



UNIVEZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET U NIŠU



Jelena N. Stanojković

EMPIRIJSKO MODELIRANJE OTPORA REZANJA KOD STRUGANJA PRIMENOM DIMENZIONALNE ANALIZE

DOKTORSKA DISERTACIJA

Tekst ove doktorske disertacije stavlja se na uvid javnosti,
u skladu sa članom 30., stav 8. Zakona o visokom obrazovanju
(„Sl. Glasnik RS”, br. 76/2005, 100/207 – autentično tumačenje, 97/2008, 44/2010,
93/2012, 89/2013 i 99/2014)

NAPOMENA O AUTORSKIM PRAVIMA:

Ovaj tekst smatra se rukopisom i samo se saopštava javnosti (član 7. Zakona o autorskim
i srodnim pravima, „SL. Glasnik RS”, br. 104/2009, 99/2011 i 119/2012).

**Nijedan deo ove doktorske disertacije ne sme se koristiti ni u kakve svrhe, osim za
upoznavanje sa njenim sadržajem pre odbrane disertacije.**

Niš, 2025.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING IN
NIŠ



Jelena N. Stanojković

EMPIRICAL MODELING OF CUTTING FORCES IN TURNING USING DIMENSIONAL ANALYSIS

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2025.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor:	dr Miloš Madić, vanredni profesor Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu
Naslov:	Empirijsko modeliranje otpora rezanja kod struganja primenom dimenzionalne analize
Rezime:	Obrada struganjem predstavlja jedan od najrasprostranjenijih procesa obrade rezanjem u industriji, jer omogućava visoku produktivnost i kvalitet obrade uz prihvatljive troškove, što je čini neophodnom u izradi različitih mašinskih delova. Uprkos dugoj tradiciji proučavanja procesa obrade rezanjem, u industrijskoj praksi i dalje postoji potreba za pouzdanim predikcionim modelima koji mogu da opišu promenu otpora rezanja pri različitim uslovima obrade. Razlog leži u složenoj prirodi interakcije između reznog alata i obratka, koja zavisi od velikog broja faktora. U tom kontekstu, predikcija otpora rezanja pri obradi struganjem nije samo matematička idealizacija procesa, već je od suštinskog značaja za industrijsku primenu u savremenoj proizvodnji, jer omogućava određivanje merodavnog režima rezanja, izbor steznog pribora, procenu ugibanja obratka, praćenje procesa obrade, analizu obradljivosti materijala, kao i optimizaciju samog procesa obrade. Istraživanje u okviru doktorske disertacije usmereno je na analizu mogućnosti integracije dimenzionalne analize i eksperimentalnih planova male rezolucije u cilju kreiranja adaptibilnih empirijskih modela za predikciju otpora rezanja kod suvog spoljašnjeg uzdužnog struganja šest čelika različitog kvaliteta i obradljivosti. U obzir su uzeti parametri koji se odnose na materijal obratka, režime rezanja i geometriju reznog alata. Cilj je predložiti efikasan pristup za kreiranje predikcionih modela otpora rezanja prihvatljive tačnosti koji bi bili prijemčivi za praktičnu primenu u industriji. Validacija kreiranih modela, koja je izvršena realizacijom eksperimentalnih ogleda van i u okviru obuhvaćenog eksperimentalnog hiper-prostora, je pokazala da predloženi modeli imaju dobre predikcione performanse.
Naučna oblast:	Mašinsko inženjerstvo
Naučna disciplina:	Proizvodni sistemi i tehnologije
Ključne reči:	struganje, dimenzionalna analiza, empirijsko modeliranje, otpori rezanja, obrada rezanjem, obradljivost
UDK:	
CERIF klasifikacija:	T120, T130
Tip licence Kreativne zajednice:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	dr Miloš Madić, associate professor, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš
Title:	Empirical modeling of cutting forces in turning using dimensional analysis
Abstract:	Turning is one of the most widespread machining processes in the industry, because it enables high productivity and machining quality at acceptable costs, which makes it necessary in the production of various machine parts. Despite the long tradition of studying machining, in industrial practice there is still a need for reliable prediction models that can describe the change of cutting force under different machining conditions. The reason lies in the complex nature of the interaction between the cutting tool and the workpiece, which depends on a large number of factors. In this context, the prediction of cutting force during turning is not only a mathematical idealization of the process, but it is of essential importance for industrial application in modern production, because it enables the determination of the relevant cutting regime, the selection of fixtures, the assessment of workpiece deflection, the monitoring of the turning process, the analysis of the materials' machinability, as well as the optimization of the process itself. The research within the doctoral dissertation is focused on the analysis of the possibility of integrating dimensional analysis and low-resolution experimental designs in order to develop adaptable empirical models for the prediction of cutting force in dry external longitudinal turning of six steels of different quality and machinability. Parameters related to workpiece material, cutting regimes and cutting tool geometry were taken into account. The aim is to propose an efficient approach to develop cutting force prediction models of acceptable accuracy that would be amenable to practical application in industry. The validation of the developed models, which was carried out by the realization of experimental trials outside and within the included experimental hyper-space, showed that the proposed models have good predictive performances.
Naučna oblast:	Mechanical engineering
Naučna disciplina:	Production systems and technologies
Key words	turning, dimensional analysis, empirical modeling, cutting force, machining, machinability
UDC:	
CERIF Classification:	T120, T130
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

Zahvalnost autora

„Velike stvari nikada ne čini pojedinac, već zajednica srca koja veruje u isti san“ – Ivo Andrić.

Ova disertacija nastala je zahvaljujući podršci, razumevanju i verovanju mnogih dobrih ljudi, čija je snaga i dobrota pratila svaki korak mog istraživačkog puta.

Najveću zahvalnost, pre svega, dugujem svom mentoru, dr Milošu Madiću, vanrednom profesoru Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu, na nesebičnom zalaganju, stručnosti, strpljenju i ohrabrenju tokom celog procesa izrade disertacije.

Zahvaljujem se i članovima Katedre za proizvodno-informacione tehnologije na konstruktivnim sugestijama, izdvojenom vremenu koje su uložili u unapređenje disertacije, kao i radu i pomoći koju su mi pružili u realizaciji eksperimentalnog istraživanja u Laboratoriji za mašine alatke i mašinsku obradu i Laboratoriji za mašinske materijale, Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Nišu.

Zahvaljujem se i mojim prijateljima i kolegama sa Fakulteta tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici na razumevanju, podsticaju i smehu kojim su ublažavali naporne periode rada. Vaša podrška je bila nevidljiva snaga koja me je pratila kroz svaku etapu ovog puta.

Najiskreniju i najdublju zahvalnost dugujem svojoj porodici, roditeljima i sestri, za svu ljubav, razumevanje i strpljenje. Hvala vam što ste me pratili u tišini, hrabрили kad sam posustajala i delili sa mnom svaki trenutak ovog putovanja. Vaša ljubav je bila moje najsigurnije utočište i najveća snaga da istrajem do kraja

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1 Predmet istraživanja	1
1.2 Cilj istraživanja	2
1.3 Primijenjene naučno-istraživačke metode	4
1.4 Metodologija istraživanja	5
1.5 Struktura doktorske disertacije	7
2. TEHNOLOGIJA OBRADE STRUGANJEM	9
2.1 Princip struganja	9
2.2 Faktori obrade struganjem	10
2.2.1 Faktori reznog alata	11
2.2.2 Faktori mašine alatke	15
2.2.3 Faktori obratka	16
2.2.4 Faktori procesa obrade	17
2.3 Performanse obrade struganjem	20
2.3.1 Performanse procesa	22
2.3.2 Performanse kvaliteta	29
2.3.3 Performanse produktivnosti	31
2.3.4 Performanse ekonomičnosti	34
2.3.5 Performanse održivosti	36
2.4 Važnost pravilnog izbora faktora obrade	38
3. MODELIRANJE PERFORMANSI OBRADE STRUGANJEM	42
3.1 Značaj i cilj modeliranja performansi obrade struganjem	42
3.2 pristupi modeliranju performansi procesa obrade struganjem	43
3.2.1 Analitički modeli	43
3.2.2 Numerički modeli	44
3.2.3 Empirijski modeli	45
3.3 Prednosti i nedostaci metoda modeliranja	46
3.4 Istorijski razvoj modela otpora rezanja	47
4. PREGLED PRETHODNIH ISTRAŽIVANJA OTPORA REZANJA	50
4.1 Prethodna istraživanja otpora rezanja kod struganja	50
4.2 Analiza i potencijalni pravci istraživanja otpora rezanja	55
5. DIMENZIONALNA ANALIZA	57
5.1 Dimenzionalna homogenost	58
5.2 Metode dimenzionalne analize	59

5.2.1 <i>Rayleigh</i> -ova metoda	59
5.2.2 <i>Buckingham</i> -ova π metoda	60
5.2.3 <i>Ipsen</i> -ova metoda.....	64
5.2.4 Matrična metoda	65
5.2.5 Metoda inspekcije.....	68
5.3 Prednosti i nedostaci dimenzionalne analize.....	69
6. MODELIRANJE OTPORA REZANJA PRIMENOM DIMENZIONALNE ANALIZE...	70
6.1 Modeliranje otpora rezanja primenom <i>Buckingham</i> -ove π metode	72
6.2 Modeliranje otpora rezanja primenom matrične metode	76
7. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA OTPORA REZANJA.....	79
7.1 Teorija planiranja eksperimenta	79
7.2 Tagučijeva metoda planiranja eksperimenta	80
7.3 Opis obradnog sistema	81
7.3.1 Mašina alatka	82
7.3.2 Rezni alat	82
7.3.3 Predmet obrade	88
7.3.4 Ispitivanje mehaničkih svojstava čelika	90
7.3.5 Režimi obrade.....	94
7.4 Eksperimentalno određivanje komponenata otpora rezanja.....	96
7.4.1 Kistler tip 9441	96
7.4.2 Kistler tip 5007	98
7.4.3 HBM QuantumX MX840	98
7.4.4 Softver “HBM Catman”	98
7.4.5 Rezultati merenja otpora rezanja	98
7.4.6 Oblik strugotine	100
8. REZULTATI I DISKUSIJA	102
8.1 Modeli predikcije otpora rezanja.....	103
8.2 Validacioni eksperiment.....	117
8.3 Modeli koeficijenata odnosa aksijalnog i glavnog otpora rezanja	124
8.4 Prošireni modeli otpora rezanja sa popravnim koeficijentom za poluprečnik zaobljenja vrha alata	127
8.5 Adekvatnost predloženih predikcionih modela otpora rezanja	130
8.6 Analiza obradljivosti istraživanih čelika sa aspekta otpora rezanja	133
8.7 Primena modela za predikciju otpora rezanja	136
8.7.1 Primena modela glavnog otpora rezanja za analizu energije rezanja i specifične energije rezanja.....	137

8.7.2 Primena modela za predikciju glavnog otpora rezanja prilikom određivanja merodavnog režima rezanja.....	144
9. ZAKLJUČAK	148
LITERATURA	152
PRILOZI	170
BIOGRAFIJA	173
IZJAVA O AUTORSTVU	174
IZJAVA O ISTOVETNOSTI ELEKTRONSKOG I ŠTAMPANOG OBLIKA DOKTORSKE DISERTACIJE.....	175
IZJAVA O KORIŠĆENJU	176

SPISAK OZNAKA SA JEDINICOM MERE I OBJAŠNJENJE

A	%	procentualno izduženje epruvete
a	mm	debljina reznog sloja
ANN		veštačka neuronska mreža (<i>eng.</i> Artificial Neural Network)
a_p	mm	dubina rezanja
A_s	mm ²	površina poprečnog preseka strugotine
a_s	mm	debljina strugotine
A_l	mm ²	površina poprečnog preseka reznog sloja
b	mm	širina reznog sloja
BEM		metoda graničnih elemenata (<i>eng.</i> Boundary Element Method)
b_s	mm	širina strugotine
C_{ip}	din	cena izmenljive pločice
C_M	din	vrednost mašine
C_r		popravnih koeficijenata za poluprečnik zaobljenja vrha alata
C_{SHP}	din/l	cena jednog litra sredstva za hlađenje i podmazivanje
C_{VcA}		dodatni korekcionni faktor
C_{VcO}		korekcionni faktor za specifičnu vrstu zahvata
C_{VcT}		korekcionni faktor za željenu postojanost alata
D	mm	prečnik obratka
DA		dimenzionalna analiza
EBFEM		metoda energetskeg bilansa (<i>eng.</i> Energy Balance Finite Element Method)
E_c	J	energija rezanja
E_{sc}	J/mm ³	specifična energija rezanja
f	mm/o	korak
F_a	N	aktivni otpor
F_c	N	glavni otpor rezanja (tangencijalni)
F_{c-n}	N/(N/mm ²)	normalizovani glavni otpora rezanja
FDM		metoda konačnih razlika (<i>eng.</i> Finite Difference Method)
FEM		metoda konačnih elemenata (<i>eng.</i> Finite Element Method)
F_f	N	otpor pomoćnog kretanja (aksijani)
F_h	h	mogući godišnji fond časova rada mašine

FL		fazi logika (<i>eng.</i> Fuzzy Logic)
F_p	N	otpor prodiranja (radijalni)
FVM		metoda konačnih zapremina (<i>eng.</i> Finite Volume Method)
GP		genetsko programiranje (<i>eng.</i> Genetic Programming)
h	mm	debljina reznog sloja
i	-	broj prolaza
k	-	koeficijent koji zavisi od broja mašina na kojim istovremeno radi jedan radnik
k_c	N/mm ²	specifični otpor rezanja
$k_{c1.1}$	N/mm ²	specifični otpor rezanja za 1 mm ² površine poprečnog preseka reznog sloja
k_{vG}		koeficijent korišćenog materija
k_1	din/min	bruto plata radnika
L	mm	dužina rezanja (obrade)
l_i	mm	rastojanje koje se prelazi prilikom izlaza alata na kraju prolaza
l_{po1}	mm	rastojanje koje se prelazi prilikom povratnog kretanja između prolaza
l_{po2}	mm	povratno rastojanje
l_{pr}	mm	prilazno rastojanje
l_z	mm	rastojanje koje se prelazi prilikom zauzimanja dubine rezanja za prolaz
MAPE		srednja apsolutna procentualna greška (<i>eng.</i> Mean Absolute Percentage Error)
M_{max}	o/min	maksimalni obrtni moment na glavnom vretenu
m_c		eksponent specifičnog otpora rezanja
n	o/min	broj obrtaja glavnog vretena
n_s	-	broj komada u seriji
n_{iip}		broj reznih ivica izmenljive pločice
n_{max}	o/min	maksimalni broj obrtaja glavnog vretena
p	%	procentualna stopa amortizacije
P_c	kW	snaga rezanja
P_{c-c}	W/mm ³	specifična snaga rezanja
P_M	kW	snaga pogonskog elektromotora mašine alatke

P_R	din/min	stopa profita
R_a	μm	srednje aritmetičko odstupanje profila od srednje linije profila
R_{eH}	N/mm^2	gornja granica tečenja
RFEM		metoda reziduuma (<i>eng.</i> Residual Finite Element Method)
R_m	N/mm^2	zatezna čvrstoća materijala obratka
R_{max}	μm	maksimalna visina neravnina
R_p	N/mm^2	granica tečenja
R_P	din/kom	prodajna cena gotovog dela
RSM		metoda odzivnih površina (<i>eng.</i> Response Surface Methodology)
R_z	μm	srednja visina neravnina
r_ϵ	mm	poluprečnik zaobljenja vrha alata
SVM		metoda potpornih vektora (<i>eng.</i> Support Vector Machine)
T	min	postojanost alata
t_c	min	vreme ciklusa obrade
t_d	min/kom	dodatno vreme obrade
t_g	min/kom	glavno vreme obrade
t_i	min	vreme potrebno za izlaz alata na kraju prolaza
t_k	min	vreme obrade jednog komada
t_p	min/kom	pomoćno vreme
t_{po1}	min	vreme potrebno za povratno kretanje između prolaza
t_{po2}	min	vreme potrebno za povrat u tačku za izmenu alata
t_{pr}	min	vreme potrebno za prilaz alata od tačke za izmenu alata do početne tačke ciklusa
T_{pz}	min	ukupno pripremno-završno vreme za seriju
t_{pz}	min/kom	pripremno-završno vreme
tr_A	din/kom	troškovi reznog alata
tr_M	din/kom	troškovi mašine alatke
tr_O	din/kom	troškovi obrade po komadu za operaciju
tr_R	din/kom	troškovi rada radnika
tr_{SHP}	din/kom	troškovi sredstva za hlađenje i podmazivanje
t_z	min	vreme potrebno za zauzimanje dubine rezanja za prolaz
t_1	min	vreme zamene pohabane izmenljive pločice
v	m/min	brzina rezanja

v_{bh}	mm/min	brzina za brzi hod pomeranja
v_C	m/min	rezultujuća korigovana brzina rezanja
v_e	m/min	rezultujuća brzina
v_f	mm/min	brzina pomoćnog kretanja
v_s	m/min	brzina strugotine
q_m	kg/min	masena proizvodnost
q_P	cm ³ /kWmin	specifična proizvodnost
Q_{SHP}	l/h	količina potrošenog sredstva za hlađenje i podmazivanje za jedan čas rada
q_t	kom/min	teorijska proizvodnost
q_V	cm ³ /min	zapreminska proizvodnost
VFEM		varijaciona metoda konačnih elemenata (<i>eng.</i> Variational Finite Element Method)
Z	%	procentualno suženje poprečnog preseka epruvete
α	°	leđni ugao alata
β	°	ugao reznog klina alata
γ	°	grudni ugao alata
ε	°	ugao vrha alata
η	-	mehanički stepen iskorišćenja mašine
η_1	°	ugao pravca glavnog kretanja
κ	°	glavni napadni ugao alata
κ_1	°	pomoćni napadni ugao alata
λ_s	°	ugao nagiba sečiva
ζ	-	faktor sabijanja strugotine
ρ	kg/cm ³	gustina materijala obratka
τ		stepen iskorišćenja mašine
φ_1	°	ugao pravca pomoćnog kretanja
Φ	°	ugao smicanja

SPISAK TABELA

Poglavlje 2

Tabela 2.1 Preporučene kombinacije materijala alata i obratka

Tabela 2.2 Oblik strugotine i ocena sa stanovišta obradljivosti

Poglavlje 3

Tabela 3.1 Usporedna analiza analitičkih, numeričkih i empirijskih modela

Poglavlje 4

Tabela 4.1 Pregled prethodnih istraživanja otpora rezanja kod struganja čelika

Poglavlje 5.

Tabela 5.1 SI sistem jedinica sa pripadajućim dimenzijama

Poglavlje 6.

Tabela 6.1 Promenljive sa pripadajućim oznakama, jedinicama i dimenzijama

Tabela 6.2 Matrica bezdimenzionalnih π grupa

Poglavlje 7.

Tabela 7.1 Kataloške oznake i karakteristike izmenljivih pločica koje su korišćene u okviru eksperimentalnog istraživanja

Tabela 7.2 Oznake kvaliteta čelika i grupe obradljivosti korišćenih materijala

Tabela 7.3 Hemijski sastav čelika

Tabela 7.4 Mehanička svojstva čelika

Tabela 7.5 Tagučijev ortogonalni niz (matrica) $L_6 (2^1 3^3)$

Tabela 7.6 Parametri sa pripadajućim nazivima, oznakama, jedinicama i vrednostima

Tabela 7.7 Tagučijev ortogonalni niz $L_6 (2^1 3^3)$ i eksperimentalni rezultati za čelik Č.4732 (42CrMo4)

Tabela 7.8 Tagučijev ortogonalni niz $L_6 (2^1 3^3)$ i eksperimentalni rezultati za čelik Č.4830 (51CrV4)

Tabela 7.9 Tagučijev ortogonalni niz $L_6 (2^1 3^3)$ i eksperimentalni rezultati za čelik Č.4850 (X155CrVMo12-1)

Tabela 7.10 Tagučijev ortogonalni niz $L_6 (2^1 3^3)$ i eksperimentalni rezultati za čelik Č.4382

(20MnCrS5)

Tabela 7.11 Tagučijev ortogonalni niz $L_6 (2^1 3^3)$ i eksperimentalni rezultati za čelik Č.1502 (-)

Tabela 7.12 Tagučijev ortogonalni niz $L_6 (2^1 3^3)$ i eksperimentalni rezultati za čelik Č.1531 (C45E)

Poglavlje 8.

Tabela 8.1 Vrednosti srednjih apsolutnih procentualnih grešaka i koeficijenata determinacije kreiranih modela za predikciju otpora rezanja za čelike iz grupe A

Tabela 8.2 Vrednosti srednjih apsolutnih procentualnih grešaka i koeficijenata determinacije kreiranih modela za predikciju otpora rezanja za čelike iz grupe B

Tabela 8.3 Vrednosti glavnog (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) u validacionom eksperimentu za čelik Č.4732 (42CrMo4)

Tabela 8.4 Vrednosti glavnog (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) u validacionom eksperimentu za čelik Č.4830 (51CrV4)

Tabela 8.5 Vrednosti glavnog (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) u validacionom eksperimentu za čelik Č.4850 (X155CrVMo12-1)

Tabela 8.6 Vrednosti glavnog (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) u validacionom eksperimentu za čelik Č.4382 (20MnCrS5)

Tabela 8.7 Vrednosti glavnog (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) u validacionom eksperimentu za čelik Č.1502 (-)

Tabela 8.8 Vrednosti glavnog (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) u validacionom eksperimentu za čelik Č.1531 (C45E)

Tabela 8.9 Vrednosti popravnih koeficijenata za poluprečnik zaobljenja vrha alata (C_r) za čelike Č.4382 (20MnCrS5) i Č.1502 (-)

Tabela 8.10 Dodatni eksperimentalni ogledi realizovani reznom pločicom sa poluprečnikom zaobljenja vrha alata od $r_\varepsilon = 1.2$ mm (Č.4382 (20MnCrS5))

Tabela 8.11 Dodatni eksperimentalni ogledi realizovani reznom pločicom sa poluprečnikom zaobljenja vrha alata od $r_\varepsilon = 1.2$ mm (Č.1502 (-))

Tabela 8.12 Prosečne vrednosti specifične energije rezanja za svih šest čelika (J/mm^3)

Prilog

Tabela P.1 Eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora rezanja za čelik Č.4732 (42CrMo4)

Tabela P.2 Eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora rezanja

za čelik Č.4830 (51CrV4)

Tabela P.3 Eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora rezanja
za čelik Č.4850 (X155CrVMo12–1)

Tabela P.4 Eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora rezanja
za čelik Č.4382 (20MnCrS5)

Tabela P.5 Eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora rezanja
za čelik Č.1502 (-)

Tabela P.6 Eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora rezanja
za čelik Č.1531 (C45E)

SPISAK SLIKA

Poglavlje 1

Slika 1.1 Razvoj predikcionog modela otpora rezanja primenom dimenzionalne analize kod struganja čelika različite obradljivosti

Poglavlje 2

Slika 2.1 Faktori procesa obrade struganjem

Slika 2.2 Geometrija reznog alata

Slika 2.3 Uticajni faktori na izbor režima obrade

Slika 2.4 Performanse obrade struganjem

Slika 2.5 Komponente otpora rezanja kod struganja

Slika 2.6 Zone zagrevanja pri obradi struganjem

Slika 2.7 Faze formiranja strugotine pri obradi struganjem

Slika 2.8 Matematički model za određivanje faktora sabijanja strugotine pri ortogonalnom rezanju

Slika 2.9 Parametri hrapavosti obrađene površine

Slika 2.10 Putanje centra alata kod ciklusa uzdužnog spoljašnjeg struganja u dva prolaza

Slika 2.11 Značaj modeliranja performansi procesa obrade struganjem

Poglavlje 3

Slika 3.1 Istorijski pregled modela otpora rezanja

Slika 3.2 Teorijski poprečni presek reznog sloja kod struganja

Poglavlje 6

Slika 6.1 Brzine glavnog i pomoćnog kretanja kod struganja

Poglavlje 7

Slika 7.1 Univerzalni strug "Potisje ADA" PA-C 30

Slika 7.2 Biranje elementa za lomljenje strugotine

Slika 7.3 Elementi za lomljenje strugotine koji su korišćeni u eksperimentalnom istraživanju

Slika 7.4 Pramet izmenljive pločice koje su korišćene u eksperimentalnom istraživanju

Slika 7.5 Držač Sandvik Coromant PCLNR 3225P 12 koji je korišćen u eksperimentalnom istraživanju

Slika 7.6 Šematski prikaz procedure ispitivanja mehaničkih svojstava zatezanjem

Slika 7.7 Skica i dimenzije epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava čelika

Slika 7.8 Dijagrami sila zatezanja-izduženje za ispitivane čelike

Slika 7.9 Pokidane epruvete ispitivanih čelika

Slika 7.10 Šematski prikaz obradnog i mernog sistema korišćenih za eksperimentalno određivanje komponenata otpora rezanja

Slika 7.11 Oblici strugotine u zavisnosti od vitkosti strugotine

Poglavlje 8

Slika 8.1 Eksperimentalne vrednosti otpora rezanja i predikcije kreiranog modela za čelik Č.4732 (42CrMo4)

Slika 8.2 Eksperimentalne vrednosti otpora rezanja i predikcije kreiranog modela za čelik Č.4830 (51CrV4)

Slika 8.3 Eksperimentalne vrednosti otpora rezanja i predikcije kreiranog modela za čelik Č.4850 (X155CrVMo12-1)

Slika 8.4 Eksperimentalne vrednosti otpora rezanja i predikcije kreiranog modela za čelik Č.4382 (20MnCrS5)

Slika 8.5 Eksperimentalne vrednosti otpora rezanja i predikcije kreiranog modela za čelik Č.1502 (-)

Slika 8.6 Eksperimentalne vrednosti otpora rezanja i predikcije kreiranog modela za čelik Č.1531 (C45E)

Slika 8.7 Promena glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa za čelik Č.4732 (42CrMo4)

Slika 8.8 Promena glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa za čelik Č.4830 (51CrV4)

Slika 8.9 Promena glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa za čelik Č.4850 (X155CrVMo12-1)

Slika 8.10 Promena glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa za čelik Č.4382 (20MnCrS5)

Slika 8.11 Promena glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa za čelik Č.1502 (-)

Slika 8.12 Promena glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa za čelik Č.1531 (C45E)

Slika 8.13 Korelacije između predikcija modela i eksperimentalnih vrednosti glavnog otpora

rezanja

Slika 8.14 Korelacije između predikcija modela i eksperimentalnih vrednosti aksijalnog otpora rezanja

Slika 8.15 Diagrami reziduala glavnog otpora rezanja

Slika 8.16 Diagrami reziduala aksijalnog otpora rezanja

Slika 8.17 Promena koeficijenta odnosa aksijalnog i glavnog otpora rezanja u zavisnosti od bezdimenzionalnih grupa

Slika 8.18 Glavni otpor rezanja kod struganja čelika 42CrMo4 u različitim režimima obrade

Slika 8.19 Glavni otpor rezanja kod struganja čelika C45E u različitim režimima obrade

Slika 8.20 Normalizovani glavni otpor rezanja kod struganja čelika različitog kvaliteta

Slika 8.21 Glavne oblasti primene modela otpora rezanja kod struganja

Slika 8.22 Promena energije rezanja u zavisnosti od promene dubine rezanja (a_p) i koraka (f) za različite vrednosti grudnog ugla alata (γ_o) za čelike iz grupe A

Slika 8.23 Promena energije rezanja u zavisnosti od promene dubine rezanja (a_p) i koraka (f) za različite vrednosti grudnog ugla alata (γ_o) za čelike iz grupe B

Slika 8.24 Promena specifične energije rezanja u zavisnosti od promene dubine rezanja (a_p) i koraka (f) za različite vrednosti grudnog ugla alata (γ_o) za čelike iz grupe A

Slika 8.25 Promena specifične energije rezanja u zavisnosti od promene dubine rezanja (a_p) i koraka (f) za različite vrednosti grudnog ugla alata (γ_o) za čelike iz grupe B

Slika 8.26 Izabrani alat

Prilog

Slika P.1 Postavka eksperimenta za svih šest čelika

1. UVOD

1.1 Predmet istraživanja

Obrada struganjem predstavlja jedan od najčešće primenjivanih procesa obrade rezanjem u proizvodnim operacijama metaloprerađivačke industrije. Kao jedna od najstarijih proizvodnih tehnologija, i danas ima značajnu ulogu u savremenoj industriji zbog povoljne mehanike rezanja za širok spektar materijala, kao i činjenice da obezbeđuje visoku produktivnost uz prihvatljive troškove izrade dela [1].

Otpori rezanja koji deluju na alat su važan aspekt obrade rezanjem. Oni predstavljaju osnovne faktore mehanike procesa rezanja. Poznavanje otpora rezanja je neophodno proizvođačima mašina alatke za procenu zahteva po pitanju snage, obrtnog momenta i opterećenja ležajeva mašina alatke, kao i za projektovanje elemenata mašine alatke, nosača alata i steznog pribora, kako bi isti bili dovoljno kruti i kako bi se sprečila pojava vibracija [2], [3]. Poznavanje otpora rezanja omogućava određivanje merodavnog režima rezanja, izbor steznog pribora, kao i optimizaciju procesa u odnosu na različite performanse obrade, što sve vodi ka poboljšanju produktivnosti, smanjenju troškova proizvodnje i povećanju efikasnosti procesa. Merenje i analiza otpora rezanja u različitim režimima obrade se takođe ponekad koristi za ocenu obradljivosti materijala, posebno u slučajevima kada se testovi postojanosti alata ne mogu izvoditi zbog vremenskih ograničenja ili ograničenih zaliha materijala, odnosno reznog alata [4]. Takođe, praćenje otpora rezanja u toku procesa obrade rezanjem je od suštinskog značaja za upravljanje procesom, praćenje habanja i detekcije loma reznog alata, kao i za obezbeđenje zahtevanog kvaliteta obrade i dimenzionalne tačnosti [5].

Otpori rezanja potiču od otpora na smicanje materijala koji se mora savladati prilikom uklanjanja materijala i od sila trenja koje se javljaju između obratka i alata. Sile trenja se javljaju prilikom kretanja strugotine preko grudne površine alata [5]. Takođe se javljaju na leđnoj površini alata ako isti prodire u obradak. Najvažnije veličine koje utiču na otpor rezanja su materijal obratka i površina poprečnog preseka reznog sloja upravna na pravac glavnog otpora rezanja, koja kod struganja direktno zavisi od dubine rezanja i koraka [6]. Ostali faktori obrade koji utiču na otpore rezanja su: parametri geometrije reznog alata (grudni ugao, ugao nagiba rezne ivice, leđni ugao, glavni napadni ugao i pomoćni napadni ugao), materijal alata, prevlake, stepen pohabanosti alata, sredstvo za hlađenje i podmazivanje i brzina rezanja. Promena brzine rezanja ima mali uticaj na otpor rezanja za većinu materijala obratka i za većinu uslova rezanja.

Efektivna primena tehnologije obrade rezanjem, koja obezbeđuje traženi kvalitet izrade

uz visoku produktivnost i prihvatljive troškove, zavisi od mogućnosti generisanja tačnih predikcija performansi i stanja u procesu. Uticaji različitih faktora, uključujući parametre obrade, svojstva materijala obratka, kinematiku i dinamiku procesa rezanja, geometriju reznog alata i uslove hlađenja i podmazivanja, doveli su do definisanja i primene velikog broja modela za predikciju otpora rezanja kod obrade struganjem. U praksi se za određivanje otpora rezanja najčešće koriste: (1) analitički modeli bazirani na elementarnoj plastomehaničkoj mehanici, (2) numerički modeli bazirani na metodi konačnih elemenata i (3) empirijski modeli bazirani na eksperimentalnim rezultatima i statističkim metodama [7].

Empirijski modeli se zasnivaju na eksperimentalnom određivanju koeficijenata modela, čija je matematička forma unapred definisana, a uobičajeno se koristi za predikciju otpora rezanja u funkciji različitih nezavisnih promenljivih, kao što su: brzina rezanja, dubina rezanja, korak, vrsta materijala obratka, geometrija reznog alata itd. Empirijski modeli se mogu koristiti za predikciju otpora rezanja sa odgovarajućom tačnošću, ali je njihova primena ograničena na opseg parametara i obradnih uslova u kojima su eksperimentalni podaci prikupljeni [7]. Izračunavanje vrednosti otpora rezanja na osnovu empirijskih modela uobičajeno je u praksi zbog jednostavnosti primene i zadovoljavajuće tačnosti za širok spektar materijala, kao i intervala variranja parametara režima obrade.

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije se odnosi na definisanje i analizu empirijskih modela za predikciju otpora rezanja kod struganja čelika iz različitih grupa obradljivosti primenom dimenzionalne analize. Primena dimenzionalne analize omogućava definisanje modela otpora rezanja na osnovu bezdimenzionalnih veličina (grupa) i koeficijenata modela koji se određuju korišćenjem eksperimentalnih podataka prikupljenih na osnovu prethodno definisane eksperimentalne plan matrice. U tom cilju izvršena je sistematska sveobuhvatna analiza različitih aspekata uključujući tehnologiju obrade struganjem, modeliranje otpora rezanja, dimenzionalnu analizu, teoriju planiranja eksperimenta, eksperimentalno određivanje otpora rezanja kod struganja primenom metode direktnih merenja i metode kreiranja i analize predikcionih modela otpora rezanja.

1.2 Cilj istraživanja

Primarni cilj naučnog istraživanja u okviru doktorske disertacije je analiza mogućnosti integracije dimenzionalne analize i eksperimentalnih planova male rezolucije radi definisanja empirijskih modela otpora rezanja kod struganja čelika iz različitih grupa obradljivosti. Pored osnovnih tehnoloških parametara koji definišu režim obrade, kao što su dubina rezanja, korak i

brzina rezanja, cilj istraživanja je i analiza i razmatranje parametara koji se odnose na geometriju reznog alata (glavni napadni ugao i grudni ugao) i materijal obratka (zatezna čvrstoća) radi definisanja osnovnih bezdimenzionalnih veličina (grupa). Kreiranje predikcionih modela ima za cilj sveobuhvatnu i detaljnu analizu uticaja bezdimenzionalnih veličina (grupa) na otpore rezanja i identifikaciju najvažnijih bezdimenzionalnih veličina koje u najvećoj meri utiču na promenu otpora rezanja.

Istraživačka hipoteza koja stoji iza naučnog istraživanja je da se, za razliku od postojećih empirijskih modela za predikciju otpora rezanja kod struganja, do adekvatnog predikcionog modela otpora rezanja, sa aspekta njegove tačnosti i mogućnosti primene može doći primenom ograničenog broja eksperimentalnih ogleda. U tom smislu, za potrebe eksperimentalnog istraživanja je primenjena Tagučijeva plan matrica.

Pored prethodno navedenih, cilj naučnog istraživanja je i analiza mogućnosti definisanja proširenih modela za predikciju otpora rezanja kod struganja, koji bi sadržali i popravne koeficijente za analizu parametara koji nisu obuhvaćeni u inicijalnoj eksperimentalnoj plan matrici. U cilju obezbeđenja pouzdane primene i potvrde slaganja eksperimentalnih rezultata otpora rezanja i predikcija predloženih modela biće izvedena i dodatna eksperimentalna istraživanja koja imaju dva osnovna cilja. Prvi se odnosi na potrebu za eksperimentalnom validacijom kreiranih modela ispitivanjem novih režima obrade u okviru obuhvaćenog eksperimentalnog hiper-prostora. Sa druge strane, ispitivanje režima obrade van okvira obuhvaćenog, eksperimentalnog hiper-prostora, ima za cilj da se ispita mogućnost ekstrapolacije kreiranih modela i njihove primene u širem opsegu intervala variranja parametara sa zadovoljavajućom tačnošću.

Osnovni cilj naučnog istraživanja se može precizno odrediti sledećim specifičnim zadacima:

- Analiza najbitnijih parametara i performansi tehnologije obrade struganjem,
- Detaljna analiza značaja otpora rezanja kod struganja i različitih pristupa modeliranju otpora rezanja na osnovu pregleda literature,
- Definisanje i predstavljanje naučnih metoda koje će se koristiti za definisanje predikcionih modela,
- Istraživanje i definisanje bezdimenzionalnih veličina (grupa) na osnovu analize parametara obrade rezanjem koji u najvećoj meri utiču na otpore rezanja,

- Realizacija eksperimentalnog istraživanja primenom principa teorije planiranja eksperimenta i korišćenje mernog sistema za prikupljanje eksperimentalnih podataka za potrebe kreiranja predikcionih modela,
- Kreiranje modela za predikciju otpora rezanja kod struganja čelika iz različitih grupa obradljivosti u funkciji bezdimenzionalnih veličina,
- Detaljna analiza uticaja bezdimenzionalnih veličina na otpore rezanja za različite materijale obratka,
- Razvoj proširenih modela za predikciju otpora rezanja kod struganja koji sadrže popravne koeficijente za parametre koji nisu prethodno razmatrani u okviru dimenzionalne analize i nisu obuhvaćeni u inicijalnoj eksperimentalnoj plan matrici,
- Eksperimentalna validacija kreiranih modela za predikciju otpora rezanja ispitivanjem novih režima obrade u okviru obuhvaćenog eksperimentalnog hiper-prostora,
- Procena tačnosti kreiranih modela izvan okvira inicijalno obuhvaćenog eksperimentalnog hiper-prostora.

1.3 Primenjene naučno-istraživačke metode

U skladu sa prethodno definisanim predmetom i ciljevima istraživanja u doktorskoj disertaciji su korišćeni multidisciplinarni pristup i različite naučno-istraživačke metode. Analiza i interpretacija eksperimentalnih rezultata, evaluacija i analiza kreiranih predikcionih modela otpora rezanja, kao i izvođenje zaključaka, zasnivaju se na primeni teorijskih principa i sagledavanju istraživanja iz oblasti, ali i primeni dostupnih tehnoloških znanja i podataka iz tehnoloških baza proizvođača reznih alata. U okviru rada na doktorskoj disertaciji i realizaciji naučnih i eksperimentalnih istraživanja u doktorskoj disertaciji su korišćene:

- Metode analize dostupne literature u skladu sa definisanim ciljevima istraživanja,
- Metode indukcije i dedukcije sa ciljem izvođenja zaključaka na osnovu pregleda istraživanja i literaturnih izvora,
- Metode ispitivanja mehaničkih svojstava materijala,
- Metode planiranja, realizacije i analize rezultata eksperimenta,
- Tagučijeva metoda ortogonalnih nizova,
- Digitalna obrada signala za određivanje vrednosti komponenata otpora rezanja pri obradi struganjem,
- Metode dimenzionalne analize,

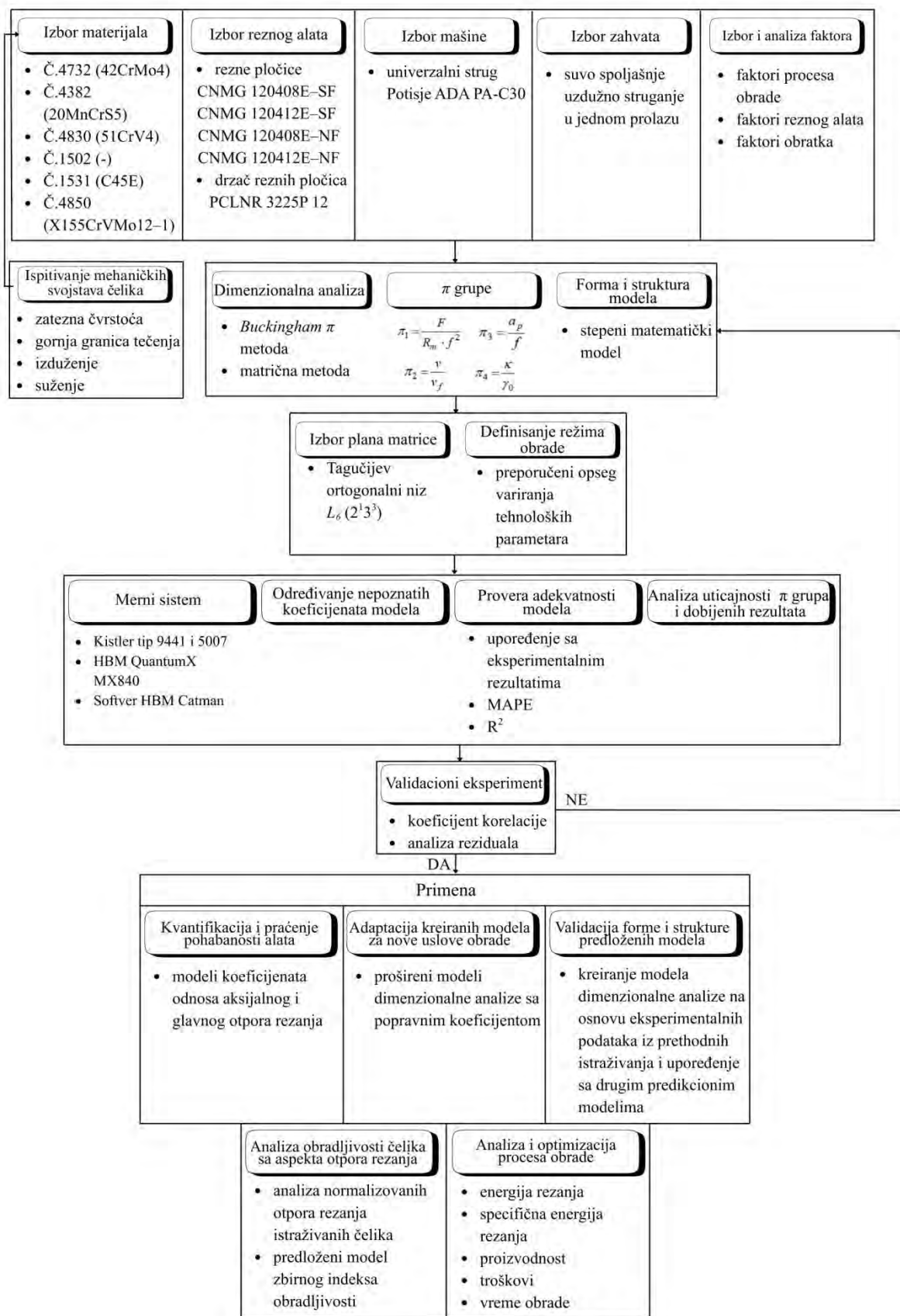
- Metode statističke analize za obradu prikupljenih podataka,
- Metoda najmanjih kvadrata,
- Metode regresione i korelacione analize,
- Metode za verifikaciju kreiranih empirijskih predikcionih modela otpora rezanja.

1.4 Metodologija istraživanja

Metodologija istraživanja koja je primenjena u doktorskoj disertaciji, u cilju definisanja predikcionih modela otpora rezanja kod struganja čelika različite obradljivosti primenom dimenzionalne analize, je ilustrovana na slici 1.1.

Predložena metodologija istraživanja predstavlja sveobuhvatan pristup koji u cilju definisanja predikcionih modela otpora rezanja integriše: (1) sistematsko sagledavanje obradnog sistema, analizu i izbor osnovnih faktora obrade struganjem za modeliranje otpora rezanja, (2) ispitivanje mehaničkih svojstava čelika različitog kvaliteta i obradljivosti, (3) primenu metoda dimenzionalne analize za identifikaciju bezdimenzionalnih grupa, forme i strukture predikcionih modela, (4) definisanje režima obrade u skladu sa Tagučijevim ortogonalnim nizom i nivoima variranja bezdimenzionalnih grupa, sagledavajući opseg preporučenih vrednosti tehnoloških parametara, mogućnosti mašine alatke i dostupnih reznih alata, (5) eksperimentalna merenja otpora rezanja, (6) definisanje predikcionih modela otpora rezanja i proveru njihove adekvatnosti kroz poređenje sa eksperimentalnim rezultatima i statističku analizu, (7) analizu predikcionih modela otpora rezanja i uticajnosti bezdimenzionalnih grupa i (8) validaciju predikcionih modela otpora rezanja ispitivanjem novih režima obrade u i van okvira obuhvaćenog eksperimentalnog hiper-prostora.

U okviru doktorske disertacije, razmatrani su i različiti aspekti praktične primene kreiranih modela za predikciju otpora rezanja.



Slika 1.1 Razvoj predikcionog modela otpora rezanja primenom dimenzionalne analize kod struganja čelika različite obradljivosti

1.5 Struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija se sastoji od deset poglavlja koja su međusobno povezana u jednu celinu. U nastavku su ukratko opisana sva poglavlja doktorske disertacije.

U prvom poglavlju data su uvodna razmatranja o potrebi za modeliranjem otpora rezanja kod procesa obrade struganjem. Predstavljani su predmet, cilj, metodološki okvir i metode koje čine osnovu istraživanja u okviru doktorske disertacije.

Osnove tehnologije obrade struganjem, sveobuhvatna analiza i klasifikacija faktora i performansi obrade struganjem, kao i značaj modeliranja njihovih međuzavisnosti, su prikazani u drugom poglavlju.

U trećem poglavlju su date osnove, značaj i cilj modeliranja procesa obrade struganjem, a predstavljani su i osnovni pristupi modeliranja performansi sa komparativnom analizom analitičkih, numeričkih i empirijskih modela. Takođe, dat je istorijski pregled razvoja modela za predikciju otpora rezanja kod struganja.

U četvrtom poglavlju je dat pregled skorijih eksperimentalnih istraživanja u oblasti modeliranja otpora rezanja kod struganja čelika različitog kvaliteta. Analiza obuhvata istraživane ulazne veličine (parametri procesa, uslovi obrade, karakteristike materijala obratka, karakteristike reznog alata), broj nivoa variranja ulaznih veličina i obuhvaćeni eksperimentalni hiper-prostor, vrste materijala obratka, korišćene eksperimentalne planove sa realizovanim brojem ogleda, kao i različite tipove modela koji su korišćeni za modeliranje i predikciju otpora rezanja.

Peto poglavlje pruža teorijski i metodološki okvir za primenu dimenzionalne analize u modeliranju procesa obrade struganjem. Date su osnove i principi dimenzionalne analize, uključujući metode dimenzionalne analize (*Rayleigh-ova*, *Buckingham-ova* π metoda, *Ipsen-ova* matrična metoda i metoda inspekcije), a razmatrani su i prednosti i nedostaci.

U šestom poglavlju je predstavljena primena dimenzionalne analize za kreiranje modela predikcije otpora rezanja kod struganja korišćenjem *Buckingham-ove* π metode i matrične metode.

U sedmom poglavlju je dat detaljan opis realizovanog eksperimentalnog istraživanja, osnove teorije planiranja eksperimenta, opis obradnog sistema (mašina alatka, rezni alat, predmet obrade, ispitivanje mehaničkih svojstava šest čelika različitog kvaliteta, definisanje režima obrade u skladu sa izabranim Tagučijevim ortogonalnim nizom), kao i opis korišćenog mernog sistema za merenje, prikupljanje i analizu dobijenih podataka u cilju eksperimentalnog određivanja otpora rezanja. U nastavku su dati tabelarni prikaz eksperimentalno izmerenih vrednosti komponenti otpora rezanja, dobijenih prema usvojenoj plan matrici eksperimenta, kao i oblici

strugotine u zavisnosti od vitkosti strugotine za svih šest kvaliteta čelika.

U osmom poglavlju su prikazani kreirani modeli predikcije glavnog i aksijalnog otpora rezanja za svih šest različitih kvaliteta čelika. Provera adekvatnosti modela izvršena je na osnovu upoređivanja predikcija modela sa eksperimentalnim vrednostima otpora rezanja, određivanjem srednje apsolutne procentualne greške i koeficijenta determinacije. Analiza i diskusija rezultata uključuje analizu uticaja bezdimenzionalnih grupa na komponente otpora rezanja. U ovom poglavlju prikazani su i eksperimentalni rezultati iz validacionog eksperimenta za dodatnu verifikaciju predloženih modela, kao i eksperimentalni rezultati iz dodatnih ogleda za određivanje popravnih koeficijenata za poluprečnik zaobljenja vrha alata radi definisanja proširenih modela otpora rezanja. U cilju potvrde adekvatnosti predloženih modela za predikciju otpora rezanja i upoređenja rezultata sa drugim empirijskim modelima, kreirani su modeli za predikciju glavnog otpora rezanja korišćenjem rezultata iz dodatnog eksperimenta (potpuni faktorni plan) i eksperimentalnih rezultata iz referente literature. Pored osnovnih ciljeva modeliranja i analize otpora rezanja, u okviru analize i diskusije rezultata izvršena je i analiza obradljivosti istraživanih čelika sa aspekta otpora rezanja. Takođe, dat je i detaljan pregled mogućih primena predloženih modela otpora rezanja u projektovanju tehnologije obrade struganjem, a konkretna primena je ilustrovan na dva primera.

Zaključci i završna razmatranja, kao i predlozi budućih istraživanja u oblasti modeliranja otpora rezanja i performansi procesa obrade struganjem primenom dimenzionalne analize, su dati u devetom poglavlju.

U desetom poglavlju dat je pregled literaturnih izvora koji su korišćeni u izradi doktorske disertacije i publikovani rezultati autora doktorske disertacije.

Na kraju rada dati su prilozi i biografija autora.

2. TEHNOLOGIJA OBRADJE STRUGANJEM

2.1 Princip struganja

Tehnologija obrade rezanjem obuhvata niz postupaka obrade koji imaju za cilj postizanje željene geometrije, dimenzija i kvaliteta obrađene nepovršine gotovog dela skidanjem materijala. Obrada struganjem je postupak obrade koji podrazumeva mehaničko odvajanje materijala u obliku strugotine sa predmeta obrade koji ima kružno kretanje i predstavlja jedan od najčešće primenjivanih metoda obrade rezanjem u metaloprerađivačkoj industriji, naročito u serijskoj i masovnoj proizvodnji. Koristi za dobijanje cilindričnih, konusnih, ravnih i profilnih površina, kao i za izradu navoja, žlebova i aksijalnih otvora i rupa. U procesu obrade ostvaruju se dva osnovna kretanja: glavno obrtno kretanje predmeta obrade i pomoćno pravolinijsko kretanje alata. Glavno kretanje određeno je brzinom odvajanja sloja materijala sa predmeta obrade (brzinom rezanja), dok je pomoćno kretanje određeno brzinom pomoćnog kretanja, odnosno korakom [8]. Korak je put koji pređe alat za jedan obrtaj predmeta obrade.

Pravac pomoćnog kretanja u odnosu na osu predmeta obrade može biti [9]:

- aksijalan – kada je paralelan osi predmeta obrade,
- radijalan – kada je upravnan na osu predmeta obrade,
- kos – kada je pod nekim uglom u odnosu na osu predmeta obrade.

Obrada struganjem može se klasifikovati na više načina, a prema standardu DIN 8589-1 [10], razlikuju se sledeće metode: ravno struganje, kružno (okruglo) struganje, izrada navoja struganjem, struganje puževa, profilno struganje i oblikovanje struganjem [9].

Zahvati obrade struganjem se prema kvalitetu obrađene površine i količini materijala koja se uklanja razvrstavaju na proizvodne zahvate grube (velike dubine rezanja i veliki koraci), poluzavršne (širok opseg kombinacija dubina rezanja i koraka) i završne obrade (male dubine rezanja i mali koraci).

U savremenim proizvodnim sistemima, struganje se često izvodi na CNC (*eng.* Computer Numerical Control) strugovima, koji nude visoku tačnost, fleksibilnost i mogućnost automatizacije. Još jedna od prednosti primene CNC strugova je povećanje proizvodnosti, usled smanjenja glavnog i pomoćnog vremena, kao i smanjenja broja i trajanja pripremnih operacija. CNC strugovi su ujedno i jedini izbor za obradu rotacionih delova složene geometrije.

Zbog mogućnosti obrade širokog spektra materijala, povoljne mehanike rezanja, kao i činjenice da obezbeđuje visoku produktivnost uz prihvatljive troškove izrade dela, struganje i danas zauzima ključno mesto u gotovo svim granama mašinske industrije. Struganje prema procenama, obuhvata najmanje trećinu svih obrada rezanjem [6].

2.2 Faktori obrade struganjem

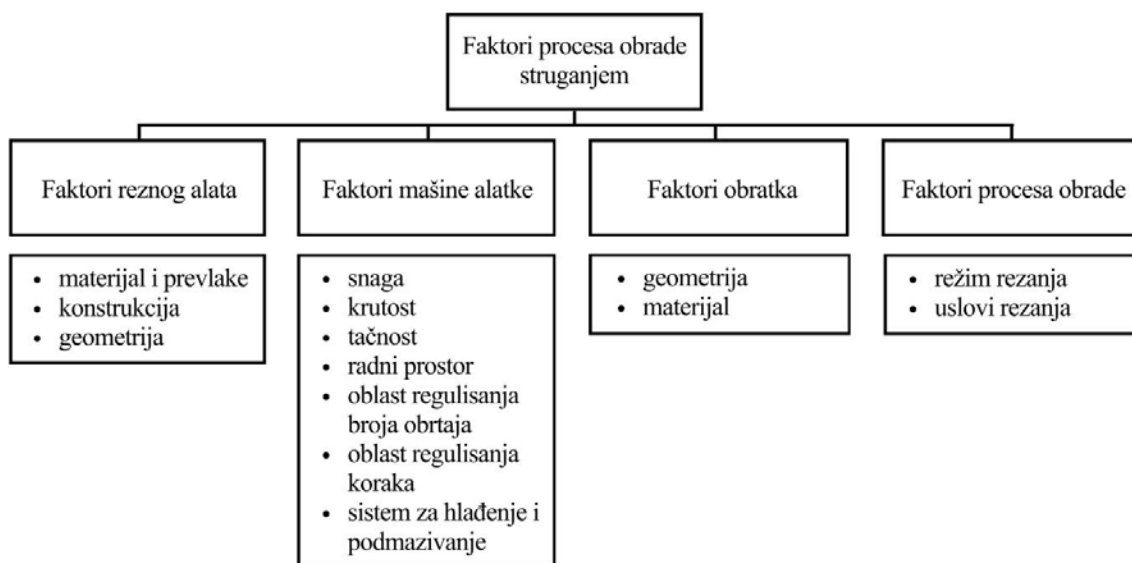
Obrada struganjem predstavlja veoma složen proces obrade materijala, zbog velikog broja uticajnih faktora, različite i promenljive prirode uticajnosti faktora, kao i postojanja interakcija nižeg i višeg reda između faktora. Štaviše, svaki od faktora obrade struganjem, bilo da je reč o kvalitativnim ili kvantitativnim, može se varirati u širokom opsegu, što dovodi do velikog broja mogućih režima obrade, među kojima su neki povoljniji od drugih, sagledavajući bitne performanse procesa kao što su kvalitet, produktivnost ili ekonomičnost obrade. Prema tome, za uspešnu realizaciju procesa obrade struganjem i adekvatno planiranje tehnološkog postupka neophodno je napraviti pažljivu sveobuhvatnu analizu i odabir faktora obrade kako bi se postigli visoka produktivnost, zahtevani kvalitet obrađene površine, dugotrajnost reznog alata i istovremeno smanjenje ukupnih troškova obrade. Uticaj svakog faktora obrade pojedinačno se menja u odnosu na njegov opseg promene, dok se pravi uticaj jedino može razumeti kroz sveobuhvatnu analizu međusobnog uticaja više faktora istovremeno. U praksi se pri obradi struganjem, u zavisnosti od tipa zahvata, bira odgovarajuća kombinacija faktora obrade. Na primer, kod grube ili poluzavršne obrade faktori obrade se biraju na način da se smanji vreme obrade, što odgovara povećanju produktivnost, ili da se smanje troškovi obrade, sagledavajući ostale performanse procesa kao funkcije ograničenja, ukoliko su eksplicitno zadate.

Faktori procesa obrade struganjem se mogu podeliti na:

- Faktore reznog alata:
 - materijal reznog alata i nanese prevlake,
 - konstrukcija reznog alata,
 - geometrija reznog alata;
- Faktore mašine alatke:
 - snaga,
 - krutost,
 - tačnost,

- radni prostor,
- oblast regulisanja broja obrtaja,
- oblast regulisanja koraka,
- sistem za hlađenje i podmazivanje;
- Faktore obratka:
 - geometrija predmeta obrade (složenost, dimenzije, tolerancije mera, oblika i položaja, kvalitet obrađene površine),
 - materijal predmeta obrade (hemijski sastav, mehaničke karakteristike, optičke, fizičke, termičke, električne, magnetne karakteristike, stanje površine, prevlake);
- Faktore procesa obrade:
 - režim rezanja (dubina rezanja, korak, brzina rezanja),
 - uslovi rezanja (upotreba sredstva za hlađenje i podmazivanje).

Na slici 2.1 prikazani su faktori procesa obrade struganjem.



Slika 2.1 Faktori procesa obrade struganjem

2.2.1 Faktori reznog alata

Materijal reznog alata i nanesene prevlake

Rezni alati pri obradi struganjem izloženi su mehaničkim i termičkim naprezanjima usled dejstva otpora rezanja i toplote koja se razvija u zoni rezanja [9]. Shodno tome, materijali za rezne alate moraju posedovati svojstva visoke tvrdoće, otpornosti na visoke

temperature i iznenadne temperaturne promene (toplotne šokove) i odgovarajuću čvrstoću i žilavost. Međutim, ne postoji materijal koji objedinjuje sva potrebna svojstva materijala reznog alata. Navedeni zahtevi su u visokom stepenu suprotstavljeni (sa povećanjem tvrdoće materijala smanjuje se njegova žilavost i obrnuto). Iz navedenih razloga je došlo do razvoja većeg broja materijala za izradu reznih alata. Najčešće se koriste: neoslojeni tvrdi metal, oslojeni tvrdi metal, kermet, keramika, kubni bor nitrid i polikristalni dijamant, u zavisnosti od unapred definisanih zahteva i uslova obrade [11], [12].

Nivo temperature rezanja koji će se dostići u procesu obrade rezanjem zavisi od materijala predmeta obrade, materijala reznog alata, izabranog režima obrade, stepena pohabanosti reznog alata i uslova hlađenja i podmazivanja [13]. Materijal od koga je izrađen rezni alat direktno utiče na otpornost na habanje, odnosno postojanost alata. Osim toga, isti direktno utiče na opseg variranja glavnih parametara obrade (dubina rezanja, korak i brzina rezanja) i na učestalost izmene alata, odnosno rezne pločice, kao i produktivnost i troškove obrade. Prilikom biranja materijala reznog alata trebalo bi sagledati materijal predmeta obrade, zahtevanu produktivnost, uslove hlađenja i podmazivanja i druge specifične zahteve obrade.

Danas se više od 60% reznih alata upotrebljava u oslojenoj formi, to jest sa prevlakama [12]. Prevlake predstavljaju jedan ili više slojeva materijala nanetih na površine reznih elemenata alata. One nude poboljšanu otpornost na habanje, što daje višu postojanost alata i mogućnost da se koriste intenzivniji režimi obrade. Debljina prevlake se kreće u opsegu od 2 do 20 μm . Prema korišćenom materijalu, prevlake se mogu podeliti na [9], [14]:

- tvrde prevlake na bazi titana (TiN, TiC, TiAlN, TiCN, AlTiN),
- keramičke prevlake (Al_2O_3),
- supertvrde prevlake (CVD-DP/BN),
- meke prevlake (MoS_2 , WC/C).

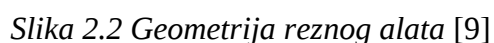
Prevlake na reznim alatima mogu biti jednoslojne (npr. TiN) ili višeslojne, pri čemu se kombinovanjem više prevlaka poboljšava otpornost na habanje, tvrdoća i čvrstoća, ali se povećava i ukupna debljina prevlake, što može dovesti do povećanja poluprečnika zaobljenja rezne ivice [13].

Geometrija reznog alata

Rezni alat se sastoji iz dva osnovna dela: reznog dela (glave) alata gde se nalaze rezni elementi sa sečivima i drške (tela) alata koja služi da se alat postavi i pričvrsti na nosač alata

Uglovi reznog dela alata služe za precizno definisanje položaja sečiva, grudne i ledne površine u prostoru. Razlikuju se dve vrste uglova reznog alata [15]:

- Geometrija reznog alata prikazana je na slici 2.2.



- leđni ugao α – ugao između leđne površine i ravni koja prolazi kroz sečivo i normalna je na osnovnu ravan,
- ugao klina β – ugao između grudne i leđne površine,
- grudni ugao γ – ugao između grudne površine i ravni koja prolazi kroz sečivo i paralelna je sa osnovnom ravni,
- glavni napadni ugao κ – ugao između projekcije sečiva na osnovnu ravan i pravca pomoćnog kretanja,

- pomoćni napadni ugao κ_1 – ugao između projekcije pomoćnog sečiva na osnovnu ravan i pravca pomoćnog kretanja,
- ugao vrha alata ε – ugao između projekcije glavnog i pomoćnog sečiva na osnovnu ravan,
- ugao nagiba sečiva λ_s – ugao između sečiva u pogledu P i ravni paralelne sa osnovnom ravni,
- poluprečnik zaobljenja vrha alata r_ε – spaja glavno i pomoćno sečivo.

Leđni ugao, ugao klina, grudni ugao, glavni napadni ugao, pomoćni napadni ugao, ugao vrha alata, ugao nagiba sečiva i poluprečnik zaobljenja vrha alata predstavljaju osnovne geometrijske parametre reznog alata. Njihov izbor i međusobni odnosi u značajnoj meri utiču na mehaniku rezanja (formiranje i odvođenje strugotine, otpori rezanja, temperatura rezanja, naponi i deformacije, habanje alata) [16]. Takođe, ovi parametri geometrije alata utiču na kvalitet obrađene površine, dimenzionalnu tačnost, oblik obrađene površine, stabilnost procesa i pojavu vibracija [17].

Važno je napomenuti da se geometrijski parametri reznog alata ne mogu birati proizvoljno, a neki od njih su međusobno i funkcionalno povezani. Tako na primer, leđni ugao, ugao klina i grudni ugao se ne mogu birati potpuno nezavisno, jer su međusobno geometrijski povezani. Naime, njihov zbir u preseku poprečne ravni alata mora da iznosi 90° [13], odakle sledi da povećanje, na primer leđnog ugla, povlači smanjenje ugla klina, grudnog ugla ili i jednog i drugog. Takođe, vrednost glavnog napadnog ugla zavisi i od međusobnog odnosa poluprečnika zaobljenja vrha alata i dubine rezanja [18]. Konkretna geometrija reznog alata određena je izborom rezne pločice i držača, a bira se u skladu sa materijalom reznog alata, materijalom obratka, vrstom zahvata koji se realizuje (gruba obrada, završna obrada, profilno struganje) i postavljenim zahtevima u pogledu kvaliteta, troškova ili produktivnosti.

Oblik rezne pločice

Oblik rezne pločice određuje čvrstoću rezne ivice, broj reznih ivica, mogućnost rada u teško dostupnim zonama, potrošnju energije, kao i mogućnost pojave vibracija alata. Izbor odgovarajućeg oblika rezne pločice zavisi od vrste materijala koji se obrađuje, vrste obrade (gruba, poluzavršna, završna), snage mašine alatke, mogućnosti pojave vibracija, vrste zahvata (uzdužno struganje, profilisanje, poprečno struganje), kao i uslova obrade (prekidno ili neprekidno rezanje). Pravilna kombinacija oblika i geometrije rezne pločice omogućava da

se u procesu rezanja postigne balans između tačnosti obrade, stabilnosti obrade i trajnosti reznog alata.

2.2.2 Faktori mašine alatke

Snaga mašine alatke određuje sposobnost mašine da savlada otpore pri obradi materijala. Veća snaga omogućava obradu tvrdih materijala i postizanje veće proizvodnosti. Snaga pogonskog elektromotora mašine alatke P_M (kW) se određuje kao odnos snage rezanja P_c (kW) i mehaničkog stepena iskorišćenja mašine η [8]:

$$P_M = \frac{P_c}{\eta} \quad (2.1)$$

Krutost mašine alatke predstavlja otpornost mašine na deformisanje pod dejstvom sila rezanja i drugih opterećenja. Krutost komponenti mašine alatke (postolje, glavno vreteno, nosač alata i konjić, ako se isti koristi) direktno utiče na tačnost mera i kvalitet obrađene površine [2]. Veća krutost mašine alatke znači veću preciznost i stabilnost u radu [19].

Tačnost mašine alatke predstavlja sposobnost mašine da proizvede delove u skladu sa zadatim dimenzijama i tolerancijama.

Radni prostor mašine alatke označava prostor u kome rezni alat i obradak mogu da se kreću. Isti određuje maksimalne dimenzije obratka koji se može obrađivati.

Oblast regulisanja broja obrtaja glavnog vretena mašine alatke je, uzimajući u obzir prečnik obrade, direktno povezana sa opsegom brzina rezanja koje se mogu realizovati. Šira oblast regulisanja omogućava obradu većeg broja različitih materijala i realizaciju različitih zahvata obrade.

Oblast regulisanja koraka odnosi se na brzinu pomeranja alata ili radnog stola mašine alatke pri obradi i pozicioniranju, što direktno utiče na produktivnost.

