UNIVERZITET U BANJOJ LUCI

MAŠINSKI FAKULTET

Branislav Sredanović

MODELIRANJE FUNKCIJA OBRADIVOSTI U MIKRO-GLODANJU

Doktorska disertacija

Banja Luka, 2018.

UNIVERSITY OF BANJALUKA

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Branislav Sredanović

MODELLING OF MACHINABILITY FUNCTIONS IN MICRO-MILLING

Doctoral dissertation

Banja Luka, 2018.

Република Српска
УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
Сенат Универзитета

Univerzitet u Banjoj Luci
MAŠINSKI FAKULTET BANJA LUKA
Broj: 16/1. 2487 / 15
Dana: 23.12 20 19.

Број: 02/04-3.4241-61/14
Дана, 27.11.2014. године

На основу члана 148. Закона о о високом образовању („Службени гласник Републике Српске“, 73/10, 104/11, 84/12 и 108/13) и члана 33. Статута Универзитета у Бањој Луци, Сенат Универзитета на 35. сједници од 27.11.2014. године, д о н о с и

О Д Л У К У

Даје се сагласност на Извјештај о оцјени подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације на Машинском факултету за **мр Бранислава Средановића** на тему под насловом „Моделирање функција обрадивости у микро-глодању“.

О б р а з л о ж е њ е

Машински факултет Универзитета у Бањој Луци доставио је Сенату Универзитета на сагласност Извјештај о оцјени подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације докторанта мр Бранислава Средановића на тему под насловом „Моделирање функција обрадивости у микро-глодању“.

Сенат Универзитета је оцијенио да је Извјештај у складу са условима утврђеним Законом о универзитету, због чега је одлучено као у диспозитиву ове Одлуке.

ДОСТАВЉЕНО:
1. Именованом,
2. Машинском факултету Х 2
3. а/а.

ПРЕДСЈЕДАВАЈУЋИ СЕНАТА
Р Е К Т О Р
Проф. др Станко Станић

Informacije o mentoru i disertaciji

Mentor:
Dr Gordana Globočki Lakić, redovni profesor, Mašinski fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci.

Komentor:
Dr Janez Kopač, redovni profesor, Fakulteta za strojništvo, Univerzitet u Ljubljani.

Naziv doktorske disertacije:
Modeliranje funkcija obradivosti u mikro-glodanju

Rezime:
Razvoj medicine, energetike, autoindustrije i avioindustrije intezivira upotrebu dijelova relativno malih dimenzija. To uslovljava potrebu za uvođenjem produktivnih, efikasnih i ekonomičnih mikroinženjerskih proizvodnih tehnologija. Relativno veliki procenat mikrodijelova kao što su minijaturni alati i funkcionalni dijelovi, izrađuju se od teškoobradivih materijala primjenom standardnih proizvodih tehnika kao što su elektroeroziona i laserska obrada. Cilj disertacije je istraživanje mogućnosti primjene mikroglodanja u izradi mikrodijelova od visokolegiranih čelika složene konfiguracije, a u svrhu izbjegavanja negativnih posljedica primjene laserske i elektroerozione obrade. Istraživanja su fokusuirana na tačnost i kvalitet obrade hrom-molibdenskog alatnog čelika X155CrMoV12, zbog njegove izuzetno loše obradivosti. Obrada je vršena vitkim loptastim mikroglodalima. Analizirane su karakteristike procesa mikroglodanja u odnosu na konvencionalno glodanje na makro nivou i izvršen pregled i analiza osnovnih tehnika modeliranja procesa rezanja na mikro nivou. Predložen je model profilnog mikroglodanja koji sadrži funkcionalne zavisnosti efektivnih geometrijskih parametara i kriterijuma obradivosti, od ulaznih tehnoloških parametara, uslova obrade i svojstava obratka. Razvijeni su modeli habanja i defleksije alata, otpora rezanja, i hrapavosti obrađene površine. Definisana je minimalna debljina strugotine i uslovi pojave efekta veličine. Na osnovu ekperimentalnih mjerenja izvršena je kalibracija koeficijenata predloženih modela, izvršeno poređenje njihovih izlaza sa realnim vrijednostima i utvrđena vrlo visoka podudarnost. Rezultati istraživanja omogućavaju efikasnije upravljanje procesom mikroglodanja, izbjegavanje negativnih pojava laserske i elektroerozione obrade, postizanje maksimalne produktivnosti i svođenje troškova obrade na minimum.

Ključne riječi: modeliranje, obradivost, mikroglodanje

Naučna oblast: Tehnološke nauke

Naučno polje: Proizvodna tehnologija

Klasifikaciona oznaka: T 130

Tip odabrane licence Kreativne zajednice: CC BY-SA

Information about mentor and dissertation

Mentor:
Dr Gordana Globočki Lakić, full professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Banjaluka.

Co-mentor:
Dr Janez Kopač, full professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana.

Title of doctoral dissertation:
Modelling of machinability functions in micro-milling

Abstract:
The development of medicine, energy, automotive and aero industry intensifies the use of microparts. This conditioned the need for the introduction of productive, efficient and economical micro-engineering production technologies. A relatively large percentage of micro-parts, such as micromoulds and functional micro-parts, are made of hard-to-machine materials in use of common production techniques: laser beam machining and electro-discharge machining. The aim of the dissertation is to investigate the possibility of using micro-milling in the production of high-alloy steel complex configuration microparts, in order to avoid the negative consequences in application of the laser beam and electro-dishcarge machining. The focus is placed on the accuracy and quality in the processing of chrome-molybdenum tool steel X155CrMoV12, due to its extremely poor machinabilty. The processing was carried out with ball-end micro-mills with a long neck. Micro-milling properties, in relation to conventional macro-level milling, are analyzed. The basics modelling of micro-cutting process are given, as the basic process of chip separation in the micro-milling. A model of profile micro-milling is proposed. It contains functions of effective geometric parameters and machinability criteria, dependenced by input cutting parameters, conditions and workpiece characteristics. The models of tool wear and deflection, cutting forces, and surface roughness have been developed. The minimum chip thickness and the conditions of the size effect are defined. Based on experimental measurements, the calibration of the proposed models coefficients, and the comparison of their output with real values was made, and noted high matching. The results of the research enable more efficient micro-milling process management, avoiding negative of laser beam and electro-discharge machining, maximizing productivity and minimizing machining costs.

Key words: modelling, machinability, micro-milling

Scientific area: Technological science

Scientific field: Production techology

Classification code: T 130

Creative Commons licence type: CC BY-SA

ZAHVALNICA

Ovim putem se zavaljujem svojoj mentorici prof. dr Gordani Globočki Lakić i komentoru prof. dr Janezu Kopaču, na punoj naučnoj i stručnoj saradnji i pomoći, podršci, te koristim savjetima i sugestijama u toku izrade i oblikovanja ove doktorske disertacije.

Ova disertacija je nastala u okviru saradnje sa kolegama istraživačima sa Katedre za menadžment proizvodnim tehnologijama sa Fakulteta za strojništvo u Ljubljani, koja je podržano od strane Ministarstva nauke i tehnologije u Vladi Republike Srpske i Vladi Republike Slovenije, kojim se ovom prilikom zahvaljujem. Članovima pomenute Katedre, mojim dragim slovenskim prijateljima i kolegama, se iskreno zahvaljujem na ustupanju laboratorijske opreme, pomoći prilikom izvođenja eksperimenata, uvođenju u aktuelne istraživačke tokove u oblasti proizvodnog mašinstva, kao i domaćinskom raspoloženju prilikom mojih dugotrajnih posjeta. Posebno se zahvaljujem prof. dr Davorinu Kramaru i prof. dr Đorđu Čiči na bezrezervnoj pomoći, podršci i korisnim savjetima u toku izrade ove disertacije. Dr Goranu Mijuškoviću i laborantu mr Vinku Rotaru se zahvaljujem na pomoći pri realizaciji eksperimetalnih mjerenja. Takođe, zahvaljujem se i kolegama na svojoj matičnoj Katedri, prof. dr Simi Jokanoviću, doc. dr Stevi Borojeviću i profesoru u penziji dr Vidu Joviševiću, na punoj podršci tokom izrade ove doktorske disertacije.

Na kraju, ali najvažnijim, zahvaljujem se svojim najmilijima, supruzi Vladani, sinu Nikoli i majci Ankici, na njihovom strpljenju i podršci tokom dugotrajnih odsustava zbog realizacije eksperimentalnih istraživanja, te strpljenju i podršci prilikom pisanja ove doktorske disertacije.

U Banjoj Luci, mart 2018. godine B. S.

SADRŽAJ

Spisak korišćenih skraćenica i
Spisak korišćenih simbola i oznaka iii
Spisak slika i tabela ix

1. UVOD 1
1.1. Uvodna razmatranja 1
1.2. Mikroinženjerske tehnologije 4
1.3. Definisanje problema istraživanja 7
1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja 10
1.5. Predmet i cilj istraživanja 20
1.6. Okvirni sadržaj rada 22
2. TEORETSKE OSNOVE PROCESA MIKROGLODANJA 23
2.1. Tehnologije mikrorezanja 23
2.2. Mikroglodanje 26
2.2.1. Mašine alatke, alati i pribori u mikroglodanju 29
2.2.2. Osnovni parametri procesa mikroglodanja 35
2.3. Karakteristike mehanizma mikroglodanja 42
2.4. Osnove modeliranja procesa mikroobrade 50
2.4.1. Tehnike modeliranja procesa mikrorezanja 52
2.4.1.1. Analitičko modeliranje 54
2.4.1.2. Numeričko modeliranje 57
2.4.1.3. Modeliranje zasnovano na vještačkoj inteligenciji 61
2.4.1.4. Empirijsko modeliranje 64
3. MODELIRANJE PROCESA PROFILNOG MIKROGLODANJA 67
3.1. Model profilnog mikroglodanja 67
3.2. Geometrijski i tehnološki parametri obrade 70
3.3. Modeli funkcija obradivosti 78
3.3.1. Model minimalne debljine strugotine 78
3.3.2. Model habanja alata 80
3.3.2. Model hrapavosti obrađene površine 82
3.3.3. Model sila rezanja 84
3.3.4. Model defleksije mikroglodala 87

4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA 93
4.1. Postavka eksperimenta 93
3.3.1. Mašina alatka 93
3.3.2. Alat 94
3.3.2. Obradak 95
4.2. Mjerna oprema 97
4.3. Planovi eksperimenta i procedure mjerenja 101

5. ANALIZA I OBRADA REZULTATA 110
5.1. Minimalna debljina strugotine 110
5.2. Habanje mikroglodala 115
5.2. Hrapavost obrađene površine 126
5.3. Sile rezanja i defleksija alata 136

6. ZAKLJUČAK 152
6.1. Doprinosi predstavljenih istraživanja 152
6.2. Pravci budućih istraživanja 156

7. LITERATURA 157

PRILOZI

SPISAK KORIŠĆENIH SKRAĆENICA

CIM	Računarom integrisana proizvodnja (engl. ***C**omputer **A**ided **M**anufacturing*)
CAD	Računarom podržano konstruisanje (engl. ***C**omputer **A**ided **D**esign*)
CAPP	Računarom podržano proj. tehnologije (engl. ***C**omputer **A**ided **P**rocess **P**laning*)
CAM	Računarom podržana obrada (engl. ***C**omputer **A**ided **M**achining*)
CAQ	Računarom podržano praćenje kvaliteta (engl. ***C**omputer **A**ided **Q**ualty*)
MST	Mikrosistemske tehnologije (engl. ***m**icro**s**ystem **t**echnology*)
MET	Mikroinženjerske tehnologije (engl. ***m**icro**eng**ineering **t**echnology*)
MEMS	Mikroelektromehanički sistem (engl. ***m**icro**e**lectro**m**echanical **s**ystem*)
NEMS	Nanoelektromehanički sistem (engl. ***n**ano**e**lectro**m**echanical **s**ystem*)
LBM	Leserska obrada (engl. ***l**aser **b**eam **m**achining*)
EDM	Elektroeroziona obrada (engl. ***e**lectro**d**ischarge **m**achining*)
MQL	Tehnika minimalnog podmazivanja (engl. ***M**inimal **Q**uantity **L**ubrication*)
AISI	Američki standard
FFT	Brza Furie-ova transformacija (engl. ***F**ast **F**urie **T**ransformation*)
S/N	Odnos signal-buka (engl. ***S**ignal to **N**oise*)
SDPT	Obrada dodirom u jednoj tački alata (engl. ***S**ingle **D**iamont **p**oint **T**urning*)
3D	Trodimenzionalno
µEDM	Mikroelektroeroziona obrada punom elektrodom
µWEDM	Mikroelektroeroziona obrada žičanom elektrodom
µLBM	Mikrolaserska obrada
µECM	Mikroelektrohemijska obrada
CNC	Numeričko upravljanje računarom (engl. ***C**omputer **N**umerical **C**ontrol*)
FIB	Fokusirana jonska obrada (engl. ***F**ocused **I**on **B**eam*)
PVD	Fizičko naparavanje površine (engl. ***P**hisical **V**apour **D**eposition*)
CVD	Hemijsko naparavanje površine (engl. ***C**hemical **V**apour **D**eposition*)
FGD	Finoszrnasti dijamant (engl. ***F**ine **G**rained **D**iamond*)
NCD	Nanokristalni dijamant (engl. ***N**ano **G**rained **D**iamond*)
HSS	Brzorezni čelik (engl. ***H**igh **S**peed **S**teel*)
cBN	Kubni nitrid bora (engl. ***C**ubic **B**oron **N**itride*)
PCD	Polikristalni dijamant (engl. ***P**oly **C**ristal **D**iamond*)
AI	Vještačka inteligencija (engl. ***A**rtifical **I**nteligence*)

MKE	Metod konačnih elemenata (engl. *Finite Element Method*)
MDS	Simulacija dinamike molekula (engl. ***M**olekular **D**ynamic **S**imulation*)
ALE	Arbitražni Laganž-Ojlerov metod (engl. ***A**rbitary **L**angrange-**E**uler Method*)
EAM	Sopstveni atomski model (engl. ***E**mbeded **A**tom **M**ethod*)
GA	Genetski algoritmi (engl. ***G**enetic **A**lgorithm*)
ANN	Vještačke neuronske mreže (engl. ***A**rifical **N**eural **N**etwork*)
OVAT	Varijacija jedne varijable u vremenu praćenja (engl. ***O**ne **V**ariable **A**t a **T**ime*)
DOE	Teorija planiranja eksperimeta (engl. ***D**esign **o**f **E**xperiments*)
RSM	Metod odzivne površine (engl. ***R**esponse **S**urface **M**etod*)
ANOVA	Analiza varijanse (engl. ***An**alysis **o**f **Va**riance*)
PSO	Optimizacija metodom roja čestica (engl. ***P**raticle **S**warm **O**ptimisation*)
ACOM	Optimizacija metodom kolonije mrava (engl. ***A**nt **C**olony **O**ptimisation **M**ethod*)
IR	Infra-crveno (engl. ***I**nfra **R**ed*)

SPISAK KORIŠĆENIH OZNAKA I SIMBOLA

a_p	mm	Dubina obrade
a_e	mm	Širina obrade
f_z	mm	Korak po zubu
v_c	m/min	Brzina rezanja
R_m	MPa	Zatezna čvrstoća materijala obratka
HRc	---	Tvrdoća materijala obratka po Rokvelu
E	MPa	Modul elastičnosti materijala
R_a	µm	Srednja visina neravnina obrađene površine
R_y	µm	Maksimalna visina neravnina obrađene površine
R_z	µm	Visina neravnina obrađene površine u 10 tačaka profila
MRR	mm^3/min	Zapremina skinutog materijala obratka u jedinici vremena
t	min	Vrijeme obrade
l_1	mm	Prepust mikroglodala
l_2	mm	Dužina mikroglodala
l_3	mm	Dužina vratnog dijela mikroglodala
l_4	mm	Dužina reznog dijela mikroglodala
d_c	mm	Nazivni prečnik mikroglodala
r_c	mm	Poluprečnik mikroglodala
d_4	mm	Prečnik vratnog dijela mikroglodala
d_m	mm	Prečnik drške mikroglodala
r_ε	mm	Poluprečnik zaobljenja vrha alata
ζ	°	Ugao vratnog konusa mikroglodala

z_n	---	Broj zuba mikroglodala
ω	°	Ugao uspona zavojnice mikroglodala
γ	°	Grudni ugao reznog klina
α	°	Leđni ugao reznog klina
r_e	µm	Poluprečnik zaobljenja rezne ivice
n	obr/min	Broj obrtaja glavnog vretena
v_f	mm/min	Brzina pomoćnog kretanja pri mikroglodanju
κ	°	Napadni ugao
ψ	°	Ugao kontakta
φ	°	Ugao zahvata
b	mm	Širina strugotine
h_r	mm	Radijalna debljina strugotine
h	mm	Debljina strugotine
h_{max}	mm	Maksimalna debljina strugotine
h_m	mm	Srednja debljina strugotine
h_{min}	mm	Minimalna debljina strugotine
A_c	mm²	Površina poprečnog presjeka strugotine
A_{cm}	mm²	Površina srednjeg poprečnog presjeka strugotine
l_ψ	mm	Dužina luka kontakta alata i obratka
V_m	mm³	Zapremina strugotine za jedan zub glodala
l_{el}	µm	Vrijednost elastične deformacije obrađene površine
γ_e	rad	Efektivna vrijednost grudnog ugla klina alata
$l_{e\alpha}$	µm	Dužina dodira alata i obratka uslijed elastične deformacije
C_{AD}	---	Koeficijent elastične deformacije u Arcona-Dow-ovom obrascu za elastičnu deformaciju obrađene površine
g_s	µm	Ekvivalentni prečnik kristalnog zrna materijala

F_R	N	Rezultujuća sila rezanja pri mikroglodanju
F_x	N	Sila rezanja u pravcu x-ose
F_y	N	Sila rezanja u pravcu y-ose
F_z	N	Sila rezanja u pravcu z-ose
F_o	N	Obimna sila na mikroglodalu
F_r	N	Radijalna sila na mikroglodalu
F_a	N	Aksijalna sila na mikroglodalu
Φ	rad	Ugao smicanja strugotine
F_c	N	Glavna sila rezanja rezanja pri mikroglodalu
F_p	N	Sila prodiranja pri mikroglodalu
F_t	N	Sila u ravni grudne površine reznog klina mikroglodala
F_n	N	Sila normalna na grudnu površinu reznog klina mikroglodala
$F_{\mu\gamma}$	N	Sila trenja na grudnoj površini reznog klina mikroglodala
$F_{n\gamma}$	N	Normalna sila na grudnoj površini reznog klina mikroglodala
$F_{\mu\alpha}$	N	Sila trenja na leđnoj površini reznog klina mikroglodala
$F_{n\alpha}$	N	Normalna sila na leđnoj površini reznog klina mikroglodala
F_s	N	Sila u ravni smicanja strugotine
F_{sn}	N	Sila normalna na ravan smicanja strugotine
μ	---	Koeficijent trenja između materijala alata i materijala obratka
μ_s	---	Koeficijent unutrašnjeg trenja u materijalu obratka
ρ	rad	Ugao trenja između alata i obratka
σ_T	MPa	Napon tečenja materijala obratka
σ	MPa	Normalni napon u materijalu obratka
τ	MPa	Tangencijalni napon u materijalu obratka
ε	---	Stepen deformacije

$\dot{\varepsilon}$	s^{-1}	Brzina deformacije
E_{spec}	J/mm²	Specifična energija mikroglodanja
b_w	µm	Srednja visina naslaga na ivicama obratka
VB	µm	Širina pojasa koncentrisanog habanja na leđnoj površini
C_m	---	Merčanova konstanta
ξ	rad	Ugao između ravni smicanja strugotine i rezultujućee sile rezanja
l_{ct}	mm	Dužina dodira alata i strugotine na grudnoj površini
ε_0	---	Referentna vrijednost stepena deformacije (na temperaturi T = 20°)
$\dot{\varepsilon}_0$	s^{-1}	Referentna vrijednost brzine deformacije
C_o	---	Oxleyev koeficijent
n_o	---	Oxleyev eksponent
$\{F\}$	N	Vektor spoljašnjih opterećenja
$[K]$	N/m	Ukupna matrica krutosti
$\{u\}$	m	Vektor pomjeranja čvorova
T	°	Temperatura
T_o	°	Temperatura okoline
T_m	°	Temperatura topljenja materijala obratka
$\sigma_{(\varepsilon=1)}$	MPa	Napon pri stepenu deformacije $\varepsilon = 1$
n_{OXL}	---	Koeficijent deformacionog očvršćavanja materijala u Oxley modelu
A_{JC}	MPa	Konstanta materijala u Johnson-Cook modelu
B_{JC}	MPa	Konstanta materijala u Johnson-Cook modelu
C_{JC}	---	Koeficijent brzine deformacije u Johnson-Cook modelu
m_{JC}	---	Eksponent termičkog omekšavanja materijala u Johnson-Cook modelu
n_{JC}	---	Eksponent deformacionog očvršćavanja materijala u Johnson-Cook modelu
$C_{ZA(i)}$	---	Koeficijenti materijala u u Zerilli-Armstrong modelu

n_{JC}	---	Ekponent deformacionog očvršćavanja materijala u Zerilli-Armstrong modelu
A_{BCJ}	---	Konstanta materijala u Bauman-Chisea-Johnson modelu
B_{BCJ}	---	Kofeicijent temperature u Bauman-Chisea-Johnson modelu
C_{BCJ}	---	Koeficijent očvršćavanja materijala u Bauman-Chisea-Johnson modelu
F_{BCJ}	---	Koeficijent tvrdoće materijala u Bauman-Chisea-Johnson modelu
G_{BCJ}	---	Koeficijent tvrdoće materijala u Bauman-Chisea-Johnson modelu
n_{BCJ}	---	Ekponent deformacionog očvršćavanja materijala u Bauman-Chisea-Johnson modelu
m_{BCJ}	---	Eksponent termičkog omekšavanja materijala u Bauman-Chisea-Johnson modelu
$\sigma_{0.2}$	MPa	Napon na granici tečenja materijala obratka na sobnoj temperaturi
$M(T)$	---	Faktor omekšavanja zavisan od temperature u Marushic modelu
n_{MAR}	---	Eksponent deformacionog očvršćavanja materijala u Marushic modelu
x_i		i – ta vrijednost ulaznog parametra
u		Funkcija vještačke neuronske mreže
w_i	---	i – ti težinski koeficijent neuronske mreže
$W_{n(novo)}$		Vektor novih vrijednosti težinskih koeficijenta
$W_{n(staro)}$		Vektor prethodnih vrijednosti težinskih koeficijenta
μ_{ANN}	---	Koeficijent učenja vještačke neuronske mreže
V_{ANN}		Vektor težinskih koeficijenata izlaznog neurona
δ_{ANN}		Delta pravilo učenja neuronske mreže
O_h		Vektor izlaza iz neurona u posmatranom skrivenom sloju
X_{kp}		Vrijednost p-tog elementa vektora ulaznih vrijednosti
p_i	---	i – ti koeficijent polinoma
k_c	N/mm²	Specifični sila pri rezanju
$K_{m,i}$	N/mm²	Specifični sila smicanja strugotine u Armarego-ovom modelu
$K_{e,i}$	N/mm	Koeficijent sile gnječenja materijala u Armarego-ovom modelu

p_{shp}	bar	Pritisak sredstva za hlađenje i pomazivanje
Q_{shp}	ml/min	Protok sredstva za hlađenje i pomazivanje
ρ_{spec}	kg/m³	Specifična masa
k	W/m°C	Koeficijent termičke provodljivosti
c	J/kg°C	Specifični toplotni kapacitet
I	mm^4	Aksijalni moment inercije
θ	°	Nagib obrađivane površine
δ	µm	Otklon mikroglodala
SD	---	Standardna devijacija
$\bar{x}$	---	Srednja vrijednost
T	min	Postojanost reznog klina
R^2	---	Koeficijent regresije modela

SPISAK SLIKA

Slika 1.1. Proces proučavanja obradivosti
Slika 1.2. Globalni rast industrije mikrodijelova [16]
Slika 1.3. Sistemi za proizvodnju kontrolu i manipulaciju mikrodijelovima [17]
Slika 1.4. Tehnologije izrade mikrodijelova [21]
Slika 1.5. Odnosi mikrotehnologija s obzirom na veličinu obratka i relativnu tačnost [23]
Slika 1.6. Zastupljenost materijala u mikroglodanju [26]
Slika 1.7. Motivacija za istraživanjem
Slika 2.1. Djelovanje reznog klina alata a) na makronivou i b) na mikronivou
Slika 2.2. Odnos geometrije reznog klina, kristalnih zrna i zahvaćenog sloja materijala
Slika 2.3. Karakteristične tehnološke strukture koje se izrađuju mikroglodanjem
Slika 2.4. Čeono, obodno i profilno mikroglodanje
Slika 2.5. Obradak u mekom mikroglodanju (lijevo) i tvrdom mikroglodanju (desno)
Slika 2.6. Proces istraživanja, analize i korišćenja mikroglodanja
Slika 2.7. Noseća struktura izrađena od specijalnih materijala [119]
Slika 2.8. Pogonski sistem sa linearnim motorom (a) i visokobrzinsko glavno vreteno (b) [123, 124]
Slika 2.9. Mikroglodalice: (a) KERN Pyramid Nano i (b) Makino iQ300
Slika 2.10. Držač alata HSK-E25 sa preklopnim stezanjem mikroglodala [127]
Slika 2.11. Mikroglodala [128, 129]
Slika 2.12. Geometrija mikroglodala
Slika 2.13. Osnovna geometrija reznog klina mikroglodala
Slika 2.14. Sistem za brzo pričvršćivane obratka na radni sto mikroglodalice [132]
Slika 2.15. Tehnološki parametri mikroglodanja
Slika 2.16. Istosmjerno (a) i suprotnosmjerno (b) glodanje
Slika 2.17. Odnos parametara obrade i napadnog ugla
Slika 2.18. Geometrijski parametri mikroglodanja
Slika 2.19. Okvir za proučavanje mikroobradivosti
Slika 2.20. Efekat veličine uslovljen poluprečnikom zaobljenja rezne ivice [30]
Slika 2.21. Stvarna debljina strugotine u odnosu na vrijednost elastičnih deformacija [100]
Slika 2.22. Promjena grudnog ugla uslijed prisustva efekta veličine [63]
Slika 2.23. Efekat veličine uslovljen mehaničkom strukturom plastičnih materijala [23]

Slika 2.24. Uticaj minimalne debljine strugotine na proces mikroglodanja
Slika 2.25. Sile (otpori) rezanja u mikroglodanju
Slika 2.26. Sile na reznom klinu mikroglodala
Slika 2.27. Uticaj efekta veličine na specifičnu energiju mikrorezanja [23]
Slika 2.28. Uticaj efekta veličine na parametre kvaliteta obrade [23]
Slika 2.29. Obrađena površina (a), naslage na ivicama obratka (b) [33, 36]
Slika 2.30. Nov (a) i pohabani rezni klin mikroglodala (b) [46]
Slika 2.31. Uticaj parametara obrade na habanje reznog klina mikroglodala
Slika 2.32. Modeliranje procesa mikroobrade u računarom podržanoj proizvodnji
Slika 2.33 Pristup u modeliranju procesa obrade [139]
Slika 2.34. Formiranje strugotine po: a) Merchant-Ernst, b) Lee-Shaffer i c) Oxley modelu
Slika 2.35. Zona formiranja strugotine po Fang-ovom univerzalnom modelu [112]
Slika 2.36. Simulacija formiranja strugotine pri mikrorezanju pomoću MKE [83]
Slika 2.37. Princip razdvajanja konačnih elemenata [147]
Slika 2.38. Interpretacija Langrange-ove (a), Euler-ove (b) i ALE tehnike (c) [86, 147]
Slika 2.39. Proces ujednačavanja (a) i ugušćavanja (b) mreže konačnih elemenata [147]
Slika 2.40. Model mikrorezanja baziran na simulaciji dinamike molekula [149]
Slika 2.41. Šema genetskog algoritma [157]
Slika 2.42. Model vještačkog neurona [160]
Slika 2.43. Topologija ANN korišćene za modeliranje funkcija obradivosti [162]
Slika 2.44. Pregled nekih od dvofaktornih planova eksperimenta
Slika 3.1. Glodanje mikrodijelova sa teško dostupnim mjestima za obradu
Slika 3.2. Šema integrisanog modela profilnog mikroglodanja
Slika 3.3. Glodanje kosih strana loptastim mikroglodalom
Slika 3.4. Zona obrade u transformisanom koordinatnom sistemu
Slika 3.5. Površina zahvaćena u jednom prolazu mikroglodala
Slika 3.6. Geometrija zahvata jednog zuba loptastog mikroglodala
Slika 3.7. Geometrija zone zgnječenog materijala
Slika 3.8. Proces habanja reznog klina mikroglodala i efekat veličine
Slika 3.9. Kriva promjene poluprečnika zaobljenja rezne ivice tokom obrade
Slika 3.10. Model talasasto hrapave površine u mikroglodanju
Slika 3.11. Teoretska visina neravnina u mikroglodanju
Slika 3.12. Komponente rezultujuće sile rezanja na reznom klinu alata
Slika 3.13. Odnosi sila rezanja na reznom klinu i sila rezanja duž osa
Slika 3.14. Deformacija i otkloni mikroglodala
Slika 3.15. Interpretacija Maxwell-Moor-ove metode jedinične sile

Slika 3.16. Ponašanje konzole uslijed djelovanja uzdužne sile
Slika 4.1. Generalna postavka eksperimenta na obradnom centru Sodick MC430L
Slika 4.2. Mikroglodalo sa držačem (a) i uređaj za montažu u držač (b)
Slika 4.3. Struktura čelika X155CrVMo12 pod mikroskopom
Slika 4.4. Oblik i dimenzije pripremka
Slika 4.5. Pripremljeni uzorci neposredno prije termičke obrade
Slika 4.6. Optički skener Alicona InfinteFocus
Slika 4.7. Korisničko okruženje „Surface Roughness“ u InfiniteFocus
Slika 4.8. Korisničko okruženje „Profile Measurment“ u InfiniteFocus
Slika 4.9. Alatni mikroskop (lijevo) i uređaj za mjerenje hrapavosti (desno)
Slika 4.10. Dinamometar Kistler 9257B
Slika 4.11. Korisničko okruženje LabVIEW za akviziciju sila rezanja po osama
Slika 4.12. Laserski uređaj za mjerenje defleksije mikroglodala
Slika 4.13. Korisničko okruženje LK-Navigator 2
Slika 4.14. Tok eksperimentalnih istraživanja
Slika 4.15. CAM model obratka u paketu MasterCAM X7
Slika 4.16. Analiza varijanse u korisničkom okruženju DesignExpert-a
Slika 4.17. Eksperimentalno mjerenje minimalne debljine strugotine
Slika 4.18. Proces mjerenja zaobljenja rezne ivice mikroglodala
Slika 4.19. Proces zadavanja linija profila u procesu mjerenja hrapavosti, upravno na pravac kretanja mikroglodala
Slika 4.20. Mjerenje sila rezanja duž osa i mjerenje defleksije mikroglodala
Slika 4.21. Mjerenje defleksije alata laserskim dužinomjerom
Slika 5.1. Zona zgnječenog materijala obratka i dobijena strugotina (63 HRc, f_z = 12 μm/zub, a_p = 10 μm, v_c = 30 m/min)
Slika 5.2. Skenirana geometrija izglodanog kanala na obratku
Slika 5.3. Promjena h_{min} u zavisnosti od poluprečnika zaobljenja
Slika 5.4. Promjena h_{min} u zavisnosti od tvrdoće materijala
Slika 5.5. Promjena defleksije mikroglodala uslijed pojave efekta veličine
Slika 5.6. Dijagram procenta normalne vjerovatnoće u odnosu na ostatak vrijednosti
Slika 5.7. Odziv modela minimalne debljine strugotine materijala obratka
Slika 5.8. Različit položaj i oblik pohabanog područja reznog klina
Slika 5.9. Vrijednosti poluprečnika rezne ivice u zavisnosti od položaja mjerenja
Slika 5.10. Naslage na reznom klinu (a) i krzanje rezne ivice (b)
Slika 5.11. Promjena poluprečnika zaobljenja rezne ivice alata u funkciji vremena obrade (f_z = 10 μm)

Slika 5.12. Promjena poluprečnika zaobljenja rezne ivice alata u funkciji vremena obrade (f_z = 15 μm)
Slika 5.13. Uticaj ulaznih parametara na postojanost mikroglodala
Slika 5.14. Odnos postojanosti alata i produktivnosti obrade
Slika 5.15. Pokazatelj adekvatnosti modela postojanosti mikroglodala
Slika 5.16. Uticaj ulaznih parametara na predviđenu postojanost mikroglodala
Slika 5.17. Dijagram izlaznih vrijednosti modela postojanosti mikroglodala za f_z = 10 μm
Slika 5.18. Dijagram izlaznih vrijednosti modela postojanosti mikroglodala za f_z = 15 μm
Slika 5.19. Topografija obrađene površine pri obradi različitim širinama obrade
Slika 5.20. Hrapavost obrađene površine u oblasti dominacije efekta veličine
Slika 5.21. Promjena pokazatelja hrapavosti Rz uslijed habanja mikroglodala
Slika 5.22. Različiti smjerovi prostiranja valovitosti obrađene površine
Slika 5.23. Vrijednosti R_z za različite nagibe obrađivane površine i ostale ulazne parametre procesa obrade
Slika 5.24. Vrijednosti R_z za različite kombinacije ulaznih parametara
Slika 5.25. Dijagrami pokazatelja adekvatnosti modela hrapavosti
Slika 5.26. Odzivi modela hrapavosti za nagib obrađivane površine 0°
Slika 5.27. Odzivi modela hrapavosti za nagib obrađivane površine 20°
Slika 5.28. Odzivi modela hrapavosti za nagib obrađivane površine 45°
Slika 5.29. Odzivi modela hrapavosti za nagib obrađivane površine 70°
Slika 5.30. Izmjereni signali sila rezanja u pravcu koordinatnih osa
Slika 5.31. Vrijednosti izmjerenih sila rezanja pri različitim vrijednostima ulaznih parametara (nagib 0°)
Slika 5.32. Vrijednosti izmjerenih sila rezanja pri različitim vrijednostima ulaznih parametara (nagib 45°)
Slika 5.33. Dijagrami pokazatelja adekvatnosti modela sila rezanja
Slika 5.34. Odziv modela sile rezanja u pravcu x-ose (ae = 16 μm, fz = 10 μm/zubu)
Slika 5.35. Odziv modela sile rezanja u pravcu y-ose (ae = 16 μm, fz = 10 μm/zubu)
Slika 5.36. Odziv modela sile rezanja u pravcu z-ose (ae = 16 μm, fz = 10 μm/zubu)
Slika 5.35. Izmjereni signal defleksije alata u ustaljenom režimu obrade
Slika 5.36. Promjena defleksije mikroglodala sa promjenom ulaznih parametara (45 HRc)
Slika 5.37. Promjena defleksije mikroglodala sa promjenom ulaznih parametara (45 HRc)
Slika 5.38. Promjena defleksije mikroglodala sa promjenom ulaznih parametara (63 HRc)
Slika 5.39. Dijagram statističkih pokazatelja adekvatnosti modela defleksije za nagib 0° i 20°
Slika 5.40. Dijagram statističkih pokazatelja adekvatnosti modela defleksije za nagib 0° i 20°
Slika 5.41. Odziv modela defleksije mikroglodala za različite vrijednosti ulaznih parametara i različite vrijednosti nagiba obrađene površine

SPISAK TABELA

Tabela 2.1. Karakteristike procesa mikrorezanja

Tabela 2.2. Poređenje mikroglodanja sa nekonvencionalnim metodama obrade [115]

Tabela 2.3. Tipičan izbor materijala alata prema materijalu obratka

Tabela 2.4. Poređenje različitih metoda modeliranja i modela u mikrorezanju

Tabela 2.5. Modeli ponašanja napona materijala obratka

Tabela 4.1. Tipični hemijski sastav materijala obratka

Tabela 4.2. Različite tvrdoće i karakteristike materijala obratka

Tabela 4.3. Nivoi variranja ulaznih parametara pri analizi habanja

Tabela 4.4. Kodovi nivoa variranja i vrijednosti parametara pri analizi habanja

Tabela 4.5. Nivoi variranja ulaznih parametara pri analizi hrapavosti

Tabela 4.6. Kodovi nivoa variranja i vrijednosti parametara pri analizi hrapavosti

Tabela 4.7. Nivoi variranja ulaznih parametara pri mjerenju ortogonalnih sila rezanja u pravcu osa

Tabela 4.8. Kodovi nivoa variranja i vrijednosti parametara pri mjerenju ortogonalnih sila rezanja u pravcu osa

Tabela 4.9. Nivoi variranja ulaznih parametara pri mjerenju defleksije mikroglodala

Tabela 4.10. Kodovi nivoa variranja i vrijednosti parametara pri mjerenju defleksije alata

Tabela 5.1. Izračunate vrijednosti minimalne debljine strugotine

Tabela 5.2. Skenirane rezne ivice loptastog mikroglodala 0.6x5 (a_p = 15 μm, a_e = 16 μm)

Tabela 5.3. Promjena vrijednosti poluprečnika zaobljenja rezne ivice u toku vremena obrade

Tabela 5.4. Modeli za proračun poluprečnika zaobljenja rezne ivice mikroglodala

Tabela 5.5. Izračunate postojanost mikroglodala i pokazatelja produktivnosti procesa

Tabela 5.6. Analiza varijanse za model postojanosti mikroglodala

Tabela 5.7. Procijenjena postojanost mikroglodala i vrijednosti dobijene modelom

Tabela 5.8. Skenirane obrađene površine pri različitoj tvrdoći i nagibu

Tabela 5.9. Izmjerene vrijednosti R_z za različite tvrdoće obratka i nagibe obrađene površine

Tabela 5.10. Analiza varijanse za model hrapavosti obrađene površine pri nagibu 0°

Tabela 5.11. Analiza varijanse za model hrapavosti obrađene površine pri nagibu 20°

Tabela 5.12. Analiza varijanse za model hrapavosti obrađene površine pri nagibu 45°

Tabela 5.13. Analiza varijanse za model hrapavosti obrađene površine pri nagibu 70°

Tabela 5.14. Poređenje pokazatelja koeficijenata regresije modela hrapavosti

Tabela 5.15. Poređenje izmjerenih vrijednosti R_z sa vrijednostima dobijenih modelom

Tabela 5.16. Izmjerene vrijednost sila rezanja u pravcu koordinatnih osa i defleksije alata u pravcu x-ose

Tabela 5.17. Analiza varijanse za model sile rezanja F_x za nagib obrađivane površine 0°

Tabela 5.18. Analiza varijanse za model sile rezanja F_y za nagib obrađivane površine 0°

Tabela 5.19. Analiza varijanse za model sile rezanja F_z za nagib obrađivane površine 0°

Tabela 5.20. Analiza varijanse za model sile rezanja F_x za nagib obrađivane površine 45°

Tabela 5.21. Analiza varijanse za model sile rezanja F_y za nagib obrađivane površine 45°

Tabela 5.22. Analiza varijanse za model sile rezanja F_z za nagib obrađivane površine 45°

Tabela 5.23. Poređenje pokazatelja koeficijenata regresije modela sila rezanja

Tabela 5.24. Poređenje izmjerenih vrijednosti sila rezanja i izlaza iz modela sila rezanja

Tabela 5.25. Izmjerene vrijednost defleksije mikroglodala

Tabela 5.26. Analiza varijanse za model defleksije mikroglodala pri nagibu 0°

Tabela 5.27. Analiza varijanse za model defleksije mikroglodala pri nagibu 20°

Tabela 5.28 Analiza varijanse za model defleksije mikroglodala pri nagibu 45°

Tabela 5.29. Analiza varijanse za model defleksije mikroglodala pri nagibu 70°

Tabela 5.30. Poređenje pokazatelja koeficijenata regresije modela defleksije mikroglodala za različite nagibe obrađivane površine

Tabela 5.31. Izmjerene vrijednost defleksije mikroglodala i vrijednosti dobijene modelom

Poglavlje 1. UVOD

U ovom poglavlju data su osnovna razmatranja o trenutnim zahtjevima u savremenoj mašinskoj industriji, te razmatran trend njenog rasta i razvoja. Naglasak je stavljen na produktivne, efikasne i ekonomičnije procese obrade u proizvodnji mikrodijelova. Definisan je problem istraživanja, analizirana su dosadašnja istraživanja, te utvrđen predmet i cilj istraživanja.

1.1. UVODNA RAZMATRANJA

Globalni rast tržišta i potražnje roba i usluga pred današnju mašinsku industriju stavlja stroge zahtjeve u pogledu povećanja kompleksnosti dijelova, podizanja produktivnosti, kvaliteta proizvoda, ekološke svijesti i uvođenja cjeloživotnog praćenja proizvoda i reciklaže. Sa druge strane, strogi zahtjevi se odnose na smanjenje vremena izrade i troškova proizvodnje, primjenu specijalnih materijala i dijelova, smanjenje angažovanih sredstava rada, smanjenje primjene velikog broja različitih proizvodnih procesa, smanjenje direktnog uticaja čovjeka, smanjenje otpada, itd. Razlozi ovako strogih, često i suprotstavljenih zahtijeva, su posljedica rasta serijske proizvodnje sličnih dijelova, a koji su u određenom procentu pojedinačno prilagođeni zahtjevima kupaca. Prilagođavajući se navedenim tržišnim uslovima, proizvođači moraju da skraćuju vrijeme proizvodnje, ali i da postignu vrlo visok stepen fleksibilnosti, visoki kvalitet proizvoda, te da redukuju angažovana proizvodna sredstava i primijenjene procese. Na osnovu studije vodećih svjetskih istraživačkih institucija [1, 2, 3], budućnost industrijske proizvodnje u sljedećoj deceniji leži, između ostalog, i u razvoju fleksibilne proizvodnje sa naprednim proizvodnim procesima, podređene zahtjevima kupaca, energetski efikasnih i ekološki prihvatljivih proizvodnih procesa. Autori ovih studija predviđaju da je budućnost industrije i u preorijentaciji ljudskih resursa sa operativnih na zadatke cjeloživotnog učenja u industrijskom okruženju, korišćenju stečenog znanja na razvoj i unaprjeđenje procesa, te totalne kontrole proizvodnih procesa. Zaključuje se da će upravo primjena navedenih smjernica u industrijskoj proizvodnji dovesti do njenog održivog rasta i razvoja, što je i cilj realizacije savremenih filozofija globalne industrije, kao što su trajno održiva proizvodnja [4, 5], četvrta industrijska revolucija [6, 7], i slično.

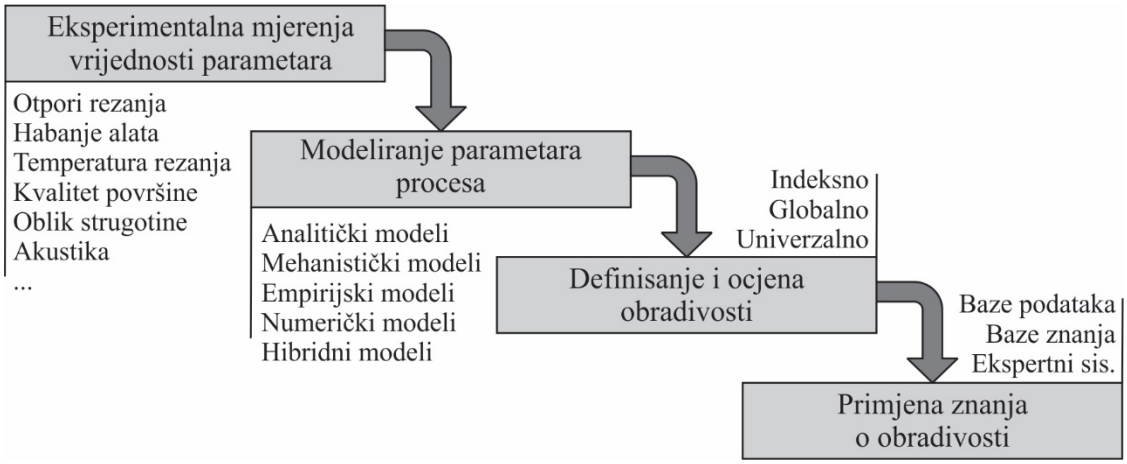
Primjena naprednih fleksibilnih tehnoloških sistema se zasniva na implementaciji informacionih tehnologija, te realizaciji i nadzoru samog procesa obrade. Informacije, koje su nastale kao rezultat upotrebe informacionih tehnologija u proizvodnim tehnologijama, moraju biti transparentne i potpuno primjenjive, a korisnici takvih informacija moraju biti decentralizovani i nezavisni u pogledu njihovog korišćenja. Informacije i procedure, pomoću kojih se dolazi do optimizovanih tehnoloških procesa i uslova obrade, moraju biti formalizovane u obliku matematičkih modela procesa obrade ili baza podataka. Kao takve, spremne su za integraciju u CAPP (engl. *Computer Aided Process Planning*) sistem, CAM (engl. *Computer Aidied Machining*) sistem, te CAQ (engl. *Computer Aided Control*) sistem, kao glavne podsisteme CIM

(engl. *Computer Intergrated Manufacturing*) sistema, nedjeljivog elementa savremene fleksibilne, visoko produktivne i efikasne proizvodnje.

Jedan od najvažnijih proizvodnih procesa u mašinskoj industriji je proces obrade rezanjem. Obrada rezanjem je subtraktivan obradni proces koji se realizuje odvajanjem čestica materijala sa obratka uslijed djelovanja reznog klina alata [8]. Izuzetno je složen jer se sastoji od procesa deformisanja i lomljenja materijala, hemijskih procesa, a koji se odvijaju pod djelovanjem velikih specifičnih pritisaka i visoke temperature. Razvoj procedura kojim se upravlja tako složenim procesom zasnivaju se na razvoju modela procesa obrade, sistema nadzora procesa obrade, optimizaciji režima obrade, te razvoju baza podataka o režimima obrade [9]. Modeli procesa obrade se zasnivaju na analizi fizičkih stanja procesa, te razvoju matematičkih modela. Takvi modeli su pojednostavljeni formalni matematički zapisi u obliku skupova relacija. U obradi rezanjem od posebnog značaja su prediktivni modeli. Oni omogućavaju kvantitativno predviđanje uticaja vrijednosti jednog ili više ulaznih parametara obrade, i to: tehnoloških i geometrijskih parametara obrade, svojstava materijala alata i obratka, geometrije alata i obratka, svojstava mašine alatke te drugih uslova obrade, na vrijednost i ponašanje jednog ili više izlaznih parametara obrade. Takođe, omogućavaju predviđanje međusobnog uticaja izlaznih parametara obrade. Pod tehnološkim parametrima se najčešće podrazumijevaju dubina i širina obrade, korak i brzina rezanja. Geometrijskim parametrima smatraju se parametri koji proizilaze iz odnosa tehnoloških parametara, geometrije alata i kinematike procesa obrade. Osnovni izlazni parametri obrade, čije je praćenje, modeliranje i predviđanje od posebne važnosti u obradi metala rezanjem su tačnost obrade i kvalitet obrade. Tačnost obrade se odnosi na odstupanje dimenzija dobijenih obradom, od zahtjevanih dimenzija obratka. Kvalitet obrade se definiše parametrima hrapavosti obrađene površine, parametrima stanja površinskog sloja materijala obratka i karakteristikama naslaga na ivicama obratka. Pored osnovnih prate se, modeliraju i optimizuju čitav niz dodatnih izlaznih parametara procesa obrade koji direktno utiču na osnovne parametre odnosno na kvalitet i tačnost obrade, te na troškove obrade i brzinu odvijanja procesa. U dodatne, odnosno izvedene izlazne parametre procesa ubrajaju se: habanje alata, sile rezanja, temperatura rezanja, vibracije, oblik i količina skinute strugotine, deformacija alata, itd. [10, 11]. Optimizacija procesa obrade spada u unutrašnju optimizaciju obradnog procesa. Optimalni režimi procesa obrade se definišu na osnovu razvijenih modela procesa obrade, najčešće zasnovanih na eksperimentalnim istraživanjima, traženjem globalnih minimuma ili maksimuma funkcija cilja. Funkcije cilja su obično vezane za maksimalnu ekonomičnost i produktivnosti obrade, a u skladu sa zahtjevanim kvalitetom i tačnošću obrade. U suštini, ekonomičnost procesa obrade se odnosi na redukciju broja proizvodnih procesa i ciklusa, uštede u korišćenju mašina, alata i drugih proizvodnih sredstava, te povećanje njihovog vijeka trajanja. Produktivnost procesa se odnosi na mogućnost obrade što većeg broja dijelova u istom vremenskom periodu. Na osnovu prethodnog, može se zaključiti da modeliranje procesa obrade rezanjem posredno utiče na proces povećanja efikasnosti, ekonomičnosti i produktivnosti same proizvodnje mašinskih dijelova.

Obradivost se može posmatrati kao osnovna tehnološka karakteristika, koja se odnosi na utvrđivanje stepena „lakoće“ obrade materijala nekim postupkom obrade. Pri tome se mora voditi računa o postizanju zahtjevanih karakteristika obratka, ali i maksimalnoj uštedi proizvodnih sredstava i vremena. Može se reći da je obradivost mjera efikasnosti obrade materijala u pogledu postizanja zahtjevanih karakteristika obratka uz maksimalnu ekonomičnost i produktivnost. Definisanje obradivosti dovodi do potrebe za praćenjem i analizom ključnih parametara procesa obrade, odnosno modeliranja njihovog ponašanja [12]. Definisanje obradivosti materijala je kompleksno jer se sastoji od čitavog niza aktivnosti i procedura (Slika 1.1). U suštini, definisanje

obradivosti se zasniva na analizi vrijednosti izlaznih parametara procesa obrade, tako da oni postaju kriterijumi obradivosti materijala. Kako su modeli procesa obrade dati u obliku funkcionalnih zavisnosti izlaznih parametara od ulaznih parametara procesa obrade, tako modeli izlaznih parametara procesa obrade u suštini predstavljaju funkcije obradivosti. Ni jedna od funkcija obradivosti se ne može uzeti u obzir kao nezavisna i jedinstvena u definiciji obradivosti, jer ne daje pravu sliku lakoće obrade materijala, odnosno samog procesa obrade.

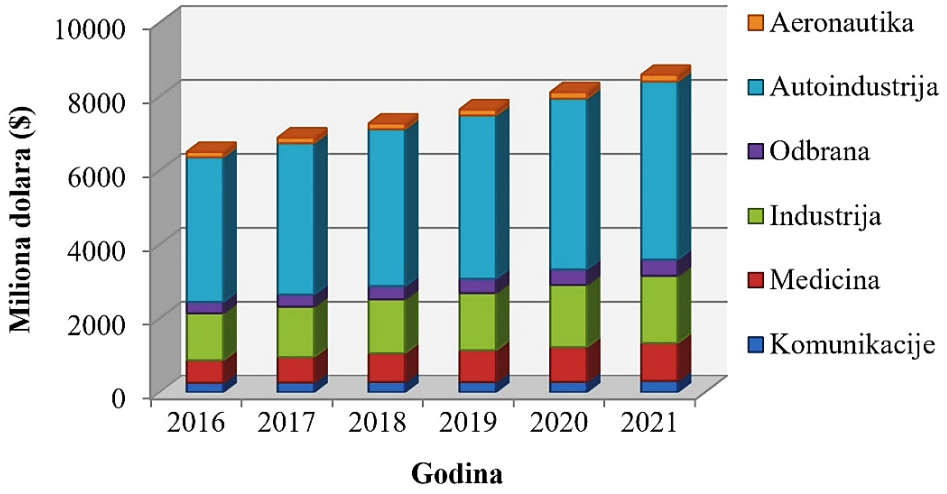


Slika 1.1. Proces proučavanja obradivosti

Intenzivan razvoj autoindustrije, aeroindustrije, svemirske industrije, medicine i energetike uslovio je potrebu za proizvodnjom dijelova relativno malih dimenzija, odnosno minijaturnih dijelova (u daljem tekstu mikrodijelova), funkcionalno i konstrukciono optimizovanih, visokog kvaliteta i tačnosti, te visoke pouzdanosti [13]. Da bi se odgovorilo strogim zahtjevima njihove proizvodnje, uveden je koncept inženjerstva mikrodijelova (u daljem tekstu mikroinženjerstva). Uvođenje ovog koncepta dovodi do primjene čitavog spektra novih principa, te inženjerskih tehnika u projektovanju, planiranju proizvodnje, razvoju alata i mašina alatki, obradi (u daljem tekstu mikroobradi), manipulaciji i kontroli dijelova [14, 15]. U mikroinženjerstvu, pored tehnika koje su primarne u konvencionalnim tehnologijama, koriste se tehnike čija upotreba nije opravdana u konvencionalnim tehnologijama, a preuzete su iz drugih naučnih disciplina (fizika, biologija, hemija i sl.). Razvojem i korišćenjem novih procesa proizvodnje mikrodijelova dolazi do pojma proizvodnih tehnologija u mikroinženjerstvu (mikrotehnologija).

1.2. MIKROINŽENJERSKE TEHNOLOGIJE

Najbolji pokazatelj razvoja industrije mikrodijelova je ukupna vrijednost proizvodnje na globalnom nivou. Ukupna vrijednost proizvodnje mikrodijelova u 2016. godini je iznosila 12.9 milijardi američkih dolara [16]. Pomenuta vrijednost se odnosi na proizvodnju dijelova za najvažnije industrijske grane, medicinu i proizvodnju dijelova za opštu upotrebu. Za 2021. godinu predviđen je rast ukupne vrijednosti proizvodnje mikrodijelova na 19.7 milijardi američkih dolara, što je povećanje od 53%. Na osnovu detaljnih studija, pretpostavlja se da će se najveći godišnji rast zabilježiti u industriji medicinske opreme, i to od 69%, vojnoj industriji 46% i proizvodnji industrijske opreme 43% (Slika 1.2). U 2016. godini, proizvodnja industrijske opreme (mašina i alata) je zauzimala drugo mjesto u ukupnim prihodima industrije mikrodijelova, što je ovu vrstu proizvodnje postavilo na drugo mjesto, odmah iza medicine. Ovaj podatak, kao i podaci drugih studija [17], govore o naglom porastu upotrebe, a time i proizvodnje mikrodijelova u svim privrednim granama.

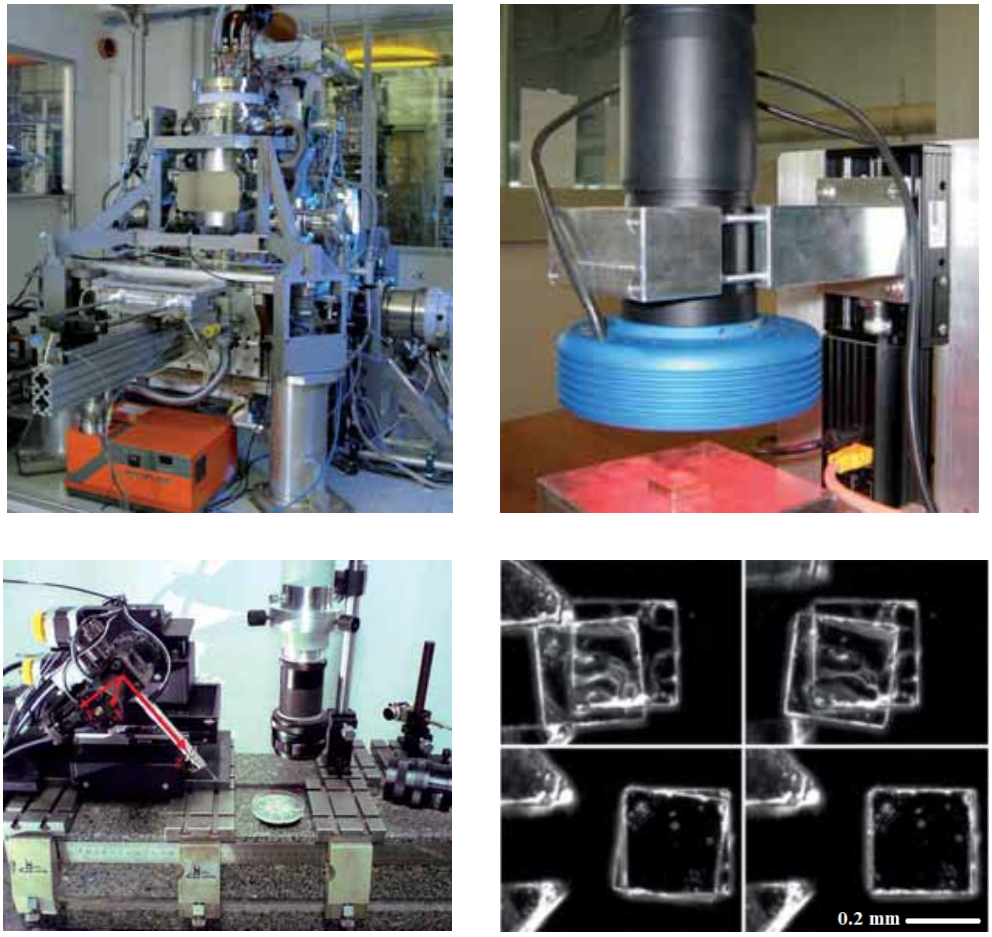


Slika 1.2. Globalni rast industrije mikrodijelova [16]

Proizvodnja mikrodijelova je izuzetno specifična i zahtijevna. S jedne strane nalaze se mikrodijelovi, najčešće složene geometrije, velike tačnosti i kvaliteta, napravljeni od specijalnih materijala; dok se sa druge strane nalazi čitav niz proizvodnih procesa, kao što su obradni, manipulacioni, montažni, kontrolni, transportni, itd. Proizvodnja mikrodijelova neminovno zahtijeva neprestani razvoj obradnih procesa, preciznih mašina, alata i pribora na mikronivou [18, 19]. Manipulacija materijalom na mikronivou se razlikuje od manipulacije materijalom na makronivou (standardne proizvodnje), jer se mehaničke i tehnološka svojstva materijala, shodno dimenzijama, ne mogu jednostavno linearno skalirati na mikronivo. Proizvodna, a naročito mjerna oprema, mora da ima specifične karakteristike u pogledu preciznosti i tačnosti, čime se dodatno usložnjava proces upravljanja takvom opremom [20].

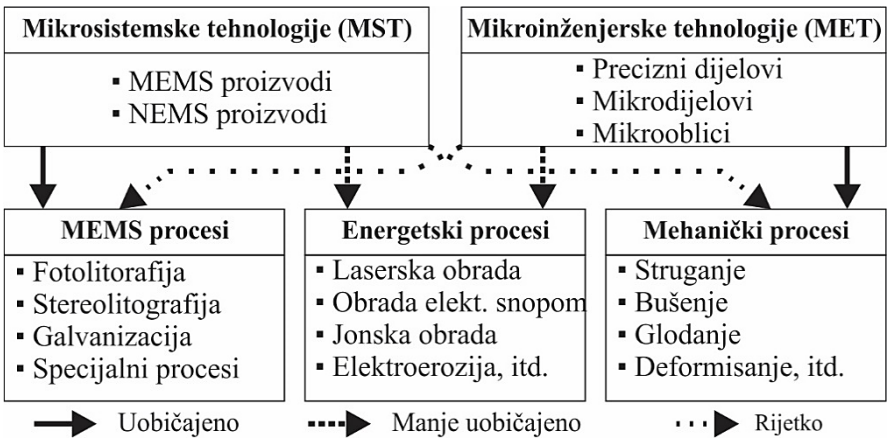
U laboratorijskim i proizvodnim uslovima razvijeni su mnogi sistemi za obradu, mjerenje i montažu mikrodijelova. Na slici 1.3. prikazani su neki od pomenutih sistema, razvijeni u laboratorijskim okruženju u okviru različitih naučnih projekata. Mogu se vidjeti: uređaj za nanošenje trodimenzionalnih mikrostruktura na različitim površinama razvijen od strane IMS Nanofabrication-a (na slici gore lijevo), stereovizijski mjerni sistem razvijen od strane MANUDIREKT-a (na slici gore desno), modularni mikromanipulacioni višeosni sistem razvijen

od strane Bugarske akademije nauka (na slici dole lijevo), te mikrorobotske čeljusti za montažu mikrodijelova razvijen od strane Tehnološkog univerziteta u Helsinkiju (na slici dole desno).



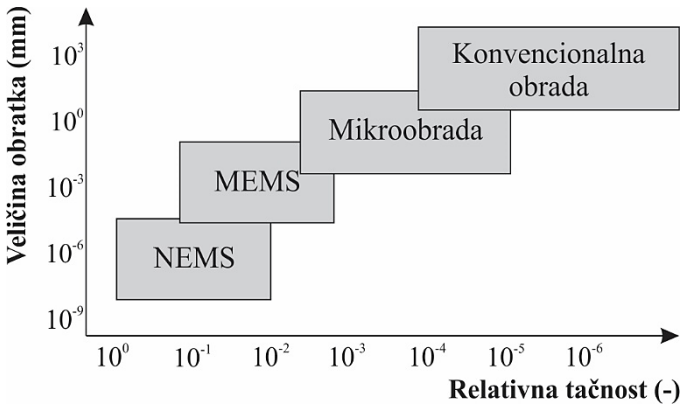
Slika 1.3. Sistemi za proizvodnju, kontrolu i manipulaciju mikrodijelovima [17]

Tehnologije za proizvodnju mikrodijelova se dijele na dva tipa: mikrosistemske tehnologije (engl. *micro-system technologies* - MST) i mikroinženjerske tehnologije (engl. *micro-engineering technologies* MET) [21]. U suštini, ove dve vrste tehnologija mogu koristiti iste vrste proizvodnih procesa (Slika 1.4). Svi navedeni procesi se mogu podijeliti u dvije grupe: aditivne i subtraktivne procese, obzirom na to da li se obradom dodaje ili uklanja materijal sa posmatranog pripremka. Prva grupa mikrotehnologija se odnosi na procese proizvodnje mikroelektromehaničkih sistema (engl. *micro-electro-mechanical systems* - MEMS) i nanoelektromehaničkih sistema (engl. *nano-electro-mechanical systems* NEMS). Svakako je bitno napomenuti da se u industriji mikrokomponenti i mikrodijelova, veliki dio ukupne proizvodnje odnosi upravo na proizvodnju MEMS i NEMS (komponente računara, mikrouređaji u medicini, mikroroboti, itd.). Druga grupa mikrotehnologija se odnosi na proizvodnju preciznih dijelova, mikrodijelova i mikrostruktura na makrodijelovima, kao što su mikrootvori, mikropovrši, i sl. Mikroinženjerske tehnologije se prepliću sa mikrosistemskim u podjeli procesa obrade, ali i u proizvodnji ultra preciznih mašina i uređaja koji se koriste u mikrosistemskim tehnologijama. Ove tehnologije objedinjuju procese koji se razlikuju po principima obrade materijala i performansama procesa [22]. Zasnivaju se na mehaničkim, energetskim i hemijskim procesima odnosno njihovoj kombinaciji.



Slika 1.4. Tehnologije izrade mikrodijelova [21]

Prema definiciji mikroobrada je postupak kojim se omogućava izrada dijelova čije su bar dvije dimenzije, mjerene u međusobno upravnim pravcima, manje od 999 μm [18, 23]. Domen mikroinženjerskih tehnologija, odnosno mikroobrade kao proizvodnog procesa, je proizvodnja dijelova čije se dimenzije kreću od nekoliko mikrona do nekoliko milimetara. Sa druge strane, prilikom konstruisanja mikrodijelova, a time i njihove proizvodnje, zahtijevaju se relativno uske tolerancije dimenzija. Na slici 1.5 je prikazan odnos pojedinih vrsta proizvodnih tehnologija u pogledu dimenzije radnih komada i njihove relativne tačnosti. Relativna tačnost predstavlja količnik između prosječne vrijednosti tolerancije i prosječne dimenzije karakterističnih radnih komada.



Slika 1.5. Odnosi mikrotehnologija s obzirom na dimenziju obratka i relativnu tačnost [23]

1.3. DEFINISANJE PROBLEMA ISTRAŽIVANJA

Posmatrajući trenutno stanje u globalnoj industriji, može se zaključiti da se javlja sve više zahtijeva za pojedinačnom ili maloserijskom proizvodnjom dijelova složene geometrijske i tehnološke konfiguracije, kod kojih se zahtijeva povišena tačnost i kvalitet obrade. Takvi dijelovi su često izrađeni od materijala povišene čvrstoće, tvrdoće, žilavosti, otpornosti na habanje te ostalih mehaničkih svojstava, pa se zbog toga smatraju teškoobradivim. Pored ovih zahtijeva, traži se visoka fleksibilnost, efikasnost, ekonomičnost i proizvodnost procesa obrade. Naravno, svi ovi zahtjevi se prelivaju i u područje mikroinženjerskih tehnologija pri čemu se javljaju dodatni problemi, koji umnogome usložnjavaju proizvodnju mikrodijelova.

Na izbor tehnologije za izradu mikrodijelova utiče: geometrijska i tehnološka kompleksnost dijelova, obradivost materijala zbog različitih svojstava, ali i strukturnog stanja, zahtjev za povećanom tačnošću izrade, zahtjev za smanjenjem vremena obrade i troškova proizvodnje [24]. Često, uticaj ima i krajnja funkcionalnost mikrodijelova. Da bi se odgovorilo tim zahtjevima, neophodno je razviti i odgovarajuće mikroobradne procese, mikromašine alatke i mikroalate. Mikroobrada je prisutna u nekonvencionalnim tehnologijama, konvencionalnim tehnologijama obrade rezanjem, tehnologijama deformisanjem, tehnologijama livenja i aditivnim tehnologijama. Analizirajući podjelu tehnologija, razvoj mikroobrade se danas odvija u vertikalnom i horizontalnom pravcu. Razvoj u vertikalnom pravcu obuhvata dublje proučavanje pojedinačnih mikroinženjerskih tehnologija. Razvojem u horizontalnom pravcu, odnosno kombinacijom različitih vrsta mikroinženjerskih tehnologija (npr. hibridnih postupaka obrade), se pokušava doći do poboljšanja u pogledu karakteristika obradnog procesa i proizvoda. Danas se kao mikroinženjerske tehnologije koriste: mikrolivenje, stereolitografija, laserska obrada (engl. *laser beam machining* - LBM), elektroeroziona obrada (engl. *electric discharge machining* - EDM), mikrodeformisanje i mikrorezanje ili njihova kombinacija.

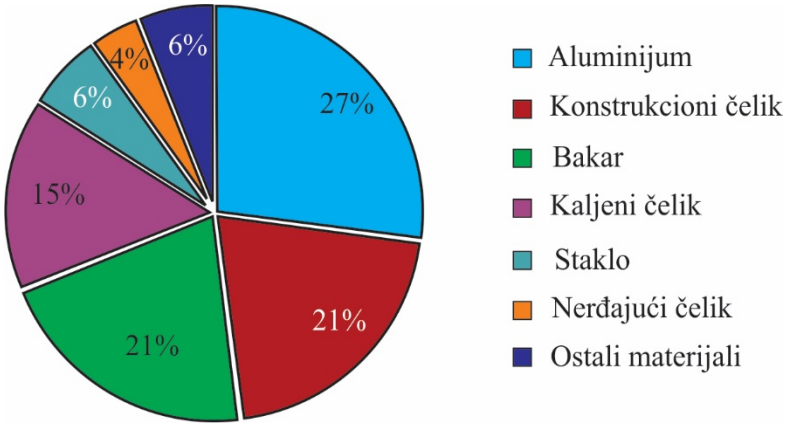
Mikrolivenje je obradni proces koji se zasniva na očvršćavanju materijala, što prilikom hlađenja dovodi do unutrašnjih napona i pojave pukotina u materijalu, te je nepogodna za izradu dijelova manjih od 500 μm. Ovaj proces je pogodan za masovnu proizvodnju. Stereolitografija se zasniva na principu lepljenja slojeva očvsnutih pod dejstvom fokusirane svijetlosti. Ovom tehnologijom je moguće dobiti dijelove koji posjeduju geometrijske forme reda veličine 12 μm, ali je njihova upotreba ograničena na nekoliko vrsta materijala. Mikrodeformisanje se zasniva na plastičnom tečenju materijala u toplom ili hladnom stanju, što sužava spektar materijala koji se mogu obraditi. Ovaj postupak je izuzetno nefleksibilan i obično se koristi u masovnoj proizvodnji, pošto su troškovi u tom slučaju najniži. Tehnologije mikrolivenja, istiskivanja ili brizganja zahtijevaju korišćenje alata čije su kalupne šupljine istog oblika kao mikrodijelovi koje je potrebno proizvesti. Jedan od glavnih problema je što pomenuti alati moraju da posjeduju mnogo veći kvalitet i tačnost obrade nego sami proizvodi, što usložnjava i poskupljuje proces, te produžava vrijeme njihove proizvodnje. Mikroalati za tehnologije livenja i deformisanja se, u prvom redu, izrađuju od visokolegiranih teškoobradivih čelika zbog njihovih posebnih mehaničkih svojstava. Oni se dominantno obrađuju elektroerozionom obradom, što se preslikalo i na oblast mikroinženjerskih tehnologija. S obzirom na to, u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji funkcionalnih mikrodijelova i naprijed pomenutih mikroalata, dominira elektroerozina obrada, iza nje slijedi laserska obrada, dok obrada mikrorezanjem još uvijek nije dovoljno istražena [24, 25].

Laserskom obradom, koja se zasniva na isparavanju materijala obratka pomoću fokusirane svijetlosti, mogu se obrađivati različite vrste materijala. Pri tome se mogu dobiti geometrijske

forme dimenzija 10 μm. Glavni nedostatak laserske obrade je nemogućnost trodimenzionalne obrade. Obrada laserom omogućava vrlo preciznu obradu, kraće vrijeme izrade, te eliminisanje greške premještanja i pozicioniranja alata koje se javljaju kod elektroerozione obrade. Ovim postupkom se ne mogu dobiti mikrodijelovi sa složenim trodimenzionalnim oblicima zbog nemogućnosti kontrolisanja dubine prodiranja laserskog zraka. Uticaj toplote laserskog zraka negativno utiče na kvalitet površine mikrodijelova uslijed promjene svojstava površinskog sloja.

Skidanje materijala pri elektroerozionoj obradi ostvaruje se putem periodičnog pretvaranja električne energije u toplotnu, pri čemu razvijena toplota dovodi do topljenja i isparavanja dijela materijala obratka. Njena primjena ograničena na materijale koji imaju posebna fizička i električna svojstva. Glavni nedostatak elektroerozione obrade je dugo vrijeme obrade odnosno vrlo mala proizvodnost. Takođe, nedostaci laserske i elektroerozione obrade se ogledaju u pojavi oštećenja površinskih slojeva obratka, kao i u relativno velikoj potrošnja energije. Postupak obrade elektroerozijom zahtjeva izradu preciznih elektroda složenog oblika za grubu, ali i elektroda za finu obradu. Izrađene elektrode se sa mašina za njihovu izradu prenose na postrojenja za elektroeroziju što dovodi do grešaka pozicioniranja. Same elektrode nakon obrade gube tačnost i kvalitet zbog toga što se habaju, te se ne mogu naknadno koristiti. Evidentno je da su za proizvodnju mikrodijelova elektroerozijom potrebne dvije različite vrste obrade i to: precizno glodanje i elektroeroziona obrada, odnosno dvije nezavisne mašine. Generalno, glavno i pripremno-završno vrijeme elektroerozione obrade je relativno veliko u odnosu druge tehnologije.

Obrada mikrorezanjem se odnosi na čitav niz obradnih procesa kao što su: mikrostruganje, mikrobušenje, mikroglodanje i mikrobrušenje. Mikroglodanje je mehanički postupak obrade skidanjem strugotine sa alatima čije su dimenzije do 1000 μm [26]. Njegova osnova je proces mikrorezanja, koji se zasniva na postupku kontrolisanog odnošenja čestica materijala obratka. Izvodi se na visokobrzinskim višeosnim glodalicama povišene krutosti, sa visokim brojevima obrtaja i mogućnošću vrlo preciznog pozicioniranja. Mikroglodanjem se može obrađivati široki spektar materijala, pri čemu su u najvećem procentu zastupljeni metali i legure metala (Slika 1.6). Generalno, aluminijum i njegove legure se koriste za izradu prototipova mikrodijelova. Bakar, legure bakra i grafit se koriste za izradu preciznih elektroda za elektroerozionu obradu. Čelici i specijalne legure, u ovom slučaju spadaju u teškoobradive materijale. Koriste se za izradu alata i funkcionalnih mikrodijelova izloženih visokim mehaničkim i toplotnim opterećenjima. Glavni nedostatak ove obrade ogleda se u pojavi složenih uslova i mehanizama odvajanja strugotine, izražene defleksije alata i male postojanosti alata, a čije se posljedice negativno odražavaju na tačnost i kvalitet obrade.



Slika 1.6. Zastupljenost materijala u mikroglodanju [26]

Poredeći elektroerozionu obradu i mikroglodanje, može se zaključiti da se elektroerozionom obradom mogu dobiti mikrodijelovi složene konfiguracije sa vrlo malim poluprečnicima unutrašnjih uglova, ali to iziskuje dugu pripremu proizvodnje i rezultuje dugačkim vremenom obrade, što povećava troškove proizvodnje uz mogućnost pojave greške manipulacije. U odnosu na mikroglodanje i elektroerozionu obradu, laserska obrada ima dovoljnu preciznost, a njome se izbjegava upotreba elektroda. Njen glavni nedostatak je nemogućnost trodimenzionalne obrade i negativan uticaj generisane toplote na površinske slojeve mikrodijelova. Kod elektroerozione obrade nema fizičkog dodira alata i obratka. Kao posljedica visoke temperature plazme koja se javlja u zoni pražnjenja, nastaje neizbježno trošenje elektrode. Javlja se na čeonoj površini, ali djelimično i na bočnim površinama. Kod laserske obrade nema mehaničkog alata, što je njena glavna prednost u odnosu na mikroglodanje. Mikroglodanje se odlikuje relativno visokom produktivnošću. S druge strane, mehanički alat postaje najosjetljiviji dio obradnog sistema zbog niske postojanosti i krutosti, koje su jako izraženi upravo pri obradi teškoobradivih materijala.

Generalno, prvi problem u mikroglodanju predstavlja obrada visokolegiranih čelika i specijalnih legura, sa visokom zateznom čvrstoćom, visokom tvrdoćom, otpornošću na habanje i otpornošću na uticaj toplote. U prvom redu, to su hrom-niklovi i manganski čelici, te titanijumove legure. Ovi materijali imaju izuzetno dobra mehanička svojstva, kao što su zatezna čvrstoća veća od 850 N/mm², tvrdoća od 55 do 65 HRc i velika toplotna postojanost, otpornost na habanje zbog prisustva karbida hroma. Navedeni čelici se koriste za izradu kovačkih i livačkih kalupa, matrica alata za obradu deformisanjem u hladnom stanju, te odgovornih funkcionalnih i visoko opterećenih mikrodijelova. Drugi opšti problem u mikroglodanju predstavlja osjetljivost reznog alata na visoke sile rezanja odnosno mala krutost i njegova niska postojanost. Obrada teškoobradivih čelika sa dodatkom hroma i nikla rezultuje intenzivnim habanjem reznog alata. Rješenja u vidu intenzivnog podmazivanja i hlađenja zone obrade, nanošenja posebnih prevlaka na alat ili izrada specijalne geometrije na glodalima imaju ograničenja upravo zbog malih dimenzija alata i uske zone obrade. Prilikom obrade mikrodijelova složene geometrije, sa teško pristupačnim zonama namijenjenim obradi, moraju se koristiti loptasta glodala sa dugačkim radnim dijelom i vratom, čime ona postaju popustljivija pri djelovanju sila rezanja, koji se javljaju prilikom obrade teškoobradivih čelika.

Problem efikasnog i ekonomičnog izvođenja, te kontrolisanja postupka mikroglodanja je mnogo izraženiji nego kod glodanja na makronivou zbog prisustva tzv. „efekta veličine“. Efekat veličine (engl. s*ize effect*) se odnosi na nesrazmjeru između ranga veličina geometrijskih i tehnoloških parametara obrade, veličine zrna u strukturi materijala obratka i geometrijskih veličina na reznom alatu [27, 28]. U ukupnim deformacijama u mikroglodanju veliki procenat deformacije se odnosi na elastične deformacije alata ali i materijala obratka, što dodatno usložnjava problem kontrolisanja i modeliranja obrade. Kako je alat najosjetljiviji element obradnog sistema u mikroglodanju, to je poznavanje prirode sila rezanja i defleksije alata bitno zbog predikcije loma alata i uticaja na tačnost obrade. Veliku važnost ima i poznavanje uticaja uslova obrade ali i ostalih parametara procesa na kvalitet obrađene površine i proces habanja alata, koji u velikoj mjeri zavise od efekta veličine koji se javlja uslijed habanja rezne ivice. U mikroglodanju postoji veliki broj ulaznih parametara i izlaznih veličina. Zbog velike brzine odvijanja procesa rezanja, njegove složenosti uzrokovane efektom veličine i složene interakcije između ulaznih i izlaznih parametara, u prvom redu se zahtijeva razvoj prediktivnih modela procesa obrade [29]. Opis njihove interakcije u okviru definisanja mikroobradivosti je izuzetno složena, te ne podliježe zakonima procesa obrade na makronivou. Kako u obradi mikrodijelova veliku važnost ima tačnost dimenzija i kvalitet obrađene površine, proučavanje i opisivanje uticaja tehnoloških i geometrijskih parametara i uslova obrade na pomenute parametre ima esencijalnu važnost [30].

1.4. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Mikroglodanje je predmet istraživanja u zadnjih petnaest godina, te se pokazalo kao prihvatljiva alternativa ustaljenim tehnologijama izrade mikrodijelova, kao što su laserska obrada i elektroeroziona obrada. Analiza istraživanja pokazuje da se mikroglodanje proučava u svrhu njegovog korišćenja kao jednog zasebnog obradnog procesa pri izradi funkcionalnih mikrodijelova, procesa koji prethodi korišćenju nekonvencionalnih mikrotehnologija ili nekog hibridnog obradnog procesa. Istraživanja ove vrste mikroinženjerske tehnologije su uglavnom rezultat rada nekoliko istraživačkih grupa u svijetu. Analiza dosadašnjih istraživanja je organizovana kroz analizu dostignuća u proučavanju obradivosti, te dostignuća u modeliranju funkcija obradivosti. Odgovarajući dio pregleda je fokusiran na istraživanja koja se odnose na profilno mikroglodanje dijelova od visokolegiranih teškoobradivih čelika.

Opsežna istraživanja obradivosti aluminijuma, grafita i legiranih čelika pri mikroglodanju proveli su Tansel i ostali [31]. U svojim istraživanjima proveli su veliki broj eksperimenata, pri čemu su mjerili signale sila rezanja, hrapavost i integritet obrađene površine, habanje alata, oblik strugotine, te naslage na alatu i obrađenoj površini. Analizom dobijenih rezultata došli su do zaključaka o zavisnosti sila rezanja, habanja i hrapavosti od tehnoloških parametara.

Kroz istraživanja mikroglodanja i hibridnih mikrotehnologija, Bissacco i ostali [32] su dali analizu obradivosti specijalnog materijala namijenjenog za izradu alata za brizganje, tvrdoće 54 HRc, dobijenog procesom sinterovanja metalnog praha. Analizirali su vrijednosti funkcija obradivosti kao što su: hrapavost obrađene površine, tačnost dimenzija mikrodijelova i proizvodnost obrade iskazanu kroz količinu skinute strugotine, te uticaj tehnoloških i geometrijskih parametara na proces obrade. Autori su se posebno osvrnuli na uticaj odnosa poluprečnika zaobljenja rezne ivice alata i debljine neodrezane strugotine na izlazne parametre procesa mikroglodanja. Ista grupa autora [33] je ispitivala uticaj efekta veličine na izlazne parametre procesa. Za analizu i modeliranje su koristili postupak analize varijanse. Došli su do zaključka da se najmanja hrapavost obrađene površine javlja kada je vrijednost odnosa poluprečnika zaobljenja rezne ivice i debljine neodrezane strugotine približno jedan, a kao razlog navode ujednačavanje mehanizama formiranja strugotine.

Istraživanja obradivosti teškoobradivog alatnog čelika AISI H13, tvrdoće 45 HRc obrađivanog vretenastim glodalom 0.9 mm, proveli su Armachareon i Mativenga [34]. U istraživanju su analizirali uticaje tehnoloških i geometrijskih parametara obrade na funkcije obradivosti. Zaključili su da je alat najosjetljiviji element obradnog sistema. Prema njima, najkritičniji parametar u pogledu kontrolisanja procesa obrade jeste poluprečnik zaobljenja rezne ivice, kojim se iskazuje vrijednost habanja alata, a koji je u direktnoj vezi sa pojavom efekta veličine. Shodno tome, u radu [35] izvršili su analizu uticaja prevlaka na alatu na integritet obrađene površine i proces habanja.

Jin i Kim [36] su istraživali uticaj tehnoloških parametara na sile rezanja i hrapavost obrađene površine, pri obradi teškoobradivog alatnog čelika AISI D2. Sile rezanja i hrapavost obrađene površine su ocijenili kao najvažnije funkcije obradivosti, upravo zbog nedostataka mikroobrade u smislu male krutosti alata i uticaja pomenute krutosti na hrapavost.

Istraživanja u svrhu povećanja postojanosti alata i smanjenja hrapavosti obrađene površine, korišćenjem specijalnih materijala reznog alata, izvršili su Klocke i ostali [37]. U radu je data analiza uticaja tehnoloških parametara na funkcije obradivosti, kao i uticaj upotrebe alata od kubnog bor-nitrida. Obradom alatnog čelika X38CrMoV5, utvrdili su da se habanje alata u

mikroglodanju ne može modelirati standardnim Taylor-ovim zavisnostima, te navode da u nekim slučajevima odnosno kombinacijama tehnoloških parametara, postojanost alata raste sa povećanjem brzine rezanja, što je u suprotnosti sa Taylor-ovim zaključcima. Ovo istraživanje govori o složenosti mehanizma mikrorezanja.

Analizu kvaliteta obrade, kroz analizu uticaja brzine rezanja i koraka po zubu na hrapavost površine i naslage na ivicama obratka, sproveli su Cristofaro i ostali [38]. Eksperimentalnom obradom alatnog čelika 90MnCrV8, tvrdoće 62 HRc, dolaze do zaključka da naslage na ivicama obratka rastu sa povećanjem koraka po zubu i brzine rezanja. Istraživanjem su pokazali da povećanje pomenutog koraka ne mora neminovno dovesti do smanjenja habanja rezne ivice alata.

Gilbin i ostali [39] su istraživali uticaj različitih prevlaka na alatu, debljine prevlaka i tehnoloških parametara na funkcije obradivosti alatnog čelika 42NiCrMo16, tvrdoće 54 HRc, obrađivanog vretenastim mikroglodalom prečnika 0.5 mm. Utvrdili su da prevlaka TiAlCrN, debljine 0.5 μm daje nabolje rezultate pri obradi, da geometrija alata najviše utiče na habanje alata, te da njegova krutost utiče na kvalitet obrađene površine. Zaključuju da vrijednost grudnog ugla jednaka nuli značajno smanjuje habanje alata, te da ne povećava vrijednost sila rezanja. Pokazali su da se naslage na ivicama obratka mogu izbjeći malim povećavanjem koraka po zubu a što, suprotno zakonitostima obrade na makronivou, nema signifikantan uticaj na kvalitet obrade.

Analizu uticaja tehnoloških parametara i krupnoće kristalnog zrna alatnog čelika AISI H13, tvrdoće 46 HRc, obrađivanog vretenastim glodalom prečnika 0.5 mm na izlazne parametre procesa, proveli su Lauro i ostali [40]. Pomenutu analizu su izvršili primjenjujući Taguchi-jev plan eksperimenta. U zaključcima navode da najveći uticaj na proces obrade ima korak po zubu, a odmah iza njega ima krupnoća kristalnog zrna materijala obratka. Utvrdili su da se optimalni pokazatelji procesa dobijaju prilikom obrade krupnozrnaste strukture manje tvrdoće, koraka po zubu od 1 μm i brzine 33 m/min. U kasnijem istraživanju [41], Lauro i ostali su analizirali potrošnju specifične energije pri prethodno opisanim uslovima. Specifičnu energiju procesa mikroobrade u vremenskom domenu, baziranu na sili rezanja, modelirali su Simpson-ovom formulom. Zaključili su da se vrijednost specifične energije može smanjiti blagim povećanjem koraka po zubu u oblasti vrijednosti bliskim poluprečniku zaobljenja rezne ivice, te da se manje vrijednosti istog dobijaju pri obradi materijala sa manjim kristalnim zrnima.

Kerbs i Kersting [42] su istraživali uticaj ugla nagiba loptastog mikroglodala na proces habanja alata i hrapavost obrađene površine. Istraživanja su proveli na brzoreznom alatnom čeliku S6-5-2, tvrdoće 63 HRc. Zaključili su da ugao nagiba mikroglodala u pravcu kretanja alata i ugao nagiba glodala u pravcu normalnom na pravac kretanja alata, imaju veliki uticaj na hrapavost površine. Preporučuju da se, pri korišćenju velikih vrijednosti koraka po zubu, koriste pozitivni nagibi ose alata, u smjeru kretanja alata. Ova preporuka vrijedi sve do pojave intenzivnog habanja alata, jer tom prilikom suprotni nagibi alata daju nižu hrapavost obrađene površine.

Mougo i ostali [43] su analizirali obradivost teškoobradivog legiranog čelika X2CrNiMoN25-7-4, tvrdoće 35 HRc, koristeći analizu varijanse. U radu su prezentovali uticaj efekta veličine poluprečnika zaobljenja rezne ivice na izlazne funkcije obradivosti. Konstatovali su da specifični pritisak rezne ivice na materijal obratka nelinearno raste sa smanjenjem koraka po zubu u oblasti malih vrijednosti, bliskih poluprečniku zaobljenja rezne ivice.

Analizu obrade alatnog čelika 40NiCrMo16, tvrdoće 54 HRc, obrađivanog loptastim mikroglodalom prečnika 0.5 mm, sproveli su Escolle i ostali [44]. Fokusirali su se na istraživanje uticaja različitih prevlaka na alatima i tehnoloških parametara na funkcije obradivosti. Tom prilikom su koristili dve strategije obrade kosih površina i to obradu odozdo na gore i horizontalnu obradu. Došli su do zaključka da rezna geometrija alata i vrsta prevlake utiču na proces habanja

alata, dok dimenzije alata i strategija obrade utiču na hrapavost obrađene površine. Zaključili su da prevlaka AlCrN daje bolje rezultate od prevlake TiAlN u pogledu postojanosti alata.

