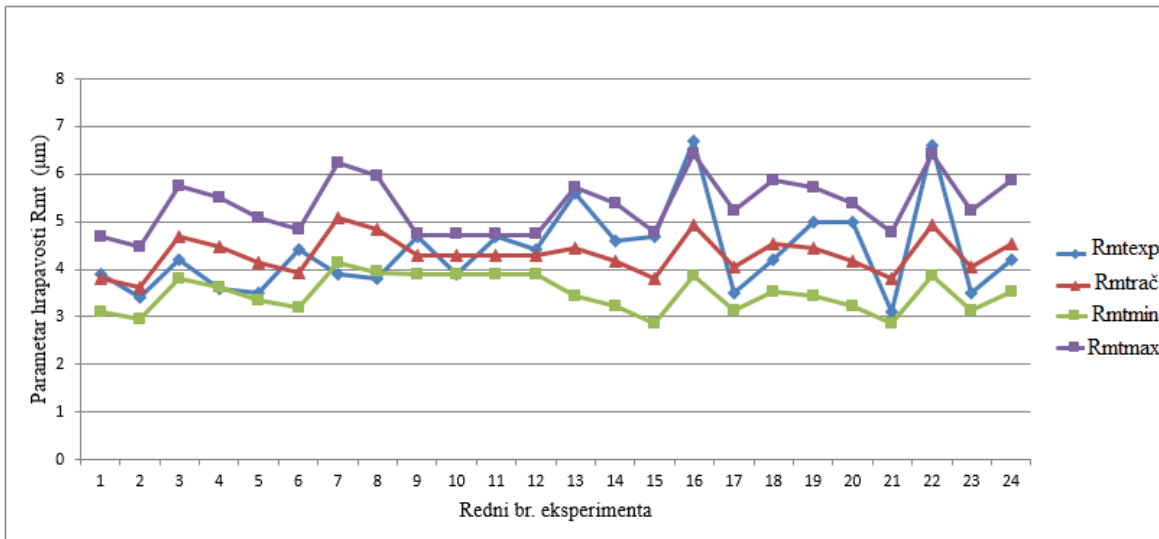
Tabela 66. Koeficijenti regresije, ocena signifikantnosti i adekvatnosti model a za maksimalnu hrapavost ( $R_{tm}$ ) pri obradi reznom pločicom od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
Model bez međusobnog uticaja	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
	$C$	9,5757	$F_t$	6,61
	$p_0$	2,25922	$F_{r0}$	3564,19
	$p_1$	-0,07966	$F_{r1}$	0,59 (*)
	$p_2$	0,14995	$F_{r2}$	12,08
	$p_3$	0,05012	$F_{r3}$	1,82 (*)
	Adekvatnost			$F_a$

Napomena: Za signifikantnost:  $F_{ri} > F_t = 6,61$ . Za adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$ ; (\*) Nesignifikantni parametri

Pošto je  $F_{r1} < F_t$ ,  $F_{r3} > F_t$  (v i a) nije uticajno na  $R_{mt}$ , dok  $F_{r2} > F_t$  element režima (s) je uticajan na  $R_{mt}$ , a  $F_a < F_t$  model je adekvatan.

Na osnovu merenih i računskih vrednosti koje su date u tabeli 59. na slici 112. dat je dijagram poređenja eksperiment- model pri obradi struganjem sa reznom pločicom od CBN CNMA 120404 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$ .



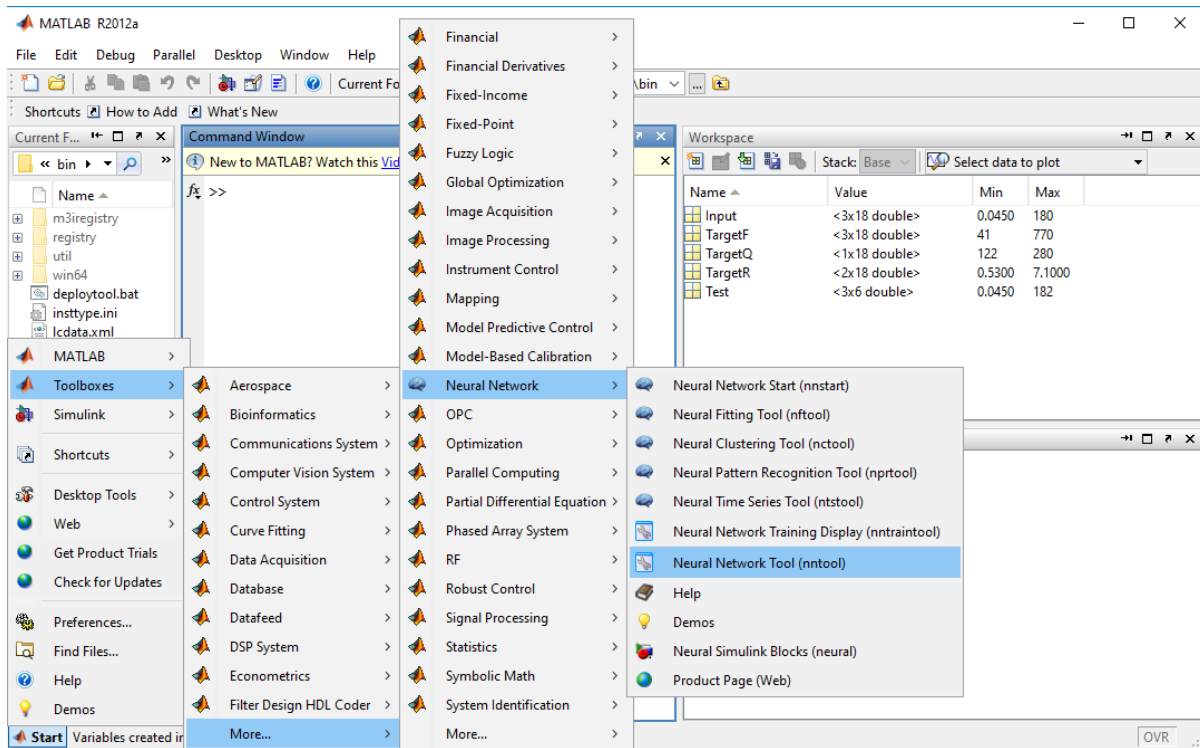
Slika 112. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za parametar hrapavosti  $R_{tm}$

## 6.2. Realizacija modela pomoću metode veštačke neuronskih mreža

U ovom delu je opisan način modelovanja eksperimentalnih podataka parametara procesa rezanja pomoću veštačke neuronske mreže. Ovaj postupak je urađen dovoljno detaljno, postupno i ilustrovano, tako da može drugim korisnicima poslužiti i kao uputstvo za savlađivanje modelovanje pomoću vaštačkih neuronskih mreža. Pre početka ulazne podatke treba podeliti na podatke za modelovanje i podatke za testiranje neuronske mreže.

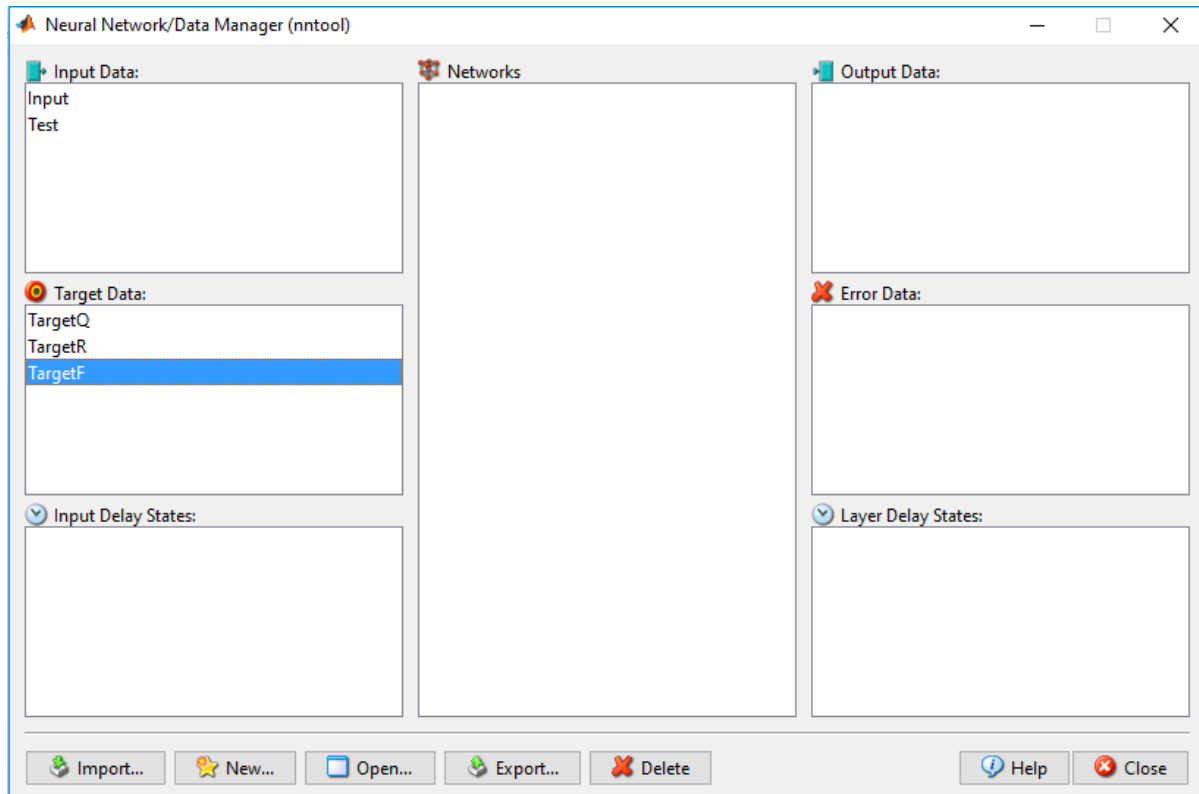
Za kreiranje i obuku neuronske mreže u samom MatLab-u korišćen je Neural Network Toolbox. Vršiti se unos podataka u *Command Window* u vidu matičnog oblika. Podaci u vidu matrica dati su na samom kraju ovog poglavlja. Kao ulazni podaci korišćeni su: brzina rezanja  $v$  (m/s), pomak  $s$  (mm/o), dubina rezanja  $a$  (mm), glavni otpor rezanja  $F_1$  (N), otpor prodiranja  $F_2$  (N), otpor pomoćnog kretanja  $F_3$  (N), temperatura u zoni rezanja  $Q$  ( $^\circ C$ ), parametar hrapavosti obrađene površine  $R_a$  ( $\mu m$ ), i parametar hrapavosti obrađene površine  $R_{tm}$  ( $\mu m$ ).

Kreiranje se vrši u *Create New Network* prozoru do kog se dolazi kucanjem komande *nntool* u *Command Window* prozoru ili preko toolbox-a *Start=>Toolboxes=>Neural Networks=>Neural Network Tools* (slika 113).



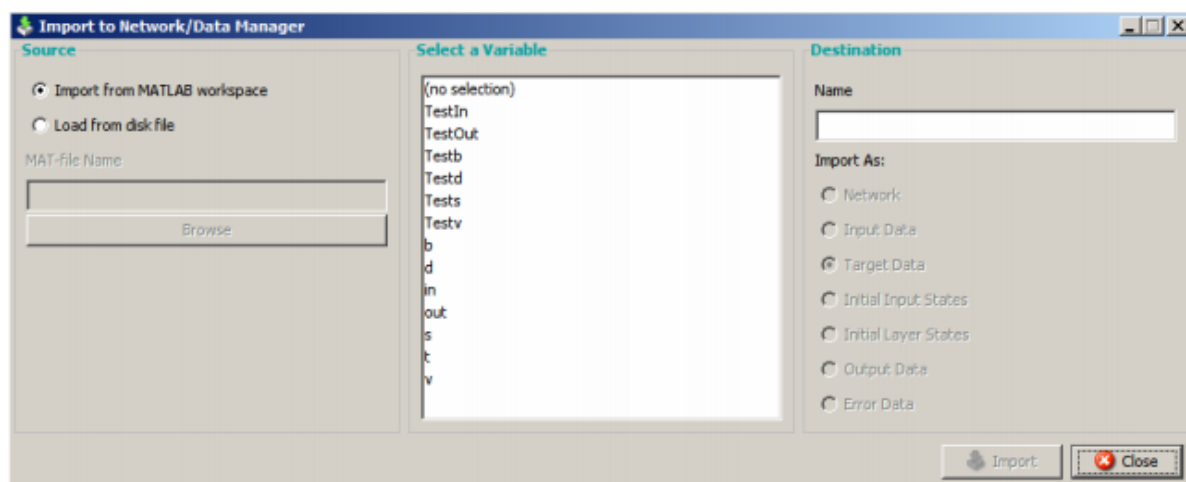
Slika 113. Putanja do komande nntool

114. Posle komande *nntool* na ekranu će se pojaviti prozor *Network/Date manager* kao na slici



Slika 114. Prozor Network/Date manager

Pomoću ovog prozora kompletno se definiše neuronska mreža: tip mreže, ulazni parametri, izlazni parametri, te se obavlja treniranje i simulacija. Uz pretpostavku da se zna koju vrstu mreže će se koristiti potrebno je definisati podatke sa kojima će mreža raditi. Odabira se opciju *Import...* Otvora se prozor izgleda kao na slici 115.

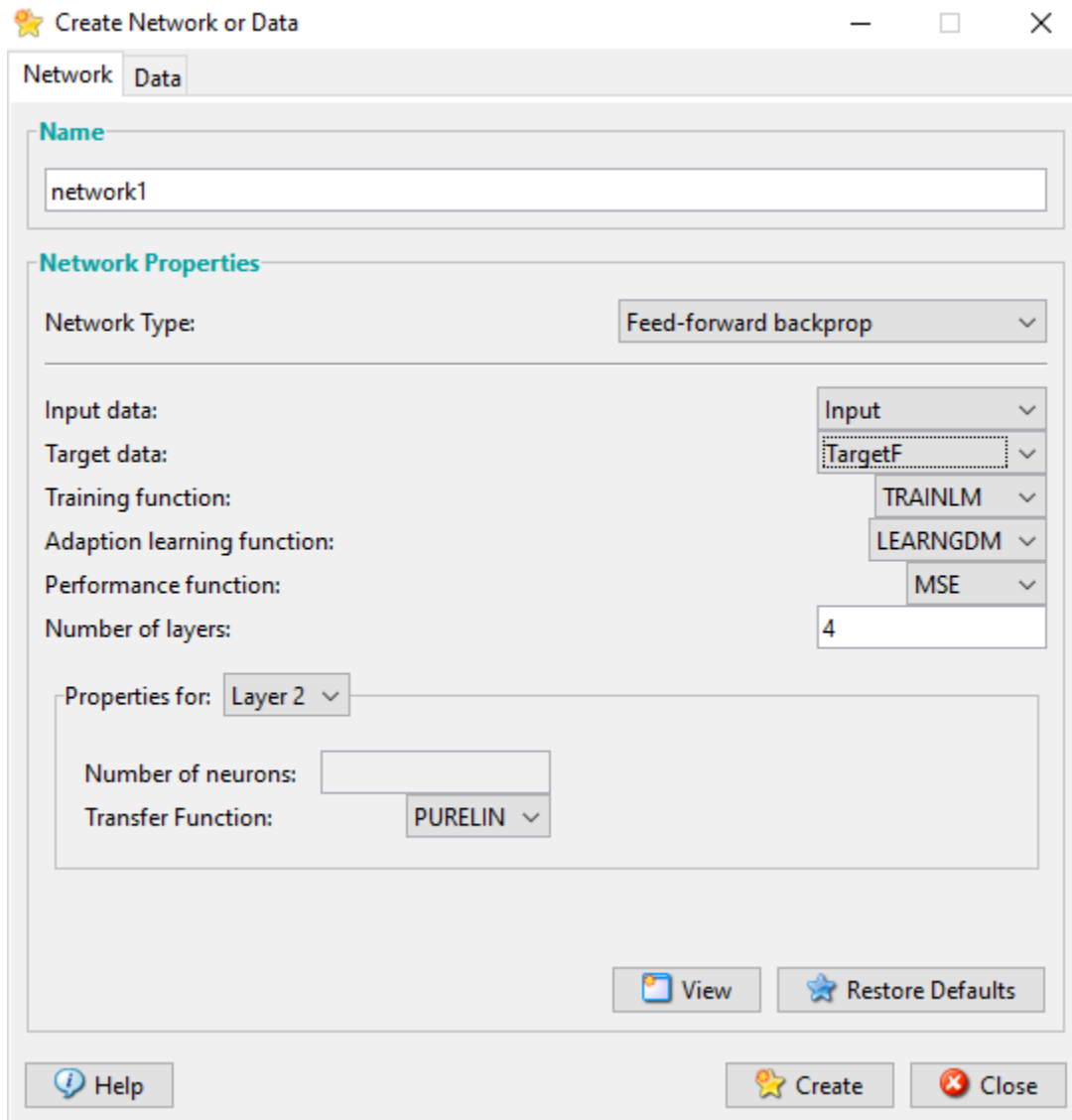


Slika 115. Prozor Import to Network/Date Manager



Potrebno je odrediti o kojem se tipu podataka radi (ulazni, izlazni, test...,greška). U središnjem prozoru izaberu se željeni podaci koji se očitavaju iz *workspace*-a. Pritiskom na *Import* potvrđuje se ispravnost podataka. Promene će se videti i u glavnom prozoru *nttool*-a.

Sledi izbor vrste neuronske mreže. Odabira se opciju *New...* Otvara se prozor koji izgleda kao na slici 116

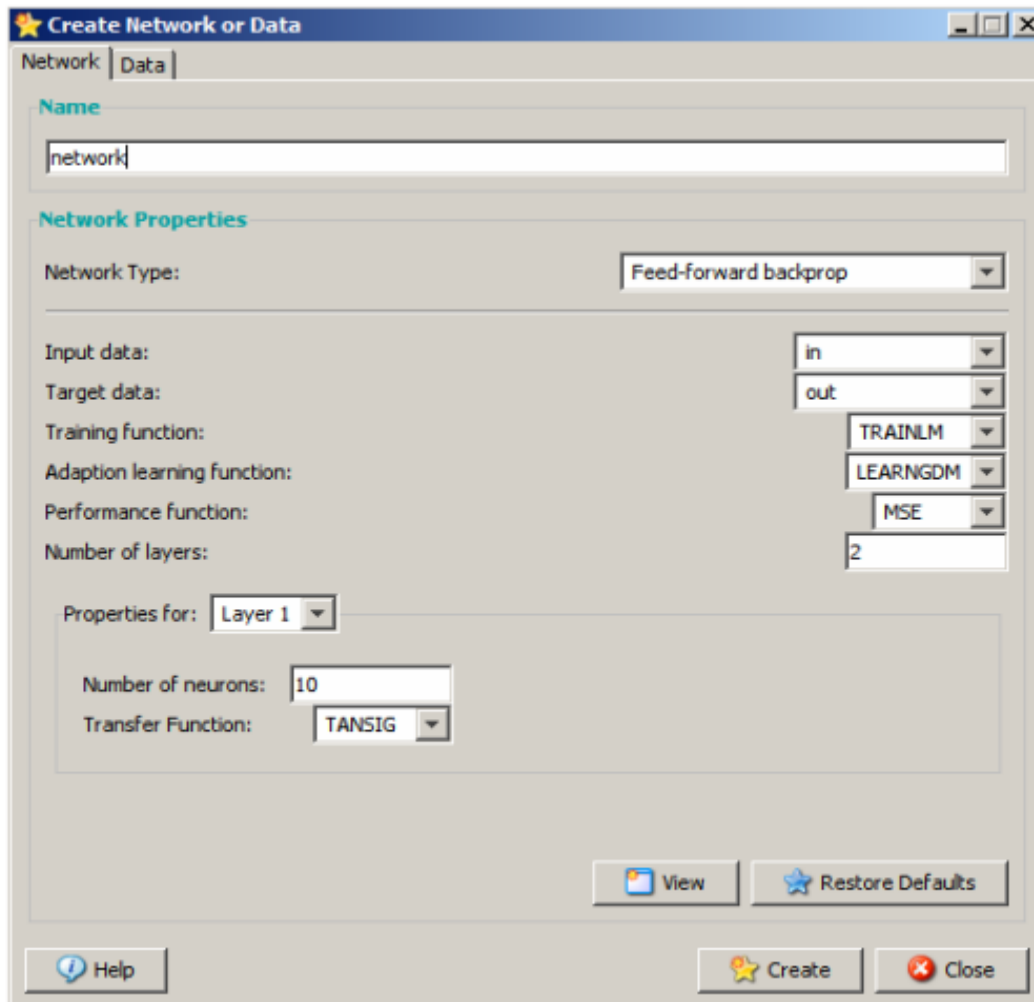


Slika 116. Izbor neuronske mreže

U ovom prozoru se bira vrsta neuronske mreže. Zavisno od vrste mreže izgled prozora se menja. Karakteristična polja su ime mreže, ulazni raspon, trenirajuća funkcija, funkcija učenja, transfer funkcija. Izabrana je feed-forward, backpropagation mreža.

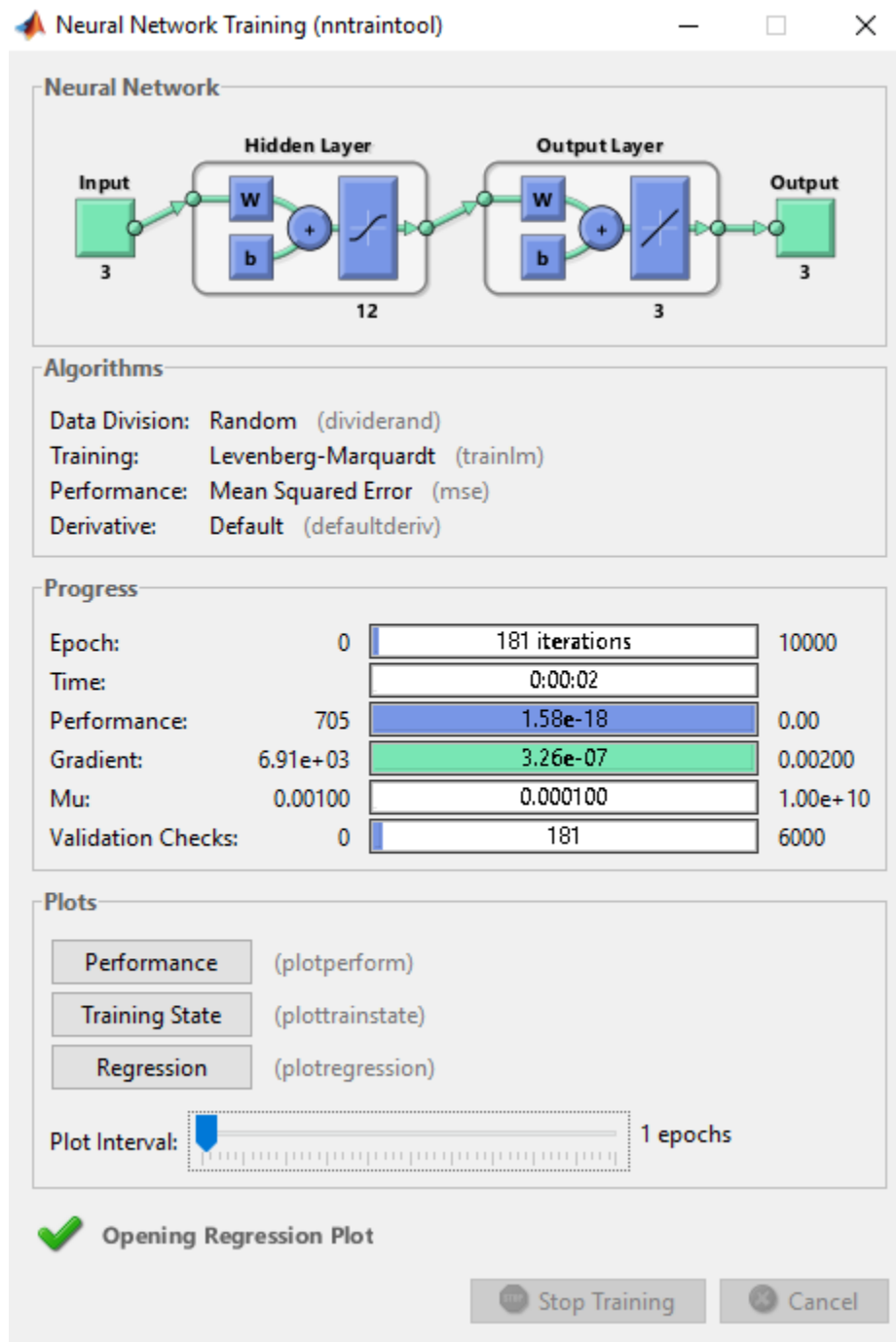
Ova mreža je izuzetno pogodna za primenu zbog svoje strukture i načina obuke. Vrlo je efikasna i u kratkom vremenu daje željene rezultate. Korišćene su sledeće funkcije i setovi metoda

za obuku: 1. *Training Function* - TRAINLM 2. *Adaption Learning Funkcion* - primenjena je *LEARNGDM* funkcija učenja za backpropagation/bias 3. *Performance* - (primenjena je srednja kvadratna vrednost greške, *Mean Square Error MSE*) 4. *Transfer Function* - odabrana mreža ima sakriveni sloj koji ima deset neurona i aktivaciona funkcija je *TANSIG*. Izlazni sloj ima dva neurona i *PURELIN* aktivacionu funkciju slika 117. Tansig je sigmoidna a purelin linearna funkcija.



Slika 117. Izbor algoritma i funkcije neuronske mreže

Nakon što su namešteni parametri na željene vrednosti, pritiskom na *Create* potvrđuju se vrednosti i formira se neuronska mreža. Na slici 118. se nalazi prozor kreirane neuronske mreže.



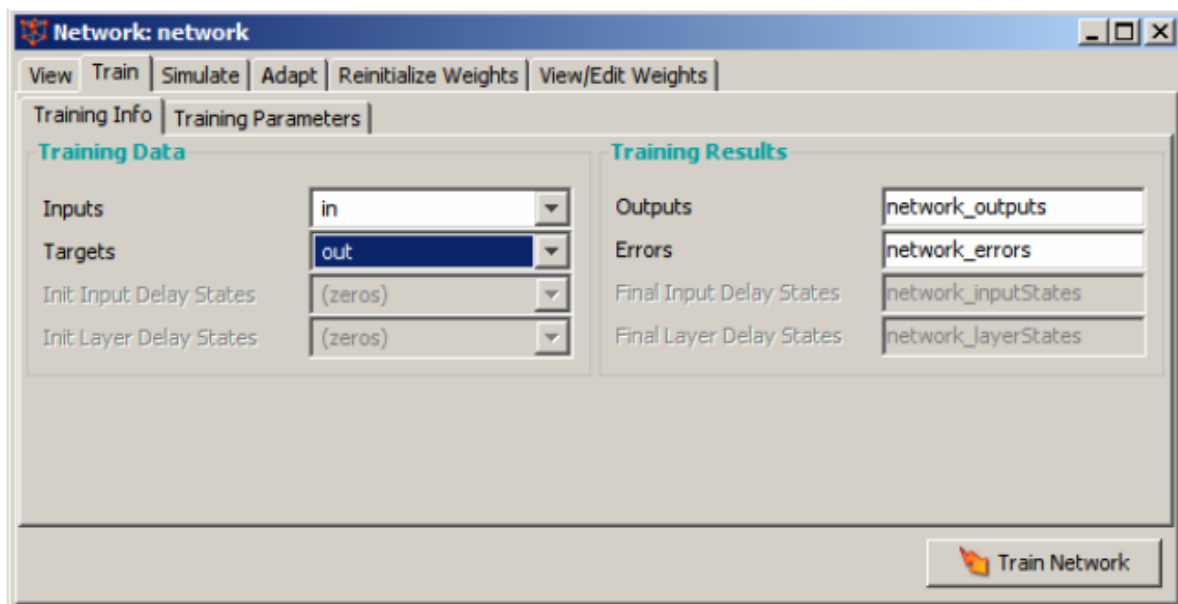
Slika 118. Prozor kreirane neuronske mreže

Tabela 67. Parametri formirane veštačke neuronske mreže

Parametar mreže		Usvojeno obeležje ANN
Trening funkcija		TRAINLM
Funkcija učenja		LEARNGDM
Funkcija performansi n/m		MSE
Broj slojeva		2
Broj neurona	I sloj (skriveni)	12
	II sloj (izlazni)	3
Transfer funkcija	I sloj	TRANSIG
	II sloj	PURRELIN
Broj epoha		10000

### 6.3. Treniranje i testiranje neuronske mreže

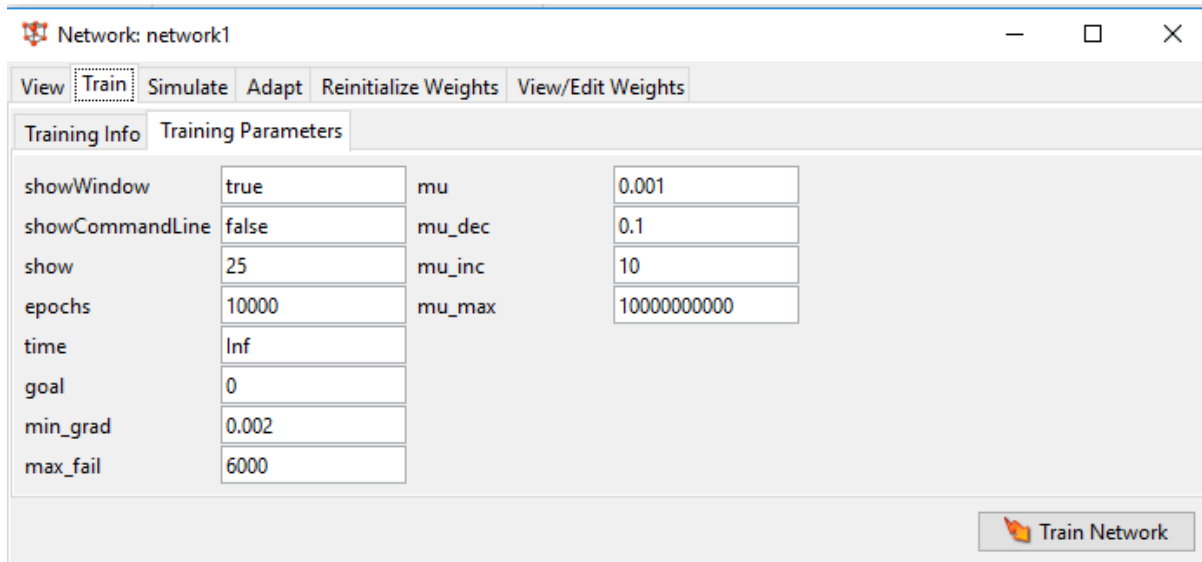
Nakon kreiranja neuronske mreže prelazi se na treniranje mreže i simulacija. Za treniranje mreže potrebno je uneti ulazne veličine i željeni izlaz. Takođe moguće je definisati izlazne varijable u koje će se zapisivati vrednosti izlaza, odnosno greške za vreme treniranje (slika 119.).



Slika 119. Trening neuronske mreže

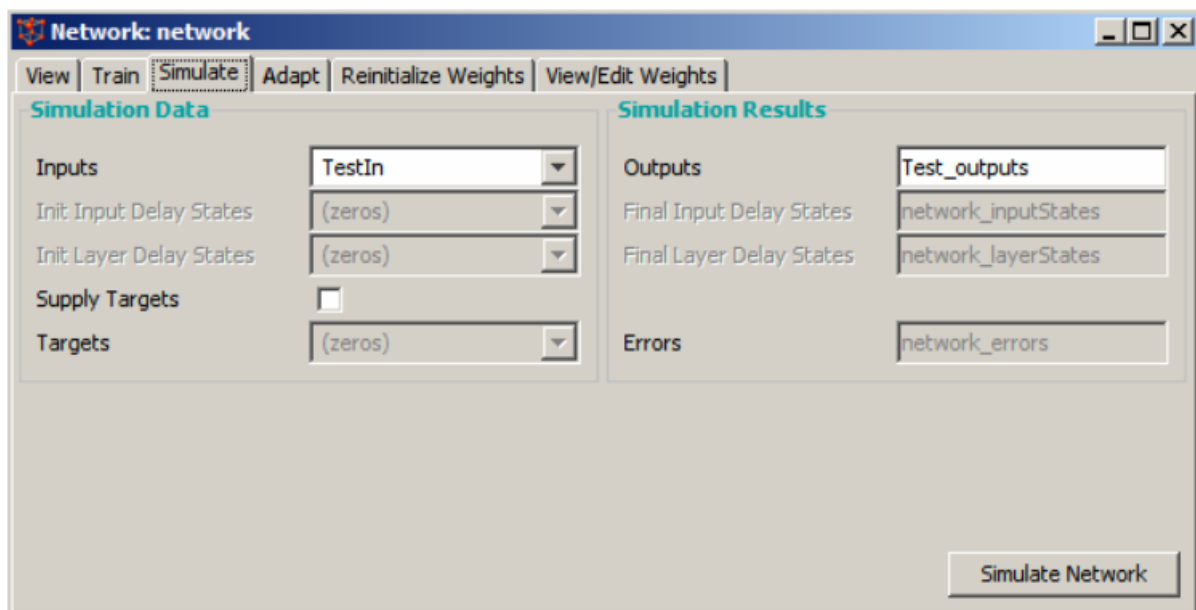
Dodatno je potrebno podesiti *Training Parameters* (slika 120.). Tu se vrši podešavanje broj epoha, dozvoljena greška, vreme učenja, i slično. Zavisno od vrste mreže parametri treniranja su

različiti. Pritiskom na *Train Network* mreža se trenira. Kao rezultat dobijaju se grafici koji pokazuju učenje neuronske mreže kroz zadani broj epoha.