Sistem za hlađenje i podmazivanje zone obrade spada u pomoćne sisteme mašine alatke. Ovaj sistem se sastoji od dva osnovna elementa: sredstvo za hlađenje i podmazivanje (SHP) i uređaj kojim se SHP dozira i dovodi u zonu formiranja strugotine [18]. Osnovni cilj korišćenja ovog sistema je poboljšanje performansi obrade efektima hlađenja i/ili podmazivanja, pri čemu ovi efekti zavise od količine proizvedene toplote (podmazivanje je važnije pri nižim brzinama rezanja, dok je hlađenje važnije pri višim brzinama rezanja). Sredstvo za hlađenje i podmazivanje pozitivno utiče na obradak (u smislu povećanja tačnosti mera, izostanka termičkih oštećenja i boljeg kvaliteta obrađene površine), rezni alat (u smislu povećanja postojanosti alata i povoljnijeg lomljenja strugotine) i sam proces obrade (u smislu obezbeđenja stabilnosti procesa, povoljnijeg odvođenja strugotine, smanjenja temperature

rezanja i smanjenja otpora rezanja) [18]. Međutim, upotreba SHP ima negativan uticaj na ekološke performanse.

Na cenu i kvalitet proizvedenog dela u značajnoj meri utiču brzina (glavnog i pomoćnog kretanja), snaga, preciznost i tačnost mašine alatke [2]. Raspoloživa snaga mašine alatke, kao i maksimalan broj obrtaja glavnog vretena i oblast regulisanja koraka, ograničavaju izbor vrednosti tehnoloških parametara (dubina rezanja, korak i brzina rezanja), koji preko zapreminske proizvodnosti i broja prolaza direktno utiču na vreme obrade. Klasifikacija gotovog dela kao škarta, zbog toga što je van tolerancija, je u većini slučajeva rezultat neodgovarajuće tačnosti mašine alatke i stanja pohabanosti reznog alata, a ne greške operatera mašine ili nesavršenosti (odstupanja karakteristika) materijala obratka [2].

2.2.3 Faktori obratka

Geometrija obratka

Geometrija obratka se odnosi na složenost, dimenzije i tolerancije. Predstavlja ključan faktor pri obradi struganjem, jer direktno utiče na izbor reznog alata, mašine, tehnološkog postupka, kao i kvalitet gotovog dela (proizvoda). Dimenzije definišu veličinu predmeta obrade, dok tolerancije definišu dozvoljena odstupanja od prethodno zadatih dimenzija [20].

Materijal obratka

Kod procesa obrade rezanjem faktori obratka, naročito mehanička svojstva materijala, su veoma važni jer utiču na kvalitet obrađene površine [21]. Pored toga, faktori obratka određuju brojne performanse procesa (kvalitet, troškovi, vreme obrade, i drugo), ali ujedno i određuju izbor drugih važnih veličina, pa su stoga osnov za pravilno planiranje procesa obrade struganjem. Kod procesa obrade struganjem, najbitniji faktori materijala obratka uključuju:

- vrstu materijala obratka,
- mehanička i fizička svojstva materijala obratka,
- strukturu i homogenost materijala,
- hemijski sastav materijala obratka,
- prethodnu obradu i metalurško stanje materijala,
- mehaničku i termičku stabilnost obratka.

Vrsta materijala obratka određuje ponašanje materijala prilikom skidanja strugotine,

odnosno aspekte obradljivosti i ima ključan uticaj na izbor materijala reznog alata, režima rezanja i eventualnu primenu sredstva za hlađenje i podmazivanje. Preporučene kombinacije materijala obratka i materijala reznog alata koje se mogu koristiti pri obradi date su u tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Preporučene kombinacije materijala alata i obratka [22]

	Meki obojeni metali (Al, Cu)	Ugljenični / niskolegirani čelici	Kaljeni alatni i čelici za kalupe	Liveno gvožđe	Legure na bazi nikla	Legure na bazi titana
Brzorezni čelik	O/⊗	O/⊗	x	⊗/x	⊗/x	⊗/x
Tvrđi metal (uključujući oslojeni)	O	✓/O	⊗	✓/O	✓	O
Kermet	⊗/x	✓	x	⊗	x	x
Keramika	x	✓/O	O	✓	✓/O	x
CBN	⊗/x	x	✓	✓/O	O	O
PCD	✓	x	x	x	x	✓
✓ – dobro; O – u redu pod nekim uslovima; ⊗ – moguće, ali se ne preporučuje; x – izbegavati						

2.2.4 Faktori procesa obrade

Režim rezanja

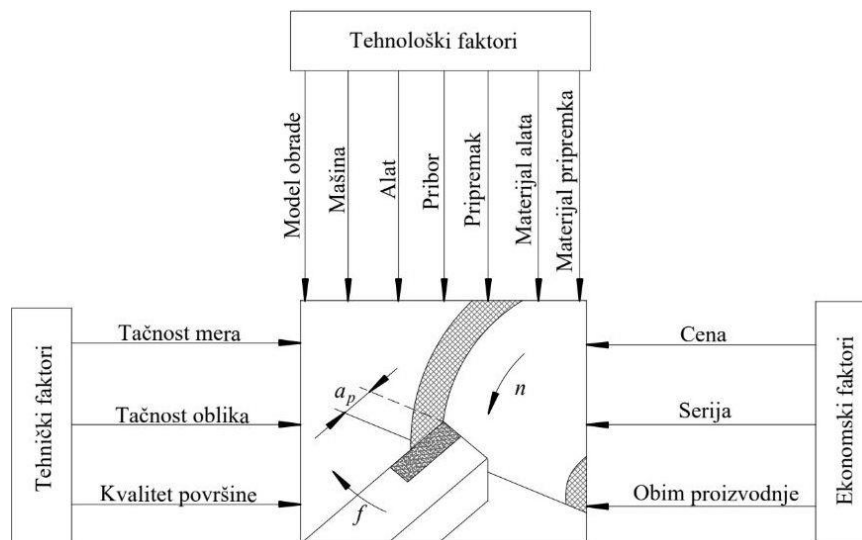
Režim rezanja predstavlja osnovni element procesa obrade koji definiše položaj i relativno kretanje reznog alata i predmeta obrade. Režim rezanja se određuju za svaki zahvat, što podrazumeva definisanje tri glavna tehnološka parametra: dubinu rezanja (a_p), korak (f) i brzinu rezanja (v) [9]. Pored ova tri najvažnija parametra, naročito u slučaju uklanjanja veće zapremine materijala, u režim rezanja može se uvrstiti i broj prolaza.

Dubina rezanja je dimenziona razlika između prethodne i obrađene površine, merena upravno na obrađenu površinu. Korak predstavlja pomeranje reznog alata u pravcu pomoćnog kretanja za jedan obrtaj predmeta obrade. Brzina rezanja je brzina kojom rezni klin alata skida zahvaćeni sloj materijala predmeta obrade [9].

Vrednosti tehnoloških parametara zavise od izabranog metoda obrade, karakteristika mašine alatke, reznog alata, pribora, stanja priprema, materijala priprema, materijala alata, zahtevane tačnosti mera i oblika, zahtevanog kvaliteta obrađene površine, cene, serije i obima proizvodnje [18]. Njihovim izborom direktno se definišu debljina i širina reznog sloja,

odnosno površina poprečnog preseka reznog sloja, čiji proizvod sa brzinom rezanja definiše količinu uklonjenog materijala u jedinici vremena, tj. zapreminsku proizvodnost. Ujedno u značajnoj meri utiču na mehaniku rezanja i brojne druge performanse koje se odnose na kvalitet i troškove, pa se njihovom određivanju pridaje veliki značaj. Tehnološki parametri se obično definišu sledećim redosledom: najpre se određuje dubina rezanja, zatim korak, a na kraju brzina rezanja [9].

Iako je redosled određivanja tehnoloških parametara dobro poznat u praksi, usvajanje konkretnih vrednosti nije jednostavno, jer je potrebno sagledati vrstu materijala koji se obrađuje, geometrijski oblik i dimenzije priprema, karakteristike dostupne mašine alatke, reznog alata i steznog pribora, ali i zahteve po pitanju kvaliteta obrade, tačnosti obrade itd. (slika 2.3).



Slika 2.3 Uticajni faktori na izbor režima obrade [9]

Prvi tehnološki parametar koji se usvaja je dubina rezanja. Opšte preporuke proizvođača alata u vezi sa odnosom dubine rezanja i poluprečnika zaobljenja vrha alata (dubina rezanja ne treba da bude manja od poluprečnika zaobljenja vrha alata [12]), kao i odnosom maksimalne dužine rezne ivice u zahvatu i dužine rezne ivice alata [12], uglavnom su već primenjene kroz preporučeni opseg za dubinu rezanja. Obzirom da se sa povećanjem dubine rezanja linearno povećavaju sve komponente otpora rezanja [14], prilikom izbora dubine rezanja treba uzeti u obzir dozvoljenu maksimalnu silu na nosaču alata mašine alatke, kao i raspoloživu snagu i maksimalni obrtni moment na glavnom vretenu. Generalno, treba koristiti potencijal dubine rezanja za smanjenje broja prolaza. Nakon usvajanja dubine

rezanja usvaja se korak. Kombinacija preporučenog opsega za dubinu rezanja i preporučenog opsega za korak odgovara povoljnom području u dijagramu lomljenja strugotine koji proizvođač alata formira za konkretnu izmenljivu pločicu [12]. Obzirom da se sa povećanjem koraka nelinearno povećavaju sve komponente otpora rezanja [14], ali u manjoj meri u odnosu na dubinu rezanja, prilikom izbora koraka treba takođe uzeti u obzir dozvoljenu maksimalnu silu na nosaču alata mašine alatke, kao i raspoloživu snagu i maksimalni obrtni moment na glavnom vretenu, sada sa poznatom dubinom rezanja. Prilikom usvajanja koraka treba uzeti u obzir i traženi kvalitet obrađene površine, obzirom da korak, zajedno sa poluprečnikom zaobljenja vrha alata, direktno utiče na kvalitet obrade. Za različite materijale obratka dostupni su i preporučeni opsezi za vitkost strugotine (količnik dubine rezanja i koraka) [23], koji dodatno ograničavaju moguće kombinacije vrednosti dubine rezanja i koraka. Generalno, treba koristiti potencijal koraka za smanjenje vremena obrade. Poslednji tehnološki parametar koji se usvaja je brzina rezanja. Vrednost brzine rezanja direktno zavisi od izabranog koraka i izabranog kvaliteta izmenljive pločice (materijal izmenljive pločice i nanese prevlake). Brzina rezanja se može korigovati primenom korekcionog faktora, uzimajući u obzir tvrdoću materijala obratka, obzirom da se inicijalno usvaja za materijal koji je reprezent grupe materijala kojoj pripada materijal obratka. Od svih tehnoloških parametara brzina rezanja ima najveći uticaj na postojanost reznog alata [12].

S obzirom na složenost problema, izbor režima rezanja kod struganja najčešće se vrši na osnovu iskustvenog znanja, preporučenih tabelarnih podataka proizvođača alata, analitičkih proračuna ili formulisanjem i rešavanjem optimizacionih modela. Iskustveno znanje operatera mašina i inženjera u proizvodnji, stečeno kroz praksu, omogućava brzo određivanje režima obrade. Tabelarni podaci, koje nude proizvođači reznog alata, predstavljaju dobar izvor informacija zasnovan na eksperimentalnim ispitivanjima u standardnim kontrolisanim uslovima obrade. Analitički proračuni, koji se oslanjaju na teorijske modele obrade metala, omogućavaju izbor režima rezanja uzimajući u obzir mehanička i fizička svojstva materijala predmeta obrade i reznog alata. Sa druge strane, optimizacioni modeli omogućavaju određivanje optimalnog režima obrade, sagledavajući veći broj performansi procesa sa ciljem postizanja određenih ciljeva, kao što su na primer minimizacija vremena obrade, uz uslov postizanja željenog kvaliteta površine.

Uslovi rezanja

Pod uslovima rezanja podrazumeva se da li se obrada struganjem odvija uz korišćenje sredstva za hlađenje i podmazivanje ili bez istog (suvo struganje). Sredstvo za hlađenje i

podmazivanje (SHP) se koristi u cilju odvođenja toplote nastale u zoni rezanja, smanjenja trenja između reznog alata i obratka i reznog alata i strugotine i lakšeg odvođenja strugotine [9]. SHP ima rashladno, podmazujuće, mehaničko, difuzno i spirajuće dejstvo [9]. Pri veoma malim brzinama rezanja može se formirati tanak film SHP i u tim slučajevima intenzitet trenja se smanjuje i do 80%.

Dovođenje SHP može biti:

- oblevanjem reznog alata i obratka,
- u vidu mlaza pod visokim pritiskom kroz dršku (telo) alata,
- u vidu mlaza pod visokim pritiskom u pravcu grudne ili leđne površine,
- kroz dršku (telo) alata.

Vrste SHP koje se najviše koriste kod obrade struganjem su: čista ulja, uljne emulzije, polusintetičke tečnosti, hemijske (sintetičke) tečnosti, vazduh i azot, masti, praškovi i filmovi [18].

Korišćenjem SHP obezbeđuje se povoljnije odvijanje triboloških i termodinamičkih procesa u toku obrade, što ima višestruki značaj, kako za izradak (kvalitet obrađene površine, izostanak termičkih oštećenja, zaštita od korozije), tako i za rezni alat (smanjenje habanja, povećanje postojanosti, zaštita od korozije). Indirektno, pravilnim odabirom i primenom SHP povećava se efikasnost i produktivnost procesa obrade, sa mogućnošću smanjenja troškova [18]. Sa druge strane, iako SHP pružaju čitav niz tehnoloških prednosti, njihova primena, skladištenje i reciklaža predstavljaju značajnu opasnost po životnu sredinu, ali i opasnost po zdravlje operatera mašina [13], [24]. Pored triboloških karakteristika SHP, tipa i vrste obrade, materijala alata i predmeta obrade, kao i izabranog režima obrade, izbor SHP zavisi i od specificiranih zahteva kvaliteta, kao i ekonomskih i ekoloških kriterijuma.

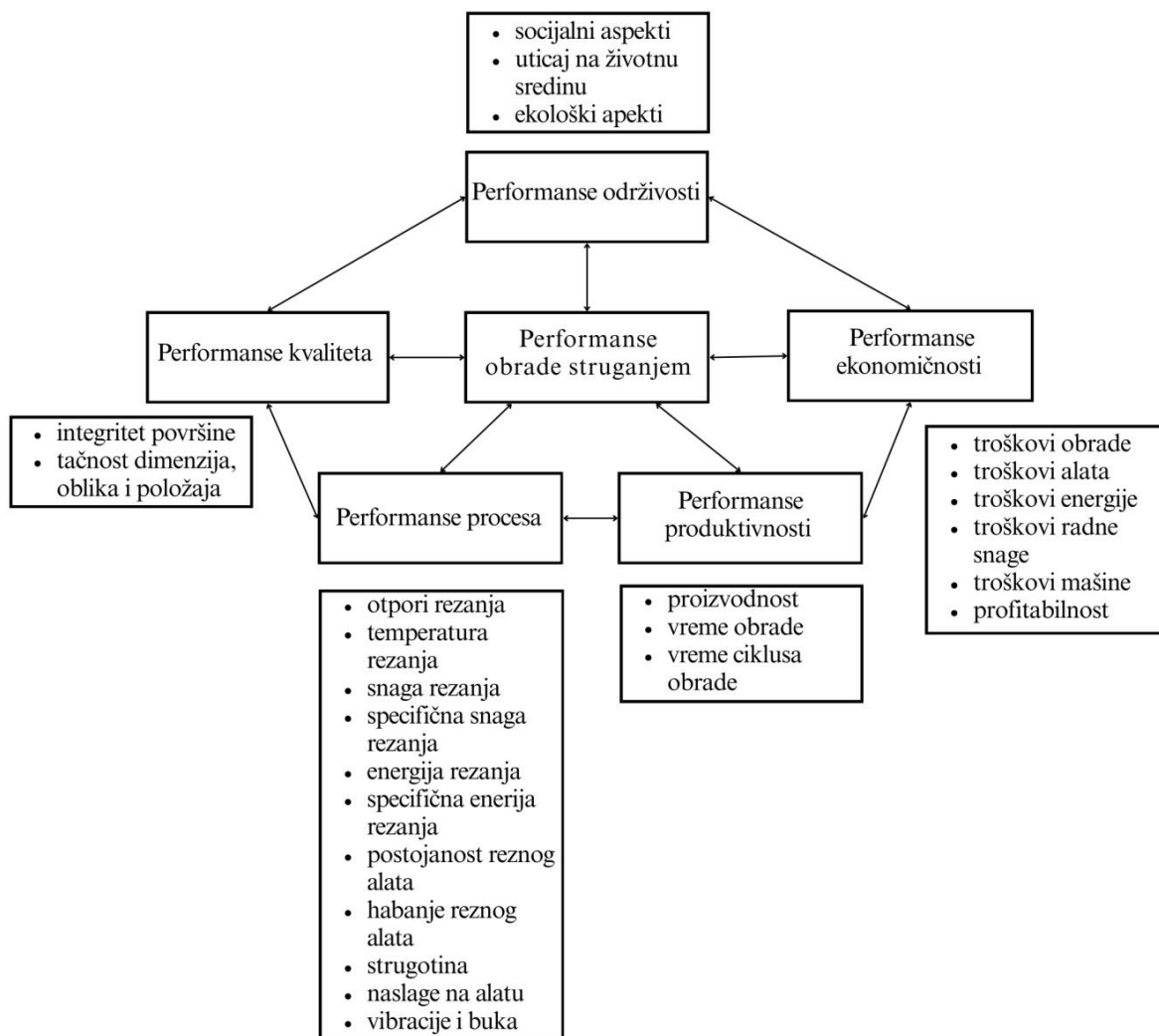
2.3 Performanse obrade struganjem

Performanse obrade struganjem predstavljaju skup pokazatelja, zavisnih u manjoj ili većoj meri od svih faktora obrade, koji se koriste za procenu efikasnosti i uspešnosti procesa obrade struganjem, uzimajući u obzir produktivnost, kvalitet obrade, kao i ukupne troškove proizvodnje. Performanse obrade struganjem mogu se grupisati u pet osnovnih grupa:

- performanse procesa (otpori rezanja, temperatura rezanja, snaga rezanja, specifična snaga rezanja, energija rezanja, specifična energija rezanja, postojanost reznog alata, habanje alata, strugotina, naslage na alatu, vibracije i buka),

- performanse kvaliteta (tačnost dimenzija, oblika i položaja, integritet površine (hrapavost obrađene površine, zaostali naponi, mikrostrukturne promene, tvrdoća površinskog sloja)),
- performanse produktivnosti (proizvodnost, vreme obrade, vreme ciklusa obrade),
- performanse ekonomičnosti (troškovi obrade, troškovi alata, troškovi energije, troškovi radne snage, troškovi mašine, profitabilnost),
- performanse održivosti (socijalni aspekti, uticaj na životnu sredinu, ekološki aspekti: energetska efikasnost, korišćenje SHP, smanjenje otpada, emisije ugljen-dioksida).

Performanse obrade struganjem prikazane su na slici 2.4.



Slika 2.4 Performanse obrade struganjem

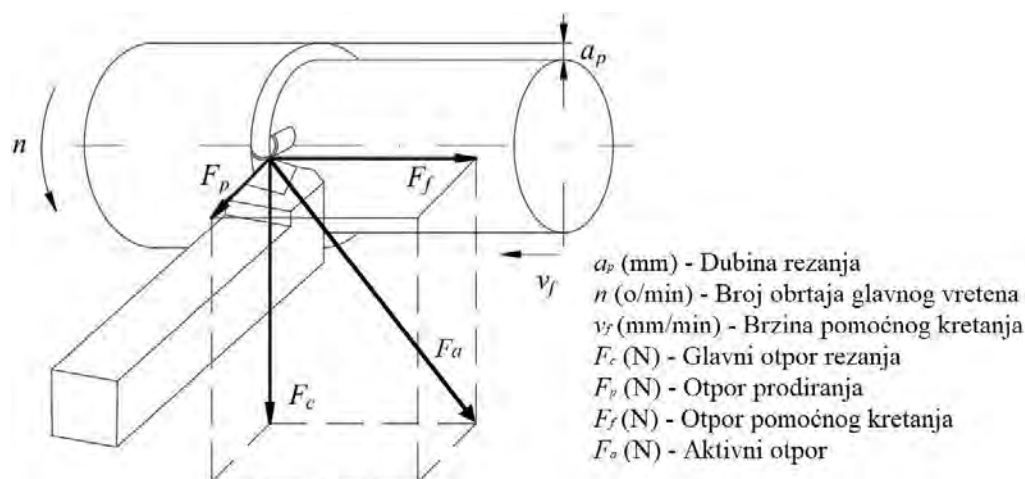
2.3.1 Performanse procesa

Performanse procesa su ključni pokazatelji koji opisuju kako se odvija sam proces obrade materijala struganjem, a obuhvataju performanse koje direktno utiču na ostale performanse obrade struganjem.

Otpori rezanja potiču od otpora na smicanje koji se moraju prevazići radi uklanjanja materijala sa predmeta obrade i od sila trenja koje se javljaju između obratka i reznog alata, koje se generišu prilikom kretanja strugotine preko grudne površine alata i u mnogo manjoj meri na površini kontakta između obratka i leđne površine alata. Intenzitet otpora rezanja zavisi od više faktora, među kojima su ključni tehnološki faktori (brzina rezanja, dubina rezanja i korak), materijal predmeta obrade, karakteristike reznog alata (materijal i nanese prevlake, geometrija, stanje reznih ivica) i sredstvo za hlađenje i podmazivanje.

Kod obrade struganjem otpor rezanja se sastoji od tri osnovne komponente koje deluju u različitim pravcima i zajedno određuju ukupni otpor koji treba savladati tokom obrade (slika 2.5) [9]:

- F_c – glavni otpor rezanja (tangencijalni),
- F_p – otpor prodiranja (radijalni),
- F_f – otpor pomoćnog kretanja (aksijalni).



Slika 2.5 Komponente otpora rezanja kod struganja

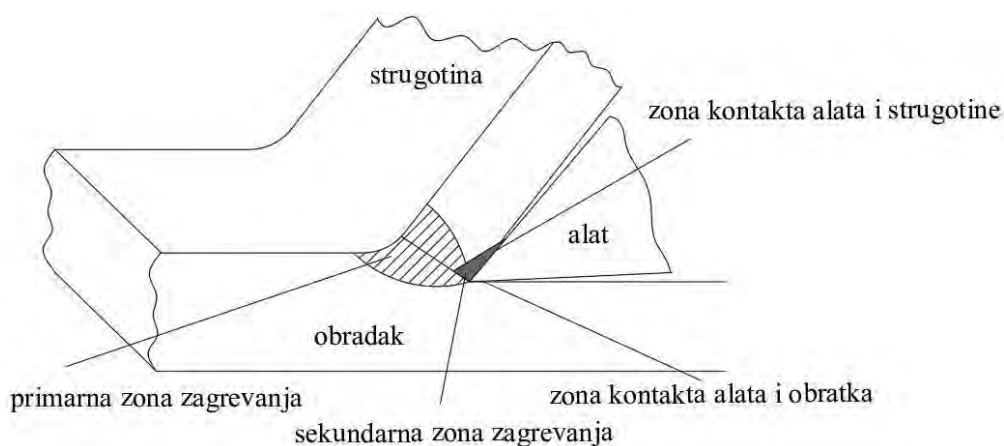
Komponente otpora rezanja razlikuju se međusobno po intenzitetu i značaju koji imaju u procesu obrade. Najveći značaj imaju glavni otpor rezanja i otpor pomoćnog kretanja. Glavni otpor rezanja u pravcu relativnog kretanja alata određuje količinu rada potrebnog za pomeranje reznog alata na datu udaljenost. Otpor pomoćnog kretanja određuje snagu

potrebnu za pogone pomoćnog kretanja koji su instaliran na alatnoj mašini. Otpor prodiranja se obično zanemaruje kod ortogonalnog rezanja, pa se ukupni otpor rezanja može svesti na aktivni otpor rezanja F_a [14]. Za praktične proračune i proračune snage i energije rezanja, koristi se samo glavni otpor rezanja iz razloga što snaga/energija pomoćnog kretanja iznosi samo 0,03 – 3% od ukupne snage ili energije rezanja, usled relativno male brzine pomoćnog kretanja i pređenog puta [13]. Približan odnos komponenata otpora rezanja iznosi 5:2:1 [5]. Međutim, ovaj odnos između komponenata nije apsolutno konstantan, već može i znatno odstupati od navedenih vrednosti.

Temperatura rezanja nastaje kao rezultat generisanja toplote tokom procesa obrade struganjem usled plastične deformacije materijala u zoni rezanja i trenja između reznog alata i strugotine na grudnoj površini alata, kao i između ledne površine alata i obratka, a razvija se u tri zone (slika 2.6) [9], [15]:

- zoni rezanja (ravan smicanja),
- zoni kontakta reznog alata i obratka,
- zoni kontakta reznog alata i formirane strugotine.

Na početku procesa rezanja, temperatura se brzo povećava i dostiže određenu maksimalnu vrednost, a deo toplote iz zone rezanja se prenosi dalje. Oko 90% generisane toplote odvodi se strugotinom koja napušta zonu rezanja, dok se preostali deo toplote prenosi na rezni alat i obradak [25]. Visoka temperatura u zoni rezanja može izazvati mikrostrukturne promene u materijalu obratka, a samim tim uticati i na kvalitet i integritet obrađene površine. Takođe, usled povišene temperature dolazi do smanjenja čvrstoće i tvrdoće materijala reznog alata, što dovodi do plastične deformacije rezne ivice, što pak vodi ka njenom postepenom zatupljivanju, povećanju otpora rezanja i ubrzanom habanju [9].



Slika 2.6 Zone zagrevanja pri obradi struganjem

Snaga rezanja P_c (kW) predstavlja količinu mehaničke energije koja je potrebna da bi se materijal efikasno uklonio tokom procesa obrade rezanjem. Može se odrediti na osnovu glavnog otpora rezanja F_c (N) i brzine rezanja v (m/min) korišćenjem sledeće jednačine [9]:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v}{60 \cdot 10^3} \quad (2.2)$$

Procena snage rezanja kod struganja je vrlo važna s obzirom na izbor režima rezanja, mašine alatke, reznog alata, ali i procenu stabilnosti i ekonomičnosti procesa obrade. Takođe, model snage rezanja često se koristi kao funkcija ograničenja pri određivanju optimalnih režima obrade.

Specifična snaga rezanja P_{c-c} (W/mm³) predstavlja snagu potrebnu za uklanjanje jedinične zapremine materijala u jedinici vremena. Može se odrediti deljenjem ukupne snage rezanja sa zapreminskom proizvodnošću [26]:

$$P_{c-c} = \frac{F_c \cdot v}{q_v} = \frac{F_c \cdot v}{a_p \cdot f \cdot v} = \frac{F_c}{a_p \cdot f} \quad (2.3)$$

U literaturi se specifična snaga rezanja naziva još i specifični pritisak rezanja [27] ili specifični otpor rezanja (simbol k_c) [28]. Procena specifične snage rezanja je bitna za izbor mašine i reznog alata, evaluaciju obradljivosti različitih materijala, a može se koristiti i kao ciljna funkcija za optimizaciju režima obrade sa aspekta energetske efikasnosti.

Energija rezanja E_c (J) predstavlja ukupnu energiju koja je potrebna da bi se izvršio proces obrade rezanjem. Može se odrediti na osnovu snage rezanja P_c (kW) i vremena rezanja t_c (min):

$$E_c = \frac{P_c \cdot t_c \cdot 60}{1000} \quad (2.4)$$

Procena energije rezanja je važna jer omogućava analizu ukupne potrošnje energije tokom obrade, što je ključno za planiranje i optimizaciju procesa obrade, kao i povećanje energetske efikasnosti procesa struganja.

Specifična energija rezanja E_{sc} (J/mm³) predstavlja energiju rezanja potrebnu da se ukloni jedinična zapremina materijala u toku obrade. Specifična energija rezanja se može izraziti kao odnos snage rezanja P_c (W) i zapreminske proizvodnosti q_v (mm³/s):

$$E_{sc} = \frac{P_c}{q_v} \quad (2.5)$$

Postojanost reznog alata predstavlja vreme neprekidnog rezanja tokom kojeg rezni alat zadržava rezne karakteristike, tj. sposobnost efikasnog uklanjanja materijala, bez potrebe za oštrenjem ili zamenom, pod određenim uslovima obrade [11]. Postojanost zavisi od niza uticajnih faktora: režima rezanja (brzina rezanja, korak, dubina rezanja), rezne geometrije i

materijala alata, karakteristika obrađivanog materijala, kao i uslova hlađenja i podmazivanja. Za potrebe planiranja tehnološkog postupka najčešće se koristi *Taylor*-ov model postojanosti alata:

$$T = C_T \cdot v^{k_v} \cdot f^{k_f} \cdot a_p^{k_a} \quad (2.6)$$

gde su: T (min) postojanost alata, v (m/min) brzina rezanja, f (mm/o) korak, a_p (mm) dubina rezanja, konstanta C_T i eksponenti k_v , k_f i k_a se određuju eksperimentalnim istraživanjem.

Postojanost reznog alata se određuje u odnosu na kriterijum pohabanosti alata, a to je zadata dopuštena vrednost mere habanja alata. Najčešće korišćena mera habanja alata je srednja širina pojasa habanja na leđnoj površini alata VB. U praksi se vrednost od $VB = 0.3$ mm najčešće uzima za kritičnu vrednost habanja alata koja određuje kraj perioda rezanja nakon kojeg dalji rad alatom više nije ekonomski opravdan. Veća postojanost reznog alata omogućava obradu sa manjim brojem prekida u radu, manji broj izmena reznih pločica, niže troškove alata, kao i veću produktivnost. Prema tome, ova performansa procesa je direktno povezana sa performansama ekonomičnosti i produktivnosti. Poznavanje modela postojanosti reznog alata, poput *Taylor*-ove jednačine, predstavlja neophodan uslov za optimizaciju režima rezanja i efikasno planiranje tehnološkog postupka obrade.

Habanje reznog alata predstavlja oblik trošenja alata kojim dolazi do gubitka rezne sposobnosti, to jest smanjenja efikasnosti reznog alata tokom procesa obrade. Gubitak rezne sposobnosti reznog alata je posledica [9], [29]:

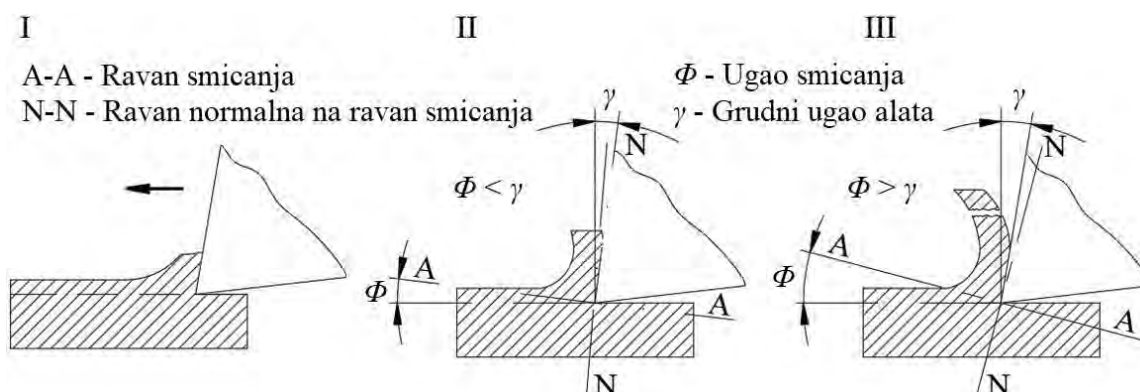
- habanja reznih elemenata alata (posebno na leđnoj i grudnoj površini),
- plastične deformacije sečiva reznog alata (usled visokih temperatura i opterećenja),
- krzanja, odlamanja ili razaranja delova sečiva reznog alata (usled udarnih opterećenja, neodgovarajućih parametara obrade ili mikrostrukturnih nepravilnosti i defekata u materijalu reznog alata).

Habanje reznih elemenata je posledica dejstva temperature, pritiska i trenja na kontaktnim površinama između reznog alata, obratka i strugotine. Zapravo, habanje i oštećenje reznog alata nastaju kao posledica kombinovanog uticaja mehaničkih opterećenja (npr. plastična deformacija rezne ivice), trenja i difuzije, mikrostrukturnih faktora, kao i termičkih i cikličkih naprezanja [30]. Površina na kojoj će se habanje javiti zavisi pre svega od materijala obratka, brzine rezanja i opterećenja u zoni rezanja. Postoje tri osnovna vida habanja reznog alata [9], [11]:

- habanje u vidu pojasa po leđnoj površini alata,
- habanje u vidu kratera po grudnoj površini alata,

- kombinovano habanje koje obuhvata i grudnu i leđnu površinu alata.

Formiranje strugotine predstavlja složen proces koji obuhvata niz fizičko-hemijskih pojava, a odvija se u više faza koje zavise od uslova rezanja i osobina materijala obratka [31]. U prvoj fazi rezni alat sabija materijal ispred grudne površine, pri čemu raste naprezanje u zoni rezanja. Kada napon u materijalu dostigne ili premaši granicu plastične deformacije, dolazi do odvajanja materijala i početka formiranja strugotine. Dalje prodiranje reznog alata izaziva povećanje napona smicanja. Kada napon smicanja premaši otpornost materijala na smicanje, javlja se prekid veza unutar materijala duž određene ravni, pri čemu nastaje strugotina. Ugao smicanja Φ određuje orijentaciju te ravni [15]. U slučaju kad je ugao smicanja manji od grudnog ugla alata, proces formiranja strugotine se završava drugom fazom, to jest strugotina se odvodi bez dodatnih deformacija. U tom slučaju, kod obrade deformabilnih materijala, najčešće se formira trakasta strugotina. Međutim, ako je ugao smicanja veći od grudnog ugla alata, nastaje i treća faza formiranja strugotine. U ovoj fazi formirana strugotina se ne odvodi nesmetano već se sudara sa grudnom površinom alata, dodatno se deformiše i lomi, odnosno formira se kidana strugotina [11], [15] (slika 2.7).



Slika 2.7 Faze formiranja strugotine pri obradi struganjem

Oblik formirane strugotine zavisi od niza faktora, među kojima su najvažniji: hemijski sastav, fizičko-mehanička svojstva obrađivanog materijala, širina i debljina sloja materijala koji se uklanja, geometrija reznog alata (grudni ugao i elementi za lomljenje strugotine) i brzina rezanja. U zavisnosti od međusobnog delovanja ovih faktora, formira se strugotina različitih oblika koja, u kombinaciji sa pravcem kretanja, može uticati na efikasnost procesa, bezbednost rada operatera mašine, habanje alata i eventualno dovesti do oštećenja obrađene površine. Tri osnovna oblika strugotine su: kidana (prekidna), naslagana (segmentna) i trakasta (neprekidna) [15]. Polazeći od osnovnih oblika strugotine mogu se izdvojiti i

međuoobllici strugotine, koji nastaju kao rezultat uslova obrade i specifičnih svojstava materijala obratka (tabela 2.2). Sa stanovišta obradljivosti i tehničke prihvatljivosti, međuoobllici strugotine mogu se svrstati u tri osnovne kategorije:

- Povoljna strugotina – kratka, lomljiva i lako se odvodi iz zone rezanja. Ne oštećuje alat ni obradak, omogućava stabilan proces i pogodna je za automatizaciju.
- Zadovoljavajuća strugotina – prihvatljive dužine i oblika, ali može zahtevati povremenu intervenciju (na primer usmeravanje ili kidanje).
- Nepovoljna strugotina – duga, zamršena ili uvijena. Može se uplesti oko alata, obratka ili glavnog vretena. Otežava odvođenje, povećava trenje i može dovesti do oštećenja obrađene površine ili ubrzanog habanja reznog alata.

Tabela 2.2 Oblik strugotine i ocena sa stanovišta obradljivosti (preuzeto i modifikovano iz [32])

Oblik strugotine	Vrsta strugotine	Ocena strugotine sa stanovišta obradljivosti	
	kratka zavojno cilindrična ili zavojno konična	povoljna	zadovoljavajuća
	spiralno cilindrična		
	spiralna		
	sitno kidana (elementarna)		nepovoljna
	krupno kidana (iverasta)		
	zavojno cilindrična		
	duga glatka (trakasta)		
	povijena ili uvijena (trakasta)		
	zgužvana (zamršena)		

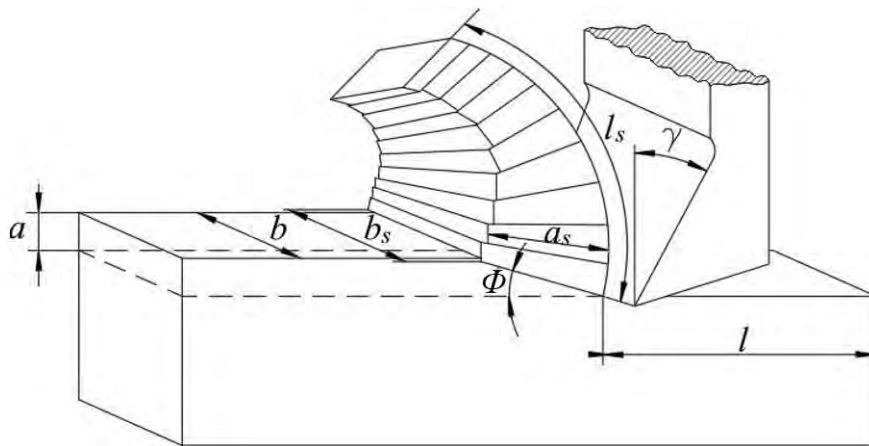
Pored oblika, drugi aspekti strugotine kao što su morfologija (karakteristike unutrašnje i spoljašnje strukture strugotine), dimenzije (debljina, širina, dužina), temperatura i boja, pravac odvođenja strugotine, faktor sabijanja strugotine i strukturna stabilnost strugotine, daju potpuniji uvid u mehaniku procesa obrade struganjem i osnovu za analizu mogućnosti poboljšanja efikasnosti, stabilnosti i kvaliteta obrade struganjem. Neadekvatan

pravac odvođenja strugotine može otežati njeno odvođenje iz zone rezanja, što dovodi do zaglavljivanja, prekida u kontinuitetu procesa, oštećenja obrađene površine, pa čak i do stvaranja opasnih situacija za operatera, kao i potencijalnog oštećenja mašine alatke usled mehaničkih blokada i povećanih opterećenja [33]. Plavičasta boja strugotine ukazuje na visoku temperaturu u zoni rezanja i moguće prekomerno zagrevanje reznog alata, posledično smanjenje njegove tvrdoće i ubrzano habanje, što u krajnjoj meri utiče na kvalitet obrade i postojanost alata. Takođe, formiranje prekidne ili nazubljene strugotine može ukazivati na prisustvo vibracija u obradnom sistemu ili na nestabilnost reznog alata.

Faktor sabijanja strugotine (ξ) predstavlja odnos debljine strugotine i debljine reznog sloja i odslikava veličinu plastične deformacije koja nastaje u procesu formiranja strugotine [9] (slika 2.8):

$$\xi = \frac{A_s}{A_1} = \frac{a_s \cdot b_s}{a \cdot b} \approx \frac{a_s}{a} = \frac{a_s}{f \cdot \sin \kappa} = \frac{v}{v_s} \quad (2.7)$$

gde su: A_s (mm^2) površina poprečnog preseka strugotine, A_1 (mm^2) površina poprečnog preseka reznog sloja, a_s (mm) debljina strugotine, b_s (mm) širina strugotine, a (mm) debljina reznog sloja, b (mm) širina reznog sloja, f (mm/o) korak, κ ($^\circ$) glavni napadni ugao alata, v (m/min) brzina rezanja i v_s (m/min) brzina strugotine. Uvedena je pretpostavka da je širenje strugotine zanemarljivo pri ortogonalnom rezanju, to jest $b_s \approx b$.



Slika 2.8 Matematički model za određivanje faktora sabijanja strugotine pri ortogonalnom rezanju [9]

Ovaj parametar je od suštinskog značaja za razumevanje mehanike rezanja, jer se na osnovu njegove vrednosti mogu analitički odrediti ostali parametri i karakteristike procesa, kao što su snaga utrošena na plastičnu deformaciju sloja koji se uklanja pri njegovoj transformaciji u strugotinu, dužina kontakta alata i strugotine, kontakti naponi (normalni i

smicajni) na granicama alat-strugotina i alat-obradak, temperatura u kontaktnoj zoni alat-strugotina, ugao smicanja, koeficijent trenja, itd. Prema tome, poznavanje faktora sabijanja strugotine omogućava izbor optimalnog režima rezanja i materijala alata, što čini osnovu za primenu praktičnog pristupa optimizacije procesa obrade rezanjem [26].

U toku obrade, pri određenim režimima obrade i kombinaciji materijala alata i obratka, na grudnoj površini reznog klina može doći do formiranja naslage, sloja materijala obratka koji se privremeno akumulira uz samu reznu ivicu alata [9]. Naslaga se razlikuje po hemijskom sastavu i mikrostrukturi u odnosu na osnovni materijal obratka, jer nastaje kao rezultat visokog kontaktnog pritiska, trenja, plastične deformacije i lokalnog zagrevanja u zoni rezanja. Periodična pojava naslaga može dovesti do promene dubine rezanja i grudnog ugla i posledično smanjiti tačnost dimenzija ili kvalitet obrađene površine usled nepravilnog odvajanja materijala [34].

Vibracije i buka koji se generišu u procesu struganja predstavljaju važne pokazatelje stabilnosti i efikasnosti obrade. Vibracije mogu biti posledica dinamičke nestabilnosti sistema alat-obradak-mašina i obuhvataju i neželjene oscilacije (mehaničke vibracije) i samopobudne vibracije (*eng.* chatter). Tokom procesa obrade, rezni alat se elastično deformiše usled otpora rezanja koje deluju na alat. Svaka nehomogenost u materijalu obratka ili neusklađenost u stezanju alata može izazvati male poremećaje u procesu rezanja. Ovi poremećaji utiču na mehanizam i dinamiku formiranja strugotine i uzrokuju varijacije otpora rezanja tako da se relativnim kretanjem između alata i obratka indukuju samopobudne vibracije [35]. Samopobudne vibracije dovode do smanjenja kvaliteta obrađene površine, ubrzanog habanja alata, prekidnog rezanja i posledičnog povećanja troškova obrade [35], [36]. Eksperimentalna istraživanja pokazuju da amplituda vibracija raste sa napredovanjem habanja alata i u korelaciji je sa lošijim kvalitetom obrađene površine [37]. Povišeni nivo buke često se koristi kao jednostavni indikator prisustva vibracija i nepovoljnih uslova rezanja, pa se u savremenim sistemima koristi i za dijagnostiku i nadzor procesa obrade [38].

2.3.2 Performanse kvaliteta

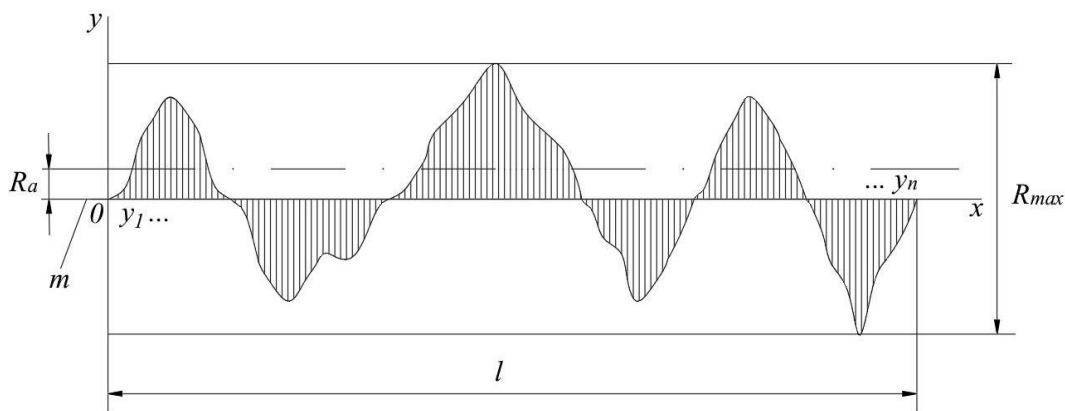
Performanse kvaliteta kod struganja su važni indikatori za evaluaciju efikasnosti i uspešnosti procesa obrade struganjem. Analiza i kontrola ovih performansi je od izuzetne važnosti u cilju postizanja visoke dimenzionalne tačnosti obrade, obezbeđenja integriteta obrađene površine i smanjenja potencijalnih defekata. Time se direktno utiče ne samo na ukupni kvalitet obrade, već i na ekonomičnost obrade.

Hrapavost obrađene površine predstavlja skup mikroskopskih neravnina koje ostaju

na površini obratka kao rezultat procesa obrade. Ove neravnine su direktna posledica načina i uslova rezanja, uključujući tehnološke faktore, faktore reznog alata, faktore obratka, ali i faktore kao što su stanje i istrošenost reznih ivica alata, prisustvo vibracija tokom obrade, krutost sistema alat-mašina-obradak. Hrapavost površine ima značajan uticaj na funkcionalnost izrađenog dela, naročito u pogledu trenja, habanja, prijanjanja i kasnijeg premazivanja ili spajanja površina [39]. Za ocenu kvaliteta površine u tehničkoj i inženjerskoj praksi najčešće se koriste osnovni parametri hrapavosti obrađene površine:

- srednje aritmetičko odstupanje profila od srednje linije profila R_a – srednja aritmetička vrednost odstupanja svih tačaka efektivnog profila od srednje linije profila m u granicama referentne dužine l (slika 2.9) [9], [11],

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| \cdot dx \quad (2.8)$$



Slika 2.9 Parametri hrapavosti obrađene površine [9]

- maksimalna visina neravnina R_{max} – rastojanje između dve prave koje su paralelne sa srednjom linijom profila m i koje, unutar granica definisane referentne dužine l , dodiruju najvišu tačku vrha i najnižu tačku doline realnog profila površine,
- srednja visina neravnina R_z – srednja vrednost visina između najviših vrhova i najdubljih dolina profila u okviru pet uzastopnih segmenata unutar definisane referentne dužine l .

Integritet površine se odnosi na ukupno stanje i karakteristike spoljnog sloja materijala nakon obrade, a uključuje mehaničke, mikrostrukturne i hemijske karakteristike koje se javljaju na samoj površini i neposredno ispod nje. Pored analize hrapavosti obrađene površine, sagledavanje ostalih aspekata integriteta površine, kao što su zaostali naponi, tvrdoća površinskog sloja, mikrostrukturne promene, prisustvo mikro-pukotina i hemijskih modifikacija, pruža sveobuhvatniju procenu kvaliteta obrade i omogućava pouzdaniju analizu

i predikciju ponašanja komponenti u radnim uslovima, naročito u pogledu njihove otpornosti na habanje, koroziju i zamor materijala.

Tačnost dimenzija, oblika i položaja predstavlja bitnu performansu kvaliteta obrade jer direktno utiče na funkcionalnost, pouzdanost i međusobno skladno spajanje delova sklopa. Tačnost dimenzija dela je određena konstruktivnim (nazivnim) merama i granicama odstupanja tih mera [6], [15]. Stvarne dimenzije, kao što su prečnici, dužine, širine i visine, utvrđuju se merenjem na izrađenom mašinskom delu i moraju biti unutar dozvoljenih tolerancija da bi deo ispravno funkcionisao u sklopu. Tačnost oblika odnosi se na odstupanja od idealnog oblika, koja mogu uključivati odstupanja od prave, ravni, kruga, cilindra, oblika profila i oblika površine [9]. Odstupanja položaja mogu biti: odstupanja po pravcu (paralelnost, upravnost, nagib), po mestu (lokacija, simetričnost, koaksijalnost) i položaju obrtnih površina (ravnost i kružnost obrtanja). Na tačnost gotovog dela utiču geometrijske specifikacije proizvoda, geometrija priprema, materijal obratka, stanje mašine alatke, pozicija obratka na mašini alatki, stezni pribor, metoda obrade, rezni alat, uslovi obrade, SHP i lokacija kontakta alat-obradak [40].

2.3.3 Performanse produktivnosti

Performanse produktivnosti odnose se na metrike za merenje i praćenje efikasnosti i brzine izvođenja procesa obrade, odnosno brzine uklanjanja materijala u jedinici vremena, vremena obrade po komadu, glavnog vremena obrade, vremena ciklusa obrade, broja obrađenih komada u jedinici vremena itd. Od vitalnog su značaja u proizvodnji i često se koriste kao ciljne funkcije u optimizacionim problemima, radi efikasnijeg planiranja obradnih procesa, povećanja produktivnosti, smanjenja troškova i unapređenja ukupne efikasnosti procesa.

Proizvodnost predstavlja efikasnost procesa obrade rezanjem i može se definisati preko broja obrađenih delova u jedinici vremena ili količine uklonjenog materijala u jedinici vremena. Teorijska proizvodnost q_t (kom/min) može se odrediti na osnovu glavnog vremena obrade t_g (min/kom) [9]:

$$q_t = \frac{1}{t_g} \quad (2.9)$$

U zavisnosti od količine uklonjenog materijala u jedinici vremena, proizvodnost se može izraziti na nekoliko načina [9], [15]:

- zapreminska proizvodnost q_V (cm³/min) – zapremina uklonjenog materijala u jedinici vremena:

$$q_V = a_p \cdot f \cdot v \quad (2.10)$$

gde su: a_p (mm) dubina rezanja, f (mm/o) korak, v (m/min) brzina rezanja.

- masena proizvodnost q_m (kg/min) – masa uklonjenog materijala u jedinici vremena:

$$q_m = a_p \cdot f \cdot v \cdot \rho \quad (2.11)$$

gde je: ρ (kg/cm³) gustina materijala predmeta obrade.

- specifična proizvodnost q_P (cm³/kWmin) – zapremina uklonjenog materijala po jedinici utrošene snage i vremena:

$$q_P = \frac{a_p \cdot f \cdot v}{P_c} \quad (2.12)$$

gde je: P_c (kW) snaga rezanja.

Vreme obrade po komadu (komadno vreme) t_k (min/kom) predstavlja ukupno vreme potrebno za izradu jednog komada i može se odrediti prema sledećem izrazu [9]. Može se odrediti kao:

$$t_k = t_g + t_p + t_{pz} + t_d \quad (2.13)$$

gde su: t_g (min/kom) glavno vreme obrade, odnosno vreme efektivnog rezanja, t_p (min/kom) pomoćno vreme, t_{pz} (min/kom) pripremno-završno vreme, t_d (min/kom) dodatno vreme obrade.

Glavno vreme obrade t_g (min/kom) je vreme direktnog kontakta reznog alata sa predmetom obrade, to jest efektivno vreme rezanja, uzimajući u obzir i prazan hod pre ulaska alata u zahvat sa obratkom i prazan hod pri izlasku alata iz zahvata sa obratkom [11]:

$$t_g = i \cdot \frac{L}{v_f} = i \cdot \frac{L}{f \cdot n} \quad (2.14)$$

gde su: i broj prolaza, L (mm) dužina rezanja (obrade), v_f (mm/min) brzina pomoćnog kretanja, f (mm/o) korak i n (o/min) broj obrtaja glavnog vretena.

Pomoćno vreme t_p (min/kom) obuhvata sva vremena koja nisu direktno povezana sa procesom obrade. To su vremena potrebna za realizaciju sledećih radnji [9]: postavljanje i stezanje pripremka, merenje i kontrola dimenzija, promena broja obrtaja ili koraka na mašini, otpuštanje izratka i njegovo odlaganje.

Pripremno završno vreme t_{pz} (min/kom) po komadu je količnik vremena potrebnog za pripremu i raspremanje mašine, reznih alata i pribora pre i nakon obrade serije komada i broja komada u seriji [9], [11]. Može se odrediti kao:

$$t_{pz} = \frac{T_{pz}}{n_s} \quad (2.15)$$

gde su: T_{pz} (min) ukupno pripremno-završno vreme za seriju, n_s broj komada u seriji.

Dodatno vreme t_d (min/kom) je vreme predviđeno za potrebe radnika koje nisu direktno vezane za proces obrade. U praksi se često izražava kao procenat od ukupnog glavnog i pomoćnog vremena.

Ukoliko numerički upravljana mašina alatka izvršava ciklus obrade, onda se na ceo vremenski raspon potreban za izvršavanje konkretnog niza koraka u okviru ciklusa ne može uticati. Ovo takozvano vreme ciklusa obrade sastoji se od glavnog vremena obrade i individualnih vremena potrebnih za prilaz alata, zauzimanje dubine rezanja, izlaz alata i povrat alata [5]:

$$t_c = t_g + t_{pr} + (t_z + t_i + t_{po1}) \cdot i + t_{po2} \quad (2.16)$$

gde su: t_c (min) vreme ciklusa obrade, t_g (min) glavno vreme obrade, t_{pr} (min) vreme potrebno za prilaz alata od tačke za izmenu alata do početne tačke ciklusa, t_z (min) vreme potrebno za zauzimanje dubine rezanja za prolaz, t_i (min) vreme potrebno za izlaz alata na kraju prolaza, t_{po1} (min) vreme potrebno za povratno kretanje između prolaza, t_{po2} (min) vreme potrebno za povrat u tačku za izmenu alata, i broj prolaza.

Individualne komponente vremena sračunavaju se na sledeći način [5]:

$$t = \frac{\text{Rastojanje koje se prelazi}}{\text{Brzina kojom se prelazi rastojanje}} \cdot \text{Broj prolaza} \quad (2.17)$$

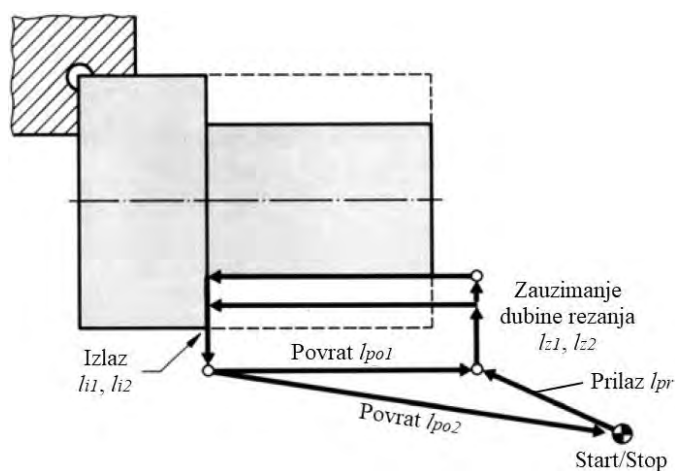
Ciklus uzdužnog spoljašnjeg struganja u dva prolaza je prikazan na slici 2.10. Vreme ciklusa obrade može se izračunati na sledeći način [5]:

$$t_c = t_g + \frac{l_{pr}}{v_{bh}} + \frac{l_{z1}}{v_{bh}} + \frac{l_{i1}}{v_f} + \frac{l_{po1}}{v_{bh}} + \frac{l_{z2}}{v_{bh}} + \frac{l_{i2}}{v_f} + \frac{l_{po2}}{v_{bh}} \quad (2.18)$$

gde su: t_c (min) vreme ciklusa obrade, t_g (min) glavno vreme obrade, l_{pr} (mm) prilazno rastojanje (od tačke za izmenu alata do početne tačke ciklusa), l_z (mm) rastojanje koje se prelazi prilikom zauzimanja dubine rezanja za prolaz, l_i (mm) rastojanje koje se prelazi prilikom izlaza alata na kraju prolaza, l_{po1} (mm) rastojanje koje se prelazi prilikom povratnog kretanja između prolaza, l_{po2} (mm) povratno rastojanje (povrat u tačku za izmenu alata), v_{bh} (mm/min) brzina za brzi hod pomeranja, v_f (mm/min) brzina pomoćnog kretanja.

Dodatne performanse produktivnosti kod struganja koje se takođe mogu koristiti uključuju iskorišćenost mašine i iskorišćenost reznog alata. Iskorišćenost mašine se određuje kao odnos vremena kada je mašina aktivna (u radu) prema ukupnom radnom vremenu (uključujući zastoje i podešavanja), dok iskorišćenost reznog alata predstavlja odnos efektivnog vremena rezanja prema ukupnom vremenu korišćenja alata, uključujući i vreme

izmene, stezanja i podešavanja.



Slika 2.10 Putanje centra alata kod ciklusa uzdužnog spoljašnjeg struganja u dva prolaza
(preuzeto i prilagođeno iz [5])

2.3.4 Performanse ekonomičnosti

Performanse ekonomičnosti kod struganja odnose se na pokazatelje koji omogućavaju procenu efikasnosti procesa obrade sa stanovišta troškova i profitabilnosti. One su značajne jer omogućavaju inženjerima i planerima proizvodnje da donesu odluke koje vode ka smanjenju troškova, povećanju profitabilnosti, odnosno efikasnijem iskorišćenju raspoloživih obradnih sistema. Najbitnije performanse ekonomičnosti su troškovi obrade po komadu, troškovi proizvodnje po komadu i stopa profita. Ekonomska razmatranja su vrlo važna kod planiranja procesa obrade i igraju vitalnu ulogu u određivanju tehnoloških parametara za svaki zahvat obrade [14].

Troškovi obrade kod struganja predstavljaju ukupne izdatke povezane sa izvođenjem obradnog procesa, a odnose se na troškove rada radnika (zavise od vremena obrade i cene radnog sata radnika), troškove alata (zavise od cene alata i izmenljivih pločica, postojanosti alata), troškove alatne mašine (zavise od amortizacije, potrošnje električne energije, troškova održavanja), troškove sredstava za hlađenje i podmazivanje (zavise od vrste, cene i potrošnje SHP) i rezidualne (indirektne) troškove. Procena ovih troškova je važna jer omogućava optimalno planiranje proizvodnje, izbor ekonomičnog režima obrade, određivanje cene proizvoda i povećanje konkurentnosti kompanije. U zbiru, prethodno navedeni pojedinačni troškovi zavise od više faktora, uključujući tehnološke parametre (brzina rezanja, korak, dubina rezanja, broj prolaza), vrstu reznog alata i stepen pohabanosti, vrstu i tvrdoću materijala predmeta obrade, oblik i dimenzije priprema, vreme obrade, kao i karakteristike

mašine alatke.

Troškovi obrade po komadu za operaciju tr_O (din/kom) mogu se odrediti pomoću sledećeg izraza [9]:

$$tr_O = tr_R + tr_A + tr_M + tr_{SHP} \quad (2.19)$$

gde su: tr_R (din/kom) troškovi rada radnika, tr_A (din/kom) troškovi alata, tr_M (din/kom) troškovi mašine alatke, tr_{SHP} (din/kom) troškovi sredstva za hlađenje i podmazivanje.

Troškovi rada radnika tr_R (din/kom) odnose se na rad radnika koji upravlja procesom obrade [9]:

$$tr_R = k \cdot k_1 \cdot t_k \quad (2.20)$$

gde su: k koeficijent koji zavisi od broja mašina na kojim istovremeno radi jedan radnik, k_1 (din/min) bruto plata radnika, t_k (min) vreme obrade jednog komada.

Troškovi reznog alata tr_A (din/kom) uključuju cenu alata, vreme zamene pohabanog alata i vreme izmene reznih pločica [9], [41]:

$$tr_A = \left(k \cdot k_1 \cdot t_1 + \frac{C_{ip}}{n_{iip}} \right) \cdot \left(\frac{t_g}{T} \right) \quad (2.21)$$

gde su: k koeficijent koji zavisi od broja mašina na kojim istovremeno radi jedan radnik, k_1 (din/min) bruto plata radnika, t_1 (min) vreme zamene pohabane izmenljive pločice, C_{ip} (din) cena izmenljive pločice, n_{iip} broj reznih ivica izmenljive pločice, (t_g/T) recipročna vrednost broja izrađenih komada do pojave pohabanosti alata (za predviđenu postojanost alata T).

Troškovi mašine tr_M (din/kom) se mogu odrediti pomoću sledećeg izraza [9]:

$$tr_M = \frac{C_M \cdot p}{6000 \cdot F_h \cdot \tau} \cdot t_k \quad (2.22)$$

gde su: C_M (din) vrednost mašine, p (%) procentualna stopa amortizacije, F_h (h) mogući godišnji fond časova rada mašine, τ stepen iskorišćenja mašine, t_k (min) vreme obrade jednog komada.

Troškovi sredstva za hlađenje i podmazivanje tr_{SHP} (din/kom) obuhvataju troškove potrošnje sredstva za hlađenje i podmazivanje tokom procesa obrade [9]:

$$tr_{SHP} = \frac{Q_{SHP} \cdot C_{SHP}}{60} \cdot t_k \quad (2.23)$$

gde su: Q_{SHP} (l/h) količina potrošenog sredstva za hlađenje i podmazivanje za jedan čas rada, C_{SHP} (din/l) cena jednog litra sredstva za hlađenje i podmazivanje, t_k (min) vreme obrade jednog komada.

Ukupni troškovi obrade po komadu kod struganja zavise od potrebnog broja zahvata, tehnoloških parametara, postojanosti alata, glavnog vremena obrade (odnosno proizvodnosti), kao i faktora koji su konstantni za određeni obradni sistem. Od tehnoloških parametara,

dubina rezanja ima najmanji uticaj na habanje alata, zbog čega se u prvom koraku optimizacije troškova preporučuje izbor najveće moguće dubine rezanja. Nakon toga, u drugom koraku, bira se što veća vrednost koraka kako bi se povećala proizvodnost, odnosno smanjilo vreme obrade, pri čemu je važno voditi računa o tehničkim ograničenjima s obzirom na korišćeni rezni alat, povoljne uslove formiranja i odvođenja strugotine, kao i zahteve kvaliteta obrade. Za razliku od ova dva parametra, brzina rezanja ima značajan uticaj na habanje alata i direktno utiče na njegovu postojanost, a samim tim i na troškove alata. U savremenim proizvodnim uslovima, sa porastom troškova energije, radne snage i mašina, kao i smanjenjem vremena pomoćnih zahvata, ali i troškova alata, visoke vrednosti tehnoloških parametara postaju ekonomski isplative, u cilju smanjenja ukupnih troškova obrade po komadu, čak i po cenu drastičnog smanjenja postojanosti alata [13]. Primena CNC mašina, pravilno planiranje procesa i izbor odgovarajućih reznih alata dodatno doprinose smanjenju ukupnih troškova obrade.

Stopa profita P_R (din/min) može se predstaviti sledećim izrazom [42]:

$$P_R = \frac{R_P - tr_O}{t_k} \quad (2.24)$$

gde su: R_P (din/kom) prodajna cena gotovog dela, tr_O (din/kom) troškovi obrade po komadu za operaciju, t_k (min/kom) vreme obrade po komadu. Profit po komadu dat je razlikom R_P i tr_O .

2.3.5 Performanse održivosti

U savremenoj industriji, održiva proizvodnja postaje ključni faktor za dugoročnu konkurentnost i ekološku odgovornost proizvodnih kompanija [43]. Sa sve većim pritiskom na očuvanje prirodnih resursa, smanjenje emisije štetnih gasova, poštovanje ekoloških regulativa, ali i rastućim troškovima energije, sirovina i resursa, proizvodne kompanije nastoje da upravljanje proizvodnim tehnologijama i resursima organizuju prema principima održive proizvodnje. Jedan od novijih pristupa u upravljanju prirodnim resursima i tehnologijom jeste putem identifikacije performansi (indikatora) održivosti [44].

U okviru performansi održivosti kod procesa obrade rezanjem, pored performansi ekonomičnosti, mogu se izdvojiti tri ključne kategorije: socijalni aspekti, uticaj na životnu sredinu i ekološki aspekti. Socijalni aspekti obuhvataju zdravlje i bezbednost radnika, radne uslove i društvenu odgovornost proizvodne kompanije. Ove performanse održivosti mogu biti osnova za dalji podsticaj tehnološkog razvoja, ali i osnova za donošenje odluka u proizvodnom okruženju sagledavajući performanse kvaliteta, produktivnosti i ekonomičnosti,

uz uvažavanje principa ekološke racionalnosti i ciljeva održivog razvoja. Performanse uticaja na životnu sredinu odnose se na analizu neposrednog uticaja procesa obrade na okolinu, s obzirom na potrošnju energije, emisije štetnih gasova (CO_2 , NO_x), PM čestica, upravljanje otpadom (strugotina, pohaban alat, škart), potrošnju i odlaganje SHP. Sa druge strane, ekološke performanse prate dugoročni uticaj realizacije obradnih procesa na prirodne ekosisteme, uključujući očuvanje biodiverziteta, regeneraciju resursa i toksičnost korišćenih resursa.

Proizvodne kompanije su se donedavno fokusirale na produktivnost, troškove i kvalitet. Međutim, zbog postepenog rasta cena energije i podizanja ekološke svesti, održiva i ekološki prihvatljiva proizvodnja postala je cilj sve većeg broja kompanija jer igra veoma važnu ulogu u transformaciji ka Industriji 4.0 [45].

Performanse održivosti kod struganja se odnose na:

- Energetsku efikasnost, koja u suštini podrazumeva minimizaciju potrošnje energije što je trenutno jedan od glavnih ciljeva u proizvodnoj industriji. Razlog leži u činjenici da 84% emisija ugljen dioksida i 90% potrošnje energije u industriji odlazi na proizvodnu industriju [46], u kojoj su pak mašine alatke dominantne po pitanju potrošnje energije [47]. Na potrošnju energije, odnosno konkretno energiju rezanja, za dati materijal obratka direktno utiču tehnološki parametri, kvalitet izmenljive pločice (prisustvo prevlaka i vrste prevlaka) i glavno vreme obrade.
- Korišćenje sredstva za hlađenje i podmazivanje. Smanjenje negativnog uticaja sredstva za hlađenje i podmazivanje na životnu sredinu može se postići primenom suve obrade (bez SHP) ili odgovarajućih tehnika hlađenja i podmazivanja zone rezanja, poput obrade koja koristi minimalnu količinu SHP i niskotemperaturnog hlađenja, kao i upotrebom ekološki prihvatljivih sredstava za hlađenje i podmazivanje, poput biorazgradivih ulja [48].
- Smanjenje otpada, gde se pre svega misli na recikliranje strugotine u polufabrikat, koje pored finansijske dobiti ima i značajne ekološke prednosti, poput nižih emisija ugljen dioksida i drugih štetnih gasova [49].
- Ugljenični otisak, koji kvantifikuje količinu gasova sa efektom staklene bašte koji su proizvod određene aktivnosti. U slučaju struganja emisija ugljen dioksida se procenjuje na osnovu energije koja je utrošena za operaciju struganja, i to množenjem iste faktorom emisije ugljenika (emisija ugljenika po kWh proizvedene električne energije (kgCO_2/kWh)) [50].