Oliveira i ostali [45] su proveli opsežnu analizu obradivosti čelika AISI 1045, obrađivanog vretenastim mikroglodalima prečnika 0.8 mm. Tom prilikom su se fokusirali na determinisanje vrijednosti minimalne debljine strugotine, izazivanjem pojave fenomena efekta veličine i mjerenja naglog povećanja specifične sile rezanja. Eksperimentalna istraživanja su obavili u oblasti malih vrijednosti koraka po zubu, manjih od poluprečnika zaobljenja rezne ivice alata, gdje praktično počinje efekt brušenja površine. Zaključili su da minimalna debljina strugotine varira od 22% do 36% poluprečnika zaobljena rezne ivice alata, što su predstavili krivom koja prikazuje odnos vrijednosti količnika specifična sila/hrapavost površine u odnosu na vrijednost količnika između koraka po zubu i poluprečnika zaobljenja rezne ivice.

Oliaei i Karpat [46] istraživali su uticaj habanja alata na sile rezanja i defleksiju alata, pri obradi nerđajućeg čelika AISI 420 vretenastim mikroglodalom prečnika 0.8 mm. Zaključuju da habanje alata, kvantifikovano poluprečnikom zaobljenja rezne ivice alata, ima uticaj na sile rezanja. Jedan od zaključaka istraživanja je da postoji mogućnost povećanja koraka po zubu, zbog prevazilaženja pojave gnječenja materijala uzrokovanog povećanjem poluprečnika zaobljenja rezne ivice alata uslijed habanja, ali je to povećanje ograničeno kritičnom defleksijom alata.

Uticaj naslaga na reznim ivicama mikroglodala na integritet obrađene površine obratka od nerđajućeg čelika AISI 316L, obrađivan vretenastim mikroglodalom prečnika 0.5 mm, izvršili su Wang i ostali [47]. U prvom dijelu rada opisan je fenomen naslage na alatu, koji su autori parametrizovali preko gustine i entropije fotografskog snimka, a zatim kvantifikovali vrijednosti tih parametara. U drugom dijelu rada analiziran je uticaj opisanih parametara na hrapavost i integritet obrađene površine, te donesen zaključak o uticaju naslage na iste.

U radu [48] Arif i ostali su prezentovali istraživanja obradivosti silicijuma namijenjenog mikroelektronskim komponentama. Tom prilikom su koristili loptasto mikroglodalo od kubnog nitrid bora. Analizirali su uticaj tehnoloških parametara, ugla nagiba površine obratka i strategije obrade na sile rezanja, hrapavost obrađene površine i habanje alata. Utvrdili su da je vrijednost koraka po zubu potrebno održavati ispod kritične vrijednosti, eksperimentalno utvrđene za odgovarajući ugao nagiba obrađivane površine na obratku.

Uticaj strategije glodanja na tačnost obrade, hrapavost obrađene površine i pojavu naslaga na ivicama alata prilikom obrade tankozidnih struktura od aluminijuma i mesinga, dat je u radu Llanosa i ostalih [49]. Nakon provedene analize zaključili su da se najbolji rezultati u pogledu funkcija obradivosti postižu, pored korišćenja nižih vrijednosti koraka po zubu i dubine rezanja te visoke brzine rezanja, korišćenjem strategije uzastopnog spuštanja alata (engl. *Z step strategy*).

Poređenjem različitih materijala alata i prevlaka na mikroglodalima, Xu i ostali [50] su analizirali proces obrade aluminijumske legure Al2024 vretenastim mikroglodalima prečnika 1 mm. Poredili su efekte primjene cermetnih mikroglodala prevučenih sa $Ti(C_7N_3)$ prevlakom u odnosu na volfram-karbidna (WC) mikroglodala. Utvrđeno je povećanje postojanosti alata sa $Ti(C_7N_3)$ prevlakom za dva puta u odnosu na WC mikroglodala. Između ostalog autori zaključuju da je dominanti mehanizam habanja kod mikroglodala sa $Ti(C_7N_3)$ prevlakom habanje sa pojavom mikropukotine, koja u suštini može dovesti do nepredviđenog loma rezne ivice alata.

Li i Chou su [51] analizirali efekte primjene hlađenja minimalnom količinom lubrikanta (engl. *minimal quantity lubrication* - MQL) tehnike podmazivanja pri obradi alatnog čelika AISI H13, tvrdoće 38 HRc. U tu svrhu, eksperiment su proveli kombinujući različite protoke i pritiske ulja, a rezultate su uporedili sa efektima obrade bez podmazivanja. Pored ovog, analizu obradivosti su izvršili mijenjanjem tehnoloških parametara i promjenom sastava materijala alata.

Analizom je utvrđeno da primjena MQL tehnike smanjuje habanje reznog alata za 60%, te da materijal alata ne utiče na efekte njene primjene.

Imran i ostali [52] su analizirali efekte podmazivanja prilikom obrade specijalne legure Inconela 718, pri čemu su koristili vretenasto mikroglodalo prečnika 0.5 mm. Analizom rezultata su utvrdili da obrada bez podmazivanja negativno utiče na integritet obrađene površine, te povećava površinske napone za 90%. Takođe, pokazali su da se za različite vidove podmazivanja, habanje alata razlikuje u mehanizmima habanja, a koje nastaje uz dominantno abrazivno i adhezivno habanje. Zaključili su da se prilikom korišćenja obrade bez podmazivanja javljaju makropukotine koje dovode do naglog loma reznog dijela glodala.

U radu [53] Hassanpour i ostali su istraživali obradivost titanijumske legure Ti6Al4V, koju su obrađivali karbidnim vretenastim mikroglodalom prečnika 0.5 mm, u uslovima primjene MQL tehnike podmazivanja. Analizirali su uticaj koraka po zubu i dubine obrade te brzine rezanja na sile rezanja, hrapavost obrađene površine, veličinu naslaga na ivicama obratka i mikrotvrdoće površinskog sloja obratka, koristeći analizu varijanse. Zaključili su da najveći uticaj na sile rezanja ima brzina rezanja, što nije slučaj u obradi na makronivou.

Slično prethodnim studijama, Aslantas i ostali [54] su proučavali uticaj tehnike podmazivanja na proces mikroglodanja titanijumske legure Ti6Al4V. U svrhu poboljšanja procesa podmazivanja razvili su hibridni sistem podmazivanja, koji kombinuje MQL tehniku podmazivanja i kriogenu tehniku hlađenja rezne ivice sa CO_2. Analizom rezultata su utvrdili da je MQL tehnika daje dva puta, a razvijena hibridna tehnika četiri puta bolju postojanost alata, u odnosu na suvu obradu. Zaključili su da se primjenom hibridne tehnike dobija za 20% manja hrapavost u odnosu na MQL tehniku.

Jun i ostali [55] su razvili proceduru za procjenu greške obrade zasnovane na akviziciji akustične emisije. U radu su razvili posebne estimacione parametre kojim se procjenjuje greška izrade alata i vrijednost defleksije alata. Pomoću razvijenih parametara i mjerenjem vibracija alata u toku zahvatanja materijala obratka, procjenjivali su ukupnu grešku obrade. U toku eksperimenta koristili su različite konstrukcije vretenastih mikroglodala, kojima su obrađivali posebno konstruisan obradak od specijalne voštane mase.

Slično prethodnom istraživanju, akustičnu emisiju u svrhu monitoringa mikroalata u istraživanjima su koristili Jemielniak i Arrazola [56]. Eksperimente su vršili na obratku od alatnog čelika X155CrVMo12, sa kosim površinama koje su obrađivali loptastim mikroglodalom prečnika 0.4 mm. Istraživanjem i analizom su izdvojili signal akustične emisije koji je oslobođen od mehaničkih poremećaja kao što su rezonantne vibracije. Takođe, uprkos maloj brzini uklanjanja materijala dobili su jak signal, usprkos vrlo kratkim vremenskim odzivom pri kontaktu alat-obradak. To je pomenutu vrstu signala učinilo pogodnim za estimaciju habanja alata.

Volger i ostali su u radu [57] izvršili analizu procesa obrade i modeliranje sila rezanja, razdvajanjem mehanizma procesa na osnovu minimalne debljine strugotine i to: na mehanizam gnječenja materijala uslijed efekta veličine i mehanizam odvajanja strugotine. Pri tome su koristili model plastičnih deformacija u ravni smicanja strugotine (engl. *slip-line plasticity force model*), odnosno model elastičnih deformacija, oba preuzeta iz makroobrade. Takođe, nepoznate koeficijente sila rezanja preuzeli su iz istraživanja drugih autora, a koji su se bazirali na metodi konačnih elemenata. U eksperimentalnim istraživanjima su koristili gvožđe sa perlitnom i feritnom strukturom, koje su obrađivali vretenastim glodalom prečnika 1 mm.

Dow i ostali [58] su modelirali sile rezanja i defleksiju alata kod mikroglodanja teškoobradivog S-7 čelika, pri čemu su koristili loptasta glodala sa prečnikom od 0.5 do 1 mm. Autori su se osvrnuli i na problematiku nedovoljno istraženih fenomena u mikrorezanju, kao što

je uticaj krupnoće kristalnih zrna materijala obratka na proces formiranja strugotine. Autori su koristili Akron-ov model sila rezanja, koji kombinuje empirijsko modeliranje i model plastičnih deformacija u ravni smicanja strugotine. Defleksiju mikroalata su modelirali Euler-Bernoulli-ovim izrazima. U validacionim eksperimentima, grešku obrade su smanjili u prosjeku deset puta.

Son i ostali [59] su predložili model proračuna minimalne debljine strugotine na osnovu koeficijenta trenja između materijala alata i materijala obratka. Model se zasniva na količniku sile prodiranja i sile u pravcu kretanja alata. U suštini, pretpostavili su da se kod ovih materijala može detektovati koeficijent trenja u idealno elastičnom regionu. Formulacija ima primjenu pri modeliranju obrade mekših materijala kod kojih se formira kontinualna strugotina pri rezanju.

U radu [60], Uriarte i ostali su analizirali i analitički modelirali tačnost obrade u zavisnosti od krutosti elemenata obradnog sistema, odnosno lanca alat-držač alata-mašina, pri mikroglodanju legiranog čelika H13 tvrdoće 50 HRc obrađivanog loptastim glodalom prečnika 0.3 mm. Zaključili su da je alat najosjetljiviji dio obradnog sistema, od kojeg potiče do 90% greške tačnosti obrade.

Kang i ostali [61, 62] su razvili mehanistički model sila rezanja, koji u obzir uzima silu trenja između obrađene površine obratka i leđne površine alata, uzrokovane elastičnošću materijala obratka. Za predikciju vrijednosti sile rezanja koristili su Tlusty-McNeil-ov model sila rezanja koji se koristi u konvencionalnim obradama skidanjem strugotine na makronivou. Takođe, koristili su Merchant-ov model ugla smicanja strugotine. Eksperimentalna istraživanja su izvršili obradom aluminijuma pomoću vretenastog mikroglodala prečnika 0.2 mm. U zaključku su naglasili da su vrijednosti sila rezanja relativno bliske za slučaj malih vrijednosti koraka po zubu, koje su bliske vrijednostima poluprečnika zaobljenja rezne ivice.

Na osnovu prethodnih istraživanja obradivosti, Bissacco i ostali [63] su koristili Armarego-ov model baziran na koeficijentima specifičnih sila rezanja u zoni rezanja. Navedeni model su primijenili uzimajući u obzir promjenjivi ugao smicanja strugotine uslijed pojave efekta veličine i radijalnog bacanja mikroglodala. Verifikaciju su izvršili na procesu mikroglodanja aluminijumske legure Al6082-T2 vretenastim glodalom prečnika 0.6 mm.

Model hrapavosti obrađene površine razvili su Wang i ostali [64]. Modelom su razmatrali proces deformacije jednog zrna aluminijuma uslijed zahvata vrha alata. Pomenuti proces su opisali korišćenjem Son-ovog modela minimalne debljine strugotine. Eksperimentalnim istraživanjem su došli do zaključka da je međukristalna zona manje deformabilna od kristalnog zrna, te da se strugotina upravo lomi po međukristalnoj zoni.

U radu [65] Malekian i ostali su dali model sila rezanja u kojem su u obzir uzeli radijalno bacanje alata, efekte gnječenja i elastičnosti materijala, kao i dinamičku prirodu sila rezanja. Efekat elastičnih deformacija, koji je povezan sa minimalnom debljinom strugotine, istražili su posebnim testovima. Dinamičko ponašanje alata modelirali su metodom kontaktnih parova. Ista grupa autora [66] su naprijed pomenuti model mikrorezanja primijenili u svrhu monitoringa stanja alata u toku obrade, koristeći posredne uređaje za mjerenje sila rezanja i akustične emisije. Modeliranje izlaznih parametara procesa obrade izvršili su primjenom neuro-fazi metode. Eksperimente su proveli na aluminijumu, uz korišćenje vretenastog mikroglodala prečnika 0.5 mm.

Biermann i Khanis [67] su istraživali uticaj poluprečnika zaobljenja rezne ivice i tehnoloških parametara glodanja na sile rezanja, koje su kasnije upotrebili u modeliranju tačnosti obrade. Simulaciju ponašanje sila rezanja izvršili su u prethodno razvijenom softveru namijenjenom za analizu obrade sa alatima velikog prečnika, te ih uporedili sa eksperimentalno izmjerenim vrijednostima. Eksperiment su proveli koristeći vretenasto mikroglodalo prečnika 0.4 mm i obrađujući alatni čelik 40CrMnMo7, tvrdoće 50 HRc. Na osnovu rezultata, Biermann i ostali

su u radu [68] dali prijedlog kompenzacije putanje mikroglodala pomoću proračuna novih koordinata tačaka kontrolnog poligona Bézier-ove krive, kojom je opisana putanja.

Altintas i Jin [69] su proširili vlastiti model baziran na analizi plastičnih deformacija u zoni smicanja strugotine, razvijen za proces rezanja na makronivou, za predikciju sila rezanja u mikroglodanju. Eksperimentišući na mesingu, model su proširili uticajem poluprečnika zaobljenja rezne ivice. Dalje, koristeći modele napona u kojima konfiguriše dubina rezanja i poluprečnik zaobljenja rezne ivice, računali su sile rezanja.

Model topografije i hrapavosti obrađene površine, pri mikroglodanju aluminijuma loptastim mikroglodalom, prezentovan je u radu Kurczewske i Vehmeyera [70]. Model se zasniva na analizi ciklične defleksije alata u toku obrade, uzrokovane silama rezanja. Sile rezanja su modelirali kao funkcionalne zavisnosti od koraka po zubu, dubine obrade i širine obrade, bazirano na ranije uspostavljenim Altintas-ovim modelima za rezanja na makronivou.

Proces mikroobrade u vremenskom domenu modelirali su Uhlman i Mahr [71]. U istraživanjima su se fokusirali na mikroglodalo, čije su dinamičke karakteristike modelirali koristeći Euler-Bernoulli-ov metod grede. Sile rezanja su modelirali koristeći diskretizaciju zapremine poprečnog presjeka strugotine po vertikali, dok su vrijednosti sila rezanja računali preko Malekian-ovog modela. Eksperimentalna istraživanja su sproveli koristeći leguru bakra kao materijal obratka, koji su obrađivali vretenastim mikroglodalom prečnika 1 mm.

Rodrigez i Lebarga [72] su razvili model koji u obzir uzima radijalno bacanje definisano defleksijom mikroglodala. U predloženom modelu, dužinu rezne ivicu su derivirali prema visini i projektovanom uglu zavojnice. Sile rezanja su modelirali Altintas-ovim i DeVor-ovim modelom, dok su za proračun minimalne debljine strugotine koristili Boothroyd-ov model razvijen za idealne uslove odvajanja strugotine u rezanju na makronivou. Eksperimentalna istraživanja su proveli na Al7075 i čeliku C45, pri čemu se rezultati vezani za čelik manje poklapaju sa izmjerenim vrijednostima, uslijed relativno složenije strukture čelika u odnosu na aluminijum.

Kombinovani mehanističko-empirijski model razvili su Afazov i ostali [73]. Sile rezanja su modelirali pomoću empirijskih obrazaca koji u obzir uzimaju uticaj veličine presjeka strugotine i vrijednosti poluprečnik zaobljenja rezne ivice. Uticaj radijalnog bacanja vretenastog mikroglodala na sile rezanja opisali su kroz mehanistički dio modela. Dalje su, eksperimentišući sa alatnim čelikom 36CrNiMo4, razmatrali ponašanje sila rezanja u vremenskom domenu, koristeći ranije razvijene modele zasnovane na teoriji plastičnih deformacija u zoni rezanja.

Srinivasa i Shunmugam [74] su predložili model sila rezanja pri obradi čelika AISI 1045, a koji u obzir uzima gnječenje i rezanje materijala obratka. Model se zasniva na Altintasov- om modelu odnosno derivaciji sila rezanja po dužini rezne ivice vretenastog mikroglodala. U daljem razvoju modela preuzeli su Armarego-ove koeficijente specifičnih sila rezanja na makronivou, te Merchant-ov model ugla smicanja strugotine. Ponašanje napona u materijalu opisali su Jonhnson-Cook-ovim konstitutivnim modelom, koji opisuje napone u materijalu u slučaju pojave visokih temperatura i deformacija.

Sličan model predložili su Zhou i ostali [75]. Modelom koji opisuje sile rezanja, obuhvatili su uticaj poluprečnik zaobljenja rezne ivice, očvršćavanja materijala, varijabilnog koeficijenta trenja i radijalnog bacanja alata. Sile rezanja su razdvojili na silu smicanja strugotine i silu trenja po leđnoj površini alata. Sile smicanja strugotine su bazirali na Altintas-ovim derivacionim obrascima sila rezanja na makronivou, u kombinaciji sa Armarego-ovim koeficijentima specifične sile. U model uvode obrasce za procjenu vrijednosti efektivnog grudnog ugla. Napone u zoni smicanja i efekat očvršćavanja su opisali preko Jonhnson-Cook-ovog proširenog modela napona

u zoni plastičnih deformacija, a silu trenja Waldort-DeVor-ovim obrascima. Validaciju modela su izvršili eksperimentalnom obradom 10Ni3MnCuAl, vretenastim mikroglodalom.

Lu i Ren [76] su razvili model za predikciju sila rezanja koji se takođe zasniva na razdvajanju mehanizama gnječenja i rezanja materijala. Istraživanja su izvršili na specijalnim legurama nikla. U modelu su uspostavili regresione zavisnosti radijalnog bacanja mikroglodala u zavisnosti od njegove geometrije. Kao osnovu modela sila rezanja uzeli su Malekian-ove obrasce, u kojima su uključili uticaj radijalnog bacanja, poluprečnika zaobljenja rezne ivice i očvršćavanja materijala. Zaključuju da sile pri odvajanju materijala obratka zavise od količine zahvaćenog materijala, dok sile pri gnječenju zavise od dužine kontakta leđne površine alata i obratka.

Modeliranje sila rezanja, razdvajanjem mehanizama rezanja i gnječenja materijala, izvršili su Zang i Wang [77]. U model su uključili vrijednost bacanja alata, efekt veličine u skladu sa poluprečnikom zaobljenja rezne ivice i promjenu putanje zuba alata u slučaju radijalnog odstupanja mikroglodala. Geometrijskom analizom, su utvrdili uticaj radijalnog odstupanja alata na uglove zahvata strugotine, a time i na efekat veličine odnosno granicu režima rezanja i gnječenja materijala. Pomenuta odstupanja su ugradili u model sila rezanja, baziran na Altintasovom modelu. Eksperimentalna istraživanja i mjerenja sila rezanja, a između ostalog i neophodno mjerenje radijalnog odstupanja centra alata odnosno defleksije, izvršili su obradom Al6061.

Uticaj radijalnog odstupanja alata i vibracija mašine alatke na sile rezanja, modelirali su Chen i ostali [78]. Navedeni uticaji u predloženom modelu su opisani preko promjene trenutne debljine strugotine. Autori su modelirali uticaj prethodne putanje reznog klina, odnosno centra alata, na dimenzije neodrezane strugotine. Koristeći dobijene vrijednosti opisali su putanju alata iterativnim metodom, čime su dobili realnije rezultate. U odnosu na druge razvijene modele, uspjeli su opisati dinamičko ponašanje sila rezanja pri malim vrijednostima koraka po zubu.

Kang i Zeng [79] su razvili model za predviđanje sila rezanja, u kojem trenutnu debljinu strugotine dobijaju na osnovu geometrijskih i tehnoloških parametara. U obrasce za trenutnu debljinu strugotine uveli su i parametar greške koji su procijenili pomoću Fourier-ove analize signala sila rezanja. Uvođenjem novih povratnih parametara procjene greške trenutne debljine strugotine, dobijaju obrasce u kojima konfiguriše korak po zubu, prečnik alata i broj zuba.

Camara i ostali [80] su razvili proceduru za mjerenje minimalne debljine strugotine za različite materijale, prateći signale sila rezanja i akustičnu emisiju. Referentnu minimalnu debljinu strugotine su dobili koristeći izmjerene vrijednosti koeficijenta trenja između materijala alata i materijala obratka, te koristeći Sonov model. Referentne vrijednosti su poredili sa signalima akustične emisije. Utvrdili su da se prilikom prelaska iz faze gnječena u fazu rezanja materijala, uslijed pojave efekta veličine, javlja naglo povećanja vibracija.

Modeliranje izlaznih parametara procesa mikrorezanja korišćenjem metode konačnih elemenata izvršili su Liu i Melkote [81], analizirajući obradivost aluminijumske legure Al5083-H116. U modelu su koristili ranije razvijeni Jonhnson-Cook-ov model za napon tečenja materijala, Zore-ov model interakcije alata i materijala u zoni obrade, te Hamel-ov model restrukturiranja mreže konačnih elemenata u vremenskom domenu. Analizom su pokazali da poluprečnik zaobljenja rezne ivice utiče na proces deformisanja materijala kroz promjenu procesa tečenja materijala, proširenje zone deformisanja, te rasipanje specifične energije uslijed povećanja dužine dodira alata i obratka pri manjim vrijednostima minimalne debljine strugotine.

Dhanorker i ostali [82] su modelirali uticaj tehnoloških parametara i poluprečnika zaobljenja rezne ivice na proces mikroglodanja čelika AISI 4340 i aluminijumske legure AL2024-T6, vretenastim glodalom. Modeliranje su izvršili primjenjujući metodu konačnih elemenata,

koristeći Jonhnson-Cook-ov model napona u materijalu. Pomoću ove metode, autori su izvršili predikciju sila rezanja, ugla smicanja strugotine i vrijednosti dimenzija debljine strugotine.

Lai i ostali [83] su modelirali proces mikroglodanja specijalnog bakra kombinujući metod konačnih elemenata i mehanistički metod. Modeliranje metodom konačnih elemenata su zasnovali na Jonhnson-Cook-ovim modelu, koji su proširili modelom ponašanja materijala obratka u zoni ispred zaobljene rezne ivice tokom obrade. Ponašanje materijala su opisali kroz naprezanje uslijed elastičnih i plastičnih deformacija, koristeći Taylor-ov dislokacijski model tečenja materijala, te uvodeći novu varijablu veličine. Ponašanje sila rezanja su modelirali koristeći Waldort-ov model zasnovan na plastičnim deformacijama u ravni smicanja strugotine.

Predikciju sila rezanja u mikroglodanju teškoobradivog čelika AISI 4340 su izvršili Afazov i ostali [84]. Oni su koristili metodu konačnih elemenata, pri čemu su koristili Yan-ov termičko-elastično-plastični model ponašanja materijala koji se bazira na Jonhnson-Cook-ovom konstruktivnom modelu stanja napona u materijalu. Mreža konačnih elemenata je konstruisana korišćenjem arbitražnog Langrange-Euler-ovog metoda. Dobijene rezultate mjerenja sila rezanja su kombinovali sa ranije razvijenim mehanističkim modelom, radi dobijanja modela njihovog ponašanja u vremenskom domenu. Kasnije su isti model iskoristili za predikciju sila rezanja u zavisnosti od tvrdoće materijala, pri obradi alatnog čelika AISI H13 [85].

Model sila rezanja, baziran na metodi konačnih elemenata, prezentovali su Jin i Altintas [86]. U prezentovanom modelu su koristili Jonhnson-Cook-ov konstruktivni model stanja napona u materijalu, a mrežu konačnih elemenata su formirali korišćenjem arbitražne Langrange- Euler-ove metode. Dobijene rezultate su poredili sa ranije razvijenim vlastitim modelom, koji se zasnivao na stanju plastičnih deformacija u zoni smicanja strugotine, kalibrisanim pomoću eksperimentalnih podataka dobijenim prilikom mikroglodanja mesinga.

Li i Wu [87] su iskoristili metod konačnih elemenata pri modeliranju minimalne debljine strugotine i koeficijenata specifičnih sila rezanja pri obradi mesinga vretenastim mikroglodalima. Prilikom modeliranja koristili su bazni Jonhnson-Cook-ov model ponašanja materijala, i primijenili ga na slučaj ortogonalne obrade. Koristeći dobijene vrijednosti pomenutih koeficijenata, razvili su mehanistički model ponašanja sila rezanja u vremenskom domenu, koji u obzir uzima dimenzije trenutne debljine režućeg sloja i poluprečnik zaobljenja rezne ivice.

Li i ostali [88] su, koristeći metodu konačnih elemenata, analizirali tačnost obrade kroz statičko i dinamičko ponašanje tankozidnih mikrorebara u toku obrade mikroglodanjem. Model za predikciju sila rezanja su preuzeli od Altintasa, pri čemu su koeficijente specifične sile rezanja kalibribrirali pri obradi čelika AISI H13. Vrijednosti sila rezanja, za različite vrijednosti tehnoloških parametara i različite strategije obrade, modelirali su metodom konačnih elemenata.

Koristeći metod konačnih elemenata, koji se bazirao na Jonhnson-Cook-ovom modelu ponašanja materijala, te uticaju poluprečnikaa zaobljenja rezne ivice, Chen i ostali [89] su izvršili predikciju minimalne debljine strugotine pri mikroglodanju čelika AISI 1045. Na osnovu dobijenih rezultata i vršenjem daljih eksperimentalnih mjerenja radijalnog bacanja alata pri različitim kombinacijama tehnoloških parametara, modelirali su hrapavost obrađene površine. Zaključili su da defleksija alata, u slučajevima kada je ona veća od koraka po zubu, intenzivno utiče na hrapavost obrađene površine.

Gan i ostali [90] su izvršili poređenje rezultata dobijenih na osnovu Merchant-ovog modela rezanja koji u obzir uzima uglove alata i ugao smicanja strugotine, sa rezultatima dobijenim na osnovu simulacije dinamike molekula. Eksperimentalna mjerenja su proveli na leguri bakra i grafita. Zapreminu obratka su podijelili na granične i unutrašnje atome koji se ponašaju u skladu sa Newton-ovim zakonima. Koristili su dvije vrste potencijalnih funkcija, i to: dobijenu na osnovu

sopstvenog atomskog modela, radi opisa međusobnog djelovanja atoma bakra, te Morse-ov potencijalni metod, radi opisa međusobnog djelovanja atoma bakra i grafita. Simulacijom su potvrdili da se smanjenjem koraka po zubu, sile rezanja mijenjaju nelinearno a većina specifične energije koristi na trenje i gnječenje materijala uzrokovano negativnim grudnim uglom.

Saedon i ostali [91] su izvršili predikciju postojanosti mikroglodala pri obradi alatnog čelika AISI D2 tvrdoće 62 HRc, koristeći regresionu analizu. U tu svrhu koristili su centralni kompozitni plan eksperimenta, te dobili regresione obrasce za postojanost alata u kojima konfigurišu signifikantni tehnološki parametri: brzina rezanja, dubina obrade i korak po zubu. Nadalje, izvršili su optimizaciju postojanosti alata i dobili oblasti prihvatljivih vrijednosti tehnoloških parametara. Optimizaciju su izvršili kombinujući metodu odzivne površine (engl. *response surface metod* - RSM) i regresione modele drugog reda, gdje su kao funkcije cilja koristili maksimalnu proizvodnost i postojanost alata.

Modeliranje i optimizaciju procesa mikroglodanja titanijumove legure Ti6Al4V korišćenjem Taguchi-jeve metode izvršili su Thepsonthi i Ozel [92]. Kao izlazne parametre procesa, pratili su hrapavost obrađene površine i naslage na ivici obratka. Eksperimentalnim putem su došli do regresionih funkcija, u kojima konfigurišu brzina rezanja, dubina obrade i korak po zubu. Do optimalnih tehnoloških parametara došli su primjenom metode roja čestica. Kao funkcije cilja koristili su minimalnu hrapavost površine i visinu naslaga, koje su u ovom slučaju bile suprotstavljene u pogledu tehnoloških parametara, te maksimalnu proizvodnost.

Defleksiju alata pri mikroglodanju grafita loptastim glodalom, eksperimentalno su izmjerili i modelirali Mijušković i ostali [93]. U regresionim zavisnostima dobijenim na osnovu punog faktornog plana eksperimenta, konfigurišu dubina i širina rezanja i korak po zubu. Analizom varijanse utvrdili su da najveći uticaj na defleksiju ima dužina vrata mikroglodala i dubina obrade.

Yi i ostali [94] su koristili različite tipove centralnog kompozitnog plana eksperimenta u svrhu modeliranja i optimizacije hrapavosti obrađene površine, koja se dobija prilikom obrade aluminijumske legure Al6061-T6. Analizom su pokazali visoku konzistentnost eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih na osnovu modela. Zaključili su da hrapavost obrađene površine raste sa porastom koraka po zubu i smanjenjem brzine rezanja.

Attanasio i ostali [95] su, koristeći Kronenbergov model specifičnih pritisaka pri rezanju, razvili analitički model sila rezanja u mikroglodanju legure Ti6Al4V. U model su ugradili uticaj radijalnog bacanja alata. Na osnovu navedenog modela i eksperimentalnih mjerenja, uz pretpostavku male defleksije alata, izvršili su optimizaciju metodom roja čestica. Kao funkciju cilja koristili su minimalizaciju defleksije mikroalata, u kojoj konfigurišu tehnološki parametri.

Adaptivni sistem kontrole procesa mikroglodanja na osnovu praćenja habanja i hrapavosti obrađene površine pri mikroglodanju alatnog čelika AISI H13, razvili su Coppel i ostali [96]. Prezentovani sistem ima nekoliko modula: modul za akviziciju signala sila rezanja, modul baziran na vještačkim neuronskim mrežama, namijenjen estimaciji hrapavosti obrađene površine na osnovu signala sile rezanja čiji je rast uzrokovan habanjem mikroglodala, modul za optimizaciju čije su funkcije cilja minimalizacija hrapavosti i troškova, te modul za upravljanje mašinom alatkom. Utvrdili su da se troškovi obrade mogu redukovati za 20%.

Posrednu predikciju sila rezanja pri mikroglodanja čelika AISI 1045, na osnovu signala sa akcelerometra i signala sa ampermetra na glavnom vretenu, prezentovali su Hong i ostali [97]. Autori su razvili model sila rezanja baziran na polinomnim neuronskim mrežama, a koji koristi rezultate brze Fourier-ove transformacije (engl. *Fast Fourier transformation* - FFT) pomenutih signala. Utvrdili su poklapanje simuliranih i izmjerenih podataka u iznosu od 91%.

U svrhu modeliranja sila rezanja, Ren i ostali [98] su koristili Takagi-Sugeno-Kang fazi-logičko modeliranje, bazirano na subrtaktivnom grupisanju. Eksperimentalna istraživanja su izvršili korišćenjem obratka od alatnog čelika X155CrVMo12, koji su obrađivali loptastim mikroglodalom. Subratktivnim grupisanjem su razvili logička pravila, dok su prilikom formiranja funkcija kojima se opisuju sile rezanja, koristili metodu najmanjih kvadrata. Kao ograničenje ovog modela autori navode nemogućnost modeliranja sile u vremenskom domenu.

Kuram i Ozcelik [99] su modelirali hrapavost obrađene površine, sile rezanja i habanje alata pri obradi nerđajućeg čelika AISI 304L loptastim mikroglodalom. Eksperiment su izvršili koristeći Taguchi-jev metod. Dobijene signale odnosno izmjerene vrijednosti navedenih funkcija obradivosti analizirali su preko pokazatelja odnosa signal-buka (engl. *signal to noise* - S/N), radi određivanja optimalnih kombinacija tehnoloških parametara: dubine obrade, koraka po zubu i brzine rezanja. Korišćenjem analize varijanse analizirali su uticaj tehnoloških parametara na posmatrane funkcije obradivosti, te došli do zaključka da je korak po zubu obrade najuticajniji parametar na proces mikrorezanja. Nadalje, funkcije obradivosti su modelirali korišćenjem fazi-logike, te na osnovu analize varijanse utvrdili da je opisani model adekvatan.

Modeliranje i optimizaciju stanja i hrapavosti obrađene površine, pomoću iterativnog metoda izvršili su Vehmeyer i ostali [100]. Analitički model su zasnovali na defleksiji alata u vremenskom domenu. Model su kalibrirali pomoću unakrsne korelacione funkcije (engl. *cross correlation function*) na osnovu eksperimentalnih podataka dobijenih mikroglodanjem alatnog čelika X153CrMoV12, tvrdoće 60 HRc, loptastim mikroglodalom prečnika 0.5 mm. Kao parametar stanja i hrapavosti površine analizirali su procenat nošenja profila odnosno Abott-Fireston-ovu krivu. Optimizaciju su takođe izvršili koristeći iterativni metod, te dobili optimalne vrijednosti brzine rezanja, koraka po zubu i dubine rezanja.

Na osnovu analize dosadašnjih istraživanja može se zaključiti da se mali broj autora fokusirao na analizu funkcija obradivosti profilnog mikroglodanja teškoobradivih čelika loptastim mikroglodalima sa dugačkim vratom, koji uzrokuje malu krutost alata. Analiza je pokazala da se mali broj istraživanja bazira na mikroglodanju visokolegiranih alatnih čelika za rad u hladnom stanju, koji imaju visoku tvrdoću i zateznu čvrstoću. Tu činjenicu potvrđuje i nedostatak odgovarajućih baza podataka koje bi se mogle koristiti u uslovima realne proizvodnje. Jasno je da složene međusobne interakcije parametara i prisustvo efekta veličine dodatno usložnjava problem proučavanja. Evidentno je da je veliki broj mehanističkih modela ponašanja vrijednosti izlaznih parametara preuzet iz oblasti makroobrade, koju karakterišu bitno drugačije ponašanje materijala i drugačiji mehanizmi odvijanja procesa rezanja. Kod modela koji su bazirani na metodi konačnih elemenata, istraživači su uglavnom analizirali ortogonalni odnosno dvodimenzionalni proces rezanja. Jedan od glavnih nedostatka ove tehnike modeliranja je nedostatak tačnih modela ponašanja materijala na mikronivou. Nedostatak metoda zasnovanih na vještačkoj inteligenciji su poteškoće u opisu ponašanja funkcija obradivosti u vremenskom domenu. U svakom slučaju, relativno veliki broj modela procesa obrade fokusirao se na analizu sila rezanja.

Sumarno, nedostaci u istraživanju mikroglodanja su: teško objašnjivi fenomeni interakcije alata i obratka, složene interakcije između ulaznih i izlaznih parametara, složeni odzivi funkcija obradivosti pri odvijanju procesa rezanja, parcijalni pristup proučavanju i nedovoljno istražena oblast primjene mikroglodanja za obradu grupe teškoobradivih materijala. Evidentni su razlozi da se istraživanje nastavi u smjeru formiranja modela funkcija obradivosti, kojima će se pokušati opisati interakcija između ulaznih i izlazih parametara, a sve u cilju formiranja baza podataka obradnog procesa.

1.5. PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja je ispitivanje mogućnosti primjene mikroglodanja u profilnoj obradi složenih mikrodijelova, izrađenih od teškoobradivih materijala koji se u praksi najčešće obrađuju elektroerozionom obradom (Slika 1.7). Fokus istraživanja će biti na analizi i modeliranju profilnog mikroglodanja sa loptastim glodalima. Ciljna grupa obradaka su mikrodijelovi složene geometrije, sa kosim površinama, kod kojih postoje nepristupačna mjesta obrade. To su dijelovi sa velikim odnosom visine i širine (većim od 5), kao što su duboke tehnološke forme, koje zahtijevaju korišćenje vitkih mikroglodala sa dugačkim vratom. Izvršiće se istraživanje i modeliranje funkcija obradivosti visokolegiranog alatnog čelika za rad u hladnom stanju X155CrMoV12, od kojeg se proizvode alati za deformisanje, sa visokom tačnošću i kvalitetom obrade.

Slika 1.7. Motivacija za istraživanjem

Zbog nepoznavanja granica u mogućnostima primjene mikroglodanja u realnim proizvodnim uslovima, potrebno je implementirati višeparametarsku analizu procesa obrade mikroglodanjem. U skladu sa opisanim problemom i predmetom istraživanja, kao cilj istraživanja se postavlja eksperimentalno istraživanje, analiza i modeliranje uticaja tehnoloških i geometrijskih parametara obrade i svojstava materijala obratka na izlazne veličine: defleksiju alata, sile rezanja, habanje alata i hrapavost obrađene površine. Zbog velikog broja ulaznih geometrijskih i tehnoloških parametara, njihovog složenog uticaja na funkcije obradivosti, te složenog međusobnog uticaja, neophodno je razviti integrisane modele. Modeli će se zasnivati na eksperimentalno izmjerenim podacima i koristiti za predviđanje vrijednosti izlaznih parametara procesa mikroglodanja. Razvijeni modeli će se zasnivati na fizičkim svojstvima materijala obratka i mehanizmu odvijanja procesa obrade. Analiziraće se fenomen efekta veličine, kroz modeliranje zone kritičnog odnosa parametara, odnosno granice između gnječenja materijala i stvaranja strugotine. Da bi se efikasno opisao efekat veličine, utvrdiće se proces habanja alata koji će se opisati povećanjem poluprečnika zaobljenja rezne ivice alata. Pošto će se u eksperimentalnim istraživanjima koristiti vitki alati koji imaju veliku popustljivost, potrebno je analizirati intenzitet, uzroke i prirodu defleksije alata te međusobni uticaj defleksije i mehanike procesa. Nadalje, na osnovu ispitivanih parametara koji proizilaze iz definicije obradivosti i razvijenih modela ponašanja izlaznih parametara procesa, potrebno je izvršiti razvoj podloga za tehno-ekonomsku

optimizaciju, što za krajni cilj ima realizaciju efikasnijeg i ekonomičnijeg procesa mikroglodanja. Kao funkcije cilja optimizacije, mogu se koristiti minimalizacija greške obrade i hrapavosti obrađene površine, te maksimalna produktivnosti.

Na osnovu definisanog predmeta istraživanja i obrazloženog cilja istraživanja, u okviru ove disertacije pokušaće se dokazati sljedeće hipoteze:

- Moguće je definisati funkcije obradivosti teškoobradivih materijala pri mikro-glodanju razvojem prediktivnih modela i na taj način uspostaviti zavisnost izlaznih parametara procesa mikroglodanja od ulaznih geometrijskih i tehnoloških parametara procesa, te karakteristika materijala i oblika radnog komada.
- Na osnovu prediktivnih modela dobijenih eksperimentalnim istraživanjem, moguće je razviti podloge za tehno-ekonomsku optimizaciju, u svrhu ostvarivanja veće proizvodnosti procesa i nižih troškova obrade, a prvenstveno nižih troškova alata kao kritičnog elementa procesa mikroglodanja.
- Mikroglodanjem je moguće ostvariti zahtijevani kvalitet obrađene površine i tačnost dimenzija radnog komada, a koji se svakako može ostvariti tradicionalno korišćenim metodama mikroobrade teškoobradivih materijala, kao što su EDM i LBM obrada.

Kao rezultat istraživanja očekuje se produktivnija, ekonomičnija i efikasnija obrada mikroglodanjem, te postizanje odgovarajuće tačnosti dimenzija i kvaliteta obrađene površine, što bi bio značajan naučni doprinos primjenjiv u praksi. Dobijeni rezultati istraživanja bi omogućili širu primjenu mikroglodanja u praksi, te eliminisanje naprijed pomenutih nepovoljnih efekata koji prate elektroerozionu i lasersku obradu.

Osnovne naučne-istraživačke metode i tehnike koje će se koristiti u istraživanju, pored dedukcije i indukcije, su metoda matematičkog modeliranja i metoda eksperimenta. Statistička obrada i analiza dobijenih rezultata eksperimentalnih mjerenja biće izvršene korišćenjem ANOVA analize, pri čemu će se primijeniti standardni statistički pokazatelji signifikantnosti varijabli i adekvatnosti predloženih modela funkcija obradivosti, i to: p-vrijednost, f-vrijednost, vrijednost R^2 koeficijenta regresije predloženog modela, S/N odnos, koeficijent varijacije, srednja vrijednost ($\bar{x}$), standardna devijacija (SD), te srednja vrijednost apsolutne greške modela. Metodologija rada se može sistematizovati u nekoliko faza odnosno međusobno povezanih cjelina, i to:

- prikupljanje, analiza i sistematizacija dosadašnjih istraživanja,
- definisanje i sistematizacija teoretskih zakonitosti procesa,
- selekcija pokazatelja stanja procesa i odgovarajućih ulaznih varijabli,
- matematičko modeliranje,
- eksperimentalna mjerenja,
- statistička obrada rezultata i
- simulacija i poređenje rezultata.

1.6. OKVIRNI SADRŽAJ RADA

U drugom poglavlju su, na osnovu definicije problema istraživanja i detaljnog pregleda dosadašnjih istraživanja, izdvojene su osnovne teoretske postavke o procesu mikrorezanja. Glavni fokus stavljen je na karakterizaciju i opis postupka mikroglodanja. Date su osnovne podjele i principi izvođenja operacija mikroglodanja, te ukratko opisane mašine alatke, alati i pribori koji se koriste u mikroglodanju. Definisani su osnovni ulazni tehnološki i geometrijski parametri, te karakteristike izlaznih parametara procesa, uz opis fenomena svojstvenih mikroglodanju. Nadalje, izvršena je podjela tehnika, i izvršeno njihovo kratko poređenje. Za svaku tehniku modeliranja dati su osnovni principi i mehanizmi uspostavljanja modela na osnovu nabrojanih tehnika.

U trećem poglavlju, shodno postavljenom cilju i predmetu istraživanja, prikazan je kombinovani analitičko-empirijski model profilnog mikroglodanja teškoobradivih materijala vitkim mikroglodalima. Date su funkcionalne zavisnosti efektivnih parametara obrade, te funkcije obradivosti najvažnijih kriterijuma obradivosti. Upravo su efektivni parametri varijable pomenutih funkcija.

U četvrtom poglavlju, na osnovu cilja istraživanja i postavljenog modela, ustanovljena je procedura, te prezentovana realizacija eksperimentalnih istraživanja. Opisana je postavka i plan eksperimenta, korišćena proizvodna oprema, mašina alatka i svojstva korišćenih mikroglodala. Nadalje, opisana je korišćena mjerna oprema, kao i prateće procedure i načini mjerena karakterističnih izlaznih parametara procesa mikroglodanja.

U petom poglavlju dati su rezultati eksperimentalnih mjerenja. Na osnovu eksperimentalnih mjerenja, izvršena je analiza pojedinačnih i kombinovanih uticaja ulaznih parametara na vrijednosti izlaza iz funkcija obradivosti. U svrhu utvrđivanja valjanosti predloženih i uspostavljenih modela, statistički su analizirane njihove greške, poređenjem izlaza iz navedenih modela i realnih vrijednosti dobijenih eksperimentalnim mjerenjima. Analiziran je model minimalne debljine strugotine, kao tehnološkog parametra, zatim model habanja rezne ivice, hrapavosti obrađene površine, sila rezanja i defleksije mikroglodala.

U šestom poglavlju dati su najvažniji zaključci o naučnom doprinosu prezentovanog istraživanja. U skladu sa tim, nabrojani su napreci u odnosu na analizirana dosadašnja istraživanja. Dati su i eksplicitni zaključci o dokazima koji dovode do potvrđivanja postavljenih hipoteza. Na kraju, predloženi su pravci budućih istraživanja.

Poglavlje 2. TEORETSKE OSNOVE PROCESA MIKROGLODANJA

U ovom poglavlju su razmatrani zahtjevi za elementima obradnog sistema i performansama procesa obrade koji omogućavaju izvođenje procesa mikroglodanja. Razmatrana je mehanika procesa mikrorezanja, te su definisani osnovni ulazni parametri. Navedene su karakteristike procesa mikrorezanja, osnovna svojstva mašina alatki i alata koje se koriste u mikrorezanju. Date su osnove procesa modeliranja i korišćenih tehnika modeliranja, te izvršena njihova komparacija.

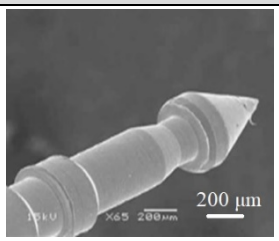
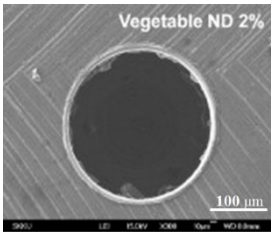
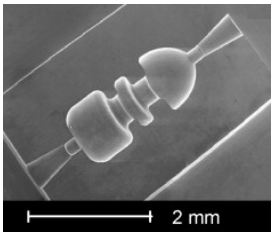
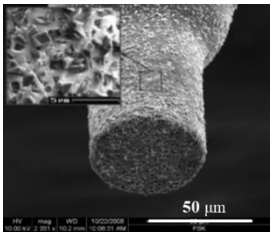
2.1. TEHNOLOGIJE MIKROREZANJA

Mikrorezanje predstavlja mehanički proces obrade kod kojeg rezna ivica alata mehanički, direktno uklanja materijal obratka [18, 23]. Obzirom na kinematiku, procesi mikrorezanja su isti kao konvencionalni procesi obrade rezanjem na makronivou. Međutim, proces mikrorezanja se razlikuje od procesa rezanja na makronivou u mnogim aspektima. Linearno skaliranje geometrijskih veličina, tehnoloških parametara i fizičkih veličina sa makronivoa na mikronivo nije jednostavno, a često je i nemoguće, jer se dobijaju neizvodivi uslovi obrade i odnosi geometrijskih i tehnoloških parametara. Postoje dva pristupa u razvoju procesa mikrorezanja, i to: kroz minijaturizaciju procesa konvencionalne obrade rezanjem na makronivou, bazirana na minijaturizaciji mašina, reznih alata i pribora, te pristup kroz korišćenje ultraprecizne obrade na makronivou, baziran na principu rezanja dodirom u jednoj tački alatima sa dijamantskim vrhom (engl. *single point diamond tip* - SPDT). Prvi pristup u razvoju procesa mikrorezanja je mnogo zastupljeniji, jer se obrada korišćenjem SPDT odnosi uglavnom na proces obrade struganjem. Mnogi fenomeni koji prate ultrapreciznu obradu, prisutni su i u procesima mikrorezanja [13, 101]. Razlika procesa mikrorezanja i procesa ultraprecizne obrade se ogleda u različitim dimenzijama alata i obratka, te području primjene. Njihove sličnosti se ogledaju u mehanizmu formiranja obrađene površine i mehanizmu formiranja strugotine, koji su uslovljeni minimalnom debljinom strugotine materijala obratka i korišćenjem relativno malih vrijednosti tehnoloških parametara. Može se reći da je proces mikrorezanja kinematski sličan konvencionalnoj obradi rezanjem na makronivou, te tehnološki sličan ultrapreciznoj obradi.

U procese mikrorezanja spadaju: mikrostruganje, mikrobušenje, mikroglodanje i mikrobrušenje. Navedeni procesi obrade mikrorezanjem, osim mikrobrušenja, dijele isti princip obrade i mehaniku odvajanja materijala obratka. Postupci mikrorezanja se razlikuju u kinematici relativnog kretanja alata i obratka, geometriji obratka, efikasnosti procesa i mogućnošću postizanja odgovarajuće tačnosti i kvaliteta obrade [102]. Mikrostruganje, mikrobušenje i mikroglodanje se koriste radi izrade manje ili više kompleksnih trodimenzionalnih (3D) struktura na mikrodijelovima, koje obično imaju velike odnose visine i širine (pinovi, igle, mikroelektrode za EDM, mikrozupčanici, kalupi mikroalata, mikrokanali, mikrootvori i sl.). Mikrobrušenje se koristi

u svrhu postizanja visoke tačnosti dimenzija i kvaliteta obrade, odnosno izuzetno uskih tolerancija dimenzija i niske hrapavosti površine na mikrodijelovima (staklena mikrosočiva, mikromlaznice, mikrodijelovi za mjerne instrumente i sl.). U tabeli 2.1 su date osnovne karakteristike i poređenja procesa mikrorezanja u pogledu oblika i dimenzija obratka, te kvaliteta obrade.

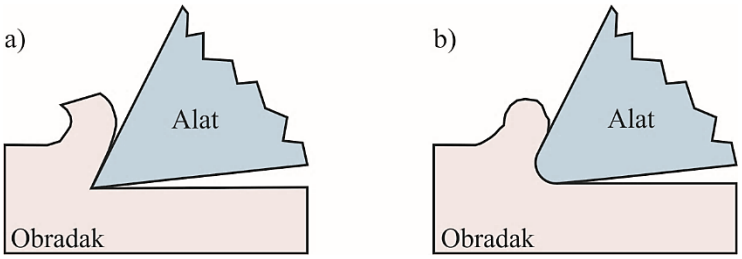
Tabela 2.1. Karakteristike procesa mikrorezanja

Proces mikrorezanja		**Oblik obratka**	**Veličina obratka**	**Hrapavost površine**
Mikrostruganje [103, 104]		Rotacioni konveksni dijelovi sa složenom konturom i velikim odnosom dužine i prečnika.	Prečnik od 100 µm pa naviše, strukture od 5 µm	R_a = 0.15 µm
Mikrobušenje [105, 106]		Cilindrični otvori malog prečnika i velike dubine, obično u nizu sa velikim brojem otvora.	Otvori prečnika od 50 µm pa naviše	R_a = 0.10 µm
Mikroglodanje [107]		Konkavni i konveksni dijelovi složenog trodimenzionalnog oblika.	Kanali od 50 µm pa naviše	R_a = 0.10 µm
Mikrobrušenje [108]		Složeni konkavni dijelovi od vrlo tvrdih materijala, sa vrlo preciznim i glatkim površinama.	Kanali širine od 20 µm pa naviše	R_a = 0.01 µm

Zahtjevi koji se stavljaju pred procese mikrorezanja, pored tačnosti i kvaliteta obrade, odnose se na fleksibilnost, efikasnost, ekonomičnost i produktivnost procesa. Obradni sistemi bazirani na mikrorezanju imaju veći stepen fleksibilnosti u odnosu na ostale mikroinženjerske tehnologije, poput mikrodeformisanja i mikrolivenja, jer se mogu brzo prilagoditi promjenama proizvodnog programa. Kinematika procesa mikrorezanja omogućava efikasnu izradu geometrijski složenih mikrodijelova, što je jedna od njihovih glavnih prednosti. Sa druge strane, imaju određena ograničenja u pogledu mogućnosti obrade pojedinih vrsta materijala. Ograničenja postoje i u dimenzijama geometrijskih struktura na mikrodijelovima, uslovljeno dimenzijama samog reznog alata. Za razliku od nekonvencionalnih procesa mikroobrade, koji su efikasniji u pogledu izrade struktura sa relativno manjim dimenzijama, procesi mikrorezanja su mnogo produktivniji i ekonomičniji. Razlog tome je direktno mehaničko odvajanje relativno veće količine materijala obratka u jedinici vremena, koje troši manje energije i ne zahtijeva komplikovanu i skupu proizvodnu opremu.

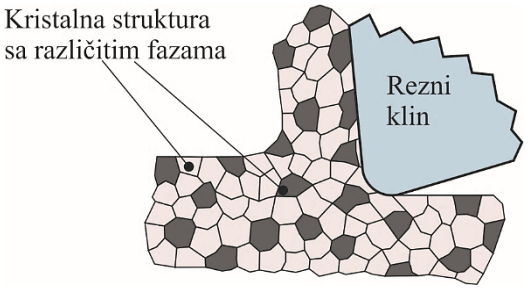
Karakteristični problemi u mikrorezanju, vezani za razmjeru tehnoloških veličina, geometrije alata i materijala obratka, a koji se održavaju na tačnost i kvalitet obrade, mogu se karakterizovati sljedećim usko povezanim cjelinama:

- ***Razmjera između karakterističnih veličina procesa*** dovodi do usložnjavanja odvijanja i praćenja procesa mikrorezanja. Veličine poput elastične deformacije obratka i minimalne debljine strugotine postaju signifikantne, jer velikim procentom ulaze u ukupnu vrijednost ulaznih, tehnoloških parametra procesa, a u prvom redu dubine obrade i koraka po zubu [109, 110]. Pored nabrojanih, signifikantan je uticaj razmjere ostalih geometrijskih veličina procesa mikrorezanja, mehaničko-fizičkih svojstava materijala (npr. da li materijal obratka homogen ili anizotropan), kinematskih karakteristika mašine alatke i sl. [111].
- ***Rezni alat*** u mikrorezanju ima malu krutost i relativno malu postojanost, što otežava postizanje zahtijevane tačnosti i kvaliteta obrade. Mogućnost izrade složene geometrije reznog dijela alata je limitirana svojstvima materijala alata i tehnologijama njegove proizvodnje, čime se postavljaju granice u obradi malih geometrijskih formi. Rezna ivica mikroalata se ne može smatrati idealno oštrom zbog čega, pri relativno malim dubinama obrade i koracima, dolazi do složenog mehanizma gnječenja materijala obratka [63, 112], (Slika 2.1).



Slika 2.1. Djelovanje reznog klina alata a) na makronivou i b) na mikronivou

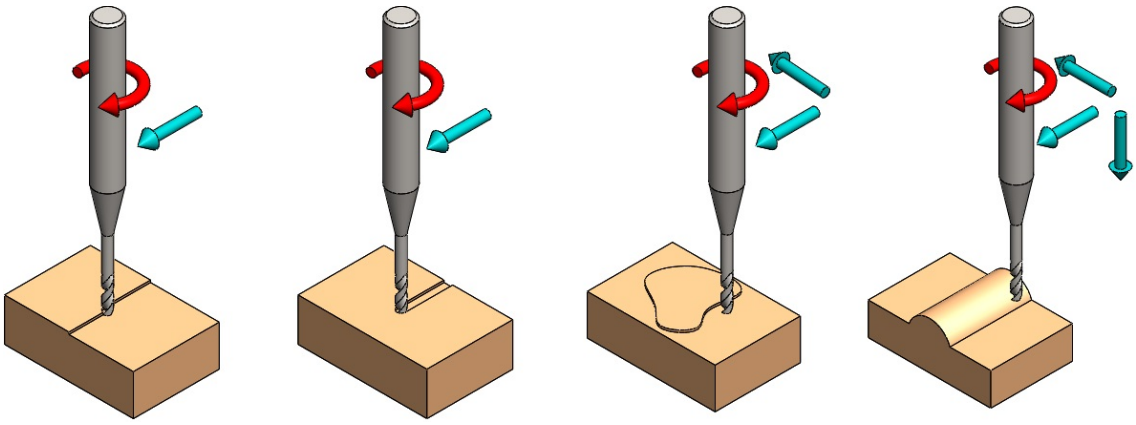
- ***Materijali obratka*** u mikrorezanju su najčešće nehomogeni plastični materijali sa polikristalnom građom. Krupnoća njihovog kristalnog zrna se kreće od 0.1 μm do 100 μm, što je područje vrijednosti tehnoloških parametara (Slika 2.2). Proces očvršćavanja materijala uslijed visokog stepena deformacije i djelovanja generisane toplote, te elastične deformacije obratka nakon djelovanja rezne ivice alata, utiču na proces odvajanja materijala [113]. Proces odvajanja materijala obratka je uslovljen sastavom i strukturom materijala obratka (krupnoća kristalnog zrna), orijentacijom kristala, međukristalnim interakcijama, što dalje utiče na sile rezanja, hrapavost površine, itd. [114].
- ***Mašina alatka*** svojim dinamičkim svojstvima utiče na tačnost i kvalitet obrade. Od mašina alatki u mikrorezanju se, u prvom redu, zahtijeva visoka krutost, tačnost i preciznost pozicioniranja, te mogućnost izvođenja malih pomjeranja.



Slika 2.2. Odnos geometrije reznog klina, kristalnih zrna i zahvaćenog sloja materijala

2.2. MIKROGLODANJE

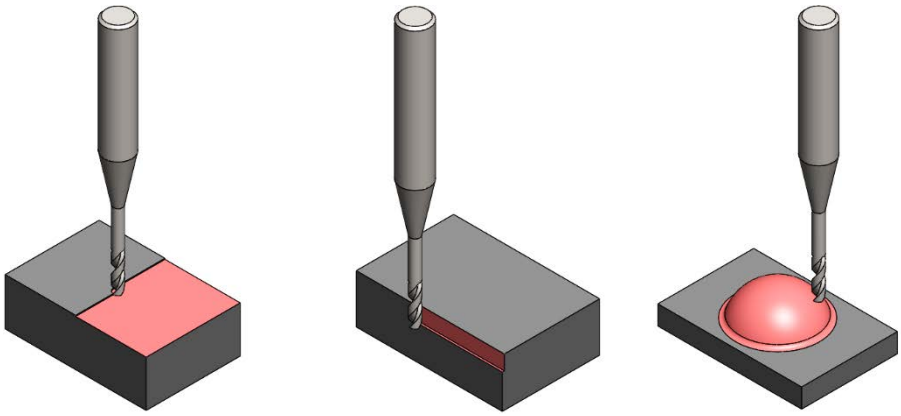
Mikroglodanje je mehanički proces obrade složenih mikrodijelova skidanjem strugotine. Rezni klinovi zuba mikroglodala direktno uklanjaju materijal obratka, što je posljedica obrtnog kretanja mikroglodala (glavnog kretanja), te međusobno relativnih kretanja alata i obratka (pomoćnog kretanja). Pomoćno kretanje može biti pravolinijsko ili obrtno, a izvodi ga mikroglodalo ili obradak u zavisnosti od konstrukcije mašine alatke. Mikroglodanjem se obrađuju dominantno prizmatični mikrodijelovi, te se koristi za obradu ravnih strana, kanala, utora, džepova, stepenika i geometrijski složenih površina (Slika 2.3). Da bi se proces okarakterisao kao mikroglodanje, mikroglodalo mora imati prečnik manji od 1 mm, ili dvije dimenzije obratka moraju biti manje od 1 mm, mjereći u dva međusobno upravna pravca.



Slika 2.3. Karakteristične tehnološke strukture koje se izrađuju mikroglodanjem

Prema načinu zahvatanja materijala obratka mikroglodalom (Slika 2.4), mikroglodanje se dijeli na:

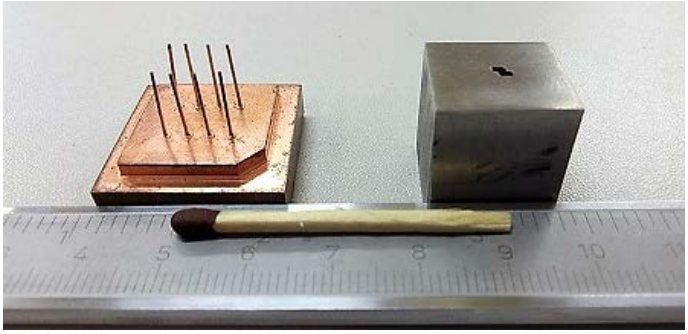
- čeono mikroglodanje (engl. *Face micromilling*), kod kojeg se skidanje materijala obratka izvršava dominantno čeonim dijelom mikroglodala,
- obodno mikroglodanje (engl. *Side micromilling*), kod kojeg se skidanje materijala obratka izvršava i čeonim i obodnim dijelom mikroglodala,
- profilno mikroglodanje (engl. *Profile micromilling*), kod kojeg se skidanje materijala obratka izvršava odgovarajućim dijelom profila mikroglodala.



Slika 2.4. Čeono, obodno i profilno mikroglodanje

Prema vrsti materijala obratka, mikroglodanje se dijeli na (Slika 2.5):

- tvrdo mikroglodanje (engl. *Hard micromilling*), koje se odnosi na obradu materijala velike tvrdoće (čelik, kaljeni čelik, staklo, itd.), i
- meko mikroglodanje (engl. *Soft micromilling*), koje se odnosi na obradu materijala male tvrdoće (grafit, bakar, aluminijum).



Slika 2.5. Obradak u mekom mikroglodanju (lijevo) i tvrdom mikroglodanju (desno)

Tvrdo mikroglodanje se najčešće susreće u pojedinačnoj obradi kaljenih čelika namijenjenih izradi alata za livenje i deformisanje ili maloserijske izrade funkcionalnih visoko opterećenih mašinskih dijelova. Meko mikroglodanje se susreće u pojedinačnoj izradi bakarnih ili grafitnih elektroda za EDM ili maloserijskoj izradi funkcionalnih mašinskih dijelova, koji trpe relativno niska mehanička opterećenja. Analizirajući proces tvrdog i mekog mikroglodanja, mogu se uočiti njihovi osnovne prednosti i nedostaci. Pozitivne karakteristike tvrdog mikroglodanja su:

- mogućnost postizanja relativno visokog kvaliteta obrade i
- mogućnost postizanja relativno visoke tačnosti obrade, zbog odgovarajućeg odnosa tvrdoće i plastičnosti materijala obratka, te niskih vrijednosti elastičnih deformacija materijala,

dok su glavni nedostaci tvrdog mikroglodanja:

- intenzivno habanje alata zbog učešća metala koji su skloni stvaranju karbida u kristalnoj strukturi materijala obratka (naročito hroma, nikla i mangana),
- pojava naslaga na ivicama obratka, zbog plastičnosti i visoke vrijednosti zatezne čvrstoće materijala obratka, i
- nestabilan proces obrade uslijed intenzivnih promjena geometrije reznog klina i složene kristalne strukture materijala obratka.

Pozitivne karakteristike mekog mikroglodanja su:

- stabilan proces obrade i
- mogućnost postizanja velikog odnosa između visine i dimenzija baze obratka,

dok su glavni nedostaci:

- nepredvidivo lomljenje i pojava prašine prilikom obrade krtih materijala,
- naslage na reznoj ivici mikroglodala, i
- krtost odnosno visoka plastičnost materijala obratka.

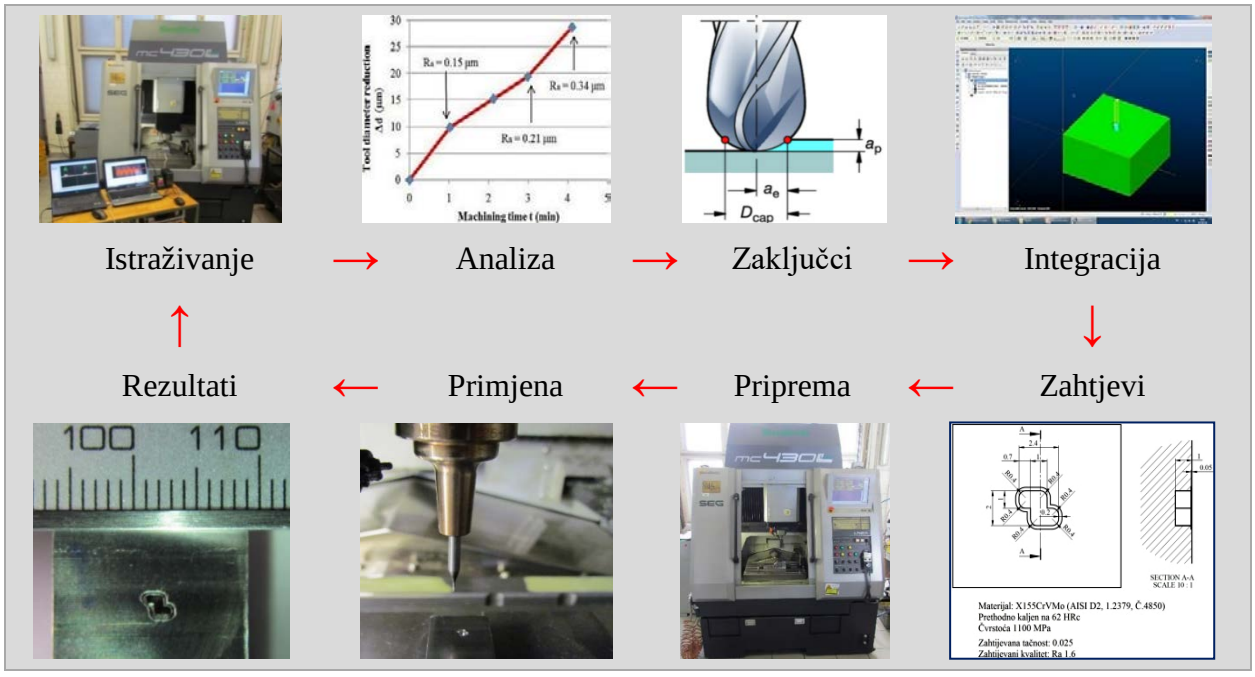
Danas se mikroglodanje, kao konvencionalni proces obrade, koristi kao alternativa za elektroerozionu (engl. *micro electrodischarge machining* - μEDM) i lasersku mikroobradu (engl. *micro laser beam machining* - μLBM), ali i žičanu elektroerozionu (engl. *micro wire electrodischarge machining* - μWEDM) te elektrohemijsku mikroobradu (engl. *micro electrochemical machining* - μECM). Kako se mikroglodanjem direktno obrađuje materijal obratka, time se izbjegavaju pojedini proizvodni procesi i smanjuju troškovi proizvodnje.

Poređenje tehnoloških svojstava mikroglodanja u odnosu na EDM i LBM su dati u tabeli 2.2. Poredeći proces mikroglodanja sa ostalim mikroinženjerskim tehnologijama, jasno je da se pred ovu tehnologiju postavljaju zahtjevi kao što su: izrada kompleksnih 3D struktura, izrada geometrijskih formi čije su dimenzije od 50 µm pa naviše, te izrada geometrijskih formi čiji je odnos visine i mjere jedne gabaritne mjere baze veća od 5. Pored ovih, zahtijeva se: tačnost obrade odnosno odstupanje dimenzija od 2 do 5 µm za vertikalne dimenzije, te od 2 do 10 µm za horizontalne dimenzije, srednja visina neravnina oko 0.1 µm, visina neravnina u 10 tačaka profila 0.25 µm, proizvodnost od 3 mm^3/min pa naviše, mogućnost obrade različitih vrsta materijala, mogućnost izvođenja maloserijske proizvodnje funkcionalnih mikrodijelova, itd.

Tabela 2.2. Poređenje mikroglodanja sa nekonvencionalnim metodama obrade [115]

Osobina	Mikroglodanje	µWEDM	µEDM	µLBM	µECM
Maksimalna mjera obratka (*mm*)	100 x 100	200 x 200	200 x 150	200 x 150	40 x 30
Minimalna mjera alata (*mm*)	0.1	0.02	0.05	-	-
Minimalna veličina strukture (*µm*)	50 - 100	20 - 50	10 - 50	5	50
Tačnost obrade (*µm*)	3 - 10	2	3	1	8
Odnos mjera visine i baze	2 - 5	10 - 50	3 - 10	2 - 50	-
Srednja visina neravnina R_a (*µm*)	0.2	0.1	0.1	1	0.1
Proizvodnost *MMR* (mm^3/min)	20	0.1	0.01	0.004	-

Za uspješno izvođenje procesa mikroglodanja, potrebno je obezbijediti čitav niz posebnih proizvodnih uslova i opreme, kao što su: mašine alatke, alati, pribori i sistemi podmazivanja. Uspješnost izvođenja zavisi i od pravilnog odabira ulaznih parametara procesa, čije su optimalne vrijednosti najčešće dobijene eksperimentalnim istraživanjem (Slika 2.6). U svrhu obezbjeđenja veće postojanosti alata, najčešće se koristi MQL tehnika podmazivanja, koja kombinuje različita sredstva za podmazivanje i hlađenje. Mikroglodanje se uključuje u hibridne postupke obrade, tako da je razvijeno laserski potpomognuto mikroglodanje ili elektroeroziono mikroglodanje.



Slika 2.6. Proces istraživanja, analize i korišćenja mikroglodanja

2.2.1. Mašine alatke, alati i pribori u obradi mikroglodanjem

Za razliku od konvencionalne obrade, specifičnost procesa mikroglodanja uslovljava upotrebu CNC mašina alatki sa posebnim performansama. Mikroglodanje je nemoguće zamisliti bez savremenih obradnih centara za glodanje, visoke tačnosti i preciznosti, sa visokim stepenom automatizacije pomoćnih procesa. Danas se koriste prototipske mikroglodalice razvijene u istraživačkim laboratorijama, ali i komercijalne mikroglodalice. U praksi, za mikroglodanje se mogu koristiti komercijalne mikroglodalice, visokobrzinski obradni centri i ultraprecizne glodalice. Mikroglodalice moraju da posjeduju sljedeće performanse [116, 117]:

- ultraprecizne linearne pogonske sisteme za pomoćna kretanja,
- minimalno trenje na kliznim stazama za pomoćna kretanja,
- potpuno riješen sistem hlađenja i podmazivanja pokretnih dijelova,
- riješen sistem kompenzacije greške uslijed termičkih naprezanja,
- visokobrzinska glavna vretena (broj obrtaja > 20000 o/min),
- postolje i traverze koje obezbjeđuju ekstremno visoku krutost strukture,
- upravljačku jedinicu koja ima sposobnost obrade velikog broja podataka u jedinici vremena,
- ultraprecizni mjerni sistem visoke rezolucije,
- visokoprecizne potpuno automatizovane pomoćne funkcije (umjeravanje alata, sl.).

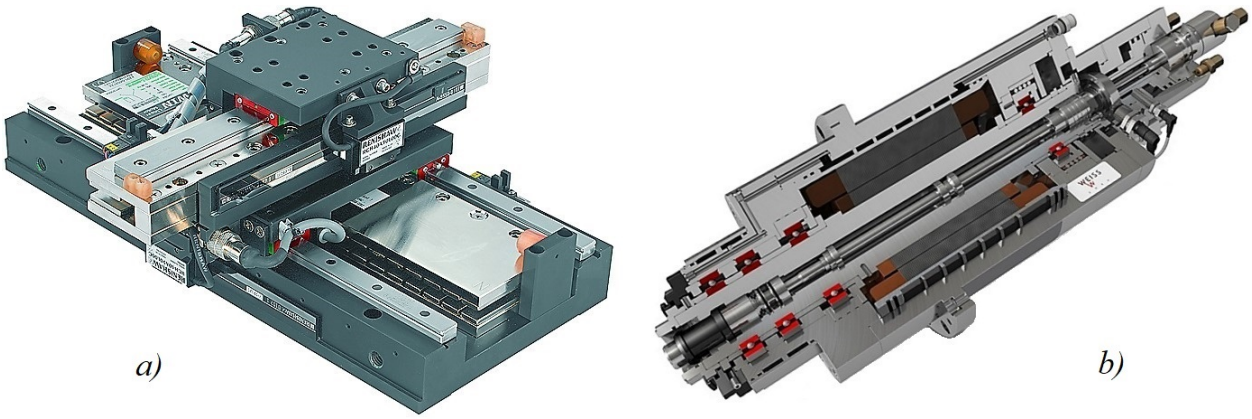
Noseća struktura mikroglodalica mora obezbijediti ekstremno visoku statičku i dinamičku krutost, te posjedovati veliku dinamičku krutost [117, 118]. U svrhu povećanja krutosti konstrukcije, primjenjuju se portalne ili čak piramidalne konstrukcije [118]. Noseća struktura kod ovog tipa mašina alatki se obično izrađuje od polimer betona ili granita (Slika 2.7). S druge strane, robusnost ovakvih konstrukcija može da utiče na povećanje inercijalnih sila pri radu, te problema sa izborom efikasnih pogonskih sistema.

Slika 2.7. Noseća struktura izrađena od specijalnih materijala [119]

Sistemi za vođenje na mikroglodalicama zahtijevaju posebna konstruktivna rješenja koja obezbjeđuju maksimalnu krutost i prigušenje vibracija, minimalno trenje i smanjenje pojave „*stik-slip*“ efekta [120]. U tu svrhu koriste se sistemi sa kotrljajnim, hidrostatičkim ili aerostatičkim vođicama, sa specijalnim sistemom prednaprezanja kojim se povećava krutost konstrukcije. Neki tipovi ovih mašina alatki posjeduju sisteme za vođenje koji su zasnovani na magnetnoj levitaciji, čime se potpuno izbjegava trenje [121]. Najveći nedostaci tog tipa sistema za vođenje su cijena te komplikovan sistem upravljanja.

Pogonsko-prenosni sistemi kod mikroglodalica moraju obezbijediti dovoljnu tačnost i preciznost pozicioniranja, kompenzaciju grešaka, te mogućnost naglih promjena smjera kretanja i ubrzanja. Izvode se sa specijalnim konstrukcijama zavojnih vretena, i to kao kuglična zavojna vretena sa specijalnom prednapregnutom recirkulacionom navrtkom ili sa međuzglobovima. Kod novijih konstrukcija ovog tipa prenosnih sistema koriste se hidrostatička zavojna vretena. Međutim, standardni pogonsko-prenosni sistem koji se koristi na većini mašina alatki ovog tipa se bazira na upotrebi linearnih motora (Slika 2.8. a). Ovi sistemi obezbjeđuju dovoljnu tačnost i preciznost pozicioniranja, upravljivost i dovoljnu krutost zbog izostanka prenosnog sistema.

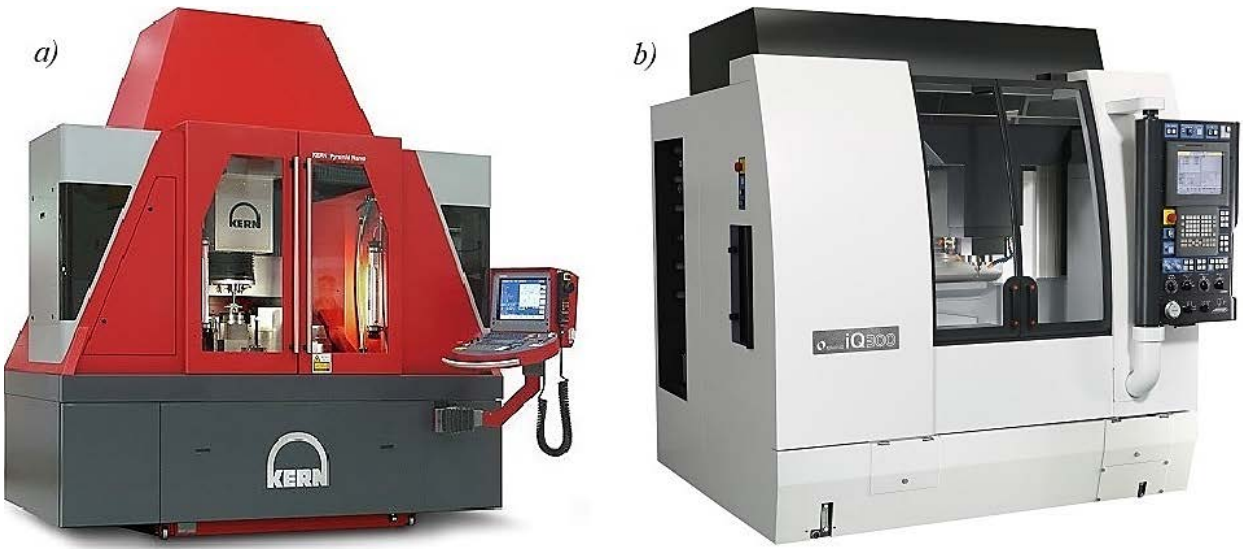
Sistem glavnog vretena kod mikroglodalica koristi konstrukcije sa visokobrzinskim električnim vretenima, sa brojevima obrtaja od 20000 o/min pa naviše (Slika 2.8. b). Time se obezbjeđuje odgovarajuća brzina rezanja pri korišćenju alata malog prečnika. Glavni problem kod sistema glavnog vretena je konstrukcija uležištenja, koja mora obezbijediti dovoljnu krutost konstrukcije pri velikim brojevima obrtaja i efikasno odvođenje toplote. Uležištenja kod ovog tipa mašina se izvode sa hibridnim ležajevima, izrađenih od keramičkih materijala. U ovu svrhu mogu se koristiti aerostatička i hidrostatička uležištenja. Savremene konstrukcije mikroglodalica koriste magnetna uležištenja, koja koriste princip magnetne levitacije glavnog vretena [122].



Slika 2.8. Pogonski sistem sa linearnim motorom (a) i visokobrzinsko glavno vreteno (b) [123, 124]

Mikroglodalice se izvode kao troosni, četvoroosni ili petoosni obradni centri. To su najčešće strukture sa serijski povezanim elementima pogonsko-prenosnih sistema. Veći broj tako povezanih elemenata, odnosno veći broj sinhronizovanih osa, dovodi do manje krutosti konstrukcije mašine, te manje tačnosti, ali i do njene veće fleksibilnosti. U najpoznatije svjetske proizvođače mikroglodalica spadaju: Kern, Makino, Kugler, Sodik, Nanotech, Matasura, Fanuc, DMG Mori Seiki i drugi.

Na slici 2.9. pod a) je prikazan vertikalni obradni centar KERN Pyramid Nano, koji ima piramidalnu portalnu noseću strukturu [125]. Pomoćna kretanja imaju ubrzanje od 30 m/s², dok je broj obrtaja ove mašine 50000 o/min. Makino iQ300 vertikalni obradni centar za mikroglodanje je prikazan na slici 2.8. pod b) [126]. Njegov broj obrtaja glavnog vretena iznosi 45000 o/min.

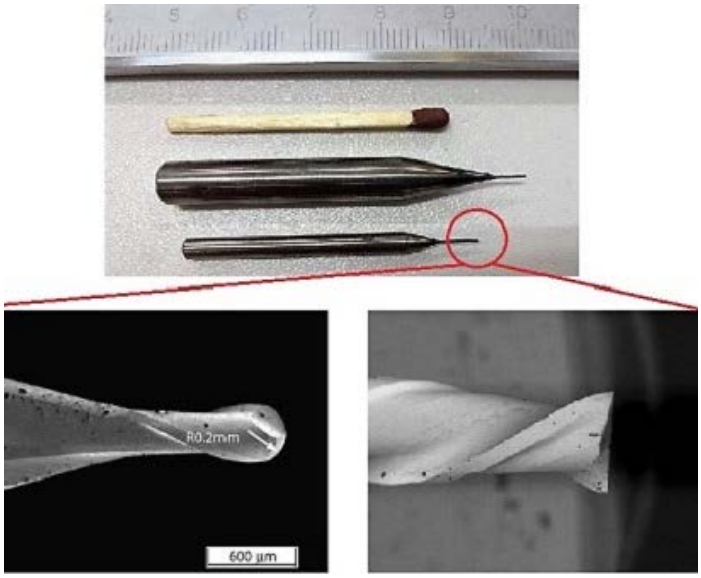


Slika 2.9. Mikroglodalice: (a) KERN Pyramid Nano i (b) Makino iQ300

Za postavljanje mikroglodala u glavno vreteno mikroglodalica koriste se standardni HSK držači alata (Slika 2.10). Ovaj tip prihvata obezbjeđuje dovoljnu krutost i tačnost nalijeganja elemenata u sistemu alat-glavno vreteno, jer se oslanjanje teoretski vrši preko tri površine. Stezanje u HSK držače se vrši sistemom sa elastičnim čaurama ili sistemom sa preklopom. Sistem sa elastičnim čaurama nije pogodan za ultraprecizne obrade, kao ni za obrtaje veće od 20000 o/min. Kod sistema sa preklopom koristi se princip toplotnog širenja materijala držača alata. Procedura stezanja alata uključuje zagrijavanje držača na posebnom uređaju, postavljanje alata u adapter i hlađenje držača. Uslijed hlađenja nastaje preklop između drške alata i adaptera držača. Pri radu na visokim brojevima obrtaja vretena ovaj sistem obezbjeđuje veliku krutost i preciznost, dok se radijalno bacanje alata i držača smanjuje na minimum.

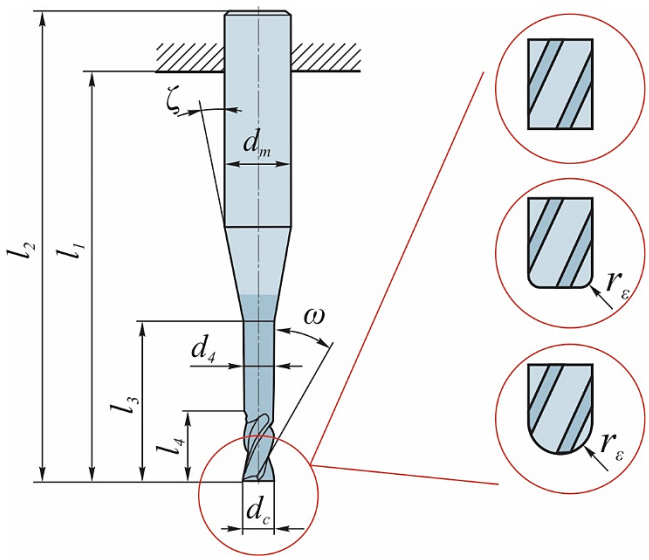
Slika 2.10. Držač alata HSK-E25 sa preklopnim stezanjem mikroglodala [127]

U mikroglodanju se koriste ravna i loptasta vretenasta, te specijalna mikroglodala, a izbor zavisi od oblika geometrijske forme na obratku (Slika 2.11) [128, 129]. U komercijalnoj upotrebi se mogu naći mikroglodala čiji se prečnici kreću od 200 μm do 1000 μm, dok se za potrebe laboratorijskih ispitivanja koriste mikroglodala čiji je prečnik manji od 100 μm [130]. Geometrijski su slična standardnim mikroglodalima koja se upotrebljavaju u makroobradi, ali je njihova proizvodnja izuzetno složena zbog dimenzionog ograničenja. Najčešće se proizvode postupkom fokusirane jonske obrade (engl. *focused ion beam* - FIB) i postupkom brušenja.



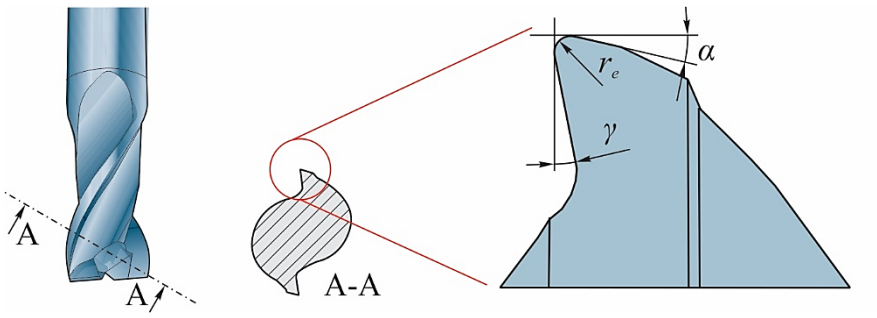
Slika 2.11. Mikroglodala [128, 129]

Tijelo mikroglodala se sastoji od cilindričnog ili loptastog reznog dijela, vratnog dijela i drške (Slika 2.12). Karakterišu ih ukupna dužina mikroglodala (l_2), dužina vratnog dijela (l_3), dužina reznog dijela (l_4), nazivni prečnik glodala odnosno prečnik reznog dijela (d_c), prečnik vratnog dijela (d_4), prečnik drške (d_m), ugao vratnog konusa (ζ) i poluprečnik zaobljenja vrha alata (r_ε). Dužina prepusta (l_1) je dužina od prihvata mikroglodala u vretenu mašine alatke do njegovog vrha. Broj zuba mikroglodala (z_n) je najčešće dva, simetrično raspoređenih na reznom dijelu mikroglodala i izvedenih u obliku zavojnice definisane uglom uspona (ω).



Slika 2.12. Geometrija mikroglodala

Rezni zub glodala je izveden u obliku klina, na kojem se mogu definisati grudni ugao (γ) i leđni ugao (α), (Slika 2.13). Kako je ranije navedeno, vrh reznog klina mikroglodala nije idealno oštar, te se predstavlja u obliku zaobljenog dijela poluprečnika (r_e). Njegova dimenzija zavisi od sastava i veličine kristalnog zrna materijala obratka, postupka završnog brušenja pri procesu proizvodnje reznog alata, karakteristika i debljine prevlake. Zaobljen vrh reznog klina alata je glavni faktor u pojavi i definiciji efekta veličine.



Slika 2.13. Osnovna geometrija reznog klina mikroglodala

Materijal obratka uslovljava upotrebu odgovarajućeg materijala alata (Tabela 2.3). Osnovni materijal mikroglodala je brzorezni čelik ili najčešće karbid, i to volfram-karbid (WC) ili titanijum-karbid (TiC). Na osnovni materijal nanose se prevlake koje smanjuju koeficijent trenja između obratka i mikroglodala, povećavaju otpornosti na habanje, smanjuju adhezivnih sklonosti, sprječavaju prodor generisane toplote u osnovni materijal, itd. Prevlake na mikroglodalima se nanose najčešće postupkom hemijskog naparavanja površine (engl. *chemical vapour deposition* - CVD) ili postupkom fizičkog naparavanja površine (engl. *phisical vapour deposition* - PVD). Kao materijal prevlaka koristi se kubni nitrid bora (engl. *cubic boron nitride* - CBN), keramika ili nitridi: TiN, TiCN i CrN. U komercijalnoj upotrebi su najčešća mikroglodala sa karbidnom osnovom od WC i prevlakom od TiAlN. Odlične rezultate u pogledu povećanja postojanosti mikroglodala daju prevlake od AlCrTiN nanesene postupkom PVD, te prevlake od sitnozrnastog dijamanta (engl. *fine grained diamond* - FGD) i nanokristalnog dijamanta (engl. *nano-cristaline diamond* - NCD) nanesene CVD postupkom [34, 131].