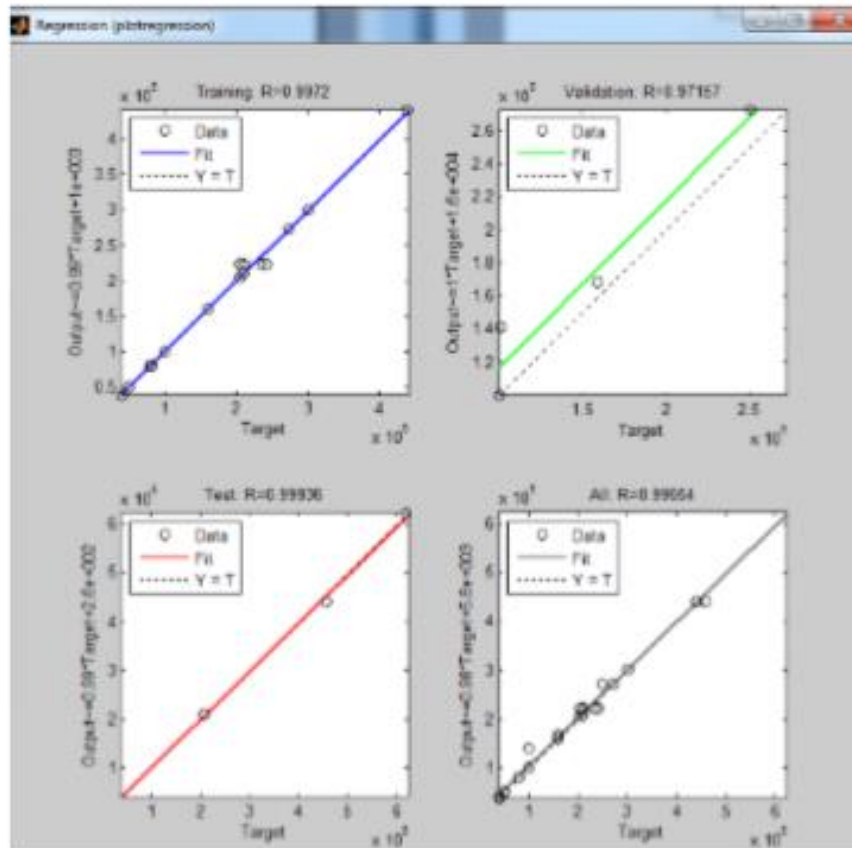
Slika 120. Podešavanje parametara treninga neuronske mreže

Završetkom treniranja mreže može se obaviti simulaciju rada neuronske mreže. Potrebno je definisati ulaze (TestIn) za mrežu. Pritiskom na Simulate Network (slika 121.) obavlja se simulacija. Pregledom dobivenih rezultata (Test\_outputs) koji se generiše u nntoolu (slika 122.), proverava se ispravnost rada mreže.



Slika 121. Simuliranje (Testiranje) neuronske mreže

Vreme trajanje treniranja mreže određuje sam kreator mreže, na osnovu iskustva. Slika 122. prikazuje dijagram regresije u procesu obuke neuronske mreže, gde se kao cilj postavlja da koeficijent regresije bude vrednost bliska broju 1 (jedan), linije regresije treba da budu pod uglom od  $45^\circ$  dok većina podataka i sa kojima se obučava neuronska mreža treba da budu uz samu liniju regresije.



Slika 122. Dijagram regresije u procesu obuke neuronske mreže

#### 6.4. Prikaz rezultata modelovanja veštačkim neuronskim mrežama

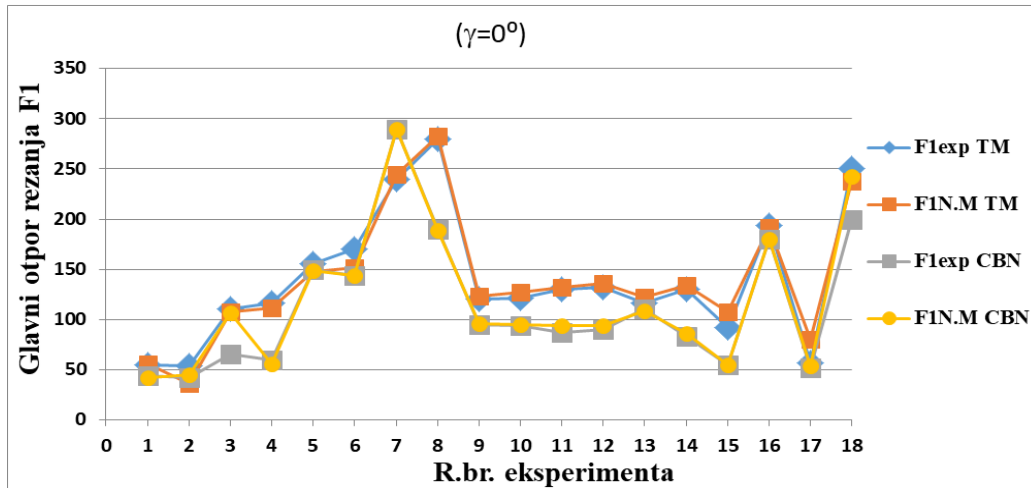
Pre početka postupka modelovanja pomoću veštačkih neuronskih mreža dvadeset četiri vrednosti dobijene eksperimentalnim merenjima prema centralnom kompozicionom planu eksperimenta podeljeno je tako da je prvih osamnaest eksperimentalnih vrednosti korišćeno za obučavanje veštačke neuronske mreže, a ostalih šest vrednosti je poslužilo kao test podaci za određenu neuronsku mrežu.

Rezultati obrade podataka za izlazne parametre procesa rezanja: komponente otpora rezanja ( $F_1, F_2, F_3$ ), temperaturu rezanja ( $Q$ ) i parametre hrapavosti ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ), na osnovu ulaznih parametara elemenata režima rezanja ( $v, s, a$ ), dobijene primenom metodologije modelovanja pomoću veštačkih neuronskih mreža, dati su u tabelama 68. do 84. Mogu su uočiti neznatna odstupanja modelovanih od eksperimentalnih vrednosti na osnovu procentualne greške odstupanja  $E$ . U tabelama za prikazane vrednosti za uslove pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN, za dva slučaja kada je geometrija reznog alata bila pozitivna ( $\gamma = 0^\circ, \alpha = 7^\circ, \lambda = -6^\circ$ ) i u drugom slučaju kada je geometrija reznog alata bila negativna ( $\gamma = -6^\circ, \alpha = 6^\circ, \lambda = -6^\circ$ ).

Tabela 68. Rezultati za glavni otpor rezanja  $F_1$  dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom  $E$  i reznim pločicama od TM i CBN kao i reznom geometrijom ( $\gamma = 0^\circ, \alpha = 7^\circ, \lambda = -6^\circ$ )

<i>Red. br</i>	$F_{1exp} (N)$ (TM)	$F_{1NM} (N)$ (TM)	$E (%)$ (TM)	$F_{1exp} (N)$ (CBN)	$F_{1NM} (N)$ (CBN)	$E (%)$ (CBN)
1.	55	55.31039	0.56	44	41.9205	4.73
2.	54	36.36002	32.66	42	44.37661	5.66
3.	116	111.4243	3.94	65	106.4602	63.78
4.	110	107.3229	2.43	60	55.5582	7.40
5.	170	151.2473	11.03	150	149.0162	0.66
6.	155	147.1689	5.05	144	143.4251	0.40
7.	280	282.6411	0.94	290	289.8712	0.04
8.	240	244.9423	2.05	190	189.0424	0.50
9.	120	122.7528	2.29	95	95.41357	0.44
10.	121	127.281	5.19	94	94.83112	0.88
11.	130	131.6411	1.26	87	94.26239	8.35
12.	132	135.7665	2.85	90	93.71062	4.12
13.	116	122.3077	5.43	110	108.8006	1.09
14.	130	133.9419	3.03	83	86.21077	3.87
15.	92	107.8689	17.24	55	54.7084	0.53
16.	194	191.4469	1.31	180	179.9016	0.05
17.	57	79.66412	39.76	52	53.7754	3.41
18.	250	237.6639	4.93	200	243.0029	21.50
Prosečna greška			<b>7.55</b>	Prosečna greška		<b>7.07</b>

Na osnovu tabele 68. dobijen je grafički prikaz na slici 123. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za materijal alata TM i CBN za glavni otpor rezanja  $F_1$ .



Slika 123. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za glavni otpor rezanja  $F_1$

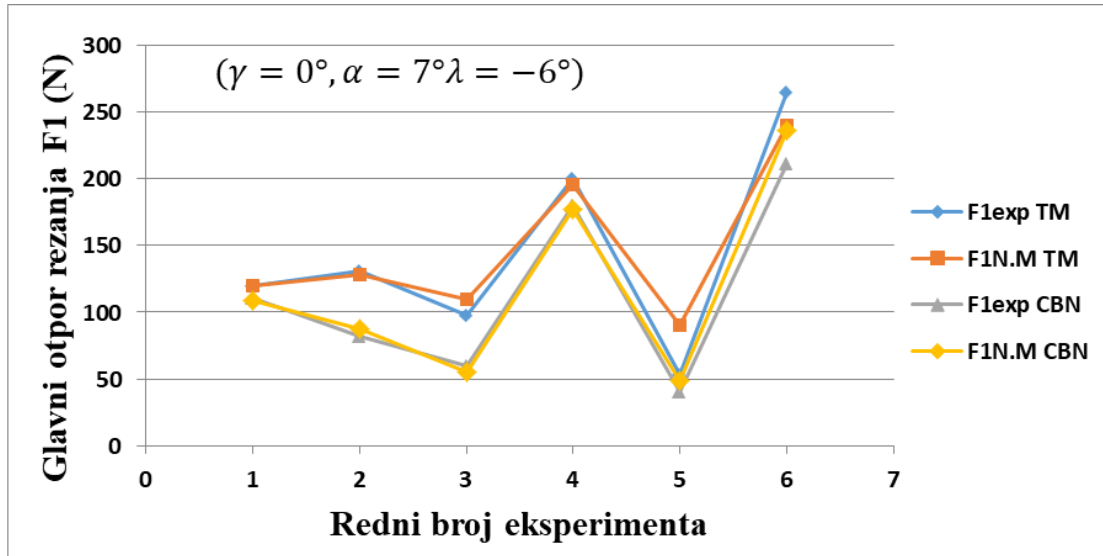
U tabeli 69. su prikazani rezultati testiranja neuronske mreže pomoću 6 izdvojenih eksperimenata za materijale alata TM i CBN, kao i procentualna greška E odstupanja merenih vrednosti od modelskih za glavni otpor rezanja  $F_1$   $\gamma = 0^\circ$ .

Tabela 69. Rezultati testiranja neuronske mreže pomoću izdvojenih 6 eksperimenata za TM i CBN kao i procentualna greška odstupanja merenih vrednosti od modelskih E, za glavni otpor rezanja  $F_1$

Red. br	$F_{1exp}$ (N) (TM)	$F_{1NM}$ (N) (TM)	$E$ (%) (TM)	$F_{1exp}$ (N) (CBN)	$F_{1NM}$ (N) (CBN)	$E$ (%) (CBN)
1 (19)	120	119.988	0.01	111	108.995	1.84
2 (20)	131	128.091	2.27	82	87.8017	6.61
3 (21)	98	110.1438	11.03	60	55.0408	9.01
4 (22)	200	195.6490	2.22	180	176.743	1.84
5 (23)	53	90.18434	41.23	40	48.6581	17.79
6 (24)	265	239.9502	10.44	211	236.697	10.86
Prosečna greška			<b>11.20</b>	Prosečna greška		<b>7.99</b>

Na osnovu tabele 69. dobija se dijagram kao na slici 124. za glavni otpor rezanja  $F_1$  za materijal alata TM i CBN.



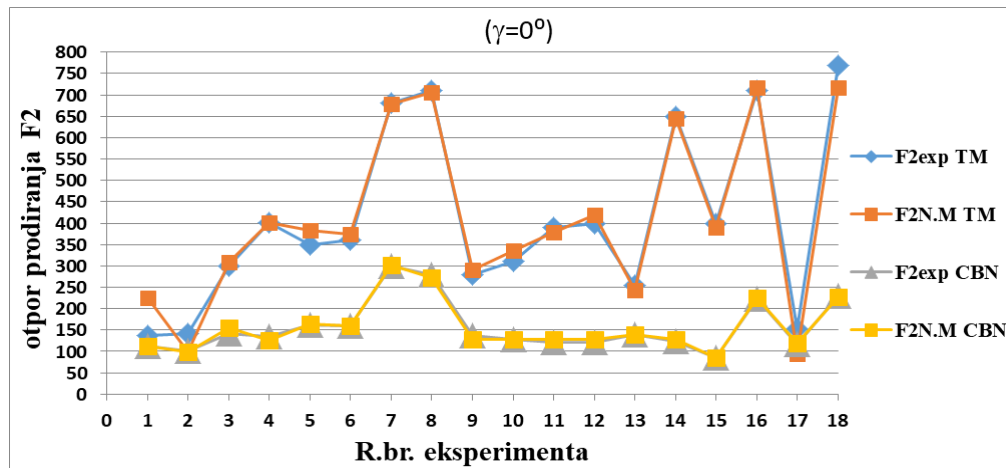


Slika 124. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za testiranje neuronske mreže za glavni otpor rezanja  $F_1$

Tabela 70. Rezultati za otpor prodiranja  $F_2$  dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom  $E$  pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. br	$F_{2exp} (N)$ (TM)	$F_2 (N)$ NM (TM)	$E (%)$ (TM)	$F_{2exp} (N)$ (CBN)	$F_2 (N)$ NM (CBN)	$E (%)$ (CBN)
1.	141	97.92707	30.55	101	98.54648	1.138992
2.	138	224.4992	62.68	112	113.2904	2.489712
3.	300	308.3765	2.79	141	155.7651	9.479088
4.	401	400.0951	0.23	134	125.6108	6.678751
5.	350	383.8323	9.67	162	164.0962	1.277398
6.	360	373.2048	3.67	160	159.4651	0.335403
7.	710	705.7636	0.60	300	301.0019	0.33286
8.	680	679.355	0.09	280	272.8743	2.611334
9.	280	290.8577	3.88	138	129.2982	6.730062
10.	310	334.8081	8.00	129	128.5408	0.357218
11.	390	377.4723	3.21	121	127.7899	5.313367
12.	400	418.2256	4.56	121	127.049	4.761185
13.	255	244.0036	4.31	140	139.0572	0.678004
14.	650	645.6134	0.67	124	128.0277	3.14598
15.	398	390.84	1.80	85	84.53636	0.548451
16.	710	717.5464	1.06	224	224.2079	0.092726
17.	152	93.72123	38.34	118	118.4522	0.381722
18.	770	715.9772	7.02	230	226.9178	1.358268
Prosečna greška			<b>10.17</b>	Prosečna greška		<b>2.65</b>

Na osnovu tabele 70. dobijen je dijagram za otpor prodiranja  $F_2$ , odstupanja merenih od modelovanih vrednosti prikazan na slici 124. za materijal alata TM i CBN.

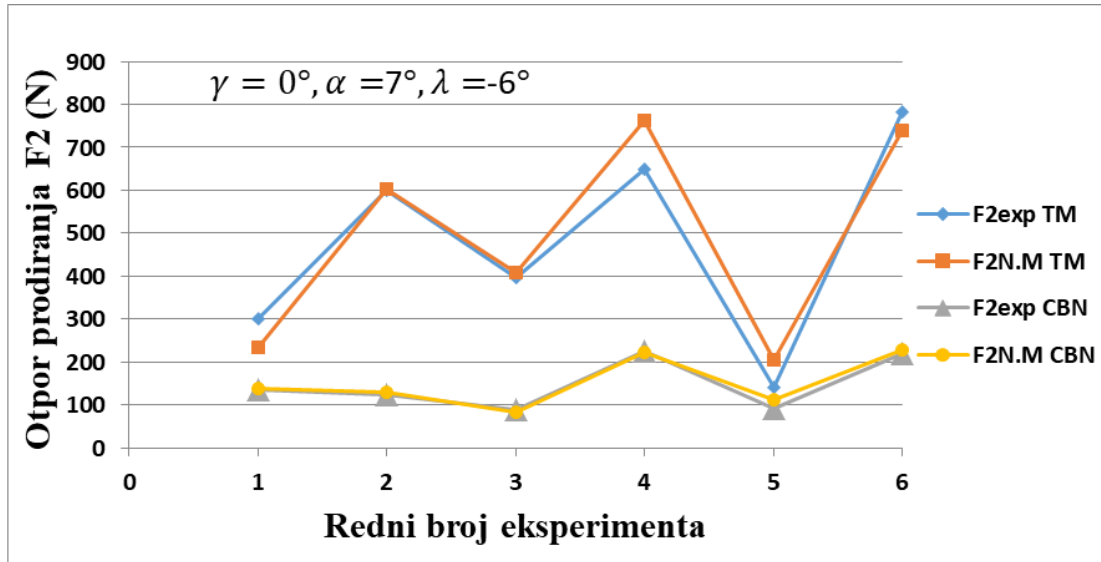


Slika 124. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za otpor prodiranja  $F_2$

Tabela 71. Rezultati za šest eksperimenata koji su korišćeni za testiranje neuronske mreže sa procentualnom greškom  $E$  pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), a za otpor prodiranja  $F_2$

<i>Red. br</i>	$F_{2exp} (N)$ (TM)	$F_2 (N) NM$ (TM)	$E (%)$ (TM)	$F_{2exp}(N)$ (CBN)	$F_2 (N) NM$ (CBN)	$E (%)$ (CBN)
1 (19)	300	233.3595	2.64	136	139.6932	2.715584
2 (20)	600	601.9701	4.86	124	130.341	5.113746
3 (21)	398	408.2178	5.75	89	84.16286	5.434991
4 (22)	650	761.3834	0.90	224	221.9983	0.893636
5 (23)	141	203.9477	18.66	91	111.8828	22.94816
6 (24)	784	738.8515	4.03	220	229.2408	4.200355
Prosečna greška			<b>13.83</b>	Prosečna greška		<b>6.14</b>

Na osnovu tabele 71. dobijen je dijagram na slici 125. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za materijal alata TM i CBN, a za otpor prodiranja  $F_2$ .

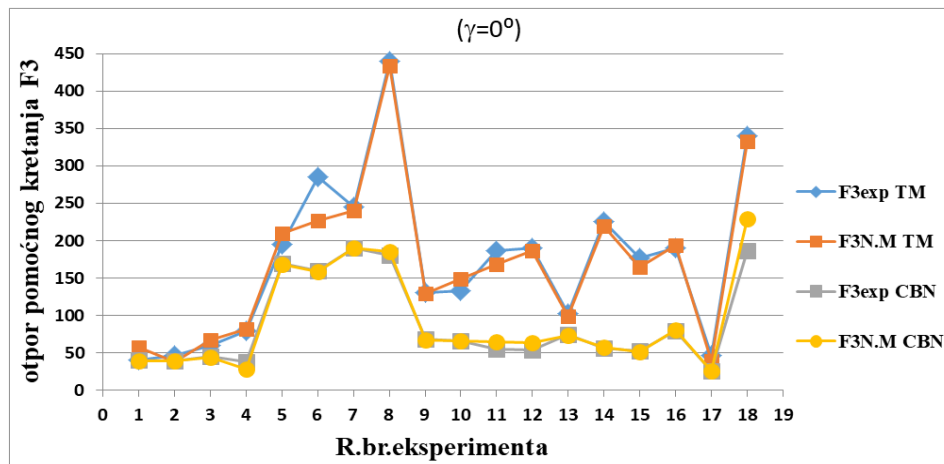


Slika 125. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za testiranje neuronske mreže za otpor prodiranja  $F_2$

Tabela 72. Rezultati za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$  dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. br	$F_{3exp}$ (N) (TM)	$F_3$ (N) NM (TM)	E (%) (TM)	$F_{3exp}$ (N) (CBN)	$F_3$ (N) NM (CBN)	E (%) (CBN)
1.	46	37.58321	18.30	40	39.47967	1.30
2.	41	57.04231	39.13	39	39.34585	0.89
3.	60	67.6128	12.69	45	44.08218	2.04
4.	80	81.96712	2.46	38	28.6704	24.55
5.	285	226.9315	20.37	170	168.7984	0.71
6.	195	209.961	7.67	160	159.1523	0.53
7.	440	434.1362	1.33	190	190.1332	0.07
8.	245	239.7481	2.14	180	185.1579	2.87
9.	130	129.0151	0.76	68	67.37873	0.91
10.	133	148.889	11.95	66	65.95757	0.06
11.	186	168.0707	9.64	55	64.54151	17.35
12.	190	186.2755	1.96	54	63.13656	16.92
13.	102	98.53795	3.39	74	73.77915	0.30
14.	225	220.0428	2.20	56	57.72469	3.08
15.	177	164.1982	7.23	52	51.59824	0.77
16.	190	193.3858	1.78	80	80.06217	0.08
17.	46	38.93081	15.37	26	26.25509	0.98
18.	340	332.2944	2.27	186	228.6869	22.95
Prosečna greška			<b>8.92</b>			<b>5.35</b>

Na osnovu tabele 72. dobija se dijagram prikazan na slici 126. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$ , za materijal alata TM i CBN.



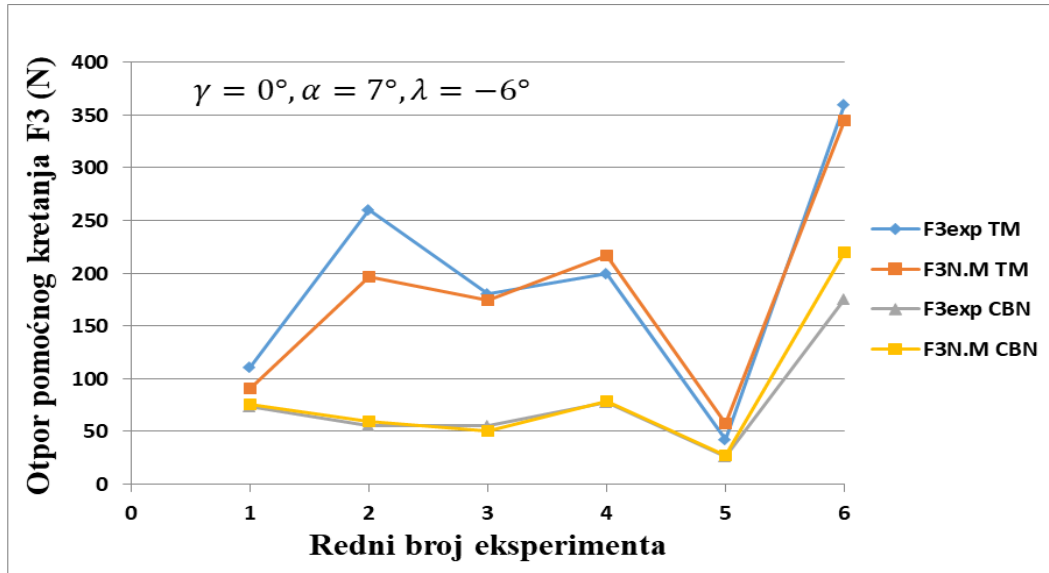
Slika 126. Grafički prikaz dobijenih vrednosti za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$

U tabeli 73. su prikazani rezultati testiranja neuronske mreže pomoću 6 izdvojenih eksperimenata, kao i procentualna greška E odstupanja merenih vrednosti od modelskih za TM i CBN i otpor pomoćnog kretanja  $F_3$ .

Tabela 73. Rezultati za šest eksperimenata koji su korišćeni za testiranje neuronske mreže sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$

<i>Red. br</i>	$F_{3exp} (N)$ (TM)	$F_3 (N) NM$ (TM)	$E (%)$ (TM)	$F_{3exp}(N)$ (CBN)	$F_3 (N) NM$ (CBN)	$E (%)$ (CBN)
1 (19)	111	90.5103	22.64	74	75.7857	2.36
2 (20)	260	196.6646	32.20	55	59.2977	7.25
3 (21)	180	174.6578	3.06	55	50.5378	8.83
4 (22)	200	216.9532	7.81	78	78.8131	1.03
5 (23)	42	57.1989	3.50	26	26.9416	3.50
6 (24)	360	344.5776	20.41	175	219.8854	20.41
Prosečna greška			<b>16.13</b>	Prosečna greška		<b>7.23</b>

Na osnovu tabele 73. nacrtan je dijagram na slici 127. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$ , za materijal alata TM i CBN.

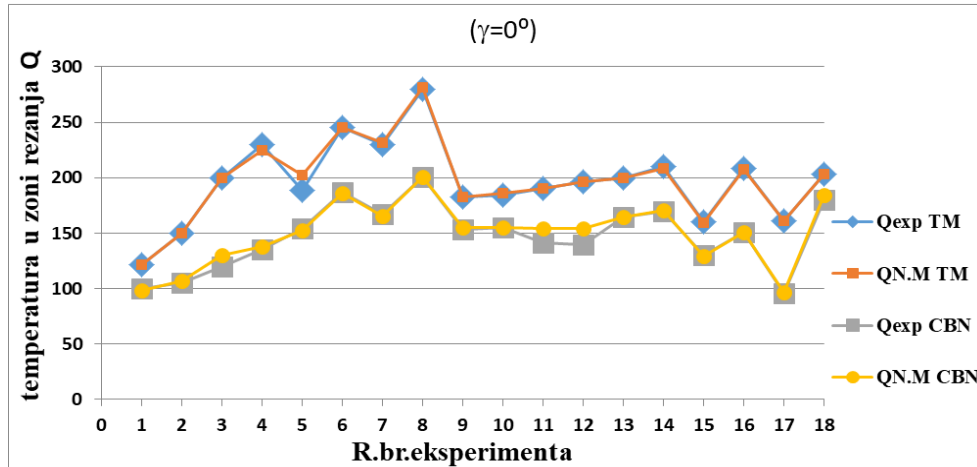


Slika 127. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za testiranje neuronske mreže za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$

Tabela 74. Rezultati za temperaturu u zoni rezanja ( $Q$ ) dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom  $E$  pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. br	$Q_{exp}$ ( $^\circ\text{C}$ ) (TM)	$Q$ NM ( $^\circ\text{C}$ ) (TM)	$E$ (%) (TM)	$Q_{3exp}$ ( $^\circ\text{C}$ ) (CBN)	$Q$ ( $^\circ\text{C}$ ) NM (CBN)	$E$ (%) (CBN)
1.	122	121.8646	0.11	100	98.26879	1.73
2.	150	149.9924	0.01	105	106.9995	1.90
3.	200	200.0113	0.01	120	129.968	8.31
4.	230	224.7395	2.29	135	137.8956	2.14
5.	189	202.051	6.91	154	152.4453	1.01
6.	245	244.9548	0.02	187	186.333	0.36
7.	230	231.3103	0.57	167	165.3572	0.98
8.	280	281.7381	0.62	201	200.7621	0.12
9.	183	182.9698	0.02	153	155.4367	1.59
10.	184	185.7457	0.95	155	154.9115	0.06
11.	190	190.0033	0.00	141	154.3875	9.49
12.	196	195.9605	0.02	140	153.8666	9.90
13.	200	200.0043	0.00	165	164.1941	0.49
14.	210	208.1916	0.86	170	170.3673	0.22
15.	160	159.835	0.10	130	129.3935	0.47
16.	208	207.9131	0.04	151	150.9593	0.03
17.	161	160.7278	0.17	96	97.00845	1.05
18.	203	203.0836	0.04	180	184.2621	2.37
Prosečna greška			<b>0.70</b>	Prosečna greška		<b>2.35</b>

Na osnovu tabele 74. dobija se dijagram na slici 128. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za TM i CBN, a za temperaturu u zoni rezanja Q.



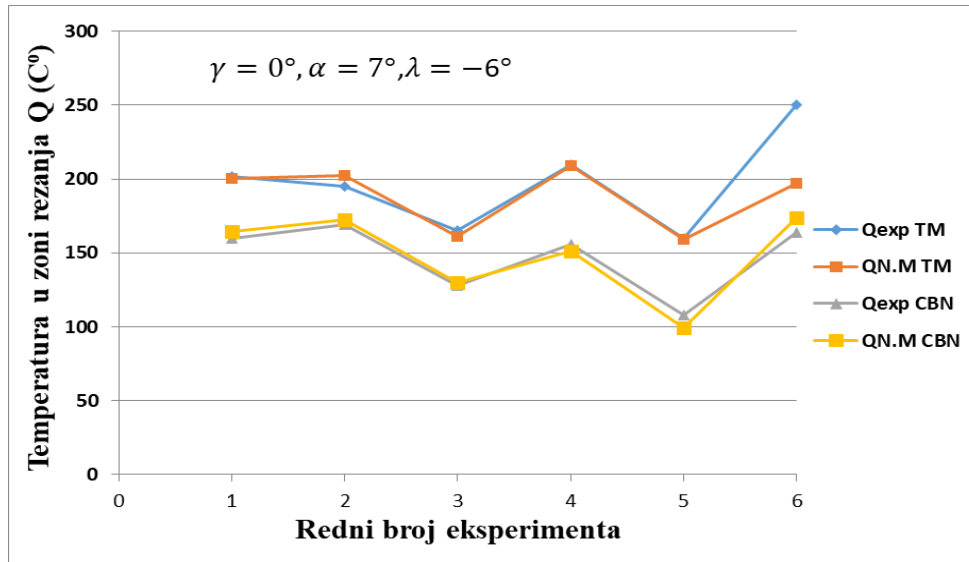
Slika 128. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za temperaturu u zoni rezanja Q

U tabeli 75. su prikazani rezultati testiranja neuronske mreže (NM) pomoću 6 izdvojenih eksperimenata za materijal alata TM i CBN kao i procentualna greška odstupanja merenih vrednosti od modelskih E za temperaturu u zoni rezanja Q.

Tabela 75. Rezultati testiranja neuronske mreže pomoću 6 izdvojenih eksperimenata za TM i CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) kao i procentualna greška odstupanja merenih vrednosti od modelskih za temperaturu u zoni rezanja (Q)

Red. br	$Q_{exp}$ (°C) (TM)	$Q_{NM}$ (°C) (TM)	$E$ (%) (TM)	$Q_{3exp}$ (°C) (CBN)	$Q$ (°C) NM (CBN)	$E$ (%) (CBN)
1 (19)	202	200.2837	0.86	160	164.4949	2.73
2 (20)	195	202.4957	3.70	169	172.4433	2.00
3 (21)	165	161.0287	2.47	128	129.756	1.35
4 (22)	210	209.0674	0.45	156	151.061	3.27
5 (23)	160	158.9695	9.00	108	99.0862	9.00
6 (24)	250	196.8551	5.51	164	173.5572	5.51
Prosečna greška			<b>5.85</b>	Prosečna greška		<b>3.98</b>

Na osnovu tabele 75. dobija se dijagram na slici 129. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za temperaturu u zoni rezanja Q, za materijal alata TM i CBN.

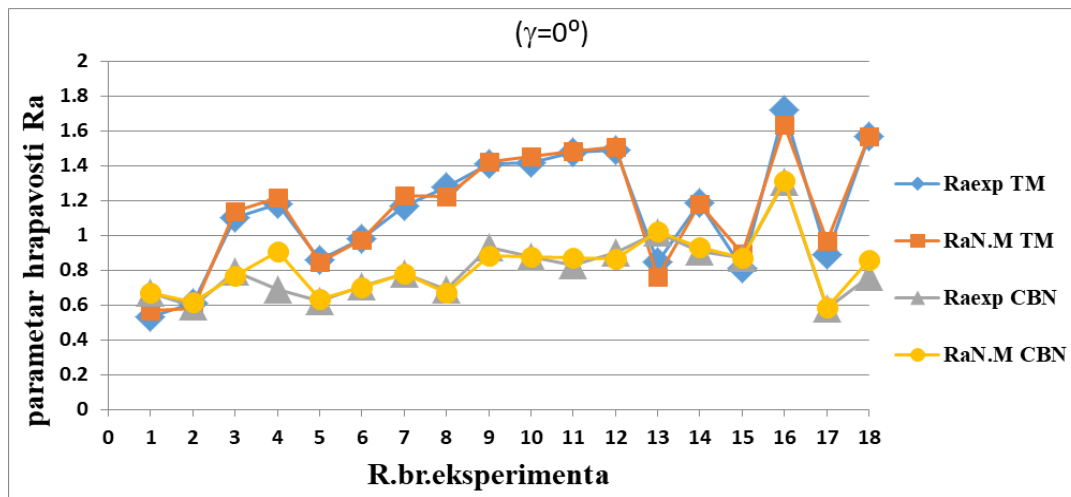


Slika 129. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za testiranje neuronske mreže za temperaturu u zoni rezanja  $Q$

Tabela 76. Rezultati dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom  $E$  pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za srednju aritmetičku hrapavost ( $R_a$ )

Red. br	$R_{aexp}$ ( $\mu m$ ) (TM)	$R_a$ ( $\mu m$ ) NM (TM)	$E$ (%) (TM)	$R_{aexp}$ ( $\mu m$ ) (CBN)	$R_a$ ( $\mu m$ ) NM (CBN)	$E$ (%) (CBN)
1.	0.61	0.5826	4.49	0.67	0.669404	0.09
2.	0.53	0.5673	7.04	0.59	0.616789	4.54
3.	1.18	1.2144	2.92	0.79	0.768907	2.67
4.	1.1	1.1372	3.38	0.69	0.908506	31.67
5.	0.86	0.8479	1.40	0.62	0.635286	2.47
6.	0.98	0.9742	0.58	0.71	0.702337	1.08
7.	1.28	1.2231	4.44	0.78	0.778116	0.24
8.	1.17	1.2267	4.85	0.69	0.668135	3.17
9.	1.41	1.4220	0.85	0.93	0.882705	5.09
10.	1.42	1.4536	2.37	0.88	0.876793	0.36
11.	1.48	1.4823	0.16	0.83	0.870989	4.94
12.	1.49	1.5078	1.20	0.9	0.86532	3.85
13.	1.19	1.1834	0.55	1.02	1.021924	0.19
14.	0.85	0.7636	10.16	0.91	0.931195	2.33
15.	0.81	0.8979	10.85	0.87	0.868701	0.15
16.	1.72	1.6367	4.84	1.31	1.31268	0.20
17.	0.89	0.9675	8.72	0.58	0.585733	0.99
18.	1.57	1.5682	0.11	0.76	0.86198	13.42
Prosečna greška			<b>3.82</b>	Prosečna greška		<b>4.30</b>

Na osnovu tabele 76. dobija se dijagram na slici 130. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$ , za materijal alata TM i CBN.