Svi navedeni aspekti spadaju u širi cilj održive proizvodnje ili zelene obrade rezanjem.

2.4 Važnost pravilnog izbora faktora obrade

Pravilan izbor faktora obrade rezanjem od suštinskog je značaja jer neposredno utiče na brojne performanse obrade: kvalitet obrađene površine, geometrijsku tačnost, produktivnost procesa, troškove proizvodnje itd. Neadekvatan izbor faktora može dovesti do prekomernog habanja i trošenja alata, povećane potrošnje energije i povećanih troškova, odnosno do smanjenja ukupne efikasnosti obradnog sistema.

Faktori obratka, uključujući hemijski sastav, mehanička svojstva materijala i dimenzije priprema, najčešće su unapred zadati tehničkim crtežom i specifikacijom proizvoda, pa se mogu smatrati fiksnim (konstantnim) ulaznim podacima na osnovu kojih je potrebno odrediti ostale faktore u obradnom sistemu. S obzirom na ograničen izbor mašina alatki i dostupnih reznih alata u datom proizvodnom preduzeću, faktori koji se odnose na mašinu (kao što su snaga pogonskog motora, stabilnost sistema i maksimalni broj obrtaja glavnog vretena) i na rezni alat (materijal, geometrija, vrste prevlaka) imaju određeni stepen fleksibilnosti, i mogu se prilagoditi ili modifikovati u odnosu na faktore obratka. Faktori koji se odnose na proces obrade, odnosno režim rezanja i uslove rezanja, imaju najveći potencijal za prilagođavanje, ali njihovo definisanje mora biti u skladu sa ograničenjima koje nameću mašina alatka, rezni alat i materijal obratka, kao i sa zahtevanim performansama procesa koje se žele postići.

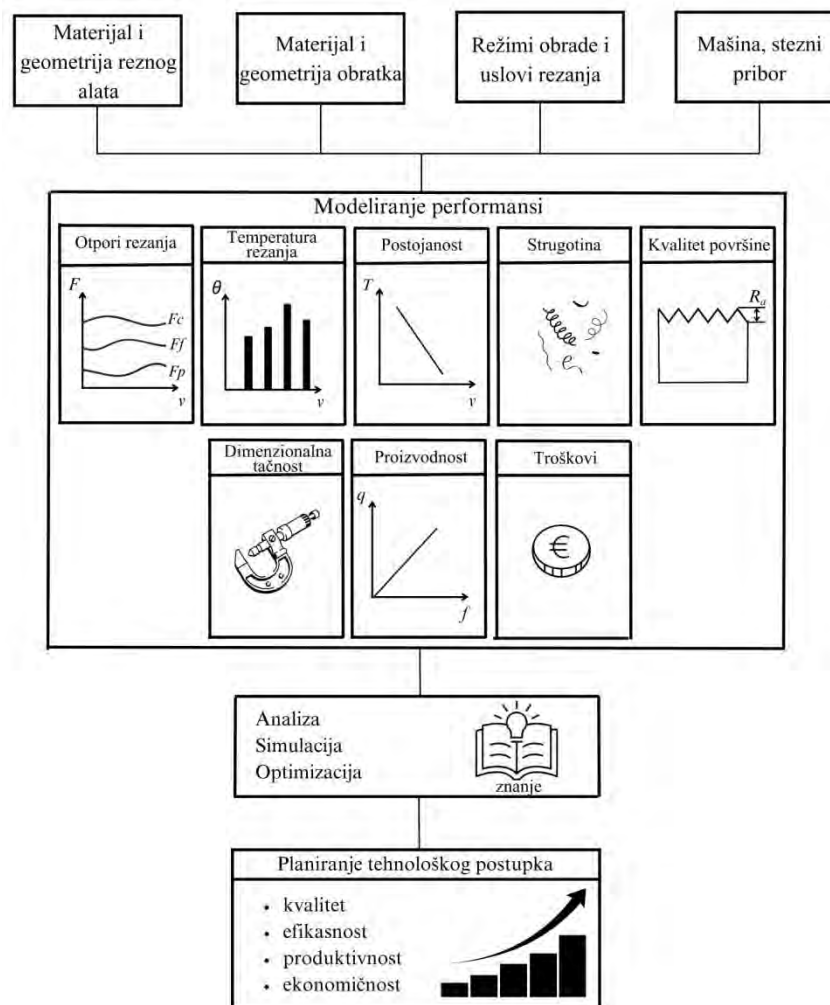
Poznavanje međusobnih interakcija i sinergije između faktora mašine, alata, obratka i procesa obrade omogućava optimalno iskorišćenje raspoloživih resursa, čime se postiže troškovno isplativa, kvalitetna i efikasna obrada rezanjem. Međutim, odabir i usklađivanje svih faktora obradnog sistema predstavlja složen i višedimenzionalan zadatak, koji zahteva detaljnu analizu, tehničko znanje i primenu metoda optimizacije, naročito imajući u vidu:

- međusobne zavisnosti tehnoloških faktora. Naime, za mnoge materijale postoji preporučen interval variranja odnosa dubine rezanja i koraka (vitkost strugotine) u kojima se ostvaruju povoljni uslovi formiranja i odvođenja strugotine.
- tehničko-tehnološka ograničenja dostupnih reznih alata (oblik i geometrija rezne pločice) i mašine (snaga, stabilnost, broj obrtaja glavnog vretena),

- dirigovani izbor. Promene faktora mašine, reznog alata ili uslova hlađenja i podmazivanja zahtevaju prilagođavanje tehnoloških parametara. Takođe, često je izbor dubine rezanja uslovljen usvojenim dodacima za obradu, potrebnim brojem prolaza, a zavisi i od geometrijskog oblika i dimenzija priprema.
- veliki broj reznih alata koji su dostupni na tržištu, koji se razlikuju po materijalu reznog alata, geometriji, prevlakama i nameni,
- veliki broj mogućih kombinacija vrednosti tehnoloških parametara, koji komplikuje i otežava proces odabira optimalnog režima obrade,
- interval variranja tehnoloških parametara, kao i dozvoljene minimalne i maksimalne vrednosti istih. Da bi se izbegla neobrađena područja na površini obratka, maksimalna vrednost koraka mora biti manja ili jednaka od poluprečnika zaobljenja vrha alata [13]. Takođe, dubina rezanja ne može biti veća od dužine sečiva reznog alata [9].
- nedovoljno poznavanje procesa i specifičnih preporuka proizvođača alata i mašina u različitim oblastima unutar hiper-prostora definisanog intervalima variranja tehnoloških parametara,
- tehnološke ciljeve da se kod odgovarajućeg tipa obrade postignu željene performanse, na primer maksimalna produktivnost, vreme obrade, potrošnja električne energije, troškovi obrade, kvalitet obrade ili određeni kompromis performansi,
- postojanje interakcija faktora obradnog sistema koje značajno utiču na performanse procesa. Ove interakcije se ne mogu posmatrati izolovano, jer promena jednog faktora često utiče na promenu uticajnosti drugih faktora.
- promenljivost uticaja faktora na performanse procesa u različitim intervalima variranja,
- mogućnost da se iste performanse procesa postignu različitim kombinacijama vrednosti faktora obrade,
- mogućnost da promena samo jednog faktora drastično promeni mehaniku rezanja i sve rezultujuće performanse,
- da izbor režima obrade (brzina rezanja, korak, dubina rezanja, broj prolaza), različito utiče na performanse procesa, kao što su kvalitet i tačnost obrade, vreme obrade, potrošnja energije, oblik strugotine itd.

Imajući u vidu prethodno, troškovno isplativa, kvalitetna i efikasna obrada rezanjem, naročito u slučaju sagledavanja većeg broja performansi procesa, jedino se može postići uspostavljanjem odgovarajućih matematičkih relacija, odnosno kreiranjem empirijskih

modela koji opisuju ulazno-izlazne relacije. Na taj način bi se omogućila kvantitativna i sveobuhvatna analiza procesa, dublje razumevanje međusobnih zavisnosti između faktora obrade i performansi, kao i primena optimizacionih modela sa ciljem određivanja faktora obrade koji predstavljaju optimalno rešenje za dati obradni sistem i postavljene ciljeve. Primena empirijskih modela omogućava integrisanu analizu više performansi procesa istovremeno, što je ključno za identifikaciju optimalnih uslova obrade kroz definisanje sveobuhvatnih optimizacionih modela. Time se postiže efikasnije planiranje tehnološkog postupka, što direktno doprinosi povećanju profitabilnosti. Konačno, uspostavljanjem ovakvog pristupa, kompanija se bolje pozicionira na tržištu zahvaljujući većoj konkurentnosti, pouzdanosti i kvalitetu proizvoda, što predstavlja ključni faktor uspeha u savremenim tržišnim uslovima (slika 2.11). Prisutno je čak i mišljenje da efikasno modeliranje proizvodnih operacija predstavlja stratešku prednost u uslovima globalne konkurencije [40].



Slika 2.11 Značaj modeliranja performansi procesa obrade struganjem

Modeli performansi obradnih procesa su potrebni i za kontrolu procesa (u smislu preduzimanja korektivnih mera radi eliminacije ili smanjenja škarta), simulaciju procesa i projektovanje opreme (mašina alatki i pribora) [40].

U kontekstu modeliranja performansi kod obrade struganjem, razvoj modela za predikciju otpora rezanja je od izuzetnog značaja. Poznavanje otpora rezanja za različite režime obrade omogućava određivanje snage rezanja, tačnosti obrade, naprezanja reznog alata, generisane toplote u toku procesa obrade, opterećenja ležajeva, ugiba reznog alata, obratka i strukture mašine [35], [51]. Analiza otpora rezanja je od ključne važnosti za procenu obradljivosti materijala, naročito kada se uzme u obzir da su eksperimenti u cilju određivanja postojanosti reznog alata vremenski i troškovno zahtevni [4]. Poznavanje otpora rezanja omogućava i određivanje merodavnog režima rezanja, izbor steznog pribora, kao i optimizaciju procesa obrade, što sve vodi ka poboljšanju produktivnosti, smanjenju troškova proizvodnje i povećanju efikasnosti procesa. Time se dostupne mašine alatke i rezni alat na najbolji mogući način koriste, a za konkretnu primenu, tj. materijal, dimenzije i oblik predmeta obrade, vrednosti faktora procesa obrade određuju na optimalan način. Otpori rezanja predstavljaju jednu od pet najznačajnijih performansi, kao indikatora stepena do kog je skup proizvodnih operacija optimizovan u odnosu na svaku pojedinačnu operaciju, ali i na skup operacija, tako da ne postoji negativan uticaj jedne operacije na drugu [52].

3. MODELIRANJE PERFORMANSI OBRADE STRUGANJEM

3.1 Značaj i cilj modeliranja performansi obrade struganjem

Struganje predstavlja složen i nelinearan proces obrade rezanjem, čiji ishod zavisi ne samo od poznatih parametara i njihovih interakcija, već i od brojnih mehaničkih, toplotnih, triboloških pojava koje nisu u potpunosti istražene i shvaćene [53]. Proces obrade struganjem se odvija u specifičnom tribološko-mehaničkom sistemu koji karakteriše veliki broj ulaznih (nezavisnih) parametara. Svaki od tih parametara se može varirati u širokom intervalu vrednosti, ali u velikom broju slučajeva relacije između parametara i performansi procesa obrade nisu u potpunosti definisane [14]. Posledično, predikcija i optimizacija performansi procesa mogu biti izazovni, iz razloga što i male promene vrednosti ulaznih parametara mogu dovesti do značajnih razlika u vrednostima performansi procesa obrade. Sa razvojem tehnologija obrade rezanjem i sve većim zahtevima za efikasnošću proizvodnih procesa prema različitim kriterijumima, a koje nameće savremena industrija, sve više se naglašava potreba za daljim istraživanjem i dubljim razumevanjem procesa obrade struganjem.

Modeliranje performansi procesa obrade struganjem zauzima centralno mesto u savremenim istraživanjima, jer omogućava pouzdaniju i tačniju predikciju ponašanja procesa obrade struganjem u realnim uslovima proizvodnje. Glavni ciljevi velikog broja istraživača poslednjih decenija bili su povećanje proizvodnosti i ekonomičnosti procesa, unapređenje kvaliteta obrade (tačnost mera i geometrijskih oblika, kvalitet obrađene površine), kao i smanjenje potrošnje resursa [54]. Da bi se ovi ciljevi postigli, neophodno je delovati u pravcu [55]:

- implementacije novih, kao i unapređenja postojećih metoda i postupaka obrade,
- primene stečenih znanja u procesima projektovanja i optimizacije, što podrazumeva definisanje pouzdanih matematičkih modela procesa,
- razvoja i primene eksperimentalnih metoda radi provere tačnosti i validacije modela,
- kontinuiranog inoviranja i revitalizacije proizvodnih tehnologija u skladu sa zahtevima savremene industrije i tržišta.

Matematički model predstavlja pojednostavljen, ali dovoljno veran prikaz stvarnog procesa/sistema, koji omogućava bolje razumevanje, analizu, kao i eksperimentisanje sa različitim vrednostima ulaznih parametara. Njime se uspostavlja veza između ulaznih parametara (faktora) i izlaznih performansi procesa [56].

Izbor pristupa (metode) modeliranja zavisi od prirode procesa/sistema koji se modelira, potrebnog nivoa pouzdanosti, raspoloživih resursa, kao i ciljeva optimizacije i razvoja sistema upravljanja [13]. Nakon toga, neophodna je verifikacija i validacija kreiranog modela kako bi se osigurala njegova tačnost i primenljivost u praksi. Bez obzira na izabranu metodu modeliranja, pri kreiranju modela neophodno je sprovesti temeljnu analizu i identifikaciju faktora koji značajno utiču na proces/sistem, kao i definisati njihove intervale variranja.

Zbog složenosti fizičke interpretacije realnog procesa obrade struganjem, modeliranje procesa obrade struganjem najčešće akcenat stavlja na najznačajnije performanse procesa obrade koje su od interesa za konkretan slučaj. Osnovni cilj modeliranja je da se omogući predikcija performansi procesa koje su bliske realnim vrednostima za proizvoljno izabrane vrednosti ulaznih parametara sa ciljem boljeg razumevanja procesa, unapređenja procesa planiranja obrade, ali i optimizacije performansi procesa, sa ili bez dodatnih ograničenja.

Da bi matematički model bio koristan u praksi, treba da bude jasno koncipiran, jednostavan za primenu i dovoljno fleksibilan da se može unapređivati u skladu sa novim saznanjima i zahtevima.

3.2 Pristupi modeliranju performansi procesa obrade struganjem

Efektivna primena tehnologije obrade struganjem, koja obezbeđuje traženi kvalitet obrade uz visoku produktivnost i prihvatljive troškove, zavisi od mogućnosti definisanja predikcionih modela performansi procesa koji sa dovoljnom tačnošću opisuju relacije između ulaznih i izlaznih veličina. Uticaji različitih faktora, uključujući tehnološke parametre obrade, svojstva materijala obratka, kinematiku i dinamiku procesa rezanja, geometriju reznog alata, kao i uslove hlađenja i podmazivanja, doveli su do razvoja velikog broja modela za predikciju performansi procesa obrade struganjem. U praksi se za potrebe predikcije performansi obrade struganjem najčešće koriste analitički, numerički i empirijski modeli [13].

3.2.1 Analitički modeli

Analitički modeli predstavljaju matematičke modele koji se zasnivaju na primeni osnovnih zakona i principa fizike, plastomehanike i matematike za opisivanje procesa struganjem [57]. Ovi modeli obezbeđuju brza rešenja, ali su ograničeni svojom složenošću, a njihovo kreiranje zahteva ekspertizu i specifična domenska znanja. Zbog složenosti realnih

uslova obrade, kreiranje analitičkih modela često podrazumeva određene aproksimacije, pretpostavku idealizovanih uslova obrade i pojednostavljenja kako bi kreirani modeli bili primenljivi u određenim uslovima obrade [58]. Kao rezultat toga, njihova praktična primena ostaje ograničena na užu spektar režima obrade, materijala predmeta obrade i geometrija reznog alata. Provera adekvatnosti kreiranih analitičkih modela vrši se isključivo eksperimentalnim putem [55]. Na osnovu načina rešavanja, analitički modeli se definišu kao modeli sa egzaktnim rešenjem, što znači da se njihova rešenja mogu izraziti zatvorenim matematičkim formulama koje omogućavaju direktno izračunavanje performansi procesa.

3.2.2 Numerički modeli

Numerički modeli su kompleksni matematički modeli koji imaju široku primenu u inženjerskim naukama [29]. Primena i razvoj numeričkih modela su podstaknuti razvojem savremenih računara i softvera, koji su omogućili rešavanje složenih sistema nelinearnih jednačina. Numerički pristup modeliranju zasnovan je na primeni različitih numeričkih metoda [57]:

- metoda konačnih elemenata (*eng.* Finite Element Method – FEM),
- metoda konačnih razlika (*eng.* Finite Difference Method – FDM),
- metoda graničnih elemenata (*eng.* Boundary Element Method – BEM),
- metoda konačnih zapremina (*eng.* Finite Volume Method – FVM),
- varijaciona metoda konačnih elemenata (*eng.* Variational Finite Element Method – VFEM),
- metoda energetskog bilansa (*eng.* Energy Balance Finite Element Method – EBFEM),
- metoda reziduuma (*eng.* Residual Finite Element Method – RFEM).

Metoda konačnih elemenata (FEM) se najviše koristi u analizi neprekidne sredine (kontinuum) u oblasti elastičnosti, gde su jasno definisane veze između naprezanja i deformacija. Primenom ove metode moguće je odrediti raspodelu naprezanja i deformacija u zoni rezanja, kao i karakteristike kontakta između reznog alata i materijala obratka. Korišćenjem simulacija zasnovanih na FEM-u mogu se analizirati uslovi procesa obrade, kao i stanje i istrošenost reznog alata.

Ova metoda se može koristiti za sveobuhvatnu analizu performansi procesa obrade rezanjem. Našla je široku primenu u brojnim proračunima, uključujući napone i deformacije, temperaturna polja u zoni rezanja i toplotne deformacije, otpore rezanja, formiranje i morfologiju strugotine, postojanost reznog alata i deformacije obratka [29]. Inicijalno su

FEM modeli bili primenjivani za analizu ortogonalnog rezanja, uz pretpostavku idealno oštre ivice reznog alata. Međutim, poslednjih godina, ova metoda je proširena kako bi uključila realniju geometriju reznog alata, uzimajući u obzir poluprečnik zaobljenja vrha alata i uticaje pohabanosti reznog alata [29], [59].

Jedan od glavnih nedostataka primene numeričkih modela jeste nepostojanje pouzdanih modela materijala predmeta obrade, kao i adekvatnih modela kontakta između reznog alata i materijala predmeta obrade. Numerički modeli često daju adekvatne rezultate, ali u određenim slučajevima zahteva se i eksperimentalna validacija dobijenih rezultata [55].

3.2.3 Empirijski modeli

Empirijski modeli se koriste za modeliranje procesa/sistema u situacijama kada nije moguće ili nije praktično koristiti klasične analitičke ili numeričke modele. Oni se zasnivaju na eksperimentalnim podacima, koji su prikupljeni realizacijom prethodno pažljivo planiranog eksperimenta, i primeni matematičkih i statističkih metoda. Na osnovu dobijenih podataka, uz primenu statističkih i regresionih metoda, kreira se model koji omogućava predikciju i analizu procesa/sistema u okviru prethodno definisanog hiper-prostora ulaznih parametara.

Empirijski modeli se zasnivaju na eksperimentalnom određivanju koeficijenata modela, čija je forma često unapred definisana [53]. Ovaj pristup modeliranja se oslanja na specifične eksperimentalne uslove, što ograničava oblast primene, jer i mala promena u uslovima eksperimentalnog istraživanja može dovesti do značajnih promena eksperimentalnih rezultata.

Tačnost i pouzdanost matematičkog modela ne zavisi samo od složenosti izabrane matematičke funkcije, već i od tipa unapred definisanog modela, ukupnog broja faktora i raspona njihovog variranja, kao i vrste eksperimentalnog plana koji je korišćen. Kako broj faktora raste, tako se povećava i složenost matematičkog modela, što iziskuje potrebu za većim brojem eksperimentalnih ogleda (opita, proba), složenijim eksperimentom, obimnijoj i vremenski zahtevnijoj analizi podataka, što na kraju dovodi do većih troškova celokupnog eksperimentalnog istraživanja [60]. Iako zahtevniji, složeniji empirijski matematički modeli obezbeđuju tačnije predikcije ponašanja istraživanog procesa/sistema u okviru izabranog eksperimentalnog hiper-prostora [61].

Primena principa teorije planiranja eksperimenta omogućava značajno povećanje efikasnosti eksperimentalnog istraživanja. Ovaj metodološki pristup nadmašuje neplansko eksperimentisanje, jer obezbeđuje organizovano, sistematično i sveobuhvatno planiranje

eksperimentalnog istraživanja, kao i pouzdanu analizu i interpretaciju dobijenih podataka, uz racionalno korišćenje dostupnih resursa [13]. Među brojnim eksperimentalnim planovima koji omogućavaju kreiranje empirijskih modela, Tagučijevi eksperimentalni planovi (nizovi) se izdvajaju po svojoj praktičnosti i fleksibilnosti [62]. Njihova popularnost proizilazi iz činjenice da omogućavaju analizu većeg broja faktora uz relativno mali broj ogleda. Na taj način, pružaju efikasan okvir za istraživanje eksperimentalnog prostora, uz mogućnost formulisanja odgovarajućih empirijskih modela.

3.3 Prednosti i nedostaci metoda modeliranja

Pri obradi rezanjem, modeliranje performansi procesa je od ključnog značaja za optimizaciju procesa obrade. Analitički, numerički i empirijski modeli se kreiraju na različitim principima, koriste specifične metode i karakterišu se određenim prednostima i ograničenjima (tabela 3.1) [29], [57].

Tabela 3.1 Uporedna analiza analitičkih, numeričkih i empirijskih modela

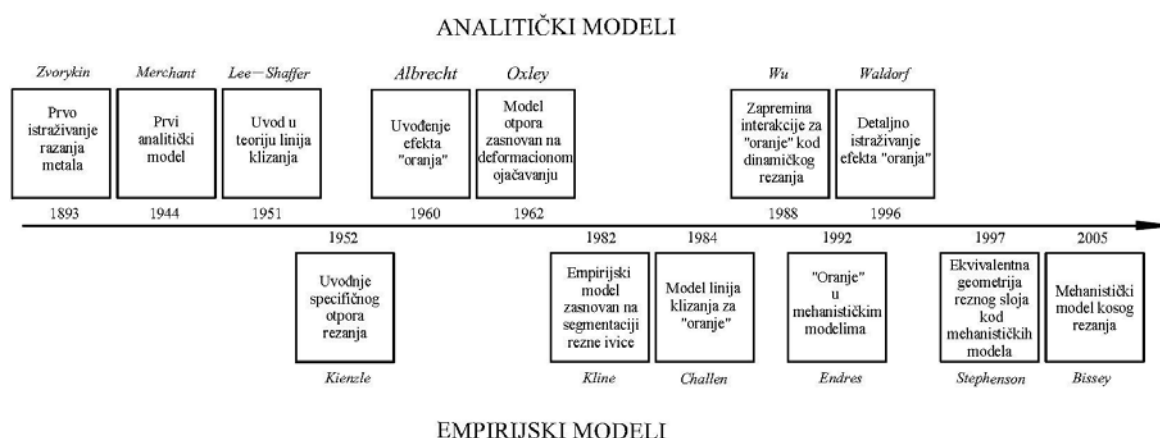
	Analitički modeli	Numerički modeli	Empirijski modeli
Princip	- fizički zakoni - elementarna plastomehanika	- diskretizacija kontinuuma - rešavanje diferencijalnih jednačina numeričkim metodama	- eksperimentalni rezultati - statističke i regresione metode - metode veštačke inteligencije
Metode	- model ravni smicanja - model polja linija klizanja - model zone smicanja	- FEM - FDM - BEM - FVM - VFEM - EBFEM - RFEM	- RSM - ANN - FL - GP - SVM
Prednosti	bolje razumevanje osnovnih mehanizama procesa	- fleksibilnost i prilagodljivost - simulacija složenih uslova obrade	- brzo kreiranje uz mogućnost adaptacije - prijemčiva i praktična primena

Nedostaci	• ograničena primenljivost, (idealni uslovi) • zanemarivanje dinamičkih efekata (vibracije, heterogenost materijala, lom strugotine)	• visoka računarska zahtevnost i dugo trajanje simulacija • ekspertiza numeričkih metoda i teorijskog znanja	• potrebni eksperimentalni resursi • validni unutar obuhvaćenog eksperimentalnog prostora
Tačnost	• umerena (idealni uslovi)	• visoka	• umerena do visoka (u zavisnosti od realizovanog eksperimenta)

Metoda odzivnih površina (*eng.* Response Surface Methodology – RSM), veštačka neuronska mreža (*eng.* Artificial Neural Network – ANN), fazi logika (*eng.* Fuzzy Logic – FL), genetsko programiranje (*eng.* Genetic Programming – GP), metoda potpornih vektora (*eng.* Support Vector Machine – SVM).

3.4 Istorijski razvoj modela otpora rezanja

Istraživanje i analiza otpora rezanja predstavlja jedno od ključnih područja u oblasti u tehnologija obrade rezanjem. Kod tehnologije obrade struganjem, modeli otpora rezanja se razmatraju u prvom redu, zbog njihovog opšteg značaja, s obzirom da otpori rezanja utiču na habanje i lom reznog alata, dimenzionalnu tačnost, ako se koriste i za određivanje snage rezanja i obrtnog momenta [22]. Hronološki pregled značajnih analitičkih i empirijskih modela otpora rezanja prikazan je na slici 3.1 [63].



Slika 3.1 Istorijski pregled modela otpora rezanja [63]

Empirijski model glavnog otpora rezanja, koji su predložili Kienzle i Victor, se zasniva se na realizaciji većeg broja eksperimentalnih opita za određivanje koeficijenata [64].

Međutim, treba imati u vidu da ukoliko se realni uslovi obrade razlikuju od eksperimentalnih uslova (materijal alata, ugao vrha, habanje itd.), potrebno je koristiti korekzione koeficijente [65]. Prema ovom modelu, glavni otpor rezanja (F_c) se može odrediti kao:

$$F_c = A_1 \cdot k_c = A_1 \cdot k_{c1.1} \cdot h^{-m_c} \quad (4.1)$$

gde su: A_1 (mm²) površina poprečnog preseka reznog sloja, k_c (N/mm²) specifični otpor rezanja, $k_{c1.1}$ (N/mm²) specifični otpor rezanja za 1 mm² površine poprečnog preseka reznog sloja, h (mm) debljina reznog sloja, m_c eksponent specifičnog otpora rezanja koji zavisi od vrste materijala obratka [63]. Geometrija reznog sloja ima ključnu ulogu, dok je najvažniji faktor koji određuje oblik poprečnog preseka reznog sloja glavni napadni ugao κ (slika 3.2).

Debljina i širina reznog sloja se mogu odrediti prema jednačinama 4.2 i 4.3 [64].

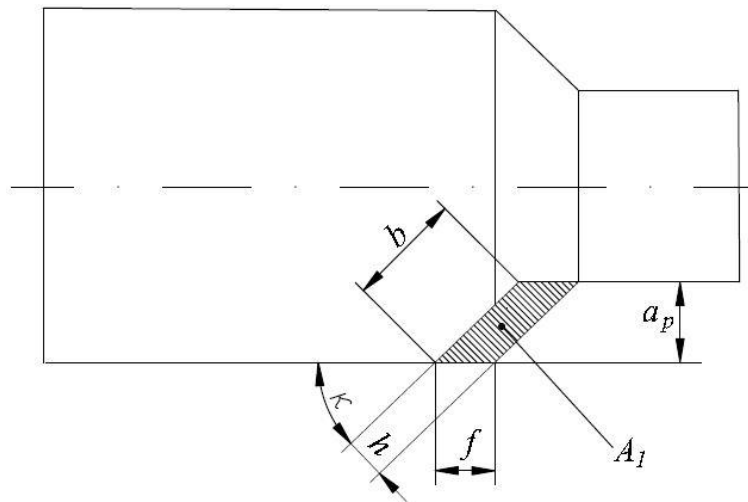
$$h = f \cdot \sin \kappa \quad (4.2)$$

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa} \quad (4.3)$$

gde su: f (mm/o) korak, a_p (mm) dubina rezanja, h (mm) debljina reznog sloja, b (mm) širina reznog sloja.

Površina poprečnog preseka reznog sloja može se predstaviti pomoću zadatih parametara rezanja (f , a_p) i geometrijskih parametara reznog sloja (h , b) [63], [66] kao:

$$A_1 = a_p \cdot f = b \cdot h \quad (4.4)$$



Slika 3.2 Teorijski poprečni presek reznog sloja kod struganja [9], [63]

Istraživanja u oblasti obrade rezanjem i dalje su usmerena na unapređenje i adaptaciju Kienzle-Victor-ovog modela glavnog otpora rezanja. Tako na primer, predikcije vrednosti glavnog otpora rezanja primenom Kienzle-Victor-ovog modela su validne za debljine reznog

sloja veće od 0.1 mm [13]. Takođe, ovaj model je primenljiv za grubu obradu, gde je dubina rezanja značajno veća od poluprečnika zaobljenja vrha alata [65]. Međutim, u slučaju završne obrade, kada se uklanjanje strugotine ne odvija prvenstveno na glavnoj reznoj ivici alata, već delimično i na poluprečniku zaobljenja vrha alata ($a_p > r_\epsilon$) ili samo na poluprečniku zaobljenja vrha alata ($a_p \ll r_\epsilon$), ovaj model se ne može primeniti [67]. Ono što otežava praktičnu primenu ovog modela je činjenica da se u literaturi i tehnološkim bazama mogu naći različite vrednosti empirijskih koeficijenata ($k_{cl,1}$ i m_c), kao i činjenica da je za neke čelike veoma teško, ili gotovo nemoguće, naći odgovarajuće vrednosti [66].

4. PREGLED PRETHODNIH ISTRAŽIVANJA OTPORA REZANJA

Otpori rezanja koji deluju na rezni alat predstavljaju važan aspekt tehnologije obrade struganjem. Poznavanje otpora rezanja je neophodno proizvođačima mašina alatki pri projektovanju elemenata mašine alatke, nosača alata i steznog pribora, jer se njihovim poznavanjem može izvršiti procena potrebne snage rezanja, obrtnog momenta i opterećenja ležajeva vretena alatnih mašina. Poznavanje otpora rezanja ima značajnu ulogu i kod planiranja tehnološkog postupka obrade iz razloga što su otpori rezanja u korelaciji sa habanjem i postojanošću alata, kvalitetom i integritetom obrađene površine, dimenzionalnom tačnošću obrade i potrošnjom energije. Njihova procena za različite režime obrade, a sagledavajući snagu pogonskog motora mašine alatke i karakteristike reznih alata koji su dostupni, može doprineti povećanju efikasnosti procesa obezbeđujući ekonomičnu obradu uz obezbeđenje visokog kvaliteta obrade. Otpori rezanja su pomoćni kriterijum na osnovu koga se može proceniti obradljivost materijala, naročito u slučajevima kada se eksperiment postojanosti alata ne može realizovati usled vremenskih ili resursnih ograničenja ili kada je istraživanje ekonomski neisplativo.

Analiza i predikcija otpora rezanja kod obrade struganjem, kao vrlo bitne performanse procesa, neophodne za optimizaciju i poboljšanje efikasnosti obrade, podstakla je brojna istraživanja. Cilj brojnih istraživanja bio je kreiranje što tačnijih predikcionih modela i analiza uticaja faktora procesa, uslova obrade i karakteristika reznog alata na otpore rezanja.

4.1 Prethodna istraživanja otpora rezanja kod struganja

U ovom delu je data analiza prethodnih eksperimentalnih istraživanja otpora rezanja kod struganja čelika različitih kvaliteta. Analiza sumira istraživane ulazne veličine (faktori procesa, uslovi obrade, karakteristike materijala obratka, karakteristike reznog alata), broj nivoa variranja i obuhvaćeni eksperimentalni hiper-prostor, različite vrste materijala obratka, korišćene eksperimentalne planove sa realizovanim brojem ogleda, kao i različite tipove modela koji su korišćeni za predikciju otpora rezanja (tabela 4.1). U većini radova, istraživanja su bila fokusirana pretežno na grubu obradu struganjem. Pregled dosadašnjih istraživanja obuhvata analizu 41 rada publikovanih u referentnoj literaturi u periodu od 2010. godine do danas.

Tabela 4.1 Pregled prethodnih istraživanja otpora rezanja kod struganja čelika

Referenca (godina)	Ulazne veličine	Oznaka čelika po EN standardu	Eksperime ntalni plan (broj ogleda)	Tip modela
<i>Cukor i Jurković</i> [68] (2010)	v (266, 300, 350, 400, 434) m/min f (0.23, 0.3, 0.4, 0.5, 0.57) mm/o a_p (1.0, 1.5, 2.25, 3.0, 3.5) mm	C45E	centralni kompozici oni (46)	kvadratni, GP
<i>*Bouacha i saradnici</i> [69] (2010)	v (125, 176, 246) m/min f (0.08, 0.12, 0.16) mm/o a_p (0.15, 0.30, 0.45) mm	100Cr6	Taguči (27)	kvazilinearni
<i>*Ding i saradnici</i> [70] (2011)	v (200-250-300) m/min f (0.028, 0.039, 0.05) mm/o a_p (0.10, 0.25, 0.40)mm	T250	<i>Box- Behnken</i> (15)	linearni
<i>*Aouici i saradnici</i> [71] (2012)	v (120, 180, 240) m/min f (0.08, 0.12, 0.16) mm/o a_p (0.15, 0.30, 0.45) mm tvrdoća (40, 45, 50) HRC	X37CrMoV5–1	<i>Box- Behnken</i> (29)	kvadratni
<i>Suresh i saradnici</i> [72] (2012)	v (140, 200, 260) m/min f (0.10, 0.18, 0.26) mm/o a_p (0.60, 0.80, 1.0) mm	34CrNiMo6	Taguči (27)	kvazilinearni
<i>*Bartarya i Choudhury</i> [73] (2012)	v (167, 204, 261) m/min f (0.075, 0.113, 0.150) mm/o a_p (0.10-0.15-0.2) mm	100Cr6	Taguči (27)	kvadratni
<i>*Madić i Radovanović</i> [74] (2013)	v (94, 116, 143) m/min f (0.124, 0.249, 0.499) mm/o a_p (0.75, 1.0, 1.5) mm κ (75, 85, 95) °	C45E	Taguči (36)	ANN
<i>Rao i saradnici</i> [75] (2013)	v (50, 75, 95) m/min f (0.05, 0.10, 0.15) mm/o a_p (0.25, 0.5, 0.75) mm	C50	Taguči (27)	kvazilinearni
<i>*Chinchani i Choudhury</i> [76] (2013)	v (100, 200, 150, 300) m/min f (0.1, 0.2, 0.3) mm/o a_p (0.5, 1.5, 2.5) mm	34CrNiMo6	centralni kompozici oni (20)	kvadratni
<i>Cica i saradnici</i> [77] (2013)	v (210, 320, 400) m/min f (0.224, 0.280, 0.355, 0.4) mm/o a_p (0.25, 0.5, 0.75) mm	C45E	Taguči (36)	ANN
<i>Bhuiyan i Ahmed</i> [78] (2014)	v (66, 85, 110, 144) m/min f (0.12, 0.16, 0.20, 0.24) mm/o	34CrNiMo6	potpuni faktorni (16)	kvadratni

*Kara i saradnici [79] (2015)	v (75,100, 150, 200, 250) m/min f (0.05, 0.1, 0.2,0.3) mm/o	X2CrNiMo17–12–2	potpuni faktorni (60)	ANN
*Tang i saradnici [80] (2015)	v (75, 150, 226) m/min f (0.10, 0.20, 0.30) mm/o a_p (0.10, 0.20, 0.30) mm tvrdoća (50, 58, 64) HRC r_ϵ (0.8, 1.2, 1.6) mm	X153CrMo12	Taguči (27)	kvazilinearni, stepeni
*Meddour i saradnici [81] (2015)	v (120, 170, 200, 280) m/min f (0.08, 0.12, 0.16, 0.20) mm/o a_p (0.15, 0.30, 0.45, 0.60) mm	X20Cr13	potpuni faktorni (64)	kvadratni
Shankar i saradnici [82] (2015)	v (90, 270, 540) m/min f (0.04, 0.14, 0.29) mm/o a_p (0.20, 0.75, 1.00) mm	S355JR	Taguči (27)	FL
Ramezani i Afsari [83] (2015)	v (375, 450, 525-600) m/min f (0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25) mm/o a_p (0.125, 0.2, 0.275, 0.35) mm r_ϵ (0.4, 0.8, 1.2) mm	40CrMnMo7	Taguči (27)	ANN
*Azizi i saradnici [84] (2016)	v (85, 120, 170) m/min f (0.08, 0.12, 0.16) mm/o a_p (0.10, 0.20, 0.30) mm tvrdoća (46, 52, 62) HRC	100Cr6	Taguči (27)	linearni
*Maňková i saradnici [85] (2016)	v (90, 120, 150) m/min f (0.045-0.095-0.15) mm/o	100Cr6	Taguči (9)	kvadratni
Magdum i Naik [86] (2017)	f (0.065, 0.13, 0.26) mm/o γ_o (0, 5, 10) ° κ (60, 70, 90) °	34CrNiMo6	Taguči (15)	linearni
*Pathak i saradnici [87] (2018)	v (150, 250, 350) m/min f (0.05, 0.10, 0.20) mm/o a_p (0.20, 0.50, 0.80) mm r_ϵ (0.4, 0.8, 1.2) mm	X165CrMoV12	Taguči (27)	linearni, FL
*Meddour i saradnici [88] (2018)	v (120, 182, 244) m/min f (0.08, 0.11, 0.14) mm/o a_p (0.1, 0.2, 0.3) mm r_ϵ (0.8, 1.2, 1.6) mm	42CrMo4	Box- Behnken (29)	kvadratni, ANN
Patole i Kulkarni [89] (2018)	v (75, 90) m/min f (0.04-0.06-0.08-0.10-0.12) mm/o a_p (0.5, 1.0, 1.5) mm r_ϵ (0.4, 0.8) mm	34CrNiMo6	potpuni faktorni (60)	kvadratni

<i>Vasu i Nayaka</i> [90] (2018)	v (24.94, 37, 41, 55, 63) m/min f (0.350, 0.700, 0.875) mm/o a_p (0.25, 0.50, 0.75) mm	50CrV4	Taguči (27)	linearni
* <i>Makhfi i saradnici</i> [91] (2018)	v (50, 100, 150, 200, 250, 300) m/min f (0.05, 0.10, 0.15, 0.20) mm/o a_p (0.20, 0.30, 0.40) mm tvrdoća (45, 50, 51.5, 54, 55.25) HRC	100Cr6	Box-Behnken (25)	ANN
<i>Zerti i saradnici</i> [92] (2019)	v (80, 120, 170, 240) m/min f (0.08, 0.12, 0.16, 0.20, 0.24) mm/o a_p (0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50) mm	X20Cr13	Taguči (25)	kvadratni
<i>Bouزيد i saradnici</i> [93] (2020)	v (100, 200, 300) m/min f (0.08, 0.14, 0.2) mm/o a_p (0.25, 0.5) mm tri rezne pločice	X153CrMo12	Taguči (18)	ANN
<i>Sharma i saradnici</i> [94] (2020)	v (192, 325, 420) m/min f (0.05, 0.1, 0.2) mm/o a_p (0.2, 0.6, 1.0) mm	X153CrMo12	Taguči (9)	linearni, FL
* <i>Osička i saradnici</i> [95] (2022)	v (130, 155, 180) m/min f (0.05, 0.1) mm/o a_p (0.2, 0.35) mm	100Cr6	Taguči (12)	stepeni
* <i>Sahachar Reddy i saradnici</i> [96] (2020)	v (120, 150, 180, 210, 240) m/min f (0.05, 0.1, 0.14, 0.2, 0.24) mm/o a_p (0.3, 0.4, 0.5, 0.9, 0.7) mm	X40CrMoV5–1	Taguči (25)	ANN
<i>Ibraheem i saradnici</i> [97] (2020)	v (100, 150, 200, 250, 300) m/min f (0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30) mm/o a_p (0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40) mm tvrdoća (45, 50, 52, 54, 56) HRC	100Cr6	parcijalni faktorni (25)	ANN
* <i>Aslan</i> [98] (2020)	v (350, 500) m/min f (0.06, 0.10) mm/o a_p (1.5, 2.0) mm κ (60, 90) °	42CrMo4	potpuni faktorni (16)	kvazilinearni

*Abdellaoui i saradnici [99] (2021)	v (180, 250, 400) m/min f (0.1, 0.15, 0.2) mm/o r_e (0.8, 1.2) mm	X5CrNi18–10	Taguči (6)	linearni
*Nur i saradnici [100] (2021)	v (100, 130, 170) m/min f (0.10, 0.125, 0.16) mm/o	X20Cr13	faktorni sa centralnim tačkama (11)	kvadratni
Alajmi i Almeshal [101] (2021)	v (75, 90) m/min f (0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12) mm/o a_p (0.5, 1.0, 1.5) mm r_e (0.4, 0.8) mm	34CrNiMo6	potpuni faktorni (60)	GPR, SVM, ANN
Özdemir i saradnici [102] (2021)	f (0.03, 0.06, 0.09) mm/o a_p (0.05, 0.10, 0.15) mm r_e (0.4, 0.8, 1.2) mm	36CrNiMo4	Taguči (9)	linearni
*Ahmed i saradnici [103] (2021)	n (245, 490, 650, 800) o/min f (0.12, 0.14, 0.16, 0.18) mm/o a_p (0.2, 0.3, 0.4, 0.5) mm D (19.10, 24.00, 31.75, 40.00) mm	X12CrMnNiN1 7–7–5	Taguči (16)	kvazilinearni
Projoth i saradnici [104] (2021)	v (100, 150, 200, 250) m/min f (0.4, 0.6, 0.8, 1.0) mm/o a_p (0.4, 0.6, 0.8, 1.0) mm	C40	Taguči (16)	kvazilinearni
*Kumar i Yadav [105] (2022)	n (186, 269, 315) o/min f (0.15, 0.20, 0.25) mm/o a_p (0.25, 0.50, 0.75) mm	C40	Taguči (27)	linearni
*Lukács i Horváth [63] (2022)	f (0.12, 0.18, 0.24, 0.30, 0.36, 0.42, 0.48, 0.54, 0.6) mm/o a_p (1.2, 2.4, 3.6, 4.8,) mm	9SMn28	potpuni faktorni (36)	Kienzle-Victor
Safi i saradnici [106] (2023)	v (180, 255, 330, 400) m/min f (0.08, 0.12, 0.16, 0.20) mm/o a_p (0.1, 0.3) mm r_e (0.4, 0.8, 1.2, 1.6) mm	X153CrMo12	Taguči (16)	linearni, ANN
Stanojković i saradnici [107] (2025)	v (157, 245) m/min f (0.196, 2.249, 0.321) mm/o a_p (1.2, 1.8, 1.9, 2.0, 2.9) mm γ_o (8.5, 19)° r_e (0.8, 1.2) mm	20MnCrS5	Taguči (6)	Model dimenzionalne analize

U radovima označenim sa * su analizirane tri komponente otpora rezanja (F_c , F_p i F_f);
 Ulazne veličine: v – brzina rezanja, f – korak, a_p – dubina rezanja, r_e – poluprečnik zaobljenja vrha alata, n – broj obrtaja glavnog vretena, D – prečnik obratka, γ_o – grudni ugao alata, κ – glavni napadni ugao alata;
 Genetsko programiranje (*eng.* Genetic Programming – GP), veštačka neuronska mreža (*eng.* Artificial Neural Network – ANN), fazi logika (*eng.* Fuzzy Logic – FL), Gausova regresija (*eng.* Gaussian Process Regression – GRP), metoda potpornih vektora (*eng.* Support Vector Machine – SVM).

4.2 Analiza i potencijalni pravci istraživanja otpora rezanja

Analiza prethodnih istraživanja otpora rezanja kod struganja čelika pokazuje da je veliki broj istraživanja limitiran samo na analizu i modeliranje otpora rezanja u funkciji režima obrade, odnosno sagledavajući samo tri ključna parametra obrade, brzinu rezanja, korak i dubinu rezanja. Pritom, za uspostavljanje matematičke zavisnosti otpora rezanja i parametara režima obrade, najčešće su korišćeni linearni, kvazilinearni i kvadratni modeli, dok se primenom modela veštačke inteligencije, naročito veštačke neuronske mreže, pokušava postići još veća predikciona tačnost. Ovde je potrebno istaći da kreiranje modela veštačke inteligencije veće tačnosti nije bez nedostataka, koji se, između ostalog, ogledaju u činjenici da je za realizaciju eksperimenta i adekvatno treniranje modela potrebno obezbediti znatno veće materijalne i vremenske resurse.

Imajući u vidu da otpori rezanja, između ostalog, zavise od vrste i termičke obrade materijala obratka, uslova hlađenja i podmazivanja, vrste reznog materijala i geometrije reznog alata, može se reći da se nedostatak prethodnih istraživanja ogleda u izostavljanju analize uticajnosti ovih parametara, kao i mogućih interakcija sa osnovnim parametrima obrade koji definišu režim obrade. Takođe, iako modeliranje otpora rezanja prati progresivna evolucija modela, od jednostavnih stepenih modela ka sve složenijim modelima baziranim na primeni veštačke inteligencije, za sada nisu predloženi opšti modeli koji bi bili primenljivi za veći broj materijala. Štaviše, sve veća primena i razvoj složenijih modela za predikciju otpora rezanja za sada nije obezbedila dovoljno prednosti da se opšte prihvaćeni *Kienzle-Victor*-ov model zameni u industrijskoj praksi. Ovaj model vrši predikciju otpora rezanja uzimajući u obzir samo geometriju poprečnog preseka reznog sloja, koja zavisi od koraka, dubine rezanja i glavnog napadnog ugla, i karakteristike materijala obratka kroz procenu empirijskih koeficijenata ($k_{c1.1}$ i m_c). Iako ovaj model daje prihvatljive rezultate, ne uzima u obzir bitne geometrijske karakteristike reznog alata (poluprečnik zaobljenja vrha alata, grudni ugao), brzinu rezanja, uslove hlađenja i podmazivanja, itd. Štaviše, praktična primena *Kienzle-*

Victor-ovog modela je ograničena s obzirom na nedostupnost podataka o vrednostima empirijskih koeficijenata. Naime, u katalozima proizvođača reznog alata i kalkulatorima mašinske obrade vrednosti ovih koeficijenata se najčešće daju za referentni materijal iz određene grupe materijala, što limitira primenu ovog modela u slučaju obrade specifičnih materijala ili materijala koji su termički obrađeni.

S obzirom da brojna empirijska istraživanja pokazuju da stepeni modeli na adekvatan način opisuju promenu otpora rezanja kod struganja u zavisnosti od režima obrade [80], a uzimajući u obzir mogućnosti primene dimenzionalne analize za sagledavanje većeg broja ulaznih veličina i realizaciju vremenski i resursno isplativih eksperimenata kod struganja [107], u disertaciji se predlaže kreiranje stepenih modela zasnovanih na bezdimenzionalnim veličinama za predikciju otpora rezanja kod struganja. Osim jednostavnosti i prijemčivosti za praktičnu primenu, radi se o modelima koji se mogu proširiti popravnim koeficijentima kako bi se poboljšala tačnost i uzele u obzir uticajnosti faktora obrade koje osnovni model ne obuhvata, čineći ih prilagodljivim specifičnim uslovima obrade. Eksperimentalna verifikacija i validacija predloženih modela omogućila bi efikasnu i ekonomičnu procenu otpora rezanja u specifičnim uslovima obrade, posebno za materijale za koje ne postoje empirijski određene konstante *Kienzle-Victor*-ovog modela, termički obrađene čelike, ili u slučajevima kada se koriste specifični rezni alati.

Primenom predloženih modela stvorili bi se uslovi za određivanje merodavnog režima rezanja i optimizaciju procesa obrade, što konačno vodi ka poboljšanju produktivnosti, smanjenju troškova i povećanju efikasnosti procesa obrade. Prema tome, glavni cilj je istraživanje mogućnosti kreiranja empirijskih modela za predikciju otpora rezanja kod struganja čelika različitog kvaliteta primenom dimenzionalne analize.

5. DIMENZIONALNA ANALIZA

Za opisivanje osnovnih fizičkih zakonitosti procesa koriste se fizičke veličine koje obuhvataju merljiva svojstva, događaje ili stanja. Definicije fizičkih veličina proizilaze iz procesa merenja ili iz veza sa već definisanim veličinama putem jednačina ili zakona. Svaka fizička veličina ima numeričku vrednost i odgovarajuću mernu jedinicu [108]. Fizičke veličine mogu biti osnovne i izvedene. Osnovne fizičke veličine su one koje su definisane Međunarodnim sistemom jedinica (SI) i koje nisu međusobno pretvorive. Sve ostale fizičke veličine izvedene su iz osnovnih fizičkih veličina, odnosno uzajamno su povezane sa njima [109].

Dimenzionalna analiza predstavlja matematičku metodu koja se koristi u nauci i inženjerstvu za identifikaciju relacija, kao i smanjenje broja i složenosti fizičkih veličina koje figurišu u posmatranom problemu istraživanja. To se postiže sažimanjem, sa ciljem da se problem istraživanja predstavi pomoću manjeg broja bezdimenzionalnih grupa. Na taj način je broj promenljivih koje definišu posmatranu pojavu smanjen na broj osnovnih dimenzija. Ova metoda je korisna za kreiranje empirijskih modela za analizu, proučavanje i optimizaciju procesa i sistema, kao i planiranje eksperimentalnih istraživanja kroz identifikaciju bezdimenzionalnih grupa. Osnovna ideja dimenzionalne analize je da se fizičke veličine izraze osnovnim dimenzijama kao što su masa, dužina i vreme (tabela 5.1). Izvedene dimenzije proistekle su iz kombinacija osnovnih dimenzija.

Tabela 5.1 SI sistem jedinica sa pripadajućim dimenzijama

Naziv	SI oznaka (naziv)	Dimenzija
Masa	kg (kilogram)	M
Dužina	m (metar)	L
Vreme	s (sekunda)	T
Termodinamička temperatura	K (kelvin)	θ
Jačina električne struje	A (amper)	I
Jačina svetlosti	cd (kandela)	C
Količina supstance	mol (mol)	N

Dimenzionalna analiza pokazuje najveći potencijal kada se koristi na potpunom matematičkom modelu u algebarskom (diferencijalnom i/ili integralnom) obliku. Međutim, čak i kada potpuni model nije dostupan ili je složen, dimenzionalna analiza može biti veoma korisna ako se primeni na jednostavan skup relevantnih promenljivih [110], [111].

Pomoću dimenzionalne analize mogu se izvesti mnogi od osnovnih zakona i odnosa u

njihovoj opštoj formi i to pomoću manipulacije dimenzijama promenljivih koje su uključene u dati problem istraživanja. Na taj način broj promenljivih je smanjen na broj osnovnih dimenzija koje se javljaju u posmatranom problemu istraživanja [112].

Primena dimenzionalne analize ne dovodi nužno do novih saznanja, nego uglavnom predstavlja potvrdu već poznatih ili pojednostavljenih činjenica, što ukazuje na težinu osnovnog problema dimenzionalne analize [109], koja se u praksi koristi za proveru ispravnosti izvedenih modela, kvantitativno izvođenje fizičkih jednačina i modeliranje procesa na osnovu teorije sličnosti [113]. Ako se za posmatrani problem istraživanja napravi adekvatan izbor promenljivih, dimenzionalna analiza postaje moćan alat.

Ključni koncept dimenzionalne analize zasnovan je na uslovu dimenzionalne homogenosti koji zahteva da sve veličine u jednačini imaju iste dimenzije u odnosu na osnovne dimenzije poput dužine, mase, vremena i dr.

Glavna razlika između dimenzionalne analize i drugih analitičkih i statističkih analiza je u tome što se dimenzionalna analiza potpuno oslanja na odnos dimenzija uključenih promenljivih. Ova analiza u osnovi se može sažeti u tri osnovna koraka:

- definisanje relevantnih promenljivih koje figurišu u posmatranom problemu istraživanja,
- definisanje promenljivih u smislu njihovih osnovnih dimenzija,
- primena uslova dimenzionalne homogenosti u cilju identifikacije bezdimenzionalnih grupa.

5.1 Dimenzionalna homogenost

Fizički zakoni koji se opisuju jednačinama moraju da ispune uslov dimenzionalne homogenosti, ključan koncept sa primenom u fizici i inženjerstvu, a koji se zasniva na činjenici da dimenzije jedne jednačine moraju biti iste sa obe strane kako bi se uspostavila jednakost. Ako je uslov dimenzionalne homogenosti ispunjen, jednačina je dimenzionalno homogena. Ovaj uslov definisao je *Fourier* 1878. godine [114].

Iz uslova dimenzionalne homogenosti proizilaze dva pravila o kojima se mora voditi računa prilikom primene dimenzionalne analize [113]:

- fizičke veličine sa obe strane jednakosti moraju imati iste dimenzije,
- mogu se sabirati samo fizičke veličine istih dimenzija.

Dimenzionalna homogenost pruža mogućnost jednostavnijeg opisivanja zakona i

relacija između fizičkih veličina. Na taj način olakšava se analiza problema (procesa/sistema) i pruža se jasan uvid u odnose fizičkih veličina.

U svakom eksperimentu može postojati n promenljivih (Y, X) koje su povezane izrazom koji je dimenzionalno homogen na sledeći način [109], [115]:

$$f(Y, X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (5.1)$$

Zavisna promenljiva Y se može izraziti sledećim modelom:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (5.2)$$

gde su: $X_1, X_2, \dots, X_n$ nezavisne promenljive, pod pretpostavkom da sve promenljive odgovaraju sistemu, opisanom osnovnim dimenzijama.

Uslov dimenzionalne homogenosti je koristan jer olakšava definisanje fizičkih veličina datog sistema, pomaže u proveru dimenzionalne homogenosti modela, a predstavlja i neophodan korak u primeni metoda dimenzionalne analize.

5.2 Metode dimenzionalne analize

Primenom dimenzionalne analize mogu se formirati π grupe i na taj način smanjiti broj promenljivih. Metode dimenzionalne analize zasnovane su na Fourier-ovom uslovu dimenzionalne homogenosti [114]. Za primenu dimenzionalne analize najčešće se koriste [111]:

- *Rayleigh*-ova metoda,
- *Buckingham*-ova π metoda (teorema),
- *Ipsen*-ova metoda,
- matrična metoda, i
- metoda inspekcije.

5.2.1 *Rayleigh*-ova metoda

Rayleigh-ova metoda dimenzionalne analize poznata je i kao metoda indeksa. Začetnikom ove metode dimenzionalne analize smatra se *John William Strutt* [116]. Jedan od njegovih ključnih doprinosa bila je formalizacija dimenzionalne analize. *Rayleigh*-ova metoda dimenzionalne analize sastoji se iz četiri koraka [115], [117]:

1. definisati nezavisne promenljive koje utiču na zavisnu promenljivu;

2. definisati model zavisnosti zavisne promenljive u funkciji nezavisnih promenljivih u obliku stepenog modela sa bezdimenzionalnom konstantom i proizvoljnim eksponentima;
3. primeniti uslov dimenzionalne homogenosti – eksponente izjednačiti sa obe strane jednačine kako bi se dobio sistem jednačina, a zatim rešiti sistem jednačina u cilju određivanja vrednosti eksponenata;
4. zameniti vrednosti eksponenata u glavnoj jednačini i formirati bezdimenzionalne grupe.

Važno pravilo *Rayleigh*-ove metode dimenzionalne analize je da nakon formiranja bezdimenzionalnih grupa postoji samo jedna zavisna promenljiva koja se pojavljuje u jednoj bezdimenzionalnoj grupi.

U opštem slučaju, kada je jedna zavisna promenljiva funkcija od n nezavisnih promenljivih, primenom uslova dimenzionalne homogenosti, izraz se može predstaviti u sledećem obliku [115], [117]:

$$Y = f(X_1)^{z_1} \cdot (X_2)^{z_2} \dots (X_n)^{z_n} \quad (5.3)$$

Uzimajući u obzir opšti oblik dimenzija *MLT* dimenzionalne analize, prethodna jednačina dobija oblik:

$$[M^a \cdot L^b \cdot T^c] = f[M^{a_1} \cdot L^{b_1} \cdot T^{c_1}]^{z_1} [M^{a_2} \cdot L^{b_2} \cdot T^{c_2}]^{z_2} \dots [M^{a_n} \cdot L^{b_n} \cdot T^{c_n}]^{z_n} \quad (5.4)$$

Izjednačavanjem eksponencijalnih članova za istu dimenziju dobija se sistem od tri jednačine:

$$\begin{aligned} a &= a_1 z_1 + a_2 z_2 + \dots + a_n z_n \\ b &= b_1 z_1 + b_2 z_2 + \dots + b_n z_n \\ c &= c_1 z_1 + c_2 z_2 + \dots + c_n z_n \end{aligned} \quad (5.5)$$

U slučaju da promenljive imaju više dimenzija, uključujući dimenzije promenljivih $[(Q, I, C, N)]$, broj dimenzija odgovara broju sistema jednačina.

Nedostatak *Rayleigh*-eve metode dimenzionalne analize je veća složenost, usled većeg broja promenljivih za posmatrani problem istraživanja [115].

5.2.2 *Buckingham*-ova π metoda

Buckingham-ova π metoda dimenzionalne analize dobila je ime po *Edgaru Bakingemu* [118] koji je 1914. godine definisao bezdimenzionalne veličine, tj. grupe i označio ih simbolom π . Kasnije je *Persi Bridgman* [119] ovu metodu dimenzionalne analize definisao kao π teoremu.

Glavni koncept *Buckingham*-ove π teoreme definiše da svaki fizički problem

uključuje n promenljivih u dimenzionalno homogenoj jednačini definisanoj dimenzijama z . Problem se može svesti na odnos $n - z$ bezdimenzionalnih veličina, poznatih kao π grupe [120].

Bilo koja matematička funkcija se može izraziti na sledeći način:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_z, X_{z+1}, \dots, X_n) \quad (5.6)$$

Prethodna jednačina se može zapisati i u sledećem obliku:

$$f(X_1, X_2, \dots, X_z, X_{z+1}, \dots, X_n) = 0 \quad (5.7)$$

gde su: z – simbol za definisanje maksimalnog broja dimenzija, n – ukupan broj promenljivih (X), X_1 – zavisna promenljiva, X_2 do X_n – nezavisne promenljive. U opštem slučaju, broj promenljivih je uvek veći od broja dimenzija [115]. U skladu sa uslovom dimenzionalne homogenosti, zavisna promenljiva je povezana sa svojim dimenzijama prema sledećem izrazu:

$$X = (A_1)^{m_1} (A_2)^{m_2} \dots (A_z)^{m_z} \quad (5.8)$$

U dimenzionalnoj analizi moguće je izvršiti promenu jedinica promenljive koristeći faktor konverzije:

$$X'_i = y_i X_i \quad (5.9)$$

Broj promenljivih od X_1 do X_z zasnovan je na maksimalnom broju dimenzija i te dimenzije nisu iste kod svake promenljive. Promenljive od 1 do z se koriste kao primarne promenljive, svaka sa jednom nezavisnom dimenzijom. Ostatak promenljivih definisan je na način kao i bilo koja opšta promenljiva, kako je prikazano u sledećim izrazima [115], [121]:

$$\begin{aligned} X_1 &= (A_1) \\ X_2 &= (A_2) \\ &\vdots \\ X_z &= (A_z) \\ X_{z+1} &= (A_1)^{m_1} (A_2)^{m_2} \dots (A_z)^{m_z} \\ &\vdots \\ X_n &= (A_1)^{p_1} (A_2)^{p_2} \dots (A_z)^{p_z} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Dimenzije za promenljive od $z+1$ do n predstavljaju ukupan broj dimenzija prethodno definisanih od 1 do z . Kako bi se definisale bezdimenzionalne promenljive, odnos, kao i faktor konverzije (y), koristi se sledeći sistem jednačina [115], [120]:

$$\begin{aligned}
X'_1 &= y_1 X_1 = y_1 A_1 \\
X'_2 &= y_2 X_2 = y_2 A_2 \\
&\vdots \\
X'_z &= y_z X_z = y_z A_z \\
X'_{z+1} &= (y_1 A_1)^{m_1} (y_2 A_2)^{m_2} \dots (y_z A_z)^{m_z} \\
&= [(y_1)^{m_1} (y_2)^{m_2} \dots (y_z)^{m_z}] [(A_1)^{m_1} (A_2)^{m_2} \dots (A_z)^{m_z}] \\
&= [(y_1)^{p_1} (y_2)^{p_2} \dots (y_z)^{p_z}] X_{z+1} \\
X'_n &= (y_1 A_1)^{p_1} (y_2 A_2)^{p_2} \dots (y_z A_z)^{p_z} = [(y_1)^{p_1} (y_2)^{p_2} \dots (y_z)^{p_z}] [(A_1)^{p_1} (A_2)^{p_2} \dots (A_z)^{p_z}] \\
&= [(y_1)^{p_1} (y_2)^{p_2} \dots (y_z)^{p_z}] X_n
\end{aligned} \tag{5.11}$$

Pošto se promenom jedinica ne menja jednačina [120]:

$$f(X'_1, X'_2, \dots, X'_z, X'_{z+1}, \dots, X'_n) = 0 \tag{5.12}$$

Zamenom vrednosti dobija se sledeći izraz:

$$f(y_1 X_1, y_2 X_2, \dots, y_z X_z, (y_1)^{m_1} (y_2)^{m_2} \dots (y_z)^{m_z} X_{z+1}, (y_1)^{p_1} (y_2)^{p_2} \dots (y_z)^{p_z} X_n) = 0 \tag{5.13}$$

Kako su jedinice proizvoljne, kao i njihovi faktori konverzije, vrednosti faktora konverzije pogodno je definisati na sledeći način [115]:

$$\begin{aligned}
y_1 &= \frac{1}{x_1} \\
y_2 &= \frac{1}{x_2} \\
&\vdots \\
y_z &= \frac{1}{x_z}
\end{aligned} \tag{5.14}$$

Zamenom faktora konverzije, koji su dati prethodnim jednačinama, dobija se izraz koji ima oblik [120]:

$$\begin{aligned}
(y_1)^{m_1} (y_2)^{m_2} \dots (y_z)^{m_z} X_{z+1} &= \left(\frac{1}{x_1}\right)^{m_1} \left(\frac{1}{x_2}\right)^{m_2} \dots \left(\frac{1}{x_z}\right)^{m_z} X_{z+1} \\
&= \frac{X_{z+1}}{(x_1)^{m_1} (x_2)^{m_2} \dots (x_z)^{m_z}}
\end{aligned} \tag{5.15}$$

Izraz koji se navodi sadrži $n-z$ promenljivih koje su bezdimenzionalne:

$$f = \left[1, 1, \dots, 1, \frac{X_{z+1}}{(x_1)^{m_1} (x_2)^{m_2} \dots (x_z)^{m_z}}, \dots, \frac{X_n}{(x_1)^{p_1} (x_2)^{p_2} \dots (x_z)^{p_z}} \right] \tag{5.16}$$

Svaki pojam se naziva π grupom:

$$\pi = \frac{X_{z+1}}{(x_1)^{m_1} (x_2)^{m_2} \dots (x_z)^{m_z}} \tag{5.17}$$

Zamenom originalnih dimenzija ovih promenljivih dokazuje se da su bezdimenzionalne i nezavisne od originalnog sistema jedinica [111]:

$$\pi = \frac{X_{z+1}}{(X_1)^{m_1}(X_2)^{m_2} \dots (X_z)^{m_z}} = \frac{(A_1)^{m_1}(A_2)^{m_2} \dots (A_z)^{m_z}}{(A_1)^{m_1}(A_2)^{m_2} \dots (A_z)^{m_z}} = 1 \quad (5.18)$$

Utvrđeno je da prvobitna jednačina koja sadrži n promenljivih ima sledeći oblik [115], [120]:

$$f(X_1, X_2, \dots, X_z, X_{z+1}, \dots, X_n) = 0 \quad (5.19)$$

Prethodna funkcija se može izraziti u vidu dve funkcije u zavisnosti od π grupa [115], [120]:

$$\begin{aligned} f(\pi_{z+1}, \pi_{z+2}, \dots, \pi_n) &= 0 \\ f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-z}) &= 0 \end{aligned} \quad (5.20)$$

Iz prethodnih izraza se dobijaju π grupe koje se mogu prikazati kao:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{X_{z+1}}{(X_1)^{m_1}(X_2)^{m_2} \dots (X_z)^{m_z}} \\ \pi_{n-z} &= \frac{X_n}{(X_1)^{m_1}(X_2)^{m_2} \dots (X_z)^{m_z}} \end{aligned} \quad (5.21)$$

Kao što se može videti iz prethodne jednačine, imenilac je isti za sve π grupe, što je jedan od razloga zašto se ova metoda naziva i metodom ponavljajućih promenljivih.