Tabela 2.3. Tipičan izbor materijala alata prema materijalu obratka

Materijal alata	**Materijal obratka**					
	Meki nemetali	**Liveno gvožđe**	**Čelici**	**Kaljeni čelici**	**Ni legure**	**Ti legure**
Brzorezni čelik (HSS)	●●	○○	●○	○○	○○	○○
Karbid	●●	●●	●●	●○	●●	●○
Keramika	○○	●●	●●	●○	●●	○○
Kubni nitrid bora (CBN)	○○	●○	○○	●●	●○	●○
Polikristalni dijamant (PCD)	●●	○○	○○	○○	○○	●●
● prihvatljivo ○ neprihvatljivo						

Stezanje obradaka na mikroglodalicama se vrši pomoću standardnih steznih pribora, kao što su standardne stege za prizmatične obratke, te stezne čaure za cilindrične obratke. Svakako, elementi koji koriste princip nalijeganja preko konusa i elastičnog stezanja doprinose tačnosti obrade. Pribori se obično pričvršćuju na radni sto mikroglodalice klasičnim sistemom pomoću vijka i T-žljebova. U svrhu izbjegavanja grešaka postavljanja pribora razvijeni su sistemi sa brzim zaključavanjem preko konusa i elastičnih elemenata (Slika 2.14). Time se obezbjeđuje preciznije i tačnije baziranje obradaka, koje se koristi prilikom mikroglodanja elektroda i njihovog prenosa na EDM mašinu.

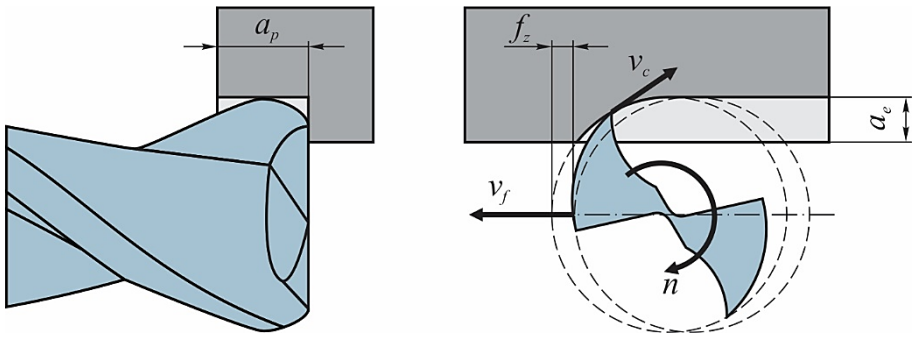
Slika 2.14. Sistem za brzo pričvršćivanje obratka na radni sto mikroglodalice [132]

2.2.2. Tehnološki i geometrijski parametri procesa mikroglodanja

Zahtjevi za realizacijom odgovarajuće kinematike glavnog i pomoćnog kretanja mašine alatke, geometrija alata i obratka, te njihov međusobni relativni položaj u toku obrade, su osnova za definiciju osnovnih parametara procesa mikroglodanja [133]. Pod glavnim kretanjem se smatra kretanje čiji se vektor brzine pruža u pravcu odvajanja strugotine. Pomoćno kretanje je kretanje koje obezbjeđuje kontinualni ili ponavljajući niz relativnih položaja rezne ivice alata i obradaka, omogućavajući kontinualno ili ponavljajuće zahvatanje strugotine. Tehnološki parametri su parametri kojima se potpuno definiše zahvat obrade. Geometrijski parametri su parametri koji proizilaze iz kinematike procesa, tehnoloških parametara i geometrije mikroglodala. Tehnološki i geometrijski parametri procesa u mikroglodanju, pored naprijed pomenute geometrije i materijala alata, spadaju ulazne parametre procesa obrade.

U tehnološke parametre u mikroglodanju spadaju (Slika 2.15):

- ***dubina obrade a_p [mm]*** koja predstavlja razliku između obrađene i neobrađene površine, i najčešće se mjeri u pravcu ose mikroglodala,
- ***širina obrade a_e [mm]*** koja predstavlja mjeru bočnog zahvata materijala obratka ili radijalnog pomjeranja alata, mjereno normalno u odnosu na pravac mjerenja dubine obrade,
- ***korak po zubu f_z [mm/zub]*** koji predstavlja veličinu zahvata materijala obratka ili pomjeranje alata u pravcu pomoćnog kretanja jednog zuba mikroglodala,
- ***brzina rezanja v_c [m/min]*** je brzina kretanja rezne oštrice u odnosu na materijal obratka.



Slika 2.15. Tehnološki parametri mikroglodanja

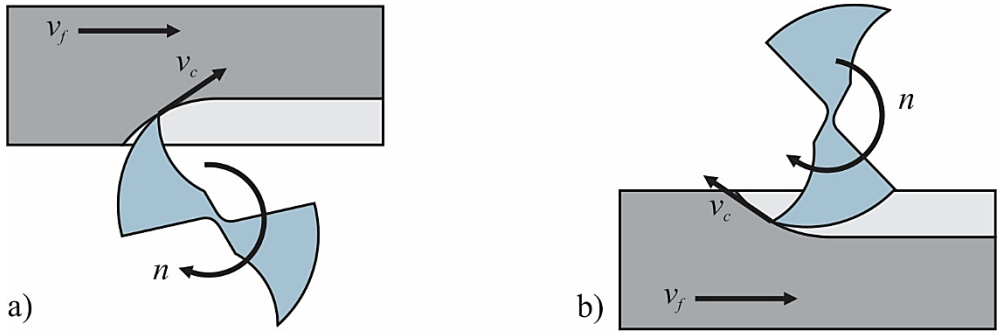
Zadavanje tehnoloških parametara pri upravljanju mašinom alatkom najčešće zahtijeva definisanje broja obrtaja glavnog vretena (n) i brzine pomoćnog kretanja (v_f), što je mnogo senzibilnije za fizičko shvatanje vrijednosti tehnoloških parametara od strane operatera. Broj obrtaja glavnog vretena zavisi od brzine rezanja v_c [m/min] i prečnika alata d_c [mm]:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{d_c \cdot \pi} \quad \left[\frac{\text{o}}{\text{min}}\right] \tag{2.1}$$

dok se brzina pomoćnog kretanja, koja predstavlja brzinu kretanja mikroglodala u odnosu na obradak, zavisi od broja obrtaja n, broja zuba z_ni koraka po zubu f_z [mm/zub]:

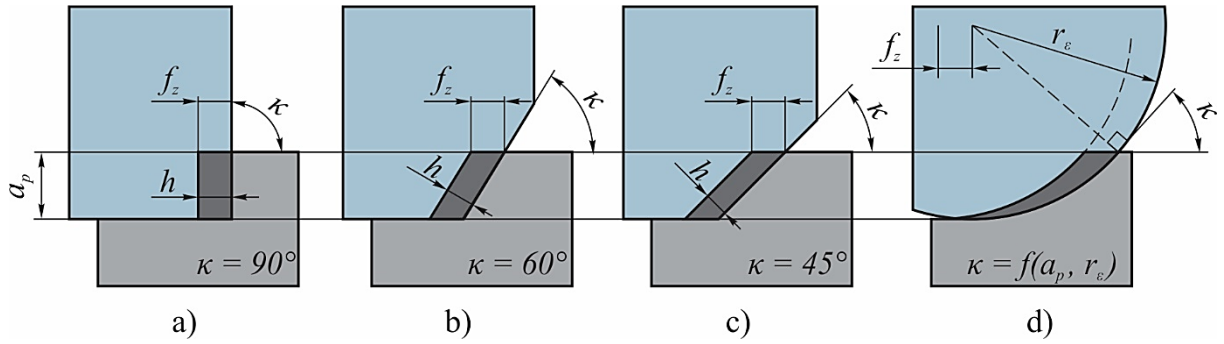
$$v_f = f_z \cdot z_n \cdot n \quad \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right] \tag{2.2}$$

Mikroglodanje može biti istosmjerno ili suprotnosmjerno (Slika 2.16). Istosmjerno mikroglodanje se javlja ukoliko se smjer vektora brzine pomoćnog kretanja i smjer vektora brzine rezanja poklapaju. Suprotnosmjerno mikroglodanje se javlja ukoliko su ova dva vektora suprotnog smjera. Kod istosmjernog mikroglodanja zubi pri ulazu u materijal obratka zahvataju maksimalni presjek strugotine. Suprotnosmjerno mikroglodanje se izbjegava zbog pojave neravnomjernog reza i gnječenja materijala na početku zahvatanja materijala obratka i naglih udara koji se javljaju kada zubi mikroglodala napuštaju obradak.



Slika 2.16. Istosmjerno (a) i suprotnosmjerno (b) glodanje

Da bi se odredili geometrijski parametri obrade, potrebno je razmatrati i nagib rezne ivice u odnosu na neobrađenu površinu obratka, koji se definiše ***napadnim uglom (κ)***. Napadni ugao zavisi od geometrije mikroglodala i tehnoloških parametara. Na slici 2.17. su prikazani uticaji različitih odnosa prečnika mikroglodala, koraka po zubu i dubine obrade, kao tehnoloških parametara, na vrijednosti napadnog ugla.



Slika 2.17. Odnos parametara obrade i napadnog ugla

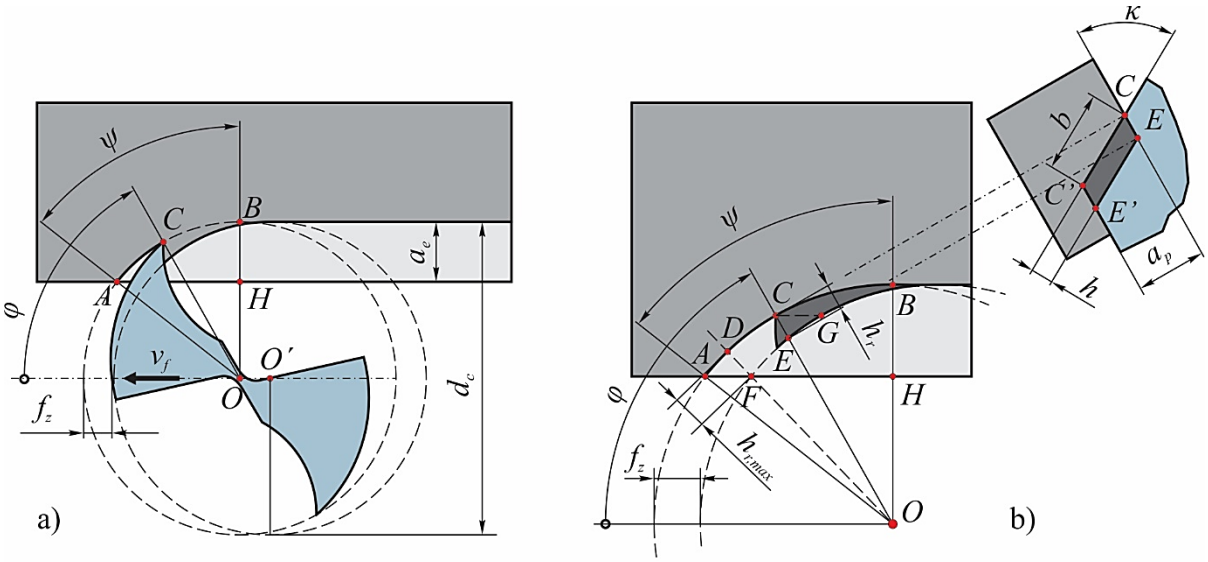
Ukoliko poluprečnik zaobljenja vrha alata (r_ε) premašuje vrijednost dubine obrade (a_p), kako je to prikazano na slici 2.17. pod d, vrijedi jednakost:

$$\cos \kappa = \frac{r_\varepsilon - a_p}{r_\varepsilon} \tag{2.3}$$

tako da napadni ugao ima vrijednost:

$$\kappa = \arccos\left(1 - \frac{a_p}{r_\varepsilon}\right) \tag{2.4}$$

U geometrijske parametre mikroglodanja ubrajaju se ugao kontakta (ψ), ugao zahvata (φ), širina strugotine (b) i debljina strugotine (h). Debljina strugotine može da bude maksimalna (h_{max}), srednja (h_m) i minimalna (h_{min}) debljina strugotine. Radi definisanja geometrijskih parametara mikroglodanja uzima se proces obrade stepenika vretenastim mikroglodalom (Slika 2.18). Prema datoj situaciji, uzima se da postoji definisani napadni ugao, te da se radijalna osa mikroglodala paralelna pravcu pomoćnog kretanja, nalazi van obratka.



Slika 2.18. Geometrijski parametri mikroglodanja

Širina strugotine (b) je definisana sa duži $\overline{CC'}$, i predstavlja dužinu dodira rezne ivice i materijala obratka. Zavisi od dubine obrade (a_p) i napadnog ugla (κ):

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa} \tag{2.5}$$

Ugao kontakta (ψ) je centralni ugao luka $\widehat{AB}$, definisanog dodirom mikroglodala i obratka. Ugao kontakta zavisi od prečnika glodala i širine obrade. Može se definisati kosinus ugla kontakta, posmatranjem trougla ΔOAH, tako da zavisi od prečnika mikroglodala (d_c) i širine obrade (a_e):

$$\cos \psi = \frac{\overline{OH}}{\overline{OA}} = \frac{\frac{d_c}{2} - a_e}{\frac{d_c}{2}} = \frac{d_c - 2 \cdot a_e}{d_c} \tag{2.6}$$

Shodno tome, ugao kontakta će biti:

$$\psi = \arccos\left(\frac{d_c - 2 \cdot a_e}{d_c}\right) = \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{d_c}\right) \tag{2.7}$$

Prilikom izrade mikrokanala, glodalo je čitavom svojom širinom u zahvatu, iz čega slijedi da je $a_e = d_c$, odnosno ugao kontakta iznosi $\psi = 180°$.

Ugao zahvata (φ) je ugao između pravca vektora brzine pomoćnog kretanja i pravca određenog centrom mikroglodala i trenutnim položajem zuba u zahvatu, odnosno pravcem kroz tačke O i C. Ovaj ugao je promjenjiv u vremenu, mjeri se u smjeru obrtanja vretena mašine alatke u odnosu na pozitivan smjer vektora brzine pomoćnog kretanja. Prema uglu kontakta i uglu zahvata, može se definisati ***broj zuba u zahvatu*** (z_c). Pošto su mikroglodala najčešće dvosječni alati, onda je broj zuba u zahvatu $z_c = 1$.

Debljina strugotine (h) je tekuća vrijednost i zavisi od trenutne vrijednosti ugla zahvata. U suštini, predstavlja debljinu poprečnog presjeka režućeg odnosno sloja materijala obratka zahvaćenog zubom mikroglodala. Analizom trougla ΔCEG, može se utvrditi da je dužina $\overline{CG} = f_z$, dok je ugao $\measuredangle ECG = \varphi$. U tom slučaju, radijalna debljina strugotine (h_r) zavisi od ugla zahvata (φ) i koraka po zubu (f_z):

$$h_r = f_z \cdot \cos\varphi \tag{2.8}$$

Posmatrajući paralelogram CEC′E′, definisan napadnim uglom (κ) i dubinom obrade (a_p), može se doći do vrijednosti h, tako da će debljina strugotine biti:

$$h = h_r \cdot \sin\kappa \tag{2.9}$$

Konačno, uvrštavanjem, dobija se obrazac za debljinu strugotine:

$$h = f_z \cdot \cos\varphi \cdot \sin\kappa \tag{2.10}$$

gdje su f_z korak po zubu, φ ugao zahvata i κ napadni ugao.

Zahvat materijala obratka zubom mikroglodala, kod istosmjernog mikroglodanja, se odvija tako da se vrijednosti ugla zahvata kreće od njegove minimalne vrijednosti od $90° - \psi$, pa do njegove maksimalne vrijednosti od 90°.

Shodno prethodnom, ***maksimalna debljina strugotine (h_{max})*** se definiše uglom zahvata čija je vrijednost određena uglom između vektora brzine pomoćnog kretanja i pravca definisanog tačkama O i D. Pošto je situacijom obrade uzeto da je $d_c > a_e$, tada je radijalna debljina strugotine definisana dužinom duži $\overline{DF}$. Ukoliko se posmatra trougao ΔOAH, dužina $\overline{AH}$ ima vrijednost:

$$\overline{AH} = \overline{AO} \cdot \sin\psi = \frac{d_c}{2} \cdot \sin\psi \tag{2.11}$$

gdje je d_c prečnik mikroglodala i ψ ugao kontakta.

Da bi se našao ugao zahvata koji odgovara maksimalnoj debljini strugotine, potrebno je odrediti dužinu duži $\overline{FH}$:

$$\overline{FH} = \overline{AH} - \overline{AF} = \frac{d_c}{2} \cdot \sin\psi - f_z \tag{2.12}$$

Ugao zahvata je ekvivalentan uglu $\measuredangle OFH$, čiji tangens iznosi:

$$tg\ (\measuredangle OFH) = \frac{\overline{HO}}{\overline{FH}} = \frac{\frac{d_c}{2} - a_e}{\frac{d_c}{2} \cdot \sin\psi - f_z} = \frac{d_c - 2 \cdot a_e}{d_c \cdot \sin\psi - 2 \cdot f_z} \tag{2.13}$$

pa pomenuti ugao ima vrijednost:

$$\measuredangle OFH = \mathrm{arctg}\left(\frac{d_c - 2 \cdot a_e}{d_c \cdot \sin\psi - 2 \cdot f_z}\right) \tag{2.14}$$

Trigonometrijski obrazac za odnos sinusa i kosinusa ugla $\measuredangle OFH$:

$$\cos(\measuredangle OFH) = \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2(\measuredangle OFH)}} \tag{2.15}$$

čijim korišćenjem se dobija:

$$\cos(\measuredangle OFH) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_c - 2 \cdot a_e}{d_c \cdot \sin\psi - 2 \cdot f_z}\right)^2}} \tag{2.16}$$

Uvrštavanjem vrijednosti prethodnog obrasca za sinus posmatranog ugla u obrazac za trenutnu debljinu strugotine, dobija se vrijednost maksimalne debljine strugotine:

$$h_{max} = f_z \cdot \sin\kappa \cdot \cos\left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_c - 2 \cdot a_e}{d_c \cdot \sin\psi - 2 \cdot f_z}\right)^2}}\right) \tag{2.17}$$

Radi lakšeg proračuna geometrijskih parametara često se uzima da vrijednost ugla koji odgovara maksimalnoj debljini strugotine približno odgovara uglu kontakta:

$$\measuredangle OFH \approx 90° - \psi \tag{2.18}$$

tako da se maksimalna debljina strugotine može izračunati pomoću obrasca:

$$h_{max} = f_z \cdot \cos\,(90° - \psi) \cdot \sin\kappa = f_z \cdot \sin\psi \cdot \sin\kappa \tag{2.19}$$

gdje je f_z korak po zubu, ψ ugao kontakta i κ napadni ugao.

Uvrštavanjem vrijednosti sinusa ugla kontakta i izostavljanju relativno malih vrijednosti, dolazi do maksimalne debljine strugotine:

$$h_{max} = f_z \cdot \sin\kappa \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{d_c - 2 \cdot a_e}{d_c}\right)^2} \approx 2 \cdot f_z \cdot \sin\kappa \cdot \sqrt{\frac{a_e}{d_c}} \tag{2.20}$$

U slučaju situacije obrade gdje je $d_c < a_e$, tada je maksimalna debljina strugotine jednaka koraku $h_{max} = f_z$.

Minimalna debljina strugotine (h_{min}) u makroglodanju iznosi nula, jer je njena relativna vrijednost u odnosu na vrijednosti tehnoloških i geometrijskih parametra obrade zanemariva. U mikroglodanju njena vrijednosti ne može zanemariti, jer se nalazi u rangu sa vrijednostima navedenih parametara. Vrijednost minimalne debljine strugotine se utvrđuje na osnovu efekta veličine, materijala obratka i geometrijskih parametara obrade [28].

Srednja debljina strugotine (h_m) je prosječna debljina strugotine, koja se može izračunati pomoću obrasca za srednju vrijednost funkcije koja glasi:

$$f_{sr} = \frac{1}{b-a} \cdot \int_a^b f(x) \cdot dx \tag{2.21}$$

Shodno tome, srednja debljina strugotine će biti:

$$h_m = \frac{1}{90° - (90° - \psi)} \cdot \int_{90°-\psi}^{90°} h(\varphi) \cdot d\varphi \tag{2.22}$$

Uvrštavanjem obrasca (2.10), kojim se definiše debljina strugotine u zavisnosti od ugla zahvata, u prethodni obrazac, dobija se:

$$h_m = \frac{1}{\psi} \cdot \int_{90°-\psi}^{90°} f_z \cdot \cos\varphi \cdot \sin\kappa \cdot d\varphi \tag{2.23}$$

Rješenjem određenog integrala (2.23) dobija se:

$$h_m = \frac{f_z \cdot \sin\kappa}{\psi} \cdot \sin\varphi|_{90°-\psi}^{90°} \tag{2.24}$$

a uvrštavanjem vrijednosti granica:

$$h_m = \frac{f_z \cdot \sin\kappa}{\psi} \cdot (1 - \cos\psi) \tag{2.25}$$

Konačna vrijednost srednje debljine strugotine se dobije uvrštavanjem obrasca (2.6), odnosno vrijednost kosinusa ugla kontakta u prethodni obrazac:

$$h_m = \frac{f_z \cdot \sin\kappa}{\psi} \cdot \left(1 - \frac{d_c - 2 \cdot a_e}{d_c}\right) \tag{2.26}$$

te konačno:

$$h_m = \frac{2 \cdot a_e \cdot f_z \cdot \sin\kappa}{\psi \cdot d_c} \tag{2.27}$$

gdje je f_z korak po zubu, a_e širina obrada, d_c prečnik glodala, ψ ugao kontakta i κ napadni ugao.

Površina poprečnog presjeka strugotine (A_c) je trenutna vrijednost koja odgovara vrijednosti trenutne debljine strugotine, koja predstavlja proizvod debljine (h) i širine strugotine (b). Površina poprečnog presjeka strugotine je jednaka površini paralelograma $\mathrm{CEC'E'}$, odnosno:

$$A_c = h \cdot b \tag{2.28}$$

Površina srednjeg poprečnog presjeka strugotine (A_{cm}) odgovara proizvodu srednje debljine strugotine (h_m) i širine strugotine (b):

$$A_{cm} = h_m \cdot b \tag{2.29}$$

Zapremina skinute strugotine za jedan zub mikroglodala (V_m) definiše se kao proizvod površina srednjeg poprečnog presjeka strugotine i dužine luka kojim je definisan ugao kontakta. Dužina luka kontakta (l_ψ) se računa pomoću obrasca:

$$l_\psi = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{d_c}{2} \cdot \psi = \frac{d_c \cdot \pi \cdot \psi}{360} \tag{2.30}$$

gdje je d_c prečnik glodala i ψ ugao kontakta.
Shodno prethodnom, zapremina skinute strugotine za jedan zub mikroglodala iznosi:

$$V_m = A_{cm} \cdot l_\psi \tag{2.31}$$

Gdje je A_{cm} površina srednjeg poprečnog presjeka strugotine i l_ψ dužina luka kontakta.

Zapremina skinutog materijala obratka u jedinici vremena (MRR) u mikrogladanju se na osnovu proizvoda zapremine skinute strugotine za jedan zub (V_m), broja zuba mikroglodala (z_n) i broja obrtaja glavnog vretena (n):

$$MRR = V_m \cdot z_n \cdot n \tag{2.32}$$

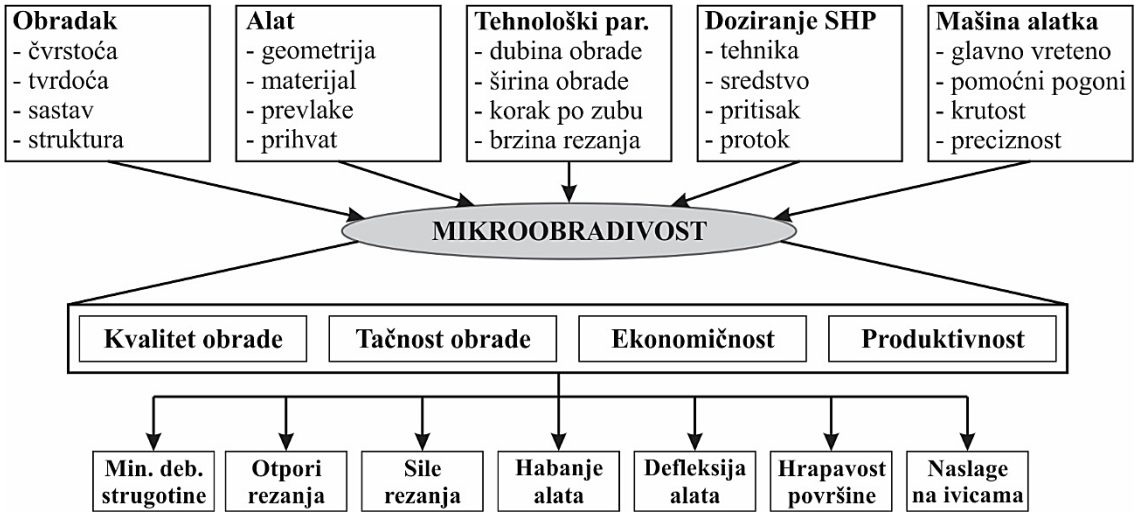
Često se, radi lakše analize procesa mikroglodanja i njegovog poređenja sa drugim metodama obrade, MRR se računa pomoću pojednostavljenog obrasca. U tom slučaju, MRR je proporcionalna proizvodu površina zahvaćene strugotine u jednom prolazu (A_e) i brzine pomoćnog kretanja (v_f):

$$MRR = A_e \cdot v_f \tag{2.33}$$

Vrijednost površina zahvaćene strugotine u jednom prolazu (A_e) se može dobiti analizom geometrije zone obrade. Često se koristi prilikom proračuna MMR za slučaj glodanja loptastim glodalima. Glodanje loptastim glodalom je predmet proučavanja ove disertacije, pa će shodno tome biti naknadno utvrđena.

2.3. KARAKTERISTIKE MEHANIZMA MIKROGLODANJA

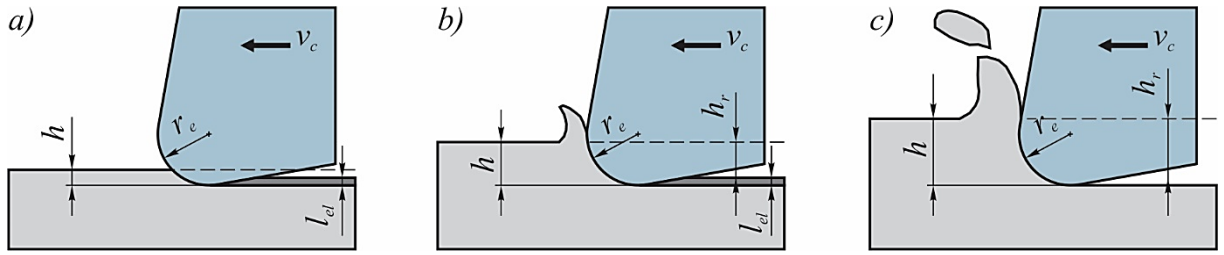
Glavna prepreka prostom skaliranju makroglodanja na mikroglodanje je postojanje nesrazmjere u rangu vrijednosti parametara procesa, što za sobom povlači čitav niz fenomena koji utiču na ponašanje izlaznih parametara mikroglodanja. Shodno tome, njihovo proučavanje je neizostavni dio proučavanja obradivosti, u ovom slučaju mikroobradivosti (Slika 2.19). Mikroobradivost je tehnološka karakteristika koja se odnosi na lakoću (efikasnost) postizanja zahtijevane tačnosti i kvaliteta obrade, uz odgovarajući stepen ekonomičnosti i produktivnosti mikroprocesa. Mikroobradivost se zasniva na analizi izlaznih parametara, koji su ranije definisani kao kriterijumi odnosno funkcije obradivosti, i ona se definiše se za različite vrste materijale obratka ili za različite uslove mikroobrade jednog materijala.



Slika 2.19. Okvir za proučavanje mikroobradivosti

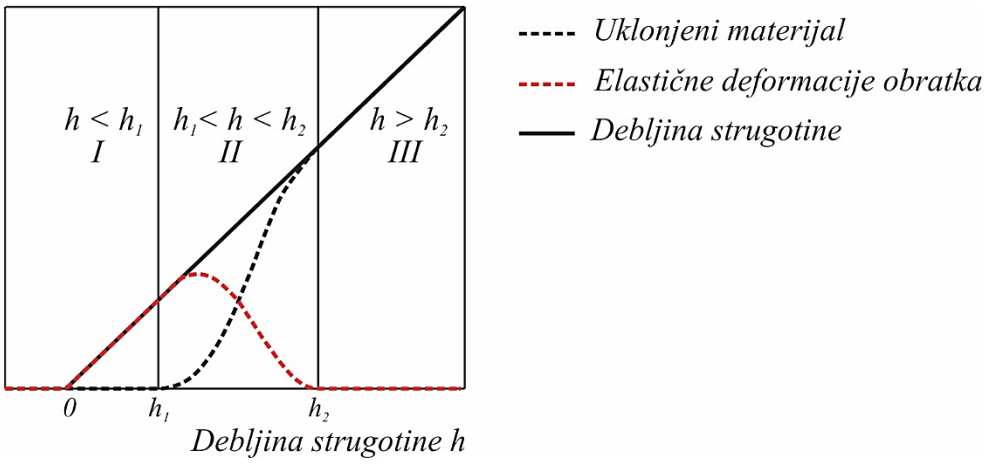
Efekat veličine, kako je ranije navedeno, se odnosi na uticaj, nesrazmjere tehnoloških i geometrijskih parametara obrade sa geometrijskim veličinama mikroalata i svojstvima kristalne strukture materijala obratka, na proces mikrorezanja kao osnovnog mehanizma mikroglodanja. Efekat veličine se djeli prema elementima koji učestvuju u njegovoj definiciji.

Efekat vrijednosti poluprečnika zaobljenja rezne ivice (engl. *cutting edge radius size effect*) mikroglodala se definiše preko odnosa pomenutog poluprečnika i trenutne debljine strugotine, i direktno utiče na mehanizam odvajanja strugotine. Ukoliko je poluprečnik zaobljenja rezne ivice veći od trenutne debljine strugotine dolazi do procesa klizanja rezne ivice po materijalu obratka, glačanja materijala obratka, te potpunog izostanka strugotine (Slika 2.20. a). U ovom slučaju, nakon djelovanja reznog klina dolazi do popuštanja elastične deformacije obrađene površine za vrijednost l_{el}. Pomenuta elastična deformacija je svakako propraćena izvjesnim procentom plastične deformacije. Ukoliko je poluprečnik zaobljenja rezne ivice približno jednak trenutnoj debljini strugotine javlja se izuzetno složena interakcija između rezne ivice i materijala obratka (Slika 2.20. b). Pri tome, dolazi do klizanja, gnječenja i lokalnog zavarivanja materijala obratka koje je propraćeno povremenom pojavom nepravilne strugotine. Ukoliko je poluprečnik zaobljenja rezne ivice manji od trenutne debljine strugotine, standardni proces formiranja strugotine postaje dominantan (Slika 2.20. c). Ova situacija predstavlja povoljnu situaciju u mikrorezanju.



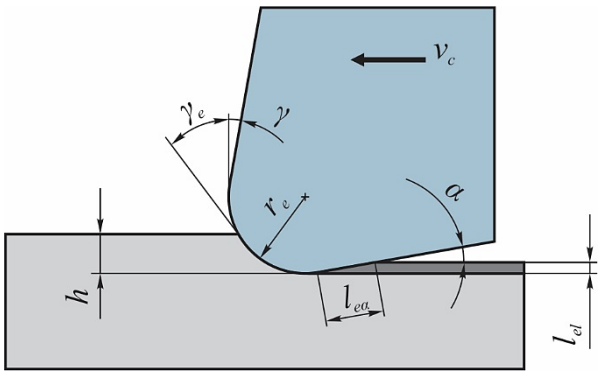
Slika 2.20. Efekat veličine uslovljen poluprečnikom zaobljenja rezne ivice [30]

Učešće vrijednosti elastične deformacije materijala obratka u definiciji geometrije režućeg sloja, može se predstaviti dijagramom prikazanom na slici 2.21. Pri malim vrijednostima debljine nema uklanjanja materijala, nego se zahvaćeni sloj materijala elastično vraća. Porastom vrijednosti debljine strugotine, opada vrijednost elastičnog vraćanja materijala, raste vrijednost uklonjenog materijala a elastične deformacije opadaju.



Slika 2.21. Odnos debljine strugotine i elastičnih deformacija [100]

Efekat veličine poluprečnika zaobljenja rezne ivice mikroglodala dovodi i do promjene geometrijskih parametara procesa obrade. Vrijednost grudnog ugla reznog klina mikroglodala se mijenja u zavisnosti od vrijednosti pomenutog poluprečnika i trenutne debljine strugotine, a definisana je tangentom na luk rezne ivice mikroglodala (Slika 2.22).



Slika 2.22. Promjena grudnog ugla uslijed prisustva efekta veličine [63]

Efektivna vrijednost grudnog ugla (γ_e) se može predstaviti obrascem, u kojem konfigurišu grudni ugao (γ), debljina strugotine (h) i poluprečnik zaobljenja rezne ivice (r_e):

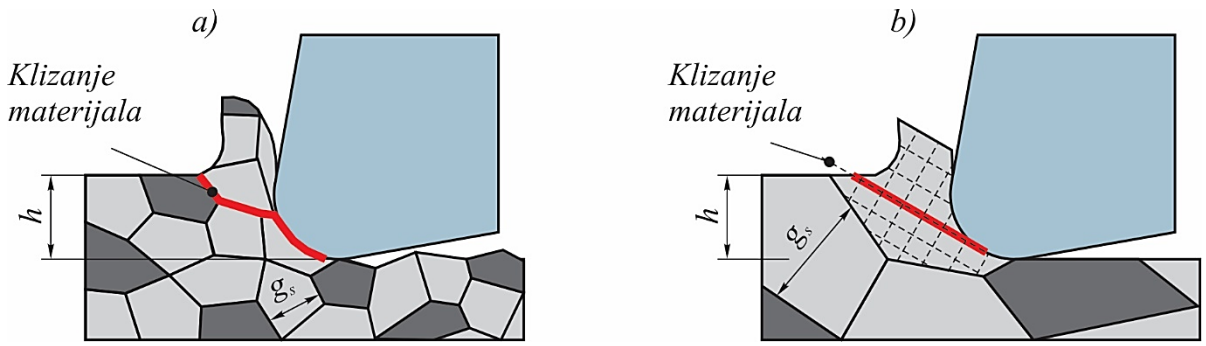
$$\gamma_e = \begin{cases} \gamma, & za\ h > r_e \\ arcsin\left(\frac{h}{r_e} - 1\right), & za\ h \leq r_e \end{cases} \tag{2.34}$$

Uslijed popuštanja elastične deformacije obrađene površine povećava se dužina dodira leđne površine reznog klina mikroglodala i materijala obratka, što dalje utiče na trenje po leđnoj površini klina. Dužina dodira uslijed elastične deformacije ($l_{e\alpha}$) se može izraziti empirijskim Arcona-Dow-ovim obrascem [61]:

$$l_{e\alpha} = \frac{l_{el}}{\sin\alpha} = \frac{C_{AD} \cdot r_e \cdot HRc}{E \cdot \sin\alpha} \tag{2.35}$$

gdje su l_{el} vrijednost elastičnog vraćanja obrađene površine obratka, C_{AD} Arcona-Dow-ov koeficijent elastičnosti materijala obratka, r_c poluprečnik zaobljenja rezne ivice, α leđni ugao, te E modul elastičnosti i HRc tvrdoća materijala obratka.

Efekat krupnoće kristalnog zrna u strukturi materijala obratka (engl. *micro structure size effect*) odnosi se na razmjeru između debljine strugotine i prosječne krupnoće kristalnog zrna materijala obratka (Slika 2.23). Kako je ranije navedeno, materijali obratka u mikroglodanju se ne mogu smatrati homogenim i izotropnim. Od odnosa srednjeg prečnika kristalnog zrna (g_s) i trenutne debljine strugotine, zavisi mehanizam deformisanja materijala obratka, odnosno mehanizam formiranja strugotine. Ukoliko je $g_s \gg h$, naprezanje trpi kristalno zrno zahvaćeno reznim klinom, te će se deformisanje odnosno smicanje materijala obratka vršiti po kristalnim ravnima. Ukoliko je $g_s \ll h$, tada će se deformisanje odnosno smicanje materijala obratka najčešće vršiti uslijed loma po međukristalnim fazama, uslijed njihove niže vrijednost zatezne čvrstoće. Opisani procesi uslovljeni su mehaničkim osobinama kristala i međufaza u materijalu obratka.

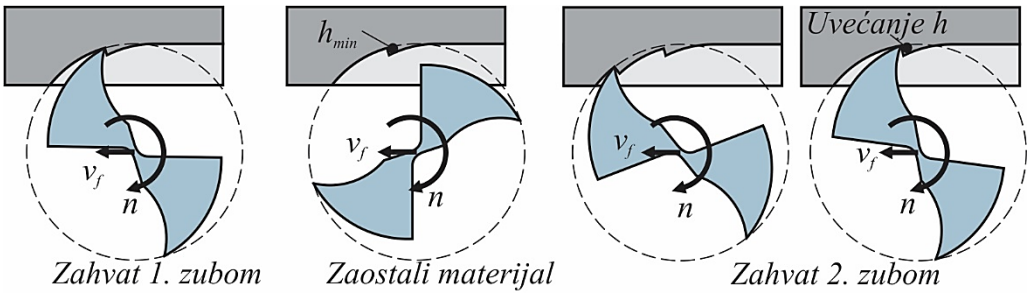


Slika 2.23. Efekat veličine uslovljen mehaničkom strukturom plastičnih materijala [23]

Različiti sastav materijala obratka, krupnoća kristalnih zrna i odnos između različitih faza u nehomogenoj kristalnoj strukturi, dovode do promjenjivih mehaničkih svojstava u različitim dijelovima zapremine obratka, što je osnova za definisanje efekta vrijednosti mehaničkih svojstava materijala (engl. *mechanical property size effect*). Mehaničko-fizička svojstva materijala obratka zavise od graničnih karakteristika kristalnih faza, te prirode procesa dislokacije atoma unutar kristalnog zrna, što utiče na proces formiranja strugotine. Na primjer, vrijednost napona tečenja istog materijala se razlikuje ukoliko u mehanizmu plastičnog deformisanja, nastalog uslijed spoljašnjih naprezanja, dominira klizanje po međufaznom prostoru ili dominira dislokacija atoma unutar kristalnog zrna materijala.

Fenomeni vezani za efekat veličine su osnova za definisanje vrijednosti minimalne debljine strugotine i njenog uticaja na proces mikroglodanja (Slika 2.24). Vrijednost minimalne debljine strugotine spada u tehnološka svojstva materijala obratka i najčešće se određuje eksperimentalnim putem [28, 59, 63, 80]. Osnovni princip pri pomenutim eksperimentalnim istraživanjima je utvrđivanje uslova obrade i trenutka kada izostaje formiranje strugotine. U tehnološkom smislu, minimalna debljina strugotine se može definisati kao minimalna debljina strugotine odnosno sloja zahvaćenog materijala obratka koji se može ukloniti u obliku strugotine. Zavisi od:

- odnosa poluprečnika zaobljenja rezne ivice i debljine strugotine,
- mehaničko-fizičkih svojstava materijala obratka i
- koeficijenta trenja između materijala alata i materijala obratka (μ).



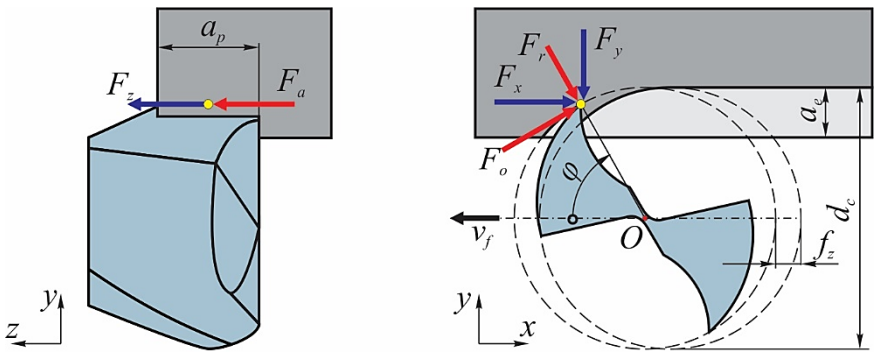
Slika 2.24. Uticaj minimalne debljine strugotine na proces mikroglodanja

Na osnovu analize istraživanja, koja su data u pregledu istraživanja, može se zaključiti da vrijednost minimalne debljine strugotine varira od 5% do 40% vrijednosti poluprečnika zaobljenja rezne ivice. Manje vrijednosti se javljaju prilikom mikrorezanja relativno plastičnijih materijala, dok se veće vrijednosti minimalne debljine strugotine javljaju kod elastičnih materijala. Prema Son-ovom obrascu [59], minimalna debljina strugotine se može dobiti na osnovu poluprečnika zaobljenja rezne ivice (r_e) i koeficijenta trenja između materijala obratka i materijala alata (μ):

$$h_{min} = r_e \cdot \left(1 - cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{2 \cdot \sqrt{1+\mu^2}}\right)\right) \tag{2.36}$$

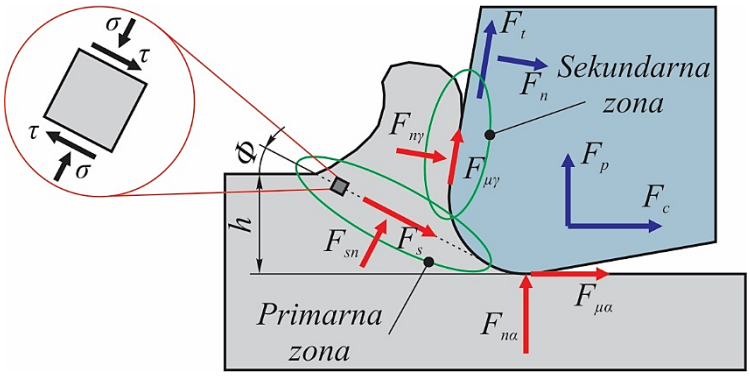
Rezultujuća sila rezanja (F_R) u mikroglodanju je vektorska suma sila kojom se materijal obratka suprotstavlja prodiranju reznog klina alata, sila pri gnječenju materijala obratka i sila trenja između materijala i alata po grudnoj i leđnoj površini reznog klina. Prema nekim autorima i literaturnim izvorima, sile kojima se materijal obratka suprotstavlja djelovanju alata se nazivaju otpori rezanja, dok se sile kojima alat djeluje na obradak nazivaju sile rezanja. Otpori i sile rezanja imaju isti intenzitet, isti pravac djelovanja i suprotan smjer. Sile rezanja direktnu utiču na tačnost obrade, jer uslovljavaju deformaciju mikroglodala i obratka. Vrijednost rezultujuće sile zavisi od svojstava materijala obratka, tehnoloških parametara obrade, geometrije alata i uslova podmazivanja zone rezanja. Mehanizam odvajanja strugotine u mikrorezanju, uslovljen pojavom efekta veličine, direktno utiče na vrijednost rezultujuće sile rezanja. Veće vrijednosti sila rezanja se dobijaju prilikom obrade materijala koji imaju visoku vrijednost zatezne čvrstoće i tvrdoće, a posljedično i visoku vrijednost napona tečenja (σ_T). Povećanje vrijednosti dubine obrade i koraka po zubu dovode do približno lineranog porasta vrijednosti rezultujuće sile mikroglodanja [134]. Geometrija alata utiče na tok materijala obratka i strugotine, a time direktno i na vrijednosti rezultujuće sile.

Rezultujuća sila se može razložiti na obimnu silu (F_o), radijalnu silu (F_r) i aksijalnu silu (F_a), koja djeluje u pravcu ose glodala (Slika 2.25). Radijalna sila opterećuje mikroglodalo na savijanje, a obimna na savijanje te uvijanje, zbog momenta u odnosu na osu glodala. Aksijalna sila opterećuje mikroglodalo na pritisak, a prilikom upotrebe vitkih mikroglodala može doći i do izvijanja. Rezultujuća sila se može razložiti na sile u pravcu osa pravouglog koordinatnog sistema, a upravo se te komponente mjere prilikom eksperimentalnih istraživanja. Prema tome, komponente rezultujuće sile su: sila u pravcu x-ose (F_x), sila u pravcu y-ose (F_y) i sila u pravcu z-ose (F_z). Vrijednost F_x i F_y su promjenjive u toku obrade, i zavise od ugla zahvata.



Slika 2.25. Sile (otpori) rezanja u mikroglodanju

Ukoliko se posmatra proces prodiranja reznog klina mikroglodala sile rezanja su rezultat naprezanja u primarnoj i sekundarnoj zoni deformisanja materijala obratka. Rezultujuća sila se može razložiti na glavnu silu rezanja (F_c) i silu prodiranja (F_p) koji djeluju u ravni (Slika 2.26). U pojedinim modelima sila rezanja i modelima procesa rezanja, rezultanta sila F_c i F_p se može razložiti na silu u ravni grudne površine reznog klina (F_T) i silu normalnu na grudnu površinu reznog klina (F_N). U vrijednosti rezultante sila F_c i F_p učestvuju vrijednost sile trenja na grudnoj površini ($F_{\mu\gamma}$) i normalne sile na grudnoj površini ($F_{n\gamma}$), koje se javljaju samo ukoliko postoji mehanizam formiranja strugotine uslovljen efektom veličine. Nadalje, u pomenutoj vrijednosti rezultante, učestvuju vrijednost sile trenja na leđnoj površini ($F_{\mu\alpha}$) i normalne sile na leđnoj površini ($F_{n\alpha}$), koje se javljaju bez obzira na trenutno dominantni mehanizam mikrorezanja.



Slika 2.26. Sile na reznom klinu mikroglodala

Dominantan udio u vrijednosti rezultante sila F_c i F_p ima sila u ravni smicanja strugotine (F_s). Ravan smicanja je teoretska ravan određena uglom smicanja (Φ), u kojoj su tangencijalni (smičući) naponi u materijalu maksimalni, što za posljedicu ima klizanje materijala obratka, te

formiranje strugotine. Prostire se od vrha reznog klina do neobrađene površine na obratku. Sila u ravni smicanja strugotine je posljedica naprezanja na smicanje materijala obratka, njegovog deformisanja, tečenja i kidanja. Sila u ravni smicanja je direktno proporcionalna proizvodu debljine i širine strugotine, odnosno površine poprečnog presjeka strugotine (A_c), te zatezne čvrstoće materijala obratka [76, 135, 136]. Pored pomenute sile, može se definisati i sila normalna na ravan smicanja strugotine (F_{sn}), koja je sa silom u ravni smicanja strugotine povezana koeficijentom unutrašnjeg trenja u materijalu obratka (μ_s). Zona deformisanja materijala obratka može se podijeliti na primarnu zonu i sekundarnu zonu deformisanja. Primarna zona deformisanja pokriva usko područje oko ravni smicanja. U ovoj zoni se javlja unutrašnje trenje u materijalu obratka, i teoretski posmatrano, konstantni tangencijalni napon. Sekundarna zona deformisanja je zona dodira reznog klina i materijala obratka. U sekundarnoj zoni se javlja spoljašnje trenje između klina i obratka, pri čemu se uzima da je odgovarajući koeficijent trenja konstantan. U graničnom području između pomenutih zona, javlja se mehanizam sljepljivanja materijala obratka i reznog klina. Vrijednost tangencionalnog napona (τ) u ravni smicanja materijala obratka, iznosi:

$$\tau = \frac{F_s}{A_c} = \frac{F_c \cdot cos\,\Phi \cdot sin\,\Phi - F_p \cdot sin^2\,\Phi}{b \cdot h} \tag{2.37}$$

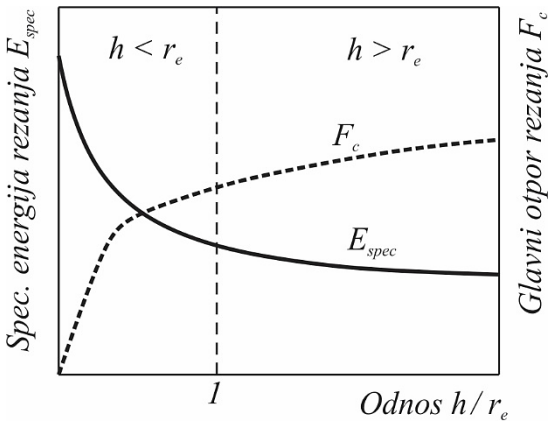
dok je vrijednost normalnog napona (σ) u ravni smicanja:

$$\sigma = \frac{F_{sn}}{A_c} = \frac{F_c \cdot sin^2\,\Phi - F_p \cdot cos\,\Phi \cdot sin\,\Phi}{b \cdot h} \tag{2.38}$$

U domenu vrijednosti debljine strugotine koje odgovaraju vrijednostima odnosa h/r_e manjim od 1, glavna sila rezanja pri mikroglodanju opada sa smanjenjem debljine strugotine. Bolji pokazatelj specifičnosti procesa mikroglodanja se može iskazati preko energije mikrorezanja (E_{spec}). Energija mikrorezanja se definiše kao rad koji je potreban da se ukloni jedinična vrijednost zapremine skinutog materijala obratka, definisane širinom (h) i debljinom strugotine (b):

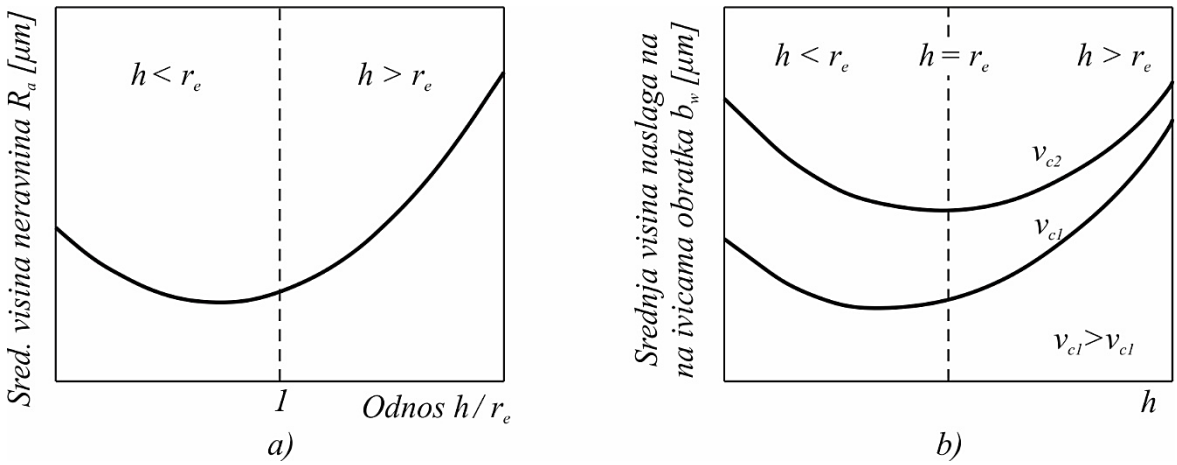
$$E_{spec} = \frac{P_c}{MRR} = \frac{F_c \cdot v_c}{h \cdot b \cdot v_c} = \frac{F_c}{h \cdot b} \tag{2.39}$$

Vrijednosti specifične energije su mnogo veće pri vrijednostima odnosa h/r_e manjeg od 1, nego u slučaju istih vrijednosti većih od 1, gdje ima približno konstantnu vrijednost (Slika 2.27). Uzrok tome je gnječenje male zapremine materijala obratka ispred reznog klina mikroglodala, koje nastaje kao posljedica efekta veličine poluprečnika zaobljenja rezne ivice, odnosno promjenom vrijednosti grudnog ugla. Pri tome se javljaju velike vrijednosti stepena deformacije (ε) praćene velikom brzinom deformacije ($\dot{\varepsilon}$), te nižom temperaturom mikrorezanja (T), uzrokovane manjom količinom generisane toplote, što dovodi do očvršćavanja materijala obratka, povećanja koeficijenta trenja i vrijednosti napona tečenja materijala, a time i specifične energije mikrorezanja [75, 113]. Dio energije, koji se rasipao na kontaktu strugotine i grudne površine reznog klina, rasipa se na dio ispred vrha reznog klina mikroglodala. Slično se dešava i sa vrijednošću specifičnog pritiska na reznom klinu alata, koji raste sa smanjenjem debljine i širine strugotine, što nije bio slučaj u makroobradi.



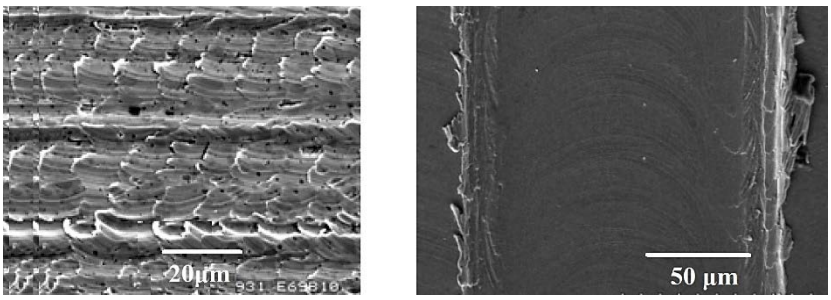
Slika 2.27. Uticaj efekta veličine na specifičnu energiju mikrorezanja [23]

Kvalitet obrade u mikroglodanju se određuje na osnovu parametara hrapavosti obrađene površine, svojstvima površinskog sloja obrađene površine i geometrijskim parametrima naslaga na ivicama obratka. Generalno, hrapavost obrađene površine raste sa povećanjem koraka i širine obrade, a opada sa porastom brzine rezanja i uvođenjem odgovarajućeg sredstva za hlađenje i podmazivanje u zonu obrade. Srednja visina neravnina (R_a), i visina neravnina u 10 tačaka (R_z) zavise od mehanizma mikrorezanja uslovljenog efektom veličine, te vrijednošću minimalne debljine strugotine. Sa porastom vrijednosti odnosa h/r_e iznad 1, dolazi do povećanja hrapavosti (Slika 2.28. a). Sa opadanjem odnosa h/r_e ispod 1, javlja se približno konstantna visina neravnina ili njen blagi porast. Najniže vrijednosti se dobijaju kada je vrijednost debljine strugotine približna minimalnoj debljini strugotine, a uzrok toj pojavi je glačanje materijala obratka. Kvalitet obrađene površine zavisi i od mehanizma odvajanja strugotine. Ukoliko se materijal obratka odvaja po međukristalnim fazama, tada na hrapavost utiče struktura i krupnoća kristalnih zrna.



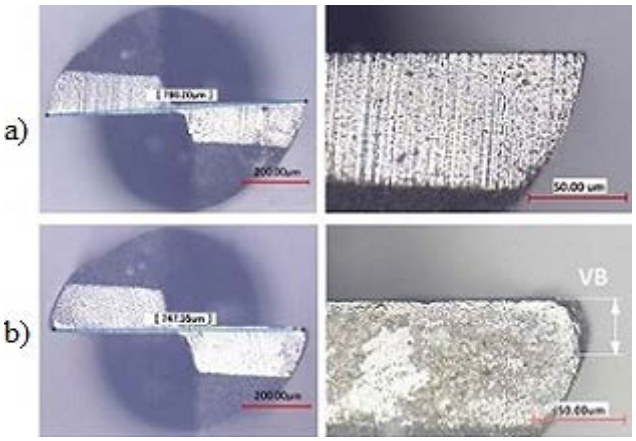
Slika 2.28. Uticaj efekta veličine na parametre kvaliteta obrade [23]

Srednja visina naslaga na ivicama obratka (b_w) predstavlja aritmetičku sredinu svih visina naslaga materijala duž posmatrane ivice tehnološke forme na mikrodijelu. Srednja visina naslaga na ivicama obratka raste sa porastom poprečnog presjeka strugotine i brzine rezanja. Kao i kod hrapavosti, visine naslaga takođe zavise i od efekta veličine, te mehanizma gnječenja, klizanja i kidanja materijala obratka (Slika 2.28. b). Naslage su mnogo izraženije pri mikroglodanju plastičnijih materijala. Pri obradi kanala, naslage su mnogo veće na strani na kojoj se vrši istosmjerno mikroglodanje (Slika 2.29. b).



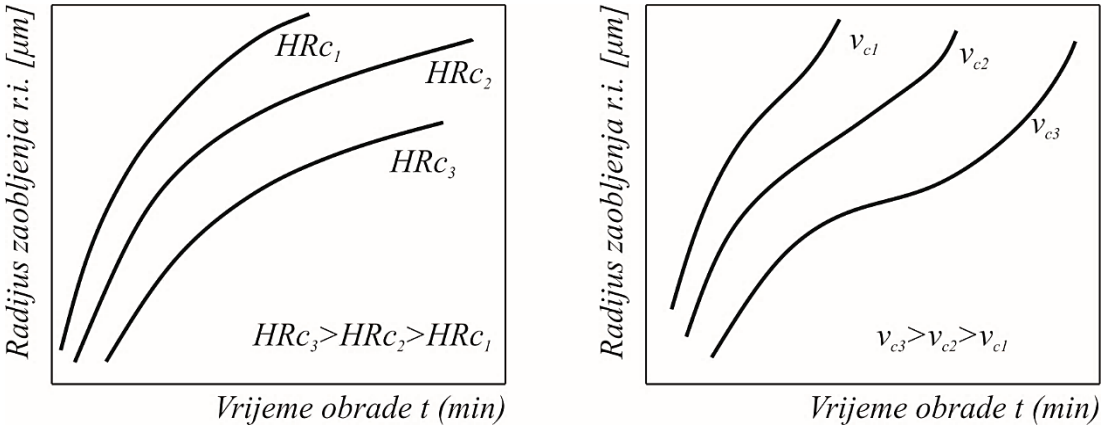
Slika 2.29. Obrađena površina (a), naslage na ivicama obratka (b) [33, 36]

Habanje mikroalata se manifestuje promjenom geometrije reznog klina mikroglodala (Slika 2.30). Prati se mjerenjem širine pojasa koncentrisanog habanja na leđnoj površini reznog klina mikroglodala (VB). Pri obradi tvrđih materijala, dominira mehanizam abrazivnog habanja, dok kod obrade mekših materijala i izostanka hlađenja i podmazivanja veliki procenat ukupnog habanja otpada na mehanizam adhezivnog habanja, a javlja se i mehanizam difuznog habanja.



Slika 2.30. Nov (a) i pohabani rezni klin mikroglodala (b) [46]

Intenzitet habanja zavisi od tvrdoće i sastava materijala obratka, materijala mikroglodala, brzine rezanja, koraka i uslova hlađenja i podmazivanja zone rezanja (Slika 2.31). Habanje utiče na porast hrapavosti obrađene površine i pad tačnosti obrade. U mikroglodanju, povećanje širine pojasa koncentrisanog habanja reznog klina dovodi do promjene geometrije vrha reznog klina, povećanje poluprečnika zaobljena rezne ivice, te pojavu efekta veličine i prateće fenomene.



Slika 2.31. Uticaj parametara obrade na habanje reznog klina mikroglodala

2.4. OSNOVE MODELIRANJA PROCESA MIKROOBRADE

Upravljanje procesima obrade podržano informacionim tehnologijama je esencijalni element savremene visokoautomatizovane industrijske proizvodnje [8, 11, 137]. Integracija i korišćenje navedenog elementa u pomenutim uslovima je usmjereno ka zadovoljavanju zahtijeva kupaca industrijskih proizvoda. Kako je ranije navedeno, uvođenjem sistema upravljanja procesom obrade u mikroinženjerskim tehnologijama, doprinosi se smanjenju grešaka u proizvodnji, povećanju ekonomičnosti, efikasnosti i produktivnosti procesa obrade. Sistem upravljanja procesom mikroobrade se može zasnivati na nadzoru u realnom vremenu (engl. *on-line monitoring system*) ili predikciji (engl. *off-line monitoring system*) njegovog ponašanja. Prema tome, sistemi upravljanja procesom obrade zahtijevaju opis njegovog ponašanja.

Opis ponašanja procesa mikrorezanja se realizuje kroz njegovu parametrizaciju odnosno utvrđivanje ulaznih i izlaznih parametara procesa, te modeliranju njihovih međusobnih uticaja. Modeliranje se vrši u svrhu kvantifikacije vrijednosti izlaznih parametra i opisa njihovog ponašanja u domenu vremena obrade. Kao ulazni parametri procesa mikroobrade uzimaju se:

- tehnološki parametri procesa mikrorezanja,
- geometrija i svojstva materijala obratka,
- geometrija i svojstva materijala mikroalata,
- načini i uslovi doziranja, te sastav sredstava za hlađenje i podmazivanje (SHP),
- strategije mikrorezanja i
- svojstva mašine alatke.

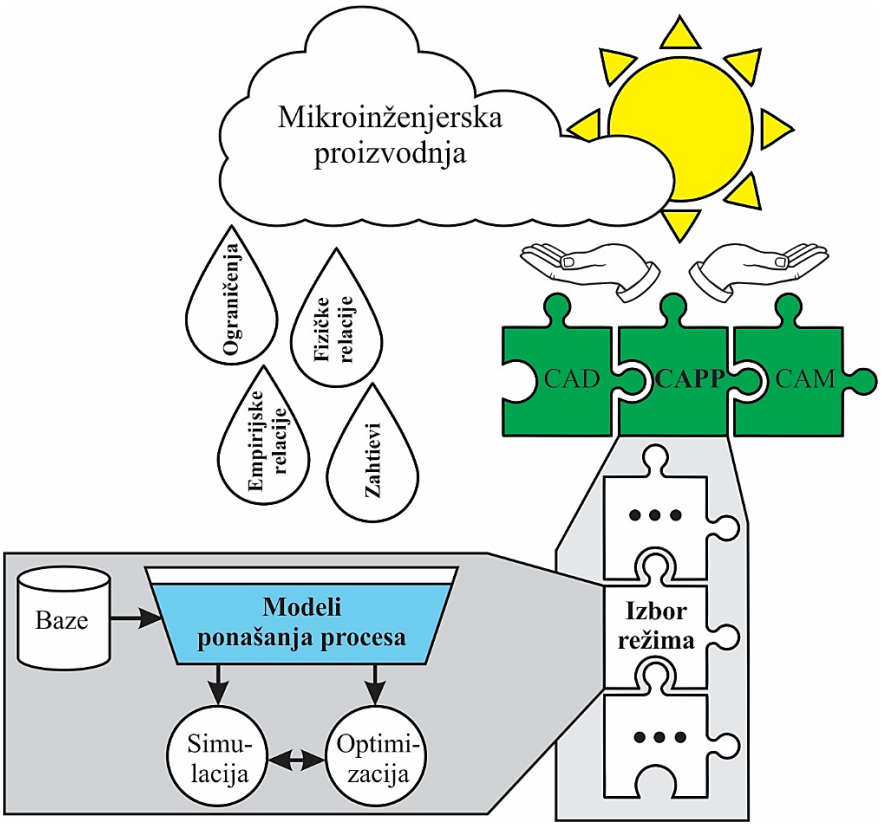
Izlazni parametri proizilaze iz zahtijeva za odgovarajućim kvalitetom i tačnošću obrade, te ekonomičnosti, efikasnosti i produktivnosti procesa obrade. Najčešće se razmatraju:

- sile rezanja,
- habanje alata,
- hrapavost obrađene površine,
- naslage na ivicama obratka,
- temperatura rezanja i
- oblik i tok strugotine.

Međusobni uticaji i zavisnosti ulaznih i izlaznih parametara se opisuju apstraktnim determinističkim modelima, u obliku niza povezanih matematičkih i logičkih funkcija, zapisanih u formalnom obliku [138, 139, 140]. Kao takvi, eksplicitni su za kvantitativno predviđanje vrijednosti izlaznih parametara na osnovu vrijednosti ulaznih parametra procesa mikroobrade, pa se nazivaju i prediktivni modeli. Glavni zadatak prediktivnih modela je da omoguće izračunavanje vrijednosti izlaznih parametara na osnovu vrijednosti ulaznih parametara obrade. Drugi zadatak prediktivnih modela je optimizacija. Optimizacija parametara procesa se zasniva na razumijevanju realnog procesa obrade i njegovog opisa pomoću razvoja eksplicitnog matematičkog modela. Nadalje, ako je pomenuti matematički model procesa obrade pouzdan i tačan, može se očekivati i da rješenja optimizacije budu zadovoljavajuća. Prediktivni modeli su posredno sredstvo za utvrđivanje odgovarajućih vrijednosti ulaznih parametara na osnovu trenutno izmjerenih, graničnih ili kritičnih vrijednosti izlaznih parametara procesa mikroobrade. Postupak utvrđivanja vrijednosti ulaznih parametara može biti rezultat jednostavnog inženjerskog proračuna, odabira iz nekog skupa diskretnih vrijednosti zapisanih u bazi podataka obradnog procesa ili rezultat procesa optimizacije [141, 142].

Sistemi upravljanja procesom mikroobrade zasnovani na monitoringu u realnom vremenu prate izlazne parametre, te automatski vrše korekciju ulaznih parametara korišćenjem modela procesa obrade. Korekcija se vrši na osnovu unaprijed utvrđenih graničnih vrijednosti izlaznih parametara ili procesom optimizacije. Kao se neki parametri nepromjenjivi u toku obrade (npr. svojstva materijala, geometrija alata i sl.), najčešće se koriguju tehnološki parametri. Kod ovog tipa sistema, izlazni parametri se prate direktno (npr. dimenziono mjerenje habanja rezne ivice u toku obrade) ili indirektno (npr. praćenje akustičnog signala u svrhu utvrđivanja habanja alata). Kod sistema upravljanja zasnovanih na predikciji ponašanja procesa mikroobrade, modeli procesa obrade su osnova za simulaciju procesa obrade. U suštini, proces simulacije predstavlja virtuelnu predikciju vrijednosti izlaznih parametara, na osnovu nekih inicijalnih, unaprijed utvrđenih ulaznih parametara. Na osnovu dobijenih rezultata simulacije utvrđuje se valjanost inicijalnih ili odabir novih, odgovarajućih vrijednosti ulaznih parametara.

U pogledu koncepta CIM-a, modeli procesa mikroobrade su njegovi neizostavni elementi [143, 144]. Oni su osnova adaptivnog upravljanja u CAQ sistemima. Mnogo češće su sadržani u fazi izbora režima obrade, kao sastavnog dijela CAPP sistema (Slika 2.32).

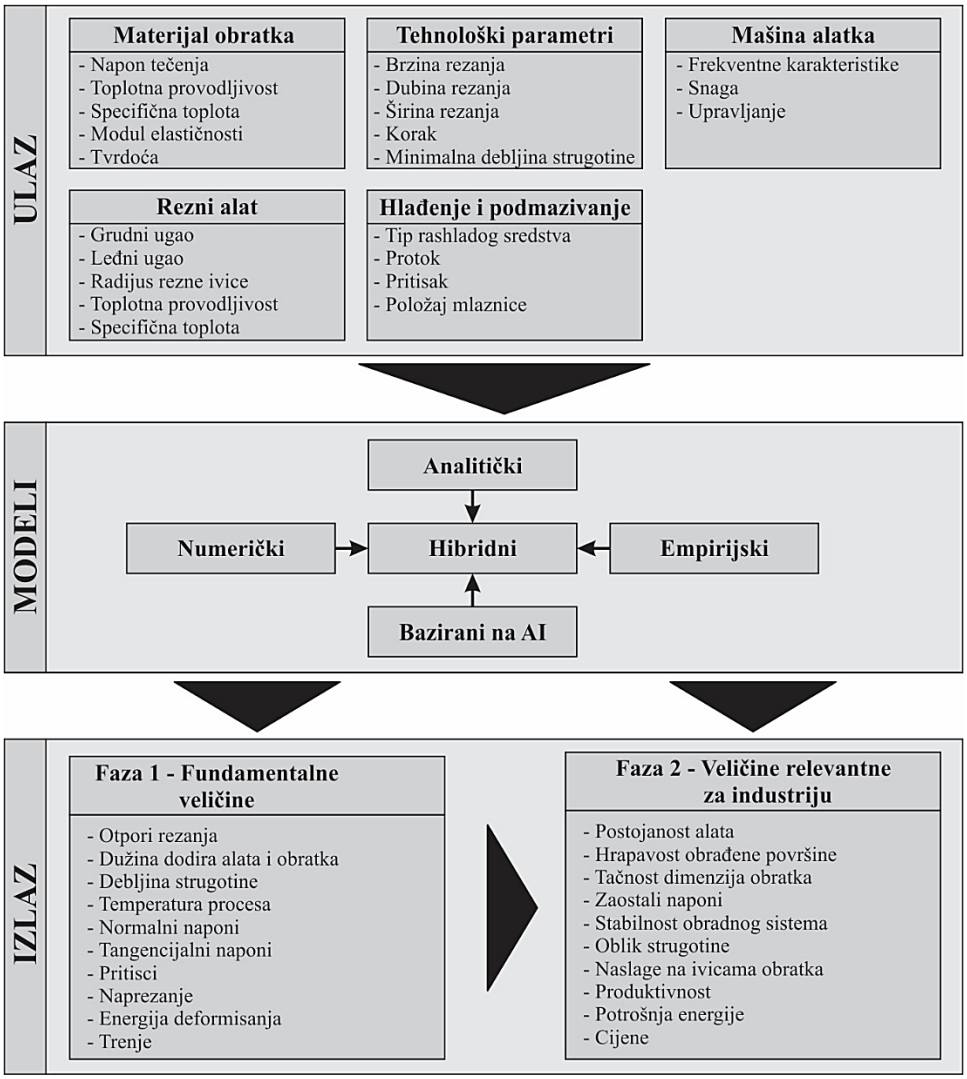


Slika 2.32. Modeliranje procesa mikroobrade u računarom podržanoj proizvodnji

2.4.1. Tehnike modeliranja procesa mikrorezanja

Proces kreiranja modela u mikrorezanju se zasniva na analizi fenomena, mehanici procesa i eksperimentalnim istraživanjima procesa. Kako se u obradi mikrorezanjem javljaju složeni mehanički i termički procesi, metodologija kreiranja modela usmjerena je na razvoj višeparametarskih modela. Njima se obuhvata i opisuje veliki broj spoljašnjih uticaja, definisanih ulaznim parametrima procesa obrade. Veći broj parametara dovodi do povećanja tačnosti modela ali i njihove složenosti, te zahtijeva za obimnim eksperimentalnim istraživanjima i računarskim resursima. Metode modeliranja su brojne, a mogu se razvrstati u nekoliko kategorija.

Prema Ehmannu i ostalima [138], metode modeliranja, odnosno modeli procesa obrade se razvrstavaju u tri grupe, i to: analitičke, eksperimentalne i mehanističko-numeričke metode. Prema toj podjeli analitičke metode se odnose na modeliranje fenomena u zoni nastanka strugotine odnosno stanja u ravni smicanja, koji imaju nelinearni karakter. Mehanističke metode se odnose na modeliranje zasnovano na kinematici procesa, silama rezanja, habanju alata, geometriji, materijalu i ponašanju alata i materijalu. Nadalje, prema navedenoj podjeli u numeričke metode spada: modeliranje zasnovano na metodi konačnih elemenata i modeliranje zasnovano na vještačkoj inteligenciji (engl. *artifical intelligence* - AI).



Slika 2.33. Pristup u modeliranju procesa obrade [139]

Arrazola i ostali [139] su metode modeliranja i modele procesa obrade podijelili na analitičke, empirijske, numeričke, metode zasnovane na vještačkoj inteligenciji i hibridne metode. Prema njima, proces modeliranja se dalje dijeli u dvije povezane faze: modeliranje fundamentalnih veličina i modeliranje veličina relevantnih za industriju (Slika 2.33). Prednosti i nedostaci različitih kategorija modela dati su u tabeli 2.4. U pogledu mikrorezanja prednost se daje numeričkim metodama, jer preuzete analitičke metode često nemaju mogućnost dovoljno dobrog opisa ponašanja materijala obratka na mikronivou.

Tabela 2.4. Poređenje različitih metoda modeliranja i modela u mikrorezanju

	Metodologija	**Primjena**	**Prednosti**	**Nedostaci**
Analitički modeli	Zasnivaju se na fundamentalnim zakonima mehanike, i nauke o materijalima	Uspostavljanje modela koji se zasnivaju na uglu smicanja strugotine	Mogućnost predikcije u širokom rasponu promjenjivih	Komplikovano opisan uticaj efekta veličine. Zahtijevaju kalibrisanje eksperim. mjerenjem
Empirijski modeli	Aproksimativno predviđanje rezultata eksperimentalnih mjerenja	Uspostavljanje modela baziranih na iskustvenom praćenju uticaja ulaznih parametara	Razumljiva i direktna predikcija izlaznih vrijednosti izlaznih parametara	Predikcija rezultata samo u granicama vrijednosti posmatranih ulaznih parametara
Numerički modeli	Predviđanje rezultata na osnovu proučavanja ponašanja diskretnih dijelova obratka i njihovo komponovanje u globalnu strukturu	Uspostavljanje modela koji u obzir uzimaju uticaje ulaznih parametara različitih vrsta i kategorija	Mogućnost predikcije velikog broja različitih izlaznih parametara na osnovu manjeg broja ulaznih parametara	Zahtjev za ogromnim računarskim resursima, te teškoće u primjeni u 3D prostoru
Zasnovani na AI	Predviđanje rezultata na osnovu složenih relacija numeričke prirode.	Uspostavljanje modela koji imaju mogućnost predvidjeti složene uticaje ulaznih parametara	Mogućnost predikcije uticaja velikog broja ulaznih parametara na jedan ili više izlaznih parametara	Zahtjev za obimnim eksperimentalnim mjerenjima radi definisanja uticaja velikog broja ulaznih parametara

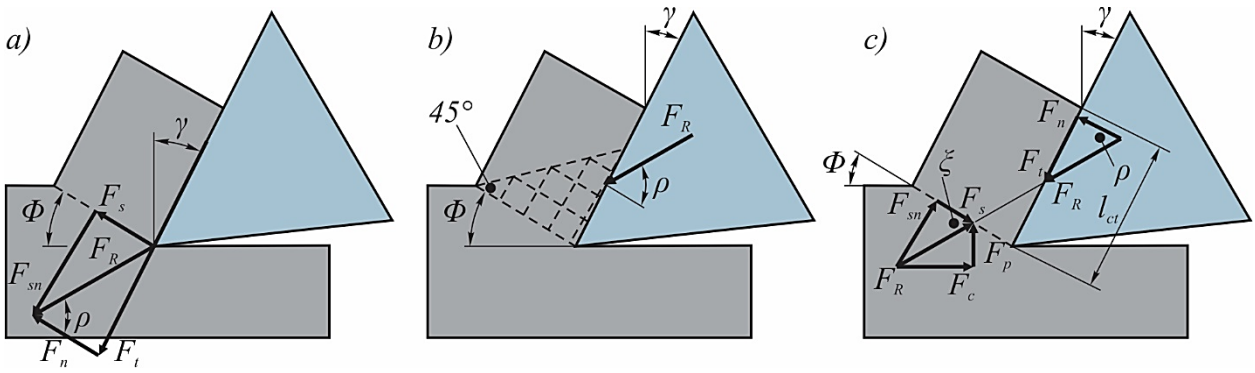
Analitički, mehanistički i empirijski modeli se ne mogu strogo podijeliti, jer je analiza zone obrade i iskustvena zaključivanja istraživača osnova svakog od njih. Na primjer, modeliranje fenomena smicanja materijala obratka, što je fokus analitičkih modela, se ne može izvršiti ukoliko se ono ne poveže sa veličinama kao što su sile rezanja i naponi, koje su fokus mehanističkih modela. Nadalje, numeričke metode i metode zasnovane na AI su sredstvo za rješavanje složenih matematičkih problema koji su prisutni u fizici procesa obrade mikroglodanjem, te ne mogu egzistirati bez osnova analitičkih i mehanističkih modela. U daljem tekstu, date su osnove tehnika modeliranja i opisi najvažnijih pripadajućih modela i algoritama.

2.4.1.1. Analitičko modeliranje

Analitičko (prema drugim podjelama i analitičko i mehanističko) modeliranje se fokusira na opis ponašanja i toka materijala obratka u zoni rezanja uslijed djelovanja reznog klina alata, te posljedica tog procesa, kao što je: pojava naprezanja i napona, trenja klizanja, generisanja toplote, stvaranja naslaga na grudnoj površini alata i habanja alata. Ova tehnika modeliranja se zasniva na primjeni fundamentalnih zakona mehanike, termodinamike, nauke o materijalima i sl. Postoje dva principa u razvoju analitičkih modela u procesima rezanja, a to su:

1. princip minimalne energije i
2. teorija polja linija klizanja.

U mikrorezanju, analitičke metode modeliranja se zasnivaju na metodama koje se koriste u makrorezanju. Ovim modelima se obično opisuje ravan smicanja strugotine, a nadalje i vrijednosti sila rezanja i napona u zoni rezanja. Među najpoznatije modele u makrorezanju spadaju Merchant-Ernst-ov, Lee-Shaffer-ov, Oxley-ev, Zore-ov, Rowe-Spick-ov model i sl., slika 2.34 [137]. Za polazne pretpostavke ovih modela uzeto je sljedeće: rezni klin je idealno oštar, ravan smicanja je idealno tanka, deformacija se prostire u dvije dimenzije i da je materijal obratka idealno homogen i plastičan. Jedna od glavnih pretpostavki je da je tok strugotine kontinualan i pravilan. Zbog polaznih pretpostavki ovaj model nije u potpunosti prihvatljiv za proces mikrorezanja zbog pojave efekta veličine, zaobljenja rezne ivice mikroalata, i sl.



Slika 2.34. Formiranje strugotine po: a) Merchant-Ernst, b) Lee-Shaffer i c) Oxley modelu

Merchant-Ernst-ov model se zasniva se na principu minimalne energije pri rezanju. U izvođenjima i poboljšanjima ovog modela, napon u ravni smicanja je definisan kao varijabla zavisna od tangencijalnog i normalnog napona, tako da je ugao smicanja strugotine (Φ) dat sljedećom zavisnošću:

$$2 \cdot \Phi + \rho - \gamma = C_m \tag{2.40}$$

pri čemu je C_m konstanta koja zavisi od materijala obratka i koja se dobija eksperimentalnim putem, ρ ugao trenja u kontaktu alata i strugotine i γ grudni ugao alata.

Lee-Shaffer-ov model se bazira na teoriji polja linija klizanja odnosno skupu međusobno upravnih linija na kojima se javljaju maksimalni smičući naponi i klizanje materijala. Dodatna početna pretpostavka pri modeliranju je da je uticaj inercije uslijed naglog deformisanja materijala zanemariv. Problem je postavljen u dvodimenzionalnom prostoru. U suštini, realno je da se

problem procesa deformisanja strugotine posmatra kao trodimenzionalni, tako da linije klizanja predstavljaju zapravo ravni klizanja. Analizom polja klizanja dolazi se do formulacije, slične prethodno pomenutom modelu, koja glasi:

$$\Phi + \rho - \gamma = \frac{\pi}{4} \tag{2.41}$$

gdje je Φ ugao smicanja strugotine, ugao trenja u kontaktu alata i strugotine i γ grudini ugao alata.

Ovaj model je prihvatljiv u slučajevima velikih vrijednosti grudnog ugla i malih vrijednosti ugla trenja. U slučaju negativnog grudnog ugla, ugao ravni smicanja poprima vrijednosti bliske nuli, što je praktično nemoguće.

Oxley-ev model se bazira na definisanju zone primarnog deformisanja materijala obratka koje se javlja u granicama koje su paralelne ravni smicanja. Zona sekundarnog deformisanja je definisana oko kontakta alata i materijala obratka, koja uzrokuje intenzivno trenje i kontaktni pritisak. Na osnovu konstantnosti napona duž ravni smicanja strugotine, dobija se jednakost:

$$\mathrm{tg}(\xi) = 1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \Phi\right) - C_O \cdot n_O \tag{2.42}$$

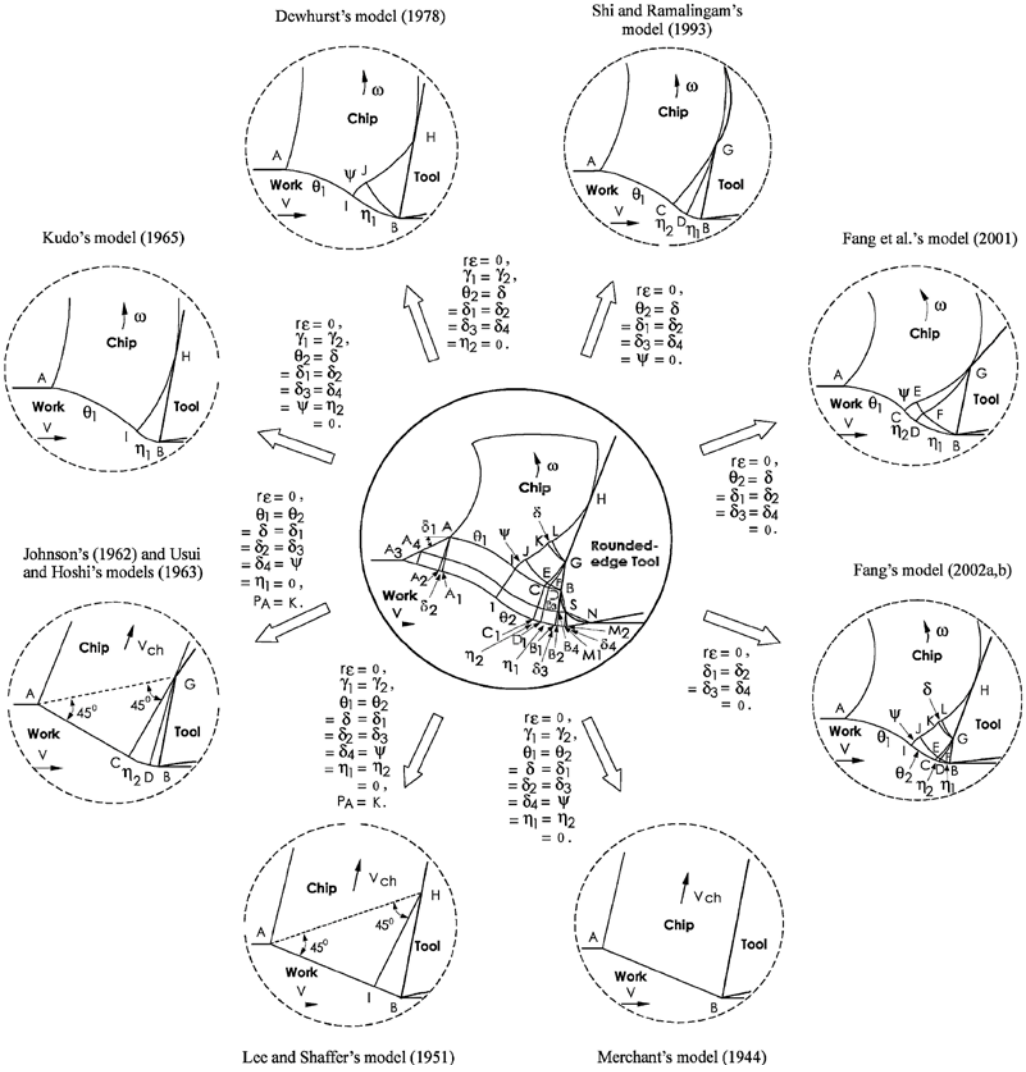
gdje je ξ ugao između ravni smicanja strugotine i rezultujuće sile rezanja, Φ ugao smicanja strugotine i C_O i n_O konstante modela koje se odnose na karakteristike materijala obratka.

Zona sekundarnog deformisanja je opisana dužinom dodira strugotine i grudne površine alata, te dužinom dodira strugotine i grudne površine (l_{ct}) na kojoj djeluje maksimalni smičući napon. U ovom analitičkom modelu u obzir je uzeto očvršćavanje materijala obratka uslijed deformacije kao i omekšavanje materijala uslijed djelovanja generisane toplote. Ovi uticaji su obuhvaćeni koeficijentom C_o koji figuriše u empirijskom obrascu za napon u materijalu obratka, te eksponentom n_o, a kojim se opisuje očvršćavanje materijala uslijed deformacije.

Analitički modeli triboloških pojava su jako složeni kao i realni tribološki procesi u zoni formiranja strugotine pri mikrorezanju. Najčešće se zasnivaju na Coulumb-ovoj jednačini, odnosno jednakosti proizvoda normalnog napona i koeficijenta trenja sa tangencijalnim naponom. Jedan od najpoznatijih modela je ***Zorev-ov model***, kojim se opisuje promjenljivost ugla smicanja strugotine, dužina dodira strugotine i alata (l_{ct}) i naponi uslijed trenja klizanja strugotine i smicanja strugotine. ***Rowe-Spick-ov*** je analitički model zasnovan na empirijskoj definiciji dužine dodira strugotine i alata. Modelom se definiše veza između tehnoloških parametara, uglova alata i dužine dodira strugotine i alata sa uglom smicanja strugotine.

Fang-ov model zone smicanja strugotine se zasniva na polju linija klizanja [112]. Naziva se i univerzalni jer se iz njega može, dobiti čitav niz ranije uspostavljenih modela (Slika 2.35). U modelu je zadovoljen zahtjev za ravnotežom naponskih stanja i zapreminske konstantnosti toka strugotine. Modelom se definiše 27 regiona u zoni primarnog i sekundarnog deformisanja materijala obratka. Regioni su razvrstani u grupe, definisane prema ponašanju materijala obratka. Zona primarnog deformisanja je definisana pomoću granica koje su paralelne samoj ravni smicanja strugotine. Integracija regiona deformisanja obavljena je Dewhurst-Collins-ovom matričnom tehnikom za numeričko rješavanje problema klizanja materijala. Fang-ovim modelom su obuhvaćeni i opisani kontakt alata i strugotine na grudnoj i leđnoj površini, međusobni uticaji zona deformisanja, otvrdnjavanje površine materijala uslijed deformisanja, omekšavanje materijala uslijed djelovanja generisane toplote, i sl. Pored nabrojanih, modelom je obuhvaćen i uticaj

zaobljenja rezne ivice alata te efekat veličine, što ovaj analitički model svrstava u grupu malobrojnih analitičkih i mehanističkih modela koji su primjenjivi u mikrorezanju.