Slika 130. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$

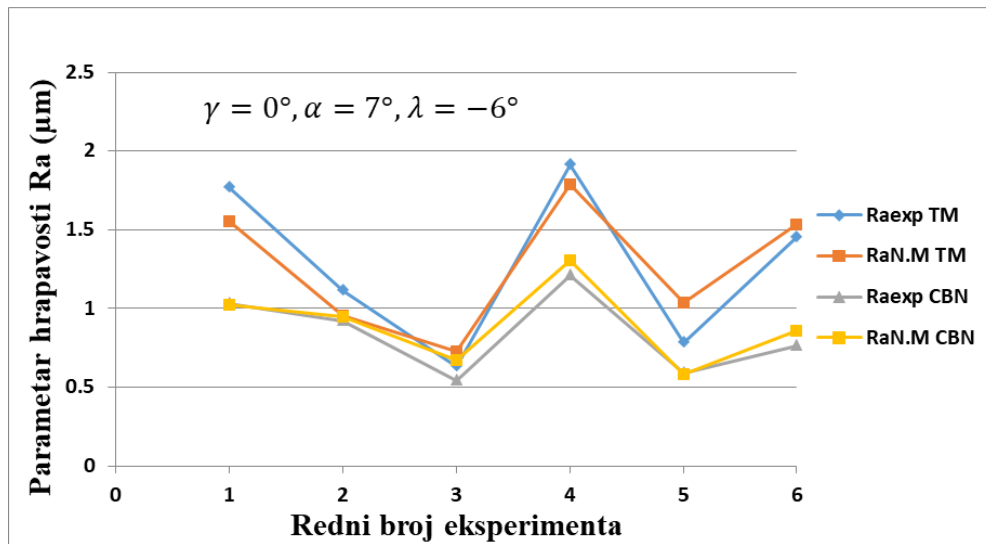
Tabela 77. Rezultati za šest eksperimenata koji su korišteni za testiranje neuronske mreže sa procentualnom greškom E, pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$ .

Red. br	$R_{aexp} (\mu m)$ (TM)	$R_a (\mu m)$ NM (TM)	E (%) (TM)	$R_{aexp} (\mu m)$ (CBN)	$R_a (\mu m)$ NM (CBN)	E (%) (CBN)
1 (19)	1.77	1.5522	14.03	1.03	1.022	0.75
2 (20)	1.11	0.9557	16.14	0.92	0.9461	2.76
3 (21)	0.63	0.7247	13.08	0.54	0.6721	19.65
4 (22)	1.91	1.7878	6.83	1.21	1.3070	7.42
5 (23)	0.78	1.0372	24.80	0.59	0.5851	0.85
6 (24)	1.45	1.5323	5.37	0.76	0.8574	11.36
Prosečna greška			<b>13.38</b>	Prosečna greška		<b>7.13</b>

Na osnovu tabele 77. dobija se dijagram na slici 131. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$  za materijal alata TM i CBN.

U tabeli 76. su prikazani rezultati dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za parametar hrapavosti ( $R_{tm}$ )



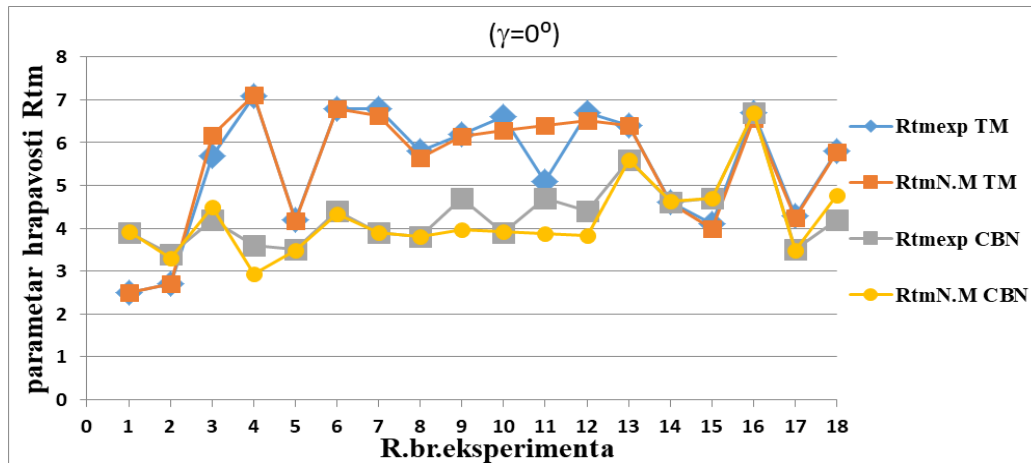


Slika 131. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za testiranje neuronske mreže za srednju aritmetičku hrapavost  $Ra$

Tabela 78. Rezultati dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom  $E$  pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = 0^\circ, \alpha = 7^\circ, \lambda = -6^\circ$ ) za maksimalnu hrapavost ( $R_{tm}$ )

Red. br	$R_{tmexp}$ ( $\mu\text{m}$ ) (TM)	$R_{tm}(\mu\text{m})$ NM (TM)	$E$ (%) (TM)	$R_{tmexp}(\mu\text{m})$ (CBN)	$R_{tm}(\mu\text{m})$ NM (CBN)	$E$ (%) (CBN)
1.	2.7	2.71169	0.43	3.9	3.9250	0.64
2.	2.5	2.50770	0.31	3.4	3.2999	2.94
3.	7.1	7.10367	0.05	4.2	4.4901	6.91
4.	5.7	6.18077	8.43	3.6	2.9274	18.68
5.	4.2	4.17820	0.52	3.5	3.4790	0.60
6.	6.8	6.79775	0.03	4.4	4.3468	1.21
7.	6.8	6.63025	2.50	3.9	3.8940	0.15
8.	5.8	5.64570	2.66	3.8	3.8180	0.47
9.	6.2	6.15761	0.68	4.7	3.9597	15.75
10.	6.6	6.28547	4.77	3.9	3.9147	0.38
11.	5.1	6.40161	25.52	4.7	3.8716	17.62
12.	6.7	6.50449	2.92	4.4	3.8309	12.93
13.	6.4	6.39495	0.08	5.6	5.6070	0.13
14.	4.6	4.58736	0.27	4.6	4.63908	0.85
15.	4.1	3.99567	2.54	4.7	4.7078	0.17
16.	6.7	6.56734	1.98	6.7	6.6933	0.10
17.	4.3	4.23701	1.46	3.5	3.4854	0.42
18.	5.8	5.78910	0.19	4.2	4.7684	13.53
Prosečna greška			<b>3.08</b>	Prosečna greška		<b>5.19</b>

Na osnovu tabele 78. dobija se dijagram na slici 132. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$



Slika 132. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$

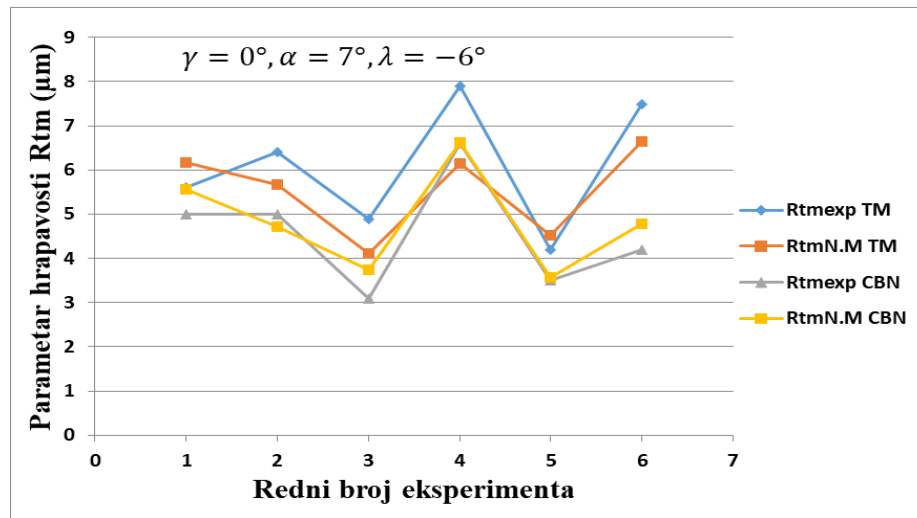
U tabeli 79 su prikazani rezultati testiranja neuronske mreže (NM) pomoću 6 izdvojenih eksperimenata za TM i CBN kao i procentualna greška odstupanja merenih vrednosti od modelskih za maksimalnu hrapavost obrađene površine  $R_{tm}$ .

Tabela 79. Rezultati za 6 eksperimenata koje su korišteni za testiranje neuronske mreže sa procentualnom greškom odstupanja  $E$  pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za maksimalnu hrapavost ( $R_{tm}$ ).

Red. br	$R_{tmexp}$ ( $\mu m$ ) (TM)	$R_{tm}$ ( $\mu m$ ) NM (TM)	$E$ (%) (TM)	$R_{tmexp}$ ( $\mu m$ ) (CBN)	$R_{tm}$ ( $\mu m$ ) NM (CBN)	$E$ (%) (CBN)
1 (19)	5.6	6.1633	9.14	5	5.5707	10.25
2 (20)	6.4	5.6692	12.89	5	4.7089	6.18
3 (21)	4.9	4.1052	19.36	3.1	3.7334	16.97
4 (22)	7.9	6.1407	28.65	6.6	6.6211	0.32
5 (23)	4.2	4.5168	7.01	3.5	3.5764	2.14
6 (24)	7.5	6.6369	13.00	4.2	4.7724	12.00
Prosečna greška			<b>15.01</b>	Prosečna greška		<b>7.97</b>

Na osnovu podataka iz tabele 79. dobijen je dijagram na slici 133. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za parametar hrapavosti ( $R_{tm}$ ) za materijal alata TM i CBN.

U tabeli 80. su prikazani rezultati za glavni otpor rezanja  $F_1$  dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom  $E$  pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

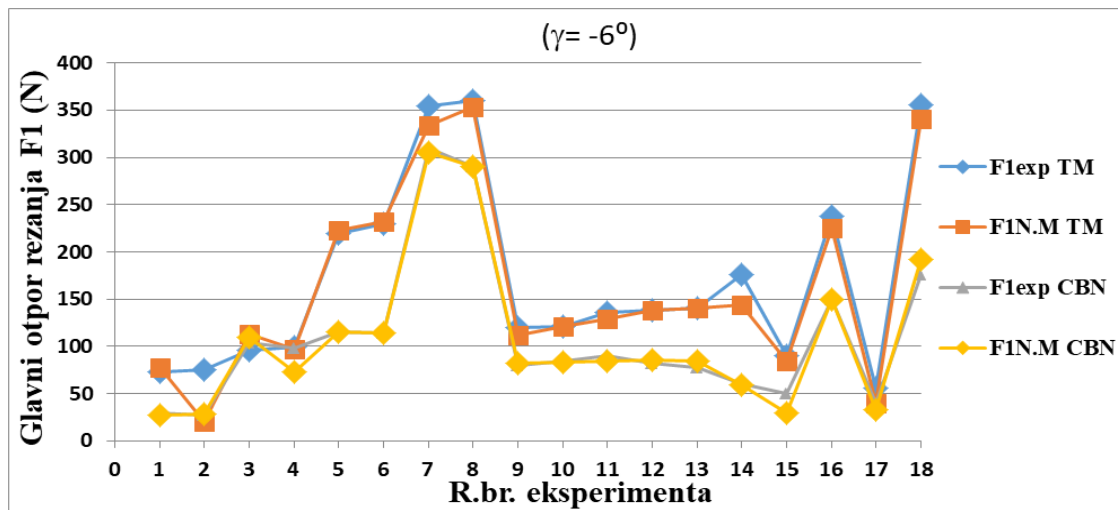


Slika 133. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za testiranje neuronske mreže za parametar hrapavosti ( $R_{tm}$ )

Tabela 80. Rezultati za glavni otpor rezanja  $F_1$  dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. br	$F_{1exp}(N)$ (TM)	$F_1(N)$ NM (TM)	E (%) (TM)	$F_{1exp}(N)$ (CBN)	$F_1(N)$ NM (CBN)	E (%) (CBN)	
1.	75	19.9291	73.42787	29	27.78068	4.20	
2.	73	77.60052	6.302078	27	28.12123	4.15	
3.	96	112.5962	17.28769	104	110.0095	5.78	
4.	99	96.65311	2.370591	98	72.59003	25.93	
5.	220	222.8428	1.292168	115	115.132	0.11	
6.	230	232.4331	1.057855	114	113.8064	0.17	
7.	360	352.8662	1.98161	310	305.5373	1.44	
8.	355	333.4408	6.073011	290	290.4075	0.14	
9.	120	112.2346	6.471135	80	82.39765	3.00	
10.	121	120.6779	0.266189	84	83.49823	0.60	
11.	136	129.1874	5.009251	90	84.62143	5.98	
12.	138	137.6303	0.267928	82	85.75785	4.58	
13.	140	140.4328	0.309109	78	84.00408	7.70	
14.	176	143.7563	18.32026	60	59.33663	1.11	
15.	90	84.34769	6.280341	50	29.84672	40.31	
16.	238	225.7065	5.16533	150	149.7317	0.18	
17.	56	39.98912	28.59085	40	33.04889	17.38	
18.	356	340.4156	4.377628	176	191.9089	9.04	
Prosečna greška			<b>10.26</b>	Prosečna greška			<b>7.32</b>

Na osnovu tabele 80. dobijen je dijagram na slici 134. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za materijal alata TM i CBN, za glavni otpor rezanja  $F_1$ .



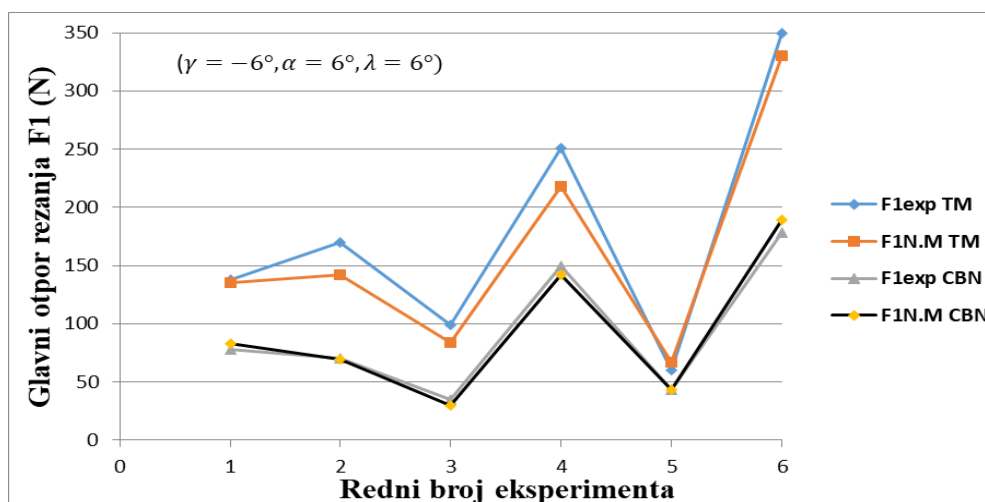
Slika 134. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za glavni otpor rezanja  $F_1$

U tabeli 81. su rezultati dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) za šest eksperimenata koji su korišćeni za testiranje neuronske mreže sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Tabela 81. Glavni otpor rezanja  $F_1$ , dobijen eksperimentalno i preko modela neuronske mreže (NM) za šest eksperimenata koji su korišćeni za testiranje neuronske mreže sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. br	$F_{1exp}$ (N) (TM)	$F_1$ (N) NM (TM)	E (%) (TM)	$F_{1exp}$ (N) (CBN)	$F_1$ (N) NM (CBN)	E (%) (CBN)
1 (19)	138	135.6826	1.71	78	83.2807	6.34
2 (20)	170	141.9240	19.78	70	69.6659	0.48
3 (21)	99	83.4347	18.66	35	29.7407	17.68
4 (22)	251	218.3527	14.95	150	141.6174	5.92
5 (23)	60	66.5958	9.90	43	43.5515	1.27
6 (24)	350	329.8968	6.09	178	189.6642	6.15
Prosečna greška			<b>11.8</b>	Prosečna greška		<b>6.31</b>

Na osnovu tabele 81. dobija se dijagram na slici 135. za materijal alata TM i CBN za glavni otpor rezanja  $F_1$ . U tabela 82. su prikazani rezultati za otpor prodiranja  $F_2$  dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ).

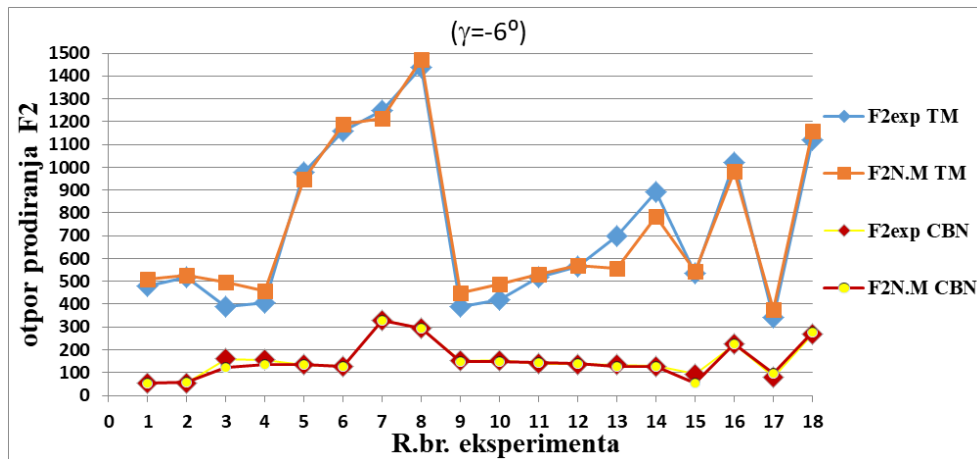


Slika 135. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za testiranje neuronske mreže za glavni otpor rezanja  $F_1$

Tabela 82. Rezultati za otpor prodiranja  $F_2$  dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. br	$F_{2\text{exp}}(N)$ (TM)	$F_2(N)$ NM (TM)	E (%) (TM)	$F_{2\text{exp}}(N)$ (CBN)	$F_2(N)$ NM (CBN)	E (%) (CBN)
1.	520	526.7667	1.30	55	55.50017	0.91
2.	480	508.2642	5.89	54	59.51269	10.21
3.	390	497.6165	27.59	160	124.2074	22.37
4.	405	456.1156	12.62	155	136.4534	11.97
5.	980	947.4772	3.32	135	135.4663	0.35
6.	1160	1189.917	2.58	129	129.039	0.03
7.	1250	1214.353	2.85	330	327.8557	0.65
8.	1440	1471.03	2.15	294	293.8763	0.04
9.	390	447.6001	14.77	152	149.0895	1.91
10.	420	488.3232	16.27	154	146.4539	4.90
11.	520	529.3929	1.81	138	143.6167	4.07
12.	566	570.2126	0.74	137	140.6065	2.63
13.	700	555.4136	20.66	135	125.0286	7.39
14.	894	782.6704	12.45	127	126.7962	0.16
15.	535	545.9486	2.05	93	55.77572	40.03
16.	1020	980.9636	3.83	225	225.0923	0.04
17.	340	375.941	10.57	80	97.42151	21.78
18.	1120	1158.249	3.42	270	278.2397	3.05
Prosečna greška			<b>8.05</b>	Prosečna greška		<b>7.36</b>

Na osnovu tabele 82. dobijen je dijagram prikazan na slici 136. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za materijal alata TM i CBN, za otpor prodiranja  $F_2$ .



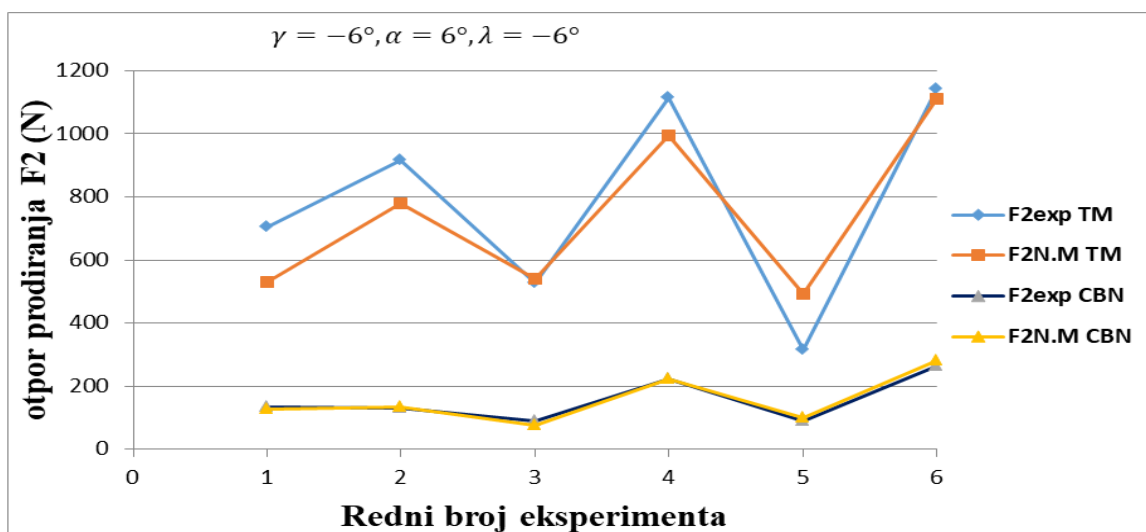
Slika 136. Grafički prikaz merenih i računskih vrednosti za otpor prodiranja  $F_2$

U tabeli 83. su eksperimentalni rezultati i vrednosti određene preko modela neuronske mreže za 6 eksperimenata koji su korišćeni za testiranje neuronske mreže sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za otpor prodiranja  $F_2$

Tabela 83. Rezultati za šest eksperimenata koji su korišćeni za testiranje neuronske mreže sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za otpor prodiranja  $F_2$ .

Red. br	$F_{2exp}(N)$ (TM)	$F_2(N)$ NM (TM)	E (%) (TM)	$F_{2exp}(N)$ (CBN)	$F_2(N)$ NM (CBN)	E (%) (CBN)
1 (19)	704	531.3318	11.51	134	125.4033	6.86
2 (20)	916	780.5209	4.03	130	132.1951	1.66
3 (21)	928	539.4819	1.22	90	55.7131	18.87
4 (22)	1115	995.28	12.03	222	222.9920	0.44
5 (23)	316	492.9663	19.90	90	99.4635	9.51
6 (24)	1140	1110.919	2.62	265	279.0406	5.03
Prosečna greška			<b>8.55</b>	Prosečna greška		<b>7.06</b>

Na osnovu tabele 83. dobija se dijagram na slici 137. za materijal alata TM i CBN za glavni otpor rezanja  $F_2$ . U tabeli 84. su prikazani rezultati za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$  dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

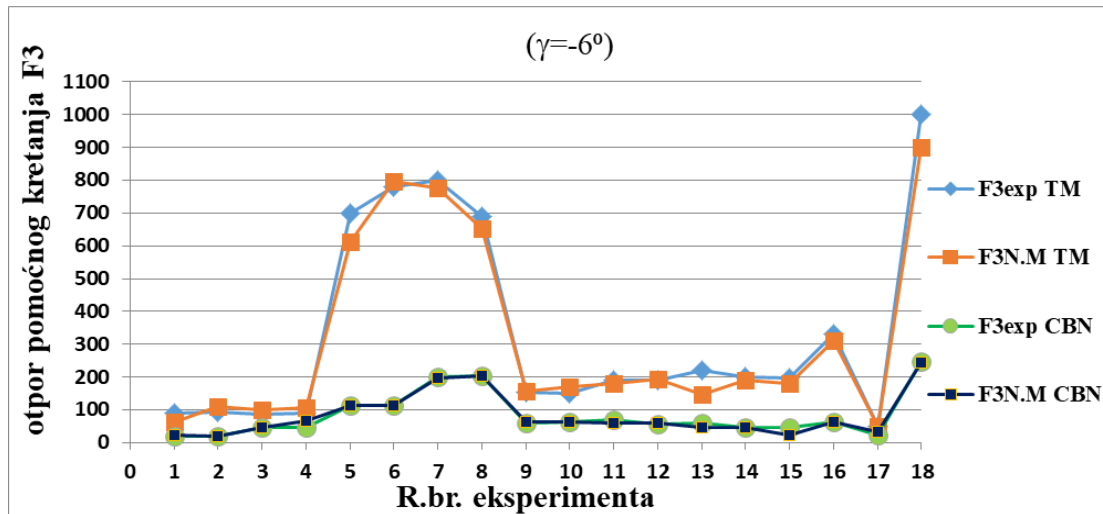


Slika 137. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za testiranje neuronske mreže za otpor prodiranja  $F_2$

Tabela 84. Rezultati za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$  dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom  $E$  pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. br	$F_{3\text{exp}}(N)$ (TM)	$F_3(N)$ NM (TM)	$E$ (%) (TM)	$F_{3\text{exp}}(N)$ (CBN)	$F_3(N)$ NM (CBN)	$E$ (%) (CBN)
1.	90	61.5825	31.57	19	22.0489	16.05
2.	92	108.546	17.98	18	18.9064	5.04
3.	87	99.6132	14.50	48	46.4892	3.15
4.	89	106.555	19.73	45	65.2968	45.10
5.	700	613.6494	12.34	114	114.3622	0.32
6.	780	797.7204	2.27	113	112.863	0.12
7.	801	778.2811	2.84	200	196.5993	1.70
8.	689	653.771	5.11	204	203.9257	0.04
9.	152	157.3649	3.53	60	63.65684	6.09
10.	151	169.1907	12.05	63	62.4661	0.85
11.	189	181.0375	4.21	70	61.2468	12.50
12.	192	192.7152	0.37	56	60.0157	7.17
13.	220	146.4864	33.42	60	45.0944	24.84
14.	201	192.0276	4.46	46	46.9458	2.06
15.	198	180.6555	8.76	48	23.3643	51.32
16.	332	309.5262	6.77	62	62.2653	0.43
17.	49	51.2948	4.68	22	33.4081	6.40
18.	1002	901.6021	10.02	246	243.4266	1.05
Prosečna greška			<b>10.81</b>	Prosečna greška		<b>9.08</b>

Na osnovu tabele 84. dobijen je dijagram na slici 138. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$ .



Slika 138. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$

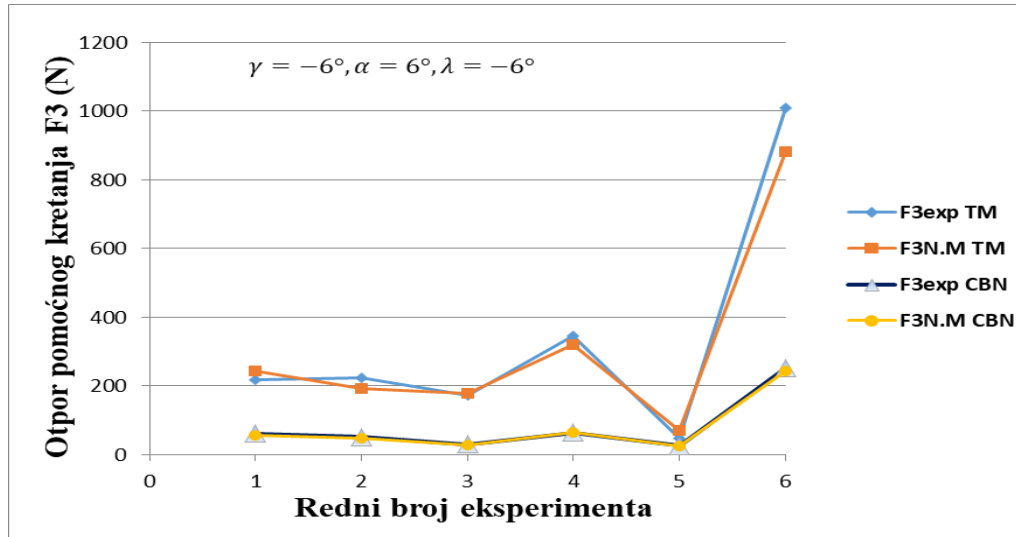
U tabeli 85. su prikazani rezultati testiranja neuronske mreže pomoću 6 izdvojenih eksperimenata za TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), kao i procentualna greška odstupanja merenih vrednosti od modelskih za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$ .

Tabela 85. Rezultati za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$  za šest eksperimenata koji su korišćeni za testiranje neuronske mreže sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. br	$F_{3exp}(N)$ (TM)	$F_3(N)$ NM (TM)	E (%) (TM)	$F_{3exp}(N)$ (CBN)	$F_3(N)$ NM (CBN)	E (%) (CBN)
1 (19)	218	242.0691	9.94	60	55.7142	7.69
2 (20)	222	190.9311	16.27	50	47.2126	5.90
3 (21)	173	176.5736	2.02	30	26.4008	13.63
4 (22)	346	318.2910	8.71	64	63.7108	0.45
5 (23)	47	68.93627	31.82	25	25.3414	1.35
6 (24)	1010	882.4760	14.45	250	243.4388	2.70
Prosečna greška			<b>13.87</b>	Prosečna greška		<b>5.29</b>

Na osnovu tabele 85. dobija se dijagram na slici 139. za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$  materijal alata TM i CBN. U tabeli 86. su rezultati za temperaturu u zoni rezanja ( $Q$ ) dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )



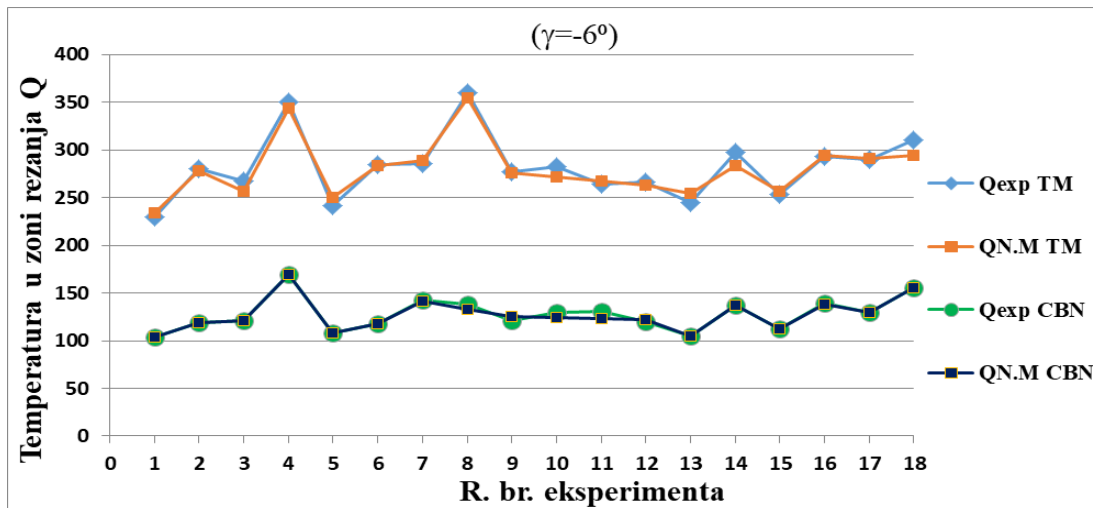


Slika 139. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za testiranje neuronske mreže za otpor pomoćnog kretanja  $F_3$

Tabela 86. Rezultati za temperaturu u zoni rezanja ( $Q$ ) dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom  $E$  pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. br	$Q_{exp}$ (°C) (TM)	$Q$ (°C) NM (TM)	$E$ (%) (TM)	$Q_{3exp}$ (°C) (CBN)	$Q$ (°C) NM (CBN)	$E$ (%) (CBN)
1.	230	234.2789	1.86	104	103.9782	0.02
2.	280	278.2022	0.64	119	119.4655	0.39
3.	268	256.9226	4.13	121	121.1632	0.13
4.	350	344.3595	1.61	169	169.4716	0.28
5.	242	249.9601	3.29	108	108.0843	0.08
6.	285	283.1664	0.64	118	117.6284	0.31
7.	286	289.2079	1.12	143	141.4657	1.07
8.	360	354.8742	1.42	138	132.7482	3.81
9.	277	275.9981	0.36	121	124.9669	3.28
10.	283	271.5828	4.03	130	124.1944	4.47
11.	264	267.1494	1.19	131	123.2918	5.88
12.	266	262.7705	1.21	120	122.2694	1.89
13.	245	255.0722	4.11	105	105.2725	0.26
14.	298	283.5448	4.85	137	137.3574	0.26
15.	254	257.0343	1.19	113	112.2819	0.64
16.	293	294.6919	0.58	139	138.5031	0.36
17.	290	291.0895	0.38	130	129.2129	0.61
18.	310	294.6571	4.95	156	155.8003	0.13
Prosečna greška			<b>2.08</b>	Prosečna greška		<b>1.33</b>

Na osnovu tabele 86. dobijen je dijagram na slici 140. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za temperaturu u zoni rezanja Q za materijal alata TM i CBN.