Na osnovu načina definisanja π grupa, *Buckingham*-ova π metoda dimenzionalne analize se svodi na sledeće činjenice [115]:

- broj bezdimenzionalnih grupa definisanih *Buckingham*-ovom π metodom jednak je $n - z$;
- broj promenljivih koje se ponavljaju jednak je broju dimenzija (z);
- promenljive koje se ne ponavljaju i imaju svoje dimenzije stepenovane su na prvi stepen.

Treba uzeti u obzir da nisu sve bezdimenzionalne grupe ($n - z$) međusobno nezavisne, odnosno broj dimenzija (z) jeste samo prva aproksimacija koja treba da bude preciznije definisana.

Bezdimenzionalna π -grupa može se u opštem slučaju definisati i na sledeći način [115]:

$$\pi = X_1(X_2)^{a_1}(X_3)^{a_2} \dots (X_n)^{a_n} \quad (5.22)$$

Buckingham-ova π metoda dimenzionalne analize se može opisati u nekoliko ključnih koraka:

- definisati sve promenljive koje su uključene u dati problem – ovde naročito treba voditi računa, jer, ako se izostave neke promenljive, moguće je formirati π grupe, ali

će kasnije eksperimentalno istraživanje pokazati da promenljive nisu adekvatne za opisivanje datog problema istraživanja; broj promenljivih definisan je kao n ;

- definisati skup dimenzija za svaku promenljivu (zavisne i nezavisne) koji se javlja u posmatranom problemu istraživanja;
- broj bezdimenzionalnih grupa je jednak razlici između broja promenljivih i broja dimenzija datog problema istraživanja ($n - z$);
- izabrati ponavljajuće promenljive čiji je broj jednak broju dimenzija – ako su dimenzije promenljivih koje se ponavljaju manje od broja nepoznatih, sistem jednačina neće imati jedinstveno rešenje. Da bi se ovo sprečilo i sistem jednačina imao jedinstveno rešenje, kombinacije promenljivih moraju imati uključene sve dimenzije posmatranog problema istraživanja;
- formirati π grupe; grupa bez dimenzija se formira množenjem jedne promenljive koja se ne ponavlja sa skupom promenljivih koje se ponavljaju;
- sistem jednačina se definiše primenom uslova dimenzionalne homogenosti; rešiti sistem jednačina i zameniti rezultate u π grupama;
- proveriti da li su dobijene π grupe bezdimenzionalne; ovaj korak je neophodan pre nego što se nastavi sa eksperimentom koji će dodatno potvrditi funkcionalnost odnosa π grupa za posmatrani problem.

5.2 3 Ipsen-ova metoda

Ipsen-ova metoda dimenzionalne analize poznata je i kao metoda korak po korak. Predložio ju je *David Ipsen* 1960. godine kao jednostavnu metodu sa ciljem eliminacije dimenzija primenom jednostavnih algebarskih operacija [122]. Suštinski predstavlja strukturirani pristup za implementaciju *Buckingham*-ove π metode. Ova metoda se realizuje u dve osnovne etape [115]:

1. definisanje svih promenljivih koje utiču na posmatranu fizičku veličinu i postavljanje dimenzija za svaku promenljivu; promenljive bi trebalo da budu međusobno nezavisne;
2. eliminisanje dimenzija svih promenljivih.

Jedna dimenzija se eliminiše u svakom koraku smanjujući broj promenljivih za jedan. U nekim posebnim slučajevima, dve dimenzije se mogu istovremeno eliminisati. Eliminacija se vrši jednostavnim algebarskim operacijama. Međutim, kada se jedna dimenzija eliminiše iz zavisne promenljive, uzimaju se u obzir samo nezavisne promenljive sa istom dimenzijom,

dok dimenzije ostalih ostaju nepromenjene. Kada se neka dimenzija eliminiše iz zavisne promenljive, treba identifikovati nezavisnu promenljivu koja sadrži istu tu dimenziju. Potrebno je izabrati jednu od nezavisnih promenljivih, nazvanu „referentnom” promenljivom, i pomnožiti sopstvenim dimenzijama tako da rezultat bude bezdimenzionalan. Redosled po kojem će se dimenzije zavisnih promenljivih eliminisati može uticati na konačni oblik π grupa [115].

5.2.4 Matrična metoda

Matrična metoda dimenzionalne analize predstavlja sistematski algebarski pristup koji se koristi za izvođenje bezdimenzionalnih grupa sagledavajući skup promenljivih, odnosno fizičkih veličina koje figurišu u posmatranom problemu istraživanja. Začetnikom ove metode smatra se *Van Driest*, koji je 1946. godine definisao sledeće pravilo: broj bezdimenzionalnih proizvoda u jednačini se dobija kada se od ukupnog broja promenljivih oduzme maksimalni broj ovih promenljivih koje neće formirati bezdimenzionalnu grupu (bezdimenzionalni proizvod, π grupa) [123]. Maksimalan broj promenljivih koje neće formirati bezdimenzionalnu grupu odgovara onima koje su međusobno nezavisne [115]. Promenljive sa pripadajućim dimenzijama mogu biti raspoređene u obliku matrice, koja se zove dimenzionalna matrica. Korišćenjem matrične algebre i Gausove eliminacije za određivanje ranga dimenzionalne matrice može se identifikovati broj nezavisnih bezdimenzionalnih grupa koje figurišu u posmatranom sistemu/procesu.

Matrica je niz brojeva poređanih u m redova i n kolona. Matrica $m \times n$ sa elementima a_{ij} može se prikazati na sledeći način:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (5.23)$$

Dimenzionalna matrica proizilazi iz uslova dimenzionalne homogenosti, uzimajući u obzir sve promenljive. Može se predstaviti u obliku sistema jednačina sa sledećom strukturom [115]:

$$\begin{aligned} a_{11}z_1 + a_{12}z_2 + \cdots a_{1n}z_n &= b_1 \\ a_{21}z_1 + a_{22}z_2 + \cdots a_{2n}z_n &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}z_1 + a_{m2}z_2 + \cdots a_{mn}z_n &= b_n \end{aligned} \quad (5.24)$$

U matričnom obliku se može predstaviti kao:

$$D \cdot Z = B \quad (5.25)$$

gde su: D – bezdimenzionalna matrica, Z – vektor nepoznatih, B – vektor konstanti. Razvijeni oblik bezdimenzionalne matrice, vektora nepoznatih i vektora konstanti može se predstaviti na sledeći način:

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

Konstante su jednake nuli kada je sistem dimenzionalno homogen. Homogen sistem jednačina se može predstaviti kao:

$$D \cdot Z = 0 \quad (5.29)$$

Važno je primetiti da kolone odgovaraju promenljivama, a redovi osnovnim dimenzijama. Svaki element dimenzionalne matrice a_{ij} je broj koji predstavlja eksponent svake dimenzije za odgovarajuću promenljivu [115], [124]:

$$\begin{array}{ccccc} & Q_1 & Q_2 & \cdots & Q_n \\ D_1 & a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ D_2 & a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_m & a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{array} \quad (5.30)$$

U opštem slučaju, broj nepoznatih može biti veći od broja jednačina. Na primer, uz pretpostavku da su definisane tri jednačine i pet nepoznatih, sistem jednačina bi bio predstavljen kao:

$$\begin{aligned} a_{11}z_1 + a_{12}z_2 + a_{13}z_3 + a_{14}z_4 + a_{15}z_5 &= b_1 \\ a_{21}z_1 + a_{22}z_2 + a_{23}z_3 + a_{24}z_4 + a_{25}z_5 &= b_2 \\ a_{31}z_1 + a_{32}z_2 + a_{33}z_3 + a_{34}z_4 + a_{35}z_5 &= b_3 \end{aligned} \quad (5.31)$$

U ovom slučaju, da bi se dobilo određeno rešenje, vrednosti dveju nepoznatih trebalo bi da budu konstantne. Ovaj uslov definiše se dodavanjem dveju jednačina potrebnih za formiranje kvadratne matrice. U tom slučaju sistem jednačina ima sledeći oblik [115]:

$$\begin{aligned} z_1 + 0 + 0 + 0 + 0 &= z_1 \\ 0 + z_2 + 0 + 0 + 0 &= z_2 \\ a_{11}z_1 + a_{12}z_2 + a_{13}z_3 + a_{14}z_4 + a_{15}z_5 &= b_1 \\ a_{21}z_1 + a_{22}z_2 + a_{23}z_3 + a_{24}z_4 + a_{25}z_5 &= b_2 \\ a_{31}z_1 + a_{32}z_2 + a_{33}z_3 + a_{34}z_4 + a_{35}z_5 &= b_3 \end{aligned} \quad (5.32)$$

U matičnom obliku prethodni sistem jednačina sa dodatnim jednačinama može se predstaviti i na sledeći način [115]:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

Rešavanje prethodnog sistema jednačina podrazumeva dobijanje inverzne vrednosti proširene matrice koja ima sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

Rešenje ovog sistema jednačina dobija se kada su elementi vektora konstanti jednaki nuli. Ovaj uslov definiše dimenzionalnu homogenost koja je neophodan uslov u primeni dimenzionalne analize. U ovom slučaju može se uočiti da je reč o proširenoj matrici koja uključuje dve matrice: matricu identiteta (I) i nula matricu (0) [115].

Pored ovog načina, rešenje se može dobiti i uključivanjem dveju dimenzionalnih matrica S i R , gde je S kvadratna matrica koja uzima elemente desne strane dimenzionalne matrice, a R je matrica koja uzima preostale elemente. Veličina kvadratne matrice je ista kao i rang dimenzionalne matrice [125]. Obe matrice su prikazane u sledećem obliku:

$$S = \begin{bmatrix} a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{24} & a_{25} \\ a_{33} & a_{34} & a_{35} \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

$$R = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

Zamenom vrednosti, sistem se svodi na sledeći oblik [115]:

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ R & S \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

Rešenje se može predstaviti kao:

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -S^{-1}R & S^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

Matrica do znaka jednakosti naziva se totalna matrica [115], [126]. Broj bezdimenzionalnih grupa odgovara broju kolona matrice identiteta.

Rešavanjem sistema (5.38) dobija se da dve kolone matrice identiteta odgovaraju dvema bezdimenzionalnim grupama [115]:

$$\begin{array}{ccccc}
 & \pi_1 & \pi_2 & & \\
 Q_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 Q_2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 Q_3 & z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} \\
 Q_4 & z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{24} \\
 Q_5 & z_{31} & z_{32} & z_{33} & z_{34}
 \end{array} \quad (5.39)$$

U ovom primeru, vrednosti z_{ij} predstavljaju rezultate matričnih operacija koje uključuju inverznu matricu R . Eksponenti promenljivih za svaku bezdimenzionalnu grupu uzimaju se iz svake kolone ispod matrice identiteta, čiji je oblik predstavljen sledećim izrazima:

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= (Q_1^1 Q_2^0 Q_3^{z_{11}} Q_4^{z_{21}} Q_5^{z_{31}}) \\
 \pi_2 &= (Q_1^0 Q_2^1 Q_3^{z_{12}} Q_4^{z_{22}} Q_5^{z_{32}})
 \end{aligned} \quad (5.40)$$

Uzimajući u obzir da matrica $-S^{-1}R$ uključuje konačnu vrednost eksponenata u bezdimenzionalnoj matrici, prisustvo svih nula u bilo kojoj koloni njenog transponovanja bio bi pokazatelj da je promenljiva irelevantna. Matrica $-S^{-1}R$, kao i njena transponovana matrica, prikazane su u nastavku:

$$-S^{-1}R = \begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \\ z_{31} & z_{32} \end{vmatrix} \quad (5.41)$$

$$(-S^{-1}R)^T = \begin{vmatrix} z_{11} & z_{21} & z_{31} \\ z_{12} & z_{22} & z_{32} \end{vmatrix} \quad (5.42)$$

5.2.5 Metoda inspekcije

Metoda inspekcije je jednostavna metoda dimenzionalne analize i primenjuje se kada je broj bezdimenzionalnih veličina mali, naročito kada se koriste samo dve π grupe. Zasniva se na primeni tri principa [115], [127]:

1. broj bezdimenzionalnih grupa poznat je iz π teoreme;
2. jedna bezdimenzionalna grupa sadrži zavisnu promenljivu;
3. bezdimenzionalne grupe su nezavisne.

Metoda nastoji da jednu promenljivu učini bezdimenzionalnom koristeći dimenzije ostalih promenljivih. Kada je formirana prva bezdimenzionalna grupa, kreira se druga sa promenljivama koje nisu korišćene u prethodnom koraku primene ove metode dimenzionalne analize [115].

5.3 Prednosti i nedostaci dimenzionalne analize

Zahvaljujući brojnim prednostima koje pruža, dimenzionalna analiza ima široku primenu u različitim naučnim i inženjerskim oblastima. Njene prednosti su [111], [115], [128]:

- Smanjenjem broja promenljivih smanjuje složenost istraživnog problema, što rezultuje manjim brojem potrebnih eksperimentalnih ogleda, a samim tim i manjim troškovima izvođenja eksperimenta;
- Brz način da se definišu relacije između posmatranih fizičkih veličina i obezbedi dimenzionalna konzistentnost;
- Bezdimenzionalna jednačina može se primeniti u širem opsegu fizičkih uslova;
- Izvođenje fizičkih zakona – u mnogim slučajevima konačni rezultat je poznata jednačina koja opisuje prirodni fenomen, izvedena u nekoliko jednostavnih koraka;
- Mnogi složeni problemi istraživanja koji se ne mogu rešiti analitičkim ili numeričkim metodama, naročito za koje fizički zakoni koji opisuju pojave i fenomene nisu dovoljno poznati, mogu se proučavati primenom dimenzionalne analize.

Nedostaci dimenzionalne analize su [115], [129], [130]:

- Zahteva dobro poznavanje problema istraživanja kako bi se sagledao potpun skup relevantnih nezavisnih promenljivih. U suprotnom, primena dimenzionalne analize dovodi do neadekvatnih modela i pogrešnih zaključaka;
- Definiše opšti oblik modela u funkciji bezdimenzionalnih grupa, ali ne i vrednosti dimenzionalnih konstantni, potrebnih da bi se definisao konačan model, za čije određivanje je neophodna realizacija eksperimenta. Sam eksperiment je često jedina provera dobrog izbora promenljivih koje figurišu u posmatranom problemu istraživanja;
- U slučaju složenih procesa/sistema, koji su difuzni, a karakterišu se i postojanjem brojnih interakcija među parametrima, dimenzionalna analiza ima ograničenu primenu.

6. MODELIRANJE OTPORA REZANJA PRIMENOM DIMENZIONALNE ANALIZE

Dimenzionalna analiza ima brojne prednosti u odnosu na druge empirijske metode modeliranja, uključuje različite metode primene i može se iskoristiti za definisanje empirijskih modela za predikciju komponenata otpora rezanja kod obrade struganjem, i to: glavnog otpora rezanja – F_c , otpora rezanja u aksijalnom pravcu (otpore pomoćnog kretanja) – F_f i otpora rezanja u radijalnom pravcu (otpore prodiranja) – F_p .

Modeliranje komponenata otpora rezanja pri obradi struganjem, korišćenjem dimenzionalne analize, omogućava kreiranje modela na osnovu fizičkih odnosa faktora procesa obrade rezanjem, faktora reznog alata i mehaničkih karakteristika materijala predmeta obrade i uključuje uspostavljanje njihovih međusobnih veza. Pored osnovnih faktora koji definišu režim obrade, kao što su brzina rezanja (v), korak (f) i dubina rezanja (a_p), istraživanje uključuje razmatranje faktora koji se odnose na geometriju reznog alata, glavni napadni ugao (κ) i grudni ugao (γ_o), kao i zateznu čvrstoću (R_m) materijala predmeta obrade.

Izbor ovih promenljivih je opravdan imajući u vidu da korak i dubina rezanja definišu debljinu i širinu reznog sloja, odnosno površinu poprečnog preseka reznog sloja, direktno utičući i na količinu uklonjenog materijala u jedinici vremena. Sa druge strane, geometrija reznog sloja, dužina rezne ivice alata u kontaktu sa materijalom predmeta obrade, opterećenje reznog alata, intenzitet svih komponenti otpora rezanja i pravac rezultujućeg otpora rezanja i lomljenje strugotine su u velikoj meri određeni izborom glavnog napadnog ugla [9], [131].

Brzina rezanja i brzina pomoćnog kretanja su u direktnoj i indirektnoj vezi sa generisanom toplotom u zoni rezanja koja potiče od intenzivne plastične deformacije u ravni smicanja i trenja na površinama kontakta između grudne površine alata i strugotine i ledne površine alata i obratka [8]. Iste utiču na otpore rezanja putem termičkog omekšavanja materijala obratka i povećanja površine poprečnog preseka reznog sloja. Grudni ugao reznog alata utiče na sve komponente otpora rezanja, obrazovanje strugotine, oblik strugotine, lomljenje strugotine, kao i na faktor sabijanja strugotine i ugao smicanja [7], [14], [42]. Isti predstavlja važan faktor koji određuje pravac rezultujućeg otpora rezanja i odnose komponenti otpora rezanja, ali i pravac odvođenja strugotine [39]. Mehanička svojstva materijala predmeta obrade imaju veliki uticaj na mehaniku rezanja. Zatezna čvrstoća i tvrdoća su uobičajena svojstva materijala koja se navode pri razmatranju obradljivosti materijala, a koja utiču na otpore rezanja. Naravno, postoji i niz drugih svojstava materijala,

kao što su mikrostruktura, veličina i oblik kristalnih zrna, vrsta i količina prisutnih nečistoća, deformabilnost, napon tečenja, koja u manjoj ili većoj meri mogu uticati na otpore rezanja [7]. Uključivanjem svih prethodno navedenih ulaznih veličina, koje u odražavaju fizičke pojave kod obrade struganjem, cilj je bio definisanje osnovnih bezdimenzionalnih veličina, odnosno grupa na osnovu kojih bi se definisali empirijski modeli za predikciju otpora rezanja. Na taj način stvorili bi se uslovi za adekvatnu predikciju otpora rezanja kod struganja materijala različitih mehaničkih karakteristika, primenom reznih alata različite geometrije i za širok spektar režima obrade. Štaviše, identifikacijom bezdimenzionalnih grupa biće omogućen bolji uvid u potrebu za istovremeno sagledavanje i balansiranje faktora obrade, a sve u cilju boljeg planiranja tehnološkog postupka i optimizacije procesa obrade.

Metode dimenzionalne analize koje su korišćene za kreiranje predikcionih modela otpora rezanja kod obrade struganjem su *Buckingham*-ova π metoda i matrična metoda. Za razliku od *Rayleigh*-eve metode i metode inspekcije, koje se koriste za jednostavnije probleme, naročito metode inspekcije koja se koristi za formiranje najviše do dve bezdimenzionalne grupe, *Buckingham*-ovom π metodom i matričnom metodom dimenzionalne analize na jednostavan način, primenom matematičkih operacija i pravilnim izborom uključenih parametara može se doći do prethodno zadatog cilja, tj. kreiranja modela za predikciju otpora rezanja kod obrade struganjem. *Buckingham*-ova π metoda je metoda koja se najčešće koristi u oblasti inženjerstva, dok se matrična metoda koristi za probleme kod kojih se razmatra veći broj promenljivih. Kod primene obe ove metode dimenzionalne analize najpre je potrebno identifikovati sve parametre, za koje se pretpostavlja da su od značaja i odrediti njihove dimenzije na osnovu osnovnih fizičkih veličina SI sistema jedinica. Kod dimenzionalne analize, neophodno je uzeti u obzir dimenzije svih uključenih parametara (fizičkih veličina), jer je uslov dimenzionalne homogenosti jedan od ključnih uslova za njenu validnu primenu.

Uključeni parametri, kao i komponente otpora rezanja, sa jedinicama i pripadajućim dimenzijama izraženim preko osnovnih dimenzija (M (masa), L (dužina) i T (vreme)), su prikazani u tabeli 6.1. U kontekstu dimenzionalne analize, glavni napadni ugao alata i grudni ugao alata su bezdimenzionalne veličine. S obzirom na to da svi modeli komponenata otpora rezanja imaju isti opšti oblik, za primenu dimenzionalne analize korišćenjem *Buckingham*-ove π metode i matrične metode korišćena je opšta oznaka F za sve komponente otpora rezanja.

Tabela 6.1 Promenljive sa pripadajućim oznakama, jedinicama i dimenzijama

Promenljive	Oznaka	Jedinica	Dimenzija
Komponente otpora rezanja	$F (F_c, F_f, F_p)$	N	MLT^{-2}
Brzina rezanja	v	m/min	LT^{-1}
Brzina pomoćnog kretanja	v_f	mm/min	LT^{-1}
Korak	f	mm/o	L
Dubina rezanja	a_p	mm	L
Zatezna čvrstoća materijala obratka	R_m	N/mm ²	$ML^{-1}T^{-2}$
Glavni napadni ugao alata	κ	°	-
Grudni ugao alata	γ_o	°	-

6.1 Modeliranje otpora rezanja primenom *Buckingham*-ove π metode

Buckingham-ova π metoda dimenzionalne analize koristi se za formiranje bezdimenzionalnih veličina (π grupa). U okviru realizovanog istraživanja u cilju kreiranja modela za predikciju otpora rezanja kod obrade struganjem ukupan broj uključenih promenljivih je osam ($F, v, v_f, f, a_p, R_m, \kappa, \gamma_o$). Broj ponavljajućih promenljivih određen je na osnovu broja dimenzija fizičkih veličina (promenljivih) koje su prethodno uzete u obzir. Prema tome, kao ponavljajuće promenljive uzete su sledeće veličine: zatezna čvrstoća materijala obratka – R_m , brzina pomoćnog kretanja – v_f , korak – f i grudni ugao alata – γ_o . Broj π grupa jednak je njihovoj razlici tako da u ovom slučaju postoje četiri π grupe za modeliranje otpora rezanja [107].

Funkcija svih uključenih promenljivih može se prikazati na sledeći način:

$$f_1 = (F, R_m, v, v_f, f, a_p, \kappa, \gamma_o) \quad (6.1)$$

Način na koji otpor rezanja zavisi od uključenih promenljivih može se izraziti kao:

$$F = f_1(R_m, v, v_f, f, a_p, \kappa, \gamma_o) \quad (6.2)$$

Prva π grupa sadrži komponentu otpora rezanja i ponavljajuće promenljive u svim ostalim π grupama i predstavljena je sledećim izrazom:

$$\pi_1 = F \cdot R_m^a \cdot v_f^b \cdot f^c \cdot \gamma_o^d \quad (6.3)$$

Zamenom dimenzija na osnovu tabele dobija se izraz:

$$\pi_1 = (MLT^{-2}) \cdot (ML^{-1}T^{-2})^a \cdot (LT^{-1})^b \cdot (L)^c \quad (6.4)$$

Za određivanje vrednosti nepoznatih eksponenata a, b i c , vrši se analiza po svim dimenzijama:

$$\begin{aligned}
M: 1 + a &= 0 \\
L: 1 - a + b + c &= 0 \\
T: -2 - 2 \cdot a - b &= 0
\end{aligned} \tag{6.5}$$

Rešavanjem sistema od tri jednačine sa tri nepoznate dobijaju se vrednosti nepoznatih eksponenata a , b i c .

$$\begin{aligned}
a &= -1 \\
b &= 0 \\
c &= -2
\end{aligned} \tag{6.6}$$

Na osnovu dobijenih rezultata, bezdimenzionalna grupa π_1 se može predstaviti sledećim izrazom:

$$\pi_1 = F \cdot R_m^{-1} \cdot f^{-2} = \frac{F}{R_m \cdot f^2} \tag{6.7}$$

Bezdimenzionalna grupa π_1 se može shvatiti kao normalizovani otpor rezanja. S obzirom da povezuje opterećenje reznog alata sa svojstvima materijala obratka i uslovima obrade, može predstavljati i indikator obradljivosti materijala.

Na identičan način se izvode i ostale bezdimenzionalne π grupe. Pri tom, za izvođenje bezdimenzionalne π_2 grupe, umesto otpora rezanja (F), posmatra se sledeća promenljiva, a to je brzina rezanja (v). Za izvođenje bezdimenzionalnih grupa π_3 i π_4 uzimaju se u obzir dubina rezanja (a_p) i glavni napadni ugao alata (κ), respektivno.

Bezdimenzionalna grupa π_2 i određivanje vrednosti nepoznatih eksponenata se mogu prikazati na sledeći način:

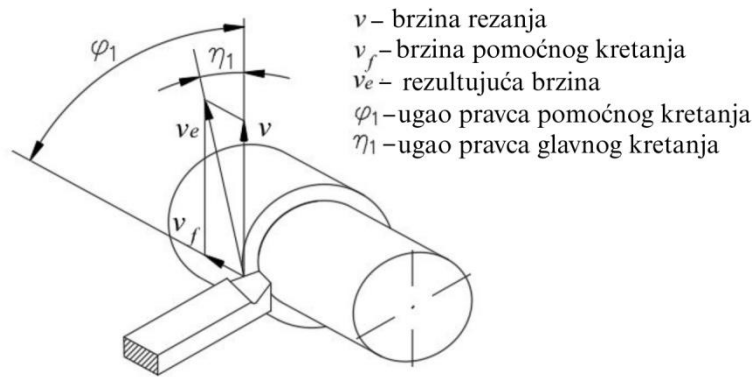
$$\begin{aligned}
\pi_2 &= v \cdot R_m^a \cdot v_f^b \cdot f^c \cdot \gamma_o^d \\
\pi_2 &= (LT^{-1}) \cdot (ML^{-1}T^{-2})^a \cdot (LT^{-1})^b \cdot (L)^c \\
M: a &= 0 \\
L: 1 - a + b + c &= 0 \\
T: -1 - 2 \cdot a - b &= 0 \\
a &= 0 \\
b &= -1 \\
c &= 0
\end{aligned} \tag{6.8}$$

Zamenom dobijenih vrednosti eksponenata iz prethodnih izraza, bezdimenzionalna grupa π_2 se može predstaviti sledećim izrazom:

$$\pi_2 = v \cdot v_f^{-1} = \frac{v}{v_f} \tag{6.9}$$

Bezdimenzionalna grupa π_2 opisuje odnos glavnog kretanja koje vrši obradak, koje određuje brzinu odvajanja sloja materijala sa obratka, i pomoćnog kretanja koje vrši alat,

kojim se određuje veličina zahvaćenog sloja materijala obratka. S obzirom da je brzina rezanja jednaka obimnoj brzini obratka, ova bezdimenzionalna grupa predstavlja odnos obimne brzine obratka (u tangencijalnom pravcu) i brzine pomoćnog kretanja (u aksijalnom pravcu) [9], [23], [55]. Ovaj odnos zapravo određuje ugao pravca rezultujuće brzine (η_1), odnosno ugao između pravca glavnog kretanja i rezultujućeg kretanja alata meren u kinematskoj ravni, slika 6.1.



Slika 6.1 Brzine glavnog i pomoćnog kretanja kod struganja [9]

Kod struganja vrednost ugla pravca rezultujućeg kretanja alata je mala iz razloga što je brzina pomoćnog kretanja znatno manja od brzine rezanja. Sa smanjenjem odnosa brzina u tangencijalnom i aksijalnom pravcu povećava se ugao između pravca glavnog i rezultujućeg kretanja, što može uticati na pravac odvođenja strugotine i promenu odnosa komponenti otpora rezanja.

Postupak izvođenja bezdimenzionalna grupe π_3 primenom *Buckingham*-ove π metode dimenzionalne analize predstavljen je sledećim izrazima:

$$\begin{aligned}
 \pi_3 &= a_p \cdot R_m^a \cdot v_f^b \cdot f^c \cdot \gamma_o^d \\
 \pi_3 &= (L) \cdot (ML^{-1}T^{-2})^a \cdot (LT^{-1})^b \cdot (L)^c \\
 M: a &= 0 \\
 L: 1 - a + b + c &= 0 \\
 T: -2 \cdot a - b &= 0 \\
 a &= 0 \\
 b &= 0 \\
 c &= -1
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

Zamenom dobijenih vrednosti eksponenata iz prethodnih izraza, bezdimenzionalna grupa π_3 se može predstaviti sledećim izrazom:

$$\pi_3 = a_p \cdot f^{-1} = \frac{a_p}{f} \quad (6.11)$$

Bezdimenzionalna grupa π_3 je dobro poznati parametar kod obrade struganjem koji se naziva vitkost strugotine. Koristi se kod planiranja tehnološkog postupka, a pokazuje međusobnu zavisnost koraka i dubine rezanja s obzirom na mogućnost dobijanja povoljne strugotine u procesu obrade. Naime, za preporučen opseg vitkosti strugotine, koji se empirijski određuje za različite materijale predmeta obrade, rezne alate i uslove obrade, vitkost strugotine se koristi za određivanje koraka s obzirom na prethodno izabranu vrednost dubine rezanja. Ova bezdimenzionalna veličina određuje oblik i veličinu poprečnog preseka reznog sloja, odnosno odnos širine i visine poprečnog preseka reznog sloja, pa direktno utiče i na oblik strugotine i opterećenje reznog alata.

S obzirom da se mogu izraziti kao odnos dužine kružnog luka i poluprečnika kružnice, parametri koji se odnose na geometriju reznog alata, odnosno glavni napadni ugao i grudni ugao alata, predstavljaju bezdimenzionalne veličine. Bezdimenzionalne veličine se dakle mogu posmatrati kao veličine sa dimenzijom jednakoj jedinici, izražene kao odnos bilo koje dve veličine identičnih dimenzija, npr. M/M , L/L , ili T/T .

Ukoliko se zvezdicom (*) označi odnos bilo koje dve veličine identičnih dimenzija, postupak izvođenja bezdimenzionalne grupe π_4 primenom *Buckingham*-ove π metode dimenzionalne analize može se predstaviti sledećim izrazima:

$$\begin{aligned} \pi_4 &= \kappa \cdot R_m^a \cdot v_f^b \cdot f^c \cdot \gamma_o^d \\ \pi_4 &= (*) \cdot (ML^{-1}T^{-2})^a \cdot (LT^{-1})^b \cdot (L)^c \cdot (*)^d \\ M: a &= 0 \\ L: 1 - a + b + c &= 0 \\ T: -2 \cdot a - b &= 0 \\ *: 1 + d &= 0 \\ a &= 0 \\ b &= 0 \\ c &= 0 \\ d &= -1 \end{aligned} \quad (6.12)$$

Zamenom dobijene vrednosti eksponenata iz prethodnih izraza, bezdimenzionalna grupa π_4 se može predstaviti sledećim izrazom:

$$\pi_4 = \kappa \cdot \gamma_o^{-1} = \frac{\kappa}{\gamma_o} \quad (6.13)$$

Bezdimenzionalna grupa π_4 odražava uticaj orijentacije sečiva reznog alata u toku procesa obrade. Glavni napadni ugao i grudni ugao alata mogu uticati u određenoj meri na

komponente otpora rezanja, oblik preseka reznog sloja, temperaturu koja se razvija u zoni kontakta između alata i strugotine i formiranje strugotine. Rezultati prethodnih istraživanja ukazuju da je njihov optimalan odnos od velikog značaja za kontrolu otpora rezanja i temperature rezanja, uzimajući u obzir da je pravac odvođenja strugotine određen ovim uglovima [66].

Na osnovu izvedenih bezdimenzionalnih π grupa, model otpora rezanja može se izraziti u opštem obliku kao funkcija bezdimenzionalne grupe π_1 u zavisnosti od ostalih bezdimenzionalnih π grupa, odnosno:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4) \quad (6.14)$$

$$\frac{F}{R_m \cdot f^2} = f\left(\frac{v}{v_f}, \frac{a_p}{f}, \frac{\kappa}{\gamma_o}\right) \quad (6.15)$$

Prema tome, opšti model za predikciju otpora rezanja kod struganja može se predstaviti sledećim izrazom:

$$F = C \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{x_1} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{x_2} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{x_3} \quad (6.16)$$

gde C , x_1 , x_2 , i x_3 predstavljaju empirijske konstante koje je potrebno odrediti eksperimentalnim putem.

Model izveden u jednačini 6.16 važi za sve komponente otpora rezanja. Modeli komponenti otpora rezanja će se razlikovati samo po vrednostima empirijskih konstanti (C , x_1 , x_2 , i x_3).

6.2 Modeliranje otpora rezanja primenom matrične metode

Kao i kod primene *Buckingham*-ove π metode, prvi korak matrične metode dimenzionalne analize je definisanje promenljivih koje će biti uključene u proces modeliranja otpora rezanja, kao i sagledavanje osnovnih dimenzija. Kada su promenljive za kreiranje modela otpora rezanja kod struganja definisane i kada je izvršena konverzija dimenzija, sledeći korak je formiranje dimenzionalne matrice na osnovu dimenzija *MLT*:

	R_m	v_f	γ_o	F	F	v	a_p	κ
M	1	0	0	0	1	0	0	0
L	-1	1	0	1	1	1	1	0
T	-2	-1	0	0	-2	-1	0	0

(6.17)

Promenljive koje nemaju dimenziju (glavni napadni ugao i grudni ugao) biće naknadno uključene u matricu u cilju određivanja četiri bezdimenzionalne π grupe. Dimenzionalna matrica koja će se razmatrati ima sledeći oblik:

$$\begin{array}{cccccc}
& R_m & v_f & F & F & v & a_p \\
M & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
L & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
T & -2 & -1 & 0 & -2 & -1 & 0
\end{array} \quad (6.18)$$

Ponavljajuće promenljive (R_m , v_f , f , γ_o) predstavljaju matricu S , dok ostali elementi predstavljaju matricu R . Matrice S i R prikazane su na sledeći način:

$$S = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ -2 & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (6.19)$$

$$R = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ -2 & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (6.20)$$

Rešenje dobijeno primenom matrične metode dimenzionalne analize, ima opšti oblik na osnovu prethodno definisanih promenljivih:

$$D = S^{-1} \cdot R \quad (6.21)$$

Za dobijanje inverzne matrice S^{-1} neophodno je da posmatrana matrica bude kvadratnog oblika (isti broj kolona i redova). Dodavanjem bezdimenzionalnih promenljivih (glavni napadni ugao i grudni ugao alata) matrice S i R dobijaju sledeće oblike:

$$S = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ -2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (6.22)$$

$$R = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ -2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (6.23)$$

Matrica S će imati svoju inverznu matricu samo ako je njena determinanta različita od nule. Determinanta matrice S je:

$$\det S = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ -2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1 \neq 0 \quad (6.24)$$

Inverzna matrica se dobija na osnovu sledećeg matematičkog izraza:

$$S^{-1} = \frac{1}{\det} \cdot \text{adj}S \quad (6.25)$$

Inverzna matrica se određuje primenom jednostavne matrične algebre. Vrednosti elemenata inverzne matrice S^{-1} su:

$$S^{-1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & -1 & 0 \\ 3 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (6.26)$$

Na osnovu prethodnog izraza za izvođenje bezdimenzionalnih π grupa primenom

matrične metode, matrica dimenzionalne analize dobijena je množenjem inverzne matrice S^{-1} ponavljajućih promenljivih i matrice R :

$$S^{-1} \cdot R = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & -1 & 0 \\ 3 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ -2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (6.27)$$

U skladu sa dobijenim vrednostima formira se tabela 6.2 u kojoj se svi elementi dobijene matrice množe sa -1 . Vrednosti koje su raspoređene u kolonama su ponavljajuće promenljive (R_m, v_f, f, γ_o), dok su redovi preostale promenljive (F, v, a_p, κ) iz matrice R .

Tabela 6.2 Matrica bezdimenzionalnih π grupa

π grupe	π_1	π_2	π_3	π_4
Promenljive	F	v	a_p	κ
R_m	-1	0	0	0
v_f	0	-1	0	0
f	-2	0	-1	0
γ_o	0	0	0	-1

Polazeći od formirane tabele 6.2, izvode se bezdimenzionalne π grupe. Dobijene su četiri bezdimenzionalne π grupe koje su predstavljene sledećim izrazima:

$$\pi_1 = F \cdot R_m^{-1} \cdot f^{-2} = \frac{F}{R_m \cdot f^2} \quad (6.28)$$

$$\pi_2 = v \cdot v_f^{-1} = \frac{v}{v_f} \quad (6.29)$$

$$\pi_3 = a_p \cdot f^{-1} = \frac{a_p}{f} \quad (6.30)$$

$$\pi_4 = \kappa \cdot \gamma_o^{-1} = \frac{\kappa}{\gamma_o} \quad (6.31)$$

Na osnovu dobijenih bezdimenzionalnih π grupa, kao kod *Buckingham*-ove π metode dimenzionalne analize, π_1 grupa u koju je uključen otpor rezanja predstavlja funkciju zavisnosti od ostalih bezdimenzionalnih π grupa:

$$F = C \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{x_1} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{x_2} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{x_3} \quad (6.32)$$

Model izveden u jednačini 6.32 odgovara modelu koji je izveden primenom *Buckingham*-ove π metode (jednačina 6.16) i važi za sve komponente otpora rezanja.

Realizacija eksperimenta u kojem će biti izvršeno merenje otpora rezanja je jedini način za određivanje empirijskih konstanti (C, x_1, x_2 i x_3) i potvrdu adekvatnosti predloženih modela za predikciju otpora rezanja primenom dimenzionalne analize.

7. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA OTPORA REZANJA

7.1 Teorija planiranja eksperimenta

Planiranje eksperimenata se sve do dvadesetih godina prošlog veka zasnivalo na iskustvu, poznavanju procesa i znanju istraživača, uz primenu jednostavnih eksperimentalnih metoda. Razvoj eksperimentalnih tehnika i metoda za analizu i interpretaciju rezultata eksperimentalnih istraživanja, ali i potreba za smanjenjem vremena i troškova realizacije eksperimentalnih istraživanja doveli su pojave, a kasnije i razvoja teorije planiranja eksperimenta. Osnove savremene teorije planiranja eksperimenta postavili su *Box* i *Wilson* [132], [133] koji su definisali osnovne principe višefaktornog eksperimenta koji objedinjuje determinističke i statističke metode [56], [134]. Njihov rad je revolucionisao način na koji se eksperimenti planiraju i način na koji je vrši analiza eksperimentalnih rezultata, omogućavajući efikasniju analizu, modeliranje i optimizaciju procesa/sistema u različitim naučnim, inženjerskim i drugim oblastima.

Postupak planiranja eksperimentalnog istraživanja se izvodi prema utvrđenoj proceduri koja se sastoji iz više aktivnosti [56], [134]: definisanje problema, izbor ulaznih i izlaznih promenljivih, izbor eksperimentalnog plana, realizacija eksperimentalnog istraživanja i analiza i interpretacija dobijenih rezultata. Kako bi se obezbedili validni i pouzdani rezultati prilikom realizacije eksperimenta neophodno je voditi računa o primeni osnovnih principa teorije planiranja eksperimenta (randomizacija, repliciranje, blokiranje) uz obezbeđenje konzistentnih uslova realizacije svih eksperimentalnih ogleda u okviru planiranog eksperimenta i pravilnog podešavanja i primene korišćenih mernih sistema [135], [136].

Glavna prednost teorije planiranja eksperimenta je minimiziranje broja eksperimentalnih ogleda bez smanjenja kvaliteta dobijenih informacija [56]. Štaviše, primena teorije planiranja eksperimenta obezbeđuje strukturiran i efikasan pristup istraživanju i analizi glavnih uticaja parametara, ali i otkrivanju uticaja interakcija drugog i višeg reda, što omogućava kreiranje tačnijih modela, ali i optimizaciju procesa/sistema kroz identifikaciju kombinacije vrednosti ulaznih promenljivih kojom se postiže ciljna vrednost performanse [135], [137].

Za potrebe planiranja, realizacije i analize, a u skladu sa postavljenim ciljevima i ograničenjima, brojem i vrstom promenljivih koje će se analizirati u eksperimentu, kao i složenošću problema koji se razmatra, u teoriji planiranja eksperimenta se primenjuju

različite eksperimentalne plan matrice. Potpuni faktorni planovi, parcijalni (delimični) faktorni planovi, centralni kompozicioni planovi, *Box-Behnken*-ovi planovi, Tagučijevi ortogonalni nizovi i dr., su primeri često korišćenih eksperimentalnih planova u inženjerstvu. Svaki od ovih eksperimentalnih planova ima svoje prednosti, nedostatke, kao i specifičnost primene, što omogućava istraživačima da izbor odgovarajućeg eksperimentalnog plana prilagode u zavisnosti od konkretnog slučaja.

U inženjerstvu, Tagučijevi eksperimentalni planovi (ortogonalni nizovi) imaju široku primenu iz razloga što pružaju isplativ i efikasan način, u smislu troškova, vremena, potrebnog materijala i angažovanja, za istraživanje uticaja većeg broj kvalitativnih i kvantitativnih parametara realizacijom malog broja eksperimentalnih ogleda. Tagučijevi eksperimentalni planovi su planovi male rezolucije pa su naročito pogodni u situacijama kada se pretpostavlja da uticaj interakcija parametara nije izražen, već su glavni uticaji parametara dominantni. Iz ovog razloga Tagučijevi eksperimentalni planovi predstavljaju adekvatan izbor za kreiranje eksperimentalne plan matrice, a u cilju određivanja empirijskih konstanti i eksponenata predloženih predikcionih modela otpora struganja izvedenih primenom dimenzionalne analize.

7.2 Tagučijeva metoda planiranja eksperimenta

Tagučijeva metoda planiranja eksperimenta zasnovana je na primeni eksperimentalnih planova koje je razvio *Genichi Taguchi* i predstavlja metodu za unapređenje kvaliteta proizvoda i procesa [138]. Predstavlja jednostavan i efikasan način planiranja eksperimenta, koji se zasniva na primeni parcijalnih faktornih planova koji pokrivaju celokupan eksperimentalni prostor sa minimalnim brojem eksperimentalnih ogleda, naročito u poređenju sa potpunim faktornim planovima [61]. U slučaju primene potpunog faktornog plana sa više parametara i nivoa variranja, potreban broj ogleda može se izračunati primenom sledeće jednačine [139]:

$$N = L^k \quad (7.1)$$

gde su: N – ukupan broj ogleda, L – broj nivoa variranja i k – broj faktora.

Na primer, za realizaciju eksperimenta gde su uključena 4 faktora sa 3 nivoa variranja, primena potpunog faktornog plana bi zahtevala realizaciju $3^4=81$ ogleda, dok bi primena standardnog ortogonalnog niza L_9 (3^4) zahtevala realizaciju samo 9 ogleda, što značajno smanjuje potrebno vreme za realizaciju eksperimenta, ali i sve potrebne materijalne resurse.

Tagučijevi ortogonalni nizovi su posebno konstruisane matrice koje omogućavaju

istovremeno istraživanje glavnih uticaja parametara realizacijom manjeg broja ogleda. Svaka kolona u ortogonalnom nizu odnosi se na jedan parametar i nivoe variranja, dok svaki red u ortogonalnom nizu predstavlja jedan ogled koji uključuje određenu kombinaciju nivoa parametara. Za konkretnu primenu na raspolaganju je veći broj ortogonalnih nizova, koji se razlikuju s obzirom na broj parametara, broj nivoa variranja i ukupan broj ogleda u eksperimentu. Razlikuju se ortogonalni nizovi namenjeni realizaciji eksperimenata koji uključuju parametre (bilo kvantitativne ili kvalitativne) koji se variraju na 2 nivoa (npr. $L_8(2^7)$), 3 nivoa (npr. $L_9(3^4)$) i ortogonalni nizovi koji su pogodni za uključivanje parametara sa različitim brojem nivoa (npr. $L_{18}(2^13^7)$) [61], [134]. Izbor odgovarajućeg ortogonalnog niza (matrice), na osnovu koga će se realizovati eksperimentalno istraživanje, zavisi od broja parametara koji se razmatraju, broja nivoa variranja, potrebne rezolucije eksperimenta i mogućih dvofaktorskih interakcija koje je neophodno uzeti u obzir [61]. U nekim slučajevima, kao što su potreba za sagledavanjem većeg broja parametara, analiza uticaja interakcija, uključivanje parametara sa različitim brojem nivoa variranja i neophodnost sagledavanja tehno-tehnoloških ograničenja pri realizaciji eksperimenta, potrebno je izvršiti modifikaciju standardnih ortogonalnih nizova. U tu svrhu koriste se metode kao što su: metoda fiktivnog nivoa, metoda kombinovanog faktora, metoda spajanja kolona, itd. [139].

Veliki doprinos razvoju ortogonalnih nizova dali su *Bolboacă* i *Jäntschi* [140]. Njihova istraživanja omogućila su izvođenje Tagučijevih ortogonalnih nizova male rezolucije za istraživanje uticaja većeg broja parametara (kvantitativnih ili kvalitativnih) koji se variraju na različitom broju nivoa koristeći manji broj eksperimentalnih ogleda [140], [141]. Primena ovih ortogonalnih nizova obezbeđuje efikasnu i fleksibilnu realizaciju eksperimenata korisnih u inženjerskoj praksi.

7.3 Opis obradnog sistema

Istraživanje u okviru doktorske disertacije usmereno je na analizu mogućnosti integracije dimenzionalne analize i eksperimentalnih planova male rezolucije s ciljem definisanja adaptibilnih empirijskih modela otpora rezanja kod suvog spoljašnjeg uzdužnog struganja čelika različitog kvaliteta iz različitih grupa obradljivosti. Za određivanje empirijskih konstanti i eksponenata empirijskih modela otpora struganja, čija je strugotina prethodno izvedena primenom dimenzionalne analize, neophodno je bilo realizovati eksperiment. Eksperimentalna istraživanja su izvedena u laboratorijskim uslovima u Laboratoriji za mašine alatke i mašinsku obradu i Laboratoriji za mašinske materijale na

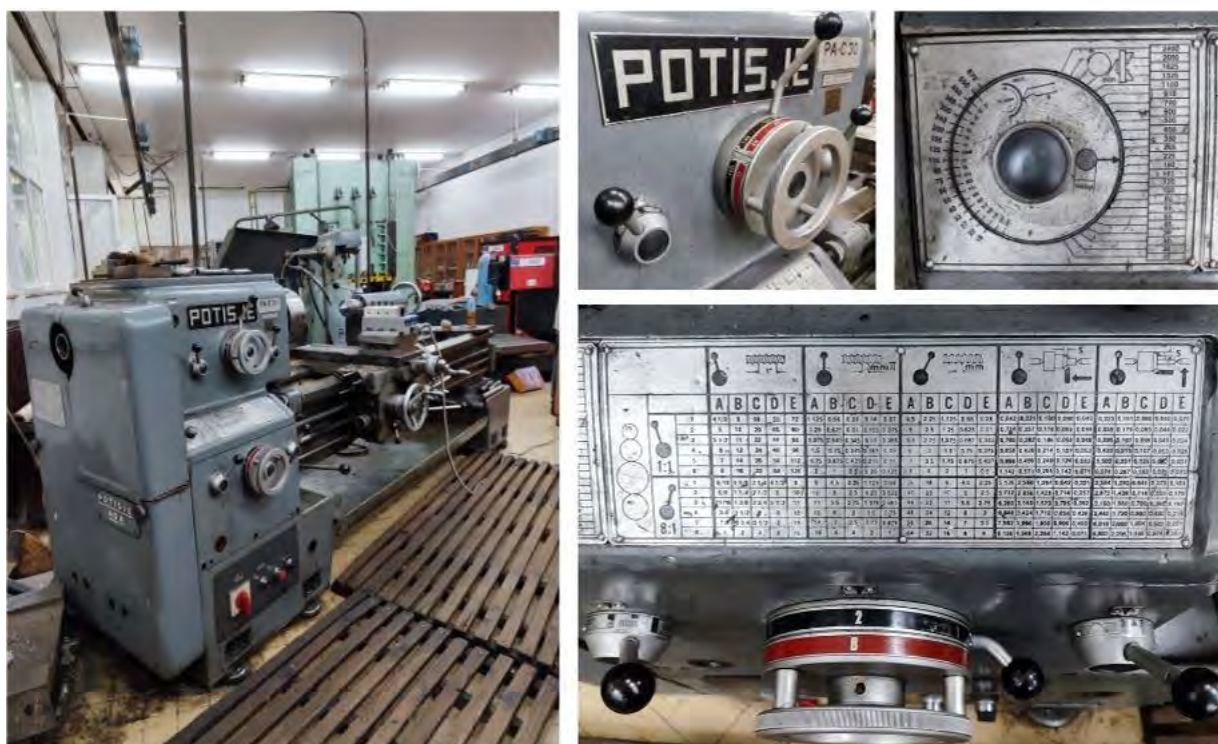
Mašinskom fakultetu u Nišu.

U ovom poglavlju detaljno su predstavljeni elementi obradnog sistema, uslovi realizacije eksperimenata i metodologija eksperimentalnog merenja otpora rezanja kod uzdužnog spoljašnjeg struganja u jednom prolazu čelika iz različitih grupa obradljivosti primenom metode direktnih merenja, kao i ispitivanja mehaničkih svojstava čelika.

7.3.1 Mašina alatka

Mašina alatka na kojoj su izvedena eksperimentalna istraživanja je univerzalni strug "Potisje ADA" PA-C 30 (slika 7.1). Tehnički podaci o strugu su sledeći:

- Snaga pogonskog elektromotora 11 kW;
- Maksimalni prečnik obrade 400 mm;
- Maksimalna dužina obratka 1500 mm;
- Opseg broja obrtaja glavnog vretena 20-2400 o/min
- Opseg koraka za uzdužnu obradu 0.04-9.136 mm/o.



Slika 7.1 Univerzalni strug "Potisje ADA" PA-C 30

7.3.2 Rezni alat

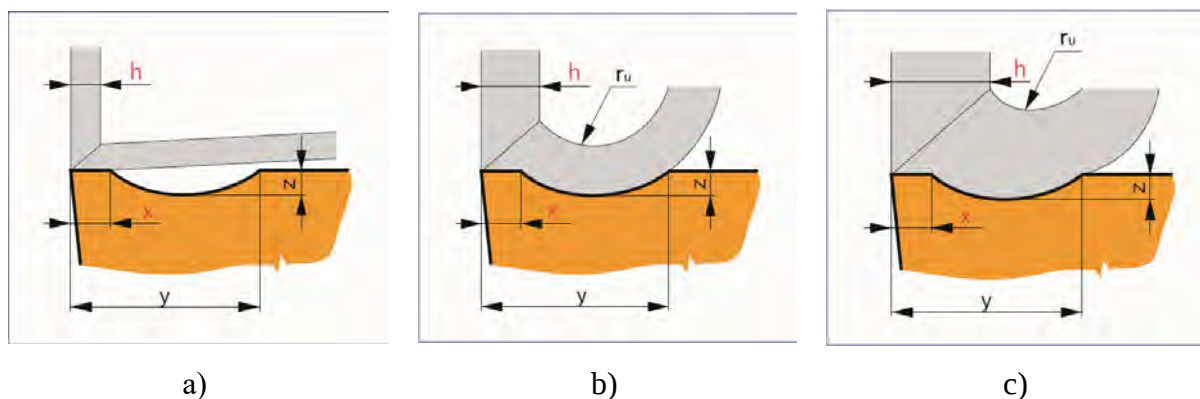
U eksperimentalnom istraživanju su korišćene izmenljive pločice kompanije Pramet. Kompanija Pramet je 1951. godine započela proizvodnju sinterovanog tvrdog metala u

pogonu u gradu Šumperk u Republici Češkoj. 1999. godine postala je deo Sandvik grupe, a 2014. godine se je spojila sa kompanijom Dormer u kompaniju Dormer Pramet.

Prilikom biranja izmenljivih pločica prvo su razmatrani elementi za lomljenje strugotine. Oblik strugotine zavisi od nekoliko faktora: svojstava komponente koja se obrađuje, čvrstoće, žilavosti i mikrostrukture materijala obratka, svojstava kvaliteta izmenljive pločice (naročito frikcionih svojstava na grudnoj površini), geometrije rezne ivice, režima i vrste elementa za lomljenje strugotine i takođe statičkih i dinamičkih svojstava mašine alatke. Praktično svi ovi faktori u procesu rezanja udruženo određuju oblik strugotine. Svaki element za lomljenje strugotine radi u definisanom opsegu koraka i dubine rezanja.

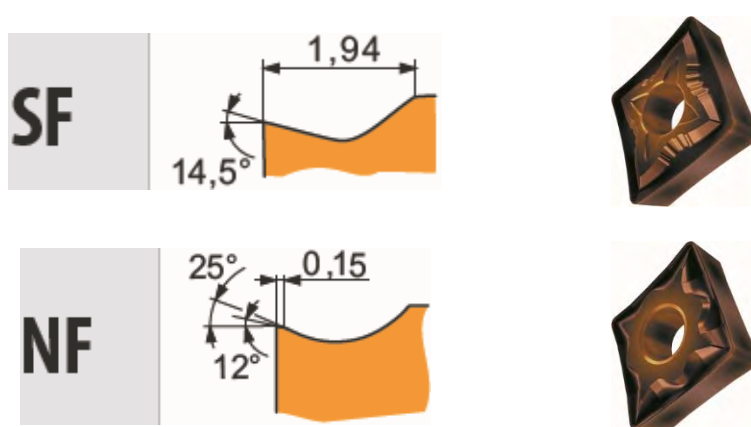
Minimalni korak pri kom element za lomljenje strugotine funkcioniše na predviđeni način zavisi od širine „ x “ i ugla ojačanja rezne ivice. Maksimalni korak zavisi od rastojanja od rezne ivice do kraja elementa za lomljenje strugotine „ y “ i dubine elementa za lomljenje strugotine „ z “.

Ako je debljina reznog sloja (h) znatno manja od širine ojačanja rezne ivice „ x “, $h \ll x$, strugotina će biti u kontaktu samo sa ojačanjem rezne ivice (slika 7.2 a). Strugotina neće moći da uđe u element za lomljenje strugotine i stoga se ne može slomiti. Ako je debljina reznog sloja „ h “ veća od širine ojačanja rezne ivice „ x “, $h > x$, strugotina ulazi u element za lomljenje strugotine i uvija se sa određenom vrednošću poluprečnika uvijanja naviše (r_u) (slika 7.2 b). Ako je debljina reznog sloja „ h “ znatno veća od širine ojačanja rezne ivice „ x “, $h \gg x$, strugotina se prekomerno deformiše (biva zgnječena) (slika 7.2 c).



Slika 7.2 Biranje elementa za lomljenje strugotine (preuzeto i prilagođeno iz [142]): a) Strugotina ne ulazi u element za lomljenje strugotine ($h \ll x$), b) Strugotina ulazi u element za lomljenje strugotine i uvija se ($h > x$), c) Strugotina se prekomerno deformiše (biva zgnječena) ($h \gg x$)

Izabrani su elementi za lomljenje strugotine SF i NF, sa grudnim uglovima od 14.5° i 25° , respektivno (slika 7.3). Element za lomljenje strugotine NF ima ojačanje rezne ivice širine 0.15 mm i ugla 12° , koje je neophodno zbog velikog grudnog ugla. SF element za lomljenje strugotine karakteriše se svestranom pozitivnom geometrijom dizajniranom za završnu obradu čelika, nerđajućih čelika, livenih gvožđa, vatrootpornih super legura, ojačanih materijala i potencijalno obojenih metala, za obradu tankozidnih struktura i kontinualne rezove. NF element za lomljenje strugotine karakteriše se visoko pozitivnom geometrijom dizajniranom za završnu i poluzavršnu obradu čelika, nerđajućih čelika i potencijalno livenih gvožđa, obojenih metala i vatrootpornih super legura, za kontinualne rezove.



Slika 7.3 Elementi za lomljenje strugotine koji su korišćeni u eksperimentalnom istraživanju
[143]

Izabran je kvalitet T8430, koji predstavlja nesumnjivo najsvestraniji materijal reznog alata kompanije Pramet. Koristan je za obradu svih vrsta materijala i praktično je primenljiv u skoro svim zahvatima struganja. Njegove glavne prednosti su visoka operativna pouzdanost (visoka otpornost na nepovoljne radne uslove) i vrlo dobra frikciona svojstva. Osnovni materijal je tvrdi metal sa ekstra finim zrnima karbida volframa (WC) ($< 1 \mu\text{m}$). Na osnovni materijal su nanese prevlake fizičkom parnom depozicijom ((*Physical Vapor Deposition* (PVD))). Pogodan je za primene pri srednjim i nižim brzinama rezanja. Kvalitet T8430 je primarno namenjen za obradu čelika i nerđajućih čelika. Odgovara opsezima ISO kvaliteta P20 – P40 i M20 – M35.

Za eksperimentalno istraživanje izabrane su negativne dvostrane izmenljive pločice sa zaobljenom reznom ivicom. Sve izabrane izmenljive pločice su primarno namenjene za poluzavršnu i završnu obradu čelika i nerđajućih čelika. Kataloške oznake i karakteristike

izabranih izmenljivih pločica date su u tabeli 7.1. Izabrane izmenljive pločice se mogu videti na slici 7.4.

Tabela 7.1 Kataloške oznake i karakteristike izmenljivih pločica koje su korišćene u okviru eksperimentalnog istraživanja

Kataloška oznaka	r_{ε} (mm)	Element za lomljenje strugotine	Oblik	l (mm)	Kvalitet
CNMG 120408E–SF:T8430	0.8	SF	C (romboidna sa uglom vrha 80°)	12	T8430
CNMG 120412E–SF:T8430	1.2				
CNMG 120408E–NF:T8430	0.8	NF			
CNMG 120412E–NF:T8430	1.2				
r_{ε} – poluprečnik zaobljenja vrha alata, l – dužina rezne ivice					



Slika 7.4 Pramet izmenljive pločice koje su korišćene u eksperimentalnom istraživanju (s leva na desno): CNMG 120408E-SF:T8430, CNMG 120412E-SF:T8430, CNMG-120408E-NF:T8430, CNMG 120412E-NF:T8430

Za izabrane izmenljive pločice proizvođač preporučuje sledeće opsege za dubinu rezanja (a_p), korak (f) i brzinu rezanja (v), za obradu čelika:

- CNMG 120408E-SF:T8430
 - a_p : 0.8 – 3.0 mm
 - f : 0.12 – 0.30 mm/o
 - v : 125 – 285 m/min
- CNMG 120412E-SF:T8430
 - a_p : 1.2 – 3.0 mm
 - f : 0.15 – 0.35 mm/o
 - v : 115 – 250 m/min
- CNMG 120408E-NF:T8430
 - a_p : 0.8 – 3.5 mm
 - f : 0.15 – 0.35 mm/o
 - v : 135 – 275 m/min

- CNMG 120412E–NF:T8430

- a_p : 1.2 – 4.0 mm
- f : 0,15 – 0,35 mm/o
- v : 145 – 280 m/min

Nakon „preklapanja“ opsega za sve četiri izabrane izmenljive pločice, dolazi se do inicijalnih opsega za dubinu rezanja, korak i brzinu rezanja za eksperimentalno istraživanje:

- a_p : 1.2 – 3.0 mm
- f : 0.15 – 0.30 mm/o
- v : 145 – 250 m/min

Kompanija Pramet predviđa tri korekciona faktora za brzinu rezanja [142]:

- korekcioni faktor za specifičnu vrstu zahvata C_{VCO} ,
- korekcioni faktor za željenu postojanost alata C_{VCT} ,
- dodatni korekcioni faktor C_{VCA} .

Korekcioni faktor za specifičnu vrstu zahvata C_{VCO} uzima u obzir vrstu zahvata (fina završna, završna, poluzavršna, gruba i teška gruba obrada), posredno preko elemenata za lomljenje strugotine, i opsega vrednosti za dubinu rezanja i korak. Za elemente za lomljenje strugotine SF i NF i inicijalne opsege za dubinu rezanja i korak za eksperimentalno istraživanje je prema preporukama iz kataloga kompanije Dormer Pramet [142] određeno da je $C_{VCO} = 0.9875$.

Prema preporukama iz kataloga kompanije Dormer Pramet [142] usvojeno je da je korekcioni faktor za željenu postojanost alata $C_{VCT} = 1.0$ što za opšte zahvate obrade (fina završna obrada do grube obrade), u koje spadaju i zahvati obrade su realizovani u eksperimentalnom istraživanju, podrazumeva postojanost alata od 15 minuta.

Dodatni korekcioni faktor C_{VCA} odnosi se na okruženje, odnosno na uslove obrade. Obzirom da je izvršena predobrada priprema, da su u okviru zahvata obrade prisutni samo kontinualni rezovi, da se može realizovati odlično stezanje obratka, da su prepusti mali, kao i da je obradak oslonjen na zadnji šiljak, može se zaključiti da su u pitanju stabilni uslovi obrade [12]. Shodno tome, prema preporukama iz kataloga kompanije Dormer Pramet [142] usvojeno je da je dodatni korekcioni faktor $C_{VCA} = 1.2$.

Dormer Pramet, kao i ostali proizvođači alata za obradu rezanjem, klasifikuje materijale obratka u šest ISO grupa. Svaka od grupa materijala se dalje deli na podgrupe na osnovu strukture i/ili sastava materijala. Konačna podela u okviru podgrupa materijala je izvršena na osnovu tvrdoće i zatezne čvrstoće materijala. Materijali su po toj konačnoj podeli

podeljeni u grupe materijala obratka (*eng. Workpiece Material Group – WMG*). Svaka grupa materijala obratka (WMG) ima pridružen koeficijent korišćenog materijala k_{vG} [142]. Materijali obratka koji su biti korišćeni u eksperimentalnom istraživanju imaju sledeće koeficijente korišćenog materijala (k_{vG}):

- Č.1502: 1.14
- Č.1531: 1.00
- Č.4382: 0.74
- Č.4732: 0.63
- Č.4830: 0.74
- Č.4850: 0.55

Prema Dormer Pramet-u [142] rezultujuća korigovana brzina rezanja v_C (m/min) može se izračunati pomoću sledećeg obrasca:

$$v_C = v \cdot k_{vG} \cdot C_{VcO} \cdot C_{VcT} \cdot C_{VcA} \quad (7.1)$$

gde su v (m/min) početna vrednost brzine rezanja iz kataloga, k_{vG} koeficijent korišćenog materijala, C_{VcO} korekcionni faktor za specifičnu vrstu zahvata, C_{VcT} korekcionni faktor za željenu postojanost alata, C_{VcA} dodatni korekcionni faktor.

Rezultujuće korigovane brzine rezanja v (m/min) za materijale koji su korišćeni u eksperimentalnom istraživanju su sledeće:

- Č.1502: 246 m/min
- Č.1531: 246 m/min
- Č.4382: 157 m/min
- Č.4732: 157 m/min
- Č.4830: 157 m/min
- Č.4850: 141 m/min

Izabran je držač sa konvencionalnom (prizmatičnom) drškom Sandvik Coromant PCLNR 3225P 12 (slika 7.5). Glavni napadni ugao izabranog držača je $\kappa = 95^\circ$, grudni ugao je $\gamma_{oh} = -6^\circ$, a ugao nagiba rezne ivice je $\lambda = -6^\circ$. Stezanje izmenljive pločice vrši se pomoću poluge.



Slika 7.5 Držač Sandvik Coromant PCLNR 3225P 12 koji je korišćen u eksperimentalnom istraživanju

Može se konstatovati da su opsezi i diskretne vrednosti za glavne tehnološke parametre i geometrijske parametre reznog alata za eksperimentalno istraživanje definisati kao:

- Dubina rezanja a_p : 1.2 – 3.0 mm
- Korak f : 0.15 – 0.30 mm/o
- Brzina rezanja v : 141 m/min (za čelik Č.4850), 157 m/min (za čelike Č.4382, Č.4732 i Č.4830) i 246 m/min (za čelike Č.1502 i Č.1531)
- Glavni napadni ugao alata κ : 95°
- Poluprečnik zaobljenja vrha alata r_ϵ : 0.8 mm i 1.2 mm
- Grudni ugao alata γ_o : 8.5° i 19°.

7.3.3 Predmet obrade

Eksperimentalna merenja otpora rezanja izvedena su za šest kvaliteta čelika iz različitih grupa obradljivosti. Izbor većeg broja materijala predmeta obrade imao je za cilj da proveri validnost predloženog pristupa za predikciju otpora rezanja, pretpostavljajući da se izabrani materijali različito ponašaju u toku obrade rezanjem. Ujedno, prikupljanjem većeg broja podataka o obradljivosti materijala različitog kvaliteta cilj je bio i da se pokuša predložiti unificirani model adekvatne tačnosti za predikciju otpora rezanja koji bi imao šire polje primene. Oznake kvaliteta čelika prema standardima EN 10025, W.Nr. i SRPS C.B0.500:1989 i grupe materijala kojima pripadaju prema, priručniku iz tehnologije obrade rezanjem (TORP) [144] i proizvođaču alata [142], [143] su prikazane u tabeli 7.2. Hemijski sastav korišćenih čelika, određen spektrometrijskom analizom, naveden je u tabeli 7.3.