Slika 2.35. Zona formiranja strugotine po Fang-ovom univerzalnom modelu [112]

Waldort-ov model je analitičko-mehanistički model za definiciju rezultujućih sila rezanja i napona pri stvaranju strugotine, zasnovan na silama uslijed gnječenja, smicanja i trenja materijala u zoni rezanja, razvijen za proces makrorezanja [145]. Modelom se opisuje fenomen izdizanja materijala na neobrađenoj površini, a ispred alata, te pojave statičnog materijala obratka blizu vrha reznog klina. Modelom je data dužina dodira alata i materijala obratka. Model uzima u obzir efekat veličine, ali ne i uticaj strukture materijala u slučaju velikog odnosa poluprečnika zaobljenja rezne ivice alata i debljine strugotine.

Izvjestan broj modela koji se zasnivaju na analizi zone smicanja i mehanici procesa mikroglodanja, je opisan u ranije datom pregledu literature. Pored naprijed pomenutih, u mikroglodanju se često koriste ranije razvijeni analitičko-mehanistički modeli sila rezanja, a koji sadrže empirijske obrasce, kao što su Armarego-ov model, DeVor-ov model, Altintas-ov model i dr. U literaturi je uočen nedostatak tačnih i pouzdanih analitičkih modela vezanih za formiranje strugotine u mikrorezanju, a veliki dio primijenjenih modela je preuzet iz makroobrade. Razlog tome je složenost samog procesa mikrorezanja, efekat veličine, uticaj strukture i ponašanja materijala na mikronivou, te ograničenja u eksperimentalnim mjerenjima.

2.4.1.2. Numeričko modeliranje

U mikrorezanju, veliki akcenat je stavljen na numeričke metode modeliranja, jer omogućavaju opis ponašanja fundamentalnih, ali i veličina relevantnih za industriju. Zasnivaju se na metodologiji numeričke podjele sistema na jedinične dijelove, njihovog opisa i integracije u globalnu strukturu. Zbog ovih osobina omogućavaju opis ponašanja materijala na kristalnom i molekularnom nivou, a njima se mogu uključiti mnogi uticaji koje je bilo teško opisati analitičkim i mehanističkim metodama modeliranja. Realizuju se na računarima sa visokim performansama, kako bi se relativno brzo obavio veliki broj numeričkih operacija. Kao tehnike numeričkog modeliranja u mikrorezanju najčešće se koriste:

1. metod konačnih elemenata (MKE),
2. simulacija dinamike molekula (engl. *molecular dynamic simulation* - MDS) i
3. metode višestrukosti (engl. *multiscale simulation* - MS).

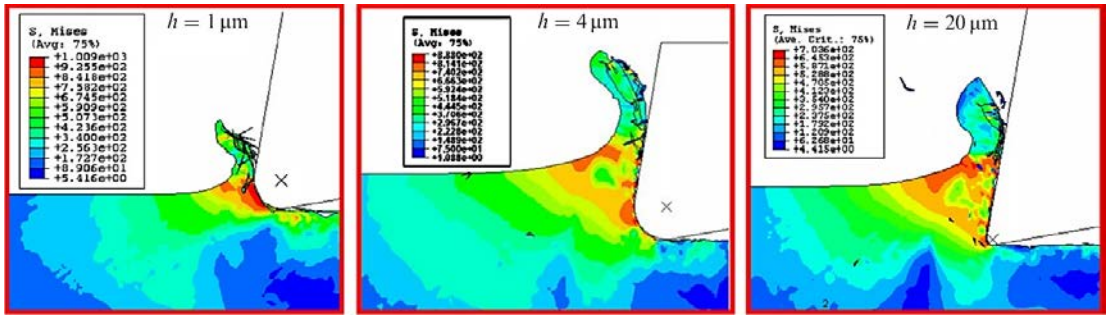
Metod konačnih elemenata se koristi za modeliranje deformacija i napona u materijalu nastalih uslijed opterećenja, što daje mogućnost korišćenja u uspostavi modela funkcija obradivosti. Uopšteno, ova tehnika se zasniva na zamjeni kontinualne strukture obratka i alata sa diskretnom strukturom sastavljenom od konačnog broja sličnih elemenata jednostavnog oblika [146]. Konačni elementi su najčešće u obliku trougla ili četvorougla povezanih u globalnu strukturu preko čvornih tačaka, u kojima se raspoređuju i spoljašnja opterećenja. Pomjeranje čvorova je osnova za proračun deformacije strukture, pri čemu se uzima osnovna statička jednačina:

$$\{F\} = [K] \cdot \{u\} \tag{2.43}$$

gdje su $\{F\}$ vektor spoljašnjih opterećenja, $[K]$ ukupna matrica krutosti strukture i $\{u\}$ vektor pomjeranja čvorova.

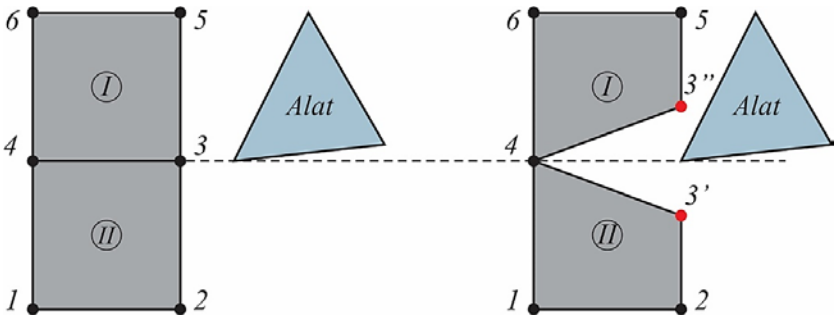
Ukupna matrica krutosti strukture zavisi od oblika i veličine objekata, materijala i vrste konačnih elemenata koji su primijenjeni u diskretizaciji njihove strukture. Ponašanje jednog konačnog elementa pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja može se izvesti za svaki tip konačnog elemenata, i to: direktnim pristupom baziranom na analizi krutosti, varijacionim pristupom, pristupom na principu energetskog balansa itd.

Procesi u zoni rezanja imaju dinamički karakter, tok strugotine je teško predvidiv, a napon tečenja u materijalu se mijenja uslijed velike deformacije i generisane toplote (Slika 2.36). Model baziran na MKE se zasniva na praćenju niza vremenski diskretnih stanja mreže konačnih elemenata. Informacije o njenim prethodnim stanjima, poput pomjeranja čvorova uslijed plastične deformacije ili loma materijala, prenose se i koriste u definisanju sljedećeg stanja mreže.



Slika 2.36. Simulacija formiranja strugotine pri mikrorezanju pomoću MKE [83]

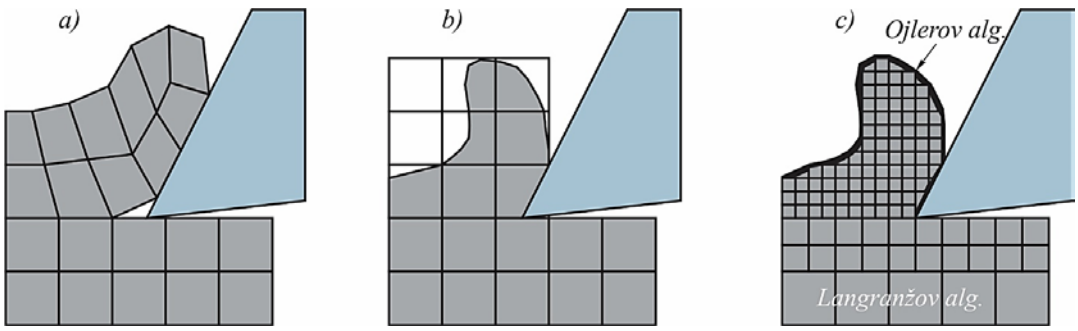
Praćenje navedenih promjena uslovljenih tečenjem materijala obratka najčešće se obavlja pomoću Lagrange-ovog algoritma, Euler-ovog algoritma ili njihove kombinacije. Lagrange-ovim algoritmom, čvorovi mreže konačnih elemenata se klasično vežu za materijal obratka, nakon čega se proračunavaju pomjeranja njenih čvorova i vremenski prate. Algoritmom je definisan proces razdvajanja konačnih elemenata (Slika 2.37). Razdvajanje elemenata može biti geometrijsko (uslijed pomjeranja čvorova klinom alata), ili fizikalno (kada napon u elementu pređe vrijednost zatezne čvrstoće materijala). Navedeni algoritam omogućava laku integraciju nasljednih stanja, dok se njegova slabost ogleda u nemogućnosti tačnog predviđanja rezultata zbog velikih promjena oblika konačnih elemenata, kojim se drastično mijenjaju njihova svojstva. Zbog toga, neprestano se mora provoditi proces ponovnog formiranja mreže (engl. *Remeshing*), što za posljedicu ima ogromno opterećenje računarskih resursa i produžetak vremena numeričkog proračuna.



Slika 2.37. Princip razdvajanja konačnih elemenata [147]

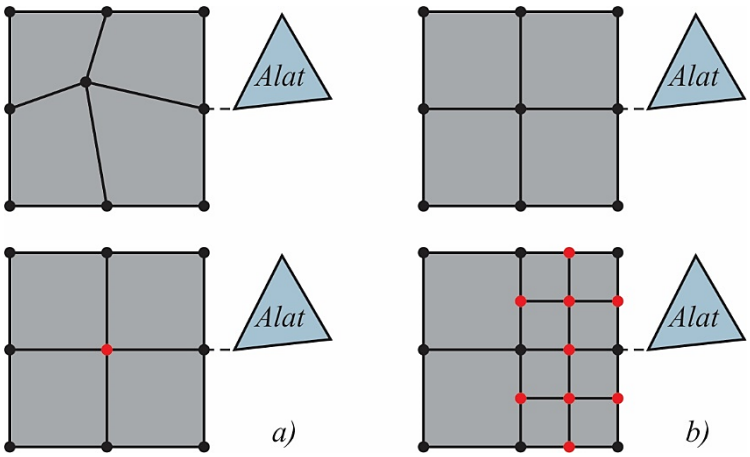
Euler-ovim algoritmom, čvorovi mreže konačnih elemenata su fiksirani u prostoru, dok se tok materijala obratka smatra fluidnim. Pri tome, prate se brzine čestica materijala obratka u odnosu na fiksne čvorove, u istom trenutku vremena. Ovaj algoritam omogućava lakše praćenje velikih deformacija, nema promjena topologije mreže konačnih elemenata, dok mu se slabost ogleda u poteškoćama pri integraciji nasljednih stanja. Takođe, Euler-ov algoritam zahtijeva konstantne granične uslove na dodiru grudne površine alata i materijala obratka, što ne odgovara realnim uslovima.

Kombinacija Lagrange-ovog i Euler-ovog algoritma je poznata kao arbitražna Lagrange-Euler (engl. *Arbitrary Lagrangien Eulerian* - ALE) tehnika (Slika 2.38). Vremenski posmatrano, mreža konačnih elemenata nije prostorno fiksna niti je vezana za materijal obratka. U jednoj fazi, mreža prati pomjeranje materijala pri čemu se koristi Lagrange-ov algoritam radi definisanja trenutnih pomjeranja i napona. Zatim slijedi faza odgovarajuće relokacije, te praćenje brzine čestica materijala korišćenjem Euler-ovog algoritma. Relokacija se najčešće vrši ujednačavanjem mreže (engl. *Mesh smoothing*) (Slika 2.39 a).



Slika 2.38. Interpretacija Lagrange-ove (a), Euler-ove (b) i ALE tehnike (c) [86, 147]

Euler-ov algoritam se koristi za predviđanje spoljašnjih granica strugotine, a Lagrange-ov za kretanje materijala unutar granica. ALE tehnikom se izbjegavaju velike deformacije konačnih elemenata i proces se odvija bez zahtijevnog ponovnog formiranja mreže. ALE tehnika sadrži algoritam ugušćavanja mreže što za posljedicu ima povećanje tačnosti rezultata modela, ali i trošenje računarskih resursa, te se provodi samo u ciljanim područjima strukture (Slika 3.6. b).



Slika 2.39. Proces ujednačavanja (a) i ugušćavanja (b) mreže konačnih elemenata [147]

Posebna pažnja u ovoj metodi se posvjećuje modeliranju ponašanja materijala u toku mikrorezanja (engl. *material behavior modelling*). Najčešće korišćeni modeli za ponašanje materijala obratka odnose se na opis promjene vrijednosti napona tečenja materijala uslijed uticaja deformacije i generisane toplote (Tabela 2.5). Dati modeli najčešće potiču iz analitičkih metoda modeliranja procesa formiranja strugotine. Konstante, koeficijenti i eksponenti u modelima se kalibrišu eksperimentalnim mjerenjima. U modelima mikrorezanja, koji su zasnovani na MKE-u, zahtijeva se i opis uticaja složene kristalne strukture materijala, što se rješava tako što se pojedinim konačnim elementima dodjele osobine koje imaju različite faze u materijalu. Međutim, u datim modelima je izuzetno teško opisati međufazne odnose u nehomogenoj kristalnoj strukturi.

Tabela 2.5. Modeli ponašanja napona materijala obratka

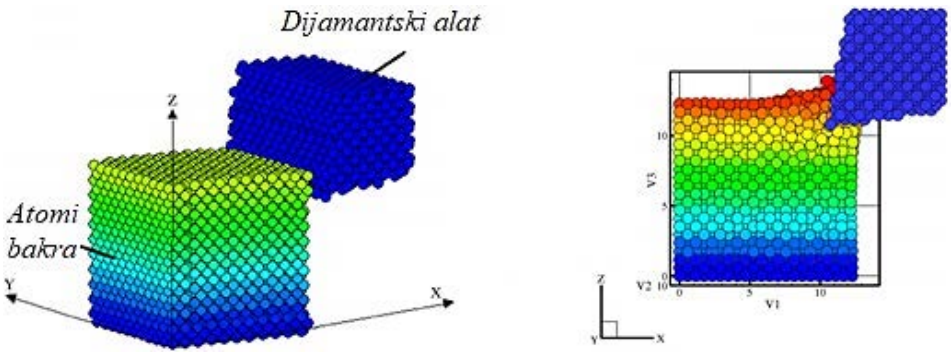
Naziv	Vrijednost napona tečenja
Oxley	$\sigma_T = \sigma_{(\varepsilon=1)} \cdot \varepsilon^{n_{OXL}}$
Johnson-Cook	$\sigma_T = \left(A_{JC} + B_{JC} \cdot \varepsilon^{n_{JC}}\right) \cdot \left(1 + C \cdot ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_o}{T_m - T_o}\right)^{m_{JC}}\right)$
Zerilli-Armstrong	$\sigma_T = C_{ZA(0)} + C_{ZA(1)} \cdot e^{\left(-C_{ZA(3)} \cdot T + C_{ZA(4)} \cdot T \cdot ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)} + C_{ZA(5)} \cdot \varepsilon^{n_{ZA}}$
Bauman-Chisea-Johnson	$\sigma_T = B_{BCJ}(T) \cdot \left(C_{BCJ} \cdot \varepsilon^{n_{BCJ}} + F_{BCJ}(HRc) + G_{BCJ}(HRc) \cdot \varepsilon\right) \cdot \left[1 + \left(ln(\dot{\varepsilon})^{m_{BCJ}} - A_{BCJ}\right)\right]$
Marushic	$\sigma_T = \sigma_{Tr} \cdot M(T) \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{n_{MAR}}}$

Simulacija dinamike molekula se koristi za modeliranje ponašanja materijala na molekularnom nivou, koji se bazira se na principu sopstvenog atomskog modela (engl. *embeded atom model* - EAM) [90]. Međumolekularna interakcija se definiše pomoću Morse-ove funkcije potencijalne energije između atoma (E_{pa}), koja se zasniva na principu vibracionog ponašanja molekula, a glasi:

$$E_{pa}(r_{ij}) = D_a \cdot \left(e^{-2 \cdot a_{EP} \cdot (r_{ij} - r_0)} - 2 \cdot e^{-a_{EP} \cdot (r_{ij} - r_0)}\right) \tag{2.44}$$

gdje je $E_{pa}(r_{ij})$ potencijalna energija između molekula i i j, D_a dubina molekularnog ponora koja opisuje kohezionu energiju između molekula, a_{EP} konstanta sile na dnu molekularnog energetskog ponora, a koji odgovara modulu elastičnosti, r_0 razdaljina između molekula u ravnoteži, r_{ij} rastojanje između i i j molekula.

U mikrorezanju, procedura modeliranja se sastoji od podjele kontinuuma materijala obratka na odgovarajuće male jedinice zapremine odnosno molekule, iste podjele kontinuuma materijala alata, definisanje graničnih uslova i modela ponašanja molekula na granicama, te definisanje međumolekularnih interakcija unutar struktura (Slika 2.40). Tokom simulacije, prate se sile između molekula i pomjeranja molekula, što se koristiti za modeliranje funkcija sila rezanja, trenja, habanja alata, naslaga na alatu i naslaga na ivicama obratka [90, 148, 149, 150].



Slika 2.40. Model mikrorezanja baziran na simulaciji dinamike molekula [149]

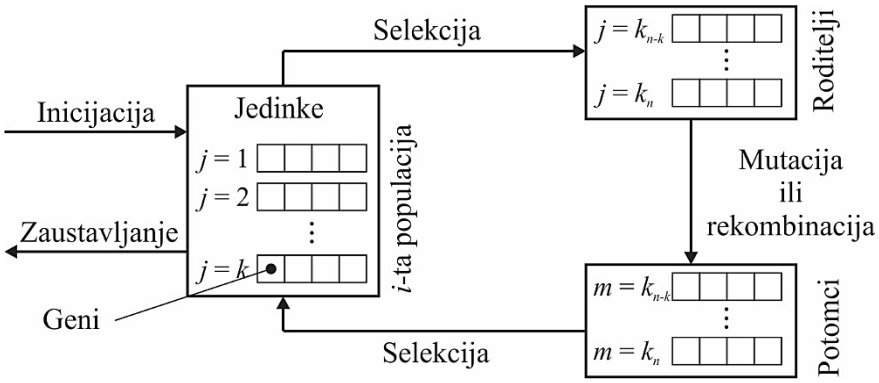
Glavni nedostatak ove tehnike numeričkog modeliranja procesa mikroobrade je dimenziono ograničenje koje se rasprostire u nanometarskim razmjerama. Nije podobna za modeliranje procesa mikrorezanja nehomogenih i neizotropnih materijala, kod kojih je izražen lom po kristalnim međufazama. Rezni klin se ne može aproksimirati kao idealno oštar, te se ova tehnika više primjenjuje u modeliranju procesa u SPTD tehnologijama.

Metod višestrukosti predstavlja kombinaciju MDS i MKE metode u procesu modeliranja mikrorezanja [151, 152]. Metod višestrukosti se uvodi radi izbjegavanja nedostatka MDS tehnike u pogledu dimenzionih ograničenja, nedostataka MKE u pogledu distorzije konačnih elemenata, te teškoća u modeliranju svojstava i ponašanja materijala obratka. Ova metoda omogućava tačniju predikciju napona u materijalu obratka i morfologije strugotine na nanonivou i mikronivou [153]. U modeliranju mikroprocesa, koriste se metode: FEAt (engl. *Finite element-atomistic analysis*) metod, QC (engl. *Quasicontiniuum*) metod, CADD (engl. *Coupled atomistic and discrete dislocation*) metod i dr. Kod ovih metoda postoji mogućnost izvršavanja numeričkih proračuna na više povezanih računarskih jedinica paralelno, što ubrzava simulaciju i rasterećuje računarske resurse.

2.4.1.3. Modeliranje zasnovano na vještačkoj inteligenciji

Vještačka inteligencija se predstavlja kao naučna disciplina koja se bavi interpretacijom ljudskog učenja, razmišljanja i zaključivanja, te njegovom primjenom u rješavanju problema u drugim naučnim disciplinama. Pojave i fenomene u procesima obrade nije uvijek moguće objasniti i opisati fundamentalnim zakonima matematike i fizike. Zbog toga, u svrhu opisa procesa mogu se koristiti metode vještačke inteligencije, čija osnove mogu biti algoritamske i nealgoritamske prirode. Metoda vještačke inteligencije je mnogo, a zasnivaju se na naukama kao što su biologija, fizika, psihologija, sociologija i sl. U modeliranju industrijskih procesa najčešće se koriste metode kao što su: genetski algoritmi, adaptivne memorije, fazi-logika, ekspertni sistemi, vještačke neuronske mreže, te njihove kombinacije [154, 155, 156].

Genetski algoritmi (engl. *genetic algorithms* - GA) su nastali na bazi prirodne selekcije živih organizama, odnosno njihove sposobnosti prilagođavanja životnim uslovima kroz buduće generacije. Metod koristi princip prirodnog ukrštanja gena roditelja radi dobijanja potomaka koji su genetski više prilagođeniji pomenutim uslovima, te sprječavanju razmnožavanja i odumiranja loših jedinki [157]. Na slici 2.41 je prikazana šema genetskog algoritma, sa pripadajućim elementima. Genetske algoritme koji se primjenjuju u modeliranju i optimizaciji procesa obrade, karakterišu sljedeći elementi: inicijalna populacija, mehanizam odabira roditelja, mehanizam ukrštanja roditelja, mehanizam odabira podobnih jedinki, nova populacije i uslov zaustavljanja.

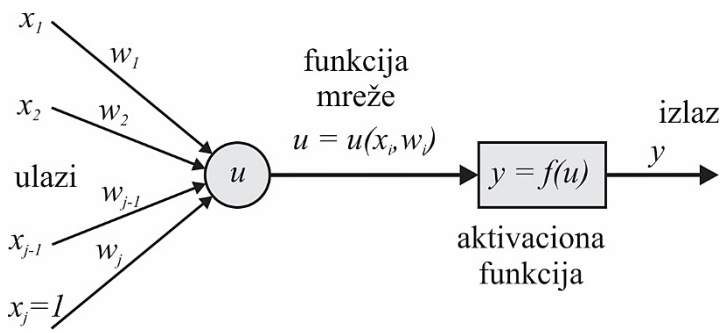


Slika 2.41. Šema genetskog algoritma [157]

Populacija predstavlja skup sa definisanim brojem jedinki, koji su opisani odgovarajućim brojem gena. Nakon toga, definiše se funkcija čije koeficijente i eksponente treba odrediti, ili pak neka poznata funkcija obradivosti za koju se želi naći optimum. S tim u vezi, broj gena jedinke direktno zavisi od broja koeficijenata odnosno broja ulaznih parametara funkcije obradivosti. Geni se najčešće reprezentuju binarnim, prirodnim ili realnim brojevima. Iz skupa se, pomoću neke zavisnosti, odabiru one jedinke čiji geni daju približniju aproksimaciju željene vrijednosti, te dalje ukrštaju radi stvaranja bolje kombinacije gena. Stvaranje novih jedinki, sada roditelja, se odvija kroz proces mutacije ili rekombinacije. Mutacija je proces stvaranja nove, prilagođenije jedinke, prilagođavanjem gena samo jednog roditelja. Može se vršiti nasumičnim odabirom, umetanjem, permutacijom, invertovanjem i sličnim postupcima utvrđivanja nove vrijednosti gena. Rekombinacija je proces stvaranja nove, prilagođenije, jedinke na osnovu ukrštanja dva roditelja. Nadalje, ponavlja se proces odabira podobnih jedinki postupcima proporcionalne podobnosti, turnirskom selekcijom, selekcijom po rangu, selekcijom po dobi i sl.

Funkcije obradivosti, kao što su hrapavost obrađene površine, habanje alata, sile rezanja i dr. mogu se modelirati nalaženjem polinominalnih koeficijenata za poznati oblik funkcije. GA su jako podobni pri nalaženju optimalnih vrijednosti ulaznih parametara. Pri tome, funkcije obradivosti moraju biti poznate, a algoritmom se traži njihov minimum ili maksimum, odnosno optimalna kombinacija ulaznih vrijednosti parametara obrade [158, 159].

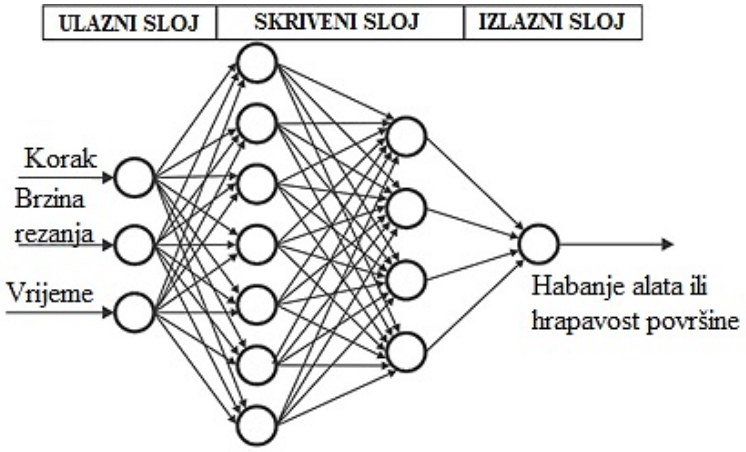
Vještačke neuronske mreže (engl. *artificial neural network* - ANN) predstavljaju računarsku interpretaciju rada ljudskog mozga [160]. Ljudski mozak se sastoji od velikog broja međusobno povezanih živčanih stanica - neurona. Međusobno djelovanje bioloških neurona određeno je pripadajućom jačinom veze, koja se mijenja procesom učenja. Slično tome, ANN se sastoje od velikog broja vještačkih neurona, pri čemu se vezama između pojedinih neurona dodjeljuju odgovarajući težinski koeficijenti. Vještački neuron posjeduje više ulaznih vrijednosti i jednu vrijednost izlaza, koja je produkt polinomske kombinacije vrijednosti ulaza i odgovarajućih težinskih koeficijenata (Slika 2.42). Način kombinovanja ulaza i težinskih koeficijenata se naziva funkcijom mreže, što je jedna od osnovnih svojstava ANN. Kao funkcije mreže mogu se koristiti linerane funkcije, linearne funkcije drugog reda ili funkcije proizvoda. Zbog različitog oblika i ranga izlaznih vrijednosti uvedena je aktivaciona funkcija, koja daje izlaz u odgovarajućem domenu vrijednosti. Zbog navedenih osobina, ANN imaju svojstvo prilagođavanja i nelinearnosti, te se mogu koristiti u modeliranju procesa kod kojih nije poznat oblik funkcije ponašanja, a poznato je da je karakteriše nelinearnost.



Slika 2.42. Model vještačkog neurona [160]

Vještačka neuronska mreža ima složenu topologiju koja se predstavlja u obliku orijentisanog grafa. Čvorovi i veze u grafu predstavljaju neurone, a smjer prostiranja signala je određen smjerom veza. ANN se razlikuju u topologiji, tako da postoje aciklične, koje nemaju povratnu spregu, ili ciklične, koje imaju povratnu spregu, i koje se koriste pri modeliranju nelinearnih dinamičkih sistema. U zavisnosti od povezanosti neurona, mogu biti potpune ili nepotpune. Razlikuju se jednoslojne i višeslojne ANN. Višeslojne mreže se sastoje iz ulaznog, najmanje jednog skrivenog i izlaznog sloja, sa odgovarajućim brojem neurona. Izlazne vrijednosti jednog sloja su ulazne vrijednosti sljedećeg sloja.

Primjenom ANN moguće je opisati izrazito složene i nelinearne funkcije obradivosti, kakve su funkcije koje, u prvom redu, opisuju habanje mikroalata, toplotne pojave u zoni obrade i hrapavost obrađene površine [97, 161]. Na slici 2.43 je prikazana ANN korišćena za modeliranje habanja alata i hrapavosti obrađene površine pri struganju teškoobradivog čelika. Kao ulazni parametri korišćeni su korak, brzina rezanja i vrijeme obrade [162]. Broj ulaza odgovara broju ulaznih parametara, dok broj izlaza odgovara broju izlaznih parametara odnosno funkcija obradivosti.



Slika 2.43. Topologija ANN korišćene za modeliranje habanja i hrapavosti obrađene površine [162]

U suštini, učenje mreže predstavlja određivanje vrijednosti težinskih koeficijenata odnosno proces promjene njihovih inicijalnih vrijednosti na konačnih vrijednosti koje daje odgovarajuće vrijednosti izlaza. Učenje se odvija po određenom procedurom koja uključuje algoritam učenja, i odvija se određenom u broju epoha učenja. Najpoznatiji algoritmi učenja su: učenje korekcijom greške, kompetetivno učenje, Hebb-ovo učenje, Boltzman-ovo učenje, Thorndiek-ovo učenje itd. Neki od algoritama učenja korekcijom greške su: Gauss-Newton-ov algoritam, Levenberg-Marquardt-ov algoritam, Vidrou-Hof-ov algoritam, metod najmanjih kvadrata, najčešće primjenjivani u oblasti modeliranja procesa obrade rezanjem - algoritam učenja prostiranjem greške unazad (engl. *back-propagation algorithm*), te hibridne tehnike učenja. Algoritam učenja prostiranjem greške unazad se zasniva na metodi najbržeg spusta odnosno gradijenta funkcije greške radi nalaženja njenog globalnog minimuma. Učenje se zaustavlja kada dobijena izlazna vrijednost približna željenoj izlaznoj vrijednosti. Vektorski obrazac za korekciju težinskih koeficijenta n-to neurona u k-tom skrivenom sloju:

$$W_{n(novo)} = W_{n(staro)} + \mu_{ANN} \cdot \delta_{ANN} \cdot V_{ANN} \cdot [O_h \cdot (1 - O_h)] \cdot X_{kp} \tag{2.45}$$

gdje je: $W_{n(novo)}$ vektor novih vrijednosti težinskih koeficijenta, $W_{n(staro)}$ vektor prethodnih vrijednosti težinskih koeficijenta, μ_{ANN} koeficijent učenja, δ_{ANN} delta pravilo učenja koje proizilazi iz odnosa dobijene i željene vrijednosti izlaza, V_{ANN} vektor težinskih koeficijenata izlaznog neurona, O_h vektor izlaza iz neurona u skrivenom sloju i X_{kp} vrijednost p-tog elementa vektora ulaznih vrijednosti.

Mnogobrojne pogodnosti naprijed opisanih metoda, dovode do njihove široke upotrebe u modeliranju procesa obrade rezanjem, u odnosu na druge tehnike zasnovane na vještačkoj inteligenciji. Pogodnost se ogleda u mogućnosti rada sa velikim broja numeričkih i nenumeričkih podataka različite prirode i ranga vrijednosti, te njihovom uniformnom matematičkom interpretacijom. Efikasne su u traženju i uspostavljanju korelacija između ulaznih i izlaznih parametara, kod kojih je interakcija relativno nejasna. Pored toga, matematički su pogodne za korišćenje u procesu traženja optimalnih parametara obrade.

2.4.1.4. Empirijsko modeliranje

Empirijsko modeliranje se zasniva na pretpostavkama ponašanja procesa obrade odnosno pretpostavkama načina uticaja ulaznih parametara na izlazne parametre procesa obrade. Empirijsko modeliranje je način modeliranja, koje se u potpunosti oslanja na znanje dobijeno eksperimentalnim istraživanjem, pri čemu se koriste samo osnovna teoretska znanja o posmatranom procesu obrade. Ovaj metod modeliranja procesa obrade je najčešće sastavni dio ostalih tehnika modeliranja i nemoguće ga je izdvojiti od njih.

Jedan od najstarijih i industrijski najrasprostranjenijih načina definisanja uticaja ulaznih parametara na izlazne parametre procesa obrade je varijacija jedne varijable u vremenu praćenja procesa (engl. *one variable at a time* - OVAT). Ovaj metod često zahtijeva dugotrajna eksperimentalna istraživanja, složenu procedura mjerenja, a uticaj prethodnog teoretskog znanja i intuicije istraživača je veliki. Uvođenjem faktornog dizajna eksperimenta od strane R.A. Fishera [163], razvila se metoda modeliranja zasnovana na teoriji planiranja eksperimenta (engl. *design of experiments* - DOE). Ova metoda koristi matematičku statistiku u svrhu određivanja signifikantnosti ulaznih parametara obrade, uspostavu funkcionalnih zavisnosti između ulaznih i izlaznih parametara obrade, procjenu valjanosti matematičkih modela, traženje maksimuma ili minimuma funkcija obradivosti itd. [164]. Shodno tome, empirijsko modeliranje se provodi kroz uspostavljanje opšte forme modela i primjene DOE-a.

U empirijskom modeliranju, polazi se od činjenice da je funkcionalna zavisnost između izlaznih i ulaznih parametara procesa obrade u suštini nepoznata, pa je njezin generalni oblik:

$$\bar{y} = f(\mathbf{p}, \mathbf{x}) + Er \tag{2.46}$$

gdje je $\bar{y}$ vrijednost dobijena modelom, $\mathbf{p}$ matrica koeficijenata modela, $\mathbf{x}$ vektor varijabli odnosno ulaznih parametara i Er slučajna greška.

Funkcionalna zavisnost između izlaznih i ulaznih parametara procesa obrade može da se pretpostavi i definiše u obliku regresione, eksponencijalne, logaritamske ili slične funkcije [165]. U tom slučaju, funkcije se mogu linearizovati u svrhu pojednostavljenja statističkog proračuna. Funkcionalne zavisnosti se najčešće predstavljaju polinomima prvog ili drugog reda. Kako je zavisnost između izlaznih i ulaznih parametara procesa obrade najčešće nelinearna, koristi se model u obliku polinoma drugog reda sa međuzavisnostima:

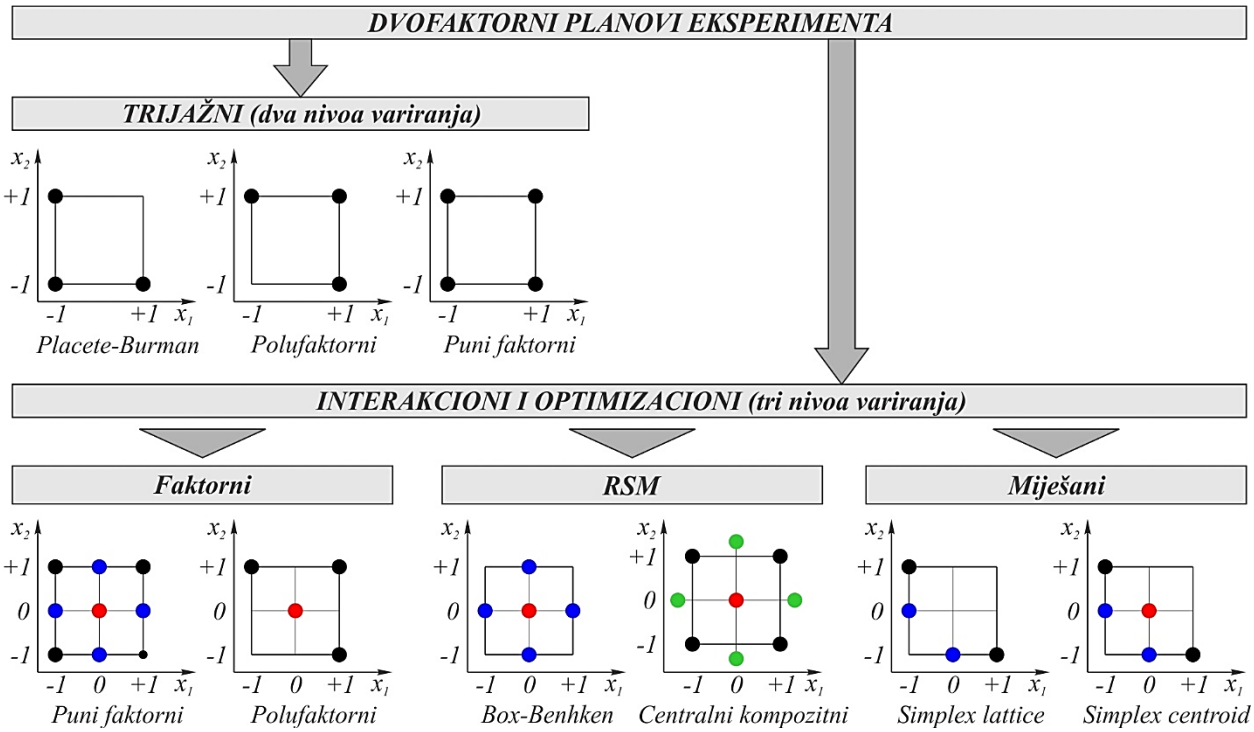
$$\bar{y} = p_0 + \sum_{i=1}^{k} p_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{k} p_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{j=2}^{k} \sum_{i<j}^{k} p_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + Er \tag{2.47}$$

U suštini, metodologija DOE-a je jedinstvena za sve tehnike modeliranja. Odvija se u pet međusobno povezanih faza: planiranja, kreiranja, provođenja, analize i konfirmacije eksperimenta [163, 164]. Faza planiranja sastoji se od pet pojedinačnih procedura, i to:

- procedure utvrđivanja uzroka problema i njihove formulacije. Jedan on najčešće korišćenih metoda utvrđivanja je Ishikawa dijagram, koji objedinjeno prikazuje moguće uzroke problema i efekte njihovog djelovanja.
- procedure definisanja odziva posmatranog problema odnosno opisne karakteristike procesa obrade (hrapavost obrađene površine, širina pojasa habanja alata i sl.)

- procedure izbora ulaznih parametara procesa, zasnovane na teoretskim znanjima i prethodnim iskustvima (tehnološki parametri, materijal obratka, vrsta SHP i sl.). Često se u ovoj fazi provode tzv. trijažni eksperimenti (engl. *screening experiments*), kojima se utvrđuje stepen uticaja ulaznih parametara procesa.
- procedure klasifikacije ulaznih parametara procesa na numeričke i nenumeričke, te kontrolisane i nekontrolisane. Ponekad je potrebno numeričke parametre normalizovati, a nenumeričke kodirati, radi ujednačavanja ranga veličina. Nekontrolisani parametri su uzrokovani spoljašnjim ili unutrašnjim uticajima (vlaga, temperatura okoline i sl.).
- procedure definisanja nivoa variranja kontrolisanih parametara. U slučaju modeliranja procesa obrade, kojeg odlikuje nelinearnost funkcija obradivosti, koriste se najmanje tri nova variranja svakog ulaznog parametra.

U fazi kreiranja eksperimenta definiše se način međusobnog kombinovanja ulaznih parametara u različitim nivoima variranja. Izbor načina kombinovanja zavisi od broja ulaznih parametara, broja nivoa, raspoloživih sredstava, raspoloživog vremena, te krajnjeg cilja provođenja eksperimenta (Slika 2.44). U modeliranju procesa obrade, najčešće se koristi se klasični Fisher-ov faktorni plan (puni ili djelimični), Plackett-Burmann-ov trijažni plan, Taguchi-ovog ortogonalni niz i metod odzivnih površina (engl. *response surface method* - RSM). RSM se koristi u svrhu utvrđivanja interakcija između ulaznih i izlaznih parametara, te optimizaciju ulaznih parametara. Tom prilikom se najčešće koriste Box-Wilson-ov plan i centralno-kompozitni plan.



Slika 2.44. Pregled nekih od dvofaktornih planova eksperimenta

Provođenje eksperimenta predstavlja prikupljanje podataka o vrijednostima izlaza za utvrđeni plan kombinacija različitih nivoa ulaznih parametara, i to u obliku $(\boldsymbol{x}, y)$. Radi kasnije statističke analize, može se izvršiti ponavljanje istih kombinacija ulaznih parametara. Analiza eksperimenta se provodi različitim statističkim metodama, od kojih se najčešće koristi analiza varijanse (engl. *analysis of variance* - ANOVA) [163, 164]. Njima se utvrđuje vrijednost

koeficijenata modela $\boldsymbol{p}$, kvantifikuje signifikantnost i važnost ulaznih parametara, utvrđuje mjera podudarnosti izmjerenih vrijednosti (y) u odnosu na vrijednosti dobijene na osnovu empirijskog modela $(\bar{y})$ i utvrđuje granica odstupanja tih vrijednosti. Konfirmacija se najčešće provodi ponovnim eksperimentalnim mjerenjima izlaznih vrijednosti za proizvoljno odabrane vrijednosti ulaznih parametara iz domena njihovog variranja. Konfirmacijom se verifikuje podudarnost izmjerenih izlaznih vrijednosti sa vrijednostima dobijenih na osnovu modela.

Neki od najpoznatijih empirijskih modela u procesima obrade rezanjem su Taylor-ov model postojanosti alata, Kinzle-ov model sila rezanja koji se zasniva na specifičnoj sili rezanja k_c, i dr. Veliki broj istraživanja se baziraju upravo na razvoju empirijskih modela funkcija obradivosti kako u makrorezanju [166, 167, 168, 169], tako i u mikrorezanju [91, 93, 170]. U mikrorezanju se vrlo često koristi Armarego-ov empirijski linearni model sile rezanja [23]:

$$F_i = \left(K_{m,i} \cdot h + K_{e,i}\right) \cdot b \tag{2.48}$$

gdje su k_m specifična sila smicanja strugotine i k_e koeficijent sile gnječenja, h debljina strugotine i b širina strugotine.

Kako je ranije navedeno, optimizacija je proces traženja maksimuma ili minimuma funkcije cilja odabranom metodom, korišćenjem različitih kombinacija vrijednosti varijabli. U procesu optimizacije, minimumi ili maksimumi funkcija obradivosti postaju funkcije cilja, a ulazni parametri obrade varijable optimizacije [141, 142]. Za vrijednosti varijabli, postavljaju se ograničenja u vidu odgovarajućih domena ili nejednačina, na osnovu čega se stvara prostor kombinacija vrijednosti varijabli. Kao funkcije mogu se koristiti modeli procesa razvijeni korišćenjem bilo koje od naprijed nabrojanih metoda i vrsta modeliranja. Jasno je da su empirijski, zbog svog eksplicitnog opisa problema i relativno jednostavnog matematičkog oblika, izuzetno podobni za provođenje postupka optimizacije vrijednosti ulaznih parametara.

U zavisnosti od broja funkcija cilja, optimizacija može biti jednokriterijumska ili višekriterijumska. Prema obliku funkcije cilja i ograničenja, metode optimizacije mogu biti linearne, nelinearne, dinamičke, heurističke, metode mrežnog planiranja, metod rezervisanja, metod teorije igara, itd. Metode optimizacije se dijele na klasične deteminističke metode i savremene meta-heurističke metode. Prednost meta-heurističkih metoda je u relativno brzom određivanju optimalnih vrijednosti ulaznih parametara, ali sa druge strane, za tako dobijene rezultate se ne može sa sigurnošću reći da su globalni optimum. Kao najčešće meta-heurističke metode optimizacije procesa obrade najčešće se koriste genetski algoritmi i optimizacija rojem čestica (engl. *particle swarm optimisation* – PSO), a mogu se koristiti i metod simultanog kaljena, metod kolonije mrava (engl. *ant colony optimisation method* – ACOM), metod harmonijskog pretraživanja i dr. Klasične metode mogu biti analitičke ili numeričke. Njima se ispituju sve kombinacije iz prostora mogućih rješenja, što opterećuje proračun i produžava vrijeme izvršenja algoritma. U procesu traženja optimuma, neke klasične metode koriste vrijednosti funkcije cilja (npr. Simplex metod, Hook-Jeews-ov metod, Powell-ov metod, Nedler-Mead-ov metod, Complex-Box metod i sl.), dok druge koriste gradijent funkcije cilja (npr. metod najbržeg spusta, Newton-ov metod i sl.).

Poglavlje 3. MODELIRANJE PROCESA PROFILNOG MIKROGLODANJA

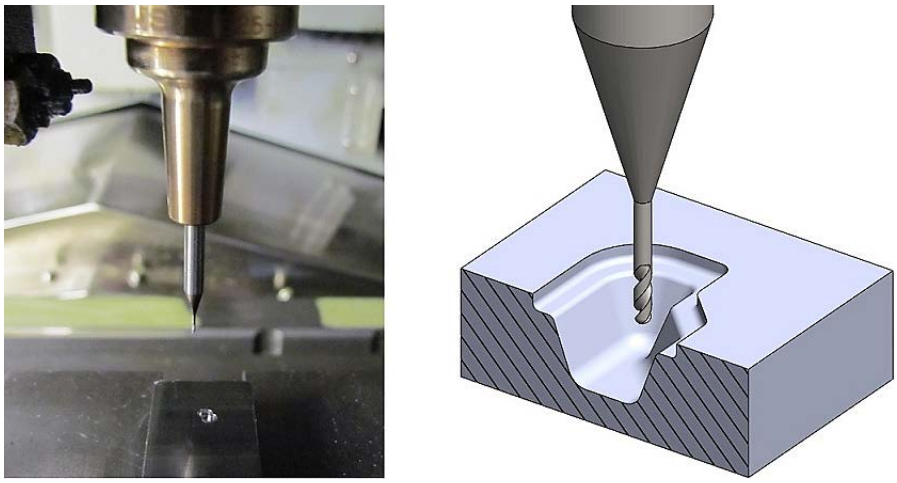
U ovom poglavlju dat je model mikroglodanja dijelova sa površinama pod nagibom, izrađenih od teškoobradivim čelika, a koji se obrađuju loptastim mikroglodalima sa dugačkim vratnim dijelom. Matematički model je zasnovan na analizi kinematike procesa obrade, geometriji poprečnog presjeka zahvaćenog sloja materijala obratka i karakteristikama procesa mikrorezanja. Sadrži modele efektivnih vrijednosti ulaznih parametara obrade i modele funkcija obradivosti.

3.1. MODEL PROFILNOG MIKROGLODANJA

Mikrodijelovi sa složenim površima zauzimaju veliki procenat u ukupnoj količini mikrodijelova. Kako je ranije navedeno, u takve dijelove spadaju alati za obradu deformisanjem, alati za obradu livenjem, alati za brizganje plastike, te funkcionalni visokooptereći mikrodijelovi. U suštini, takvi mikrodijelovi imaju sljedeće karakteristike:

- izrađeni su od teškoobradivih čelika i legura nehomogene strukture,
- posjeduju teško dostupna mjesta za obradu,
- složene su geometrije, te posjeduju strane od nagibom, itd.

Obrada naprijed opisanih mikrodijelova zahtijeva korišćenje loptastih glodala sa dugačkim vratom (Slika 3.1). Naprijed navedeni uslovi obrade dovode do relativno složene geometrije i kinematike procesa obrade mikroglodanjem, te složenog procesa odvajanja strugotine. Posljedice toga su poteškoće prilikom postizanja zahtijevane tačnosti i kvaliteta mikrodijelova, odnosno pri minimalizaciji greške obrade.

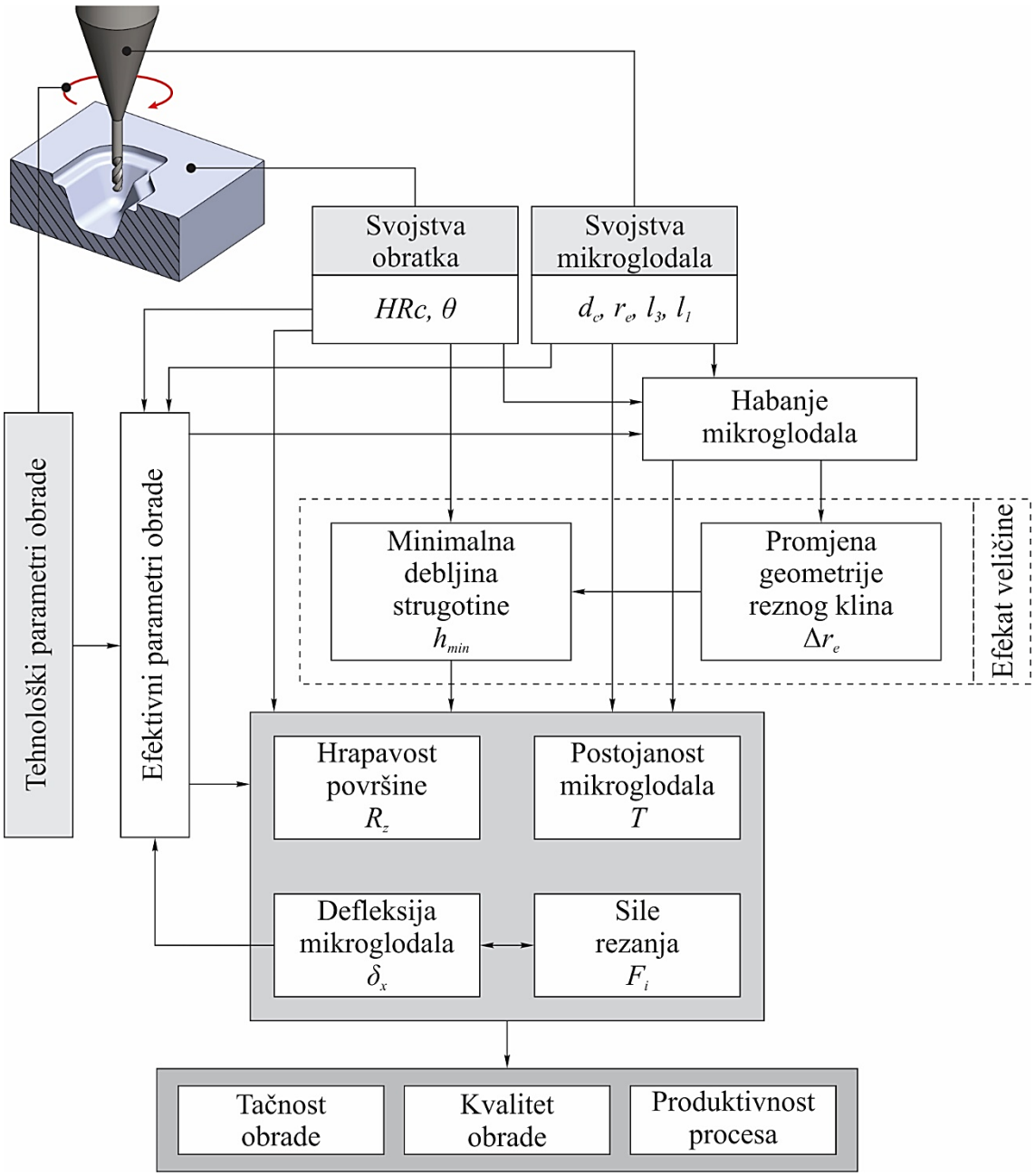


Slika 3.1. Glodanje mikrodijelova sa teško dostupnim mjestima za obradu

Odstupanja od zahtijevane tačnosti i kvaliteta mikrodijelova mogu biti posljedica: grešaka u pripremnoj fazi (greške CAD i CAM modela, greške u procesiranju i postprocesiranju, greške u prenosu upravljačkih instrukcija), grešaka mašine alatke (greške upravljačke jedinice, geometrijske i kinematske greške izvršnih organa), te grešaka obrade [171]. Greške obrade su najčešće rezultat neadekvatnog odabira parametara i uslova obrade, što za posljedicu ima: deformaciju reznog alata, promjenu geometrije i triboloških svojstava reznog klina alata, deformaciju obratka, narušavanje integriteta površinskog sloja obratka, itd.

U svrhu upravljanja tačnošću i kvalitetom obrade pri profilnom mikroglodanju, u nastavku će biti predložene funkcije obradivosti, odnosno modeli ponašanja izlaznih parametara procesa. Varijable pomenutih modela su geometrijski i tehnološki parametri obrade, geometrija alata, fizička i mehanička svojstva materijala obratka i reznog alata itd. Kako je geometrija zone obrade u profilnom mikroglodanju izuzetno složena, neophodno je definisati geometrijske odnose između mikroglodala i obratka [172, 173]. Odnos je definisan putem odgovarajućih efektivnih parametra obrade, koji proizilaze iz tehnoloških i geometrijskih parametra obrade, geometrije mikroglodala i obratka, a koji konfigurišu u modelima ponašanja izlaznih parametara procesa.

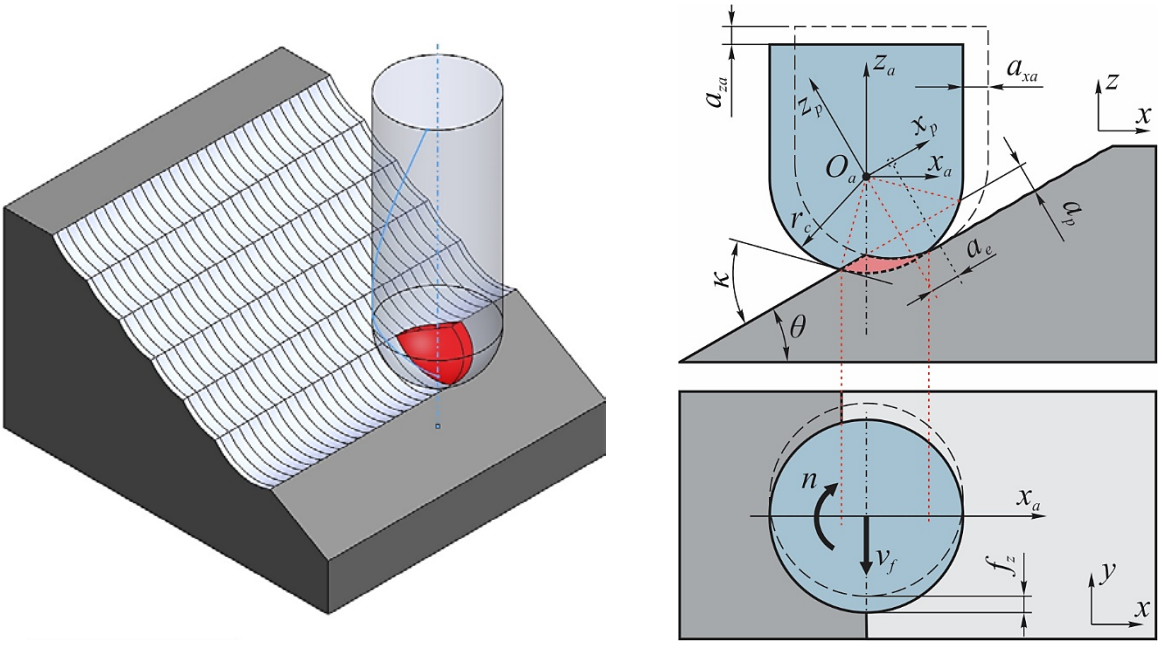
U svrhu predikcije izlaznih parametara u složenim procesima, kao što je mikroglodanje loptastim glodalom površina pod nagibom, na obracima od teškoobradivih legiranih alatnih čelika, neophodno je provesti međusobnu integraciju i povezivanje modela pojedinih kriterijuma obradivosti. Na slici 3.2 je prikazana šema integralnog modela profilnog glodanja, čije će cjeline biti razrađene i prezentovane u nastavku. Kompleksnost modela se ogleda u povratnim uticajima izlaznih parametara obrade na definiciju i vrijednost ulaznih parametara obrade. Povezanost je definisana preko razvijenih modela kojima se opisuje efekt veličine, te preko promjene položaja tačaka na reznoj ivici mikroglodala u odnosu na nominalni položaj, definisane defleksijom mikroglodala.



Slika 3.2. Šema integrisanog modela profilnog mikroglodanja

3.2. GEOMETRIJSKI I TEHNOLOŠKI PARAMETRI OBRADE

Prikaz profilnog mikroglodanja kosih strana je predstavljen na slici 3.3. Globalni koordinatni sistem obratka $Oxyz$ odgovara koordinatnom sistemu troosne vertikalne numerički upravljane mašine alatke. Nagib kose strane je određen uglom nagiba (θ), mjerenim u odnosu na x-osu. Prema prikazanoj šemi, mikroglodalo se pri obradi kreće duž y-ose, dok novi prolaz zauzima sekvencijalnom promjenom položaja po x-osi i z-osi.



Slika 3.3. Glodanje kosih strana loptastim mikroglodalom

Položaj mikroglodala u odnosu na obradak, u toku izvođenja pojedinih prolaza, zavisi od nagiba i tehnoloških parametara, a može se izraziti vertikalnim pomjeranjem po z-osi:

$$a_{z_a} = \frac{a_p}{\cos\theta} \tag{3.1}$$

odnosno radijalnim pomjeranjem po x-osi:

$$a_{x_a} = a_e \cdot \cos\theta \tag{3.2}$$

gdje je θ ugao nagiba obrađivane površine, a_p dubina obrade i a_e širina obrade.

Prema prikazanoj šemi, definisan je pravougli koordinatni sistem mikroglodala $O_a x_a y_a z_a$. Njegovo ishodište je u centru loptastog dijela mikroglodala, z_a-osa je osa obrtanja, dok se y_a-osa poklapa sa vektorom brzine pomoćnog kretanja. Osa obrtanja je osnovni element u odnosu na koji se definiše geometrija zone zahvaćenog materijala obratka, a time i efektivni tehnološki parametra obrade. Na primjer, efektivni poluprečnik neke posmatrane tačke na reznoj ivici mikroglodala (r_{ce}) predstavlja njeno rastojanje od ose obrtanja.

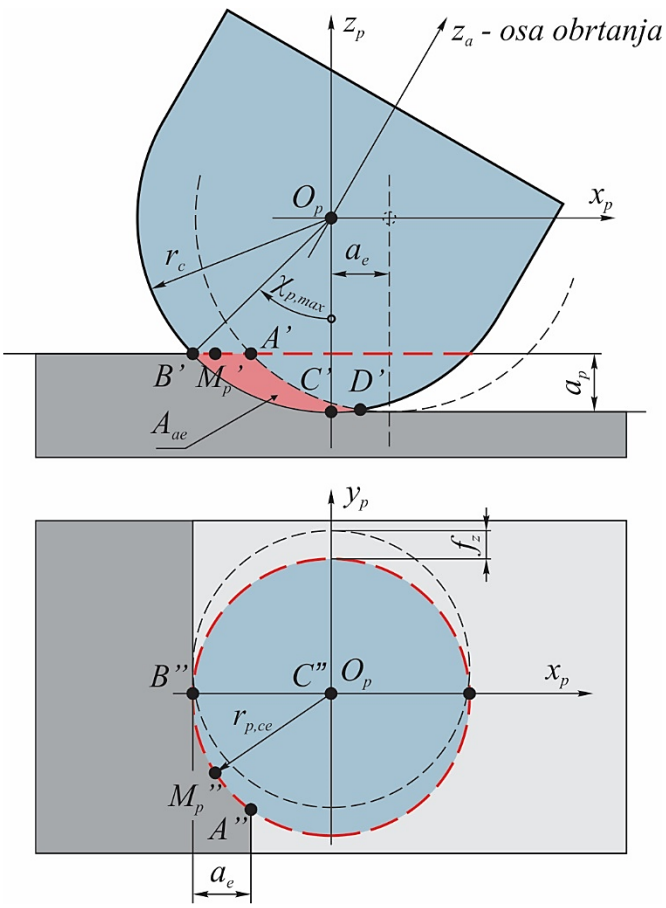
Radi analize obrade površine pod nagibom, a u skladu sa teoretski definisanim tehnološkim parametrima kao što su dubina obrade, širina obrade i korak po zubu, izvršiće se transformacija

geometrije rotacijom oko y_a-ose. Prema matematičkoj definiciji, ugao rotacije se mjeri ulijevo posmatrajući iz vrha ose oko koje se vrši rotacija. Shodno tome, u posmatranom slučaju potrebno je izvršiti rotaciju za negativnu vrijednost ugla nagiba (θ):

$$\mathbf{P_p} = \mathbf{P_a} \cdot \mathbf{R_{y_a}}(-\theta) \tag{3.3}$$

gdje je $\mathbf{P_p}$ matrica koordinata tačke u $O_p x_p y_p z_p$ koordinatnom sistemu, $\mathbf{P_a}$ matrica koordinata tačke u $O_a x_a y_a z_a$ koordinatnom sistemu, $\mathbf{R_{y_a}}(-\theta)$ matrica rotacije oko y_a-ose za ugao $-\theta$.

Primjenom transformacije, dobija se situacija ekvivalentna obradi horizontalne površi, sa koordinatnim sistemom $O_p x_p y_p z_p$, koji odgovara postavci nominalnih tehnoloških parametara (Slika 3.4). Analiza se vrši za loptasti dio mikroglodala, tako da vrijedi nejednakost $|z_p| \leq r_c$. Analizom situacije obrade se zaključuje da koordinata z_p može da poprimi sve vrijednosti od $-r_c$ do vrijednosti $a_p - r_c$, koja odgovara dubini obrade.



Slika 3.4. Zona obrade u transformisanom koordinatnom sistemu

Napadni ugao je jednak maksimalnoj vrijednosti ugla dodira rezne ivice ($\chi_{p,max}$), koji odgovara vrijednosti $a_p - r_c$, odnosi se na tačku B, te iznosi:

$$\kappa = \chi_{p,max} = \arcsin \frac{\sqrt{2 \cdot a_p \cdot r_c - {a_p}^2}}{r_c} \tag{3.4}$$

gdje je a_p dubina obrade i r_c poluprečnik loptastog mikroglodala.

Za svaku tačku na površini loptastog dijela mikroglodala, može se definisati efektivni poluprečnik $r_{p,ce}(z_p)$, koji predstavlja njenu udaljenost od vertikalne z_p-ose. Ako se posmatra projicirani profil loptastog dijela mikroglodala dat na prethodnoj slici, i bilo koja tačka koja leži na profilu, a čija je koordinata $y_p = 0$, tada će odgovarajući efektivni prečnik biti jednak vrijednosti njene koordinate x_p i zavisiće od vrijednosti koordinate po z_p-osi:

$$r_{p,ce}(z_p) = x_p = \sqrt{{r_c}^2 - {z_p}^2} \tag{3.5}$$

Shodno tome, ukoliko se posmatraju tačke čija koordinata po z_p-osi odgovara dubini obrade (a_p), odnosno ima vrijednost $a_p - r_c$, kao što je tačka A, efektivni prečnik će imati vrijednost:

$$r_{p,ce} = \sqrt{2 \cdot a_p \cdot r_c - {a_p}^2} \tag{3.6}$$

gdje je a_p dubina obrade i r_c poluprečnik loptastog mikroglodala.

Dio kružnice koja prolazi kroz tačke A i B, koje odgovaraju dubini obrade, predstavlja prostornu krivu dodira između mikroglodala i neobrađene površine obratka (K), a koja će kasnije biti korišćena u definisanju efektivnih parametara obrade. Jednačina pomenute kružnice u Katrezijevim koordinatama sistema $O_p x_p y_p z_p$, može se zapisati kao:

$$K := \begin{cases} {x_p}^2 + {y_p}^2 = {r_{p,ce}}^2 \\ z_p = a_p - r_c \end{cases} \tag{3.7}$$

odnosno, uvrštavanjem (3.15) u prethodno, dobija se:

$$K := \begin{cases} {x_p}^2 + {y_p}^2 = 2 \cdot a_p \cdot r_c - {a_p}^2 \\ z_p = a_p - r_c \end{cases} \tag{3.8}$$

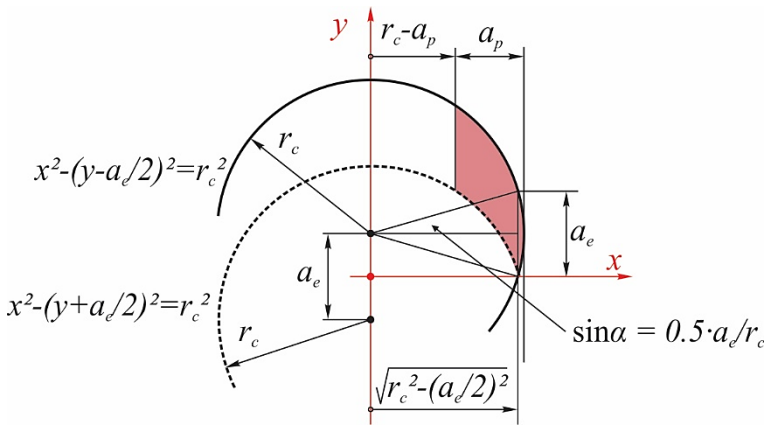
Vrijednosti količine skinute strugotine u jedinici vremena se mogu približno izračunati kao proizvod površine zahvaćene strugotine u jednom prolazu (A_{ae}) i brzine pomoćnog kretanja (v_f):

$$MRR \approx v_f \cdot A_{ae} \tag{3.9}$$

Površina zahvaćene strugotine u jednom prolazu se može izračunati kao zbir dvije površine, i to: površine kružnog odsječka i složene površine između dvije krive, date jednačinama kružnih profila glodala (Slika 3.5). Koordinatni sistem i projicirani profili mikroglodala su postavljeni u odgovarajući položaj, radi pojednostavljenja proračuna.

Kružni odsječak je jednak razlici površine kružnog isječka i jednakostraničnog trougla, čije površine zavise od dubine obrade (a_p) i poluprečnika loptastog mikroglodala (r_c):

$$A_{odsječak} = \frac{{r_c}^2 \cdot \pi}{360} \cdot 2 \cdot \arcsin \frac{a_e}{2 \cdot r_c} - a_e \cdot \sqrt{{r_c}^2 - 0.25 \cdot {a_e}^2} \tag{3.10}$$



Slika 3.5. Površina zahvaćena u jednom prolazu mikroglodala

Površina ograničena sa jednačinama dvaju kružnica i vertikalnim pravcima se računa pomoću integrala:

$$A_{složž} = \int_{r_c-a_p}^{\sqrt{r_c^2-0.25\cdot a_e^2}} \left[\left(\sqrt{r_c^2-x^2}\right)+0.5\cdot a_e-\left(\sqrt{r_c^2-x^2}\right)+0.5\cdot a_e\right]dx \tag{3.11}$$

čijim se rješenjem dobije:

$$A_{složž} = a_e\cdot x\Big|_{r_c-a_p}^{\sqrt{r_c^2-0.25\cdot a_e^2}} = a_e\cdot\left(\sqrt{r_c^2-0.25\cdot a_e^2}-r_c+a_p\right) \tag{3.12}$$

Konačno, sabiranjem, dobija se površina zahvaćene strugotine u jednom prolazu:

$$A_{ae} = \frac{r_c^2\cdot\pi}{180}\cdot\arcsin\frac{a_e}{2\cdot r_c}+a_e\cdot a_p-a_e\cdot r_c \tag{3.13}$$

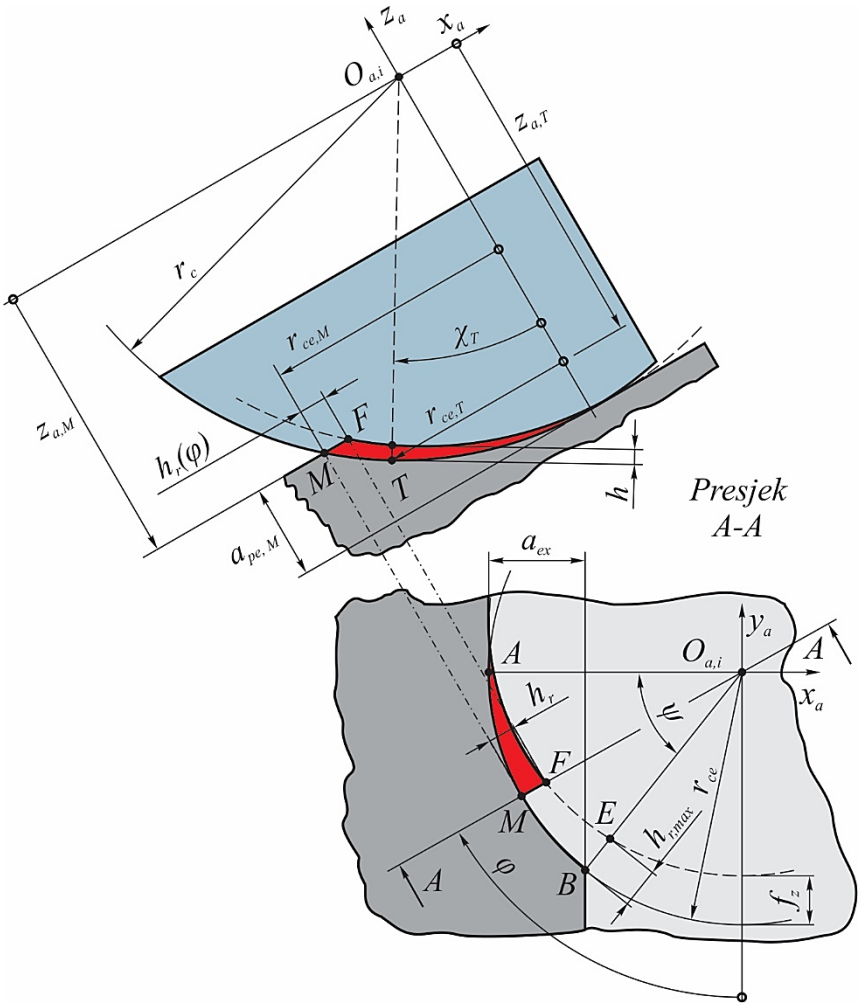
gdje je a_p dubina obrade, a_e širina obrade i r_c poluprečnik loptastog mikroglodala.

Na slici 3.6 je prikazana geometrija zahvaćenog materijala obratka po jednom zubu loptastog mikroglodala, koja se definiše u odnosu na z_a-osu kao osu obrtanja mikroglodala. Pri datoj situaciji, neophodno je definisati efektivne geometrijske i tehnološke parametre. Njihova definicija proizilazi iz prethodno izvršene analize obrade horizontalnih površi sa koordinatnim sistemom koji odgovara nominalnim geometrijskim i tehnološkim parametrima.

Transformacija iz koordinatnog sistema koji odgovara tehnološkim parametrima $O_px_py_pz_p$ u koordinatni sistem mikroglodala $O_ax_ay_az_a$, koji odgovara efektivnim parametrima, vrši se inverznom transformacijom u odnosu na transformaciju datu obrascem (3.6), odnosno rotacijom oko y_a-ose za ugao nagiba (θ):

$$\mathbf{P_a} = \mathbf{P_p}\cdot\mathbf{R_{y_a}}(\theta) \tag{3.14}$$

gdje je $\mathbf{P_p}$ matrica koordinata tačke u $O_px_py_pz_p$ koordinatnom sistemu, $\mathbf{P_a}$ matrica koordinata tačke u $O_ax_ay_az_a$ koordinatnom sistemu, $\mathbf{R_{y_a}}(\theta)$ matrica rotacije oko y_a-ose za ugao θ.



Slika 3.6. Geometrija zahvata jednog zuba loptastog mikroglodala

U tom slučaju, koordinate svih tačaka će u poprimiti nove vrijednosti, i to:

$$[x_a \quad y_a \quad z_a \quad 1] = [x_p \quad y_p \quad z_p \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

Zahvat materijala obratka jednim zubom mikroglodala definisan je uglom zahvata rezne ivice φ kao tekućom vrijednošću, koja zavisi od ugaone brzine mikroglodala i vremena obrade. Jasno je da se sve tačke prostorne krive dodira između mikroglodala i neobrađene površine obratka K, transformišu iz koordinatnog sistema $O_p x_p y_p z_p$ u koordinatni sistem $O_a x_a y_a z_a$. Shodno tome, zavisnost koordinate z_a u odnosu na odgovarajuću koordinatu, definisanu u koordinatnom sistemu koji odgovara tehnološkim parametrima, može se predstaviti obrascem:

$$z_a = x_p \cdot \sin\theta + z_p \cdot \cos\theta \tag{3.16}$$

Efektivni poluprečnik alata (r_{ce}) se definiše kao udaljenost tačke na reznoj ivici mikroglodala od ose obrtanja mikroglodala. Matrična parametarska funkcija zavojnice mikroglodala definiše se korišćenjem poluprečnika zavojnice odnosno mikroglodala r_c [mm], polarnog ugla zavojnice φ_a [rad] i ugla uspona zavojnice odnosno mikroglodala ω [rad]:

$$\begin{bmatrix} x_{zav} \\ y_{zav} \\ z_{zav} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_c \cdot \cos\varphi_a \\ r_c \cdot \sin\varphi_a \\ r_c \cdot \varphi_a \cdot \operatorname{ctg}\omega - r_c \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

Nadalje, može se koristiti jednakost $z_a = r_c \cdot \varphi_a \cdot \operatorname{ctg}\omega$, koja se dobija iz odnosa geometrijskih varijabli zavojnice, iz koje se dobija obrazac za vrijednost ugla φ_a. Vrh mikroglodala je sferičan, te je pri vrhu mikroglodala poluprečnik u odnosu na osu obrtanja promjenjiva veličina zavisna od vrijednosti koordinate z_a, te je jednaka poluprečniku sfernog odsječka loptastog dijela, čija vrijednost iznosi $\sqrt{{r_c}^2 - {z_a}^2}$. Korišćenjem navedenih jednakosti i prevođenjem prethodnog matričnog obrasca jednačine u homogene koordinate, dobija se jednačina zavojnice zuba na loptastom dijelu mikroglodala:

$$\begin{bmatrix} x_{zav} \\ y_{zav} \\ z_{zav} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{{r_c}^2 - {z_a}^2} \cdot \cos\left(\dfrac{z_a}{\sqrt{{r_c}^2 - {z_a}^2} \cdot \operatorname{ctg}\omega}\right) \\ \sqrt{{r_c}^2 - {z_a}^2} \cdot \sin\left(\dfrac{z_a}{\sqrt{{r_c}^2 - {z_a}^2} \cdot \operatorname{ctg}\omega}\right) \\ z_a - r_c \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

Na osnovu polazne definicije, vrijednost efektivnog prečnika zavisi od Kartezijevih koordinata posmatrane tačke na reznoj ivici mikroglodala:

$$r_{ce}(z_a) = \sqrt{{x_{zav}}^2 + {y_{zav}}^2} = \sqrt{{r_c}^2 - {z_a}^2} \tag{3.19}$$

Efektivna brzina rezanja $\boldsymbol{v_{ce}}$ [m/min] je brzina rezanja koja odgovara efektivnom poluprečniku mikroglodala, a koja se definiše na osnovu broja obrtaja alata odnosno nominalne brzine rezanja v_c [m/min], korišćenjem obrasca (2.1):

$$v_{ce}(z_a) = \frac{v_c}{r_c} \cdot r_{ce}(z_a) \tag{3.20}$$

Debljina strugotine (h) je, pri analiziranoj situaciji obrade, promjenjiva veličina koja zavisi od radijalne debljine strugotine, koja se pak računa na osnovu trenutne vrijednosti ugla zahvata odnosno obrasca (2.8). Shodno tome, funkcija koja daje trenutne vrijednosti debljine strugotine je:

$$h(\varphi, \chi) = h_r(\varphi) \cdot \sin\chi = f_z \cdot \cos\varphi \cdot \sin\chi \tag{3.21}$$

gdje je f_z korak po zubu, φ ugao zahvata posmatrane tačke na reznoj ivici mikroglodala i χ ugao dodira posmatrane tačke na reznoj ivici mikroglodala.

Ugao dodira rezne ivice neke tačke na reznoj ivici mikroglodala u koordinatnom sistemu $O_a x_a y_a z_a$, npr. tačke T, je ugao između posmatrane tačke i z_a-ose, odnosno ose obrtanja. Pomenuti ugao zavisi od efektivnog poluprečnika posmatrane tačke i poluprečnika mikroglodala, te se može napisati sljedeća jednakost:

$$\sin\chi = \frac{r_{ce}(z_a)}{r_c} = \frac{\sqrt{{r_c}^2 - {z_a}^2}}{r_c} \tag{3.22}$$

Nadalje, uvrštavanjem obrasca za efektivni poluprečnik u prethodni obrazac, dobija se:

$$h(\varphi, z_a) = f_z \cdot \frac{\sqrt{{r_c}^2 - {z_a}^2}}{r_c} \cdot \cos\varphi \tag{3.23}$$

prema čemu debljina strugotine, odnosno efektivna debljina strugotine, prema prethodnim obrascima, zavisi od ugla zahvata (φ) i koordinata tačke (x_p, z_p) u kojoj se zub trenutno zahvata sa materijalom obratka:

$$h(\varphi, z_p) = f_z \cdot \frac{\sqrt{{r_c}^2 - \left(x_p \cdot \sin\theta + z_p \cdot \cos\theta\right)^2}}{r_c} \cdot \cos\varphi \tag{3.24}$$

gdje je f_z korak po zubu, r_c poluprečnik mikroglodala, θ ugao nagiba obrađivane površine, φ ugao zahvata posmatrane tačke na reznoj ivici mikroglodala.

Širina strugotine (b) se može posmatrati kao lučna dužina dodira alata i materijala obratka, mjereno od vertikalne ose do posmatrane tačke na loptastom dijela mikroglodala. U suštini, to je promjenjiva veličina, čija se promjena odnosi na širinu strugotine duž prostorne krive dodira između mikroglodala i neobrađene površine obratka (K). Shodno tome, vrijedi jednakost:

$$b = \frac{r_c \cdot \pi}{180} \cdot \arcsin(\chi) \tag{3.25}$$

odnosno:

$$b(\varphi, z_p) = \frac{r_c \cdot \pi}{180} \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{{r_c}^2 - \left(x_p \cdot \sin\theta + z_p \cdot \cos\theta\right)^2}}{r_c}\right) \tag{3.26}$$

gdje je r_c poluprečnik mikroglodala, θ ugao nagiba obrađivane površine, φ ugao zahvata posmatrane tačke na reznoj ivici mikroglodala.

Srednja debljina strugotine (h_m) i ***srednja širina strugotine*** (b_m) predstavljaju srednju vrijednost funkcionalnih zavisnosti debljine odnosno širine strugotine. Srednje vrijednost funkcija se mogu dobiti preko srednje aritmetičke sredine svih izlaza funkcija, dobijenih na osnovu konačnog broja kombinacija diskretnih vrijednosti njihovih varijabli. Diskretne vrijednosti varijabli se kreću između njihovih graničnih vrijednosti, čime se stvara prostor ulaznih kombinacija oblika (φ, z_p). Vrijednosti z_p se kreću od $z_{p,min} = -r_c$ do $z_{p,max} = a_p - r_c$. Ugao zahvata strugotine se kreće u granicama od $\varphi_{min} = 90° - \psi$ do $\varphi_{max} = 90°$. Ugao kontakta se dobija na osnovu obrasca (2.7), koji za razmatranu situaciju obrade ima oblik:

$$\psi = \arccos\left(1 - \frac{a_{x_a}}{r_{ce}}\right) \tag{3.27}$$

Do srednje vrijednosti širine strugotine, kao i srednje debljine strugotine, moguće je doći koristeći numeričko rješenje. Numeričko rješenje se može predstaviti u vidu sljedećeg algoritma:

```
Input rc, ap, ae, teta, n
 zp_min = – rc
 zp_max = ap – rc
 rce = izraz(3.19)
 psi = izraz(3.27)
 fi_min = – rc
 fi_max = ap – rc
  `Korak vrijednosti varijabli
   zp_n = (zp_max – zp_min) / n
   fi_n = (fi_max – fi_min) / n
    hm_sum = 0 And bm_sum = 0
     For i = fi_min To fi_max Step fi_n
       For j = zp_min To zp_max Step zp_n
         h = izraz (3.24)
         b = izraz (3.26)
           hm_sum = hm_sum + h
           bm_sum = bm_sum + b
       Next j
     Next i
  hm = hm_sum / n
  bm = bm_sum / n
```

Prethodno dati algoritam se može vrlo brzo prilagoditi nekom od dostupnih programskih jezika. Algoritmom se može stvoriti skup uređenih četvorki oblika (φ, z_p, b, h) ili pak (φ, χ, b, h). Obzirom na prethodno definisane srednje vrijednosti, zaključuje se da postoji i srednja vrijednost koordinate z_p, odnosno ugla zahvata φ. Iste se mogu dobiti pretražujući skup uređenih četvorki dobijenih na osnovu algoritma ili jednostavno uzeti da je srednja vrijednost ugla zahvata:

$$\varphi_m = \frac{\varphi_{max} - \varphi_{min}}{2} = \frac{90° - (90° - \psi)}{2} = \frac{\psi}{2} \tag{3.28}$$

odnosno:

$$z_{pm} = \frac{z_{p,max} - z_{p,min}}{2} = \frac{a_p - r_c}{2} \tag{3.29}$$

gdje je r_c poluprečnik mikroglodala, a_p dubina obrade i ψ ugao kontakta.

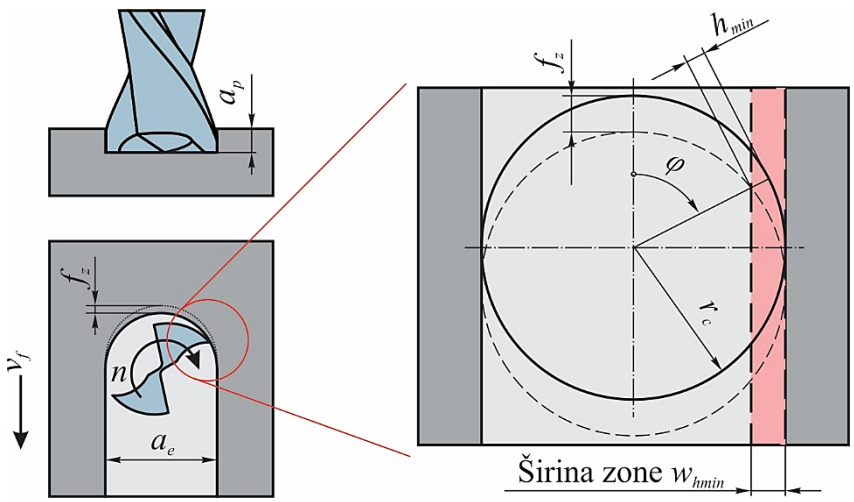
3.3. MODELI FUNKCIJA OBRADIVOSTI

Kriterijumi obradivosti, kao što su habanje mikroalata, deformacija alata, stanje obrađene površine i dr., u uskoj su vezi sa nominalnim i efektivnim parametrima obrade. U nastavku su predloženi modeli funkcionalnih zavisnosti kriterijuma obradivosti od parametara obrade. Jasno je da je funkcije obradivosti, kao i kriterijume, nemoguće nezavisno posmatrati.

3.3.1. Minimalna debljina strugotine

Minimalna debljina strugotine, kao tehnološko svojstvo materijala, zavisi od geometrije reznog klina glodala, te mehaničkih svojstava materijala obratka odnosno njegove kristalne strukture i hemijskog sastava. Postoji izvjestan broj analitičkih modela ove veličine, postavljenih za idealno homogene materijale izotropne prirode. S druge strane, na osnovu analize literature može se utvrditi da su mnogo pouzdaniji modeli bazirani na eksperimentalnim mjerenjima i posrednoj procjeni vrijednosti minimalne debljine strugotine.

Potrebno je eksperimentalno identifikovati trenutak obrade pri kojoj se duž cijele rezne ivice loptastog mikroglodala javlja mehanizam obrade baziran na minimalnoj debljini strugotine. To je trenutak kada se vrijednost minimalne debljine izjednači sa trenutnom debljinom strugotine. Tada rezni klin prestaje da odvaja materijal obratka, te počinje dominacija efekta veličine i gnječenje materijala obratka. Takođe, dolazi do pojave potpunog izostanka odrezane strugotine, propraćeno naglom promjenom hrapavosti obrađene površine i promjenom intenziteta specifične energije mikrorezanja. U tom slučaju, ne postoji odrezani sloj koji odgovara nominalnoj debljini strugotine, već zona zgnječenog materijala obratka, što je moguće izmjeriti (Slika 3.7). Shodno tome, proces procjene minimalne debljine strugotine može se izvesti mjerenjem širine zone zgnječenog materijala (w_{hmin}).



Slika 3.7. Geometrija gnječenja materijala

Da bi se izvršila estimacija minimalne debljine strugotine na osnovu širine zone zgnječenog materijala i debljine strugotine, potrebno je doći do ugla zahvata koji odgovara minimalnoj debljini strugotine (φ). Na osnovu geometrijskih odnosa sa slike 3.7, može se uspostaviti sistem jednačina, čija je prva jednačina:

$$h_{min} = f_z \cdot \cos\varphi \tag{3.30}$$

a ako se uzme da vrijedi da je poluprečnik glodala mnogo veći od vrijednosti minimalne debljine strugotine ($r_c \gg h_{min}$), dolazi se do druge jednačine sistema:

$$r_c \cdot \sin\varphi = r_c - w_{hmin} \tag{3.31}$$

gdje je f_z korak po zubu, φ ugao zahvata, r_c poluprečnik mikroglodala i w_{hmin} širina zone zgnječenog materijala.

Rješenjem prethodno datog sistema jednačina, dolazi do vrijednosti minimalne debljine strugotine (h_{min}), koja u ovom slučaju, zavisi od poluprečnika mikroglodala, koraka po zubu (f_z) i širine zone zgnječenog materijala (w_{hmin}):

$$h_{min} = f_z \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r_c - w_{hmin}}{r_c}\right)^2} \tag{3.32}$$

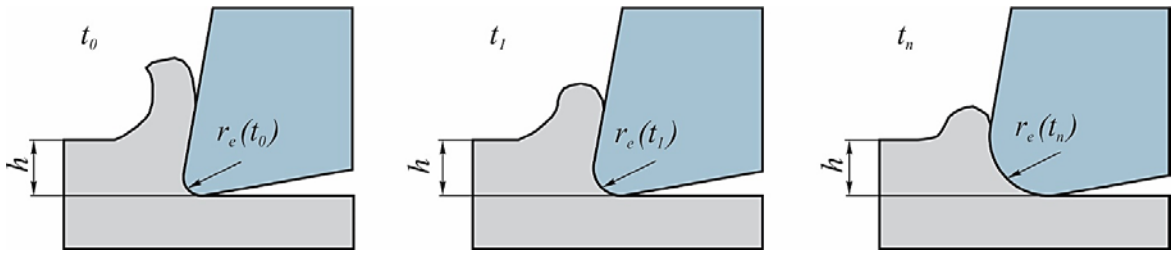
Prema teoretskim izvorima, mehanizam gnječenja materijala obratka zavisi od napona tečenja materijala obratka, a dešava se u oblasti neposredno ispred zaobljenog vrha reznog klina. Napon tečenja, kao najvažnija osobina materijala u definiciji minimalne debljine strugotine je direktno povezan sa tvrdoćom materijala. Uticaj geometrije vrha reznog klina mikroglodala na vrijednost minimalne debljine strugotine se može se opisati uticajem poluprečnika zaobljenja rezne ivice mikroglodala. Shodno tome, za utvrđivanje vrijednosti minimalne debljine strugotine, kod grupe kaljenih alatnih čelika, predlaže se sljedeći model:

$$h_{min} = \mathrm{C} \cdot r_e \cdot HRc^x \tag{3.33}$$

gdje su C i x – koeficijent i eksponent regresionog modela, HRc tvrdoća materijala obratka u Rokvelima i r_e [μm] poluprečnik zaobljenja rezne ivice mikroglodala.