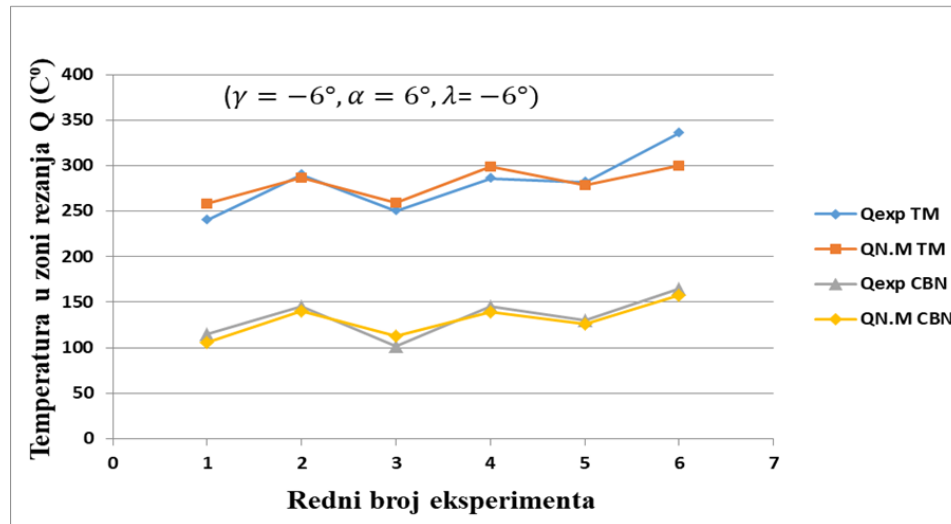
Slika 140. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za temperaturu u zoni rezanja Q

U tabeli 87. su prikazani rezultati testiranja neuronske mreže pomoću 6 izdvojenih eksperimenata za materijal alata TM i CBN, kao i procentualna greška odstupanja merenih vrednosti od modelskih za temperaturu rezanja Q.

Tabela 87. Rezultati dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) za šest eksperimenata koje su korišćene za testiranje neuronske mreže sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za temperaturu u zoni rezanja Q.

Red. br	$Q_{exp}$ (°C) (TM)	$Q$ (°C) NM (TM)	$E$ (%) (TM)	$Q_{3exp}$ (°C) (CBN)	$Q$ (°C) NM (CBN)	$E$ (%) (CBN)
1 (19)	240	258.1056	7.01	115	105.9669	8.52
2 (20)	290	286.4558	1.24	145	139.9921	3.58
3 (21)	250	258.7689	3.39	102	112.3835	9.24
4 (22)	286	299.1517	4.40	145	139.4102	4.01
5 (23)	282	278.9277	1.10	130	126.4670	2.79
6 (24)	336	300.2041	11.92	165	157.0243	5.08
Prosečna greška			<b>4.84</b>	Prosečna greška		<b>5.54</b>

Na osnovu tabele 87. dobija se dijagram na slici 141. za temperaturu u zoni rezanja Q za materijal alata TM i CBN. U tabeli 88. su prikazani rezultati za parametre hrapavosti ( $R_a$ ) dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronske mreže (NM) sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ).

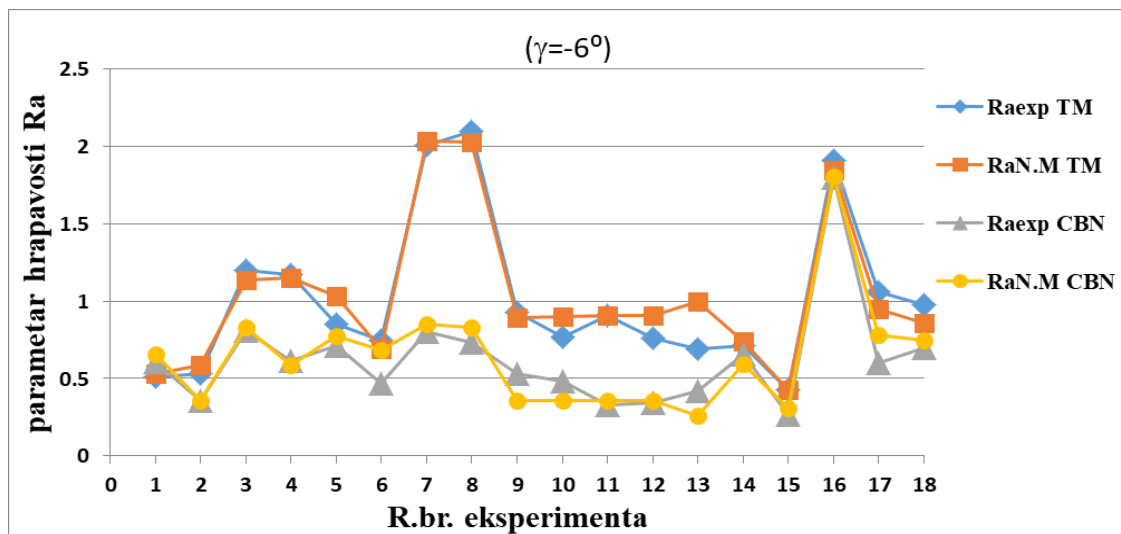


Slika 141. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za testiranje neuronske mreže za temperaturu u zoni rezanja Q

Tabela 88. Rezultati za parametre hrapavosti ( $R_a$ ) dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronske mreže (NM) sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. br	$R_{aexp}$ ( $\mu\text{m}$ ) (TM)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) NM (TM)	E (%) (TM)	$R_{aexp}$ ( $\mu\text{m}$ ) (CBN)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) NM (CBN)	E (%) (CBN)
1.	0.53	0.5894	11.21	0.61	0.6592	9.65
2.	0.51	0.5335	4.61	0.36	0.3557	0.81
3.	1.20	1.1362	5.32	0.81	0.8331	1.93
4.	1.17	1.1477	1.91	0.62	0.5893	2.36
5.	0.85	1.0349	21.75	0.71	0.7777	7.97
6.	0.75	0.6920	7.73	0.47	0.6832	28.43
7.	2.01	2.0359	1.29	0.8	0.8527	2.63
8.	2.10	2.0256	3.54	0.73	0.8288	4.71
9.	0.93	0.8965	3.60	0.53	0.3581	18.48
10.	0.77	0.9006	16.97	0.48	0.3588	15.73
11.	0.91	0.9047	0.58	0.33	0.3582	3.10
12.	0.76	0.9086	19.55	0.34	0.3558	2.09
13.	0.69	0.9999	44.91	0.42	0.2565	23.68
14.	0.71	0.7407	4.32	0.66	0.59537	8.82
15.	0.43	0.4258	0.96	0.27	0.3057	8.32
16.	1.91	1.8493	3.18	1.80	1.8051	0.27
17.	1.06	0.9489	10.48	0.60	0.7843	17.39
18.	0.98	0.8574	12.51	0.70	0.7456	4.65
Prosečna greška			<b>9.69</b>	Prosečna greška		<b>8.94</b>

Na osnovu tabele 88. dobijen je dijagram na slici 142. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$  za materijal alata TM i CBN.



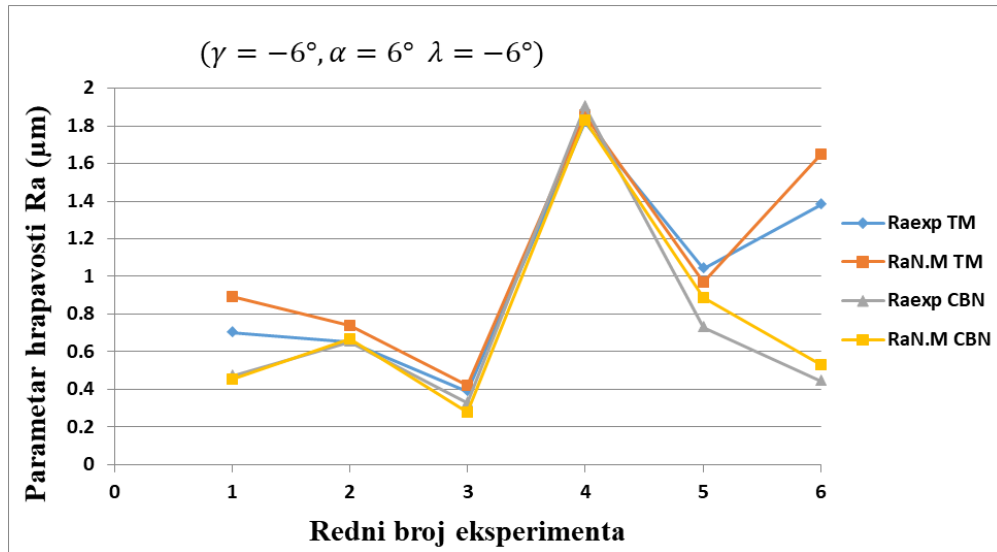
Slika 142. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$

U tabeli 89. su rezultati dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronske mreže (NM) za 6 eksperimenata koji su korišteni za testiranje neuronske mreže sa procentualnom greškom  $E$  pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$ .

Tabela 89. Rezultati za 6 eksperimenata koji su korišteni za testiranje neuronske mreže sa procentualnom greškom  $E$  pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$ .

<i>Red. br</i>	$R_{aexp}(\mu m)$ (TM)	$R_a(\mu m)$ NM (TM)	$E$ (%) (TM)	$R_{aexp}(\mu m)$ (CBN)	$R_a(\mu m)$ NM (CBN)	$E$ (%) (CBN)
1 (19)	0.7	0.8956	21.84	0.47	0.4533	3.68
2 (20)	0.65	0.7417	12.37	0.652	0.6655	2.04
3 (21)	0.39	0.4226	7.73	0.33	0.2790	18.28
4 (22)	1.82	1.8570	2.00	1.9	1.8304	3.80
5 (23)	1.04	0.9716	7.03	0.73	0.8895	17.93
6 (24)	1.38	1.6496	16.34	0.445	0.5301	16.06
Prosečna greška			<b>11.22</b>	Prosečna greška		<b>10.30</b>

Na osnovu tabele 89. dobija se dijagram na slici 143. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za srednju aritmetičku hrapavost  $R_a$  za materijal alata TM i CBN.



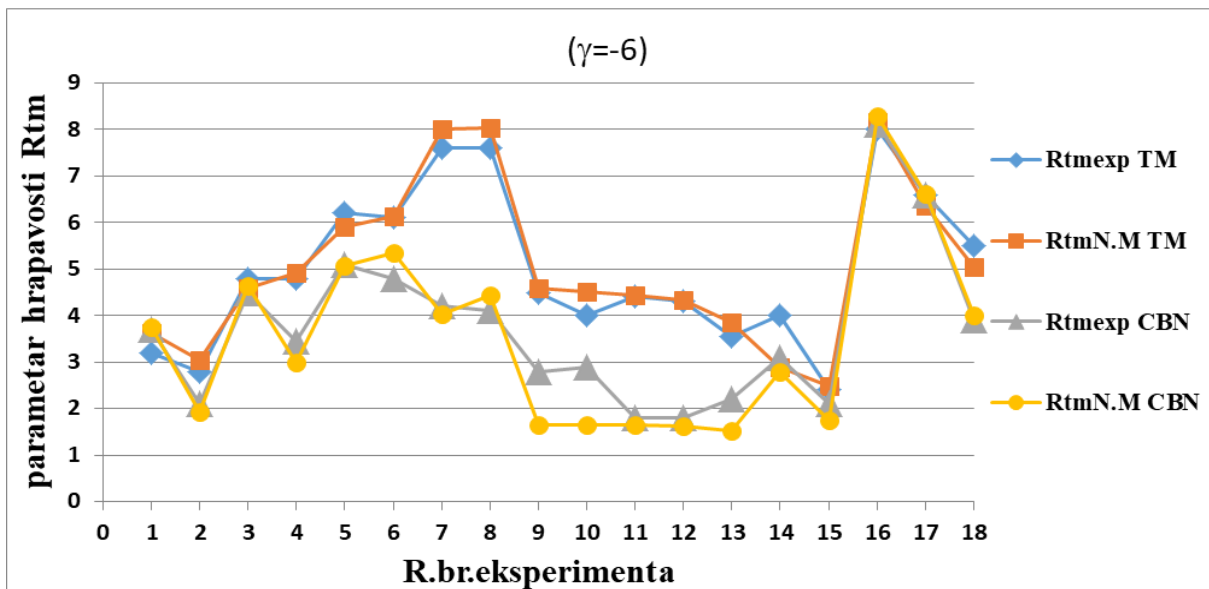
Slika 143. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za testiranje neuronske mreže za srednju aritmetičku hrapavost  $Ra$

Tabela 90. Rezultati za maksimalnu hrapavost ( $R_{tm}$ ) dobijeni eksperimentalno i preko modela neuronskih mreža (NM) sa procentualnom greškom E pri obradi reznom pločicom od TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

Red. br	$R_{tmexp} (\mu m)$ (TM)	$R_{tm} (\mu m)$ NM (TM)	E (%) (TM)	$R_{tmexp} (\mu m)$ (CBN)	$R_{tm} (\mu m)$ NM (CBN)	E (%) (CBN)
1.	3.2	3.6262	13.32	3.7	3.7574	1.55
2.	2.8	3.0361	8.43	2.1	1.9229	8.43
3.	4.8	4.5816	4.55	4.5	4.6422	3.16
4.	4.8	4.9182	2.46	3.46	2.9841	13.75
5.	6.2	5.9059	4.74	5.1	5.0833	0.33
6.	6.1	6.1287	0.47	4.8	5.3483	11.42
7.	7.6	8.0019	5.29	4.2	4.0420	3.76
8.	7.6	8.0436	5.84	4.1	4.4420	8.34
9.	4.5	4.5989	2.20	2.8	1.6534	40.95
10.	4.0	4.5170	12.93	2.9	1.6588	42.80
11.	4.4	4.4331	0.75	1.8	1.6539	8.11
12.	4.3	4.3482	1.12	1.8	1.6365	9.08
13.	3.56	3.8465	8.05	2.2	1.5225	30.79
14.	4.0	2.8922	27.69	3.1	2.7949	9.84
15.	2.4	2.4928	3.87	2.1	1.7402	17.13
16.	8.01	8.1591	1.86	8.1	8.2975	2.44
17.	6.6	6.3531	3.74	6.6	6.6161	0.24
18.	5.5	5.0389	8.38	3.9	3.9992	2.55
Prosečna greška		<b>6.42</b>		Prosečna greška		<b>9.94</b>

U tabeli 90. su rezultati testiranja neuronske mreže pomoću izdvojenih 6 eksperimenata za materijal alata TM i CBN, ( $\gamma = -6^\circ$ ), kao i procentualna greška odstupanja merenih vrednosti od modelskih za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$ .

Na osnovu tabele 90. dobijen je dijagram na slici 144. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$  i materijal alata TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ).



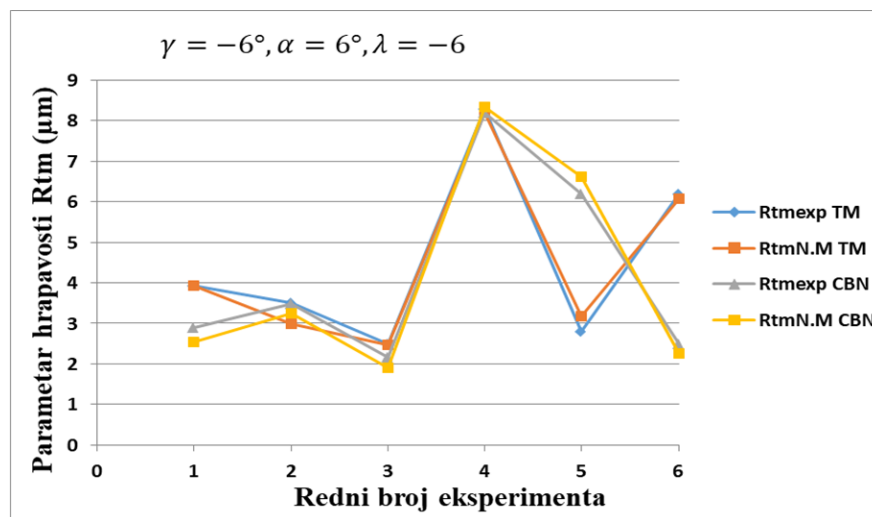
Slika 144. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$

U tabeli 91. su prikazani rezultati testiranja neuronske mreže pomoću 6 izdvojenih eksperimenata za TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ), kao i procentualna greška odstupanja merenih vrednosti od modelskih za maksimalnu hrapavost obrađene površine  $R_{tm}$  za 18 urađenih eksperimenata.

Tabela 91. Rezultati testiranja neuronske mreže (NM) pomoću izdvojenih 6 eksperimenata za TM ( $\gamma = -6^\circ$ ), kao i procentualna greška odstupanja merenih vrednosti od modelskih E za maksimalnu hrapavost obrađene površine  $R_{tm}$

Red. br	$R_{tmexp}$ ( $\mu m$ ) (TM)	$R_{tm}$ ( $\mu m$ ) NM (TM)	E (%) (TM)	$R_{tmexp}$ ( $\mu m$ ) (CBN)	$R_{tm}$ ( $\mu m$ ) NM (CBN)	E (%) (CBN)
1 (19)	3.93	3.9245	0.18	2.9	2.5444	13.98
2 (20)	3.5	2.9792	21.06	3.48	3.2542	6.94
3 (21)	2.5	2.4732	0.33	2.15	1.8978	13.29
4 (22)	8.3	8.1966	3.26	8.2	8.3473	1.76
5 (23)	2.8	3.1739	6.15	6.2	6.6167	6.30
6 (24)	6.2	6.0787	2.00	2.48	2.2659	9.45
Prosečna greška			<b>5.50</b>	Prosečna greška		<b>8.62</b>

Na osnovu tabele 91. dobija se dijagram na slici 145. odstupanja merenih od modelovanih vrednosti za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$  i materijal alata TM i CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ).



Slika 145. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti za testiranje neuronske mreže za maksimalnu hrapavost  $R_{tm}$

Na osnovu grafičkog prikaza i analize izračunate procentualne greške odstupanja merenih vrednosti od modelskih vidi se dobro poklapanje merenih i modelskih vrednosti određenih pomoću neuronske mreže kod svih ispitivanih parametara obradnog procesa kaljenog čelika. Grafička provera kao i izračunata greška odstupanja preko šest izdvojenih eksperimentalnih vrednosti za testiranje neuronske mreže pokazuje utniranost mreže i pokazuje dobro poklapanje kod svih dobijenih modela veštačkih neuronskih mreža.

Nažalost veštačke neuronske mreže ne daju mogućnost ocene signifikantnosti ulaznih parametara, već samo odstupanje merenih vrednosti od računskih, pa to ovde nije ni diskutovano.

Osim ovih modela ima dovoljno eksperimentalnih podataka za modelovanje novih neuronskih mreža. Moguće je odrediti nove sveobuhvatnije neuronske mreže gde bi se odredio ANFIS model koji bi uključio ispitivane rezne materijale kao četvrti ulazni faktor, a i drugi model neuronske mreže koji bi uključio i geometriju alata kao četvrti ulazni faktor, a na kraju jednu sveobuhvatnu neuronsku mrežu koja bi bila model kompletno svih izvedenih istraživanja u doktorskoj disertaciji.

### 6.5. Rezultati ispitivanja habanja alata

Rezultati merenja širine pojasa habanja na leđnoj površini alata (VB), otpora rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) i temperature u zoni rezanja (Q) pri obradi struganjem sa nosačem reznog alata PCLNR 25 25 M16, reznom pločicom od TM CMNA 120404 sa geometrijom reznog alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) su prikazani u tabeli 92 za materijal alata TM, a u tabeli 93. za materijal alata CBN.

Tabela 92. Širina pojasa habanja (VB) na leđnoj površini alata, otpori rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) i temperatura u zoni rezanja pri obradi struganjem, reznom pločicom od TM sa reznom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

R.br.	Vreme (s)	Širina pojasa habanja VB (mm)	Temperatura u zoni rezanja Q (°C)	Otpori rezanja		
				$F_1$ (N)	$F_2$ (N)	$F_3$ (N)
1.	70	0.03	92	150	210	110
2.	140	0.05	120	160	250	130
3.	210	0.10	205	200	300	150
4.	280	0.22	260	240	510	170
5.	350	0.35	360	300	650	200

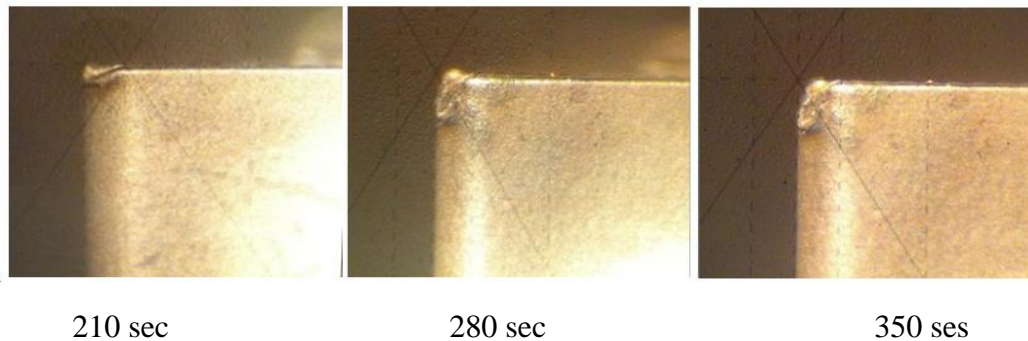
Tabela 93. Širina pojasa habanja (VB) na leđnoj površini alata, otpori rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$ ) i temperatura u zoni rezanja Q pri obradi, reznom pločicom od CBN sa geometrijom reznog alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

R.br.	Vreme (s)	Širina pojasa habanja VB (mm)	Temperatura u zoni rezanja Q (°C)	Otpori rezanja		
				$F_1$ (N)	$F_2$ (N)	$F_3$ (N)
1.	70	0.015	105	140	120	90
2.	140	0.02	161	140	130	95
3.	210	0.03	205	150	140	100
4.	280	0.045	240	160	140	100
5.	350	0.05	280	160	150	110
6.	420	0.07	298	170	150	120
7.	560	0.08	330	180	160	130

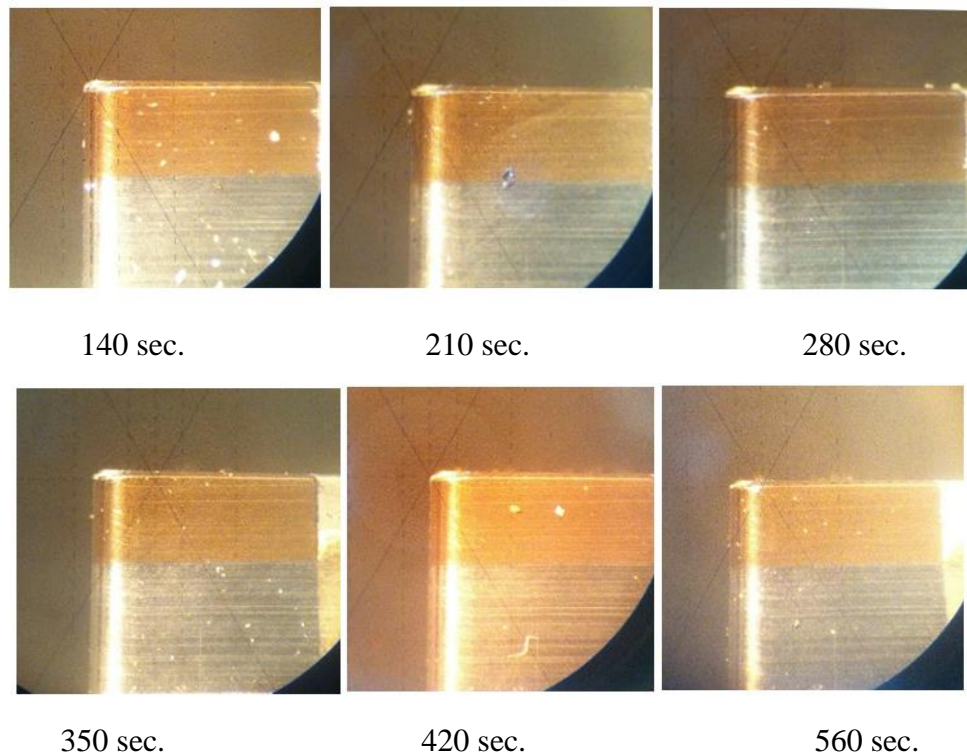


Na slici 146. su prikazane fotografije progressa habanja u vremenu rezanja za materijal alata TM, a na slici 147. za materijal alata CBN i za ( $\gamma = -6^\circ$ ) i materijal obratka kaljeni čelik 90MnCrV8.

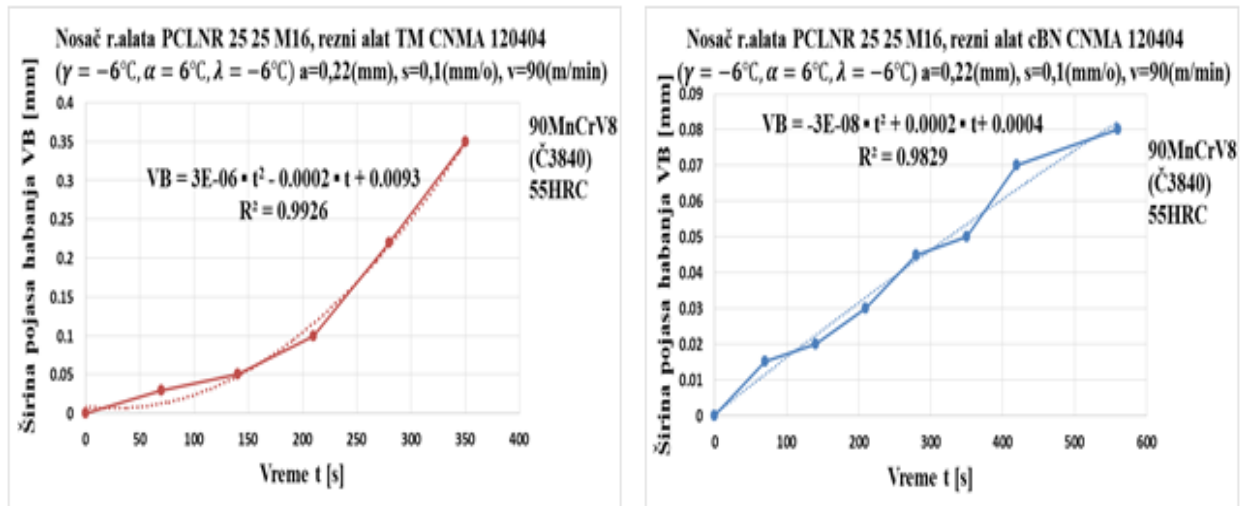
Na osnovu rezultata merenja širine pojasa habanja ledne površine VB reznih pločica od TM i CBN-a pri obradi kaljenog čelika 90MnCrV8 struganjem konstantnim režimom rezanja, nacrtane su krive habanja alata u vremenu rezanja na slici 148.



Slika 146. Habanje površina alata od TM u vremenu rezanja ( $v = 90$  m/min,  $a = 0,22$  mm,  $s = 0,1$  mm/o,  $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )

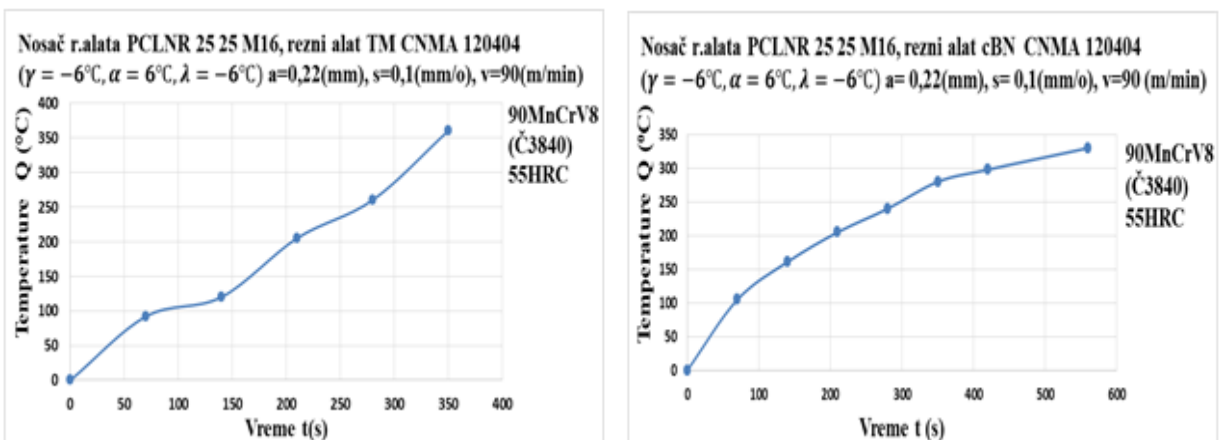


Slika147. Habanje površina alata od CBN u vremenu rezanja ( $v = 90$  m/min,  $a = 0,22$  mm,  $s = 0,1$  mm/o,  $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )



Slika 148. Širina pojasa habanja ledne površine VB alata od TM levo i alata od CBN desno, u zavisnosti od vremena rezanja pri obradi kaljenog čelika istom geometrijom i konstantnim režimom obrade

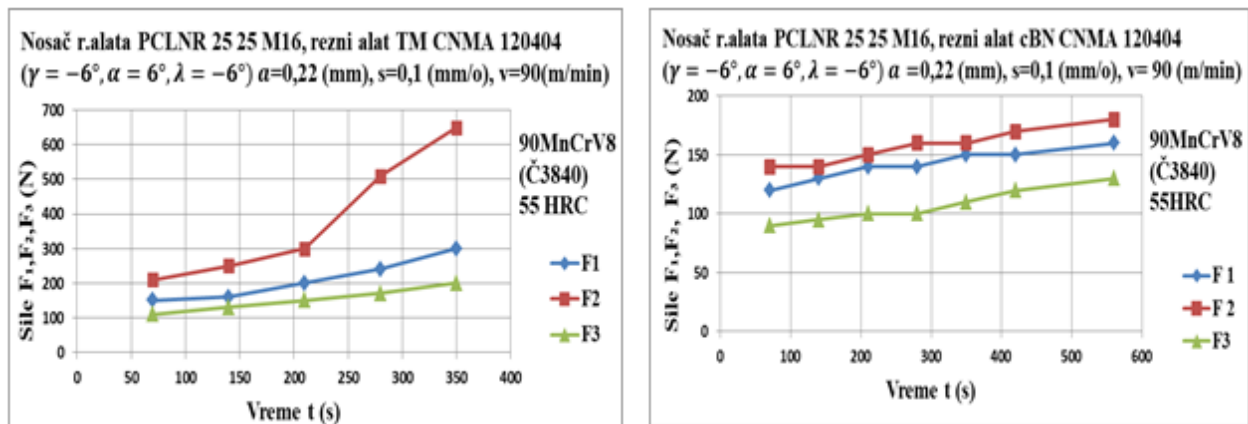
Temperatura rezanja pri obradi Q na strugu kaljenog čelika 90MnCrV8 reznim pločicama od TM i CBN pri istoj geometriji i konstantnim režimom obrade prikazana je na slici 134.



Slika 149. Temperatura rezanja pri obradi na strugu Q reznim pločicama od TM i CBN pri istoj geometriji i konstantnim režimom obrade

Dijagram zavisnosti temperature rezanja Q i širine pojasa habanja VB pri obradi na strugu kaljenog čelika 90MnCrV8 reznim pločicama od TM i CBN pri istoj geometriji i konstantnim režimom obrade prikazan je na slici 151.

Na slici 150. je prikazana promena komponente otpora rezanja u toku vremena pri obradi kaljenog čelika 90MnCrV8 reznim pločicama od TM i CBN pri geometriji  $\gamma = -6^\circ$ , i konstantnim režimom obrade.



Slika 150. Komponente otpora rezanja u toku vremena pri obradi kaljenog čelika reznim pločicama od TM i CBN sa geometrijom  $\gamma=-6^\circ$ , i konstantnim režimom obrade

Vidi se je da porast širine pojasa habanja reznog alata znatno brži kod reznih pločica od TM u odnosu na porast kod reznih pločica od CBN-a.