Tabela 7.2 Oznake kvaliteta čelika i grupe obradljivosti korišćenih materijala

Alfanumerička EN oznaka	Numerička EN oznaka	JUS oznaka	TORP grupa materijala	Dormer Pramet grupa materijala
42CrMo4	1.7225	Č.4732	4.1	P3.3
20MnCrS5	1.7149	Č.4382	5.1	P3.2
51CrV4	1.8159	Č.4830	5.4	P3.2
-	-	Č.1502	2.3	P2.2
C45E	1.1191	Č.1531	2.3	P2.2
X155CrVMo12-1	1.2379	Č.4850	8.6	P4.1

Tabela 7.3 Hemijski sastav čelika

Hemijski element	42CrMo4 1.7225 Č.4732	20MnCrS5 1.7149 Č.4382	51CrV4 1.8159 Č.4830	- - Č.1502	C45E 1.1191 Č.1531	X155CrVMo12-1 1.2379 Č.4850
	Hemijski sastav [%]					
C	0.4230	0.1774	0.5244	0.4396	0.4653	1.3606
Mn	0.0301	1.1185	0.8637	0.4772	0.6947	0.2703
Si	0.1566	0.2160	0.2155	0.1103	0.1182	0.2407
P	0.0103	0.0113	0.0105	0.0210	0.0149	0.0180
S	0.0301	0.0075	0.0118	0.0155	0.0127	0.0075
Cr	0.9115	0.8300	0.9935	0.0581	0.0859	11.4450
Ni	0.0762	0.0267	0.0284	0.0126	0.0734	0.1979
Cu	0.2137	0.0158	0.0376	0.0153	0.1783	-
Mo	0.1863	0.0088	0.0114	0.0036	0.0155	0.6571
Al	0.0145	0.0243	0.0209	0.0010	0.0105	-
V	0.0085	0.0053	0.1506	0.0042	0.00269	-
Nb	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	-
Sn	0.0281	0.0030	0.0041	0.0026	0.0099	-
W	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	-
Co	0.0090	0.0022	0.0046	0.0042	0.0070	-
FE%	97.1520	97.5483	97.1191	98.8311	98.3116	85.8028
FeIS	40.1390	41.0305	39.2590	41.6840	41.4020	31.8635

Č.4732 (42CrMo4) je hrom-molibden legirani čelik sa prosečnim sadržajem ugljenika i dobrim mehaničkim svojstvima (visoka zatezna čvrstoća, dobra žilavost i otpornost na habanje) koji se može poboljšati. Koristi se za komponente koje zahtevaju visoku čvrstoću i otpornost na zamor i habanje, pa ima široku primenu u mašinskoj industriji za izradu osovin, vratila, zupčanika i dr. [145].

Č.4382 (20MnCrS5) je niskougljenični hrom-manganski čelik sa dodatkom sumpora pogodan za cementaciju kojom se postiže dobra kombinacija površinske tvrdoće, otpornosti na habanje i žilavosti. Iz ovih razloga se primenjuje za izradu vratila, klinova i čaura u automobilske i mašinske industrije [146].

Č.4830 (51CrV4) je visokougljenični legirani opružni čelik sa dodatkom hroma i

vanadijuma. Odlikuju ga visoka granica tečenja i zatezna čvrstoća, dobra otpornost na zamor i deformacije. Koristi se za izradu opruga, vratila, zupčanika, alata za oblikovanje metala i komponenata koje su izložene dinamičkom opterećenju [147].

Č.1502 (-) je čelik koji se koristi za cevi bez šava za cevne vodove, sudove i aparate.

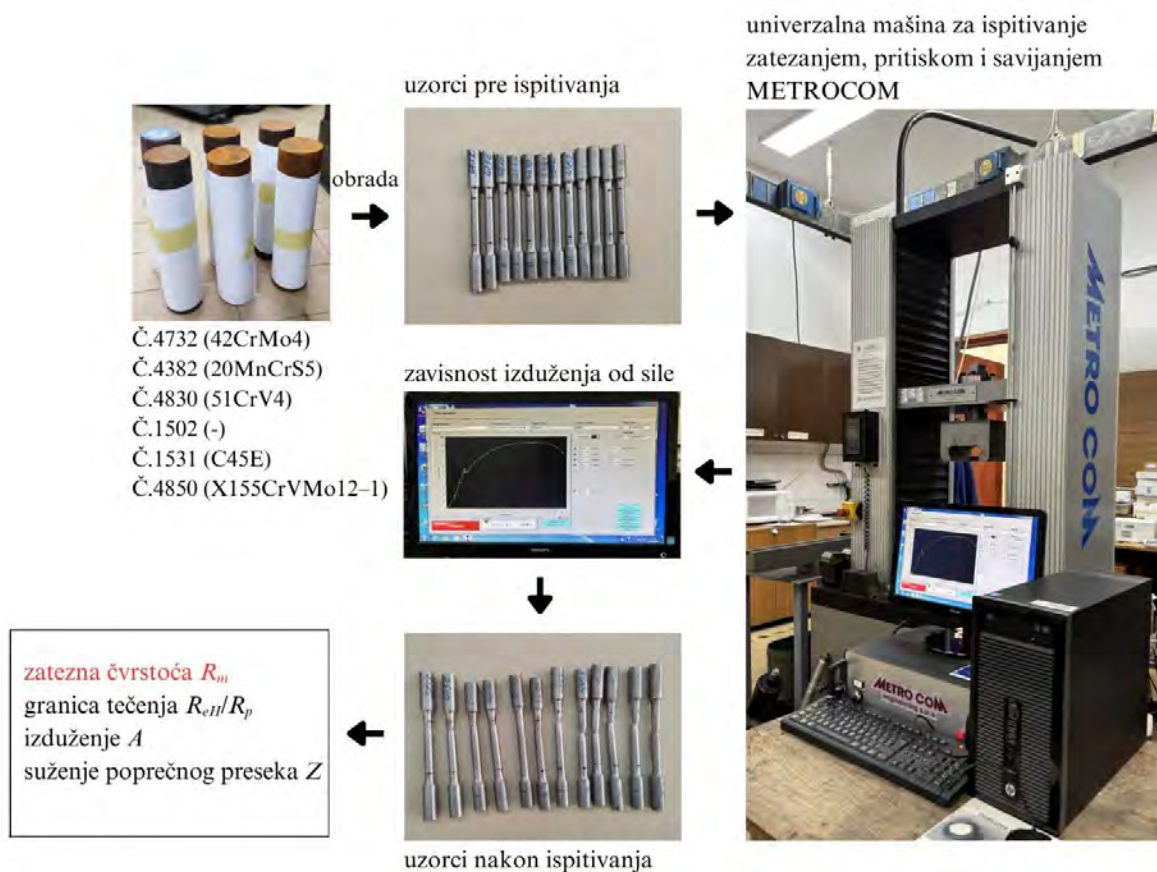
Č.1531 (C45E) je srednjeugljenični nelegirani čelik sa dobrom kombinacijom žilavosti, otpornosti na habanje i čvrstoće koja se postiže postupcima termičke obrade. Najviše se koristi kao konstrukcioni čelik za izradu vratila, vretena, zupčanika, klinova i dr. [1], [59].

Č.4850 (X155CrVMo12–1) predstavlja visokolegirani alatni čelik koji ima visok sadržaj ugljenika, hroma, molibdena i vanadijuma. Koristi se za izradu komponenti koje zahtevaju odličnu otpornost na habanje i umerenu žilavost. Ima široku primenu u mašinskoj industriji za izradu alata, kalupa, sečiva i drugih komponenti za rad u uslovima visokog habanja [148].

Pre početka eksperimentalnog merenja otpora rezanja u toku procesa obrade, izvedena je priprema predmeta obrade, tj. predobrada, da bi se skinuo površinski sloj, obezbedila tačnost potrebnih mera i oblika i stvorili uslovi za realizaciju verodostojnih eksperimentalnih ogleda. Početne dimenzije pripremaka nakon predobrade, u obliku šipke kružnog poprečnog preseka, bile su: dužina 250 mm i prečnik 55 mm ($\varnothing 55 \times 250$) za čelike 42CrMo4, 20MnCrS5 i 51CrV4. Za čelike Č.1502 (-) i C45E korišćeni su priprepci prečnika 59 mm i dužine 250 mm ($\varnothing 59 \times 250$), dok je za čelik X155CrVMo12–1 korišćen pripremak prečnika 75 mm i dužine 250 mm ($\varnothing 75 \times 250$).

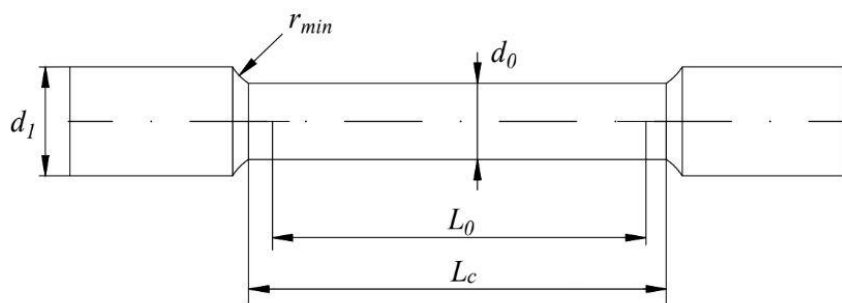
7.3.4 Ispitivanje mehaničkih svojstava čelika

Eksperimentalna postavka ispitivanja mehaničkih svojstava čelika prikazana je na slici 7.6.



Slika 7.6 Šematski prikaz procedure ispitivanja mehaničkih svojstava zatezanjem

Za ispitivanje mehaničkih svojstava zatezanjem od preostalog materijala nakon izvedene obrade napravljene su po dve standardne epruvete za svaki od čelika (42CrMo4, 20MnCrS5, 51CrV4, C45E, Č.1502, X155CrVMo12-1). Skica epruvete prikazana je na slici 7.7.

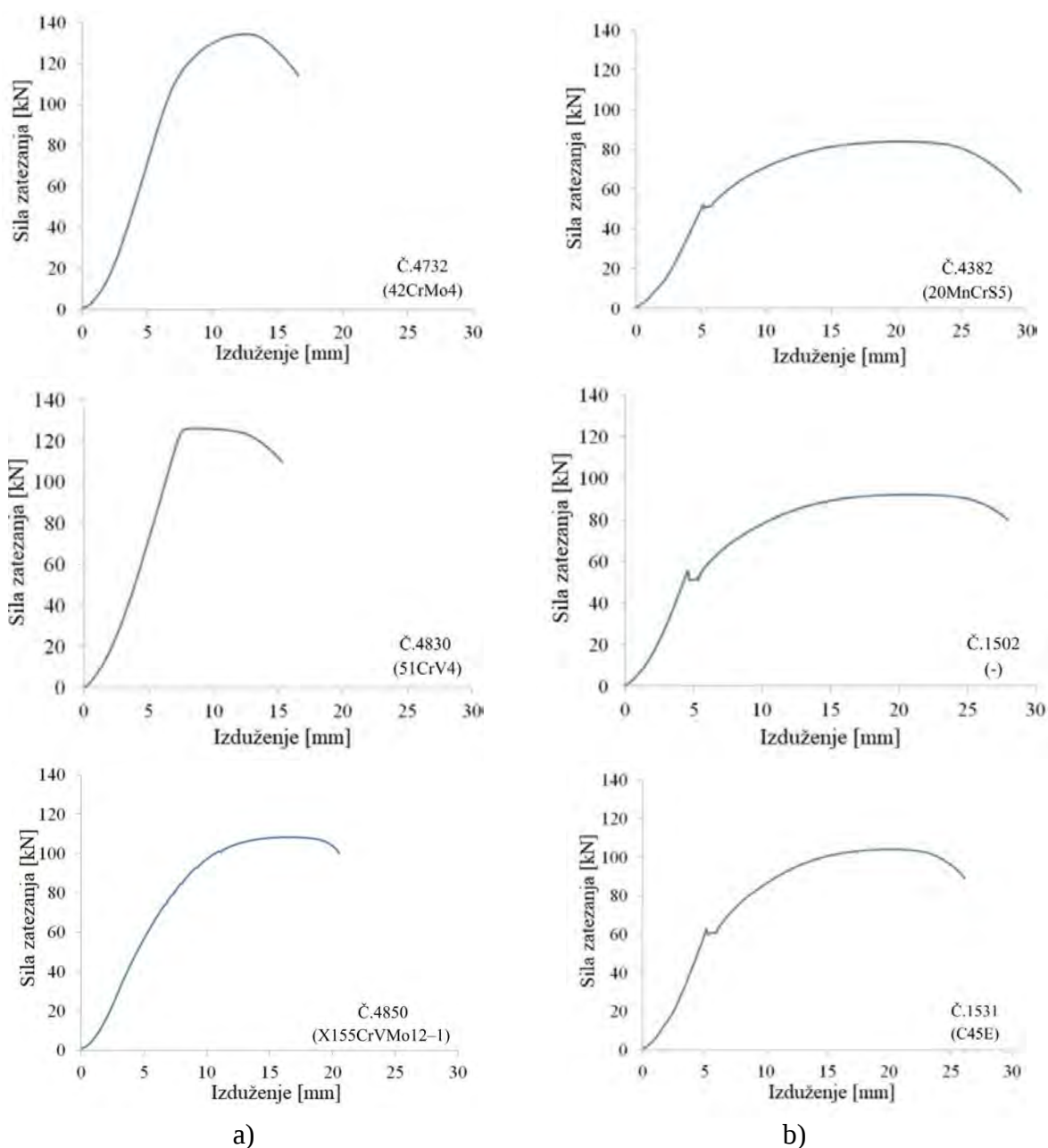


Slika 7.7 Skica i dimenzije epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava čelika
($d_1 = 20 \text{ mm}$, $d_0 = 14 \text{ mm}$, $L_0 = 70 \text{ mm}$, $L_c = 77 \text{ mm}$, $r_{min} = 12 \text{ mm}$)

Ispitivanja zatezanjem izvedena su na univerzalnoj mašini za ispitivanje zatezanjem, pritiskom i savijanjem METROCOM (300 kN), prema standardu SRPS EN ISO 6892 –

1:2020 – ispitivanje zatezanjem na sobnoj temperaturi pri brzini pomeranja čeljusti od 15 mm/min. Ispitivanje zatezanjem predstavlja najznačajnije mehaničko ispitivanje materijala, tokom kojeg se pomoću dinamometra kontinuirano meri sila zatezanja i beleži zavisnost izduženja od primenjene sile, na osnovu kojih se određuju karakteristični naponi i deformacije.

Dijagrami zavisnosti izduženja materijala od primenjene sile zatezanja za sve uzorke čelika prikazani su na slici 7.8.



Slika 7.8 Dijagrami sila zatezanja-izduženje za ispitivane čelike: a) Manje deformabilni (bez izraženog napona tečenja) b) Deformabilni (sa izraženim naponom tečenja)

Epruvete izrađene od čelika 42CrMo4, 51CrV4 i X155CrVMo12–1 su pokidane sa manjim suženjem poprečnog preseka i manjim procentualnim izduženjem, a prekid je bio približno ravan (krt prelom), što ukazuje na slabu deformabilnost ovih materijala. Nasuprot tome, epruvete izrađene od deformabilnih materijala (20MnCrS5, Č.1502 i C45E) imale su primetno žilavi lom sa značajnijim smanjenjem poprečnog preseka na mestu kidanja i većim procentualnim izduženjem (slika 7.9), što je uslovljeno hemijskim sastavom i strukturom. Takođe, dijagrame zatezanja epruveta izrađenih od deformabilnih čelika (20MnCrS5, Č.1502 i C45E) karakteriše jasno izražena granica tečenja, za razliku od epruveta izrađenih od čelika male deformabilnosti (42CrMo4, 51CrV4 i X155CrVMo12–1).



Slika 7.9 Pokidane epruvete ispitivanih čelika

Na osnovu slika 7.8 i 7.9, može se uočiti da nelegirani i niskolegirani čelici (20MnCrS5, Č.1502 i C45E) imaju dobru deformabilnost i niže vrednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće. Sa druge strane, potpuno očekivano, legirani čelici (42CrMo4, 51CrV4 i X155CrVMo12–1) imaju manju deformabilnost, nemaju izraženu oblast tečenja, ali zato imaju značajno veće napone tečenja i čvrstoću.

Na osnovu izmerenih veličina pre, tokom i nakon ispitivanja, dobijene su vrednosti mehaničkih svojstava čelika: zatezna čvrstoća (R_m), gornja granica tečenja (R_{eH}), odnosno granica tečenja (R_p), procentualno izduženje epruvete (A) i procentualno suženje poprečnog preseka epruvete (Z) (tabela 7.4).

Tabela 7.4 Mehanička svojstva čelika

Materijal	R_m [N/mm ²]	R_{eH}/R_p^* [N/mm ²]	A [%]	Z [%]
Č.4732 (42CrMo4)	922	755*	10.6	36.0
Č.4830 (51CrV4)	810	770*	8.1	34.1
Č.4850 (X155CrVMo12-1)	722	480*	14.9	19.0
Č.4382 (20MnCrS5)	550	340	29.5	71.5
Č.1502 (-)	608	365	24.5	43.9
Č.1531 (C45E)	680	410	21.4	44.0

7.3.5 Režimi obrade

Za određivanje vrednosti empirijskih konstanti (C , x_1 , x_2 , i x_3) prethodno izvedenih modela za predikciju otpora rezanja primenjen je plan male rezolucije, Tagučijev ortogonalni niz L_6 (2^13^3) (tabela 7.5) [140].

Tabela 7.5 Tagučijev ortogonalni niz (matrica) L_6 (2^13^3)

Redni broj ogleda	π_2	π_3	π_4
1	0	0	-1
2	0	0	1
3	1	-1	-1
4	1	1	1
5	-1	1	-1
6	-1	-1	1

Kao što se može videti u tabeli 7.5, u okviru kolona vrši se variranje nivoa izvedenih bezdimenzionalnih grupa π_2 , π_3 i π_4 . Za definisanje režima obrade koji će se testirati u procesu obrade u okviru realizacije eksperimenta neophodno je sagledati sve ulazne promenljive koji figurišu u prethodno izvedenim bezdimenzionalnim grupama. Prilikom izbora vrednosti promenljivih kojima se postiže promena nivoa izvedenih bezdimenzionalnih grupa su uzeti u obzir njihova uticajnost na promenu otpora rezanja, ali i na samu mehaniku procesa obrade rezanjem, mogućnost variranja vrednosti s obzirom na dostupnost držača alata i reznog alata, kao i opravdanost promene s obzirom na izabrani zahvat obrade. Brzina rezanja je imala konstantnu vrednost iz razloga što je njen uticaj na otpore rezanja veoma mali, skoro zanemarljiv za većinu materijala, osim kod obrade mekih metala i materijala osetljivih na temperaturu [4], [39]. Glavni napadni ugao alata je bitan faktor u obradi rezanjem, s obzirom da određuje dužinu kontakta rezne ivice alata sa predmetom obrade, kao i oblik preseka reznog sloja [9], [66]. Međutim, iako značajno menja mehaniku rezanja, eksperimentalna istraživanja otpora rezanja kod uzdužnog spoljašnjeg struganja čelika C60E pokazuju da glavni napadni ugao ima pozitivnu korelaciju sa glavnim otporom rezanja, ali

njegova promena u opsegu $[45 - 90^\circ]$ nema izražen uticaj na promenu vrednosti glavnog otpora rezanja [149], već je njegov uticaj više izražen na promenu otpora prodiranja i pomoćnog kretanja [150]. Grudni ugao alata je jedan od najbitnijih geometrijskih parametara alata koji utiče na površinu kontakta alata i strugotine, komponente otpora rezanja, kao i temperaturu rezanja. Povećanjem grudnog ugla alata se generalno povećava ugao smicanja što posledično rezultuje smanjenjem otpora rezanja [151]. Takođe, poznato je da uticaj grudnog ugla alata na promenu otpora rezanja zavisi od materijala predmeta obrade [152]. S obzirom da glavni napadni ugao i grudni ugao alata imaju značajan uticaj na otpore rezanja, temperaturu rezanja, a da zajedno određuju pravac odvođenja strugotine, postoji optimalna kombinacija ovih uglova kojima se postiže efikasnija obrada [66]. Dubina rezanja i korak direktno utiču na poprečni presek reznog sloja i količinu materijala koju alat uklanja u toku procesa obrade, pa predstavljaju neizostavne parametre koje je neophodno uzeti u obzir prilikom kreiranja modela za predikciju otpora rezanja kod struganja.

Veličina poluprečnika zaobljenja vrha alata određuje površinu kontakta alata i predmeta obrade, pa time direktno utiče na rezultujuće otpore rezanja. Zapravo, za uslove rezanja gde je dubina rezanja manja od dvostruke vrednosti poluprečnika zaobljenja vrha alata, promena poluprečnika zaobljenja vrha alata značajno utiče na rezultujuće otpore rezanja [13]. Istraživanja pokazuju da sa povećanjem poluprečnika zaobljenja vrha alata dolazi do povećanja glavnog otpora rezanja [153], [154]. Imajući u vidu široku dostupnost alata sa različitim poluprečnicima zaobljenja vrha, a iako ne figuriše u izvedenim bezdimenzionalnim grupama, u okviru istraživanja uticaj poluprečnika zaobljenja vrha alata je uzet u obzir prilikom kreiranja modela otpora rezanja definisanjem popravnih koeficijenata.

Parametri sa njihovim nazivima, oznakama, jedinicama i vrednostima kojima su definisani režimi obrade i geometrija reznog alata u eksperimentalnom istraživanju prikazani su u tabeli 7.6.

Opsezi i nivoi parametara su odabrani na osnovu preporuka proizvođača reznog alata, sagledavajući prethodno definisane nivoe bezdimenzionalnih grupa π_2 , π_3 i π_4 , (tabela 7.5). Eksperiment uzdužnog spoljašnjeg struganja u jednom prolazu je realizovan za uslove poluzavršne obrade pri čemu nije korišćeno sredstvo za hlađenje i podmazivanje.

Tabela 7.6 Parametri sa pripadajućim nazivima, oznakama, jedinicama i vrednostima

Parametar	Oznaka	Jedinica	42CrMo4 20MnCrS5 51CrV4	Č.1502 C45E	X155CrVMo12–1
Brzina rezanja	v	m/min	157	246	141
Korak	f	mm/o	0.196	0.249	0.321
Dubina rezanja	a_p	mm	1.2	1.8	1.9
Grudni ugao alata	γ_o	°	8.5	19	2.0
Glavni napadni ugao alata	κ	°	95	2.9	
Poluprečnik zaobljenja vrha alata	r_ϵ	mm	0.8	1.2	

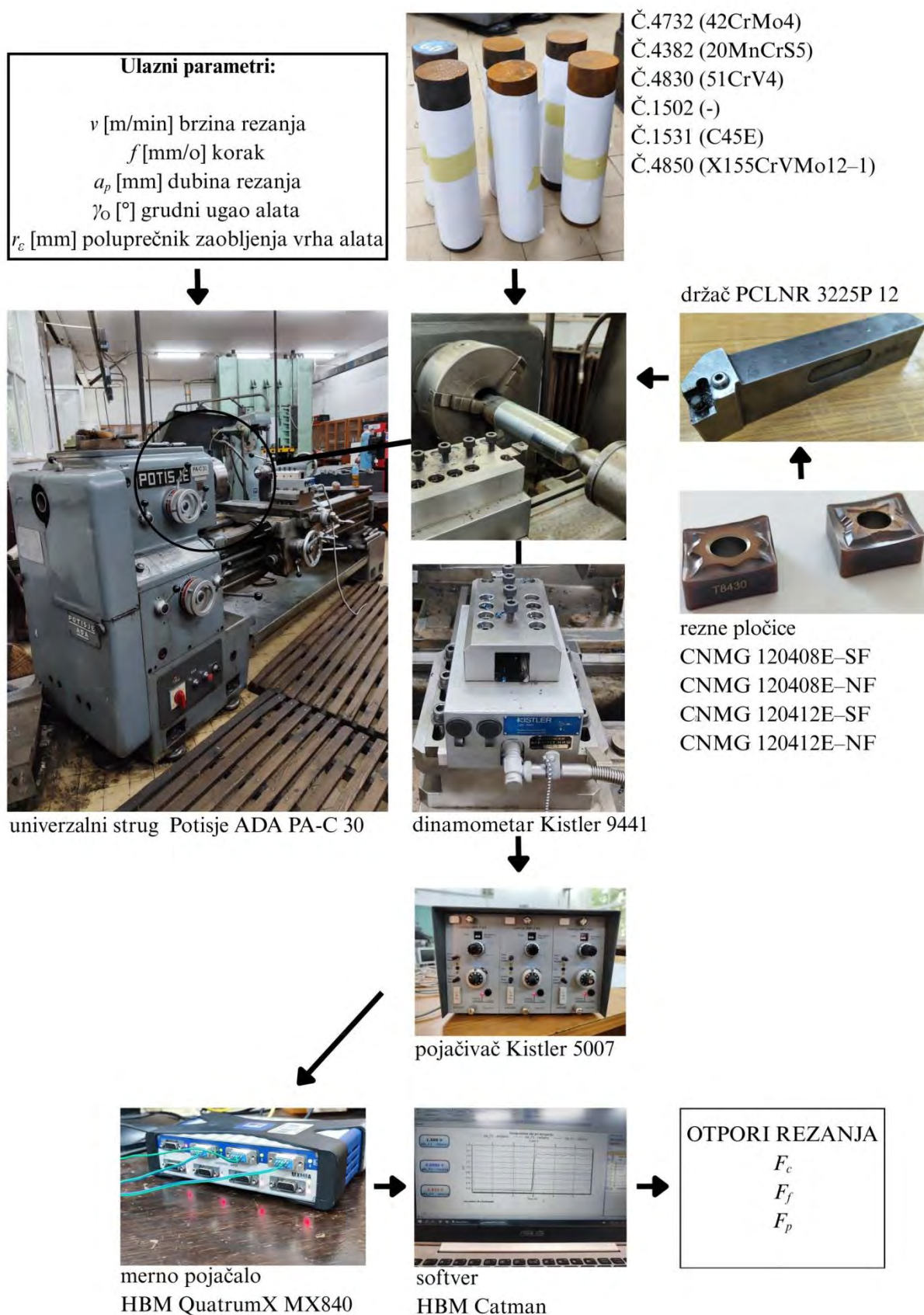
7.4 Eksperimentalno određivanje komponenata otpora rezanja

Komponente otpora rezanja kod poluzavršne obrade struganjem su merene korišćenjem trokomponentnog piezoelektričnog dinamometra, Kistler tip 9441, koji je montiran na alatnu mašinu preko prilagođenog adaptera za nosač alata. Signal opterećenja generišu dinamometar i pojačivač, Kistler tip 5007. Preko HBM QuantumX MX840 univerzalnog mernog pojačivača, mereni podaci su prikupljeni, vizuelizovani i analizirani pomoću softvera za prikupljanje podataka HBM Catman. Eksperimentalna postavka merenja komponenata otpora rezanja je prikazana na slici 7.10.

7.4.1 Kistler tip 9441

Kistler tip 9441 je trokomponentni piezoelektrični dinamometar koji se koristi za merenje komponenata otpora rezanja u laboratorijskim i industrijskim uslovima. Karakterističan je po svojoj preciznosti i sposobnosti merenja vrlo malih promena sa velikom tačnošću u tri ortogonalna pravca (x , y i z) sa sledećim karakteristikama:

- kanal 1 – z pravac (F_z) – obimna/transverzalna sila (maksimalni opseg merenja otpora $F_x = \pm 15$ kN),
- kanal 2 – y pravac (F_y) – radijalna sila (maksimalni opseg merenja otpora $F_y = \pm 15$ kN),
- kanal 3 – x pravac (F_x) – aksijalna sila (maksimalni opseg merenja otpora $F_z = \pm 30$ kN),
- osetljivost za otpore F_x i F_y oko -8 pC/N,
- osetljivost za otpor F_z oko -3.7 pC/N.



Slika 7.10 Šematski prikaz obradnog i mernog sistema korišćenog za eksperimentalno određivanje komponenata otpora rezanja

Princip rada zasniva se na piezoelektričnom efektu pretvaranja mehaničke sile u električni signal. Dinamometar se povezuje sa pojačivačem signala i koristi se sa odgovarajućim softverom za prikupljanje, memorisanje i obradu dobijenih podataka.

7.4.2 Kistler tip 5007

Kistler tip 5007 je pojačivač signala koji se koristi za obradu električnih signala dobijenih iz piezoelektričnih senzora. Pojačivač je karakterističan po svojoj preciznosti i visokoj otpornosti na šum i smetnje. Princip rada zasniva se na pretvaranju izlaznog signala piezoelektričnog senzora u proporcionalan električni napon koji se koristi za dalju analizu.

7.4.3 HBM QuantumX MX840

HBM QuantumX MX840 je univerzalni sistem za akviziciju podataka iz serije QuantumX, koji podržava 17 različitih senzorskih tehnologija i omogućava povezivanje na svih 8 kanala. Odlikuje se visokom preciznošću, fleksibilnošću i efikasnim prikupljanjem podataka, sa klasom tačnosti od 0.05 % i brzinom uzorkovanja do 40 kS/s po kanalu. Način rada sistema se zasniva na preciznom analognom prikupljanju signala, digitalizaciji putem A/D konvertora visoke rezolucije i obradi podataka u realnom vremenu. Dobijeni podaci se putem Ethernet veze prenose na računar, gde se dalje analiziraju i vizuelizuju u softveru “HBM Catman“, koji omogućava obradu signala, filtriranje, praćenje vremenskih serija i izvoz rezultata.

7.4.4 Softver “HBM Catman”

HBM Catman je softver namenjen za prikupljanje, vizuelizaciju i analiziranje podataka merenja, posebno u kombinaciji sa piezoelektričnim sensorima, pojačivačima i drugim uređajima za merenje. Odlikuje se preciznim snimanjem podataka merenja, koje prikazuje u realnom vremenu, uz mogućnost da korisnik prilagodi način prikaza i analize prema sopstvenim potrebama. Omogućava sinhronizaciju sa više modula, a prilagođen je kako za laboratorijska ispitivanja, tako i za merenja u industrijskim uslovima.

7.4.5 Rezultati merenja otpora rezanja

U tabelama 7.7 do 7.12 su prikazani eksperimentalni planovi sa vrednostima nivoa bezdimenzionalnih grupa π_2 , π_3 i π_4 i eksperimentalni rezultati, odnosno izmerene vrednosti komponenta otpora rezanja za šest čelika različitog kvaliteta i obradljivosti.

Tabela 7.7 Tagučijev ortogonalni niz $L_6 (2^1 3^3)$ i eksperimentalni rezultati za čelik Č.4732
(42CrMo4)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
1	693.93	7.63	5.00	941	341	157.2
2	693.93	7.63	11.18	1000	381	184.7
3	881.57	6.12	5.00	511	194	137.1
4	881.57	9.18	11.18	765	327	149.2
5	538.28	9.03	5.00	1623	611	161.3
6	538.28	6.23	11.18	1284	430	212.3

Tabela 7.8 Tagučijev ortogonalni niz $L_6 (2^1 3^3)$ i eksperimentalni rezultati za čelik Č.4830
(51CrV4)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
1	693.93	7.63	5.00	917	348	143
2	693.93	7.63	11.18	1004	424	174
3	881.57	6.12	5.00	512	207	126
4	881.57	9.18	11.18	766	366	140
5	538.28	9.03	5.00	1900	835	189
6	538.28	6.23	11.18	1309	486	204

Tabela 7.9 Tagučijev ortogonalni niz $L_6 (2^1 3^3)$ i eksperimentalni rezultati za čelik Č.4850
(X155CrVMo12–1)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
1	946.26	7.63	5.00	993	388	177
2	946.26	7.63	11.18	1035	438	203
3	1202.14	6.12	5.00	547	227	159
4	1202.14	9.18	11.18	781	361	162
5	734.02	9.03	5.00	1964	796	195
6	734.02	6.23	11.18	1333	507	233

Tabela 7.10 Tagučijev ortogonalni niz $L_6 (2^1 3^3)$ i eksperimentalni rezultati za čelik Č.4382
(20MnCrS5)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
1	693.93	7.63	5.00	969	478	172
2	693.93	7.63	11.18	977	497	197
3	881.57	6.12	5.00	508	247	144
4	881.57	9.18	11.18	742	404	155
5	538.28	9.03	5.00	1831	903	178
6	538.28	6.23	11.18	1334	634	282

Tabela 7.11 Tagučijev ortogonalni niz $L_6 (2^1 3^3)$ i eksperimentalni rezultati za čelik Č.1502 (-)

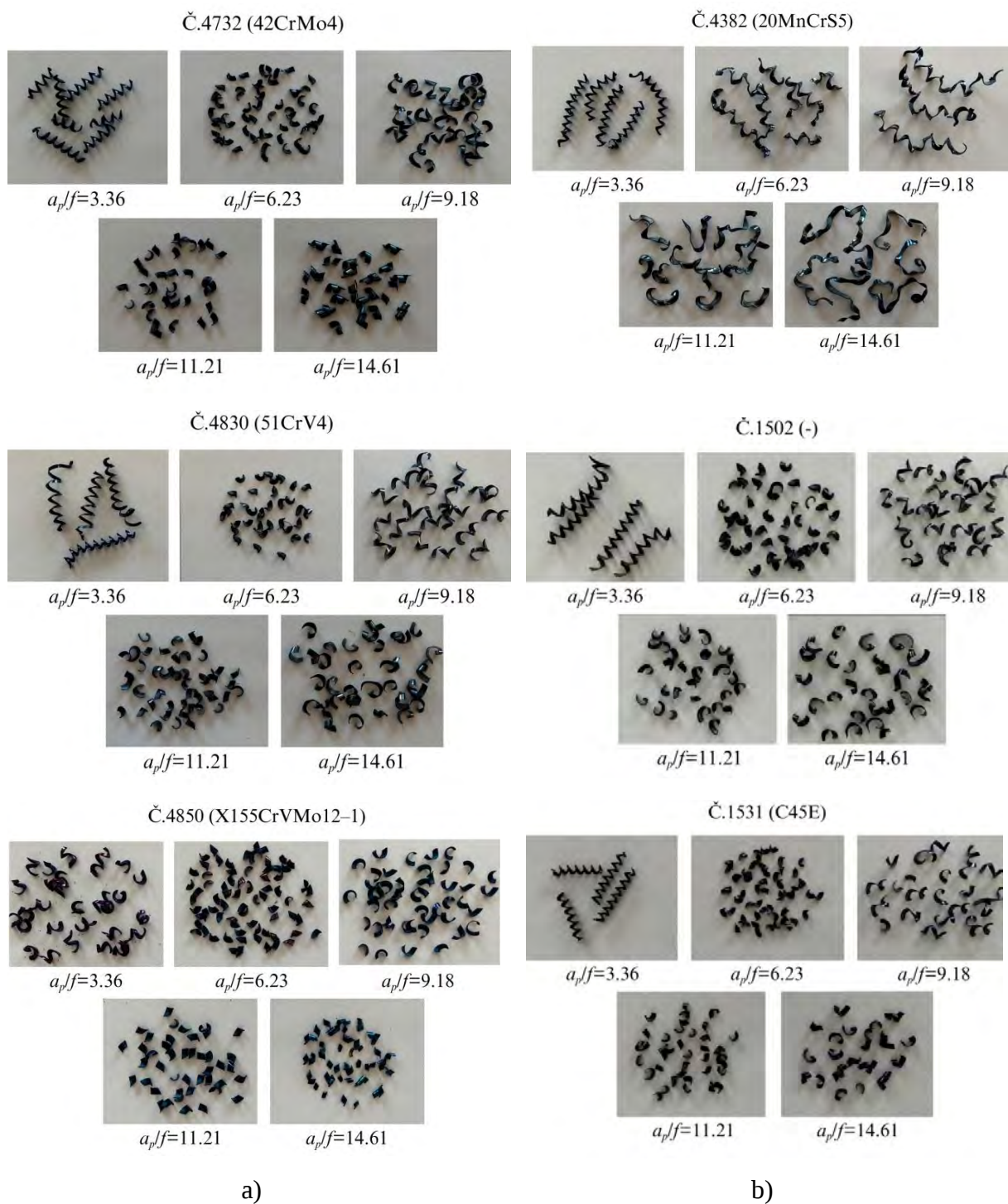
Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
1	744.39	7.63	5.00	895	330	139
2	744.39	7.63	11.18	939	377	163
3	945.68	6.12	5.00	465	182	118
4	945.68	9.18	11.18	731	326	139
5	577.43	9.03	5.00	1747	712	181
6	577.43	6.23	11.18	1235	451	198

Tabela 7.12 Tagučijev ortogonalni niz $L_6 (2^1 3^3)$ i eksperimentalni rezultati za čelik Č.1531 (C45E)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
1	744.39	7.63	5.00	908	320	140
2	744.39	7.63	11.18	969	375	160
3	945.68	6.12	5.00	492	185	122
4	945.68	9.18	11.18	724	293	132
5	577.43	9.03	5.00	1843	753	169
6	577.43	6.23	11.18	1254	434	191

7.4.6 Oblik strugotine

U okviru eksperimentalnog istraživanja uočeno je da se oblik strugotine menja u zavisnosti od izabranih režima, naročito u odnosu na promenu vitkosti strugotine. Na slici 7.11 se može videti da su oblici strugotine deformabilnih čelika donekle drugačiji i nepovoljniji, jer isti zavise od mehaničkih karakteristika i mikrostrukture materijala. Materijali sa većom tvrdoćom, poput manje deformabilnih čelika na slici 7.11, imaju manju sposobnost deformisanja, pa se strugotina lomi i lako uklanja iz zone rezanja. Veća vitkost strugotine rezultuje kraćim i tanjim strugotinama [107], [155], [156], [157].



Slika 7.11 Oblici strugotine u zavisnosti od vitkosti strugotine: a) manje deformabilni čelici (grupa A), b) deformabilni čelici (grupa B)

8. REZULTATI I DISKUSIJA

Na osnovu eksperimentalno izmerenih vrednosti otpora rezanja i primenom dimenzionalne analize kreirani su empirijski modeli za predikciju glavnog otpora rezanja (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) za svih šest kvaliteta čelika, odnosno grupu A (manje deformabilni čelici: Č.4732 (42CrMo4), Č.4830 (51CrV4), Č.4850 (X155CrVMo12–1)) i grupu B (deformabilni čelici: Č.4382 (20MnCrS5), Č.1502 (-), Č.1531 (C45E)), u funkciji bezdimenzionalnih veličina (π grupa). Metodom najmanjih kvadrata određeni su nepoznati koeficijenti predloženih modela za predikciju otpora rezanja u softverskom paketu MatLab. Provera adekvatnosti modela izvršena je izračunavanjem srednje apsolutne procentualne greške (*eng.* Mean Absolute Percentage Error – MAPE), kao jednog od najstrožih kriterijuma za procenu adekvatnosti modela i koeficijenta determinacije (R^2). Analiza rezultata uključuje analizu uticaja parametara, odnosno bezdimenzionalnih grupa, na komponente otpora rezanja, kao i kreiranje površinskih dijagrama za sveobuhvatniju analizu.

Kako bi se osigurala pouzdana primena i verifikovalo slaganje eksperimentalnih rezultata glavnog i aksijalnog otpora rezanja sa predikcijama kreiranih modela realizovan je i dodatni validacioni eksperiment. U okviru dodatnog eksperimenta izvršeno je testiranje novih režima rezanja, i to unutar eksperimentalnog hiper-prostora obuhvaćenog u glavnom eksperimentu, kao i novih režima rezanja van granica eksperimentalnog hiper-prostora obuhvaćenog u glavnom eksperimentu, s ciljem da se proceni mogućnost ekstrapolacije kreiranih modela i njihove primene u širem opsegu parametara sa zadovoljavajućom tačnošću. Pored uporednog prikaza eksperimentalnih vrednosti otpora rezanja i predikcija kreiranih modela, određeni su i koeficijenti korelacije između predikcija modela i eksperimentalnih vrednosti za glavni i aksijalni otpor rezanja, uzimajući u obzir podatke iz glavnog i validacionog eksperimenta. Dodatno, radi sveobuhvatnije procene adekvatnosti kreiranih modela, izvršena je i analiza reziduala.

S obzirom na praktični značaj koeficijenta odnosa glavnog i aksijalnog otpora rezanja za kvantifikaciju opterećenja i habanja reznog alata tokom procesa obrade, analiza rezultata uključuje i kreiranje predikcionih modela koeficijenta odnosa glavnog i aksijalnog otpora rezanja za svih šest istraživanih čelika. Ovim je omogućena analiza uticajnosti bezdimenzionalnih grupa, kao i sveobuhvatnija procena obradljivosti ovih čelika.

Jedan od ciljeva naučnog istraživanja je i analiza mogućnosti definisanja proširenih modela za predikciju otpora rezanja sa popravnim koeficijentom za parametre koji nisu prethodno razmatrani, a nisu ni bili obuhvaćeni inicijalnom eksperimentalnom plan

matricom. U tom cilju, realizovani su dodatni eksperimentalni ogledi za određivanje popravnih koeficijenata za poluprečnik zaobljenja vrha alata i prikazani su prošireni modeli glavnog i aksijalnog otpora rezanja. Pored toga, izvedeni su modeli za određivanje vrednosti popravnog koeficijenta u funkciji poluprečnika zaobljenja vrha alata.

U cilju potvrde adekvatnosti predloženih modela za predikciju otpora rezanja i njihove mogućnosti primene u različitim uslovima obrade, potvrde zapažanja po pitanju uticajnosti bezdimenzionalnih grupa, kao i upoređenja rezultata sa drugim empirijskim modelima za predikciju otpora rezanja, uključujući i široko prihvaćeni *Kienzle-Victor*-ov model, kreirani su modeli za predikciju glavnog otpora rezanja korišćenjem rezultata iz dodatnog eksperimenta (potpuni faktorni plan) i eksperimentalnih rezultata iz referentne literature (centralni kompozicioni plan).

Pored osnovnih ciljeva modeliranja i analize otpora rezanja, u okviru analize i diskusije rezultata izvršena je i analiza obradljivosti istraživanih čelika sa aspekta otpora rezanja. Procena obradljivosti istraživanih čelika je izvršena određivanjem i analizom normalizovanog glavnog otpora rezanja iz svih ogleda iz glavnog i validacionog eksperimenta. Predložen je i zbirni indeks obradljivosti čelika, kao model za sveobuhvatnu procenu obradljivosti čelika sa aspekta otpora rezanja. Takođe, predstavljen je detaljan pregled mogućih primena predloženih modela otpora rezanja u projektovanju tehnologije obrade struganjem, a konkretna primena je ilustrovan na dva primera. Prvi primer se odnosi na analizu uticaja dubine rezanja, koraka i grudnog ugla alata na energiju rezanja i specifičnu energiju rezanja za svih šest kvaliteta čelika. Kreirani su površinski dijagrami za sveobuhvatniju analizu. Energija rezanja i specifična energija rezanja su određene korišćenjem kreiranih modela za predikciju glavnog otpora rezanja. Drugi primer prikazuje upoređenje dva postupka za određivanje merodavnog režima rezanja za dati zahvat obrade i datu mašinu alatku, u dve situacije, kada je za predikciju snage rezanja i potrebne snage mašine korišćen: 1) kreirani model za predikciju glavnog otpora rezanja, i 2) *Kienzle-Victor*-ov model za predikciju glavnog otpora rezanja. Predikcija snage rezanja i potrebne snage mašine je u datom slučaju bila neophodna kako bi se uzela u obzir ograničenja koja nameće data mašina alatka.

8.1 Modeli predikcije otpora rezanja

Modeli predikcije otpora rezanja zasnivaju se na bezdimenzionalnim grupama π_2 , π_3 i π_4 , čije su definicije date u jednačinama 6.29 do 6.31 (poglavlje 6). Kreirani modeli za

predikciju glavnog otpora rezanja (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) za svih šest čelika, različitog kvaliteta i obradljivosti, dati su jednačinama 8.1 do 8.12:

$$\begin{array}{l} \text{Č.4732} \\ (42\text{CrMo4}) \end{array} \quad F_c = 0.3851 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.3038} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.7865} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0953} \quad (8.1)$$

$$\begin{array}{l} \\ (42\text{CrMo4}) \end{array} \quad F_f = 0.0145 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.5597} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{1.0771} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.1167} \quad (8.2)$$

$$\begin{array}{l} \text{Č.4830} \\ (51\text{CrV4}) \end{array} \quad F_c = 1.1058 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.1279} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.9562} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0501} \quad (8.3)$$

$$\begin{array}{l} \\ (51\text{CrV4}) \end{array} \quad F_f = 0.0596 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.2990} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{1.3702} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0937} \quad (8.4)$$

$$\begin{array}{l} \text{Č.4850} \\ (X155\text{CrVMo12-1}) \end{array} \quad F_c = 1.1630 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.1626} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.9171} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0041} \quad (8.5)$$

$$\begin{array}{l} \\ (X155\text{CrVMo12-1}) \end{array} \quad F_f = 0.0620 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.3841} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{1.1284} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0556} \quad (8.6)$$

$$\begin{array}{l} \text{Č.4382} \\ (20\text{MnCrS5}) \end{array} \quad F_c = 2.3782 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.1060} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.8577} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0292} \quad (8.7)$$

$$\begin{array}{l} \\ (20\text{MnCrS5}) \end{array} \quad F_f = 0.3342 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.2294} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{1.0429} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0735} \quad (8.8)$$

$$\begin{array}{l} \text{Č.1502} \\ (-) \end{array} \quad F_c = 1.2656 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.1270} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.9855} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0636} \quad (8.9)$$

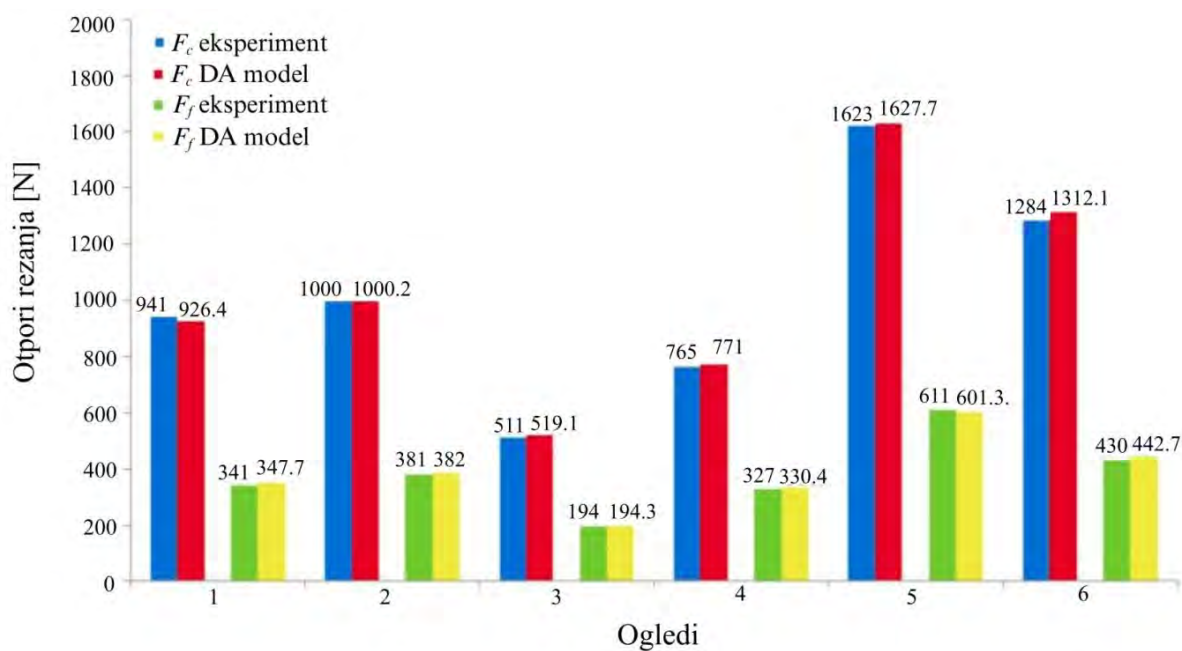
$$\begin{array}{l} \\ (-) \end{array} \quad F_f = 0.0868 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.2885} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{1.2819} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.1075} \quad (8.10)$$

$$\begin{array}{l} \text{Č.1531} \\ (C45E) \end{array} \quad F_c = 1.5517 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.1047} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.9512} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0275} \quad (8.11)$$

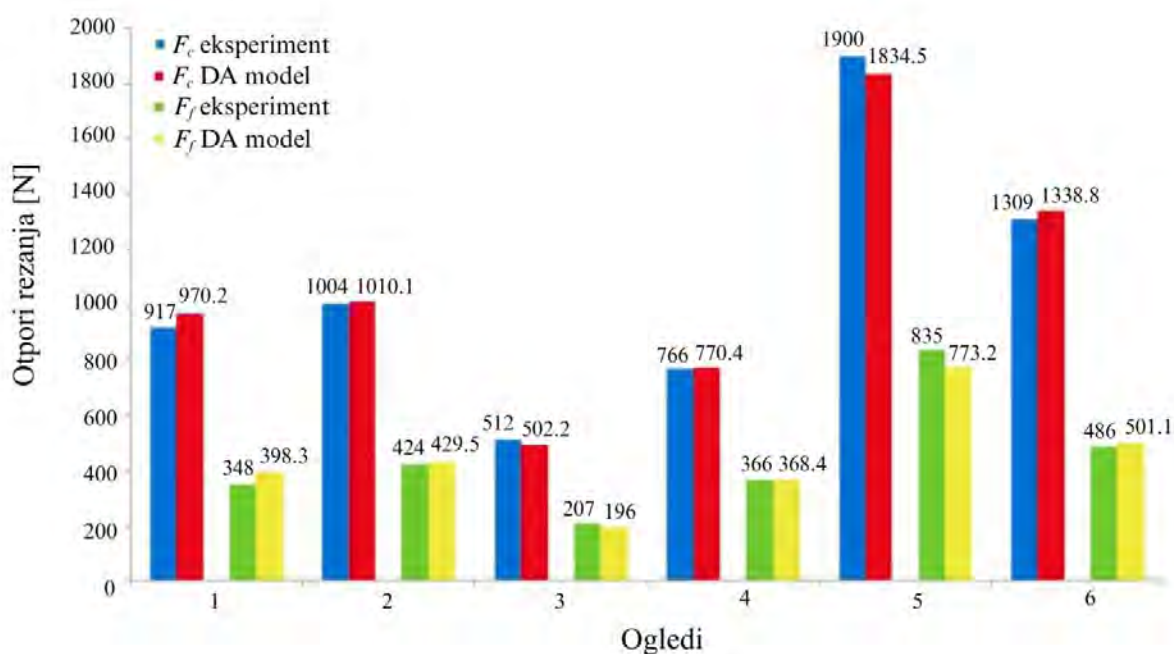
$$\begin{array}{l} \\ (C45E) \end{array} \quad F_f = 0.1980 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.1791} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{1.2465} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0279} \quad (8.12)$$

Svi modeli imaju opšti stepeno-multiplikativni oblik ranije dat u poglavlju 6 (jednačina (6.32)), izveden primenom dimenzionalne analize i *Buckingham*-ove π metode.

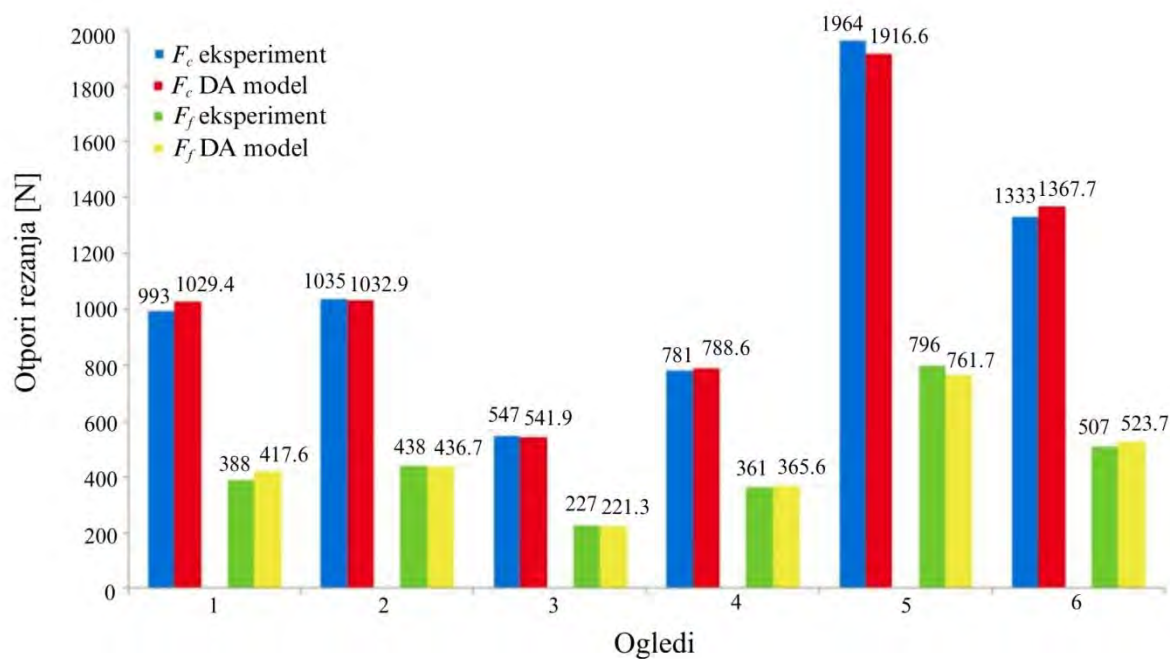
Nakon definisanja predikcionih modela, neophodno je izvršiti njihovu vizuelnu verifikaciju i uporediti predikcije sa eksperimentalno izmerenim vrednostima. U tu svrhu prikazani su dijagrami poređenja modela i eksperimentalnih podataka za svih šest čelika. Uporedni prikaz eksperimentalnih vrednosti glavnog otpora rezanja (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f), kao i predikcija modela kreiranih primenom dimenzionalne analize (DA modeli) dat je na slikama od 8.1 do 8.6 za svih šest kvaliteta čelika.



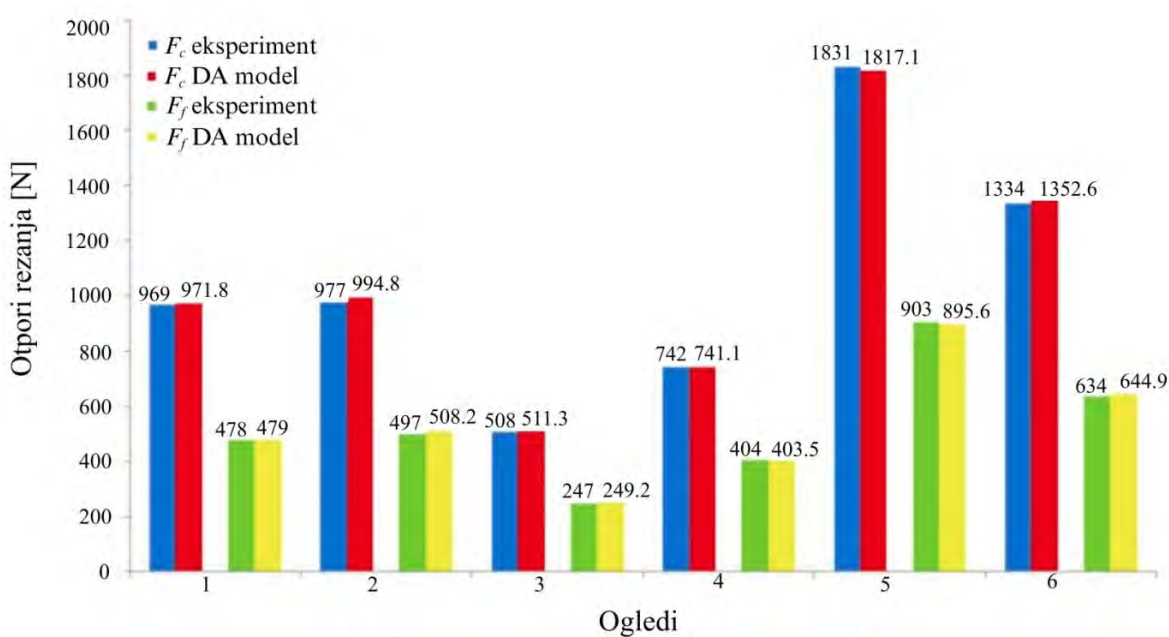
Slika 8.1 Eksperimentalne vrednosti otpora rezanja i predikcije kreiranog modela za čelik Č.4732 (42CrMo4)



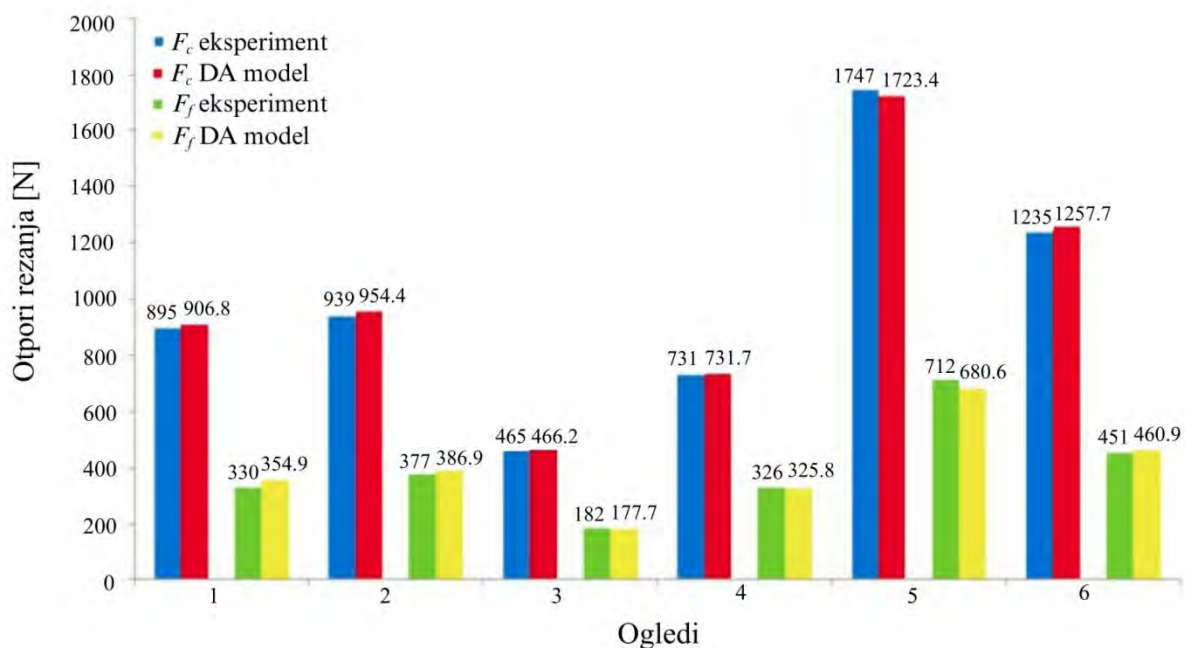
Slika 8.2 Eksperimentalne vrednosti otpora rezanja i predikcije kreiranog modela za čelik Č.4830 (51CrV4)



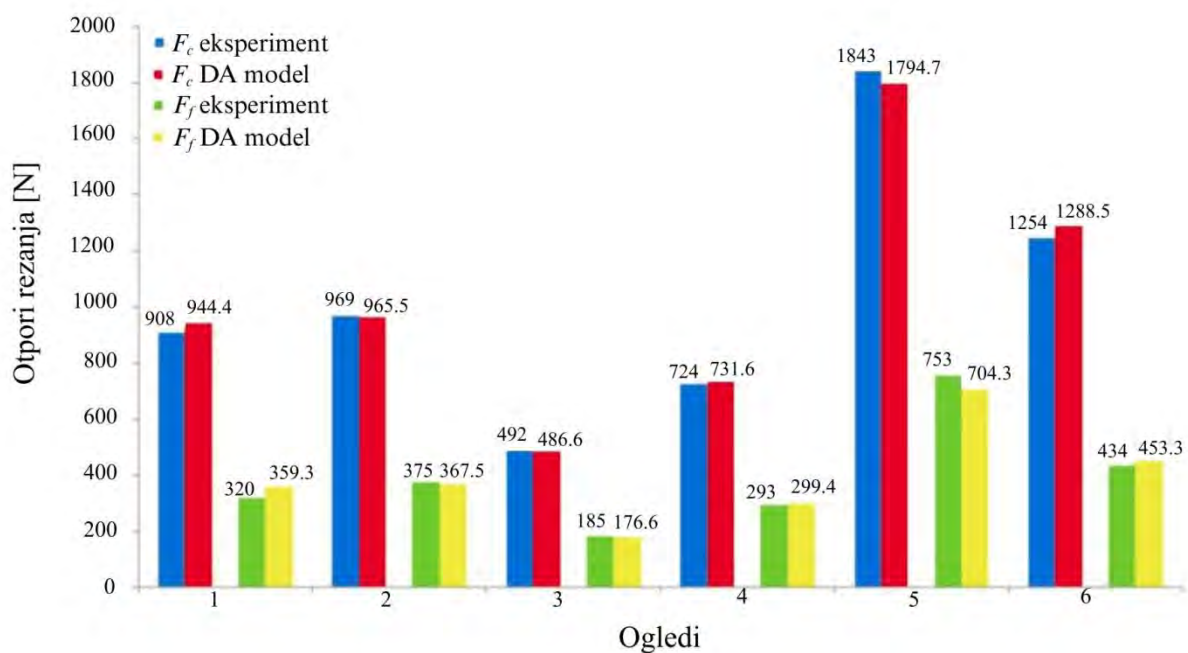
Slika 8.3 Eksperimentalne vrednosti otpora rezanja i predikcije kreiranog modela za čelik Č.4850 (X155CrVMo12-1)



Slika 8.4 Eksperimentalne vrednosti otpora rezanja i predikcije kreiranog modela za Č.4382 (20MnCrS5)



Slika 8.5 Eksperimentalne vrednosti otpora rezanja i predikcije kreiranog modela za čelik Č.1502 (-)



Slika 8.6 Eksperimentalne vrednosti otpora rezanja i predikcije kreiranog modela za čelik Č.1531 (C45E)

Iz prikazanih dijagrama može se uočiti da modeli dobro prate eksperimentalno izmerene vrednosti glavnog i aksijalnog otpora rezanja. Za svih šest čelika vidljivo je dobro slaganje između modelskih i eksperimentalnih podataka, sa blagim odstupanjima koja su

najčešće posledica varijabilnosti procesa formiranja strugotine i specifične geometrije alata. Veća rasipanja kod aksijalnog otpora rezanja (F_f) u odnosu na glavni otpor rezanja (F_c) očekivana su zbog izraženijeg uticaja trenja na grudnoj površini alata. Ukupno posmatrano, dijagrami potvrđuju da je model kreiran primenom dimenzionalne analize adekvatan i da predstavlja dobru osnovu za dalju validaciju.

Na osnovu predikcija modela i eksperimentalno izmerenih vrednosti otpora rezanja određene su vrednosti srednjih apsolutnih procentualnih grešaka (MAPE) i vrednosti koeficijenata determinacije (R^2) kreiranih modela. Ove vrednosti, posebno za modele glavnog i modele aksijalnog otpora rezanja, su prikazane u tabelama 8.1 i 8.2 za svih šest kvaliteta čelika, razvrstanih u grupu A (manje deformabilni čelici) i grupu B (deformabilni čelici).

Tabela 8.1 Vrednosti srednjih apsolutnih procentualnih grešaka i koeficijenata determinacije kreiranih modela za predikciju otpora rezanja za čelike iz grupe A

Grupa A	F_c		F_f	
	MAPE [%]	R^2	MAPE [%]	R^2
Č.4732 (42CrMo4)	1.07	0.99853	1.33	0.9967
Č.4830 (51CrV4)	2.44	0.99306	5.37	0.9703
Č.4850 (X155CrVMo12-1)	1.80	0.99602	3.22	0.9871

Tabela 8.2 Vrednosti srednjih apsolutnih procentualnih grešaka i koeficijenata determinacije kreiranih modela za predikciju otpora rezanja za čelike iz grupe B

Grupa B	F_c		F_f	
	MAPE [%]	R^2	MAPE [%]	R^2
Č.4382 (20MnCrS5)	0.84	0.9992	1.00	0.9988
Č.1502 (-)	1.08	0.99853	3.21	0.9885
Č.1531 (C45E)	1.98	0.99555	5.32	0.9766

Vrednosti srednjih apsolutnih procentualnih grešaka modela za predikciju glavnog otpora rezanja čelika iz grupe A se kreću u intervalu 1.07 – 2.44%, dok se za čelike iz grupe B kreću u intervalu 0.84 – 1.98%. Kod modela za predikciju aksijalnog otpora rezanja, vrednosti srednjih apsolutnih procentualnih grešaka za čelike iz grupe A se kreću u intervalu 1.33 – 5.37%, dok se za čelike iz grupe B kreću u intervalu 1.00 – 5.32%. Primećuje se da su MAPE vrednosti za aksijalni otpor rezanja u proseku veće nego za glavni otpor rezanja, što je očekivano zbog većeg uticaja trenja i mikrogeometrije grudne površine alata na aksijalni otpor rezanja.