3.3.2. Model habanja mikroglodala

Habanje mikroglodala je izlazni parametar obrade, odnosno kriterijum obradivosti kojim se opisuje trošenje reznog klina mikroglodala u toku obrade, koje se javlja na njegovoj grudnoj i leđnoj površini, što neminovno dovodi do promjene njegove geometrije. Promjena geometrije reznog klina direktno utiče na prediktivno upravljanje tačnošću i kvalitetom mikroobrade. Prilikom obrade teškoobradivih čelika, dominira mehanizam abrazivnog habanja zbog prisustva karbidnih faza u materijalu obratka, dok toplota generisana u zoni mikroobrade omekšava materijal mikroalata i intenzivira habanje. Shodno tome, može se zaključiti da uticaj na habanje reznog klina ima tvrdoća materijala obratka kao direktni pokazatelj postojanja tvrdih i karbidnih faza u strukturi. Nadalje, na habanje utiče i debljina zahvaćenog sloja materijala obratka i brzina rezanja, kao direktni uzročnici većih lokalnih pritisaka na rezni klin odnosno veće količine generisane toplote. Habanje reznog klina mikroglodala je moguće opisati promjenom poluprečnika zaobljenja rezne ivice u toku vremena obrade, kao veoma bitnog parametra u definiciji efekta veličine (Slika 3.8). Povećanje poluprečnika zaobljenja rezne ivice uslijed habanja utiče na pojavu efekta veličine, a time i ostale fenomene u mikrorezanju. Posljedica toga je činjenica, da je fenomene vezane za minimalnu debljinu strugotine i trenutak dominacije efekta veličine nemoguće odvojeno posmatrati od procesa habanja reznog klina mikroglodala.

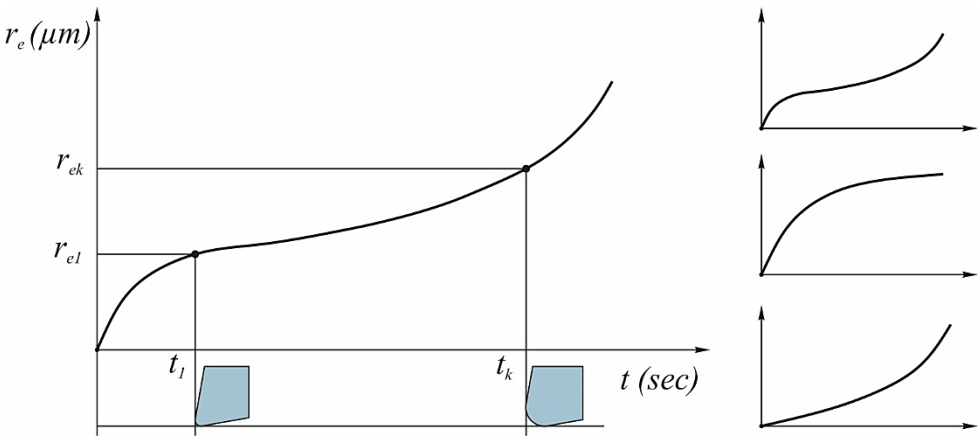


Slika 3.8. Proces habanja reznog klina mikroglodala i efekat veličine

Za svaku kombinaciju naprijed pomenutih signifikantnih parametara obrade i karakteristika materijala, moguće je uspostaviti funkcionalnu zavisnost vrijednosti poluprečnika zaobljenja rezne ivice za svaki trenutak u toku izvođenja obrade:

$$r_e(t) = \sum_{i=0}^{n} p_i \cdot t^i \tag{3.34}$$

gdje su p_i i-ti koeficijent modela i t [s] vrijeme obrade, pri čemu se i kreće od 0 do n. Koeficijenti modela se dobijaju na osnovu eksperimentalnih podataka i najčešće korišćenjem metode najmanjih kvadrata. Može se pretpostaviti da će prethodno data funkcija moći adekvatno aproksimirati krivu promjene parametra habanja u vremenu obrade. Kriva promjene parametra habanja se naziva kriva habanja. Kako je za parametar kojim se prati habanje mikroglodala uzeta promjena poluprečnika zaobljenja rezne ivice u toku obrade, kriva habanja se može predstaviti zavisnošću prikazanoj na slici 3.9. Teoretski, takva kriva habanja može poprimiti više oblika, kako je to prikazano desno na slici 3.9.



Slika 3.9. Kriva promjene poluprečnika zaobljenja rezne ivice tokom obrade

Shodno prethodnom datom obrascu, može se definisati neki trenutak vremena obrade T, pri kojoj dolazi do kritičnog porasta poluprečnika zaobljenja rezne ivice mikroglodala, te njene narušavanja njene efikasnosti u procesu odvajanja materijala obratka. Teoretski, taj vremenski trenutak se definiše kao postojanost mikroglodala. Shodno prethodnim zaključcima, a u svrhu utvrđivanja uticaja pojedinih parametara na postojanost, predlaže se regresioni model:

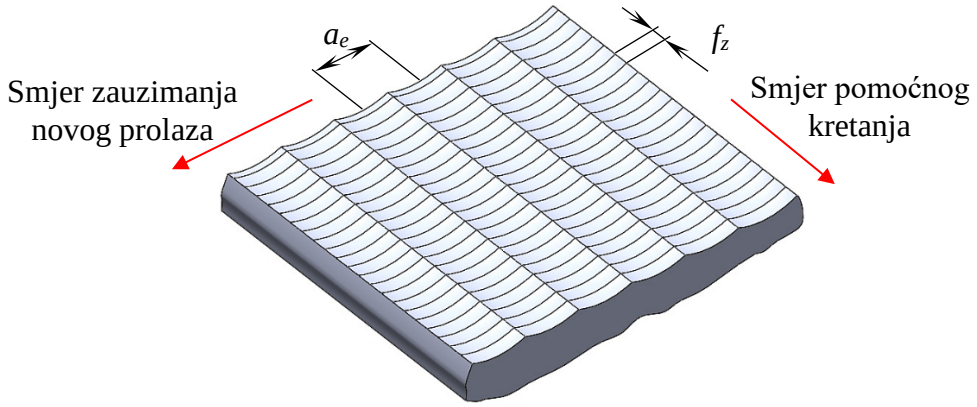
$$T_{r_e} = \mathrm{C} \cdot {f_z}^{x} \cdot {v_{ce}}^{y} \cdot HRc^{z} \tag{3.35}$$

gdje su C, x, y i z koeficijenti i eksponenti regresionog modela, f_z [μm] korak po zubu kao mjerilo debljine sloja zahvaćenog sloja materijala obratka, HRc tvrdoća materijala obratka u Rokvelima kojima se obuhvata uticaj strukture materijala obratka, i v_{ce} [m/min] efektivna brzina rezanja, kojima se obuhvata uticaj generisane toplote.

3.3.3. Model hrapavosti obrađene površine

Hrapavost obrađene površine se definiše parametrima hrapavosti definisanim međunarodnim standardom ISO 4287. Prema standardu, definišu se linijski i površinski parametri hrapavosti, obzirom da li se mjere na odgovarajućoj referentnoj dužini profila ili na čitavoj referentnoj površini. Mikroglodanjem sa loptastim glodalom se dobija talasasto obrađena površina, koja je posljedica niza sukcesivnih prolaza profila mikroglodala, odnosno sukcesivnih zahvata zuba mikroglodala pri obradi. Shodno tome, linijskim parametrima hrapavosti se može definisati hrapavost obrađene površine u smjeru vektora pomoćnog kretanja i hrapavost obrađene površine u smjeru zauzimanja novog prolaza (Slika 3.10). Na osnovu toga, može se zaključiti da su najuticajniji parametri na hrapavost, upravo korak po zubu i širina obrade.

U svim proizvodnim tehnologijama, u koju spada i mikrorezanje odnosno mikroglodanje, najčešće se zahtijeva postizanje odgovarajućih vrijednosti parametara hrapavosti pri obradi. Prema tome, najčešće se zahtijevaju, te prate i analiziraju: srednja visina neravnina R_a [μm], maksimalna visina neravnina R_y [μm], visina neravnina u 10 tačaka mjerenog profila R_z [μm], ili odgovarajući površinski parametri. Pored nabrojanih, prati se i procenat nošenja, kojim se opisuje punoća i glatkoća profila, čime se omogućava formiranje Abot-ove krive.



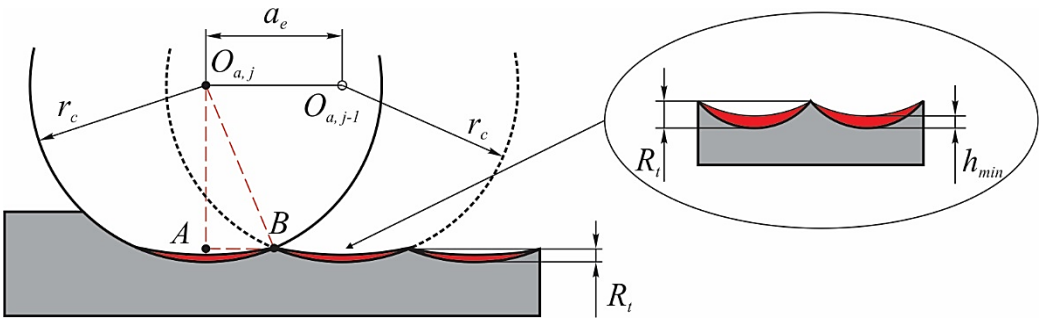
Slika 3.10. Model talasasto hrapave površine u mikroglodanju

Na slici 3.11 je prikazana geometrija zone obrade i definicija teoretske visina neravnina. Teoretski pretpostavljeni rang vrijednosti parametara hrapavosti se kreće relativno blizu ranga vrijednosti efektivnih tehnoloških parametara. Pored ranije pomenutih, može se pretpostaviti da na vrijednost parametara hrapavosti utiče minimalna debljina strugotine, koja u ovom slučaju predstavlja debljinu sloja materijala obratka koji nije uklonjen. Prema predstavljenoj situaciji, ukoliko su vrijednosti efektivnih tehnoloških parametra bliske vrijednostima minimalne debljine strugotine, pokazatelji hrapavosti će imati neku približno konstantnu vrijednost, bez obzira na promjenu vrijednosti tih parametara.

Ukoliko se posmatraju teoretske vrijednosti parametara hrapavosti, analizom prethodne slike mogu se koristiti geometrijske relacije prilikom uspostavljanja međusobnih funkcionalnih zavisnosti. Posmatrajući pravougli trougao $\Delta ABO_{a,j}$ može se napisati jednakosti:

$$r_c{}^2 = \left(\frac{a_e}{2}\right)^2 + (r_c - R_t)^2 \tag{3.36}$$

gdje je r_c poluprečnik mikroglodala, a_e širina obrade, R_t teoretska visina neravnina.



Slika 3.11. Teoretska visina neravnina u mikroglodanju

Shodno tome, teoretska visina neravnina R_t [μm] u pravcu zauzimanja prolaza, uz izostavljanje relativno malih veličina ${R_t}^2 \approx 0$, zavisi od širine obrade a_e [μm] i poluprečnika mikroglodala r_c [μm]:

$$R_t = \frac{{a_e}^2}{8 \cdot r_c} \tag{3.37}$$

Vrijednost prethodnog parametra hrapavosti, mjereno u pravcu vektora pomoćnog kretanja, može se predstaviti istim funkcionalnim zavisnostima, ukoliko se umjesto a_e uzme u obzir f_z. Ekvivalentno teoretskoj maksimalnoj visini neravnina u pravcu zauzimanja prolaza, teoretska maksimalna visina neravnina u pravcu vektora pomoćnog kretanja se može izračunati korišćenjem prethodnog obrasca u kojem umjesto širine obrade, konfiguriše korak po zubu. Prema teoretskim pretpostavkama, srednja visina neravnina je za određen procenat manja od maksimalne visine neravnina. Vrijednosti parametara hrapavosti je potrebno posmatrati i u različitim trenucima obrade, odnosno za različite stepene pohabanosti reznog klina. Može se zaključiti da na srednju visinu neravnina utiče veći broj ulaznih parametara, zbog specifičnosti mikrorezanja. Shodno tome, na maksimalnu i srednju visinu neravnina, pored minimalne debljine strugotine i širine obrade, uticaj imaju i drugi parametri: krupnoća kristalnog zrna materijala obratka i efektivna brzina obrade, kao parametri koji utiču na proces odvajanja materijala obratka.

Objedinjeni uticaj strukture materijala obratka i minimalne debljine strugotine na visinu neravnina, može se opisati uticajem tvrdoće materijala obratka. Relativno često korišćen pokazatelj hrapavosti obrađene površine u mikrorezanju, jeste visina neravnina u 10 tačaka profila (R_z), mjerena u smjeru zauzimanja prolaza. Posljedično, ukoliko se posmatra obrada površine pod nagibom, loptastim mikroglodalom jedinstvene geometrije, za pomenuti kriterijum obradivosti se može pretpostaviti sljedeći model:

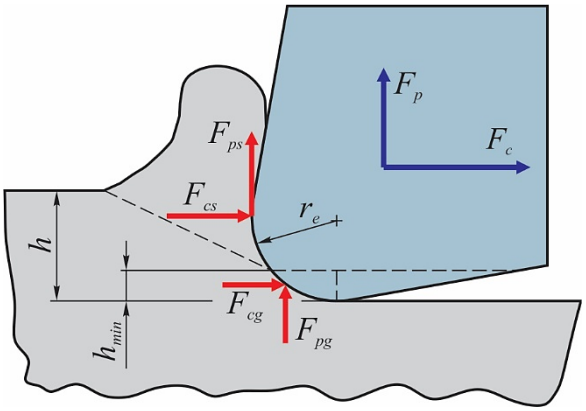
$$R_z = \begin{cases} \text{Konstantno}, & \text{za } a_e \leq h_{min} \\ C \cdot {a_e}^x \cdot {f_z}^y \cdot {v_{ce}}^z \cdot HRc^k, & \text{za } a_e > h_{min} \end{cases} \tag{3.38}$$

gdje su C, x, y, z, k koeficijent i eksponenti hrapavosti obrađene površine. Jasno je da se mora razdvojiti uticaj brzine rezanja od nagiba obrađivane površine, zbog definicije efektivne brzine.

3.3.4. Model sila rezanja

Sile rezanja dovode do deformacija alata, a time i direktno do odstupanja od zadate putanje pri obradi. Ukoliko sile rezanja pređu kritične vrijednosti, dolazi do loma reznog klina alata, kao i samog mikroglodala. Proces smicanja i gnječenja materijala obratka je uzročnik pojave sila rezanja. Shodno tome, sile rezanja u prvom redu zavise od mehaničkih svojstava materijala obratka, a zbog prisustva efekta veličine, i od svojstava njegove kristalne strukture i minimalne debljine strugotine. Intenzitet sila rezanja zavisi od vrijednosti geometrijskih parametara obrade. U zoni obrade, rezultujuća sila rezanja se može razložiti na dvije komponente, i to: glavnu silu rezanja (F_c), u pravcu vektora brzine i upravnu na reznu ivicu, te silu prodiranja (F_p), upravnu na obrađenu površinu i u pravcu ose rotacije mikroglodala (Slika 3.12).

Na osnovu teoretskih izvora, zaključeno je da elastična deformacija materijala obratka stvara dodatni otpor kojim se materijal suprotstavlja prodiranju reznog klina. Zbog velike tvrdoće i karakteristične kristalne strukture materijala obratka, ova komponenta sile se zanemaruje. Prisustvo efekta veličine, uslovljava situaciju uslijed koje rezni klin smiče i gnječi materijal obratka prilikom zahvatanja materijala obratka. Proces gnječenja materijala, kao ekvivalent njegovom plastičnom tečenju i plastičnosti, u direktnoj je vezi sa tvrdoćom materijala.



Slika 3.12. Komponente rezultujuće sile rezanja na reznom klinu alata

Najveći procenat gnječenja materijala se odvija u uskoj zoni dijela rezne ivice, koja odgovara negativnoj vrijednosti grudnog ugla, odnosno debljinama strugotine manjim od poluprečnika zaobljenja rezne ivice. Jasno je da, i mehanizam smicanja i mehanizam gnječenja materijala, doprinose intenzitetu glavne sile i sile prodiranja. Shodno tome, glavna sila rezanja se može definisati kao zbir komponente glavne sile rezanja uslijed smicanja i komponente glavne sile rezanja uslijed gnječenja materijala. Kako na obe komponente glavne sile rezanja utiču geometrijski parametri obrade i mehaničke osobine materijala obratka, glavna sila rezanja se može opisati sljedećim jednakostima:

$$F_c = F_{cs} + F_{cg} = K_{cs} \cdot (h - h_{min}) \cdot b + HRc^c \cdot (r_c - h_{min}) \cdot b \tag{3.39}$$

kao i sila prodiranja:

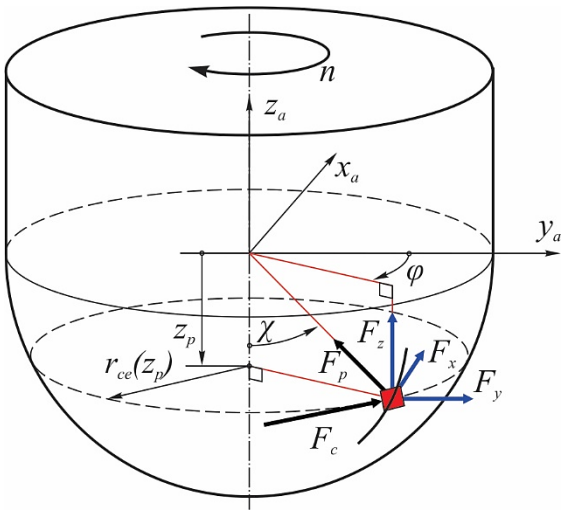
$$F_p = F_{ps} + F_{pg} = K_{cp} \cdot (h - h_{min}) \cdot b + HRc^p \cdot (r_c - h_{min}) \cdot b \tag{3.40}$$

gdje su r_c poluprečnik zaobljenja rezne ivice, h debljina strugotine, b širina strugotine, HRc tvrdoća materijala obratka, h_{min} minimalna debljina strugotine, K_{cs} specifični otpor smicanja strugotine u pravcu glavne sile rezanja, K_{cp} specifični otpor smicanja strugotine u pravcu sile prodiranja, c eksponent tvrdoće za glavnu silu rezanja i p eksponent tvrdoće za silu prodiranja.

Predstavljeni modeli su dati prema srednjim vrijednostima geometrijskih parametara obrade. Date sile rezanja se mogu prezentovati i preko integracije njihovih vrijednosti, deriviranih duž rezne ivice mikroglodala i duž dodirne krive između alata i neobrađene površine obratka. Pri tome se mogu koristiti naprijed definisane uređene četvorke (φ, χ, b, h).

U svrhu kalibrisanja koeficijenata, eksponenata i specifičnih otpora u prethodno datim modelima sila rezanja, neophodno je definisati sile rezanja u pravcu osa mikroglodala. Sile rezanja u pravcu osa mikroglodala zavise od glavne sile rezanja i sile prodiranja, te tekućih vrijednosti ugla zahvata i ugla dodira (Slika 3.13). Analizom pomenute slike, dolazi se do funkcionalne zavisnosti sila rezanja u pravcu osa mikroglodala, koja se može predstaviti matričnom jednačinom:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \cos\varphi \cdot \sin\chi & 0 \\ \sin\varphi & -\sin\varphi \cdot \sin\chi & 0 \\ 0 & \cos\chi & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_c \\ F_p \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.41}$$



Slika 3.13. Odnosi sila rezanja na reznom klinu i sila rezanja duž osa

Prethodni matrični obrazac vrijedi i u slučaju korišćenja vrijednosti sila rezanja modeliranih preko srednjih vrijednosti i u slučaju korišćenja deriviranih sila rezanja. U slučaju korišćenja sila rezanja deriviranih duž rezne ivice i duž linije dodira mikroglodala i obratka, jasno je da je ugao zahvata (φ) tekuća vrijednost. Ugao dodira (χ) odgovara derivatu površine poprečnog presjeka strugotine, određene sa trenutnom vrijednošću debljine strugotine h i derivata širine db.

Uzimajući u obzir prethodno date modele sila rezanja na reznom klinu i opisane uticaje svojstava obratka, svojstava mikroglodala, te ulaznih parametara obrade na njihovu vrijednost, moguće je definisati odgovarajuće modele za sile rezanja u pravcu osa. Od tehnoloških parametara obrade, najveći uticaj na vrijednost sila rezanja duž osa ima dubina obrade, a zatim korak po zubu. Ukoliko tokom obrade dominira efekat veličine, tada izostaje formiranje strugotine, te vrh glodala klizi po obrađivanoj površini. Pomenuti slučaj se javlja ukoliko je vrijednost minimalne debljine strugotine veća od dubine obrade, pri ustaljenom procesu obrade i nepromenjenim početnim vrijednostima ostalih tehnoloških parametara obrade. U tom slučaju, može se zaključiti da sila

rezanja u pravcu y-ose, odnosno u pravcu kretnja mikroglodala, zavisi od sile u pravcu z-ose i koeficijenta trenja između mikroglodala i obratka, dok je sila u pravcu x-ose približno jednaka 0. Sila rezanja u pravcu z-ose zavisi od savojne krutosti mikroglodala i njegove deformacije. Pomenuta deformacija se ogleda u defleksiji mikroglodala, uzrokovane pomjeranjem njegovog vrha. Pomjeranje je jednako debljini neobrađenog sloja materijala obratka, odnosno dubine obrade. Na osnovu navedenog, moguće je predložiti modele za sile rezanja u pravcu osa, i to za silu rezanja u pravcu x-ose:

$$F_x = \begin{cases} \approx 0, & \text{za } a_p \leq h_{min} \\ C_x \cdot {a_p}^{x_x} \cdot {a_e}^{y_x} \cdot {f_z}^{z_x} \cdot HRc^{k_x}, & \text{za } a_p > h_{min} \end{cases} \tag{3.42}$$

za silu rezanja u pravcu y-ose:

$$F_y = \begin{cases} \mu \cdot F_z, & \text{za } a_p \leq h_{min} \\ C_y \cdot {a_p}^{x_y} \cdot {a_e}^{y_y} \cdot {f_z}^{z_y} \cdot HRc^{k_y}, & \text{za } a_p > h_{min} \end{cases} \tag{3.43}$$

i za silu rezanja u pravcu z-ose:

$$F_z = \begin{cases} f\left(a_p, k_s\right), & \text{za } a_p \leq h_{min} \\ C_i \cdot {a_p}^{x_i} \cdot {a_e}^{y_i} \cdot {f_z}^{z_i} \cdot HRc^{k_i}, & \text{za } a_p > h_{min} \end{cases} \tag{3.44}$$

pri čemu je μ koeficijent trenja između mikroglodala i obratka, k_s savojna krutost mikroglodala, a_p dubina obrade, a_e širina obrade, f_z korak po zubu, HRc tvrdoća materijala obratka, h_{min} minimalna debljina strugotine i C_i, x_i, y_i, z_i, k_i odgovarajući koeficijenti i eksponenti varijabli u modelima sila rezanja u pravcu osa.

3.3.5. Model defleksije mikroglodala

Defleksija mikroglodala je direktna posljedica djelovanja sila rezanja. Vrijednost defleksije zavisi od pravca i intenziteta sila rezanja, te krutosti mikroglodala. Ona direktno utiče na tačnost obrade. U tom slučaju defleksija se može opisati otklonom mikroglodala (δ), koje predstavlja odstupanje njegove elastične linije u nekoj tački, od idealne vertikalne ose. Jasno je da je u ovom slučaju vertikalna osa upravo osa obrtanja.

Otklon mikroglodala uslijed sila rezanja, može se modelirati korišćenjem regresionog obrasca. Njegove varijable su parametri obrade i karakteristike materijala obratka čiji je uticaj obuhvaćen modelima sila rezanja. Ovaj obrazac može poslužiti u definiciji korelacija između sila rezanja duž osa i ugiba mikroglodala. Uticaj sila rezanja na defleksiju obuhvaćen je tehnološkim parametrima od kojih zavisi površina reznog sloja, i to pod uticajem dubine obrade, širine obrade i koraka po zubu. Uticaj fizičkih svojstava materijala obratka je obuhvaćen uticajem tvrdoće. Navedeni uticaji se mogu razmatrati za različite nagibe obrađivane površine, čime se razmatra uticaj geometrije dodira mikroglodala i obratka. U svrhu analize uticaja parametara na vrijednost defleksije i analize varijanse, predlaže se sljedeći model defleksije mikroglodala u pravcu x-ose, za jedinstvenu geometriju mikroglodala i nagib površine obratka:

$$\delta_x = \begin{cases} \text{Konstantna}, & \text{za } a_p \leq h_{min} \\ C \cdot {a_p}^x \cdot {a_e}^y \cdot {f_z}^z \cdot HRc^t, & \text{za } a_p > h_{min} \end{cases} \tag{3.45}$$

gdje je HRc tvrdoća materijala obratka, a_p dubina obrade, a_e širina obrade, f_z korak po zubu, te C, x, y, z, t koeficijent i eksponenti defleksije mikroglodala.

Uslijed defleksije mikroglodala, sve tačke na tijelu mikroglodala će pretrpjeti pomjeranje, koje se može razložiti na pomjeranje u pravcu osa mikroglodala. Najveće pomjeranje će se dešavati u pravcu x-ose i y-ose. Pomjeranje u pravcu z-ose, zbog relativno malih vrijednosti, se može zanemariti. Pomjeranje u pravcu osa direktno utiče na vrijednost ranije definisanih efektivnih tehnoloških i geometrijskih parametara obrade. Njihov uticaj se može opisati uvođenjem transformacije translacije, čiji su argumenti odstupanja po pojedinim osama mikroglodala. Translacija se izvodi u koordinatnom sistemu alata. Shodno tome, koordinate karakterističnih tačaka u zoni dodira mikroglodala i obratka, poprimaju vrijednosti prema obrascu:

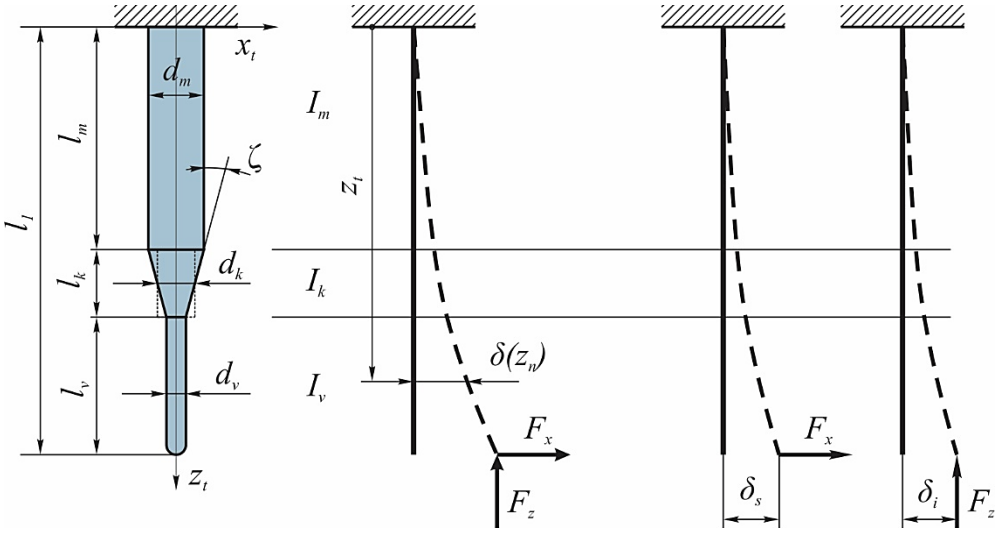
$$\mathbf{P_\delta} = \mathbf{P_a} \cdot \mathbf{T_{y_a}}(\delta_x, \delta_y, \delta_z) \tag{3.46}$$

gdje je $\mathbf{P_\delta}$ matrica novih koordinata pomjerene karakteristične tačke u koordinatnom sistemu $O_a x_a y_a z_a$, $\mathbf{P_a}$ matrica nominalnih koordinata karakteristične tačke u koordinatnom sistemu $O_a x_a y_a z_a$, $\mathbf{T_{y_a}}(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$ matrica translacije za defleksiju u pravcu odgovarajuće ose.

Nadalje, koordinate karakterističnih tačaka, će poprimiti nove vrijednosti:

$$[x_a \quad y_a \quad z_a \quad 1] = [x_p \quad y_p \quad z_p \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \delta_x & \delta_y & \delta_z & 1 \end{bmatrix} \tag{3.47}$$

Loptasto mikroglodalo sa dugačkim vratom, koje je predmet proučavanja, se zbog svoje vitkosti može uprošćeno predstaviti kao Euler-Bernoulli-ova greda, odnosno konzolni nosač promjenjivog poprečnog presjeka, sa uklještenjem i slobodnim krajem na kojem djeluju sile po osama (Slika 3.14). Ukoliko se posmatraju sile rezanja po osama, jasno je da će mikroglodalo biti opterećeno na savijanje, pritisak i elastično izvijanje. Prema ranije datoj situaciji, narušavanje tačnosti obrade uzrokuje sila rezanja čiji pravac djelovanja odgovara normali na obrađenu površinu, u ovom slučaju F_x. Shodno uticaju na tačnost obrade i karakteristikama mikroglodala, deformacija uslijed aksijalnog pritiska se može zanemariti.



Slika 3.14. Deformacija i otkloni mikroglodala

Shodno ranije nominalno definisanoj geometriji mikroglodala: prečnik drške (d_m), prečnikom vrata odnosno reznog dijela (d_c), dužinom prepusta (l_1), dužinom vrata (l_3) i uglom konusa (ζ), nadalje se mogu definisati njegova tri dijela, sa geometrijskim parametrima i parametrima krutosti. Prvi dio predstavlja drška prečnika d_m, čija je dužina $l_m = l_1 - l_k - l_3$, a kojoj odgovara aksijalni moment inercije presjeka I_m i modul elastičnosti E_m. Drugi dio je konusni dio koji se može predstaviti ekvivalentnim vrijednostima, budući da je ciljni dio mikroglodala dio pri vrhu alata, koji se nalazi na njegovom reznom dijelu. Shodno tome, mogu se definisati: modul elastičnosti E_k, dužina $l_k = 0.5 \cdot (d_m - d_c) \cdot \mathrm{ctg}\,\zeta$, ekvivalentni prečnik d_k, te odgovarajući ekvivalentni moment inercije I_k. Za treći dio, vrat sa loptastim reznim dijelom, takođe se mogu definisati ekvivalentne vrijednosti, i to: modul elastičnosti E_v, dužina vrata $l_v = l_3$ i ekvivalentni prečnik vrata kao 80% vrijednosti prečnika glodala (d_c), odnosno $d_v = 0.8 \cdot d_c$, a time i odgovarajući moment inercije I_v.

Momenti inercije pojedinačnih dijelova na tijelu mikroglodala se računaju na osnovu obrasca za kružni poprečni presjek:

$$I_i = \frac{{d_i}^4 \cdot \pi}{64}, \quad i = m, k, v \tag{3.48}$$

gdje je d_i prečnik dijela tijela mikroglodala.

U svrhu proračuna ugiba konzolnog nosača, iskoristiće se Maxwell-Moor-ov metod jedinične sile [174]. Neka je diferencijalna jednačina elastične linije:

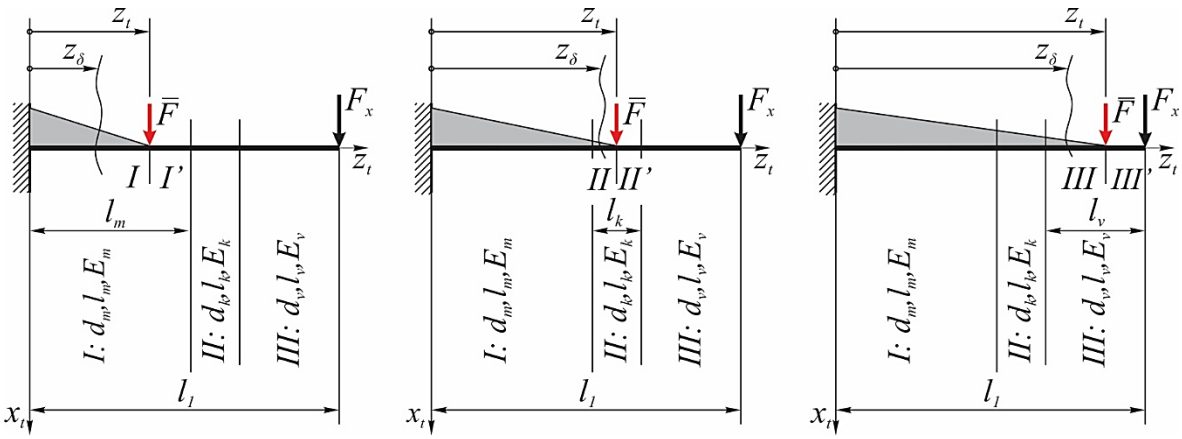
$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{M_x(z)}{E \cdot I_x} \tag{3.49}$$

a diferencijalna jednačina zavisnosti momenta savijanja od spoljašnjeg opterećenja:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial z^2} = -q(z) \tag{3.50}$$

pri čemu je u funkcija ugiba zavisna od uzdužne koordinate posmatranog presjeka z, $M_x(z)$ funkcija momenta savijanja u posmatranom presjeku, $q(z)$ funkcija spoljašnjeg opterećenja u posmatranom presjeku, E modul elastičnosti, I_x moment inercije posmatranog presjeka.

Osnovni Maxwell-Moor-ov metod je metod proračuna ugiba i opterećenja nosača, koji se zasniva na sličnosti diferencijalne jednačine elastične linije, odnosno činjenici, da je odnos linije momenata i opterećenja isti kao odnos elastične linije i dijagrama momenata podijeljenog sa savojnom krutošću. Kod ove metode, ugib se određuje korišćenjem fiktivnog opterećenja proizvoljne vrijednosti $\bar{F}$, čija je napadna tačka odgovara mjestu traženog ugiba. Kao vrijednost navedenog opterećenja može se uzeti $\bar{F} = 1$, te se metod i naziva Maxwell-Moor-ov metod jedinične sile (Slika 3.15).



Slika 3.15. Interpretacija Maxwell-Moor-ove metode jedinične sile

Korišćenjem pomenute metode, u kombinaciji sa metodom integraljenja po Vereščaginu, ugib posmatrane tačke iznosi:

$$\delta_s = \int_0^L \frac{M_x \cdot \bar{M}_x}{E \cdot I} dz \tag{3.51}$$

u kojoj figurišu moment aktivne sile (M_x), moment jedinične sile odnosno jedinični moment ($\bar{M}_x$) i odgovarajuća savojna krutost, odnosno proizvod modula elastičnosti materijala mikroglodala (E) i momenta inercije (I).

Aktivni moment savijanja, u prvom redu, uzrokuje radijalna sila odnosno sila rezanja u pravcu x-ose (F_x). Takođe, aktivni moment savijanja uzrokuje i aksijalna sila odnosno sila u pravcu z-ose (F_z), jer je ekscentrična u odnosu na osu obrtanja mikroglodala. Momenti aktivne sile za posmatranu tačku, po poljima konzole, dobijaju se na osnovu funkcionalne zavisnosti:

$$M_x = \begin{cases} M_{x,I} = -F_x \cdot (l_1 - z_t), & \text{za} \quad 0 \le z_t \le l_m \\ M_{x,II} = -F_x \cdot (l_1 - z_t), & \text{za} \quad l_m \le z_t \le l_m + l_k \\ M_{x,III} = -F_x \cdot (l_1 - z_t), & \text{za} \quad l_m + l_k \le z_t \le l_1 \end{cases} \tag{3.52}$$

gdje je F_x radijalna sila u pravcu x-ose.

Za prvo polje konzole, u kojoj tekuća koordinata tačke za koju se traži ugib z_δ varira u granicama $0 \le z_\delta \le l_m$, jedinični moment za lijevi dio prvog polja posmatrano od napadne tačke jedinične sile do posmatrane tačke iznosi:

$$\bar{M}_{x,I'} = -\bar{F} \cdot (z_\delta - z_t) = z_t - z_\delta \tag{3.53}$$

Ugib u tačkama konzole, koje pripadaju naprijed datim granicama, računa se na osnovu integrala:

$$\delta_s = \int_0^{z_\delta} \frac{M_{x,I} \cdot \bar{M}_{x,I'}}{E_m \cdot I_m} dz_t = \int_0^{z_\delta} \frac{-F_x \cdot (l_1 - z_t) \cdot (z_t - z_\delta)}{E_m \cdot I_m} dz_t \tag{3.54}$$

Za drugo polje, u kojoj tekuća koordinata varira u granicama $l_m \le z_\delta \le l_m + l_k$, jedinični moment za prvo polje, te lijevi dio drugog polja posmatrano od napadne tačke jedinične sile do posmatrane tačke, su jednaki i iznose:

$$\bar{M}_{x,II'} = \bar{M}_{x,I} = -\bar{F} \cdot (z_\delta - z_t) = z_t - z_\delta \tag{3.55}$$

Ugib za neku tačku u posmatranom polju konzole, određenu tekućom koordinatom polja z_δ, računa se razvojem integrala u kojem figuriše i jedinični moment prvog polja, tako da se dobija jednakost:

$$\delta_s = \int_0^{l_m} \frac{M_{x,I} \cdot \bar{M}_{x,I}}{E_m \cdot I_m} dz_t + \int_{l_m}^{z_\delta} \frac{M_{x,II} \cdot \bar{M}_{x,II'}}{E_k \cdot I_k} dz_t \tag{3.56}$$

Za treće polje, u kojoj tekuća koordinata polja se kreće u granicama $l_m + l_k \le z_\delta \le l_1$, jedinični moment za prvo i drugo polje, te lijevi dio trećeg polja posmatrano od napadne tačke jedinične sile do posmatrane tačke, su jednaki i iznose:

$$\bar{M}_{x,III'} = \bar{M}_{x,I} = \bar{M}_{x,II} = -\bar{F} \cdot (z_\delta - z_t) = z_t - z_\delta \tag{3.57}$$

Shodno tome, ugib tačke na konzoli koja pripada naprijed datom polju, računa se kao:

$$\delta_s = \int_0^{l_m} \frac{M_{x,I} \cdot \bar{M}_{x,I}}{E_m \cdot I_m} dz_t + \int_{l_m}^{l_m+l_k} \frac{M_{x,II} \cdot \bar{M}_{x,II}}{E_k \cdot I_k} dz_t + \int_{l_m+l_k}^{z_\delta} \frac{M_{x,III} \cdot \bar{M}_{x,III'}}{E_v \cdot I_v} dz_t \tag{3.58}$$

Rješenjem naprijed datih određenih integrala, dobija se ugib konzole odnosno otklon mikroglodala uslijed savijanja. Vrijednost otklona mikroglodala, u bilo kojoj tački na tijelu mikroglodala, a čija je tekuća koordinata z_δ, može se odrediti prema sljedećem:

- ukoliko se posmatrana tačka nalazi na dršci mikroglodala, odnosno u području sa granicama $0 \leq z_\delta \leq l_m$:

$$\delta_s(z_\delta) = \frac{F_x}{E_m \cdot I_m} \cdot \left(\frac{l_1 \cdot {z_\delta}^2}{2} - \frac{{z_\delta}^3}{6} \right) \tag{3.59}$$

- ukoliko se posmatrana tačka nalazi na konusnom dijelu mikroglodala, odnosno u području sa granicama $l_m \leq z_\delta \leq l_m + l_k$:

$$\begin{aligned} \delta_s(z_\delta) = {} & \frac{F_x}{E_k \cdot I_k} \cdot \left(\frac{l_1 \cdot {z_\delta}^2}{2} - \frac{{z_\delta}^3}{6} \right) \\ & + \left(\frac{F_x}{E_k \cdot I_k} - \frac{F_x}{E_m \cdot I_m} \right) \cdot \left(\frac{{l_m}^2 \cdot (l_1 + z_\delta)}{2} - l_1 \cdot z_\delta \cdot l_m - \frac{{l_m}^3}{3} \right) \end{aligned} \tag{3.60}$$

- ukoliko se posmatrana tačka nalazi na vratnom dijelu mikroglodala, odnosno u području sa granicama $l_m + l_k \leq z_\delta \leq l_1$:

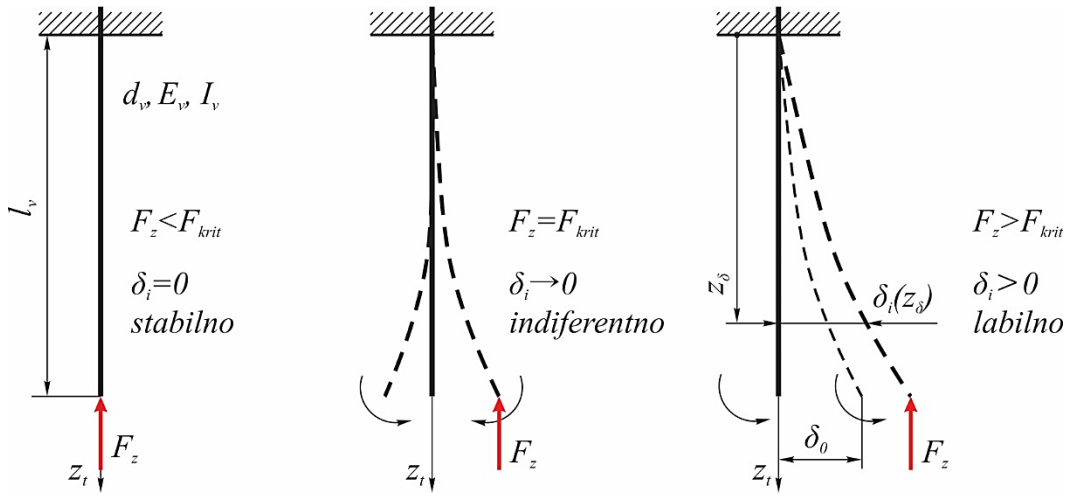
$$\begin{aligned} \delta_s(z_\delta) = {} & \frac{F_x}{E_v \cdot I_v} \cdot \left(\frac{l_1 \cdot {z_\delta}^2}{2} - \frac{{z_\delta}^3}{6} \right) \\ & + \left(\frac{F_x}{E_k \cdot I_k} - \frac{F_x}{E_m \cdot I_m} \right) \cdot \left(\frac{{l_m}^2 \cdot (l_1 + z_\delta)}{2} - l_1 \cdot z_\delta \cdot l_m - \frac{{l_m}^3}{3} \right) \\ & + \left(\frac{F_x}{E_v \cdot I_v} - \frac{F_x}{E_m \cdot I_m} \right) \cdot \left(\frac{(l_m + l_k)^2 \cdot (l_1 + z_\delta)}{2} - l_1 \cdot z_\delta \cdot (l_m + l_k) - \frac{(l_m + l_k)^3}{3} \right) \end{aligned} \tag{3.61}$$

Otklon mikroglodala uslijed izvijanja se javlja ukoliko je aksijalna sila, u ovom slučaju sila rezanja po uzdužnoj, vertikalnoj osi mikroglodala F_z, veća od Euler-ove kritične sile izvijanja F_{krit} [174]. Ponašanje konzole, kojom je predstavljeno mikroglodalo, uslijed djelovanja uzdužne sile F_z duž, opisuje se prema njenoj ravnoteži, koja može biti: stabilna, indiferentna ili labilna (Slika 3.16).

Zbog relativno velikog poprečnog presjeka drške i konusnog dijela, izvijanje mikroglodala će se analizirati samo za vratni dio. Euler-ova kritična sila za konzolu prikazanu na pomenutoj slici, računa se energetskom metodom, a zavisi od dužine posmatrane konzole, karakteristika materijala i veličine poprečnog presjeka:

$$F_{krit} = \frac{\pi^2 \cdot E_v \cdot I_v}{4 \cdot {l_v}^2} \tag{3.62}$$

gdje je I_v dužina konzole, E_v modul elastičnosti materijala konzole, I_v moment inercije poprečnog presjeka konzole.



Slika 3.16. Ponašanje konzole uslijed djelovanja uzdužne sile

Za proizvoljni posmatrani presjek konzole, određen tekućom koordinatom z_δ, moment savijanja ima vrijednost $M = -F \cdot (\delta_0 - \delta_i)$, tako da će diferencijalna jednačina elastične linije konzole imati oblik:

$$\frac{\partial^2 \delta_i}{\partial {z_t}^2} = -\frac{M_x(z_t)}{E_v \cdot I_v} = \frac{F_z \cdot (\delta_0 - \delta_i)}{E_v \cdot I_v} \tag{3.63}$$

Kako je prethodna diferencijalna jednačina nehomogena jednačina drugog reda, njenim rješavanjem uz korišćenje graničnih uslova je ugib i nagib elastične linije na mjestu uklještenja jednak nuli, dolazi se do otklona posmatrane tačke na konzoli:

$$\delta_i = \delta_0 \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{F_z \cdot z_t}{E_v \cdot I_v}\right)\right] \tag{3.64}$$

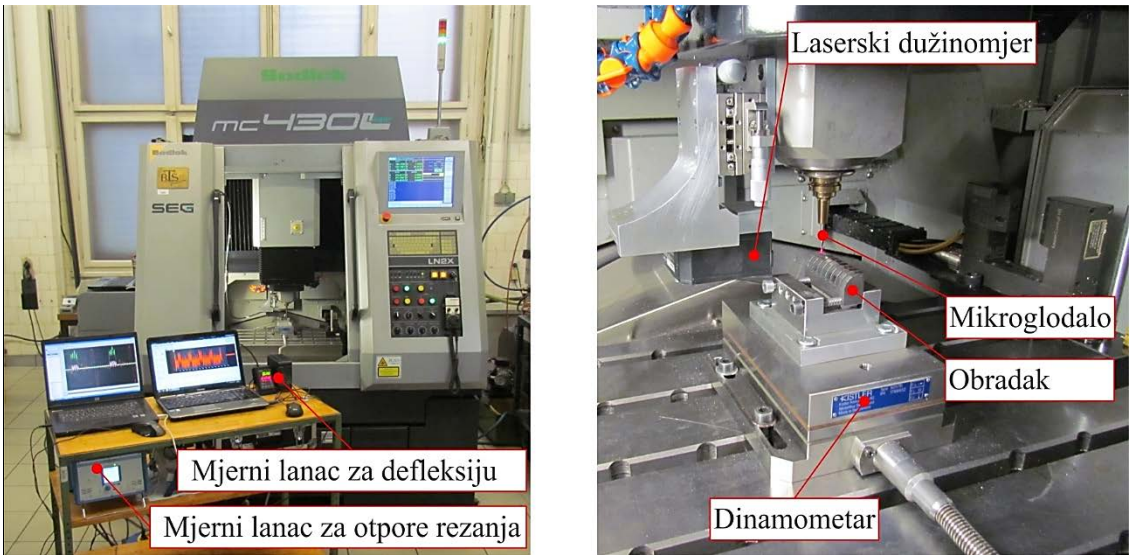
Poglavlje 4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju opisana je postavka i realizacija eksperimentalnih istraživanja. Procedura i plan eksperimentalnih istraživanja su definisani na osnovu postavljenih modela funkcija obradivosti, a u skladu sa ciljem i predmetom istraživanja. Nadalje, opisan je način izvođenja eksperimentalnih mjerenja, te dati osnovni podaci o mjernoj opremi. Prikazana eksperimentalna mjerenja su obavljena na *Katedri za menedžment obdelovalnih tehnologij* na Fakultetu za strojništvo u Ljubljani, u laboratorijama LABOD i LAZAK [175].

4.1. POSTAVKA EKPERIMENTA

4.1.1. Mašina alatka

Eksperimentalna istraživanja su izvršena na visokobrzinskom preciznom troosnom obradnom centru *Sodick MC430L*, opremljenog sa upravljačkom jedinicom *LN2X* sa *Windows* platformom (Slika 4.1). Njegov radni prostor u pravcu x, y i z-ose iznosi 420 x 350 x 200 mm, respektivno. Obradni centar je opremljen magacinom sa 16 gnijezda za alate za obradu rezanjem, namijenjenih za postavljanje u držač alata HSK-E25. Montaža alata se realizuje preklopom nastalim uslijed toplotnog skupljanja držača. U okviru opreme obradnog centra nalazi se sistem za automatsko umjeravanje alata BLUM-Micro, te elektronska dodirna glava za umjeravanje nulte tačke obratka sa infra-crvenom (eng. *infra-red* - IR) komunikacijom. Doziranje sredstva za hlađenje i podmazivanje se vrši standardnom tehnikom podmazivanja ili MQL tehnikom.



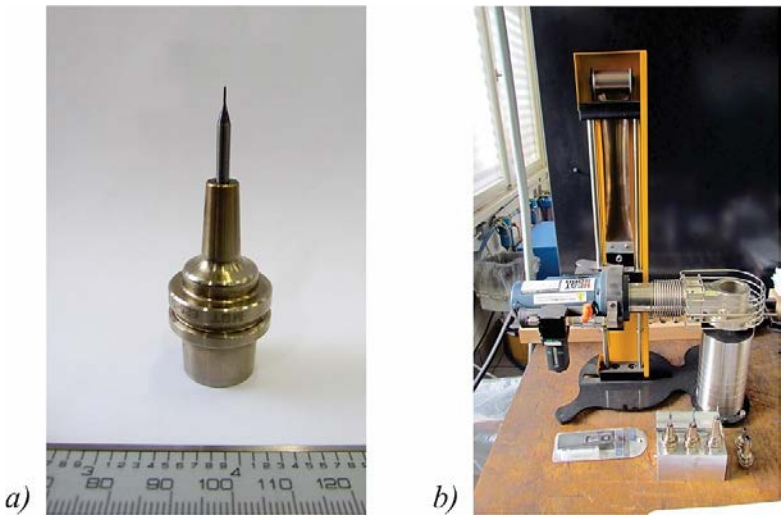
Slika 4.1. Generalna postavka eksperimenta na obradnom centru Sodick MC430L

Glavno vreteno obradnog centra je izvedeno kao motor-vreteno sa hibridnim ležajevima, dok je pogonski sistem linearnih osa izveden pomoću linearnih motora. Obradni centar posjeduje zasebne uređaje za hlađenje glavnog vretena i linearnih motora. Maksimalni broj obrtaja glavnog vretena je 40000 o/min. Maksimalna brzina pomoćnog kretanja u pravcu osa je 36000 mm/min, sa mogućnošću maksimalnog ubrzanja od 10 m/s². Rezolucija mjernog sistema mašine je 0,1 μm, dok je izmjerena poziciona tačnost od 1 μm. Obradni centar je ispitan prema standardu ISO 230, nakon čega je ujednačena preciznost pozicioniranja u pravcu osa.

4.1.2. Alat

U istraživanjima su korišćena vretenasta loptasta i ravna mikroglodala proizvođača *SECO*, serije *Jabro Mini* [176]. To su karbidna mikroglodala sa prevlakom od TiAlN. Korišćena loptasta mikroglodala su posjedovala dva zuba, dugački vratni dio, te tijelo dužine l_2 = 40 mm i prečnika d_m = 3 mm. Ugao uspona zavojnice je ω = 20°, a grudni ugao reznog klina mikroglodala γ = 4°. Za potrebe eksperimentalnih mjerenja korišćeni prečnici mikroglodala (d_c) su: 0.3, 0.5 i 0.6 mm, Glodala prečnika 0.3 mm nije imalo vratni dio, glodala prečnika 0.5 mm su imala vratni dio dužine l_3 = 4 mm, a glodala prečnika 0.6 mm vratni dio dužine l_3 = 4 mm. Prilikom montaže mikroglodala u HSK držač pomoću posebnog uređaja, prepusti alata (l_1) su podešavani na 20 i 25 mm (Slika 4.2). Mjerenjima je utvrđeno da srednja vrijednost poluprečnika rezne ivice iznosi r_e = 8 μm.

Vretenasta ravna glodala su korišćena u eksperimentima estimacije minimalne debljine strugotine, pri čemu je iskorišćena njihova sličnost bitnih geometrijskih veličina sa prethodno opisanim loptastim mikroglodalima. U tu svrhu, korišćeno je vretenasto glodalo prečnika d_c = 0.6 mm, dužine vrata l_3 = 5 mm. Ugao uspona zavojnice, iznosio je ω = 20°, a grudni ugao γ = 4°. Prečnik drške je bio d_m = 3 mm, a prepust je iznosio je l_1 = 20 mm.



Slika 4.2. Mikroglodalo sa držačem (a) i uređaj za montažu u držač (b)

Tokom istraživanja, korišćena je MQL tehnika podmazivanja. Korišćena je ekološka emulzija za podmazivanje, sastavljena od emulgirajućeg sintetičkog ulja u tehničkoj vodi. Koncentracija ulja u tehničkoj vodi je iznosila 3%. Fluid za podmazivanje mikroglodala i mjesta obrade je doziran kroz mlaznice, direktno u zonu dodira mikroglodala i obratka. Tom prilikom je korišćen pritisak fluida od p_{shp} = 5 bara, te protok od Q_{shp} = 0.25 ml/min, što je uslovilo da rezni fluid bude dovođen u obliku aerosola.

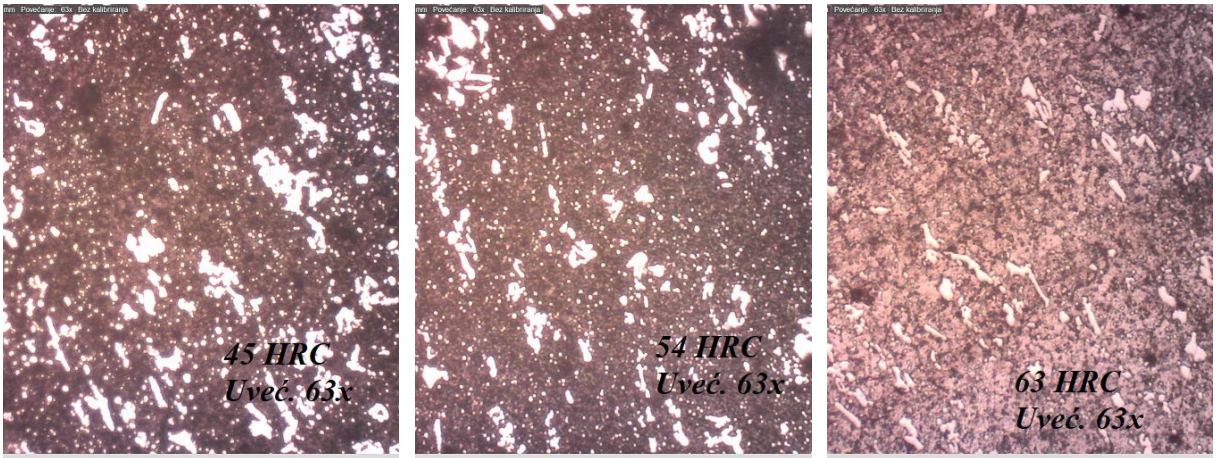
4.1.3. Materijal obratka

Kao materijal obratka korišćen je visokolegirani hrom-molibdenov alatni čelik namijenjen za rad u hladnom stanju oznake X155CrMoV12, distributera *Bogner Edelstahl* [177]. Ekvivalenti pomenutog čelika su AISI D2, 1.2379, SDK 11, Č4850 odnosno OCR12. Njegov hemijski sastav je dat u tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Tipični hemijski sastav materijala obratka

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	S	P
%	1.55	0.32	0.35	11.8	0.90	0.80	0.30	0.016	0.018

Čelik X155CrMoV12 ima izuzetne mehaničke osobine, dobru prokaljivost i provodljivost toplote, te se izuzetno teško obrađuje. Kaljenjem ovog čelika se dobija martenzitna struktura, u kojoj se nalaze karbidi legirajućih elemenata, što mu daje izuzetnu tvrdoću i otpornost na habanje (Slika 4.3). Koristi se za izradu visokoopterećenih alata za kovanje i istiskivanje u hladnom stanju, te za visokoopterećene funkcionalne dijelove kod kojih se zahtijeva izuzetno visoka otpornost na habanje pri povišenim temperaturama.



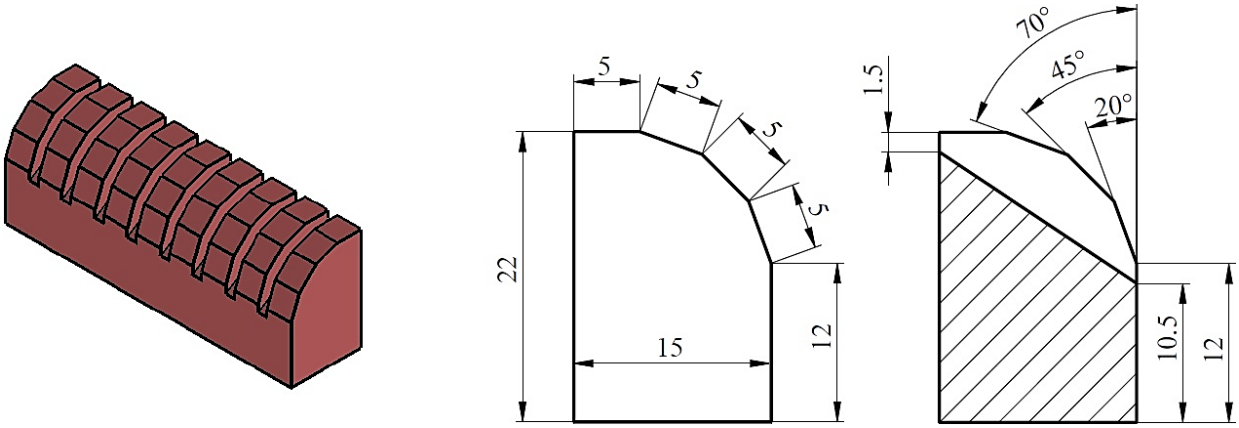
Slika 4.3. Struktura čelika X155CrMoV12 pod mikroskopom

Specifična masa čelika X155CrMoV12 je ρ_{spec} = 7700 kg/m³, koeficijent linearnog širenja iznosi $12.8 \cdot 10^{-6}$ 1/°C, koeficijent termičke provodljivost k = 20 W/m°C, specifični toplotni kapacitet c = 460 J/kg°C, dok modul elastičnosti iznosi $E = 2.1 \cdot 10^5$ MPa. Zatezna čvrstoća alatnog čelika X155CrMoV12 se kreće u granicama od R_m = 1800 - 2300 MPa. Za potrebe eksperimentalnih istraživanja, materijal obratka je sječen i pripremljen u termički neobrađenom stanju. Nakon pripreme, kaljen je na tri različite tvrdoće, i to: 45, 54 i 63 HRc, sa odstupanjima u dobijenoj i izmjerenoj tvrdoći od ±0.5 HRc. U tabeli 4.2. su, za navedene tvrdoće, date procijenjene vrijednosti odgovarajućih mehaničkih i strukturnih osobina.

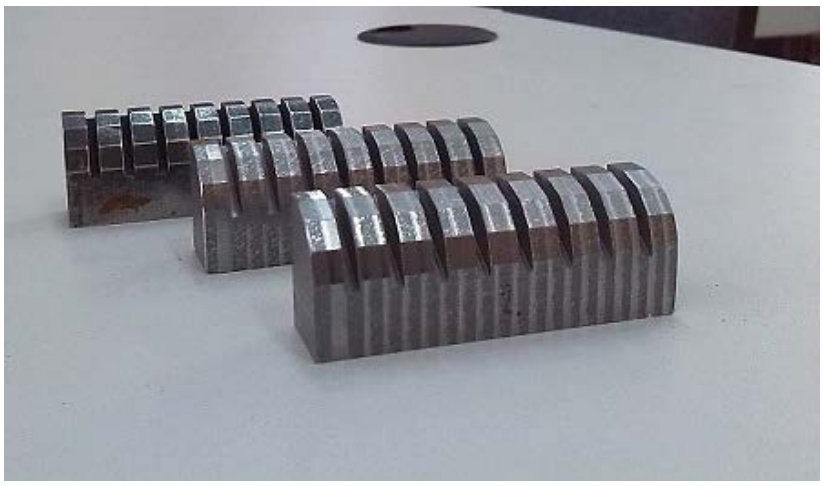
Tabela 4.2. Različite tvrdoće i karakteristike materijala obratka

Tvrdoća po Rokvelu (HRc)	**Napon tečenja σ_T (MPa)**
45	1500
54	1900
63	2200

Radi ispitivanja uticaja nagiba obrađivane površine na vrijednost izlaznih parametara obrade, pripremci su prije kaljenja izrađeni sa različitim nagibima (θ), i to: 0°, 20°, 45° i 70° (Slika 4.4). Svaka površina na pripremku je podijeljena, te odgovarajuće označena (Slika 4.5). Prije svakog eksperimentalnog mjerenja, svaki pripremak je očišćen, stegnut u stezni pribor, dodatno obrađen loptastim glodalom prečnika 6 mm, te ručno poliran.



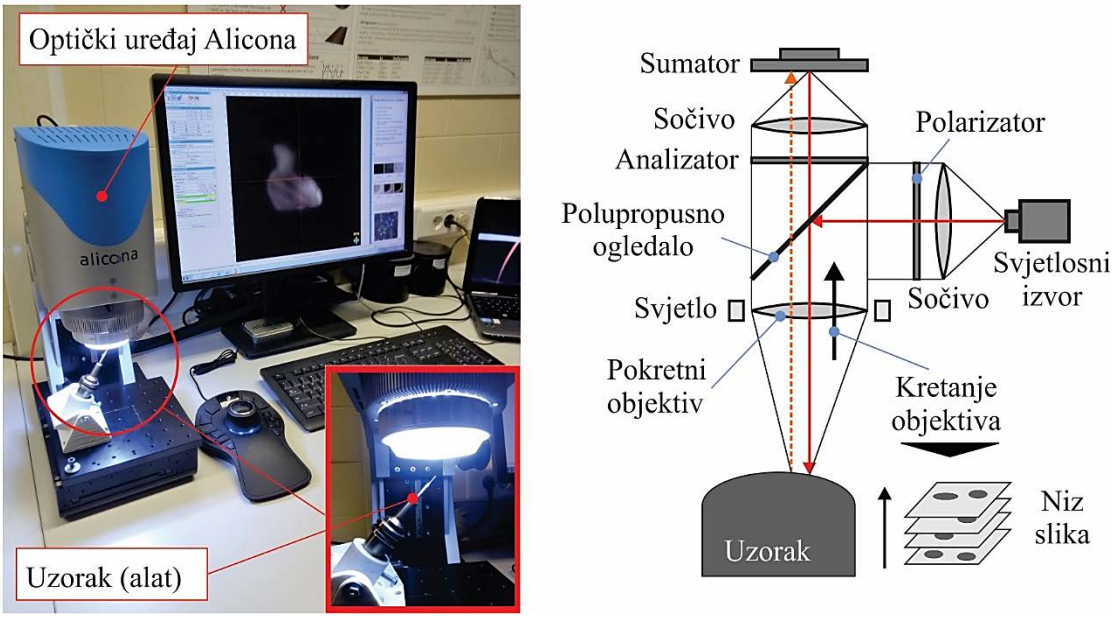
Slika 4.4. Oblik i dimenzije pripremka



Slika 4.5. Pripremljeni uzorci neposredno prije termičke obrade

4.2. MJERNA OPREMA

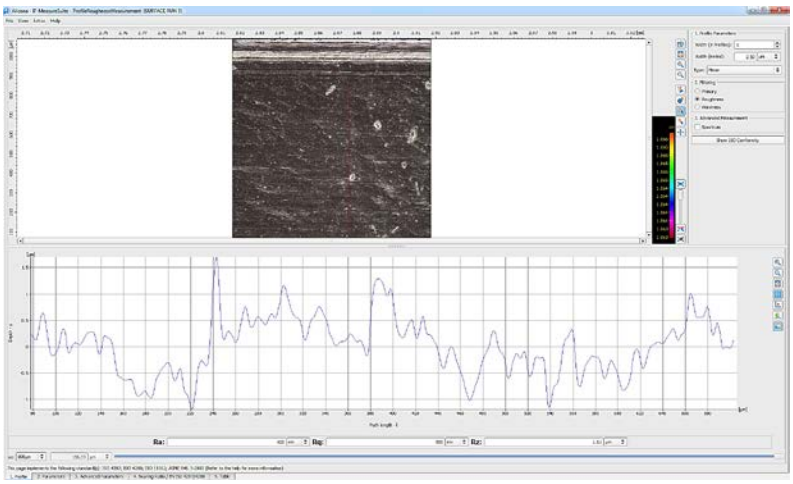
Dimenziono mjerenje na mikronivou, mjerenje habanja alata i hrapavosti obrađene površine su vršeni na optičkom mjernom uređaju *Alicona* [179]. Uređaj se sastoji od optičkog skenera *InfiniteFocus SL*, postolja sa držačima uzoraka, upravljačkog panela i računarskog softvera, sastavljenog od više modula (Slika 4.6). Skeniranje uzorka pomoću optičkog skenera odvija se na način da se objektiv skenera kontinualno pomjera vertikalno, te se dobija sukcesivni niz slika površine uzorka, tzv. principom varijacije fokusa. Iz trenutno dobijene slike izdvajaju se samo najoštriji dijelovi, bilježi njihova boja, te trenutna pozicija objektiva. Nakon analize slika, dobijene informacije se integrišu u trodimenzionalni topografski prikaz skenirane površine u boji.



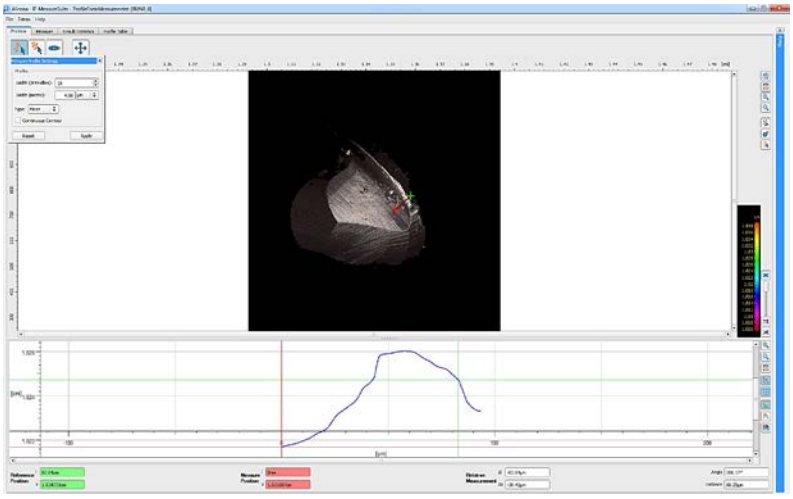
Slika 4.6. Optički skener Alicona InfinteFocus

Sva mjerenja su izvršena sa objektivom uvećanja 20x. Prema objektivu, vertikalna rezolucija skeniranja je iznosila 50 nm, horizontalna rezolucija je iznosila 0.88 µm, dok je šum iznosio 20 nm. Mjerenje hrapavosti obrađene površine izvršeno je prema standardu ISO 4287. Tačnost mjerenja hrapavosti obrađene površine za R_a = 0.1 µm, iznosila je 0.025 µm. Dimenzije mjernog područja su bile 1x1 mm. Analiza i očitavanje vrijednosti parametara hrapavosti obrađene površine se vrši u softverskom modulu „*Surface rouhness*“, na osnovu zadane linije profila od strane korisnika (Slika 4.7). Prilikom mjerenja hrapavosti korišćene su posebne ugaone prizme, koje su obrađenu površinu dovodile u vodoravni položaj u odnosu na objektiv.

Praćenje habanja mikroglodala mjerenjem poluprečnika zaobljenja rezne ivice su vršena u softverskom modulu „*Profile measurement*“, označavanjem ciljnog područja na topografskom prikazu skenirane površine rezna ivica (Slika 4.8). Tom prilikom se zadavala orijentacija i dužina pojasa mjerenja, te njegova širina i broj mjernih profila unutar širine. Softver nakon obrade podataka daje konturu skeniranog područja, koja se dalje analizira i mjeri. Za korišćeno uvećanje objektiva, optički skener ima mogućnost mjerenja poluprečnika zaobljenja rezne ivice u dijapazonu od 3 do 20 µm, pri čemu je tačnost mjerenja 0.15 µm. Uređaj *Alicona* je opremljena posebnim držačima uzoraka. U toku mjerenja habanja alata korišćen je držač sa mogućnošću ugaonog zakretanja.

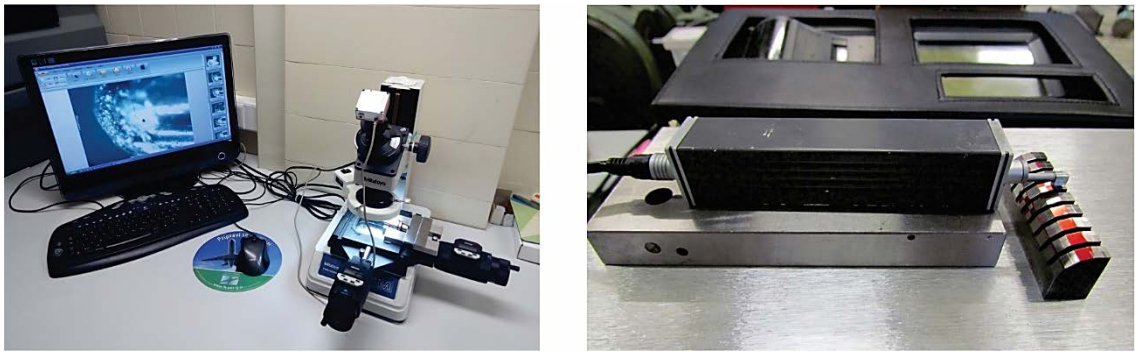


Slika 4.7. Korisničko okruženje „Surface Roughness“ u InfiniteFocus



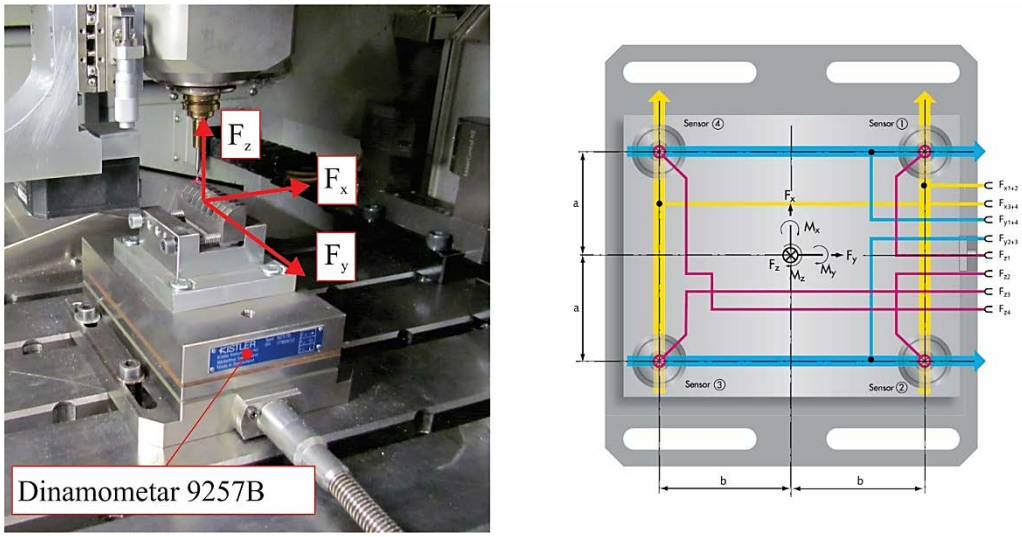
Slika 4.8. Korisničko okruženje „Profile Measurment“ u InfiniteFocus

Za potrebe dodatnih mjerenja, validacije i analize mjerenja dimenzija, hrapavosti i habanja alata, korišćeni su i alatni mikroskop *Mitutoyo TM-505* i uređaj za mjerenje hrapavosti *Mitutoyo Surftest SJ-301* (Slika 4.9). Alatni mikroskop je opremljen dvoosnim pokretnim stolom sa mikrometrima, kamerom sa rezolucijom od 5 MP i softverom za analizu slika. Uvećanje alatnog mikroskopa prilikom eksperimentalnih istraživanja je bilo 200x. Uređaj za mjerenje hrapavosti direktnim dodirom, posjedovao je konzolu sa mjernom iglicom čiji je prečnik vrha 2 μm. Rad i mjerenje na *Mitutoyo Surftest SJ-301* je prilagođeno standardu ISO 4287 [180].



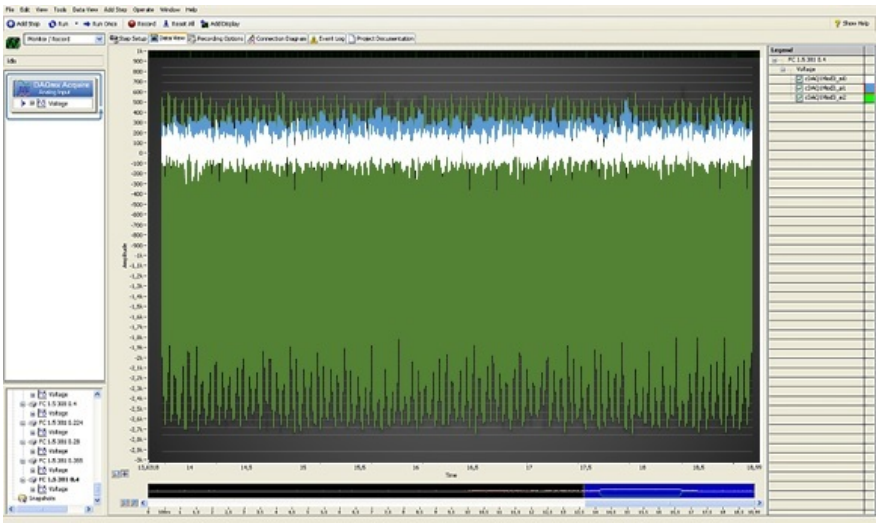
Slika 4.9. Alatni mikroskop (lijevo) i uređaj za mjerenje hrapavosti (desno)

Sile rezanja u eksperimentalnim istraživanjima su mjerene pomoću mjerno-akvizicionog uređaja *Kistler* [181], koji se sastojao od dinamometra *Kistler 9257B*, povezanog sa pojačivačem *Kistler 5070A*, te A/D kartice i računara sa softverom. Na dinamometar je bio montiran posebni stezni pribor, prilagođen obratku. Dinamometar *Kistler 9257B* je trokomponentni mjerač sile koji, pomoću piezoelektričnog efekta, omogućuje mjerenje sila u tri međusobno upravna pravca. U toku eksperimentalnih mjerenja mjerene su sile rezanja u pravcu translatornih osa obradnog centra (Slika 4.10). Dinamometar ima nekoliko nivoa kalibracije, a za potrebe mjerenja otpora rezanja pri mikroglodanju kalibrisan je opseg od -50 do +50 N za mjerenje u pravcu x i y-ose, te od -100 do +100 N u pravcu z-ose. Frekvencija mjerenja je podešena na 6 kHz. Za očekivane vrijednosti sila rezanja, u pojačivač su unijete vrijednosti od 10 N za sva tri mjerna pravca.



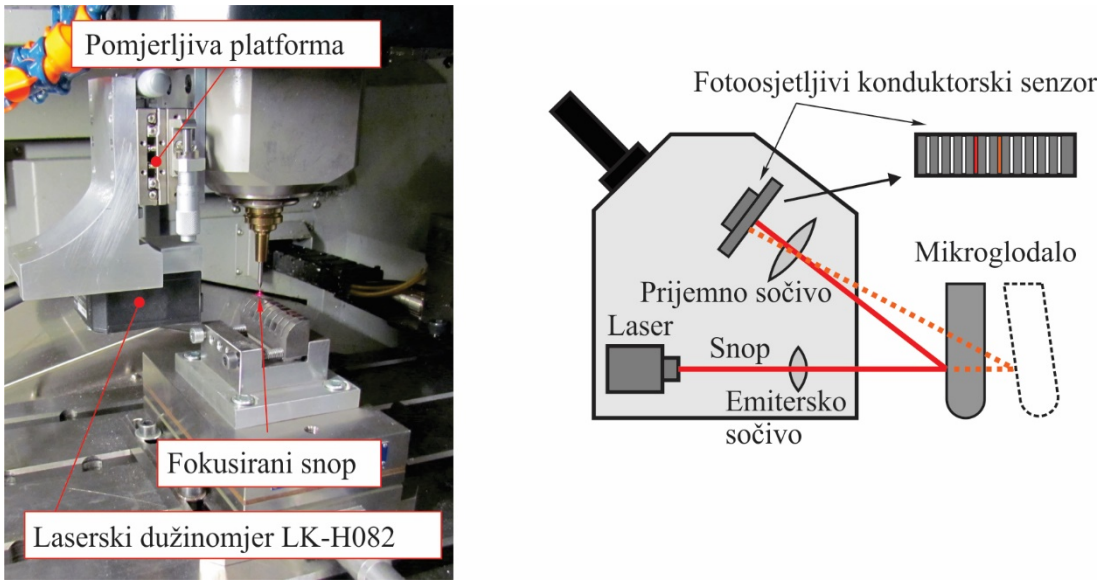
Slika 4.10. Dinamometar Kistler 9257B

Signali iz pojačivača su prenošeni na PC računar preko posebne A/D konvertorske kartice. Digitalizovani signali su obrađivani i vizuelizovani u posebnom korisničkom računarskom okruženju, razvijenom u softverskom paketu *LabVIEW* (Slika 4.11). Naknadna obrada izmjerenih vrijednosti izvršena je u programskom paketu *MATLAB*.



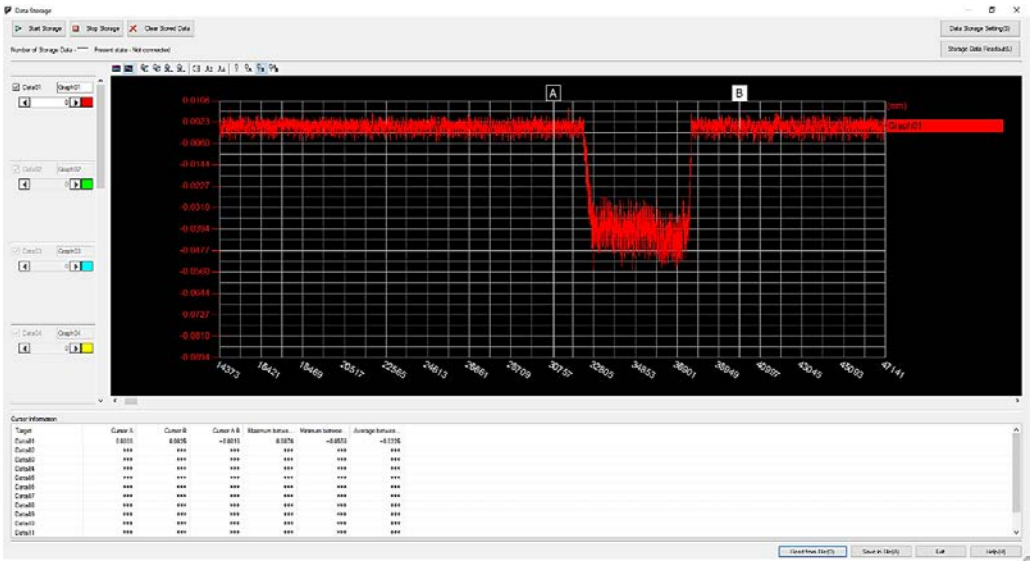
Slika 4.11. Korisničko okruženje LabVIEW za akviziciju sila rezanja po osama

Defleksija alata je direktno mjerena pomoću laserskog mjernog uređaja proizvođača *Keyence*. Aparatura se sastoji od laserske mjerne glave *LK-H082*, koja je povezana na pojačivač signala *LK-G5001PV*. Pojačivač signala je USB konekcijom povezan na računar, na kojem se nalaz aplikativni softver *LK-Navigator 2* [182]. Mjerna glava posjeduje izvor laserske svjetlosti i prijemne foto-senzore. Mjerenja se vrše na principu odbijanja laserske svjetlosti, pod različitim uglovima, te očitavanja mjesta odbijanja (Slika 4.12). Opseg mjerenja laserske mjerne glave je ±18 mm, preciznost je 0.1 μm, dok je prečnik fokusiranog snopa laserske svjetlosti 70 μm.



Slika 4.12. Laserski uređaj za mjerenje defleksije mikroglodala

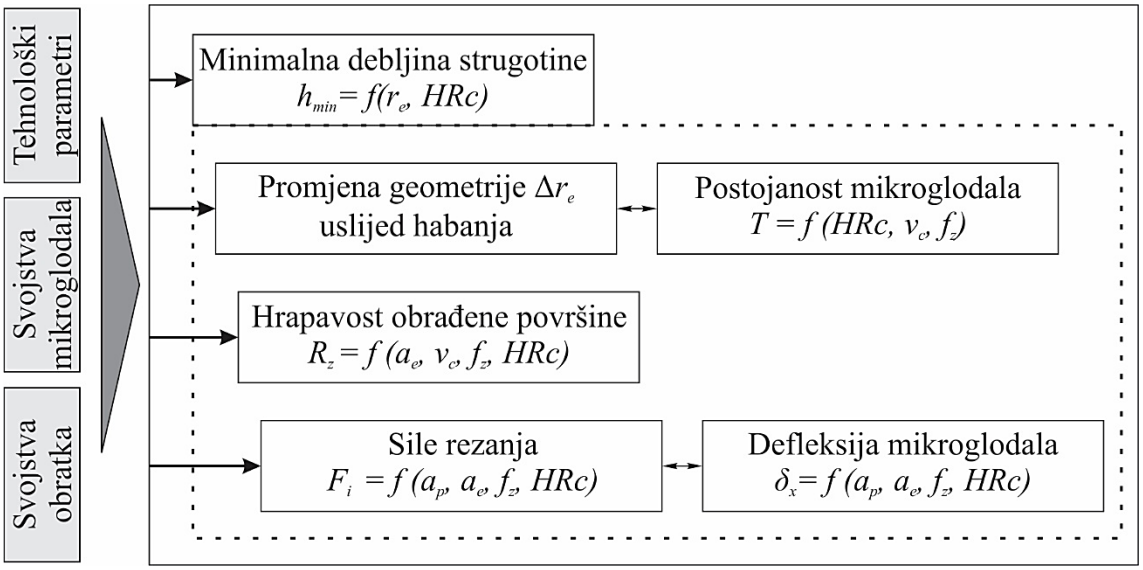
Frekvencija mjerenja je bila podešena na 10 kHz. Prilikom eksperimentalnih mjerenja, snop laserske svjetlosti je usmjeren direktno u mikroglodalo, na različitim visinama. Fino podešavanje položaja laserske mjerne glave je izvršeno pomoću dvoosne mikrometarski manuelno pomjerljive platforme. Praćenje procesa akvizicije i očitavanje vrijednosti defleksije izvršeno je u korisničkom okruženju softvera *LK-Navigator 2* (Slika 4.13).



Slika 4.13. Korisničko okruženje LK-Navigator 2 sa izmjerenom defleksijom

4.3. PLANOVI EKSPERIMENTA I PROCEDURE MJERENJA

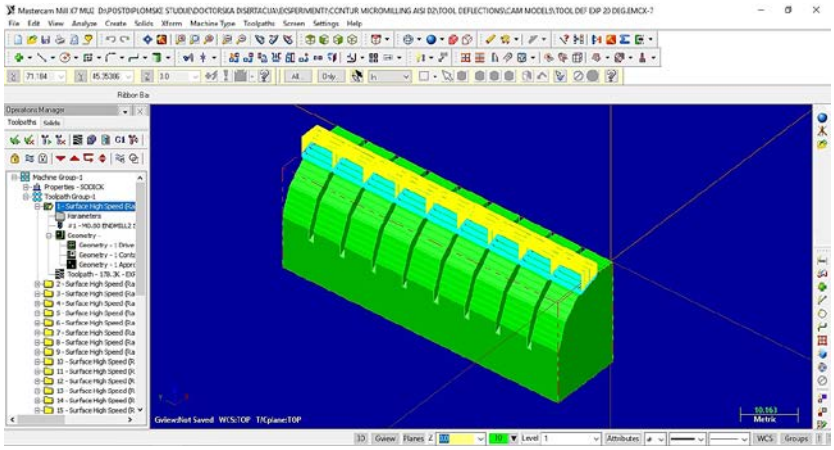
Eksperimentalna istraživanja su podijeljena u nekoliko međusobno povezanih faza, definisanih prema pretpostavljenim modelima funkcija obradivosti (Slika 4.14). Prva faza eksperimentalnih istraživanja je izvršena u svrhu procjene vrijednosti minimalne debljine strugotine. Druga faza eksperimentalnih istraživanja je uključivala istraživanje uticaja parametara obrade i tvrdoće materijala obratka na proces habanja alata, odnosno na promjenu geometrije reznog klina. Treća faza se odnosila na utvrđivanje uticaja ulaznih parametara obrade na hrapavost obrađene površine. Četvrta faza istraživanja je obuhvatila mjerenja sila rezanja u zavisnosti od promjene ulaznih parametara obrade. Peta faza obuhvatala mjerenje ugiba vitkih mikroglodala u zavisnosti od promjene ulaznih parametara obrade. Analiza rezultata eksperimenata se zasnivala na vizuelnoj inspekciji obrađenih površina i tijela alata, te analizi vrijednosti izmjerenih izlaznih parametara obrade i njihovog ponašanja u toku vremena obrade.



Slika 4.14. Tok eksperimentalnih istraživanja

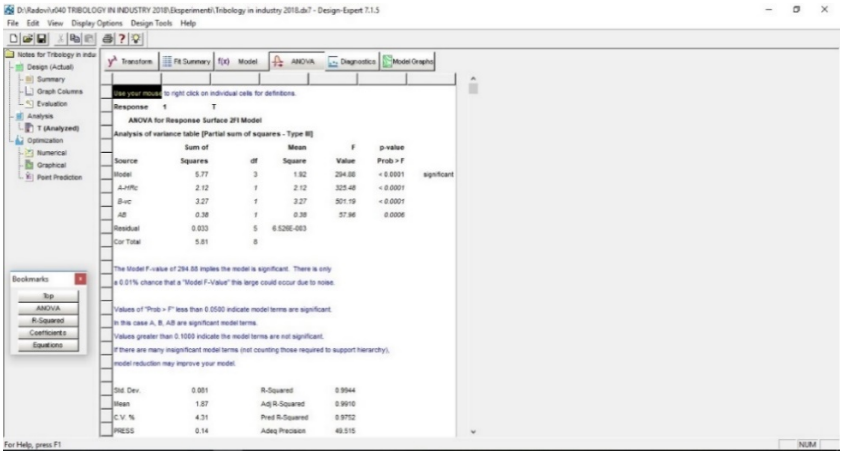
Planovi eksperimenta i vrijednosti ulaznih parametara po nivoima variranja su odabrani u skladu sa ciljevima istraživanja, prethodnim istraživanjima, teoretskim preporukama, praktičnim preporukama realnog metaloprerađivačkog sektora, mogućnošću laboratorijske opreme, te racionalizacije troškova mjerenja. Pri tome se vodilo računa o odgovarajućim procentu povećanja po nivoima variranja, radi obuhvatanja ciljanog područja. U svrhu verifikacije, izvršena su probna istraživanja sa graničnim vrijednostima parametara, te je u skladu sa uslovima obrade, utvrđen njihov domen vrijednosti. Svi tehnološki parametri obrade (ulazni parametri) su varirani na tri nivoa, i to: dubina obrade a_p = 5, 10 i 15 µm; širina obrade a_e = 8, 16 i 22 µm, korak po zubu f_z = 5, 10 i 15 µm/zubu, te brzina rezanja v_c = 40, 55 i 70 m/min. U svrhu verifikacije dobijenih modela, potvrđivanja teoretski zaključaka, te detaljnijeg objašnjenja naknadno uočenih pojava vršeni su dodatni eksperimenti, sa različitim vrijednostima i kombinacijama ulaznih parametara.