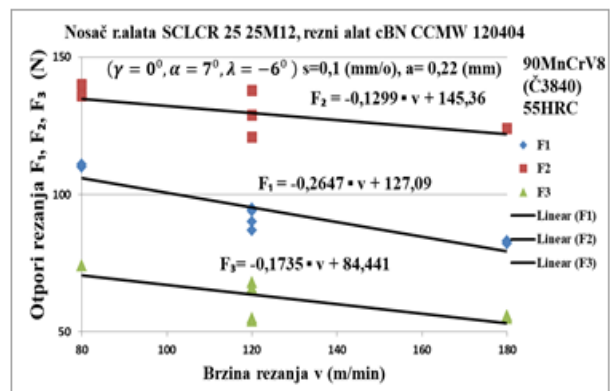
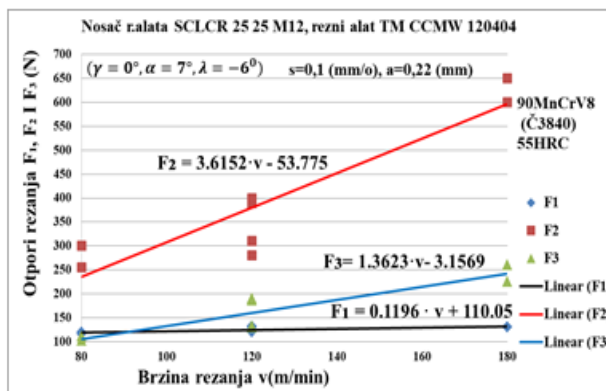
Na osnovu dijagrama zavisnosti temperature rezanja može se videti znatno veći porast temperature pri obradi sa alatom od TM što dovodi brzo i do njegovog otkaza. Temperatura rezanja kod CBN je znatno niža i ima manji trend porasta nego kod alata od TM.

## 7. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

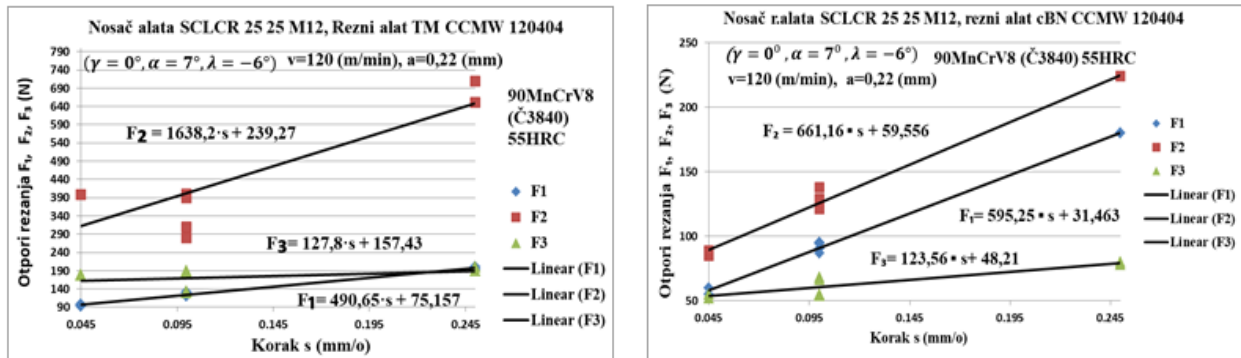
### 7.3. Otpori rezanja

Otpori rezanja pri obradi struganjem kod kaljenog čelika razlikuju se u odnosu na uobičajeno struganje. Kod kaljenog čelika pri obradi struganjem najveći je otpor prodiranja  $F_2$ , dok je kod konvencionalnog struganja najveći glavni otpor rezanja  $F_1$ . Sa povećanjem dužine rezanja dolazi do povećanja širine pojasa habanja VB, a time i značajnog povećanja vrednosti sile prodiranja. Pri obradi kaljenih čelika, komponente otpora rezanja se povećavaju sa povećanjem negativnog grudnog ugla alata. Tokom procesa obrade kaljenog čelika nastaje kompleksna međusobna interakcija između alata i obratka na kontaktnim površinama. Kao posledica toga nastaju veliki otpori rezanja i visoke temperature rezanja koje izazivaju habanje, a ponekad i lom alata. Najčešće ove pojave dovode i do oštećenja i promena mehaničkih karakteristika obrađene površine.

Na slici 152. prikazana je promena otpora rezanja u zavisnosti od brzine rezanja, na slici 153 od pomaka, a na slici 154 od dubine rezanja. Sa povećanjem brzine rezanja dolazi do postepenog smanjenja vrednosti otpora rezanja kod reznih alata od CBN, dok je kod reznih alata od TM obrnut proces. Razlog za ovo je omekšavanje materijala obratka zbog veće toplote koja se generiše pri većim brzinama rezanja i smanjenje trenja. Zbog omekšavanja i velike brzine rezanja, materijal se lako skida iz zone rezanja. Otpori rezanja brže opadaju u intervalu brzina od 80 do 180 m/min. Povećanje brzine rezanja poboljšava kvalitet obrađene površine, dok povećanje pomaka i dubine rezanja pogoršava kvalitet obrađene površine pri obradi reznim pločicama od CBN. Kada su u pitanju rezne pločice od TM sa povećanjem brzine rezanja pogoršava se kvalitet obrađene površine. Isti je slučaj i sa povećanjem koraka i dubine rezanja pogoršava se kvalitet obrađene površine pri obradi struganjem reznim pločicama od TM.

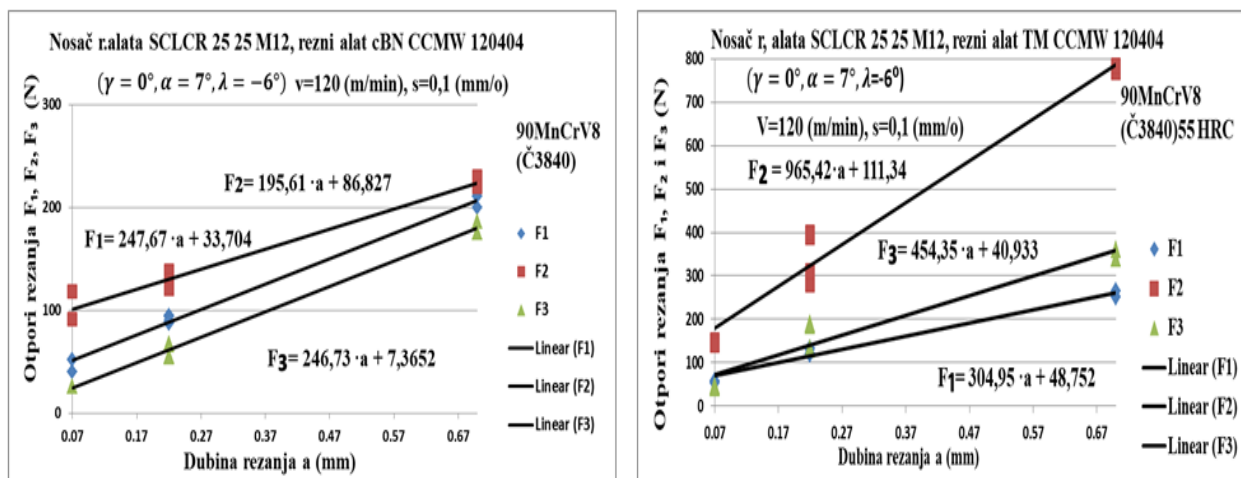


Slika.152. Zavisnost komponenti otpora rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) od brzine rezanja ( $v$ ) pri obradi reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja



Slika 153. Zavisnost komponenti otpora rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) od pomaka ( $s$ ) pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja

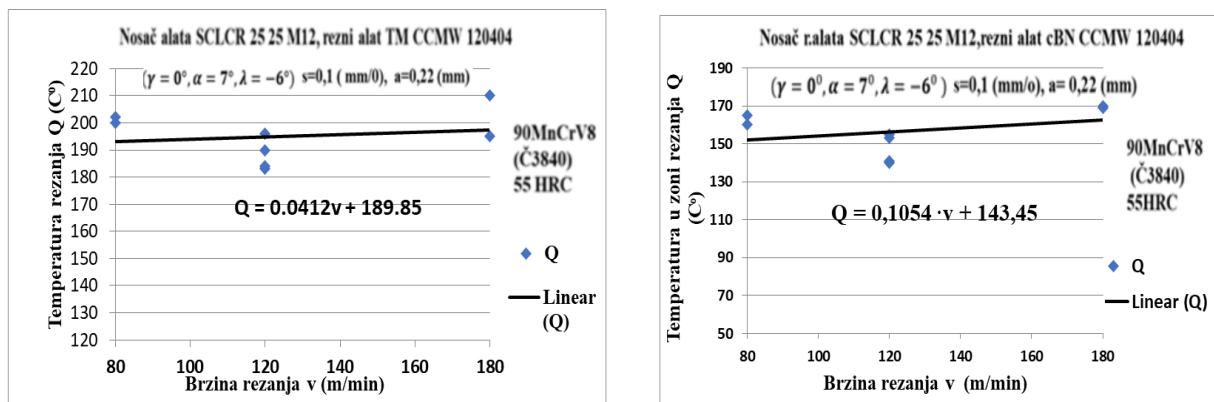
Pri dubini rezanja od 0,2 mm radialna komponenta (otpor prodiranja  $F_2$ ) postaje dominantnija u odnosu na druge dve komponente otpora rezanja. Ovo se može objasniti naponom koji isključivo deluje na zaobljenom delu reznog vrha alata. Povećanje otpora rezanja je proporcionalno povećanju koraka. U svim eksperimentima sa promenom koraka otpor prodiranja je veći od glavnog otpora rezanja. Povećanje otpora rezanja je proporcionalno povećanju pomaka. U svim eksperimentima sa promenom pomaka sila prodiranja je veća od glavne sile rezanja.



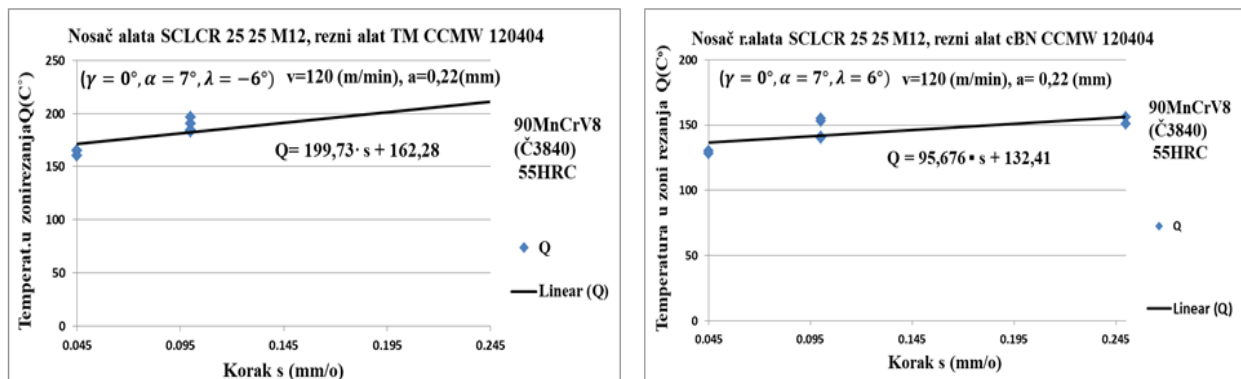
Slika 154. Zavisnost komponenti otpora rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) od dubine rezanja ( $a$ ) pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja

## 7.2. Temperatura rezanja

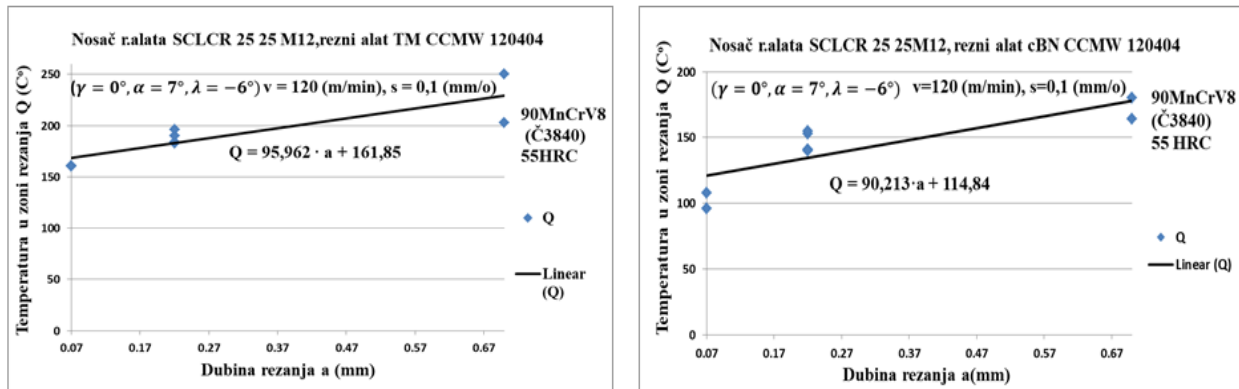
Na slici 155. prikazana je promena temperature rezanja u funkciji brzine rezanja, na slici 156 od pomaka, a na slici 157 dubine rezanja, pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja.



Slika 155. Zavisnost temperature u zoni rezanja  $Q$  od brzine rezanja ( $v$ ) dobijena pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja



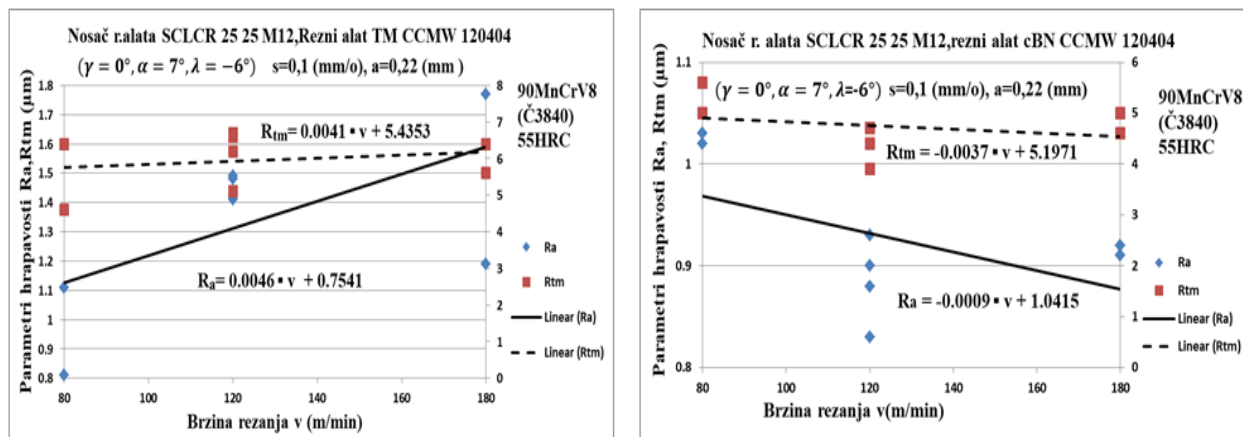
Slika 156. Zavisnost temperature u zoni rezanja  $Q$  od pomaka ( $s$ ) dobijena pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja



Slika 157. Zavisnost temperature u zoni rezanja Q od dubine rezanja (a) dobijena pri obradi reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja

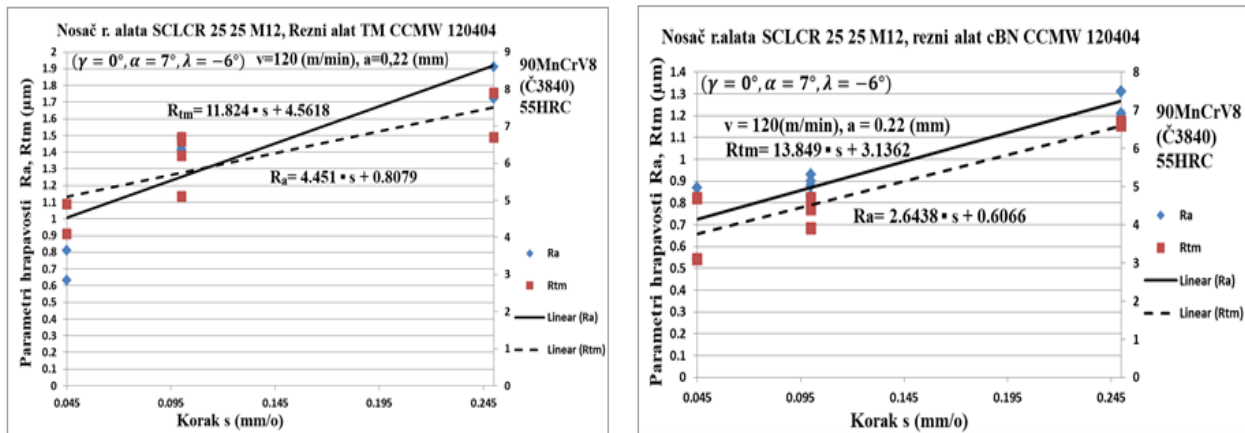
### 7.3. Parametri hrapavosti obrađene površine

Zavisnost parametara hrapavosti ( $R_a$ ,  $R_{tm}$ ) od brzine rezanja (v) prikazana je na slici 158, od pomaka na slici 159, a od dubine rezanja 160, dobijena pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja.

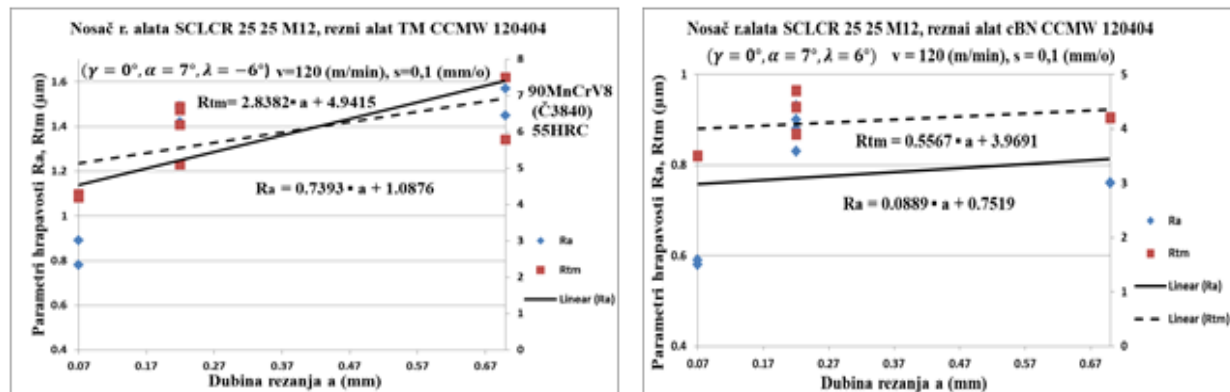


Slika.158. Zavisnost parametara hrapavosti ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ) od brzine rezanja v dobijenih pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja

Treba naglasiti da su parametri hrapavosti ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ) manji kod reznih pločica od CBN u odnosu na rezne pločice od TM.



Slika 159. Zavisnost parametara hrapavosti ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ) od koraka  $s$  dobijenih pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja



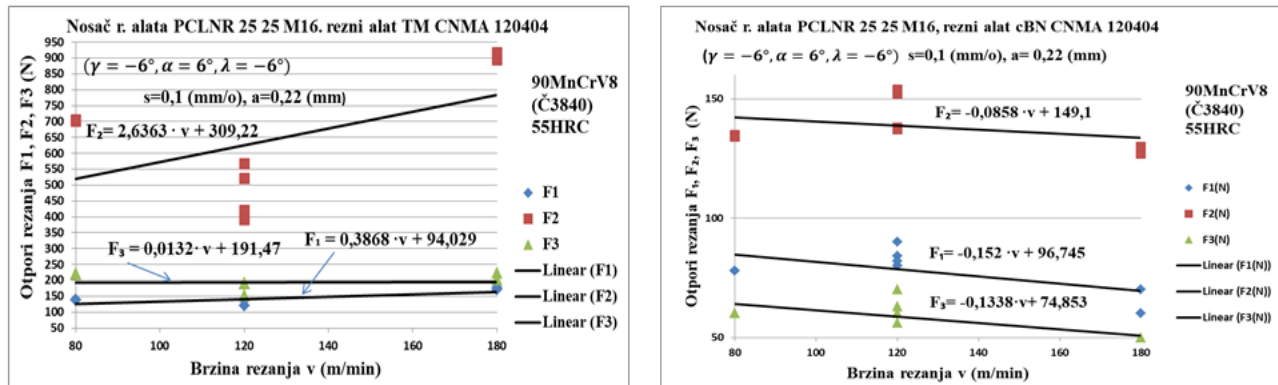
Slika 160. Zavisnost parametara hrapavosti ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ) od dubine rezanja ( $a$ ) dobijenih pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja

Najveći uticaj na parametre hrapavosti ima pomak dok brzina rezanja i dubina rezanja imaju neodređen uticaj kod oba ispitivana materijala alata. Povećanjem pomaka pogoršava se hrapavost obrađene površine.

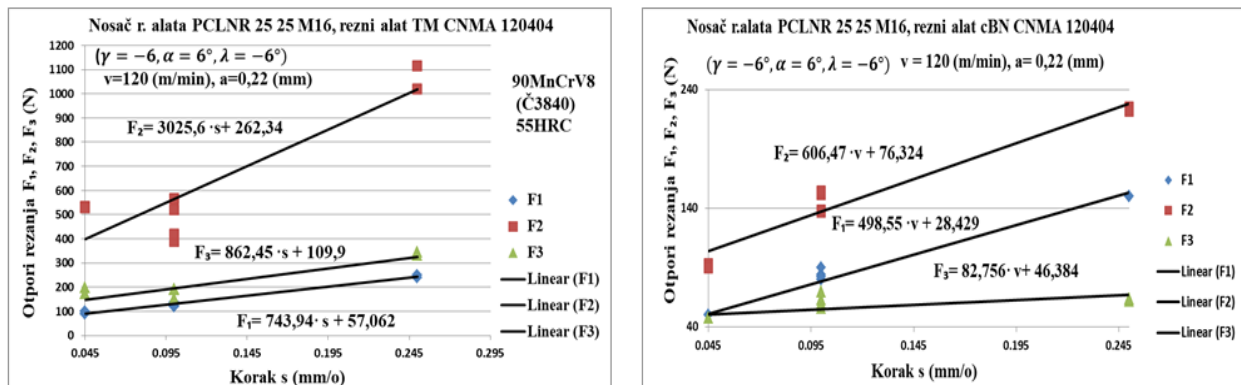


#### 7.4. Otpori rezanja

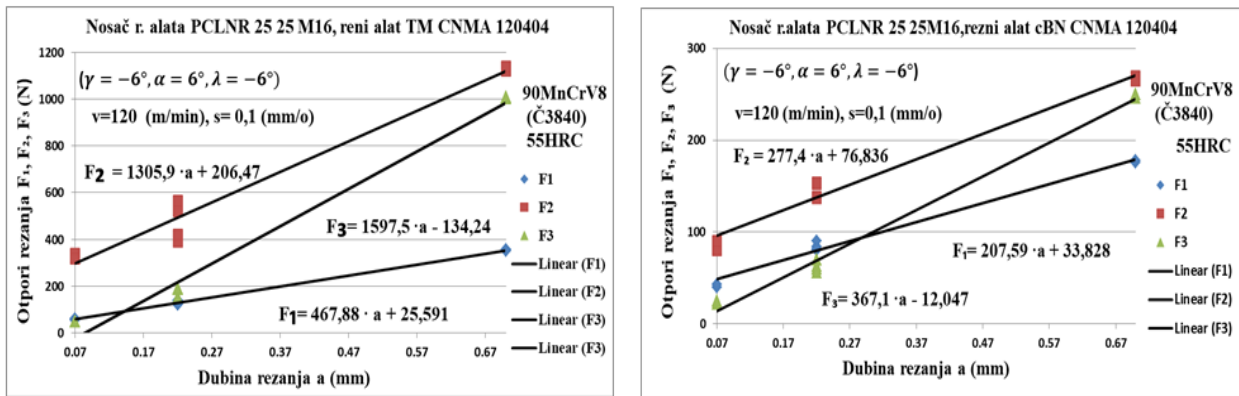
Na slici 161. prikazana je promena komponenti otpora rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$ ) od brzine rezanja, na slici 162 od pomaka, a na slici 163 od dubine rezanja, dobijene pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja.



Slika 161 Zavisnost komponenti otpora rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) od brzine rezanja ( $v$ ) dobijenih pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja



Slika 162. Zavisnost komponenti otpora rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) od pomaka ( $s$ ) dobijenih pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja

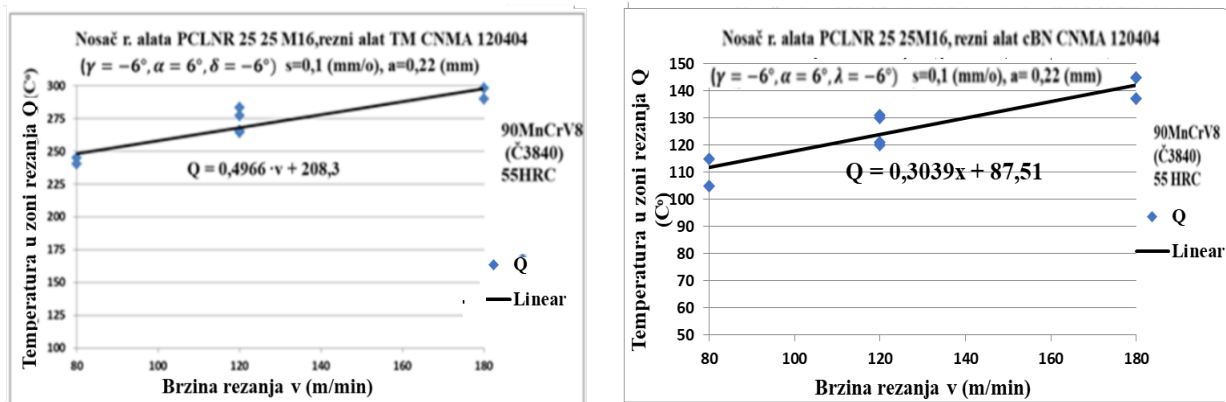


Slika 163. Zavisnost komponenti otpora rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) od dubine rezanja ( $a$ ) dobijenih pri obradi reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i konstantnim režimima rezanja

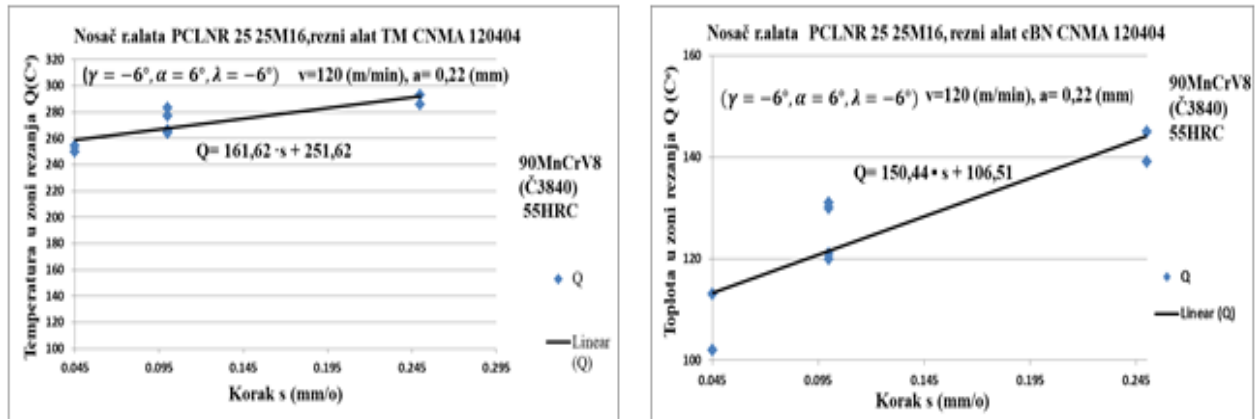
Dubina rezanja, a zatim pomak najviše utiče na sve komponente otpora rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$ ), sa povećanjem pomaka ( $s$ ) i dubine rezanja ( $a$ ) povećavaju se otpori rezanja kod obe vrste ispitivanih reznih alata. Brzina rezanja najmanje utiče na komponente otpore rezanja kod TM dolazi do blagog povećanja komponenti otpora, a kod CBN dolazi do blagog smanjenja komponenti otpora sa povećanjem brzine rezanja. Komponente otpora rezanja kod reznih pločica od TM su puno veće od komponenti otpora pri obradi sa reznim pločicama od CBN, što je vidljivo sa slika 161 do 163.

### 7.5. Temperatura rezanja

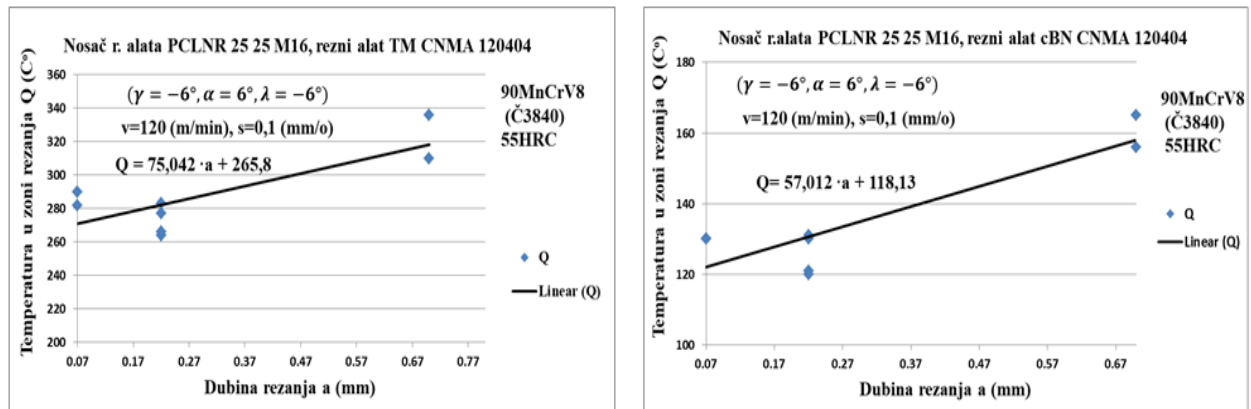
Na slici 164. prikazana je promena temperature rezanja u funkciji brzine rezanja, na slici 165. od pomaka, a na slici 166. od dubine rezanja, pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja.



Slika 164. Zavisnost temperature u zoni rezanja ( $Q$ ) od brzine rezanja ( $v$ ) dobijenih pri obradi reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ )



Slika 165. Zavisnost temperature u zoni rezanja (Q) od koraka (s) dobijeno pri obradi reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja

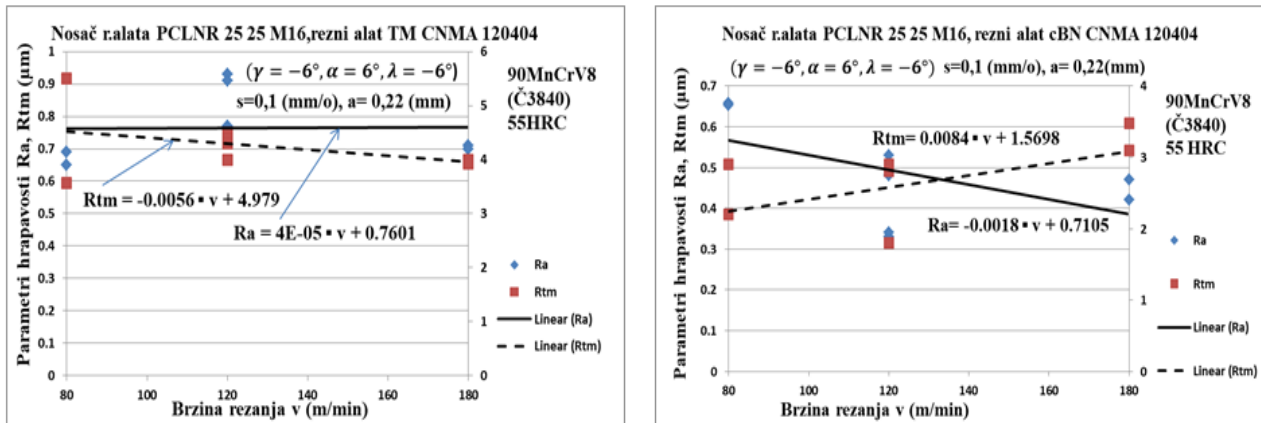


Slika 166. Zavisnost temperature u zoni rezanja (Q) od dubine rezanja (a) pri obradi reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja

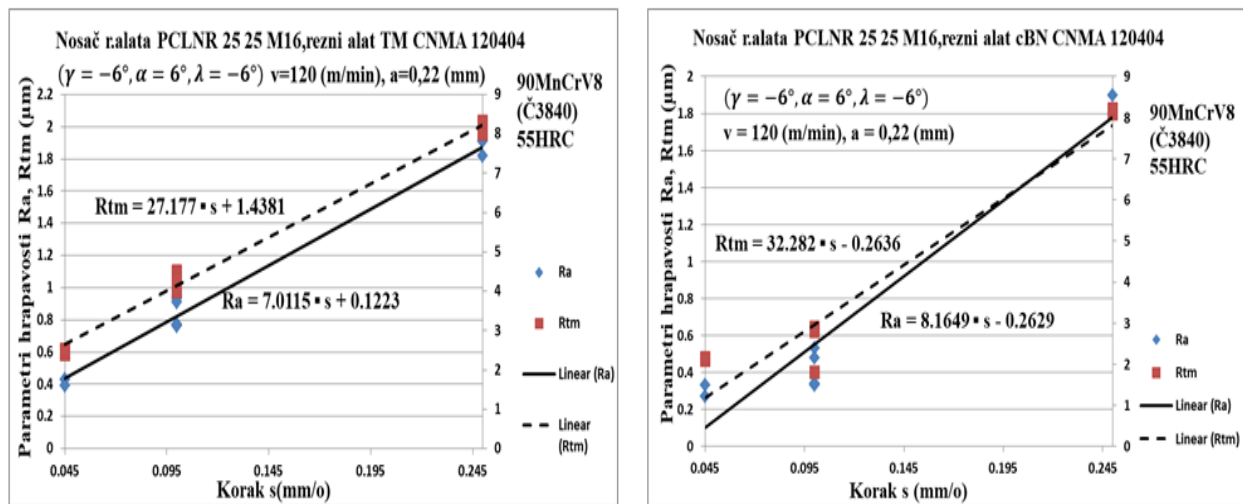
Sa slika 164. do 166. se vidi značajan uticaj svih elemenata režima rezanja na povećanje temperature rezanja kod obe vrste reznog materijala, a naročito veliki uticaj na porast temperature je kod TM tako da su niže temperature rezanja kod CBN.

## 7.6. Hrapavost obrađene površine

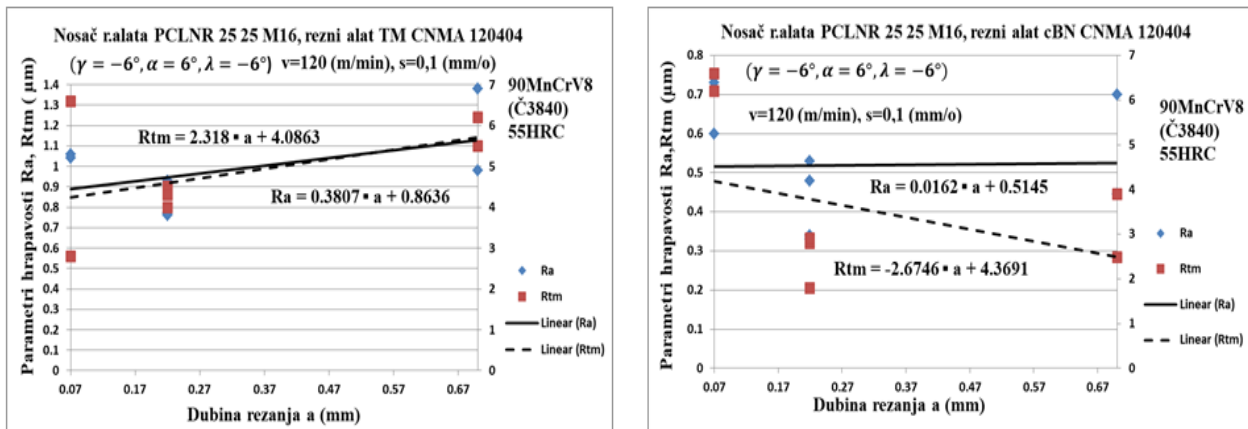
Zavisnost parametara hrapavosti ( $R_a$ ,  $R_{tm}$ ) od brzine rezanja prikazana je na slici 167, a od pomaka na slici 168, a od dubine rezanja na slici 169, rezultati su dobijeni pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja.



Slika 167. Zavisnost parametara hrapavosti ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ) od brzine rezanja ( $v$ ) dobijenih pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja.



Slika 168. Zavisnost parametara hrapavosti ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ) od koraka ( $s$ ) dobijenih pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja.



Slika 169. Zavisnost parametara hrapavosti ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ) od dubine rezanja ( $a$ ) dobijenih pri obradi struganjem reznim pločicama od TM i CBN sa istom geometrijom ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i režimima rezanja.

Najveći uticaj na parametre hrapavosti ima pomak, a brzina rezanja i dubina rezanja imaju neodređen uticaj. Povećanjem pomaka pogoršava se hrapavost obrađene površine. Treba naglasiti da su parametri hrapavosti ( $R_a$ ,  $R_{tm}$ ) manji kod reznih pločica od CBN u odnosu na rezne pločice od TM.

### 7.7. Matematički modeli otpora rezanja, parametara hrapavosti i temperature rezanja

Na osnovu eksperimentalnih rezultata pri obradi sa alatom od TM ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), dati tabelama 19, 21, 23, 25, 27 i 29 određeni su matematički modeli glavnog otpora rezanja  $F_1$ , otpora prodiranja  $F_2$ , parametri hrapavosti obrađene površine ( $R_a$  i  $R_{atm}$ ), i temperaturu u zoni rezanja ( $Q$ ) definisani su tabelama 20, 22, 24, 26, 28 i 30 i glase:

$$F_1 = 565.6459 \cdot v^{0.14182} \cdot s^{0.37591} \cdot a^{0.77141}$$

$$F_2 = 861.8504 \cdot v^{0.21422} \cdot s^{0.17779} \cdot a^{0.57860}$$

$$F_3 = 2572.8403 \cdot v^{-0.02166} \cdot s^{0.14922} \cdot a^{1.32511}$$

$$R_a = 7.4431 \cdot v^{-0.04522} \cdot s^{0.70557} \cdot a^{0.17458}$$

$$R_{tm} = 20,9827 \cdot v^{-0,03234} \cdot s^{0,43005} \cdot a^{0,25051}$$

$$Q = 89,7785 \cdot v^{0,29845} \cdot s^{0,10286} \cdot a^{0,03694}$$

(7.1)

Svi matematički modeli zadovoljavaju uslov adekvatnosti modela.

Na osnovu ocene signifikantnosti faktora za TM sve tri odabrane nezavisno promenljive imaju signifikantan uticaj na promenu glavnog otpora rezanja  $F_1$ . Najveći uticaj na promenu otpora rezanja  $F_1$  i  $F_2$  ima dubina rezanja, zatim korak i na kraju brzina rezanja. Kod modela za otpor  $F_3$  najveći uticaj ima dubina rezanja, zatim korak dok brzina rezanja nema signifikantan uticaj. Na oba modela parametara hrapavosti ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ), najveći uticaj ima korak, pa dubina rezanja dok brzina rezanja nema signifikantan uticaj na parametre hrapavosti ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ). Kod modela temperature rezanja (Q) uticajna su sva tri faktora. Njihovi uticaji se mogu poredati po sledećem redosledu uticaja: najuticajnija je dubina rezanja, zatim brzina rezanja, a najmanje uticaja ima pomak.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata za alat od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) prikazanih u tabelama 31, 33, 35, 37, 39 i 41, i njihove obrade formirani su matematički modeli za otpore rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$ ), parametre hrapavosti obrađene površine ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ) i temperaturu u zoni rezanja (Q) i definisani su u tabelama (32, 34, 36, 38, 40 i 42) i glase:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= 2842,9748 \cdot v^{-0,15868} \cdot s^{0,73066} \cdot a^{0,70672} \\
 F_2 &= 1421,4808 \cdot v^{-0,05217} \cdot s^{0,574037} \cdot a^{0,49554} \\
 F_3 &= 1560,2933 \cdot v^{-0,16103} \cdot s^{0,39939} \cdot a^{1,02816} \\
 R_a &= 2,8264 \cdot v^{-0,04471} \cdot s^{0,58975} \cdot a^{0,00716} \\
 R_{tm} &= 9,0036 \cdot v^{-0,3717} \cdot s^{0,37380} \cdot a^{-0,6148} \\
 Q &= 53,9354 \cdot v^{0,28666} \cdot s^{0,16299} \cdot a^{0,06957}
 \end{aligned}
 \tag{7.2}$$

Svi matematički modeli zadovoljavaju uslov adekvatnosti modela.

Prema oceni signifikantnosti utvrđeno je da na komponentu otpora  $F_1$  značajno utiču korak i dubina rezanja dok brzina rezanja nema signifikantan uticaj u izvedenom eksperimentu. Analizom modela otpora  $F_2$  vidi se da najveći uticaj ima korak, zatim dubina rezanja, dok brzina rezanja nema signifikantan uticaj u izvedenom eksperimentu. Na komponentu otpora  $F_3$  najuticajniji je korak, dubina rezanja dok brzina rezanja nema signifikantan uticaj. Kod modela srednjeg aritmetičkog odstupanja profila  $R_a$  najveći uticaj ima pomak, zatim dubina rezanja, dok brzina rezanja nema signifikantan uticaj u modelu.

Model parametra hrapavosti obrađene površine ( $R_{tm}$ ) pokazuje da parametar hrapavosti raste sa rastom koraka, dok pri povećanju dubine rezanja i brzine rezanja opada. Prema oceni

signifikantnosti to je istovremeno i redosled njihovog uticaja na model parametra hrapavosti ( $R_{tm}$ ).

U modelu temperature rezanja ( $Q$ ) sva tri parametra pokazuju signifikantan uticaj (brzine rezanja, pomak, i dubine rezanja). Temperatura rezanja ( $Q$ ) raste sa povećanjem brzine rezanja, koraka, i dubine rezanja, a to je istovremeno i redosled veličine njihovog uticaja.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata prikazanih u tabeli. 43, 45, 47, 49, 51 i 53, i njihove obrade alatom od TM ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) dobijeni su matematički modeli za otpore rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$ ), parametre hrapavosti obrađene površine ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ) i temperaturu u zoni rezanja ( $Q$ ), a koji su definisani tabelama (44, 46, 48, 50, 52 i 54) i glase:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= 857.9038 \cdot v^{-0.00713} \cdot s^{0.40196} \cdot a^{0.63773} \\
 F_2 &= 174,3623 \cdot v^{0.55557} \cdot s^{0.42175} \cdot a^{0.61967} \\
 F_3 &= 191.1774 \cdot v^{0.33243} \cdot s^{0.16645} \cdot a^{0.96013} \\
 R_a &= 0.7262 \cdot v^{-0.28368} \cdot s^{0.41463} \cdot a^{0.21597} \\
 R_{tm} &= 19.7153 \cdot v^{-0.05475} \cdot s^{0.31413} \cdot a^{0.20658} \\
 Q &= 160,5185 \cdot v^{0,17852} \cdot s^{0,17706} \cdot a^{0,17271}
 \end{aligned}
 \tag{7.3}$$

Svi matematički modeli zadovoljavaju uslov adekvatnosti.

Prema oceni signifikantnosti uticajnih faktora sve tri odabrane nezavisno promenljive imaju signifikantan uticaj na promenu glavnog otpora rezanja  $F_1$ , pri čemu po intenzitetu najveći uticaj ima dubina rezanja, zatim korak i na kraju brzina rezanja. Kod modela otpora prodiranja  $F_2$ , uticajna su sva tri faktora. Najveći uticaj na otpor prodiranja  $F_2$  ima dubina rezanja, zatim brzine rezanja, a korak ima najmanji uticaj. Kod modela otpora pomoćnog kretanja  $F_3$  uticajna su sva tri faktora. Najveći uticaj na otpor  $F_3$  ima dubina rezanja, zatim brzina rezanja i na kraju pomak. Kod modela hrapavosti obrađene površine  $R_a$  i  $R_{tm}$  uticajna su sva tri ulazna faktora. Kod oba parametra hrapavosti  $R_a$  i  $R_{tm}$  najveći uticaj ima korak, zatim brzina rezanja dok dubina rezanja ima najmanji uticaj. Što se tiče modela temperature rezanja  $Q$  uticajna su sva tri ulazna faktora. Njihovi uticaji su vrlo bliski ali se mogu poređati po sledećem redosledu uticaja: najuticajnija je brzina rezanja, zatim korak a najmanje uticaja ima dubina rezanja.

Uz primenu alata od CBN ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ), i na osnovu eksperimentalnih rezultata prikazanih u tabelama 55, 57, 59, 61, 63 i 65, i njihove obrade formirani su matematički modeli za otpore rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$ ), parametre hrapavosti obrađene površine ( $R_a$  i  $R_{tm}$ ) i temperaturu u zoni rezanja ( $Q$ ) definisani su prema tabelama (56, 58, 60, 62, 64 i 66) i glase:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= 3486,3422 \cdot v^{-0,30780} \cdot s^{0,44306} \cdot a^{0,72724} \\
 F_2 &= 855,4927 \cdot v^{-0,07196} \cdot s^{0,39354} \cdot a^{0,35054} \\
 F_3 &= 769,1679 \cdot v^{-0,16478} \cdot s^{0,11528} \cdot a^{0,89518} \\
 R_a &= 2,5258 \cdot v^{-0,12398} \cdot s^{0,20217} \cdot a^{0,064866} \\
 R_{tm} &= 9,5757 \cdot v^{-0,07966} \cdot s^{0,14995} \cdot a^{0,05012} \\
 Q &= 131,6211 \cdot v^{0,14462} \cdot s^{0,09724} \cdot a^{0,24987}
 \end{aligned}
 \tag{7.4}$$

Svi matematički modeli zadovoljavaju uslov adekvatnosti modela.

Što se tiče komponente otpora  $F_1$  najveći uticaj pokazuje dubina rezanja, zatim korak, i na kraju brzina rezanja. Analizom modela sile  $F_2$  vidi se da najveći uticaj ima korak, pa zatim dubina rezanja. Prema oceni signifikantnosti brzina rezanja nije pokazala signifikantni uticaj na model otpora  $F_2$ . Na model otpora  $F_3$  prema oceni signifikantnosti uticajna su sva tri faktora u modelu. Na osnovu modela otpora  $F_3$  se vidi da najveći uticaj ima dubina rezanja, zatim pomak pa dubina rezanja, dok brzina rezanja najmanje značajno utiče na model.

Prema oceni signifikantnosti faktora sve tri odabrane nezavisno promenljive imaju signifikantan uticaj na model srednjeg aritmetičkog odstupanja profila  $R_a$ . Najveći uticaj ima korak, zatim brzina rezanja dok najmanji uticaj ima dubina rezanja. Kod modela za parametar hrapavosti  $R_{tm}$  najveći uticaj ima dubina rezanja, zatim korak dok brzina rezanja nema značajan uticaj. U modelu temperature rezanja  $Q$  uticajna su sva tri faktora. Najuticajnija je dubina rezanja, zatim brzine rezanja, a najmanje uticaja ima pomak.

## 7.8. Uticaj alatnog materijala

Veličine komponenti otpora rezanja zavise i od vrste materijala alata, a kao posledica različitih njihovih fizičko - mehaničkih svojstava (posebno koeficijenta trenja na kontaktnim površinama alata). Pri obradi kaljenih čelika nastala temperatura rezanja u zoni rezanja je direktno povezana sa njegovom tvrdoćom, tako da se može uočiti i nastanak usijane strugotine. Pošto je veća toplotna provodljivost kubnog bornitrida ( $\lambda = 60 - 120 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ ) u odnosu na tvrde metale, niža je i temperatura rezanja pri obradi ovim alatima.

Ako se uticaj alatnog materijala posmatra sa aspekta obrade navedenog čelika sa alatom iste geometrije pri istim uslovima obrade tako da se iz tabela, može uočiti prisustvo porasta



komponenti otpora rezanja sa geometrijom  $\gamma = 0^\circ$ ;  $F_1$  ( $F_1 = 0,8 - 1,6$  puta),  $F_2$  ( $F_2 = 1,2 - 5,2$  puta),  $F_3$  ( $F_3 = 1,0 - 3,7$  puta),  $R_a$  ( $R_a = 0,7-2,0$  puta),  $R_{tm}$  ( $R_{tm} = 0,6-1,9$  puta) i Q ( $Q = 1,1-1,7$  puta) pri obradi alatom od tvrdog metala TM u odnosu na CBN. Ukoliko se posmatra primena alata od TM i CBN, može se uočiti prisustvo porasta otpora rezanja sa geometrijom  $\gamma = 0^\circ$ ;  $F_1$  ( $F_1 = 0,8 - 1,6$  puta),  $F_2$  ( $F_2 = 1,2 - 5,2$  puta),  $F_3$  ( $F_3 = 1,0 - 3,7$  puta),  $R_a$  ( $R_a = 0,7-2,0$  puta),  $R_{tm}$  ( $R_{tm} = 0,6-1,9$  puta) i Q ( $Q = 1,1-1,7$  puta) pri obradi alatom od tvrdog metala TM u odnosu na alat od CBN.

Potrebno je istaći da su ove razlike naročito izražene pri obradi struganjem sa režimima  $v = 160$  (m/min),  $s_{max} = 0,2$  (mm/o) i  $a_{max} = 0,5$  (mm) i sa reznim pločicama čija je geometrija ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ). Tada postoji porast sila  $F_1$  ( $F_1 = 1,5$  puta),  $F_2$  ( $F_2 = 2,5$  puta),  $F_3$  ( $F_3 = 2,3$  puta),  $R_a$  ( $R_a = 1,8$  puta), i Q ( $Q = 1,4$  puta) kod reznih pločica od TM u odnosu na rezne pločice od CBN. Kod obrade sa reznim pločicama čija je geometrija ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i istim režimima obrade ( $v = 160$  m/min,  $s_{max} = 0,2$  mm/o i  $a_{max} = 0,5$  mm) rast sila  $F_1$  ( $F_1 = 1,2$  puta),  $F_2$  ( $F_2 = 4,9$  puta),  $F_3$  ( $F_3 = 2,3$  puta),  $R_a$  ( $R_a = 2,8$  puta), i Q ( $Q = 2,5$  puta) kod reznih pločica od TM u odnosu na rezne pločice od CBN. Generalno može se zaključiti da se pri obradi kaljenih čelika 90MnCrV8 alatom od CBN javljaju manji otpori rezanja u odnosu na alat od TM.

Kada se analizira uticaj alatnog materijala na hrapavost obrađene površine, moguće je zaključiti:

Najveća hrapavost obrađene površine se postiže pri korišćenju alata od TM u oba slučaja kada je geometrija  $\gamma = 0^\circ$ , i kada je  $\gamma = -6^\circ$  u odnosu na alat od CBN. Alat od CBN pokazuje bolje rezultate pri obradi kaljenih čelika u odnosu na alat od TM jer se postiže i nešto niža hrapavost obrađene površine.

## 7.9. Uticaj grudnog ugla alata

Geometrija reznog dela alata je faktor sa jakim uticajem na postojanost alata i hrapavost obrađene površine. Grudni ugao  $\gamma$  utiče na sabijanje strugotine i njegova optimalnu vrednost je vezana za tvrdoću i plastičnost materijala. Leđni ugao ( $\alpha$ ) ima direktan uticaj na habanje leđne površine alata a veličina napadnog ugla ( $\kappa$ ) definiše debljinu strugotine .

Grudni ugao geometrijski gledano nema direktnog uticaja na hrapavost obrađene površine, međutim, indirektno sa povećanjem grudnog ugla, olakšava se odvođenje strugotine i time se smanjuju i elastične deformacije obrađene površine što je rezultat smanjenja hrapavosti.

Uticaj grudnog ugla alata na izlazne elemente procesa obrade je analiziran kroz analizu smanjenja ugla  $\gamma = 0^\circ$  na  $\gamma = -6^\circ$ , pri obradi alatom od TM i CBN. Tako pri obradi alatom od TM smanjenje grudnog ugla dovodi do porasta glavnog otpora  $F_1$ , nešto veći porast izraženiji je kod otpora  $F_2$  dok je kod otpora  $F_3$  manje izraženiji. Obrada alatom od CBN u većini eksperimenata

dovodi do povećanja glavnog otpora rezanja  $F_1$  za 10 %, odnosno otpora prodiranja  $F_2$  za oko 30 % kada se smanjuje grudni ugao sa  $\gamma = 0^\circ$  na  $\gamma = -6^\circ$ . Treba naglasiti da postoje i uslovi obrade koji dovode do smanjenja sila a to je povezano sa dubinom rezanja.

Grudni ugao utiče i na promenu hrapavosti obrađene površine, što su pokazala izvedena istraživanja. Naime, pri obradi kaljenog čelika 90MnCrV8 alatom od TM, pri smanjenju grudnog ugla sa  $\gamma = 0^\circ$  na  $\gamma = -6^\circ$  nastaje povećanje hrapavosti obrađene površine u razmatranim uslovima obrade. Za razliku od alata od TM, primena alata od CBN dovodi do nastanka boljeg kvaliteta obrađene površine, a i manje hrapavosti obrađene površine. Na osnovu rezultata prikazanih u tabelama, može se konstatovati se da promena grudnog ugla sa  $\gamma = 0^\circ$  na  $\gamma = -6^\circ$  uslovljava nastanak manje hrapavosti obrađene površine.

Negativni grudni ugao daje više temperature rezanja kod TM, a kod CBN je obrnuto.

#### 7.10. Uticaj režima obrade

Iz literature je poznato da sa povećanjem tvrdoće materijala obratka komponenta otpora rezanja  $F_1$ , i  $F_3$  sporije raste u odnosu na komponenta  $F_2$  da bi se pri tvrdoći od oko 58 HRC uspostavila relacija da je  $F_2$  veća od  $F_1$  i  $F_3$  što potvrđuju i izvedena istraživanja u zavisnosti od režima rezanja.

Povećanje elemenata režima rezanja uslovljava i povećanje temperature rezanja, a time i nastanak intenzivnijeg habanja alata i smanjenje njegove postojanosti, dok sa druge strane dolazi do omekšavanja materijala što pogoduje procesu rezanja. Kada je reč o uticaju dubine rezanja, moguće je izvesti dva zaključka:

- a) teorijski dubina rezanja ne utiče direktno na hrapavost površine, i
- b) uticaj dubine rezanja je indirektno povezan preko formiranja naslaga na alatu, deformacije strugotine, temperature rezanja, sila rezanja i vibracija.

Pri korišćenju alata od TM ( $\gamma = -6^\circ$ ), izraženiji je uticaj promene dubine rezanja na promenu komponenata otpora rezanja i hrapavosti obrađene površine. Tako da povećanjem dubine rezanja nastaje porast  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $R_a$ ,  $R_{tm}$  i  $Q$ .

Najveći uticaj promene dubine rezanja na promenu sila rezanja je izražen pri radu alatom od CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ), uz napomenu da je promena hrapavosti najniža.

Korak utiče direktno proporcionalno na hrapavost, tj. povećanjem koraka povećava se hrapavost obrađene površine. Neograničeno smanjenje koraka ne daje rezultate daljeg smanjenja hrapavosti, nego kod nekih graničnih veličina koraka koja zavisi od veličine radijusa zaobljenja vrha alata, hrapavost ostaje približno konstantna na minimalnoj vrednosti.

Pri obradi alatom od TM ( $\gamma=0^\circ$ ,  $\gamma=-6^\circ$ ), povećanjem pomaka ( $s$ ) nastaje manji rast sila rezanja da bi porast hrapavosti bio izraženiji pri manjim dubinama rezanja.

Poređenjem rezultata dobijenih pri obradi alatom od CBN, može se zaključiti da povećanje pomaka ( $s$ ) dovodi do sporijeg porasta sila rezanja  $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$ . Uticaj pomaka pri obradi alatom CBN ( $\gamma = -6^\circ$ ) dovodi do povećanja sila rezanja  $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$ .

Pitanje uticaja brzine rezanja je povezano sa nastankom naslaga na reznom alatu i njihovom uticaju na hrapavost obrađene površine. Sa povećanjem brzine rezanja menja se i karakter nastanka strugotine, tj. smanjuju se plastične deformacije što utiče na smanjenje hrapavosti površina. Treba istaći da neograničeno povećanje brzine rezanja ne utiče na dalje smanjenje hrapavosti jer se istovremeno povećava habanje alata, čime se hrapavost održava na približno konstantnoj veličini.

Objašnjenje za ovaj fenomen treba tražiti i procesima interakcije ovog alatnog materijala i obrađivanog materijala.

Na slici 148 se vidi da širina pojasa habanja na leđnoj površini reznog alata je znatno veća kod reznih pločica od TM u odnosu na rezne pločica od CBN-a. Habanje alata se menja u toku vremena rezanja, a odgovarajuće sile rezanja i temperatura rezanja, se kontinualno povećavaju zbog većih kontaktnih površina između alata i obratka.

Alat od CBN je postojaniji u odnosu na TM, a i fenomeni habanja alata se međusobno razlikuju, što se manifestuje sporijim habanjem i grudne i leđne površine alata pa time i boljim kvalitetom obrađene površine kaljenog čelika.

Pri kontinuiranom struganju sa reznim pločicama od CBN kriva monotono raste što se može objasniti pojavom mikro krzanja na sečivu zbog velike krtosti CBN. Sa slike 148. se vidi da kod obrade struganjem kaljenih čelika kriva habanja reznih pločica od TM je puno strmija i ovaj uspon se povećava sa povećanjem vremena obrade rezanjem, nego pri obradi reznim pločicama od CBN. Zato je i postojanost nekoliko puta veća kod reznih alata od CBN. Područje u kome dolazi do intenzivnog habanja definiše vremenski interval kada dolazi do intenzivnog mikro krzanja sečiva, kao posledica povećanja otpora rezanja pri obradi struganjem kaljenih čelika. Uvećano mikro krzanje se odražava na lošiji kvalitet obrađene površine, što može dovesti i do loma rezne pločice. Naravno, intenzitet habanja će biti puno veći kod reznih pločica od TM u odnosu na reznim pločicu od CBN.

### 7.11. Uticaj temperature rezanja

Temperatura rezanja ima negativan uticaj na kvalitet površine i povećava habanje alata. Zagrevanje obratka prilikom procesa u neku ruku ima i pozitivan učinak, poznato je da se porastom temperature materijal omekša, što olakšava proces rezanja. Povećanjem vrednosti elemenata režima rezanja dolazi i do povećanja temperature rezanja. Skoro se sva mehanička energija prilikom procesa rezanja transformiše u toplotnu energiju. Porast temperature prilikom procesa

obrabe nastaje kao posledica plastične deformacije kaljenog čelika pri obradi, trenja između grudne površine i strugotine kao i trenja između ledne površine alata i obratka. Temperatura rezanja prodire ispod obrađene površine obratka do određene dubine. Usled visokih temperatura nastalih tokom procesa obrade, dolazi do promene mikrostrukture i tvrdoće u površinskom sloju obratka. Mikrostruktura obrađene površine može se značajno razlikovati od stanja površine obratka pre obrade. Međutim kontrolisanjem ulaznih parametara ovo se može uspešno sprečiti. Vrednosti parametra obrade značajno utiču na razvoj temperature rezanja. Brzina rezanja i korak imaju veći uticaj na temperaturu, dok dubina rezanja utiče najmanje. Sa povećanjem svih ovih ulaznih parametara obrade dolazi i do povećanja temperature rezanja.

Analiza uticaja parametara modela određenih preko veštačkih neuronskih mreža se poklapa sa podacima dobijenim preko centralnog kompozicionog plana, ali ipak daju neuronske mreže nešto bolje poklapanje merenih i modelskih vrednosti za izlazne parametre. Tu gde je poklapanje lošije može se još poraditi na neuronskoj mreži

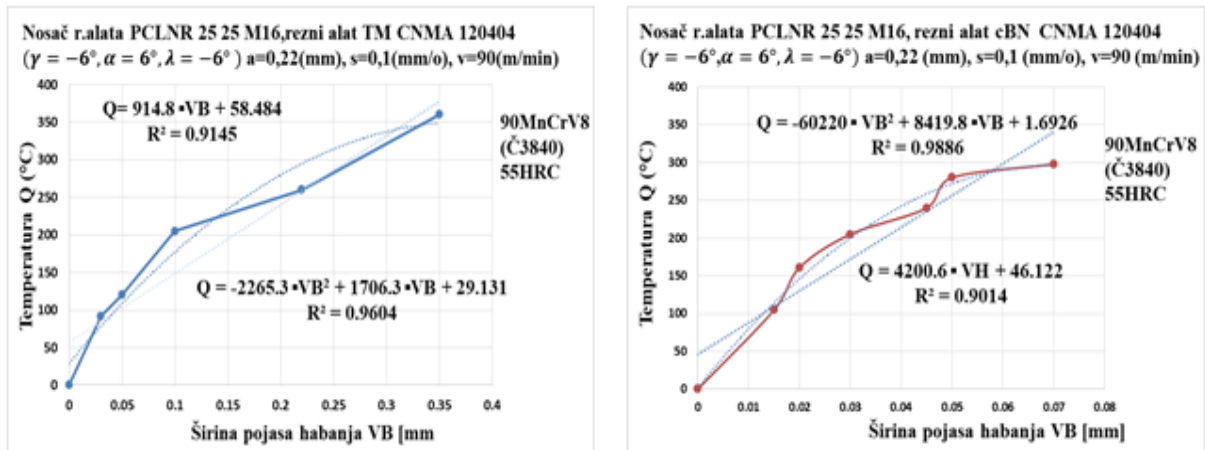
### **7.12. Uticaj habanja alata**

Vidi se da porast širine pojasa habanja reznog alata je znatno brži kod reznih pločica od TM u odnosu na reznih pločica od CBN-a.

Na osnovu dijagrama zavisnosti temperature rezanja može se videti znatno veći porast temperature pri obradi sa alatom od TM što dovodi brzo i do njegovog otkaza. Temperature kod CBN je znatno niža i ima manji porast nego kod TM

Na osnovu rezultata merenja, na slici 150. uporedno su prikazane promena komponenti otpora rezanja u toku vremena, pri obradi kaljenog čelika struganjem reznim pločicama od TM i CBN pri istoj geometriji reznog alata ( $\gamma = -6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ ) i jednakim režimima obrade. Vidi se da su u ovom slučaju znatno veće vrednosti komponenti  $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$  kod reznih pločica od TM u odnosu na rezne pločice od CBN-a. i kod reznih pločica od TM i rezne pločice od CBN-a najveća sila je  $F_2$ , dok su manje sile  $F_1$  i  $F_3$ . Veličina komponenti sile rezanja je zavisna od povećanju habanje alata, tako da se površinska hrapavost malo pogoršava (povećava) sa početkom habanja alata kako kod reznih pločica od TM tako i kod reznih pločica CBN-a. Habanje reznog alata utiče na sile rezanja i obrnuto. Istraživanja vezana za habanje alata pokazuju da sile rezanja, hrapavost površine i temperatura rezanja imaju tendenciju rasta sa habanjem alata pri obradi struganjem kaljenog čelika.

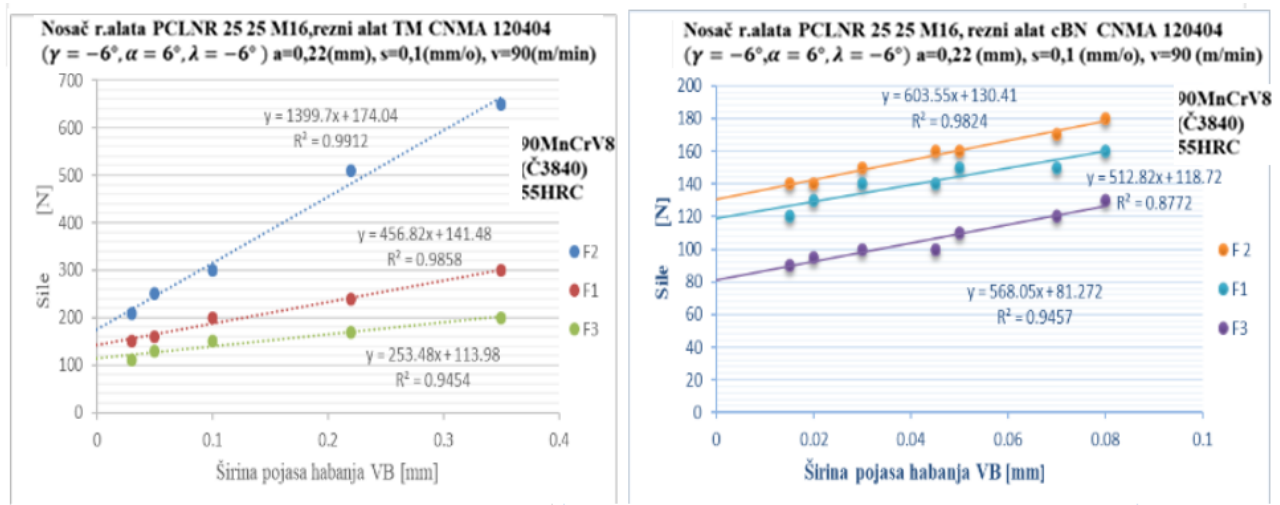
Dijagram zavisnosti temperature rezanja  $Q$  i širine pojasa habanja  $VB$  pri obradi kaljenog čelika 90MnCrV8 reznim pločicama od TM i CBN pri geometriji  $\gamma = -6^\circ$ , i konstantnim režimima obrade je prikazan na slici 171.



Slika 171. Dijagram zavisnosti temperature rezanja  $Q$  i širine pojasa habanja  $VB$  pri obradi kaljenog čelika reznim pločicama od TM i CBN pri geometriji  $\gamma = -6^\circ$ , i konstantnim režimima obrade

Na osnovu dijagrama na slici 171. se vidi da postoji zavisnost između temperature rezanja i širine pojasa habanja koja se može predstaviti u obliku linearne i polinomne zavisnosti sa visokom vrednošću koeficijenta korelacije, većim za polinomne zavisnosti gde je za TM koeficijent korelacije  $R = 0,96$ ; a za CBN je koeficijent korelacije  $R = 0,99$ .

Dijagram zavisnosti otpora rezanja  $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$  i širine pojasa habanja ( $VB$ ) pri obradi na strugu kaljenog čelika 90MnCrV8 reznim pločicama od TM i CBN pri istoj geometriji i konstantnim režimom obrade prikazan je na slici 172.



Slika 172. Dijagram zavisnosti otpora rezanja  $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$  i širine pojasa habanja ( $VB$ ) pri obradi na strugu kaljenog čelika reznim pločicama od TM i CBN pri istoj geometriji i konstantnim režimom obrade

Na osnovu dijagrama na slici 172. se vidi da postoji zavisnost između komponenti otpora rezanja i širine pojasa habanja koja se može predstaviti u obliku linearne zavisnosti sa visokom vrednošću koeficijenta korelacije, za oba ispitivana materijala alata TM i CBN.

## 8. ZAKLJUČAK

Modelovanje parametara procesa obrade je složen zadatak, jer je potrebno poznavati proces obrade, karakteristike mašine alatke, karakteristike alata, empirijske jednačine za razvoj realnih ograničenja, poznavanje matematičke i numeričke tehnike itd. Proces obrade struganjem je složen proces zbog uticaja velikog broja faktora, kao što su visoke temperature rezanja, otpori rezanja, vibracije, povećan intenzitet habanja itd. Otpori rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$ ), parametri hrapavosti ( $R_a$ ,  $R_{tm}$ ), i temperatura u zoni rezanja ( $Q$ ) su bili realan izbor za posmatrane rezultate obrade i za date uslove. Za ulazne parametre obrade su izabrani: brzina rezanja ( $v$ ) dubina rezanja ( $a$ ) i pomak ( $s$ ). Promenljive ulazne veličine u eksperimentu su bile takođe i materijal alata i grudni ugao alata, a njihov uticaj na pomenute izlazne veličine je takođe razmatran. Rezultati istraživanja mogu se primeniti u industrijskoj praksi pri obradi kaljenih čelika tvrdoće iznad 55 HRC.

Kao rezultat obavljenih istraživanja mogu se izvesti zaključci:

1. Uspešno su izvršena eksperimentalna istraživanja i određeni matematički modeli otpora rezanja ( $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$ ), parametara hrapavosti ( $R_a$ ,  $R_{tm}$ ), i temperature u zoni rezanja ( $Q$ ) primenom centralnog kompozicionog trofaktornog plana eksperimenta čime se čime se obezbedio i dpvoljan broj eksperimenata za model na bazi neuronskih mreža u funkciji elemenata režima obrade, za alate od dve vrste materijala (tvrđog metala i kubnog bornitrida) i sa dve odabrane geometrije ( $\gamma=-6^\circ$  i  $\gamma=0^\circ$ ). Za svaki od navedenih matematičkih modela izvršena je i ocena adekvatnosti modela, signifikantnosti ulaznih parametara i tačnosti modela za pomenute izlazne parametre procesa. Na kraju je vršena provera slaganja izmerenih i modelskih vrednosti koja je pokazala zadovoljavajuće poklapanje za modele dobijene pomoću neuronskih mreža i pomoću trofaktornog plana eksperimenta.
2. Uticaj alatnog materijala je analiziran kroz primenu dve vrste materijala alata (TM i CBN) preko uticaja elemenata režima rezanja na otpore rezanja, parametre kvaliteta obrađene površine i temperature rezanja. Poređenjem dobijenih vrednosti otpora rezanja moguće je konstatovati da se niže vrednosti temperature rezanja i otpora rezanja dobijaju pri korišćenju alata od CBN u poređenju sa alatom od TM. Ovo se može objasniti da pri tome nastaju različiti uslovi trenja i sporije habanje alata. Promena komponenti otpora rezanja u vremenu se takođe menja, a veće vrednosti odnosno i veći porast otpora rezanja se postiže pri struganju sa alatom od TM. Takođe je uočeno da se pri obradi kaljenog čelika 90MnCrV8 koji ima tvrdoću 55 HRC, ne dobija najveća komponenta glavnog otpora rezanja  $F_1$  već komponenta otpora prodiranja  $F_2$ , kao što je to pri obradi mekših materijala.
3. Otpori rezanja su najviše pod uticajem pomaka i dubine rezanja jer se njihovim povećanjem povećava presek strugotine pri obradi a time i otpori, što se slaže se drugim istraživanjima.

4. Na povećanje temperature rezanja utiče povećanje sva tri elementa režima rezanja. Viša temperatura se dobija pri rezanju sa negativnom geometrijom alata. Takođe se viša temperatura dobija i pri obradi sa alatom od TM. Sa habanjem alata odnosno vremenom rezanja postiže se i viša temperatura na alatu. Ako se posmatra materijal alata znatno viša temperatura u vremenu rezanja se postiže kod materijala alata TM.
5. Geometrijski posmatrano grudni ugao alata nema direktnog uticaja na hrapavost obrađene površine, međutim indirektno sa povećanjem grudnog ugla, olakšava se odvođenje strugotine, a time se smanjuje trenje i temperatura na kontaktnim površinama alata, što takođe utiče na smanje deformacije obrađene površine, a odražava se na smanjenje parametara hrapavosti obrađene površine. Pri obradi alatom od CBN se postiže bolja hrapavost obrađene površine sa smanjenjem grudnog ugla što se dovodi u vezu sa lakšim odvođenjem strugotine.
6. Pomak pri obradi direktno proporcionalno utiče na hrapavost obrađene površine, tj. njegovim povećanjem povećava se hrapavost obrađene površine. Uticaj pomaka je bitno povezan sa radiusom zaobljenja vrha alata a to ima veliki uticaj na dužinu kontakta i specifično opterećenje sečiva, odnosno sa promenom otpora rezanja i temperaturom u zoni rezanja, a dalje i njenim uticajem na habanje alata i kvalitet obrađene površine.
7. Uticaj brzine rezanja je povezan sa karakterom nastanka strugotine i brzinom oticanja strugotine. Pri povećanju brzine rezanja dolazi do smanjenja plastičnih deformacija, odnosno smanjenja hrapavosti, što potvrđuju rezultati obrade sa alatom CBN i TM. Uticaj brzine rezanja se pokazao i u smislu povećanja temperature rezanja i habanja alata, a i preko neznatnog uticaja na hrapavost obrađene površine. Brzina rezanja ima veći uticaj na otpore rezanja kod alata TM nego kod alata od CBN. Uticaj dubine rezanja se vidi i na postojanost alata, koja je veća razumljivo kod alata od CBN.
8. Uticaj dubine rezanja nije direktno vezan za hrapavost površine, ali jeste indirektno preko formiranja naslaga na alatu, deformacije strugotine, temperature i otpora rezanja. Uticaj dubine rezanja je izraženiji kod primene alata od CBN u odnosu na TM, što se može objasniti time da je dubina rezanja od  $a = 0,5$  mm granična dubina za alat od CBN.
9. Sa snimaka habanja alata se može videti značajno veće habanje kod TM u odnosu na CBN za jednaki vremenski period. Habanje pločice od CBN za mnogo duži vremenski period je neznatno pa se ovaj materijal alata preporučuje za obradu kaljenih čelika. Ovo takođe potvrđuju i dijagrami zavisnosti promene širine pojasa habanja na leđnoj površini VB sa vremenom rezanja. Promena otpora rezanja i temperature u vremenu je takođe znatno veća kod alata TM u odnosu na alat od CBN
10. Pitanje habanja alata u procesu obrade teškoobradljivih čelika je veoma kompleksno. Tako i objašnjenje stanja obrađene površine može da se dovede u vezu sa fenomenima habanja alata..



11. Na osnovu dobijenih rezultata mogu se odrediti uslovi obrade pri kojima će se ostvariti traženi kvalitet obrađene površine, niža temperatura rezanja, manji otpori rezanja ili manje habanje alata.
12. Na osnovu grafičkog prikaza i analize procentualne greške odstupanja merenih vrednosti od modelskih pomoću neuronske mreže se videti dobro poklapanje testiranih, mernih i modelskih vrednosti. Ovo poklapanje modelskih vrednosti kod neuronskih mreža je malo bolje nego kod modela na osnovu faktornog plana eksperimenta.

### 8.1. Pravci budućih istraživanja

Buduća istraživanja, u području modelovanja procesa struganja reznim pločicama od tvrdog metala i reznim pločicama od CBN teskoobradljivih (kaljenih) čelika se mogu podeliti u nekoliko pravaca:

- Kako habanje alata za obradu utiče na veličinu drugih parametara procesa (otpore rezanja, temperature rezanja, procesa nastajanja strugotine, i sl.), to se kao mogućnost za dalja istraživanja postavlja iznalaženje modela koji će uzeti u obzir i druge parametre procesa osim istraživanih. Formiranjem novih modela stvorila bi se mogućnost predikcije procesa obrade sa aspekta postizanja optimalnih parametara obrade.

- Zbog značajnog uticaja habanja alata na izlazne performanse procesa struganja reznim pločicama od tvrdog metala TM i reznim pločicama od CBN (što je izraženo kod teškoobradljivih čelika), ispitivanje parametara habanja reznog alata i postojanost reznog alata bi trebalo proširiti na druge parove materijala alata i obratka.

- Uticaj geometrije reznog alata je jedan od važnih faktora koji utiče na izlazne performanse procesa obrade struganja teškoobradljivih (kaljenih) čelika i to bi takođe trebalo ispitati,

- Istraživanja u području u procesu modelovanja procesa obrade struganjem reznim pločicama od TM i reznim pločicama od CBN teškoobradljivih (kaljenih) čelika trebalo bi da uključuje i analizu druge materijale reznih alata kao i druge materijale obratka, kako bi doprineli stvaranju potpunije baze podataka o obradljivosti teškoobradljivih (kaljenih) čelika.

- Sto se tiče modelovanja na osnovu dobijenih eksperimentalnih podataka moguće je odrediti nove sveobuhvatnije neuronske mreže gde bi se našao model koji bi uključio rezne materijale i drugi model koji bi uključio i geometriju u jednu neuronsku mrežu koja bi bila model kompletno svih izvedenih istraživanja u doktorskoj disertaciji.

## LITERATURA

1. Davim J. P.: *Machining of hard materials*. Springer, London, (2011)
2. Byrne G., Dornfeld D., Denkena D.: *Advancing cutting technology*. CIRP Ann Manuf Technol, (2003), 52(2):483–507
3. Tanović Lj., Petrakov J., *Teorija i simulacija procesa obrade*, Mašinski fakultet, Beograd, 2007.
4. Vitor Augusto A. de Godoy, Anselmo Eduardo Diniz, *Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools*, 2012,
5. A.I. Fernández-Abia, J. Barreiro, J. Fernández-Larrinoa, L.N. López de Lacalle, A. Fernández-Valdivielso, O. M. Pereira.: *Behaviour of PVD coatings in the turning of austenitic stainless steels*, Procedia Engineering, 2012, vol.63, pp.133-141.
6. Sadik M. Ibrahim, *Wear development and cutting forces on CBN cutting tool in Hard Part turning of different hardened steels*, CIRP, 2012, pp.232-237.
7. Gaurav Bartarya, S .K. Choudhury, *Effect of cutting parameters on cutting force and surface roughness during finish hard turning AISI52100 grade steel*, CIRP, 2012, pp.651-656.
8. J. Kunderák, G. Varga, *Use of Coolants and Lubricants in Hard Machining*, Technical Gazette 20(6) (2013) 1081-1086
9. Asiltürk I, Akku H., *Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method*, University Turke, 2011
10. Slomski, J. , *Einfluss von CBN-Hartdrehen an die Dauerwählfestigkeit*. Werkstatt und Betrieb (1992)
11. Cebalo, R., Udiljak, T., *Trajanje i trošenje oštrice reznog alata-predviđanje i nadzor*, Zbornik radova 3. međunarodnog savjetovanja proizvodnoga strojarstva CIM 95, 1995
12. Аранзон, М. А. *Стоякость резцов из сверхтвердых материалов, Станки и инструмент*, 1977
13. Вобров, В. Ф., *Основы теории резания металлов*, Машиностроение, Москва, 1975
14. Вондаренко, Б. П., Халена, А. П., *Термодинамическое исследование взаимодействия нитрида вора с непеходными металлами*, 1977
15. Верещака, А. С., Вологитников, Г. В., *Анализ тенденций развития у овласты применения инструментов для резания труднообрабатываемых материялов*, Москва, 1989
16. Вульф, А. М., *Резание металлов*, Машиностроение 1973
17. Wit Grzesik, Berend Denkena, Krzysztof Żak, Thilo Grove, Benjamin Bergmann: *Energy consumption characterization in precision hard machining using CBN cutting tools*, Int J Adv Manuf Technol, (2016), 85:2839–2845 DOI 10.1007/s00170-015-8091-1

18. Демкин, В., Фактическая площадь контакта и жестокость тяжело нагруженных стиков, Техника, Киев, 1976
19. Желтонога, Л. А., Габриелов, И. Р., Особенности роста трещин в спейенны материалах, Порошковая металургия, 1979
20. Зорев, Н. Н., Вопросы механики процесса резания металлов, Машгиз, Москва 1956,
21. Карюк, Г. Г., Вочко, А. В. Барабан, В. П., Гексанут-Р и гексанут-А-новые инструментальные материалы, Станки и инструмент, 1977,
22. Коробов, М. Й., Прейс, А. Г, Электромеханический износ при трении у резании металлов, Техника, КИЕВ, 1976,
23. Kundrák J., Markopoulos A. P., Makkai T.: Assessment of tool life and wear intensity of CBN tools in hard cutting, Proceedings of the 8th international congress on precision machining - ICPM 2015, Novi Sad, 2015
24. Кононенко, В. И.: Износ инструментов при резании металокерамических материялов, Машиностроение, Москва, 1972,
25. Nedic, B., Eric M., Cutting temperature measurement and material machinability. Thermal Science, 2014. 18(suppl.1): p. 259-268.,
26. Крагельский, В. И. Демкин, Б., Определение фактической площади касания шерховатих роверхностей, Трение и износ в машинах, Москва, 1977,
27. 10 Chou Y K, Song H.: Tool nose radius effect on finish hard turning. J Mater Process Technol, (2014), 148(2):259–268
28. Резаников, А. Н., Тйеплофизика резания, Машиностроение, Москва, 1969,
29. Huang Y, Chou Y K, Liang S.: CBN tool wear in hard turning: a survey on research progress. Int J Adv Manuf Technol, (2007), 34(5):443–453
30. Grzesik W.: Advanced machining processes of metallic materials. Elsevier, Amsterdam, (2008)
31. Подураев, В. Н., Резание трудно обрабатываемих материялов, Висшая школа, Москва, 1974
32. Jovičić, M.: Obrada rezanjem teškoobradljivih metala i legura. Beograd 1992
33. Ekinović S., Oradljivost čeličnih materijala, Mašinski fakultet Zenica 1999,
34. Maňková, I. Vrabel, M., Beňo, J., Kovač, P., Gostimirovic, M.: Application of Taguchi method and surface response methodology to evaluate of mathematical models for chip deformation when drilling with coated and uncoated twist drills. In: Manufacturing Technology. Vol. 13, no. 4 (2013), p. 492-499. - ISSN 1213-2489
35. Kalajdžić M., Tehnologija mašinogradnje I, Mašinski fakultet, Beograd, 1989

36. Stanić, J., Merernje i kvalitet obrade, I deo, Tačnost mašinske obrade, Mašinski fakultet Beograd, 1986
37. Ivković, B., Teorija rezanja, Jugoslovenko društvo za tribologiju, Kragujevac, 1991
38. Vukelja, D., Uticaj mehaničkog i toplotnog opterećenja na promenu oblika reznog klina, Čačak, 1980
39. Šolaja, V., Habanje alata, Seminar RIO-II IAMA i Katedra za proizvodno mašinstvo, Mašinski fakultet Beograd, 1980
40. Radonjić, S., Šolaja V., Koncentrisano habanje alata i oblici strugotine, Savetovanje proizvodnog strojarstva, Opatija, 1987
41. Šolaja V., Radonjić, S., Lukić Ij., Prilog o koncentrisanom habanju reznog alata kao univerzalnom fenomenu, Bgd. 1986,
42. Šolaja V., Novi model korelacije habanja alata i kvaliteta površina pri struganju, Mašinstvo, 28 (1973) Bgd.
43. Mayer R, Köhler J, Denkena B. Influence of the tool corner radius on the tool wear and process forces during hard turning. *Int J Adv Manuf Technol*, 2012, 58(9–12):933–940
44. Lonardo, M., Lo Nostro, M., Condizioni di usura in utensili finitori sottoposti ad avanzamenti variabili, *Macchine*, 28 (1973)
45. Trajkovski S., Teorijska analiza na zavisnosti na rapavosti na obrabotenoj površini od geometrijskih parametri na rezačkom alat i pomestak, Godišen zbornik, Skopje, 1974
46. Chinchani S, Choudhury S K: Machining of hardened steel—experimental investigations, performance modelling and cooling techniques: a review. *Int J Mach Tools Manuf* (2015), 89:95–109
47. Sokolowski, A., P., Präzision in der Metallbearbeitung, VEB-Verlag Technik, Berlin 1955
48. Jovičić M, Tanović LJ., Stanić, J., Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.
49. Singh, K., Vajpayee, S., Evaluation of Flank Wear on Cutting Tools, *Wear*, 62, (1980).
50. Tönshoff H K, Arendt C, Ben Amor R.: Cutting of hardened steel. *CIRP Ann Manufact Technol*, (2000), 49(2):547–566
51. Jovičić, M., Primena novih materijala alata pri obradi teškoobradljivih metala i legura. Beograd, 1992.
52. Whitehouse, D. J., Approximate Methods of Assessment of Surface Topography Parameters, *Annals of the CIRP*, Vol.25/1/1976
53. Stanić, J., Kalajdžić M., Kovačević, R., Merna tehnika u tehnologiji obrade metala rezanjem, Građevinska knjiga, Beograd, 1983

- 
54. Dašić, P., Filipović, Đ., Ispitivanje funkcije srednje aritmetičkog ostupanja profila u pogonskim uslovima, Deseta JUPITER konferencija, Cavtat 1984
55. Woldman N. E., Gibbons R. C.: *Machinability and Machining of Metals*, New York, 1951
56. Tönshoff, H. K., Chryssolouris, G.: Einsatz kubischen Bornitrids (CBN) beim Drehen gehärteter Stähle., *Werkstatt und Betrieb*, 114 (1981) 1, S. 45-49.
57. Manokhin, A. C., Klimenko, S. A., Melniichuk, Y. A.: The Stressed -Strained State in the Chip Forming Zone during the Finish Turning of Workpieces of Hardened Steels, ISSN 1063-4576, *Journal of Superhard Materials*, 2011, Vol. 33, No. 5, pp. 333–339.
58. Lazoglu, I., Altintas, Y.: Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002.
59. Zuperl, U., Čuš F.: Optimization of cutting conditions during machining by using neural networks, *Production Engineering*, Maribor, 2000
60. Messner, G.: Modeling metal cutting process under consideration of elastic material properties, *Dissertation aus dem Werkzeugmaschinenlabor, Düsseldorf*, 2007.
- 61 E. Dow Whitney: *Ceramic Cutting Tools; Materials, Development and Performance*, Noyes Publications, New Jersey, 1994.
62. Filetin T, Kovačiček F., J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
63. Udiljak T: *Predavanja iz kolegija Postupci obrade odvajanjem*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010
64. B. Savković, P. Kovač, K. Gerić, M. Sekulić, K. Rokosz, Application of neural network for determination of cutting force changes versus instantaneous angle in face milling, *Journal of Production Engineering* 16 (2) (2013) 25-28.
65. Schmitz, T.; Davies, M. *The Dynamics of High-Speed Machining: ASPE tutorial*, 2003
66. Cajner F.: *Predavanja iz kolegija Alatni materijali*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
67. K. Suzuki, Y. Shiraishi, N. Nakajima, M. Iwai, S. Ninomiya, Y. Tanaka, T. Uematsu: Development of New PCD Made Up of Boron Doped Diamond Particles and its Machinability by EDM, online at: <http://www.scientific.net>, TransTech Publications, Switzerland, 2009.)
68. Gabrić I., Šitić S., *MATERIJALI II*, Sveučilište u Splitu, 2015
69. Jovanović M., Lazić V., Adamović D., Ratković N., *MAŠINSKI MATERIJALI*, Kragujevac, 2003.

- 
70. Krumes, D.: Toplinska obrada, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2000.
71. Narutaki, N., i dr., Tool wear and cutting temperature of CBN tools in machining of hardened steels. CIRP. Ann., 38 (1980) 1, 23.
72. SRPS EN ISO 1302: Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS). Označavanje površinske teksture u tehničkoj dokumentaciji proizvoda, 2013
73. SRPS EN 4287: Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS). Površinska tekstura: Metoda profila – termini, definicija i parametri površinske testure, 2014
74. Lin, C.Z., Lin, Y.Y.: Fundamental modeling for oblique cutting by thermo-elasticplastic FEM, International Journal of Mechanical Sciences, 2003.
75. Uhlmann E., Oyanedel Fuentes J. A., Keunecke M.: Machining of high performance workpiece materials with CBN coated cutting Thin Solid Films 518 (2009) 1451–1454 tools
76. Kovac, P., Rodic, D., Pucovsky, V., Savkovic, B., Gostimirovic M.: Application of fuzzy logic and regression analysis for modeling surface roughness in face milling. (2013), Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 24 (4), pp. 755-762
77. Brinksmeler E., Lucca D. A., Walter A., Chemical aspects of machining proces, Annals of the CIRP, 2003
78. Widman, L. E., Loparo, K. A.: Artificial intelligence, simulation, and modeling: a critical survey, (1989) 1-44.
79. Kovač P. Teorija obrade rezanjem, Tehničke nauke-udžbenik, FTN izdavaštvo, Novi Sad, 2014
80. Gostimirović, M.: Baze podataka obradnih procesa, Tehničke nauke-udžbenik, FTN izdavaštvo, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2013.
81. Singh, K., Vajpayee, S., Evaluation of Flank Wear on Cutting Tools, Wear, 62 1980
82. Stanić J., Teorija obrade metala I, Mašinski fakultet, Beograd, 1986
83. Kuruc M., Kusý M, Šimna V., Peterka J. Influence of machining parameters on surface topography of cubic boron nitride at rotary ultrasonic machining, Proceedings of the 8th International congress on precision machining - ICPM 2015, Novi Sad, 2015
84. Struzikiewicz G., Zębala W., Rumian K.: Application of Taguchi method to optimization of cutting force and temperature during turning of difficult to cut materials, Proceedings of the 8th international congress on precision machining - ICPM 2015, Novi Sad, 2015

- 
85. Ślusarczyk L., Matras A.: Influence of cutting data on the thin wall deformation in milling of difficult to cut materials, Proceedings of the 8th international congress on precision machining - ICPM 2015 Novi Sad, 2015
86. Höglund, U., Cutting Edge Wear in Microscale Physical Conditions – Wear Processes, Annals of the CIRP Vol. 25/1/1996.
87. Moore, M., A review of two-body abrasive wear, *Wear*, 27, 1974
88. Whitehouse, D. J., Approximate Methods of Assessment of Surface Topography Parameters, Annals of the CIRP, Vol.1996
89. Vukelja, D., Prilog studiji habanja alata pri obradi rezanjem, UDK 621.96.004.83 (07), 1975
90. Kovač, P., Sekulić, S., Sistemski prilazi primene višefaktornog plana eksperimenata na kvalitet obrađene površine pri završnoj obradi na strugu, Zbornik radova ICPR-81, Novi Sad, 1981
91. Stanić, J., Kalajdžić, M., Kovačević P., Merna tehnika u tehnologiji obrade metala rezanjem, Građevinska knjiga, Beograd, 1983
92. Investor R. W., Kenedy M., Davies M., Stevenson R., Thiele J., Furness R., Athavale S.: Assessment of machining models: Progress report *Machining Science and Technology* 4(3), 2000., pp. 511-538.
93. Armarego E. J. A., Jawahir I. S., Ostafiev V. A., Venuvinod P. K.: Modeling of Machining Operations, CIRP Working Group Paper, STC-C Paris, France, 1996
94. Jablonski W, Simulation of Cutting Process – Modeling and Applications, Engineering the Future, Laszlo Dudas (Ed.), (2010), ISBN:978-953-210-4.
95. Arrazola P. J. Özel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I. S.: Recent advances in modelling of metal machining processes, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62, 2013., pp.695-718
96. Fang N., Jawahir I. S.: An Analytical Predictive Model and Experimental Validation for Machining with Grooved Tools Incorporating the Effects of Strains, Strainrates, and Temperatures, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 51(1), 2002, pp.83-86
97. Komanduri R., Hou Z. B.: Thermal Modeling of the Metal Cutting Process, Part1: Temperature Rise Distribution Due to Shear Plane Heat Source, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42, 2001., pp.1715-1752
98. Davies M. A., Burns T. J.: Thermo-Mechanical Oscillations in Material Flow During High-Speed Machining *Proceedings of the Royal Society*, Vol. 359, 2001., pp. 821-846

- 
99. Sekulić M., Vukomirović S., Stević M.: Forecasting signals in manufacturing process with neural networks, 4th International Conference on Engineering Technologies-ICET 2009, Novi Sad, 2009
100. Reddy N. S. K., Rao P. V.: Selection of optimum geometry and cutting konditions using surface roughness prediction model for end milling, *int. J. Adv. Manuf .Technol.*, Vol. 26, 2005, pp. 1202-1210
101. Fuat K., Kubilay A., Adem C: Prediction of cutting temperature in orthogonal machining of AISI316L using artificial neural network, *Applied Soft Computing*, Vol. 38, 2016., pp. 64-74.
102. Czarnota C., Koné F., Haddag B., Nouari M.: A predictive hybrid force modeling in turning: aplication to stainless steel dry machining with a coated groove tool, *International Juournal of Advanced Manuf .Technol.*, Vol. 79, 2015, pp. 65-79.
103. Fang X. D., Fei J. Jawahir I. S.: A Hybrid Algorithm for Predicting Chip-from/ Chip Breakability in Machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 36 (10), 1996, pp. 1093-1107,
104. Grzesik W. Determination of temperature distribution in the cutting zone using hybrid analytical-FEM technique, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Vol. 46 (6), 2006., pp.651-658,
105. Kienzle, O.: Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen, Gekürzte Wiedergabe eines Vortrages in der Fachsitzung "Betriebstechnik" der 81. VDI - Hauptversammlung, Hannover, 1951.
106. Kovac, P.: Modeliranje procesa obrade- faktorni planovi eksperimenta, FTN, Novi Sad, 2006.
107. Box, G.E.P, Wilson K. B.: On Experimental Attainment of Optimum Conditions, *Ronal Stat. Soc.*, B, 13.1, 1951.
108. Ogunnaike B. A., Ray W. H., *Process Dynamics, Modeling, and Control*, Oxford University Press, Oxford, U.K., 1994
109. S. G. Kapoor, R. E. Devor, R. Zhu, R. Gajjela, G. Parakkal and D. Smithey, "Develompent of Mechanistic Models for the Prediction of Machining Performance: Model Building Methodolgy," *Machining Science and Technology: An International Journal*, vol. 2:2, pp. 213-238, 1998.
110. Kienzle O., "Die Bestimmung von Kraften und Leistungen an Spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen," *Z-VDI*, vol. 94, pp. 299-302, 1952.
111. Raghunandan B. V., Bhandarkar S. L., Pankaj K. S.: An Experimental Mathematical Modelling of Surface Roughness in Turning Opertion of En19 with Carbide Tool, *International Journal of Mechanical Engineering and Research*, Volume 3, Number 5, 2013, pp. 495-502.
-



- 
112. Dadić Z., Tribological principles and steps to reduce cutting tool wear, International conference Mechanical Technologies and Structural Materials, Split, 26-27. September 2013.
113. Milikić D, Gostimirović, M., Sekulić M.: Osnove tehnologije obrade rezanjem, FTN, N.Sad, 2015
114. Katalog HAHN+KOLB: Werkzeuge Maschinen Betriebseinrichtungen ATORN ORION 2015
115. Masato Okada, Akira Hosokawa, Ryutaro Tanaka, Takashi Ueda., Cutting performance of PVD -coated carbide and CBN tools in hard milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 51 (2011) 127–132
116. [https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost\\_tehnickih\\_povrsina.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf)
117. Scheer, A.-W., Thomas, O., Adam, O.: Process Modeling using Event-Driven Process Chains. In: Dumas, M., van der Aalst, W. M., ter Hofstede, A. H. (editors): *Process-Aware Information Systems: Bridging People and Software Through Process Technology*, Wiley, 119-145 pp., (2005)
118. Victor H., Müller M., Opferkuch R.; *Zerspantechnik, Teil I*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg- New York- Tokyo, 1982.
119. Kovac, P., Milikić, D.: *Rezanje metala*, FTN, Novi Sad, 1998.
120. Nedić, B., Lazić, M.: *Proizvodne tehnologije – Obrada metala rezanjem*, Mašinski Fakultet Kragujevac, Kragujevac, 2007.
121. Milikić, D.: *Nova metoda za merenje temperatura pri obradi rezanjem i mogućnosti njene tehnološke i senzorske primene*, Doktorska disertacija, FTN, Novi Sad, 1980.
122. Arsecularatne, J. A.: On prediction of tool life and tool deformation conditions in machining with restricted contact tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003.
123. Van Luttervelt, S A, Childs T, Jawahir I S, Klocke F., Venuvinod P K.: *The State-of-the-Art of Modeling in Machining Processes*, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, (1998) 47(2): pp 587-626.
124. Schütze, N., *Neue Methoden zur Steuerung der Wassergabe mit Neuronalen Netzen in der Bewässerungswirtschaft*, *Dresdner Schriften zur Hydrologie*, Heft 3, Dresden, 2005
125. <https://anuradhasrinivas.files.wordpress.com/2012/08/artificial-neural-networks-rev.ppt>
126. Russel S., Norvig P., *Artificial Intelligence - A modern approach*, Prentice Hall, New York, 2003
127. Picton P., *Neural Networks*. PALGRAVE, 1994.
128. Gurney, "Computers and Symbols versus Nets and Neurons". Dept. Human Sciences, Brunel University, Uxbridge, 2001
129. <http://eris.foi.hr/11neuronske/nn-predavanje4.html>
-

- 
130. Dalbelo-Bašić B., Čupić M., Šnajder J., Umjetne neuronske mreže, Zagreb, 2008.
131. Petrović I., Baotić M., Perić N., Inteligentni sustavi upravljanja: Neuronske mreže, evolucijski i genetički algoritmi, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, (2011./2012.)
132. E. Uhlmann, J. A. Oyanedel Fuentes, M. Keunecke: Machining of high performance workpiece materials with CBN coated cutting Thin Solid Films 518 (2009) 1451–1454 tools
133. Lončarić S., Neuronske mreže: proces učenja, Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb, 2008.
134. Vukadinović D., Procjena brzine vrtnje vektorski upravljano asinkronog motora primjenom neuronske mreže (doktorska disertacija), Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2005.
135. Mitchell T. M.: Machine Learning. The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
136. Lakhmi, C. J; w. de S. Clarence: Intelligent adaptive control Industrial Applications, CRC Press, 1999.
137. Zilouchian, A., Mo Jamshidi: Intelligent Control Systems Using Soft Computing Methodologies, CRC Press, 2001
138. Goerke, F. Kintzler, R. Eckmiller. Self organized classification of chaotic domains from a nonlinear attractor. In Neural Networks, 2001. Pro-ceedings. IJCNN'01. International Joint Conference on, volume 3, 2001.
139. Goerke N., Scherbart A.. Classification using multi-soms and multi-neural gas. In IJCNN, pages 3895–3902, 2006.
140. Ekinović, S.: Obrada rezanjem, Mašinski fakultet, Zenica, 2001.
141. Müller, B. Thermische Analyse des Zerspanens metallischer Werkstoffe bei hohen Schnittgeschwindigkeiten. Ph. D. thesis, Fakultät für Maschinenwesen, Aachen, (2004).
142. Lazić, M. Obrada metala rezanjem, monografija. Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2002
143. Jovanović, D. M. Kontinualno uklanjanje strugotine kod obrade krtih materijala rezanjem. Doktorska disertacija, Fakultet zaštite na radu, Niš, (1995)
144. Abuk N A, Mativenga P T, Sheikh M A.: Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. Int Mach T & Man 2006; 46: 782-800.
- 145 Merchant, M. E. Mechanics of Metal Cutting Process I, Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip. Journal of Applied Physics, (1945). Vol. 16, No. 5, pp. 267-275.
146. Vieregge, G. Zerspanung der Eisenwerkstoffe. Verlag Stahleisen M. B. H. Düsseldorf, (1970)

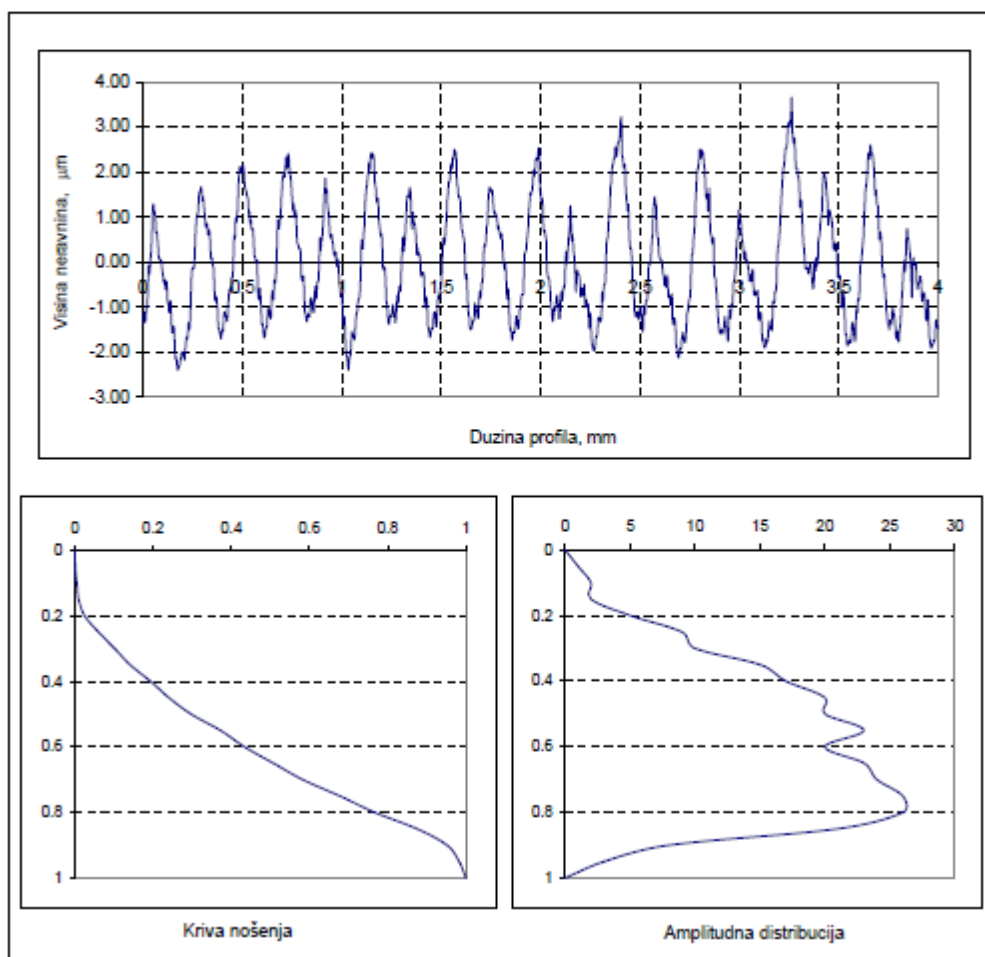
- 
147. Molinari, A. Dudzinski, D. Stationary Shear Band in High-Speed Machining. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, (1992). 315-II, pp. 399-405.
148. Hoppe, S. Experimental and Numerical Analysis of Chip Formation in Metal Cutting. Ph. D. thesis, RWTH, Aachen, (2003).
149. Taylor, G. I. Quinney, H. The Latent Energy Remaining in a Metal after Cold Working. *Proceedings Royal Society London, A* 413, (1934). pp. 307-326.
150. Messner, G.: Modeling metal cutting process under consideration of elastic material properties, Dissertation aus dem Werkzeugmaschinenlabor, Düsseldorf, 2007.
151. W. König, F. Klocke, M. Rehse, Prospects for the use of process models in metal cutting, *VDI Berichte*, No. 1399 (1998), 235-249.
152. Naveen, Sait A.; Aravindan, S.; Noorul Haq, A., Influence of machining parameters on surface roughness of GFRP pipes, *Advances in Production Engineering & Management* 4, 1-2 (2009), str. 47-58.
153. S.Y. Luo, Y. S. Liao, Y. Y. Tsai: Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools *Journal of Materials Processing Technology* 88 (1999) 114–121
154. J. A. Stori, P. K. Wright, C. King, Integration of process simulation in machining parameter optimization, *J. Manuf. Sci. Engng*, Vol.121 (1999), 134-143.
155. Grzesik W,: Developments in metal removal processes, *Proc.4th Intl. Scientific Development of Metal Cutting*, Košice, Slovakia, 2002, pp 103-110
156. M. G. Merchant, D. A. Dornfeld, P. K. Wright, Manufacturing-its evolution and future, *Transactions of NAMRI/SME*, Vol.33 (2005), 211-218.
157. C. A. Van Luttervelt, T.H.C. Childs et al., Present situations and future trends in modelling of machining operations. Progress report of the CIRP working group „Modelling of Machining Operations“, *CIRP Annals*, Vol. 47/2 (1998), 587-626.
158. Tanović Lj., Tehnologija proizvodnje savremenih reznih alata, Mašinski fakultet, Beograd, 1997.
159. Jurković M: Matematičko modeliranje inženjerskih procesa i sistema, Mašinski fakultet, Bihać, 1999,
160. Tarić R. M.: Istraživanje procesa struganja teškoobradljivih čelika, Magistarski rad, Univerzitet Istočno Sarajevo, Mašinski fakultet, Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina, 2015, s. 127
161. Манохин А, Клименко С., Тарић М., Тановић Љ. : Promene u površinskom sloju alata od CBN pri struganju kaljenog čelika, *Техника* 14, 1, 2015

- 
162. Zeren E., Özel T.: Hard turning Technology, Report No MARL-01, The State University of New Jersey, Piscataway, June 2002
163. Raghunandan B.V., Bhandarkar S. L., Pankaj K. S., An Experimental Mathematical Modelling of Surface Roughness in Turning Operation of En19 with Carbide Tool, International Journal of Mechanical Engineering and Research, Volume 3, Number 5, 2013, p. 495-502
164. Globočki-Lakić G., Kramar D., Kopač J. Metal cutting - theory and applications, ISBN 999383949-3, Publisher: University of Banjaluka, Faculty of Mechanical Engineering; University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, 2014
165. Globočki-Lakić G. Sredanović B. The importance of modeling in the study of machinability, Conference Proceedings of 5th International Conference on Manufacturing Engineering ICMEN 2014, Thessaloniki, Greece, 2014
166. M. Tarić, P. Kovač, B. Nedić, D. Rodić, D. Ješić, Monitoring and neural network modeling of cutting temperature during turning hard steel, Thermal Science, 2017, DOI10.2298/TSCI170606210T
167. D. Jesic, P. Kovac, B. Savkovic, M. Gostimirovic, D. Sarjanovic, T. Stanivuk, M. Taric, Equipment for towing - bollard 200 t, Machine Design, Vol X (2018) No ISSN 1821-1259, prihv. za objavljivanje
168. Tarić, M., Kovač, P., Nedić, B., Rodić, D., Ješić, D. Tool wear, cutting temperature and cutting force during turning hard steel, <http://doi.org/10.24867/JPE-2017-02-013> 13 JPE (2017) Vol.20(2)
169. Savkovic, B., Taric, M., Kovac, P., Nedic, B., Pucovski, V., Risteiu, M.: Modeling of cutting temperature in turning of hardened steel, Journal of Production Engineering, 2016 No.2, pp 7-12
170. Манохин А, Клименко С., Тарић М., Тановић Љ. : Промене у површинском слоју алата СВН при стругању каљеног челика, Техника 14, 1, 2015

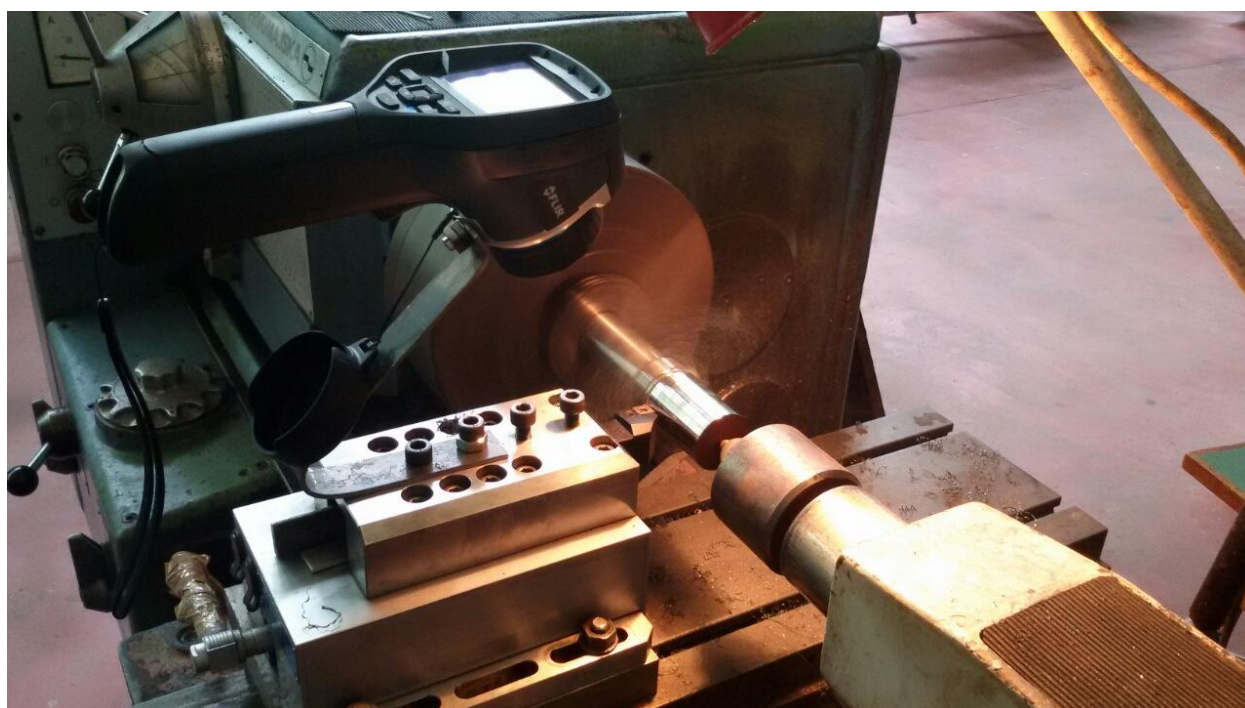
## PRILOG

Topografija: TM\_P\_9

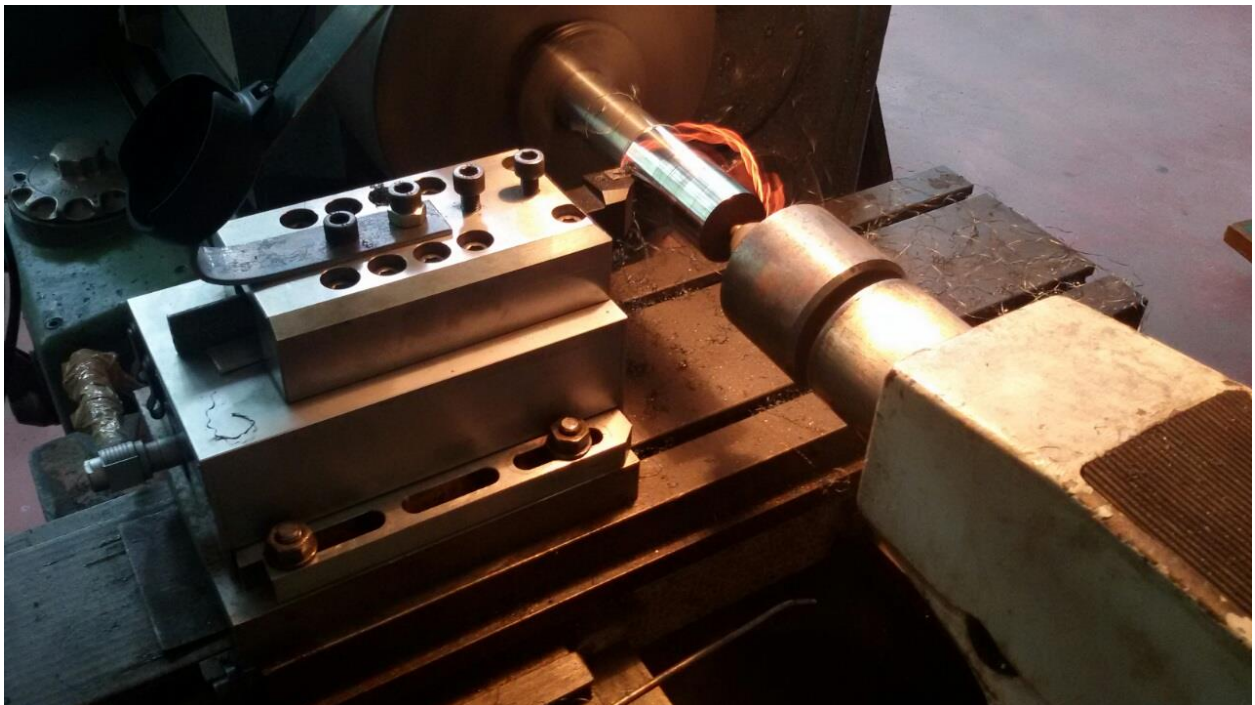
Rt1 =	4.8 $\mu\text{m}$	Ry =	5.6 $\mu\text{m}$	Sm =	174 $\mu\text{m}$
Rt2 =	4.9 $\mu\text{m}$	Rtm =	5.1 $\mu\text{m}$	S =	28 $\mu\text{m}$
Rt3 =	4.9 $\mu\text{m}$	Rv =	2.4 $\mu\text{m}$	DELQ =	3.4 deg
Rt4 =	5.3 $\mu\text{m}$	Rp =	3.6 $\mu\text{m}$	Rsk =	0.4
Rt5 =	5.6 $\mu\text{m}$	R3z =	3.8 $\mu\text{m}$	Rku =	2.2
Ra =	1.08 $\mu\text{m}$	Rpm =	2.9 $\mu\text{m}$		
Rq =	1.27 $\mu\text{m}$	R3y =	4.4 $\mu\text{m}$		

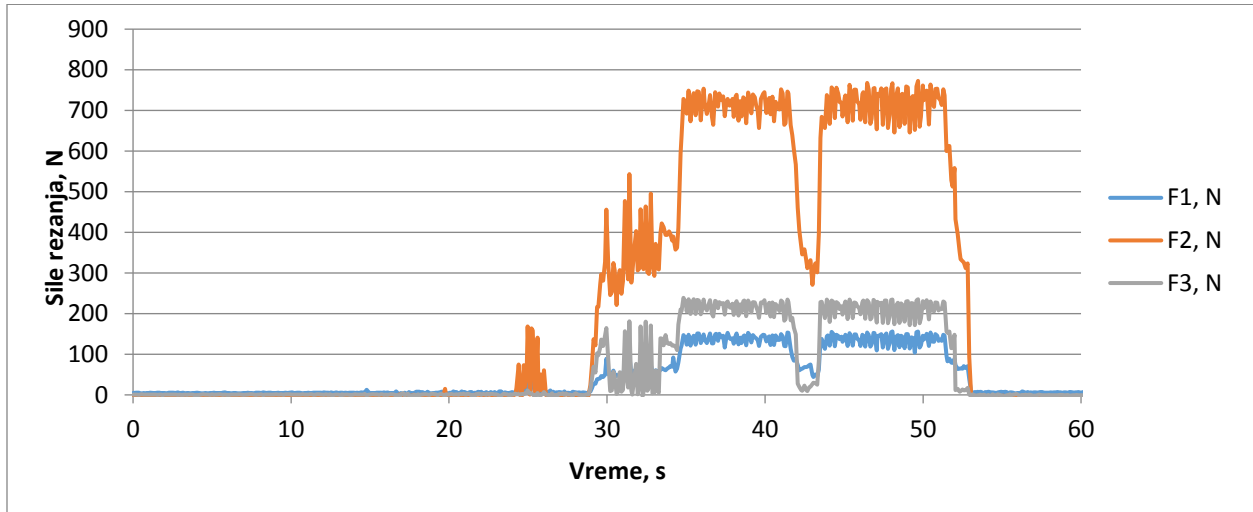


Zapis prametara hrapavosti



Fotografije radnog mesta tokom merenja

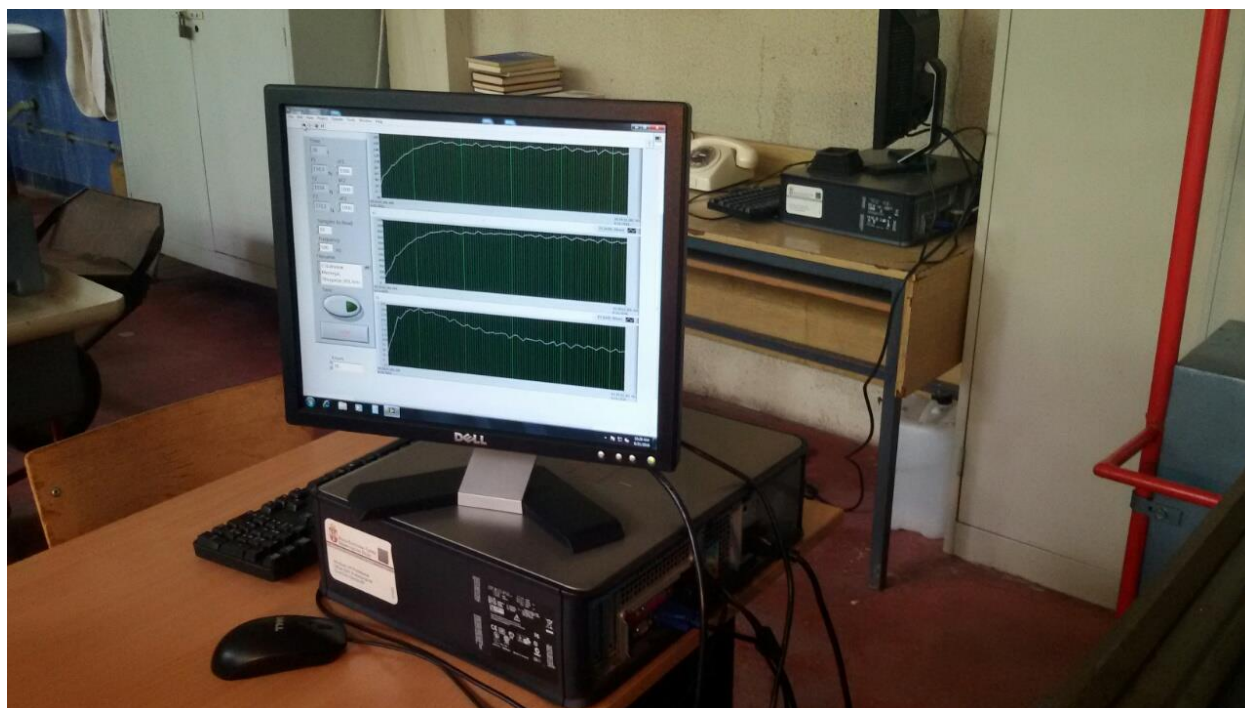
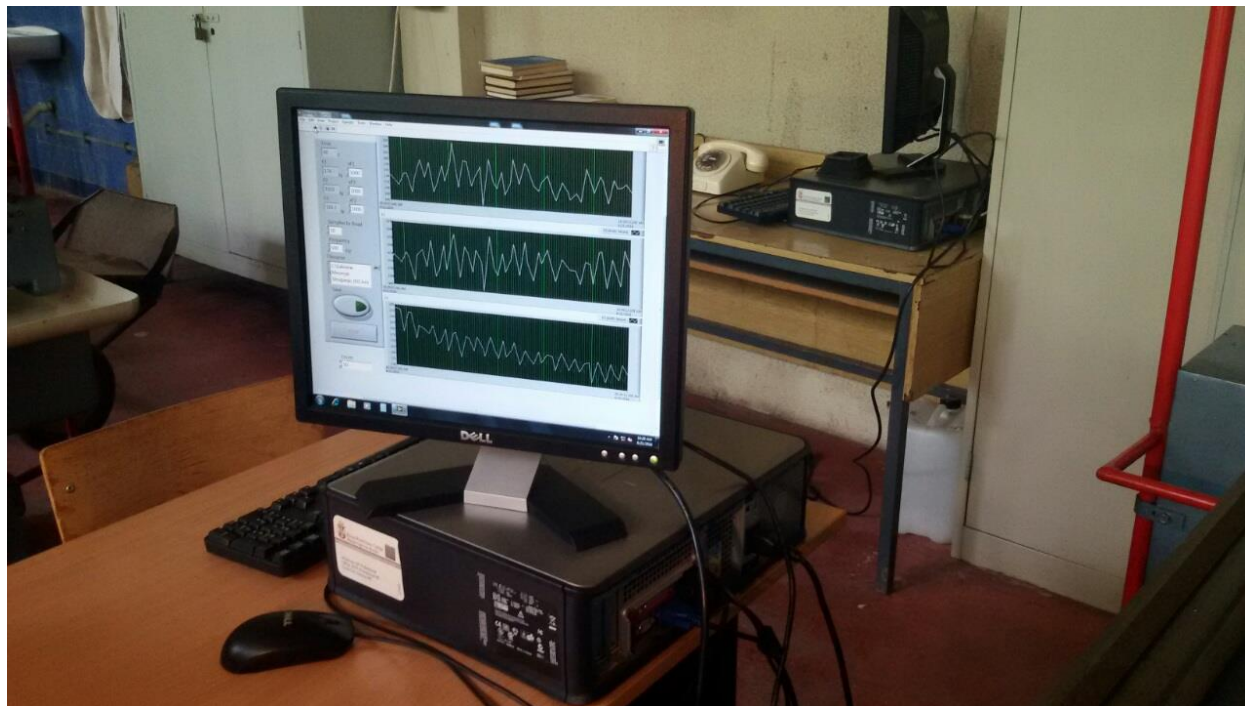




Zapis merenja sile, eksperiment 13 i 19 TM - 6

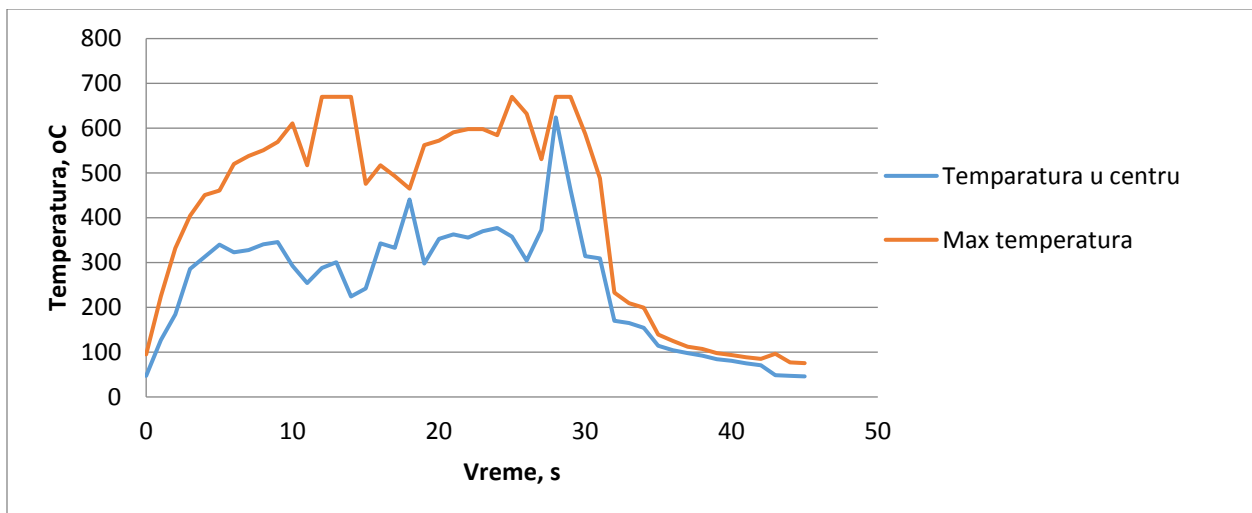






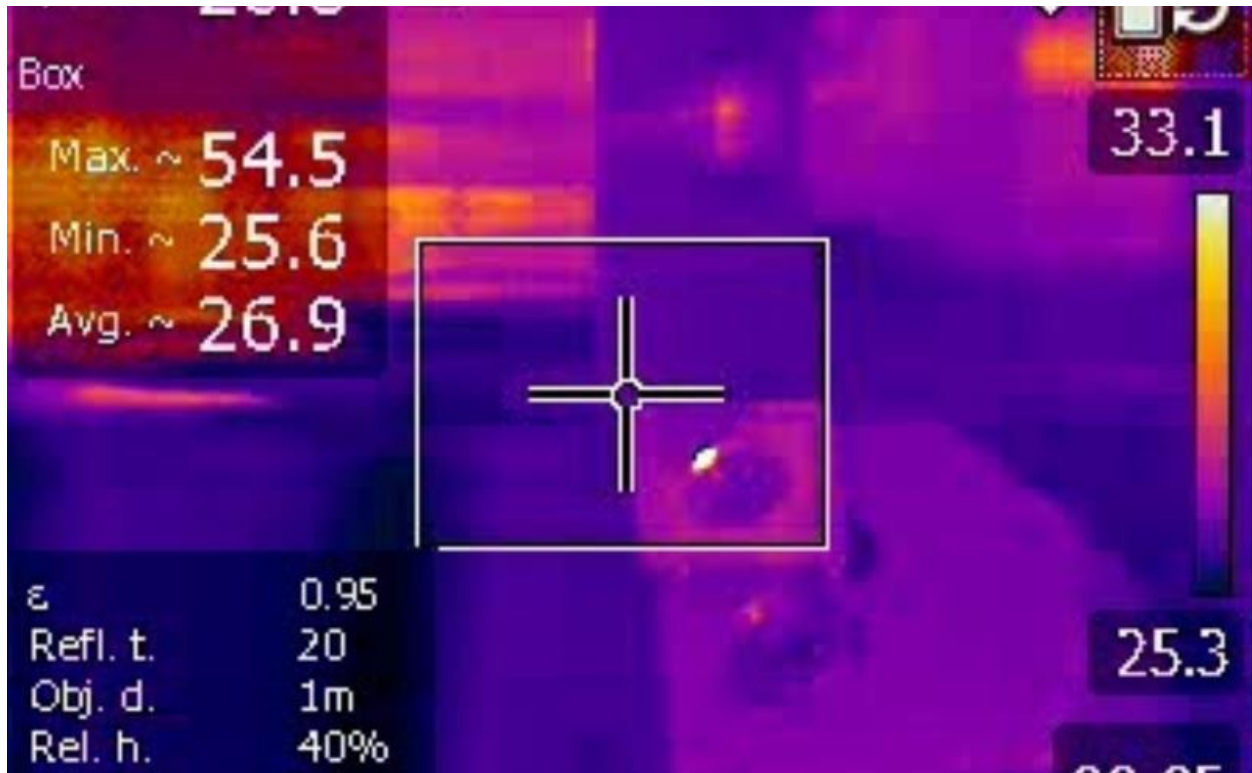


Dinamometar Kistler



Snimak vremenskog toka temperature Mov 130, za uslove obrade,  $a=0.7$ ,  $s=0.1$ ,  $v=120$  18 i 24 experiment

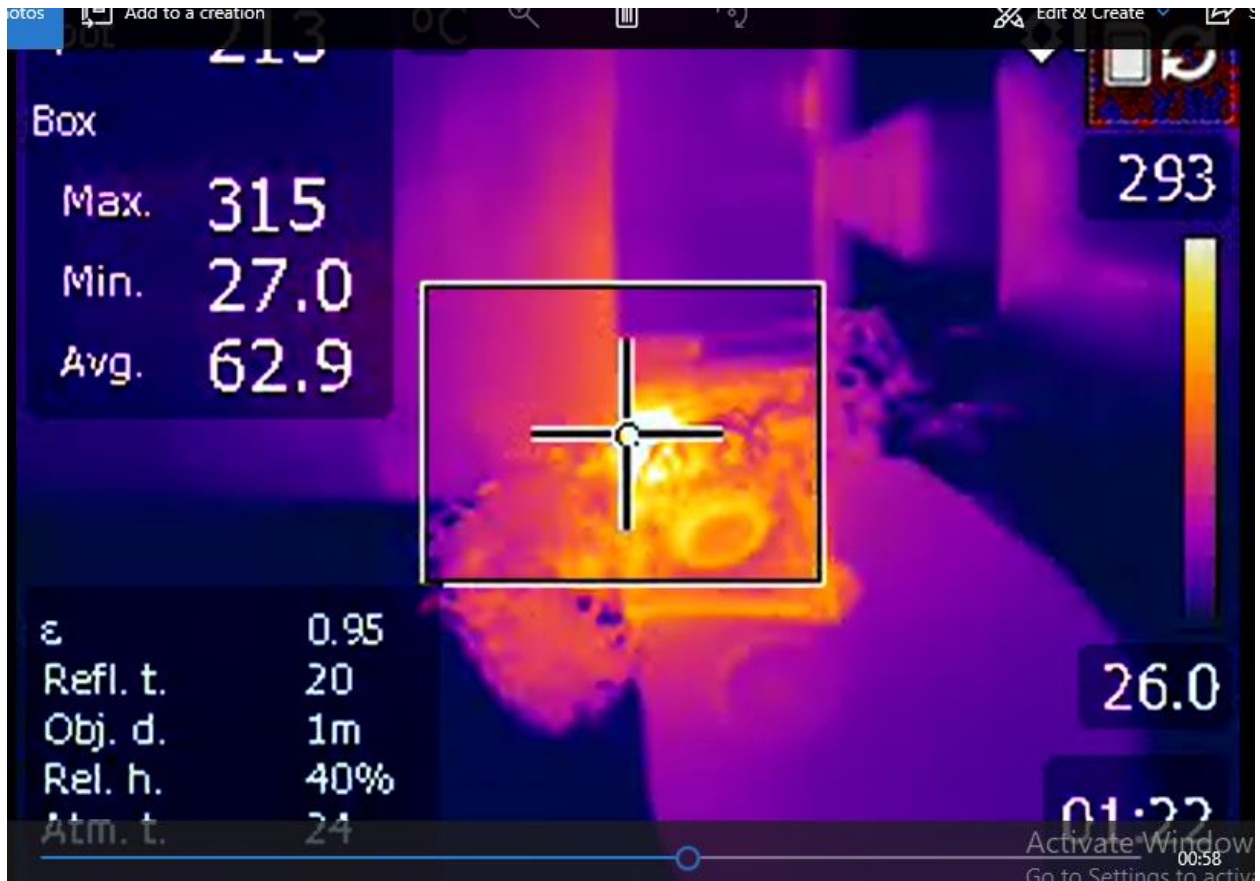
*Snimci termokamerom tokom obrade*

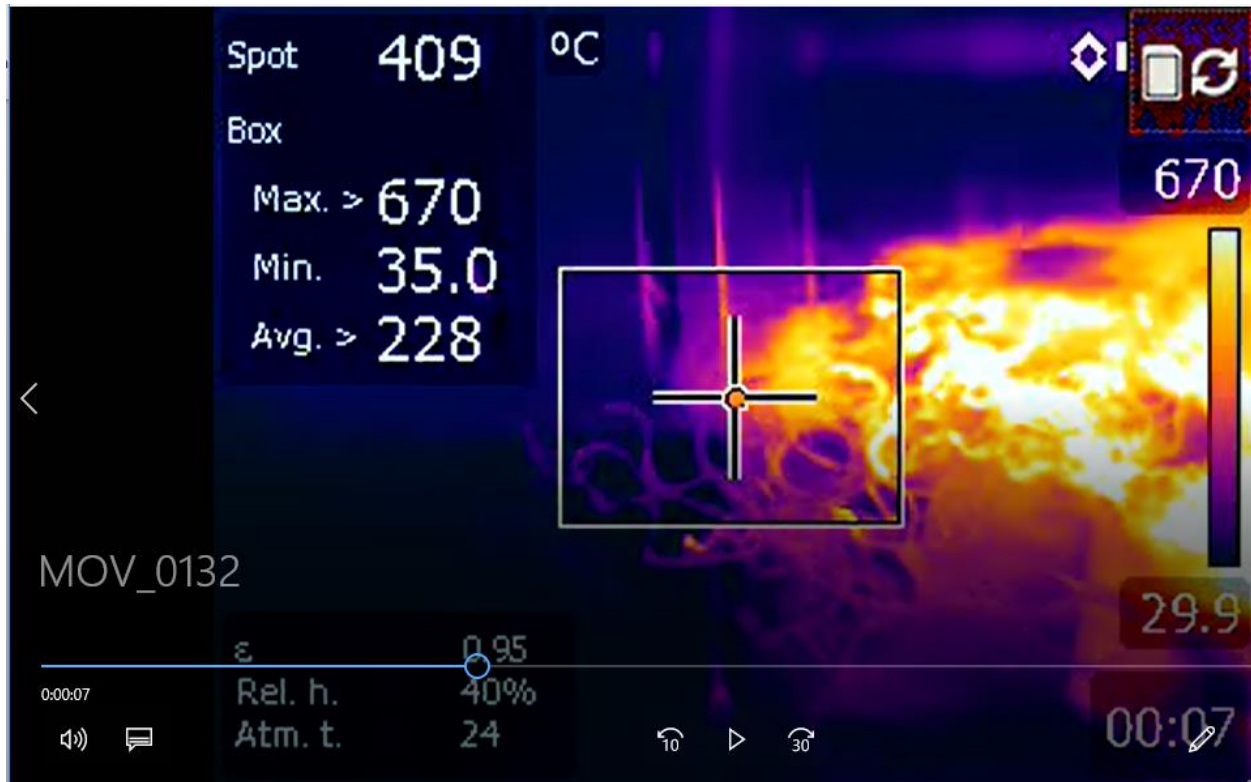


Snimci termokamerom tokom obrade









## Promena otpora rezanja u zavisnosti od habanja TM