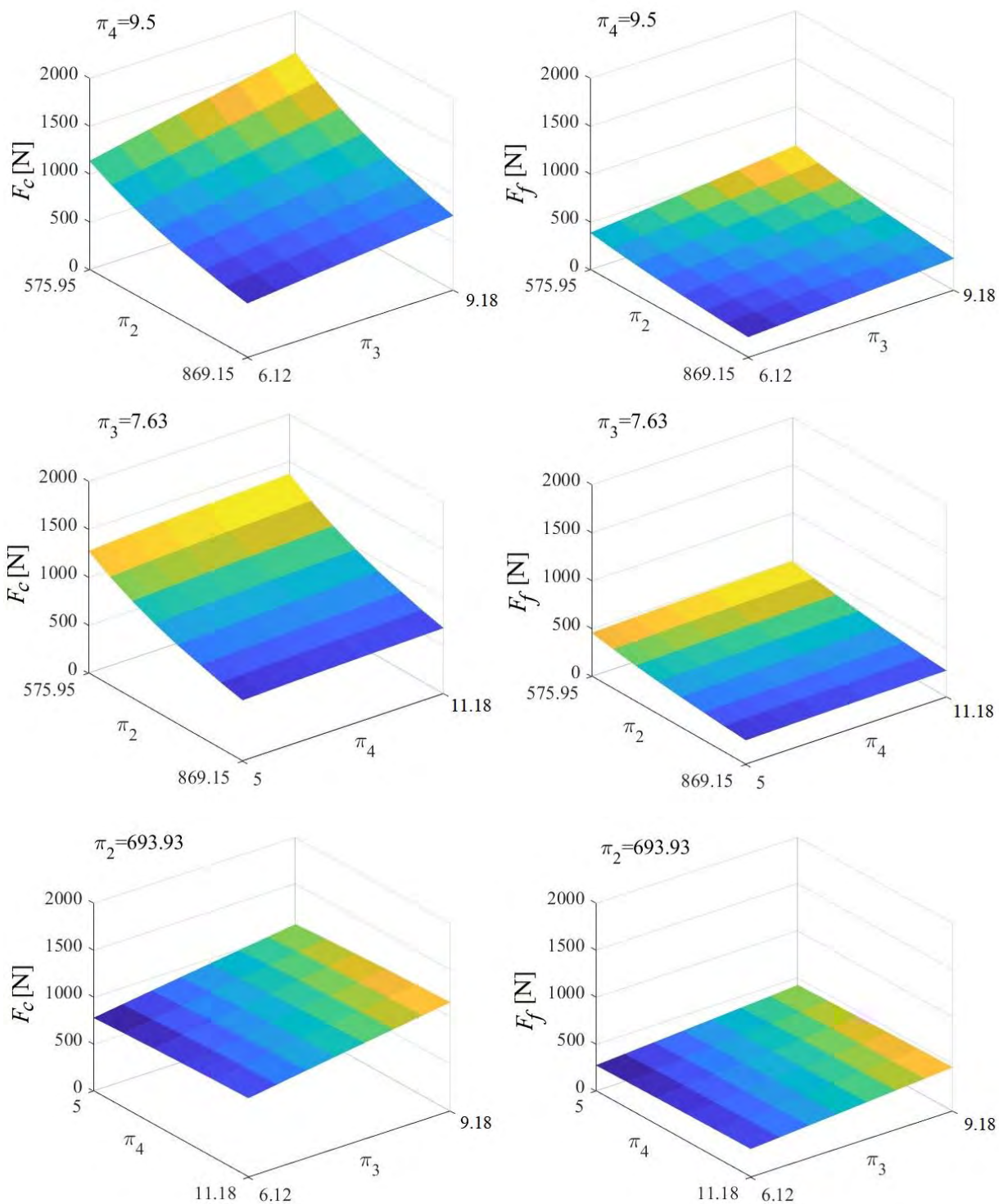
Koeficijenti determinacije modela za predikciju glavnog i aksijalnog otpora rezanja za obe grupe čelika (A i B) imaju vrednosti vrlo bliske 1, što ukazuje da modeli objašnjavaju

dominantan deo varijacije u eksperimentalnim podacima otpora rezanja. Ovo dodatno potvrđuje pouzdanost i primenljivost kreiranih modela. Na osnovu ovih rezultata, može se reći da modeli za predikciju glavnog i aksijalnog otpora rezanja, kreirani primenom dimenzionalne analize, daju dobre rezultate sa inženjerske tačke gledišta.

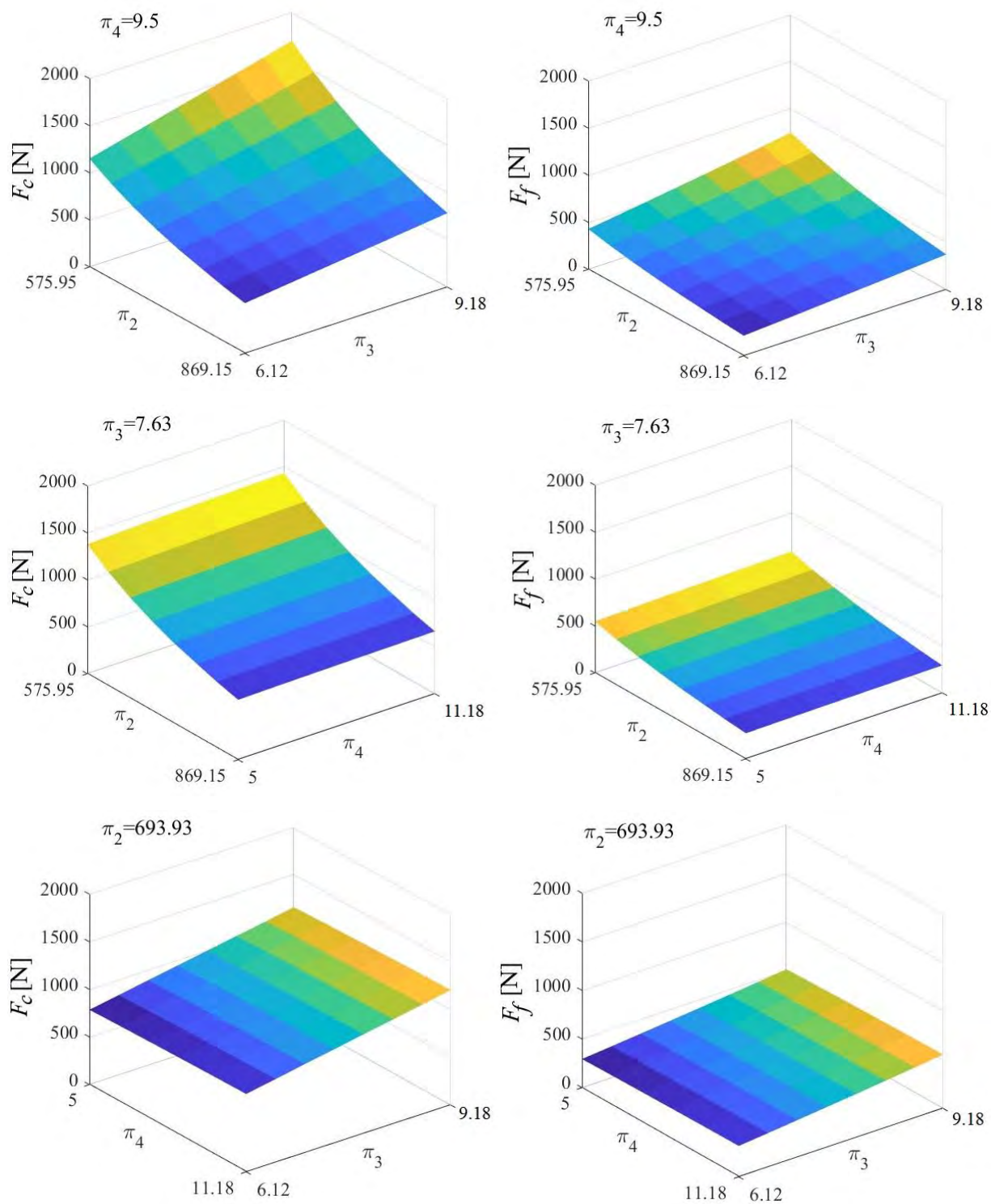
Istraživani čelici, koji pripadaju dvema različitim grupama materijala (grupa A i grupa B), imaju različite mehaničke karakteristike, pa su posledično i svrstani u različite grupe obradljivosti. Određeni koeficijenti kreiranih modela predikcije na osnovu primene dimenzionalne analize (C , x_1 , x_2 , x_3), čak i u okviru iste grupe, mogu imati značajnije razlike u vrednostima, što ukazuje na različito ponašanje pri obradi, tj. različitu obradljivost. To dalje ukazuje na činjenicu da se jedan jedinstven, generalizovan model, u formi izvedenoj primenom dimenzionalne analize, ne može koristiti za adekvatnu predikciju glavnog i aksijalnog otpora rezanja. Sa druge strane, struktura modela ukazuje na proporcionalnost sa zateznom čvrstoćom i dominantan uticaj koraka na rezultujuće otpore rezanja kod struganja, ali i uticajnost bezdimenzionalnih grupa. U skladu sa postavkom eksperimentalnog istraživanja i strukturom kreiranih predikcionih modela izvršena je analiza uticajnosti bezdimenzionalnih grupa na otpore rezanja adekvatnim izborom režima obrade. Površinski dijagrami na slikama od 8.7 do 8.12 prikazuju promene glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa.

S obzirom na formu kreiranih predikcionih modela može se zaključiti da bezdimenzionalna grupa π_3 – vitkost strugotine, bezdimenzionalna veličina koja predstavlja odnos širine i debljine reznog sloja, ima izražen uticaj na glavni i aksijalni otpor rezanja kod svih istraživanih čelika. Može se primetiti da postoji pozitivna korelacija, odnosno da povećanje vitkosti strugotine povećava komponente otpora rezanja. *Denkena* i saradnici [158] su zaključili da povećanje površine poprečnog preseka reznog sloja i zapremine deformisanog materijala, bilo povećanjem dubine rezanja ili koraka, rezultira povećanjem glavnog i aksijalnog otpora rezanja kod struganja legiranih i ugljeničnih čelika.

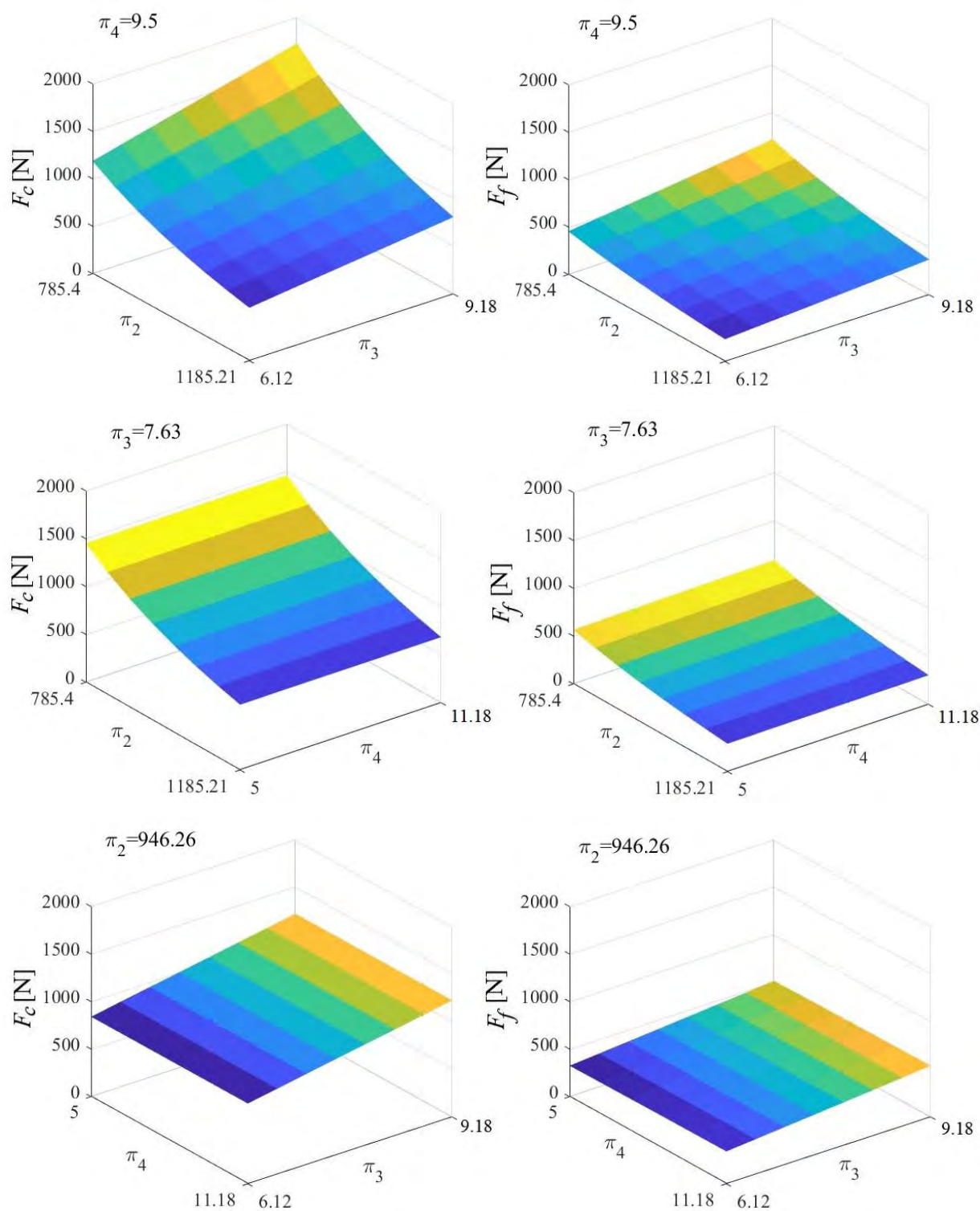
Sa druge strane, povećanje vrednosti bezdimenzionalne grupe π_2 , koje je eksperimentu realizovano smanjenjem vrednosti koraka, dovodi do smanjenja glavnog i aksijalnog otpora rezanja kod svih istraživanih čelika. Takođe, za konstantne vrednosti koraka, na osnovu kreiranih modela može se očekivati neznatan rast otpora rezanja sa povećanjem brzine rezanja. Tako na primer, u proseku za čelike iz grupe A, za povećanje brzine rezanja od 20% može se očekivati povećanje glavnog otpora rezanja za svega 3.7%. U slučaju čelika iz grupe B, to povećanje je još manje i iznosi svega 2.7%.



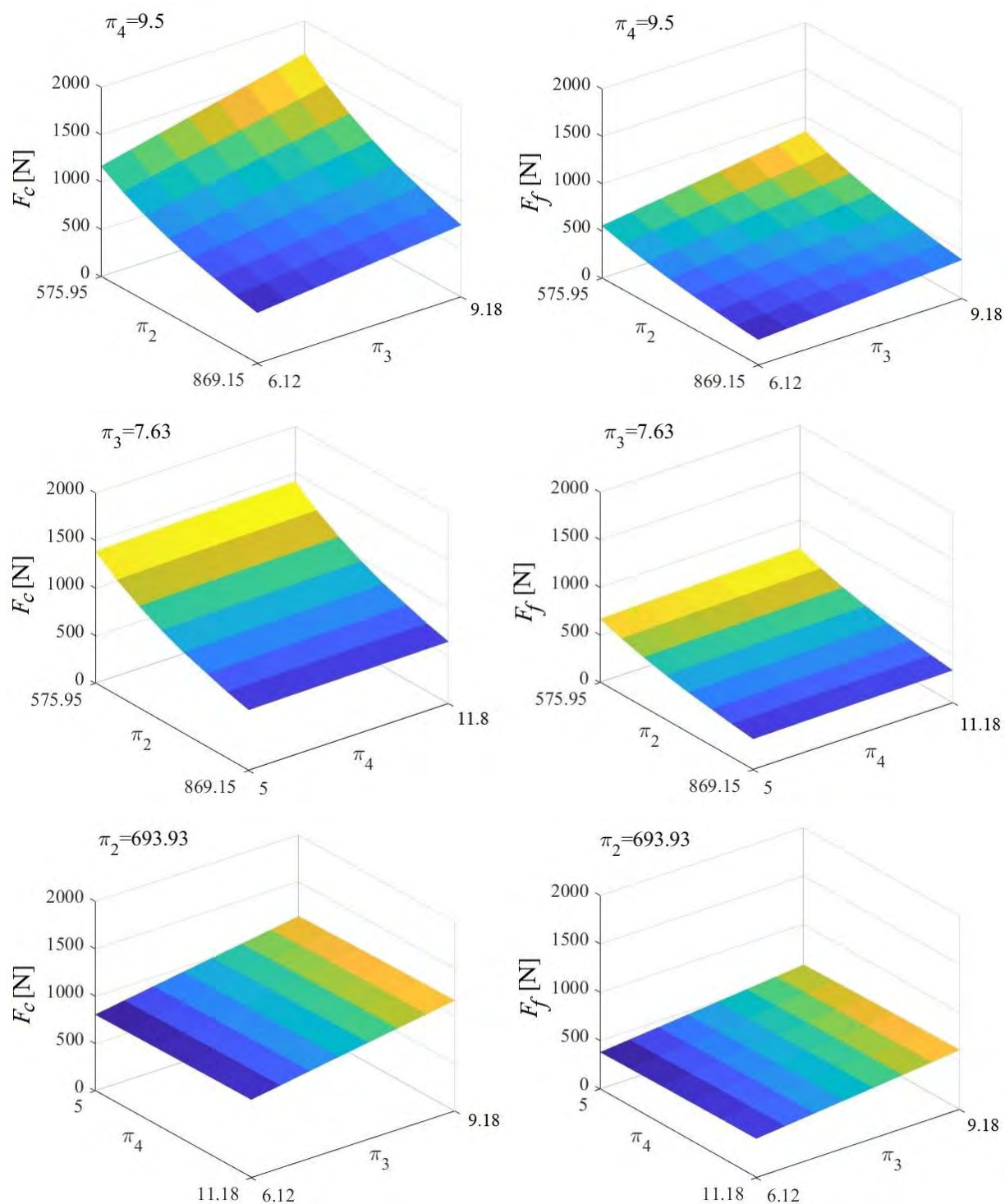
Slika 8.7 Promena glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa za čelik Č.4732 (42CrMo4)



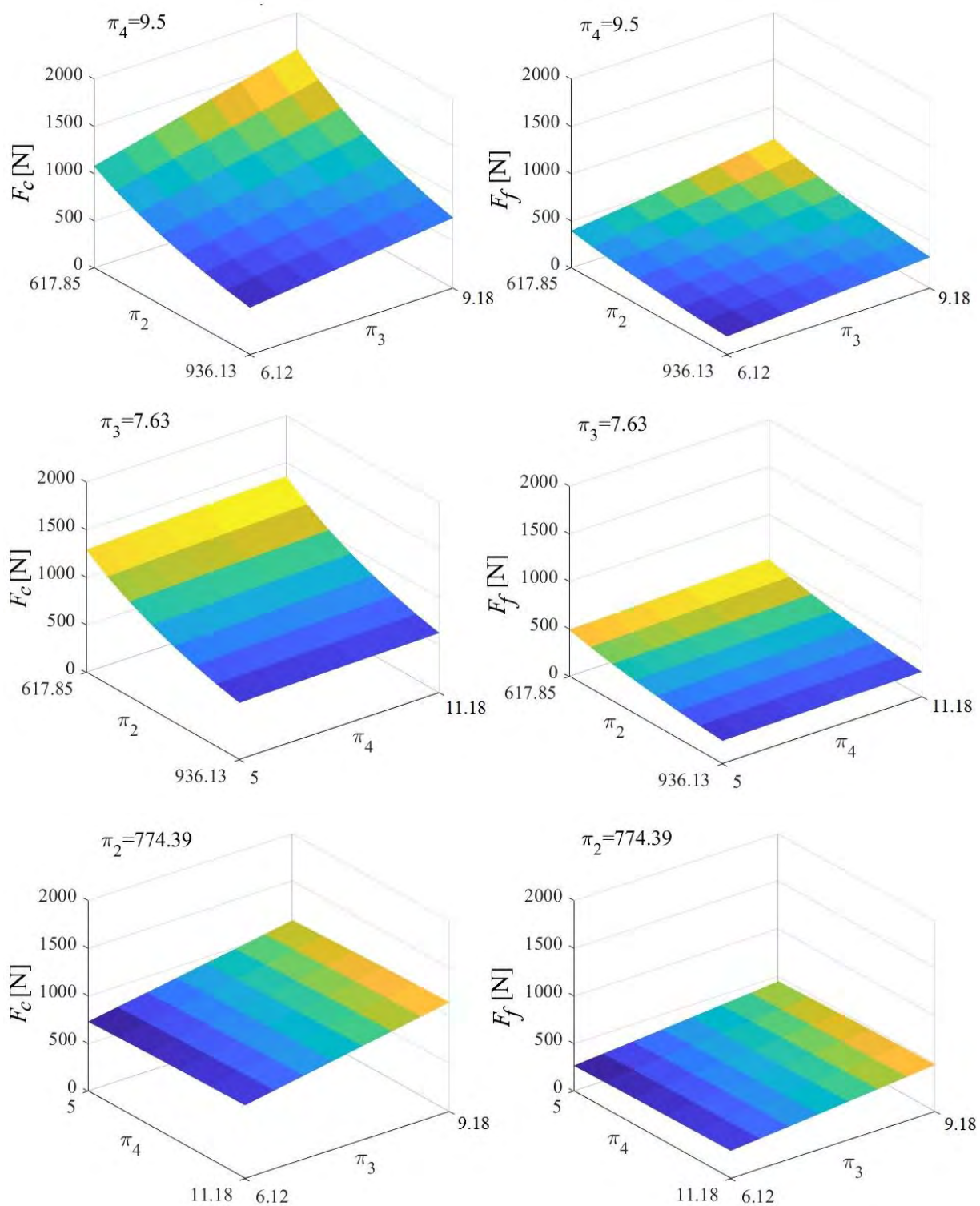
Slika 8.8 Promena glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa za čelik Č.4830 (51CrV4)



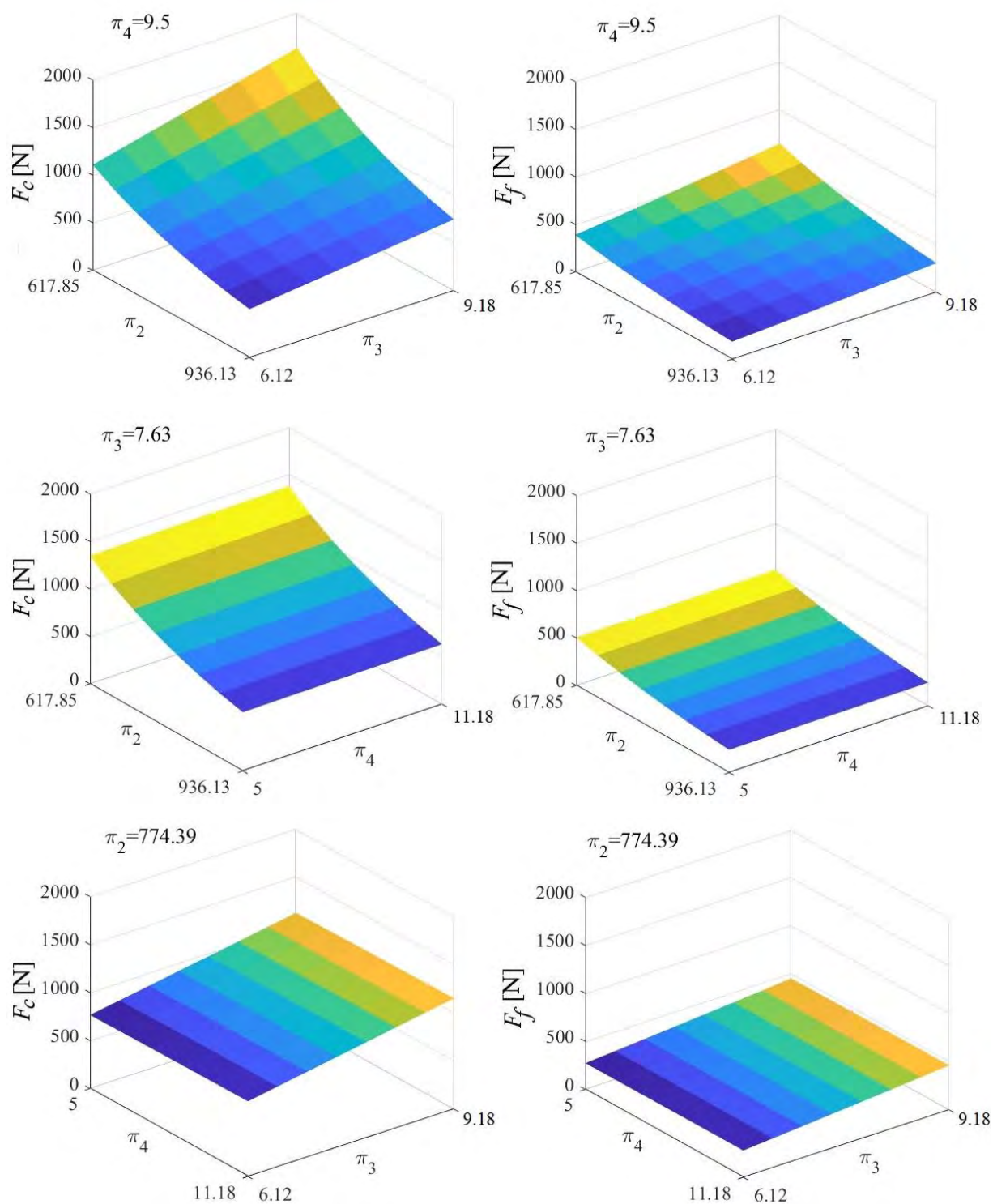
Slika 8.9 Promena glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa za čelik Č.4850 (X155CrVMo12-1)



Slika 8.10 Promena glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa za čelik Č.4382 (20MnCrS5)



Slika 8.11 Promena glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa za čelik Č.1502 (-)



Slika 8.12 Promena glavnog i aksijalnog otpora rezanja u zavisnosti od promene vrednosti bezdimenzionalnih grupa za čelik Č.1531 (C45E)

Konačno, najmanje izražen uticaj na glavni i aksijalni otpor rezanja kod svih istraživanih čelika ima bezdimenzionalna grupa π_4 , koja odražava uticaj orijentacije sečiva reznog alata u toku procesa obrade. Pritom, postoji pozitivna korelacija ove

bezdimenzionalne grupe i komponenata otpora rezanja, pa sa njenim povećanjem, koje je eksperimentu realizovano smanjenjem grudnog ugla, dolazi i do rasta otpora rezanja kod svih istraživanih čelika. Povećanje grudnog ugla povećava ugao smicanja i rezultira smanjenjem debljine strugotine, kao i smanjenjem glavnog i aksijalnog otpora rezanja i samim tim smanjenjem snage rezanja, koja zavisi od glavnog otpora rezanja [159]. Međutim, veliki grudni ugao alata smanjuje otpore rezanja, ali istovremeno smanjuje i čvrstoću vrha reznog alata, što na kraju može dovesti do njegovog loma [160].

Analizom vrednosti predikcija glavnog otpora rezanja koje su prikazane na površinskim dijagramima (slike 8.7 do 8.12) može se pokazati da je za iste uslove obrade glavni otpor rezanja veći kod obrade čelika iz grupe A (manje deformabilni čelici) u odnosu na čelike iz grupe B (deformabilni čelici). Pritom, najveća prosečna vrednost glavnog otpora rezanja se javlja kod obrade čelika Č.4850 (X155CrVMo12–1), dok je najniža prosečna vrednost glavnog otpora rezanja kod obrade čelika Č.1502. Vrednost glavnog otpora rezanja kod čelika Č.4850 (X155CrVMo12–1), je za oko 9.17 % veća u odnosu na čelik Č.1502. Kada je u pitanju aksijalni otpor rezanja, u proseku, za iste uslove obrade, vrednosti su takođe veće kod obrade čelika iz grupe A u odnosu na čelike iz grupe B. Međutim, najveća prosečna vrednost aksijalnog otpora rezanja se javlja kod obrade čelika Č.4382 (20MnCrS5), dok je najniža prosečna vrednost aksijalnog otpora rezanja kod obrade čelika Č.1531 (C45E). Vrednost aksijalnog otpora rezanja kod čelika 20MnCrS5 je za oko 36.83 % veća u odnosu na čelik C45E.

U odnosu na tehnološke parametre i parametre reznog alata može se zaključiti da povećanje koraka ima najveći uticaj na porast glavnog i aksijalnog otpora rezanja. Dubina rezanja takođe utiče na povećanje otpora rezanja, ali u manjoj meri od koraka, dok je uticaj grudnog ugla najmanje izražen. Ovi rezultati su u saglasnosti sa rezultatima prethodnih istraživanja. Naime, *Samsudeensadham* i saradnici [161] su istraživali uticaj parametara na komponente otpora rezanja i zaključili da korak ima veći uticaj na otpore rezanja i temperaturu u poređenju sa dubinom rezanja. *El-Tamimi* i *El-Hossainy* [162] su istraživali uticaj parametara rezanja pri obradi čelika AISI 420 alatom od tvrdog metala. Utvrdili su da je korak parametar koji najviše utiče na glavni otpor rezanja. *Kiran Sagar* i saradnici [163] su ustanovili da je najuticajniji parametar na otpore rezanja korak i odredili optimalne vrednosti parametara obrade kako bi se minimizovali otpori rezanja koji nastaju tokom procesa obrade.

Kreirani modeli pokazuju da se za sve istraživane čelike najmanji otpor rezanja postiže pri većem grudnom uglu, manjoj vitkosti strugotine i većem odnosu brzine rezanja i brzine pomoćnog kretanja, koji se ostvaruje smanjenjem koraka. Sa druge strane, najveći

otpor rezanja se javlja za manji grudni ugao, veću vitkost strugotine i manji odnos brzine rezanja i brzine pomoćnog kretanja. Ove zavisnosti su u skladu sa fizičkom interpretacijom procesa rezanja, pri čemu veći grudni ugao i manja debljina reznog sloja doprinose lakšem odvajanju materijala i manjem opterećenju alata, usled smanjenja površine kontakta između alata i strugotine i smanjenja sile trenja [160]. Međutim, treba istaći da za mnoge materijale predmeta obrade postoji opseg preporučenih vrednosti vitkosti strugotine, a da jako mala vitkost strugotine nije povoljna [23].

Površinski dijagrami na slikama 8.7 do 8.12 pokazuju da nema izraženih interakcija između bezdimenzionalnih grupa. Svaka bezdimenzionalna grupa pokazuje nepromenljiv uticaj na komponente otpora rezanja, nezavisno od vrednosti ostalih bezdimenzionalnih grupa. Drugim rečima, nema kvalitativne promene uticaja pojedinačnih grupa na komponente otpora rezanja u zavisnosti od promena vrednosti drugih bezdimenzionalnih grupa. Odsustvo značajnih interakcija parametara obrade (dubina rezanja, korak, brzina rezanja, brzina pomoćnog kretanja, glavni napadni ugao alata, grudni ugao alata), kada se radi o uticaju na komponente otpora rezanja je prethodno potvrđeno u referentnoj literaturi [164]. Izostanak značajnih interakcija ukazuje na opravdanost primene jednostavnijih stepenih modela, izvedenih primenom dimenzionalne analize i eksperimentalnih planova male rezolucije, za predikciju otpora rezanja kod struganja.

8.2 Validacioni eksperiment

Adekvatna eksperimentalna validacija kreiranih modela za predikciju otpora rezanja je neophodan korak kako bi se osigurala dobra generalizacija sa novim podacima, što je ključno za njihovu dalju primenu. U tom cilju realizovan je validacioni eksperiment za čelike iz obe grupe materijala sa režimima obrade, odnosno vrednostima bezdimenzionalnih grupa, koji prethodno nisu obuhvaćeni inicijalnim, glavnim eksperimentom. Eksperimentalne vrednosti glavnog i aksijalnog otpora rezanja, kao i predikcije kreiranih modela za različite režime rezanja, dati su u tabelama od 8.3 do 8.8.

Tabela 8.3 Vrednosti glavnog (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) u validacionom eksperimentu za čelik Č.4732 (42CrMo4)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija modela	
1	538.28	3.74	5.00	769	222	813.2	232.5
2	484	3.36	11.18	865	288	967.1	265.4
3	807.42	7.48	5.00	692	254	705.1	273.5
4	606.27	7.72	11.18	1237	435	1269.2	469.8
5	970.72	14.61	5.00	977	424	873.6	431.5
6	807.42	11.21	11.18	1058	427	1047.3	464.9

Tabela 8.4 Vrednosti glavnog (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) u validacionom eksperimentu za čelik Č.4830 (51CrV4)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija modela	
1	538.28	3.74	5.00	773	254	789.0	230.8
2	484	3.36	11.18	849	307	905.4	257.8
3	807.42	7.48	5.00	700	265	716.6	299.3
4	606.27	7.72	11.18	1247	487	1315.2	549.0
5	970.72	14.61	5.00	1008	486	963.0	547.8
6	807.42	11.21	11.18	1056	459	1099.4	562.6

Tabela 8.5 Vrednosti glavnog (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) u validacionom eksperimentu za čelik Č.4850 (X155CrVMo12–1)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija modela	
1	743.02	3.74	5.00	767	237	853.3	281.4
2	660.00	3.36	11.18	868	309	944.1	309.9
3	1101.03	7.48	5.00	729	289	764.9	319.5
4	826.73	7.72	11.18	1353	535	1337.8	550.3
5	1323.70	14.61	5.00	1111	599	1007.7	505.2
6	1101.03	11.21	11.18	1162	532	1113.1	528.0

Tabela 8.6 Vrednosti glavnog (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) u validacionom eksperimentu za čelik Č.4382 (20MnCrS5)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija modela	
1	538.28	3.74	5.00	739	280	852.5	356.8
2	484	3.36	11.18	810	318	974.4	409.0
3	807.42	7.48	5.00	715	360	716.8	358.6
4	606.27	7.72	11.18	1248	618	1297.6	653.3
5	970.72	14.61	5.00	973	556	898.1	520.4
6	807.42	11.21	11.18	1069	576	1039.0	580.7

Tabela 8.7 Vrednosti glavnog (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) u validacionom eksperimentu za čelik Č.1502 (-)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija modela	
1	577.43	3.74	5.00	735	240	722.3	219.6
2	519.20	3.36	11.18	794	259	835.4	250.6
3	866.14	7.48	5.00	658	251	669.2	266.8
4	650.36	7.72	11.18	1184	442	1243.1	494.8
5	1041.31	14.61	5.00	890	412	917.0	459.3
6	866.14	11.21	11.18	1005	415	1050.3	489.1

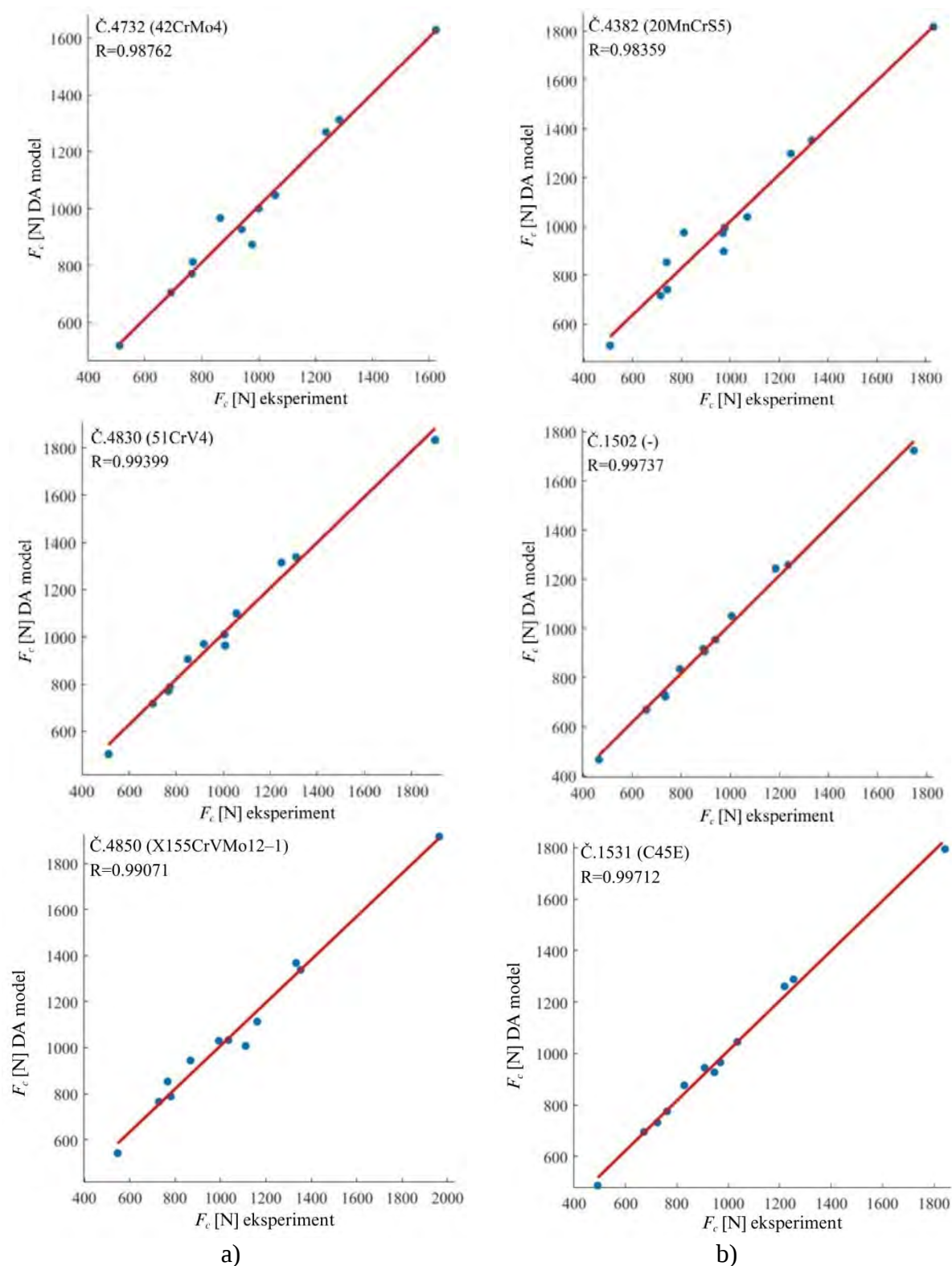
Tabela 8.8 Vrednosti glavnog (F_c) i aksijalnog otpora rezanja (F_f) u validacionom eksperimentu za čelik Č.1531 (C45E)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija modela	
1	577.43	3.74	5.00	762	242	775.3	234.5
2	519.20	3.36	11.18	829	280	876.3	254.9
3	866.14	7.48	5.00	672	237	695.1	265.9
4	650.36	7.72	11.18	1219	433	1260.9	476.8
5	1041.31	14.61	5.00	946	401	927.1	438.1
6	866.14	11.21	11.18	1035	413	1045.1	450.7

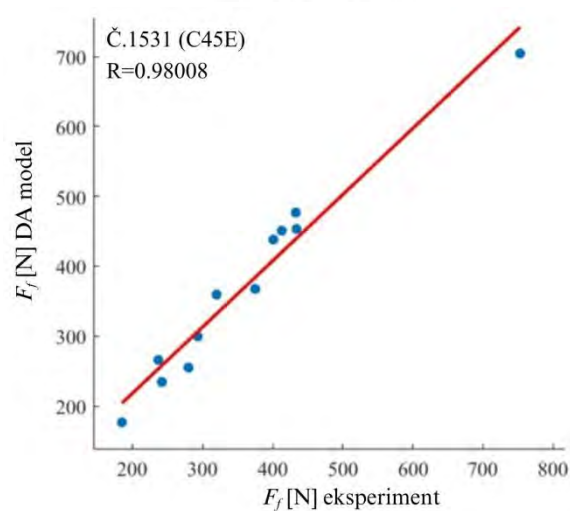
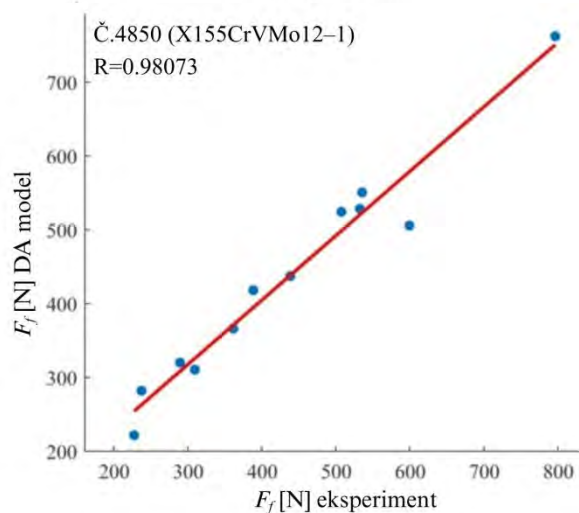
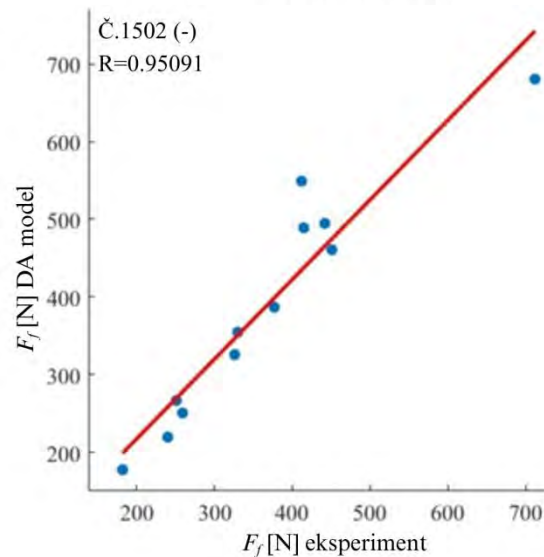
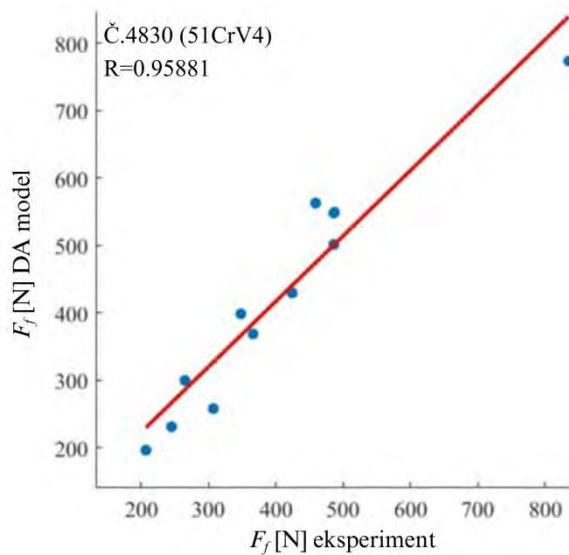
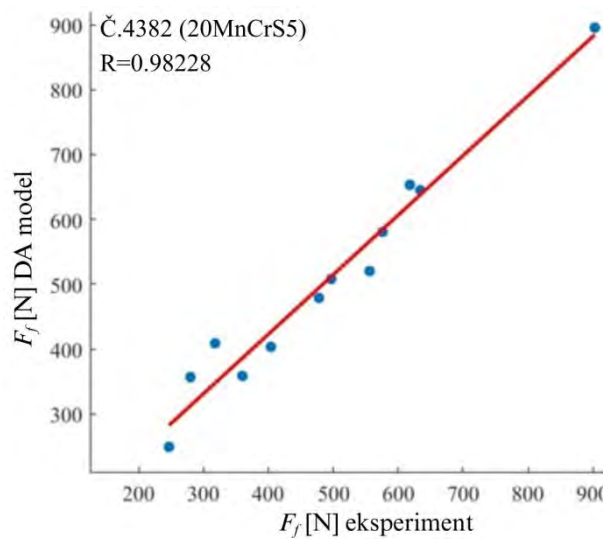
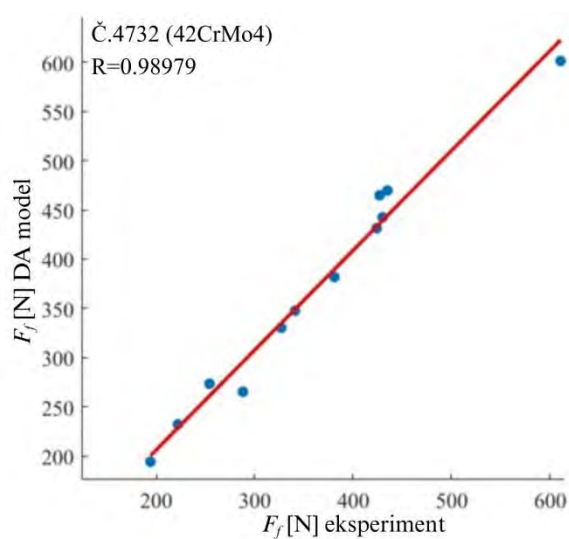
Rezultati dodatnih validacionih ogleda za sve čelike pokazuju da su vrednosti predikcija glavnog i aksijalnog otpora rezanja bliske eksperimentalno izmerenim vrednostima otpora rezanja dobijenim u validacionom eksperimentu. Kao što se može videti iz tabela 8.3 do 8.8, validacioni ogledi 3 i 4 su realizovani unutar obuhvaćenog eksperimentalnog hiperprostora iz glavnog eksperimenta, dok su validacioni ogledi 1 i 2, kao i validacioni ogledi 5 i 6, realizovani van obuhvaćenog eksperimentalnog hiper-prostora iz glavnog eksperimenta. Može se uočiti da su odstupanja između predikcija modela i eksperimentalno izmerenih vrednosti glavnog i aksijalnog otpora rezanja najmanja upravo u validacionim ogledima 3 i 4, što je i očekivano s obzirom na to da se radi o interpolaciji. Takođe, za sve istraživane čelike i većinu validacionih ogleda, nisu primetna drastična odstupanja između predikcija modela i eksperimentalno izmerenih vrednosti za ostale režime rezanja. Međutim, treba napomenuti da veća promena u hiper-prostoru parametara može zahtevati upotrebu drugačijeg modela, koji bi eventualno uključivao interakcijske članove, s obzirom na izmenjenu mehaniku rezanja.

Analiza kreiranih modela za predikciju glavnog i aksijalnog otpora rezanja, uzimajući u obzir podatke iz glavnog i validacionog eksperimenta, izvršena je izračunavanjem

koeficijenta korelacije između predikcija modela i eksperimentalnih vrednosti za glavni otpor rezanja (slika 8.13) i aksijalni otpor rezanja (slika 8.14).



Slika 8.13 Korelacije između predikcija modela i eksperimentalnih vrednosti glavnog otpora rezanja: a) čelici iz grupe A, b) čelici iz grupe B



a)

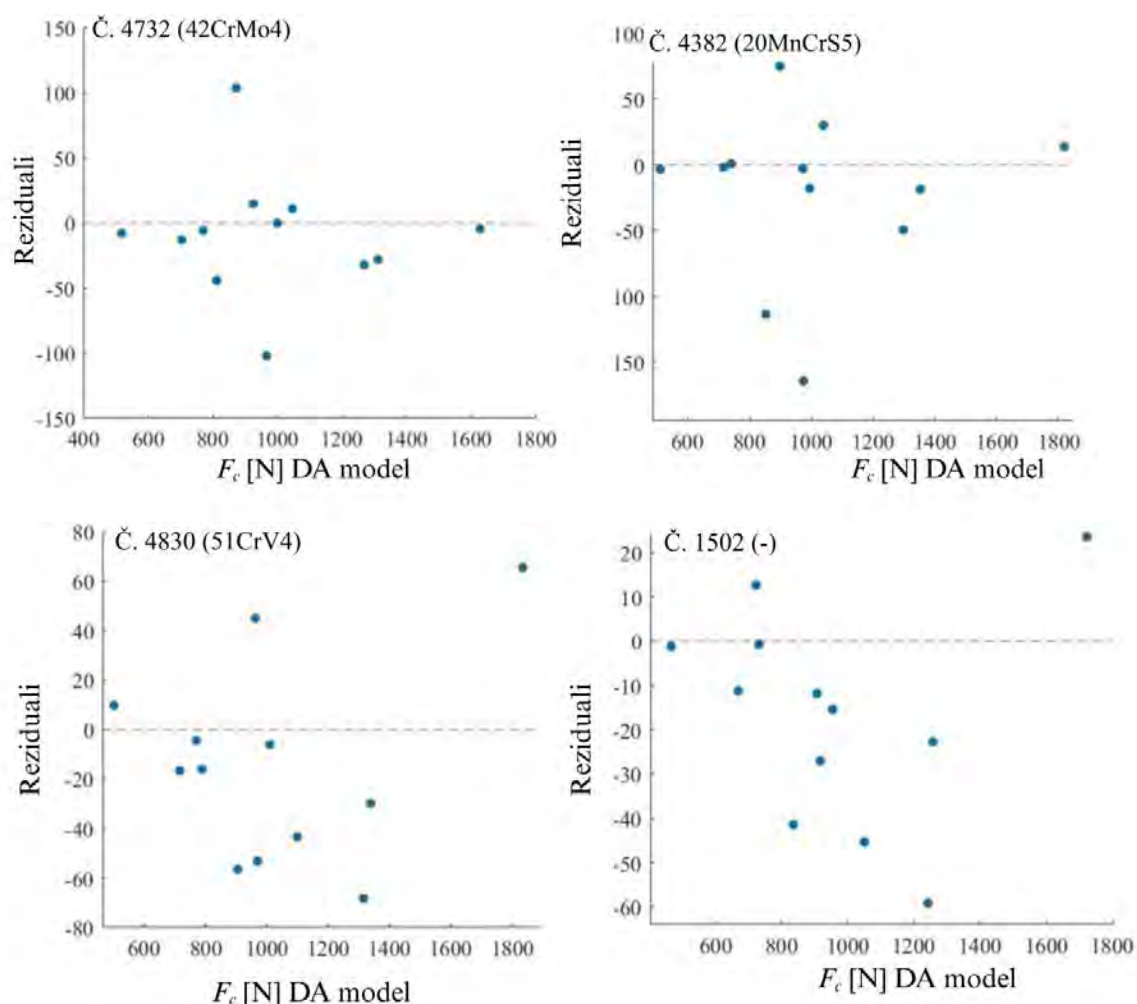
b)

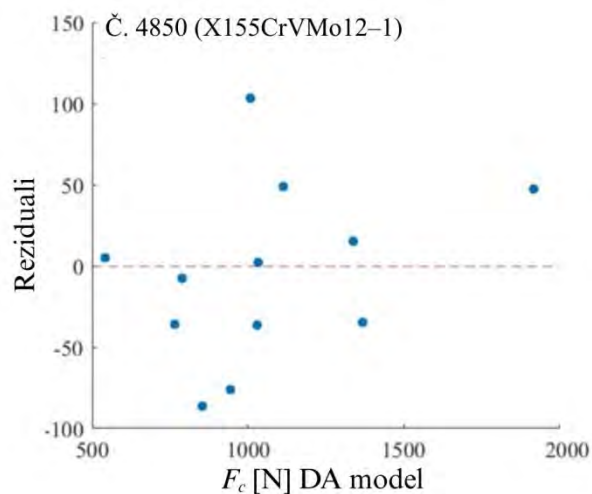
Slika 8.14 Korelacije između predikcija modela i eksperimentalnih vrednosti aksijalnog otpora rezanja: a) čelici iz grupe A, b) čelici iz grupe B

Za sve kreirane modele, koeficijenti korelacije između predikcija i eksperimentalnih vrednosti glavnog otpora rezanja kreću se u opsegu od 0.984 do 0.997. Ovakve visoke vrednosti ukazuju da predikcioni modeli adekvatno aproksimiraju eksperimentalne podatke, obezbeđuju zadovoljavajuću tačnost predikcija i potvrđuju pouzdanost predloženih modela.

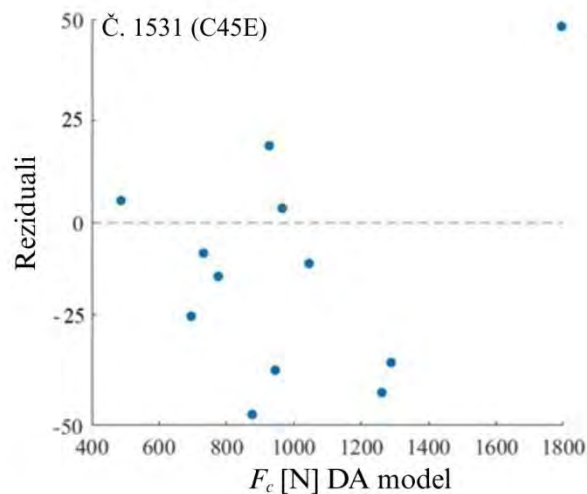
Sličan zaključak se može izvesti i u slučaju modela za predikciju aksijalnog otpora rezanja, s obzirom na visoke vrednosti koeficijenata korelacije, koji se kreću u opsegu od 0.951 do 0.989.

Dodatno, radi dalje procene adekvatnosti kreiranih modela, izvršena je analiza reziduala, odnosno razlika između eksperimentalnih vrednosti i vrednosti predikcija modela za glavni i aksijalni otpor rezanja. Dijagrami reziduala za glavni otpor rezanja su prikazani na slici 8.15, a na slici 8.16 su prikazani dijagrami reziduala za aksijalni otpor rezanja.





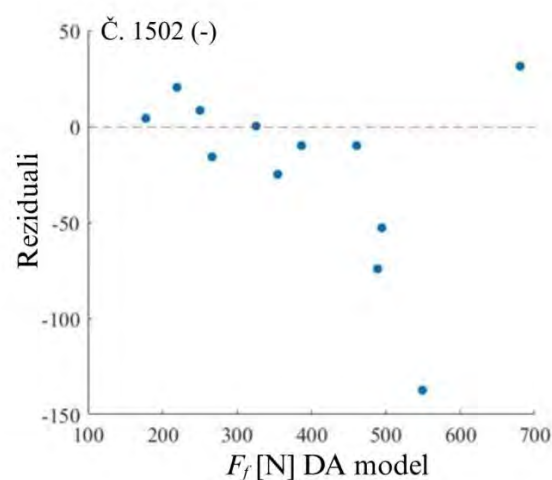
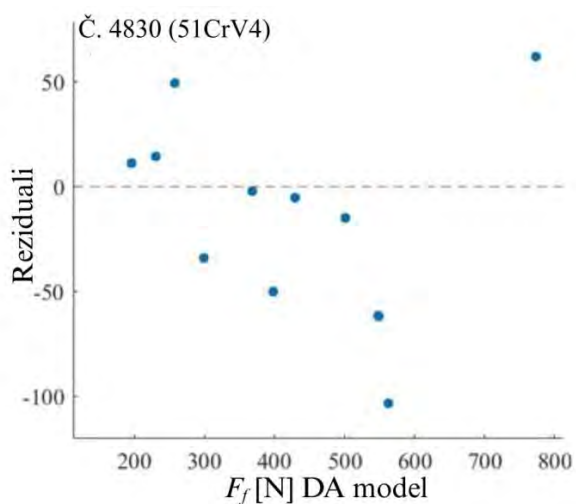
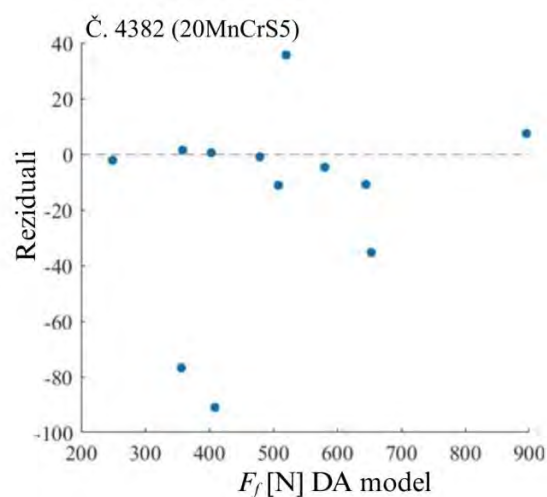
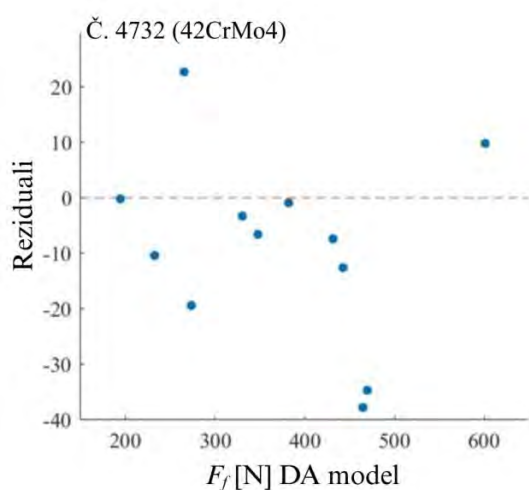
a)

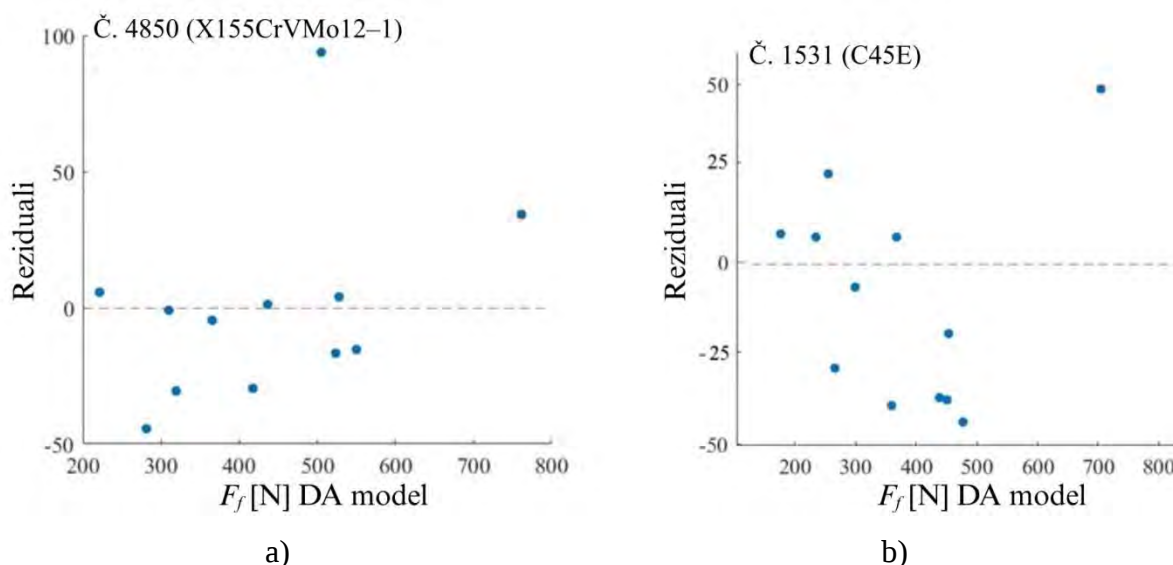


b)

Slika 8.15 Dijagrami reziduala glavnog otpora rezanja: a) čelici iz grupe A, b) čelici iz grupe

B





Slika 8.16 Dijagrami reziduala aksijalnog otpora rezanja: a) čelici iz grupe A, b) čelici iz grupe B

Reziduali glavnog i aksijalnog otpora rezanja za obe grupe čelika ne pokazuju prepoznatljive obrasce koji bi ukazivali na sistematske greške modela. Takođe, ne uočava se značajna zavisnost između vrednosti otpora rezanja i reziduala, što potvrđuje konzistentnu tačnost predikcija modela za posmatrani opseg vrednosti otpora rezanja. Ravnomerna raspodela reziduala oko nule potvrđuje adekvatnost i nepristrasnost modela.

8.3 Modeli koeficijenata odnosa aksijalnog i glavnog otpora rezanja

Analiza komponenata otpora rezanja, kao i koeficijenata odnosa, pruža značajne informacije koje mogu poslužiti za bolje razumevanje procesa obrade, projektovanje tehnologije obrade struganjem, optimizaciju uslova obrade, kao i izbor alata [165]. Odnos aksijalnog otpora rezanja i glavnog otpora rezanja (R_F) je važan pokazatelj kod procesa obrade struganjem [166]. Naime, kako su zaključili Choudhury i Kishore [167], praćenje koeficijenta odnosa aksijalnog i glavnog otpora rezanja (F_f/F_c) omogućava praktičan i pouzdan pristup za kvantifikaciju i praćenje habanja reznog alata tokom procesa obrade. Pored toga, ovaj koeficijent odnosa pruža uvid u mehaniku procesa rezanja, omogućava bolje razumevanje opterećenja alata [168], kao i uočavanje promena u mehanizmima i intenzitetu trenja na grudnoj površini alata i procesu formiranja strugotine [169]. Sve ove pojave posledično utiču na druge aspekte obrade, kao što su ugibanje i vibracije reznog alata, integritet obrađene površine, kao i energetske efikasnost procesa obrade. Ako je vrednost

koeficijenta odnosa (R_F) blizu jedinice, to znači da se proces rezanja odvija pomoću mehanizma „oranja“, a ne mehanizma rezanja [170]. Velika vrednost koeficijenta odnosa (R_F) može ukazivati na značajni aksijalni otpor rezanja i potencijalnu nestabilnost tokom procesa obrade, što može dovesti do ugiba alata ili obratka i pojave vibracija, naročito kod obrade tankozidnih/vitkih obradaka, što posledično negativno utiče na geometrijsku tačnost i integritet obrađene površine [171]. Pored toga, sa aspekta efikasnosti, u ovakvim uslovima obrade, veći deo energije troši se na aksijalno pomeranje alata, s obzirom da aksijalni otpor rezanja određuje snagu potrebnu za napajanje pogona alatne mašine [159], umesto na formiranje i uklanjanje strugotine.

S obzirom na praktični značaj koeficijenta odnosa aksijalnog i glavnog otpora rezanja (R_F), kreirani su i predikcioni modeli za svih šest istraživanih čelika, kako bi se dobio bolji uvid u uticajnost bezdimenzionalnih grupa, kao sveobuhvatnije procene obradljivosti ovih čelika. Modeli za predikciju koeficijenta odnosa aksijalnog i glavnog otpora rezanja (R_F) čelika iz grupe A su dati jednačinama 8.13 do 8.15, dok su za čelike iz grupe B dati jednačinama 8.16 do 8.18.

$$\text{Č.4732 (42CrMo4)} \quad R_F = 0.0377 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.2559} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.2906} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0214} \quad (8.13)$$

$$\text{Č.4830 (51CrV4)} \quad R_F = 0.0539 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.1711} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.4140} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0436} \quad (8.14)$$

$$\begin{array}{l} \text{Č.4850} \\ \text{(X155CrVMo12-1)} \end{array} \quad R_F = 0.0533 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.2216} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.2113} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0514} \quad (8.15)$$

$$\begin{array}{l} \text{Č.4382} \\ \text{(20MnCrS5)} \end{array} \quad R_F = 0.1405 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.1234} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.1852} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0443} \quad (8.16)$$

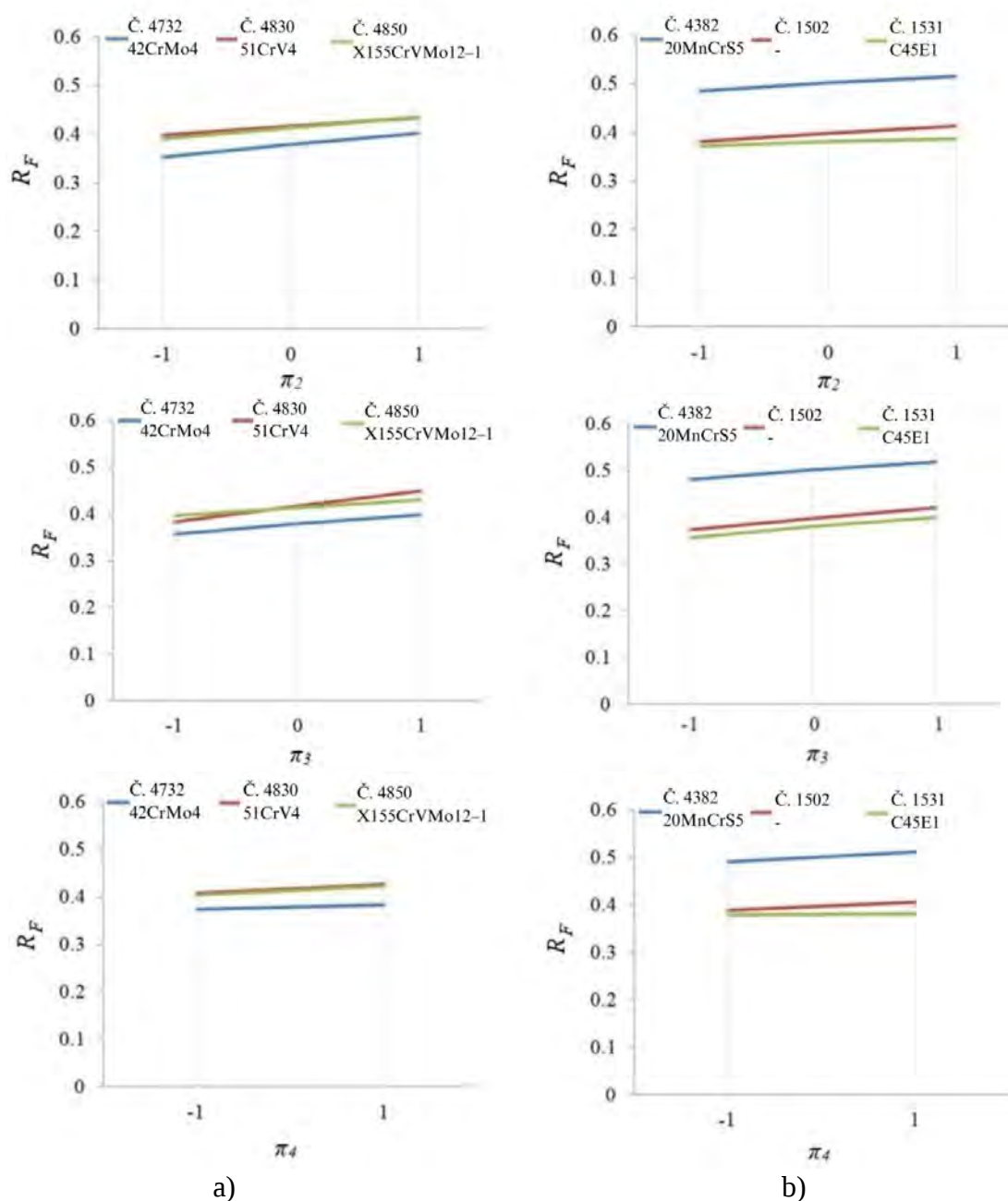
$$\begin{array}{l} \text{Č.1502} \\ \text{(-)} \end{array} \quad R_F = 0.0686 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.1616} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.2963} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0439} \quad (8.17)$$

$$\begin{array}{l} \text{Č.1531} \\ \text{(C45E)} \end{array} \quad R_F = 0.1276 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.0744} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.2953} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0005} \quad (8.18)$$

Uticaj bezdimenzionalnih π grupa na promenu vrednosti koeficijenta odnosa aksijalnog i glavnog otpora rezanja (R_F) za sve istraživane čelike je prikazan na slici 8.17.