Programiranje putanje mikroglodala je urađeno u računarskom CAM paketu *MasterCAM X7*, koji sadrži odgovarajući postprocesor za upravljačku jedinicu naprijed opisanog obradnog centra [178]. Korišćen je modul za glodanje i strategije „*Surface High Speed*“ (Slika 4.15). U svim eksperimentalnim mjerenjima odabrano je istosmjerno glodanje.



Slika 4.15. CAM model obratka u paketu MasterCAM X7

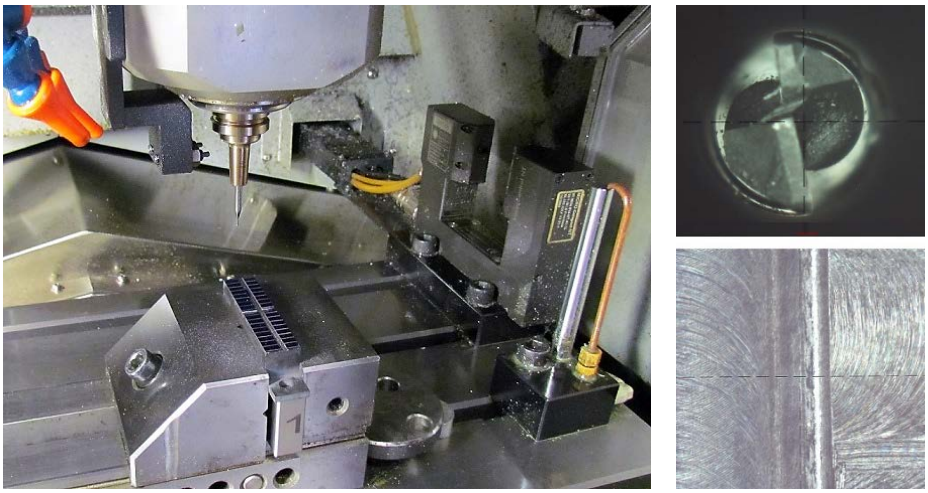
U skladu sa ciljem istraživanja, prirodom izlaznih parametara obrade, te brojem i varijacijom ulaznih parametara obrade u softverskom paketu *DesignExpert7* [183], izvršen je izbor odgovarajućih planova eksperimenata. Nakon toga, u posebnom modulu pomenutog softvera, vršena je analiza varijanse na osnovu dobijenih podataka i predloženih modela izlaznih parametara procesa mikroglodanja (Slika 4.16). Softver generiše modele u obliku regresionih obrazaca, čiji se koeficijenti dobijaju metodom najmanjih kvadrata. Pored opisanih modula, *DesignExpert7* ima nekoliko povezanih modula za analizu signifikantnosti ulaznih parametara, generisanje modela na osnovu ulaznih parametara, procjenu greške modela, generisanje dijagrama, optimizaciju, itd.



Slika 4.16. Analiza varijanse u korisničkom okruženju DesignExpert-a

Procjena vrijednosti minimalne debljine strugotine čelika X155CrMoV12 izvršena je korišćenjem vretenastih ravnih mikroglodala prečnika 0.6 mm, sa vratom dužine 5 mm. Shodno predloženom modelu minimalne debljine strugotine (obrazac 3.33), korišćene su različite tvrdoće obratka, i to: 45, 54 i 63 HRc. Radi uspostavljanja konstantnih uslova obrade, vrijednosti ulaznih parametara obrade su održavane na konstantnom nivou, tako da je korak po zubu iznosio f_z = 12 µm, dubina obrade a_p = 10 µm, te brzina obrade v_c = 30 m/min. Obrada je izvršena u uslovima MQL tehnike podmazivanja. Procedura eksperimentalnog mjerenja minimalne debljine strugotine je uključivala izradu ravnih kanala na obracima različite tvrdoće. Tokom mjerenja vršeno je zaustavljanje obrade i skeniranje rezne ivice mikroglodala, u svrhu utvrđivanja trenutne vrijednosti njenog poluprečnika zaobljenja (Slika 4.17). Nakon obrade, obradak je skinut nakon čega je

izvršeno skeniranje izrađenih kanala i mjerenje širine zone gnječenja materijala. Širina zone gnječenja je mjerena na tri pozicije, na uskom dijelu kanala, koji je odgovarao trenucima mjerenja poluprečnika zaobljenja rezne ivice. Mjerenje je vršeno na optičkom uređaju *Alicona*-i.



Slika 4.17. Eksperimentalno mjerenje minimalne debljine strugotine

Plan eksperimenta u svrhu praćenja habanja mikroglodala postavljen je prema predloženom modelu (obrazac 3.35). Kao ulazni parametri uzeti su tvrdoća materijala obratka, brzina rezanja i korak po zubu, čiji su nivoi variranja dati u tabeli 4.3. Korišćen je puni faktorni plan eksperimenta, definisan kao $3^2 \cdot 2^1$, tako da je korišćeno 18 različitih kombinacija pomenutih ulaznih parametara (Tabela 4.4). Ispitivano je habanje mikroglodala pri obradi površine na obratku pod nagibom od 20°. Pri svim kombinacijama, korišćena su loptasta mikroglodala prečnika 0.6 mm, dužine vrata 5 mm, sa prepustom od 30 mm, čije su karakteristike opisane u postavci eksperimenta, te MQL tehnika podmazivanja. Prema teoretskim preporukama, dubina obrade i širina obrade su održavane konstantnim u toku mjerenja. Pri tome uzete su vrijednosti srednjeg nivoa variranja posmatrano u odnosu drug planove eksperimenta, i to: dubina obrade od $a_p = 15\ \mu m$ i širina obrade od $a_e = 16\ \mu m$.

Tabela 4.3. Nivoi variranja ulaznih parametara pri analizi habanja

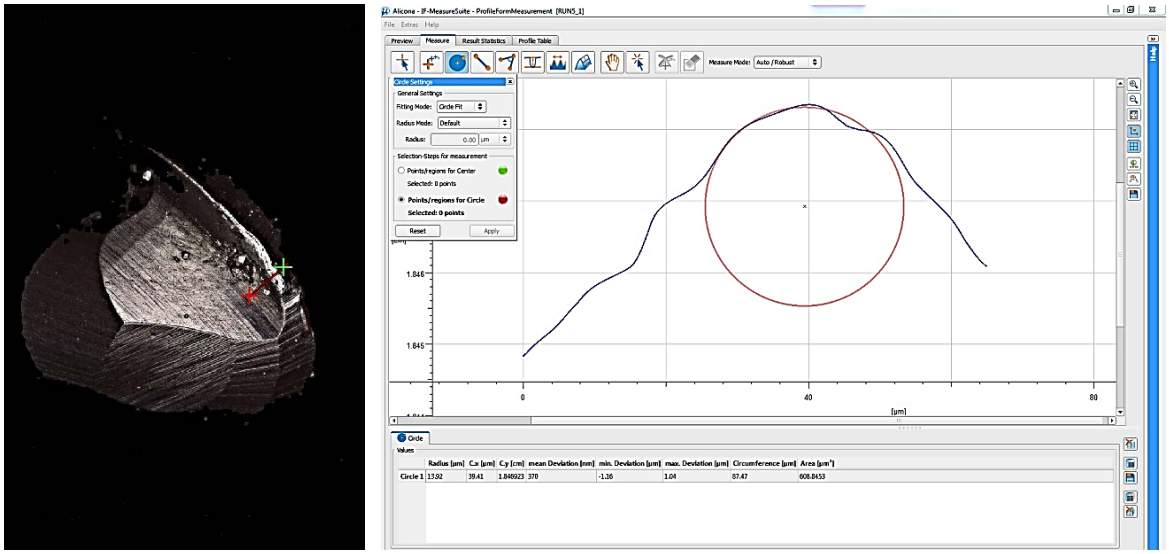
Parametri		**Nivoi variranja**		
		-1	**0**	**+1**
Tvrdoća obratka HRc	A	45	54	63
Brzina rezanja v_c (m/min)	B	40	55	70
Korak po zubu f_z (µm/zub)	C	10	-	15

Za svaku kombinaciju ulaznih parametara, izvršen je proces obrade. U toku obrade, na svakih 30 sekundi, proces obrade je prekidan i vršeno je skeniranje rezne ivice, nakon čega je obrada nastavljana do sljedećeg zaustavljanja i mjerenja. Opisane sukcesivne faze mjerenja za jednu kombinaciju ulaznih parametara su vršene do vremena od 240 sekundi, kada je proces obrade zaustavljen. Kako je i ranije opisano, habanje mikroglodala je praćeno mjerenjem poluprečnika zaobljenja rezne ivice mikroglodala na njenom skeniranom uzorku, pomoću optičkog uređaja *Alicona* (Slika 4.18). Mjerenje poluprečnika zaobljenja rezne ivice alata je vršeno u nominalnom

presjeku i još dodatna dva bliska, paralelna presjeka sa svake njegove strane. Nominalni presjek je presjek normalan na reznu ivicu, čija pozicija odgovara teoretskoj tački dodira rezne ivice i obrađene površine. Rezultat mjerenja predstavlja aritmetičku sredinu vrijednosti pomenutih poluprečnika na svim profilima.

Tabela 4.4. Kodovi nivoa variranja i vrijednosti parametara pri analizi habanja

Rb	Tvrdoća materijala obratka	Brzina rezanja	Korak po zubu	Tvrdoća materijala obratka *HRc*	Brzina rezanja v_c (m/min)	Korak po zubu f_z (μm/zub)
	A	B	C			
1	+1	+1	-1	63	70	10
2	+1	0	-1	63	55	10
3	+1	-1	-1	63	40	10
4	0	+1	-1	54	70	10
5	0	0	-1	54	55	10
6	0	-1	-1	54	40	10
7	-1	+1	-1	45	70	10
8	-1	0	-1	45	55	10
9	-1	-1	-1	45	40	10
10	+1	+1	+1	63	70	15
11	+1	0	+1	63	55	15
12	+1	-1	+1	63	40	15
13	0	+1	+1	54	70	15
14	0	0	+1	54	55	15
15	0	-1	+1	54	40	15
16	-1	+1	+1	45	70	15
17	-1	0	+1	45	55	15
18	-1	-1	+1	45	40	15



Slika 4.18. Proces mjerenja zaobljenja rezne ivice mikroglodala

Plan eksperimenta za mjerenje hrapavosti obrađene površine postavljen je u skladu sa predloženim modelom (obrazac 3.38), kojim je obuhvaćeno mjerenje uticaja širine obrade, koraka po zubu, brzine rezanja i tvrdoće materijala obratka na hrapavost obrađene površine. Nivoi variranja pobrojanih ulaznih parametara dati u tabeli 4.5. Srednja visina neravnina u 10 tačaka profila (R_z) je mjerena (ali nezavisno) za slučaj četiri različita nagiba površine koja se obrađuje (θ), i to za nagib od: 0°, 20°, 45° i 70°. U svrhu racionalizacije troškova mjerenja odnosno optimizacije broja potrebnih eksperimenata, korišćen je Taguchi-jev ortogonalni plan eksperimenata $L_9(3^2)$, plan bez međusobne interakcije ulaznih parametara, kojim je definisano 9 kombinacija ulaznih parametara (Tabela 4.6). Pri svim kombinacijama, korišćena su loptasta mikroglodala prečnika 0.6 mm, dužine vrata 5 mm, sa prepustom od 30 mm, te MQL tehnika podmazivanja. U toku mjerenja, dubina obrade je bila konstantna i iznosila je $a_p = 15\ \mu m$.

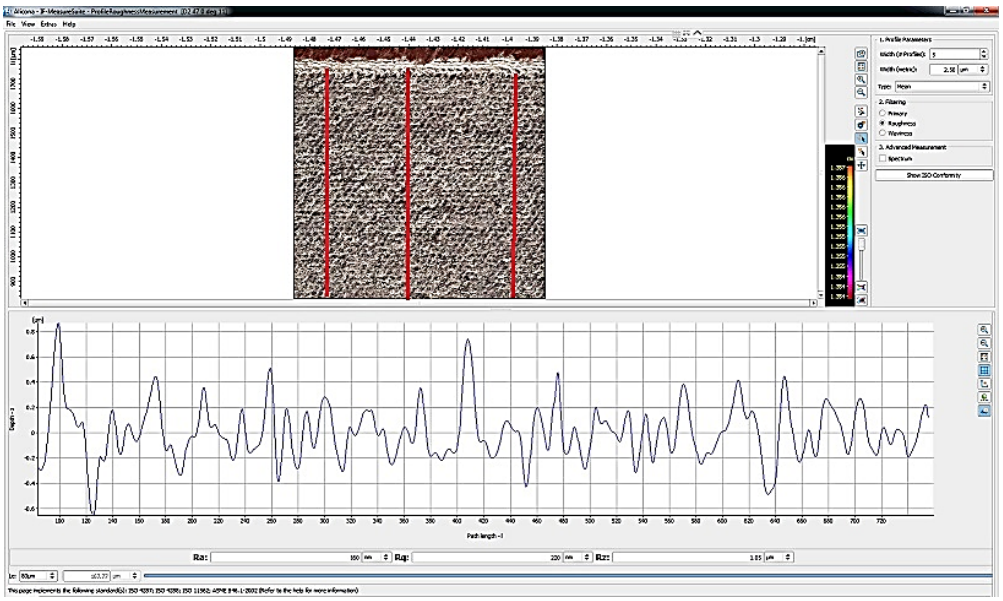
Tabela 4.5. Nivoi variranja ulaznih parametara pri analizi hrapavosti

Parametri		**Nivoi variranja**		
		-1	**0**	**+1**
Širina obrade a_e (μm)	A	8	16	22
Brzina rezanja v_c (m/min)	B	40	55	70
Korak po zubu f_z (μm/zub)	C	5	10	15
Tvrdoća obratka HRc	D	45	54	63

Tabela 4.6. Kodovi nivoa variranja i vrijednosti parametara pri analizi hrapavosti

R. b.	Širina obrade	Brzina rezanja	Korak po zubu	Tvrdoća materijala obratka	Širina obrade a_e (μm)	Brzina rezanja v_c (m/min)	Korak po zubu f_z (μm/zub)	Tvrdoća obratka *HRc*
	A	B	C	D				
1	-1	-1	-1	-1	8	40	5	45
2	0	0	+1	-1	16	55	15	45
3	+1	+1	0	-1	22	70	10	45
4	-1	0	0	0	8	55	10	54
5	0	+1	-1	0	16	70	5	54
6	+1	-1	+1	0	22	40	15	54
7	-1	+1	+1	+1	8	70	15	63
8	0	-1	0	+1	16	40	10	63
9	+1	0	-1	+1	22	55	5	63

Parametri hrapavosti obrađene površine izmjereni su na optičkom skeneru *Alicona*-i, skeniranjem obrađene površine odnosno neravnina nastalih uslijed odvajanja strugotine, a nakon izvršene obrade. Mjerenje hrapavosti skenirane površine se odvijalo interaktivnim zadavanjem linija profila upravno na pravac kretanja mikroglodala. Vrijednosti parametara hrapavosti su očitavane za tri različite linije profila, koje su postavljenje na krajevima i sredini skenirane površine (Slika 4.19). Konačna izmjerena vrijednost predstavlja aritmetičku sredinu vrijednosti parametara hrapavosti, dobijenih na pomenutim linija profila.



Slika 4.19. Proces zadavanja linija profila u procesu mjerenja hrapavosti, upravno na pravac kretanja mikroglodala

Plan eksperimenta za mjerenje ortogonalnih sila rezanja u pravcu osa postavljen je u skladu sa postavljenim modelima ortogonalnih sila rezanja u pravcu osa (obrasci 3.42, 3.43 i 3.44). Eksperimentom je obuhvaćeno mjerenje sila rezanja pri različitim vrijednostima tvrdoće materijala obratka, dubine obrade, širine obrade i koraka po zubu. Nivoi variranja navedenih ulaznih parametara dati su u tabeli 4.7. U svrhu ispitivanja uticaja navedenih ulaznih parametara obrade i svojstva materijala obratka, korišćen je Taguchi-jev ortogonalni plan eksperimenta $L_9(3^2)$ kojim je, kako je već prethodno rečeno, definisano 9 različitih kombinacija ulaznih parametara (Tabela 4.8). Prilikom izvođenja obrade sa korišćenjem različitih kombinacija, istovremeno su mjerene sile rezanja u pravcu x-ose (F_x), sile rezanja u pravcu y-ose (F_y) i sila rezanja u pravcu z-ose (F_z). Navedena tri mjerena izlaza, mjerena su za obrađivane površine, čiji su uglovi nagiba (θ) bili 0° i 45°. Pri tome korišćeno je loptasto mikroglodalo prečnika 0.6 mm, dužine vrata 5 mm, sa prepustom od 30 mm. Brzina rezanja za sve kombinacije je iznosila $v_c = 55$ m/min, te je korišćena MQL tehnika podmazivanja. U svrhu dodatnih analiza, istovremeno sa mjerenjem sila rezanja, pomoću laserskog dužinomjera *Keyence* mjeren je i otklon vrha mikroglodala u pravcu x-ose, upravne na vektor brzine pomoćnog kretanja mikroglodala.

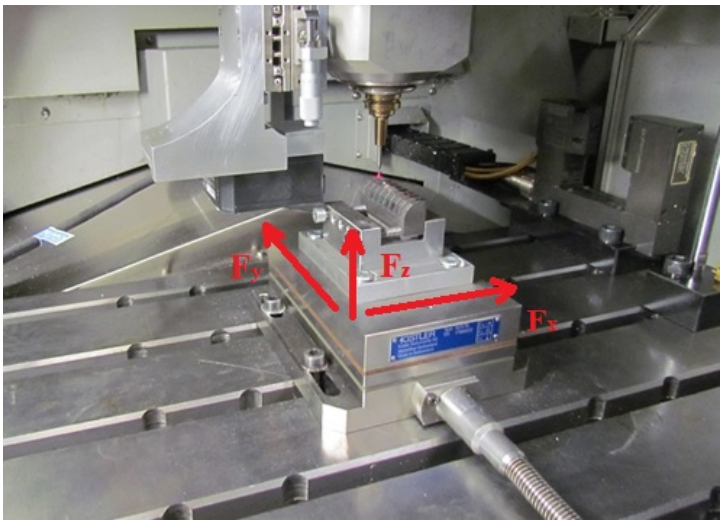
Tabela 4.7. Nivoi variranja ulaznih parametara pri mjerenju ortogonalnih sila rezanja u pravcu osa

Parametri		**Nivoi variranja**		
		-1	**0**	**+1**
Tvrdoća obratka HRc	A	45	54	63
Dubina obrade a_p (μm)	B	5	10	15
Širina obrade a_e (μm)	C	8	16	22
Korak po zubu f_z (μm/zub)	D	5	10	15

Tabela 4.8. Kodovi nivoa variranja i vrijednosti parametara pri mjerenju ortogonalnih sila rezanja u pravcu osa

R. b.	Tvrdoća materijala obratka	Dubina obrade	Širina obrade	Korak po zubu	Tvrdoća materijala obratka *HRc*	Dubina obrade a_p (μm)	Širina obrade a_e (μm)	Korak po zubu f_z (μm/zub)
	A	B	C	D				
1	-1	-1	-1	-1	45	5	8	5
2	-1	0	0	+1	45	10	16	15
3	-1	+1	+1	0	45	15	22	10
4	0	-1	0	0	54	5	16	10
5	0	0	+1	-1	54	10	22	5
6	0	+1	-1	+1	54	15	8	15
7	+1	-1	+1	+1	63	5	22	15
8	+1	0	-1	0	63	10	8	10
9	+1	+1	0	-1	63	15	16	5

Mjerenje sila rezanja je izvršeno na dinamometru *Kistler* (Slika 4.20). Signal sila rezanja u pravcu osa, mjeren je u toku obrade, nakon čega je zabilježena srednja vrijednost signala u periodu ustaljenog odziva. Period ustaljenog odziva signala predstavlja period u toku mjerenja u kom se javlja približno ista promjena signala. U tom periodu, signali imaju približno iste amplitude i srednje vrijednosti. Period ustaljenog odziva signala se javljao nakon više sukcesivnih prolaza mikroglodala, a nekoliko sekundi nakon ulaska mikroglodala u zahvat sa materijalom obratka. Mjerenje za svaku kombinaciju ulaznih parametara je ponavljano tri puta, uz izvođenje više sukcesivnih prolaza obrade, nakon čega je računata njihova aritmetička sredina.



Slika 4.20. Mjerenje sila rezanja duž osa i mjerenje defleksije mikroglodala

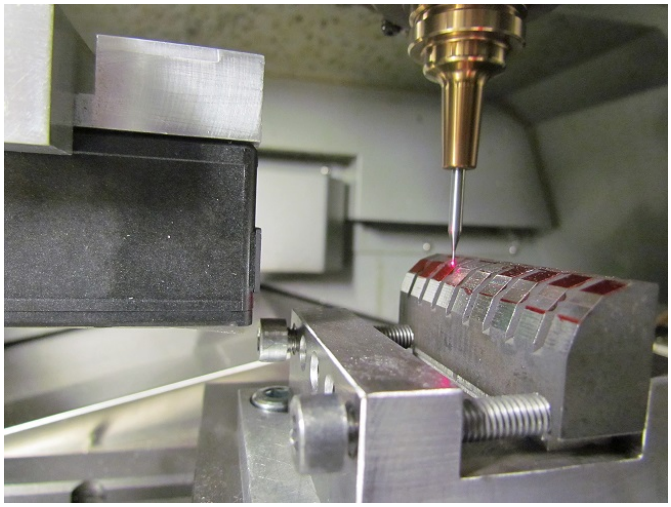
Plan eksperimenta pri mjerenju defleksije mikroglodala je obuhvatao ispitivanje uticaja tvrdoće materijala, dubine obrade, širine obrade i koraka po zubu na defleksiju alata, kako je to predviđeno predloženim modelom (obrazac 3.45). U okviru pomenutog plana eksperimenta, korišćeni su nivoi variranja ulaznih parametara dati u tabeli 4.9. Korišćen je puni faktorni plan eksperimenta, odnosno $3^3 \cdot 2^1$, čime su dobijene ukupno 54 različite kombinacije ulaznih

parametara (Tabela 4.10). Praćena je defleksija alata za četiri različita slučaja obrade, odnosno četiri različita nagiba obrađene površine (θ), i to: 0°, 20°, 45° i 70°. Pri svim kombinacijama, korišćeno je loptasto mikroglodalo prečnika 0.6 mm, dužine vrata 5 mm, sa prepustom od 30 mm, te MQL tehnika podmazivanja. Brzina rezanja za sve kombinacije je iznosila $v_c = 55\ \mu m$.

Tabela 4.9. Nivoi variranja ulaznih parametara pri mjerenju defleksije mikroglodala

Parametri		**Nivoi variranja**		
		-1	**0**	**+1**
Tvrdoća obratka HRc	A	45	54	63
Dubina obrade a_p (μm)	B	5	10	15
Širina obrade a_e (μm)	C	16	-	22
Korak po zubu f_z (μm/zub)	D	5	10	15

Defleksija mikroglodala je mjerena direktno u toku obrade pomoću laserskog dužinomjera *Keyence*. Mjeren je signal otklona različitih tačaka duž mikroglodala. Izvršeno je mjerenje defleksije alata u smjeru upravnom na smjer njegovog kretanja, u ovom slučaju u pravcu x-ose (Slika 4.21). Time se direktno mjerio otklon vrha mikroglodala od obrađivane površine. Navedeni način mjerenja otklona je odabran zbog njegovog direktnog uticaja na tačnost dimenzija obratka nakon obrade mikroglodanjem. Kako je ranije navedeno, odstupanje vrha alata od zadate putanje direktno doprinosi povećanju greške obrade i smanjenju tačnosti dimenzija obratka. Mjerenja pri svakoj kombinaciji iz plana eksperimenta je ponavljano tri puta, a zabilježena je srednja aritmetička vrijednost signala, izmjerena u periodu njegovog ustaljenog odziva.



Slika 4.21. Mjerenje defleksije alata laserskim dužinomjerom

Tabela 4.10. Kodovi nivoa variranja i vrijednosti parametara pri mjerenju defleksije alata

Rb	Tvrdoća obratka	Dubina obrade	Širina obrade	Korak po zubu	Tvrdoća obratka HRc	Dubina obrade a_p (μm)	Širina obrade a_e (μm)	Korak po zubu f_z (μm/zub)
	A	B	C	D				
1	-1	-1	-1	-1	45	5	16	5
2	-1	-1	-1	0	45	5	16	10
3	-1	-1	-1	+1	45	5	16	15
4	-1	-1	+1	-1	45	5	22	5
5	-1	-1	+1	0	45	5	22	10
6	-1	-1	+1	+1	45	5	22	15
7	-1	0	-1	-1	45	10	16	5
8	-1	0	-1	0	45	10	16	10
9	-1	0	-1	+1	45	10	16	15
10	-1	0	+1	-1	45	10	22	5
11	-1	0	+1	0	45	10	22	10
12	-1	0	+1	+1	45	10	22	15
13	-1	+1	-1	-1	45	15	16	5
14	-1	+1	-1	0	45	15	16	10
15	-1	+1	-1	+1	45	15	16	15
16	-1	+1	+1	-1	45	15	22	5
17	-1	+1	+1	0	45	15	22	10
18	-1	+1	+1	+1	45	15	22	15
19	0	-1	-1	-1	54	5	16	5
20	0	-1	-1	0	54	5	16	10
21	0	-1	-1	+1	54	5	16	15
22	0	-1	+1	-1	54	5	22	5
23	0	-1	+1	0	54	5	22	10
24	0	-1	+1	+1	54	5	22	15
25	0	0	-1	-1	54	10	16	5
26	0	0	-1	0	54	10	16	10
27	0	0	-1	+1	54	10	16	15
28	0	0	+1	-1	54	10	22	5
29	0	0	+1	0	54	10	22	10
30	0	0	+1	+1	54	10	22	15
31	0	+1	-1	-1	54	15	16	5
32	0	+1	-1	0	54	15	16	10
33	0	+1	-1	+1	54	15	16	15
34	0	+1	+1	-1	54	15	22	5
35	0	+1	+1	0	54	15	22	10
36	0	+1	+1	+1	54	15	22	15
37	+1	-1	-1	-1	63	5	16	5
38	+1	-1	-1	0	63	5	16	10
39	+1	-1	-1	+1	63	5	16	15
40	+1	-1	+1	-1	63	5	22	5
41	+1	-1	+1	0	63	5	22	10
42	+1	-1	+1	+1	63	5	22	15
43	+1	0	-1	-1	63	10	16	5
44	+1	0	-1	0	63	10	16	10
45	+1	0	-1	+1	63	10	16	15
46	+1	0	+1	-1	63	10	22	5
47	+1	0	+1	0	63	10	22	10
48	+1	0	+1	+1	63	10	22	15
49	+1	+1	-1	-1	63	15	16	5
50	+1	+1	-1	0	63	15	16	10
51	+1	+1	--1	+1	63	15	16	15
52	+1	+1	+1	-1	63	15	22	5
53	+1	+1	+1	0	63	15	22	10
54	+1	+1	+1	+1	63	15	22	15

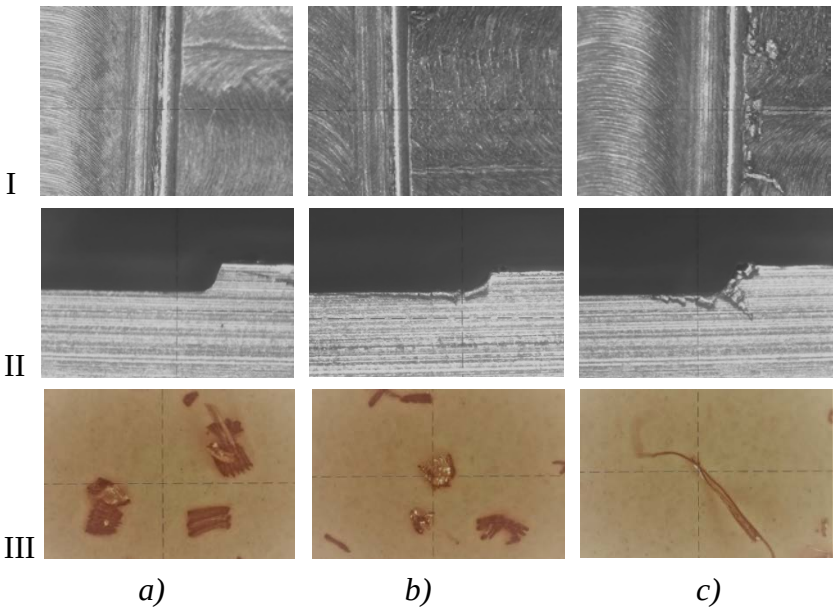
Poglavlje 5. ANALIZA I OBRADA REZULTATA

U ovom poglavlju je izvršena analiza i obrada rezultata dobijenih na osnovu eksperimentalnih mjerenja. Na osnovu dobijenih rezultata, uspostavljeni su modeli funkcija obradivosti, te izvršena analiza uticaja pojedinačnih ulaznih parametara obrade na izlazne parametre procesa. Takođe, u sklopu ovog poglavlja je izvršena i analiza adekvatnosti uspostavljenih modela, za različite funkcije obradivosti.

5.1. MINIMALNA DEBLJINA STRUGOTINE

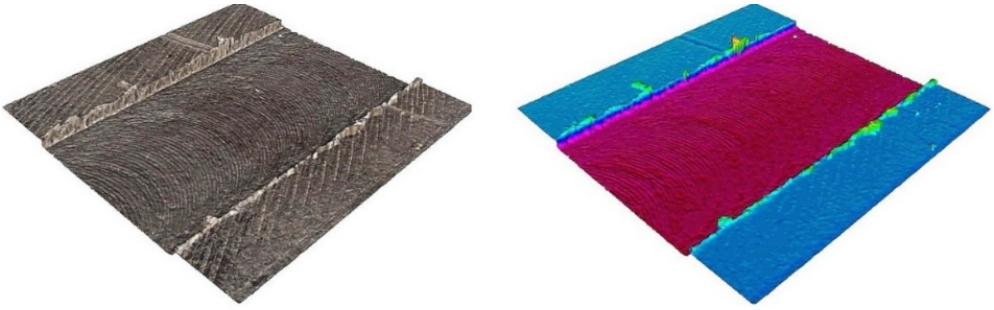
Model minimalne debljine strugotine je dat obrascem 3.33 (poglavlje 3.3.1), čije su varijable tvrdoća materijala i poluprečnik zaobljenja rezne ivice mikroglodala. Shodno tome, na osnovu rezultata eksperimentalnih mjerenja, potrebno je naći odgovarajuće vrijednosti koeficijenta C i eksponenta tvrdoće materijala obratka x. Kako je ranije pomenuto, prilikom obrade materijala sa debljinama strugotine, čije su vrijednosti bliske minimalnoj, izostaje formiranje strugotine i javlja se nagla promjena specifične energije rezanja i hrapavosti obrađene površine. Prema planu eksperimenta, izvršena je izrada kanala na obracima različite tvrdoće, izmjerena je širina zone zgnječenog materijala, te izvršena je posredna procjena vrijednosti minimalne debljine strugotine.

Na slici 5.1. su prikazane zone zgnječenog materijala obratka, u različitim trenucima obrade, pri tvrdoći obratka 63 HRc. Na pojedinim djelovima slike se može vidjeti porast širine zone zgnječenog materijala na dnu kanala, nastale uslijed povećanja poluprečnika zaobljenja rezne ivice mikroglodala (Slika 5.1, prvi red). Porast širine zone zgnječenog materijala se može procijeniti analizom ulaznog dijela. Na slikama se jasno vide naslage na ivicama, koje odgovaraju pomenutoj širini. Njegovo povećanje je posljedica intenzivnog habanja reznog klina mikroglodala. Povećanje poluprečnika zaobljenja rezne ivice, a time i njegovog odnosa sa debljinom strugotine, dovodi do intenzivnijeg klizanja reznog klina preko obrađivane površine. Takođe, pomenuto povećanje dovodi do gnječenja većeg sloja materijala, naročito u zoni koja odgovara negativnim vrijednostima grudnog ugla. Jasno je da se ta zona nalazi na konkavnom dijelu vrha reznog klina mikroglodala. U svrhu verifikacije mjerenja i zaključaka o minimalnoj debljini strugotine, izvršena je i analiza oblika strugotine, prikupljene u toku izrade kanala (Slika 5.1). U prvom dijelu vremena obrade, u najvećem procentu dobijena je relativno duža rezana strugotina, sa jasno izraženom lamelarnom segmentacijom (Slika 5.1, IIIa). Nastavkom obrade, dobijena je relativno kratka, strugotina. U ukupnoj količini prikupljene strugotine, značajan procenat je otpadao na zgnječenu strugotinu nedefinisanog oblika (Slika 5.1, IIIb). Na kraju, u ukupnoj količini strugotine, relativno veliki procenat je otpadao na strugotinu nedefinisanog oblika, uglavnom dobijenu gnječenjem (Slika 5.1, IIIc). Jedan dio segmenata uklonjenog materijala obratka u ukupnoj količini strugotine, odnosio se na dijelove zgnječenog materijala koji je otpao sa ivica izrađenih kanala.



Slika 5.1. Zona zgnječenog materijala obratka i dobijena strugotina (63 HRc, f_z = 12 μm/zub, a_p = 10 μm, v_c = 30 m/min)

Obrađeni kanali na uzorcima su skenirani, a onda primjenom softvera optičkog skenera *Alicona*, propušteni kroz odgovarajuće grafičke filtere radi utvrđivanja granice zone zgnječenog materijala (Slika 5.2). U različitim sukcesivnim vremenskim trenucima prilikom obrade, mjereni su širina zone zgnječenog materijala, na strani istosmjernog glodanja, te poluprečnik zaobljenja rezne ivice u pomenutom trenutku vremena. Zona zgnječenog materijala se na skeniranim uzorcima manifestovala u vidu glatkih zona na dnu kanala bliskih ivicama izrađenog kanala. Ove zone su bile relativno veće visine u odnosu na dobijeno dno kanala. Time su se razlikovale u odnosu na ostalu obrađenu površinu dna kanala, kod koje su se jasno vidjele brazde nastale prolaskom vrha mikroglodala. Mjerenje širine zone zgnječenog materijala je izvršeno na četiri mjesta na kratkom dijelu kanala. Aritmetičke sredine izmjerenih vrijednosti širine zone zgnječenog materijala, za različite tvrdoće materijala obratka, date su u tabeli 5.1. U pomenutoj tabeli su date i trenutne vrijednosti poluprečnika zaobljenja rezne ivice, izmjerene u trenucima mjerenja širine zone zgnječenog materijala. Nadalje, prema pomenutim izmjerenim vrijednostima, u istoj tabeli je data i izračunata vrijednost minimalne debljine strugotine, prema modelu datom obrascem 3.32.



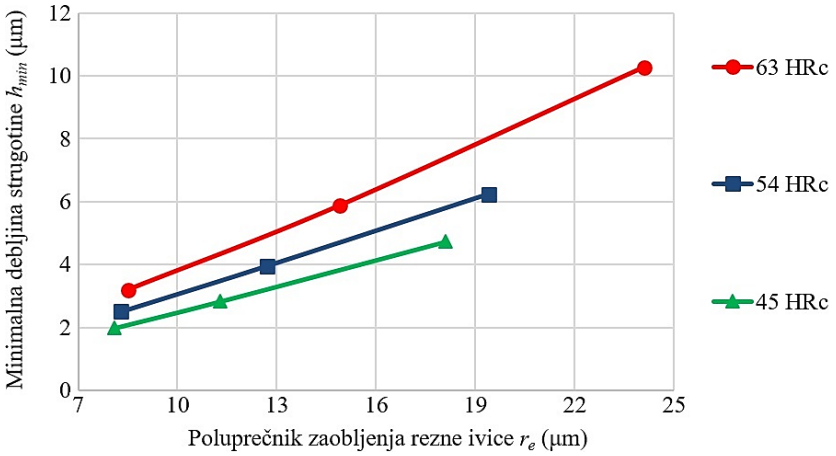
Slika 5.2. Skenirana geometrija izglodanog kanala na obratku

Zavisnosti minimalne debljine strugotine od vrijednosti r_e za različite tvrdoće obratka, date su na slici 5.3 i slici 5.4. Može se primjetiti porast minimalne vrijednosti debljine strugotine sa porastom poluprečnika zaobljenja rezne ivice, te njen porast sa porastom tvrdoće materijala.

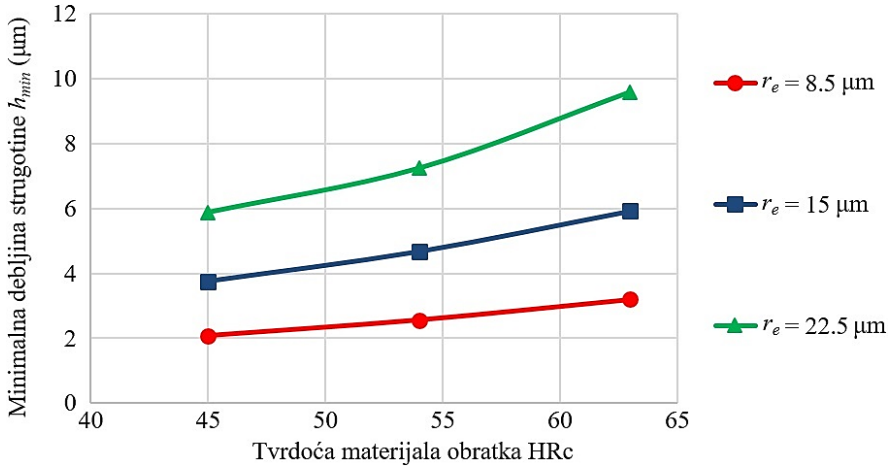
Tabela 5.1. Izračunate vrijednosti minimalne debljine strugotine

R. br.	Trenutak obrade, mjerenja	Tvrdoća obratka *HRc*	Širina zone zgnječ. materijala (izmjerena) w_{hmin} (µm)	Poluprečnik zaoblj. rezne ivice (izmjeren) r_e *(µm)*	Minimalna debljina strugotine (izračunata) h_{min} (µm)	Odnos h_{min}/r_e
1	I	63	21.7	8.5	3.2	0.376
2	II	63	76.8	14.9	5.9	0.394
3	III	63	289.4	24.1	10.3	0.426
4	I	54	13.2	8.3	2.5	0.302
5	II	54	33.5	12.7	4.0	0.311
6	III	54	87.6	19.4	6.2	0.322
7	I	45	8.2	8.1	2.0	0.244
8	II	45	16.9	11.3	2.8	0.250
9	III	45	48.6	18.1	4.7	0.261

Prema krivama prikazanim na slici 5.3., vrijednost minimalne debljine strugotine se skoro linearno mijenja u zavisnosti od poluprečnika zaobljenja rezne ivice mikroglodala, za različite tvrdoće materijala obratka. Sa slike 5.4 se vidi, da se vrijednost minimalne debljine strugotine, takođe mijenja skoro linearno u zavisnosti od promjene tvrdoće materijala obratka, za različite poluprečnike zaobljenja rezne ivice alata.

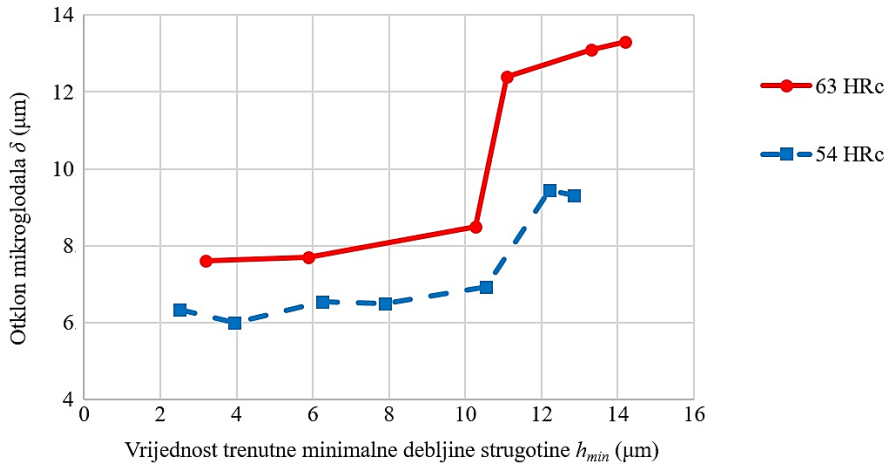


Slika 5.3. Promjena h_{min} u zavisnosti od poluprečnika zaobljenja



Slika 5.4. Promjena h_{min} u zavisnosti od tvrdoće materijala

Promjena specifične energije rezanja prikazana je posredno, preko izmjerene defleksije mikroglodala u pravcu vektora brzine pomoćnog kretanja, a koja direktno zavisi od sila rezanja odnosno debljine strugotine (Slika 5.5). Mjerenje defleksije mikroglodala je izvršeno u trenucima neposredno prije zaustavljanja procesa obrade u svrhu mjerenja poluprečnika zaobljenja rezne ivice mikroglodala. Na dijagramu se može zapaziti postepeni porast defleksije sa porastom minimalne debljine strugotine odnosno porastom poluprečnika zaobljenja rezne ivice. Poluprečnik zaobljenja rezne ivice, a time i minimalna debljina strugotine mijenjaju u toku obrade. Nagla promjena vrijednosti defleksije se javlja u trenutku kada se vrijednost koraka po zubu (f_z = 12 μm/zub) i vrijednosti minimalne debljine strugotine približe. Razlog tome je što rezni klin mikroglodala, u trenutku prolaska zuba ne može da ukloni materijal obratka već klizi preko obrađivane površine.

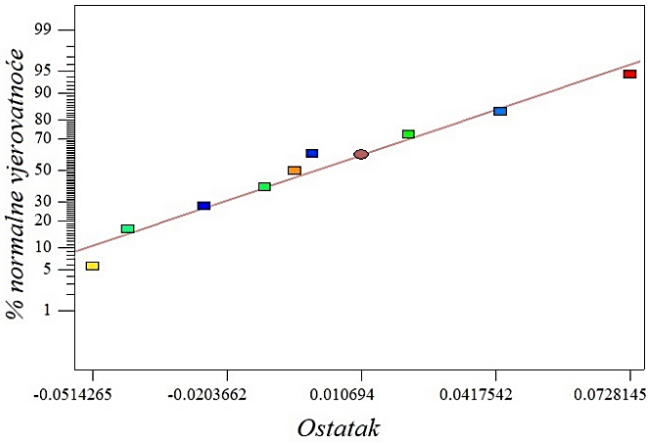


Slika 5.5. Promjena defleksije mikroglodala uslijed pojave efekta veličine

Statistička obrada rezultata, zbog specifičnosti procedure mjerenja i proračuna, izvršena je nakon prirodnog logaritmovanja ulaznih vrijednosti, te izlazne vrijednosti definisane u obliku odnosa h_{min}/r_e (Tabela 5.1). Prema teoriji eksperimenta, najveći uticaj na izlaz ima onaj parametar čija je F - vrijednost najveća i P - vrijednost najmanja. Na osnovu ovih statističkih parametara, moguće je zanemariti uticaj pojedinih ulaznih parametara predloženog modela. Najčešće, uticaj posmatranog parametra na odzive modela se zanemaruje ako je njegova P - vrijednost veća od 0.1. Metodom najmanjih kvadrata izračunati su koeficijenti i eksponenti koji figurišu u logaritmovanom modelu minimalne debljine strugotine (obrazac 3.33). Nakon toga, matematičkim operacijama eksponovanja, u svrhu dobijanja izraza za nepoznatu vrijednosti h_{min}, dobijena je sljedeća jednakost:

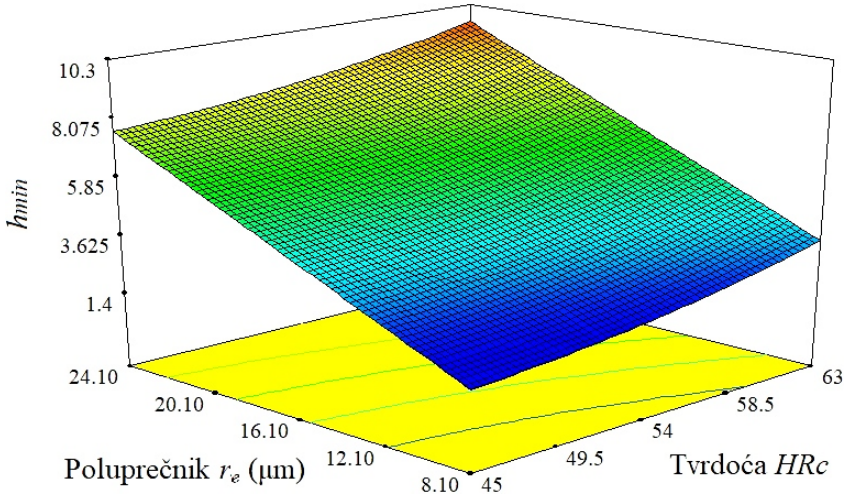
$$h_{min} = 0.0014 \cdot r_e \cdot HRc^{1.36} \tag{5.4}$$

Na slici 5.6. dat je dijagram procenta normalne vjerovatnoće u odnosu na ostatak vrijednosti, dobijen na osnovu odziva modela. Procenat postotka normalne vjerovatnoće se linearno mijenja sa porastom ostatka vrijednosti, što govori o podudarnosti odziva predloženog modela sa realno izmjerenim vrijednostima minimalne debljine strugotine.



Slika 5.6. Dijagram procenta normalne vjerovatnoće u odnosu na ostatak vrijednosti

Na osnovu modela datog prethodnim obrascem i izmjerenih podataka, dobijen je statistički pokazatelj F – vrijednost koja je u ovom slučaju iznosi 146.87. Koeficijent regresije modela R^2 iznosi 0.96, standardna devijacija $SD = 0.046$, odnos S/N iznosi 20.6, dok je standardna greška modela 0.026. Na osnovu datih pokazatelja, može se zaključiti da je model adekvatan. Na slici 5.7 je prikazan dijagram izlaznih vrijednosti uspostavljenog modela minimalne debljine strugotine.



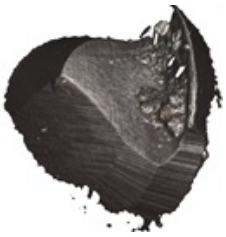
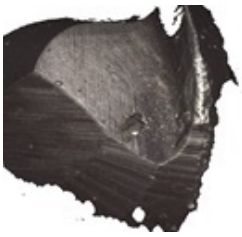
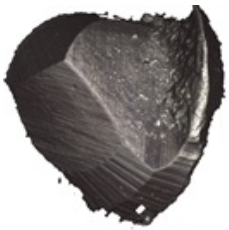
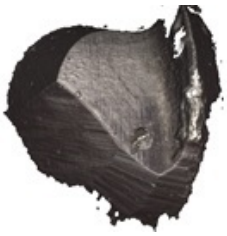
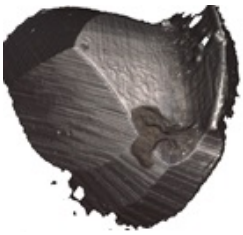
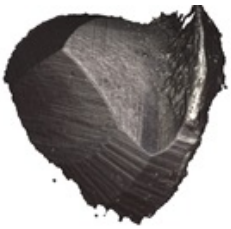
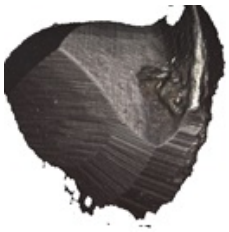
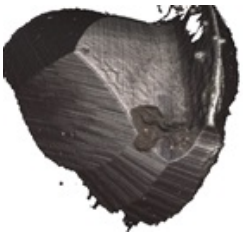
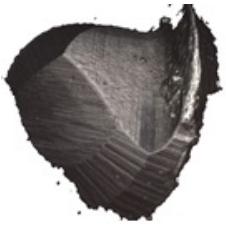
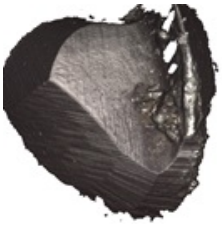
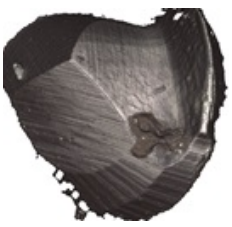
Slika 5.7. Odziv modela minimalne debljine strugotine materijala obratka

Analizom dobijenog modela, može se zaključiti da poluprečnik zaobljenja rezne ivice ima linearni uticaj na vrijednost minimalne debljine strugotine. Vrijednost minimalne debljine strugotine je konstantna za neku vrijednost pomenutog poluprečnika, a eksponencijalno raste sa porastom tvrdoće materijala obratka. To se može objasniti činjenicom da manja tvrdoća, odnosno veća plastičnost materijala, doprinosi većoj stopi plastičnog deformisanja i gnječenja materijala. Posljedica toga je situacija pri kojoj materijal obratka lakše teče ispod vrha reznog klina mikroglodala. Vrijednost minimalne debljine strugotine je konstantna i za neku konstantnu tvrdoću materijala obratka, što se u potpunosti podudara sa zaključcima ostalih istraživanja odnosno ranije razvijenih modela. Njena vrijednost se može iskazati i preko odgovarajućeg procenta poluprečnika zaobljenja rezne ivice, ukoliko su konstantni ostali parametri i uslovi obrade, kao i tvrdoća materijala obratka.

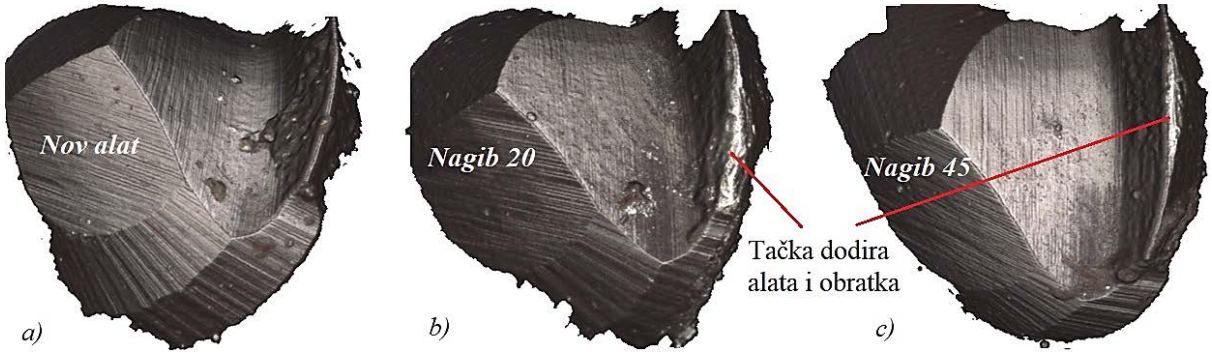
5.2. HABANJE MIKROGLODALA

Korišćenjem kombinacija ulaznih parametara dobijenih na osnovu postavljenog plana eksperimenta za analizu habanja mikroglodala, izvršena je obrada mikroglodanjem i analiza habanja. Kako je ranije opisano, izvršeno je skeniranje rezne ivice mikroglodala na optičkom uređaju. Stanja rezne ivice loptastog mikroglodala pri obradi sa odgovarajućim parametrima obrade, prikazana su u obliku skeniranih trodimenzionalnih površina, i data su u tabeli 5.2. Prikazana stanja se odnose na različite kombinacije ulaznih parametara, skenirana u različitim trenucima obrade. Analizom fotografija može se zapaziti povećanje poluprečnika zaobljenja rezne ivice mikroglodala, te linije pucanja prevlake na mikroglodalu, odnosno nastanak katastrofalnog habanja reznog klina u funkciji vremena rezanja.

Tabela 5.2. Skenirane rezne ivice loptastog mikroglodala 0.6x5 (a_p = 15 μm, a_e = 16 μm)

Vrijeme obr. t	63 HRc, v_c = 55 m/min f_z = 10 μm/zub	63 HRc, v_c = 55 m/min f_z = 15 μm/zub	63 HRc, v_c = 70 m/min f_z = 10 μm/zub	45 HRc, v_c = 55 m/min f_z = 10 μm/zub
30				
90				
150				
210				
240				

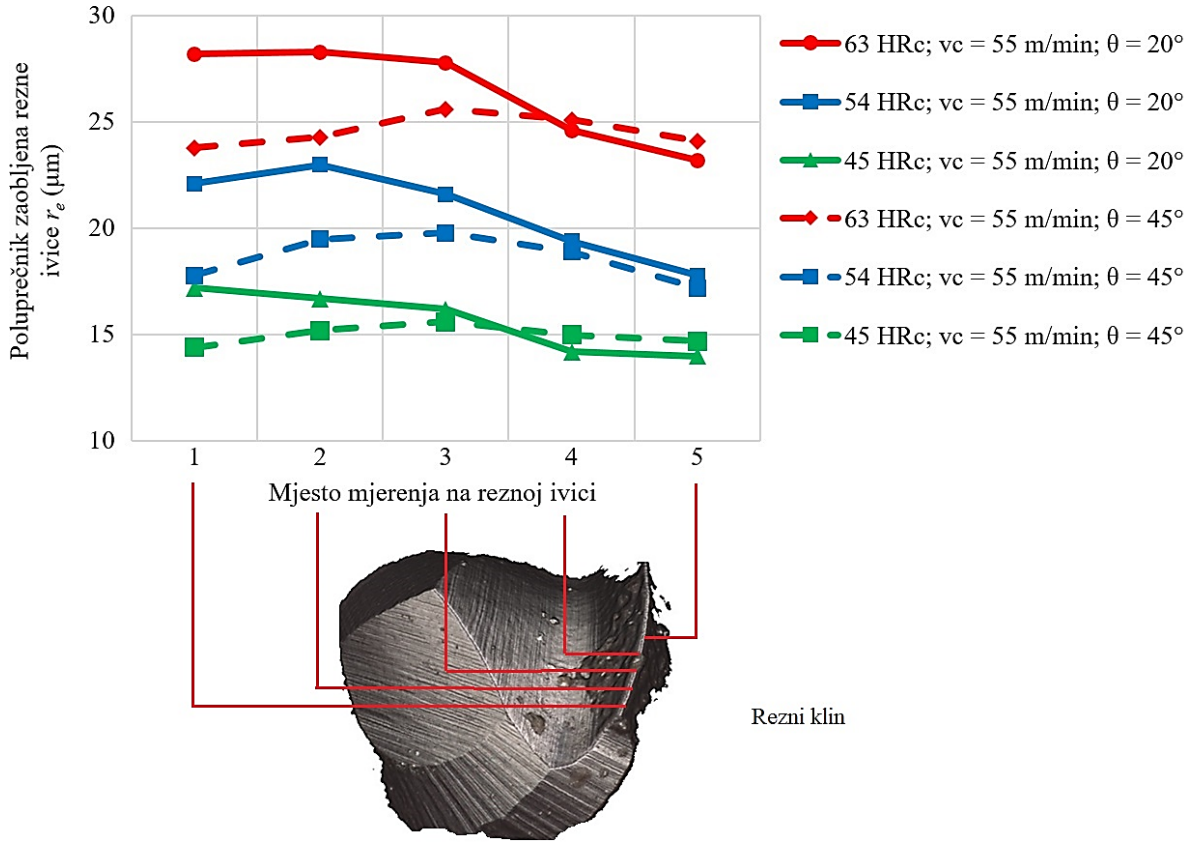
Na slici 5.8 su prikazani oblik i položaj zone habanja mikroglodala. Lijevo na slici je prikazan nov, nepohaban rezni klin, na kojem se može uočiti inicijalna zaobljenost rezne ivice, te tragovi brušenja nastali pri njegovoj proizvodnji. Kako je ranije navedeno, inicijalni poluprečnik zaobljenja rezne ivice je iznosio 8 μm. Na istoj slici, u sredini, je prikazana zona habanja mikroglodala nastala pri obradi površine obratka koja je imala relativno mali nagib od 20°. Pomenuta zona habanja je nastala u trenutku vremena obrade od 90 s, pri obradi obratka tvrdoće 63 HRc, brzinom rezanja od v_c = 70 m/min i korakom po zubu f_z = 10 μm/zub.



Slika 5.8. Različit položaj i oblik pohabanog područja reznog klina

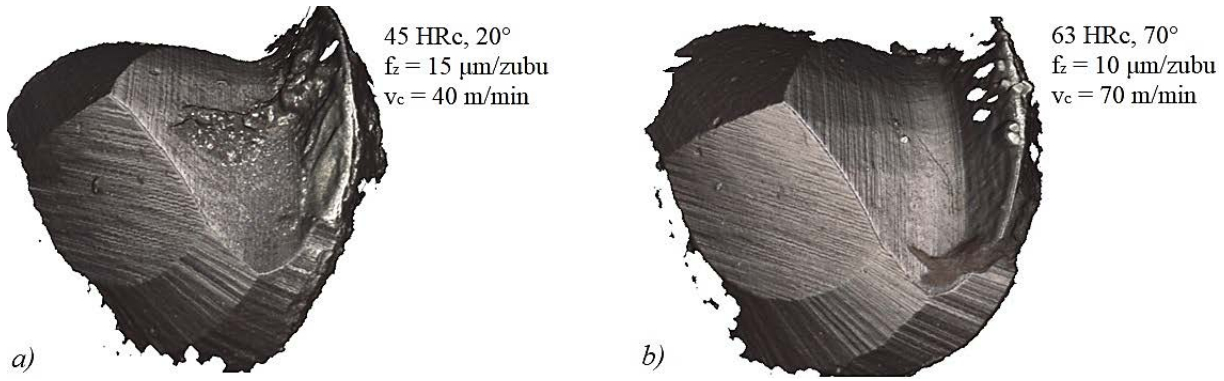
Mjerenja su pokazala da se, pri pomenutom nagibu i različitim vrijednostima ulaznih parametara obrade, zona habanja povećava na dijelu rezne ivice od teoretske tačke dodira mikroglodala i obratka ka vrhu loptastog mikroglodala. Jasno je da su pomenuta mjesta na reznoj ivici, bliža vrhu ali i osi alata, imala manju efektivnu brzinu rezanja. U svrhu dodatne analize i utvrđivanja uticaja tehnoloških parametara i svojstava obratka na proces habanja alata, izvršena su dodatna eksperimentalna mjerenja habanja mikroglodala pri obradi površina sa relativno većim nagibom, i to od 45°. U dodatnim eksperimentima korišćena je brzina rezanja od v_c = 55 m/min i korak po zubu f_z = 15 μm/zub. Na slici 5.8 c) prikazan je nov, nepohaban alat. Na slici 5.8 b) je prikazana zona habanja mikroglodala pri obradi obratka sa nagibom od 20°, a na slici 5.8 c) zona habanja za nagib 45°. Pomenute zona habanja su u oba slučaja nastala u trenutku vremena obrade od 90 s, pri obradi obratka tvrdoće 63 HRc, brzinom rezanja od v_c = 55 m/min i korakom po zubu f_z = 15 μm/zub.

Rezultati pomenutih dodatnih mjerenja su prikazani u vidu dijagrama na slici 5.9. Analizom dijagrama može se zaključiti da su pri obradi površina sa manjim nagibom, dijelovi rezne ivice koji odgovaraju većoj efektivnoj brzini, pretrpjele manje habanje. Uzrok tome je sama geometrija zahvata, a koja je definisana ranije opisanom krivom dodira rezne ivice i obratka. U ovom slučaju, zone koje su udaljenije od vrha loptastog mikroglodala nisu konstantno u zahvatu sa materijalom obratka. Sa druge strane, utvrđeno je da se pri obradi površina sa većim nagibom, javlja približno isti intenzitet habanja na djelovima rezne ivice koje su podjednako udaljene od teoretske tačke dodira alata i obrađene površine. Sa dijagrama na slici 5.9 se vidi da je habanje u tačkama, koje su bliže vrhu mikroglodala (imaju nepovoljniju geometriju zahvata) skoro ujednačeno sa habanjem u tačkama koje su iznad teoretske tačke dodira alata i obrađene površine. Ako se posmatra dio rezne ivice koji je konstantno u dodiru sa materijalom obratka, tada se intenzivnije habaju dijelove posmatrane rezne ivice koji zahvataju relativno veću debljinu strugotine. Analizom dijagrama se može zaključiti, da se naprijed pomenute vrijednosti poluprečnika rezne ivice za različite tačke duž rezne ivice razlikuju prosječno za 8 - 10 μm. Pomenute razlike su manje prilikom obrade obradaka sa manjom tvrdoćom.



Slika 5.9. Vrijednosti poluprečnika rezne ivice u zavisnosti od položaja mjerenja

U zonama habanja koje su bile pod uticajem manje efektivne brzine, javljale su se naslage na reznom klinu (Slika 5.10 a). Pomenute naslage su bile češće pri obradi obradaka sa tvrdoćom 45 HRc. Uočava se nešto veća pojava naslaga na reznoj ivici alata, prilikom obrade sa većim korakom po zubu (f_z = 15 µm/zub). Razlog tome je veća generisana toplota, te njen uticaj na materijal obratka sa manjom tvrdoćom. Pri obradi površina sa većim nagibom javljalo se habanje u vidu krzanja rezne ivice, naročito pri obradi sa većim brzinama rezanja, kao i većim efektivnim brzinama rezanja, i to v_c = 55 m/min i v_c = 70 m/min. Takođe, krzanje se javljao pri obradi obradaka veće tvrdoće, i to 54 HRC i 63 HRc (Slika 5.10 b). Krzanje rezne ivice je posljedica sudara rezne ivice i izrazito tvrdih kristalnih faza u materijalu obratka, naročito karbidnih kristalnih zrna.



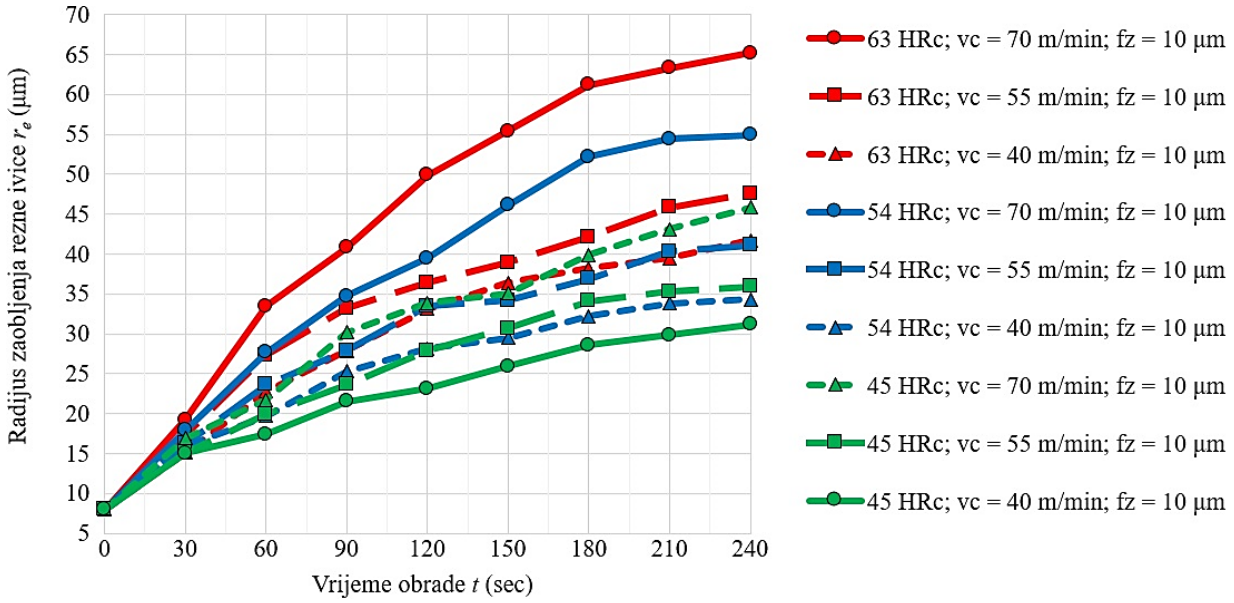
Slika 5.10. Naslage na reznom klinu (a) i krzanje rezne ivice (b)

U tabeli 5.3 date su izmjerene vrijednosti poluprečnika zaobljenja rezne ivice za različite kombinacije ulaznih parametara, definisane planom eksperimenta (poglavlje 4.3). Prikazane vrijednosti poluprečnika su izmjerene u nizu sukcesivnih trenutaka tokom vremena obrade.

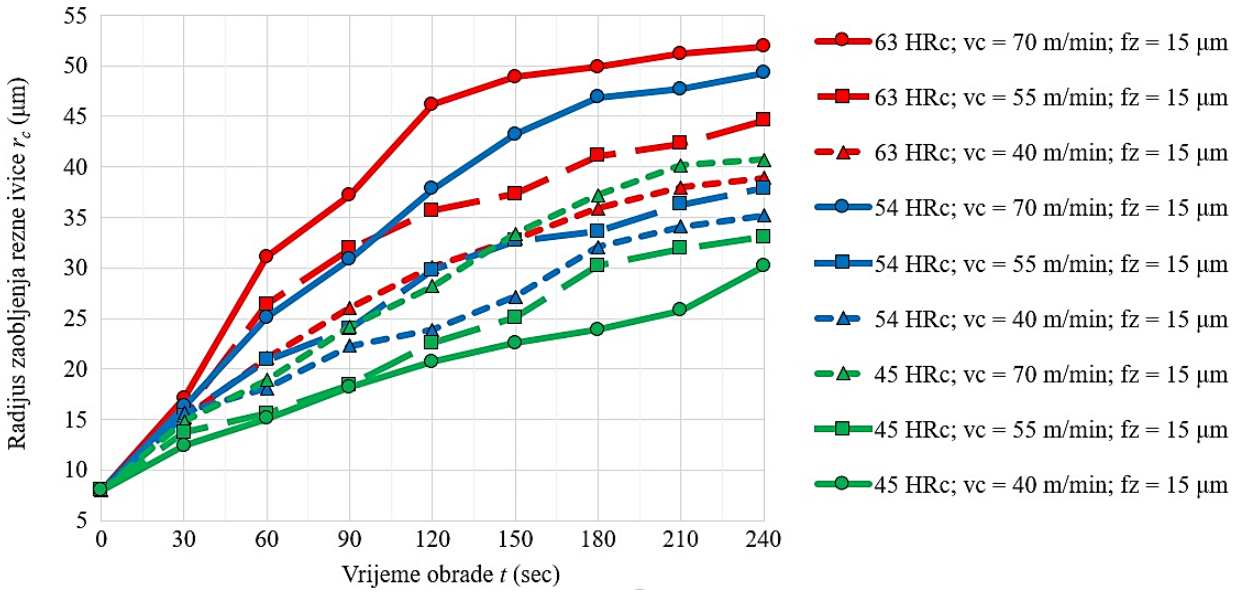
Tabela 5.3. Promjena vrijednosti poluprečnika zaobljenja rezne ivice u toku vremena obrade

Rb	Tvrdoća materijala obratka *HRc*	Brzina rezanja v_c (m/min)	Korak po zubu f_z (μm/zub)	Poluprečnik zaobljenja rezne ivice r_e (μm), za naznačeno vrijeme *t* (sec)								
				0	30	60	90	120	150	180	210	240
1	63	70	10	8	19.2	33.5	40.8	49.9	55.4	61.2	63.3	65.2
2	63	55	10	8	17.3	27.3	33.2	36.4	38.9	42.1	45.8	47.6
3	63	40	10	8	15.1	22.8	27.9	33.1	36.4	38.2	39.5	41.7
4	54	70	10	8	17.9	27.7	34.7	39.5	46.1	52.2	54.4	54.9
5	54	55	10	8	16.2	23.6	27.9	33.5	34.2	36.9	40.3	41.1
6	54	40	10	8	15.9	19.7	25.3	28.2	29.5	32.2	33.8	34.3
7	45	70	10	8	16.9	21.7	30.2	33.9	35.1	39.9	43.1	45.8
8	45	55	10	8	15.1	19.9	23.6	27.9	30.7	34.1	35.3	35.9
9	45	40	10	8	15.0	17.4	21.5	23.1	25.9	28.6	29.8	31.2
10	63	70	15	8	17.1	31.1	37.2	46.2	48.9	49.9	51.2	51.9
11	63	55	15	8	15.6	26.4	31.9	35.7	37.3	41.1	42.3	44.6
12	63	40	15	8	15.2	21.1	26.1	30.1	32.9	35.9	38.0	38.9
13	54	70	15	8	16.3	25.1	30.9	37.8	43.2	46.9	47.7	49.3
14	54	55	15	8	15.4	20.9	24.0	29.8	32.7	33.6	36.3	37.9
15	54	40	15	8	15.7	18.1	22.3	23.9	27.2	32.1	34.1	35.2
16	45	70	15	8	14.8	18.9	24.2	28.2	33.4	37.2	40.2	40.7
17	45	55	15	8	13.7	15.6	18.4	22.6	25.1	30.2	31.9	33.1
18	45	40	15	8	12.4	15.1	18.2	20.7	22.6	23.9	25.8	30.2

Dijagram promjene pomenutih vrijednosti poluprečnika zaobljenja rezne ivice u toku vremena obrade, za korak po zubu $f_z = 10\,\mu m$ i različite tvrdoće materijala obratka X155CrMoV12 i brzine rezanja, dat je na slici 5.11. Promjena pomenutog poluprečnika, za različite tvrdoće materijala obratka i brzine rezanja, te korak po zubu $f_z = 15\,\mu m$, prikazana je na slici 5.12. Jasno je da se za sve kombinacije ulaznih parametara, poluprečnik zaobljenja rezne ivice naglo povećava, nakon čega intenzitet promjene opada. Veća tvrdoća i veća brzina rezanja dovode do većeg intenziteta habanja rezne ivice. S druge strane, pri većoj vrijednosti koraka po zubu javlja se manji intenzitet habanja, što je u suprotnosti sa istraživanjima na polju konvencionalne obrade glodanjem na makronivou. Tome doprinosi efektivniji mehanizam odvajanja strugotine, odnosno činjenica da je debljina strugotine veća od minimalne debljine strugotine. Kao posljedica toga, materijal obratka lakše klizi preko grudne površine reznog klina mikroglodala, a izbjegava se veliki specifični pritisak na vrhu reznog klina. Takođe, u poređenju sa habanjem alata u makroobradi, na dijagramima promjene habanja za mikroglodanje, ne mogu se uočiti jasne granice inicijalnog, ustaljenog i katastrofalnog habanja. U skoro svim eksperimentima, izraženo je intenzivno habanje. Kao jedini izuzeci mogu se uzeti eksperimenti na obracima tvrdoće 45 HRc i sa brzinama 40 m/min, kao i korakom po zubu 15 μm.



Slika 5.11. Promjena poluprečnika zaobljenja rezne ivice alata u funkciji vremena obrade (f_z = 10 µm/zubu)



Slika 5.12. Promjena poluprečnika zaobljenja rezne ivice alata u funkciji vremena obrade (f_z = 15 µm/zubu)

Prethodno prikazani dijagrami promjene poluprečnika zaobljenja rezne ivice alata u funkciji vremena, na najbolji način ilustruju porast habanja mikroglodala, tokom vremena rezanja. Porast poluprečnika zaobljenja reznog klina mikroglodala, tokom vremena rezanja, matematički je ranije opisan pomoću obrasca 3.34, koja u suštini predstavlja polinom višeg reda. Za neke karakteristične kombinacije ulaznih parametara (tabela 5.4), dati su modeli za proračun vrijednosti poluprečnika zaobljenja rezne ivice mikroglodala, sa pripadajućim koeficijentima regresije, kao pokazateljem tačnosti modela. Dobijeni modeli su formirani korišćenjem metode najmanjih kvadrata, i tom prilikom su dobijene polinomske funkcije trećeg reda, u kojima kao varijabla konfiguriše vrijeme obrade.

Tabela 5.4. Modeli za proračun poluprečnika zaobljenja rezne ivice mikroglodala

R. b.	Tvrdoća materij. obratka *HRc*	Brzina rezanja v_c (m/min)	Korak po zubu f_z (μm)	Model	R^2
1	63	70	10	$r_e = 0.001 \cdot t^3 - 0.834 \cdot t^2 + 15.484 \cdot t - 7.059$	0.99
2	54	55	10	$r_e = 0.055 \cdot t^3 - 1.298 \cdot t^2 + 12.179 \cdot t - 3.057$	0.97
3	45	40	10	$r_e = 0.030 \cdot t^3 - 0.697 \cdot t^2 + 7.079 \cdot t + 2.155$	0.98
4	63	70	15	$r_e = 0.022 \cdot t^3 - 1.284 \cdot t^2 + 16.375 \cdot t - 8.246$	0.98
5	54	55	15	$r_e = 0.024 \cdot t^3 - 0.742 \cdot t^2 + 8.919 \cdot t - 0.048$	0.98
6	45	40	15	$r_e = 0.053 \cdot t^3 - 0.885 \cdot t^2 + 6.762 \cdot t + 1.933$	0.97

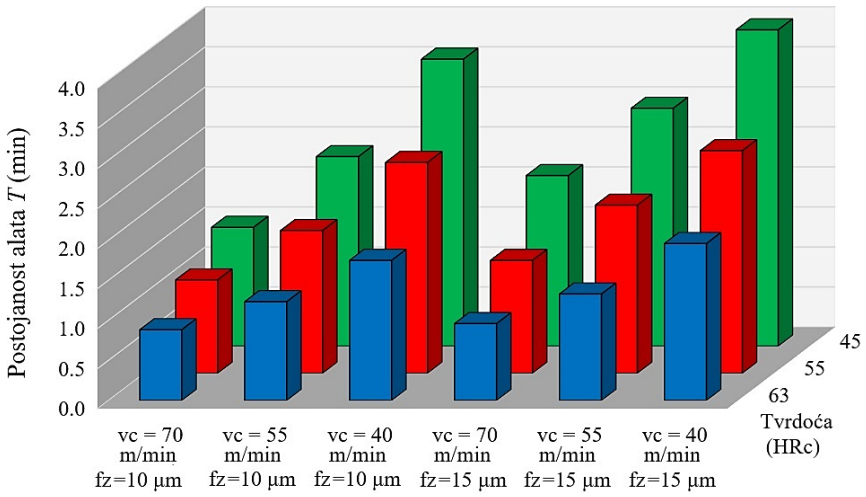
Teoretski, postojanost alata je trenutak vremena kada alat za rezanje gubi odgovarajuća rezna svojstva. Uvidom u dosadašnja dostupna istraživanja utvrđeno je da kriterijum postojanosti alata u mikrorezanju još uvijek nije jednoznačno i precizno definisana. U suštini, pomenuti kriterijum treba da predstavlja granicu vrijednosti nekog izlaznog parametra obrade, pri kojoj može doći do narušavanja tačnosti i kvaliteta obrade.

U svrhu analize i poređenja postojanosti loptastih mikroglodala, kao kriterijum postojanosti uzet je trenutak vremena kada poluprečnik rezne ivice alata, uslijed habanja dosegne vrijednost od 30 μm. Pomenuta vrijednost odgovara momentu kada minimalna debljina strugotine dosegne vrijednost koraka po zubu, te mehanizam gnječenja materijala i pojava visokih specifičnih pritiska, postaju signifikantni u ukupnom mehanizmu odvajanja strugotine. Razmatrani su uslovi obrade obratka sa najvećom tvrdoćom, pri čemu je korišćena srednja vrijednost koraka po zubu korišćenog u eksperimentalnim istraživanjima. Potrebno je napomenuti da mikroglodalo u opisanom trenutku nije u potpunosti izgubilo rezna svojstva. Na osnovu utvrđene granične vrijednosti poluprečnika zaobljenja rezne ivice i modela njegove promjene u toku vremena obrade (dio je prikazan u tabeli 5.4), izračunata je postojanost mikroglodala. Izračunate vrijednosti postojanosti mikroglodala za sve kombinacije ulaznih parametara utvrđenih planom eksperimenta, koji je objašnjen u poglavlju 4.3., date su tabeli 5.5. U tabeli 5.5 takođe su date vrijednosti količine skinutog materijala, izračunate kao proizvod postojanosti mikroglodala i količine skinutog materijala u jedinici vremena (*MRR*). Količina skinutog materijala u jedinici vremena je proračunata korišćenjem obrasca 2.33 iz poglavlja 2.2.2 i obrasca 3.13 iz poglavlja 3.2. Ovi podaci su ključni parametri u utvrđivanju optimalnih uslova obrade.

Uticaj ulaznih parametara obrade i tvrdoće materijala obratka na postojanost reznog klina mikroglodala data je na slici 5.13. Analizom histograma, može se utvrditi porast postojanosti alata sa opadanjem tvrdoće materijala i smanjenjem brzine rezanja. Sa porastom koraka po zubu, postojanost mikroglodala blago raste, što je izraženije pri rezanju obradaka sa nižom vrijednošću tvrdoće materijala. Ova činjenica je u skladu sa prethodno iznijetim zaključkom, da se pri većoj vrijednosti koraka po zubu javlja manji intenzitet habanja mikroglodala (manji rast poluprečnika zaobljenja vrha alata). Najveća postojanost loptastog mikroglodala, od 3.95 min, je dobijena pri obradi čelika X155CrMoV12, tvrdoće 45 HRc, koji je obrađivan korišćenjem koraka po zubu od 15 μm i brzinom rezanja 40 m/min. Jasno je da je pri ovim uslovima obrade uklonjena najveća količina materijala obratka. Najniža postojanost alata je iznosila 0.88 min i dobijena je pri rezanju obratka tvrdoće 63 HRc, pri brzini rezanja od 70 m/min i koraku po zubu od 10 μm.

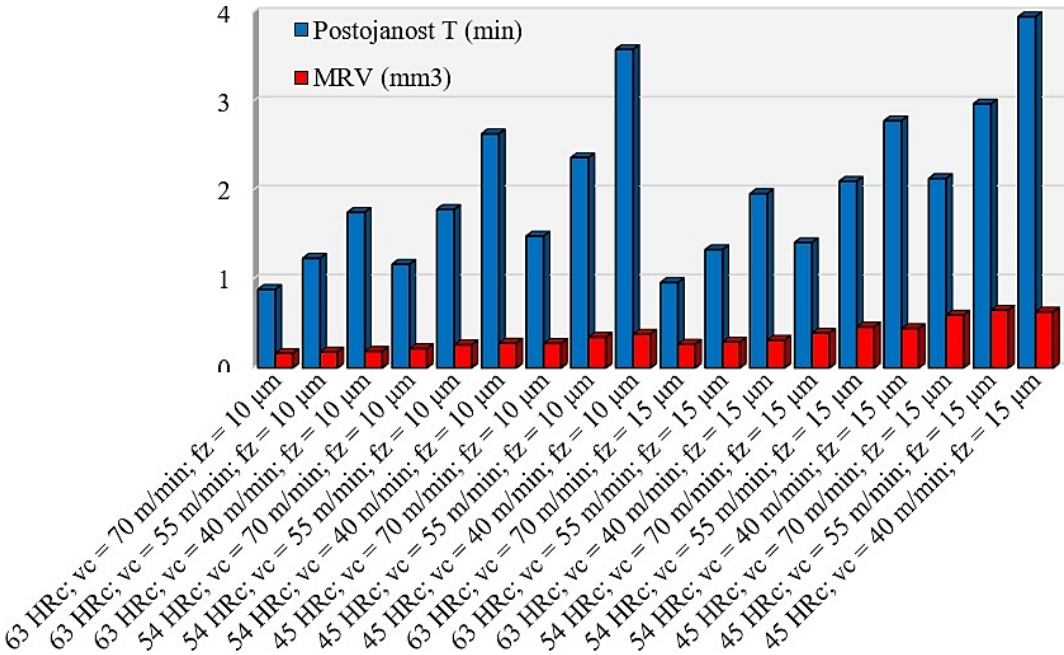
Tabela 5.5. Izračunate postojanost mikroglodala i pokazatelja produktivnosti procesa

R. b.	Tvrdoća obratka *HRc*	Brzina rezanja v_c (m/min)	Korak po zubu f_z (µm/zub)	Količina skinutog mater. u jed. vremena *MRR* (mm³/min)	Postojanost alata *T* (min)	Količina skinutog materijala *MRV* (mm³)
1	63	70	10	0.186	0.88	0.164
2	63	55	10	0.146	1.23	0.180
3	63	40	10	0.106	1.75	0.186
4	54	70	10	0.186	1.17	0.217
5	54	55	10	0.146	1.78	0.260
6	54	40	10	0.106	2.63	0.280
7	45	70	10	0.186	1.48	0.276
8	45	55	10	0.146	2.37	0.345
9	45	40	10	0.106	3.58	0.380
10	63	70	15	0.279	0.96	0.268
11	63	55	15	0.219	1.33	0.291
12	63	40	15	0.159	1.96	0.312
13	54	70	15	0.279	1.41	0.393
14	54	55	15	0.219	2.10	0.460
15	54	40	15	0.159	2.78	0.443
16	45	70	15	0.279	2.13	0.594
17	45	55	15	0.219	2.97	0.650
18	45	40	15	0.159	3.95	0.629



Slika 5.13. Uticaj ulaznih parametara na postojanost mikroglodala

Na slici 5.14 je prikazan odnos postojanosti alata i količine skinutog materijala, za različite kombinacije ulaznih parametara i tvrdoće obratka. Ukoliko se kao cilj postave uslovi koji daju veću postojanost odnosno veću količinu strugotine, analizom dijagrama se može zaključiti da će se to postići pri korišćenju većeg koraka po zubu. Najbolji omjer količine skinutog materijala obratka u odnosu na tvrdoću obratka se dobija prilikom korišćenja većeg koraka po zubu, ali i manje vrijednosti brzine rezanja.



Slika 5.14. Odnos postojanosti alata i produktivnosti obrade

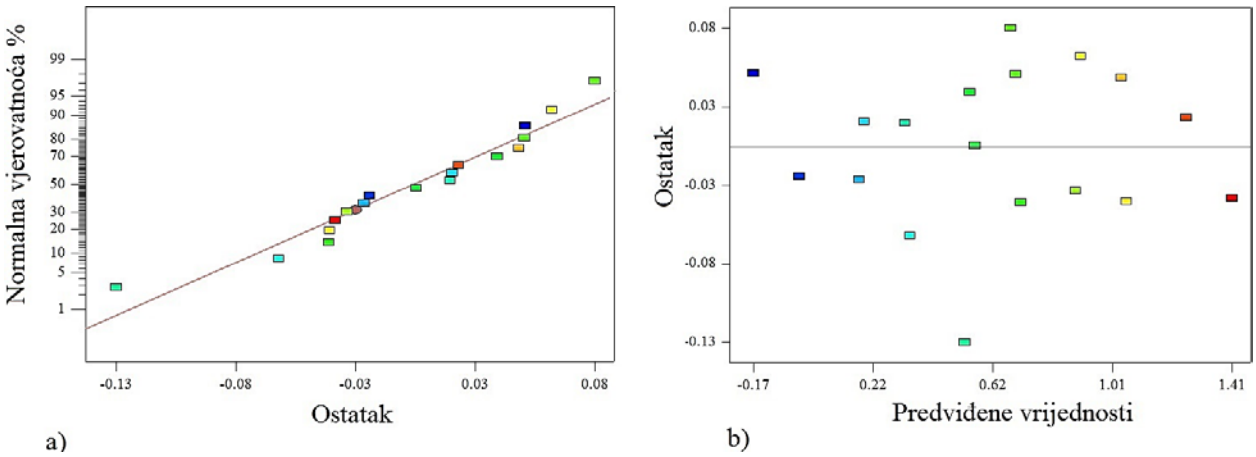
Na osnovu izračunatih vrijednosti postojanosti mikroglodala za različite kombinacije ulaznih parametara utvrđenih planom eksperimenta za analizu habanja mikroglodala i vrijednosti izlaza iz predloženog modela, definisanog obrascem (3.44), u softveru *DesignExpert7* je izvršena ANOVA analiza. Shodno obliku predloženog modela, u okviru pomenute analize korišćene su prirodno logaritmovane vrijednosti ulaza. Ovakav oblik ulaznih i izlaznih vrijednosti su posljedica linearizacije predloženog modela postojanosti mikroglodala, u svrhu dobijanja polinominalne regresione funkcije s ciljem daljeg korišćenja u metodi najmanjih kvadrata. Odgovarajućim matematičkim operacijama eksponiranja, takav oblik funkcionalne zavisnosti se može ponovo prevesti u oblik koji odgovara predloženom modelu, odnosno prevesti u eksponencijalnu funkcionalnu zavisnosti u kojoj figurišu eksponenti i koeficijenti.

U tabeli 5.6 su dati rezultati analize varijanse za predloženi model i izmjerene eksperimentalne podatke. Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 5.6 može se zaključiti da su svi ulazni parametri signifikantni. Prema izvršenoj analizi varijanse, srednja vrijednost iznosi $\bar{x}$ = 0.62 uz standardnu devijaciju SD = 0.071. Odnos signala i šuma iznosi S/N = 46.9, a koeficijent regresije iznosi R^2 = 0.98.

Tabela 5.6. Analiza varijanse za model postojanosti mikroglodala

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	3.15	1.05	208.07	< 0.0001
Tvrdoća HRc	1.45	1.45	288.15	< 0.0001
Brzina rezanja v_c	1.59	1.59	315.50	< 0.0001
Korak po zubu f_z	0.10	0.10	20.55	0.0005
OSTATAK	0.071	$5.04 \cdot 10^{-3}$		
UKUPNO	3.22			

Normalna raspodjela izlaza iz modela približno linearna, što se može zaključiti na osnovu dijagrama datog na slici 5.15 pod a). Dijagram zavisnosti ostataka vrijednosti u odnosu na predviđene vrijednosti je prikazan na slici 5.15 pod b). Zaključuje se da je varijansa konstantna za sve ulazne parametre jer je ostatak vrijednosti raspoređen nasumično. Na osnovu dobijenih podataka, može se zaključiti da je model adekvatan.