Na osnovu kreiranih modela može se zaključiti da sve bezdimenzionalne grupe imaju pozitivnu korelaciju sa koeficijentom odnosa aksijalnog i glavnog otpora rezanja (R_F), što znači da sa porastom vrednosti bezdimenzionalnih grupa dolazi do povećanja vrednosti koeficijenta odnosa aksijalnog i glavnog otpora rezanja (R_F). Kao što se jasno može videti sa slike 8.17, za obe grupe čelika dominantan uticaj na koeficijent odnosa aksijalnog i glavnog

otpora rezanja (R_F) ima bezdimenzionalna grupa π_3 , tj. vitkost strugotine. Naročito kod čelika 51CrV4 i čelika Č.1502 važno je kontrolisati vitkost strugotine s obzirom na njen najveći uticaj. Uticaj bezdimenzionalne grupe π_2 je umeren kod čelika iz grupe A (manje deformabilni čelici), dok je kod čelika iz grupe B (deformabilni čelici) manje izražen. Sa druge strane, uticaj bezdimenzionalne grupe π_4 , koja odražava uticaj orijentacije sečiva reznog alata u toku procesa obrade, na koeficijent odnosa kod svih istraživanih čelika je najmanje izražen.



Slika 8.17 Promena koeficijenta odnosa aksijalnog i glavnog otpora rezanja u zavisnosti od bezdimenzionalnih grupa za: a) čelike iz grupe A, b) čelike iz grupe B

U okviru grupe A, u različitim uslovima obrade vrednosti koeficijenta odnosa su najveće kod čelika 51CrV4, zatim sledi čelik X155CrVMo12–1 i na kraju 42CrMo4. U okviru grupe B, ali i uopšte sagledavajući sve čelike, u različitim uslovima obrade vrednosti koeficijenta odnosa su izrazito veće kod čelika 20MnCrS5, pre svega s obzirom na najveću vrednost osnovne konstante, a ne tako izraženih uticaja bezdimenzionalnih grupa.

Na osnovu analize kreiranih modela može se zaključiti da kombinacija manjih dubina rezanja i najvećeg mogućeg koraka, čija vrednost bi mogla biti ograničena imajući u vidu ograničenja raspoložive snage mašine alatke ili postavljenim ciljevima po pitanju postizanja kvaliteta obrađene površine, obezbeđuje uslove obrade gde koeficijent odnosa aksijalnog i glavnog otpora rezanja ima najmanju vrednost. Obrada u ovakvim režimima obezbeđuje manji intenzitet habanja reznog alata i omogućava postizanje boljih performansi u pogledu kvaliteta i produktivnosti obrade.

8.4 Prošireni modeli otpora rezanja sa popravnim koeficijentom za poluprečnik zaobljenja vrha alata

Otpori rezanja u procesu struganja ne zavise samo od fizičko-mehaničkih svojstava materijala obratka i tehnoloških parametara, već i od geometrije reznog alata, koja utiče na formiranje strugotine (debljinu, širinu i oblik). Poluprečnik zaobljenja vrha alata je važan parametar geometrije reznog alata koji utiče na otpore rezanja kod struganja. Povećanje poluprečnika zaobljenja vrha alata ne samo da povećava glavni otpor rezanja, već utiče i na komponente otpora rezanja, tj. uzrokuje promene odnosa aksijalnog i radijalnog otpora rezanja [107], [153], [172], [173], [174], [175]. Treba međutim istaći mogućnost postojanja nelinearnog uticaja poluprečnika zaobljenja vrha alata, kao i interakcijskih uticaja poluprečnika zaobljenja vrha alata sa ostalim faktorima na komponente otpora rezanja. Naime, u radu Tzotzis-a i saradnika [174], gde je izvršena analiza eksperimentalnih rezultata i FEM simulacija, variranjem koraka, brzine rezanja i poluprečnika zaobljenja vrha alata, navodi se da su statistički najznačajniji uticaji na rezultujući otpor rezanja kod struganja čelika 42CrMo4 kvadratni uticaj poluprečnika zaobljenja vrha alata i dvofaktorska interakcija poluprečnika zaobljenja vrha alata i koraka. Ova zapažanja ukazuju da kod obrade određenih materijala i u obuhvaćenom eksperimentalnom hiper-prostoru, uticaj poluprečnika zaobljenja vrha alata može biti promenljiv i nelinearan, što zahteva realizaciju eksperimenta velike rezolucije radi kreiranja adekvatnijeg modela i razumevanja njegovog uticaja. Istraživanja

pomenutih autora su takođe pokazala da veći poluprečnik zaobljenja vrha alata može dovesti, u zavisnosti od uslova obrade, do većih vrednosti glavnog otpora rezanja, čak i preko 30%.

S obzirom na uticajnost poluprečnika zaobljenja vrha alata, jedan od ciljeva naučnog istraživanja je i analiza mogućnosti definisanja proširenih modela za predikciju otpora rezanja sa popravnim koeficijentom za poluprečnik zaobljenja vrha alata.

Za određivanje vrednosti popravnih koeficijenata (C_r) modela za predikciju glavnog i aksijalnog otpora rezanja realizovana su po tri dodatna eksperimentalna ogleda u eksperimentalnim uslovima koji odgovaraju glavnom i validacionom eksperimentu, s tim što je korišćena izmenljiva pločica sa poluprečnikom zaobljenja vrha od $r_\epsilon = 1.2$ mm. Analizom dobijenih eksperimentalnih rezultata (ogledi 3, 5 i 6), utvrđeno je da promena poluprečnika zaobljenja vrha alata kod određenih čelika iz grupe A i B može imati promenljiv, nekonzistentan uticaj na promenu glavnog i aksijalnog otpora rezanja, naročito sa promenom vrednosti grudnog ugla. Iako bi u ovim slučajevima predloženi predikcioni modeli mogli biti prošireni interakcijskim članovima, prošireni modeli otpora rezanja sa popravnim koeficijentom za poluprečnik zaobljenja vrha alata su izvedeni za dva čelika iz grupe B (Č.4382 (20MnCrS5) i Č.1502), kod kojih je uočena konzistentnost uticaja promene poluprečnika zaobljenja vrha alata na rezultujuće vrednosti glavnog i aksijalnog otpora rezanja. Prošireni modeli predikcije glavnog i aksijalnog otpora rezanja sa popravnim koeficijentom za poluprečnik zaobljenja vrha alata dati su jednačinama 8.19 do 8.22:

$$\text{Č.4382} \quad F_c = 2.3782 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.1060} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.8577} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0292} \cdot C_r \quad (8.19)$$

$$(20\text{MnCrS5}) \quad F_f = 0.3342 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.2294} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{1.0429} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0735} \cdot C_r \quad (8.20)$$

$$\text{Č.1502} \quad F_c = 1.2656 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.1270} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.985} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.0636} \cdot C_r \quad (8.21)$$

$$(-) \quad F_f = 0.0868 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.2885} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{1.2819} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{0.1075} \cdot C_r \quad (8.22)$$

U slučaju korišćenja poluprečnika zaobljenja vrha alata od $r_\epsilon = 0.8$ mm, popravni koeficijent ima vrednost $C_r = 1$, dok su vrednosti popravnih koeficijenta u slučaju korišćenja poluprečnika zaobljenja vrha alata od $r_\epsilon = 1.2$ mm date u tabeli 8.9.

Tabela 8.9 Vrednosti popravni koeficijenata za poluprečnik zaobljenja vrha alata (C_r) za čelike Č.4382 (20MnCrS5) i Č.1502 (-)

	F_c	F_f
Č.4382 (20MnCrS5)	1.044	1.073
Č.1502 (-)	1.050	1.076

Iz tabele 8.9 se može videti da sa povećanjem poluprečnika zaobljenja vrha alata dolazi do porasta glavnog i aksijalnog otpora rezanja, pri čemu je povećanje aksijalnog otpora rezanja nešto izraženije. Ovo se može objasniti povećanjem zone kontakta između reznog alata i obratka, posebno u aksijalnom pravcu [153]. Analiza eksperimentalnih podataka pokazala je nešto veći rast otpora rezanja u slučaju većih grudnih uglova. Potrebno je istaći da je u cilju poboljšanja tačnosti modela za predikciju otpora rezanja potrebno izvršiti precizniju procenu popravni koeficijenata realizacijom većeg broja dodatnih eksperimentalnih oglada kako bi se sagledali interakcijski uticaji ulaznih parametara.

Dodatni realizovani eksperimentalni ogladi sa vrednostima bezdimenzionalnih grupa, eksperimentalno izmerenim vrednostima glavnog i aksijalnog otpora rezanja, kao i predikcijama proširenog modela dati su u tabelama 8.10 i 8.11.

Tabela 8.10 Dodatni eksperimentalni ogladi realizovani reznom pločicom sa poluprečnikom zaobljenja vrha alata od $r_\epsilon = 1.2$ mm (Č.4382 (20MnCrS5))

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija proširenog modela	
1	538.28	9.03	5.00	1972	1081	1897.1	961
2	538.28	6.23	11.18	1300	566	1412.1	692
3	881.57	6.12	5.00	555	283	533.8	267.4

Tabela 8.11 Dodatni eksperimentalni ogladi realizovani reznom pločicom sa poluprečnikom zaobljenja vrha alata od $r_\epsilon = 1.2$ mm (Č.1502 (-))

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija proširenog modela	
1	577.43	9.03	5.00	1882	844	1809.5	714.6
2	577.43	6.23	11.18	1226	392	1320.6	483.9
3	945.68	6.12	5.00	505	202	489.5	186.5

Model vrlo precizno predviđa glavni otpor rezanja (F_c) za sve oglade. Kod aksijalnog otpora rezanja (F_f) uočavaju se veća odstupanja, naročito u ogledu 2 (oko 20%), što potvrđuje

raniji zaključak da je aksijalni otpor rezanja osetljiviji na trenje i mikrogeometriju kontakta. Ukupno posmatrano, model dobro reprodukuje ponašanje otpora rezanja za materijal Č.1502.

Ukoliko se pretpostavi linearna zavisnost između popravnih koeficijenata i poluprečnika zaobljenja vrha alata, mogu se izvesti i sledeći modeli za određivanje vrednosti popravnih koeficijenata u slučaju korišćenja reznih pločica sa poluprečnicima zaobljenja vrha alata od $r_\varepsilon = 0.4$ mm i $r_\varepsilon = 1.6$ mm:

$$\text{Č.4382} \quad F_c: C_r = 0.912 + 0.11 \cdot r_\varepsilon \quad (8.23)$$

$$(20\text{MnCrS5}) \quad F_f: C_r = 0.854 + 0.1825 \cdot r_\varepsilon \quad (8.24)$$

$$\text{Č.1502} \quad F_c: C_r = 0.9 + 0.125 \cdot r_\varepsilon \quad (8.25)$$

$$(-) \quad F_f: C_r = 0.848 + 0.19 \cdot r_\varepsilon \quad (8.26)$$

Kreiranjem prethodnih modela omogućena je veća fleksibilnost i primenljivost modela za predikciju glavnog i aksijalnog otpora rezanja, uključujući korišćenje reznih alata sa različitim poluprečnicima zaobljenja vrha alata.

8.5 Adekvatnost predloženih predikcionih modela otpora rezanja

Primenom dimenzionalne analize identifikovane su bezdimenzionalne grupe i struktura predikcionih modela otpora rezanja. Realizacijom eksperimentalnih planova male rezolucije utvrđeno je da predloženi stepeno-multiplikativni model daje dobre rezultate predikcije otpora rezanja, naročito u okviru inicijalno pokrivenog eksperimentalnog hiperprostora. U cilju potvrde forme i strukture predloženih modela i njihove mogućnosti primene u različitim uslovima obrade, potvrde prethodnih zapažanja po pitanju uticajnosti bezdimenzionalnih grupa, kao i upoređenja rezultata sa drugim modelima za predikciju otpora rezanja, kreirani su modeli za predikciju glavnog otpora rezanja korišćenjem rezultata iz:

- realizovanog eksperimentalnog istraživanja glavnog otpora rezanja kod struganja čelika Č.4732 (42CrMo4) koristeći držač CORUN PCLNR 3225P 12 i rezne pločice Pramet CNMG 120408E–SF T8430, primenom potpunog faktornog plana sa 27 opita i tri nivoa variranja brzine rezanja, dubine rezanja i koraka, i
- eksperimentalnog istraživanja glavnog otpora rezanja kod struganja čelika Č.1531 (C45E) primenom centralnog kompozicionog plana sa 46 ogleda i pet nivoa variranja brzine rezanja, dubine rezanja i koraka [68].

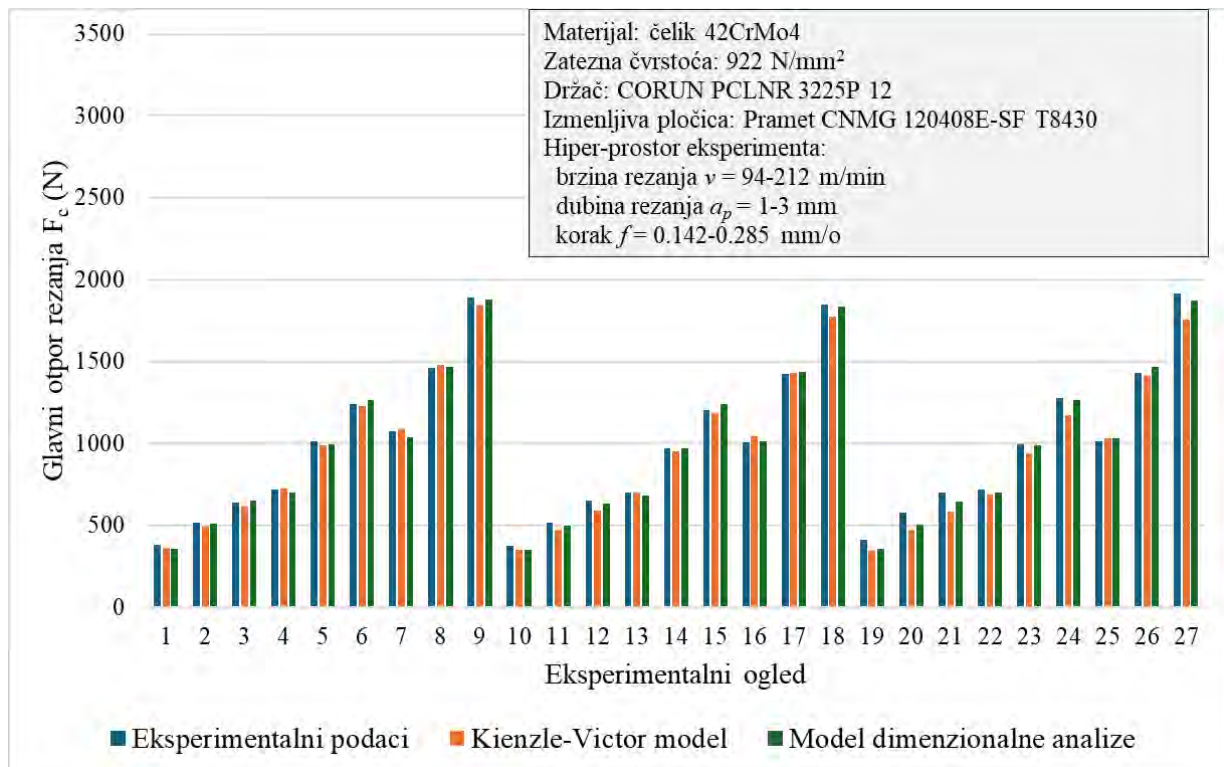
Modeli za predikciju glavnog otpora rezanja kod struganja čelika 42CrMo4 i čelika

C45E kreirani su izborom svega po pet ogleda, kojima je pokriven ceo opseg promene vitkosti strugotine, a za konstantnu (srednju) vrednost brzine rezanja. Minimizacijom sume kvadrata određeni su nepoznati koeficijenti predloženih modela otpora rezanja, koji su prikazani sledećim jednačinama:

$$\begin{array}{l} \text{Č.4732} \\ (42\text{CrMo4}) \end{array} \quad F_c = 17.337 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{0.1821} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{0.967} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{-1.2973} \quad (8.27)$$

$$\begin{array}{l} \text{Č.1531} \\ (C45E) \end{array} \quad F_c = 14.786 \cdot R_m \cdot f^2 \cdot \left(\frac{v}{v_f}\right)^{-0.1178} \cdot \left(\frac{a_p}{f}\right)^{1.02} \cdot \left(\frac{\kappa}{\gamma_o}\right)^{-0.448} \quad (8.28)$$

Uporedne vrednosti predikcija kreiranog modela, eksperimentalno izmerenih vrednosti glavnog otpora rezanja i predikcije modela *Kienzle-Victor* kod struganja čelika 42CrMo4 su date na slici 8.18.

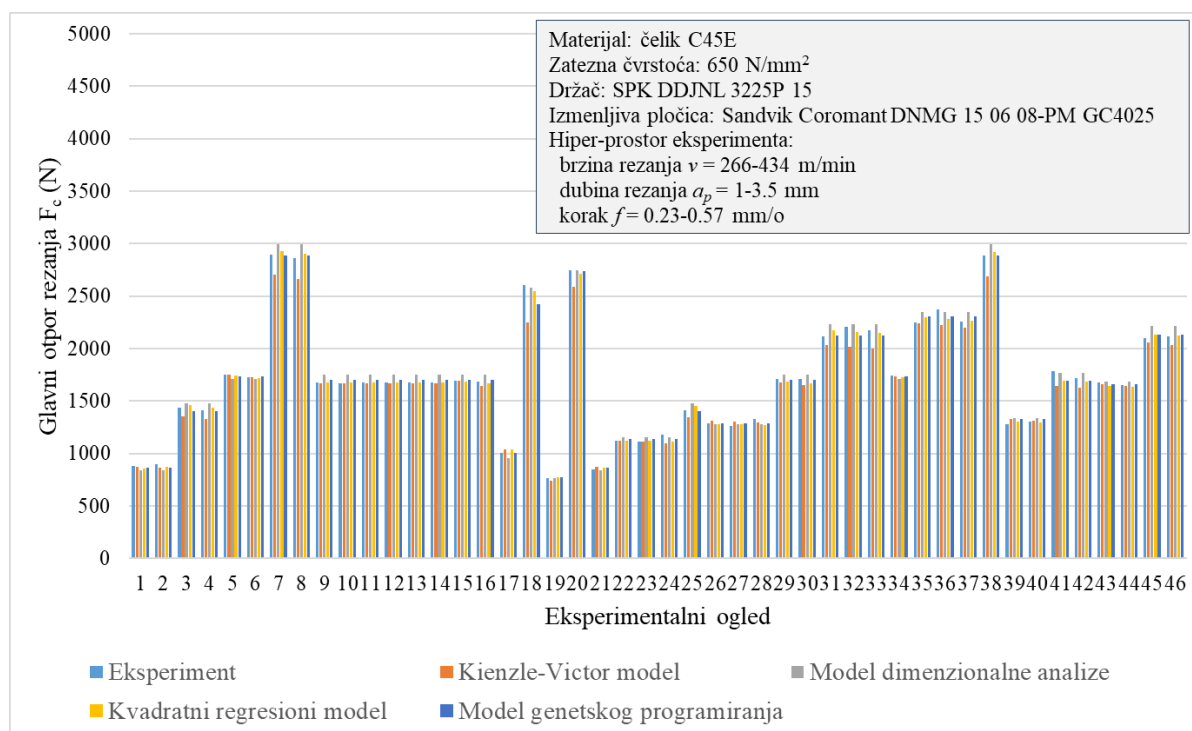


Slika 8.18 Glavni otpor rezanja kod struganja čelika 42CrMo4 u različitim režimima obrade

Kao što se može videti sa slike 8.18, predikcije modela *Kienzle-Victor* i kreiranog modela dimenzionalne analize pokazuju veoma dobro slaganje sa eksperimentalno određenim vrednostima glavnog otpora rezanja za sve ogleda. Za ceo eksperiment, srednje apsolutne procentualne greške modela *Kienzle-Victor* i kreiranog modela dimenzionalne analize iznose 5.17% i 3.14%, respektivno.

Uporedne vrednosti predikcija kreiranog modela, eksperimentalno izmerenih vrednosti glavnog otpora rezanja, predikcije modela *Kienzle-Victor*, kao i predikcija modela genetskog programiranja i kvadratnog regresionog modela [68] kod struganja čelika C45E su date na slici 8.19.

Kao što se može videti sa slike 8.19, predikcije modela *Kienzle-Victor*, modela genetskog programiranja, kvadratnog regresionog modela [68] i kreiranog modela dimenzionalne analize pokazuju veoma dobro slaganje sa eksperimentalno određenim vrednostima glavnog otpora rezanja. Za ceo eksperiment, srednje apsolutne procentualne greške modela *Kienzle-Victor*, modela genetskog programiranja, kvadratnog regresionog modela [68] i kreiranog modela dimenzionalne analize iznose 3.31%, 1.58%, 1.64% i 3.09%, respektivno.



Slika 8.19 Glavni otpor rezanja kod struganja čelika C45E u različitim režimima obrade

Kvadratni regresioni model, a naročito model genetskog programiranja, pokazuju viši stepen tačnosti u predikciji glavnog otpora rezanja, pre svega zbog svoje sposobnosti da efikasno modeliraju nelinearnosti i interakcije. Međutim, ovakvi modeli zahtevaju realizaciju složenijeg eksperimenta, s obzirom na to da precizno određivanje većeg broja koeficijenata modela zahteva veći broj eksperimentalnih ogleda, što povećava troškove realizacije eksperimenta, ali i potrebno vreme kreiranje modela. Sa druge strane, predloženi predikcioni

model, zasnovan na dimenzionalnoj analizi, iako jednostavnije forme i sa znatno manjim brojem parametara, pokazuje dovoljnu tačnost i fleksibilnost da uspešno aproksimira promenu glavnog otpora rezanja u širokom spektru režima obrade. S obzirom da kreiranje predloženih predikcionih modela zahteva znatno manji broj ogleda, ovi modeli su pogodni za praktičnu primenu, naročito u situacijama kada nisu dostupne vrednosti jediničnog specifičnog otpora rezanja ($k_{c1.1}$) i eksponenta (m_c) za primenu *Kienzle-Victor*-ovog modela ili kada su eksperimentalni resursi ograničeni, a postoji potreba za brzom i dovoljno preciznom procenom otpora rezanja. Takođe, sa aspekta interpretabilnosti, model genetskog programiranja sadrži složene funkcionalne izraze bez jasnog fizičkog značenja, što otežava njegovo tumačenje. Sa druge strane, *Kienzle-Victor*-ov model i predloženi model dimenzionalne analize imaju bolju interpretabilnost zahvaljujući jednostavnoj strukturi i utemeljenosti u fizičkim principima procesa rezanja.

Na osnovu prethodnih analiza može se zaključiti da predloženi stepeni multiplikativni model, zasnovan na primeni dimenzionalne analize, poseduje odgovarajuću formu i strukturu i predstavlja ekonomično i efikasno rešenje za pouzdanu procenu glavnog otpora rezanja kod struganja.

8.6 Analiza obradljivosti istraživanih čelika sa aspekta otpora rezanja

Obradljivost, kao tehnološko svojstvo materijala, predstavlja meru efikasnosti procesa obrade materijala u odnosu na mogućnost postizanja performansi obrade iz kategorija kvaliteta obrade, produktivnosti, ekonomičnosti i ekolozičnosti [4], [18], [176]. Obradljivost ne zavisi samo od materijala predmeta obrade, već i od metode obrade, karakteristika reznog alata i pribora, izabranih režima i uslova obrade [18], [177]. Procena obradljivosti može služiti kao vodič za izbor preliminarnih režima obrade za dalje poboljšanje ili optimizaciju procesa rezanja [29], a vrši se sagledavanjem većeg broja kriterijuma koji predstavljaju relativne vrednosti performansi procesa obrade. Najčešće korišćeni kriterijumi (aspekti) za procenu obradljivosti pri obradi struganjem su [178], [179]: postojanost reznog alata (habanje reznog alata), otpori rezanja, temperatura u zoni rezanja, oblik strugotine, hrapavost obrađene površine, proizvodnost i potrošnja energije. Potrebno je istaći da navedeni pokazatelji obradljivosti mogu imati promenljivu relativnu značajnost, kao i da mogu biti međusobno suprotstavljeni [18].

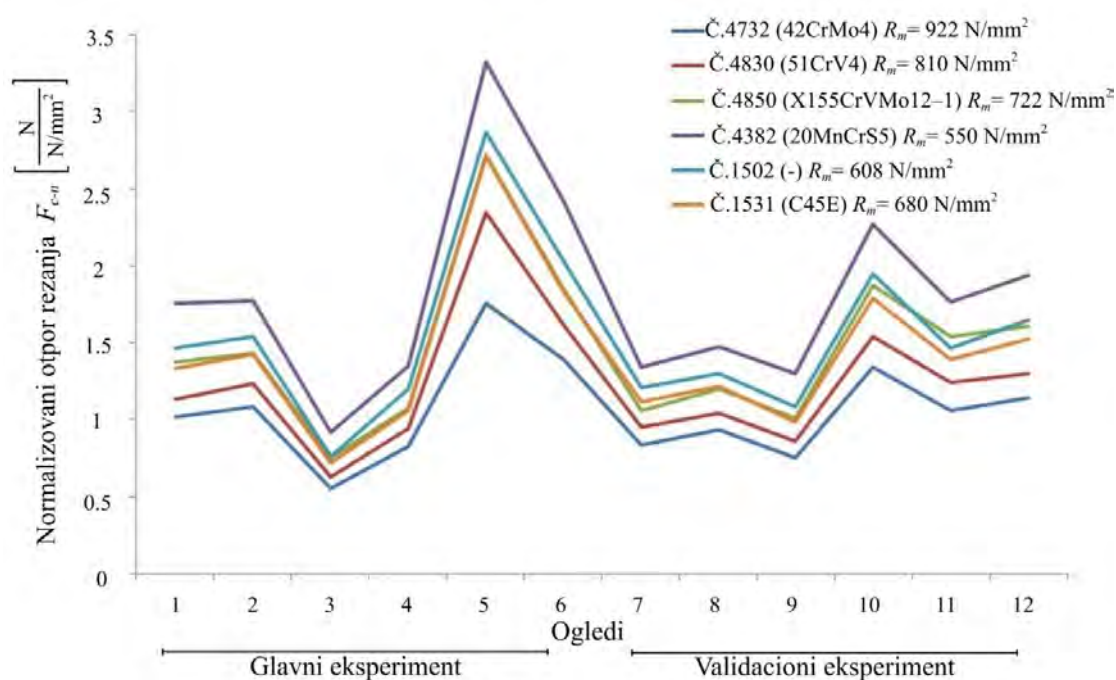
Pored osnovnih ciljeva modeliranja i analize otpora rezanja, u okviru realizovanog istraživanja izvršena je analiza obradljivosti čelika. Jedan od načina kvantifikacije i

upoređenja obradljivost različitih materijala, s obzirom na glavni otpor rezanja i mehaničke karakteristike materijala obratka, odnosno zatezne čvrstoće, je određivanje normalizovanog glavnog otpora rezanja kod struganja [180]:

$$F_{c-n} = \frac{F_c}{R_m} \quad (8.29)$$

Na slici 8.20 prikazane su vrednosti normalizovanog glavnog otpora rezanja iz glavnog eksperimenta (ogledi 1-6) i validacionog eksperimenta (ogledi 7-12) za sve čelike.

Na slici 8.20 se može uočiti da čelik 42CrMo4 ima najmanje vrednosti normalizovanog glavnog otpora rezanja u svim ispitivanim režimima obrade. Takođe, s obzirom na promene u vrednostima normalizovanog glavnog otpora rezanja može se videti da je obradljivost čelika 42CrMo4 manje osetljiva na promene režima obrade. Sa druge strane, obradljivost čelika 20MnCrS5 i Č.1502 je više osetljiva na promene režima obrade. Uprkos najvećoj vrednosti zatezne čvrstoće, čelik 42CrMo4 pokazuje bolju obradljivost u poređenju sa čelicima manje zatezne čvrstoće, naročito u poređenju sa čelikom 20MnCrS5, koji pokazuje najgoru obradljivost. Manje deformabilni čelici, čelici bez izražene granice tečenja, nemaju nagli prelaz, ponašaju se ravnomernije pri deformaciji, skloniji su lomljenju strugotine i smatra se da poseduju bolju obradljivost [27]. Deformabilni čelici, čelici sa izraženom granicom tečenja, stvaraju dugu, neprekidnu strugotinu i poseduju lošiju obradljivost [39].



Slika 8.20 Normalizovani glavni otpor rezanja kod struganja čelika različitog kvaliteta

Svi istraživani čelici pokazuju istu tendenciju promene normalizovanog glavnog otpora rezanja pri promeni režima obrade. Najveći normalizovani glavni otpor rezanja se javlja u ogledu 5, naročito kod čelika 20MnCrS5, dok se najmanji normalizovani glavni otpor rezanja javlja u ogledima 7 i 9. U odnosu na vrednosti tehnoloških parametara obrade, to znači da su kombinacije manjih dubina rezanja i srednjih do velikih koraka povoljnije, u odnosu na kombinacije velikih dubina rezanja i velikih koraka. Može se zaključiti da obradljivost ispitivanih čelika ne zavisi samo od zatezne čvrstoće, već u značajnoj meri odražava uticaj hemijskog sastava, kristalne strukture, mehaničkih i termičkih svojstava, otpornosti prema deformaciji i deformacionom ojačavanju.

Analiza obradljivosti čelika sa aspekta otpora rezanja se može izvršiti i na sveobuhvatniji način, sagledavajući u isto vreme, ne samo glavni otpor rezanja (F_c), već i aksijalni (F_f), radijalni (F_p) ili ukupni otpor rezanja (F_r), ali i međusobne odnose komponenata otpora rezanja. S tim u vezi, može se predložiti zbirni indeks obradljivosti čelika, kao kriterijum za procenu obradljivosti čelika, sa aspekta otpora rezanja. Predloženi zbirni indeks obradljivosti (MI), sa aspekta otpora rezanja, ukoliko su obuhvaćene veličine iz kategorije „što manje to bolje“, može se prikazati sledećim modelom:

$$MI = \prod \left(\frac{1}{F_{c-n}} \cdot \alpha \right) \left(\frac{1}{\frac{F_f}{F_c}} \cdot \beta \right) \left(\frac{1}{\frac{F_p}{F_c}} \cdot \gamma \right) \left(\frac{1}{\frac{F_r}{F_c}} \cdot \varepsilon \right) \left(\frac{1}{F_r} \cdot \zeta \right) \quad (8.30)$$

gde su: $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \zeta$ empirijski koeficijenti određeni eksperimentalno radi procene obradljivosti različitih materijala predmeta obrade, a koji se mogu odrediti i u odnosu na različite rezne alate i uslove obrade.

Predloženi zbirni indeks obradljivosti objedinjuje više aspekata otpora rezanja i pripada kategoriji „što više to bolje“, odnosno što je veća vrednost zbirnog indeksa obradljivosti (MI), obradljivost materijala, sa aspekta otpora rezanja, je bolja. Model zbirnog indeksa obradljivosti (MI) može imati praktičnu primenu za sveobuhvatniju uporednu procenu obradljivosti materijala, izabranog reznog alata i režima obrade. Inače, merenja otpora ili energije rezanja predstavljaju relevantan metod za ocenu obradljivosti materijala, naročito u situacijama kada ispitivanja postojanosti alata nisu izvodljiva usled vremenskih ograničenja ili nedostatka materijala i reznih alata [4], [181].

8.7 Primena modela za predikciju otpora rezanja

Modeliranje otpora rezanja je od suštinskog značaja za poboljšanje i optimizaciju obradnih procesa i sistema, imajući u vidu da njihovo poznavanje omogućava:

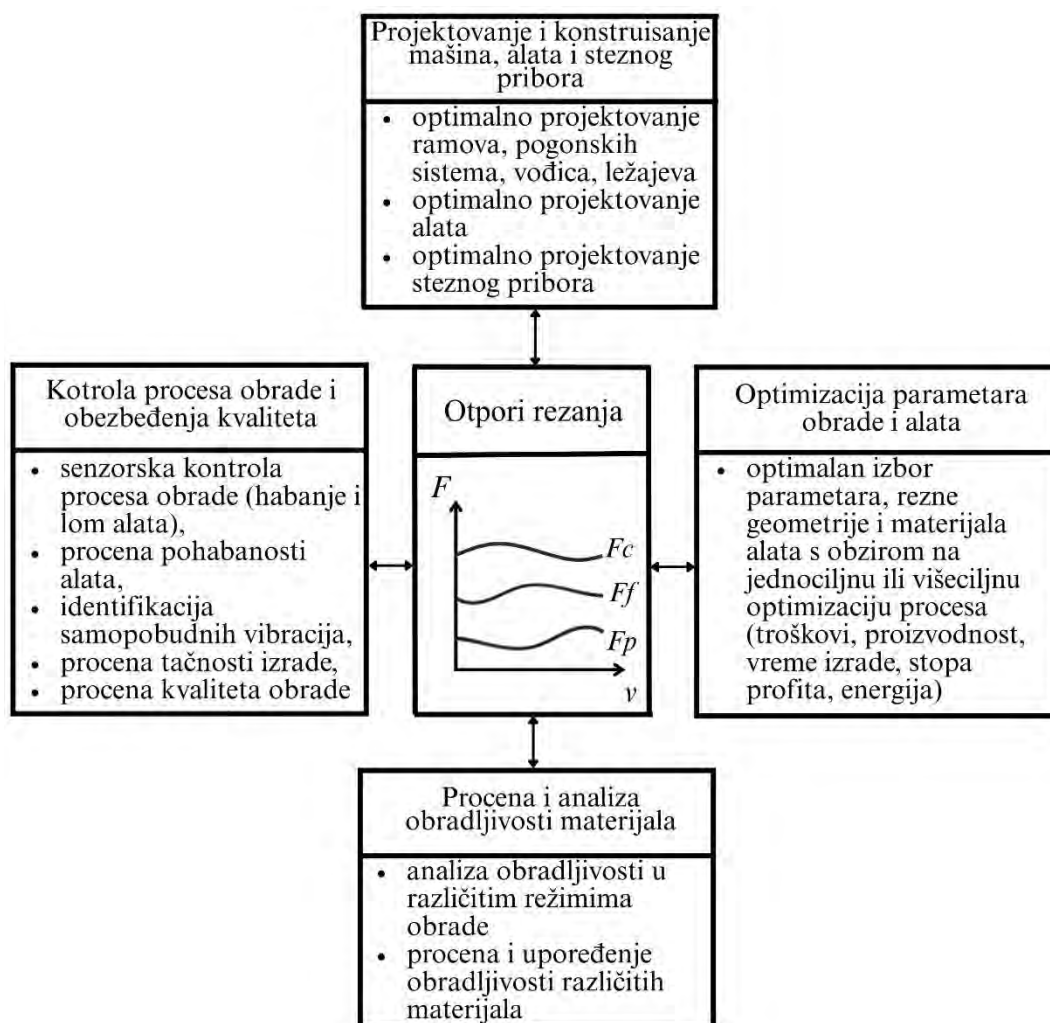
- optimalno projektovanje mašina alatki, uključujući ramove, pogonske sisteme, sistema alata i vođica u skladu sa postavljenim zahtevima [13],
- procenu tačnosti izrade radnog predmeta u zavisnosti od deformacija obratka i mašine pri datim uslovima obrade [13],
- procenu obradljivosti različitih materijala predmeta obrade [13],
- senzorsku kontrolu procesa obrade radi praćenja habanja reznog alata i detekcije loma alata [4], [167],
- određivanje potrebne snage mašine i opterećenja ležajeva, kao i projektovanje alata i steznog pribora [4],
- procenu habanja alata, dimenzionalne tačnosti, snage rezanja i momenta [22],
- optimalan izbor parametara obrade [182], u odnosu na različite performanse uključujući troškove obrade, proizvodnost, vreme obrade, itd.,
- izbor odgovarajuće rezne geometrije i materijala reznog alata [183],
- identifikaciju uslova obrade u kojima se javljaju samopobudne vibracije [4], i
- procenu energije rezanja i specifične energije rezanja [184].

Na osnovu prethodnog, mogu se identifikovati četiri ključne oblasti primene modela otpora rezanja u projektovanju tehnologije obrade struganjem, a to su: (1) projektovanje i konstrukcija mašina alatki, alata i steznog pribora, (2) kontrola procesa obrade i obezbeđenje kvaliteta obrade, (3) optimizacija parametara obrade i alata u odnosu na različite performanse procesa, i (4) procena i analiza obradljivosti materijala (slika 8.21).

Višestruki značaj otpora rezanja, njihovo modeliranje i poznavanje u različitim uslovima obrade predstavlja osnovu za unapređenje kvaliteta obrade, produktivnosti, ekonomičnosti i ukupne efikasnosti obradnih sistema. Zbog svoje važnosti modeli otpora rezanja su sastavni elementi modernih CAD/CAM sistema, digitalnih blizanaca procesa obrade struganjem i inteligentnih sistema upravljanja obradom.

Primena kreiranih modela za predikciju otpora rezanja biće ilustrovana na primeru komparativne analize energije rezanja i specifične energije rezanja kod svih šest istraživanih čelika. Takođe, na primeru zahvata spoljašnjeg uzdužnog grubog struganja čelika C45E, biće prikazan predloženi postupak za određivanje merodavnog režima rezanja uzimajući u obzir

tehničke karakteristike mašine alatke, preporučen opseg tehnoloških parametara, karakteristike reznog alata i kreiran model za predikciju glavnog otpora rezanja.



Slika 8.21 Glavne oblasti primene modela otpora rezanja kod struganja

8.7.1 Primena modela glavnog otpora rezanja za analizu energije rezanja i specifične energije rezanja

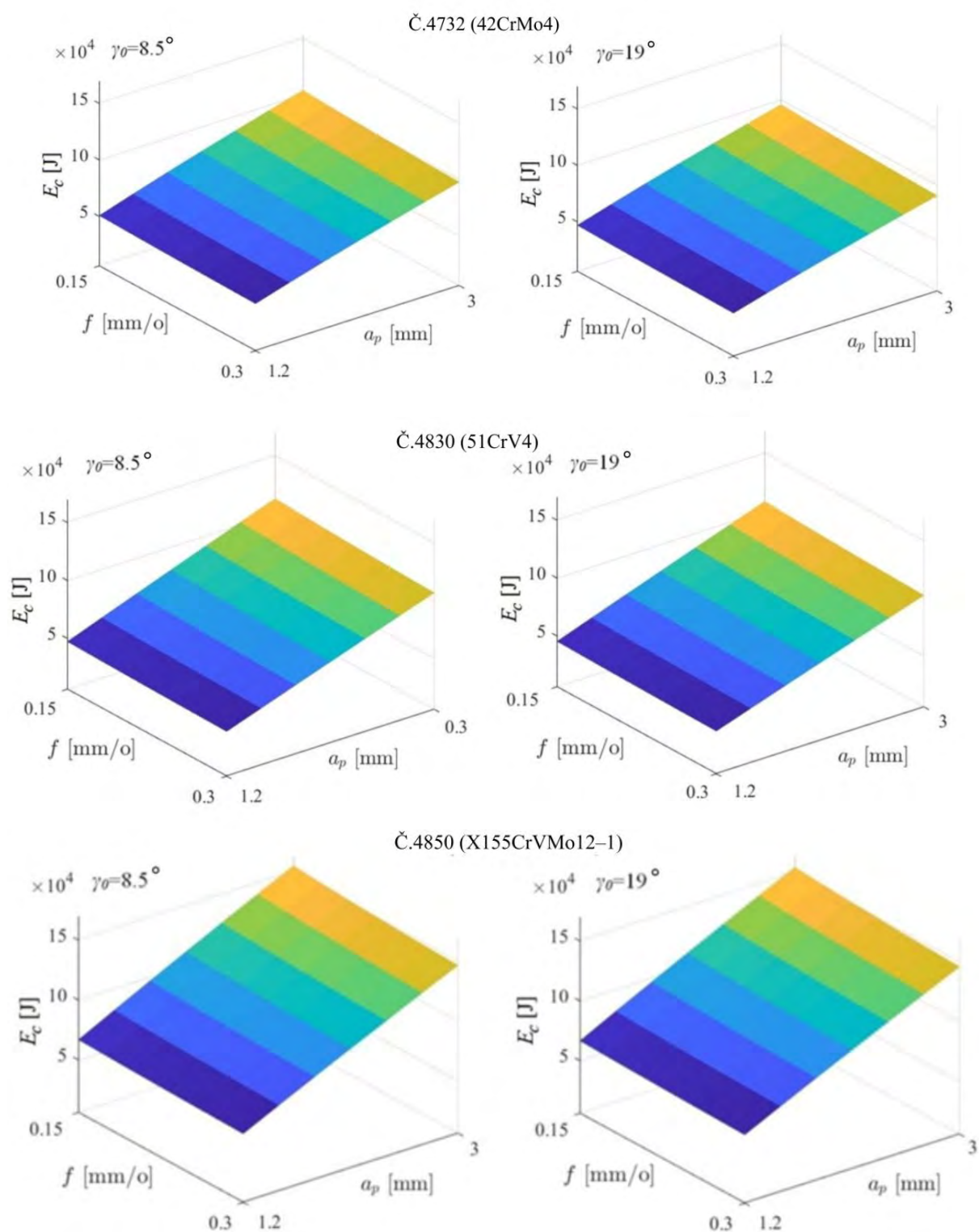
Energija rezanja, koja prema standardu DIN 6584 [185] predstavlja proizvod glavnog otpora rezanja i puta koji rezni alat prelazi u pravcu iste, rasipa se pre svega u plastično deformisanje (smicanje) materijala obratka i savladavanje trenja na kontaktu između alata i strugotine [14]. Predstavlja jednu od važnih energetske performansi obrade struganjem. Potrošnja energije kod obrade rezanjem je usko povezana sa obradljivošću materijala [184], koja se pak može proceniti na osnovu stope habanja alata i kvaliteta obrađene površine, ili preko nekog od pomoćnih kriterijuma, poput oblika strugotine ili otpora rezanja [186]. Smanjenje potrošnje energije u proizvodnji doprinosi efikasnijem korišćenju mašine alatke, a

može se postići određivanjem optimalnih uslova obrade [187]. Poznato je da energija rezanja, odnosno energija potrebna za uklanjanje materijala, predstavlja samo manji deo ukupne energije koja se utroši na nivou celog obradnog sistema [188]. Međutim, proučavanje energije rezanja je neophodno, obzirom da je direktno uključena u formiranje obrađene površine i da je od presudnog značaja za njen integritet [189].

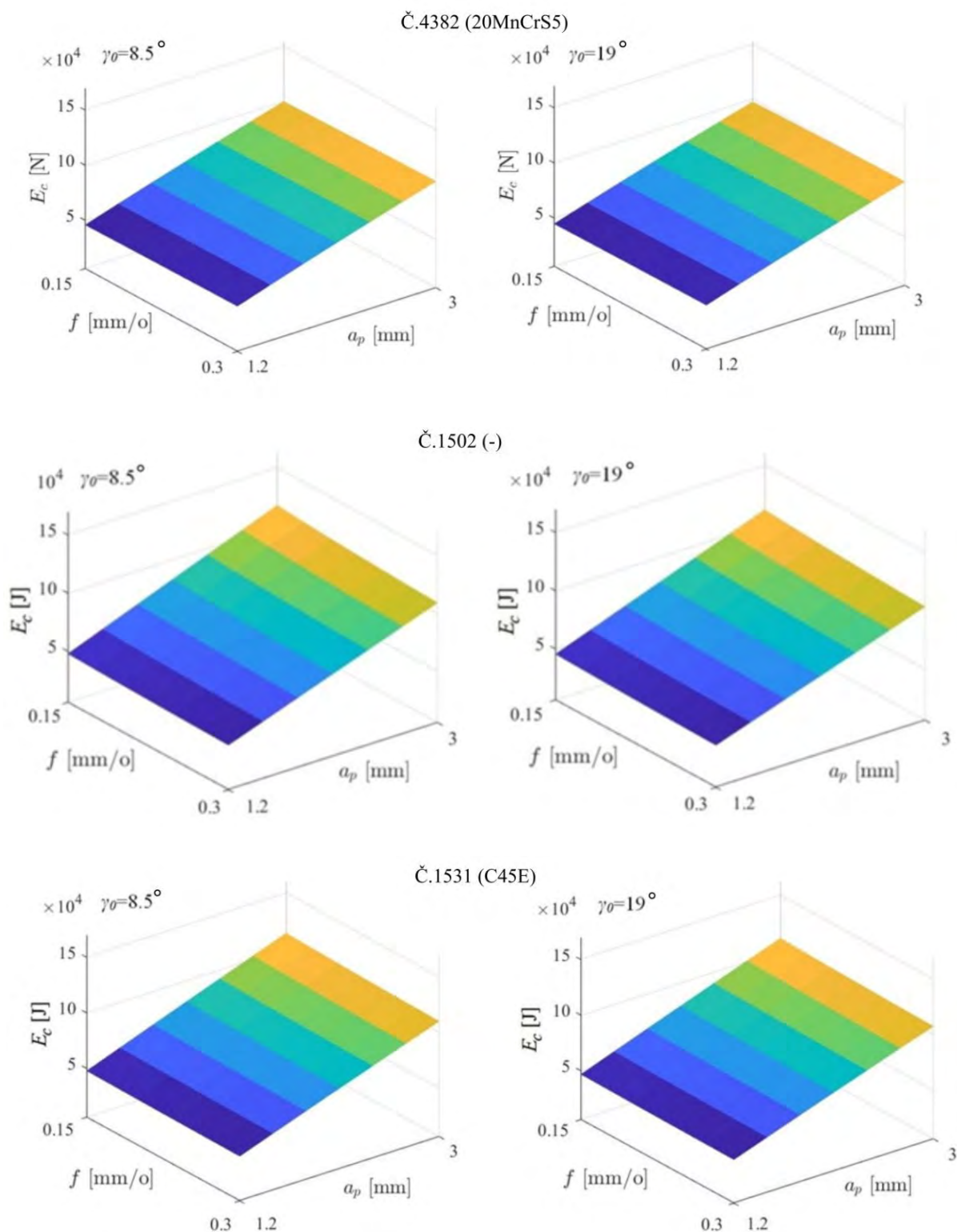
Nakon analize energije rezanja, neophodno je sagledati i specifičnu energiju rezanja, koja omogućava direktnije poređenje različitih materijala i režima obrade. Specifična energija rezanja ne uzima u obzir energetske aspekte komponenata mašine alatke [190], već samo energiju potrebnu za uklanjanje jedinice zapremine materijala obratka. Ona karakteriše sposobnost materijala obratka da pruži otpor rezanju [191], [192]. Specifična energija rezanja se često koristi za upoređivanje obradljivosti različitih materijala obratka [193], naročito u situacijama kada uporedni podaci o postojanosti alata nisu dostupni.

Korišćenjem kreiranih modela za predikciju glavnog otpora rezanja (F_c), za svih šest kvaliteta čelika određene su vrednosti energije rezanja (E_c) i specifične energije rezanja (E_{cs}), prema izrazima (2.2), (2.4), (2.5) i (2.10), za režime obrade iz eksperimentalnog istraživanja (potpoglavlje 7.3.5 Režimi obrade) i dužinu struganja $l = 100$ mm.

Komparativna analiza energije rezanja i specifične energije rezanja izvršena je u funkciji najznačajnijih tehnoloških parametara (korak i dubina rezanja) i grudnog ugla alata kreiranjem površinskih dijagrama. Površinski dijagrami na slikama 8.22 i 8.23 prikazuju promene energije rezanja u zavisnosti od promene dubine rezanja (a_p) i koraka (f) za različite vrednosti grudnog ugla alata (γ_o), za čelike iz grupe A (manje deformabilni čelici: Č.4732 (42CrMo4), Č.4830 (51CrV4), Č.4850 (X155CrVMo12–1)) i grupe B (deformabilni čelici: Č.4382 (20MnCrS5), Č.1502 (-), Č.1531 (C45E)). Površinski dijagrami na slikama 8.24 i 8.25 prikazuju promene specifične energije rezanja u zavisnosti od promene dubine rezanja (a_p) i koraka (f) za različite vrednosti grudnog ugla alata (γ_o), za čelike iz grupe A i grupe B.

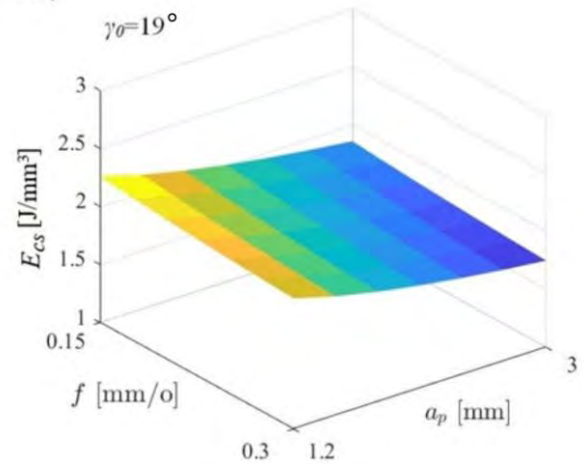
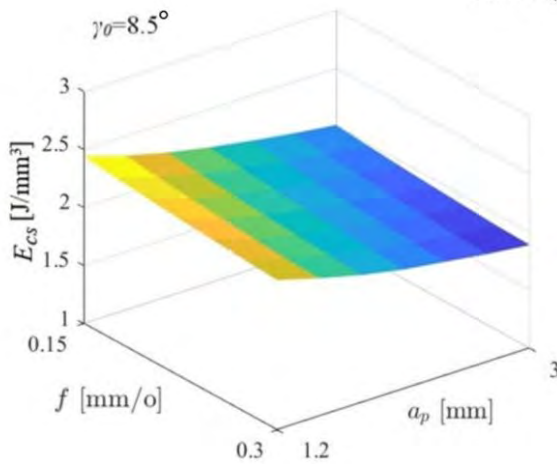


Slika 8.22 Promena energije rezanja u zavisnosti od promene dubine rezanja (a_p) i koraka (f) za različite vrednosti grudnog ugla alata (γ_0) za čelike iz grupe A

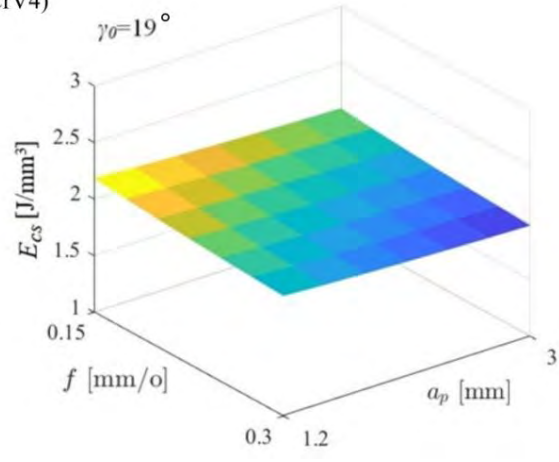
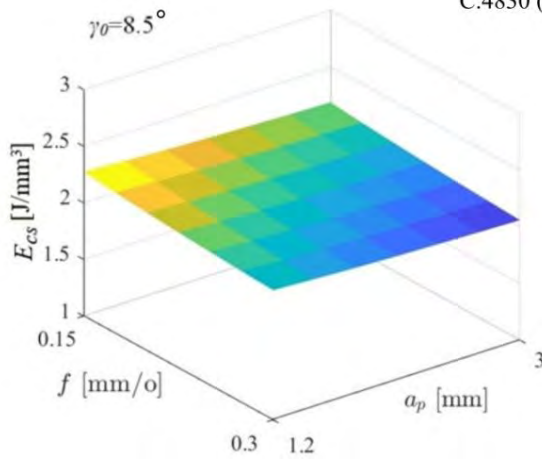


Slika 8.23 Promena energije rezanja u zavisnosti od promene dubine rezanja (a_p) i koraka (f) za različite vrednosti grudnog ugla alata (γ_0) za čelike iz grupe B

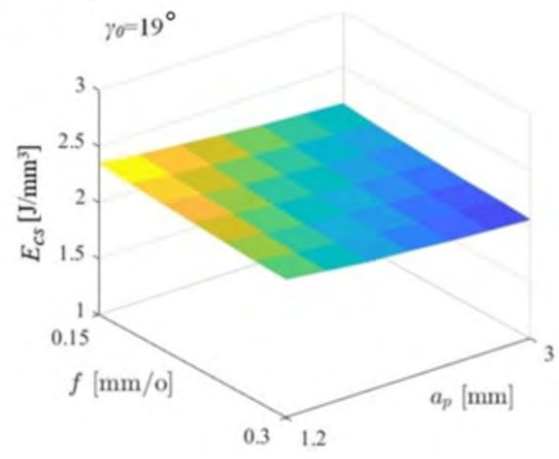
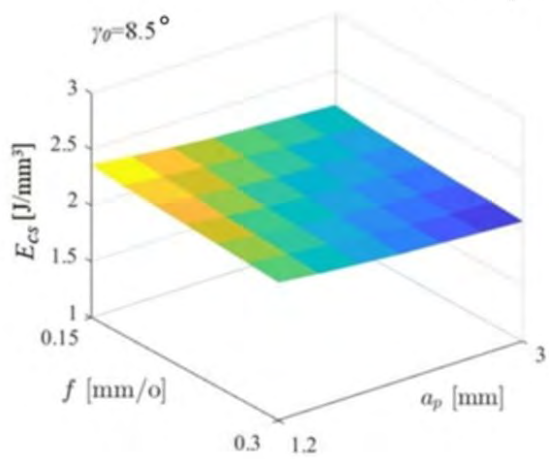
Č.4732 (42CrMo4)



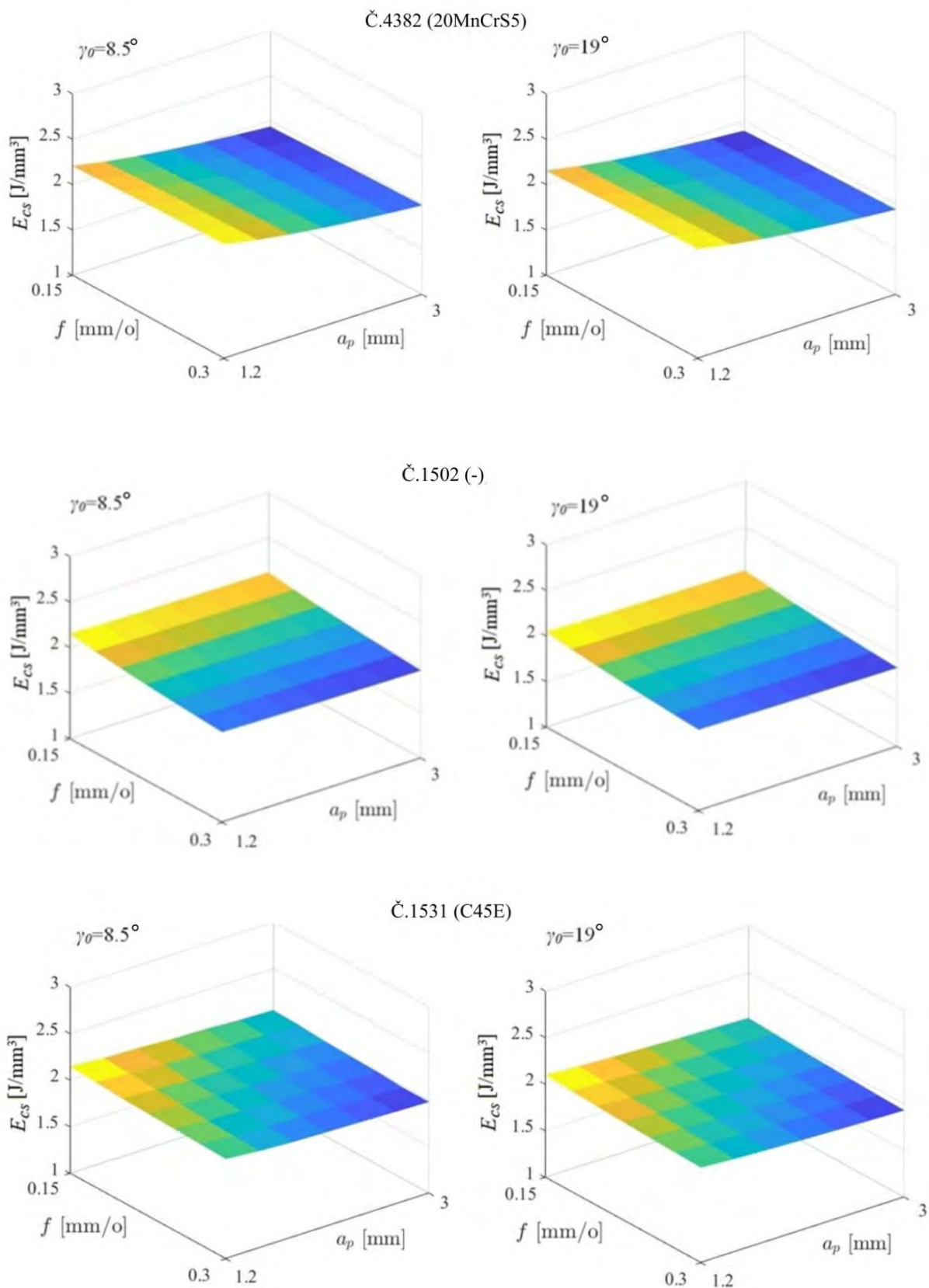
Č.4830 (51CrV4)



Č.4850 (X155CrVMo12-1)



Slika 8.24 Promena specifične energije rezanja u zavisnosti od promene dubine rezanja (a_p) i koraka (f) za različite vrednosti grudnog ugla alata (γ_0) za čelike iz grupe A



Slika 8.25 Promena specifične energije rezanja u zavisnosti od promene dubine rezanja (a_p) i koraka (f) za različite vrednosti grudnog ugla alata (γ_0) za čelike iz grupe B

Na osnovu površinskih dijagrama prikazanih na slikama 8.22 i 8.23 može se zaključiti da dubina rezanja ima najizraženiji uticaj na energiju rezanja kod svih istraživanih čelika. Može se primetiti da postoji pozitivna korelacija, odnosno da povećanje dubine rezanja povećava energiju rezanja. Ovaj rezultat je u skladu sa rezultatima istraživanja uticaja tehnoloških parametara na potrošnju energije kod struganja legiranog čelika 20CrNiMo5 [194]. Dubina rezanja ne utiče na glavno vreme obrade, ali se njenim povećanjem, povećava i površina poprečnog preseka reznog sloja, pa samim tim i vrednost glavnog otpora rezanja, snaga rezanja i energija rezanja. Uticaj koraka i grudnog ugla alata na energiju rezanja je znatno manje izražen kod svih istraživanih čelika. U pitanju je negativna korelacija, što podrazumeva da povećanje koraka ili grudnog ugla alata blago smanjuje energiju rezanja. Može se reći da je uticaj koraka očekivan, obzirom da se povećanjem koraka povećava i brzina pomoćnog kretanja, čime se smanjuje glavno vreme obrade. Korak ima manje izražen uticaj na glavni otpor rezanja u odnosu na dubinu rezanja, obzirom da povećanje koraka rezultuje smanjenjem specifične sile rezanja i blagim povećanjem površine poprečnog preseka reznog sloja [14]. Prema tome, gotovo približno jednaki uticaj koraka, sa jedne strane na povećanje otpora i snage rezanja, a sa druge strane smanjenje vremena obrade, može objasniti uticajnost koraka u ukupnom energetsom bilansu. Povećanjem grudnog ugla alata povećava se ugao smicanja, što dovodi do smanjenja glavnog otpora rezanja [66]. Najmanja energija rezanja se za sve istraživane čelike postiže pri manjoj dubini rezanja, većem koraku i većem grudnom uglu.

Površinski dijagrami na slikama 8.22 i 8.23 pokazuju da nema bitnije kvalitativne i kvantitativne promene uticaja, kao i interakcija između dubine rezanja, koraka i grudnog ugla alata. Svaki od tri pomenuta faktora pokazuje nepromenljiv uticaj na energiju rezanja, nezavisno od vrednosti ostalih faktora.

Kada je u pitanju specifična energija rezanja, na osnovu površinskih dijagrama prikazanih na slikama 8.24 i 8.25, može se zaključiti da dubina rezanja ima najizraženiji uticaj kod čelika 42CrMo4 iz grupe A i čelika 20MnCrS5 iz grupe B. Kod svih istraživanih čelika se povećanjem dubine rezanja smanjuje se specifična energija rezanja. Povećanjem dubine rezanja povećava se glavni otpor rezanja i posledično snaga rezanja, ali se u isto vreme povećava i zapreminska proizvodnost, što rezultuje smanjenjem specifične energije rezanja. Uticaj koraka i grudnog ugla alata na specifičnu energiju rezanja je kvalitativno isti. Sa povećanjem koraka ili grudnog ugla alata smanjuje se specifična energija rezanja, pri čemu je uticaj koraka nešto izraženiji. S obzirom da grudni ugao alata ne utiče na zapreminsku proizvodnost, uticajnost ovog parametra na specifičnu energiju rezanja može se

objasniti preko ranije analiziranog uticaja na glavni otpor rezanja i posledično snagu rezanja. Kada je u pitanju uticaj koraka, jedini izuzetak je čelik 20MnCrS5 iz grupe B, gde povećanje koraka blago povećava specifičnu energiju rezanja. Za iste uslove obrade struganjem, deformabilniji materijali pokazuju veće vrednosti faktora sabijanja strugotine, koji predstavlja meru intenziteta plastične deformacije materijala pri njegovom pretvaranju u strugotinu [26]. Povećanje debljine strugotine, odnosno rast faktora sabijanja strugotine, ukazuje na veći stepen plastične deformacije, pa se shodno tome povećava i potrebna snaga po jedinici zapremine uklonjenog materijala [195]. U skladu sa tim, može se objasniti i izuzetak primećen kod čelika 20MnCrS5, kod kojeg povećanje koraka dovodi do blagog porasta specifične energije rezanja. Za razliku od ostalih analiziranih čelika, kod kojih se najmanja specifična energija rezanja postiže kombinacijom veće dubine rezanja, većeg koraka i većeg grudnog ugla alata, kod čelika 20MnCrS5 najmanja specifična energija rezanja odgovara kombinaciji veće dubine rezanja, manjeg koraka i većeg grudnog ugla alata. Prosečne vrednosti specifične energije rezanja kod svih šest čelika za različite vrednosti grudnog ugla alata prikazane su u tabeli 8.12.

Tabela 8.12. Prosečne vrednosti specifične energije rezanja za svih šest čelika (J/mm^3)

γ_0 [°]	Č.4732 (42CrMo4)	Č.4830 (51CrV4)	Č.4850 (X155CrVMo12–1)	Č.4382 (20MnCrS5)	Č.1502 (-)	Č.1531 (C45E)
8.5°	2.118	2.153	2.196	2.078	2.045	2.051
19°	1.962	2.068	2.188	2.030	1.943	2.005

Prethodna analiza pokazuje da su modeli otpora rezanja od suštinske važnosti za sveobuhvatnu analizu uticajnosti parametara na energiju i specifičnu energiju rezanja kod struganja. Naime, za datu studiju slučaja, a s obzirom na specifičnosti materijala predmeta obrade, pokriveni opseg variranja vrednosti tehnoloških parametara, postojanje međusobno suprotstavljenih relacija tehnoloških parametara sa otporima rezanja (snagom), vremenom obrade i proizvodnošću, uticaji mogu biti promenljivi, pa je postojanje adekvatnih modela otpora rezanja neophodan uslov za identifikaciju energetski efikasnih uslova obrade.

8.7.2 Primena modela za predikciju glavnog otpora rezanja prilikom određivanja merodavnog režima rezanja

Jedna od značajnih primena kreiranog modela za predikciju glavnog otpora rezanja jeste provera ograničenja raspoložive snage mašine alatke tokom određivanja merodavnog

režima rezanja. U nastavku se upoređuju rezultati dobijeni primenom kreiranog modela i standardno korišćenog *Kienzle-Victor*-ovog modela za predikciju glavnog otpora rezanja.