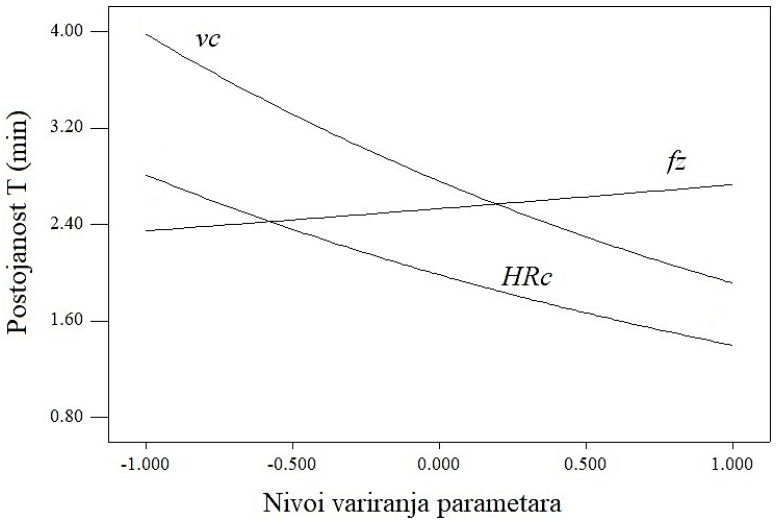


Slika 5.15. Pokazatelj adekvatnosti modela postojanosti mikroglodala

Dobijeni model se matematičkim operacijama eksponenciranja, iz linearnog oblika prevodi u funkcionalnu zavisnost sa kalibrisanim koeficijentom i eksponentima ulaznih parametara obrade, što je ranije i predloženo kao teoretski predložen model postojanosti alata:

$$T = 478.1 \cdot 10^3 \cdot HRc^{-2.068} \cdot {v_c}^{-1.298} \cdot {f_z}^{0.375} \tag{5.5}$$

Za prikazane konstantne uslove obrade, uticaj vrijednosti signifikantnih parametara je prikazan na slici 5.16. Može se zaključiti da najveći uticaj na postojanost alata ima brzina rezanja i tvrdoća materijala obratka. U tabeli 5.7 dato je poređenje vrijednosti izmjerene (proračunate) postojanosti alata i vrijednosti dobijenih modelom postojanosti mikroglodala (obrazac 5.5). Na osnovu ovih veličina izračunata je srednja vrijednost apsolutne greške modela. Vrijednost pomenute greške iznosi 5%, što govori da je predloženi model postojanosti alata tačan i pouzdan.

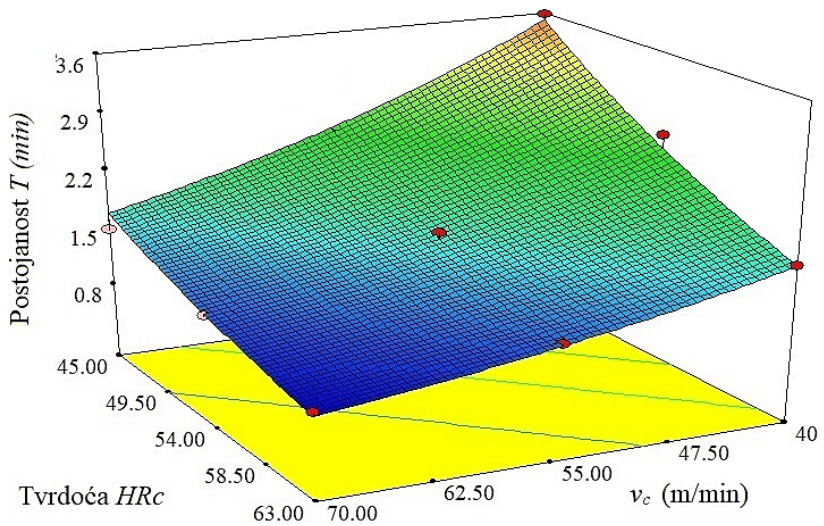


Slika 5.16. Uticaj ulaznih parametara na postojanost mikroglodala

Tabela 5.7. Procijenjena postojanost mikroglodala i vrijednosti dobijene modelom

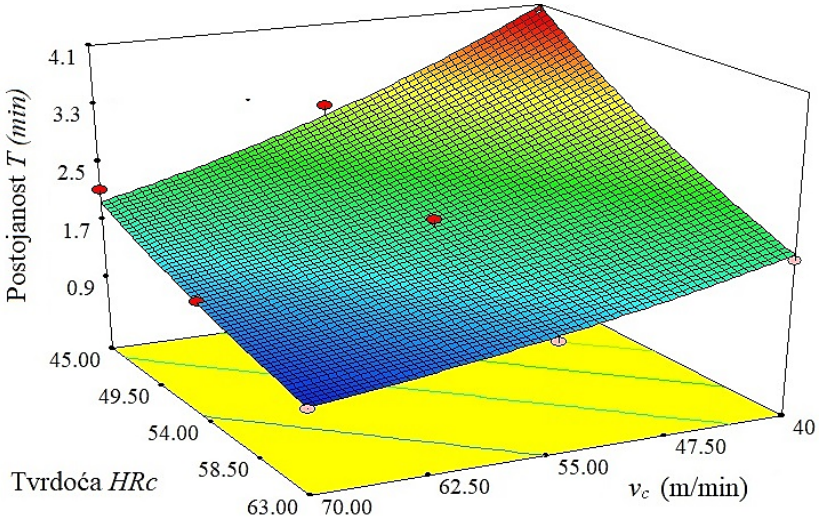
R. b.	Tvrdoća obratka *HRc*	Brzina rezanja v_c (m/min)	Korak po zubu f_z (μm/zub)	Procijenjena postojanost alata *T* (min)	Postojanost alata dobijena modelom *T* (min)	Apsolutna vrijednost odstupanja izlaza modela
1	63	70	10	0.88	0.87	2%
2	63	55	10	1.23	1.19	4%
3	63	40	10	1.75	1.79	3%
4	54	70	10	1.17	1.19	2%
5	54	55	10	1.78	1.63	8%
6	54	40	10	2.63	2.47	6%
7	45	70	10	1.48	1.74	17%
8	45	55	10	2.37	2.38	1%
9	45	40	10	3.58	3.60	0%
10	63	70	15	0.96	1.01	5%
11	63	55	15	1.33	1.38	4%
12	63	40	15	1.96	2.09	7%
13	54	70	15	1.41	1.39	1%
14	54	55	15	2.10	1.90	9%
15	54	40	15	2.78	2.87	3%
16	45	70	15	2.13	2.03	5%
17	45	55	15	2.97	2.77	7%
18	45	40	15	3.95	4.19	6%

Dijagrami promjene izlaznih vrijednosti prihvaćenog modela postojanosti mikroglodala pri obradi legiranog čelika X155CrMoV12 loptastim glodalom prečnika 0.6 mm, prema definisanim ulaznim i izlaznim parametrima, prikazan je na slici 5.17 i slici 5.18. Dijagrami prikazuju promjenu vrijednosti izlaza modela postojanosti alata u odnosu na različite vrijednosti tvrdoće materijala obratka i brzine rezanja. Za oba ulazna parametra, vidljiv je eksponencijalni uticaj na postojanost mikroglodala.



Slika 5.17. Dijagram izlaznih vrijednosti modela postojanosti mikroglodala za f_z = 10 μm/zubu

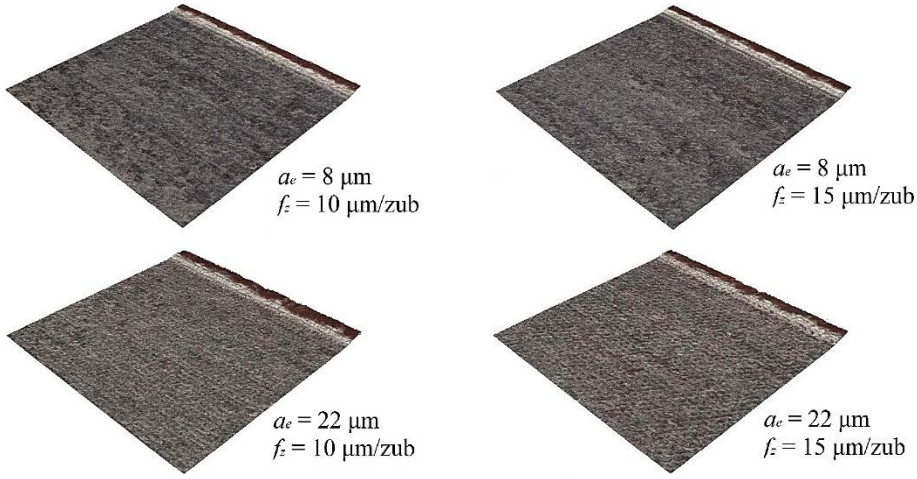
Dijagram na slici 5.17 prikazuje pomenute promjene za korak po zubu f_z = 10 μm, dok dijagram na slici 5.18 se odnosi na korak po zubu f_z = 15 μm. Modelirani uticaj ulaznih parametara i tvrdoće materijala na postojanost alata se u potpunosti poklapa sa zaključcima donijetim na osnovu teoretske analize habanja mikroglodala, izvedenim u svrhu utvrđivanja obradivosti.



Slika 5.18. Dijagram izlaznih vrijednosti modela postojanosti mikroglodala za f_z = 15 μm/zubu

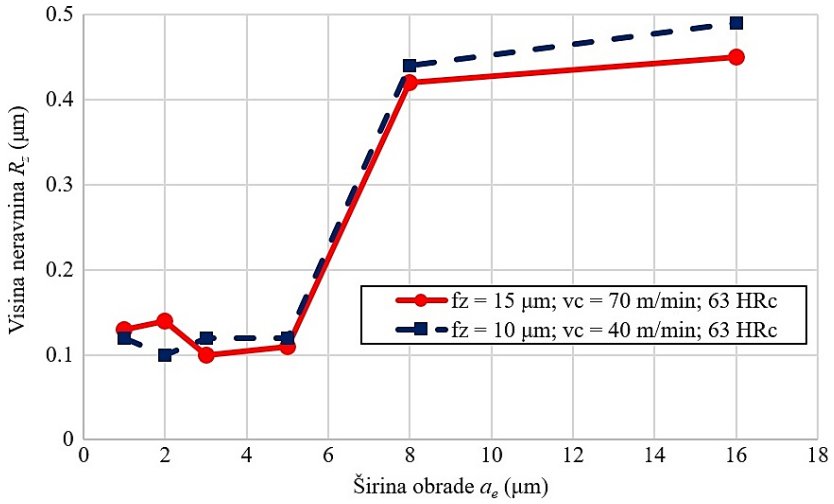
5.3. HRAPAVOST OBRAĐENE POVRŠINE

Eksperimentalna mjerenja hrapavosti obrađene površine, izvršena su u skladu sa postavljenim planom eksperimenta, predstavljenog u poglavlju 4.3 ovog rada, pri čemu je mjerenja srednja visina neravnina u 10 tačaka profila (R_z). Shodno pretpostavljenom modelu hrapavosti obrađene površine (obrazac 3.38), potrebno je kalibrisati koeficijent i eksponente modela hrapavosti obrađene površine na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata. Mjerenja i vizuelna analiza dobijenih uzoraka su, kako je i opisano, izvršena na optičkom skeneru *Alicona*. Na slici 5.19 su prikazane skenirane obrađene površine na obracima tvrdoće 45 HRc, za različite širine obrade (8 μm i 22 μm) i različite korake po zubu (10 μm i 15 μm). Analizom slika, jasno se može vidjeti da je došlo do promjena topografije obrađene površine na uzorcima zbog uticaja različitih vrijednosti ulaznih parametara. Uočava se povećanje valovitosti obrađene površine pri većim vrijednostima širine obrade. S druge strane, obrađene površine dobijene obradom sa relativno manjim vrijednostima širine obrade imaju istu, skoro neprimjetnu valovitost.



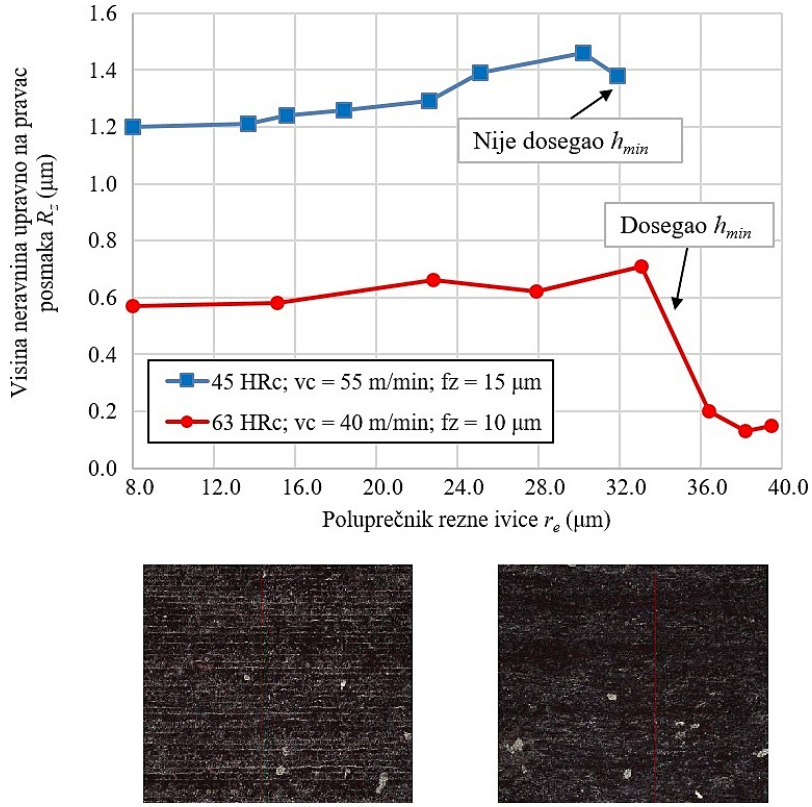
Slika 5.19. Topografija obrađene površine pri obradi različitim širinama obrade

U skladu sa postavljenim modelom hrapavosti obrađene površine, te u svrhu tačnijeg utvrđivanja vrijednosti pokazatelja hrapavosti obrađene površine, izvršeni su dodatni eksperimenti sa većim spektrom varijacije širine obrade. Pored vrijednosti širina obrade, koje su obuhvaćene planom eksperimenta, u ovim ispitivanjima su korišćene i dodatne manje vrijednosti, i to: 2 μm, 4 μm i 6 μm. Tom prilikom je mjerena visina neravnina u 10 tačaka. Eksperimentalno dobijene vrijednosti su dijagramski prikazane na slici 5.20. Analizom dijagrama, može se uočiti granica naglog porasta vrijednosti visine neravnina u 10 tačaka profila. Vrijednost pomenutog parametra hrapavosti je bila konstantna (R_z = 0.1 μm) bez obzira na promjenu vrijednosti širine obrade sve do trenutka dok širina obrade nije postala veća od vrijednosti minimalne debljine strugotine. Nakon toga dolazi do naglog porasta parametra hrapavosti R_z. Granica naglog porasta vrijednosti parametra R_z je u oblasti gdje vrijednost širine obrade, kao mjere debljine režućeg sloja, počinje da raste iznad vrijednosti minimalne debljine strugotine. Dobijeni rezultati su u skladu sa teoretski zaključcima dobijenim pri pretpostavljanju modela hrapavosti obrađene površine, odnosno pretpostavkama o dominaciji efekta veličine. Površine dobijene pri manjim vrijednostima širine obrade su bile vizuelno glatkije, sa uzdužnim tragovima zgnječenog materijala u vidu traka, što upućuje na zaključak da materijal obratka uopšte nije uklanjan mehanizmom rezanja.



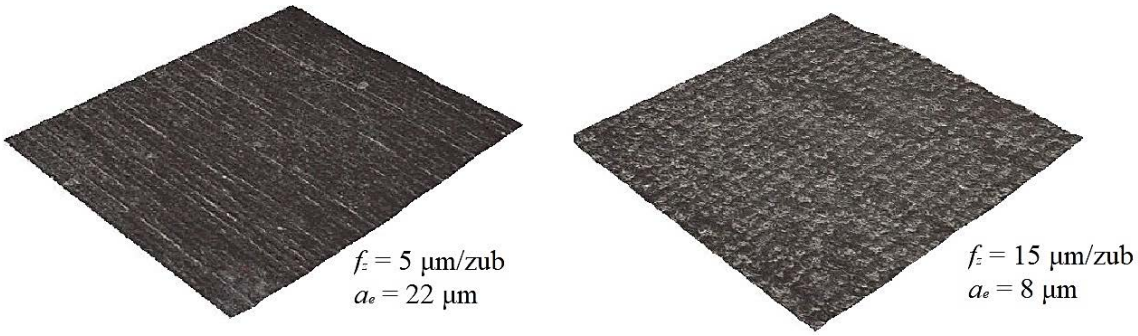
Slika 5.20. Hrapavost obrađene površine u oblasti dominacije efekta veličine

Kao prilog prethodnom zaključku, može se razmotriti i hrapavost obrađene površine R_z, koja je mjerena tokom analize procesa habanja alata. Hrapavost obrađene površine je imala približno konstantnu vrijednost koja je odgovarala vrijednosti hrapavosti izmjerenoj na početku mjerenja habanja mikroglodala. Sa porastom poluprečnika zaobljenja rezne ivice, došlo je do intenzivnog pada vrijednosti parametra hrapavosti R_z (Slika 5.21). Analizom vrijednosti i odgovarajuće promjene na dijagramu, može se zaključiti da je vrijednost posmatranog parametra hrapavosti pala na R_z = 0.1 µm. Pri obradi relativno mekšeg obratka, tvrdoće 45 HRc, širina zahvaćenog sloja materijala obratka nije dosegla vrijednost minimalne debljine strugotine, jer mekši obradci imaju manju vrijednost minimalne debljine strugotine. U tom slučaju, mehanizam uklanjanja materijala obratka mikrorezanjem, je bio dominantan.



Slika 5.21. Promjena pokazatelja hrapavosti obrađene površine R_z uslijed habanja mikroglodala

Promjena smjera prostiranja valovitosti obrađene površine zavisi od odnosa vrijednosti koraka po zubu i širine obrade (Sika 5.22). Valovitost obrađene površine ostvarena pri radu sa većim vrijednosti koraka po zubu nema pravilne smjerove prostiranja kao valovitost postignuta u slučaju rada sa većim vrijednostima širine obrade. Ukoliko se koriste veće vrijednosti koraka po zubu u odnosu na vrijednost širine obrade, valovitost mijenja pravac u odnosu na pravac vektora brzine pomoćnog kretanja. Jasno je da topografija obrađene površine zavisi i od trenutne vrijednosti ugla zahvata zuba pri ulasku u novi zahvat sa materijalom obratka. Uslove koji obezbjeđuju konstantnu vrijednost ugla zahvata na ulazu mikroglodala u novi zahvat, je izuzetno teško postići na komercijalnoj mašini alatki.



Slika 5.22. Različiti smjerovi prostiranja valovitosti obrađene površine

U tabeli 5.8. su prikazane skenirane obrađene površine različitog nagiba, na obracima različite tvrdoće. Na datim slikama obrađenih površina, može se uočiti smjer valovitosti i tragovi prolaska mikroglodala u toku obrade. Analizom slika skeniranih površina, može se zaključiti da je pri obradi tvrđih obradaka, dobijena nešto povoljnija topografija obrađene površine. S druge strane, povećanjem nagiba obrađene površine, pri istim ulaznim parametrima i tvrdoći obratka, dobijena je nepovoljnija topografija obrađene površine.

Vrijednosti visine neravnina u 10 tačaka profila, izmjerene prema proceduri i za kombinacije ulaznih parametara procesa koji su opisani u Taguchi-jevom planu eksperimenta $L_9(3^2)$, date su u tabeli 5.9. Najmanja vrijednost od R_z = 0.42 μm je izmjerena nakon obrade površine pod nagibom 0°, na obratku tvrdoće 63 HRc, za širinu obrade 8 μm, korak po zubu 15 μm, te brzinu rezanja 70 m/min. Najveća vrijednost od R_z = 1.82 μm je izmjerena nakon obrade površine pod nagibom 70°, na obratku tvrdoće 45 HRc, za širinu obrade 22 μm, korak po zubu 10 μm, te brzine rezanja 70 m/min. Generalno posmatrajući dobijene vrijednosti visine neravnina u 10 tačaka profila, zaključuje se da mikroglodanjem loptastim glodalom dobija obrađena površina visokog kvaliteta obrade, mjerena prema standardnim klasama kvaliteta. Pri poređenju sa standardnim klasama kvaliteta u obradi rezanjem, granica fine obrade je vrijednost R_z = 1.6 μm. Ova vrijednost odgovara klasi N5, po starom načinu označavanja kvaliteta obrađene površine. Uvidom u eksperimentalno dobijene rezultate, jasno je da ni jedna izmjerena vrijednost ne prelazi pomenutu granicu. Na osnovu toga, može se zaključiti da je mikroglodanje adekvatna tehnologija za izradu mikrodijelova visokog kvaliteta obrađene površine. Bitno je napomenuti da, prema teoretskim izvorima, vrijednost srednje visine neravnina iznosi oko 25% vrijednosti visine neravnina u 10 tačaka profila. Teoretski, kvalitet obrađene površine dobijen mikroglodanjem, odgovara kvalitetima koji se postižu prilikom finog brušenja, pa čak i procesima koji se koriste za povećanje kvaliteta, kao što je honovanje ili lepovanje.

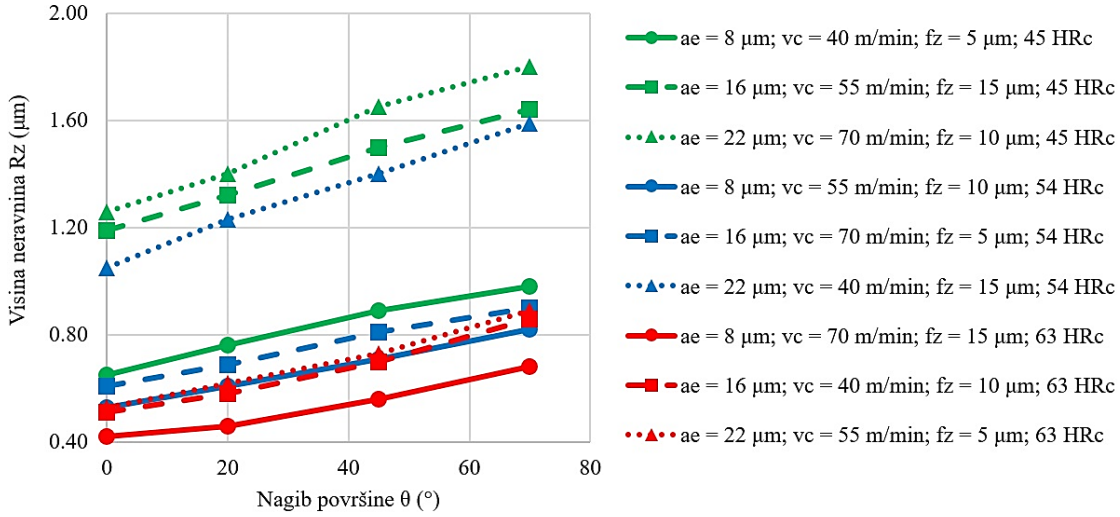
Tabela 5.8. Skenirane obrađene površine pri različitoj tvrdoći i nagibu

$\theta°$	63 HRc	54 HRc	45 HRc
0			
20			
45			
70			

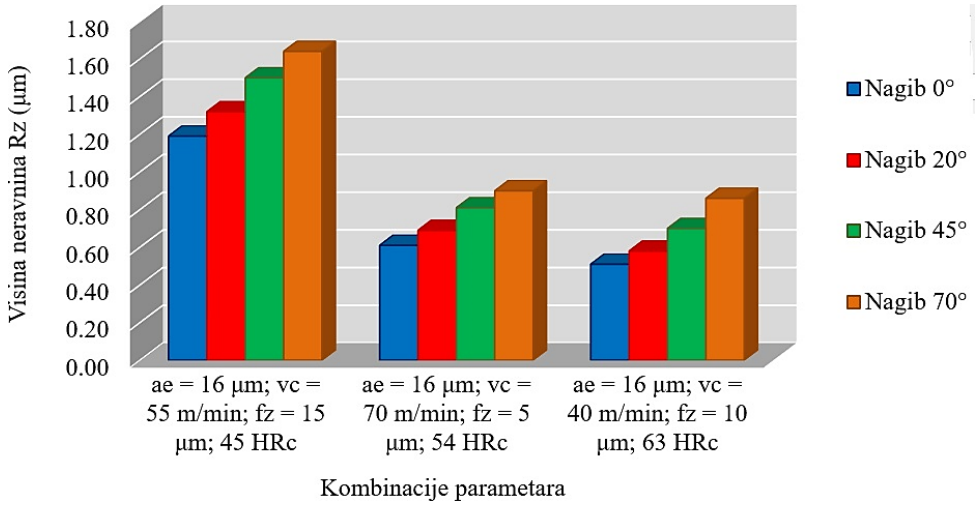
Tabela 5.9. Izmjerene vrijednosti R_z za različite tvrdoće obratka i nagibe obrađene površine

R. b.	Širina obrade a_e (µm)	Brzina rezanja v_c (m/min)	Korak po zubu f_z (µm/zub)	Tvrdoća obratka *HRc*	R_z (µm) za $\theta = 0°$	R_z (µm) *za* $\theta = 20°$	R_z (µm) za $\theta = 45°$	R_z (µm) za $\theta = 70°$
1	8	40	5	45	0.65	0.76	0.89	0.98
2	16	55	15	45	1.19	1.32	1.50	1.64
3	22	70	10	45	1.26	1.40	1.65	1.80
4	8	55	10	54	0.53	0.61	0.71	0.82
5	16	70	5	54	0.61	0.69	0.81	0.90
6	22	40	15	54	1.05	1.23	1.40	1.59
7	8	70	15	63	0.42	0.46	0.56	0.68
8	16	40	10	63	0.51	0.58	0.70	0.86
9	22	55	5	63	0.53	0.62	0.73	0.89

Na slici 5.23 prikazana je zavisnost visine neravnina u 10 tačaka profila obrađene površine (u daljem tekstu pokazatelja hrapavosti) za različite nagibe površine obratka. Zavisnost pokazatelja hrapavosti od različitih kombinacija ulaznih parametara data je na slici 5.24. Analizom prikazanih dijagrama može se uočiti da na povećanje hrapavosti obrađene površine utiče širina obrade, zatim tvrdoća materijala obratka, te nagib obrađivane površine. Neosporna je činjenica, da sa povećanjem ugla nagiba obrađivane površine, raste posmatrani parametar hrapavosti obrađene površine. Ova činjenica važi bez obzira na vrijednosti širine obrade, odnosno tvrdoće obratka. Takođe vidljivo je da se za iste uglove nagiba obrađivane površine, pri konstantnoj vrijednosti širine obrade, najmanja hrapavost dobija za materijal obratka sa najvećom tvrdoćom (63 HRc).



Slika 5.23. Vrijednosti R_z za različite nagibe obrađivane površine i ostale ulazne parametre procesa obrade



Slika 5.24. Vrijednosti R_z za različite kombinacije ulaznih parametara

Analizom prethodnih slika, može se zaključiti da se vrijednosti pokazatelja hrapavosti povećavaju sa porastom širine obrade i koraka po zubu, jer ovi ulazni parametri direktno utiču na geometriju valovitosti obrađene površine. Pri obradi obradaka manje tvrdoće, dobija se veća hrapavost obrađene površine. Razlog za to je veća deformabilnost materijala, kod obradaka sa manjom tvrdoćom, zbog čega se tokom rezanja pojavljuje gnječenje materijala i njegovo nepravilno odvajanje od tela pripremka. Mikrorezanjem tvrđih materijala obezbjeđuje se

ravnomjerniji lom kristalnih faza u strukturi obratka. Povećanje hrapavosti sa povećanjem nagiba obrađivane površine je posljedica dinamičkog ponašanja mikroglodala, odnosno njegove relativno male radijalne krutosti u odnosu na aksijalnu (pritisnu/zateznu) krutost. Prilikom obrade manjih nagiba glodalo je više opterećeno na pritisak, pa ključnu ulogu preuzima aksijalna krutost.

Na osnovu izmjerenih vrijednosti pokazatelja hrapavosti obrađene površine R_z i predloženog modela hrapavosti obrađene površine, izvršena je ANOVA analiza. Kao i u prethodnim analizama eksperimenata, teoretski predloženi modeli su linearzovani prirodnim logaritmovanjem, da bi se dobila linearna funkcionalna zavisnost koja je prilagođena upotrebi u metodi najmanjih kvadrata. Pokazatelji valjanosti predloženih modela za pokazatelj hrapavosti obrađene površine za nagibe obrađivane površine 0°, 10°, 45° i 70°, dobijeni analizom varijanse, su prikazani u tabelama 5.10, 5.11, 5.12 i 5.13, respektivno.

Tabela 5.10. Analiza varijanse za model hrapavosti obrađene površine pri nagibu 0°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	1.32	0.33	138.43	0.0002
Širina obrade a_e (μm)	0.42	0.42	173.95	0.0002
Brzina rezanja v_c (m/min)	9.467E-004	9.467E-004	0.40	0.5630
Korak po zubu f_z (μm/zub)	0.14	0.14	57.72	0.0016
Tvrdoća obratka *HRc*	0.77	0.77	321.66	< 0.0001
OSTATAK	9.548E-003	2.387E-003		
UKUPNO	1.33			

Tabela 5.11. Analiza varijanse za model hrapavosti obrađene površine pri nagibu 20°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	1.30	0.33	75.04	0.0005
Širina obrade a_e (μm)	0.43	0.43	98.06	0.0006
Brzina rezanja v_c (m/min)	6.455E-003	6.455E-003	1.49	0.2897
Korak po zubu f_z (μm/zub)	0.11	0.11	26.02	0.0070
Tvrdoća obratka *HRc*	0.76	0.76	174.62	0.0002
OSTATAK	0.017	4.341E-003		
UKUPNO	1.32			

Tabela 5.12. Analiza varijanse za model hrapavosti obrađene površine pri nagibu 45°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	1.20	0.30	100.42	0.0003
Širina obrade a_e (μm)	0.40	0.40	133.43	0.0003
Brzina rezanja v_c (m/min)	4.060E-003	4.060E-003	1.36	0.3090
Korak po zubu f_z (μm/zub)	0.11	0.11	35.81	0.0039
Tvrdoća obratka *HRc*	0.69	0.69	231.07	0.0001
OSTATAK	0.012	2.995E-003		
UKUPNO	1.22			

Tabela 5.13. Analiza varijanse za model hrapavosti obrađene površine pri nagibu 70°

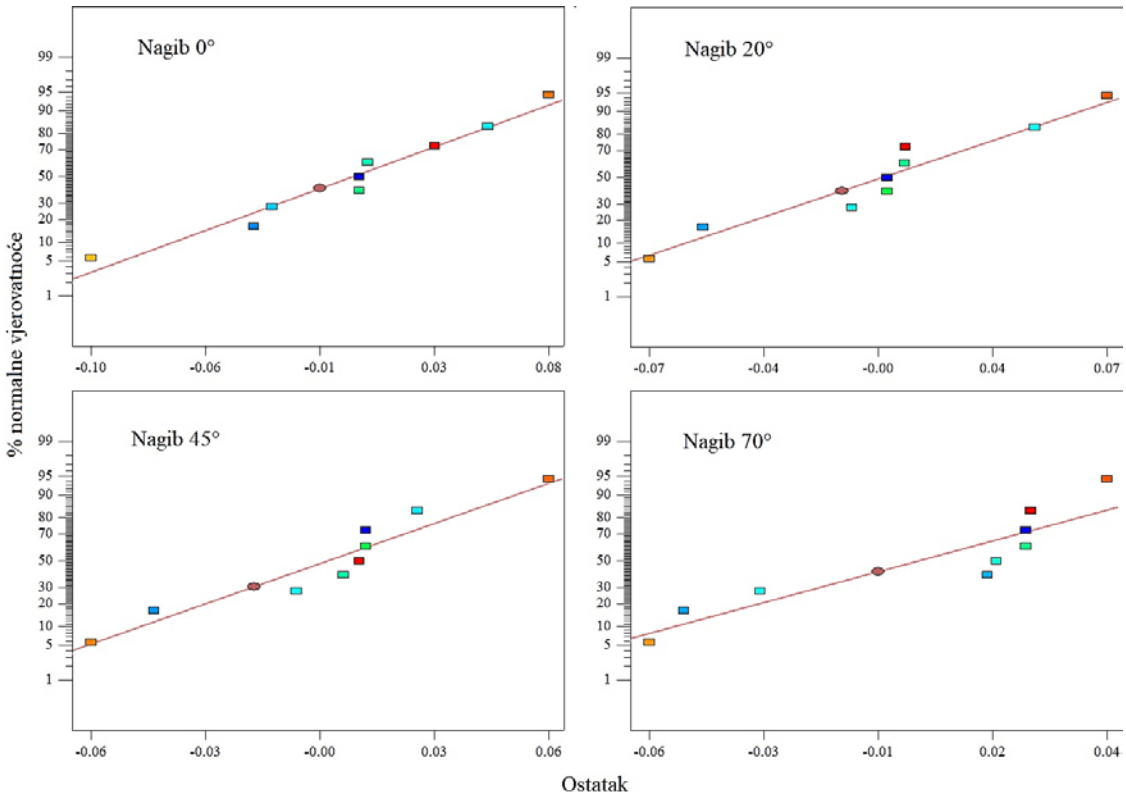
Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	0.99	0.25	91.72	0.0003
Širina obrade a_e (μm)	0.39	0.39	142.29	0.0003
Brzina rezanja v_c (m/min)	6.449E-003	6.449E-003	2.38	0.1978
Korak po zubu f_z (μm/zub)	0.11	0.11	41.18	0.0030
Tvrdoća obratka *HRc*	0.49	0.49	181.03	0.0002
OSTATAK	0.011	2.710E-003		
UKUPNO	1.01			

Analizom vrijednosti dobijenih na osnovu analize varijanse, može se zaključiti da su predloženi modeli signifikantni. Prema rezultatima, najveći uticaj na hrapavost obrađene površine ima tvrdoća obratka i širina obrade, jer su u svim slučajevima pripadajuće P – vrijednosti najmanje. Najmanji uticaj ima brzina rezanja, čije se P – vrijednosti kreću oko vrijednosti 0.3. Ovi zaključci su u skladu sa teoretskim pretpostavkama i ranijim zaključcima. Relativno mali uticaj na hrapavost mjerenu upravno na pravac vektora brzine pomoćnog kretanja, ima korak po zubu. Uticaj koraka po zubu na visinu neravnina u 10 tačaka je manji pri manjim nagibima obrađivane površine (0° i 20°). Za veće nagibe, uticaj koraka po zubu je veći. Razlog tome je uticaj koraka po zubu na dinamičko ponašanje mikroglodala. U tabeli 5.14 su dati pokazatelji valjanosti predloženih regresionih modela, za različite nagibe obrađivane površine. Uvidom u vrijednosti koeficijenata regresije R^2, može se zaključiti da su svi modeli adekvatni.

Tabela 5.14. Poređenje pokazatelja koeficijenata regresije modela hrapavosti

Pokazatelj	R_z za 0°	R_z za 20°	R_z za 45°	R_z za 70°
Standardna devijacija (SD)	0.077	0.065	0.053	0.050
Srednja vrijednost ($\bar{x}$)	-0.36	-0.25	-0.075	0.067
Odnos *S/N*	30.7	23.1	26.6	24.9
Koeficijent R^2	0.98	0.99	0.99	0.99
Koeficijent $R^2{}_{Adj.}$	0.97	0.97	0.98	0.98
Koeficijent $R^2{}_{Pred.}$	0.94	0.95	0.96	0.95

Na slici 5.25 su pokazani dijagrami koji pokazuju odnos ostatka vrijednosti i procenta normalne vjerovatnoće, dobijenih na osnovu eksperimentalnih podataka i izlaza iz predloženog modela. Za svaki nagib obrađivane površine formiran je zasebni dijagram. Analizom se zaključuje da zavisnost normalne vjerovatnoće od ostatka vrijednosti linearan, što govori o adekvatnosti predloženih modela.



Slika 5.25. Dijagrami pokazatelja adekvatnosti modela hrapavosti

U nastavku su dati regresioni modeli za analizirane nagibe obrađene površine, dobijeni eksponovanjem linearne regresione funkcije koja predstavlja model za visinu neravnina, datu u obliku $\ln(R_z)$. Time su dobijeni koeficijenti i eksponenti teoretski predloženog modela za različite nagibe obrađivane površine. Model za nagib obrađivane površine 0° je:

$$R_{z,0°} = 561 \cdot {a_e}^{0.508} \cdot {v_c}^{-0.045} \cdot {f_z}^{0.273} \cdot HRc^{-2.127} \tag{5.6}$$

za nagib obrađivane površine 20°:

$$R_{z,20°} = 839 \cdot {a_e}^{0.514} \cdot {v_c}^{-0.117} \cdot {f_z}^{0.247} \cdot HRc^{-2.113} \tag{5.7}$$

za nagib obrađivane površine 45°:

$$R_{z,45°} = 651 \cdot {a_e}^{0.498} \cdot {v_c}^{-0.093} \cdot {f_z}^{0.241} \cdot HRc^{-2.019} \tag{5.8}$$

za nagib obrađivane površine 70°:

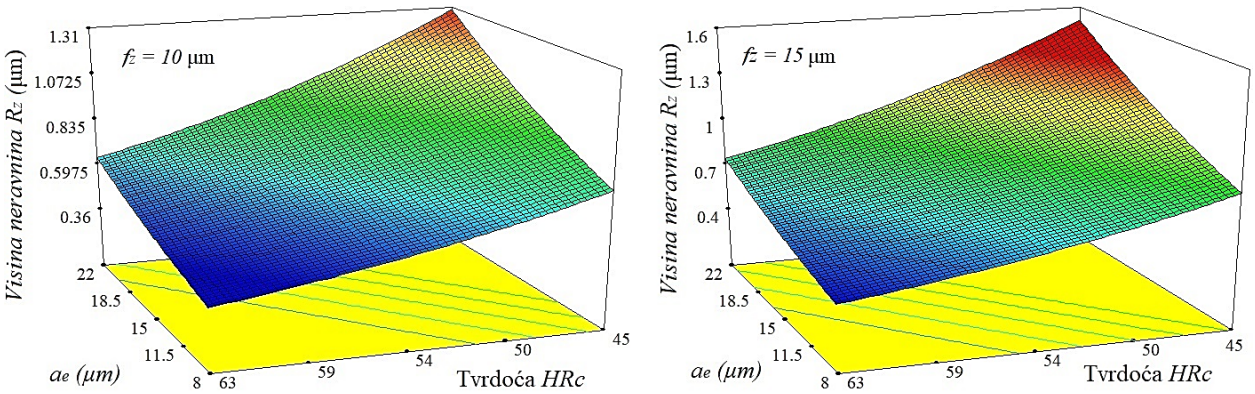
$$R_{z,70°} = 234 \cdot {a_e}^{0.489} \cdot {v_c}^{-0.117} \cdot {f_z}^{0.245} \cdot HRc^{-1.700} \tag{5.9}$$

U tabeli 5.15 dato je poređenje izmjerenih vrijednosti pokazatelja hrapavosti R_z i njegovih vrijednosti dobijenih na osnovu prethodno datih modela postojanosti alata. Na osnovu pomenutih veličina izračunata je srednja vrijednost apsolutne greške modela hrapavosti obrađene površine. Vrijednost pomenute greške za prethodne modele redom iznose 2%, 8%, 3% i 3%, na osnovu čega se može zaključiti da su predloženi modeli hrapavosti obrađene površine tačni i pouzdani.

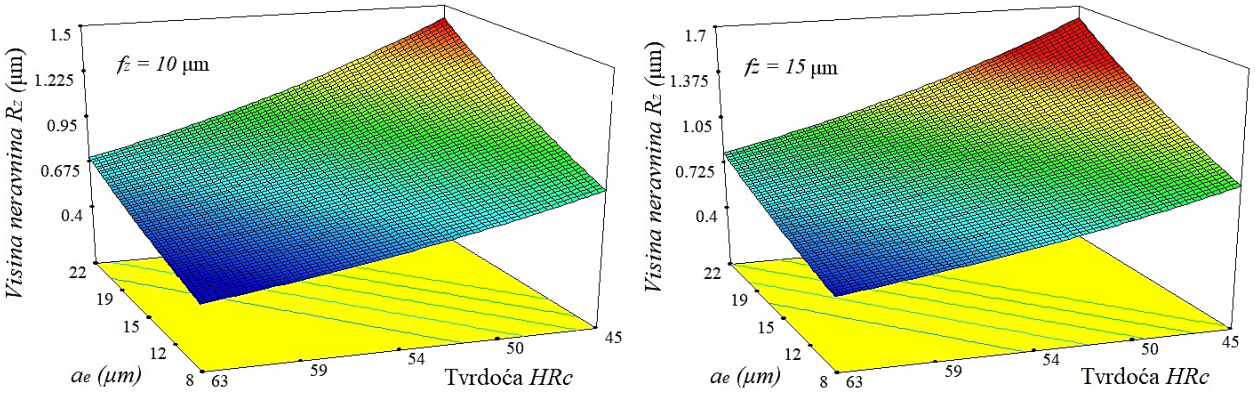
Tabela 5.15. Poređenje izmjerenih vrijednosti R_z sa vrijednostima dobijenih modelom

R. b.	Širina obrade a_e (μm)	Brzina rezanja v_c (m/min)	Korak po zubu f_z (μm/zub)	Tvrdoća obratka *HRc*	Nagib površine θ (°)	Izmjerena R_z (μm)	Izračunata R_z (μm)	Apso. vrij. odstupanja izlaza modela
1	8	40	5	45	0	0.65	0.65	1%
2	16	55	15	45	0	1.19	1.22	3%
3	22	70	10	45	0	1.26	1.27	1%
4	8	55	10	54	0	0.53	0.52	2%
5	16	70	5	54	0	0.61	0.61	0%
6	22	40	15	54	0	1.05	0.99	6%
7	8	70	15	63	0	0.42	0.42	1%
8	16	40	10	63	0	0.51	0.54	6%
9	22	55	5	63	0	0.53	0.52	2%
1	8	40	5	45	20	0.76	0.70	8%
2	16	55	15	45	20	1.32	1.27	4%
3	22	70	10	45	20	1.40	1.31	6%
4	8	55	10	54	20	0.61	0.54	11%
5	16	70	5	54	20	0.69	0.64	8%
6	22	40	15	54	20	1.23	1.05	15%
7	8	70	15	63	20	0.46	0.42	8%
8	16	40	10	63	20	0.58	0.58	0%
9	22	55	5	63	20	0.62	0.56	10%
1	8	40	5	45	45	0.89	0.88	1%
2	16	55	15	45	45	1.50	1.57	5%
3	22	70	10	45	45	1.65	1.64	1%
4	8	55	10	54	45	0.71	0.70	1%
5	16	70	5	54	45	0.81	0.82	1%
6	22	40	15	54	45	1.40	1.31	6%
7	8	70	15	63	45	0.56	0.55	1%
8	16	40	10	63	45	0.70	0.75	6%
9	22	55	5	63	45	0.73	0.72	2%
1	8	40	5	45	70	0.98	0.96	2%
2	16	55	15	45	70	1.64	1.71	4%
3	22	70	10	45	70	1.80	1.76	2%
4	8	55	10	54	70	0.82	0.81	2%
5	16	70	5	54	70	0.90	0.93	3%
6	22	40	15	54	70	1.59	1.52	5%
7	8	70	15	63	70	0.68	0.67	2%
8	16	40	10	63	70	0.86	0.91	5%
9	22	55	5	63	70	0.89	0.86	3%

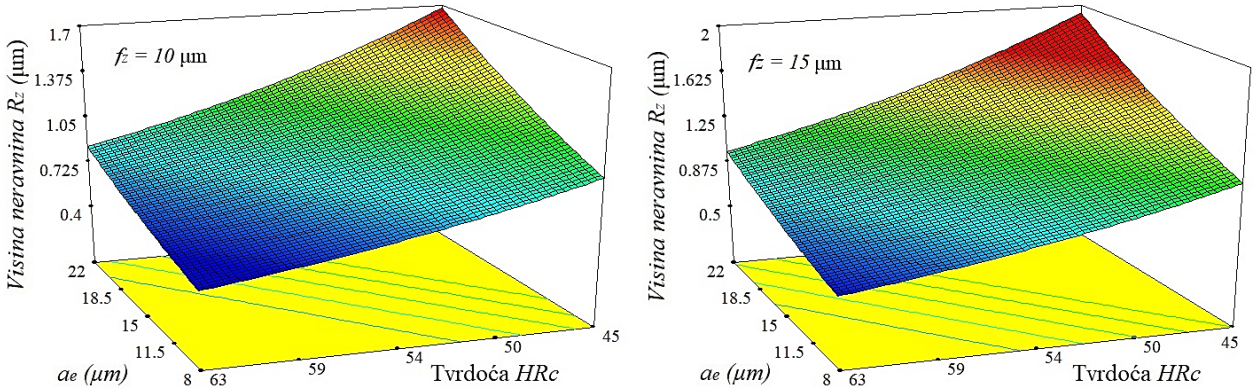
Na slici 5.26 su dati dijagrami odziva dobijenih modela za nagib obrađivane površine 0°, na obratku od legiranog čelika X155CrVMo12, obrađivanog loptastim glodalom prečnika 0.6 mm, i to za korak po zubu 10 μm (lijevo) i 15 μm (desno). Za iste konstantne uslove obrade i iste korake po zubu, na slici 5.27 su prikazani odzivi modela za nagib površine 20°, na slici 5.28 za nagib površine 45°, te na slici 5.29 za nagib 70°.



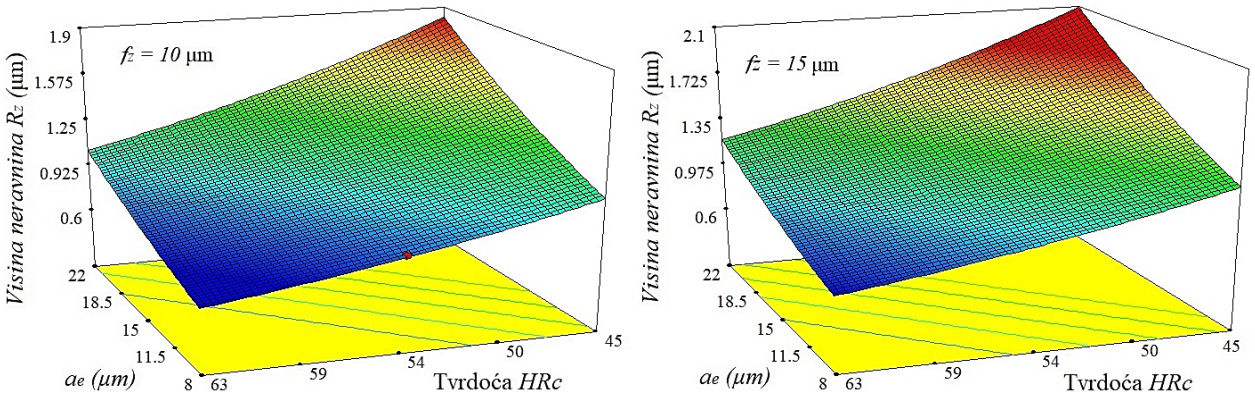
Slika 5.26. Odzivi modela hrapavosti za nagib obrađivane površine 0°



Slika 5.27. Odzivi modela hrapavosti za nagib obrađivane površine 20°



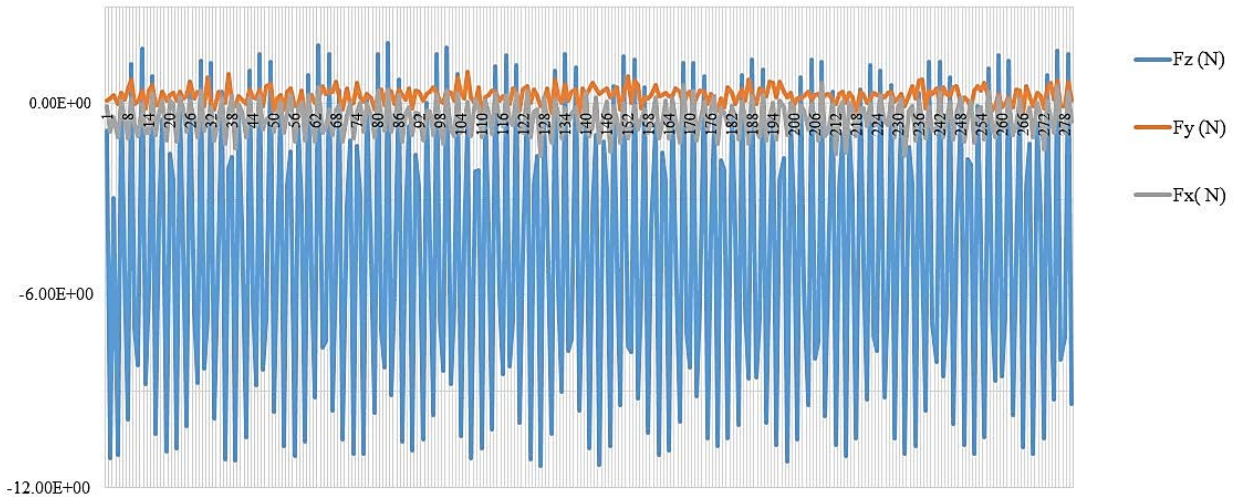
Slika 5.28. Odzivi modela hrapavosti za nagib obrađivane površine 45°



Slika 5.29. Odzivi modela hrapavosti za nagib obrađivane površine 70°

5.4. SILE REZANJA I DEFLEKSIJA ALATA

Na osnovu predloženog modela a na osnovu plana eksperimenta, izvršeno je mjerenje vrijednosti ortogonalnih sila rezanja u pravcu osa obratka. U svrhu dodatnih analiza, pored sila rezanja, za iste kombinacije ulaznih parametara obrade, mjerena je i defleksija mikroglodala. Na slici 5.30 je prikazan izmjereni signal ortogonalnih sila rezanja u pravcu osa. Izmjerena vrijednost sila rezanja predstavlja srednju vrijednost dobijenog signala, izmjerenog u periodu njegovog ustaljenog odziva.



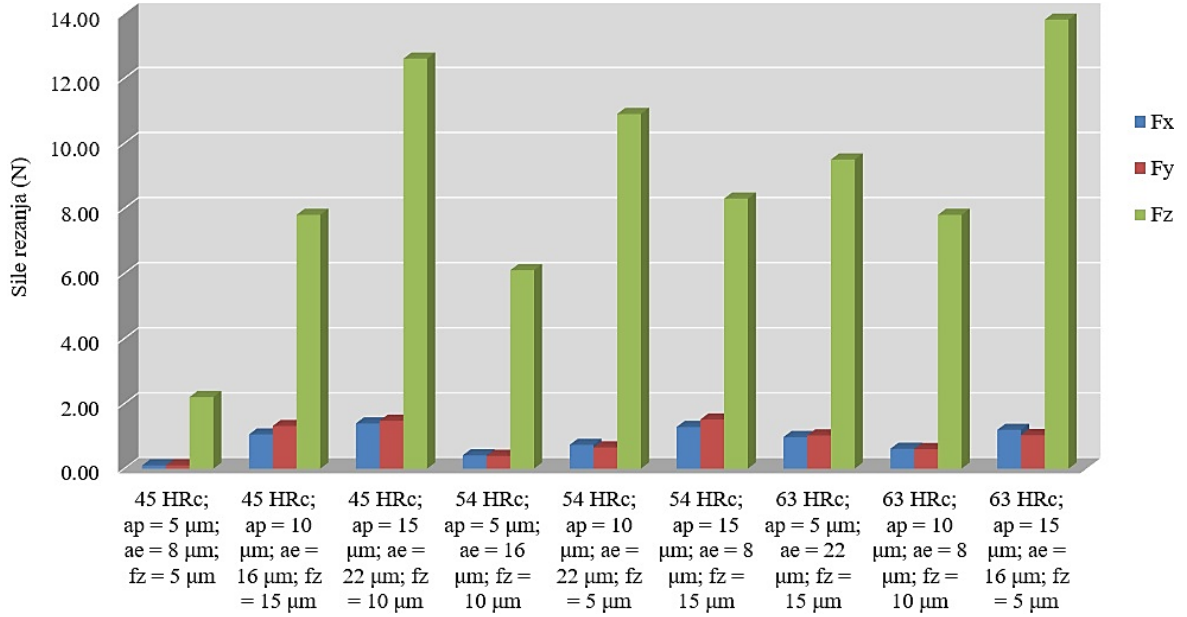
Slika 5.30. Izmjereni signali sila rezanja u pravcu koordinatnih osa

U tabeli 5.16 su date vrijednosti izmjerenih ortogonalnih sila rezanja F_x, F_y i F_z i defleksije alata u pravcu x-ose (δ_x), za različite vrijednosti dubine obrade, širine obrade, koraka po zubu i tvrdoće materijala. Pomenute sile rezanja su izmjerene za nagibe obrađivane površine od 0° i 45°.

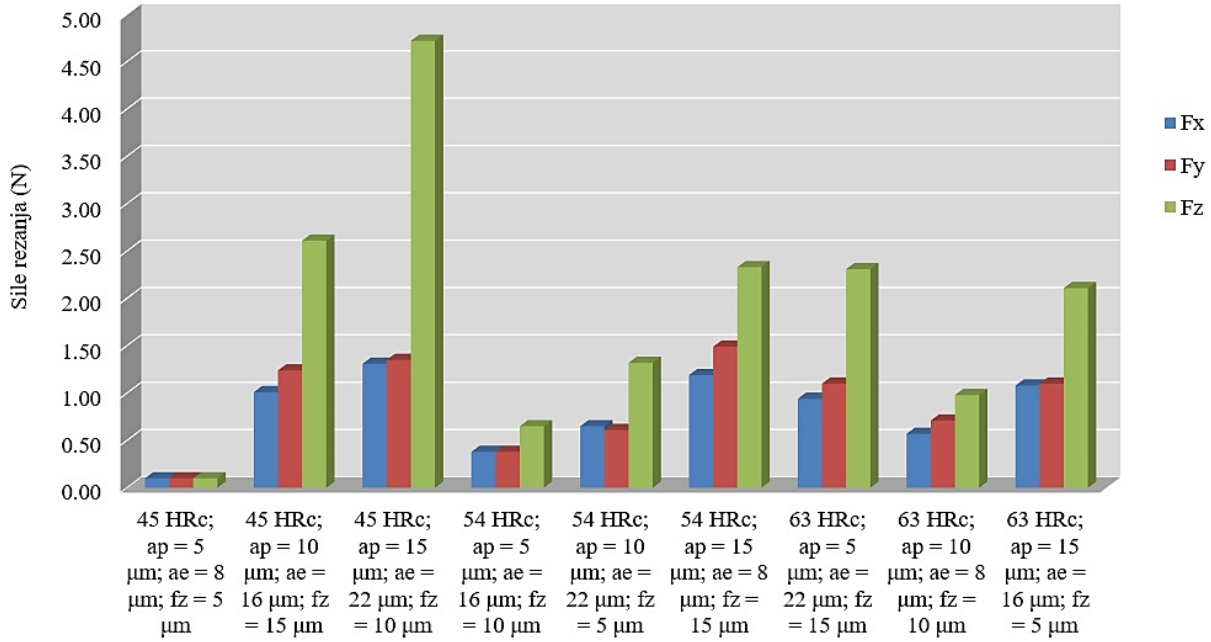
Tabela 5.16. Izmjerene vrijednost sila rezanja u pravcu koordinatnih osa i defleksije alata u pravcu x-ose

R. b.	Tvrd. obrat. *HRc*	Dubina obrade a_p (μm)	Širina obrade a_e (μm)	Korak po zubu f_z (μm/zub)	Nagib θ = 0°				Nagib θ = 20°			
					F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	δ_x (μm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	δ_x (μm)
1	45	5	8	5	0.10	0.10	2.20	1.8	0.10	0.10	0.10	1.6
2	45	10	16	15	1.05	1.31	7.80	12.9	1.01	1.24	2.61	6.1
3	45	15	22	10	1.39	1.47	12.60	19.6	1.31	1.35	4.72	9.4
4	54	5	16	10	0.41	0.39	6.10	6.5	0.38	0.38	0.65	4.5
5	54	10	22	5	0.73	0.65	10.90	12.2	0.65	0.61	1.32	6.0
6	54	15	8	15	1.28	1.51	8.30	15.2	1.19	1.49	2.33	8.3
7	63	5	22	15	0.97	1.02	9.50	18.8	0.94	1.10	2.31	7.9
8	63	10	8	10	0.61	0.60	7.80	10.7	0.57	0.71	0.98	7.0
9	63	15	16	5	1.19	1.03	13.80	19.1	1.08	1.10	2.11	10.2

Vrijednosti izmjerenih sila rezanja, za svih devet eksperimentalnih mjerenja, prikazane su na slikama 5.31 (θ = 0°), odnosno 5.32 (θ = 45°). Analizom izmjerenih vrijednosti sila rezanja može se zaključiti da sile rezanja rastu sa porastom dubine i širine rezanja, koraka po zubu, te tvrdoće materijala obratka. Prilikom obrade, izmjerene su relativno velike vrijednosti sile rezanja u pravcu z-ose. Razlika između vrijednosti sile rezanja F_z i sila rezanja F_x i F_y, izraženija je prilikom obrade ravne površine (θ = 0°). U tom slučaju, sila rezanja F_z je imala mnogo veću vrijednost u poređenju sa druge dvije sile rezanja. Pri većim vrijednostima sila rezanja, naročito sile rezanja F_z dobila se veća defleksija alata. Razlog tome leži u činjenici da se zona obrade prilikom obrade ravne površine nalazi blizu ose mikroglodala.



Slika 5.31. Vrijednosti izmjerenih sila rezanja pri različitim vrijednostima ulaznih parametara (nagib 0°)



Slika 5.32. Vrijednosti izmjerenih sila rezanja pri različitim vrijednostima ulaznih parametara (nagib 45°)

Na osnovu izmjerenih vrijednosti sila rezanja, koje su date u tabeli 5.13, te prema ranije predloženim modelima za proračun ortogonalnih sila rezanja (obrasci 3.51, 3.52 i 3.53), izvršena je ANOVA analiza i procjena signifikantnosti ulaznih parametara. U tabelama 5.17 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 i 5.22 su prikazani podaci iz ANOVA analize za svaku od tri ortogonalne sile rezanja i to za dva ugla nagiba obrađivane površine (θ = 0° i θ = 45°)

Tabela 5.17. Analiza varijanse za model sile rezanja F_x za nagib obrađivane površine 0°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	5.45	1.36	180.35	< 0.0001
Tvrdoća obratka *HRc*	0.42	0.42	55.19	0.0018
Dubina obrade a_p (μm)	2.68	2.68	355.16	< 0.0001
Širina obrade a_e (μm)	1.15	1.15	152.17	0.0002
Korak po zubu f_z (μm/zub)	1.20	1.20	158.88	0.0002
OSTATAK	0.030	7.555E-003		
UKUPNO	5.48			

Tabela 5.18. Analiza varijanse za model sile rezanja F_y za nagib obrađivane površine 0°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	9.04	2.26	108.65	0.0002
Tvrdoća obratka *HRc*	0.60	0.60	28.95	0.0058
Dubina obrade a_p (μm)	3.91	3.91	187.77	0.0002
Širina obrade a_e (μm)	1.73	1.73	83.18	0.0008
Korak po zubu f_z (μm/zub)	2.80	2.80	134.72	0.0003
OSTATAK	0.083	0.021		
UKUPNO	9.13			

Tabela 5.19. Analiza varijanse za model sile rezanja F_z za nagib obrađivane površine 0°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	2.36	0.59	167.93	0.0001
Tvrdoća obratka *HRc*	0.41	0.41	115.74	0.0004
Dubina obrade a_p (μm)	1.02	1.02	290.89	< 0.0001
Širina obrade a_e (μm)	0.86	0.86	244.26	< 0.0001
Korak po zubu f_z (μm/zub)	0.073	0.073	20.81	0.0103
OSTATAK	0.014	3.508E-003		
UKUPNO	2.37			

Tabela 5.20. Analiza varijanse za model sile rezanja F_x za nagib obrađivane površine 45°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	8.23	2.06	149.30	0.0001
Tvrdoća obratka *HRc*	0.80	0.80	57.92	0.0016
Dubina obrade a_p (μm)	3.57	3.57	258.92	< 0.0001
Širina obrade a_e (μm)	1.83	1.83	132.79	0.0003
Korak po zubu f_z (μm/zub)	2.03	2.03	147.56	0.0003
OSTATAK	0.055	0.014		
UKUPNO	8.29			

Tabela 5.21. Analiza varijanse za model sile rezanja F_y za nagib obrađivane površine 45°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	5.86	1.46	105.90	0.0003
Tvrdoća obratka *HRc*	0.44	0.44	31.97	0.0048
Dubina obrade a_p (μm)	2.70	2.70	195.07	0.0002
Širina obrade a_e (μm)	0.82	0.82	59.65	0.0015
Korak po zubu f_z (μm/zub)	1.89	1.89	136.92	0.0003
OSTATAK	0.055	0.014		
UKUPNO	5.91			

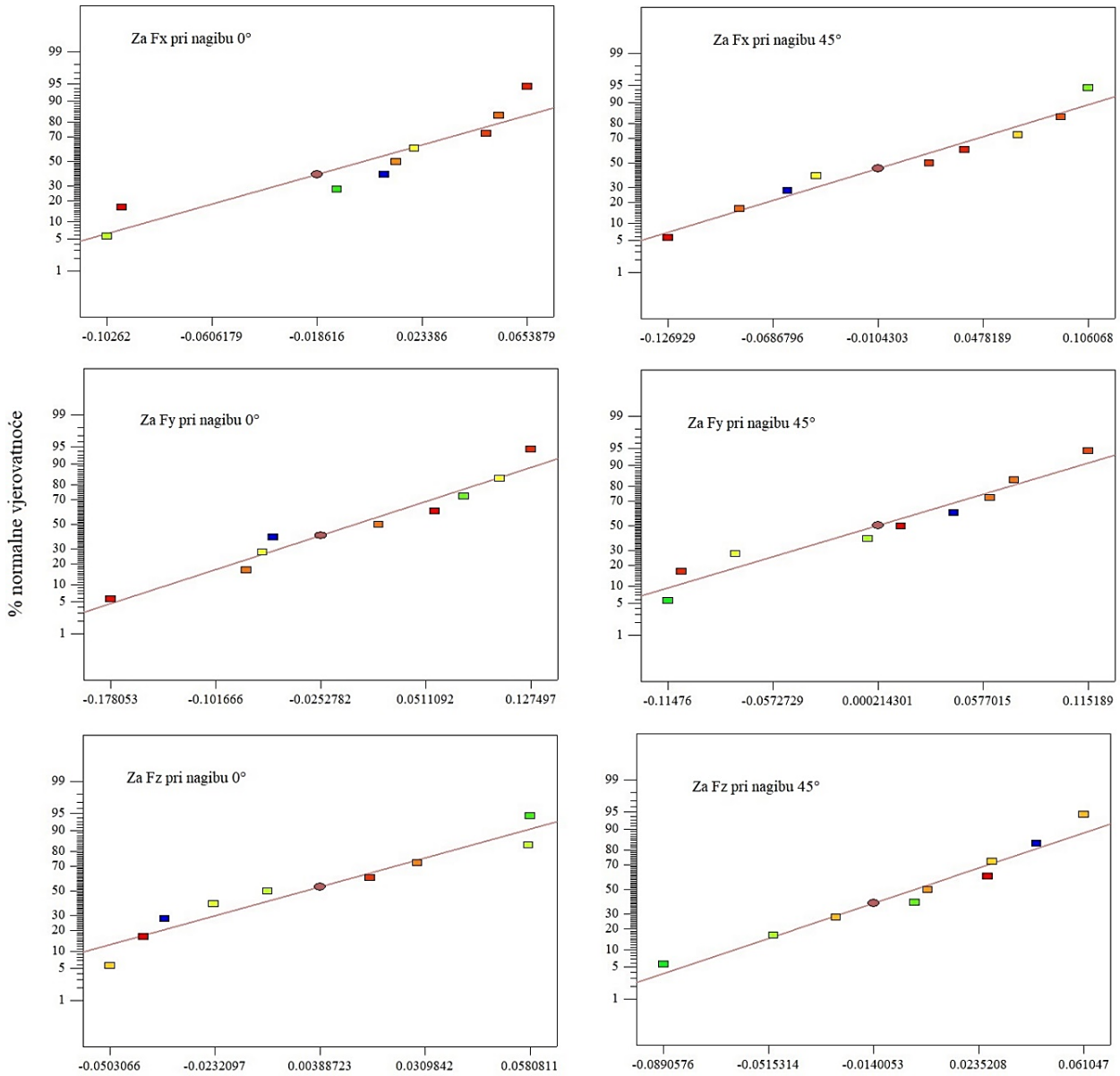
Tabela 5.22. Analiza varijanse za model sile rezanja F_z za nagib obrađivane površine 45°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	10.17	2.54	553.42	< 0.0001
Tvrdoća obratka *HRc*	0.30	0.30	65.39	0.0013
Dubina obrade a_p (μm)	4.31	4.31	938.11	< 0.0001
Širina obrade a_e (μm)	2.96	2.96	644.66	< 0.0001
Korak po zubu f_z (μm/zub)	2.60	2.60	565.51	< 0.0001
OSTATAK	0.018	4.596E-003		
UKUPNO	10.19			

Na osnovu ANOVA analize, F i P-vrijednosti, utvrđena je potpuna signifikantnost ulaznih parametara na izlazne vrijednosti pretpostavljenog model. Shodno tome, predloženi modeli su prihvaćeni kao signifikantni. U tabeli 5.20 su dati pokazatelji poklapanja izmjerenih vrijednosti i vrijednosti dobijenih pretpostavljenim modelom, odnosno koeficijenti regresije i odstupanja vrijednosti. Na slici 5.32 nalaze se dijagrami promjene procenta vjerovatnoće u odnosu na ostatak vrijednosti, kao jednog od pokazatelja adekvatnosti modela. Na osnovu dobijenih pokazatelja predstavljenih u tabeli 5.23 kao i na slici 5.33, predloženi modeli se mogu prihvatiti kao adekvatni.

Tabela 5.23. Poređenje pokazatelja koeficijenata regresije modela sila rezanja

Pokazatelj	F_x za 0°	F_y za 0°	F_z za 0°	F_x za 45°	F_y za45°	F_z za 45°
Standardna devijacija (SD)	0.087	0.14	0.059	0.12	0.12	0.068
Srednja vrijednost ($\bar{x}$)	0.36	0.42	2.07	0.50	0.33	0.27
Odnos *S/N*	42.2	32.5	41.7	38.1	31.4	76.6
Koeficijent R^2	0.98	0.97	0.98	0.97	0.96	0.98
Koeficijent $R^2{}_{Adj.}$	0.97	0.97	0.97	0.95	0.95	0.96
Koeficijent $R^2{}_{Pred.}$	0.96	0.95	0.96	0.94	0.94	0.96



Slika 5.33. Dijagrami pokazatelja adekvatnosti modela sila rezanja

Koeficijenti i eksponenti predloženih adekvatnih modela dobijeni su metodom najmanjih kvadrata. Model za silu rezanja u pravcu x-ose pri obradi površine pod nagibom 0° je:

$$F_{x,0^\circ} = 1.73 \cdot 10^{-6} \cdot HRc^{1.567} \cdot {a_p}^{1.204} \cdot {a_e}^{0.846} \cdot {f_z}^{0.805} \tag{5.10}$$

za silu rezanja u pravcu y-ose pri obradi površine pod nagibom 0° je:

$$F_{y,0^\circ} = 6.25 \cdot 10^{-8} \cdot HRc^{1.884} \cdot {a_p}^{1.453} \cdot {a_e}^{1.038} \cdot {f_z}^{1.230} \tag{5.11}$$

za silu rezanja u pravcu z-ose pri obradi površine pod nagibom 0° je:

$$F_{z,0^\circ} = 3.05 \cdot 10^{-4} \cdot HRc^{1.547} \cdot {a_p}^{0.742} \cdot {a_e}^{0.731} \cdot {f_z}^{0.199} \tag{5.11}$$

za silu rezanja u pravcu x-ose pri obradi površine pod nagibom 45° je:

$$F_{x,45^\circ} = 2.98 \cdot 10^{-8} \cdot HRc^{2.169} \cdot {a_p}^{1.388} \cdot {a_e}^{1.068} \cdot {f_z}^{1.048} \tag{5.12}$$

za silu rezanja u pravcu y-ose pri obradi površine pod nagibom 45° je:

$$F_{y,45^\circ} = 1.32 \cdot 10^{-6} \cdot HRc^{1.614} \cdot {a_p}^{1.207} \cdot {a_e}^{0.717} \cdot {f_z}^{1.011} \tag{5.13}$$

za silu rezanja u pravcu z-ose pri obradi površine pod nagibom 45° je:

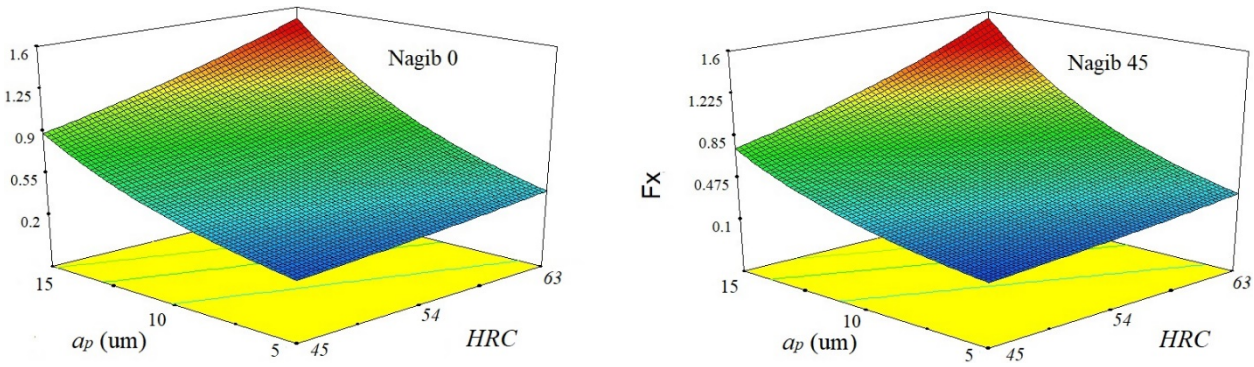
$$F_{z,45^\circ} = 4.57 \cdot 10^{-7} \cdot HRc^{1.331} \cdot {a_p}^{1.526} \cdot {a_e}^{1.359} \cdot {f_z}^{1.185} \tag{5.14}$$

U tabeli 5.24 dato je poređenje izmjerenih vrijednosti ortogonalnih sila rezanja sa odgovarajućim vrijednostima dobijenih na osnovu prethodno datih modela sila rezanja. Na osnovu ovih veličina izračunata je srednja vrijednost apsolutne greške modela sila rezanja. Vrijednost pomenute greške za prethodne modele, počevši od modela datog obrascem 5.10 pa do modela 5.14, redom iznose 5%, 8%, 4%, 8%, 7% i 4%, na osnovu čega se može zaključiti da su predloženi modeli sila rezanja tačni i pouzdani.

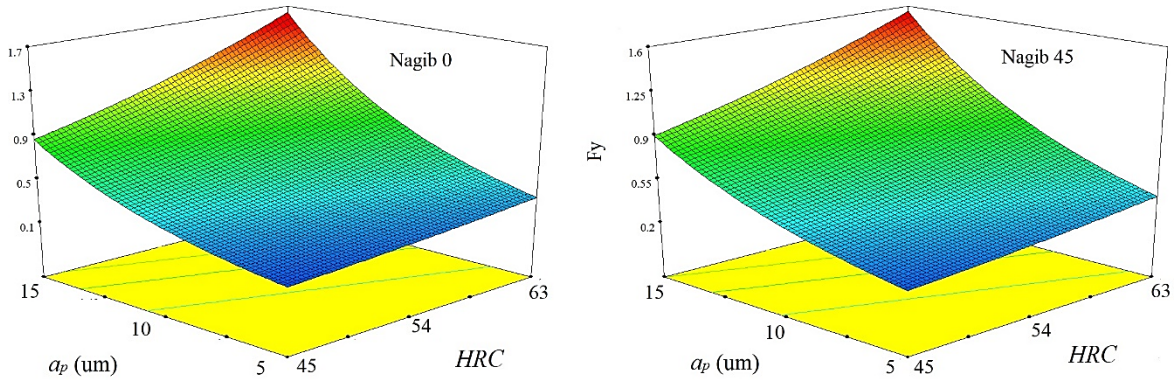
Tabela 5.24. Poređenje izmjerenih vrijednosti sila rezanja i izlaza iz modela sila rezanja

R. b.	Tvrd. obrat. *HRc*	a_p (μm)	a_e (μm)	f_z (μm /zub)	Nagib $\theta°$	Izmjereno			Po modelu			Odstupanja		
						F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	za F_x (N)	za F_y (N)	za F_z (N)
1	45	5	8	5	0	0.10	0.10	2.20	0.10	0.10	2.3	1%	3%	4%
2	45	10	16	15	0	1.05	1.31	7.80	1.00	1.15	7.9	5%	12%	1%
3	45	15	22	10	0	1.39	1.47	12.60	1.53	1.75	12.4	10%	19%	1%
4	54	5	16	10	0	0.41	0.39	6.10	0.41	0.36	5.8	1%	8%	5%
5	54	10	22	5	0	0.73	0.65	10.90	0.72	0.58	10.6	2%	10%	2%
6	54	15	8	15	0	1.28	1.51	8.30	1.20	1.42	8.5	6%	6%	3%
7	63	5	22	15	0	0.97	1.02	9.50	0.96	1.10	10.0	1%	8%	6%
8	63	10	8	10	0	0.61	0.60	7.80	0.68	0.64	7.4	11%	7%	5%
9	63	15	16	5	0	1.19	1.03	13.80	1.13	1.01	14.4	5%	2%	5%
1	45	5	8	5	45	0.10	0.10	2.20	0.09	0.10	0.10	11%	3%	4%
2	45	10	16	15	45	1.05	1.31	7.80	0.93	1.12	2.61	8%	10%	0%
3	45	15	22	10	45	1.39	1.47	12.6	1.49	1.52	4.62	14%	13%	2%
4	54	5	16	10	45	0.41	0.39	6.10	0.34	0.43	0.71	10%	13%	10%
5	54	10	22	5	45	0.73	0.65	10.9	0.61	0.62	1.39	6%	2%	6%
6	54	15	8	15	45	1.28	1.51	8.30	1.15	1.49	2.41	3%	0%	3%
7	63	5	22	15	45	0.97	1.02	9.50	1.03	1.05	2.19	10%	5%	5%
8	63	10	8	10	45	0.61	0.60	7.80	0.60	0.78	0.98	5%	9%	0%
9	63	15	16	5	45	1.19	1.03	13.8	1.07	1.03	2.06	1%	6%	2%

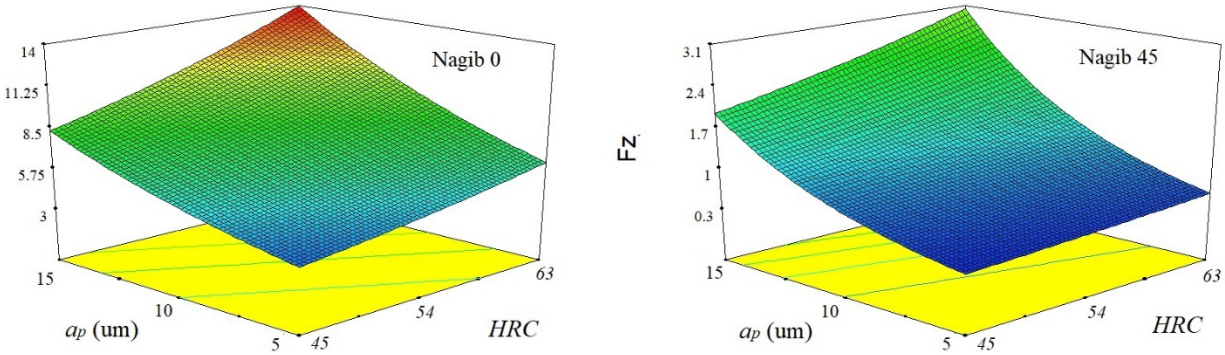
Na slici 5.34 su dijagramski dati odzivi razvijenih modela sile rezanja u pravcu x-ose, za nagib 0°. Na slikama 5.35 i 5.36 su prikazani odzivi za sile rezanja u pravcu y-ose i z-ose, respektivno. Analizom odzivnih površina može se utvrditi eksponencijalna zavisnost sila rezanja od ulaznih parametara. Prema datim slikama, može se utvrditi da tvrdoća materijala obratka ima relativno veći uticaj na vrijednost sile rezanja F_z u odnosu na uticaj na sile rezanja F_x i F_y. Uticaj tvrdoće materijala na vrijednost sila rezanja je približno linearna. Vrijednost sila rezanja se eksponencionalno povećava sa porastom vrijednosti dubine obrade. Naprijed navedene konstatacije su u skladu sa teoretskim zaključcima i rezultatima prethodnih istraživanja.



Slika 5.34. Odziv modela sile rezanja u pravcu x-ose (a_e = 16 µm, f_z = 10 µm/zubu)

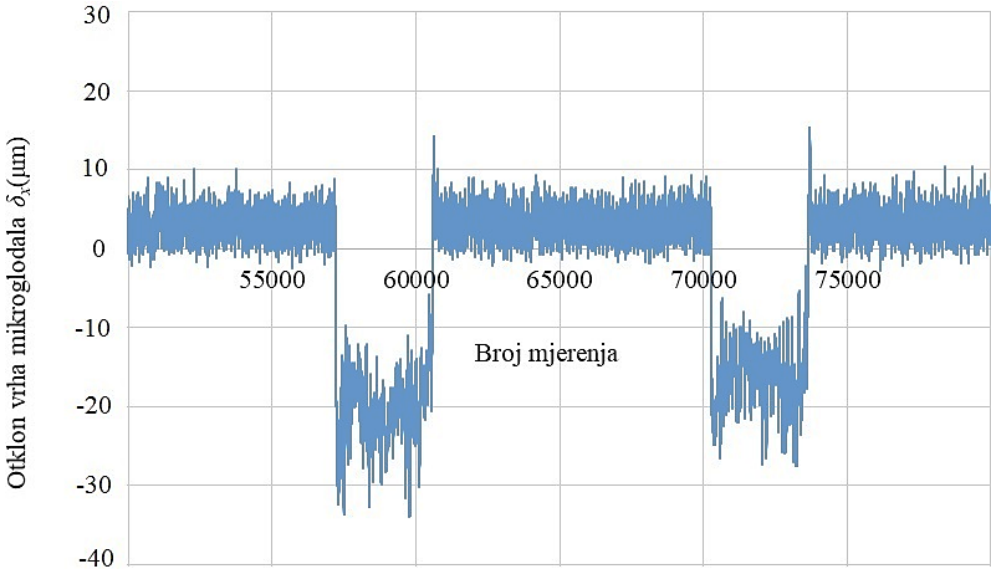


Slika 5.35. Odziv modela sile rezanja u pravcu y-ose (a_e = 16 µm, f_z = 10 µm/zubu)



Slika 5.36. Odziv modela sile rezanja u pravcu z-ose (a_e = 16 µm, f_z = 10 µm/zubu)

U svrhu utvrđivanja uticaja tehnoloških parametara i svojstava obratka na tačnost obrade, odnosno na odstupanje putanje vrha alata u odnosu na zadatu putanju, izvršeno je mjerenje defleksije alata. Defleksija alata je mjerena prema planu eksperimenta, datom u poglavlju 4.3 ovog rada. Na slici 5.36 prikazana je primjer izmjerenog signala defleksije alata na kojem uočavaju dva karakteristična područja porasta praćenog signala. Razlog postepenog porasta vrijednosti signala je zauzimanje novog prolaza mikroglodala. Defleksija vrha mikroglodala je bila znatno niža prilikom prvog prolaza mikroglodala, da bi pomjeranjem glodala u stranu u kojoj se mjeri defleksija je došla na ustaljeni nivo signala. Razlog toga je mala krutost alata, pa alat ne može da zahvati nominalnu debljinu strugotine u prvim prolazima.



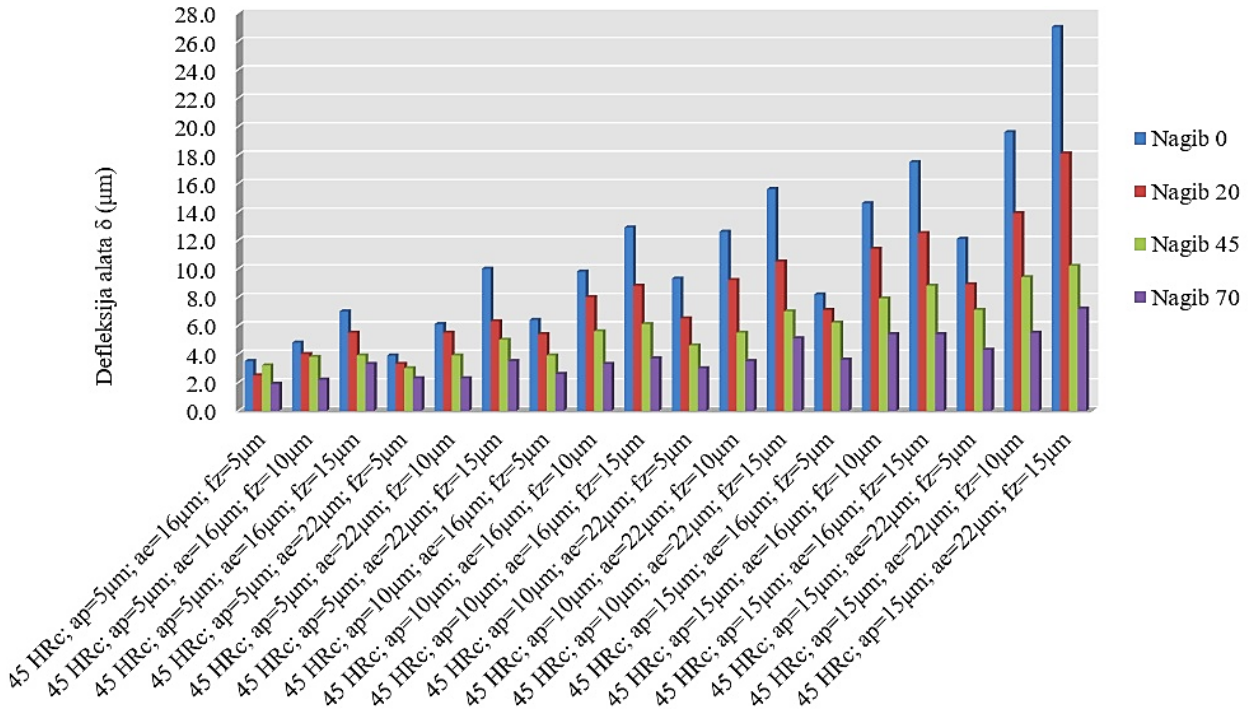
Slika 5.36. Izmjereni signal defleksije alata u ustaljenom režimu obrade

U tabeli 5.25. date su vrijednosti izmjerene vrijednosti otklona mikroglodala za različite kombinacije ulaznih parametara. Date vrijednosti predstavljaju srednje vrijednosti izmjerenog signala defleksije, u trenucima ustaljenog signala. Izmjerene vrijednosti uključuju uticaj tvrdoće materijala, dubine obrade, širine obrade i koraka po zubu. Defleksija alata je nezavisno mjerena za različite nagibe obrađivane površine.

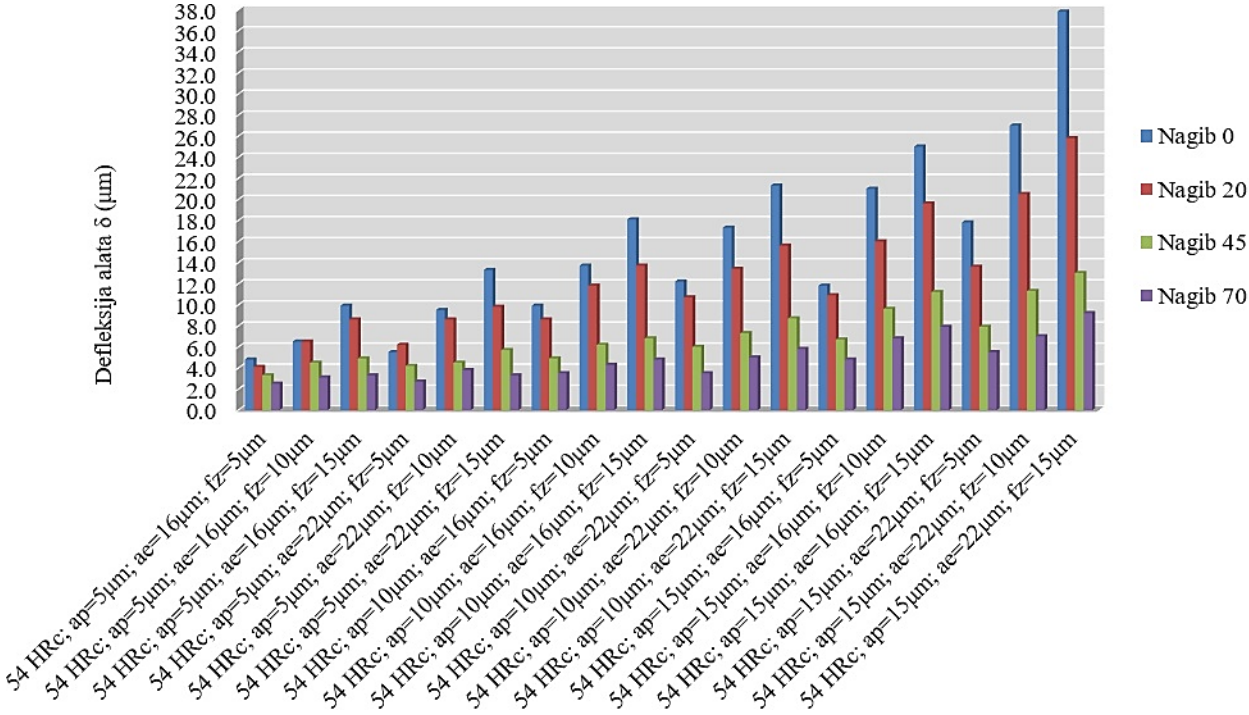
Na slikama 5.37, 5.38 i 5.39 prikazani su histogrami promjene vrijednosti defleksije za različite kombinacije ulaznih parametara, i to za tvrdoću materijala obratka 45 HRc, 54 HRc i 63 HRc, respektivno. Analizom dijagrama, može se zaključiti da defleksija raste sa povećanjem tvrdoće materijala, dubine obrade, koraka po zubu i širine obrade. Ovo povećanje je uzrokovano povećanjem površine sloja zahvaćene strugotine, čiji je porast direktna posljedica porasta dubine i širine obrade, te koraka po zubu.