Mašina alatka je CNC strug Haas ST-10. Strug ima sledeće tehničke karakteristike:

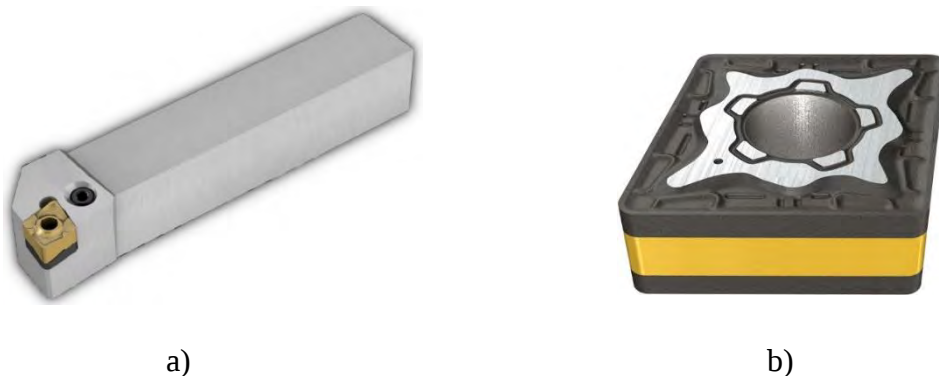
- Snaga pogonskog elektromotora $P_M = 11.2$ kW
- Mehanički stepen iskorišćenja mašine $\eta = 0.9$
- Maksimalni broj obrtaja glavnog vretena $n_{max} = 6000$ o/min
- Maksimalni obrtni moment na glavnom vretenu $M_{max} = 102$ Nm (na 1300 o/min)

Materijal obratka je C45E/1.1191/Č.1531, koji pripada Iscar grupi 2 materijala obratka. Referentni materijal ove grupe ima zateznu čvrstoću $R_m = 650$ N/mm², tvrdoću 190 HB, specifični otpor rezanja za površinu poprečnog preseka reznog sloja od 1 mm² $k_{c1.1} = 1500$ N/mm² i faktor (eksponent) debljine reznog sloja $m_c = 0.22$ [196].

Obrada se izvodi kao spoljašnje uzdužno grubo struganje. Početni prečnik je 60 mm. Dužina struganja je $l = 100$ mm. Prazan hod pre ulaska alata u zahvat sa obratkom je $l_p = 2$ mm.

Alat je kombinacija držača sa konvencionalnom (prizmatičnom) drškom Iscar PCLNL 2525M 12 (glavni napadni ugao $\kappa = 95^\circ$, grudni ugao držača $\gamma_{oh} = -6^\circ$, ugao nagiba rezne ivice $\lambda = -6^\circ$) i izmenljive pločice za poluzavršnu obradu Iscar CNMG 120408-M3P kvaliteta IC8250 (oslojeni tvrdi metal) (poluprečnik zaobljenja vrha $r_\epsilon = 0.8$ mm, element za lomljenje strugotine M3P, grudni ugao $\gamma_{oi} = 11^\circ$) (slika 8.26). Grudni ugao alata je $\gamma_o = 5^\circ$. Za izabranu izmenljivu pločicu proizvođač preporučuje sledeće opsege za dubinu rezanja (a_p), korak (f) i brzinu rezanja (v), za obradu čelika:

- a_p : 0.5 – 5.5 mm
- f : 0.15 – 0.50 mm/o
- v : 200 – 340 m/min



Slika 8.26 Izabrani alat: a) držač Iscar PCLNL 2525M 12, b) izmenljiva pločica Iscar CNMG 120408-M3P IC8250 [196]

Potrebno je odrediti merodavni režim rezanja za dati zahvat. Pod pojmom merodavni se podrazumeva „najbolji koji se u datim uslovima može ostvariti“ [6]. To nije optimalni režim obrade, jer se on određuje po posebnoj proceduri.

Prisutna su sledeća ograničenja:

- Raspoloživa snaga mašine ($P_M \cdot \eta = 11.2 \cdot 0.9 = 10.08 \text{ kW}$) treba da bude veća od snage rezanja.
- Preporučeni opseg vitkosti strugotine kod struganja čelika: $5 \leq a_p/f \leq 15$ [142]. Prema opštim preporukama o povoljnim oblicima strugotine, treba izbegavati odnos dubine rezanja i koraka koji daje „strugotinu poprečnog preseka oblika kvadrata“ ($a_p = f$) i trakastu strugotinu (kombinacija velike dubine rezanja i malog koraka).

Ekonomska razmatranja su veoma važna u planiranju procesa obrade rezanjem. U tom kontekstu se obično prilikom određivanja režima rezanja koriste sledeći kriterijumi [42]:

- Minimalno jedinično proizvodno vreme (ili maksimalna produktivnost kao recipročna vrednost) (takozvani kriterijum produktivnosti),
- Minimalni jedinični proizvodni trošak (takozvani kriterijum ekonomičnosti) i
- Maksimalan profit u jedinici vremena (to jest maksimalna stopa profita).

S obzirom na to da dubina rezanja najviše utiče na produktivnost, kod grube obrade se nastoji da se, u skladu sa ograničenjima, izabere najveća moguća dubina rezanja. Takođe je poznato da je jedinični proizvodni trošak niži za veće vrednosti koraka, jer se smanjuje vreme obrade po jednoj jedinici zapremine [42]. Brzina rezanja, kao treći element režima rezanja se prema preporukama proizvođača alata za izabrani kvalitet izmenljive pločice bira u zavisnosti od izabranog koraka.

Korišćenjem *Kienzle-Victor*-ovog modela za predikciju glavnog otpora rezanja sa korekcionim faktorom grudnog ugla alata [12]:

$$F_c = a_p \cdot f \cdot \frac{k_{c1.1}}{(f \cdot \sin \kappa)^{m_c}} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right) \quad (8.31)$$

koji se standardno koristi u praksi i obrasca (2.2) za određivanje snage rezanja, nakon više iteracija, određen je merodavni režim rezanja: $a_p = 3.5 \text{ mm}$, $f = 0.35 \text{ mm/o}$ i $v = 260 \text{ m/min}$. Dobijena vrednost glavnog otpora rezanja za ovaj režim rezanja je $F_c = 2201 \text{ N}$. Izračunata snaga rezanja $P_c = 9.54 \text{ kW}$, je niža od raspoložive snage mašine (10.08 kW). Vitkost strugotine iznosi 10, što je u skladu sa opštim preporukama i u okviru preporučenog opsega vitkosti strugotine. Zapreminska proizvodnost za ovaj režim rezanja je $q_v = 318.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ (jednačina 2.10). Glavno vreme obrade je $t_g = 0.211 \text{ min}$ (jednačina 2.14).

Korišćenjem kreiranog modela za predikciju glavnog otpora rezanja za čelik

C45E/1.1191/Č.1531 (jednačine 8.11 i 2.2) za određivanje snage rezanja utvrđeno je da je za merodavni režim rezanja određen po gore pomenutom standardnom pristupu ($a_p = 3.5$ mm, $f = 0.35$ mm/o i $v = 260$ m/min) glavni otpor rezanja iznosi $F_c = 2420.02$ N, dok je snaga rezanja $P_c = 10.49$ kW. Dakle, pomenuti režim rezanja se ne može realizovati na datoj mašini alatki, obzirom da je raspoloživa snaga mašine (10.08 kW) manja od snage rezanja. Razlog je činjenica da materijal obratka, čelik C45E/1.1191/Č.1531, očigledno nije istovremeno i referentni materijal Iscar grupe materijala obratka kojoj pripada, a za koji su očitane vrednosti specifičnog otpora rezanja za površinu poprečnog preseka reznog sloja od 1 mm^2 i faktora (eksponenta) debljine reznog sloja.

Korišćenjem kreiranog modela za predikciju glavnog otpora rezanja za čelik C45E/1.1191/Č.1531 (jednačine 8.11 i 2.2) za određivanje snage rezanja, nakon više iteracija, određen je merodavni režim: $a_p = 3.5$ mm, $f = 0.3$ mm/o i $v = 280$ m/min. Dobijena vrednost glavnog otpora rezanja za ovaj režim rezanja je $F_c = 2092.27$ N. U modelu za predikciju glavnog otpora rezanja je korišćena zatezna čvrstoća $R_m = 680 \text{ N/mm}^2$ koja je određena u okviru eksperimentalnog istraživanja. Izračunata snaga rezanja $P_c = 9.76$ kW, je niža od raspoložive snage mašine (10.08 kW). Vitkost strugotine iznosi 11.67, što je u skladu sa opštim preporukama i u okviru preporučenog opsega vitkosti strugotine. Zapreminska proizvodnost za ovaj režim rezanja je $q_v = 294 \text{ cm}^3/\text{min}$. Glavno vreme obrade je $t_g = 0.229$ min. Smanjenje koraka sa 0.35 mm/o na 0.3 mm/o dovodi do smanjenja površine poprečnog preseka reznog sloja, čime se direktno umanjuju glavni otpor rezanja i snaga rezanja. Na taj način vrednost snage rezanja pada ispod raspoložive snage mašine. Istovremeno, povećanje brzine rezanja na 280 m/min je u skladu sa preporukama proizvođača alata, prema kojima se za manje korake može primeniti veća brzina rezanja. Tako definisan režim rezanja istovremeno zadovoljava ograničenje snage mašine, obezbeđuje vitkost strugotine unutar preporučenog opsega i omogućava povoljnu proizvodnost.

9. ZAKLJUČAK

Efektivna primena tehnologije obrade struganjem, koja obezbeđuje traženi kvalitet uz visoku produktivnost i prihvatljive troškove, zavisi od mogućnosti predikcija performansi i stanja u procesu. Među brojnim performansama procesa, otpori rezanja koji deluju na alat imaju višestruki značaj u tehnologiji obrade rezanjem. U radu je predložena primena dimenzionalne analize i eksperimentalnih planova male rezolucije sa ciljem definisanja empirijskih modela otpora rezanja kod struganja čelika različite obradljivosti. Pored osnovnih tehnoloških parametara koji definišu režim obrade, u cilju definisanja osnovnih bezdimenzionalnih veličina (grupa) predikcionih modela, uzeti su u obzir i faktori geometrije reznog alata (glavni napadni ugao i grudni ugao) i materijala obratka (zatezna čvrstoća). U cilju kreiranja empirijskih modela za predikciju otpora rezanja realizovano je eksperimentalno istraživanje suvog spoljašnjeg uzdužnog struganja primenom Tagučijevog ortogonalnog niza. Kako bi se osigurala pouzdana primena i verifikovalo slaganje eksperimentalnih rezultata otpora rezanja sa predikcijama kreiranih modela realizovan je i dodatni validacioni eksperiment. U cilju analize mogućnosti definisanja proširenih modela za predikciju otpora rezanja sa popravnim koeficijentom za parametre koji nisu prethodno razmatrani, realizovani su i dodatni eksperimentalni ogledi za određivanje popravnih koeficijenata modela.

S obzirom na postavku eksperimentalnog istraživanja i strukturu kreiranih predikcionih modela, kao i sprovedenih analiza, eksperimentalnih rezultata i rezultata predikcije, mogu se izvući sledeći zaključci:

- Vitkost strugotine je najvažniji parametar, odnosno bezdimenzionalna veličina, koja u najvećoj meri utiče na glavni i aksijalni otpor rezanja, zatim sledi odnos brzine rezanja i brzine pomoćnog kretanja, dok je uticaj odnosa glavnog napadnog ugla i grudnog ugla alata najmanje izražen.
- Sve tri bezdimenzionalne veličine (vitkost strugotine, odnos brzine rezanja i brzine pomoćnog kretanja i odnos glavnog napadnog ugla i grudnog ugla alata) imaju pozitivnu korelaciju sa otporima rezanja.
- Vrednosti srednjih apsolutnih procentualnih grešaka modela za predikciju glavnog i aksijalnog otpora rezanja za sve ispitivane čelike su manje od 2.44%, odnosno 5.37%, što pokazuje dobro slaganje predikcija modela sa eksperimentalnim vrednostima otpora rezanja.

- Vrednosti koeficijenata determinacije predloženih modela za sve ispitivane čelike ukazuju da modeli objašnjavaju dominantan udeo varijacije u eksperimentalnim podacima otpora rezanja.
- Dodatni validacioni eksperimentalni ogledi sa vrednostima parametara van početnog eksperimentalnog hiper-prostora pokazali su da predloženi modeli imaju dobre mogućnosti ekstrapolacije za predikciju glavnog i aksijalnog otpora rezanja.
- Realizacijom dodatnih eksperimentalnih oglada kod struganja čelika Č.4382 i Č.1502, određeni su popravni koeficijenti za sagledavanje uticaja poluprečnika zaobljenja vrha alata, parametra koji u postavci problema nije inicijalno razmatran. Treba međutim istaći, da iako su predloženi modeli adaptabilni, određivanje popravnih koeficijenata, radi proširenja primene predloženih modela, može zahtevati složeniji eksperiment s obzirom na promenljiv, nelinearan i interakcijski uticaj datog parametra.
- Predloženi pristup modeliranja je pokazao veoma dobre predikcione rezultate čak i u slučaju korišćenja ograničenog broja eksperimentalnih podataka preuzetih iz literaturnih izvora za kreiranje modela glavnog otpora rezanja.
- Predloženi predikcioni modeli otpora rezanja se mogu uspešno koristiti za određivanje modela koeficijenta odnosa aksijalnog i glavnog otpora rezanja (u cilju analize i kvantifikacije habanja alata), analize obradljivosti čelika sa aspekta otpora rezanja (određivanjem normalizovanog glavnog otpora rezanja ili primenom predloženog zbirnog indeksa obradljivosti), analizu energije rezanja i specifične energije rezanja, proveru ograničenja raspoložive snage mašine alatke tokom određivanja merodavnog režima rezanja, kao i u formulisanju optimizacionih obradnih modela.
- Iako razvijeni u funkciji bezdimenzionalnih veličina, predloženi modeli se mogu primeniti za analizu performansi u odnosu na relevantne faktore obrade.

Dobijeni rezultati ukazuju da modeli zasnovani na primeni dimenzionalne analize imaju dobar potencijal za pouzdanu procenu otpora rezanja kod struganja i mogu predstavljati prijemčivo rešenje za primenu u praksi. Predloženi pristup može uzeti u obzir analizu većeg broja faktora obrade primenom jednostavnijeg eksperimenta sa manjim brojem oglada, što je od posebnog značaja sa stanovišta ekonomičnosti eksperimenta, smanjenja vremena eksperimentalnog istraživanja, kao i uštede materijala i energije. Rezultati takođe pokazuju da, uprkos jednostavnijoj strukturi, predloženi modeli u pogledu predikcionih performansi ne zaostaju za znatno složenijim predikcionim modelima otpora rezanja (kvadratni model, genetsko programiranje), čije kreiranje zahteva obimnije i složenije eksperimente. Takođe, rezultati

predikcija predloženih modela su uporedivi i sa široko prihvaćenim *Kienzle-Victor*-ovim modelom, čija je primena ograničena dostupnošću pouzdanih empirijskih konstanti za dati materijal obratka.

Predloženi modeli za predikciju otpora rezanja imaju i određena ograničenja. Ograničenje predloženih modela, zasnovanih na primeni dimenzionalne analize, je u tome što bi njihovo proširenje bilo neophodno u slučaju postojanja značajnih interakcija između faktora, što ograničava mogućnost modeliranja, s obzirom na prirodu posmatrane performanse ili obuhvaćeni prostor istraživanja. Pored toga, postojanje većeg broja bezdimenzionalnih grupa sa kvantitativnim i kvalitativnim faktorima otežava definisanje nivoa variranja i izbor odgovarajuće eksperimentalne plan matrice.

Da bi se u potpunosti iskoristile prednosti analitičkih i eksperimentalnih metoda, potrebno je istražiti nove pristupe i mogućnosti primene. Oblasti istraživanja su veoma raznovrsne, usmerene u više pravaca i usko su povezane sa najnovijim trendovima u primeni obrade struganjem. Predlozi za dalja istraživanja primene dimenzionalne analize za modeliranje otpora rezanja, ali i drugih performansi, kod obrade struganjem bi mogli da budu usmereni u više pravaca:

- Uključivanje većeg broja faktora obrade radi definisanja modela za predikciju otpora rezanja, kao i uslova obrade kroz definisanje korekcionih faktora.
- Određivanje opštijih modela za predikciju otpora rezanja za materijale slične obradljivosti s obzirom na mehanička svojstva i faktor sabijanja strugotine.
- Primena dimenzionalne analize za identifikaciju bezdimenzionalnih veličina u cilju kreiranja predikcionih modela ostalih performansi procesa obrade struganjem.
- Korišćenje bezdimenzionalnih veličina u primeni modela veće složenosti i predikcionih mogućnosti, kao što su veštačke neuronske mreže.
- Analiza i istraživanje korelacije otpora rezanja i drugih važnih performansi obrade, kao što su temperatura rezanja, habanje alata, kvalitet i tačnost obrade, itd.
- Uporedna analiza performansi procesa struganja različitih materijala obratka i formulisanje i rešavanje nekih studija optimizacije, na osnovu kreiranja predikcionih modela otpora.
- Kreiranje modela za predikciju otpora rezanja kod struganja termički obrađenih, kao i drugih specifičnih materijala, za koje je primena *Kienzle-Victor*-ovog modela ograničena.

- Analiza korelacija komponenti otpora rezanja i performansi procesa obrade struganjem.
- Implementacija modela kroz razvoj aplikativnog softvera za industrijsku primenu u cilju podrške prilikom planiranja tehnološkog postupka obrade struganjem.

LITERATURA

- [1] Madić, M., Trifunović, M., & Janković, T. (2022). Development and analysis of a surface roughness model in dry straight turning of C45E steel. *Innovative Mechanical Engineering*, 1(2), 11-21.
- [2] Liang, S., & Shih, A. (2016). *Analysis of Machining and Machine Tools*. New York, NY: Springer.
- [3] Trent, E., & Wright, P. (2000). *Metal Cutting (4th Edition)*. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann.
- [4] Stephenson, D., & Agapiou, J. (2016). *Metal Cutting Theory and Practice (3rd Edition)*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- [5] Tschätsch, H. (2009). *Applied Machining Technology (8th Edition)*. Heidelberg: Springer.
- [6] Milikić, D., Gostimirović, M., & Sekulić, M. (2015). *Osnove tehnologije obrade rezanjem*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu.
- [7] Toenshoff, H., & Denkena, B. (2013). *Basics of Cutting and Abrasive Processes*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- [8] Nedić, B., & Lazić, M. (2007). *Proizvodne tehnologije: Obrada metala rezanjem*. Kragujevac: Mašinski fakultet.
- [9] Radovanović, M. (2002). *Tehnologija mašinogradnje, Obrada rezanjem*. Niš: Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu.
- [10] German Institute for Standardisation. (2003). DIN 8589-1:2003-09 Manufacturing processes chip removal - Part 1: Turning; Classification, subdivision, terms and definitions.
- [11] Lazić, M. (2002). *Obrada metala rezanjem, Monografija*. Kragujevac: Mašinski fakultet u Kragujevcu, Jugoslovensko društvo za tribologiju.
- [12] Sandvik Coromant. (2017). *Metal Cutting Technology Training Handbook*. Sandvik Coromant.
- [13] Klocke, F. (2011). *Manufacturing Processes 1: Cutting*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- [14] Grzesik, W. (2017). *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling, and Applications (2nd Edition)*. Amsterdam: Elsevier.

- [15] Milikić, D. (1999). *Tehnologija obrade rezanjem: Opšta i primenjena teorija*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu.
- [16] Duc, P., Giang, L., Dai, M., & Sy, D. (2020). An experimental study on the effect of tool geometry on tool wear and surface roughness in hard turning. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(9), 1-11. doi:10.1177/1687814020959885
- [17] Dogra, M., Sharma, V., & Dureja, J. (2011). Effect of tool geometry variation on finish turning - A Review. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 4(1), 1-13.
- [18] Sredanović, B. (2023). *Modeliranje procesa obrade rezanjem - Uticaj hlađenja i podmazivanja*. Banja Luka: Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka.
- [19] Majda, P., & Jastrzębska, J. (2021). Measurement uncertainty of generalized stiffness of machine tools. *Measurement*, 170, 108692. doi:10.1016/j.measurement.2020.108692
- [20] Vuković, V., Vuković, M., Knežević, I., & Bojanić, M. (2015). *Osnove mašinstva*. Banja Luka: Univerzitet za poslovni inženjering i menadžment Banja Luka.
- [21] Kang, I.-S., & Lee, T.-H. (2024). Influence of the Material Mechanical Properties on Cutting Surface Quality during Turning. *Processes*, 12, 1171. doi:10.3390/pr12061171
- [22] Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., & Yamane, Y. (2000). *Metal Machining: Theory and Applications*. London: Arnold.
- [23] Cukor, G. (2012). *Proračuni u obradi metala rezanjem*. Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet.
- [24] Laghari, R., He, N., Jamil, M., Hussain, M., Gupta, M., & Krolczyk, G. (2023). A State of the Art Review on Recently Developed Sustainable and Green Cooling/Lubrication Technologies in Machining Metal Matrix Composites (MMCs). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 10(6), 1637-1660. doi:10.1007/s40684-023-00521-8
- [25] Tanikić, D., Manić, M., & Devedžić, G. (2008). Modeliranje temperature strugotine korišćenjem metoda veštačke inteligencije. *Tehnička dijagnostika*, 7(4), 3-11.
- [26] Astakhov, V. (2010). *Geometry of Single-point Turning Tools and Drills: Fundamentals and Practical Applications*. London: Springer.
- [27] Boothroyd, G., & Knight, W. (2006). *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools (3rd Edition)*. Boca Raton, FL: CRC Press.

- [28] Yoon, M., & Kim, Y. (2004). Cutting dynamic force modelling of endmilling operation. *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156, 1383-1389. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.218
- [29] Globočki Lakić, G., Kramar, D., & Kopač, J. (2014). *Metal Cutting: Theory and Applications*. Banja Luka and Ljubljana: University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering.
- [30] de Melo, A., Milan, J., da Silva, M., & Machado, Á. (2006). Some Observations on Wear and Damages in Cemented Carbide Tools. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 28(3), 269-277. doi:10.1590/S1678-58782006000300004
- [31] Filković, L. (1999). *Priručnik za projektovanje i pripremu tehnoloških postupaka pri obradi metala rezanjem*. Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva.
- [32] Marinković, V., & Radovanović, M. (1994). *Priručnik za laboratorijske vežbe iz obrade materijala rezanjem*. Niš: Mašinski fakultet u Nišu.
- [33] Batzer, S., & Sutherland, J. (2001). A geometric analysis of semi-spiral chip morphology in orthogonal machining. *Machining Science and Technology*, 5(1), 63-76. doi:10.1081/MST-100103178
- [34] Ahmed, Y., Fox-Rabinovich, G., Paiva, J., Wagg, T., & Veldhuis, S. (2017). Effect of Built-Up Edge Formation during Stable State of Wear in AISI 304 Stainless Steel on Machining Performance and Surface Integrity of the Machined Part. *Materials*, 10(11), 1230. doi:10.3390/ma10111230
- [35] Gasagara, A., Jin, W., & Uwimbabazi, A. (2019). Stability analysis for a single-point cutting tool deflection in turning operation. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(6), 1-14. doi:10.1177/1687814019853188
- [36] Siddhpura, M., & Paurobally, R. (2013). Chatter stability and tool wear predictions in the presence of chatter vibrations for orthogonal turning process. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 11(2), 67-82. doi:10.7158/M12-019.2013.11.2
- [37] Ambhore, N., Kamble, D., & Chinchani, S. (2020). Analysis of tool vibration and surface roughness with tool wear progression in hard turning: An experimental and statistical approach. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(1), 6461-6472. doi:10.15282/jmes.14.1.2020.21.0506

- [38] Deja, M., & Licow, R. (2021). A pilot study to assess manufacturing processes using selected point measures of vibroacoustic signals generated on a multitasking machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(3), 807-822. doi:10.1007/s00170-020-06180-2
- [39] Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology (7th Edition)*. Singapore: Pearson Education South Asia.
- [40] van Luttervelt, C., Childs, T., Jawahir, I., Klocke, F., Venuvinod, P., Altintas, Y., . . . Sato, H. (1998). Present Situation and Future Trends in Modelling of Machining Operations Progress Report of the CIRP Working Group 'Modelling of Machining Operations'. *CIRP Annals*, 47(2), 587-626. doi:10.1016/S0007-8506(07)63244-2
- [41] Ivković, B. (1994). *Obrada metala rezanjem*. Kragujevac: Mašinski fakultet u Kragujevcu, Jugoslovensko društvo za tribologiju.
- [42] Cukor, G. (2021). *Obrada metala rezanjem*. Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet.
- [43] Jayal, A., Badurdeen, F., Dillon Jr., O., & Jawahir, I. (2010). Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(3), 144-152. doi:10.1016/j.cirpj.2010.03.006
- [44] Mitić, M. (2007). Indikatori održivosti kao instrument u upravljanju tehnološkim razvojem i prirodnim resursima. *Istraživanja i projektovanja za privredu*, 5(17), 7-14.
- [45] Gupta, K. (2020). A Review on Green Machining Techniques. *Procedia Manufacturing*, 51, 1730-1736. doi:10.1016/j.promfg.2020.10.241
- [46] Duflou, J., Sutherland, J., Dornfeld, D., Hermann, C., Jeswiet, J., Kara, S., . . . Kellens, K. (2012). Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2), 587-609. doi:10.1016/j.cirp.2012.05.002
- [47] Sihag, N., & Sangwan, K. (2020). A systematic literature review on machine tool energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123125. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123125
- [48] Sekulić, M. (2021). *Inovacione tehnologije obrade rezanjem*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu.
- [49] Jozić, S., Lela, B., Krolo, J., & Jakovljevic, S. (2023). Production of Open-Cell Metal Foams by Recycling of Aluminum Alloy Chips. *Materials*, 16(11), 3930. doi:10.3390/ma16113930

- [50] Yin, R., Ke, J., Mendis, G., & Sutherland, J. (2019). A cutting parameter-based model for cost and carbon emission optimisation in a NC turning process. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(10), 919-935. doi:10.1080/0951192X.2019.1667026
- [51] Tanović, L., & Петраков, Ю. (2007). *Teorija i simulacija procesa obrade*. Beograd: Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [52] Byrne, G., Dornfeld, D., & Denkena, B. (2003). Advancing Cutting Technology. *CIRP Annals*, 52(2), 483-507. doi:10.1016/S0007-8506(07)60200-5
- [53] Madić, M., & Radovanović, M. (2011). Metodologija modeliranja procesa obrade rezanjem primenom neuronskih mreža. *IMK-14 Istraživanje i razvoj*, 17(1), 11-16.
- [54] Wang, L., Cai, W., He, Y., Peng, T., Xie, J., Hu, L., & Li, L. (2023). Equipment–process–strategy integration for sustainable machining: a review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 18(3), 36. doi:10.1007/s11465-023-0752-4
- [55] Jurković, M. (1999). *Matematičko modeliranje inženjerskih procesa i sistema*. Bihać: Mašinski fakultet Bihać.
- [56] Radovanović, M., & Madić, M. (2019). *Planiranje i analiza eksperimenata*. Niš: Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu.
- [57] Tarić, M. (2018). *Modelovanje procesa obrade struganjem termički obrađenog čelika, Doktorska disertacija*. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka.
- [58] Dubey, A., & Yadava, V. (2008). Laser beam machining - A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(6), 609-628. doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.10.017
- [59] Globočki Lakić, G., Sredanović, B., Kramar, D., & Kopač, J. (2016). Machinability of C45E steel - Application of minimum quantity lubrication and high pressure jet assisted machining techniques. *Transactions of FAMENA*, 40(2), 45-58. doi:10.21278/TOF.40204
- [60] Montgomery, D., Peck, E., & Vining, G. (2001). *Introduction to Linear Regression Analysis (3rd Edition)*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- [61] Madić, M. (2013). *Matematičko modeliranje i optimizacija procesa laserskog sečenja primenom metoda veštačke inteligencije, Doktorska disertacija*. Niš: Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu.

- [62] Ilzarbe, L., Álvarez, M., & Tanco, M. (2008). Practical Applications of Design of Experiments in the Field of Engineering: A Bibliographical Review. *Quality and Reliability Engineering International*, 24(4), 417-428. doi:10.1002/qre.909
- [63] Lukács, J., & Horváth, R. (2022). Comprehensive Investigations of Cutting with Round Insert: Introduction of a Predictive Force Model with Verification. *Metals*, 12(2), 257. doi:10.3390/met12020257
- [64] Kienzle, O., & Victor, U. (1957). Spezifische Schnittkräfte bei der Metallbearbeitung. *Werkstattstechnik*, 47, 224-225.
- [65] Horváth, R. (2015). A New Model for Fine Turning Forces. *Acta Polytechnica Hungarica*, 12(7), 109-128. doi:10.12700/APH.12.7.2015.7.7
- [66] Saglam, H., Yaldiz, S., & Unsacar, F. (2007). The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature. *Materials and Design*, 28(1), 101-111. doi:10.1016/j.matdes.2005.05.015
- [67] Horváth, R., & Lukács, J. (2017). Application of a Force Model Adapted for the Precise Turning of Various Metallic Materials. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 63(9), 489-500. doi:10.5545/sv-jme.2017.4430
- [68] Cukor, G., & Jurković, Z. (2010). Optimization of turning using evolutionary algorithms. *Engineering Review*, 30(2), 1-10.
- [69] Bouacha, K., Yallese, M., Mabrouki, T., & Rigal, J.-F. (2010). Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28(3), 349-361. doi:10.1016/j.ijrmhm.2009.11.011
- [70] Ding, Y., Wang, X., Xie, L., & Yang, H. (2011). Modeling and Analysis of Cutting Forces in Hard Turning T250 Steel Using CBN Tools. *Advanced Materials Research*, 154-155, 694-700. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.154-155.694
- [71] Aouici, H., Yallese, M., Chaoui, K., Mabrouki, T., & Rigal, J.-F. (2012). Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization. *Measurement*, 45(3), 344-353. doi:10.1016/j.measurement.2011.11.011
- [72] Suresh, R., Basavarajappa, S., & Samuel, G. (2012). Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool. *Measurement*, 45(7), 1872-1884. doi:10.1016/j.measurement.2012.03.024

- [73] Bartarya, G., & Choudhury, S. (2012). State of the art in hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 53(1), 1-14. doi:10.1016/j.ijmachtools.2011.08.019
- [74] Madić, M., & Radovanović, M. (2013). Modeling and analysis of correlations between cutting parameters and cutting force components in turning AISI 1043 steel using ANN. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 35(2), 111-121. doi:10.1007/s40430-013-0012-3
- [75] Rao, C., Rao, D., & Srihari, P. (2013). Influence of cutting parameters on cutting force and surface finish in turning operation. *Procedia Engineering*, 64, 1405-1415. doi:10.1016/j.proeng.2013.09.222
- [76] Chinchankar, S., & Choudhury, S. (2013). Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: An optimization approach. *Measurement*, 46(4), 1572-1584. doi:10.1016/j.measurement.2012.11.032
- [77] Cica, D., Sredanovic, B., Lakic-Globocki, G., & Kramar, D. (2013). Modeling of the Cutting Forces in Turning Process Using Various Methods of Cooling and Lubricating: An Artificial Intelligence Approach. *Advances in Mechanical Engineering*, 5, 798597. doi:10.1155/2013/798597
- [78] Bhuiyan, T., & Ahmed, I. (2014). Optimization of Cutting Parameters in Turning Process. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 7(1), 233-239. doi:10.4271/2014-01-9097
- [79] Kara, F., Aslantas, K., & Çiçek, A. (2015). ANN and multiple regression method-based modelling of cutting forces in orthogonal machining of AISI 316L stainless steel. *Neural Computing and Applications*, 26(1), 237-250. doi:10.1007/s00521-014-1721-y
- [80] Tang, L., Cheng, Z., Huang, J., Gao, C., & Chang, W. (2015). Empirical models for cutting forces in finish dry hard turning of hardened tool steel at different hardness levels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(1-4), 691-703. doi:10.1007/s00170-014-6291-8
- [81] Meddour, I., Yallese, M., Khattabi, R., Elbah, M., & Boulanouar, L. (2015). Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool: cutting conditions optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(5-8), 1387-1399. doi:10.1007/s00170-014-6559-z

- [82] Shankar, S., Thangarasu, S., Mohanraj, T., & Pravien, D. (2015). Prediction of cutting force in turning process: An experimental and fuzzy approach. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology*, 28(4), 1785-1793. doi:10.3233/IFS-141465
- [83] Ramezani, M., & Afsari, A. (2015). Surface roughness and cutting force estimation in the CNC turning using artificial neural networks. *Management Science Letters*, 5(4), 357-362. doi:10.5267/j.msl.2015.2.010
- [84] Azizi, M., Belhadi, S., Yallese, M., Lagred, A., Bouziane, A., & Boulanouar, L. (2016). Study of the machinability of hardened 100Cr6 bearing steel with TiN coated ceramic inserts. *Proceedings of the third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution (ICEMAEP2016)*, (pp. 172-177). Constantine.
- [85] Maňková, I., Vrabel, M., Beňo, J., & Franková, M. (2016). Modelling and Analysis of Relationship between Cutting Parameters Surface Roughness and Cutting Forces Using Response Surface Methodology when Hard Turning with Coated Ceramic Inserts. *Key Engineering Materials*, 686, 19-26. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.686.19
- [86] Magdum, V., & Naik, V. (2017). Investigating Feed Rate Effect on Cutting Force of EN 8 Turning. *Asian Review of Mechanical Engineering*, 6(1), 8-12. doi:10.51983/arme-2017.6.1.2424
- [87] Pathak, A., Warghane, R., & Deokar, S. (2018). Optimization of cutting parameters in Dry Turning of AISI A2 Tool Steel using Carbide Tool by Taguchi Based Fuzzy Logics. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5082-5090. doi:10.1016/j.matpr.2017.12.087
- [88] Meddour, I., Yallese, M., Bensouilah, H., Khellaf, A., & Elbah, M. (2018). Prediction of surface roughness and cutting forces using RSM, ANN, and NSGA-II in finish turning of AISI 4140 hardened steel with mixed ceramic tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(5-8), 1931-1949. doi:10.1007/s00170-018-2026-6
- [89] Patole, P., & Kulkarni, V. (2018). Prediction of surface roughness and cutting force under MQL turning of AISI 4340 with nano fluid by using response surface methodology. *Manufacturing Review*, 5, 5. doi:10.1051/mfreview/2018002
- [90] Vasu, M., & Nayaka, H. (2018). Investigation of Cutting Force Tool Tip Temperature and Surface Roughness during Dry Machining of Spring Steel. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 7141-7149. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.379

- [91] Makhfi, S., Haddouche, K., Bourdim, A., & Habak, M. (2018). Modeling of Machining Force in Hard Turning Process. *Mechanika*, 24(3), 367-375. doi:10.5755/j01.mech.24.3.19146
- [92] Zerti, A., Yallese, M., Meddour, I., Belhadi, S., Haddad, A., & Mabrouki, T. (2019). Modeling and multi-objective optimization for minimizing surface roughness, cutting force, and power, and maximizing productivity for tempered stainless steel AISI 420 in turning operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(1-4), 135-157. doi:10.1007/s00170-018-2984-8
- [93] Bouzid, L., Yallese, M., Belhadi, S., & Haddad, A. (2020). Modelling and optimization of machining parameters during hardened steel AISI D3 turning using RSM, ANN and DFA techniques: Comparative study. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(2), 6835-6847. doi:10.15282/jmes.14.2.2020.23.0535
- [94] Sharma, V., Kumar, P., & Prakash Misra, J. (2020). Cutting force predictive modelling of hard turning operation using fuzzy logic. *Materials Today: Proceedings*, 26(2), 740-744. doi:10.1016/j.matpr.2020.01.018
- [95] Osička, K., Zouhar, J., Sliwková, P., & Chladil, J. (2022). Cutting Force When Machining Hardened Steel and the Surface Roughness Achieved. *Applied Sciences*, 12(22), 11526. doi:10.3390/app122211526
- [96] Sahachar Reddy, T., Banik, T., Velagala, R., & Kashyap, S. (2020). A study and modeling of cutting forces in dry turning of heat treated AISI H13 tool steel with brazed tungsten carbide tip. *Materials Today: Proceedings*, 24(2), 704-713. doi:10.1016/j.matpr.2020.04.326
- [97] Ibraheem, M. (2020). Prediction of Cutting Force in Turning Process by Using Artificial Neural Network. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 16(2), 34-46. doi:10.22153/kej.2020.04.002
- [98] Aslan, A. (2020). Optimization and analysis of process parameters for flank wear, cutting forces and vibration in turning of AISI 5140: A comprehensive study. *Measurement*, 163, 107959. doi:10.1016/j.measurement.2020.107959
- [99] Abdellaoui, L., Khlifi, H., Bouzid Sai, W., & Hamdi, H. (2021). Tool nose radius effects in turning process. *Machining Science and Technology*, 25(1), 1-30. doi:10.1080/10910344.2020.1815038
- [100] Nur, R., Yusof, N., Sudin, I., Nor, F., & Kurniawan, D. (2021). Determination of Energy Consumption during Turning of Hardened Stainless Steel Using Resultant Cutting Force. *Metals*, 11(4), 565. doi:10.3390/met11040565

- [101] Alajmi, M., & Almeshal, A. (2021). Modeling of Cutting Force in the Turning of AISI 4340 Using Gaussian Process Regression Algorithm. *Applied Sciences*, 11(9), 4055. doi:10.3390/app11094055
- [102] Özdemir, M., Ercan, K., Büyüker, B., & Akyildiz, H. (2021). Analysis of the Effect of Tool Nose Radius, Feed Rate, and Cutting Depth Parameters on Surface Roughness and Cutting Force in CNC Lathe Machining of 36CrNiMo4 Alloy Steel. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(2), 308-317.
- [103] Ahmed, T., Mollick, N., Mahmud, S., & Ahmad, T. (2021). Analysis of Effects of Machining Parameters on Cutting Force Components in Turning AISI 201 Stainless Steel Using Cemented Carbide Cutting Tool Insert. *Materials Today: Proceedings*, 42(2), 832-837. doi:10.1016/j.matpr.2020.11.416
- [104] Projoth, T., Victor, D., & Nanthakumar, P. (2021). Analysis and prediction of cutting force through lathe tool dynamometer in CNC turning process. *Materials Today: Proceedings*, 46(9), 4174-4179. doi:10.1016/j.matpr.2021.02.681
- [105] Kumar, P., & Yadav, S. (2022). Experimental Analysis of (triaxial /3D) Machining Cutting Forces and Surface Roughness in Turning Operation of EN8 Steel. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 10(11), 9-17. doi:10.22214/ijraset.2022.47240
- [106] Safi, K., Yallese, M., Belhadi, S., Mabrouki, T., & Chihaoui, S. (2023). Modeling of cutting force and power consumption using ANN and RSM methods in turning of AISI D3: Comparative study and precision benefit. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Sofia*, 53, 49-65. doi:10.55787/jtams.23.53.1.49
- [107] Stanojković, J., Madić, M., Trifunović, M., Janković, P., & Petković, D. (2025). A novel approach to predicting the cutting force in turning using dimensional analysis. *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Mechanical Engineering*. doi:10.22190/FUME241129010S
- [108] Maksimović, M. (2004). *Zbirka zadataka iz jediničnih operacija hemijskog inženjerstva*. Banja Luka: Tehnološki fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci.
- [109] Cvijović, S., Đorđević, B., & Tasić, A. (1970). *Jedinice, dimenzije i dimenziona analiza*. Beograd: Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- [110] Gibbings, J. (1982). A logic of dimensional analysis. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 15(7), 1991-2002. doi:10.1088/0305-4470/15/7/011
- [111] Gibbings, J. (2011). *Dimensional Analysis*. London: Springer-Verlag.

- [112] Tan, Q.-M. (2011). *Dimensional Analysis With Case Studies in Mechanics*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- [113] Maluckov, Č., Pavlović, Z., & Radović, M. (2009). *Zbirka zadataka iz obrade rezultata fizičkih merenja*. Bor: Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru.
- [114] Fourier, J. (1878). *The Analytical Theory of Heat*. London: Cambridge: At the University Press.
- [115] Conejo, A. (2021). *Fundamentals of Dimensional Analysis: Theory and Applications in Metallurgy*. Singapore: Springer.
- [116] Rayleigh. (1915). The Principle of Similitude. *Nature*, 95(2373), 202-203. doi:10.1038/095202d0
- [117] Mendoza, C. (1994). A theorem for Rayleigh's method of dimensional analysis and its proof. *Mechanics Research Communications*, 21(2), 103-107. doi:10.1016/0093-6413(94)90081-7
- [118] Buckingham, E. (1914). On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations. *Physical Review*, 4(4), 345-376. doi:10.1103/PhysRev.4.345
- [119] Bridgman, P. (1931). *Dimensional analysis (2nd Edition)*. New Haven, CT: Yale University Press.
- [120] Sonin, A. (1992). *The Physical Basis of Dimensional Analysis*. Cambridge, MA: Department of Mechanical Engineering, MIT.
- [121] Langhaar, H. (1951). *Dimensional Analysis and Theory of Models*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- [122] Ipsen, D. (1960). *Units, Dimensions, and Dimensionless Numbers*. New York, NY: McGraw Hill Book Company.
- [123] Van Driest, E. (1946). On Dimensional Analysis and the Presentation of Data in Fluid-Flow Problems. *Journal of Applied Mechanics*, 13(1), A34-A40. doi:10.1115/1.4009512
- [124] Sharp, J., Deb, A., & Deb, M. (1992). Applications of Matrix Manipulation in Dimensional Analysis Involving Large Numbers of Variables. *Marine Structures*, 5(4), 333-348. doi:10.1016/0951-8339(92)90018-K
- [125] Worstell, J. (2014). *Dimensional Analysis: Practical Guides in Chemical Engineering*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.

- [126] Szirtes, T., & Rózsa, P. (2007). *Applied Dimensional Analysis and Modeling (2nd Edition)*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.
- [127] Young, D., Munson, B., Okiishi, T., & Huebsch, W. (2011). *A Brief Introduction to Fluid Mechanics (5th Edition)*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [128] Giancoli, D. (2005). *Physics: Principles with Applications (6th Edition)*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- [129] Barenblatt, G. (2003). *Scaling*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [130] White, F. (2010). *Fluid Mechanics (7th Edition)*. New York, NY: McGraw Hill.
- [131] Amigo, F., Urbikain, G., de Lacalle, L., Fernández Lucio, P., Pereira, O., & Fernández Valdivielso, A. (2023). On the effects of cutting edge angle on high feed turning of Inconel 718© superalloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(9-10), 4237-4252. doi:10.1007/s00170-023-10974-5
- [132] Box, G., & Wilson, K. (1951). On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, 13(1), 1-38. doi:10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x
- [133] Box, G., & Hunter, J. (1957). Multi-Factor Experimental Designs for Exploring Response Surfaces. *The Annals of Mathematical Statistics*, 28(1), 195-241.
- [134] Kovač, P. (2015). *Metode planiranja i obrade eksperimenta (drugo izdanje)*. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka.
- [135] Montgomery, D. (2017). *Design and Analysis of Experiments (9th Edition)*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [136] Antony, J. (2023). *Design of Experiments for Engineers and Scientists (3rd Edition)*. Amsterdam: Elsevier.
- [137] Box, G., Hunter, J., & Hunter, W. (2005). *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery (2nd Edition)*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [138] Taguchi, G. (1986). *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*. Tokyo: Asian Productivity Organization.
- [139] Phadke, M. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

- [140] Bolboacă, S., & Jäntschi, L. (2007). Design of Experiments: Useful Orthogonal Arrays for Number of Experiments from 4 to 16. *Entropy*, 9(4), 198-232. doi:10.3390/e9040198
- [141] Czyżżak, P., & Jaskiewicz, A. (1998). Pareto Simulated Annealing - A Metaheuristic Technique for Multiple-Objective Combinatorial Optimization. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 37(1), 34-47. doi:10.1002/(SICI)1099-1360(199801)7:1%3C34::AID-MCDA161%3E3.0.CO;2-6
- [142] Dormer Pramet. (2021). *Catalog Turning 2021 – 2022*. Šumperk: Dormer Pramet.
- [143] Dormer Pramet. (2024). *Catalog Turning 2024*. Šumperk: Dormer Pramet.
- [144] Kalajdžić, M., Tanović, L., Babić, B., Glavonjić, M., Miljković, Z., Puzović, R., . . . Vasić, I. (2021). *Tehnologija obrade rezanjem - Priručnik (deveto izdanje)*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.
- [145] Mitskovski, J., & Magdeski, J. (1996). Kinetic of tempering hardened steels Č.1530 and Č.4732. *Journal of Engineering Creation and Technology "ENGINEERING"*, 1(2), 157-166.
- [146] Chen, Y., Luo, L., Zhang, Y., Zhou, X., Zeng, D., & Yu, F. (2024). Effect of Al Element on Retained Austenite, Residual Compressive Stress, and Contact Fatigue Life of Carburized and Quenched 20MnCr5 Steel Gear. *Materials*, 17(23), 5764. doi:10.3390/ma17235764
- [147] Kubit, A., Bucior, M., Zielecki, W., & Stachowicz, F. (2016). The impact of heat treatment and shot peening on the fatigue strength of 51CrV4 steel. *Procedia Structural Integrity*, 2, 3330-3336. doi:10.1016/j.prostr.2016.06.415
- [148] Ernst, I., & Duh, D. (2004). Properties of cold-work tool steel X155CrVMo12-1 produced via spray forming and conventional ingot casting. *Journal of Materials Science*, 39(22), 6835-6838. doi:10.1023/B:JMSC.0000045614.59164.26
- [149] Radovanović, M., Dašić, P., & Janković, P. (2006). Experimental determination of cutting force by longitudinal turning of C60E steel. *Romanian Technical Sciences Academy*, 2, 113-119.
- [150] Saglam, H., Unsacar, F., & Yaldiz, S. (2006). Investigation of the effect of rake angle and approaching angle on main cutting force and tool tip temperature. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(2), 132-141. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.05.002
- [151] Groover, M. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems (4th Edition)*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

- [152] Baldoukas, A., Soukatzidis, F., Demosthenous, G., & Lontos, A. (2008). Experimental investigation of the effect of cutting depth, tool rake angle and workpiece material type on the main cutting force during a turning process. *Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN)* (pp. 47-55). Chalkidiki: EEΔM and PCCM.
- [153] Parida, A., & Maity, K. (2017). Effect of nose radius on forces, and process parameters in hot machining of Inconel 718 using finite element analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(2), 687-693. doi:10.1016/j.jestch.2016.10.006
- [154] Davim, J. (2008). *Machining: Fundamentals and Recent Advances*. London: Springer-Verlag.
- [155] Demir, Z., & Adiyaman, O. (2019). Investigation of influence of approach angle and chip slenderness ratio on vibration, chip formation and surface quality in turning of AISI 1050 steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(10), 467. doi:10.1007/s40430-019-1977-3
- [156] Yılmaz, B., Karabulut, Ş., & Güllü, A. (2020). A review of the chip breaking methods for continuous chips in turning. *Journal of Manufacturing Processes*, 49, 50-69. doi:10.1016/j.jmapro.2019.10.026
- [157] Trifunović, M., Madić, M., & Janković, P. (2023). Analysis of chip compression ratio in turning of polyoxymethylene copolymer. *Journal of Production Engineering*, 26(2), 13-17. doi:10.24867/JPE-2023-02-013
- [158] Denkena, B., Breidenstein, B., Krödel, A., & Prasanthan, V. (2021). Chip formation in machining hybrid components of SAE1020 and SAE5140. *Production Engineering*, 15(2), 187-197. doi:10.1007/s11740-020-00993-6
- [159] Grzesik, W. (2008). *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling, and Applications (1st Edition)*. Amsterdam: Elsevier.
- [160] Günay, M., Aslan, E., Korkut, İ., & Şeker, U. (2004). Investigation of the effect of rake angle on main cutting force. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(9), 953-959. doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.01.015
- [161] Samsudeensadham, S., Kumar Suppan, D., Krishnaraj, V., & Parthiban, M. (2020). An analysis on the effect of machining parameters on surface quality during dry machining of Ti-6Al-4V alloy. *Materials Today: Proceedings*, 22(4), 2814-2823. doi:10.1016/j.matpr.2020.03.413

- [162] El-Tamimi, A., & El-Hossainy, T. (2008). Investigating the Machinability of AISI 420 Stainless Steel Using Factorial Design. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(4), 419-426. doi:10.1080/10426910801974838
- [163] Kiran Sagar, C., Kumar, T., Priyadarshini, A., & Kumar Gupta, A. (2019). Prediction and optimization of machining forces using Oxley's predictive theory and RSM approach during machining of WHAs. *Defence Technology*, 15(6), 923-935. doi:10.1016/j.dt.2019.07.004
- [164] Demir, Z., & Adıyaman, O. (2018). A mathematical approach to investigate the effect of chip slenderness ratio in primary deformation zone in turning. *Academia Journal of Scientific Research*, 6(9), 351-357. doi:10.15413/ajsr.2018.0136
- [165] Nedić, B., Tadić, B., Mitrović, R., & Jačmenica, R. (1996). Prilog izučavanju procesa obrade struganjem sa aspekta analize otpora rezanja. *Zbornik radova 26. Međunarodnog savetovanja proizvodnog mašinstva Jugoslavije (SPMJ'96)*. Podgorica-Budva.
- [166] Ryabov, O., Kano, S., Sawada, H., & Herwan, J. (2018). Ratio of Cutting Force Components in Turning. *Materials Science Forum*, 940, 65-71. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.940.65
- [167] Choudhury, S., & Kishore, K. (2000). Tool wear measurement in turning using force ratio. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(6), 899-909. doi:10.1016/S0890-6955(99)00088-7
- [168] Sztankovics, I. (2025). Design and Realization of a Cutting Force Measuring System to Analyze the Chip Removal Process in Rotational Turning. *Metrology*, 5(1), 5. doi:10.3390/metrology5010005
- [169] Kryzhanivskyy, V., Bushlya, V., Gutnichenko, O., M'Saoubi, R., & Ståhl, J. (2018). Heat flux in metal cutting: Experiment, model, and comparative analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 134, 81-97. doi:10.1016/j.ijmachtools.2018.07.002
- [170] Hascelik, A., Aslantas, K., & Ahmed, W. (2019). Finite Element Modelling of Edge Radius Effect in Micro Turning Process. *Proceedings of the 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)* (pp. 1-5). Dubai: IEEE. doi:10.1109/ICASET.2019.8714250
- [171] Li, C., Zou, Z., Duan, W., Liu, J., Gu, F., & Ball, A. (2023). Characterizing the Vibration Responses of Flexible Workpieces during the Turning Process for Quality Control. *Applied Sciences*, 13(23), 12611. doi:10.3390/app132312611

- [172] Li, W., Zhou, B., Xing, L., He, H., Ni, X., Li, M., & Gong, Z. (2023). Influence of cutting parameters and tool nose radius on the wear behavior of coated carbide tool when turning austenitic stainless steel. *Materials Today Communications*, 37, 107349. doi:10.1016/j.mtcomm.2023.107349
- [173] Balwan, V., Dabade, B., & Wankhade, L. (2022). Influence of hard turning parameters on cutting forces of EN 353 steel. *Materials Today: Proceedings*, 63, 149-156. doi:10.1016/j.matpr.2022.02.425
- [174] Tzotzis, A., García-Hernández, C., Huertas-Talón, J.-L., & Kyratsis, P. (2020). Influence of the Nose Radius on the Machining Forces Induced during AISI-4140 Hard Turning: A CAD-Based and 3D FEM Approach. *Micromachines*, 11(9), 798. doi:10.3390/mi11090798
- [175] Tagiuri, Z., Dao, T.-M., Samuel, A., & Songmene, V. (2022). A Numerical Model for Predicting the Effect of Tool Nose Radius on Machining Process Performance during Orthogonal Cutting of AISI 1045 Steel. *Materials*, 15(9), 3369. doi:10.3390/ma15093369
- [176] Radzevich, S. (2022). *Theory of Gearing: Kinematics, Geometry, and Synthesis (3rd Edition)*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- [177] Ezugwu, E. (2005). Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(12-13), 1353-1367. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003
- [178] Goch, G., Knapp, W., & Härtig, F. (2012). Precision engineering for wind energy systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2), 611-634. doi:10.1016/j.cirp.2012.05.011
- [179] Hyatt, G., Piber, M., Chaphalkar, N., Kleinhenz, O., & Mori, M. (2014). A Review of New Strategies for Gear Production. *Procedia CIRP*, 14, 72-76. doi:10.1016/j.procir.2014.03.034
- [180] Smolenicki, D. (2017). *Chip formation analysis of innovative graphitic steel in drilling processes, Ph.D. Thesis*. Zurich: ETH Zurich.
- [181] Manna, A., & Bhattacharayya, B. (2003). A study on machinability of Al/SiC-MMC. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 711-716. doi:10.1016/S0924-0136(03)00905-1
- [182] Stratford, K., & Audy, J. (1997). Indirect monitoring of machinability in carbon steels by measurement of cutting forces. *Journal of Materials Processing Technology*, 67(1-3), 150-156. doi:10.1016/S0924-0136(96)02835-X

- [183] Sousa, V., Silva, F., Fecheira, J., Lopes, H., Martinho, R., Casais, R., & Ferreira, L. (2020). Cutting Forces Assessment in CNC Machining Processes: A Critical Review. *Sensors*, 20(16), 4536. doi:10.3390/s20164536
- [184] Trifunović, M., Madić, M., Janković, P., Rodić, D., & Gostimirović, M. (2021). Investigation of cutting and specific cutting energy in turning of POM-C using a PCD tool: Analysis and some optimization aspects. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127043. doi:10.1016/j.jclepro.2021.127043
- [185] German Institute for Standardisation. (1982). DIN 6584:1982-10 Terms of the cutting technique; forces, energy, work, power.
- [186] Grote, K.-H., & Antonsson, E. (2008). *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. Cham: Springer.
- [187] Stanojković, J., Madić, M., Trifunović, M., Janković, P., Petković, D., & Marinković, D. (2025). Analysis of the main cutting force, cutting energy and specific cutting energy in turning of X155CrVMo12–1 steel. *Acta Technica Jaurinensis*. doi:10.14513/actatechjaur.00808
- [188] Gutowski, T., Dahmus, J., & Thiriez, A. (2006). Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. *Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE2006)*, (pp. 623-627). Leuven.
- [189] Sealy, M., Liu, Z., Zhang, D., Guo, Y., & Liu, Z. (2016). Energy consumption and modeling in precision hard milling. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1591-1601. doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.094
- [190] Warsi, S., Jaffery, S., Ahmad, R., Khan, M., Ali, L., Agha, M., & Akram, S. (2017). Development of energy consumption map for orthogonal machining of Al 6061-T6 alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 232(14), 2510-2522. doi:10.1177/0954405417703424
- [191] Zhang, G., & Guo, C. (2015). Modeling of Cutting Force Distribution on Tool Edge in Turning Process. *Procedia Manufacturing*, 1, 454-465. doi:10.1016/j.promfg.2015.09.001
- [192] Zhang, Y., Zou, P., Li, B., & Liang, S. (2015). Study on optimized principles of process parameters for environmentally friendly machining austenitic stainless steel with high efficiency and little energy consumption. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(1-4), 89-99. doi:10.1007/s00170-014-6763-x
- [193] Groover, M. (2020). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems (7th Edition)*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

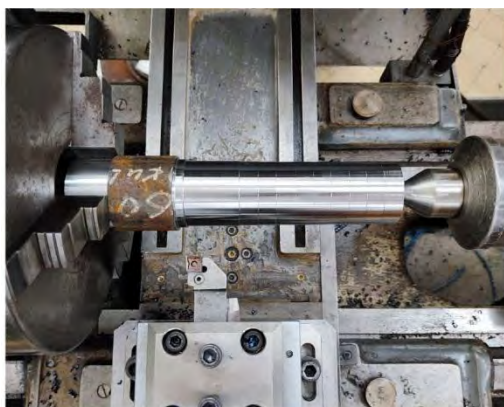
- [194] Bilga, P., Singh, S., & Kumar, R. (2016). Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1406-1417. doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.220
- [195] Mills, B., & Redford, A. (1983). *Machinability of Engineering Materials*. Dordrecht: Springer Science+Business Media.
- [196] Iscar. (2023). *Iscar Turning Lines Metric Catalog 2023*. Iscar.

PRILOG

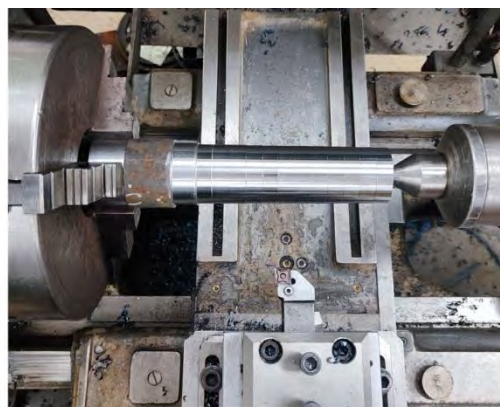
U nastavku doktorske disertacije predstavljeni su prilozi koji prate tok istraživanja.

Plilog 1.

Postavka eksperimenta za svih šest čelika, slika P.1.



Č.4732 (42CrMo4)



Č.4382 (20MnCrS5)



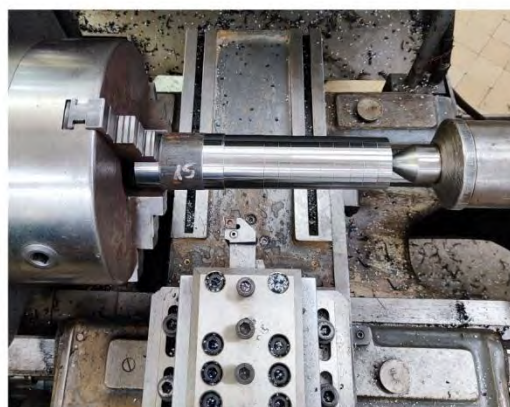
Č.4830 (51CrV4)



Č.1502 (-)



Č.4850 (X155CrVMo12-1)



Č.1531 (C45E)

Slika P.1 Postavka eksperimenta za svih šest čelika

Plilog 2.

U tabelama od P.1 do P.6 su prikazane eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora rezanja i predikcije kreiranih modela rezanja za sve istaživane čelike.

Tabela P.1 Eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora rezanja za čelik Č.4732 (42CrMo4)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija modela	
1	693.93	7.63	5.00	941	341	926.4	347.7
2	693.93	7.63	11.18	1000	381	1000.2	382.0
3	881.57	6.12	5.00	511	194	519.1	194.3
4	881.57	9.18	11.18	765	327	771.0	330.4
5	538.28	9.03	5.00	1623	611	1627.7	601.3
6	538.28	6.23	11.18	1284	430	1312.1	442.7

Tabela P.2 Eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora rezanja za čelik Č.4830 (51CrV4)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija modela	
1	693.93	7.63	5.00	917	348	970.2	398.3
2	693.93	7.63	11.18	1004	424	1010.1	429.5
3	881.57	6.12	5.00	512	207	502.2	196.0
4	881.57	9.18	11.18	766	366	770.4	368.4
5	538.28	9.03	5.00	1900	835	1834.5	773.2
6	538.28	6.23	11.18	1309	486	1338.8	501.1

Tabela P.3 Eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora rezanja za čelik Č.4850 (X155CrVMo12–1)

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija modela	
1	946.26	7.63	5.00	993	388	1029.4	417.6
2	946.26	7.63	11.18	1035	438	1032.9	436.7
3	1202.14	6.12	5.00	547	227	541.9	221.3
4	1202.14	9.18	11.18	781	361	788.6	365.6
5	734.02	9.03	5.00	1964	796	1916.6	761.7
6	734.02	6.23	11.18	1333	507	1367.7	523.7

*Tabela P.4 Eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora
rezanja za čelik Č.4382 (20MnCrS5)*

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija modela	
1	693.93	7.63	5.00	969	478	971.8	479.0
2	693.93	7.63	11.18	977	497	994.8	508.2
3	881.57	6.12	5.00	508	247	511.3	249.2
4	881.57	9.18	11.18	742	404	741.1	403.5
5	538.28	9.03	5.00	1831	903	1817.1	895.6
6	538.28	6.23	11.18	1334	634	1352.6	644.9

*Tabela P.5 Eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora
rezanja za čelik Č.1502 (-)*

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija modela	
1	744.39	7.63	5.00	895	330	906.8	354.9
2	744.39	7.63	11.18	939	377	954.4	386.9
3	945.68	6.12	5.00	465	182	466.2	177.7
4	945.68	9.18	11.18	731	326	731.7	325.8
5	577.43	9.03	5.00	1747	712	1723.4	680.6
6	577.43	6.23	11.18	1235	451	1257.7	460.9

*Tabela P.6 Eksperimentalne vrednosti i predikcije modela glavnog i aksijalnog otpora
rezanja za čelik Č.1531 (C45E)*

Ogled	v/v_f π_2	a_p/f π_3	κ/γ_o π_4	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
				eksperiment		predikcija modela	
1	744.39	7.63	5.00	908	320	944.4	359.3
2	744.39	7.63	11.18	969	375	965.5	367.5
3	945.68	6.12	5.00	492	185	486.6	176.6
4	945.68	9.18	11.18	724	293	731.6	299.4
5	577.43	9.03	5.00	1843	753	1794.7	704.3
6	577.43	6.23	11.18	1254	434	1288.5	453.3

BIOGRAFIJA

Jelena Stanojković rođena je 4. aprila 1989. godine u Aleksincu. Osnovno i srednje obrazovanje završila je u rodnom gradu, gde je 2008. godine maturirala u Aleksinačkoj gimnaziji, na prirodno-matematičkom smeru.

Iste godine upisala je osnovne akademske studije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu. Osnovne akademske studije je završila 1. jula 2011. godine sa prosečnom ocenom 9.36, odbranom završnog rada pod nazivom „Nesigurnost merenja“.

Po završetku osnovnih akademskih studija, 2011. godine je upisala Master akademske studije na istom fakultetu, na smeru Proizvodno-informacione tehnologije i industrijski menadžment. Master studije završila je 18. oktobra 2013. godine sa prosečnom ocenom 9.72, odbranom master rada „Montaža elektronskih komponenti na štampanim pločama“.

Doktorske akademske studije iz oblasti Proizvodno-informacionih tehnologija i industrijskog menadžmenta je upisala 2013. godine na Mašinskom fakultetu u Nišu. Kao stipendista Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja bila je uključena u projekat „Istraživanje primene savremenih nekonvencionalnih tehnologija u proizvodnim preduzećima sa ciljem povećanja efikasnosti korišćenja, kvaliteta proizvoda, smanjenja troškova i uštede energije i materijala“ (TP 35034), realizovan na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu.

Radno angažovanje započela je 2017. godine u Istraživačko-razvojnom centru „Alfatec“ u Nišu, gde je do 2019. godine bila zaposlena kao istraživač pripravnik.

Od marta 2019. godine radi kao asistent na Katedri za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka sa sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Univerziteta u Prištini. Od 2022. godine obavlja poslove projektovanja elektro-energetskih instalacija prema ANSI standardima u američkoj firmi (Terrapower solutions) na skraćeno radno vreme.

Izjava 1.

IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom:

**„Empirijsko modeliranje otpora rezanja kod struganja primenom dimenzionalne
analize“**

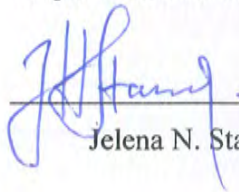
koja je odbranjena na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivao/la na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredio/la autorska prava, niti zloupotrebio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, _____

Potpis autora disertacije:



Jelena N. Stanojković

Izjava 2.

**IZJAVA O ISTOVETNOSTI ELEKTRONSKOG I ŠTAMPANOG OBLIKA
DOKTORSKE DISERTACIJE**

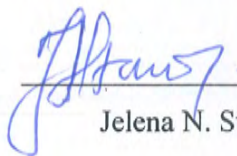
Naslov disertacije:

**„Empirijsko modeliranje otpora rezanja kod struganja primenom dimenzionalne
analize“**

Izjavljujem da je elektronski oblik moje doktorske disertacije, koju sam predao/la za
unošenje u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, istovetan štampanom obliku.

U Nišu, _____

Potpis autora disertacije:



Jelena N. Stanojković

Izjava 3.

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

„Empirijsko modeliranje otpora rezanja kod struganja primenom dimenzionalne analize“

Disertaciju sa svim prilogima predao/la sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
- ☒ 3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerađivanja (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerađivanja (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)¹

U Nišu, _____

Potpis autora disertacije:



Jelena N. Stanojković

¹ Autor disertacije obavezan je da izabere i označi (zaokruži) samo jednu od šest ponuđenih licenci; opis licenci dat je u nastavku teksta.

1. Autorstvo (CC BY)

Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora, na način određen od autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)

Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora, na način određen od autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)

Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora, na način određen od autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)

Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora, na način određen od autora ili davaoca licence, i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada

5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)

Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora, na način određen od autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora, na način određen od autora ili davaoca licence, i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda

²Više o licencama Kreativne zajednice na adresi:

http://creativecommons.org.rs/?page_id=74CC. Ovaj tekst NIJE sastavni deo izjava autora!