Tabela 5.25. Izmjerene vrijednost defleksije mikroglodala

Rb	Tvrdoća obratka HRc	Dubina obrade a_p (μm)	Širina obrade a_e (μm)	Korak po zubu f_z (μm/zub)	Otklon mikroglodala			
					0°	20°	45°	70°
1	45	5	16	5	3.5	2.5	3.2	1.9
2	45	5	16	10	4.8	4.0	3.8	2.2
3	45	5	16	15	7.0	5.5	3.9	3.3
4	45	5	22	5	3.9	3.3	3.0	2.3
5	45	5	22	10	6.1	5.5	3.9	2.3
6	45	5	22	15	10.0	6.3	5.0	3.5
7	45	10	16	5	6.4	5.4	3.9	2.6
8	45	10	16	10	9.8	8.0	5.6	3.3
9	45	10	16	15	12.9	8.8	6.1	3.7
10	45	10	22	5	9.3	6.5	4.6	3.0
11	45	10	22	10	12.6	9.2	5.5	3.5
12	45	10	22	15	15.6	10.5	7.0	5.1
13	45	15	16	5	8.2	7.1	6.2	3.6
14	45	15	16	10	14.6	11.4	7.9	5.4
15	45	15	16	15	17.5	12.5	8.8	5.4
16	45	15	22	5	12.1	8.9	7.1	4.3
17	45	15	22	10	19.6	13.9	9.4	5.5
18	45	15	22	15	27.0	18.1	10.2	7.2
19	54	5	16	5	4.8	4.1	3.3	2.5
20	54	5	16	10	6.5	6.5	4.5	3.1
21	54	5	16	15	9.9	8.6	4.9	3.3
22	54	5	22	5	5.5	6.2	4.2	2.7
23	54	5	22	10	9.5	8.6	4.5	3.8
24	54	5	22	15	13.3	9.8	5.7	3.3
25	54	10	16	5	9.9	8.6	4.9	3.5
26	54	10	16	10	13.7	11.8	6.2	4.3
27	54	10	16	15	18.1	13.7	6.8	4.8
28	54	10	22	5	12.2	10.7	6.0	3.5
29	54	10	22	10	17.3	13.4	7.3	5.0
30	54	10	22	15	21.3	15.6	8.7	5.8
31	54	15	16	5	11.8	10.9	6.7	4.8
32	54	15	16	10	21.0	16.0	9.6	6.8
33	54	15	16	15	25.0	19.6	11.2	7.9
34	54	15	22	5	17.8	13.6	7.9	5.5
35	54	15	22	10	27.0	20.5	11.3	7.0
36	54	15	22	15	37.8	25.8	13.0	9.2
37	63	5	16	5	6.3	5.6	4.9	3.7
38	63	5	16	10	8.6	8.5	6.4	5.3
39	63	5	16	15	13.7	11.4	7.3	5.8
40	63	5	22	5	7.8	7.6	5.5	4.3
41	63	5	22	10	12.5	10.9	6.9	5.4
42	63	5	22	15	18.8	13.7	7.9	6.1
43	63	10	16	5	13.1	11.1	7.2	5.4
44	63	10	16	10	19.5	15.9	9.3	7.3
45	63	10	16	15	25.1	18.4	10.0	7.5
46	63	10	22	5	17.2	14.0	8.2	6.4
47	63	10	22	10	23.9	18.1	10.0	7.5
48	63	10	22	15	30.2	22.0	12.2	9.2
49	63	15	16	5	16.0	14.8	10.2	7.4
50	63	15	16	10	28.7	22.6	13.6	10.2
51	63	15	16	15	34.9	26.4	15.2	11.8
52	63	15	22	5	24.0	18.9	11.8	8.8
53	63	15	22	10	37.9	28.1	15.7	11.2
54	63	15	22	15	53.4	36.4	18.9	14.0



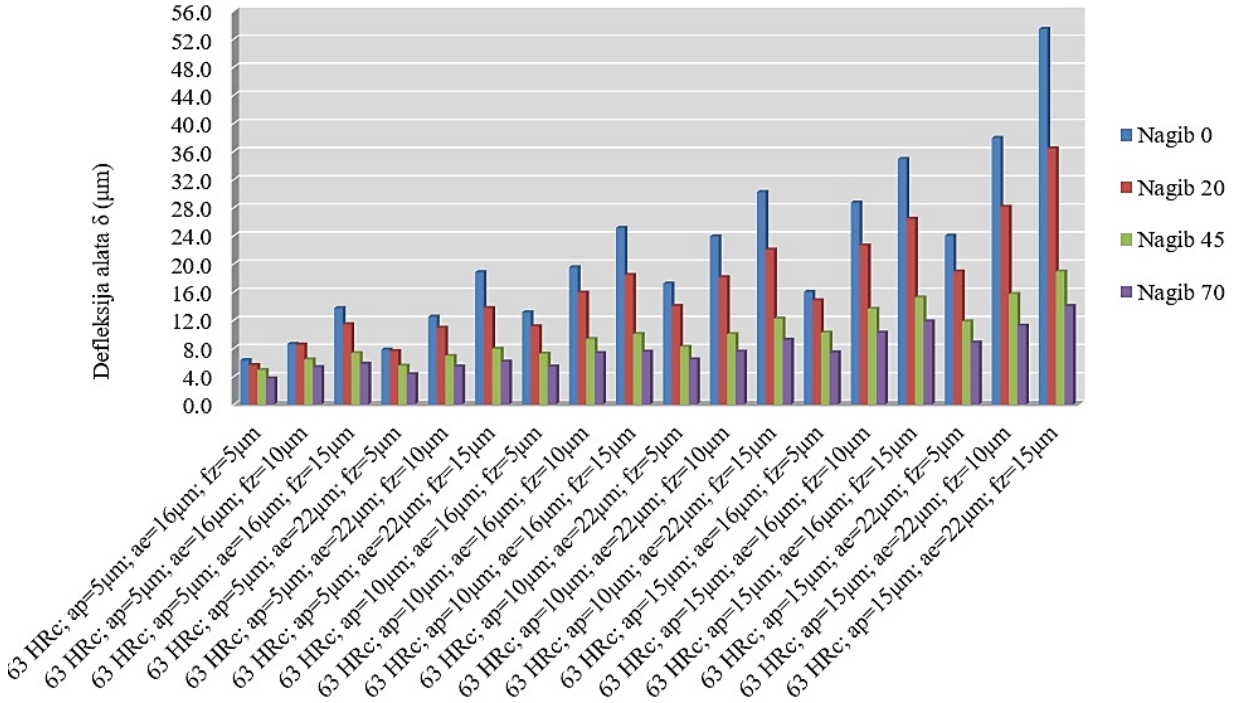
Slika 5.37. Promjena defleksije mikroglodala sa promjenom ulaznih parametara (45 HRc)



Slika 5.38. Promjena defleksije mikroglodala sa promjenom ulaznih parametara (54 HRc)

Daljom analizom rezultata predstavljenih na slikama 5.37, 5.38 i 5.39 može se zaključiti da vrijednost defleksije opada sa porastom nagiba obrađene površine. Ova promjena je intenzivnija pri radu sa većim vrijednostima ulaznih parametara. Ova pojava se može objasniti geometrijom dodira između mikroglodala i obratka. Naime, pri manjim vrijednostima nagiba, režući sloj se nalazi više ispod mikroglodala, te se javlja intenzivno gnječenje materijala i veće vrijednosti sile rezanja u pravcu vertikalne *z*-ose alata. Tome u prilog ide i činjenica, da se analizom prikazanih

dijagrama, uočava veća razlika u vrijednosti defleksije mikroglodala između nagiba obrađivane površine od 20° i 45°.



Slika 5.39. Promjena defleksije mikroglodala sa promjenom ulaznih parametara (63 HRc)

U cilju utvrđivanja stepena uticaja pojedinih ulaznih parametara, na osnovu izmjerenih rezultata i softverski predloženog modela defleksije alata, izvršena je analiza varijanse. Vrijednosti ulaznih parametara kao i predloženi model defleksije su linearzovani, u cilju dobijanja regresione funkcije prilagođene metodi najmanjih kvadrata. Za razmatrane nagibe obrađivane površine, i to 0°, 20°, 45° i 70°, pokazatelji analize varijanse su dati u tabelama 5.26, 5.27, 5.28 i 5.29, respektivno.

Tabela 5.26. Analiza varijanse za model defleksije mikroglodala pri nagibu 0°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	19.94	4.99	912.62	< 0.0001
Tvrdoća obratka *HRc*	3.95	3.95	723.35	< 0.0001
Širina obrade a_e (µm)	10.05	10.05	1839.25	< 0.0001
Širina obrade a_e (µm)	1.13	1.13	206.36	< 0.0001
Korak po zubu f_z (µm/zub)	4.82	4.82	881.54	< 0.0001
OSTATAK	0.27	5.463E-003		
UKUPNO	20.21			

Tabela 5.27. Analiza varijanse za model defleksije mikroglodala pri nagibu 20°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	16.74	4.19	1028.95	< 0.0001
Tvrdoća obratka *HRc*	4.91	4.91	1207.02	< 0.0001
Širina obrade a_e (μm)	8.00	8.00	1966.42	< 0.0001
Širina obrade a_e (μm)	0.70	0.70	171.28	< 0.0001
Korak po zubu f_z (μm/zub)	3.14	3.14	771.10	< 0.0001
OSTATAK	0.20	4.067E-003		
UKUPNO	16.94			

Tabela 5.28. Analiza varijanse za model defleksije mikroglodala pri nagibu 45°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	9.56	2.39	277.06	< 0.0001
Tvrdoća obratka *HRc*	2.60	2.60	301.08	< 0.0001
Širina obrade a_e (μm)	5.30	5.30	614.40	< 0.0001
Širina obrade a_e (μm)	0.24	0.24	28.00	< 0.0001
Korak po zubu f_z (μm/zub)	1.42	1.42	164.78	< 0.0001
OSTATAK	0.42	8.626E-003		
UKUPNO	9.98			

Tabela 5.29. Analiza varijanse za model defleksije mikroglodala pri nagibu 70°

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P - vrijednost
Model	10.89	2.72	195.29	< 0.0001
Tvrdoća obratka *HRc*	4.39	4.39	315.19	< 0.0001
Širina obrade a_e (μm)	4.71	4.71	337.76	< 0.0001
Širina obrade a_e (μm)	0.20	0.20	14.45	0.0004
Korak po zubu f_z (μm/zub)	1.59	1.59	113.77	< 0.0001
OSTATAK	0.68	0.014		
UKUPNO	11.57			

Prema vrijednostima dobijenim analizom varijanse, može se potvrditi potpuna signifikantnost ulaznih parametara na vrijednost defleksije mikroglodala. Prema dobijenim p-vrijednostima, širina obrade ima nešto manji uticaj ima prilikom obrade površine sa nagibom 70°. Razlog manjeg uticaja je odnos geometrijskih vrijednosti površine pod nagibom, geometrije zahvaćenog sloja materijala obratka i vrijednosti defleksije alata. Na osnovu prezentovanih pokazatelja, može se zaključiti da su svi ulazni parametri signifikantni . U skladu sa tim, u nastavku su predstavljeni regresioni modeli defleksije alata u funkciji od tehnoloških parametara obrade i tvrdoće materijala, te za različite nagibe obrađivanje površine i to, za nagib od 0°:

$$\delta_{x,0^\circ} = 9.37 \cdot 10^{-6} \cdot HRc^{2.005} \cdot {a_p}^{0.950} \cdot {a_e}^{0.903} \cdot {f_z}^{0.663} \tag{5.15}$$

za nagib 20°:

$$\delta_{x,20°} = 8.76 \cdot 10^{-6} \cdot HRc^{2.235} \cdot {a_p}^{0.848} \cdot {a_e}^{0.710} \cdot {f_z}^{0.535} \tag{5.16}$$

za nagib 45°:

$$\delta_{x,45°} = 3.13 \cdot 10^{-4} \cdot HRc^{1.626} \cdot {a_p}^{0.690} \cdot {a_e}^{0.418} \cdot {f_z}^{0.360} \tag{5.17}$$

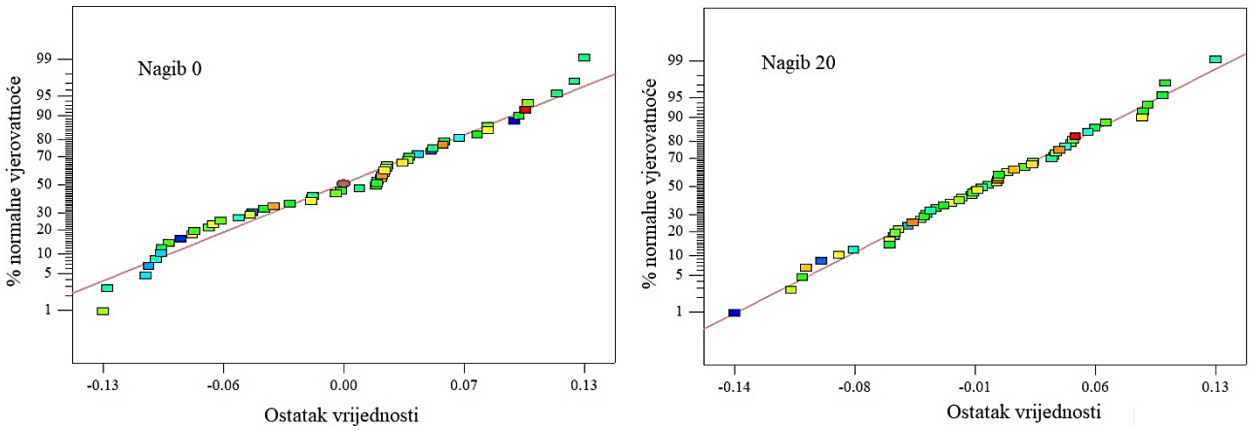
za nagib 70°:

$$\delta_{x,70°} = 3.62 \cdot 10^{-5} \cdot HRc^{2.114} \cdot {a_p}^{0.650} \cdot {a_e}^{0.382} \cdot {f_z}^{0.381} \tag{5.18}$$

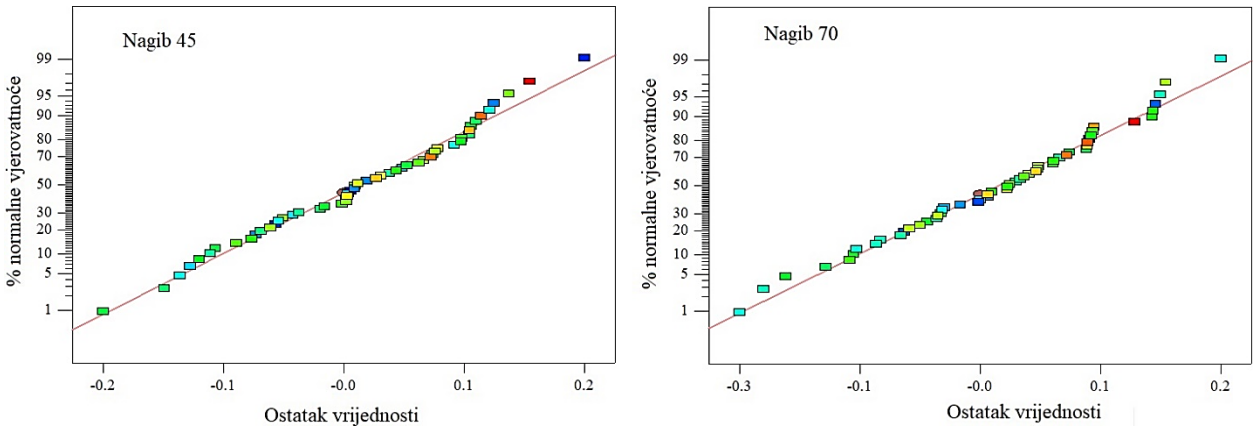
U tabeli 5.30 su dati pokazatelji adekvatnosti predloženih regresionih modela za različite nagibe obrađivane površine. Analizom prikazanih vrijednosti, može se zaključiti da su modeli za sve analizirane uslove adekvatni. Nadalje, može se primjetiti opadanje koeficijenta regresije sa porastom nagiba obrađivane površine, odnosno blago smanjenje tačnosti datih modela. Razlog tome je veća razbacanost izmjerenih vrijednosti. Na slici 5.40 i 5.41, su prikazani dijagrami statističkih pokazatelja za rezultate modeliranja defleksije pri različitim nagibima obrađivane površine.

Tabela 5.30. Poređenje pokazatelja koeficijenata regresije modela defleksije mikroglodala za različite nagibe obrađivane površine

Pokazatelj	δ_x za nagib 0°	δ_x za nagib 20°	δ_x za nagib 45°	δ_x za nagib 70°
Standardna devijacija (SD)	0.074	0.064	0.093	0.12
Srednja vrijednost ($\bar{x}$)	2.61	2.38	1.94	1.58
Odnos *S/N*	73.1	67.8	64.4	54.3
Koeficijent R^2	0.99	0.98	0.96	0.94
Koeficijent ${R^2}_{Adj.}$	0.99	0.98	0.95	0.94
Koeficijent ${R^2}_{Pred.}$	0.98	0.98	0.95	0.93

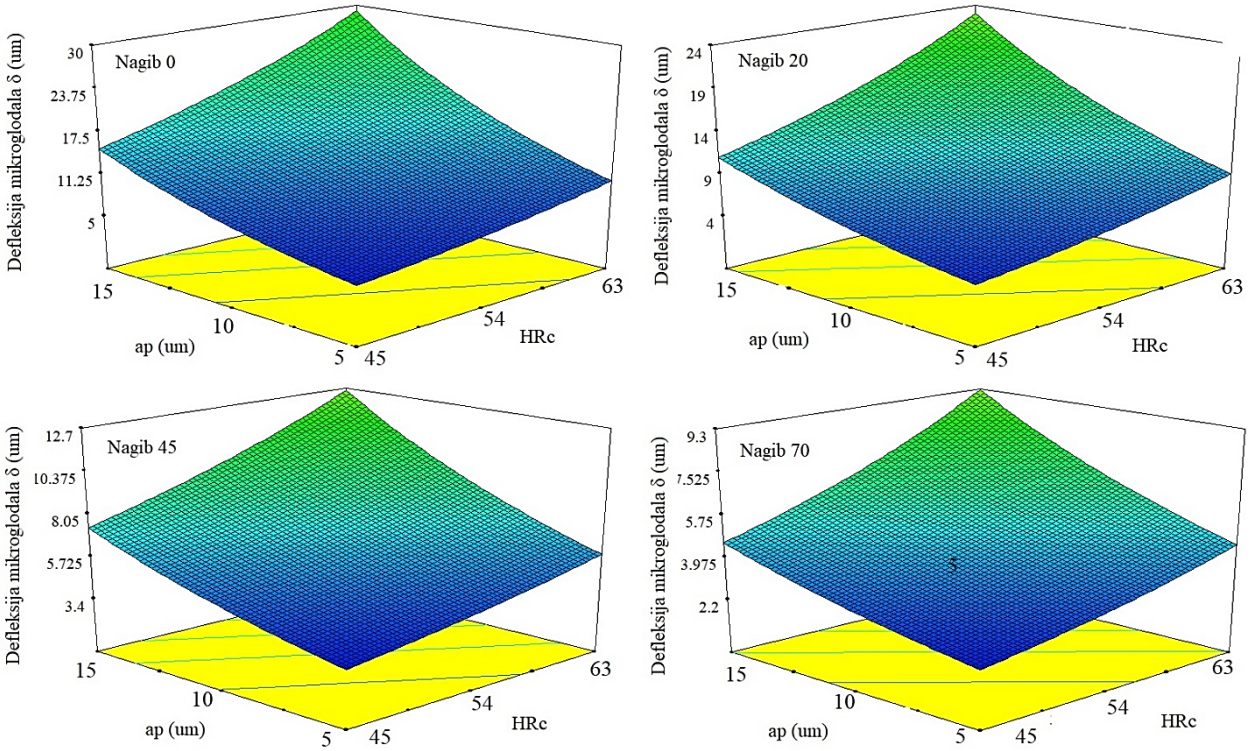


Slika 5.40. Dijagram statističkih pokazatelja adekvatnosti modela defleksije za nagib 0° i 20°



Slika 5.41. Dijagram statističkih pokazatelja adekvatnosti modela defleksije za nagib 45° i 70°

Odzivi modela defleksije mikroglodala za različite nagibe, u zavisnosti od najuticajnijih varijabli, odnosno tvrdoće materijala obratka i dubine obrade, pokazani su na slici 5.42. Dijagramima je jasno pokazana eksponencijalna promjena vrijednosti defleksije u zavisnosti od pomenutih ulaznih parametara.



Slika 5.42. Odziv modela defleksije mikroglodala za različite vrijednosti ulaznih parametara i različite vrijednosti nagiba obrađene površine

U tabeli 5.31 dato je poređenje izmjerenih vrijednosti defleksije mikroglodala sa odgovarajućim vrijednostima dobijenih na osnovu prethodno datih modela defleksije mikroglodala. Na osnovu ovih veličina izračunata je srednja vrijednost apsolutne greške modela sila rezanja. Vrijednost pomenute greške za prethodne modele, počevši od modela datog obrascem 5.15 pa do modela 5.18, redom iznose 6%, 7%, 5% i 8%, na osnovu čega se može zaključiti da su predloženi modeli sila rezanja tačni i pouzdani.

Tabela 5.31. Izmjerene vrijednost defleksije mikroglodala i vrijednosti dobijene modelom

Rb	HRc	a_p (μm)	a_e (μm)	f_z (μm/zub)	Izmjereno za				Prema modelu				Odstupanje			
					0°	20°	45°	70°	0°	20°	45°	70°	0°	20°	45°	70°
1	45	5	16	5	3.5	2.5	3.2	1.9	3.2	2.9	2.6	1.7	9%	15%	18%	10%
2	45	5	16	10	4.8	4.0	3.8	2.2	5.0	4.2	3.4	2.2	5%	4%	11%	2%
3	45	5	16	15	7.0	5.5	3.9	3.3	6.6	5.2	3.9	2.6	6%	6%	0%	21%
4	45	5	22	5	3.9	3.3	3.0	2.3	4.2	3.6	3.0	1.9	8%	9%	0%	16%
5	45	5	22	10	6.1	5.5	3.9	2.3	6.7	5.2	3.9	2.5	10%	5%	1%	10%
6	45	5	22	15	10.0	6.3	5.0	3.5	8.8	6.5	4.5	2.9	12%	3%	11%	16%
7	45	10	16	5	6.4	5.4	3.9	2.6	6.1	5.2	4.3	2.7	4%	4%	9%	3%
8	45	10	16	10	9.8	8.0	5.6	3.3	9.7	7.5	5.5	3.5	1%	6%	3%	6%
9	45	10	16	15	12.9	8.8	6.1	3.7	12.7	9.3	6.3	4.1	2%	6%	4%	11%
10	45	10	22	5	9.3	6.5	4.6	3.0	8.2	6.5	4.9	3.0	12%	0%	6%	1%
11	45	10	22	10	12.6	9.2	5.5	3.5	12.9	9.4	6.2	4.0	3%	2%	13%	13%
12	45	10	22	15	15.6	10.5	7.0	5.1	16.9	11.7	7.2	4.6	8%	11%	3%	9%
13	45	15	16	5	8.2	7.1	6.2	3.6	9.0	7.3	5.6	3.5	10%	3%	9%	3%
14	45	15	16	10	14.6	11.4	7.9	5.4	14.3	10.6	7.2	4.6	2%	7%	9%	16%
15	45	15	16	15	17.5	12.5	8.8	5.4	18.7	13.1	8.4	5.3	7%	5%	5%	1%
16	45	15	22	5	12.1	8.9	7.1	4.3	12.0	9.2	6.4	4.0	1%	3%	9%	8%
17	45	15	22	10	19.6	13.9	9.4	5.5	19.0	13.3	8.2	5.2	3%	5%	12%	6%
18	45	15	22	15	27.0	18.1	10.2	7.2	24.9	16.5	9.5	6.0	8%	9%	6%	17%
19	54	5	16	5	4.8	4.1	3.3	2.5	4.6	4.3	3.5	2.5	5%	5%	7%	1%
20	54	5	16	10	6.5	6.5	4.5	3.1	7.2	6.3	4.6	3.3	11%	4%	1%	6%
21	54	5	16	15	9.9	8.6	4.9	3.3	9.5	7.8	5.3	3.8	4%	9%	7%	16%
22	54	5	22	5	5.5	6.2	4.2	2.7	6.1	5.4	4.1	2.8	11%	13%	4%	5%
23	54	5	22	10	9.5	8.6	4.5	3.8	9.6	7.9	5.2	3.7	2%	9%	16%	2%
24	54	5	22	15	13.3	9.8	5.7	3.3	12.6	9.8	6.0	4.3	5%	0%	6%	31%
25	54	10	16	5	9.9	8.6	4.9	3.5	8.8	7.8	5.7	4.0	11%	9%	17%	13%
26	54	10	16	10	13.7	11.8	6.2	4.3	14.0	11.3	7.3	5.2	2%	4%	18%	20%
27	54	10	16	15	18.1	13.7	6.8	4.8	18.3	14.0	8.5	6.0	1%	2%	25%	25%
28	54	10	22	5	12.2	10.7	6.0	3.5	11.8	9.8	6.5	4.5	4%	9%	9%	28%
29	54	10	22	10	17.3	13.4	7.3	5.0	18.6	14.1	8.4	5.8	8%	6%	15%	16%
30	54	10	22	15	21.3	15.6	8.7	5.8	24.4	17.6	9.7	6.8	14%	13%	12%	17%
31	54	15	16	5	11.8	10.9	6.7	4.8	13.0	11.0	7.6	5.1	10%	1%	13%	7%
32	54	15	16	10	21.0	16.0	9.6	6.8	20.5	15.9	9.7	6.7	2%	1%	1%	1%
33	54	15	16	15	25.0	19.6	11.2	7.9	26.9	19.8	11.2	7.8	8%	1%	0%	1%
34	54	15	22	5	17.8	13.6	7.9	5.5	17.3	13.8	8.6	5.8	3%	1%	9%	6%
35	54	15	22	10	27.0	20.5	11.3	7.0	27.4	19.9	11.1	7.6	1%	3%	2%	8%
36	54	15	22	15	37.8	25.8	13.0	9.2	35.8	24.8	12.8	8.8	5%	4%	1%	4%
37	63	5	16	5	6.3	5.6	4.9	3.7	6.2	6.1	4.6	3.5	1%	9%	7%	6%
38	63	5	16	10	8.6	8.5	6.4	5.3	9.9	8.8	5.8	4.5	15%	4%	9%	14%
39	63	5	16	15	13.7	11.4	7.3	5.8	12.9	11.0	6.8	5.3	6%	4%	7%	8%
40	63	5	22	5	7.8	7.6	5.5	4.3	8.3	7.7	5.2	3.9	6%	1%	5%	8%
41	63	5	22	10	12.5	10.9	6.9	5.4	13.1	11.1	6.7	5.1	5%	2%	3%	5%
42	63	5	22	15	18.8	13.7	7.9	6.1	17.2	13.8	7.7	6.0	9%	1%	2%	2%
43	63	10	16	5	13.1	11.1	7.2	5.4	12.0	11.0	7.3	5.5	8%	1%	2%	1%
44	63	10	16	10	19.5	15.9	9.3	7.3	19.0	15.9	9.4	7.1	2%	0%	1%	2%
45	63	10	16	15	25.1	18.4	10.0	7.5	24.9	19.8	10.9	8.3	1%	7%	9%	11%
46	63	10	22	5	17.2	14.0	8.2	6.4	16.0	13.8	8.4	6.2	7%	2%	2%	3%
47	63	10	22	10	23.9	18.1	10.0	7.5	25.4	20.0	10.8	8.1	6%	10%	8%	7%
48	63	10	22	15	30.2	22.0	12.2	9.2	33.2	24.8	12.5	9.4	10%	13%	2%	2%
49	63	15	16	5	16.0	14.8	10.2	7.4	17.7	15.5	9.7	7.1	10%	5%	5%	4%
50	63	15	16	10	28.7	22.6	13.6	10.2	28.0	22.5	12.5	9.3	2%	1%	8%	9%
51	63	15	16	15	34.9	26.4	15.2	11.8	36.6	27.9	14.4	10.8	5%	6%	5%	8%
52	63	15	22	5	24.0	18.9	11.8	8.8	23.6	19.4	11.1	8.1	2%	3%	6%	8%
53	63	15	22	10	37.9	28.1	15.7	11.2	37.3	28.1	14.3	10.5	2%	0%	9%	6%
54	63	15	22	15	53.4	36.4	18.9	14.0	48.8	35.0	16.5	12.2	9%	4%	13%	13%

Poglavlje 6. ZAKLJUČAK

U ovom poglavlju data su zaključna razmatranja o istraživanjima prezentovanim u prethodnim poglavljima. Zaključna razmatranja baziraju na toku kojim se došlo od definisanog problema istraživanja, analize dosadašnjih istraživanja, uspostave predmeta i cilja istraživanja, preko teoretskih zaključaka i razvoja modela zasnovanih na eksperimentalnim istraživanjima. Na kraju, dati su i pravci budućih istraživanja.

6.1. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Zadnjih godina, zabilježen je ubrzan rast mašinske industrije i razvoj mašinskog inženjerstva, koji su posljedica sve strožijih zahtjeva globalnog tržišta (visoki kvalitet obrade, tačnost dimenzija, brzi rokovi isporuke, itd.). Bilježi se i rast u smislu kombinovanja različitih naučnih i inženjerskih disciplina, tako da je danas nemoguće povući strogu granicu između različitih oblasti mašinskog inženjerstva. Zahtjevi globalnog tržišta se često ogledaju u potražnji za proizvodnjom dijelova složene geometrije, specijalnih svojstava, visoke pouzdanosti, visoke tačnosti i kvaliteta obrade, koji se izrađeni od teškoobradivih materijala i proizvode se u maloserijskoj i serijskoj proizvodnji. U tim okolnostima, veliki procenat razvoja se odvija u smjeru proučavanja i korišćenja visokoproduktivnih, efikasnih i ekonomičnih proizvodnih procesa. Takvi proizvodni procesi zahtijevaju efikasne sisteme upravljanja, zasnovane na nadzoru, ekspertskom znanju, bazama podataka, i sl. Osnovni elementi navedenih sistema su modeli ponašanja procesa. To su najčešće apstraktni deterministički matematički modeli zapisani u formalizovanom obliku, čija je primjena nemoguća bez upotrebe informacionih tehnologija.

Razvoj inženjerskih i naučnih disciplina u mašinskoj industriji, prvenstveno u avioindustriji, autoindustriji i energetici, ali i drugim oblastima kao što su medicina, doveo je do potrebe za proizvodnjom minijaturnih dijelova i komponenata. Time je uslovljen i razvoj proizvodnih procesa namijenjenih njihovoj proizvodnji. Pomenute proizvodne tehnologije se razvijaju u dva pravca, a prema vrsti mikrodijelova, i to: u pravcu razvoja mikrosistemskih tehnologija (namijenjenih proizvodnji MEMS-a, čipova, kola i sl.), i u pravcu razvoja mikroinženjerskih tehnologija (namijenjenih proizvodnji funkcionalnih mikrodijelova, dijelova visoke preciznosti, tehnoloških struktura na makrodijelovima, i sl.). Mikrosistemske i mikroinženjerske tehnologije dijele zajedničke procese obrade. Mikroinženjerske tehnologije su takođe zahvaćene globalnim razvojem mašinske industrije, što za posljedicu ima neophodnost proučavanja pripadajućih procesa obrade, te razvoj efikasnih upravljačkih sistema.

U okviru prezentovanih istraživanja, razmatrana je mogućnost primjene procesa mikroglodanja u proizvodnji mikrodijelova, koji predstavlja proces obrade skidanjem materijala obratka mehaničkim putem. Shodno prethodno opisanom razvoju, ciljna grupa su bili mikrodijelovi složene geometrije, kod kojih se zahtijeva visoka tačnost i kvalitet obrade, izrađeni od teškoobradivih mašinskih materijala. Mikrodijelovi navedenih karakteristika najčešće se

obrađuju laserskom i elektroerozionom obradom, koje prati niz nedostataka u pogledu mogućnosti izrade složene geometrije, tačnosti i kvaliteta, te produktivnosti i ekonomičnosti procesa [184, 185, 186, 187]. Kao reprezentativan materijal za izradu dijelova iz ciljne grupe, zbog svojih izrazito visokih fizičkih i mehaničkih svojstava, korišćen je termički obrađen visoko legirani hrom-molibdenski čelik X155CrMoV12. Ovaj materijal je namijenjen izradi alata za deformisanje u hladnom stanju i funkcionalnih dijelova otpornih na habanje. Kako je fokus stavljen na dijelove sa složenom geometrijom, pomenuti materijal je obrađivan troosnim glodanjem sa vitkim loptastim mikroglodalima, prečnika ispod 1 mm.

Problemi, definisani u okviru disertacije, odnose se na veliku osjetljivost mikroglodala i složeni mehanizam formiranja obrađene površine. Osjetljivost mikroglodala, kao mehaničkog alata se ogleda u njegovoj maloj krutosti i relativno maloj postojanosti. Mala krutost alata direktno utiče na veličinu njegovog otklona uslijed djelovanja otpora rezanja, što za posljedicu ima njegovo odstupanje od zadane putanje i katastrofalan lom. Intenzivno habanje reznog klina mikroglodala dovodi do gubitka njegovih adekvatnih reznih svojstava, koje za posljedicu ima povećanje složenosti mehanizma odvajanja materijala obratka. Složenost pomenutog mehanizma definisana je efektom veličine. Promjena ustaljenog mehanizma odvajanja strugotine za posljedicu ima narušavanje kvaliteta obrade, te smanjenje ekonomičnosti i produktivnosti procesa. Dodatno usložnjavanje procesa formiranja obrađene površine posljedica je složene geometrije zahvata mikroglodala i obratka, koja se javlja prilikom obrade površina pod nagibom.

U svrhu istraživanja mogućnosti prevazilaženja pomenutih problema, izvršena je detaljna analiza prethodnih istraživanja drugih autora. Analiza je pokazala da se mali broj istraživača fokusirao na istraživanje procesa obrade teškoobradivog hrom-molibdenovog čelika, a naročito obrade površina pod nagibom loptastim mikroglodalom, na troosnim visokobrzinskim mašinama alatkama. Pokazalo se da su se istraživači, koji su koristili analitičke i mehanističke pristupe u modeliranju, uglavnom bazirali na obradi strukturno jednostavnih izotropnih materijala, poput aluminijuma i bakra, koje su obrađivali ravnim mikroglodalima na kojima ne postoji vratni dio, čime im je obezbijeđena visoka krutost. Uočen je nedostatak u istraživanju integralnog uticaja parametara obrade i karakteristika materijala obratka na vrijednosti funkcija obradivosti, kao pokazatelja stanja i valjanosti procesa.

Shodno prethodnom, kao cilj i je postavljen razvoj modela mikroglodanja teškoobradivih materijala vitkim loptastim mikroglodalom. Predmet istraživanja je bila formulacija efektivnih parametara obrade i integrisanih adekvatnih modela: habanja reznog klina mikroglodala, hrapavosti obrađene površine, te defleksije mikroglodala uzrokovane otporima rezanja. U svrhu razumijevanja procesa, definisana su i opisana opšta svojstva procesa mikroglodanja koje ono dijeli sa preciznom i makroobradom, koja su se odnosila na kinematiku relativnog kretanja alata u odnosu na obradak odnosno na red vrijednosti parametara obrade i zahtijeva u pogledu tačnosti i kvaliteta obrade. Na osnovu analize dosadašnjih istraživanja, izdvojena su i teoretski opisana svojstva procesa koja karakterišu odvajanje materijala na mikronivou odnosno mikrorezanje, kao i osnovni mehanizam mikroglodanja.

Proces modeliranja mikroglodanja započet je objašnjenjem njegove uopštene procedure i svrhe. Klasifikovane su i pobrojane, te ukratko opisane tehnike modeliranja mikroglodanja, sa pripadajućim osnovama i principima. Nadalje, prezentovan je model mikroglodanja složenih površina vitkim loptastim mikroglodalom. Model se zasniva na definiciji efektivnih geometrijskih i tehnoloških parametara mikroglodanja, kao što su: dubina obrade, širina obrade, debljina i širina strugotine, njihove srednje vrijednosti, te efektivni prečnik, napadni ugao, efektivna brzina rezanja. Za efektivne parametre procesa razvijene su matematičke relacije, koje su se zasnivale na

geometrijskoj analizi u dva koordinatna sistema, i to: koordinatnom sistemu prilagođenom definiciji nominalnih tehnoloških parametara, te koordinatnom sistemu koji odgovara poziciji i orjentaciji mikroglodala toku procesa mikroobrade. Pomenuta dva koordinatna sistema povezana su relacijama koje su se odnosile na transformaciju rotacijom oko y-ose, koja je u oba slučaja imala isti pravac i smjer i predstavljala je pravac kretanja mikroglodala pri obradi. Time se došlo do geometrijskog opisa zahvata materijala obratka reznom ivicom mikroglodala, u obliku definisane prostorne krive K. Ovo rješenje je uslovilo upotrebu numeričkih rješenja složenih integrala, koji su se odnosili na proračun srednjih vrijednosti efektivnih parametara. Minimalna debljina strugotine je modelirana kao funkcionalna zavisnost poluprečnika zaobljenja rezne ivice i tvrdoće obratka, kao jedinstven pristup u njenoj estimaciji.

Razvijeni su modeli funkcija obradivosti, koji se odnose na glavne kriterijume obradivosti. U okviru istraživanja razvijen je model minimalne debljine strugotine, koji se zasniva na eksperimentalnim mjerenjima. Pomenuti model u obzir uzima tvrdoću materijala obratka i poluprečnik zaobljenja rezne ivice mikroglodala. Nadalje, razvijen je model promjene poluprečnika rezne ivice alata uslijed habanja alata, u kojem generišu tvrdoća materijala obratka, brzina obrade i korak po zubu, koji je zavistan od geometrije kontakta razmatran za različite nagibe obrađivane površine. U tu svrhu, predložen je model postojanosti mikroglodala. Razvijeni model za hrapavost obrađene površine uzima u obzir uticaj minimalne debljine strugotine, kao vrlo signifikantnog parametra u mikrorezanju. Shodno tome, predložen je model visine neravnina u 10 tačaka profila talasaste površine formirane obradom, u kojem generišu širina obrade, korak po zubu, brzina obrade i tvrdoća obratka. Otpori rezanja su modelirani preko komponenti razloženih u pravcu ortogonalnih osa koordinatnog sistema obratka, koji se poklapao sa ranije pomenutim koordinatnim sistemom mikroglodala. Kao takve, povezane su sa modelom otpora rezanja definisanim u odnosu na geometriju reznog klina. Pomenuti model uključuje funkcionalne zavisnosti otpora u pravcu vektora brzine rezanja, te pravcu upravnom na formiranu obrađenu površinu. Model defleksije mikroglodala sadrži uticaje tehnoloških parametara obrade, i to: dubine obrade, širine obrade, koraka po zubu, te svojstava obratka: tvrdoće i nagiba obrađivane površine. Svi pomenuti modeli sadrže uticaj minimalne debljine strugotine. Signifikantnost ulaznih parametara u modelima i sama adekvatnost modela potvrđene su opsežnim eksperimentalnim istraživanjima. Svi modeli su predstavljeni eksplicitnim matematičkim funkcijama, što omogućava razvoj podloga za optimizaciju procesa mikroglodanja.

Procedure opsežnih eksperimentalnih istraživanja zasnivale su se na ispitivanju uticaja ulaznih parametara sadržanih u predloženim modelima funkcija obradivosti, na vrijednost odziva procesa. Procedure eksperimentalnih mjerenja su se zasnivale na punim faktornim i Taguchi-jevim ortogonalnim planovima eksperimenta. Većina dimenzionih geometrijskih mjerenja izvršena je beskontaktnim putem korišćenjem optičkog mikroskopa, čije se mjerenje zasniva na automatskoj varijaciji fokusa, te laserskom daljinomjeru, čije se mjerenje zasniva na mjerenju ugla odbijene laserske svjetlosti. Uz veliki broj ponavljanja istih kombinacija u svrhu osrednjavanja vrijednosti i analize njihovog rasipanja, izmjerene vrijednosti su verifikovane dodatnim mjerenjima pomoću industrijskih uređaju za mjerenje. Provedenom analizom na osnovu izmjerenih vrijednosti, data je standardna interpretacija i objašnjenje vezano za dobijene rezultate i uočene fenomene za pojedinačno izvedene eksperimente odnosno kriterijum obradivosti. Koeficijenti i eksponenti predloženih modela funkcija obradivosti izračunati su metodom najmanjih kvadrata, te je za iste provedena analiza varijanse, ocjena signifikantnosti ulaznih parametara, te ocjena adekvatnosti dobijenih modela.

Naučni doprinosi ove disertacije, između ostalog, ogleda se u iscrpnoj eksperimentalnoj analizi i definisanju uzroka uočenih pojava i fenomena u mikroglodanju, kao relativno nove oblasti u proizvodnim tehnologijama. Uspješno je izvršena obrada dijelova složene geometrije odnosno površina pod nagibom, izrađenih od izuzetno teškoobradivog materijala, kakav je termički obrađen hrom-molibdenov čelik. Pri tome je postignuta visoka tačnost i kvalitet obrade, te visoka ekonomičnost i produktivnost procesa. Nadalje, doprinos se ogleda u karakterističnom pristupu u definisanju geometrije zahvata materijala obratka zubom mikroglodala, te implementacija iste u funkcije obradivosti. Razvijeni modeli funkcija obradivosti uzimaju u obzir do sada neistražene uticaje parametra procesa i karakteristika obratka i daju objašnjenje fenomena uočenih u toku obrade, te se mogu koristiti u prediktivnom upravljanju procesom obrade. Pored navedenih naučnih doprinosa, istraživanja imaju i praktičnu primjenu, jer se implementacijom dobijenih rezultata može značajno unaprijediti proces izrade mikrodijelova.

6.2. PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA

Korišćenjem prethodno prezentovanih rezultata istraživanja, potrebno je razviti specijalne baze podataka o obradnom procesu mikroglodanja pogodne korišćenju u realnim industrijskim uslovima, što je jedan od pravaca budućih istraživanja. Pomenute baze bi bile adekvatne za integraciju i korišćenje u savremene CAM programske pakete. Nadalje, plan je da se u okviru pomenutih programskih paketa, razviju specijalne strategije i procedure obrade, sa pripadajućim optimizacionim algoritmima, namijenjene obradi mikrodijelova.

Pravci budućih istraživanja mogu se usmjeriti na primjenu metoda vještačke inteligencije u modeliranju složenih pojava koje prate proces mikroglodanja. Tom prilikom bi se mogao proširiti skup ulaznih parametara, te istražiti uticaj dodatnih parametara i njihovih korelacija sa kriterijumima obradivosti. Bazu ispitivanih materijala obratka bi svakako trebalo proširiti sa predstavnicima drugih grupa materijala, kao što su specijalne legure titanijuma i nikla. Pri tome bi pažnju trebalo usmjeriti ka opisu uticaja karakteristika kristalnih faza u strukturi materijala, uticaja karakteristika međukristalnih faza, neizotropnosti materijala i sl. Tom prilikom bi trebalo izvršiti estimaciju minimalne debljine strugotine, u svrhu definisanja i objašnjenja fenomena vezanih za efekat veličine.

Takođe, predmet budućih istraživanja je istraživanje dinamičke prirode procesa, odnosno uticaj dinamičke prirode mikroglodala na funkcije obradivosti, koje je izuzetno složeno u smislu procedure mjerenja i matematičkog opisa. Geometrija alata, a time i dinamičko ponašanje alata direktno utiču na formiranje obrađene površine odnosno na njenu hrapavost i svojstva površinskog sloja. Kao jedan od ciljeva budućih istraživanja mogu se navesti istraživanja vezana količinu i uticaj generisane toplote na mikroalat, na omekšavanje materijala obratka, i na svojstva površinskog sloja, u prvom redu njegove mikrotvrdoće i zaostalih napona. Uz to, mogla bi se provesti istraživanja o uticaju procesa gnječenja materijala na ista svojstva obratka.

7. LITERATURA

[1] European Commission, European factories of the future research association, (2013). *Factories of the future, multi annual roadmap for the contractual under Horizon 2020*. [Online], dostupno na: http://www.effra.eu/attachments/article, [pristup: 29.01.2016]

[2] Institute for defense analyses, (2012). *Emerging global trends in advanced manufacturing*. [Online], dostupno na: https://www.ida.org/en/STPI/ExploreSTPIResearch.aspx, [pristup: 11.02.2016]

[3] McKinsey Global Institute, (2012). Manufacturing the future: the next era of global growth and innovation. [Online], dostupno na: http://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-future-of-manufacturing, [pristup: 14.02.2016]

[4] US department of Commerce, National Institute of Standard and Technology, (2016). *Sustainable manufacturing – Partners create standard to improve Sustainable Manufacturing*. [Online], dostupno na: https://www.nist.gov/topics/sustainable-manufacturing, [pristup: 21.10.2016]

[5] United States Enviromental Protection Agency, (2015). *Sustainble manufacturing*. [Online], dostupno na: https://www.epa.gov/sustainability/sustainable-manufacturing, [pristup: 21.10.2016]

[6] GTAI – economic development agency of the Federal republic of Germany, (2014). *Industrie 4.0, smart manufaturing for the future*. [Online], dostupno na: https://www.gtai.de/GTAI/Content/EN/Invest/_SharedDocs/Downloads/GTAI/Brochures/Industries/industrie4.0-smart-manufacturing-for-the-future-en.pdf, [pristup: 04.12.2016]

[7] McKinsey Global Institute, (2012). *Industry 4.0 How to navigate digitization of the manufacturing sector*. [Online], dostupno na: http://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/industry-four-point-o-how-to-navigae-the-digitization-of-the-manufacturing-sector, [pristup: 05.12.2016]

[8] W.Grzesik, *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and application*“. Elsevier B. V., Amsterdam, 2008.

[9] P. Davim, *Machining – fudamentals and recent advances*. Springre-Verlag, Berlin, 2008.

[10] G. Byrne, D. Dornfeld, B. Denkena, „Advancing Cutting Technology“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 52, no. 2, pp. 483-507, 2003. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60200-5

[11] E.Trent, P. Wright, *Metal cutting*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.

[12] G.Globočki - Lakić, *Obrada rezanjem – teorija, modeliranje, simulacija*. Mašinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, Banja Luka, 2010.

[13] D. Dornfeld, D.E. Lee, *Precision Manufacturing*. Springre-Verlag, Berlin, 2008.

[14] V. K. Jain, *Introduction to Micromachining*. Alpha Science International, Oxford, 2008.

[15] L. Alting, F. Kimura, H.N. Hansen, G. Bissacco, „Micro Engineering“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 52, no. 2, pp. 483-695, 2003. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60208-X

[16] E. Mounier, C. Troadec, G. Girardin, Y. Charentenay, “Status of the MEMS Industry”, Yole Développement, Lyon, Buisness report, May 2015. https://www.i-micronews.com/

[17] European Commission, Directorate of Industrial technologies, (2009). Downsizing – the march of micro and nano manufacturing. [Online], dostupno na: https://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/downsizing_en.pdf, [pristup: 22.12.2016]

[18] T. Matuzawa, „State of the Art of Micromachining“, *Annals of the CIRP*, vol. 49, no. 2, pp. 473-488, 2000. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63451-9

[19] D. Dornfeld, S. Min, Y. Takeuchi, „Recent Advances in Mechanical Micromachining“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 55, no. 2, pp. 745-768, 2006. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.006

[20] Y. Qin, A. Brockett, Y. Ma, et al. „Micro-manufacturing: research, technology outcomes and development issues“, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 47, no. 9, pp. 821–837, 2010. https://doi.org/10.1007/s00170-009-2411-2

[21] E. Brinksmeier, O. Riemer, R. Stern, „Machining of precision parst and microstructures“, in *Proc. of 10th International Conference on Precision Engineering (ICPE)*, Yokohama, Japan, July 2001, pp. 3-12. https://doi.org/10.1007/0-306-47000-4_1

[22] E. Gentili, L. Tabaglio, F. Aggogeri, „Review on micromachining techniques” in *Proc. of 7th International Conference on Advance Manufacturing Systems and Technology (AMST)*, Udine, Italy, June 2005, pp. 387-396. https://doi.org/10.1007/3-211-38053-1_37

[23] K. Cheng, D. Huo, *Microcutting - fundmentals and application.* 1. ed., John Willey and Sons, Oxford, 2013.

[24] J. McGeough, *Micromachining of engineering materials*. Marcel Decker Inc., New York, 2002.

[25] H. El-Hofy, *Advanced machining processes – nontraditional and hybrid machining processes*. McGraw-Hill, New York, 2005.

[26] M. A. Camara, J. C. Rubio, A. M. Abrao, J. P. Davim, „State of the Art on Micromilling of Materials - a Review“, *Journal of Materials Science Technology*, vol. 28, no. 8, pp. 673 - 685, 2012. https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60115-7

[27] K. Nakayama, K. Tamura, „Size effect in metal-cutting force“, Journal of Engineering for Industry, vol. 90, no. 1, pp. 119-126, 1968. https://doi.org/10.1115/1.3604585

[28] L. Zhanqiang, S. Zhenyu, W. Yi, „Definition and determination of the minimum uncut chip thickness of microcutting“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 69, no. 6-8, pp. 1219-1232, 2013. https://doi.org/10.1007/s00170-013-5109-4

[29] X. Liu, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, K.F. Ehmann, „The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 122, no. 4, pp. 666-678, 2005. https://doi.org/10.1115/1.1813469

[30] J. Chae, S.S. Park, T. Freiheit, „Investigation of micro-cutting operations“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 3-4, pp. 313-332, 2006. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015

[31] I. Tansel, O. Rodriguez, M. Trujillo, E. Paz, W. Li, „Micro-end-milling, I. Wear and breakage“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, no. 12, pp. 1419-1436, 1998. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00015-7

[32] G. Bissacco, H.N. Hansen, L. DeChiffre, „Micromilling of hardened tool steel for mould making applications“, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 167, no. 2-3, pp. 201-207, 2005. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.029

[33] G. Bissacco, H.N. Hansen, L. DeChiffre, „Size Effects on Surface Generation in Micro Milling of Hardened Tool Steel“, *Annals of the CIRP*, vol. 55, no. 1, pp. 593-496, 2006. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60490-9

[34] A. Aramcharoen, P.T. Mativenga, S. Yang, K.E. Cooke, D.G. Teer, „Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel“, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 48, no. 14, pp. 1578-1584, 2008. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.05.011

[35] A. Aramcharoen, P.T. Mativenga, „Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel“, Precision Engineering, vol. 33, no. 4, pp 402-407, 2009. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.11.002

[36] C.Z. Jin, I.S. Kang, J.H. Park, S.H. Jang, J.S. Kim, „The characteristics of cutting forces in the micromilling of AISI D2 steel“, Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 23, pp. 2823-2829, 2009. https://doi.org/10.1007/s12206-009-0804-7

[37] F. Klocke, F. Quito, K. Arntz, A. Souza, „A study of the influence of cutting parameters on micro milling of steel with CBN tools“, *In Proc. of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, vol. 7402, San Jose - CA, United States, January 2009., pp. 1-10. http://doi.org/10.1117/12.808554

[38] S. DeCristofaro, G.C. Feriti, N. Funaro, A. Santandrea, M. Lucassino, C. Stefanini, A. Merlo and P. Dario, „A Study of Cutting Parameters Influence on Micromilling of Hardened Steels“, *In Proc. of the 8th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture (4M 2011)*, Stuttgart, Germany, November 2011., pp. 277-280. https://doi.org/10.3850/978-981-07-0319-6_206

[39] A. Gilbin, M. Fontaine, G. Michel, S. Thibaud, P. Picard, „Capability of tungsten carbide micro mills to machine hardened tool steel“, *International Journal of Precision*

Engineering and Manufacturing, vol. 14, no. 1, pp. 23-28, 2013. https://doi.org/10.1007/s12541-013-0004-3

[40] C.H. Lauro, L.C. Brandão, S.L.M.R. Filho, D. Baldo, „Analysis of the forces in micromilling of hardened AISI H13 steel with different grain“, *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 2014, pp. 1-10, 2014. https://doi.org/10.1155/2014/465178

[41] C.H. Lauro, L.C. Brandão, D. Carou, J.P. Davim, „Specific cutting energy employed to study the influence of the grain size in the micromilling of the hardened AISI H13 steel“, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 81, no. 9-12, pp. 1591-1599, 2015. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7321-x

[42] E. Krebsa, P. Kersting, „Improving the cutting conditions in the five axis micromilling of hardened high speed steel by applying a suitable tool inclination“, Procedia CIRP, vol. 14, pp. 366- 370, 2014. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.032

[43] A.L. Mougo, F.O. Campos, A.C. Araujo, „Size effect in micromilling of superduplex stainless steel“, *In Proc. of the 9th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture (4M)*, Milano, Italy, March 2015., pp. 150-153.

[44] B. Escolle, M. Fontaine, A. Gilbin, S. Thibaud, P. Picart, „Experimental investigation in micro ball end milling of hardened steel“, *Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 5, no. 9-10, pp 327-338, 2015. https://doi.org/10.17265/2161-6213/2015.9-10.001

[45] F.B. Oliveira, A.R. Rodrigues, R.T. Coelho, A.F. Souza, „Size effect and minimum chip thickness in micromilling“, *International Journal of MachineTools and Manufacture*, vol. 89, pp. 39–54, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001

[46] S.N.B. Oliaei, Y. Karpat, „Influence of tool wear on machining forces and tool deflections during micromilling“, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 84, no. 9-12, pp. 1963-1980, 2016. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7744-4

[47] Z. Wang, V. Kovvuri, A. Araujo, M. Bacci, W.N.P. Hung, S.T.S. Bukkapatnam, „Built-up-edge effects on surface deterioration in micromilling process“, Journal of Manufacturing Processes, vol. 24, no. 2, pp. 321-327, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.016

[48] M. Arif, M. Rahman, W.Y. San, „An experimental investigation into micro ball end-milling of silicon“, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 14, no. 1, pp. 52-61, 2012. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.09.004

[49] I. Llanos, A. Agirre, H. Urreta, T. Thepsonthi, T. Özel, „Micromilling high aspect ratio features using tungsten carbide tools“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 228 no. 11, pp. 1350-1358. https://doi.org/10.1177/0954405414522214

[50] K. Xu, B. Zou, Y. Wang, P. Guo, C. Huang, J. Wang, „An experimental investigation of micro-machinability of aluminum alloy 2024 using $Ti(C_7N_3)$-based cermet micro end-mill tools“, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 235, pp. 13-27, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.04.011

[51] K.M. Li, S.Y. Chou, „Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling“, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 15, pp. 2163-2170, 2010. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.031

[52] M. Imran, P.T. Mativenga, A. Gholinia, P.J. Withers, „Comparison of tool wear mechanism and surface integrity for dry and wet micro-drilling of nickel-base super alloys“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 76, pp. 49-60, 2014. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.10.002

[53] H. Hassanpour, M.H. Sadeghi, H. Rezaei, A. Rasti, „Experimental study of cutting force, microhardness, surface roughness, and burr size on micromilling of Ti6Al4V in MQL“, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 13 pp. 1654-1662, 2016. http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2015.1117629

[54] K. Aslantas, A. Çicek, I. Ucun, M. Percin, H.E. Hopa, „Performance evaluation of a hybrid cooling lubrication system micro-milling of Ti6Al4V alloy“, Procedia CIRP, vol. 46, pp. 492-495, 2016. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.037

[55] M.B.G. Jun, K. Bourne, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, „Estimation of effective error parameters in high speed micro end milling“, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 47, pp. 1449-1454, 2007. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.027

[56] K. Jemielniak, P.J. Arrazola, „Application of AE and cutting force signals in tool condition monitoring in micro-milling“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 1, no. 2, pp 97-102, 2008. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.09.007

[57] M.P. Volger, S.G. Kapoor, R.E. DeVor, „On the modeling and analysis of machining performance in micro end milling, part II: cutting force prediction“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, no. 4, pp. 695-705, 2006. https://doi.org/10.1115/1.1813471

[58] T.A. Dow, E. L. Miller, G. Kenneth, „Tool force and deflection compensation for small milling tools“, *Precision Engineering*, vol. 28, no. 1, pp. 31-45, 2004. https://doi.org/10.1016/S0141-6359(03)00072-2

[59] S.M. Son, H.S. Lim, J.H. Ahn, „Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 4-5, pp. 529-535, 2005. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.09.001

[60] L. Uriarte, A. Herrero, M. Zatarain, G. Santiso, L.N.L. Lacalle, A. Lamikiz, J. Albizuri, „Error budget and stiffness chain assessment in a micromilling machine equipped with tools less than 0.3 mm in diameter“, *Precision Engineering*, vol 31, no. 1, pp. 1-12, 2007. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2005.11.010

[61] I.S. Kang, J.S. Kim, J.H. Kim, M.C. Kang, Y.W. Seo, „A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process“, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 187-188, pp. 250-255, 2007. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.155

[62] I.S. Kang1, J.S. Kim, Y.W. Seo, „Cutting force model considering tool edge geometry for micro end milling process“, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 293-299, 2008. https://doi.org/10.1007/s12206-007-1110-x

[63] G. Bissacco, H.N. Hansen, J. Slunsky, „Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro-milling“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, no. 1, pp. 113-116, 2008. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.085

[64] J.S. Wang, Y.D. Gong, G. Abba, K. Chen, J.S. Shi, G.Q. Cai, „Surface generation analysis in micro end milling considering the influences of grain“, *Microsystem Technologies*, vol. 14, no. 7, pp. 937-942, 2008. https://doi.org/10.1007/s00542-007-0478-y

[65] M. Malekian, S.S. Park, M.B.G. Jun, „Modeling of dynamic micromilling cutting forces“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 7-8, pp. 586-598, 2009. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.02.006

[66] M. Malekian, S.S. Park, M.B.G. Jun, „Tool wear monitoring of micro-milling operations“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 209, no. 10, pp. 4903-4914, 2009. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.01.013

[67] D. Biermann, P. Kahnis, „Analysis and simulation of size effects in micromilling“, *Production Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 25-34, 2010. https://doi.org/10.1007/s11740-009-0201-1

[68] D. Biermann, E. Krebsa, A. Sacharow, P. Kersting, „Using NC path deformation for compensating tool deflections“, *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 132-137, 2012. https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.022

[69] Y. Altintas, X. Jin, „Mechanics of micro-milling with round edge tools“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 77-80, 2011. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.084

[70] I. P. Kurczewski, J. Vehmeyer, „Simulation model for micro milling operations and surface generation“, *Advanced Materials Research*, vol. 223, pp. 849-858, 2011. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.849

[71] E. Uhlmann, F. Mahr, „A Time Domain Simulation Approach for Micro Milling Processes“, *Procedia CIRP*, vol. 4, pp. 22-28, 2012. https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.10.005

[72] P. Rodríguez, J.E. Labarga, „A new model for the prediction of cutting forces in micro-end-milling operations“, Journal of Materials Processing Technology, vol. 213, no. 2, pp. 261-268, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.09.009

[73] S.M. Afazov, D. Zdebski, S.M. Ratchev, J. Segal, S. Liu, „Effects of micro-milling conditions on the cutting forces and process stability“, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 5, pp. 671-684, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.12.001

[74] Y.V. Srinivasa, M.S.Shunmugam, „Mechanistic model for prediction of cutting forces in micro end milling and experimental comparison“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 67, pp. 18-27, 2013. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.12.004

[75] L. Zhou, F.Y. Peng, R. Yan, P.F. Yao, C.C. Yang, B. Li, „Analytical modeling and experimental validation of micro end-milling cutting forces considering edge radius and

material strengthening effects“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 97, pp. 29-41, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.07.001

[76] X. Lu, Z. Jia, X. Wang, G. Li, Z. Ren, „Three dimensional dynamic cutting forces prediction model during micro-milling nickel based superalloy“, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 81, no. 9-12, pp. 2067-2086, 2015. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7310-0

[77] X. Zhang, K.F. Ehmann, T. Yu, W. Wang, „Cutting forces in micro end milling processes“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 107, pp. 21-40, 2016. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.04.012

[78] W. Chen, X. Teng, D. Huo, Q. Wang, „An improved cutting force model for micro milling considering machining dynamics“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp 1–12, 2017. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0706-2

[79] Y.H. Kang, C.M. Zheng, „Mathematical modelling of chip thickness in micro end milling, a fourier modelling“, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, no. 6, pp. 4208-4223, 2013. https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.011

[80] M.A. Câmara, A.M. Abrão, J.C.C. Rubio, G.C.D. Godoyb, B.S. Cordeiro, „Determination of the critical undeformed chip thickness in micromilling by means of the acoustic emission signal“, *Precision Engineering*, vol. 46, pp. 377-382, 2016. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.06.007

[81] K. Liu, S.N. Melkote, „Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process“, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 49, no. 5, pp. 650-660, 2007. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.09.012

[82] A. Dhanorker, X. Liu, T. Ozel, „Micromilling process planning and modeling for micromold manufacturing“, *in Proc. of ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering (MSEC)*, Atlanta-GA, USA, October 2007., pp. 759-769. https://doi.org/10.1115/MSEC2007-31070

[83] X. Lai, H. Li, C. Li, Z. Lin, J. Ni, „Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 1, pp. 1-14, 2008. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.011

[84] S.M. Afazov, S.M. Ratchev, J. Segal, „Modelling and simulation of micromilling cutting forces“, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 15, pp. 2154-2162, 2010. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.033

[85] S.M. Afazov, S.M. Ratchev, J. Segal, „Prediction and experimental validation of micro milling cutting forces of AISI H13 steel at hardness between 35 and 60 HRc“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, no. 9-12, pp. 887-899, 2012. https://doi.org/10.1007/s00170-011-3864-7

[86] X. Jin, Y. Altintas, „Prediction of micromilling forces with finite element method“, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 3, pp. 542-552, 2012. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.05.020

[87] H. Li, B. Wu, „Development of a hybrid cutting force model for micro milling of brass“, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 115-116, pp. 586-595, 2016. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.08.002

[88] P. Li, D. Zdebski, H.H. Langen, A.M. Hoogstrate, J.A.J. Oosterling, R.H.M. Schmidt, D.M. Allen, „Micromilling of thin ribs with high aspect ratios“, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, no. 11, pp. 1-10, 2010. https://doi.org/10.1088/0960-1317/20/11/115013

[89] W. Chen, D. Huo, X. Teng, Y. Sun, „Surface generation modelling for micro end milling considering the minimum chip thickness and tool runout“, *Procedia CIRP*, vol. 58, pp. 364-369, 2017. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.237

[90] Q. Gan, H. Ning, L. Liang, Z. Meng, „Molecular dynamics simulation of the influence of cutting edge radius on the size effect in micro cutting“, *in Proc. of the 8th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture (4M 2011)*, Stuttgart, Germany, November 2011., pp. 87-91. https://doi.org/10.3850/978-981-07-0319-6_199

[91] J.B. Saedon, S.L. Soo, D.K. Aspinwall, A. Barnacle, N.H.Saad, „Prediction and optimization of tool life in micromilling AISI D2 (62 HRc) hardened steel“, *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 1674-1683, 2012. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.367

[92] T. Thepsonthi, T. Özel, „Multiobjective process optimization for micro end milling of Ti6Al4V titanium alloy“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 63, no. 9-12, pp. 903-914, 2012. https://doi.org/10.1007/s00170-012-3980-z

[93] G. Mijušković, P. Krajnik, J. Kopač, „Analysis of tool deflection in micro milling of graphite electrodes“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, no. 1-4, pp. 209-217, 2015. https://doi.org/10.1007/s00170-013-5536-2

[94] J. Yi, L. Jiao, X. Wang, J. Xiang, M. Yuan, S. Gao, „Surface roughness models and their experimental validation in micro milling of Al alloy by RSM“, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, pp. 1-9, 2015. http://dx.doi.org/10.1155/2015/702186

[95] A. Attanasio, E. Ceretti, C. Giardini, „SWARM optimization of force model parameters in micromilling“, *Procedia CIRP*, vol. 58, pp. 434-439, 2017. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.248

[96] R. Coppel, J.V.A. Nebot, H.R. Siller, „Adaptive control optimization in micromilling of tool steel“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 84, no. 9-12, pp. 2219-2238, 2016. https://doi.org/10.3850/978-981-09-4609-8_048

[97] Y.C. Hong, S.J. Ha, M.W. Cho, „Predicting of cutting forces in a micromilling process based on frequency analyseis of sensor signal and modified polynominal neural network“, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 1, pp. 17-23, 2012. https://doi.org/10.1007/s12541-012-0003-9

[98] Q. Ren, M. Balazinski, K. Jemielniak,L. Baron, S. Achiche, „Experimental and fuzzy modelling analysis on dynamic cutting force in micromilling“, *Soft Computing*, vol. 17, no. 9, pp. 1687-1697, 2013. https://doi.org/10.1007/s00500-013-0983-0

[99] E. Kuram, B. Ozcelik, „Micromilling performance of AISI 304 stainless steel using Taguchi method and fuzzy logic modelling“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 27, no. 4, pp. 817-830, 2016. https://doi.org/10.1007/s10845-014-0916-5

[100] J. Vehmeyera, I.P. Kurczewski, F. Bohmermann, O. Riemer, P. Maaß, „Least-squares based parameter identification for a function-related surface optimisation in micro ball-end milling“, *Procedia CIRP*, vol. 31, pp. 276-281, 2015. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.076

[101] V.C. Venkatesh, S. Izman, *Precision Engineering*. McGraw-Hill. New Delhi, 2007. https://doi.org/10.1036/0071548270

[102] B. Denkena, H.W. Hoffmeister, M. Reichstein, S. Illenseer, M. Hlavac, „Micro-machining processes for microsystem technology“, *Microsystem Technologies*, vol. 12, 659-664, 2006. https://doi.org/10.1007/s00542-006-0089-z

[103] Z. Lu, T. Yoneyama, „Micro cutting in the micro lathe turning system“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 39, no. 7, pp. 1171-1183, 1999. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00092-3

[104] M.A. Rahman, M. Rahman, A.S. Kumar, H.S.Lim, „CNC microturning: an application to miniaturization“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 6, pp. 631-639, 2005. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.10.003

[105] K. Egashira, K. Mizutani, „Micro-drilling of monocrystalline silicon using a cutting tool“, *Precision Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 263-268, 2002. https://doi.org/10.1016/S0141-6359(01)00113-1

[106] J.S. Nam, P.H. Lee, S.W. Lee, „Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 51, no. 7-8, pp. 649-652, 2011. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.04.005

[107] C. Brecher, C. Wenzel, R. Klar, „Characterization and optimization of the dynamic tool path of a highly dynamic micromilling machine“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 86-91, 2008. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.09.013

[108] J.C. Aurich, J. Engmann, G.M. Schueler, R. Haberland, „Micro grinding tool for manufacture of complex structures in brittle materials“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 311-314, 2009. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.049

[109] N. Ikawa, S. Shimada, H. Tanaka, „Minimum thickness of cut in micromachining“, *Nanotechnology*, vol.3, no. 1, pp. 6-9, 1999. https://doi.org/10.1088/0957-4484/3/1/002

[110] C.R. Friedrich, V.P. Kulkarni, „Effect of workpiece springback on micromilling forces“, *Microsystem Technologies*, vol. 10, no. 6-7, pp. 472–477, 2004. https://doi.org/10.1007/s00542-004-0375-6

[111] F. Vollertsen, D. Biermann, H.N. Hansen, I.S. Jawahir, K. Kuzman, „Size effects in manufacturing of metallic components“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 2, pp. 566-587, 2009. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.002

[112] N. Fang, „Slip-line modelling of machining with a rounded-tool edge – part I: new model and theory“, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 51, no. 4, pp. 715-742, 2003. https://doi.org/10.1016/S0022-5096(02)00060-1

[113] K. Liu, S.N. Melkote, „Material strengthening mechanisms and their contribution to size effect in micro-cutting“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 128, no. 3, pp. 730-738, 2006. https://doi.org/10.1115/1.2193548

[114] A. Simoneau, E. Ng, M.A. Elbestawi, „The effect of microstructure on chip formation and surface defects in microscale, mesoscale and macroscale cutting of steel“, *CIRP Annals – Manufacturing Technol*ogy, vol 55, no. 1, pp. 97-102, 2006. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60375-8

[115] S. Azcarate, L. Uriarte, S. Bigot, “Hybrid tooling: a review of process chains for tooling microfabrication within 4M”, *In Proc. of the 2rd International Conference on Multi-Material Micro Manufacture (4M 2006)*, Cardiff, England, 2006., pp. 1-4.

[116] L.N.L Lacalle, A. Lamikiz, *Machine tools for high performance machining*. Springer-Verlag, Berlin, 2009. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-380-4

[117] D. Huo, K. Cheng, F. Wardle, „Design of a five-axis ultra-precision micro-milling machine - UltraMill. Part 1: holistic design approach, design considerations and specifications“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 47, no. 9-12, pp. 867-87, 2010. https://doi.org/10.1007/s00170-009-2128-2

[118] X. Luo, K. Cheng, D. Webb, F. Wardle, „Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components“, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 167, no. 2-3, pp. 515-528, 2005. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.050

[119] Moxer technologies, Canada, https://www.zoominfo.com/c/moxer-technologies-inc/365494958

[120] Đ. Čiča, *Mašine alatke*. Mašinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, Banja Luka, 2017.

[121] I. Etxaniz, A. Izpizua, M.S. Martin, J. Arana, „Magnetic levitated 2D fast drive“, *IEEJ Transactions on Industry Applications*, vol. 126, no. 12, pp. 1678-1681, 2006. http://doi.org/10.1541/ieejias.126.1678

[122] J.T. Sawicki, E.H. Maslen, K.R. Bischop, „Modeling and performance evaluation of machining spindle with active magnetic bearings“, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 21, no. 6, pp. 847-850, 2007. https://doi.org/10.1007/BF03027055

[123] HIWIN Corporation, Huntley, USA, web sajt: https://www.hiwin.com/

[124] Weiss Gmbh, Maroldsweisach, Germany, web sajt: https://www.weissgmbh.com/en

[125] KERN Microtechnik GmbH, Eschenlohe, Germany, website: http://www.kern-microtechnik.com/en/machine-tool-manufacture/used-machines/

[126] Makino Milling Machine Co. Ltd, Tokyo, https://www.makino.com/vertical-machining-centers/

[127] Haimer USA LCC, Villa Park (IL), https://www.haimer-usa.com/products/tool-holders

[128] S. Kouravand, B.M. Imani, „Developing a surface roughness model for end-milling of micro-channel“, *Machining Science and Technology: An International Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 299-321, 2014. http://doi.org/10.1080/10910344.2014.897846

[129] T. Matsumura, T. Ono, „Cutting process of glass with inclined ball end mill“, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 200, no. 1-3, pp. 356-363, 2008. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.067

[130] www.secotools.com/jabromini

[131] C.D. Torres, P.J. Heaney, A.V. Sumant, M.A. Hamilton, F.E. Pfefferkorn, „Analyzing the performace of diamond coated micro end mills“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 7-8, pp. 599-612, 2009. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.02.001

[132] Hermann Schmidt Co., South Windsor, USA, web sajt: https://www.hschmidt.com/

[133] F. Klocke, *Manufacturing processes 1: Cutting*. Springer-Verlag, Berlin, 2011.

[134] C.J. Kim, J.R. Mayor, J. Ni, „A static model of chip formation in microscale milling“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, no. 4, pp. 710-718, 2006. https://doi.org/10.1115/1.1813475

[135] M.T. Zaman, A.S. Kumar, M. Rahman, S. Sreeram, „A three dimensional analytical cutting force model for micro end milling operation“, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, vol. 46, no. 1, pp. 353-366, 2006. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.021

[136] C. Li, X. Lai, H. Li, J. Ni, „Modeling of three dimensional cutting forces in micro end milling”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, no. 4, pp. 671-678, 2007. https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/4/001

[137] T. Childs, K. Meakawa, T. Obikawa, Y. Yamane, *Metal machining*, Arnold Publisher, London, 2000.

[138] K.F. Ehmann, S.G. Kapoor, R.E. DeVor, I. Lazoglu, „Machining process modeling: a review“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 119, no.4, pp (1997), 655-662, 1997. https://doi.org/10.1115/1.2836805

[139] P.J. Arrazola, T. Özel, D. Umbrello, M. Davies, I.S. Jawahir, „Recent advances in modelling of metal machining processes“, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 62, no. 2, pp. 695-718, 2013. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.006

[140] R.S. Anand, K. Patra, „Modeling and simulation of mechanical micro machining: a review”, *Machining Science and Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 323-347, 2014. http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2014.925377

[141] I. Mukherjee, P.K. Ray, “A review of optimization techniques in metal cutting processes”, *Computers&Industrial Engineering*, vol. 50, no. 1-2, pp. 15-34, 2006. https://doi.org/10.1016/j.cie.2005.10.001

[142] V.S. Sal’nikov, V.C. Hoang, “Optimization of cutting processes”, *Russian Engineering Research*, vol. 36, no. 6, pp. 508-510, 2016. https://doi.org/10.3103/S1068798X16060186

[143] X. Xu, *Integrating advanced computer aided design, manufacturing, and numerical control: principles and implementations*, Arnold - IGI Global, Hershey, 2009.

[144] V. Jovišević, *Projektovanje tehnoloških postupaka*, Mašinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, Banja Luka, 2005.

[145] D.J. Waldorf, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, "A slip line field for ploughing during orthogonal cutting", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 120, no. 4, pp. 693-699, 1998. https://doi.org/10.1115/1.2830208

[146] S. Jokanović, *Projektovanje pomoću računara - skripta*, Mašinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, Banja Luka, 2005.

[147] C. Kiliçaslan, "Modelling and simulation of metal cutting by finite element method", PhD thesis, Izmir Institute of Technology, Izmir, Turkey, 2009.

[148] K. Maekawa, A. Itoh, "Friction and tool wear in nano-scale machining - a molecular dynamics approach", *Wear*, vol. 188, no. 1-2, pp. 115-122, 1995. https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06633-0

[149] Z.C. Lin, J.C. Huang, "A nano-orthogonal cutting model based on a modified molecular dynamics technique", *Nanotechnology*, vol. 15, no. 5, pp. 510-519, 2004. https://doi.org/10.1088/0957-4484/15/5/019

[150] M.B. Cai, X.P. Li, M.Rahman, "Study of the mechanism of nanoscale ductile mode cutting of silicon using molecular dynamics simulation", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 1, pp. 75-80, 2007. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.02.016

[151] M.F. Aly, E. Ng, S.C.Veldhuis, M.A. Elbestawi, "Prediction of cutting forces in the micro-machining of silicon using a hybrid molecular dynamic-finite element analysis force model", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 14, pp. 1727-1739, 2006. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.12.008

[152] Z. Niu, K. Cheng, "Multiscale multiphysics-based modeling and analysis on the tool wear in micro drilling", *Journal of Multiscale Modelling*, vol. 7, no. 1, pp. 1-22, 2016. https://doi.org/10.1142/S1756973716400023

[153] B. Shiari, R.E. Miller, D.D. Klug, "Multiscale simulation of material removal processes at the nanoscale", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 55, no. 11, pp. 2384-2405, 2007. https://doi.org/10.1016/j.jmps.2007.03.018

[154] R. Venkata, *Advanced modeling and optimization of manufacturing processes*, Springer-Verlag, London, 2011.

[155] M. Chandrasekaran, M. Muralidhar, C.M. Krishna, U.S. Dixit, "Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: a literature review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 46, no. 5-8, pp 445-464, 2010. https://doi.org/10.1007/s00170-009-2104-x

[156] K. Zhu, Y.S. Wong, G.S. Hong, "Multi-category micro-milling tool wear monitoring with continuous hidden Markov models", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, no. 2, pp. 547-560, 2009. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.04.010

[157] J. McCall, "Genetic algorithms for modelling and optimisation", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 184, no. 1, pp. 205-222, 2006. https://doi.org/10.1016/j.cam.2004.07.034

[158] R.S. Quiza, M.R. Santana, E.A. Brindis, "Genetic algorithm based multi objective optimization of cutting parameters in turning processes", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 19, no. 2, pp. 127-133, 2006. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2005.06.007

[159] M. Durairaj, S. Gowri, "Parametric optimization for improved tool life and surface finish in micro turning using genetic algorithm", *Procedia Engineering*, vol. 64, pp. 878-887, 2013. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.164

[160] Z. Miljković, D. Aleksendrić, *Veštačke neuronske mreže, zbirka rešenih zadataka sa izvodima iz teorije*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2009.

[161] W.H. Hsieh, M.C. Lu, S.J. Chiou, "Application of backpropagation neural network for spindle vibration-based tool wear monitoring in micro-milling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 61, no. 1-4, pp. 53-61, 2016. https://doi.org/10.1007/s00170-011-3703-x

[162] D. Cica, B. Sredanovic, D. Kramar, "Modelling of tool life and surface roughness in hard turning using soft computing techniques a comparative study", *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 49-64, 2015. https://doi.org/10.1504/IJMPT.2015.066866

[163] G.L. Globočki, D. Kramar, J. Kopač, *Metal cutting – theory and applications*, Faculties of Mechanical Engineering at University of Banjaluka and University of Ljubljana, Banjaluka and Ljubljana, 2014.

[164] D.C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, Wiley, New York, 2005.

[165] E. Kreyzig, *Advanced engineering mathematics*, Wiley, New York, 2006.

[166] S. Wojciechowski, R.W. Maruda, S. Barrans , P. Nieslony , G.M. Krolczyk," Optimization of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface inclinations", *Measurement*, vol. 111, pp. 18-28, 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.020

[167] A. Gok, C. Gologlu, H.I. Demirci, "Cutting parameter and tool path style effects on cutting force and tool deflection in machining of convex and concave inclined surfaces", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, no. 5-8, pp. 1063-1078, 2013. http://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5075-x

[168] V. Pejic, M. Sekulic, S. Jokanovic, P. Kovac, M. Gostimirovic, "Modeling of cutting forces in ball-end milling process of hard (hardened) steel by using response surface methodology", *Journal of Production Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 17-20, 2017. http://doi.org/10.24867/JPE-2017-02-017

[169] V. N. Gaitonde, S.R. Karnik, C.H.A. Maciel, J.C.C. Rubio, A.M. Abrão, "Machinability Evaluation in Hard Milling of AISI D2 Steel", *Materials Research*, vol. 19, no. 2, pp. 360-369, 2016. http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0263

[170] E. Kuram, B. Ozcelik, "Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill", *Measurement*, vol. 46, no. 6, pp. 1849-1864, 2013. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.02.002

[171] J. Fleischer, M. Deuchert, M. Chlipala, "Development of a 5-axis micro-test-work piece for micro-milling machine tools" *In Proc. of 3rd CIRP International Conference on High Performance Cutting (HPC)*, June 2008, Dublin, Ireland, pp. 795-804.

[172] L.N. L. de Lacalle, A. Lamikiz, J.A. Sanchez, M.A. Salgado, "Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 24, no. 9-10, pp. 621-631, 2004. https://doi.org/10.1007/s00170-003-1723-x

[173] K. Zhu, Y. Zhang, "Modeling of the instantaneous milling force per tooth with tool run-out effect in high speed ball-end milling", I*nternational Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 118, pp. 37-48, 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.04.001

[174] J. Lubliner, P. Papadopoulos, *Introduction to Solid Mechanics: An Integrated Approach*, 2nd Ed., Springer, Switzerland, 2014.

[175] *Katedra za menedžment obdelovalnih tehnologij na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani*, Ljubljana, Slovenia, web: http://lab.fs.uni-lj.si/labod/

[176] *Seco Tools AB*, Fagersta, Sweden, web: https://www.secotools.com/#?terms=jabro

[177] *Bogner Edelstahl Polska*, Kujawski, Poland, web: http://www.bogner-edelstahl.pl/en

[178] *MasterCam* software by *CNC Software Inc.*, Tolland - CT, USA, web: https://www.mastercam.com/

[179] *Alicona Imaging GmbH*, Graz, Austria, web: http://www.alicona.com/

[180] *Mitutoyo Corporation*, Takatsu-ku, Japan, web: http://www.mitutoyo.com/

[181] *Kistler Group AG*, Winterthur, Switzerland, web: https://www.kistler.com/en/

[182] *Keyence Corporation*, Osaka, Japan, web: https://www.keyence.com/

[183] *DesignExpert7* software by *Stat-Ease Inc.*, Minneapolis - MN, USA, web: https://www.statease.com/

[184] L. Raju, S. S. S. Hiremath, "A state-of-the-art review on micro electro-discharge machining", Procedia Technology, Volume 25, 2016, Pages 1281-1288, https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.222

[185] F. Modica, V. Marrocco, G. Copani, I. Fassi, "Sustainable micro-manufacturing of micro-components via micro electrical discharge machining" *Sustainability*, vol. 3, no. 12, 2011, pp. 2456-2469, https://doi.org/10.3390/su3122456

[186] S. Mishra, V. Yadava, "Laser Beam Micro Machining (LBMM) – A review", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 73, 2015, pp. 89-122, https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.03.017

[187] J. Cheng, C.S. Liu, S. Shang, D. Liu, W. Perrie, G. Dearden, K. Watkins, "A review of ultrafast laser materials micromachining", Optics & Laser Technology, Vol. 46, 2013, pp. 88-102, https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.06.037

BIOGRAFIJA

Branislav Sredanović je rođen 5.1.1984. godine u Jajcu, tadašnja SFRJ, od oca Velimira i majke Ankice, gdje je živio i školovao se do 1995. godine. Te godine je, zbog ratnih neprilika, sa roditeljima izbjegao u Teslić, gdje je završio osnovnu školu. Srednju školu, smijer Mašinski tehničar, je završio u Tesliću, školske 2001/2002 godine, sa odličnim uspjehom, kao đak generacije. Godine 2002. upisuje Mašinski fakultet u Banjoj Luci, smijer Proizvodno mašinstvo, gdje je petogodišnje studije završio u roku, školske 2006/2007. godine, sa prosjekom ocjena 9,02. Dobitnik je Zlatne plakete Univerziteta u Banjoj Luci. U periodu od 2007. do 2009. godine radio je kao tehnolog u proizvodnom preduzeću Megastil d.o.o. u Banjoj Luci. Godine 2009. izabran je u zvanje asistenta na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Banjoj Luci, na užu naučnu oblast Konvencionalne tehnologije. Dvogodišnje postdiplomske studije, smjer Obradni sistemi i tehnologija fleksibilnih sistema za rezanje, je upisao 2008. godine na Mašinskom fakultetu u Banjoj Luci. Pomenute studije je završio 2012. godine sa prosjekom ocjena 9,83 i odbranom magistarskog rada pod nazivom „Razvoj modela za definisanje univerzalne obradivosti na osnovu parametara procesa rezanja“. Nakon toga, 2013. godine je izabran u zvanje višeg asistenta, na užu naučnu oblast Proizvodno mašinstvo na istom fakultetu. U toku izrade magistarskog rada i ekperimentalnih istraživanja vezanih za doktorsku disertaciju, u više navrata je boravio na Fakultetu za strojništvo Univerziteta u Ljubljani. Branislav Sredanović je autor i koautor preko 35 naučnih i stručnih radova, od kojih je 7 na SCI listi iz uže naučne oblasti, te jednog univerzitetskog udžbenika. Učesnik je nekoliko naučnih i stručnih projekata iz oblasti proizvodnog mašinstva, čiji je fokus podrška metaloprerađivačkim preduzećima. Trenutno na Mašinskom fakultetu izvodi vježbe na odsjeku Proizvodno mašinstvo, Mehatronika i Energetsko i saobraćajno mašinstvo, kao i na drugim fakultetima Univerziteta u Banjoj Luci, i to: Prirodno-matematičkom fakultetu i Šumarskom fakultetu. Oženjen je i otac je jednog djeteta.

Prilog 2

Izjava 1.

IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem
da je doktorska disertacija

Naslov rada: **Modeliranje funkcija obradivosti u mikro-glodanju**

Naslov rada na engleskom jeziku: Modelling of machinability functions in micro-milling

☒ rezultat sopstvenog istraživačkog rada,

☒ da doktorska disertacija, u cijelini ili u dijelovima, nije bila predložena za dobijanje bilo kakve diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,

☒ da su rezultati konkretno navedeni i

☒ da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Banjoj Luci, 25.4.2018. godine

Potpis doktoranta:

Izjava 2.

Izjava kojom se ovlašćuje Univerzitet u Banjoj Luci da doktorsku disertaciju učini javno dostupnom

Ovlašćujem Univerzitet u Banjoj Luci da moju doktorsku disertaciju pod naslovom

Modeliranje funkcija obradivosti u mikro-glodanju

koja je moje autorsko djelo, učini javno dostupnom.

Doktorsku disertaciju sa svim prilozima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u digitalni repozitorijum Univerziteta u Banjoj Luci mogu da koriste svi koji poštuju odredbe u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (*Creative Commons*) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomerijalno
3. Autorstvo – nekomerijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomerijalno – djeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

U Banjoj Luci, 25.4.2018. godine

Potpis doktoranta:

Izjava 3.

Izjava o identičnosti štampane i elektronske verzije doktorske disertacije

Ime i prezime autora Branislav Sredanović

Naslov rada **Modeliranje funkcija obradivosti u mikro-glodanju**

Mentor Prof. dr Gordana Globočki Lakić

Izjavljujem da je štampana verzija moje doktorske disertacije identična elektronskoj verziji koju sam predao za digitalni repozitorijum Univerziteta u Banjoj Luci.

U Banjoj Luci, 25.4.2018. godine

Potpis doktoranta: