



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Rajko Todić

MODEL DUBOKOGA MIKROBUŠENJA POTPOMOGNUTOGA VIBRACIJAMA

DOKTORSKI RAD

Mentor:
prof. dr. sc. Toma Udiljak

Zagreb, 2018.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL
ARCHITECTURE

Rajko Todić

MODEL OF VIBRATION ASSISTED DEEP HOLE MICRO DRILLING

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
prof. dr. sc. Toma Udiljak

Zagreb, 2018.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK:

Ključne riječi: Mikrobušenje, duboko bušenje, bušenje potpomognuto vibracijama, lom svrdla, vijek trajanja svrdla

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarsstvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB)

Mentor rada: Prof. dr. sc. Toma Udiljak

Broj stranica: 168

Broj slika: 96

Broj tablica: 25

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 174

Datum obrane: 4.2018.

Povjerenstvo: Dr. sc. Damir Ciglar, red. prof. – predsjednik
Dr. sc. Toma Udiljak, red. prof. – mentor
Dr. sc. Goran Cukor, red. prof. Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci – član

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Zagreb
Nacionalna i sveučilišna knjižnica, Zagreb

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Tomi Udiljku na stručnoj i osobnoj potpori te prof. dr. sc. Damiru Ciglaru i prof. dr. sc. Goranu Cukoru na potpori tijekom istraživanja i pisanja rada.

Također se zahvaljujem mr. sc. Željku Goji i g. Mladenu Šarliji na poticaju i bezrezervnoj potpori tijekom ovog istraživanja i rada u tvrtki HSTec d.d. Zadar, korisnim savjetima te omogućavanju realizacije ispitnog postava i eksperimentalnog dijela rada.

Veliku zahvalnost dugujem i svim kolegama u tvrtki HSTec d.d. Zadar, posebice kolegama Tomislavu Marfatu, Marinu Juranu, Anti Bartuloviću, Borisu Brčiću, Marku Goji, Zoranu Vlašiću, Krsti Šormazu i Hrvoju Macuri na razumijevanju i pomoći tijekom izrade rada. Veliko hvala i kolegama Miodragu Kulašu, Stipi Kardumu, Vlatku Bogdaniću, Đaniju Ivičeviću, Hrvoju Prtenjači, Mateju Lazanji, Ivanu Novaku i Andyju Morleyju na pomoći kod realizacije eksperimentalnog dijela rada. Posebna zahvala ide g. Borisu Mešku za pomoć pri realizaciji ispitnog postava.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Tomislavu Staroveškom, izv. prof. dr. sc. Danku Brezaku, prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu i Mihi Klaiću na potpori u različitim fazama istraživanja. Također zahvaljujem prof. dr. sc. Jošku Parunovu i g. Zvonki Fofić na srdačnoj pomoći.

Zahvaljujem se i svojim bivšim kolegama s Katedre za konstruiranje i razvoj proizvoda prof. dr. sc. Dorianu Marijanoviću, prof. dr. sc. Nenadu Bojčetiću, prof. dr. sc. Mariju Štorgi, prof. dr. sc. Nevenu Pavkoviću te prof. dr. sc. Zvonku Heroldu.

Naposljetku, najveću zahvalnost na beskrajnoj potpori i razumijevanju dugujem svojoj obitelji, supruzi Marijani, sinu Luki i kćeri Dori.

Podaci o mentoru.....	iv
Predgovor	vi
Sažetak	vii
Summary	viii
Ključne riječi – Keywords.....	ix
Popis oznaka.....	x
Popis kratica	xii
Popis slika	xiii
Popis tablica	xix
1. Uvod.....	1
1.1. Motivacija.....	1
1.2. Cilj i hipoteza rada.....	4
1.3. Metodologija i plan istraživanja	5
1.3.1. Razvoj eksperimentalnog postava	5
1.3.2. Plan pokusa	5
1.3.3. Modeliranje procesa mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	6
2. Mikrobušenje.....	7
2.1. Značajke spiralnog mikrosvrkla	8
2.1.1. Geometrija spiralnog mikrosvrkla.....	8
2.1.2. Materijali mikrosvrkla	12
2.1.3. Čvrstoća mikrosvrkla	13
2.2. Parametri mikrobušenja	15
2.2.1. Brzina rezanja.....	15
2.2.2. Posmak	17
2.2.3. Dubina provrta i odvođenje odvojenih čestica	18

2.3.	Utjecaji značajki bušenja na vijek trajanja mikrosvrkla	21
2.4.	Bušenje s periodičkim izvlačenjem svrdla (<i>peck drilling</i>)	23
2.4.1.	Visina izvlačenja svrdla	25
2.4.2.	Dubina koraka	26
2.4.3.	Vrste niza vrijednosti dubine koraka i broj koraka izvlačenja svrdla	28
2.5.	Efekt veličine	29
2.6.	Vrludanje svrdla kod mikrobušenja i korištenje pilotskog provrta	31
2.7.	Učinci SHIP-a na mikrobušenje	33
2.8.	Modeli mikrobušenja	34
3.	Bušenje potpomognuto vibracijama	38
3.1.	Kinematika oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama	38
3.2.	Pregled stanja područja istraživanja bušenja potpomognutoga niskofrekventnim vibracijama	50
3.2.1.	Utjecaj primjene niskofrekventnih vibracija na aksijalnu silu	53
3.2.2.	Utjecaj odabira frekvencije i amplitude vibracija, posmaka i učestalosti vrtnje	54
3.2.3.	Veličina odvojenih čestica i njihovo odvođenje iz provrta	55
3.2.4.	Temperatura kod bušenja potpomognutoga vibracijama	56
3.2.5.	Trošenje alata	56
3.2.6.	Vijek trajanja svrdla	57
3.2.7.	Istraživanja mikrobušenja potpomognutoga niskofrekventnim vibracijama	58
3.3.	Bušenje potpomognuto ultrazvučnim vibracijama	60
3.3.1.	Bušenje provrta većih promjera potpomognuto ultrazvučnim vibracijama	60
3.3.2.	Mikrobušenje potpomognuto ultrazvučnim vibracijama	62
3.4.	Sustavi generirani samouzbudom	62
4.	Eksperimentalni postav i mjerna oprema	64
4.1.	Konstrukcija stroja za mikrobušenje	65
4.2.	Sustav za generiranje vibracija	69

4.3.	Mjerni sustav	71
4.3.1.	Modul za akviziciju	72
4.3.2.	Senzor sile i momenta	72
4.4.	Senzor vibracija	74
4.5.	Programska podrška mjernog sustava	74
5.	Eksperimentalni rad.....	77
5.1.	Planiranje pokusa.....	77
5.1.1.	Materijal obratka i karakteristike svrdla.....	77
5.1.2.	Cilj provođenja pokusa i odabir utjecajnih faktora	80
5.1.3.	Oblikovanje plana pokusa i njegova provedba	83
5.2.	Metodologija korištena za izradu i vrednovanje matematičkih modela	87
5.3.	Prikaz rezultata dobivenih mjerenjem aksijalne sile i momenta mikrobušenja bez vibracija.....	94
5.4.	Statistička obrada rezultata i izrada matematičkog modela za opisivanje utjecaja parametara mikrobušenja	95
5.5.	Prikaz rezultata dobivenih mjerenjem aksijalne sile i momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	106
5.6.	Statistička obrada rezultata i izrada matematičkog modela za opisivanje utjecaja parametara mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	107
6.	Analiza rezultata.....	121
7.	Zaključak	126
8.	Literatura	128
	Kratki životopis	144

Toma Udiljak rođen je 16. 11. 1955. u Studencima, Republika Hrvatska. Osnovnu školu i V gimnaziju završava u Zagrebu, gdje je 1980. diplomirao na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB), Sveučilišta u Zagrebu. Godine 1981. upisuje poslijediplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, gdje je 1988. godine magistrirao, a 1996. godine doktorirao. Nakon studija se zapošljava u tvornici *Jugoturbina*, Karlovac, a od 1982. radi na FSB Zagreb, Zavod za tehnologiju, u zvanju asistenta. 1997. je izabran za višeg asistenta, 2000. za docenta, 2004. za izvanrednog profesora, a 2009. za redovitog profesora.

Tijekom 1989. godine bio je šest mjeseci na specijalizaciji na *University of South Florida*, Tampa, a u srpnju 1995. na specijalizaciji za primjenu CAD/CAM sustava za izradu proteza u Seattle-u, SAD.

Obavljao je funkciju voditelja Laboratorija za alatne strojeve, a 2007. je sudjelovao u osnivanju Laboratorija za medicinsko inženjerstvo. Tijekom rada na FSB bio je član većeg broja povjerenstava, voditelj Laboratorija za medicinsko inženjerstvo, voditelj usmjerenja *Obradbeni strojevi i procesi*, prodekan za organizaciju, a trenutno je predstojnik Zavoda za tehnologiju i voditelj Katedre za alatne strojeve.

Sudjeluje u izvođenju nastave iz većeg broja kolegija Katedre za alatne strojeve na preddiplomskom, diplomskom i poslijediplomskom studiju. Sudjelovao je i u izvođenju nastave na Strojarskom fakultetu u Slavonskom Brodu, Višoj tehničkoj školi u Varaždinu, Tehničkom veleučilištu u Karlovcu i na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu. Kao nastavnik je sudjelovao u radu doktorskih škola na *Tallinn University of Technology*, Estonija i na Sveučilištu u Zadru. Od 1982. aktivno je sudjelovao u ostvarivanju desetak znanstvenoistraživačkih projekata. Autor je i koautor u više od 100 znanstvenih i stručnih radova, i voditelj više uspješno završenih tehnologijskih projekata.

Do sada je, kao član organizacijskog i/ili znanstvenog odbora sudjelovao u pripremi i realizaciji velikog broja znanstvenih i stručnih savjetovanja u Hrvatskoj i inozemstvu.

Predsjednik je *Hrvatske udruge proizvodnoga strojarstva* (HUPS) i udruge *Božo Težak*, član Međunarodnog odbora *Donau-Adria Association for Automation and*

Manufacturing -DAAAM Viena, član Akademije tehničkih znanosti i član Znanstvenog vijeća za tehnološki razvoju pri HAZU.

U periodu 1997.-2002. bio je član Sveučilišnog odbora za međunarodnu suradnju, u periodu 2008. – 2011. član stručnog vijeća Tehničkog veleučilišta u Zagrebu, od 2005. je član Vijeća tehničkog područja Sveučilišta u Zagrebu, a od 2012. godine član Senata Sveučilišta u Zagrebu.

Dobitnik je studentske svibanjske nagrade, medalje fakulteta FSB, priznanja DAAAM, srebrne i zlatne plakete Hrvatskog društva održavatelja (HDO), te srebrne i zlatne plakete HUPS-a.

Govori i piše engleski, a služi se njemačkim jezikom. Oženjen je i otac troje djece.

Proces dubokoga mikrobušenja karakterizira veći odnos dubine i promjera provrta i time otežanu primjenu sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, otežano odvođenje odvojenih čestica iz provrta uz povećano trenje između alata i obratka. To uzrokuje povećanje sila i momenta bušenja, što uz malu krutost svrdla češće dovodi do loma alata. Jedna od mogućnosti za povećanje pouzdanosti procesa je, na standardnu kinematiku procesa bušenja, superponiranje vibracija u smjeru osi svrdla. Promjenom mehanizma formiranja odvojenih čestica, koje lakše izlaze izvan provrta smanjujući sile koje djeluju na svrdlo, što je posebno istaknuto kod obrade duktilnih materijala gdje postoji vjerojatnost začepjenja spiralnog utora svrdla dugim neprekinutim odvojenim česticama.

Ovaj rad bavi se istraživanjem konvencionalnog dubokoga mikrobušenja svrdlima promjera 0,5 mm duktilne legure aluminija AlMg3 uz periodičko izvlačenje svrdla i hibridnog procesa dubokoga mikrobušenja potpomognutoga vibracijama. Numerički se definiraju ovisnosti sila rezanja o dubini provrta, parametrima bušenja i parametrima vibracija te njihovim interakcijama i utjecaj na vijek trajanja svrdla. Razvijeni matematički model mogao bi se koristiti u razvoju sustava upravljanja procesom bušenja kojim bi se omogućio odabir parametara obrade u svrhu sprečavanja loma i produljenja vijeka trajanja svrdla te time povećanja pouzdanosti i proizvodnosti procesa mikrobušenja.

U radu je predstavljen pregled rezultata istraživanja dubokoga mikrobušenja i dubokoga bušenja potpomognutoga vibracijama. Nakon pregleda stanja dosadašnjih istraživanja, preko kinematičke analize trajektorija glavnih oštrica svrdla utvrdio se utjecaj parametara vibracija u ovisnosti o parametrima bušenja na debljinu odvojenih čestica prije deformacije, koja ima utjecaj na sile rezanja i veličinu odvojenih čestica.

Provedena je eksperimentalna analiza konvencionalnog i mikrobušenja potpomognutog vibracijama, uz periodičko izvlačenje svrdla, mjerenjem odzivnih veličina aksijalne sile i momenta bušenja preko planiranih eksperimenata. Za analizu utvrđivanja značajnosti utjecaja odabranih parametara na odzivne veličine, koristila se metoda odzivne površine. Za promatrani raspon parametara, izrađeni su matematički modeli odziva aksijalne sile i momenta konvencionalnog i mikrobušenja potpomognutoga vibracijama, u ovisnosti o parametrima bušenja, vibracija i dubine provrta.

Usporedbom eksperimentalnih rezultata i oba modela, utvrđeno je kako bušenje potpomognuto vibracijama prvenstveno pogoduje na smanjenje ukupnog momenta mikrobušenja za određeni skup parametara. Smanjenje momenta povezano je s manjim odvojenim česticama i time smanjenom vjerojatnosti začepljenja utora spirale mikrosvrdla i manjim trenjem prilikom dubokoga mikrobušenja. Načinjena je usporedba vijeka trajanja svrdla između konvencionalnog mikrobušenja i onog potpomognutoga vibracijama za proces s većom dubinom koraka ciklusa bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla. Kod dubokoga mikrobušenja potpomognutoga vibracijama ustanovljeno je kako postignuto smanjenje ukupnog momenta bušenja, u kombinaciji s adekvatnom veličinom aksijalne sile, može osigurati prosječno veći broj probušenih provrta prije loma svrdla i time pouzdaniji proces dubokoga mikrobušenja.

This work presents research results from the investigation of the deep hole micro drilling and the vibration assisted deep hole micro drilling. Literature survey and the kinematic analysis of the main cutting edges trajectories for the vibration assisted drilling were performed. Influence of the vibration and drilling parameters on undeformed chip thickness is determined, which is directly related with the chip size and the cutting forces.

Experimental analysis of conventional and vibration assisted peck micro drilling was performed using the design of experiments. Measured axial force and drilling torque were used as the response variables. Statistical assessment of the significance of the parameters on the response variables is performed with the response surface methodology. For the analysed range of parameters, mathematical models for the axial force and drilling torque of the conventional and vibration assisted micro drilling were created, in relation with the drilling and vibration parameters, as well as the hole depth.

Comparison of experimental results and both models showed that, for a certain set of parameters, the vibration assisted drilling has a primary benefit in the form of reduced drilling torque. This is related to smaller chip size, which in turn, leads to reducing the probability of the chip jamming in the micro drill flute and reduced friction during the deep hole micro drilling. For peck drilling, analysis of the drill lifetime for both conventional and vibration assisted micro drilling was performed. It was concluded that for deep hole vibration assisted micro drilling, the reduction in the drilling torque with the combination of adequate axial force, can provide larger number of drilled holes before the drill breaks and thus a more reliable deep hole micro drilling process.

- Mikrobušenje
- Duboko bušenje
- Bušenje potpomognuto vibracijama
- Aksijalna sila bušenja
- Moment bušenja
- Vijek trajanja svrdla

- Micro drilling
- Deep hole drilling
- Vibration assisted drilling
- Drilling axial force
- Drilling torque
- Drill lifetime

Oznaka	Jedinica	Opis
2φ	°	vršni kut svrdla
A	mm	amplituda vibracija
a_p	mm	dubina rezanja
b	mm	duljina glavne oštrice
d_1	mm	promjer svrdla
d_c	mm	promjer jezgre
f	mm/okr.; Hz	posmak, mm/okretaju svrdla; frekvencija
f_r	Hz	frekvencija vrtnje svrdla
f_v	Hz	frekvencija vibracija
F_z	N	aksijalna sila bušenja
F_c	N	glavna sila rezanja
F_{cp}	N	glavna sila rezanja poprečne oštrice
F_f	N	posmična sila
F_p	N	natražna sila
F_R	N	rezultantna sila rezanja
F'_R	N	rezultantna sila u X-Y ravnini
F_x	N	komponenta rezultante sile rezanja u smjeru X osi
F_y	N	komponenta rezultante sile rezanja u smjeru Y osi
F_z	N	komponenta rezultante sile rezanja u smjeru Z osi
h	mm	debljina čestice prije deformacije
h_i	mm	visina izvlačenja svrdla bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla

Oznaka	Jedinica	Opis
h_v	mm	aksijalna debljina čestice prije deformacije
L	mm	dubina provrta
M_u	Nm	ukupni moment rezanja
n	min^{-1}	učestalost vrtnje glavnog vretena
P	mm	Dubina koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem
r_A		omjer amplituda
r_e	mm	radijus oštrice alata
r_f		omjer frekvencija vibracija i vrtnje svrdla
a_p	mm	dubina rezanja
t	s	vrijeme
t_b	s	vrijeme bušenja
v_c	m/min	brzina rezanja
v_f	mm/min	posmična brzina
z	mm	aksijalni pomak svrdla
α	°	kut stražnje površine
α_e	°	efektivni kut stražnje površine
γ	°	kut prednje površine
γ_e	°	efektivni kut prednje površine
β	°	kut klina
η_d	°	dinamički kut posmaka
θ	°	kut rotacije svrdla
λ	°	kut trenja
ψ_p	°	kut poprečnog brida
ϕ	°	kut smicanja
ϕ_d	°	dinamički kut smicanja
ω_s	°	kut spiralnog žlijeba

Kratica	Opis
AE	Akustična emisija (<i>Accoustic Emission</i>)
EDM	Obrada elektroerozijom (<i>Electro Discharge Machining</i>)
FFT	Brza Fourierova transformacija (<i>Fast Fourier Transformation</i>)
FRP	Vlaknima ojačani polimer (<i>Fibre-Reinforced Polymer</i>)
GFRP	Polimer ojačan staklenim vlaknima; stakloplastika (<i>Glass Fiber-Reinforced Polymer</i>)
GUI	Grafičko korisničko sučelje (<i>Graphical User Interface</i>)
HFVAD	Bušenje potpomognuto vibracijama visokih frekvencija (<i>High Frequency Vibration Assisted Drilling</i>)
HSS	Brzorezni čelik (<i>High Speed Steel</i>)
LFHAVAD	Bušenje potpomognuto vibracijama nižih frekvencija i većih amplituda (<i>Low Frequency High Amplitude Vibration Assisted Drilling</i>)
LFVAD	Bušenje potpomognuto vibracijama niskih frekvencija (<i>Low Frequency Vibration Assisted Drilling</i>)
MEMS	Mikroelektromehanički sustavi (<i>Microelectromechanical systems</i>)
MUSM	Mikroultrazvučno bušenje (<i>Micro Ultrasonic Machining</i>)
PCB	Tiskalne pločice (<i>Printed Circuit Board</i>)
RMS	Efektivna vrijednost (<i>Root Mean Square</i>)
SHIP	Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje
TM	Tvrđi metal
UV	Ultrazvučne vibracije (<i>Ultrasonic Vibrations</i>)
VAD	Bušenje potpomognuto vibracijama (<i>Vibration Assisted Drilling</i>)
WC	Volframov karbid (<i>Tungsten Carbide</i>)

Slika 1.1 Primjeri primjene mikrobušenja.....	1
Slika 1.2 Usporedba geometrije provrta i pretaljenog sloja kod bušenja legure nikla mikro EDM postupkom (a, d), laserom (b, e) i mehaničkim mikrobušenjem (c, f) [4, 5]	2
Slika 1.3 Glavni izazovi kod primjene mehaničkog mikrobušenja.....	3
Slika 2.1 Prikaz svrdla s dvije oštrice	9
Slika 2.2 Tipični oblici loma zbog izvijanja na (a) početku i (b) tijekom bušenja na dubini provrta $L \geq 2d$ [7]	14
Slika 2.3 a) utjecaj učestalosti vrtnje na silu izvijanja; b) utjecaj aksijalne sile na kritičnu frekvenciju vrtnje [47].....	16
Slika 2.4 Utjecaj brzine rezanja na aksijalnu silu kod mikrobušenja čelika svrdlom promjera 0,2 mm [29]	16
Slika 2.5 Utjecaj posmaka na aksijalnu silu i moment mikrobušenja [21]	18
Slika 2.6 Promjena aksijalne sile i momenta s dubinom provrta kod mikrobušenja različitih materijala [21]	19
Slika 2.7 Varijacija aksijalne sile i momenta povećanjem dubine mikrobušenja svrdlom promjera 0,5 mm [18].....	19
Slika 2.8 Primjer dugih odvojenih čestica na svrdlu prilikom mikrobušenja	20
Slika 2.9 Usporedba graničnog momenta loma svrdla T_L i momenta bušenja [19]	22
Slika 2.10 Promjena aksijalne sile prije loma s obzirom na vrijeme bušenja [37]	23
Slika 2.11 Princip bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla	24
Slika 2.12 Moment i aksijalna sila tijekom kontinuiranog bušenja provrta $d = 0,6$ mm, $L = 1$ mm, u čeliku Cr18Ni9Ti [19].....	24
Slika 2.13 Moment i aksijalna sila tijekom isprekidanog bušenja provrta $d = 0,6$ mm, $L = 1$ mm, u 3 jednaka koraka od 0,35 mm, u čeliku Cr18Ni9Ti [19]	25
Slika 2.14 Ovisnost vijeka trajanja o dubini koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem [37]	27
Slika 2.15 Vrijeme potrebno za izradu provrta $L = 7$ mm, $d = 0,5$ mm u ovisnosti o posmaku f i dubini koraka P	28
Slika 2.16 Utjecaj zaobljenja rezne oštrice alata i debljine deformirane čestice na efektivni kut prednje površine alata.....	29

Slika 2.17 Von Mises-ova raspodjela naprezanja za različite omjere debljine odvojene čestice i radijusa alata [60]	30
Slika 2.18 Efekt veličine geometrije svrdla na relativnu aksijalnu silu [29].....	30
Slika 2.19 Spiralni tragovi zbog vrludanja svrdla promjera 0,3 mm na obratku od čelika [7] ..	32
Slika 2.20 Varijacija aksijalne sile i momenta prilikom vrludanja svrdla promjera 0,9 mm [18]	32
Slika 2.21 Shematski prikaz procesa obrade odvajanjem čestica	35
Slika 2.22 Shematski prikaz sila bušenja na elementarni dio oštrice kod modela kosog rezanja [73, 74, 75]	36
Slika 3.1 Vrste obrade odvajanjem čestica potpomognute vibracijama: a) vibracije u smjeru brzine rezanja; b) u smjeru posmaka.....	38
Slika 3.2 Trajektorije dviju oštrica svrdla kod bušenja bez primjene vibracija ($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 0$, $A = 0$)	40
Slika 3.3 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama ($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 3$, $A = 2,5 \mu\text{m}$).....	43
Slika 3.4 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama ($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 3$, $A = 2 \mu\text{m}$).....	43
Slika 3.5 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama ($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 2$, $A = 2,5 \mu\text{m}$).....	44
Slika 3.6 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama ($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 2$, $A = 10 \mu\text{m}$).....	44
Slika 3.7 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama ($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 4$, $A = 20 \mu\text{m}$).....	45
Slika 3.8 Krivulje prijelaza iz kontinuiranog u isprekidano rezanje za bušenje svrdlima s dvije oštrice	46
Slika 3.9 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama ($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 3$, $A = 5 \mu\text{m}$).....	46
Slika 3.10 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama ($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 3$, $A = 10 \mu\text{m}$)	48
Slika 3.11 Primjeri kompleksnijih preklapanja trajektorija dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama	48
Slika 3.12 Utjecaj promjene frekvencije vrtnje uz istu vrijednost amplitude na promjenu efektivnog kuta.....	49
Slika 3.13 Raspon promatranih omjera frekvencija u istraživanju	50

Slika 3.14 Različite vrijednosti aksijalnih brzina i omjera R_c i R_p u ovisnosti o različitim frekvencijama vibracija [10]	59
Slika 3.15 Veza između trošenja alata i omjera vremena rezanja R_c i omjera pozitivne brzine R_p [10]	60
Slika 4.1 Ispitni postav primijenjen u eksperimentalnom dijelu istraživanja	64
Slika 4.2 Stroj za mikrobušenje.....	65
Slika 4.3 Motorvreteno HSTEC-HSM080AA-V01-LK719-55	66
Slika 4.4 Pogonske karakteristike ugradbenog motora $E+A$ mW 7/7-2-267d/282dr0	66
Slika 4.5 Linerni motor Siemens 1FN3050-2WC00-0EA1	67
Slika 4.6 Linearni davač položaja Heidenhein LC 483 ML-170	67
Slika 4.7 Upravljački dio stroja za mikrobušenje.....	68
Slika 4.8 GUI stroja za mikrobušenje	68
Slika 4.9 Piezoelektrični aktuator PI P-842.60 s pojačalom PI- E-505.00.....	69
Slika 4.10 Izvedba sustava za generiranje vibracija sa senzorom sile i momenta	71
Slika 4.11 Generator funkcije HP 3312A.....	71
Slika 4.12 Modul za akviziciju National Instruments 9234	72
Slika 4.13 Senzor sile i momenta Kistler 9345A s nabojnim pojačalom Kistler 5073	73
Slika 4.14 Senzor vibracija i mjesto ugradnje u eksperimentalnom postavu.....	74
Slika 4.15 GUI mjerne aplikacije za prikaz i upravljanje akvizicijom signala	75
Slika 4.16 GUI mjerne aplikacije za upravljanje akvizicijom i spremanjem podataka	76
Slika 4.17 GUI mjerne aplikacije s prikazom spremljenih vrijednosti signala	76
Slika 5.1 Uzorci iz aluminija korišteni za eksperimentalna bušenja	78
Slika 5.2 SEM snimke vrha svrdla korištenog u eksperimentu.....	79
Slika 5.3 Glavne dimenzije svrdla <i>Gühring</i> 706 HVM 0,5 mm	80
Slika 5.4 Signali F_z i M kod bušenja bez periodičkog izvlačenja svrdla s parametrima $n = 12000 \text{ min}^{-1}$ i $f = 0,0075 \text{ mm/okr.}$	81
Slika 5.5 Signali F_z i M kod bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla s parametrima $n = 12000 \text{ min}^{-1}$ i $f = 0,0075 \text{ mm/okr.}$, $P = 0,2 \text{ mm}$	82
Slika 5.6 Primjer prikaza plana s tri faktora za opis nelinearnih odziva: (a) puni faktorijski plan na tri razine, (b) Box-Wilsonov centralno kompozitni plan, (c) Box-Behnkenov plan [140]	83
Slika 5.7 Dijagram interno studentiziranih rezidualnih odstupanja za linearni matematički model za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja.....	97

Slika 5.8 Dijagram rezidualnih odstupanja u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja	98
Slika 5.9 Slučajno rasipanje rezidualnih odstupanja u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za linearni matematički model za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja.....	98
Slika 5.10 Dijagram stvarnih vrijednosti u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja	99
Slika 5.11 Dijagram interno studentiziranih rezidualnih odstupanja za linearni matematički model za izračunavanje momenta mikrobušenja	101
Slika 5.12 Dijagram rezidualnih odstupanja u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje momenta mikrobušenja	102
Slika 5.13 Slučajno rasipanje rezidualnih odstupanja u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za linearni matematički model za izračunavanje momenta mikrobušenja.....	102
Slika 5.14 Dijagram stvarnih vrijednosti u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje momenta mikrobušenja	103
Slika 5.15 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti sile F_z mikrobušenja o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 2 \text{ mm}$, $n = 12000 \text{ min}^{-1}$).....	104
Slika 5.16 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti sile F_z mikrobušenja o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 6 \text{ mm}$, $n = 12000 \text{ min}^{-1}$).....	104
Slika 5.17 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti momenta M mikrobušenja o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 2 \text{ mm}$, $n = 12\,000 \text{ min}^{-1}$).....	105
Slika 5.18 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti momenta M mikrobušenja o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 6 \text{ mm}$, $n = 12\,000 \text{ min}^{-1}$).....	105
Slika 5.19 Dijagram interno studentiziranih rezidualnih odstupanja za linearni matematički model za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama.....	110
Slika 5.20 Dijagram rezidualnih odstupanja u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	110
Slika 5.21 Slučajno rasipanje rezidualnih odstupanja u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za linearni matematički model za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	111
Slika 5.22 Dijagram stvarnih vrijednosti u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	111
Slika 5.23 Dijagram interno studentiziranih rezidualnih odstupanja za linearni matematički model za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	114

Slika 5.24 Dijagram rezidualnih odstupanja u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	114
Slika 5.25 Slučajno rasipanje rezidualnih odstupanja u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusaza linearni matematički model za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	115
Slika 5.26 Dijagram stvarnih vrijednosti u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	115
Slika 5.27 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti sile F_z mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 2$ mm, $n = 12000$ min ⁻¹ , $rf = 1$, $A = 0,005$ mm).....	116
Slika 5.28 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti sile F_z mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 6$ mm, $n = 12000$ min ⁻¹ , $rf = 1$, $A = 0,005$ mm).....	117
Slika 5.29 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti sile F_z mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i frekvenciji vrtnje f_r (dubina provrta $L = 2$ mm, $P = 0,1$ mm, $rf = 1$, $A = 0,005$ mm).....	117
Slika 5.30 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti sile F_z mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i frekvenciji vrtnje f_r (dubina provrta $L = 6$ mm, $P = 0,3$ mm, $rf = 1$, $A = 0,005$ mm).....	118
Slika 5.31 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti momenta M mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 2$ mm, $n = 12000$ min ⁻¹ , $rf = 1$, $A = 0,005$ mm).....	118
Slika 5.32 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti momenta M mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 6$ mm, $n = 12000$ min ⁻¹ , $rf = 1$, $A = 0,005$ mm).....	119
Slika 5.33 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti momenta M mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i frekvenciji vrtnje f_r (dubina provrta $L = 2$ mm, dubina koraka $P = 0,1$ mm, $rf = 1$, $A = 0,005$ mm)	119
Slika 5.34 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti momenta M mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i frekvenciji vrtnje f_r (dubina provrta $L = 6$ mm, dubina koraka $P = 0,3$ mm, $rf = 1$, $A = 0,005$ mm)	120
Slika 6.1 Primjeri veličine odvojenih čestica kod bušenja bez primjene vibracija a) s početka bušenja, b) ostatak odvojenih čestica na svrdlu	123
Slika 6.2 Primjer veličine odvojenih čestica kod bušenja potpomognutoga vibracijama	123

Slika 6.3 Usporedba vijeka trajanja svrdla kod bušenja provrta dubine $L = 6$ mm, bez vibracija i bušenja potpomognutoga vibracijama, s parametrima bušenja $n = 18000 \text{ min}^{-1}$, $f = 0,0025 \text{ mm/okr.}$ i parametrima vibracija $f_v = 300 \text{ Hz}$, $A = 0,005 \text{ mm}$	124
Slika 6.4 Usporedba vijeka trajanja svrdla za bušenje provrta dubine $L = 6$ mm, bez vibracija i bušenja potpomognutoga vibracijama, s parametrima bušenja $n = 18\,000 \text{ min}^{-1}$, $f = 0,0075 \text{ mm/okr.}$ i parametrima vibracija $f_v = 300 \text{ Hz}$, $A = 0,005 \text{ mm}$	124

Tablica 3.1 Pregled istraživanja vezanih uz bušenje većih promjera potpomognuto vibracijama niskih frekvencija (LFVAD)	51
Tablica 3.2 Pregled istraživanja vezanih uz mikrobušenje potpomognuto vibracijama niskih frekvencija	52
Tablica 4.1 Osnovne tehničke karakteristike sustava za generiranje vibracija	70
Tablica 4.2 Osnovne tehničke karakteristike mjernog sustava sile i momenta bušenja	73
Tablica 5.1 Karakteristike materijala AlMg3	78
Tablica 5.2 Geometrijske karakteristike svrdla <i>Gühring</i> 706 HVM	79
Tablica 5.3 Rasponi vrijednosti parametara u pokusima	83
Tablica 5.4 Stanja pokusa mikrobušenja bez vibracija generirana programom <i>Design-Expert 10</i>	85
Tablica 5.5 Stanja pokusa mikrobušenja potpomognutoga vibracijama generirana programom <i>Design-Expert 10</i>	86
Tablica 5.6 Rezultati mjerenja aksijalne sile i momenta mikrobušenja bez vibracija po stanjima plana pokusa	94
Tablica 5.7 Pregled članova modela mikrobušenja	95
Tablica 5.8 Analiza varijance za izrađeni linearni matematički model za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja	95
Tablica 5.9 Statističke veličine koje opisuju kvalitetu linearnog matematičkog modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja	96
Tablica 5.10 Procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija... ..	97
Tablica 5.11 Analiza varijance za izrađeni linearni matematički model za izračunavanje momenta mikrobušenja	99
Tablica 5.12 Statističke veličine koje opisuju kvalitetu linearnog matematičkog modela za izračunavanje momenta mikrobušenja	100
Tablica 5.13 Procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija.	101
Tablica 5.14 Rezultati mjerenja aksijalne sile i momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama po stanjima plana pokusa	106
Tablica 5.15 Pregled članova modela mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	107

Tablica 5.16 Analiza varijance za izrađeni linearni matematički model za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	108
Tablica 5.17 Statističke veličine koje opisuju kvalitetu linearnog matematičkog modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	108
Tablica 5.18 Procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija.	109
Tablica 5.19 Analiza varijance za izrađeni linearni matematički model za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	112
Tablica 5.20 Statističke veličine koje opisuju kvalitetu linearnog matematičkog modela za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama	112
Tablica 5.21 Procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija.	113

1.1. Motivacija

Minijaturizacija komponenti nosi sa sobom veću zastupljenost proizvoda s mikroznačajkama, kao što su mikroprovrti, te zahtijeva učinkovite tehnologije mikroobrade koje imaju bolju točnost, pouzdanost i proizvodnost. Mikroprovrti najčešće nalaze primjenu u preciznim proizvodnim industrijama u rasponu od proizvodnje komponenti za protok fluida (slika 1.1), komponenti u optičkoj i automobilskoj industriji, medicinske opreme, elektroničkih komponenti, posebice tiskanih pločica – (PCB) do komponenti mikroelektromehaničkih sustava (MEMS) [1].



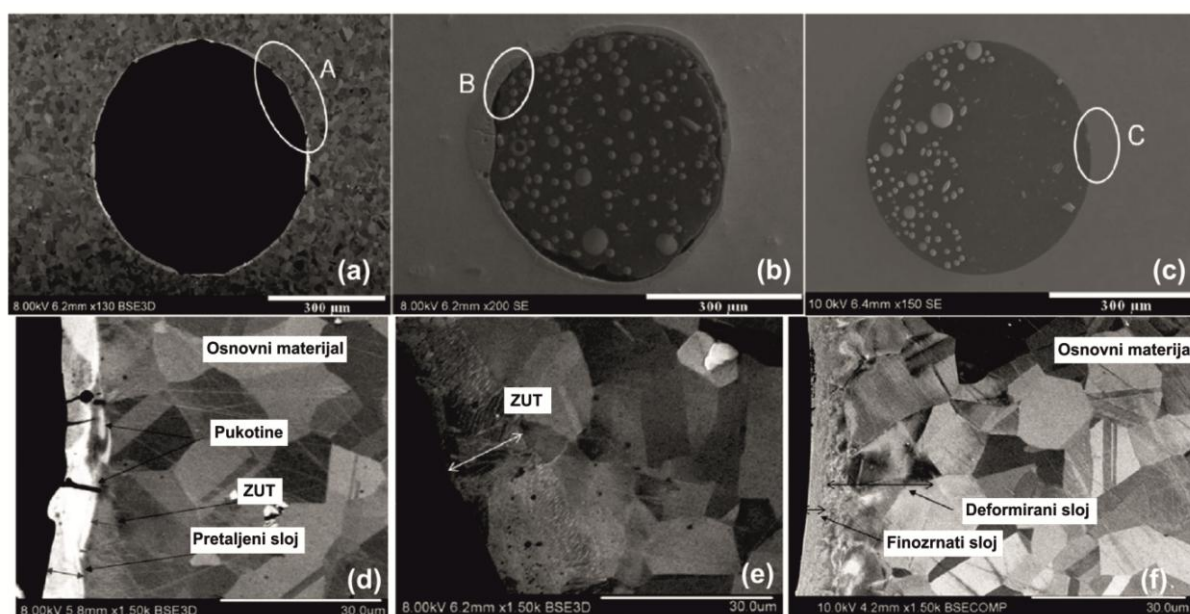
Slika 1.1 Primjeri primjene mikrobušenja

Uz mehanički proces mikrobušenja, koriste se različite metode mikrobušenja, kao što su obrada elektroerozijom (EDM), lasersko mikrobušenje, elektrokemijsko, mikrobušenje ionskim i elektronskim mlazom, mikroultrazvučno bušenje (MUSM), bušenje vodenim mlazom i mikroprobijanje. Parametri za odabir odgovarajuće tehnike mikrobušenja su vrsta materijala, veličina i oblik provrta, omjer dubine i promjera provrta, trošak procesa itd.

Kod zahtjeva za izradom provrta s velikim omjerom dubine i promjera uglavnom se preferira mikroobrada elektroerozijom, no njom se mogu obrađivati samo materijali koji su vodiči struje. Također se mogu javiti problemi vezani za integritet površine, što uključuje formiranje pretaljenih slojeva i zone utjecaja topline (ZUT), mikropukotine, tvrdoću i zaostala vlačna naprezanja. Svi ovi čimbenici bitno utječu na vijek trajanja i zamor komponenti.

Točnost obrade elektroerozijom ograničena je trošenjem alata, što je neizbježna posljedica u procesu, jer iskre generirane za obradu istodobno uklanjaju dio alata tj. elektrode.

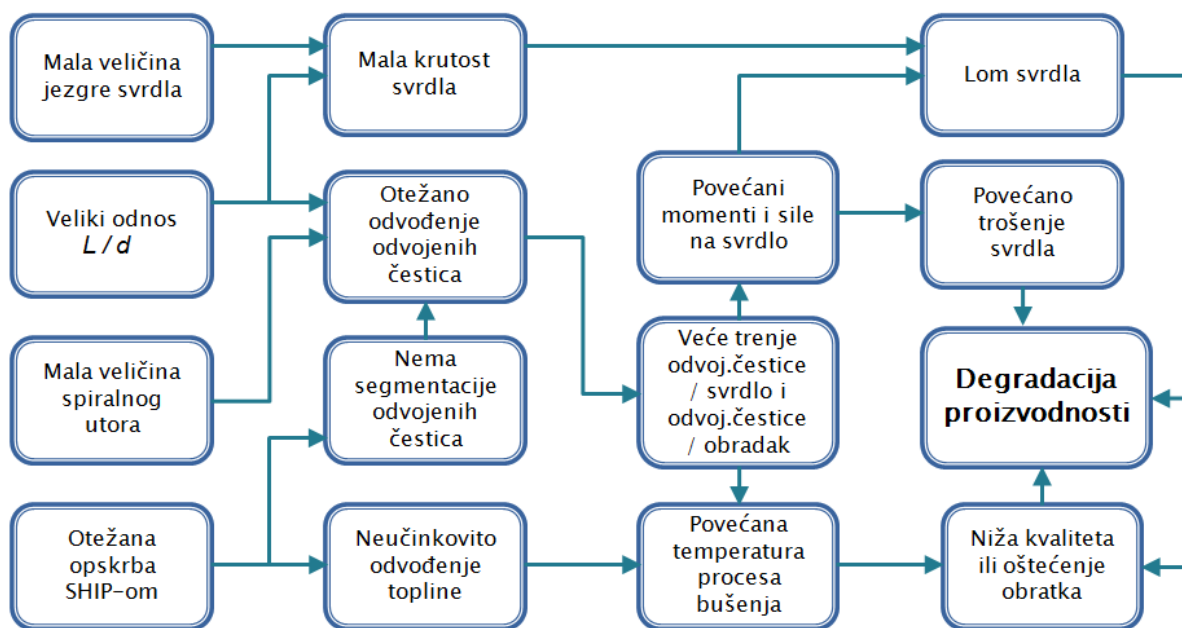
U usporedbi s postupkom mikroobrade elektroerozijom i laserskim mikrobušenjem mehaničko mikrobušenje povoljan je izbor kod procesa izrade mikroprovrti sa stajališta ukupnih troškova. Prvenstveno se to odnosi na minimiziranje rada na površini izratka zbog manje kontaminacije te, uzimajući u obzir materijal i svojstva izradaka, kraće ukupno vrijeme obrade [2], uz potencijal postizanja bolje kružnosti provrta i integriteta površine [3], kao što je prikazano na primjeru na slici 1.2. Kratko vrijeme obrade također je velika prednost u odnosu na ostale, prethodno navedene, netradicionalne procese.



Slika 1.2 Usporedba geometrije provrta i pretaljenog sloja kod bušenja legure nikla mikro EDM postupkom (a, d), laserom (b, e) i mehaničkim mikrobušenjem (c, f) [4, 5]

U usporedbi s bušenjem provrta većih promjera, mikrobušenje predstavlja veći izazov u mnogim aspektima. Postoje razne vrste poteškoća i problema kod mikrobušenja i mnogi od njih su međusobno povezani. Mikrosvrkla su podvrgnuta značajnom proklizavanju tijekom početnog prodiranja u obradak i vrlo mala radijalna sila pri ulasku svrdla u materijal obratka može dovesti do vrludanja i loma svrdla [6]. Zbog velikog omjera L/d i male veličine promjera svrdla, otežano je odvođenje odvojenih čestica, što uz nemogućnost dobave SHIP-a u zonu rezanja, dovodi do povećanja trenja uz otežanu disipaciju topline, posebno kod provrta s visokim omjerom L/d . To može povećati sile, moment bušenja te veći intenzitet trošenja, što uz malu krutost svrdla i utjecaj relativno veće debljine jezgre svrdla, češće dovodi do loma alata [7] i u konačnici manje proizvodnosti, a ponekad i do gubitka obratka. Glavni izazovi

primjene mehaničkog mikrobušenja, njihova interakcija i posljedice shematski su prikazani na slici 1.3.



Slika 1.3 Glavni izazovi kod primjene mehaničkog mikrobušenja

Neki problemi mogu se riješiti podešavanjem parametara obrade ili prijevremenim mijenjanjem alata, a neki teže, prvenstveno zbog ograničenja mehanizma procesa bušenja i materijala za izradu svrdala. Bušenje s periodičkim izvlačenjem (retrakcijom) svrdla iz provrta koristi se radi boljeg pristupa SHIP-a u zonu kontakta oštrice svrdla i obratka te lakšeg odvođenja odvojenih čestica. Pošto se kod dubokoga mikrobušenja s periodičkim izvlačenjem dubina koraka posmaka mora značajno smanjiti, povećava se broj izvlačenja, što povećava vrijeme bez bušenja, povećavajući ukupno vrijeme obrade, što direktno smanjuje proizvodnost.

Mogući napredak u rješavanju navedenih problema je mikrobušenje potpomognuto vibracijama. Bušenje potpomognuto vibracijama je hibridni proizvodni proces koji se odvija kada se vibracije, bilo svrdla ili obratka, superponiraju na proces bušenja. U tom slučaju, proces bušenja direktno uklanja materijal, dok proces vibriranja pomaže odvajanju materijala mijenjajući uvjete bušenja [8]. Bušenje potpomognuto vibracijama može se podijeliti na bušenje uz pomoć vibracija niskih frekvencija (LFVAD) u rasponu od 0,1 Hz do 1000 Hz te bušenje uz pomoć visokih frekvencija (HFVAD) u rasponu od 1 kHz do 80 kHz. Bušenje

potpomognuto vibracijama ima mnoge jedinstvene značajke, poput udarnog djelovanja i odvajanja svrdla, promjene posmične brzine i efektivnih kutova rezanja u procesu bušenja.

Primjenom vibracija nižih frekvencija u smjeru osi svrdla stvaraju se tanje i kraće odvojene čestice, koje lakše izlaze izvan provrta, smanjujući prosječne sile na svrdlo, temperaturu procesa i trošenje svrdla, što može produžiti vijek trajanja mikrosvrdla [9, 10, 11].

Izazovi vezani uz bušenje potpomognuto vibracijama su nedostatak modela mehanizama obrada odvajanjem čestica uz pomoć vibracija, nepostojanje standarda odabira parametara i nedovoljna razina praktičnoga znanja [12], što je posebno naglašeno kod mikrobušenja zbog efekta veličine i nemogućnosti korištenja proporcionalnog smanjenja parametara konvencionalnog bušenja potpomognutoga vibracijama te problema vezanih za smanjenu krutost mikrosvrdala.

1.2. Cilj i hipoteza rada

Cilj istraživanja je razvoj sustava za odabir parametara mikrobušenja dubokih provrta potpomognutoga vibracijama za unapređenje tehnološkog učinka procesa smanjenjem veličine odvojenih čestica i sila rezanja u svrhu postizanja veće proizvodnosti, smanjenja trošenja i produljenja vijeka trajanja mikrosvrdla u usporedbi s konvencionalnim mikrobušenjem.

Hipoteza istraživanja: Moguće je izvesti model dubokoga mikrobušenja potpomognutoga vibracijama koji bi definirao optimalne odnose između parametara bušenja (frekvencija vrtnje, posmak i retrakcija svrdla) i parametara vibracija (frekvencija i veličina amplitude).

Očekivani znanstveni doprinos predloženog istraživanja je mogućnost izdvajanja značajki koje imaju značajnu korelaciju s parametrima bušenja i vibracija te položajem svrdla u provrtu. Razvijeni model omogućio bi odabir i prilagodbu parametara mikrobušenja dubokih provrta potpomognutoga vibracijama u cilju smanjenja veličine odvojenih čestica i sila rezanja, uzimajući u obzir različite faktore koji utječu na ovaj hibridni proces.

1.3. Metodologija i plan istraživanja

1.3.1. Razvoj eksperimentalnog postava

U cilju strukturiranja modela mikrobušenja potpomognutoga vibracijama i njegove verifikacije, realiziran je eksperimentalni ispitni postav koji se zasniva na konstrukciji bušilice s visokobrzinskim motorvretenom maksimalne učestalosti vrtnje vretena do 40000 min^{-1} i s posmičnom osi pogonjenoj visokodinamičkim linearnim motorom. Sustav za generiranje vibracija instaliran je ispod stezne naprave tako da su vibracije bile generirane sa strane obratka. Sustav za generiranje vibracija temelji se na piezoelektričnom aktuatoru koji može generirati vibracije frekvencija do 2 kHz uz vrijednosti amplituda do $90 \text{ }\mu\text{m}$.

U dostupnoj literaturi navode se realizacije generatora vibracija i preko elektromagnetskih vibratora (solenoid), linearnih motora, ekscentara, grebena ili preko rješenja na temelju samovibrirajućeg rezonantnog sustava za bušenje. Pošto ubrzanje, a time i inercijska sila, raste s kvadratom frekvencije, ispitivanja su se temeljila na vibracijama nižih frekvencija koje se u praksi mogu lakše realizirati i implementirati u postojeće strojeve. Kod dubokoga mikrobušenja, učestalosti vrtnje vretena za mikropromjere variraju od 6000 min^{-1} do 30000 min^{-1} (frekvencije vrtnje od 100 Hz do 500 Hz), ovisno o promjeru svrdla i materijalu obratka. Za frekvencije vibracija od primjerice 1 kHz, kontakt oštrice svrdla može biti prekinut i do 10 puta po okretaju za svrdlo s dvije oštrice, što kod mikrobušenja osigurava dovoljno kratke odvojene čestice. Sustav za nadzor procesa bušenja potpomognutoga vibracijama temelji se prvenstveno na podacima iz senzora sile, momenta i vibracija.

1.3.2. Plan pokusa

Istraživanje dubokoga mikrobušenja potpomognutoga niskofrekventnim vibracijama temeljilo se na sustavnom proučavanju procesa i usporedbi s konvencionalnim dubokim mikrobušenjem. Sva ispitivanja dubokoga mikrobušenja vršila su se standardnim svrdlima od tvrdog metala promjera 0,5 mm. Radi definiranja utjecaja primjene vibracija na duboko mikrobušenje, na svakom ispitnom uzorku vršila su se bušenja više provrta s nekoliko omjera dubine i promjera L / d od 6, 8 i 12 s i bez primjene niskofrekventnih vibracija. U svim ispitivanjima koristio se postupak bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla. Izrade provrta izvršene su u cilindričnim obradcima malih dimenzija kako bi njihova manja masa imala što manji utjecaj na vibracijski sustav. Materijal na kojem su izvršeni pokusi mikrobušenja bila je legura aluminija AlMg3. Radi reduciranja broja potrebnih bušenja provrta, analiza značajnosti

utjecaja faktora na odzivne veličine aksijalne sile i momenta te njihove interakcije, izvedena je planom pokusa metodom odzivne površine.

1.3.3. Modeliranje procesa mikrobušenja potpomognutoga vibracijama

Razvijen je matematički model procesa temeljen na eksperimentalnim rezultatima i s potencijalom za industrijsku primjenu. Značajke, tj. parametri uključeni u model su frekvencija vrtnje, posmična brzina, omjer frekvencije vrtnje i vibracija, veličina amplitude vibracija te dubina provrta i dubina koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla. Analiziran je njihov utjecaj na odzivne veličine sile, momenta rezanja i korelacija tih veličina s brojem probušenih provrta prije loma, tj. životni vijek svrdla te njihov međusobni utjecaj. U posljednjoj fazi istraživanja, izvršena je verifikacija postavljenog modela dubokoga mikrobušenja potpomognutoga vibracijama.

2. Mikrobušenje

Geometrija svrdla za bušenje ne temelji se na geometrijskim principima sličnosti za sve promjere [13] pa je, stoga, teško utvrditi preciznu definiciju gdje konvencionalno bušenje postaje mikrobušenje. Premda ne postoji određeni standard za definiranje mikrobušenja, definicija mikrobušenja, najčešće, ovisi o promjeru provrta. Ovisno o istraživaču, postoje različite definicije mikrobušenja. Tako, primjerice, Boswell definira mikrobušenje kao bušenje promjerima svrdala ispod 50 μm [14], Chen promjerima $\leq 0,5 \text{ mm}$ [15], a Chyan [16, 17] te Cheong [18] definiraju mikrobušenje kao bušenje svrdlima $\leq 0,5 \text{ mm}$, uz uvjet da je omjer duljine i promjera svrdla L / d veći od 10. Kudla [7] definira mikrosvrdlo kao svrdlo s promjerom manjim od 0,5 mm, dok u drugim radovima isti autor [19, 20, 21] s promjerom manjim od 1 mm. Prema Masuzawi [1], bušenje provrta promjera manjih od 1 mm mogu se nazvati mikrobušenje, što se navodi i kod većine radova ostalih istraživača [22, 23, 24, 25, 26, 27, 6, 28, 29, 30]. U ovom radu, bit će prihvaćena definicija kojom je mikrobušenje bušenje provrta s promjerima manjim od 1 mm.

Osim toga, iz praktičnih iskustava, konvencionalna svrdla s promjerom $> 1 \text{ mm}$ podložnija su trošenju prije samog loma, dok mikrosvrdla s promjerima $\leq 1 \text{ mm}$ imaju problem preranog loma, budući da su puno vitkija od konvencionalnih svrdala, što je posebice izraženo kod dubokoga mikrobušenja. Imran [6] i Liu [31] navode da je kod dubokoga mikrobušenja omjer duljine i promjera svrdla L / d veći od 5, dok je kod većine radova ostalih istraživača [32, 33, 34, 35, 36, 37, 10] taj omjer veći od 10. U ovom radu, bit će prihvaćena definicija kojom je duboko mikrobušenje proces bušenja svrdlima promjera manjeg od 1 mm, s omjerom duljine i promjera svrdla L / d većim od 10.

Općenito se tehnološka izvedba bušenja, pa tako i mikrobušenja određuje mjerenjem aksijalne sile, zakretnog momenta, vijekom trajanja svrdla, točnosti i kvalitetom površine obratka [13]. Na njih utječu varijable kao što su karakteristike materijala svrdla i obratka, geometrija svrdla, parametri i strategija bušenja, primjena SHIP-a, a dodatno za mikrobušenje i efekt veličine (proporcionalnost s konvencionalnim bušenjem i utjecaj omjera debljine nedeformirane odvojene čestice i radijusa oštice alata) te vrludanje svrdla pri ulasku u obradak i time vezano korištenje pilotskog provrta. Važnost svih navedenih varijabli iznimno je značajna kod procesa mikrobušenja, gdje i male varijacije mogu učiniti proces

neučinkovitim [20]. Stoga je važno razumjeti kvantitativne odnose između parametara obrade i mjera za optimizaciju procesa što, u praksi, ovaj zadatak dokazano čini vrlo složenim.

2.1. Značajke spiralnog mikrosvrkla

Spiralno svrdlo je jedan od najčešćih alata u industriji i smatra se jednim od složenijih geometrija alata za obradu odvajanjem čestica. Razvijene su brojne vrste geometrija i materijala svrdala te strategije za prilagodbu postupka bušenja specifičnostima materijala izradaka, kvaliteti provrta i potrebnom stupnju pouzdanosti procesa. Kod procesa bušenja, za razliku od postupaka glodanja i tokarenja, zona rezanja nalazi se duboko u provrtu uz ograničen prostor za uklanjanje odvojenih čestica. Duž reznih oštrica postoje varijacije geometrijskih parametara i brzine rezanja, a proizvodnja topline u procesu je znatna zbog neodgovarajuće opskrbe SHIP-om i trenja između alata, odvojenih čestica i obratka [38].

2.1.1. Geometrija spiralnog mikrosvrkla

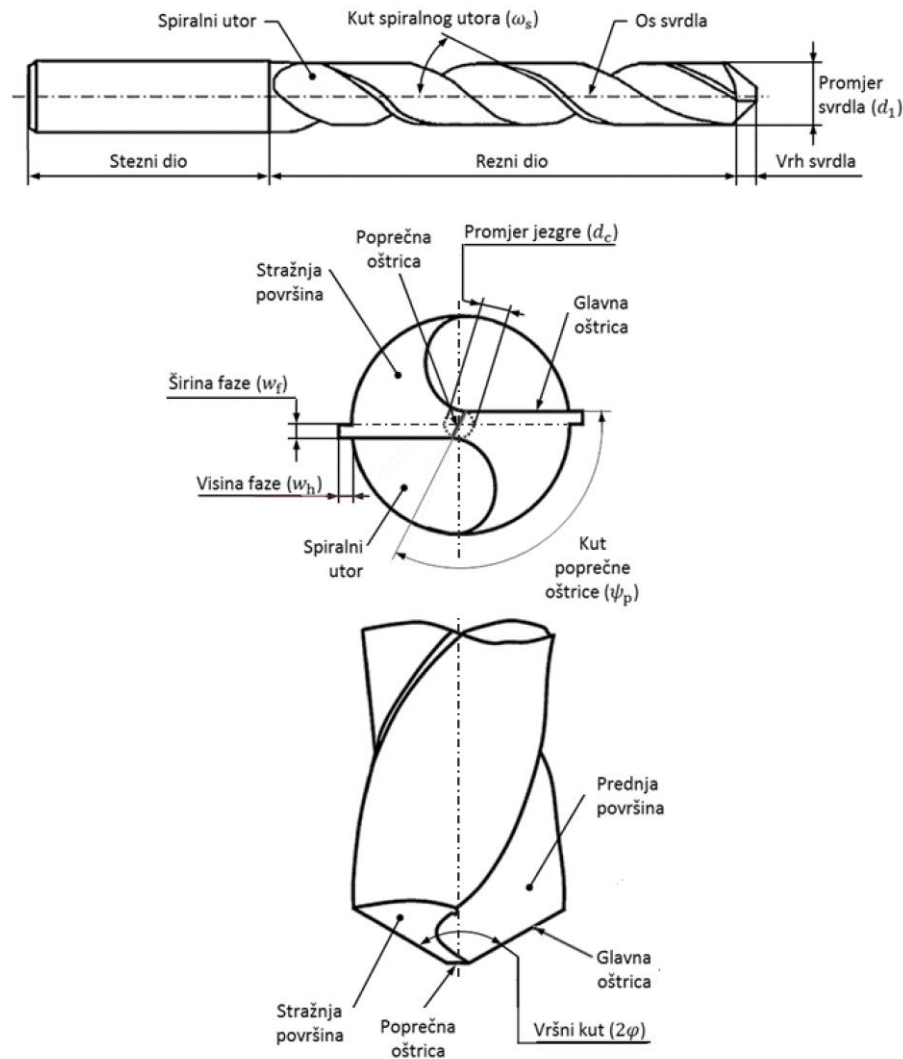
Većina operacija mikrobušenja izvedena je spiralnim svrdlima. Osnovna geometrija spiralnog svrdla je općenito podijeljena na tri glavna dijela (slika 2.1): stezni dio, za koji se svrdlo drži i pokreće; rezni dio s dva spiralna utora koja su simetrična oko osi svrdla kako bi pružili prostor za izvlačenje odvojenih čestica i opskrbu SHIP-om; i vrh svrdla, koji se sastoji od glavnih i poprečnih oštrica gdje dolazi do rezanja materijala [13].

Analizom dosadašnjih istraživanja geometrije svrdla konvencionalnog bušenja većih promjera [13, 38, 39, 40], izdvojeni su neki od značajnijih parametara za određivanje izvedbe svrdla koji se mogu primijeniti i na mikrosvrdla:

- promjer jezgre svrdla (d_c),
- vršni kut (2φ),
- kut spiralnog utora na vanjskom promjeru (ω_s),
- kut stražnje površine na vanjskom promjeru (α).

Ti parametri izravno utječu na normalni i efektivni kut prednje površine, od vanjskog promjera svrdla prema središtu svrdla. Male varijacije u geometrijskim parametrima i simetriji mogu rezultirati značajnim promjenama u izvedbi procesa bušenja. Vrijednosti parametara geometrije svrdla mogu odstupati ovisno o proizvođaču svrdla i čak ovisno o seriji proizvodnje istog proizvođača. Već mala odstupanja mogu promijeniti aksijalnu silu i

moment za pojedino svrdlo, što je posebice važno kod mikrobušenja, stoga granica pogreške izrade može biti postavljena izrazito nisko.



Slika 2.1 Prikaz svrdla s dvije oštrice

Promjer jezgre d_c je promjer na najužem dijelu svrdla, kao što je prikazano na slici 2.1. Općenito, d_c se povećava od vrha svrdla do steznog dijela svrdla kako bi se osigurala veća čvrstoća u blizini steznog dijela svrdla. Glavni učinak povećanja d_c je ojačanje glavne oštrice u blizini vrha svrdla, što se može objasniti smanjenjem nominalnog kuta prednje površine na poprečnoj oštrici. S druge strane, veći d_c povezuje se s povećanjem duljine ruba poprečne oštrice, stoga je očekivana veća količina uklanjanja materijala ekstruzijom, a ne rezanjem glavnim oštricama. Ovo ekstruzijsko djelovanje rezultira povećanjem ukupne aksijalne sile. Povećanje promjera jezgre d_c , također, rezultira smanjenjem površine utora i ograničava evakuaciju odvojenih čestica, a povećava se i aksijalna sila i moment bušenja, uglavnom zbog

povećanja poprečne oštrice. S druge strane, smanjenjem promjera jezgre d_c smanjuje se i torzijska krutost spiralnog svrdla. Torzijska krutost je važan faktor, pošto presjek svrdla mora biti dovoljan za izdržavanje sila rezanja generiranih tijekom procesa bušenja. Torzijska krutost ovisi o poprečnom presjeku i momentu inercije površine te, načelno, za određeni tip materijala obratka postoji optimalna vrijednost debljine jezgre. Kod mikrosvrdala veća jezgra svrdla može omogućiti veći posmak, što je kod bušenja mikroprovrtu izrazito važno zbog mogućnosti ranog loma svrdla. Nedostatak veće vrijednosti d_c je smanjenje poprečnog presjeka spiralnog utora svrdla koji je nužan za odvođenje odvojenih čestica iz provrta.

Povećanje vršnog kuta (2φ) svrdla ima veći utjecaj u blizini poprečne oštrice nego na vanjskom promjeru svrdla. Za veći vršni kut svrdla znatno je povećan efektivni kut prednje površine γ_e blizu ruba poprečne oštrice i neznatno promijenjen na vanjskom promjeru svrdla. Ova mala promjena kuta prednje površine na vanjskom promjeru svrdla dovodi do nešto jače glavne oštrice, ali i nešto većih sila rezanja. S druge strane, kod manjeg vršnog kuta svrdla, znatno je smanjen γ_e u sredini svrdla, ali je neznatno povećan na vanjskom promjeru svrdla, što ukazuje na manje sile rezanja na vanjskom promjeru svrdla. Iz toga razloga, odabrati se manji vršni kut svrdla za bušenje materijala relativno male čvrstoće, uz manju čvrstoću oštrice svrdla u cilju smanjenja sila rezanja na vanjskom promjeru svrdla. Dok se svrdlo obično lomi na vanjskom promjeru svrdla tijekom obrade mekih metala, kod bušenja tvrdih metala najčešće se lomi u središtu svrdla. Povećanje vrijednosti vršnog kuta svrdla povećava aksijalnu silu i smanjuje zakretni moment na svrdlo, što može povećati vijek trajanja mikrosvrdla [34]. Velike vrijednosti vršnog kuta rezultiraju kraćim glavnim oštricama i bržem dostizanju punog kontakta glavnih oštrica svrdla u obratku, međutim i povećanjem mogućnosti vrludanja svrdla za vrijeme centriranja i početka prodiranja u obradak. Uobičajene vrijednosti 2φ su od 90° za mekše materijale do 130° za tvrde materijale obradaka.

Profil spiralnog utora trebao bi biti odabran kako bi se omogućio prostor za transport odvojenih čestice bez ugrožavanja torzijske krutosti alata. Općenito se odabire različita veličina kuta spiralnog utora ω_s za različite materijale izrade. Kut spiralnog utora zapravo određuje kut prednje površine svrdla i općenito se definira kao kut između ravnine paralelne s osi svrdla koja sadrži glavnu oštricu i ravnine koja je tangentna na površinu utora na glavnoj oštrici. Vrijednost ω_s općenito je najveća na vanjskom promjeru svrdla i postupno se smanjuje prema središtu, međutim, za praktične svrhe, ω_s se uzima kao kut prednje površine γ na vanjskom promjeru svrdla. Povećanje ω_s uzrokuje veliko povećanje efektivnog i normalnog

kuta prednje površine alata na vanjskom promjeru svrdla i manji porast u sredini svrdla te time rezultira povoljnijim rezanjem, ali i manjom čvrstoćom duž cijele oštrice, osobito na vanjskom promjeru svrdla. Općenito, veća vrijednost ω_s omogućuje dobro odvođenje odvojenih čestica, no doprinosi relativno slabijom glavnom oštricom, dok manja vrijednost ω_s omogućuje slabije odvođenje odvojenih čestica i čvršću glavnu oštricu. Čvršća glavna oštrica može se povezati s torzijskom krutošću svrdla, budući da maksimalna sila rezanja koju spiralno svrdlo može podnijeti ovisi o njegovoj torzijskoj krutosti. Uobičajene vrijednosti ω_s variraju između 25° i 40°, ovisno o materijalu obratka.

Funkcija kuta stražnje površine α je osiguranje slobodnog prostora iza glavne oštrice tako da svrdlo može slobodno rezati, bez kontakta stražnje površine i obratka. Općenito se kut stražnje površine mijenja od vanjskog promjera svrdla, gdje je najmanji, do najvećeg kuta u središtu svrdla. Veće vrijednosti kuta stražnje površine mogu dovesti do manjeg kuta klina (slabiji alat), što može dovesti do ranog loma ili trošenja svrdla. Manje vrijednosti mogu dovesti do pojave natražne sile, zbog kontakta između stražnje površine i obratka, elastične deformacije obratka te do pregrijavanja stražnje površine, što ima veliki utjecaj na proces bušenja potpomognutoga vibracijama.

Tri su glavne grupe mikrosvrđala, svrstane po veličini promjera d [20]:

- 0,5 - 1 mm – oblik sličan standardnim svrdlima, osim što nemaju utor u fazi koji formira podrez,
- 0,2 - 0,5 mm – nema faze, cijela površina je istog nazivnog promjera,
- < 0,2 mm – imaju stezni dio većeg promjera od promjera svrdla, veći omjer promjera jezgre d_c i promjera svrdla d , u usporedbi s prethodne dvije grupe.

Za mikrosvrđala postoje dvije glavne razlike u odnosu na konvencionalna svrdla. Prva je da je omjer duljine utora i promjera svrdla veći, što smanjuje krutost svrdla i druga, da je omjer promjera jezgre i promjera svrdla (d_c / d) veći zbog konstrukcije mikrosvrđala u cilju povećanja krutosti na savijanje [41]. To podrazumijeva da, za razliku od konvencionalnih svrdala, krutost savijanja ima veći utjecaj za mikrosvrđala. Vanjska opterećenja, kao što je aksijalna sila, značajno utječu na čvrstoću na savijanje, a zbog malih promjera svrdlo je sklono lomu. Važni geometrijski parametri, kao što su promjer i duljina utora zahtijevaju pažljiv odabir prije primjene mikrobušenja. Gong [42] je ustanovio kako smanjenje konvencionalnog svrdla na razinu mikrosvrđala utječe na aksijalnu i radijalnu silu rezanja. Omjeri promjera jezgre svrdla i promjera svrdla te duljine i promjera svrdla u mikrobušenju

veći su od onih kod konvencionalnog bušenja, što za posljedicu ima pojavu savijanja i izvijanja svrdla.

Utjecaj geometrije malih i mikrosvrđala eksperimentalnom analizom proveo je Kudla [19], gdje je bušenje svrdlom $d = 0,7$ mm u mjedi pokazalo kako je kod mikrobušenja utjecaj glavne i sporedne oštrice na moment i aksijalnu silu bušenja značajno manji, u usporedbi s bušenjem provrta većih promjera. Udio momenta generiranog na poprečnoj oštrici u ukupnoj vrijednosti momenta bio je 46% (taj udio je kod bušenja svrdlima većih promjera negdje oko 8%), dok je udio aksijalne sile na poprečnoj oštrici bio 60% (kod bušenja svrdlima većih promjera je 40%), pa bi smanjenje veličine poprečne oštrice imalo veliki utjecaj na opterećenje svrdla. Chen [15] ističe kako kod dubokoga mikrobušenja geometrija vrha nema utjecaja na moment bušenja, dok smanjenje vršnog kuta 2φ i povećavanje kuta stražnje površine α smanjuju veličinu aksijalne sile bušenja.

2.1.2. Materijali mikrosvrđala

Obično se zahtijeva da materijal svrdla ima svojstva visoke otpornosti na trošenje, krutost i tvrdoću pri višim temperaturama. Neki od uobičajenih komercijalno dostupnih materijala za izradu alata su brzorezni čelik (HSS), tvrdi metal (TM), kermet i polikristalinični dijamant (PCD). Među njima, HSS i TM najčešći su materijali za proizvodnju svrdala [13], jer imaju najpovoljniji omjer cijene i kvalitete te se stoga najčešće koriste i u industriji mikrobušenja. Većina operacija mikrobušenja izvodi se spiralnim svrdlima HSS, sinteriranim sitnozrnatim tvrdim metalima, kao K10 (95% WC, 5% Co) ili K20/K30, s većim udjelom kobalta, do 12% [7].

HSS (Cr4W6Mo5V2) ili HSCO (Cr4W6Mo5Co5V2) preferirani je izbor od strane mnogih proizvođača, uzimajući u obzir dobar vijek trajanja alata i minimalne troškove. Uglavnom se koriste za rezanje ugljičnog čelika, aluminija i mjedi, a dodani kobalt stvara bolja termička svojstva, što ga čini boljim izborom za rezanje tvrdog materijala. Brzorezni čelik se obično koristi u proizvodnoj industriji, jer je relativno jeftin i žilav, ali ima nekoliko ograničenja, kao što su slabija otpornost na trošenje i niža tvrdoća pri višim temperaturama.

TM se odnosi na legure načinjene metodama metalurgije praha, kao smjesa materijala tvrdih metala i vezivnih metala. Kobalt, u rasponu od 6-15% masenog udjela se koristi kao povoljan vezivni metal. Iako skup (3 – 5 puta skuplji od HSS svrdala) i krhak, TM ima veću otpornost na trošenje i višu tvrdoću pri višim temperaturama, u usporedbi s brzoreznim

čelicima. Ultra finoizrnuti visokočvrsti tvrdi metal (veličina zrna od 0,2 do 0,8 μm) s dodanim W i Cr omogućuje stvaranje tvrdih i oštrijih reznih oštrica i može spriječiti lom svrdla, zbog npr. neželjenih vibracija ili začepljenja odvojenim česticama. Negativan utjecaj krhkosti TM i time povezan lom svrdla, može se značajno smanjiti kada se koriste odgovarajuća geometrija alata i parametri bušenja.

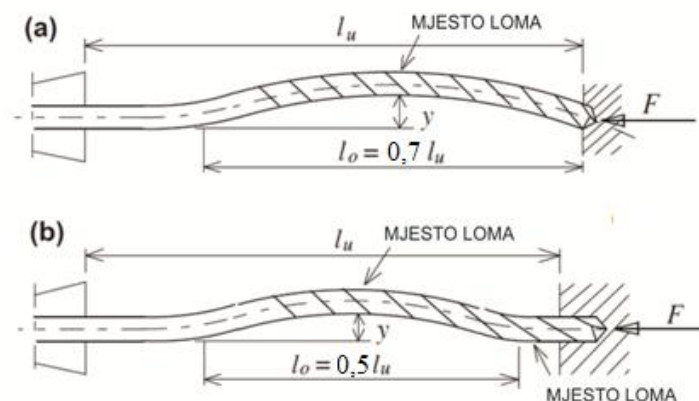
2.1.3. Čvrstoća mikrosvrdla

Mikrosvrdla načelno imaju kratak i nepredvidiv vijek trajanja, jer se slome prije nego što se istroše [43], a glavni razlog tome su relativno velika opterećenja svrdla u usporedbi s njegovom čvrstoćom [20]. Tijekom bušenja na svrdlo djeluje kombinacija različitih opterećenja: moment bušenja uzrokuje smično naprezanje, aksijalna sila stvara tlačno naprezanje i naprezanje na izvijanje, radijalna sila uzrokuje savijanje mikrosvrdla, uz dodatnu silu trenja generiranu iz kontakta odvojenih čestica u utoru spirale svrdla i obratka.

Kudla [7] je proučavao ponašanje mikrosvrdala pri savijanju, tlačnom opterećenju i torziji pod statičkim i dinamičkim uvjetima. Torzijsko naprezanje primijenjeno je s aksijalnim opterećenjem za mjerenje vrijednosti deformacija, sila i momenata uz promatranje stvaranja mikropukotina i njihovog širenja. Isti autor [20] utvrdio je kako je čvrstoća na uvijanje svrdla funkcija promjera, profila poprečnog presjeka, duljine reznog dijela i svojstava materijala te je općenito proporcionalna četvrtoj potenciji promjera svrdla i obrnuto proporcionalna drugoj potenciji njegove duljine, što ukazuje na smanjenu torzijsku krutost za mikrosvrdla. Kutne deformacije, zbog uvijanja mikrosvrdala od tvrdih metala proporcionalne su opterećenju, a kod brzoreznog čelika, one su dvostruko veće za isto opterećenje.

Elongacija mikrosvrdla, zbog kutne deformacije, unosi dodatno aksijalno opterećenje na svrdlo [7] koje se može eliminirati periodičkim prekidanjem kontakta svrdla i obratka. Kod brzoreznog čelika, veće tlačno naprezanje tijekom bušenja smanjuje kutnu deformaciju zbog kombiniranog djelovanja sila. Utvrđeno je da krutost na savijanje dominira kod dinamičke stabilnosti za svrdlo s većim omjerom L / d , jer je granica nestabilnosti savijanja manja od torzijske. Krutost na savijanje svrdala manja je kod mikrosvrdala s visokim omjerima L / d , što rezultira većim savijanjem i izvijanjem od konvencionalnih svrdala [44] i dovodi do odstupanja od osi, proširenja provrta i u konačnici do loma svrdla [27]. TM svrdla imaju prednost zbog veće krutosti na savijanje (veća za 30% od HSS-a), no mana im je mala elastičnost (dvostruko manja od HSS-a). Opterećenje na izvijanje svrdla odnosi se na opterećenje do kojeg dolazi zbog gubitka stabilnosti svrdla, kada je aksijalno opterećeno

prekomjerno velikom tlačnom silom. Ovisno o položaju svrdla (početak bušenja ili unutar provrta), uočena su različita mjesta loma zbog izvijanja [7] (slika 2.2). Kod loma na uvijanje ili savijanje, lom pokazuje karakterističnu i ponavljajuću formu.



Slika 2.2 Tipični oblici loma zbog izvijanja na (a) početku i (b) tijekom bušenja na dubini provrta $L \geq 2d$ [7]

Gong je utvrdio kako [42] krutost na izvijanje opada s većim kutom spiralnog utora, poprečnim presjekom svrdla i manjom duljinom svrdla. Vlastita frekvencija mikrosvrdla opada povećanjem aksijalne sile i učestalosti vrtnje, a povećava se povećanjem dubine provrta, dok se amplituda vibracija značajno povećava prilikom početnog ulaska svrdla u obradak i može uzrokovati odstupanje točnosti pozicije provrta [45].

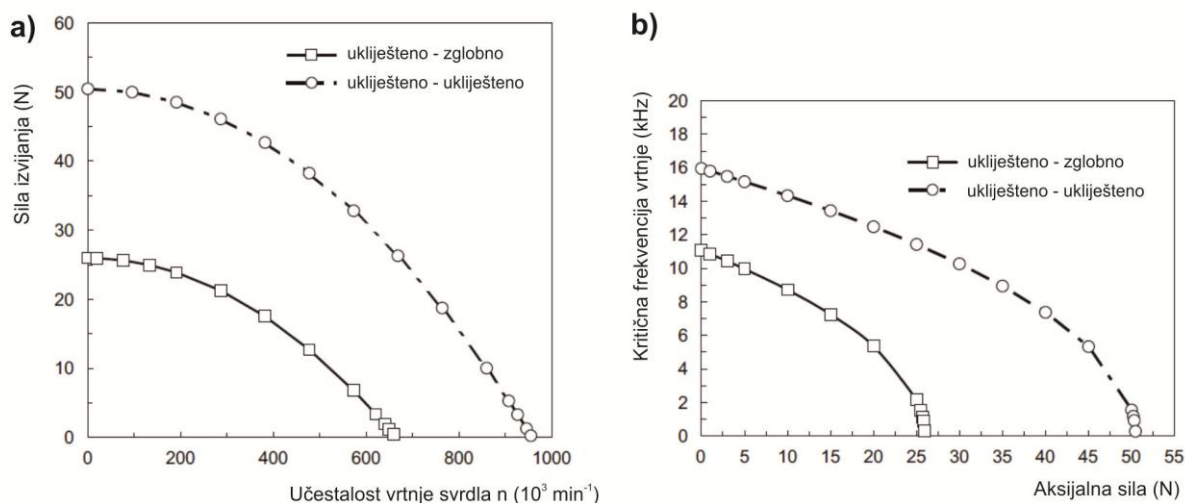
Prekomjerno naprezanje od sila rezanja jedan je od glavnih razloga za gubitak funkcije svrdla. Kod HSS mikrosvrdala, lom je uslijedio nakon elastične i plastične deformacije reznog dijela, dok su TM svrdla pokazala samo elastične deformacije prije krhkog loma [7]. Također je utvrđeno da je manja krutost savijanja glavni razlog za vrludanje vrha svrdla u slučaju nepravilnosti površine obratka [20]. Savijanje mikrosvrdla može se dogoditi uslijed male sile, gdje za svrdla promjera od 0,3 - 0,5 mm i za radijalnu silu od 0,5 N vrh svrdla ima pomak od približno 0,04 mm. Stoga je potrebno stabilizirati i smanjiti sile rezanja primjenom različitih strategija rezanja u procesu mikrobušenja.

2.2. Parametri mikrobušenja

2.2.1. Brzina rezanja

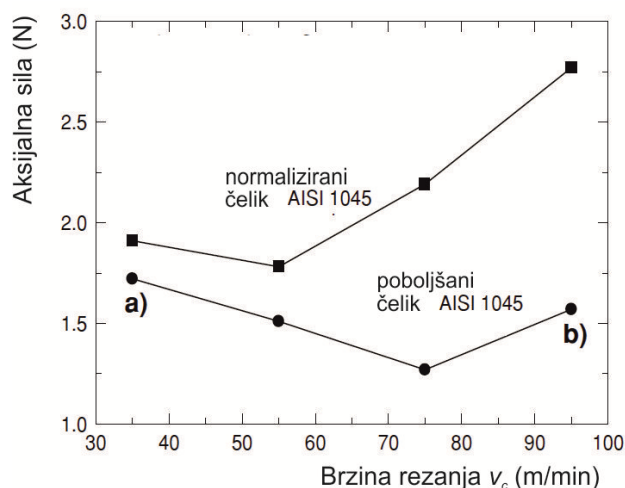
Povećanje učestalosti vrtnje svrdla n za fiksnu posmičnu brzinu smanjuje posmak po okretaju f , što može znatno smanjiti energiju rezanja unutar određenog raspona i time smanjuje mehaničko i toplinsko oštećenje materijala. Povećanje brzine rezanja, uz konstantni posmak, smanjuje okretni moment i aksijalnu silu mikrobušenja, dok se ne postigne minimalna vrijednost [32], što omogućuje kraće vrijeme i veću produktivnost. Jedna od značajnih razlika između mikrorezanja i konvencionalnog rezanja je raspon brzine rezanja. Kod mikrobušenja metala, obično se odabiru niže vrijednosti brzina rezanja i obično su red veličine manje od onih koje se koriste u konvencionalnoj visokobrzinskoj obradi, kako bi se osiguralo da se alat ne slomi [46, 6]. Visoka učestalost vrtnje u mnogim je slučajevima povezana s nepoželjnom dinamikom alata i povećanjem temperature izazvanih trenjem, što dovodi do ubrzanog trošenja alata i toplinskog oštećenja materijala. Smanjenjem posmaka po okretaju do izuzetno niskih vrijednosti, uz povećanje učestalost vrtnje, može preokrenuti trend sile zbog visokih tlakova rezanja te se proces može pogoršati zbog dinamičke nestabilnosti.

Krutost na izvijanje značajno se smanjuje povećanjem učestalosti vrtnje [41, 47, 42]. Opterećenje na izvijanje i kritična učestalost vrtnje, pri kojoj dolazi do izvijanja, proučavani su u odnosu na frekvenciju vrtnje i aksijalnu silu. Na slici 2.3 prikazani su rezultati analize metodom konačnih elemenata za mikrosvrdlo promjera 0,457 mm i duljinom spirale od 8,89 mm s različitim rubnim uvjetima [47]. Može se vidjeti da se otpornost na izvijanje smanjuje povećanjem učestalosti vrtnje za oba rubna uvjeta. Sila izvijanja će se smanjiti na nulu, kada se učestalost vrtnje svrdla poveća na određenu vrijednost. Sličan trend može se promatrati za kritičnu brzinu, tj. kritična brzina se smanjuje povećanjem aksijalne sile za oba rubna stanja.



Slika 2.3 a) utjecaj učestalosti vrtnje na silu izvijanja;
b) utjecaj aksijalne sile na kritičnu frekvenciju vrtnje [47]

Klocke i sur. [29] istražili su efekt veličine svrdla proporcionalnim smanjenjem promjera svrdla u mikrorasponu ($d = 0,05 - 1 \text{ mm}$). Povećanje brzine rezanja smanjuje aksijalnu silu dok ne dosegne minimalnu vrijednost, nakon čega se počinje povećavati (slika 2.4). Ovo smanjenje sile rezanja povezano je s toplinskim omekšavanjem materijala zbog povećanja temperature s brzinom rezanja kod bušenja u čeliku. Za razliku od konvencionalnog bušenja svrdlima većih promjera, pri većim brzinama rezanja događa se nakupljanje materijala na oštrici (naljepak) i time povećani otpor rezanja, što dovodi do veće sile rezanja i viših stopa trošenja alata [32].

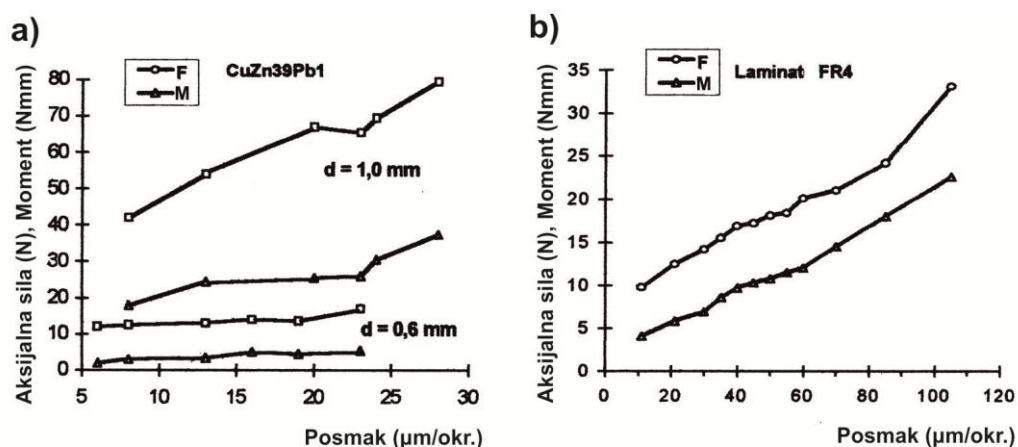


Slika 2.4 Utjecaj brzine rezanja na aksijalnu silu kod mikrobušenja čelika svrdlom promjera 0,2 mm [29]

Guo [23] utvrđuje da učestalost vrtnje n ima neznatan utjecaj na aksijalnu silu kod mikrobušenja aluminijskih svrdla promjera 0,5 i 1 mm, u rasponu učestalosti vrtnje do 2500 min^{-1} , bez primjene SHIP-a. Chen [15] bilježi kako povećanje učestalosti vrtnje (u rasponu od 60000 do 100000 min^{-1}) smanjuje moment i neznatno aksijalnu silu kod bušenja kompozitnog laminata svrdlom $d = 0,475$ mm. Imran [6] rezultatima mikrobušenja teško obradive legure nikla svrdlom promjera 0,5 mm od tvrdog metala, obloženog TiAlN, pokazuje da je vijek trajanja alata optimalno područje $n = 3000 - 5000$ min^{-1} . To je objašnjeno činjenicom kako veća brzina rezanja uzrokuje otvrdnjavanje materijala obratka i veća toplinska opterećenja, što dovodi do trošenja alata i smanjuje njegov vijek trajanja. Rahamathullah [48] kod bušenja kompozita od ugljičnih vlakana mikrosvrdlima promjera 0,32 mm s visokom učestalosti vrtnje (40000 min^{-1}) i uz umjereni posmak, bilježi manje oštećenje delaminacijom, manje odstupanje i greške kružnosti promjera. Cheong [18] je predložio metodu za prilagodbu učestalosti vrtnje preko momenta bušenja za povoljno izvlačenje čestica i smanjenje aksijalne sile te time izbjegavanje bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla.

2.2.2. Posmak

Posmak je dominantan parametar u procesu mikrobušenja, jer određuje debljinu odvojenih čestica i rezultirajuću silu rezanja [46]. Kudla [21] bilježi kako se povećanjem posmaka značajno povećava sila rezanja i momenta pri mikrobušenju kompozita svrdlima promjera 1 mm i 0,8 mm (slika 2.5). Kim [49] je ustanovio kako kod mikrobušenja čelika svrdlima promjera 0,2 mm najveći utjecaj na povećanje aksijalne sile imaju redoslijedom posmak, dubina koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla i na kraju učestalost vrtnje. Hemanth [27], je analizom metodom konačnih elemenata utvrdio kako je posmak kritični parametar na izvijanje prije loma svrdla te kako bi trebao biti niži za tvrde materijale, poput čelika.

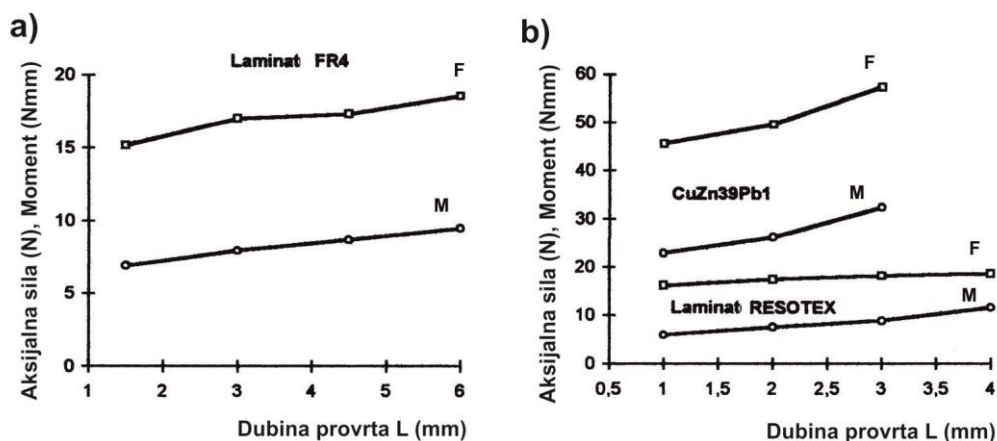


Slika 2.5 Utjecaj posmaka na aksijalnu silu i moment mikrobušenja [21]

Načelno, posmak treba smanjiti kako bi se izbjeglo lomljenje svrdla zbog velikog naprezanja, a s druge strane, vrlo niska brzina posmaka može značiti da je proces ispod minimalne debljine odvojene čestice prije deformacije. Ako je posmak premali, toplina se stvara vrlo intenzivno bez učinkovitog rezanja i može se smanjiti tvrdoća mikrosvrdla [21]. Imran [6], kod istraživanja bušenja mikrosvrdlom promjera 0,5 mm u leguri nikla pokazuje da smanjenje posmaka ispod 5 μm/okr. dovodi do smanjenja vijeka trajanja, jer je veličina posmaka bila slična veličini radijusa oštrice svrdla. Stoga, ograničenja minimalne debljine odvojene čestice prije deformacije i opterećenje do loma svrdla postavljaju teorijska ograničenja raspona vrijednosti posmaka za mikrobušenje. Rezultati bušenja keramike svrdlima s $d = 0,1$ mm pokazali su kako je posmak najznačajniji faktor koji utječe na dimenzije promjera i kružnost provrta [50].

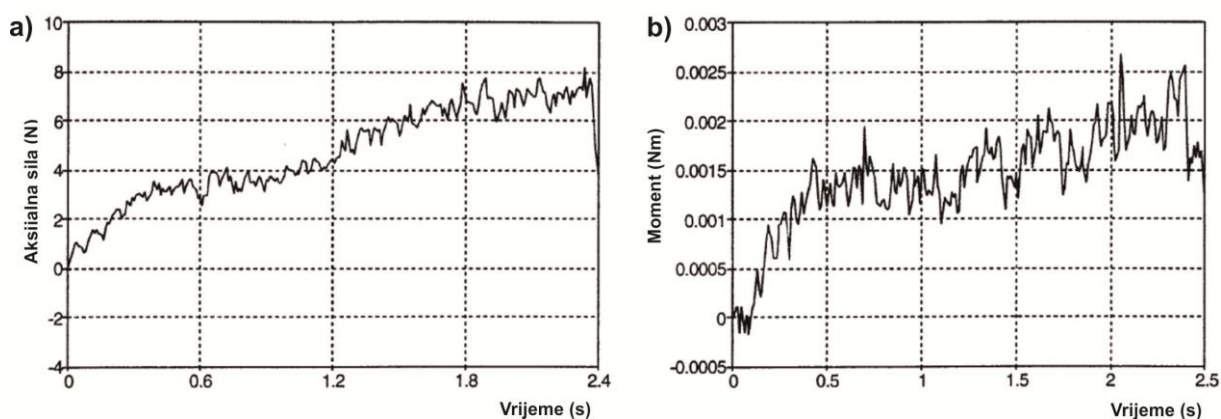
2.2.3. Dubina provrta i odvođenje odvojenih čestica

U istraživanju Iwate [32], pokazalo se kako se povećavanjem dubine provrta povećavaju vrijednosti aksijalne sile i momenta bušenja, gdje je, za razliku od aksijalne sile, zakretni moment pokazao vrlo visoku vrijednost prije loma svrdla. Kudla [21] bilježi porast aksijalne sile i momenta povećanjem dubine provrta kod mikrobušenja kompozita svrdlima $d = 1$ mm i 0,8 mm (slika 2.6).



Slika 2.6 Promjena aksijalne sile i momenta s dubinom provrta kod mikrobušenja različitih materijala [21]

Cheong [18] je ustanovio kako se sile rezanja povećavaju dubinom provrta kod bušenja provrta s visokim omjerom L / d . Na slici 2.7 može se vidjeti da se povećanjem dubine provrta (funkcija vremena bušenja), povećava i aksijalna sila te moment pri bušenju svrdlom $d = 0,5 \text{ mm}$ ($n = 45000 \text{ min}^{-1}$, $f = 4,3 \text{ } \mu\text{m/okr.}$), što je objašnjeno utjecajem odvojenih čestica proizvedenih tijekom bušenja i time povećanog trenja između spiralnog utora svrdla i površine provrta.

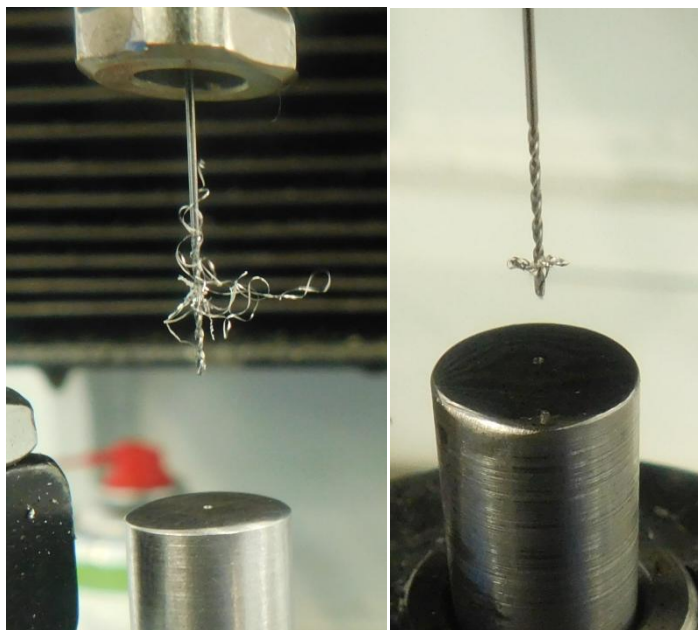


Slika 2.7 Varijacija aksijalne sile i momenta povećanjem dubine mikrobušenja svrdlom promjera 0,5 mm [18]

Odvojene čestice se odvoje iz provrta zbog utjecaja centrifugalnih sila uslijed rotacije i spiralnog oblika utora, gravitacijom ili usisom. Uklanjanje odvojenih čestica jedan je od najvažnijih faktora kod mikrobušenja, posebice dubokoga mikrobušenja. Odvojene čestice nije moguće jednostavno ukloniti iz provrta, što može dovesti do začepljenja utora svrdla i

povećanog trenja između čestica i unutrašnje površine provrta te posljedično rezultirati lomom svrdla.

S toplinom generiranom iz odvojenih čestica zaglavljenih u provrtu, oštrica svrdla može omekšati pri visokoj temperaturi, deformirati se i prijeći iz elastičnog u plastično područje te stoga rezultirati oštećenjem alata. Akumulacija materijala obratka na oštrici alata čest je uzrok loma alata, gdje se odvojene čestice lijepe na svrdlo (posebice kod bušenja polimernih i kompozitnih materijala) i mijenjaju geometriju alata, što povećava radijus oštrice svrdla i smanjuje njegovu oštrinu. Akumulacija materijala obratka na oštricama svrdla ostavlja manje prostora za odvojene čestice generirane u sljedećem koraku i to također može pogoršati postupak odvođenja odvojenih čestica. Shi u radu [51] snimanjem visokobrzinskom video kamerom bušenje PCB-a mikrosvrdlima s $d = 0,3$ mm zabilježio je kako je lom svrdla ponajprije uzrokovan začepljenjem svrdla s odvojenim česticama (otopljena smola veže staklena vlakna za svrdlo), a slično je pokazano u radu Zhenga [52].



Slika 2.8 Primjer dugih odvojenih čestica na svrdlu prilikom mikrobušenja aluminijske (lijevo) i čelike (desno)

Kako se zakretni moment mijenja u odnosu na dubinu svrdla, uz otpor odvojenih čestica u provrtu, stvorene odvojene čestice mogu imati različit oblik, ovisno o dubini bušenja. Duge i uvijene odvojene čestice (slika 2.8) imaju tendenciju prianjanja u prostoru spiralnog utora svrdla, što sprječava prolazak SHIP-a za smanjenje temperature i podmazivanje vrha svrdla. S druge strane, prekratke odvojene čestice lako se zajedno

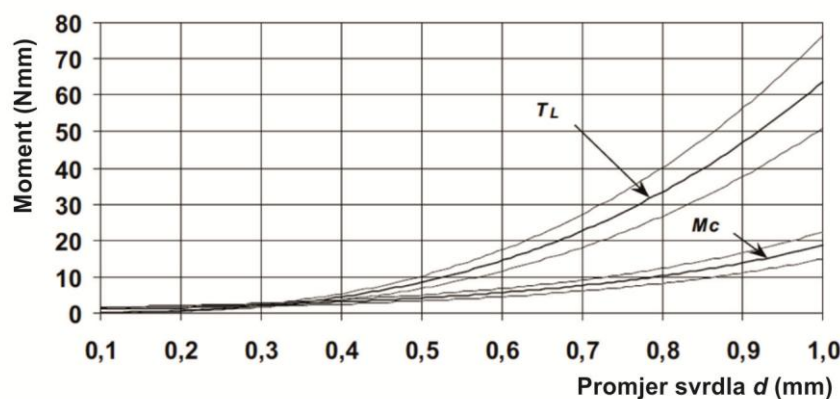
skupljaju unutar utora spirale svrdla, što stvara veće naprezanje i toplinu koji skraćuju vijek trajanja svrdla. Stoga se kod mikrobušenja preporučuju odvojene čestice srednje veličine, no potrebna su dodatna ispitivanja u svrhu optimizacije veličine odvojenih čestica i brzine njihovog odvođenja [4]. Mikrosvrdlo može trajati duže podešavanjem parametara bušenja za optimalno uklanjanje odvojenih čestica iz dubokih provrta.

2.3. Utjecaji značajki bušenja na vijek trajanja mikrosvrdla

Kod svrdala većih promjera do gubitka funkcije najčešće dolazi uslijed postupnog trošenja oštrice ili previsoke temperature rezanja, dok je gubitak funkcije mikrosvrdala najčešće uzrokovan prevelikim silama ili momentom bušenja, s obzirom na čvrstoću svrdla, koje uzrokuju iznenadni krhki lom [53].

Uobičajeno je da je vijek trajanja mikrosvrdala vrlo kratak i u većini praktičnih uvjeta, vijek trajanja mikrosvrdla najčešće je statistički slučajno raspoređen [22]. Ova vrsta gubitka funkcije svrdla je nepredvidljiva i teško uočljiva, jer čak i malo oštećenje može dovesti do potpunog loma svrdla u nekoliko sekundi. Tansel [22] analizom statističke raspodjele vijeka trajanja mikrosvrdala promjera 0,3 mm kod mikrobušenja provrta dubine 1,2 mm u čeliku i mjedi, pokazao je kako mikrosvrdla imaju malu čvrstoću na zamor, veliko rasipanje vijeka trajanja te da je vrlo opasno koristiti srednji vijek trajanja kao parametar za izmjenu alata. Statistička raspodjela vijeka trajanja svrdla varirala je ovisno o materijalu obratka.

Kako se smanjenjem promjera smanjuje moment potreban za lom mikrosvrdla i u radu [19] je uveden granični moment loma svrdla T_L kao 50% od stvarne vrijednosti momenta loma svrdla. Na slici 2.9 prikazana je usporedba T_L (uz fluktuacije čvrstoće svrdla od 20%) s momentom bušenja M_C , dobivenim bušenjem ugljičnog čelika svrdlima različitih promjera (parametri $n = 32000 \text{ min}^{-1}$, $f = 8 \text{ } \mu\text{m/okr}$, $L / d = 2$, bez uporabe SHIP-a). Kritična točka je kod promjera svrdla između 0,3 i 0,4 mm, ispod koje se preporuča smanjeni posmak za manje provrte ili primjena drugih mjera za smanjenje vjerojatnosti loma svrdla [19].

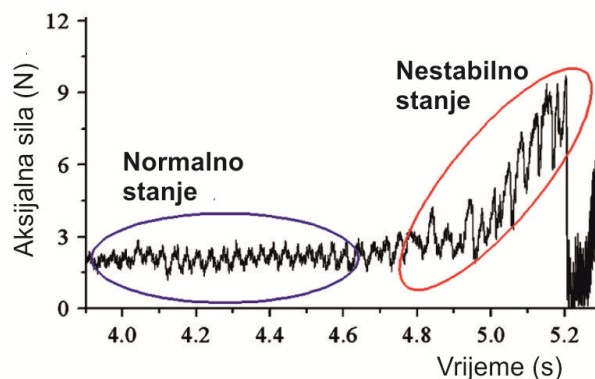


Slika 2.9 Usporedba graničnog momenta loma svrdla T_L i momenta bušenja [19]

Chen [15] je razvio empirijski model vijeka trajanja svrdla 0,457 mm kojim je pokazano kako najveći utjecaj na vijek trajanja imaju učestalost vrtnje, posmak i omjer L / d . Heinemann [34] navodi da je začepljenje svrdla odvojenim česticama kod dubokoga bušenja svrdlima manjih promjera glavni razlog za lom spiralnih svrdala, a Nambu [35] kako je ono izraženije povećanjem omjera duljine i promjera svrdla L / d . Jedna od metoda za postizanje bolje izvedbe procesa bušenja je smanjenje vrijednosti dubine koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem, kako svrdlo ide dublje u provrt.

Nadzor mikrobušenja je teži od nadzora konvencionalnog bušenja svrdlima većih promjera, jer su sile rezanja kod mikrobušenja vrlo male, a time je i identificiranje signala sile rezanja i zakretnog momenta prilično teško zbog slabog omjera signala i šuma [37]. Također, nema jednostavne korelacije između trošenja alata i sile rezanja. Rezultati dubokoga bušenja čelika HSS svrdlima malih promjera ($d = 1,5$ mm, $v_c = 26$ m/min, $f = 26$ μ m/okr, $L / d = 10$) pokazali su kako aksijalna sila nije pogodan parametar za utvrđivanje trošenja svrdla, dok su signali AE i vrijednosti momenta bušenja bili za to pogodniji, no zbog različitih stupnjeva trošenja, mikrozavarivanja materijala obratka za svrdlo i začepljenja svrdla odvojenim česticama, bilo je prilično teško točno utvrditi stanje alata prije loma [34].

S druge strane, Kim. [37] koristi metodu za praćenje aksijalne sile tijekom procesa dubokoga mikrobušenja za dokazivanje trošenja svrdla kako bušenje postaje dublje. Na slici 2.10, prikazan je lom svrdla nakon oštrog povećanja aksijalne sile te se u radu preporuča bušenje s periodičkim izvlačenjem svrdla, za smanjenje vrijednosti aksijalne sile.

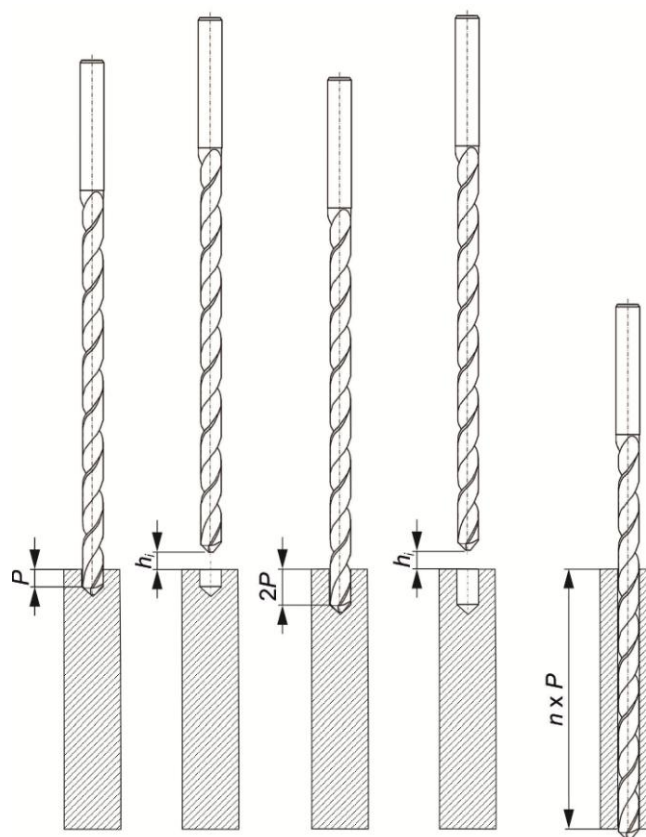


Slika 2.10 Promjena aksijalne sile prije loma s obzirom na vrijeme bušenja [37]

Kondo [25] eksperimentalnim mikrobušenjima TM svrdlima $d = 0,1 - 0,3$ mm (parametri $n = 10000 \text{ min}^{-1}$, $f = 0,5 \text{ } \mu\text{m/okr}$) pokazuje kako je za svrdla s promjerom većim od 0,1 mm moguće predvidjeti lom svrdla uzrokovao trošenjem preko vrijednosti veličine aksijalne sile. Isti autor [24], korištenjem istih parametara kao i u radu [25] pri različitim uvjetima bušenja, bilježi lom svrdala promjera 0,1 mm pri vrijednostima maksimalne aksijalne sile istovjetnim kritičnom opterećenju na izvijanje svrdla.

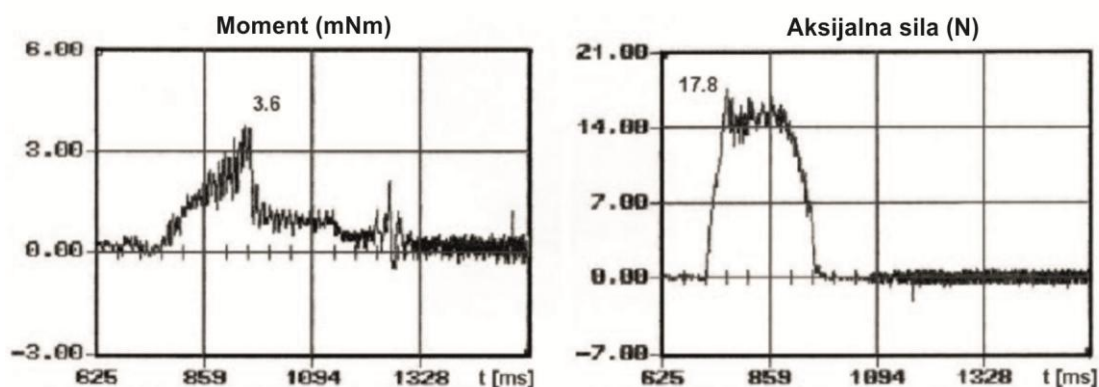
2.4. Bušenje s periodičkim izvlačenjem svrdla (*peck drilling*)

Problemi većih sila bušenja, značajnog nakupljanja topline i težeg uklanjanja odvojenih čestica (posebno za duboke mikroprovrt u duktilnim materijalima), tijekom bušenja mogu se smanjiti primjenom bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla iz provrta [18, 21, 19]. Ciklus bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla sastoji se od koraka bušenja do određene dubine (korak P) i povlačenja na visinu izvlačenja h_i (slika 2.11) te ponovnim ulazom u provrt na dubinu izbušenu u prethodnom koraku i bušenjem novog koraka, zatim povlačenjem i tako ciklički, sve dok se provrt ne izbuši.

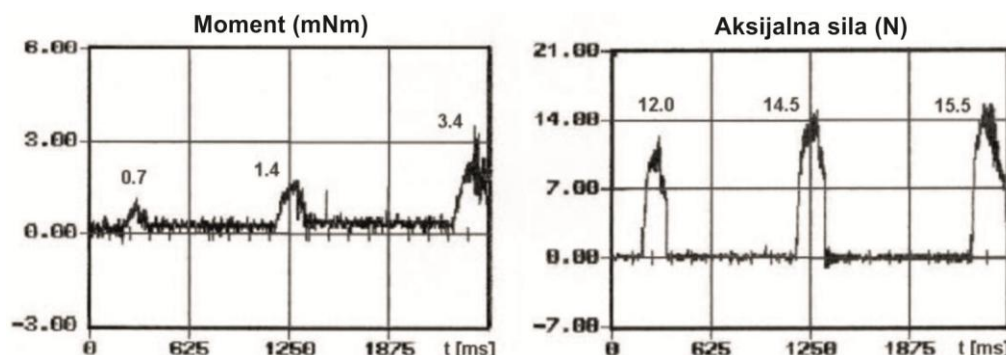


Slika 2.11 Princip bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla

Ovi periodički prekidi procesa bušenja, dok je svrdlo izvan provrta, omogućuju evakuaciju ostatka odvojenih čestica, hlađenje svrdla, kao i pristup SHIP-u (kojemu je značajno ograničen pristup kod dubokoga mikrobušenja), kako bi se učinkovitije uklonila toplina i odvojene čestice te time produžio vijek trajanja svrdla.

Slika 2.12 Moment i aksijalna sila tijekom kontinuiranog bušenja provrta
 $d = 0,6$ mm, $L = 1$ mm, u čeliku Cr18Ni9Ti [19]

Usporedbom konvencionalnog i mikrobušenja s periodičkim povlačenjem svrdla, pokazalo se kako isprekidano bušenje omogućuje bolje odvođenje čestica i stoga manje trenje, što donekle smanjuje maksimalne vrijednosti momenta i aksijalne sile (slike 2.12 i 2.13) [19].



Slika 2.13 Moment i aksijalna sila tijekom isprekidanog bušenja provrta $d = 0,6$ mm, $L = 1$ mm, u 3 jednaka koraka od 0,35 mm, u čeliku Cr18Ni9Ti [19]

Utvrđeno je kako je gibanje čestica stohastičko i uzrokovano novostvorenim česticama, a manje vrtnjom spiralnog utora. Heinemann [34] je pokazao da je bušenje s periodičkim povlačenjem svrdla uvelike produžilo vijek trajanja zbog boljeg podmazivanja, no preveliki broj koraka izvlačenja smanjuje vijek trajanja zbog, smatra se, prevelikog broja udara, posebice kod krućih svrdala (Co HSS). Tri glavna parametra koja utječu na izvedbu bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla su:

- visina izvlačenja svrdla h_i ,
- korak P ,
- vrsta niza vrijednosti dubine koraka i broj koraka.

2.4.1. Visina izvlačenja svrdla

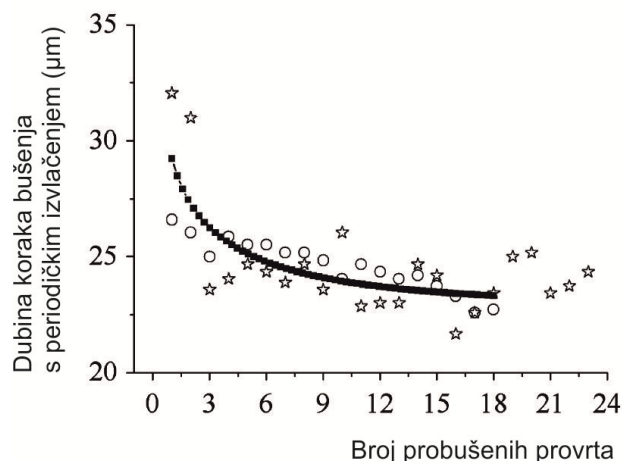
Kod bušenja većih promjera, svrdla se obično izvlače na malu udaljenost iznad prethodne dubine bušenja. To može pomoći smanjenju stvorene topline, a što je manja udaljenost koju svrdlo prevali, to će biti kraće vrijeme potrebno za proces izrade provrta, što u određenoj mjeri pomaže održati brzinu izrade. Međutim, preslikavanje makrobušenja ne funkcionira jednako dobro i kod procesa mikrobušenja. Uz otežan pristup SHIP-a u provrt, toplina se nakuplja na vrh svrdla u kraćem vremenu nego što je to slučaj kod klasičnog bušenja, što može uzrokovati veće naljepljivanje odvojenih čestica uz alat te gubitak oštine oštrica svrdla, a uz manji volumen utora spirale svrdla i smanjenje brzine uklanjanja odvojenih čestica. Stoga se načelno preporuča potpuno izvlačenje mikrosvrdla iz provrta za

manje prijanjanje odvojenih čestica ili za čak njegovo sprečavanje. SHIP može prodrijeti izravno do vrha svrdla, ukloniti odvojene čestice i neke kapljice rashladne tekućine mogu ostati unutar utora spirale te ući u provrt, kako bi se smanjila toplina na kontaktu svrdla i obratka te podmazao proces bušenja. Nasuprot tome, Rahamathullah [48] je, kod bušenja kompozita od ugljičnih vlakana mikrosvrdlima $d = 0,32$ mm, omjera provrta $L / d = 7$, bez primjene SHIP-a, zabilježio uspješno korištenje djelomičnog povlačenja svrdla za smanjenje ukupnog vremena bušenja i poboljšanje produktivnosti.

2.4.2. Dubina koraka

Početni korak pokazuje učinkovitost kontakta svrdla i obratka, a vrijednost dubine početnog koraka P utječe na sile rezanja, kao i na uklanjanje odvojenih čestica. Ako je početna vrijednost koraka premalena, zahvat svrdla neće biti dobar, jer će biti premalo kontaktne površine između svrdla i provrta, ako se ne koristi pilotski provrt. To može potencijalno dovesti do problema s položajem za drugi korak, jer postoji mnogo manja površina za ponovni zahvat svrdla. S druge strane, kada je početni ulaz bušenja prevelik, generirane odvojene čestice su prevelike, što dovodi do začepljenja utora spirale svrdla, uz povećanu toplinu svrdla. Stoga, za optimalni postupak bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla treba koristiti srednju vrijednost za dubinu početnog koraka i najčešće je ona vrijednosti dvostruko veće od promjera svrdla, tj. $P = 2 d$ [54].

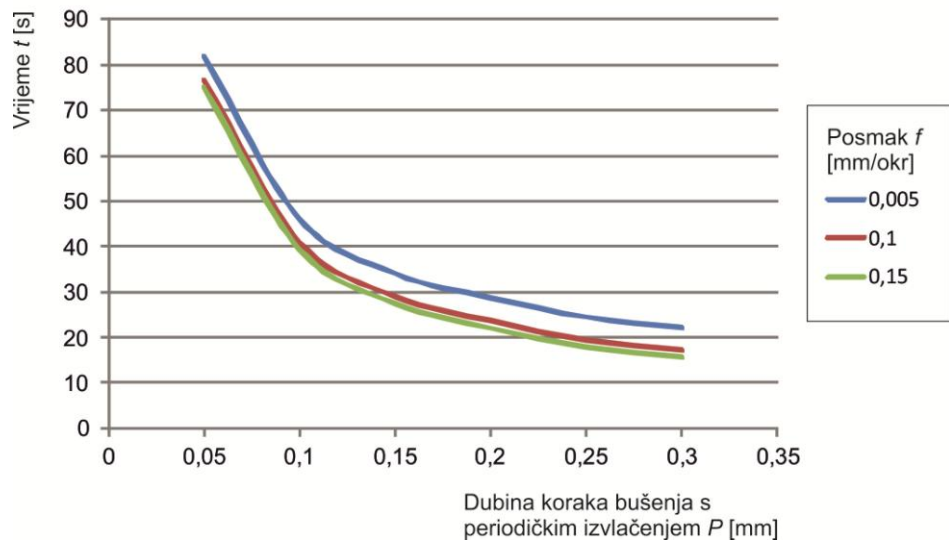
Kod dubokoga mikrobušenja na većim dubinama provrta, akumulacija topline je najveća, što uzrokuje da odvojene čestice iz posljednjih nekoliko koraka bušenja lako prijanjaju na površinu utora spirale svrdla, a otežano uklanjanje odvojenih čestica povećava mogućnost začepljenja svrdla, što na koncu doprinosi lomu svrdla. Prema tome, poželjna je što manja veličina koraka za postizanje dužeg vijeka trajanja svrdla. Kim [37] je predložio dubinu koraka od $P = 0,1 d$ za duži vijek trajanja alata (slika 2.14) kod dubokoga mikrobušenja čelika ($L / d = 15$) tvrdometalnim svrdlima promjera 0,25 mm ($n = 15\ 000 - 30\ 000\ \text{min}^{-1}$, $f = 1 - 2\ \mu\text{m/okr}$), gdje su sva mikrosvrdla bila slomljena bez korištenja bušenja s periodičkim izvlačenjem.



Slika 2.14 Ovisnost vijeka trajanja o dubini koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem [37]

Imran [6] je kod dubokoga mikrobušenja (omjer $L / d = 10$) legure nikla TM svrdlima $d = 0,5$ mm ispitivao utjecaj vrijednosti koraka u rasponu od $0,05 - 0,2$ mm. Postignut je vijek trajanja svrdla od 80 izbušenih provrta, gdje je vijek trajanja alata bio manji kada je dubina koraka P bila ispod i iznad vrijednosti od $0,1$ mm. Objašnjenje za kraći vijek trajanja u slučaju vrijednosti od $P = 0,05$ mm je da je on niži od visine vrha svrdla, što otežava odvođenje odvojenih čestica, a u slučaju većeg koraka može doći do većih sila, trenja i temperature, što ugrožava vijek trajanja mikrosvrdla. Aksijalna sila povećava se povećanjem dubine provrta, što se može pripisati povećanju trenja između alata i obratka te ukazuje kako je potrebna veća sila da se dublje uđe u provrt. S druge strane, na malim dubinama koraka nakupljanje odvojenih čestica u provrtu je zanemarivo.

Kim [49] je pokazao kako periodičko izvlačenje kod mikrobušenja svrdlima $d = 0,2$ mm u čeliku omogućuje bolje izvlačenje čestica i topline iz provrta, uz duži vijek trajanja svrdla. Najveći utjecaj na veličinu aksijalne sile imali su redoslijedom: posmak f , dubina koraka P pa učestalost vrtnje n . Bolji rezultati zabilježeni su kod manje vrijednosti P , ali time i duže vrijeme obrade. Manja vrijednost koraka obično dovodi do niske produktivnosti, zbog prolongacije vremena obrade, pošto se uklanja manja količina odvojenih čestica za ukupno vrijeme bušenja [18, 34]. Slika 2.15 prikazuje ovisnost vremena potrebnog za izradu provrta, ovisno o veličini koraka P i posmaku mikrobušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla.



Slika 2.15 Vrijeme potrebno za izradu provrta $L = 7$ mm, $d = 0,5$ mm u ovisnosti o posmaku f i dubini koraka P

2.4.3. Vrste niza vrijednosti dubine koraka i broj koraka izvlačenja svrdla

Više ciklusa dopušta malu završnu ili početnu vrijednost dubine koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla. Nasuprot tome, mali broj koraka generirao bi relativno veliku konačnu vrijednost dubine koraka. U nekim postupcima, broj koraka može biti varijabla za podešavanje završnog koraka na temelju jednadžbe po kojoj se regulira vrijednost dubine koraka. Zuang [54] navodi smjernice za veličinu koraka P kod bušenja s periodičkim izvlačenjem, gdje se za omjere provrta $L / d \leq 10$ koristi jednadžba 2.1:

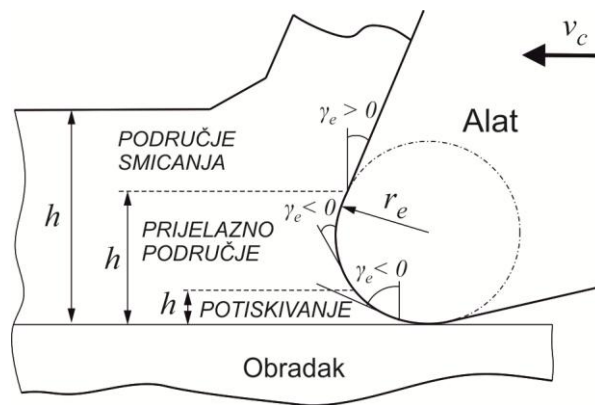
$$\frac{P}{d} = \frac{1}{9(19,5 - 1,5R)} \quad \text{za omjer } L/d \leq 10 \quad (2.1)$$

R je veličina omjera dubine i promjera provrta na određenoj dubini provrta koja se mijenja kako provrt postaje dublji tijekom procesa bušenja, uz posljedično smanjenje koraka P . Za provrte s većim omjerom dubine i promjera, najčešće se koristi jednadžba 2.2:

$$\frac{P}{d} = 0,5 \quad \text{za omjer } L/d > 10 \quad (2.2)$$

2.5. Efekt veličine

Značajke procesa konvencionalnih (makro) obrada odvajanjem čestica ne mogu se primijeniti kod mikroobrada samo proporcionalnim umanjnjem vrijednosti veličina [55, 56, 57, 29]. Efekt veličine definira se kao odstupanja od proporcionalnih vrijednosti procesa, koja se javljaju prilikom korištenja omjera umanjnja prema konvencionalnim geometrijskim parametrima [57] i načelno se opisuje omjerom debljine čestice prije deformacije i radijusa oštrice alata h / r_e [58]. Za razliku od konvencionalne obrade, gdje se koristi Merchantov model rezanja alatom idealno oštrog ruba ($r_e = 0$) za određivanje smicanja po ravni smicanja i trenja na prednjoj površini alata [59], kod mikroobrade omjer h / r_e može biti manji od jedan, čime se mijenja nominalni i efektivni kut prednje površine γ_e (slika 2.16).

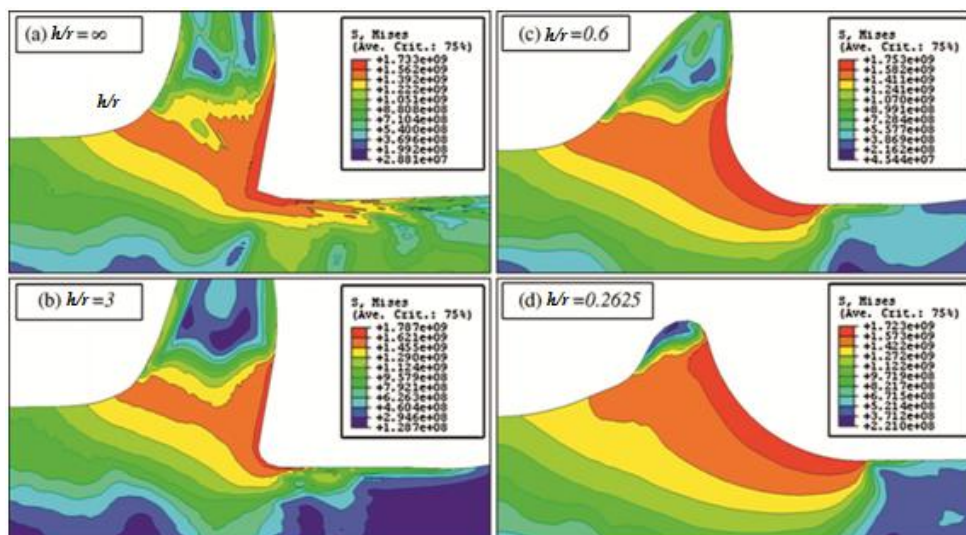


Slika 2.16 Utjecaj zaobljenja rezne oštrice alata i debljine deformirane čestice na efektivni kut prednje površine alata

Smanjenjem kuta smicanja (pod utjecajem velikog negativnog kuta γ_e) povećavaju se specifične sile rezanja i energija procesa [56, 58]. Tijekom procesa rezanja prevladava utiskivanje, gdje se dio materijala obratka plastično deformira ispod oštrice alata, a ostatak materijala iza alata se elastično oporavlja [60, 29]. Kod makroobrade metala s kontinuiranim stvaranjem odvojenih čestica, ustanovljeno je da većinu topline (oko 80%) preuzimaju odvojene čestice [38]. Sa smanjenjem toplinske mase odvojenih čestica, kako se smanjuje debljina čestice prije deformacije, smicanje u zoni smicanja i trenje prednje površine ne mogu se uzeti u obzir. Za dubine rezanja ispod nekoliko mikrometara, zbog radijusa oštrice alata, trljanje stražnje površine alata zbog elastičnog povrata materijala obratka i natražne sile imaju veću ulogu kao mehanizam disipacije mehaničke energije [61, 62].

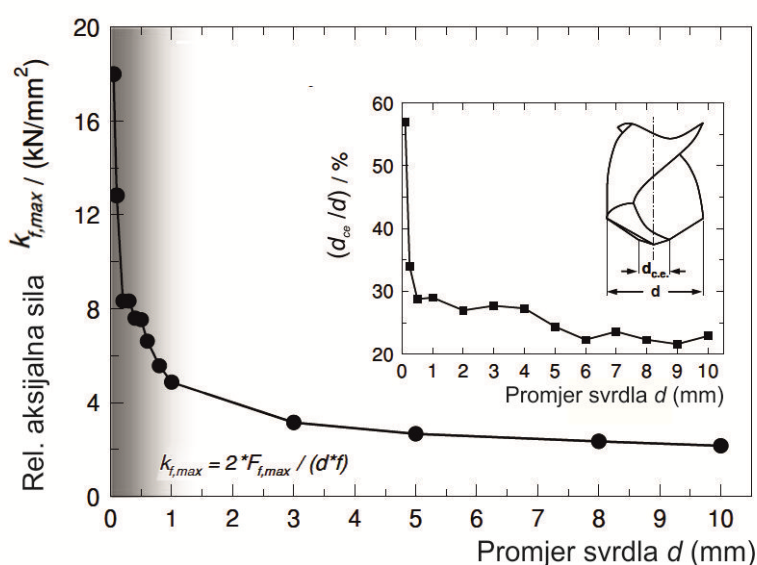
Analizom metodom konačnih elemenata, formiranja odvojene čestice kod mikroobrade odvajanjem čestica utvrđeno je kako je h / r_e glavni parametar koji utječe na

formiranje odvojene čestice, deformaciju materijala i raspodjelu naprezanja [60] (slika 2.17). Kod omjera $h / r_e < 1$ nema koncentriranog smicanja u primarnoj zoni deformacije, dok se za $h / r_e > 1$ može uzeti kao da je slučaj rezanja savršenom oštricom.



Slika 2.17 Von Mises-ova raspodjela naprezanja za različite omjere debljine odvojene čestice i radijusa alata [60]

Klocke [29] je zabilježio različite učinke veličine i njihove značajne utjecaje na mikrobušenje čelika uz pomoć eksperimentalnih rezultata i uspješno proširio konvencionalnu Victor-Kienzleovu formulu rezanja metala u modeliranju aksijalne sile u mikroraspon (slika 2.18).



Slika 2.18 Efekt veličine geometrije svrdla na relativnu aksijalnu silu [29]

Anand [63, 64] je proširio konvencionalni Victor-Kienzleov model rezanja metala za modeliranje specifičnih aksijalnih i radijalnih sila mikrobušenja plastike ojačane karbonskim vlaknima, uz zaključak kako kod omjera $h / r_e < 1$ dolazi do nelinearnog povećanja specifične sile rezanja daljnjim smanjenjem debljine odvojene čestice. Kod mikrobušenja istog materijala svrdlima $d = 0,5$ mm, najniže sile rezanja i greške kvalitete provrta nisu zabilježene kod posmaka nižih vrijednosti, već kod vrijednosti posmaka otprilike jednake radijusu oštrice svrdla [65]. Imran [6] navodi rezultate mikrobušenja teško obradive legure nikla koji pokazuju kako mikrobušenje s posmakom ispod radijusa oštrice $f < r_e$ dovodi do smanjenja vijeka trajanja svrdla. Radijus oštrice alata r_e povećava se zbog progresivnog trošenja alata i time rezultira promjenom iz procesa rezanja u proces utiskivanja, povećanjem natražne sile i u konačnici smanjenjem vijeka trajanja alata.

Liu [66] je razvio analitički model baziran na molekularno-mehaničkoj teoriji trenja za predviđanje normalizirane minimalne debljine odvojene čestice, kojim se pokazuje da se normalizirana minimalna debljina odvojene čestice povećava povećanjem brzine rezanja i radijusa oštrice alata pri obradi ugljičnih čelika, što se pripisuje prevladavanju toplinskog smekšanja nad efektom otvrdnjavanja materijala obratka. S druge strane, tijekom različitih brzina rezanja i radijusa oštrice alata pri mikroobradi legure aluminija, normalizirana minimalna debljina odvojene čestice ostaje gotovo konstantna, što se pripisuje međusobnom poništavanju učinaka toplinskog omekšavanja i otvrdnjavanja materijala obratka.

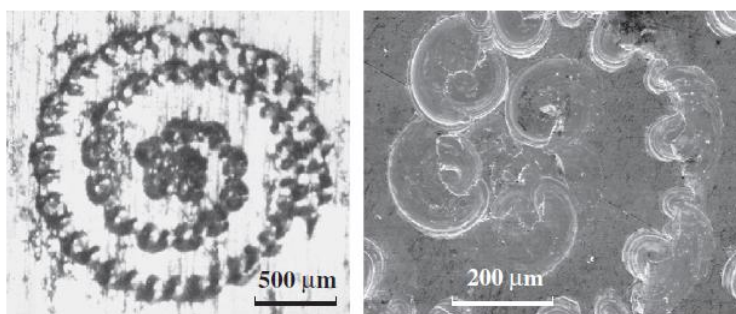
2.6. Vrludanje svrdla kod mikrobušenja i korištenje pilotskog provrta

Bušenje se može opisati u četiri faze: slobodna rotacija svrdla, otklizavanje vrha svrdla gdje vrh samo dodiruje obradak, vrludanje svrdla (do postizanja punog promjera vrha svrdla) i puno prodiranje (faze svrdla su u zahvatu). Na gibanje tijekom inicijalnog prodiranja (slobodna rotacija, otklizavanje i vrludanje) imaju utjecaj stanje poprečnih oštrica svrdla i simetričnost vrha svrdla.

Pojava radijalnih sila, koje su za usporedbu značajno manje od aksijalne sile bušenja [67] i koje djeluju na poprečnu oštricu mogu dovesti do otklizavanja svrdla i vrludanja tijekom ove početne faze prodiranja [44, 18]. Tome pridonose i niska krutost mikrosvrdla, mala aksijalna sila (pošto nema dovoljno prigušenja između svrdala i obratka kako bi se stabilizirala lateralna gibanja svrdala), a također postoje pogreške u brušenju ili ugradnji svrdla, koje dovode do nejednakih sila na svakoj od glavnih reznih oštrica. Kod bušenja

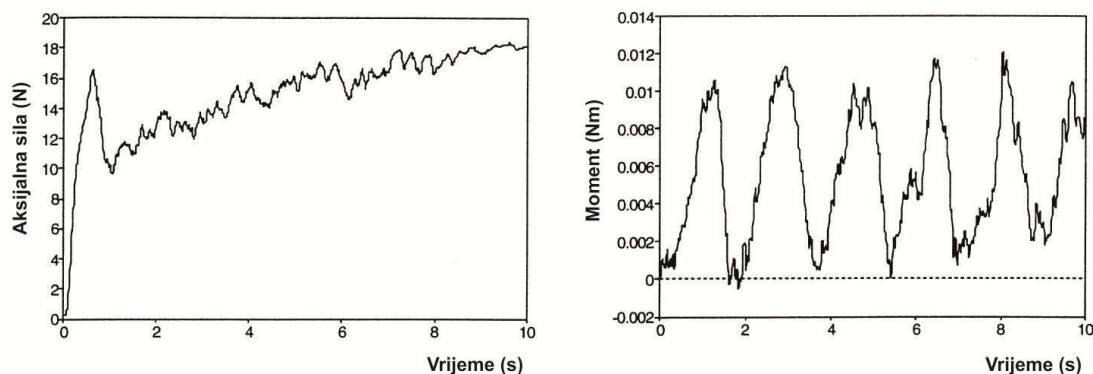
svrdlima većih promjera, omjer duljine poprečne oštrice i promjera bušenja je vrlo mali pa je utjecaj radijalnih sila, generiran preko poprečne oštrice, zanemariv za vrijeme početnog stupnja penetracije. Međutim, za mikrosvrkla taj je omjer prilično velik i rezultira znatnim radijalnim silama tijekom nekoliko početnih okretaja svrdla.

Drugi važan faktor koji bi mogao utjecati na inicijalno prodiranje svrdla je stanje površine obratka. Ako površina obratka nije okomita u odnosu na os svrdla, tada će utjecaj radijalnih sila na rub poprečne oštrice biti prilično visok [18, 44] i uzrokovat će promjenu aksijalnog položaja svrdla koja može dovesti do nekontroliranog gibanja vrha svrdla, tj. vrludanja (slika 2.19) [7].



Slika 2.19 Spiralni tragovi zbog vrludanja svrdla promjera 0,3 mm na obratku od čelika [7]

Utvrđeno je da je vrludanje svrdla jedan od glavnih faktora koji pridonosi slaboj pouzdanosti mikrobušenja. Varijabilnost aksijalne sile i momenta bušenja tijekom početnog gibanja vrludanja prikazana je na slici 2.20, gdje je vidljivo da okretni moment ima mnogo veći stupanj varijacije od aksijalne sile [18].



Slika 2.20 Varijacija aksijalne sile i momenta prilikom vrludanja svrdla promjera 0,9 mm [18]

Utvrđeno je da početno vrludanje svrdla utječe na točnost položaja provrta, koja je općenito funkcija simetrije vrha svrdla i hrapavosti površine obradaka. Postoji linearni odnos između točnosti položaja provrta i vrludanja svrdla [68]. Utvrđeno je da je faza otklizavanja svrdala odlučujući faktor za odstupanje točnosti položaja provrta. Za vrijeme početnog stupnja penetracije, budući da je veća varijacija sila rezanja [69], potrebno je odabrati prikladne početne parametre mikrobušenja za suzbijanje i stabiliziranje početnog vrludanja svrdla u što moguće kraćem vremenu [18]. Utvrđeno je da je za minimiziranje učinka vrludanja vrha svrdla na početku prodiranja svrdla u obradak poželjno, u usporedbi s kasnijom fazom bušenja, primijeniti manji posmak [7] ili manji omjer učestalosti vrtnje bušenja i posmaka [18].

Drugi pristup rješavanju problema vrludanja svrdla, uz optimizaciju parametara tijekom početnog prodiranja svrdla u obradak, upotreba je pilotskog svrdla s vrlo kratkom duljinom reznog dijela svrdla, kako bi se izbjegao početni bočni pomak svrdla. Pilotski provrt pruža mogućnost uspostavljanja veće površine za kontakt mikrosvrdla s obratkom, čime pomaže svrdlu da ostvari precizniji i učinkovitiji kontakt s obratkom na željenoj poziciji, tijekom početne faze bušenja. Nakon što cijeli vrh svrdla uđe unutar provrta, vanjska površina svrdla i glavne oštrice vode svrdlo u gibanje prema naprijed, što osigurava pravocrtnost provrta i smanjuje trenje na unutrašnjoj površini provrta [70].

Na temelju analize sile kontakta i sile trenja, preporuka je da bi vršni kut vrha pilotskog svrdla trebao biti manji ili jednak kutu vrha mikrosvrdla [6]. Time glavne oštrice dolaze u kontakt s obratkom prije poprečne oštrice, čime se smanjuje mogućnost vrludanja svrdla unutar pilotskog provrta. Pilotski provrt s vršnim kutom koji je značajno manji od vršnog kuta svrdla, uzrokuje trošenje vanjskih kutova oštrice, zbog iznenadnog udara između ovog relativno krhkog dijela oštrice svrdla i obratka, a povećanim trošenjem svrdla, povećava se netočnost pozicije i geometrije provrta [71].

2.7. Učinci SHIP-a na mikrobušenje

SHIP igra značajnu ulogu u određivanju izvedbe obrade odvajanjem čestica. Različite funkcije SHIP-a uključuju odvođenje topline iz zone rezanja, podmazivanje između alata i obradaka, odvođenje odvojenih čestica i uklanjanje neprihvatljivih utjecaja površine obratka. Primarna funkcija SHIP-a je smanjenje topline smanjenjem trenja u zoni rezanja. Iwata [32] je proučavao utjecaj različitih uvjeta rezanja na sile rezanja i temperaturu kod bušenja

mikroprovrt $d = 0,1 - 0,45$ mm. Rezultati eksperimentalnih bušenja bez primjene SHIP-a, kao što su suho rezanje i puhanje zrakom te izravna primjena SHIP-a u obliku ulja i uljne magle, pokazali su kako uljna magla daje najbolji rezultat vezan za sile rezanja i zakretni moment.

Kudla [19] eksperimentalno provodi bušenja provrta dubine 1,5 mm svrdlima $d = 0,4$ mm u mjestu, čeliku i nehrđajućem čeliku ($n = 42000 \text{ min}^{-1}$, $f = 4 \text{ } \mu\text{m/okr}$) i naglašava primjenu SHIP-a kao važnog faktora za smanjenje trenja između obratka i alata, čestica i alata te čestica i obratka, uz nužnost primjene povećanog tlaka SHIP-a kod mikrobušenja. Utjecaj SHIP-a smanjuje sile rezanja od 5-25%, što može biti bitan čimbenik za učinkovitiju obradu. Heinemann [72] navodi kako kod dubokoga bušenja svrdlima malih promjera, SHIP nikad ne prodire do najviše opterećene kontaktne površine u blizini oštrice, već djeluje u manje opterećenoj zoni gdje odvojene čestice napuštaju alat i uzrokuje smanjenje duljine kontakta odvojenih čestica s alatom. Navodi i kako su za optimalno duboko mikrobušenje potrebne tekućine s niskom viskoznošću, visokom toplinskom difuzijom i dobrim svojstvima podmazivanja. U nekim procesima mikrobušenja, kao što je bušenje PCB-a, obično se ne koristi SHIP, a jedan od razloga je taj što upotreba SHIP-a otežava čišćenje prašine koja se inače može usisati nakon bušenja. Općenito, kod suhog bušenja malih provrta generiraju se veće temperature, pri čemu bi veće trenje moglo potaknuti povećanu temperaturu rezanja, trošenje i ugroziti vijek trajanja alata [32, 72].

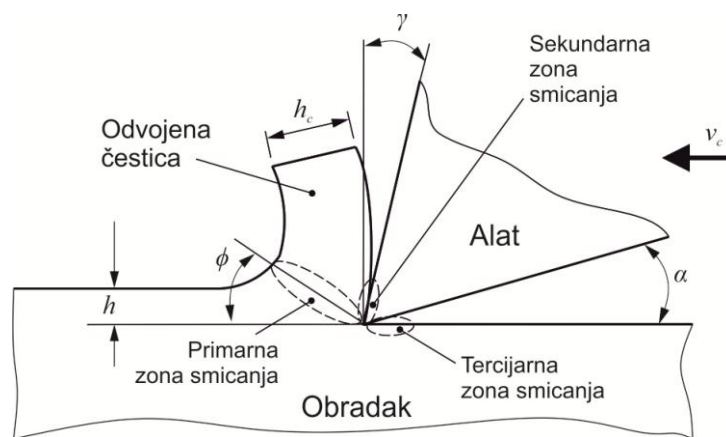
2.8. Modeli mikrobušenja

Kod modeliranja mikrobušenja najčešće se koriste empirijski, numerički i mehanički modeli, prvenstveno za predviđanje sila rezanja. Empirijske metode temelje se na utvrđivanju sila rezanja pomoću rezultata eksperimenata bušenja i direktnom mapiranju izlaznih rezultata prema ulaznim podacima. U empirijskom modeliranju, eksperimenti su dizajnirani pomoću ulaznih parametara određenih statističkim alatima, kao što je Box-Behnkenova ili Taguchieva matrica, tako da se može utvrditi utjecaj ulaza na aksijalnu silu i zakretni moment. Budući da je odnos između ulaza i aksijalne sile i momenta nepoznat, obično se približava polinomu nižeg reda.

Numeričke metode najčešće se koriste metodom konačnih elemenata (MKE) za predviđanje oblika odvojene čestice i sila rezanja te je to najdetaljniji pristup modeliranja koji koristi sofisticirane matematičke modele plastičnosti i zahtijeva manji broj eksperimenata.

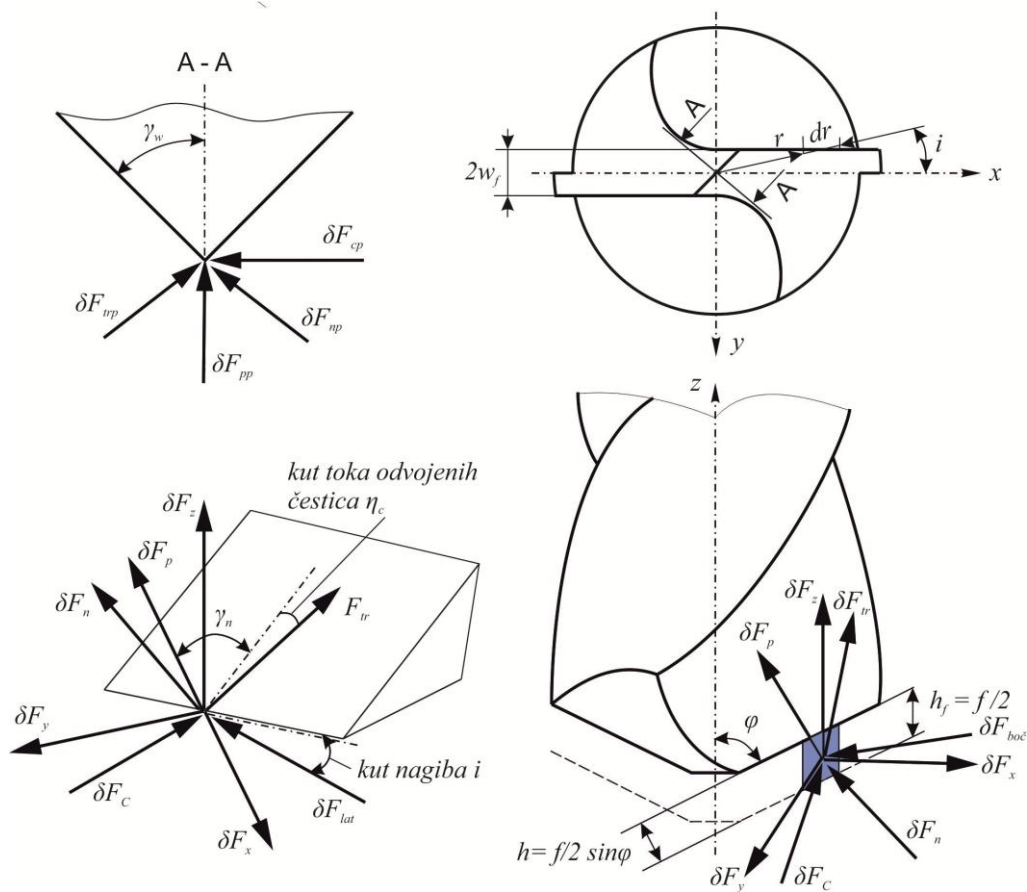
Kada su modelirani svi parametri (npr. temperatura okoline, faktori trenja, koeficijenti prijelaza topline itd.), odnosi (npr. konstitutivni zakon, kriterij neuspjeha, kontaktni model itd.) i kreirana mreža elemenata, izvodi se simulacija koja može biti vrlo dugotrajna (nekoliko puta duža u usporedbi s mehaničkim modelima) te postoje poteškoće uključivanja dinamičkih efekata sustava. Međutim, korist MKE-a je da su pokusi najčešće potrebni samo za potrebe validacije.

Kod mehaničkih metoda, koje su polu-empirijske metode, sile rezanja modelirane su kao proporcionalne određenim parametrima, a kalibracijske konstante proporcionalnosti procjenjuju se eksperimentiranjem i umjeravanjem regresijskih jednadžbi. Potrebno je detaljno razumijevanje kinematike procesa, kao i osnovna pretpostavka da su sile rezanja proporcionalne površini odvojene čestice ili opterećenju odvojenih čestica. Osnovni analitički model za rezanje daje Merchant [59], na kojem se temelje skoro svi kasniji analitički modeli koji su razrađeni u literaturi. Slika 2.21 prikazuje shemu tradicionalnog modela klina alata, gdje je ϕ kut smicanja, γ je kut prednje površine, h je debljina čestice prije deformacije, h_c je debljina odvojene čestice.



Slika 2.21 Shematski prikaz procesa obrade odvajanjem čestica

Značajke materijala uključene u konstante izvedene su eksperimentalno. Zbog boljeg razumijevanja fizike procesa, potrebno je manje eksperimenata umjeravanja nego kod empirijskog pristupa i vjerojatnije je da će model biti valjan izvan ispitivanog raspona s prihvatljivim pogreškama. Iz dostupne literature vidljivo je kako se najčešće koriste modeli makrobušenja koji se proširuju na mikrobušenje. Elhachimi [73] koristi model kosog rezanja glavne oštrice i ortogonalni model rezanja s negativnim kutom prednje površine na poprečnoj oštrici za predviđanje aksijalne sile i momenta kod makrobušenja spiralnim svrdlima.



Slika 2.22 Shematski prikaz sila bušenja na elementarni dio oštrice kod modela kosog rezanja [73, 74, 75]

Gong [44] je proučavao dinamiku početnog prodiranja svrdla koje obuhvaća proklizavanje svrdla i posljedično vrludanje, kod spiralnih svrdala za određivanje kvalitete provrta. Dinamičke sile bušenja modelirane su zamjenom statičke površine odvojene čestice u mehaničkom modelu i statičke debljine odvojene čestice u specifičnim reznim tlakovima s njihovim dinamičkim ekvivalentima. Dinamička promjena debljine odvojene čestice uzrokovana je deformacijom svrdla i pogreškama brušenja svrdla. Dinamička debljina odvojene čestice nije se uzela u obzir, kako bi se smanjilo vrijeme izračuna i stoga što pojednostavljena statička debljina odvojene čestice daje dovoljnu točnost kod modeliranja sile. Roukema je predstavio mehanički model sile rezanja koji može predvidjeti moment rezanja i aksijalnu silu kao funkciju posmične brzine, radijalne dubine i geometrije [76, 77, 78, 79].

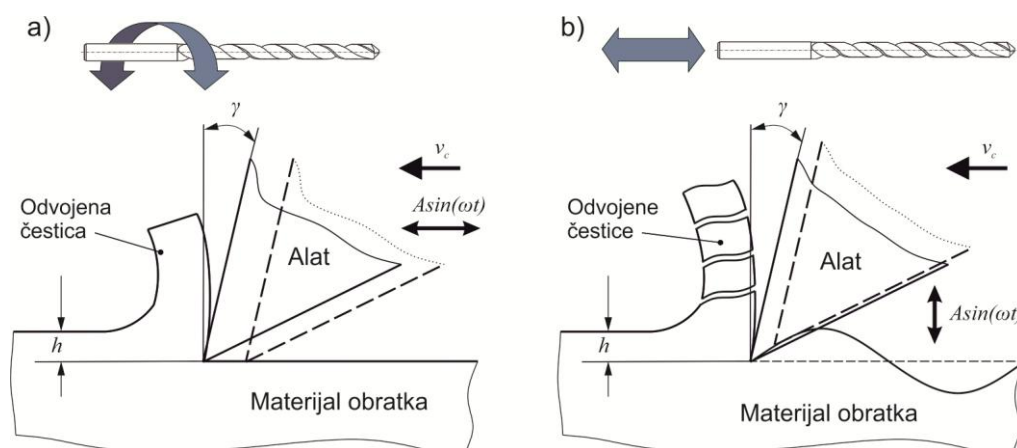
Mehanički model sile rezanja mikrobušenja razvijen je od strane Gonga [41], gdje su se koeficijenti rezanja dobili iz eksperimentalnih bušenja bez uzimanja u obzir efekta veličine. Razvijen je koncept dinamičke debljine odvojene čestice i varijacije debljine uslijed savijanja

svrdla i greške svrdla. Uzeta je u obzir dinamička površina čestice na glavnoj oštrici i poprečnoj oštrici te su razvijeni modeli sila na glavnoj i sekundarnoj oštrici te zoni utiskivanja. Anand [75] je razvio mehanički model sila mikrobušenja gdje je uzet u obzir radijus oštrice alata i minimalna debljina čestice za slučajeve rezanja s formiranjem čestice i bez formiranja čestice (utiskivanje materijala umjesto rezanja zbog malog omjera veličine odvojene čestice prije deformiranja i radijusa oštrice svrdla). Utjecaj vibracija, udara svrdla, vrludanja i krutosti svrdla nisu uzeti u obzir. Eksperimentalna validacija modela provela se bušenjem provrta dubine 1,5 mm TM svrdlom 0,5 mm u nehrđajućem čeliku, postupkom bušenja s izvlačenjem svrdla ($n = 10000 - 25000 \text{ min}^{-1}$, $f = 0,5 - 6 \text{ } \mu\text{m/okr}$, korak $P = 0,5 \text{ mm}$).

Zhang [80] je razvio matematički model za predviđanje sila rezanja kod mikrobušenja, uzimajući u obzir radijus oštrice alata. Sve predviđene vrijednosti iz modela bile su niže od eksperimentalnih kod bušenja čelika svrdlima promjera 0,5 mm, što se pripisalo faktorima kao što su vibracije i vrludanje svrdla, trenje između svrdla i stijenke provrta te da su neke od konstanti, kao što je omjer smičnog naprezanja, kalibrirane za druge metode obrade, a ne za bušenje. Slično objašnjenje navedeno je i kod Shambhava [81], gdje su predviđene aksijalne sile za velike posmake iz matematičkog modela mikrobušenja bile manje od eksperimentalno zabilježenih kod bušenja čelika svrdlima promjera 0,5 mm, dok model mikrobušenja pokazuje dobru sukladnost s eksperimentalnim rezultatima za debljinu odvojene čestice oko minimalne debljine odvojene čestice.

3. Bušenje potpomognuto vibracijama

Bušenje potpomognuto vibracijama može se podijeliti na bušenje uz pomoć vibracija niskih frekvencija (0,1 Hz do 1000 Hz) te bušenje uz pomoć visokih frekvencija (1 kHz do 80 kHz). Osim frekvencije, postoji podjela i na smjer vibracija: bušenje potpomognuto vibracijama gdje je amplituda u smjeru brzine rezanja, što se postiže superponiranjem torzijskih vibracija na svrdlo i bušenje potpomognuto vibracijama čija je amplituda u smjeru posmaka, što se postiže superponiranjem longitudinalnih vibracija u smjeru osi svrdla (slika 3.1Slika 3.1).



Slika 3.1 Vrste obrade odvajanjem čestica potpomognute vibracijama:
a) vibracije u smjeru brzine rezanja; b) u smjeru posmaka

U ovom odjeljku predstavljena je kinematička analiza trajektorija oštrica svrdla kod bušenja potpomognutoga vibracijama uz koje je vezano formiranje odvojene čestice, geometrija i sile rezanja. Prikazano je trenutno stanje područja bušenja potpomognutoga vibracijama niskih frekvencija i kratki pregled rezultata ispitivanja bušenja potpomognutoga ultrazvučnim vibracijama.

3.1. Kinematika oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama

Proces bušenja potpomognutoga vibracijama temelji se na stvaranju stanja isprekidanog rezanja pod djelovanjem vibracijskog gibanja, pri čemu se odvija niz redovitih perioda prekidanja kontakta između svrdla i obratka. Relativno gibanje alata i obratka je

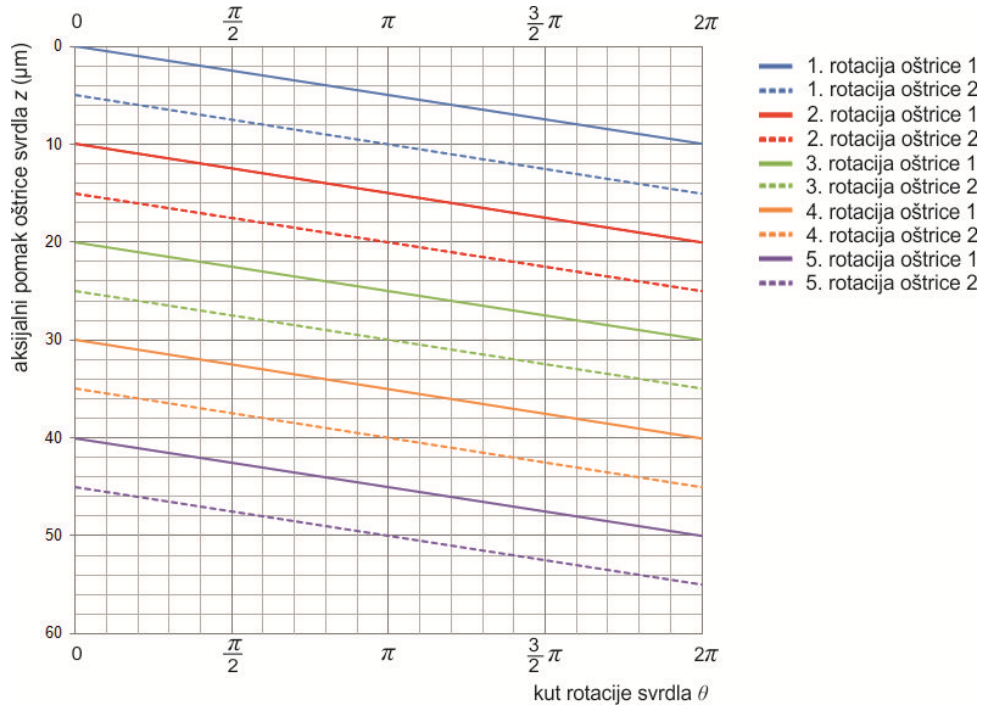
kombinacija konvencionalnog posmičnog gibanja i superponiranog harmoničkog vibracijskog gibanja.

U dostupnoj literaturi, u velikoj većini slučajeva koriste se vibracije u smjeru osi svrdla gdje se harmoničko gibanje alata oko srednjeg puta posmičnog gibanja kontrolira frekvencijom i amplitudom vibracija. Rezultirajući relativni položaji alata i posmaka definiraju geometriju formirane odvojene čestice za određeni trenutak vremena. Maksimalna debljina čestice prije deformacije h koja odgovara dubini rezanja, postiže se kada je alat u maksimalnom položaju zahvata, dok h može pasti na vrijednost nula u položaju punog odvajanja. Trajanje ciklusa zahvata kontrolira frekvencija vibracija, a amplituda vibracija mora biti dovoljno velika kako bi se prekinuo kontakt između alata i obratka te stvorile manje odvojene čestice koje lakše izlaze iz provrta, čime se smanjuje trenje na kontaktu s alatom i sile rezanja. Promjena položaja i aksijalne brzine alata mijenja i geometriju rezanja (naročito efektivni kut prednje površine). Preklapanje putanja oštrica alata koje slijede jedna iza druge, a koje se događa pri bušenju uz pomoć vibracija, također mogu pozitivno utjecati na kvalitetu površine provrta. Sve navedeno izravno utječe na energiju rezanja koja se prenosi, prvenstveno, na sile rezanja i toplinu, a varijacija kutova rezanja i debljine čestice prije deformacije, u ovisnosti o vremenu, čini analizu bušenja potpomognutoga vibracijama složenom.

Aksijalna debljina čestice prije deformacije za konvencionalno bušenje svrdlom s dvije oštrice je konstantna i može se izračunati jednadžbom:

$$h = \frac{f}{2} \quad (3.1)$$

Slika 3.2 prikazuje trajektorije oštrice 1 (prikazana punom crtom) i oštrice 2 (prikazana isprekidanom crtom) bez dodanih vibracija.



Slika 3.2 Trajektorije dviju oštrica svrdla kod bušenja bez primjene vibracija
($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 0$, $A = 0$)

Međutim, za bušenje potpomognuto vibracijama, aksijalna debljina čestice prije deformacije varira s vremenom. Prema metodologiji iz više radova [82, 83, 84], trenutna aksijalna debljina čestice prije deformacije kod bušenja potpomognutoga vibracijama može se procijeniti analizom trenutnog položaja oštrice svrdla.

Pomak je jednak zbroju pomaka uslijed posmaka $ff_r t$ i pomaka uslijed vibracija $A \sin(2\pi f_v t)$ kako slijedi:

$$z(t) = f f_r t + A \sin(2\pi f_v t) \quad (3.2)$$

$$f_r = \frac{n}{60} \quad (3.3)$$

U jednadžbi 3.2 vrijeme $t = 0$ predstavlja svrdlo neposredno iznad obratka, a $z(0) = 0$. Trenutna brzina oštrice u aksijalnom smjeru je:

$$\dot{z}(t) = f f_r + 2\pi f_v A \cos(2\pi f_v t) \quad (3.4)$$

Da bi se odredila aksijalna debljina čestica prije deformacije koja utječe na sile bušenja, potrebno je pratiti maksimalnu dubinu pri kutu vrtnje θ .

$$\theta = 2\pi f_r t \quad (3.5)$$

$$z(\theta) = \frac{f\theta}{2\pi} + A \sin\left(\frac{f_v\theta}{f_r}\right) \quad (3.6)$$

Aksijalna brzina i aksijalna akceleracija su prema tome:

$$\dot{z}(\theta) = \frac{f}{2\pi} + \frac{f_v A}{f_r} \cos\left(\frac{f_v\theta}{f_r}\right) \quad (3.7)$$

$$\ddot{z}(\theta) = \left(\frac{f_v}{f_r}\right)^2 A \sin\left(\frac{f_v\theta}{f_r}\right) \quad (3.8)$$

Uvedena je veličina r_f kao omjer frekvencije vibracija f_v i frekvencije vrtnje f_r jedne oštrice:

$$r_f = \frac{f_v}{f_r} \quad (3.9)$$

te je jednadžba trajektorije točke na glavnoj oštrici:

$$z(\theta) = \frac{f\theta}{2\pi} + A \sin(r_f \theta) \quad (3.10)$$

Razlika između kutova rotacije dvije oštrice svrdla (oštrice 1 i oštrice 2) je π pa je aksijalna debljina odvojene čestice prije deformiranja h_f (debljina u smjeru posmaka f) razlika između aksijalnih pomaka dviju točaka na oštricama 1 i 2.

$$z_1(\theta) = \frac{f\theta}{2\pi} + A \sin(r_f \theta) \quad (3.11)$$

$$z_2(\theta) = \frac{f(\theta + \pi)}{2\pi} + A \sin[r_f(\theta + \pi)] \quad (3.12)$$

$$h_f(\theta) = z_2(\theta) - z_1(\theta) \quad (3.13)$$

$$h_f(\theta) = \frac{f}{2} + 2A \sin\left(\frac{r_f \pi}{2}\right) \cos\left[r_f \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)\right] \quad (3.14)$$

Za svrdlo s k oštrica jednadžba ima oblik:

$$h_f(\theta) = \frac{f}{k} + 2A \sin\left(\frac{r_f \pi}{k}\right) \cos\left[r_f \left(\theta + \frac{\pi}{k}\right)\right] \quad (3.15)$$

Minimalna aksijalna debljina nedeformirane čestice za svrdlo s dvije oštrice:

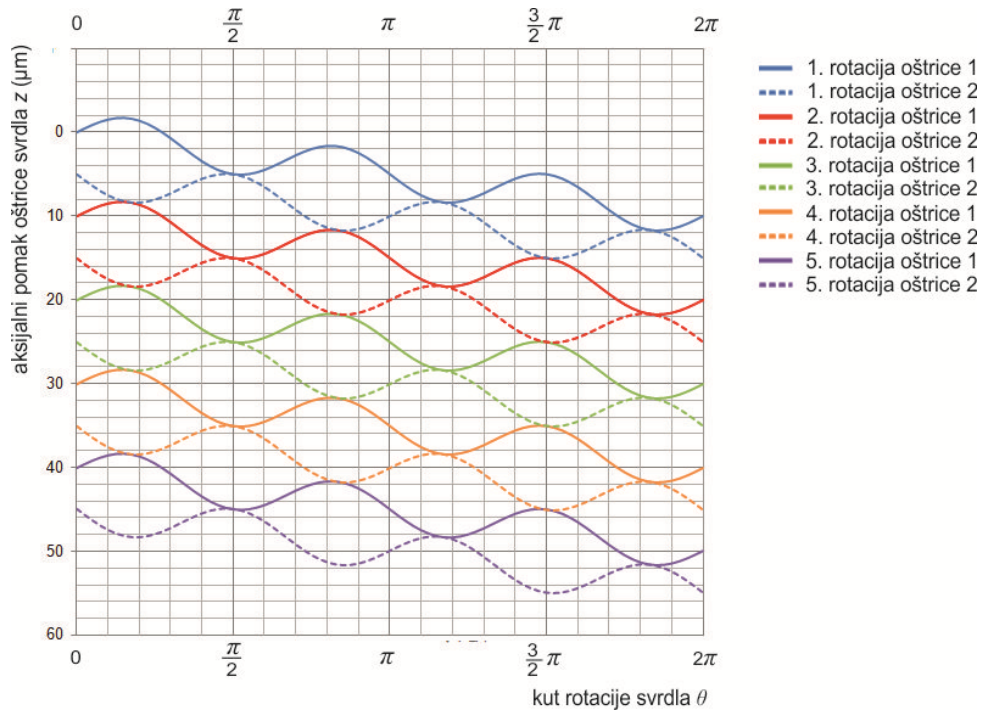
$$h_{f \min} = \frac{f}{2} - 2A \sin\left(\frac{r_f \pi}{2}\right) \quad (3.16)$$

Isprekidano rezanje događa se kada je $h_{f \min} \leq 0$ pa je uvjet isprekidanog rezanja izražen jednadžbom:

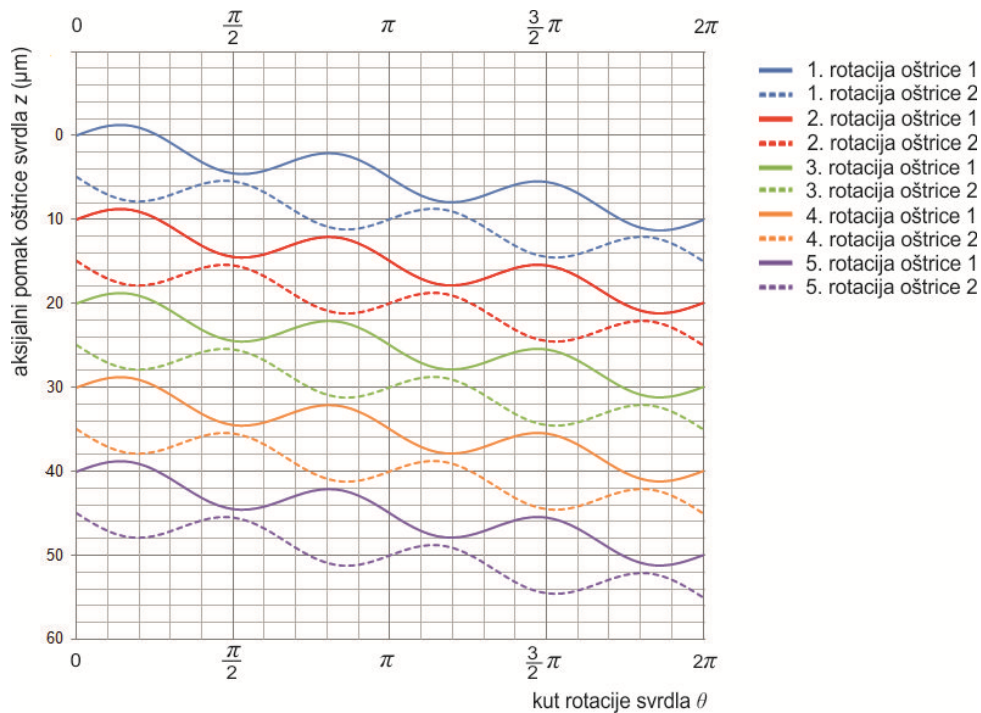
$$\frac{A}{f} \geq \frac{1}{4 \sin\left(\frac{r_f \pi}{2}\right)} \quad (3.17)$$

Slika 3.3 prikazuje trajektorije oštrica svrdla uz kombinaciju parametara koja ispunjava uvjet isprekidanog rezanja, gdje je $h_{f \min} = 0$.

Slika 3.4 prikazuje slučaj gdje veličina amplitude vibracija nije dovoljna za ispunjenje uvjeta isprekidanog rezanja.



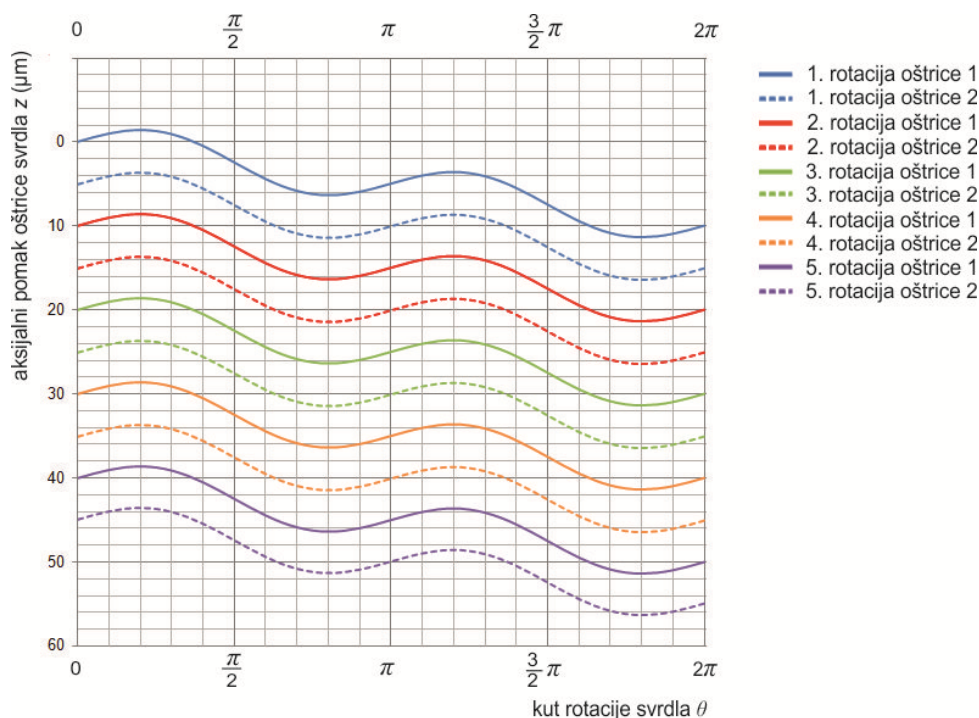
Slika 3.3 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama
($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 3$, $A = 2,5 \mu\text{m}$)



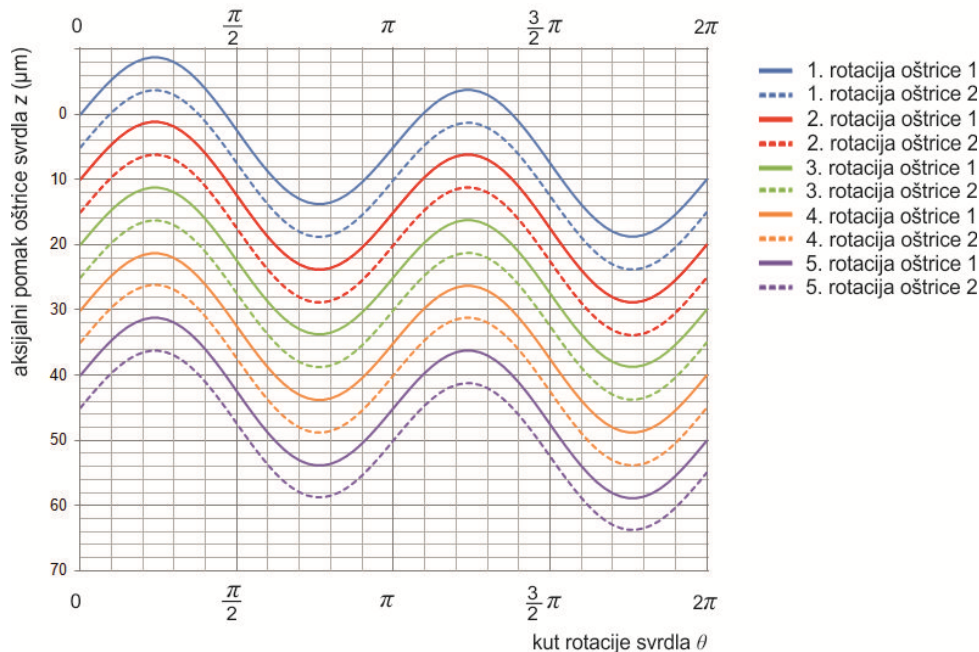
Slika 3.4 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama
($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 3$, $A = 2 \mu\text{m}$)

Kada je vrijednost r_f jednaka cjelobrojnom parnom broju (2, 4, 6...) izraz $\sin(r_f \pi / 2)$ u jednadžbi 3.17 ima vrijednost 0. U tom slučaju, uvjet iz jednadžbe 3.17 ne može biti ispunjen

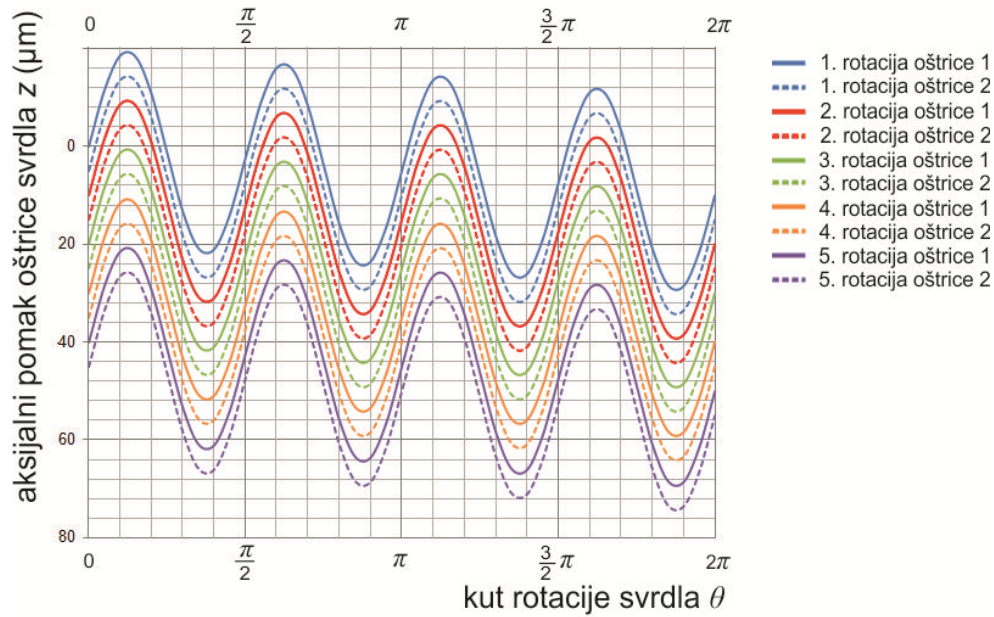
i neće doći do isprekidanog rezanja prilikom bušenja potpomognutoga vibracijama (slika 3.5), bez obzira koliko velika bila vrijednost amplitude A (slike 3.6 i 3.7).



Slika 3.5 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama ($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 2$, $A = 2,5 \mu\text{m}$)



Slika 3.6 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama ($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 2$, $A = 10 \mu\text{m}$)



Slika 3.7 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama
($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $r_f = 4$, $A = 20 \mu\text{m}$)

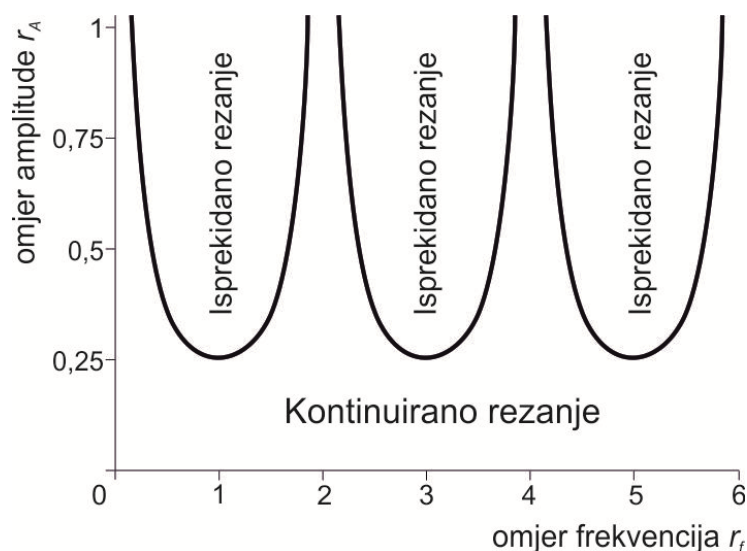
S druge strane, uvjet za isprekidano rezanje iz jednadžbe 3.17 ne može biti ispunjen i ako amplituda vibracija za određeni omjer frekvencija r_f nije dovoljno velika u odnosu na posmak f (slika 3.7). Uvedena je veličina r_A kao omjer amplitude vibracija A i posmaka po okretaju svrdla f :

$$r_A = \frac{A}{f} \quad (3.18)$$

te se jednadžba 3.17 može prikazati i kao:

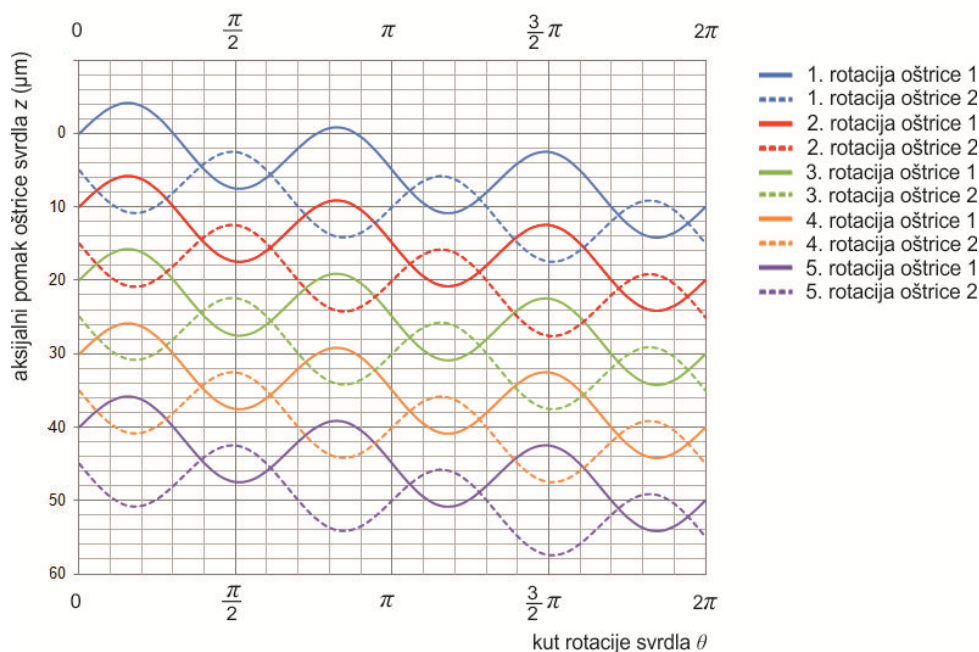
$$r_A \geq \frac{1}{4 \sin\left(\frac{r_f \pi}{2}\right)} \quad (3.19)$$

Prema jednadžbi 3.19 izveden je dijagram s krivuljama prijelaza iz kontinuiranog u isprekidano rezanje, u ovisnosti o omjeru frekvencija r_f i omjeru amplituda r_A kao omjera amplitude vibracija i posmaka po okretaju svrdla (slika 3.8).



Slika 3.8 Krivulje prijelaza iz kontinuiranog u isprekidano rezanje za bušenje svrdlima s dvije oštrice

Jednadžba 3.17 ne može opisati sve slučajeve isprekidanog rezanja. Kada je amplituda toliko velika da premašuje uvjet iz jednadžbe 3.17, trajektorije se međusobno presijecaju i oštrica izlazi iz kontakta (slika 3.9).



Slika 3.9 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama ($f = 10 \mu\text{m}/\text{okr}$, $r_f = 3$, $A = 5 \mu\text{m}$)

Jednadžba trajektorije točke oštrice za j -ti prolaz:

$$z_j(\theta) = \frac{f(\theta - j\pi)}{2\pi} + A \sin[k_f(\theta - j\pi)] \quad (3.20)$$

$$(j = 1, 2, \dots, k)$$

jednadžba trajektorije točke oštrice za posljednji prolaz $k+1$:

$$z_{k+1}(\theta) = \frac{f\theta}{2\pi} + A \sin(k_f\theta) \quad (3.21)$$

Aksijalna debljina čestice prije deformiranja jednaka je razlici između aksijalnog položaja oštrice posljednjeg prolaza $k+1$ i maksimuma aksijalnih položaja trajektorija prethodnih prolaza oštrica.

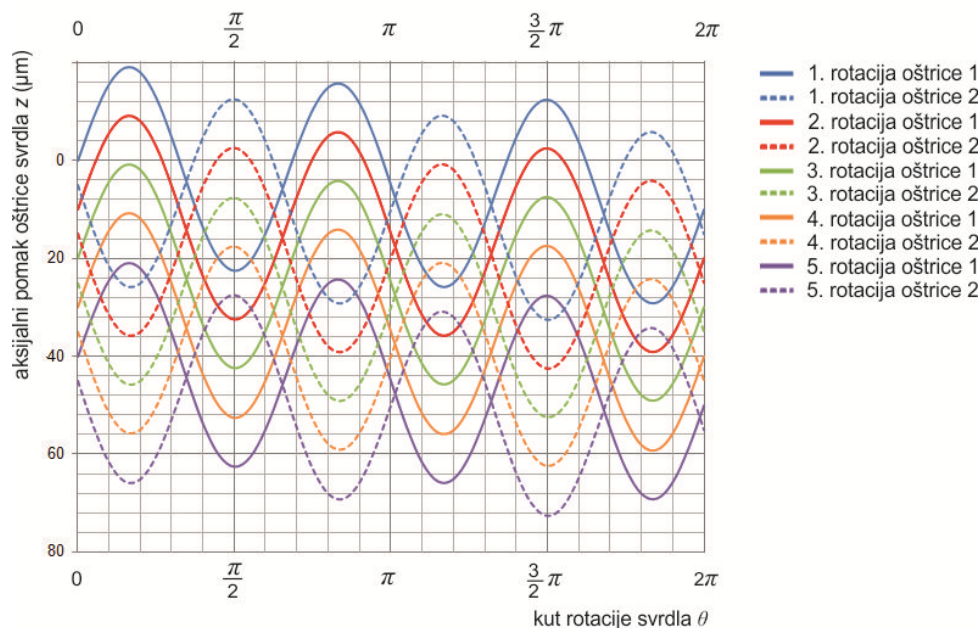
$$h_f(\theta) = z_{k+1}(\theta) - \max\{z_1(\theta), z_2(\theta), z_3(\theta), \dots, z_j(\theta), \dots, z_k(\theta)\} \quad (3.22)$$

$$h_f = h_f \quad \text{ako je } h_f > 0$$

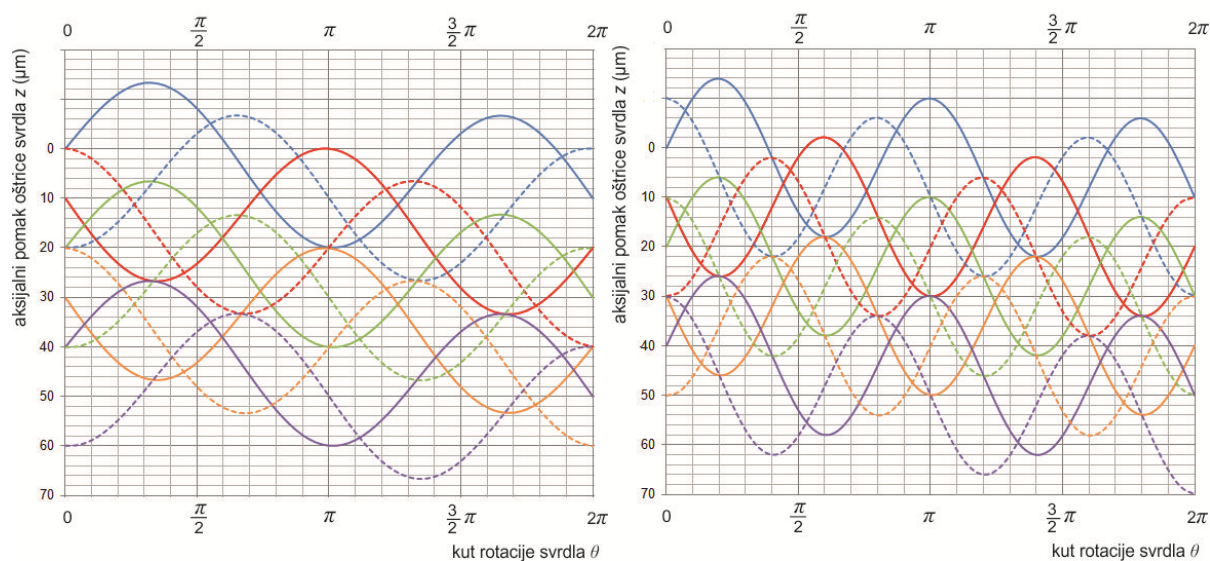
$$h_f = 0 \quad \text{inače}$$

Prema tome, upravljanje mehanizmom nastanka isprekidanih čestica vrši se kombinacijama amplitude vibracija A , frekvencije vibracija f_v , frekvencije vrtnje svrdla f_r i posmaka f .

Slika 3.10 pokazuje kako povećanje amplitude izravno povećava h_f zbog povećanja dubine zahvata tijekom radnog ciklusa. Postoji veliki broj kombinacija parametara bušenja i parametara vibracija, uslijed kojih dolazi do kompleksnog preklapanja trajektorija oštrica svrdla (primjeri na slici 3.11), većeg broja različitih aksijalnih debljina čestice i time otežanog planiranja procesa bušenja potpomognutoga vibracijama.



Slika 3.10 Trajektorije dviju oštrica kod bušenja potpomognutoga vibracijama
($f = 10 \mu\text{m/okr}$, $f_r = 3$, $A = 10 \mu\text{m}$)

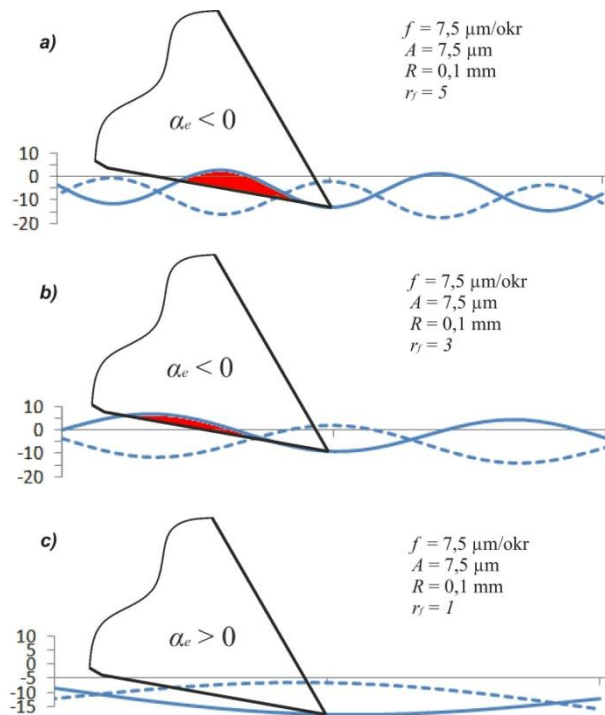


Slika 3.11 Primjeri kompleksnijih preklapanja trajektorija dviju oštrica kod
bušenja potpomognutoga vibracijama

Povećanje amplitude vibracija uzrokuje povećanje aksijalne brzine oštrice svrdla (jednadžba 3.7) što direktno utječe na udarno djelovanje, tj. impuls sile (umnožak sile i brzine). Osim toga, povećanje amplitude, uz istu frekvenciju vibracija, može povećati površinu kontakta između stražnje površine svrdla i dna provrta obrađenog prethodnom

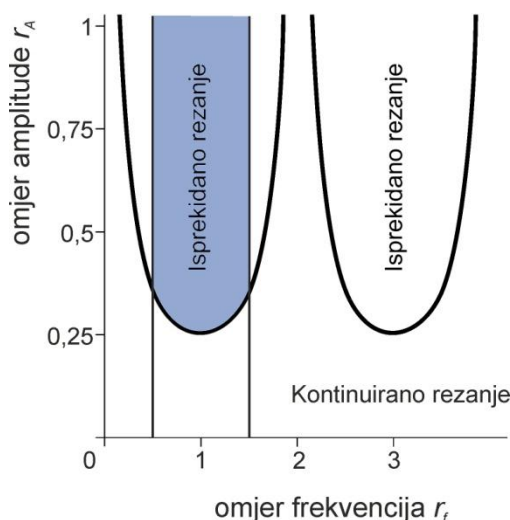
trajektorijom oštrice, mijenjajući efektivni kut stražnje površine α_e . To može negativno djelovati na svrdlo, stvarajući veću natražnu silu i time veće opterećenje na svrdlo.

Na isti način, može se promatrati povećanje omjera frekvencija r_f za istu amplitudu vibracija, posebice kod dijela glavne oštrice koji je bliži osi svrdla. Na slici 3.12 prikazan je primjer smanjenja efektivnog kuta stražnje površine α_e povećanjem omjera frekvencija r_f pri istoj amplitudi vibracija.



Slika 3.12 Utjecaj promjene frekvencije vrtnje uz istu vrijednost amplitude na promjenu efektivnog kuta

Uzimajući u obzir kako mikrobeušenje zahtijeva što manju aksijalnu silu, u ovom istraživanju bit će razmatrane vrijednosti omjera frekvencija r_f rasponu od 0,5 – 1,5. (slika 3.13).



Slika 3.13 Raspon promatranih omjera frekvencija u istraživanju

3.2. Pregled stanja područja istraživanja bušenja potpomognutoga niskofrekventnim vibracijama

Analizirani su dostupni radovi s eksperimentalnim rezultatima bušenja potpomognutih vibracijama nižih frekvencija, objavljeni posljednjih 20 godina i prikazani kronološki za promjere svrdla iznad 1 mm (tablica 3.1) i za mikrosvrdla ispod promjera od 1 mm (tablica 3.2). Tablice sadrže promjer i materijal svrdla, omjer dubine i promjera provrta L / d , korištene materijale obradaka te parametre bušenja i vibracija.

Glavne značajke bušenja potpomognutoga vibracijama su dinamički uvjeti rezanja, tako da vrijednosti posmaka, brzina rezanja i kutova oštice alata ovise o vremenu, što rezultira periodičkom fluktuacijom sila rezanja i rasterećenjem reznih oštrica zbog izlaza iz kontakta s materijalom obratka, promjenom sile trenja na kontaktnim površinama između alata obratka i odvojenih čestica te udarnim djelovanjem svrdla. Zabilježeni su pozitivni učinci primjene vibracija kod bušenja, prvenstveno u vidu smanjenja prosječne sile i temperature, manje veličine odvojenih čestica i njihovog boljeg uklanjanja te povećanom učinkovitosti primjene SHIP-a. Radovi su također pokazali da postoje bolji ili povoljniji parametri vibracija. Kako bi se povećala učinkovitost obrade odvajanjem čestica potpomognute vibracijama nižih frekvencija, navodi se kako je potrebno pažljivo odabrati parametre vibracija.

Tablica 3.1 Pregled istraživanja vezanih uz bušenje većih promjera potpomognuto vibracijama niskih frekvencija (LFVAD)

Rad	d (mm)	L/d	Materijal svrdla	Materijal obratka	n (min^{-1})	f_r (Hz)	f ($\mu\text{m}/\text{okr}$)	f_v (Hz)	r_f	A (μm)
[83]	3	-	HSS	Cr-Ni čelik	1350	22,5	10	100	4,44	35
[85]	2	-	HSS	FRP	1500	25	5-30	200-600		2-10
[86]	6,35	-	HSS	Al, čelik	1500	25	5	25-125	1-5	40
[87]	2	2,4	HSS	CFRP	22000	366	2-13	100-500	0,27- 1,36	2-10
[88]	6	0,6	HSS	GFRP	630	10,5	40	220	21	5-20
[89]	6	0,6	TM	GFRP	630	10,5	40	220	21	5-20
[90]	3	-	-	Aluminij	1350	22,5	10	100	4,44	1-16
[91]	4	6	HSS/TiN	Čelik	6500	108,3	70	Samo- uzbuda	-	varira
[92]	-	-	HSS	GFRP	($v_c=18,85$ m/min)	-	200-600	50-300	-	5-20
[93]	6	-	HSS	Čelik	3000	50	50	Samo- uzbuda	-	varira
[94]	3	-	HSS	Al, Cr-Ni čelik	2400	40	10-30	40-60	1 i 1,5	16
[95]	3	1	TM	Legura titana	10000	166,6	20-40	10-30	0,06- 0,18	240
[96]	3	4	HSS	Aluminij	3600	60	40	60	1	16,5
[97]	3	4	TM	Cr-Ni čelik	1000	16,7	10	0,5-8	0,5	50
[98]	8	2,5	HSS	Čelik	400	6,66	100	22	3,3	500
[11]	1,2	12,5	TM	Legura nikla	2040	37	20	102	3	15
[11]	5	15	TM	Cr-Ni čelik	2400	40	10	200	5	10
[11]	7	5	TM	Legura bakra	4800	80	100	240	3	30
[99]	6	-	-	-	480	8	60	10-15	1,25- 1,88	60, 180
[100]	6,37	1,6	TM	Aluminij	5000	83	100	125	1,5	50- 350
[101]	4,83	2	TM	CFRP/Ti6Al4V	1000	16,7	75	25	1,5	115
[102]	4,83	2	TM	CFRP/Ti6Al4V	1000	16,7	75	25	1,5	115
[103]	3,5	3,4	TM	Cr-Ni čelik	2400 - 3300	40-55	15-30	300	5,5	8-16

Rad	d (mm)	L / d	Materijal svrdla	Materijal obratka	n (min^{-1})	f_r (Hz)	f ($\mu\text{m/okr}$)	f_v (Hz)	r_f	A (μm)
[104]	6	-	TM	CFRP	6000 – 12 000	100 - 200	50-150	30 i 60	0,33	20 - 200
[105]	4,8	2	TM	Legura titana	($v_c = 7 - 21$ m/min)		75-125		1,5	95 - 135
[106]	2	-	TM	Cr-Ni čelik	1000 – 3000	16,6 - 50	1-5	100-300	2-18	2-6
[107]	8	1	TM	Aluminij	300	5	50	12,5	2,5	200
[108]	2	5	TM	Legura titana, bakar	3600 - 4800	60, 80	10-30	120-240	2-3	13, 22
[109]	2,6	3,8	TM	Aluminij, čelik, legura titana	3600	60	20-40	120-180	2-3	20 - 36
[110]	4	1	TM	CFRP	1200 - 2400	20 - 40	45	110-220	5,5	47
[111]	6	1,1	Dijamantna prevlaka	CFRP	11000	183	40-80	55	0,3	5 - 20
[112]	6	-	TM	Legura titana	1000	16,6	40	0,8-12,5	0,05- 0,75	600

Tablica 3.2 Pregled istraživanja vezanih uz mikrobušenje potpomognuto vibracijama niskih frekvencija

Rad	d (mm)	L / d	Materijal svrdla	Materijal obratka	n (min^{-1})	f_r (Hz)	f ($\mu\text{m/okr}$)	f_v (Hz)	r_f	A (μm)
[113]	0,28	-	HSS	Mjed, čelik, Cr-Ni čelik	15000	250	4	250	1	5,5
[114]	0,4	5	HSS	Čelik	18000	300	10	300 - 1500	1 - 5	5
[9]	0,28	5,7	HSS	Čelik	15000	250	4	250	1	5,5
[115]	0,5	-	TM	Cr-Ni čelik	3500	66	7	90	1,5	3,5
[116]	0,5	-	HSS	Kompozit	22000	366	1-5,5	200-500	0,5 - 1,5	0-10
[117]	0,5	4	HSS, TM	FRP	22000	366	2,7,11	100-500	0,27- 1,37	2-10
[11]	0,76	19	TM	Legura nikla	4020	67	5	67	1	2
[11]	0,32	7,8	HSS/ TiN	Čelik	9660	161	5	161	1	4
[10]	0,1	15	TM	Cr-Ni čelik	5040	84	1	0-252	0,35- 2,38	2-10

3.2.1. Utjecaj primjene niskofrekventnih vibracija na aksijalnu silu

Wang [117] je pokazao kako bušenje uz vibracije niske frekvencije može smanjiti aksijalne sile i kako postoje povoljni parametri vibracija za određene uvjete rezanja, a kod bušenja FRP-a smanjenje prosječne aksijalne sile, u odnosu na sile konvencionalnog bušenja vezano je s promjenama u formiranju odvojene čestice, stvaranju pukotina i akumulaciji lomova materijala. Rezultati su pokazali kako je veličina aksijalne sile ponajprije pod utjecajem posmaka. Povećanjem posmaka i amplitude, nakon određene granice povećava se aksijalna sila, što je objašnjeno povećanim opterećenjem svrdla s jakim udarnim opterećenjem između svrdla i dna provrta. Aksijalna sila zabilježena primjenom HSS svrdala bila je veća, u usporedbi s onom zabilježenom kod TM svrdala, što se pripisuje ubrzanom trošenju alata zbog većeg abrazivnog djelovanja čestica vlakana na HSS alate, u usporedbi s tvrdometalnim alatima.

Sadek [104] bilježi kako se, u usporedbi s konvencionalnim bušenjem, prosječna aksijalna sila može smanjiti do 36% bušenjem potpomognutim vibracijama, no povećanjem posmaka i amplitude vibracija ona se povećava. Pri istoj frekvenciji vibracija povoljnija je niža učestalost vrtnje, pri kojoj se bilježi manja aksijalna sila, jer se ostvaruje više prekidanja i manja debljina čestice. Najdominantniji učinak na aksijalnu silu imaju redoslijedom: amplituda A , posmak f , učestalost vrtnje n i frekvencija vibracija f_v , što je i očekivano, pošto se radi o bušenju s niskom frekvencijom i velikim amplitudama ($f_v = 60$ Hz, $A = 0,4$ mm).

Arul [92] je pokazao kako se aksijalna sila povećava s posmakom te je smanjena za oko 40%, u usporedbi s konvencionalnim bušenjem. Smanjenje aksijalne sile pripisano je udarnom djelovanju na kompozit u aksijalnom smjeru (koje zahtijeva manje sile za stvaranje odvojenih čestica, uslijed koncentracije energije rezanja) i smanjenoj sili trenja na kontaktu između prednje površine alata i odvojenih čestica, uslijed isprekidanog kontakta svrdla i obratka. Bušenje potpomognuto vibracijama povećava broj izbušenih provrta za 67%, prije no što dođe do kritične razine aksijalne sile ili faktora delaminacije. Predlaže se korištenje *on-line* nadzora aksijalne sile za kontrolu parametara bušenja, na temelju dobre korelacije između aksijalne sile i faktora delaminacije.

Debnath [110], bušenjem potpomognutim vibracijama plastike ojačane ugljičnim vlaknima bilježi do 15% manju prosječnu silu, no maksimalna aksijalna sila bila je veća u usporedbi s bušenjem bez vibracija. Faktor delaminacije primjenom bušenja uz pomoć vibracija manji je do 15%. Guo [109] bilježi veće maksimalne vrijednost aksijalne sile kod

bušenja potpomognutom vibracijama titana za 70%, čelika za 130% i aluminija za 50%, u usporedbi s bušenjem bez vibracija. Srednja vrijednost sile bila je 10% niža za titan, 30% za aluminij, ali i 30% viša za čelik. Utvrđeno je kako elasticitet komponenti sustava uvjetuje podatnost koja uzrokuje prigušenje, tj. smanjenje amplitude vibracija.

3.2.2. Utjecaj odabira frekvencije i amplitude vibracija, posmaka i učestalosti vrtnje

Chhabra [86] je u istraživanju bušenja potpomognutoga vibracijama većih promjera (s već predbušenim provrtom manjeg promjera, tako da poprečna oštrica nije imala utjecaja) koristio linearni motor za generiranje vibracija niskih frekvencija (< 400 Hz) za provjeru kinematičkog modela bušenja potpomognutoga vibracijama razvijenog od strane Toewsa [84], proučavajući učinak omjera frekvencija r_f na lom odvojenih čestica. Primjena neparne vrijednosti r_f rezultirala je slomljenim odvojenim česticama konzistentne veličine i smanjenim prosječnim momentom i prosječnom aksijalnom silom, uz veći utjecaj primjene vibracija na smanjenje prosječne sile nego na moment bušenja. S druge strane, parni cjelobrojni omjer frekvencija rezultirao je kontinuiranim odvojenim česticama, a promjena okretnog momenta i aksijalne sile bila je beznačajna, u usporedbi s konvencionalnim bušenjem [84].

Zhang [87] je predstavio strategiju bušenja potpomognutoga vibracijama FRP materijala, uz varijaciju frekvencije i amplitude vibracija te posmaka bušenja. Faktor za varijaciju parametara bio je kritična vrijednost aksijalne sile, kod koje dolazi do delaminacije materijala obratka. Proces bušenja podijeljen je u tri faze. Prva faza je početak bušenja, kada svrdlo dođe u kontakt s obratkom, gdje se koristi veća brzina rezanja, bez pojave delaminacije materijala obratka. U drugoj fazi, nakon što je svrdlo potpuno u obratku i prije izlaska iz obratka, parametri se mijenjaju kako bi se osigurala niža aksijalna sila bušenja od kritične. U trećoj fazi, kada svrdlo počinje izlaziti iz obratka, koristi se niža brzina rezanja, jer je tada kritična sila aksijalne sile značajno niža. Pokazalo se da se ovom tehnikom količina delaminacije može smanjiti.

Ma [98] eksperimentalno pokazuje kako vrijednosti omjera r_f od 1,33 i 1,67 kreiraju isprekidane čestice, ali su kod omjera 1,67 one manje veličine. U rasponu omjera r_f od 0,03 do 0,5 najmanje odvojene čestice bile su pri većim frekvencijama vibracija, tj. pri $r_f = 0,5$ kod bušenja potpomognutoga vibracijama teško obradivog nehrđajućeg čelika [97].

Mann [11] je eksperimentalno ispitao kinematički model bušenja potpomognutoga niskofrekventnim vibracijama bušenjem svrdlima promjera od 0,32 do 7 mm. Rezultati su

pokazali nužnost korištenja nešto veće amplitude no što je predviđeno kinematičkim jednadžbama, uz preporuku korištenja što većeg omjera frekvencija r_f za stvaranje manjih odvojenih čestica. Lai [106] je razmatrao utjecaj parametara bušenja potpomognutoga vibracijama na točnost položaja i veličinu srha, gdje je utvrđeno da najveći utjecaj imaju redoslijedom frekvencija vibracija, posmak, amplituda i učestalost vrtnje. U razmatranom rasponu postignuti su optimalni rezultati na najvećoj frekvenciji, brzini vrtnje i amplitudi te najmanjem posmaku. Aksijalna sila i faktor delaminacije opadaju povećanjem brzine i frekvencije vibracija, a rastu povećanjem posmaka i amplitude vibracija, kao i u radu Kua [111] gdje je manja amplituda vibracija imala najveći utjecaj na manju aksijalnu silu. Guo [108] navodi kako se povećanjem amplitude povećava dinamička aksijalna sila te je poželjno držati vrijednost amplitude što nižom, uz ispunjavanje uvjeta isprekidanog rezanja.

3.2.3. Veličina odvojenih čestica i njihovo odvođenje iz provrta

Pecat [100], na temelju kinematičkog modela bušenja potpomognutoga niskofrekventnim vibracijama, uvodi karakterizaciju oblika odvojenih čestica s maksimalnim posmakom po zubu, radijalnim kutom čestice, posmičnom brzinom u trenutku ulaska u obradak i omjerom vremena rezanja čestice $R_c = T_c / T_v$. Povećanjem amplitude radijalni kut čestice opada, posmična brzina u trenutku ulaska u obradak značajno se povećava (utječe na udarnu silu na svrdlo), a omjer vremena rezanja pada do 25% ukupnog vremena (utječe na temperaturu). Eksperimentalno odstupanje oblika čestica od modela pripisuje se deformaciji čestica. Isti autor u radu [102] pokazuje da bušenje potpomognuto vibracijama omogućuje bolje izvlačenje čestica titana, koje tako ne oštećuju CFRP sloj kompozita te manji srh i bolju kvalitetu površine provrta, izbjegavanjem termomehaničkih oštećenja. Brinkemeister u radu [105] uvodi indeks odvođenja odvojenih čestica, gdje niži posmak i velike amplitude vibracija daju najbolje rezultate. Također primjena minimalne količine SHIP-a omogućuje bolje odvođenje čestica, uz niže vrijednosti sila i temperature procesa bušenja.

Guo [108] je predstavio kinematički model bušenja potpomognutoga niskofrekventnim vibracijama, uz eksperimentalnu evaluaciju veličine čestica i njihove evakuacije iz provrta. Veličina odvojenih čestica ovisila je o frekvenciji vibracija, dok amplituda u promatranom rasponu nije imala utjecaj. Istaknuto je kako se frekvencijom vibracija kontrolira proces formiranja odvojenih čestica samo u jednoj dimenziji, jer se širina čestica definira radijusom koji je nepromijenjen frekvencijom vibracija.

3.2.4. Temperatura kod bušenja potpomognutoga vibracijama

Studije o temperaturi rezanja, kod isprekidanog rezanja, ističu značajnu ulogu prekinutog kontakta između alata i obratka kod smanjenja temperature [118, 119]. Sile rezanja kod isprekidanog rezanja metala su smanjene, u nekim slučajevima zbog manjeg vremena kontakta i duljine između odvojene čestice i prednje površine alata, što smanjuje komponentu sile trenja [120]. Okamura je u radovima [95, 112] ukazao na povoljan učinak smanjenja temperature kod bušenja potpomognutoga vibracijama nižih frekvencija i većih amplituda (LFHAVAD). Za razliku od konvencionalnog bušenja, pri superponiranju vibracija omjer vremena rezanja je mali i 3-8 puta veća debljina čestica prije deformiranja, ali je stoga i maksimalna aksijalna sila veća. Isti autor u radu [95] bilježi za otprilike 30% manje trošenje, uz komentar da se zbog manjih odvojenih čestica uz veću amplitudu i frekvenciju, može očekivati duži vijek trajanja svrdla. Rezultati ispitivanja iz [112] pokazuju kako konvencionalno bušenje ima nižu temperaturu pri početku bušenja, no daljnjim tijekom bušenja temperatura kod konvencionalnog bušenja je veća, u usporedbi s bušenjem potpomognutim vibracijama. Varijacije u modelu temperature odgovaraju varijacijama debljine čestice prije deformiranja i razlikama perioda kada svrdlo nije u kontaktu. Utjecaj trenja svrdla i provrta nije uziman u obzir, kao ni utjecaj nagomilanih čestica unutar utora spirale svrdla.

Shi [99] bušenjem potpomognutim vibracijama bilježi nižu temperaturu bušenja do 37%, a niža temperatura zabilježena je pri većoj amplitudi vibracija. Sadek [104] bilježi kako najveći utjecaj na temperaturu na vrhu svrdla imaju posmak i učestalost vrtnje, gdje je veći posmak značio manju temperaturu (objašnjeno bržim bušenjem koje ne dopušta prijenos topline na svrdlo). Pri srednjim vrijednostima učestalosti vrtnje, zabilježena je najveća temperatura na vrhu svrdla. Niža učestalost vrtnje povezana je s manjom energijom rezanja i time nižom temperaturom, dok je viša učestalost vrtnje omogućavala kreiranje vrtloga zraka i bolje hlađenje. Isti autor u [101] bilježi smanjeno trošenje i temperaturu kod bušenja potpomognutoga vibracijama (do 43% u leguri titana), ali uz veliku aksijalnu silu, prema čemu se zaključilo da na trošenje ima veći utjecaj temperatura (difuzijski procesi) nego sila.

3.2.5. Trošenje alata

Ma [96] je razmatrao mehanizme trošenja i loma svrdala kod bušenja potpomognutoga vibracijama. Povećanjem posmaka povećava se brzina odvajanja materijala i smanjuje se hlađenje i podmazivanje SHIP-a, tako da se brzo događa adhezivno trošenje. S druge strane,

veća amplituda vibracija povećava udarnu silu na vrh svrdla, što uzrokuje oštećenje poprečne oštrice. Povećanjem amplitude produživao se vijek trajanja svrdla, do granice nakon koje je daljnje povećanje amplitude uzrokovalo smanjenje vijeka trajanja. Zaključak je kako općenito vibracije poboljšavaju brzinu rezanja poprečne oštrice i utjecaj SHIP-a, no da bi se povećao vijek trajanja alata, trebala bi biti što veća frekvencija vibracija uz prikladnu amplitudu, mali posmak i frekvenciju vrtnje svrdla.

3.2.6. Vijek trajanja svrdla

Yang [113] na temelju kinematičkog modela, odabire frekvenciju aksijalne vibracije uz omjer $r_f = 1$, kako bi se omogućilo generiranje isprekidanih odvojenih čestica i njihovo lakše odvođenje uz povećanje vijeka trajanja svrdla i smanjenje raspršenja statističke distribucije vjerojatnosti vijeka trajanja svrdla. Isti autor u radu [9], postiže poboljšan vijek trajanja svrdla s djelomično manjim česticama, stvorenim bušenjem potpomognutim vibracijama te njihovim boljim odvođenjem.

Ramkumar [89, 88] i Arul [92] su uspoređivali performanse bušenja uz pomoć vibracija i konvencionalnog bušenja GFRP pri nižim frekvencijama i većim amplitudama vibracija (LFHAV). U obje studije, pokazalo se kako bušenje potpomognuto vibracijama može proizvesti otprilike dvostruko više izbušenih provrta od broja provrta izbušenih konvencionalnim bušenjem prije postizanja kritične razine aksijalne sile, faktora delaminacije ili trošenja alata. U istraživanju Ramkumara ispitivana su tri različita materijala svrdla (svrdlo s vrhom od TM, dvospiralno i trospiralno svrdlo od punog TM), a trospiralno svrdlo od punog TM pokazalo je najbolju izvedbu. Istraživanja Sadeka [121] pokazala su manju delaminaciju i manje toplinsko oštećenje FRP materijala primjenom LFHAVAD, uz pravilnu kombinaciju visoke učestalosti vrtnje s malim ili srednjim posmakom, manjom amplitudom i velikom frekvencijom vibracija.

Ma [94] opisuje povećanu torzijsku krutost svrdla primjenom niskofrekventnih vibracija (mnogo nižih frekvencija od vlastite frekvencije svrdla). Isto je objašnjeno time što prilikom isprekidanog rezanja odvajanje oštrice od materijala obratka mijenja način vibriranja iz prisilnog u slobodno vibriranje i torzijske deformacije mogu brzo nestati pod djelovanjem prigušenja sustava. Eksperimentalno je potvrđeno da se uz pravilni odabir parametara može poboljšati hrapavost površine provrta i vijek trajanja svrdla.

Joshi [103] bilježi kako bušenje potpomognuto vibracijama može značajno poboljšati vijek trajanja svrdla uz manje trošenje pri većoj brzini vrtnje i manjem posmaku. No, kod većeg posmaka vibracije negativno utječu na vijek trajanja svrdla, što je povezano s većim udarnim djelovanjem. Bušenje potpomognuto vibracijama omogućilo je bolju hrapavost površine zbog lakšeg izvlačenja odvojenih čestica i boljeg podmazivanja kontakta svrdla i obratka.

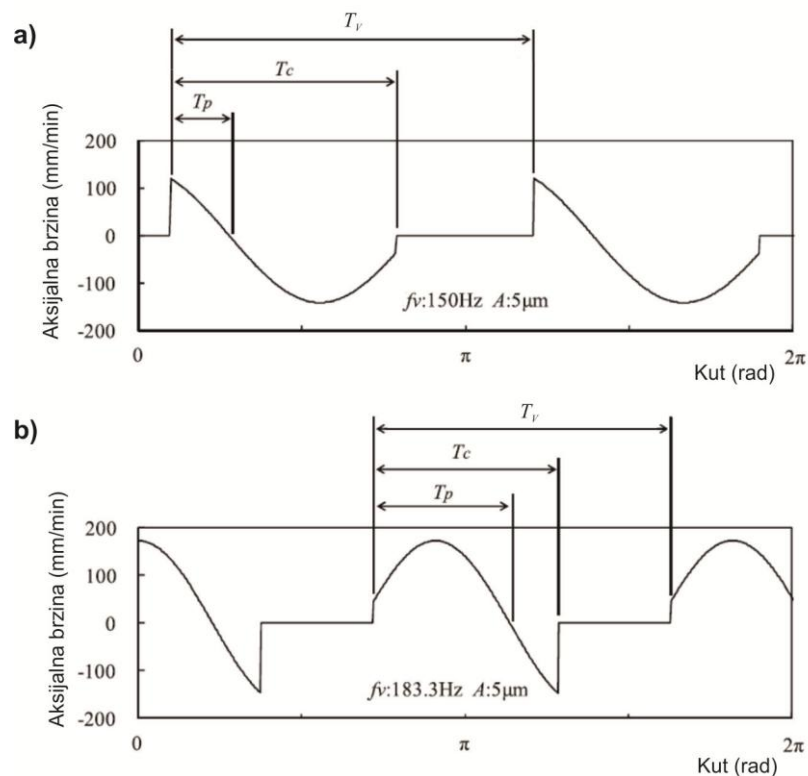
3.2.7. Istraživanja mikrobušenja potpomognutoga niskofrekventnim vibracijama

Yang [113], mikrobušenjem uz pomoć aksijalnih vibracija niske frekvencije, postiže točnost pozicije provrta od 0,04 mm, za koju se smatra da je teško postići za konvencionalno mikrobušenje. Poboljšanje točnosti položaja objašnjeno je prekidnim mehanizmom rezanja uvedenim aksijalnim vibracijama, uz posljedično povećanje vijeka trajanja svrdla i smanjenje raspršenja statističke distribucije vjerojatnosti vijeka trajanja svrdla. Isti autor u radu [9] pokazuje kako su superponirane vibracije omogućile repozicioniranje svrdla prilikom ulaska u materijal obratka. Princip mikrobušenja potpomognutoga vibracijama s niskom frekvencijom koje ima mogućnost točnog zabušivanja opisuje se na sljedeći način: kada svrdlo koje vibrira aksijalno pri nižim frekvencijama počinje rezati, pri kontaktu s površinom obratka vrh svrdla se pomiče bočno, što uzrokuje savijanje svrdla. Kada se vrh svrdla odvoji od obratka, svrdlo vibrira na vlastitoj frekvenciji s vibracijama koja opadaju, tijekom tog perioda svrdlo se ispravlja i ponovo dolazi u točnu poziciju. Ovaj ciklus kontakta, bočnog odstupanja, povlačenja svrdla i ponovnog kontakta svrdla, ponavlja se s frekvencijom aksijalne vibracije i s posmakom svrdla vrh svrdla prilazi željenoj poziciji. To može dovesti do bolje pravocrtности svrdla, manje poprečne sile na svrdlo i u konačnici smanjene mogućnosti vrludanja svrdla i time loma svrdla. Kubota [114] kod mikrobušenja svrdlima $d = 0,4$ mm, postiže najveći broj izbušenih provrta, tj. veći vijek trajanja (od 30 – 40 puta veći nego kod bušenja bez vibracija) pri omjeru frekvencija r_f od 1 i 3, za razliku od vrijednosti omjera r_f od 2, 4 i 5. Objašnjenje za loš rezultat za omjer $r_f = 5$ (premda je neparan cijeli broj) je negativan efektivni kut stražnje površine koji uzrokuje natražnu silu i degradaciju vijeka trajanja svrdla. Kiesewetter [115] dokumentira stvaranje isprekidanih čestica za omjer frekvencija $r_f = 1,5$ te je ostvareno najveće smanjenje aksijalne sile do 49%, za razliku od omjera r_f od 1 i 1,7.

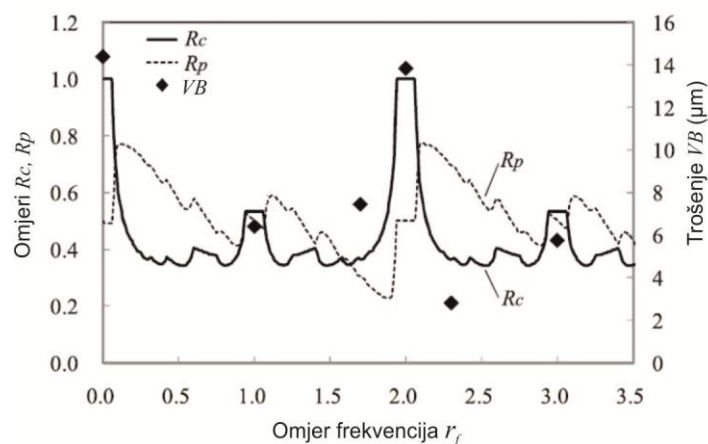
Li [116] je razvio višestupanjsku kontrolu stanja mikrobušenja potpomognutoga vibracijama laminiranog kompozita sačinjenog od nehrđajućeg čelika, GFRP i aluminijske. U radu su mijenjani parametri vibracija prema materijalima obradaka, kao i prema zonama

bušenja: ulaz, sredina i izlaz iz provrta, kako bi se optimirao proces bušenja potpomognutoga vibracijama. Koristeći navedenu tehniku, prosječno odstupanje vrha svrdla smanjeno je za više od 20%, greška promjera provrta za više od 80% i visina srha za više od 40%, u usporedbi s konvencionalnim bušenjem.

Nanbu [10] je pokazao kako se dubokim mikrobušenjem, uz pomoć niskofrekventnih vibracija, uz pravilni odabir omjera r_f i r_A , mogu stvoriti manje odvojene čestice. Za razliku od bušenja bez vibracija, gdje je aksijalna sila kontinuirano rasla, primjenom niskofrekventnih vibracija zabilježena je konstantna sila na svrdlu, što se povezuje s manjim trošenjem alata. Korištena je veličina omjera vremena rezanja $R_c = T_c / T_v$ (odnos vremena dok su alat i obradak u kontaktu i vremena periode vibracija) te omjer pozitivne brzine $R_p = T_p / T_c$ (odnos vremena kada je svrdlo u kontaktu s obratkom odmiče od obratka i ukupnog vremena, dok su alat i obradak u kontaktu – slika 3.14). Zabilježeno je najmanje trošenje pri $r_f = 1$ i visokom omjeru pozitivne brzine R_p i niskom omjeru vremena rezanja R_c , dok je za niski R_p i visoki omjer R_c utvrđeno najveće trošenje (slika 3.15). Uz iste uvjete i najveći omjer r_A postignuta je manja prosječna aksijalna sila na svrdlo te je ona bila konstantna s brojem izbušenih provrta, u usporedbi s bušenjem bez vibracija, gdje je sila rasla povećanjem izbušenih provrta.



Slika 3.14 Različite vrijednosti aksijalnih brzina i omjera R_c i R_p u ovisnosti o različitim frekvencijama vibracija [10]



Slika 3.15 Veza između trošenja alata i omjera vremena rezanja R_c i omjera pozitivne brzine R_p [10]

Kod mikrobušenja, Mann [11] je dokumentirao mogućnost izbjegavanja korištenja bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla, kod bušenja čelika za poboljšavanje svrdlima promjera $d = 0,32$ mm, uz značajno duži vijek trajanja svrdla te mogućnost bušenja provrta dubine preko duljine spiralnog utora, bez loma svrdla kod bušenja legure nikla svrdlima promjera $d = 0,78$ mm. U oba primjera, korišten je omjer frekvencija $r_f = 1$.

3.3. Bušenje potpomognuto ultrazvučnim vibracijama

Kako bi se poboljšao proces bušenja superponiranjem frekvencija većih od 20 kHz, u većini slučajeva se koristi pretvornik (longitudinalni pretvornik ili torzijski pretvornik) za generiranje ultrazvučnih vibracija na strani obratka ili svrdla, gdje obje izvedbe imaju svojih prednosti i ograničenja. Kod izvedbe generatora vibracija na strani obratka, može se ostvariti velika učestalost vrtnje vretena, no obradak u ovom slučaju mora biti relativno male mase i vibracije moraju biti pažljivo kontrolirane, ovisno o obratku. Kod primjene vibracija na strani svrdla, svrdlo može biti pobuđeno ultrazvučnim pretvornikom na koje je pričvršćeno, korištenjem rezonancije vibracijskog sustava [122]. Međutim, to može dovesti do složenijih konstrukcijskih izmjena stroja za bušenje, u usporedbi s prethodnim slučajem, budući da će za takav sustav svrdla i pretvarača biti izazov ostvariti velike učestalosti vrtnje (pretvornici obično imaju velike dimenzije radi širenja valova).

3.3.1. Bušenje provrta većih promjera potpomognuto ultrazvučnim vibracijama

Jedna od glavnih prednosti bušenja uz pomoć ultrazvučnih vibracija je smanjenje sila i momenata koji djeluju na svrdlo. Konvencionalno bušenje, koje je kontinuirani proces

rezanja, promijenjen je u vibracijsko-udarni proces na mikrorazini, a neželjena plastična deformacija i trenje mogu se znatno smanjiti. Visokofrekvencijska impulsna sila koja nastaje tijekom vibracijskog procesa ima značajnu ulogu u poboljšanju procesa rezanja. Time se postiže učinkovitije rezanje, u usporedbi s uobičajenim slučajevima rezanja kod kojih je sila rezanja veća i kontinuirana. Smanjenje sila i momenata koji djeluju na svrdlo kod bušenja potpomognutoga vibracijama navodi se u više radova [74, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131] i prilikom bušenja različitih vrsta materijala.

Vijek trajanja alata značajan je industrijski faktor i može se povećati superponiranjem UV i do 20 puta [125, 132], dok Babitsky [133] dokumentira i mogućnost korištenja istrošenih svrdala kada to, bez pomoći vibracija u nekim materijalima uopće nije moguće. Azghandi [128] navodi kako je smanjenje odvojenih čestica jedan od glavnih razloga povećanja vijeka trajanja svrdla, dok Chang [123] bilježi kako korištenje UZV može dovesti i do smanjenja trajanja svrdla. Azarhoushang [125] je ispitivao ovisnost kružnosti i cilindričnosti provrta o parametrima obrade i UV, gdje su se kružnost i cilindričnost poboljšale primjenom UV. Njihove vrijednosti bile su lošije povećanjem učestalosti vrtnje i posmične brzine, a bolje povećanjem amplitude UV. Hrapavost površine iznimno je bitna karakteristika tehnologije izrade provrta, posebice kod obradaka koji se koriste za protok fluida ili npr. kod obradaka koji zahtijevaju naknadnu obradu površine. Zabilježena su poboljšanja kvalitete površine korištenjem UV [125, 126, 128, 133]. Formiranje srha izražen je problem, posebice kod bušenja duktilnih materijala, i to prilikom izlaska alata iz obratka. Uklanjanje srha direktno utječe na povećanje proizvodnih troškova. Dokumentirano je kako bušenje potpomognuto ultrazvučnim vibracijama može imati utjecaja na značajno smanjenje ili uklanjanje pojave srha pravilnim odabirom parametara bušenja i vibracijskog sustava [123, 128, 133]. U nekim ekstremnim slučajevima, izvlačenje svrdla iz provrta spriječeno je formacijama srha koje mogu dovesti do loma alata i gubitka obratka, što se primjenom UV može izbjeći [125].

Liao [130] navodi kako se vijek trajanja alata može značajno produžiti korištenjem malih amplituda UV, dok prevelike amplitude dovode do negativnih učinaka, a promjene frekvencije UV ne utječu bitno na vijek trajanja svrdla. Pujana [127] bilježi kako se povećanjem amplitude UV ostvaruju manje aksijalne sile, ali i povećanje temperature prilikom bušenja legure titana svrdlima od TM

3.3.2. Mikrobušenje potpomognuto ultrazvučnim vibracijama

Smanjenje sile je jedna od primarnih prednosti primjene tehnike HFVAD i potencijalno je rješenje za sprečavanje loma i nestabilnost mikrosvrđala. Začepljenje utora spirale svrdla i provrta odvojenim česticama također se može smanjiti, jer vibracije visoke frekvencije mogu pomoći pri transportu odvojenih čestica.

U dostupnim radovima o mikrobušenju primjenom UV, zapažene su manja veličina odvojenih čestica i manje sile u radovima Zhanga [134] (PCB, $d = 1$ mm, $n = 20\,000 - 100\,000$ min⁻¹) i Nambua [36] (Cr-Ni čelik, $d = 0,2$ mm, $n = 5000$ min⁻¹, $f = 1$ μm/okr). Hrapavost površine poboljšana je primjenom UV u radu Liua [31] (Cr-Ni čelik, $d = 1$ mm, $n = 500 - 1800$ min⁻¹, $f = 5 - 8$ μm/okr) i Cherna [135] (aluminij i čelik, $d = 0,5$ mm, $n = 2000$ min⁻¹, $f = 2 - 10$ μm/okr). Većina ovdje navedenih radova bila je ograničena relativno niskim brojem okretaja vretena i brzinama rezanja, što ne odgovara trenutnim praktičnim komercijalnim zahtjevima u industriji, posebno kod proizvodnje PCB-a.

Chern [135] bilježi i smanjenje veličine srha na izlazu iz provrta, a povećanjem frekvencije i amplitude UV, zabilježeno je manje odstupanje dimenzija i položaja provrta. Kružnost izbušenog provrta može se poboljšati pri većim amplitudama i prihvatljivom području frekvencija. Povećanje učestalosti vrtnje svrdla n i povećanje frekvencije vibracija f_v negativno utječu na vijek trajanja alata. Zhang [134] je ispitivanjem mikrobušenja uz visoke učestalosti vrtnje utvrdio kako su prosječne aksijalne sile značajno smanjene uporabom UV, no optimalna frekvencija vibracija razlikovala se pri različitim brzinama vrtnje. Povećanjem učestalosti vrtnje aksijalna sila opada, ali manje pri većim brzinama [134].

3.4. Sustavi generirani samouzbuđom

U radovima [91, 93, 107, 136, 137] razvijeni su sustavi bušenja potpomognutoga vibracijama generiranih samouzbuđom, tj. koriste se vibracije generirane samim procesom bušenja pri velikoj brzini, uz za to prikladno izvedene držače alata. Istaknuto je da se prilikom konvencionalnog bušenja mnogi problemi vezani uz nižu krutost sustava eliminiraju pravilnim odabirom parametara i alata za smanjenje vibracija. S druge strane, vibracije mogu biti od pomoći zbog lomljenja odvojenih čestica i njihovog lakšeg uklanjanja iz provrta, primjerice kod dubokoga bušenja. Pošto se vibracije ne mogu izbjeći, predloženo je da ih se iskoristi posebice za obradu teže obradivih materijala. Kod takvih sustava nije potrebna dodatna energija, jer se vibracije održavaju pojavom rezonancije, ali se zahtijeva savršeno

savladavanje i kontrola uvjeta obrade. Razvijen je matematički dinamički model dubokoga bušenja uz pomoć vibracija niskih frekvencija, prvenstveno za vibracijske sustave sa samouzbuđom, uzimajući u obzir aksijalne vibracije i krutost komponenti sustava (krutost obratka i svrdla). Razvijen je model za odabir parametara za održanje vibracija kod bušenja uz pomoć vibracija sa samouzbuđom u radu [91], gdje je duži vijek trajanja svrdla objašnjen manjom prosječnom silom na svrdlo. U radu [93] prikazan je dijagram gdje je pokazano kako rastom amplitude kut stražnje površine postaje negativan, stražnja površina dolazi u kontakt s generiranom površinom dna provrta, time uzrokujući natražnu silu i prigušenje vibracija generiranih samouzbuđom i bušenje bez isprekidanih čestica, njihovo teže odvođenje iz provrta, neučinkovitu primjenu SHIP-a i u konačnici lom svrdla [138, 139].

4. Eksperimentalni postav i mjerna oprema

U svrhu potrebe provođenja eksperimentalnog dijela ovog rada, razvijen je odgovarajući ispitni stroj za mikrobušenje i sustav za generiranje vibracija na strani obratka, gdje obratci imaju relativno malu masu i dimenzije ($D = 10\text{ mm}$, $H = 20\text{ mm}$, $m = 4,3\text{ g}$).

Eksperimentalni postav opremljen je eksternim mjernim uređajima prikladnim za mjerenje sile i momenta mikrobušenja te senzorom za nadzor generiranih vibracija za bušenje potpomognuto vibracijama i nadzor vibracija tijekom bušenja (slika 4.1).



Slika 4.1 Ispitni postav primijenjen u eksperimentalnom dijelu istraživanja

4.1. Konstrukcija stroja za mikrobušenje

U firmi HSTEC d.d. razvijen je stroj za mikrobušenje (slika 4.2) koji se sastoji od sljedećih glavnih komponenti:

- Visokobrzinskog motorvretena HSM080AA-V01-LK719-55
- Posmičnog prigona s linernim motorom
- Pneumatskog aktuatora za minimiziranje utjecaja težine pomične mase na pogon linearne osi
- Postolja u koji je integriran upravljački sklop

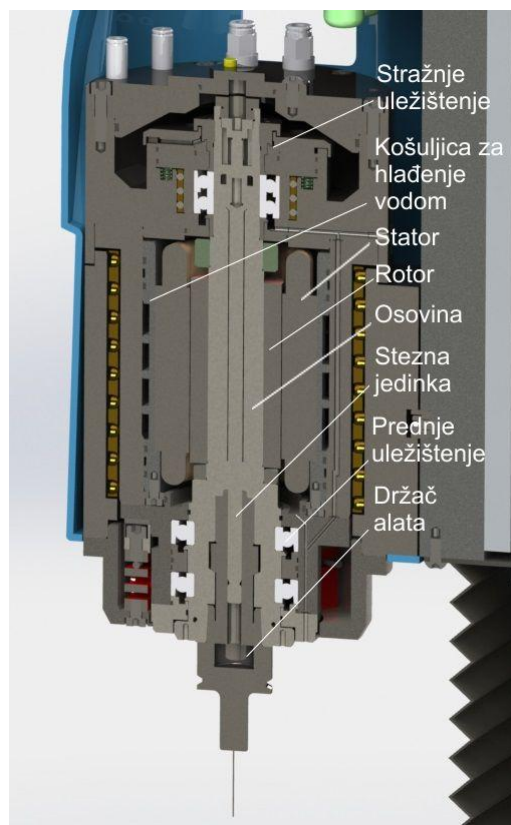


Slika 4.2 Stroj za mikrobušenje

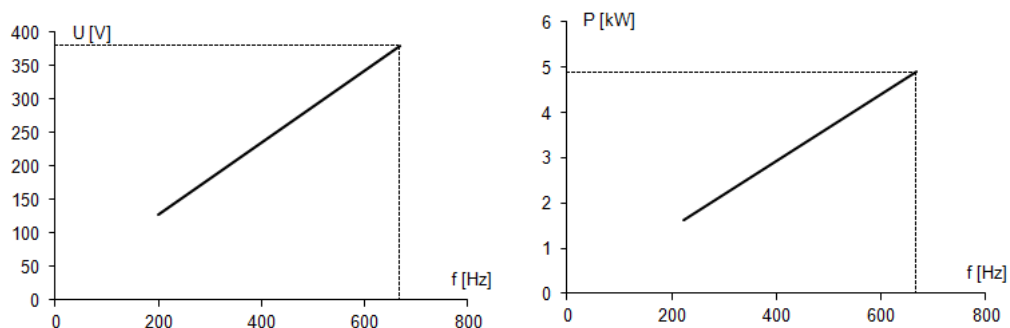
Za glavni prigon koristi se motorvreteno HSTEC-HSM080AA-V01-LK719-55 (slika 4.3) sa sljedećim karakteristikama:

- Snaga (S1) $P = 4,9 \text{ kW}$
- Max. učestalost vrtnje $n = 39\,400 \text{ min}^{-1}$
- Vodom hlađeni ugradbeni motor
- Prihvat alata HSK 32

Motorvreteno je pogonjeno ugradbenim asinkronim motorom mW 7/7-2-267d/282dr0 proizvođača *Elektromaschinen und Antriebe (E+A) AG* (Švicarska), čije su karakteristike prikazane na slici 4.4.



Slika 4.3 Motorvreteno HSTEC-HSM080AA-V01-LK719-55

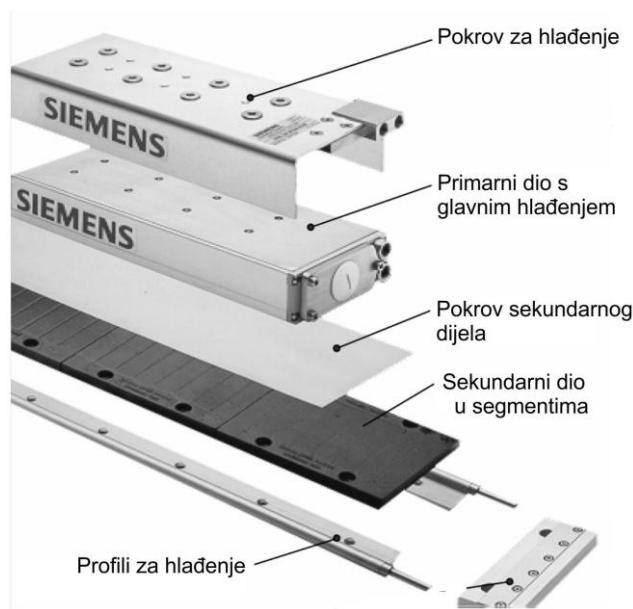


Slika 4.4 Pogonske karakteristike ugradbenog motora E+A mW 7/7-2-267d/282dr0

Motorvreteno je smješteno na vertikalnu linearnu os za posmični prigon koji je ostvaren linearnim motorom 1FN3050-2WC00-0EA1 proizvođača *Siemens AG* (Njemačka) sa sljedećim karakteristikama:

- $F_n = 200 \text{ N}$
- $F_{\max} = 550 \text{ N}$
- $v_{\max}(F_{\max}) = 146 \text{ m/min}$
- $v_{\max}(F_n) = 373 \text{ m/min}$
- $P_{EL,\max} = 4110 \text{ W}$

Linearni motor (slika 4.5) odabran je kao visokodinamički pogon koji omogućuje brzo izvlačenje svrdla kod procesa bušenja s izvlačenjem svrdla („*peck drilling*“) i može se koristiti za brzo izvlačenje svrdla prije postizanja kritičnih vrijednosti koje mogu dovesti do loma svrdla u procesu bušenja s nadzorom sile i momenta bušenja ili akustične emisije.



Slika 4.5 Linerni motor Siemens 1FN3050-2WC00-0EA1

Linearna os opremljena je linearnim davačem položaja LC 483 ML (slika 4.6) hoda 170 mm proizvođača *Heidenhein AG* (Njemačka) koji omogućuje točnost pozicioniranja osi od 3 μm s rezolucijom od 0,005 μm .



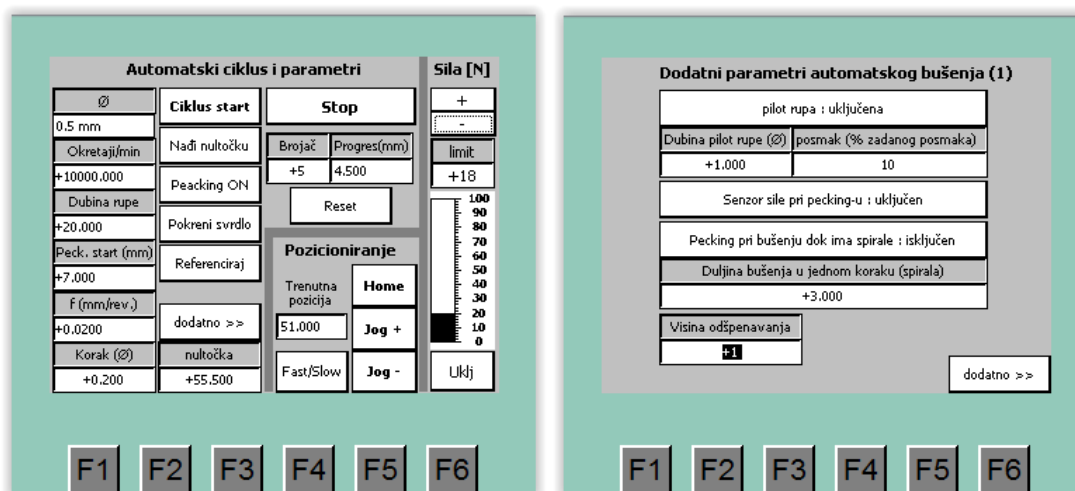
Slika 4.6 Linearni davač položaja Heidenhein LC 483 ML-170

Upravljački dio stroja za mikrobušenje čini PLC Simatics S7-1200, CPU 1214 proizvođača *Siemens AG* (Njemačka) i upravljačke jedinice pogonskih motora koji su, zajedno s pripadajućim sustavima napajanja i ostalim ulazno-izlaznim sklopovljem, smješteni u elektro-ormaru stroja (slika 4.7).



Slika 4.7 Upravljački dio stroja za mikrobušenje

Informacije kao što su karakteristike provrta (d , L), parametri bušenja (n , f) s mogućnošću odabira opcije bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla i njenih parametara (dubina na kojoj započinje bušenje s periodičkim izvlačenjem, dubina koraka P i visina izvlačenja h_i) te parametri opcije pilotskog provrta (dubina i posmak) unose se preko korisničkog sučelja stroja za bušenje (slika 4.8).



Slika 4.8 GUI stroja za mikrobušenje

4.2. Sustav za generiranje vibracija

Najveći omjer frekvencije vibracija i frekvencije vrtnje svrdla u praksi je direktno određen uređajem za generiranje vibracija, tj. maksimalnom veličinom amplitude koju je moguće ostvariti pri određenoj frekvenciji vibracija. Pošto ubrzanje, a time i inercijska sila, rastu s kvadratom frekvencije (jednadžbe 4.1 i 4.2), ispitivanja su se temeljila na vibracijama nižih frekvencija koje se u praksi mogu lakše realizirati i implementirati u postojeće strojeve.

Jednadžba 4.1 definira inercijsku silu kod harmoničkog vibriranja pokretane mase u ovisnosti o vremenu, a jednadžba 4.2 njenu maksimalnu vrijednost.

$$F_v = ma(t) = m4\pi^2 f_v^2 A \sin(2\pi f t) \quad (4.1)$$

$$F_{v,\max} = m4\pi^2 f_v^2 A \quad (4.2)$$

Prema jednadžbi 4.2 za frekvenciju vibracija od 1000 Hz i amplitude od 5 μm postiže se maksimalno ubrzanje od 200 m/s^2 , dok za 5000 Hz i 10 μm ono se penje na 10 000 m/s^2 što može limitirati masu koja može biti pokretana od strane generatora vibracija.

Glavne komponente sustava za generiranje vibracija su piezoelektrični linearni aktuator tip P-842.60 s visokom rezolucijom za statičke i dinamičke aplikacije i njegovo pojačalo PI E-505.00 proizvođača *Physik Instrumente (PI) GmbH* (Njemačka) (slika 4.9).



Slika 4.9 Piezoelektrični aktuator PI P-842.60 s pojačalom PI- E-505.00

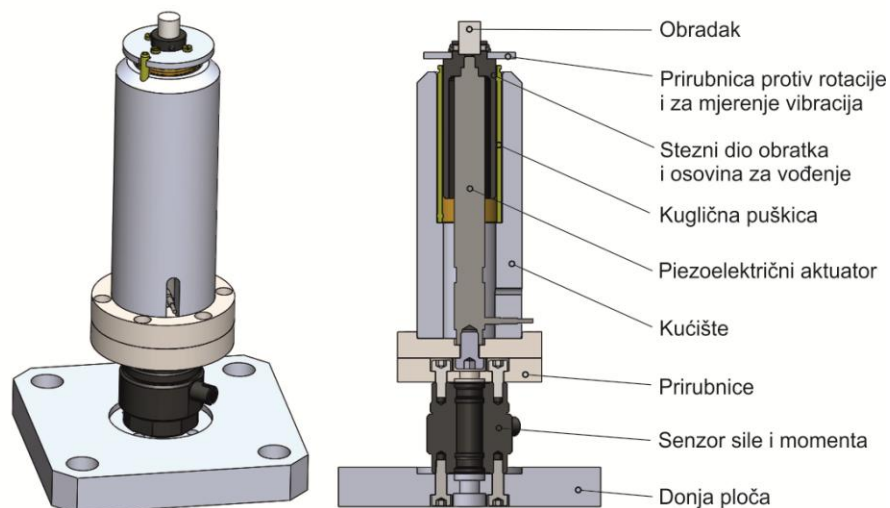
Aktuator čini više slojeva piezokeramičkog materijala unutar kućišta od nehrđajućeg čelika s predopterećenjem izvedenim preko opruge. Ovo predopterećenje omogućuje

dinamičke aplikacije, primjerice za preciznu obradu ili aktivno prigušenje te za vlačna opterećenja. Sustav omogućuje vrijeme odziva ispod milisekunde i rezoluciju ispod nanometra. U tablici 4.1 su dane osnovne tehničke karakteristike sustava za generiranje vibracija.

Tablica 4.1 Osnovne tehničke karakteristike sustava za generiranje vibracija

		Vrijednost	Jedinica
Piezoelektrični aktuator (tip P842.60)	Hod	90	μm
	Rezolucija	0,9	nm
	Krutost	10	N/μm
	Max. sila pritiskanja / povlačenja	800 / 300	N
	El. kapacitet	9	μF
	Vlastita frekvencija	6	kHz
Pojačalo (tip E-505.00)	Ulazni napon	-2 ... 12	V
	Izlazni napon	-30 ... 130	V
	Vršna jakost struje (<3 ms)	2	A
	Prosječna jakost struje	215	mA
	Šum, 0 do 100 kHz	<0,6	mVrms

Keramički materijali unutar piezoelektričnog aktuatora su osjetljivi na savijanje i smično naprezanje te je, stoga, nužno ugraditi dodatno vođenje na koje bi se prenijele sve sile koje ne djeluju u smjeru osi aktuatora. U kućište sustava za generiranje vibracija ugrađena je linearna kuglična puškica za vođenje u aksijalnom smjeru, unutar koje je smještena pomična osovinica koja je ujedno i prihvat obratka, povezana s aktuatorom (slika 4.10). Na nju je pričvršćena prirubnica koja sprečava zakretanje oko osi aktuatora i ujedno služi kao referentna ploha za senzor vibracija, u svrhu očitavanja veličine pomaka i frekvencije vibracija.



Slika 4.10 Izvedba sustava za generiranje vibracija sa senzorom sile i momenta

Kao generator sinusnog oblika vibracija koristi se generator funkcije HP 3312A, proizvođača *Hewlett Packard* (SAD) (slika 4.11) koji može ostvariti raspon frekvencija od 0,1 Hz do 13 MHz. Osim sinusnog oblika, ovim uređajem moguće je generirati i druge izlazne valne oblike, poput kvadratnog, trokutastog, nazubljenog ili pulsirajućeg s varijabilnom simetrijom.



Slika 4.11 Generator funkcije HP 3312A

4.3. Mjerni sustav

Mjerni sustav, razvijen za eksperimentalni dio ovog rada sastoji se od:

- Modula za akviziciju
- Senzora sile i momenta
- Senzora vibracija
- Programske podrške mjernog sustava

4.3.1. Modul za akviziciju

Modul za akviziciju NI 9234, zajedno s adapterom NI 9162 proizvođača *National Instruments Co.* (SAD), koristi se za akviziciju signala sile, momenta i vibracija (slika 4.12).

Modul se spaja na mjerno računalo putem USB veze, a značajke modula su:

- Ulazno područje signala: ± 5 V
- 24-bitna rezolucija
- Frekvencija uzorkovanja: 51,2 kHz
- 4 kanala.



Slika 4.12 Modul za akviziciju National Instruments 9234

4.3.2. Senzor sile i momenta

Signali sile i momenta bušenja prikupljani su primjenom mjernog sustava sastavljenog od piezoelektričnog trokomponentnog senzora sila i odgovarajućeg nabojnog pojačala proizvođača *Kistler Holding AG* (Švicarska), prikazanih na slici 4.13.

Dvokomponentni piezoelektrični senzor 9345A koristi se za mjerenje sile F_z i momenta M_z koji djeluju na os senzora. Senzor ima visoku vlastitu frekvenciju, a njegova velika krutost omogućuje mjerenje praktički bez pomaka. Visoka rezolucija senzora omogućuje mjerenje i najmanjih dinamičkih promjena kod mjerenja posmičnih sila i momenata procesa bušenja ili narezivanja navoja. Nekoliko slojeva kvarcnih diskova, koji su osjetljivi na tlačno i smično naprezanje, integrirani su u kućište pod velikom silom predopterećenja. Signali naboja, proporcionalni sili i momentu (smičnom naprezanju), elektrodama i kabelom dolaze do pojačala Kistler 5073 koji ih pretvara u izlazni napon koji se može snimiti. Senzor sila ugrađen je ispod generatora vibracija, u sklopu stezne naprave (slika

4.10), a izlazni signali nabojnog pojačala su snimani u sklopu mjernog računala. Mjerni sustav nije umjeravan, već su za tu svrhu korišteni zadani tvornički kalibracijski parametri senzora sile. U tablici 4.2 su dane osnovne tehničke karakteristike mjernog sustava sile i momenta bušenja.



Slika 4.13 Senzor sile i momenta Kistler 9345A s nabojnim pojačalom Kistler 5073

Tablica 4.2 Osnovne tehničke karakteristike mjernog sustava sile i momenta bušenja

			Područje	Jedinica
Senzor sile i momenta (tip 9345A)	Kalibrirano mjerno područje	F_z	-0,1 ... 0,1 (1%)	kN
		M_z	-2,5 ... 2,5 (10%)	Nm
	Maksimalne dozvoljene vrijednosti	F_z	-12/12	kN
		F_z	-25/25	Nm
	Osjetljivost	F_z	-3,8	pC/N
		M_z	-220	pC/Nm
	Prag osjetljivosti	F_z	<0,02	N
		M_z	<0,035	Ncm
	Linearnost u mjernog područja	F_z	<±1	%
		M_z	<±0,5	%
Prag histereze mjernog područja	F_z	<1	%	
	M_z	<0,5	%	
Nabojno pojačalo (tip 5073)	Broj kanala		3 (do 4)	
	Mjerno područje (podesivo po kanalu)		±100 ... 10 ⁶	pC
	Frekvencijsko područje		0 ... 20	kHz
	Greška		<±0,5	%
	Izlazni signal (po kanalu)		±10	V

4.4. Senzor vibracija

Mjerenje vibracija izvedeno je mjernim sustavom koji čine senzor vrtložne struje, tip CMSS 65 i odgovarajući oscilacijski demodulator, tip CMSS 665 proizvođača *Vibro-Meter SA* (Švicarska). Senzor vibracija smješten je na stalku u neposrednoj blizini stezne naprave i obratka koji vibrira (slika 4.14). Izlazni signal nabojnog pojačala sniman je u sklopu upravljačkog sustava akvizicijskom karticom. Kalibracijski parametri pojačala podešeni su prema tvorničkoj deklaraciji isporučenog senzora.



Slika 4.14 Senzor vibracija i mjesto ugradnje u eksperimentalnom postavu

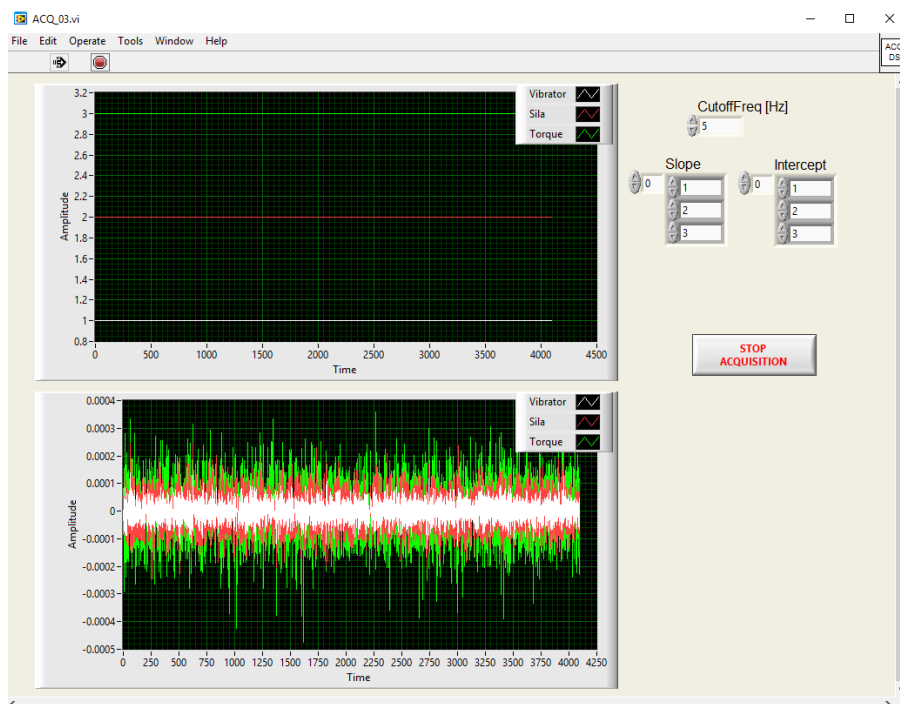
4.5. Programska podrška mjernog sustava

Tijekom bušenja, korištena je mjerna aplikacija razvijena u sklopu *LabView* okruženja. Mjerna aplikacija (slika 4.15) je u eksperimentalnom dijelu istraživanja imala višeznačnu ulogu, a korištena je za:

- kontinuitano mjerenje vibracija generiranih preko generatora vibracija prije početka bušenja i vibracija obratka tijekom bušenja,
- kontinuirano snimanje signala sile i momenta procesa bušenja te ostvarenih vibracija povezanih s modulom za akviziciju,
- vizualnu i numeričku verifikaciju dobivenih rezultata,
- generiranje mjerne datoteke.

Slika 4.15 prikazuje korisničko sučelje s prikazom nefiltriranih signala, s frekvencijom uzoraka signala od 4096 Hz na apscisi, ispod kojeg se nalazi prikaz filtriranih signala. Filter je Besselov Highpass (visokopropusni filter 3. reda), a moguće je zadati donju graničnu

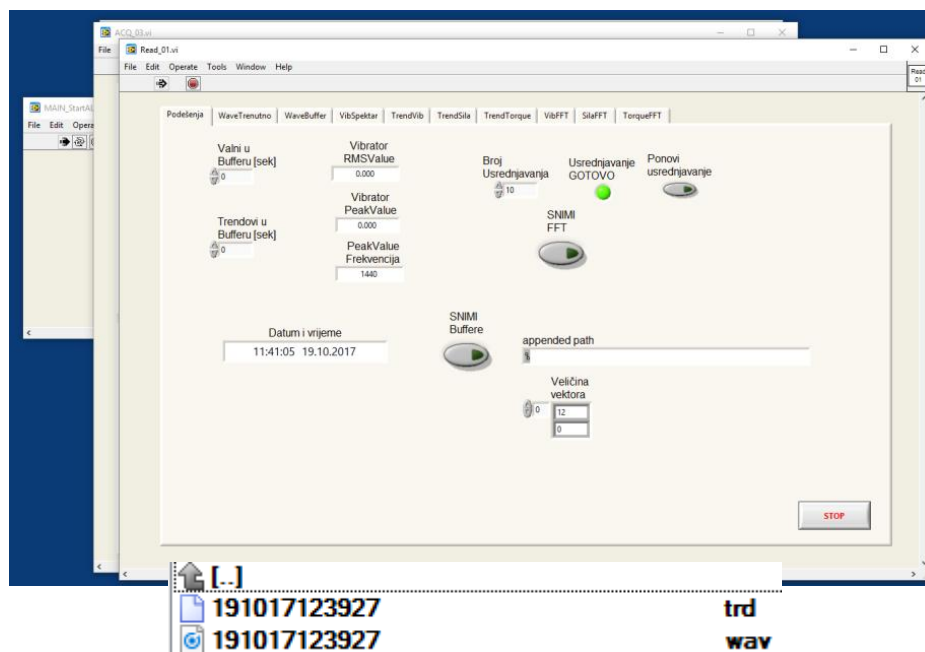
frekvenciju. Na istom sučelju omogućuje se unos koeficijenata *Signal gain* i *Offset* (na sučelju oznake “*Slope*” i “*Intercept*”) za linearnu jednadžbu za automatsko preračunavanje vrijednosti izlaznog signala (napon), u vrijednosti izražene u fizikalnim jedinicama koje se šalju u podatkovnu sabirnicu.



Slika 4.15 GUI mjerne aplikacije za prikaz i upravljanje akvizicijom signala

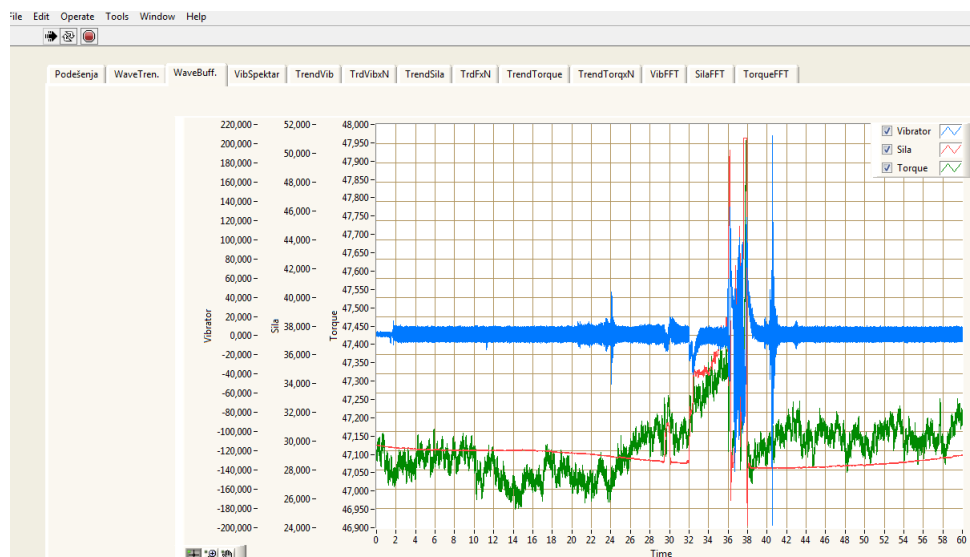
Slika 4.16 prikazuje sučelje aplikacije, preko kojeg se definira vrijeme pohrane signala i trendova signala, odnosno koliko zadnjih sekundi signala mjerna aplikacija ima u memoriji. Također su prikazane trenutne vrijednosti izlaznih veličina vibracija, trenutni datum i vrijeme. Preko sučelja se aktivira snimanje trenutno pohranjenih valnih oblika i trendova te se kreiraju dvije datoteke ekstenzije *.trd* za trendove i *.wav* za valne oblike (ime datoteke: dan, mjesec, godina, sat, minuta, sekunda). Datoteke izlaznih podataka snimljene su u ASCII formatu, a grupe podataka (vibracije, sila i moment) snimljene su kao stupci.

Na prozoru upravljanja postoji i odjeljak za upravljanje FFT (*Fast Fourier Transformation*) obradom signala s kontrolama broja usrednjavanja, gdje se zadaje broj usrednjavanja spektra i kontrolom snimanja trenutnih usrednjenih spektara s ekstenzijom *.fft* i imenom, generiranim na prethodno opisani način.



Slika 4.16 GUI mjerne aplikacije za upravljanje akvizicijom i spremanjem podataka

Slika 4.17 prikazuje prozor aplikacije gdje su prikazani trenutno snimljeni valni oblici vibracija (plavo), sila (crveno) i moment (zeleno) u trajanju ovisno o postavkama. U gornjem desnom kutu dijagrama pojedine se krivulje mogu učiniti nevidljivim deaktiviranjem kvačice u okviru uz oznaku krivulje.



Slika 4.17 GUI mjerne aplikacije s prikazom spremljenih vrijednosti signala

Provedeno eksperimentalno istraživanje, podijeljeno je u dva dijela. Prvi dio odnosi se na mjerenje veličina procesa mikrobušenja bez vibracija, a drugi dio na mjerenje veličina procesa tijekom mikrobušenja potpomognutoga vibracijama. Usporedbom odnosa istih veličina, želi se pokazati kako različiti uvjeti rezanja utječu na veličine odziva, konkretno aksijalne sile i momenta, što bi moglo imati utjecaj na pouzdani rad i vijek trajanja mikrosvrkla.

5.1. Planiranje pokusa

5.1.1. Materijal obratka i karakteristike svrdla

Prilikom bušenja duktilnih materijala, poput aluminijske i titane jedan od glavnih problema je izvlačenje odvojenih čestica iz provrta, pošto obrada duktilnih materijala ima tendenciju stvaranja kontinuiranih spiralnih odvojenih čestica. U usporedbi s drugim procesima obrade odvajanjem čestica, ograničeni prostor unutar spiralnog utora mikrosvrkla često uzrokuje akumulaciju odvojenih čestica i pričvršćenje odvojenih čestica na površinu svrdla, što može uzrokovati oštećenje obratka i svrdla. Očekuje se kako bi bušenje potpomognuto vibracijama bilo izrazito djelotvorno kod obrade duktilnih materijala, stoga je za materijal obratka, u eksperimentalnom dijelu rada, odabrana aluminijska legura oznake AlMg3, čije karakteristike su prikazane u tablici 5.1.

Izrađeni su cilindrični uzorci obradaka promjera 10 mm i visine 20 mm (za mogućnost obostranog bušenja) koji su smješteni u steznu napravu, koja je zbog što točnijeg mjerenja momenta precizno smještena u os senzora za mjerenje sile i momenta. Iz preliminarnih eksperimentalnih bušenja, ustanovilo se kako i najmanja nepravilnost na površini obratka može dovesti do vrludanja svrdla ili odstupanja od planirane pozicije provrta, što dovodi do mijenjanja procesa iz pravocrtnog bušenja u bušenje pod kutom koji, u pravilu, dovodi do ubrzanog loma mikrosvrkla, što je posebno izraženo kod krhkih mikrosvrkla izrađenih od tvrdog metala. Kako bi se umanjila mogućnost navedenog odstupanja položaja svrdla, ravne su površine obratka, koje su bile mjesto kontakta svrdla i obratka, polirane (slika 5.1).

Tablica 5.1 Karakteristike materijala AlMg3

Kemijski sastav		Svojstva materijala	
Al	94,2 – 97,4%	Gustoća, ρ	2670 kg/m ³
Cr	0,3% max.	Talište, T	600-645°C
Cu	0,1% max.	Modul elastičnosti, E	69 GPa
Fe	0,4% max.	Vlačna čvrstoća, R_m	220-330 MPa
Mg	2,6 – 3,6%	Koeficijent toplinske vodljivosti, k	130-140 W/mK
Mn	0,5% max.	Koeficijent toplinske rastezljivosti, α	23,7 $\mu\text{m/mK}$
Si	0,4% max.		
Ti	0,15% max.		
Zn	0,2% max.		
Ostalo:	0,15% max.		

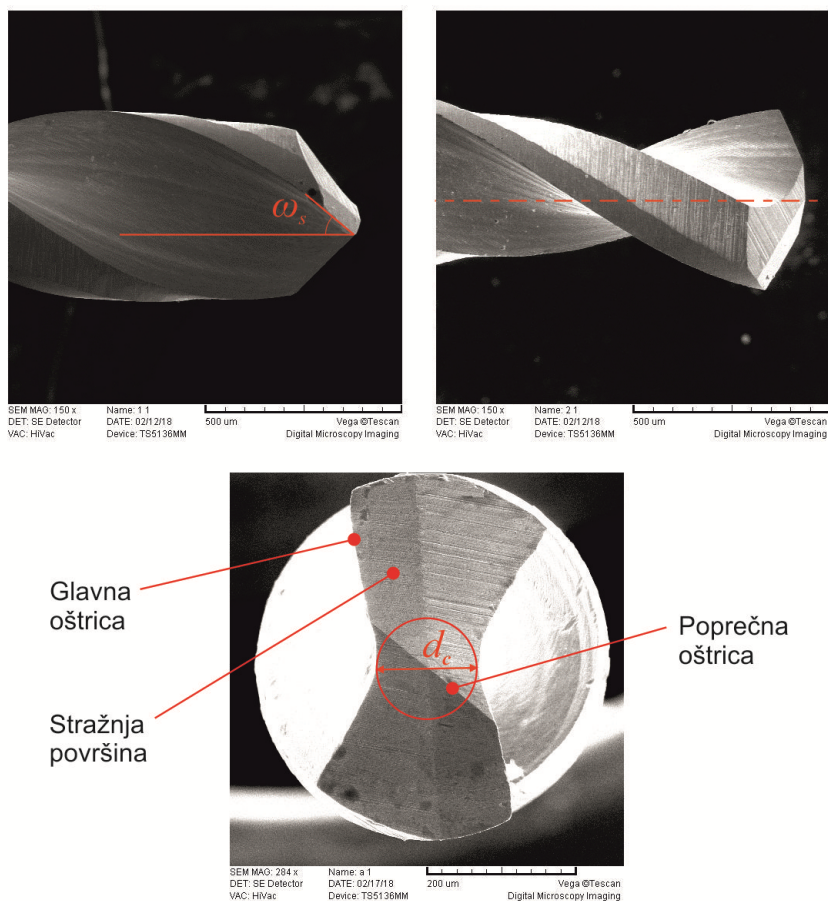


Slika 5.1 Uzorci iz aluminija korišteni za eksperimentalna bušenja

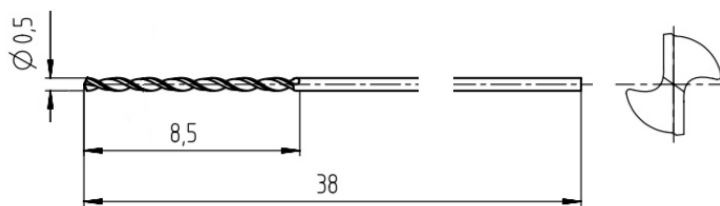
U svim pokusima bušenja, koristila su se tvrdometalna (*solide carbide*) svrdla 706 HVM proizvođača *Gühring* (Njemačka). Tablica 5.2 sadrži geometrijske karakteristike svrdla, a slika 5.2 prikazuje snimku vrha svrdla.

Tablica 5.2 Geometrijske karakteristike svrdla *Gühring 706 HVM*

Karakteristika	Veličina
Promjer, d	0,5 mm
Vršni kut, 2φ	130°
Kut spirale utora, ω_s	30°
Kut stražnje površine, α	10°
Promjer jezgre svrdla, d_c	0,14 mm
Kut poprečne oštrice, ψ_p	130°
Radius oštrice, r_e	5-10 μm



Slika 5.2 SEM snimke vrha svrdla korištenog u eksperimentu



Slika 5.3 Glavne dimenzije svrdla *Gühring 706 HVM 0,5 mm*

Za svaki novi izbušeni provrt, zabilježen u eksperimentu, koristilo se novo svrdlo kako bi se izbjegao utjecaj ostatka nalijepljenog materijala, oštećenja ili trošenja svrdla. Svrdlo je stegnuto u držaču alata HSK-32 ERC8-60, proizvođača *NT-Tool* (Japan). Duljina svrdla izvan držača, tj. udaljenost vrha svrdla do steznog dijela držača je namještena na 16 mm, a ostale glavne dimenzije svrdla prikazane su na slici 5.3. Sva ispitivanja bušenja izvedena su bez primjene SHIP-a, zbog neučinkovite ili nekonzistentne dobave u duboki mikroprovrt tijekom bušenja.

5.1.2. Cilj provođenja pokusa i odabir utjecajnih faktora

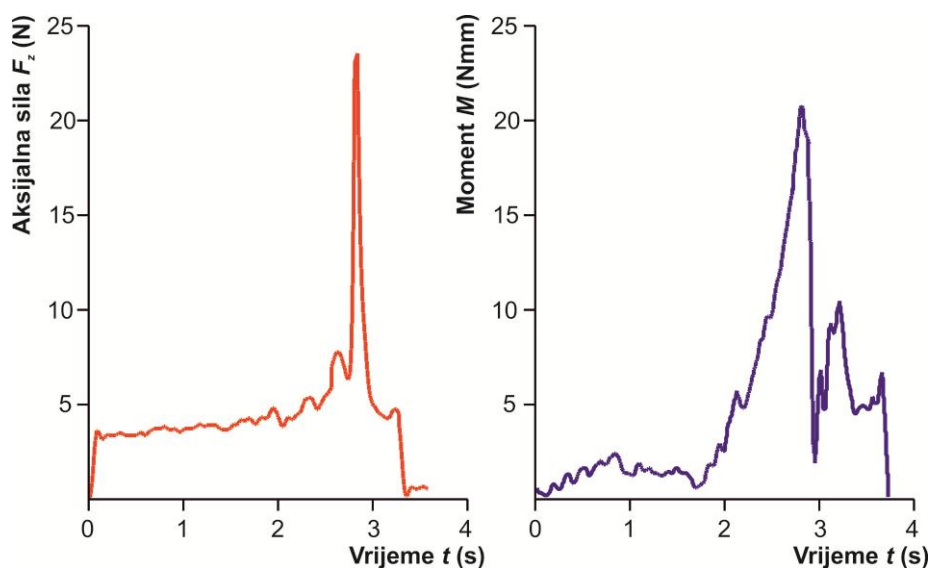
Cilj provođenja eksperimenata mikrobušenja jest utvrditi utjecaj parametara mikrobušenja (učestalost vrtnje svrdla i posmak) na odziv sile i momenta u ovisnosti o dubini provrta. Cilj provođenja eksperimenata mikrobušenja potpomognutoga vibracijama jest utvrditi utjecaj parametara mikrobušenja (učestalost vrtnje svrdla i posmak) i parametara vibracija (frekvencija i amplituda) na odziv sile i momenta u ovisnosti o dubini provrta.

Prilikom bušenja u AlMg3, prethodno opisanim svrdlima i mjerenjem aksijalne sile i momenta bušenja prije loma, utvrđeno je kako je prosječna kritična vrijednost aksijalne sile F_z bila cca. 20 N, a momenta bušenja M cca. 18 Nmm. Kako bi se omogućio relativno pouzdan proces mikrobušenja, potrebno je uzeti u obzir faktor sigurnosti i umanjiti kritične vrijednosti za 50% [19]. Također se preporuča dodatnih 20% zbog mogućih fluktuacija čvrstoće svrdala ovisno o seriji, nehomogenosti materijala obratka i naprezanja uslijed odstupanja položaja svrdla od osi provrta [19]. Prema tome su odabrani parametri procesa koji bi, u kombinaciji, mogli rezultirati s maksimalno 40% kritične vrijednosti, tj. u ovom slučaju $F_z < 8$ N i $M < 7,2$ Nmm.

U preliminarnom eksperimentalnom dijelu rada, ustanovilo se kako vrijednosti učestalosti vrtnje n u rasponu od 6000 – 18000 min⁻¹ osiguravaju dovoljnu brzinu rezanja za svrdlo $d = 0,5$ mm, a s druge strane osiguravaju dinamičku stabilnost svrdlu za pouzdan

proces dubokoga mikrobušenja u aluminiju. Navedeni raspon učestalosti vrtnje n u eksperimentu je izražen kao raspon frekvencije vrtnje f_r od 100 - 300 Hz.

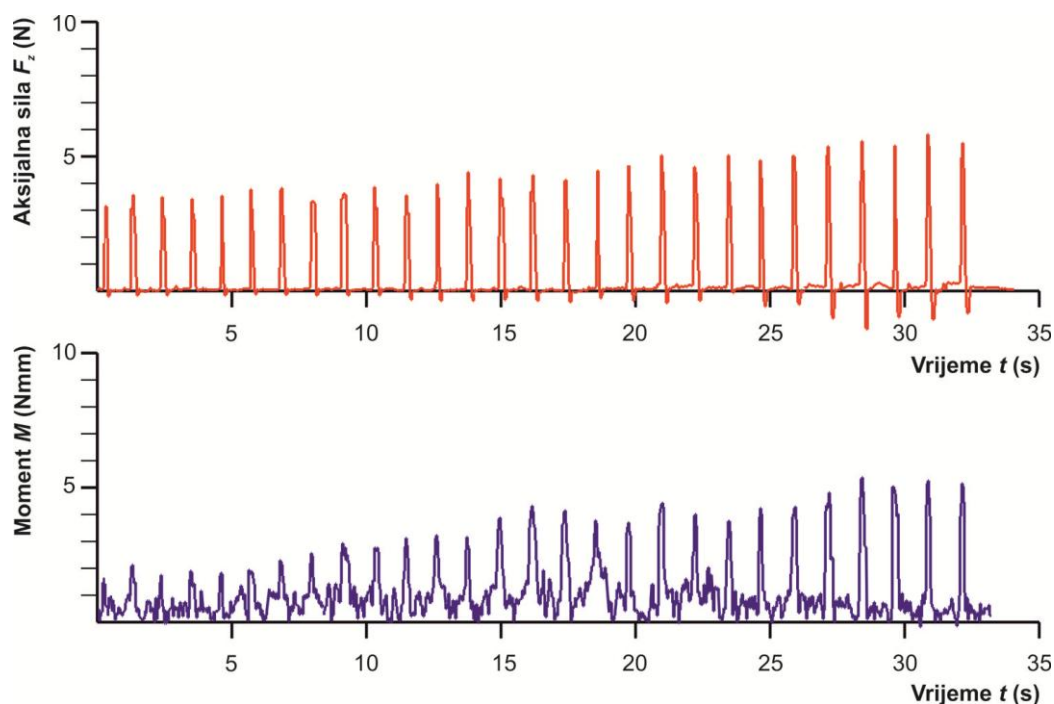
Vrijednosti posmaka f odabrane su u rasponu od 0,0025 – 0,0075 mm/okr., pošto su vrijednosti iznad navedenih dovodile do preopterećenja i preranog loma svrdla. Utvrdilo se kako nije moguće pouzdano izbušiti provrte omjera $L / d > 10$, bez korištenja bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla iz provrta. Na slici 5.4 prikazani su signali aksijalne sile i momenta snimljeni prilikom bušenja bez periodičkog izvlačenjem svrdla, tijekom kojeg je došlo do prekoračenja kritičnih vrijednosti F_z i M , usljed kojeg je došlo do loma svrdla.



Slika 5.4 Signali F_z i M kod bušenja bez periodičkog izvlačenja svrdla s parametrima $n = 12000 \text{ min}^{-1}$ i $f = 0,0075 \text{ mm/okr.}$

Radi jednostavnosti eksperimenta, odabran je ciklus s konstantnom dubinom koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla P , od početka bušenja provrta. Autori u dostupnoj literaturi navode preporuke za dubinu koraka od $0,1 d - 0,5 d$, što bi za $d = 0,5 \text{ mm}$ bio raspon $P = 0,05 - 0,25 \text{ mm}$. Prema iskustvu iz preliminarnog eksperimentalnog dijela rada, odabran je raspon $P = 0,1$ do $0,3 \text{ mm}$, kao relativno pouzdano područje za primjenu kod bušenja aluminija. Svi eksperimenti bušenja provedeni su s konstantnom visinom izvlačenja svrdla iz provrta $h_i = 1 \text{ mm}$.

Korištenjem bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla bitno se reduciraju vrijednosti F_z i M , no i produžava vrijeme bušenja (slika 5.5). Uočava se kako se i aksijalna sila i moment povećavaju s dubinom provrta.



Slika 5.5 Signali F_z i M kod bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla s parametrima $n = 12000 \text{ min}^{-1}$ i $f = 0,0075 \text{ mm/okr.}$, $P = 0,2 \text{ mm}$

Analiziran je utjecaj različitih dubina provrta L u rasponu od 2 – 6 mm, tj. preko omjera L / d u rasponu od 4 – 12 za $d = 0,5 \text{ mm}$.

Iste vrijednosti raspona gore navedena četiri faktora: f_r , f , P i L , koji se koriste u prvom dijelu eksperimentalnog rada za ispitivanje mikrobušenja, koriste se i u drugom dijelu, gdje se analizira utjecaj vibracija na mikrobušenje. U drugom dijelu eksperimentalnog rada, uvedena su dodatna dva faktora; omjer frekvencija r_f (omjer frekvencije vibracija f_v i frekvencije vrtnje f_r) i amplituda vibracija A .

Prema preliminiranim istraživanjima, pokazalo se kako su najbolji rezultati vezano za pouzdanost bušenja bili pri omjerima r_f u rasponu od 0,5 – 1,5 i te vrijednosti su uzete kao referentno područje ispitivanja. Prema tim omjerima, raspon frekvencija korištenih vibracija kretao bi se od 50 – 450 Hz, ovisno o učestalosti vrtnje svrdla. Vrijednosti amplituda vibracija iznad 0,01 mm, negativno su djelovale povećanjem aksijalne sile, stoga je, za ovo ispitivanje, odabran raspon vrijednosti amplituda od 0,0025 – 0,0075 mm. Rasponi vrijednosti parametara korišteni u eksperimentalnom dijelu rada prikazani su u tablici 5.3.

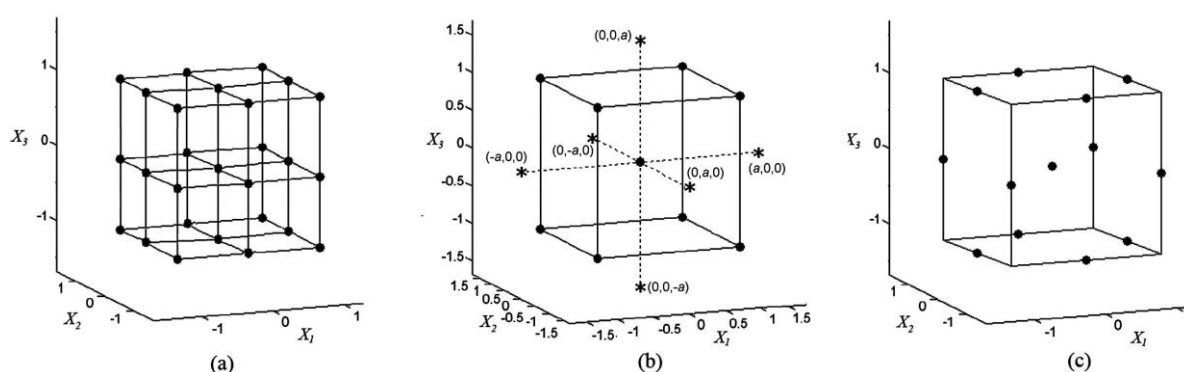
Tablica 5.3 Rasponi vrijednosti parametara u pokusima

Parametar	Veličina
Učestalost vrtnje, n	6000 - 18000 min ⁻¹
Posmak, f	0,0025 - 0,0075 mm/okr.
Dubina koraka, P	0,1 – 0,3 mm
Dubina provrta, L	2 – 6 mm
Frekvencija vibracija, f_v	50 – 450 Hz
Amplituda vibracija, A	0,0025 – 0,0075 mm

5.1.3. Oblikovanje plana pokusa i njegova provedba

Za analizu utvrđivanja značajnosti utjecaja odabranih parametara na odzivne veličine aksijalne sile i momenta mikrobušenja bez korištenja vibracija i mikrobušenja potpomognutoga vibracijama, koristit će se metoda odzivne površine (RSM - *Response Surface Method*) prema Box-Behnkenovom modelu (slika 5.6).

Metoda odzivne površine je skup statističkih i matematičkih metoda koje se koriste za modeliranje i optimizaciju inženjerskih problema. Glavni cilj ove metode je kvantifikacija i optimiziranje odziva koji su pod utjecajem različitih parametara. Kod izrade modela korištenjem metode odzivne površine, podaci se prikupljaju preko planiranih eksperimenata.



Slika 5.6 Primjer prikaza plana s tri faktora za opis nelinearnih odziva:
 (a) puni faktorijalni plan na tri razine, (b) Box-Wilsonov centralno kompozitni plan,
 (c) Box-Behnkenov plan [140]

Box-Behnkenov plan zahtijeva 3 razine svakog od faktora, omogućuje učinkovitu procjenu koeficijenata prvog i drugog reda s manje točaka, što ga čini jeftinijim za izvedbu od

centralno kompozitnog plana za isti broj faktora, ali u isto vrijeme i nepouzdanijim. Box-Behnkenov plan nema aksijalnih točaka, čime se osigurava da su sve točke eksperimenta unutar zone sigurnog djelovanja i da svi faktori nisu postavljeni na svoje najveće vrijednosti istovremeno. Slika 5.6 prikazuje primjer takvog plana pokusa za 3 parametra zbog lakše vizualizacije, a planove pokusa s 4 i 6 parametara, kakvi se koriste u ovom radu nije moguće prikazati u 3D prostoru.

Nakon izvođenja pokusa i izvršenog mjerenja, pomoću F–testa će se analizirati varijanca, odnosno utvrditi značajnost doprinosa pojedinih parametara te međusobni utjecaj faktora analizom efekata. U tablicama 5.4 i 5.5 prikazana su sva stanja plana pokusa. Pet ponavljanja se izvodi u centru radi određivanja zakrivljenosti odzivnih površina u eksperimentalnom prostoru za ispitivanje mikrobušenja, a šest ponavljanja kod ispitivanja mikrobušenja potpomognutoga vibracijama.

Tablica 5.4 Stanja pokusa mikrobušenja bez vibracija generirana programom *Design-Expert*
10

Oznaka slučajnoga redoslijeda izvođenja	Oznaka stanja pokusa prema redoslijedu izvođenja	Faktori			
		A	B	C	D
		Frekvenc. vrtnje f_r	Posmak f	Dubina koraka P	Dubina provrta L
		Hz	mm/okr	mm	mm
14	1	200	0,0075	0,1	4
20	2	300	0,005	0,3	4
19	3	100	0,005	0,3	4
8	4	200	0,005	0,3	6
16	5	200	0,0075	0,3	4
3	6	100	0,0075	0,2	4
21	7	200	0,0025	0,2	2
23	8	200	0,0025	0,2	6
24	9	200	0,0075	0,2	6
11	10	100	0,005	0,2	6
7	11	200	0,005	0,1	6
28	12	200	0,005	0,2	4
10	13	300	0,005	0,2	2
25	14	200	0,005	0,2	4
4	15	300	0,0075	0,2	4
12	16	300	0,005	0,2	6
18	17	300	0,005	0,1	4
9	18	100	0,005	0,2	2
15	19	200	0,0025	0,3	4
2	20	300	0,0025	0,2	4
1	21	100	0,0025	0,2	4
27	22	200	0,005	0,2	4
6	23	200	0,005	0,3	2
22	24	200	0,0075	0,2	2
29	25	200	0,005	0,2	4
13	26	200	0,0025	0,1	4
17	27	100	0,005	0,1	4
5	28	200	0,005	0,1	2
26	29	200	0,005	0,2	4

Tablica 5.5 Stanja pokusa mikrobušenja potpomognutoga vibracijama generirana programom *Design-Expert 10*

Oznaka slučajnoga redoslijeda izvođenja	Oznaka stanja pokusa prema redoslijedu izvođenja	Faktori					
		A	B	C	D	E	F
		Frekvenc. vrtnje f_r	Posmak f	Korak P	Omjer frekvenc. r_f	Amplituda vibracija A	Dubina L
		Hz	mm/okr	mm		mm	mm
15	1	200	0,0025	0,3	1	0,0075	4
13	2	200	0,0025	0,1	1	0,0075	4
54	3	200	0,005	0,2	1	0,005	4
53	4	200	0,005	0,2	1	0,005	4
6	5	300	0,0025	0,2	1,5	0,005	4
45	6	100	0,005	0,1	1	0,005	6
38	7	200	0,0075	0,2	1	0,0025	6
17	8	200	0,005	0,1	0,5	0,005	2
20	9	200	0,005	0,3	1,5	0,005	2
29	10	100	0,005	0,2	0,5	0,0075	4
19	11	200	0,005	0,1	1,5	0,005	2
25	12	100	0,005	0,2	0,5	0,0025	4
32	13	300	0,005	0,2	1,5	0,0075	4
50	14	200	0,005	0,2	1	0,005	4
8	15	300	0,0075	0,2	1,5	0,005	4
3	16	100	0,0075	0,2	0,5	0,005	4
28	17	300	0,005	0,2	1,5	0,0025	4
7	18	100	0,0075	0,2	1,5	0,005	4
31	19	100	0,005	0,2	1,5	0,0075	4
16	20	200	0,0075	0,3	1	0,0075	4
12	21	200	0,0075	0,3	1	0,0025	4
51	22	200	0,005	0,2	1	0,005	4
14	23	200	0,0075	0,1	1	0,0075	4
39	24	200	0,0025	0,2	1	0,0075	6
18	25	200	0,005	0,3	0,5	0,005	2
41	26	100	0,005	0,1	1	0,005	2
1	27	100	0,0025	0,2	0,5	0,005	4
26	28	300	0,005	0,2	0,5	0,0025	4
46	29	300	0,005	0,1	1	0,005	6
43	30	100	0,005	0,3	1	0,005	2
9	31	200	0,0025	0,1	1	0,0025	4
23	32	200	0,005	0,1	1,5	0,005	6
11	33	200	0,0025	0,3	1	0,0025	4
24	34	200	0,005	0,3	1,5	0,005	6
36	35	200	0,0075	0,2	1	0,0075	2
48	36	300	0,005	0,3	1	0,005	6

Oznaka slučajnoga redosljeda izvođenja	Oznaka stanja pokusa prema redosljedu izvođenja	Faktori					
		A	B	C	D	E	F
		Frekvenc. vrtnje f_r	Posmak f	Korak P	Omjer frekvenc. r_f	Amplituda vibracija A	Dubina L
		Hz	mm/okr	mm		mm	mm
40	37	200	0,0075	0,2	1	0,0075	6
52	38	200	0,005	0,2	1	0,005	4
4	39	300	0,0075	0,2	0,5	0,005	4
22	40	200	0,005	0,3	0,5	0,005	6
2	41	300	0,0025	0,2	0,5	0,005	4
30	42	300	0,005	0,2	0,5	0,0075	4
5	43	100	0,0025	0,2	1,5	0,005	4
27	44	100	0,005	0,2	1,5	0,0025	4
49	45	200	0,005	0,2	1	0,005	4
44	46	300	0,005	0,3	1	0,005	2
10	47	200	0,0075	0,1	1	0,0025	4
21	48	200	0,005	0,1	0,5	0,005	6
42	49	300	0,005	0,1	1	0,005	2
34	50	200	0,0075	0,2	1	0,0025	2
47	51	100	0,005	0,3	1	0,005	6
37	52	200	0,0025	0,2	1	0,0025	6
33	53	200	0,0025	0,2	1	0,0025	2
35	54	200	0,0025	0,2	1	0,0075	2

5.2. Metodologija korištena za izradu i vrednovanje matematičkih modela

Rezultati mjerenja aksijalne sile F_z i momenta bušenja M statistički su obrađeni pomoću programskog paketa *Design-Expert 10* te su pomoću istog programskog paketa izrađeni matematički modeli za opisivanje utjecaja parametara mikrobušenja i dubine provrta na mjerenja. ANOVA (*Analysis of Variance*) je računski postupak pomoću kojega se ispituju podaci određenoga pokusa, kroz procjenu odklona pojedinih srednjih vrijednosti od prosječne vrijednosti uzoraka uzetih iz nekog osnovnog skupa. Za izračunavanje značajnosti razlike između dviju procjena parametara (u ovom slučaju radi se o aritmetičkim sredinama dobivenih podataka), koristi se t (Studentov) test:

$$|t| = \frac{|\bar{x} - \mu|}{s/\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

$$s^2 = \frac{n}{n-1} \sigma^2 \quad (5.2)$$

gdje je: μ – očekivanje osnovnog skupa, n – broj ponavljanja pokusa, a s^2 – nepristrana procjena varijance osnovnog skupa na osnovu varijance uzorka.

Varijanca predstavlja prosječno kvadratno odstupanje svih podataka od aritmetičke sredine i opisana je sljedećim izrazom:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.3)$$

Svakom t testu za provjeru aritmetičke sredine uzorka i skupova mora prethoditi F test. F-vrijednost modela je omjer procijenjene varijance modela i procijenjene varijance rezidualnih odstupanja koji pokazuje relativan doprinos procijenjene varijance modela procijenjenoj varijanci rezidualnih odstupanja i ima F (Fisherovu) razdiobu.

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} = \frac{s_{između\ uzoraka}^2}{s_{unutar\ uzoraka}^2} \quad (5.4)$$

$$s_1^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\bar{y}_i - \bar{y})^2}{k-1} \quad (5.5)$$

$$s_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n-k} \quad (5.6)$$

gdje je: y_{ij} - vrijednost odziva nekog stanja plana pokusa, $\bar{y}_i$ - aritmetička sredina odziva i -te grupe plana pokusa, $\bar{y}$ - aritmetička sredina odziva ukupnog plana pokusa, k – broj grupa, n – broj uzoraka.

Primjenom F-testa određena je značajnost izrađenih modela, značajnost pojedinih članova modela te *Nedostatak podudaranja (Lack of Fit)* testiranjem hipoteza H_0 prema alternativnoj hipotezi H_1 . Ako je izračunata F-vrijednost veća od F_0 , hipoteza H_0 se odbacuje kao neistinita i prihvaća se alternativna hipoteza H_1 . Veliki broj ukazuje na to da je varijanca u velikoj mjeri objašnjena modelom, a mali broj da je varijanca moguća zbog šumova. P-

vrijednost $Prob > F$ analizirane F-vrijednosti modela je vjerojatnost da je hipoteza H_0 istinita tj. da model nije značajan. Rizik prihvatanja ili odbacivanja nekoga zaključka, a na osnovi ispitivanja nulte hipoteze, iskazuje se postotkom:

- $P > \alpha_{0,05}$ ($> 95,0\%$): (nije značajan)
- $P < \alpha_{0,05}$ ($< 95,0\%$): (značajan),
- $P < \alpha_{0,01}$ ($< 99,0\%$): (vrlo značajan)
- $P < \alpha_{0,001}$ ($< 99,9\%$): (visoki stupanj značajnosti)

Isto vrijedi i za F-vrijednost člana modela. F-vrijednost *Nedostatak podudaranja* je omjer procijenjene varijance *Nedostatak podudaranja* i procijenjene varijance *Čiste greške* koji pokazuje relativan doprinos procijenjene varijance *Nedostatak podudaranja* procijenjenoj varijanci *Čiste greške*. Veliki broj ukazuje na to da je varijanca, u velikoj mjeri, objašnjena s *Nedostatak podudaranja*, a mali broj da je varijanca moguća zbog šumova. Što je broj veći, veća je vjerojatnost da izrađeni model ne opisuje dobro pojavu. P-vrijednost $Prob > F$ analizirane F-vrijednosti *Nedostatak podudaranja* je vjerojatnost da je hipoteza H_0 istinita, tj. da *Nedostatak podudaranja* nije značajno. Kada je vrijednost $Prob > F$ manja od 0,05, znači da je *Nedostatak podudaranja* značajno.

Regresijskom analizom određene su jednadžbe koje najbolje opisuju dobivene podatke. U matematičkim modelima funkcije odziva nazivaju se još i teorijskim jednadžbama višestruke regresije. Koeficijenti regresije statistički su procijenjeni na osnovi rezultata eksperimentalnih ispitivanja. Najčešće korištena metoda za procjenjivanje parametara (koeficijenata) jest metoda najmanjih kvadrata. Ona se sastoji u određivanju regresijskog pravca koji minimizira sumu tzv. rezidualnih odstupanja.

U nastavku su objašnjene veličine koje su korištene za analizu i vrednovanje kvalitete izrađenih matematičkih modela.

Koeficijent determinacije R^2 predstavlja procjenu ukupne varijacije podataka objašnjenih pomoću modela, a izračunava se prema izrazu:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (5.7)$$

gdje je SSE – suma kvadrata rezidualnih odstupanja, a SST – ukupna suma kvadrata odstupanja regresijskog modela.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (5.8)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (5.9)$$

Prilagođeni koeficijent determinacije R_{adj}^2 je koeficijent determinacije prilagođen za broj stupnjeva slobode modela u odnosu na broj stanja pokusa, a izračunava se prema izrazu:

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SSE/(n - p - 1)}{SST/(n - 1)} \quad (5.10)$$

gdje je p – broj faktora modela, n – veličina uzorka, $(n - p - 1)$ – stupnjevi slobode rezidualnih odstupanja, $(n - 1)$ – stupnjevi slobode modela.

Predviđeni koeficijent determinacije R_{pred}^2 je mjera iznosa varijacija u novim podacima objašnjenim pomoću modela i izračunava se prema izrazu:

$$R_{pred}^2 = 1 - \frac{PRESS}{SST} \quad (5.11)$$

Može se primijetiti kako je R_{pred}^2 koeficijent determinacije gdje je suma kvadrata rezidualnih odstupanja zamijenjena s predviđenom sumom kvadrata rezidualnih odstupanja. *Predviđena suma kvadrata (PRESS)*, izračunava se prema izrazu:

$$PRESS = \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_i}{1 - h_{ii}} \right)^2 \quad (5.12)$$

gdje je e_i – rezidualno odstupanje, odnosno razlika između izračunate i stvarne vrijednosti, h_{ii} – vrijednost *Utjecaj na model*.

Utjecaj na model (Leverage) su dijagonalni elementi h_{ii} matrice $\mathbf{H} = \mathbf{X}(\mathbf{X}\mathbf{X}^T)^{-1}\mathbf{X}^T$ i nalaze se u rasponu od 0 do 1 te pokazuju koliko pojedino stanje plana pokusa utječe na predviđene vrijednosti modela. Visoka vrijednost *Utjecaj na model* h_{ii} je nepovoljna, jer ukoliko postoji neočekivana greška mjerenja u takvoj točki, ta greška snažno utječe na model.

Prilagođeni i predviđeni koeficijenti determinacije trebali bi biti blizu vrijednosti jedan, a ako su jednaki jedan, onda je 100% varijacije promatranih vrijednosti objašnjeno modelom. Razlika između prilagođenoga i predviđenoga koeficijenta determinacije ne smije biti veća od 0,2 tj. ako je razlika znatno veća, postoji sumnja u vjerodostojnost podataka ili izrađenog matematičkog modela. Ukoliko je prilagođeni koeficijent determinacije veći od 75%, model se može smatrati značajnim.

Većina komercijalnih programskih paketa za regresiju pruža skup studentiziranih rezidualnih odstupanja. Interno studentizirana rezidualna odstupanja su rezidualna odstupanja podijeljena s procijenjenom standardnom pogreškom (ostaci izračunati po Student-ovoj t-razdiobi). Vrijednost mjeri broj standardnih devijacija koje razdvajaju stvarne i predviđene vrijednosti. Interno studentizirana rezidualna odstupanja se izračunavaju prema izrazu:

$$r_i = \frac{e_i}{s\sqrt{1 - h_{ii}}} \quad (5.13)$$

gdje je: e_i – razlika između izračunate i stvarne vrijednosti, s – procijenjene varijance, h_{ii} – vrijednost *Utjecaj na model*.

Eksterno studentizirano rezidualno odstupanje je vrijednost dobivena kada se iz analize izostavi stvarna vrijednost analiziranog stanja pokusa dok se vrijednost toga stanja procjenjuje uz pomoć ostalih stanja pokusa (ovi ostaci su također izračunati po Student-ovoj t-razdiobi). Time se provjerava slijedi li ispitivano stanje pokusa model s koeficijentima koji su procijenjeni iz ostalih stanja pokusa, tj. je li konzistentno s ostalim podacima modela. Eksterno studentizirani ostaci se izračunavaju prema izrazu:

$$t_i = \frac{e_i}{s_{-i}\sqrt{1 - h_{ii}}} \quad (5.14)$$

gdje je s_{-i} – procijenjene varijance izračunate pomoću ostalih stanja pokusa.

Nedostatak podudaranja (Lack of fit) je veličina koja govori o varijaciji vrijednosti mjerene veličine kod ponavljanja istovjetnih stanja plana pokusa oko njihovih prosječnih vrijednosti. Ako je ova vrijednost značajna, to znači da je varijacija ponovljenih stanja pokusa veća od varijacije vrijednosti za pojedino stanje pokusa predviđeno modelom. Analiza vrijednosti *Nedostatak podudaranja* se provodi tako da se izračuna F_0 - vrijednost za izrađeni model prema izrazima

$$F = \frac{MSE(LoF)}{MSE(pure)} \quad (5.15)$$

$$SSE(LoF) = SSE - SSE(pure) \quad (5.16)$$

$$MSE(LoF) = \frac{SSE(LoF)}{k - 2} \quad (5.17)$$

$$SSE(pure) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (5.18)$$

$$MSE(pure) = \frac{SSE(pure)}{n - k} \quad (5.19)$$

gdje su: $SSE(pure)$ – suma kvadrata *Čisto odstupanje*, $SSE(LoF)$ – suma kvadrata *Nedostatak podudaranja*, $MSE(pure)$ srednji kvadrat *Čisto odstupanje*, $MSE(LoF)$ – srednji kvadrat *Nedostatak podudaranja*, k – broj grupa, n – broj uzoraka.

Čisto odstupanje (Pure error) je odstupanje ponavljanja pojedinih stanja pokusa u svrhu procjene varijance odziva kao i broja stupnjeva slobode za adekvatno statističko testiranje izrađenog modela.

Adekvatna preciznost (Adequate precision) je mjera usporedbe raspona predviđenog odziva u odnosu na raspon njegove greške, tj. radi o omjeru signala i šuma (S/N - *signal to noise ratio*). Poželjno je da je omjer veći od 4 i izračunava se prema izrazu:

$$AP = \frac{\max(\hat{y}) - \min(\hat{y})}{\sqrt{\frac{p\sigma^2}{n}}} \quad (5.20)$$

gdje su: $\hat{y}$ – izračunata vrijednost odziva nekog stanja plana pokusa, p – broj parametara modela, n – broj eksperimenata, σ^2 – varijanca rezidualnih odstupanja.

Procjena koeficijenta je regresijski koeficijent koji predočava očekivane promjene odziva y prema promjeni faktora x , dok su svi ostali faktori nepromijenjeni. Stupnjevi slobode jednaki su 1 za testirane koeficijente. Ako donja i gornja granica 95% intervala povjerenja (CI) imaju suprotne predznake, postoji mogućnost da je koeficijent jednak nuli te da je član modela neznačajan. *Faktor inflacije varijance VIF* (*Variance Inflation Factor*) mjeri koliko je varijanca oko procjene koeficijenta porasla smanjenjem ortogonalnosti u planu pokusa. Ako je neki faktor ortogonalan u odnosu na sve ostale, tada vrijednost *VIF* iznosi 1. Vrijednosti veće od 1, a pogotovo veće od 10, ukazuju na veliku međusobnu povezanost. *VIF* se izračunava prema izrazu:

$$VIF = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (5.21)$$

gdje je R_i^2 – višestruki koeficijent korelacije za određeni faktor, a računa se u odnosu na sve ostale faktore modela.

Nakon što se provede statistička obrada dobivenih rezultata pokusa očekuje se dobivanje matematičkih modela oblika prikazanog izrazom:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{\substack{j=1 \\ i < j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 \quad (5.22)$$

gdje je b_0 slobodni član, $\sum_{j=1}^k b_j x_j$ su glavni efekti, $\sum_{\substack{j=1 \\ i < j}}^k b_{ij} x_i x_j$ su interakcije prvog reda, a $\sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2$ su interakcije drugog reda.

5.3. Prikaz rezultata dobivenih mjerenjem aksijalne sile i momenta mikrobušenja bez vibracija

Tablica 5.6 prikazuje rezultate mjerenja po stanjima plana pokusa, a tablica 5.7 pregled članova modela s kratkim statističkim pregledom.

Tablica 5.6 Rezultati mjerenja aksijalne sile i momenta mikrobušenja bez vibracija po stanjima plana pokusa

Oznaka slučajnoga redoslijeda izvođenja	Oznaka stanja pokusa prema redoslijedu izvođenja	Odziv	
		R1	R2
		Sila F_z	Moment M
		N	Nmm
14	1	4,26	4,1
20	2	5,3	8,7
19	3	5,44	9,1
8	4	5,2	8,4
16	5	5,7	6,3
3	6	5,16	8,1
21	7	2,8	3,8
23	8	3,6	6,6
24	9	5,04	4,1
11	10	5,6	9,1
7	11	3,45	4
28	12	4,89	8
10	13	3,5	4,7
25	14	4,11	7,3
4	15	4,67	6,3
12	16	4,1	6,5
18	17	3,4	3,2
9	18	3,2	3,3
15	19	5,3	9,6
2	20	2,75	4
1	21	4,05	8,8
27	22	4	5,5
6	23	4,11	7,4
22	24	4,66	2,6
29	25	4,4	7,3
13	26	3,2	3,2
17	27	2,9	3
5	28	3,1	2,9
26	29	4,25	6,9

Tablica 5.7 Pregled članova modela mikrobušenja

Study Type	Response Surface	Subtype	Randomized					
Design Type	Box-Behnken	Runs	29					
Design Model	Quadratic	Blocks	No Blocks					
Factor	Name	Units	Minimum	Maximum	Coded	Values	Mean	Std. Dev.
A	Frekv. vrtnje f_r	Hz	100	300	-1,000=100	1,000=300	200	65,46537
B	Posmak f	mm/okr	0,0025	0,0075	-1,000=0,0025	1,000=0,0075	0,005	0,001637
C	Korak P	mm	0,1	0,3	-1,000=0,1	1,000=0,3	0,2	0,065465
D	Dubina L	mm	2	6	-1,000=2	1,000=6	4	1,309307
Response	Name	Units	Obs	Analysis	Minimum	Maximum		
R1	Sila F_z	N	29	Polynomial	2,75	5,7		
R2	Moment M	Nmm	29	Polynomial	2,6	9,6		
Mean	Std. Dev.	Ratio	Trans	Model				
4,211724138	0,903351177	2,072727	None	Linear				
5.95862069	2.263927883	3.692308	None	Linear				

5.4. Statistička obrada rezultata i izrada matematičkog modela za opisivanje utjecaja parametara mikrobušenja

Analiza varijance je pokazala da se ovisnost aksijalne sile i momenta mikrobušenja o ulaznim parametrima može najbolje opisati linearnim matematičkim modelima. Analiza varijance aksijalne sile mikrobušenja, prikazana je u tablici 5.8.

Tablica 5.8 Analiza varijance za izrađeni linearni matematički model za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Broj stupnjeva slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P-vrijednost Prob > F	Značajnost
Model	17,88	4	4,47	21,58	< 0,0001	značajan
Članovi modela						
A-Frek. vrtnje f_r	0,58	1	0,58	2,78	0,1083	neznačajan
B-Posmak f	5,06	1	5,06	24,41	< 0,0001	značajan
C-Korak P	9,61	1	9,61	46,40	< 0,0001	značajan
D-Dubina L	2,63	1	2,63	12,71	0,0016	značajan
Rezidualno odstupanje	4,97	24	0,21			
Nedostatak podudaranja	4,49	20	0,22	1,86	0,2898	neznačajan
Čista greška	0,48	4	0,12			
Ukupno	22,85	28				

F-vrijednost modela od 21,58 ukazuje na značajnost modela jer vjerojatnost da se pojavi tako velika vrijednost, uslijed šuma, iznosi samo 0,01%. Vrijednost $Prob > F$ manja od 0,05, za pojedine članove predloženog matematičkog modela, govori u prilog značajnosti njihovog utjecaja. U ovom modelu su stoga značajni faktori B, C i D.

F-vrijednost veličine *Nedostatak podudaranja* od 1,86 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na *Čistu grešku*. Postoji vjerojatnost od 28,98% da tako velika F-vrijednost veličine *Nedostatak podudaranja* nastaje zbog šuma. S obzirom da *Nedostatak podudaranja* nije značajno, model je prihvaćen. U tablici 5.9 prikazane su statističke veličine koje opisuju kvalitetu linearnog matematičkog modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja

Tablica 5.9 Statističke veličine koje opisuju kvalitetu linearnog matematičkog modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja

Standardna devijacija odstupanja modela	0,46
Aritmetička sredina	4,21
Koeficijent varijacije (%)	10,81
Predviđena suma kvadrata <i>PRESS</i>	7,52
Koeficijent determinacije R^2	0,7824
Prilagođeni koeficijent determinacije R^2_{adj}	0,7462
Predviđeni koeficijent determinacije R^2_{pred}	0,6710
Aдекватna preciznost <i>AP</i>	16,324

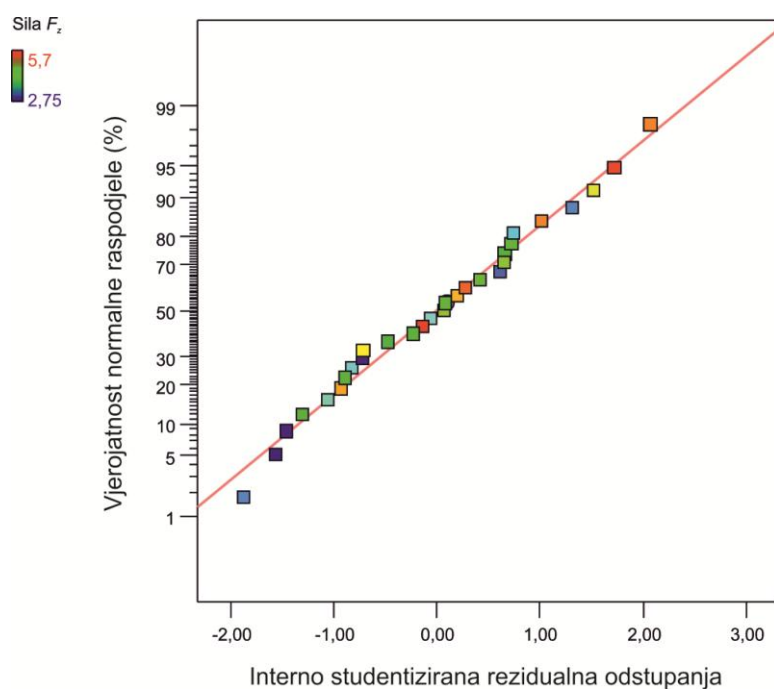
Razlika između veličine R^2_{pred} od 0,671 i veličine R^2_{adj} koja iznosi 0,7462 ne prelazi vrijednost 0,2. Adekvatna preciznost mjeri odnos veličina signala u odnosu na šum, a kako je omjer 16,342 veći od traženog minimuma koji iznosi 4, postoji primjeren signal. Stoga se ovaj model može koristiti za analizu u eksperimentalnom prostoru.

Procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija koeficijenta (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance, za svaki član izrađenog linearnog matematičkog modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja, prikazani su u tablici 5.10.

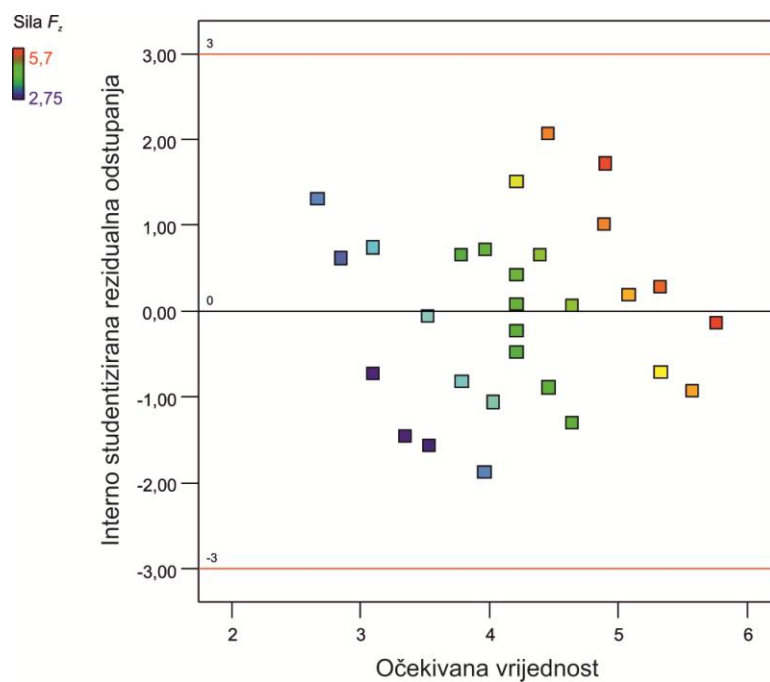
Tablica 5.10 Procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija koeficijenta (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance za svaki član izrađenog linearnog matematičkog modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja

Član modela	Procjena koeficijenta	Stupnjevi slobode	Standardna pogreška	95% interval povjerenja donja granica	95% interval povjerenja gornja granica	Faktor inflacije varijance
Slobodni član	4,21	1	0,08	4,04	4,39	
A-Frekv. vrtnje f_r	-0,22	1	0,13	-0,49	0,05	1
B-Posmak f	0,65	1	0,13	0,38	0,92	1
C-Korak P	0,90	1	0,13	0,62	1,17	1
D-Dubina L	0,47	1	0,13	0,20	0,74	1

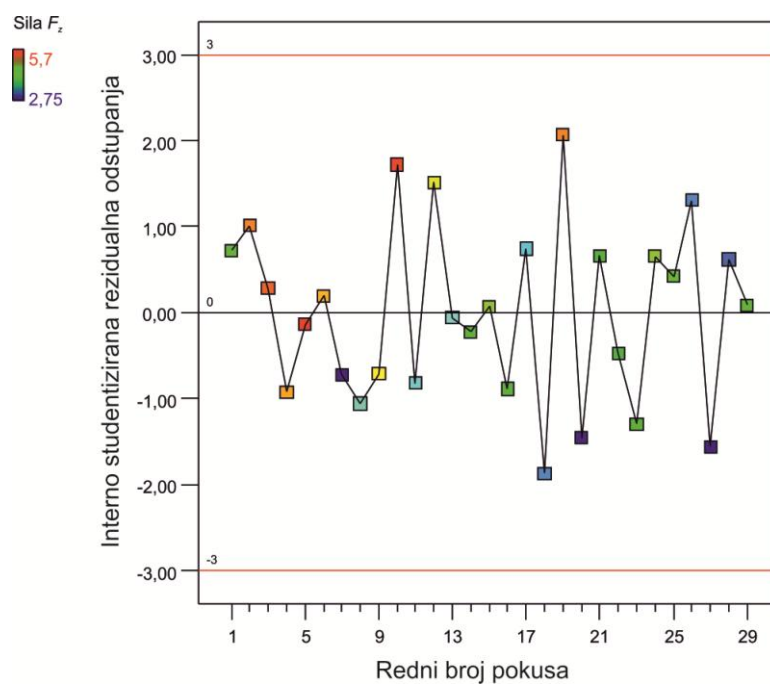
Na slikama 5.7 – 5.10 prikazano je ponašanje rezultata eksperimenta. Ponašanje rezultata mjerenja opisano je analizom rezidualnih odstupanja za određivanje adekvatnosti modela pokusa.



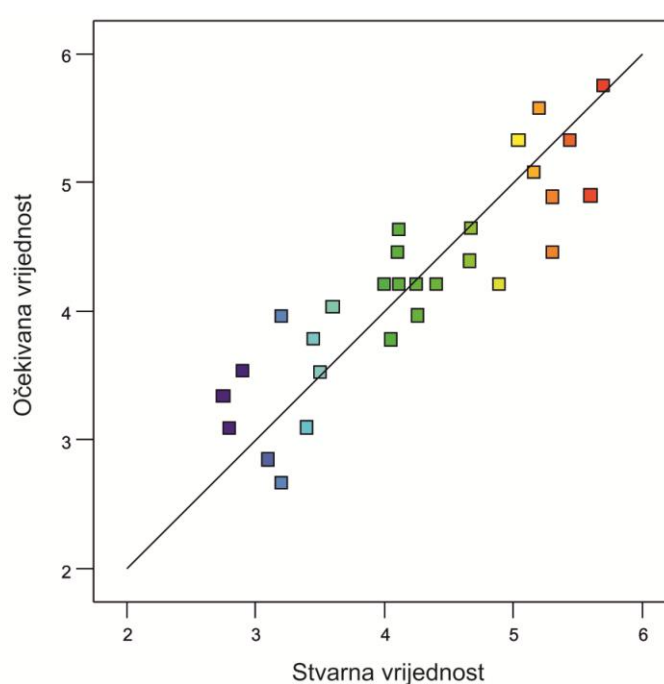
Slika 5.7 Dijagram interno studentiziranih rezidualnih odstupanja za linearni matematički model za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja



Slika 5.8 Dijagram rezidualnih odstupanja u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja



Slika 5.9 Slučajno rasipanje rezidualnih odstupanja u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za linearni matematički model za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja



Slika 5.10 Dijagram stvarnih vrijednosti u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja

Analiza varijance momenta mikrobušenja bez vibracija prikazana je tablicom 5.11.

Tablica 5.11 Analiza varijance za izrađeni linearni matematički model za izračunavanje momenta mikrobušenja

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Broj stupnjeva slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P-vrijednost Prob > F	Značajnost
Model	93,92	4	23,48	11,36	< 0,0001	značajan
Članovi modela						
A-Frek. vrtnje f_r	5,33	1	5,33	2,58	0,121216	neznačajan
B-Posmak f	1,69	1	1,69	0,82	0,375123	neznačajan
C-Korak P	70,57	1	70,57	34,15	< 0,0001	značajan
D-Dubina L	16,33	1	16,33	7,91	0,0097	značajan
Rezidualno odstupanje	49,59	24	2,07			
Nedostatak podudaranja	46,15	20	2,31	2,68	0,1747	neznačajan
Čista greška	3,44	4	0,86			
Ukupno	143,51	28				

F-vrijednost modela od 11,36 ukazuje na značajnost modela, jer vjerojatnost da se pojavi tako velika vrijednost, uslijed šuma, iznosi samo 0,01%. Vrijednost $Prob > F$ manja od 0,05, za pojedine članove predloženog matematičkog modela govori u prilog značajnosti njihovog utjecaja. U ovom modelu su, stoga, značajni faktori C i D.

F-vrijednost veličine *Nedostatak podudaranja* od 2,86 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na *Čistu grešku*. Postoji vjerojatnost od 17,47% da tako velika F-vrijednost veličine *Nedostatak podudaranja* nastaje zbog šuma. S obzirom da *Nedostatak podudaranja* nije značajno, model je prihvaćen. U tablici 5.12 prikazane su statističke veličine koje opisuju kvalitetu linearnog matematičkog modela za izračunavanje momenta mikrobušenja.

Tablica 5.12 Statističke veličine koje opisuju kvalitetu linearnog matematičkog modela za izračunavanje momenta mikrobušenja

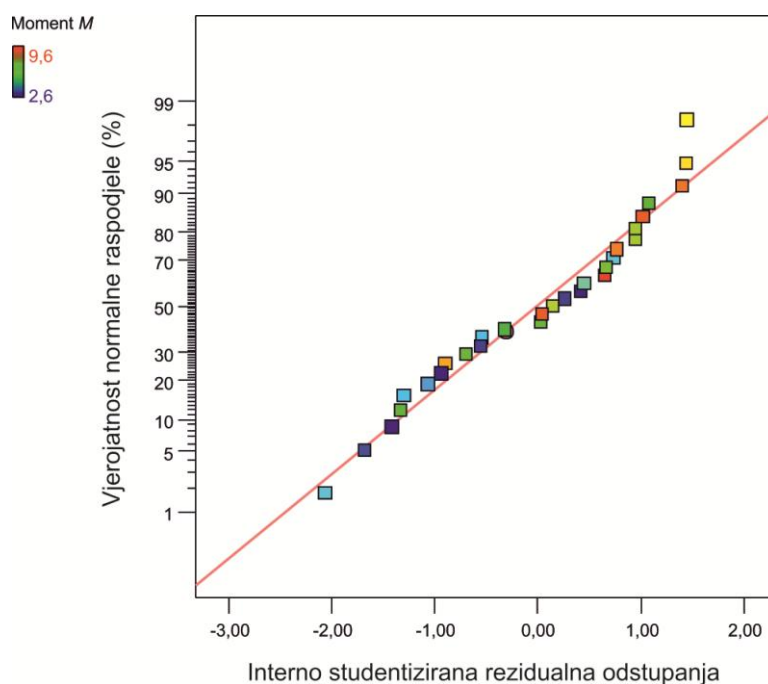
Standardna devijacija odstupanja modela	1,44
Aritmetička sredina	5,96
Koeficijent varijacije (%)	24,12
Predviđena suma kvadrata <i>PRESS</i>	73,32
Koeficijent determinacije R^2	0,6545
Prilagođeni koeficijent determinacije R^2_{adj}	0,5969
Predviđeni koeficijent determinacije R^2_{pred}	0,4891
Aдекватna preciznost <i>AP</i>	12,035

Razlika između veličine R^2_{pred} od 0,4891 i veličine R^2_{adj} koja iznosi 0,5969 ne prelazi vrijednost 0,2. Adekvatna preciznost mjeri odnos veličina signala u odnosu na šum, a kako je omjer 12,035 veći od traženog minimuma koji iznosi 4, postoji primjeren signal. Stoga se ovaj model može koristiti za analizu u eksperimentalnom prostoru. Procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija koeficijenta (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance, za svaki član izrađenog linearnog matematičkog modela za izračunavanje momenta mikrobušenja, prikazani su u tablici 5.13.

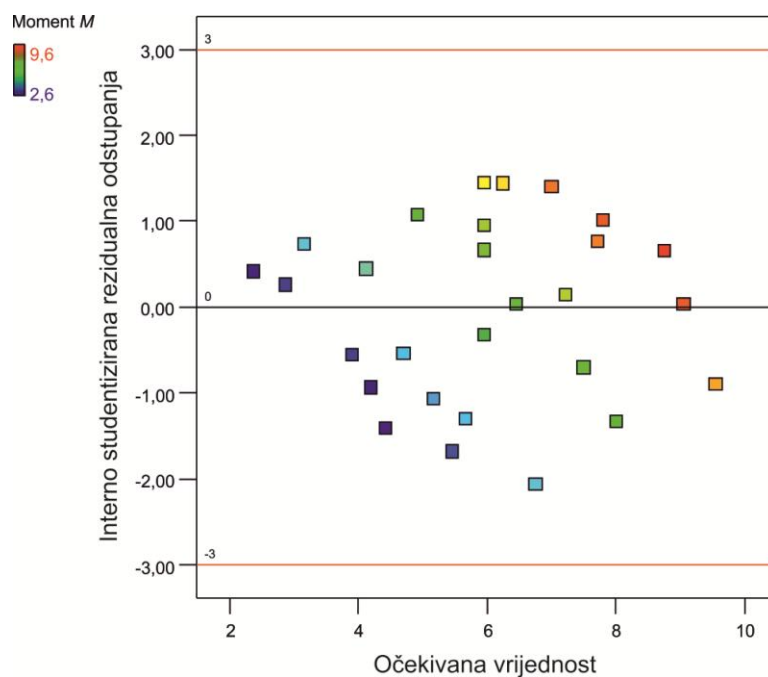
Tablica 5.13 Procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija koeficijenta (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance za svaki član izrađenog linearnog matematičkog modela za izračunavanje momenta mikrobušenja

Član modela	Procjena koeficijenta	Stupnjevi slobode	Standardna pogreška	95% interval povjerenja donja granica	95% interval povjerenja gornja granica	Faktor inflacije varijance
Slobodni član	5,96	1	0,27	5,41	6,51	
A-Frekv. vrtnje f_r	-0,67	1	0,41	-1,52	0,19	1
B-Posmak f	-0,38	1	0,41	-1,23	0,48	1
C-Korak P	2,43	1	0,41	1,57	3,28	1
D-Dubina L	1,17	1	0,41	0,31	2,02	1

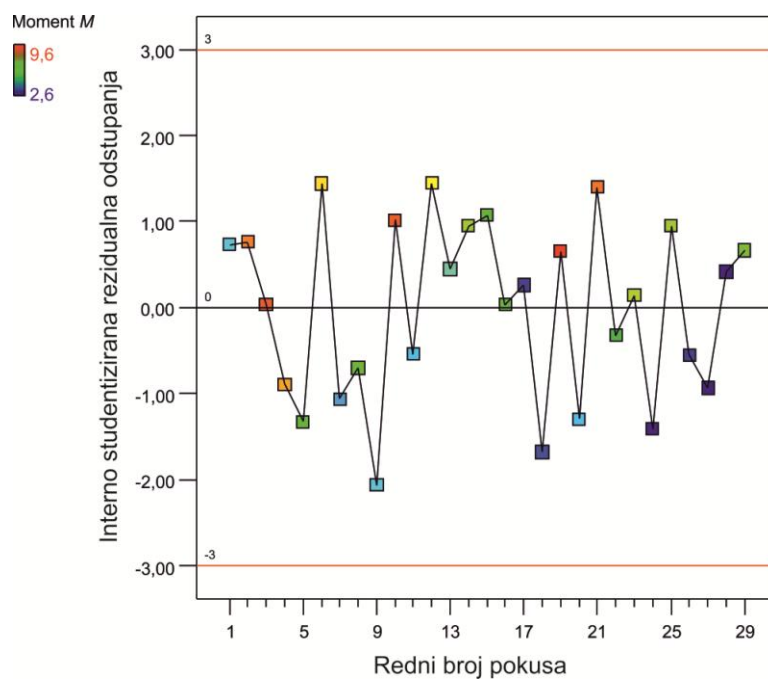
Na slikama 5.11 – 5.14 prikazano je ponašanje rezultata eksperimenta.



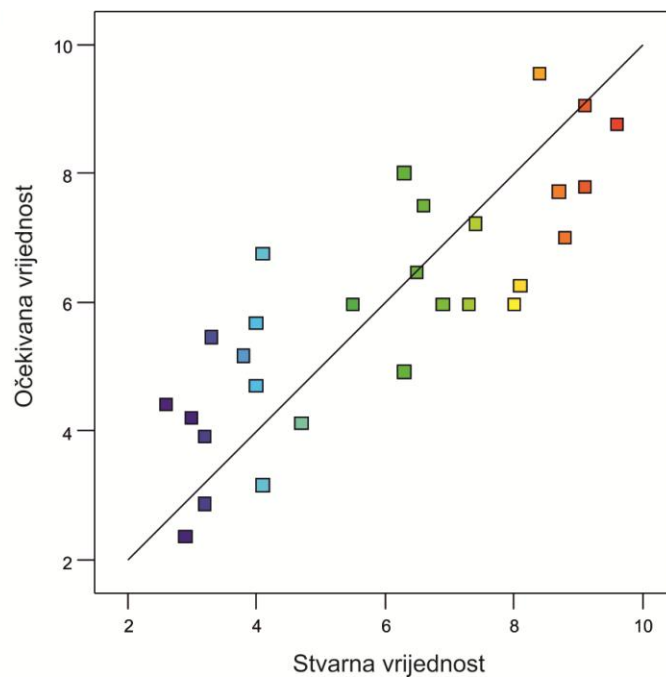
Slika 5.11 Dijagram interno studentiziranih rezidualnih odstupanja za linearni matematički model za izračunavanje momenta mikrobušenja



Slika 5.12 Dijagram rezidualnih odstupanja u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje momenta mikrobušenja



Slika 5.13 Slučajno rasipanje rezidualnih odstupanja u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za linearni matematički model za izračunavanje momenta mikrobušenja



Slika 5.14 Dijagram stvarnih vrijednosti u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje momenta mikrobušenja

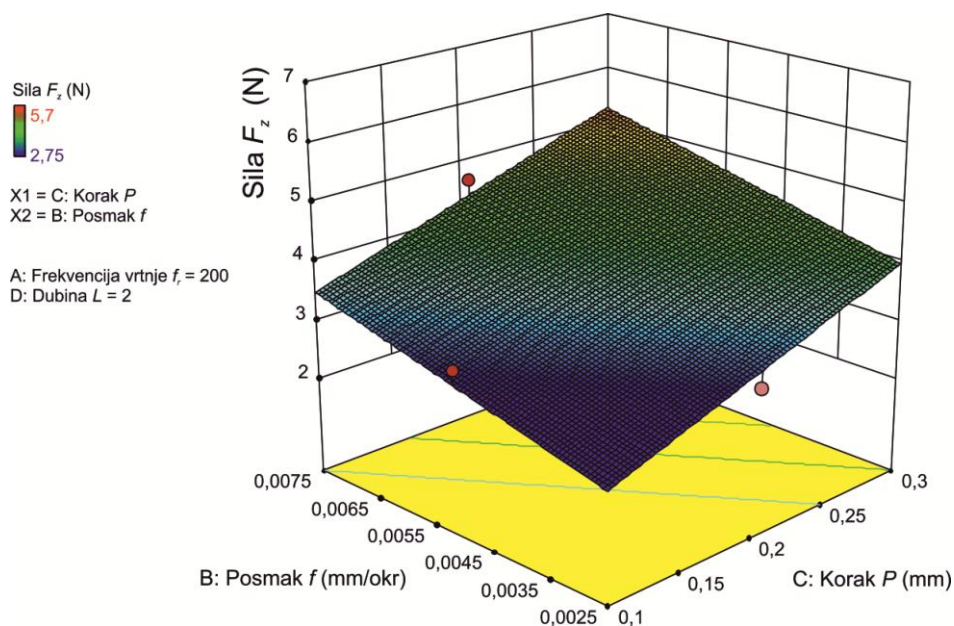
Matematički modeli aksijalne sile i momenta mikrobušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla prikazani su jednadžbama:

$$F_z = 0,625 - 2,19 \cdot 10^{-3} \cdot f_r + 259,66 \cdot f + 8,95 \cdot P + 0,23 \cdot L \quad (5.23)$$

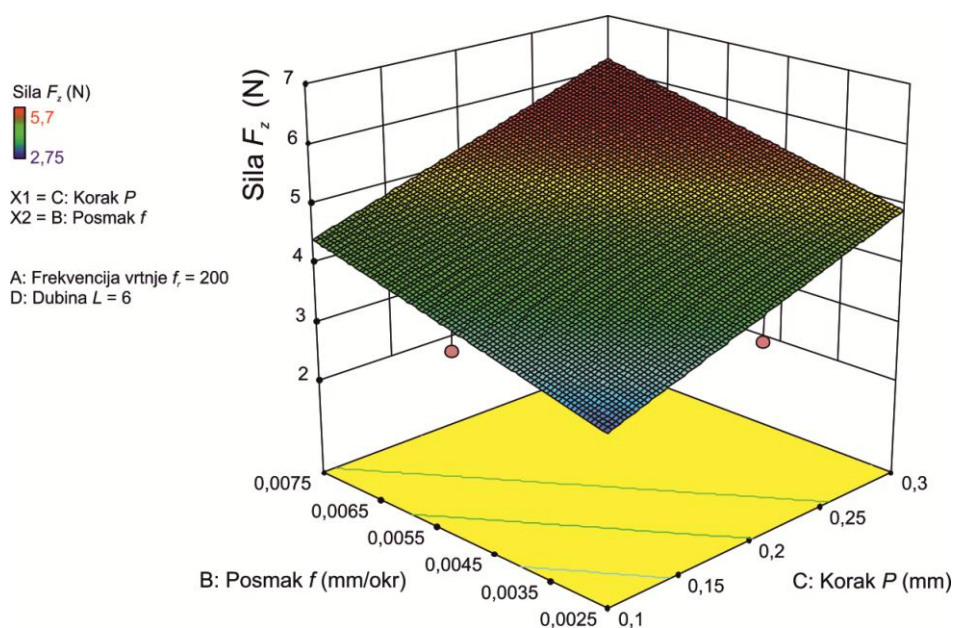
$$M = 0,86 - 6,67 \cdot 10^{-3} \cdot f_r - 150 \cdot f + 24,25 \cdot P + 0,58 \cdot L \quad (5.24)$$

gdje je: F_z – aksijalna sila (N), M – moment (Nmm), f_r – frekvencija vrtnje svrdla (Hz), f – posmak (mm/okr.), P – dubina koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem (mm), L – dubina provrta (mm).

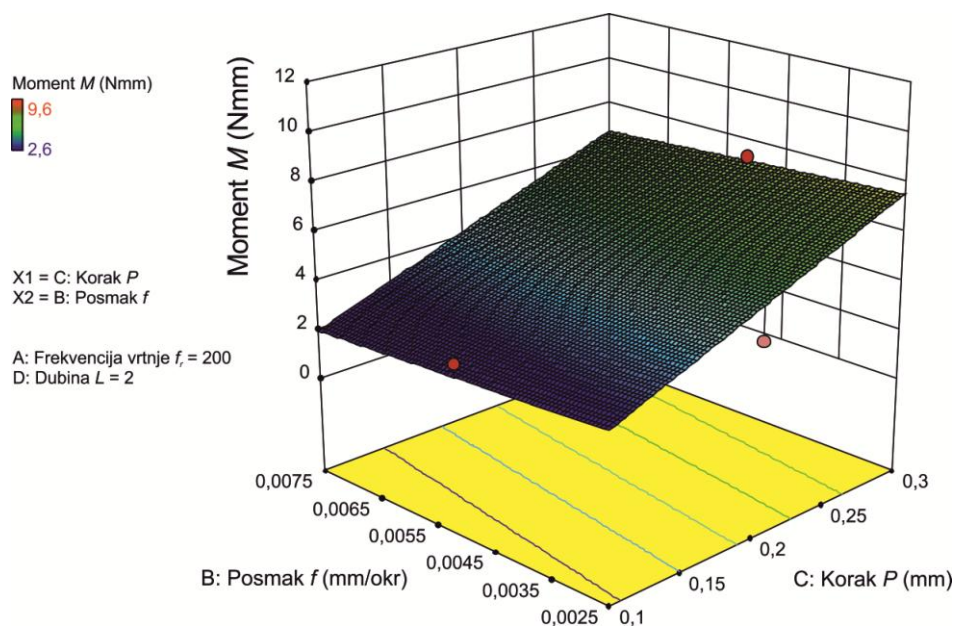
Potrebno je napomenuti da ove jednadžbe, dobivene regresijskom analizom eksperimentalnih podataka, vrijede za specifični obrađivani slučaj. 3D prikazi vrijednosti aksijalne sile i momenta bušenja, za različite kombinacije parametara modela prikazani su na slikama 5.15 – 5.18.



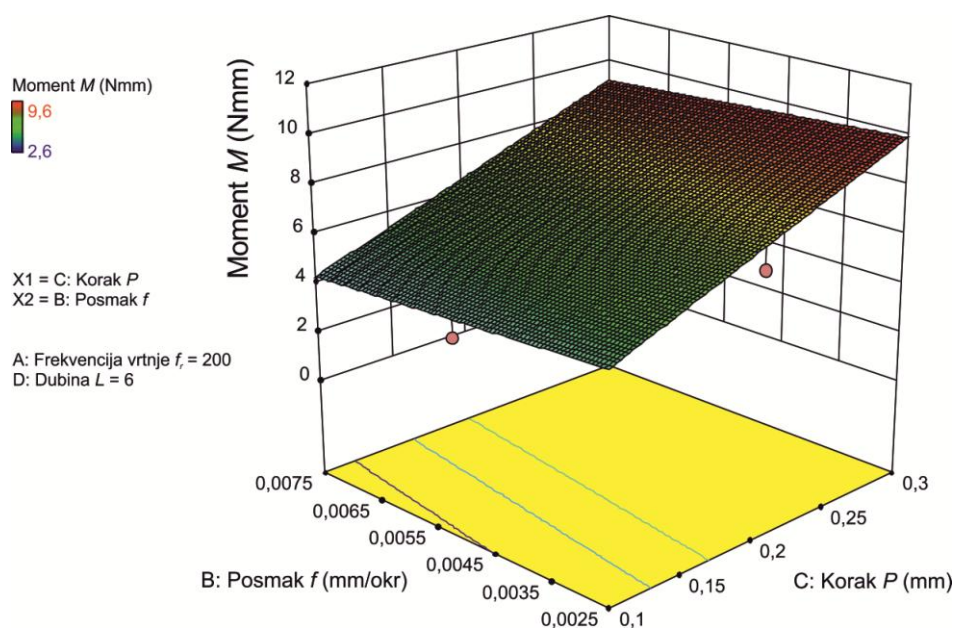
Slika 5.15 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti sile F_z mikrobušenja o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 2$ mm, $n = 12000$ min⁻¹)



Slika 5.16 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti sile F_z mikrobušenja o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 6$ mm, $n = 12000$ min⁻¹)



Slika 5.17 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti momenta M mikrobušenja o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 2$ mm, $n = 12\,000\text{ min}^{-1}$)



Slika 5.18 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti momenta M mikrobušenja o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 6$ mm, $n = 12\,000\text{ min}^{-1}$)

5.5. Prikaz rezultata dobivenih mjerenjem aksijalne sile i momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama

Tablica 5.14 prikazuje rezultate mjerenja po stanjima plana pokusa, a tablica 5.15 pregled članova modela s kratkim statističkim pregledom.

Tablica 5.14 Rezultati mjerenja aksijalne sile i momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama po stanjima plana pokusa

Oznaka slučajnoga redoslijeda izvođenja	Oznaka stanja pokusa prema redoslijedu izvođenja	Odziv		Oznaka slučajnoga redoslijeda izvođenja	Oznaka stanja pokusa prema redoslijedu izvođenja	Odziv	
		R1	R2			R1	R2
		Sila F_z	Moment M			Sila F_z	Moment M
		N	Nmm			N	Nmm
15	1	3,51	3,3	26	28	3,67	4,1
13	2	3,77	1,7	46	29	3,79	2,7
54	3	4,9	5,1	43	30	4,06	4,5
53	4	5,39	6,8	9	31	2,88	1,6
6	5	2,98	3,5	23	32	4,65	3,6
45	6	6,3	5	11	33	5,16	4,9
38	7	5,6	4,2	24	34	6,16	7,9
17	8	3,91	1,8	36	35	5	2,6
20	9	4,72	4,4	48	36	5,3	7,8
29	10	5,36	6,6	40	37	5,65	5,9
19	11	3,61	2	52	38	4,11	4,8
25	12	6,81	6,4	4	39	5,9	4,9
32	13	4,2	3	22	40	5,45	6,4
50	14	4,61	5,1	2	41	3,3	3,1
8	15	5,08	2,3	30	42	4,71	4,2
3	16	7,56	7,9	5	43	4,1	3,2
28	17	4,2	3,5	27	44	4,75	6,3
7	18	6,94	8,1	49	45	5,16	5,3
31	19	4,04	5,8	44	46	4	4
16	20	5,18	6,1	10	47	4,92	2,8
12	21	6,42	5,9	21	48	4,49	3,4
51	22	4,75	4,9	42	49	3,48	2
14	23	4,75	1,5	34	50	4,42	2,7
39	24	4,71	5,8	47	51	5,37	6,8
18	25	4,08	4,2	37	52	3,7	2,8
41	26	5	3,4	33	53	2,74	1,9
1	27	3,7	5,4	35	54	3	2,1

Tablica 5.15 Pregled članova modela mikrobušenja potpomognutoga vibracijama

Study Type	Response Surface	Subtype	Randomized					
Design Type	Box-Behnken	Runs	54					
Design Model	Quadratic	Blocks	No Blocks					
Factor	Name	Units	Minimum	Maximum	Coded	Values	Mean	Std. Dev.
A	Frekvencija vrtnje f_r	Hz	100	300	-1,000=100	1,000=300	200	67,29266
B	Posmak f	mm/okr	0,0025	0,0075	-1,000=0,0025	1,000=0,0075	0,005	0,001682
C	Korak P	mm	0,1	0,3	-1,000=0,1	1,000=0,3	0,2	0,067293
D	Omjer r_f		0,5	1,5	-1,000=0,5	1,000=1,5	1	0,336463
E	Amplituda vibr. A	mm	0,0025	0,0075	-1,000=0,0025	1,000=0,0075	0,005	0,001682
F	Dubina L	mm	2	6	-1,000=2	1,000=6	4	1,345853
Response	Name	Units	Obs	Analysis	Minimum	Maximum		
R1	Sila F_z	N	54	Polynomial	2,74	7,56		
R2	Moment M	Nmm	54	Polynomial	1,5	8,1		
Mean	Std. Dev.	Ratio	Trans	Model				
4,666667	1,057259	2,759124	None	Linear				
4,37037	1,821738	5,4	None	Linear				

5.6. Statistička obrada rezultata i izrada matematičkog modela za opisivanje utjecaja parametara mikrobušenja potpomognutoga vibracijama

Analiza varijance je pokazala da se ovisnost aksijalne sile i momenta mikrobušenja o ulaznim parametrima može najbolje opisati linearnim matematičkim modelima. Analiza varijance sile, prikazana je tablicom 5.16.

Tablica 5.16 Analiza varijance za izrađeni linearni matematički model za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Broj stupnjeva slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P-vrijednost Prob > F	Značajnost
Model	41,57	6	6,93	18,43	< 0,0001	značajan
Članovi modela						
A-Frek. vrtnje f_r	7,46	1	7,46	19,84	< 0,0001	značajan
B-Posmak f	23,74	1	23,74	63,15	< 0,0001	značajan
C-Korak P	2,57	1	2,57	6,85	0,0119	značajan
D-Omjer frekv. r_f	0,51	1	0,51	1,37	0,2485	neznačajan
E-Amplituda A	0,08	1	0,08	0,21	0,6457	neznačajan
F-Dubina L	7,21	1	7,21	19,16	< 0,0001	značajan
Rezidualno odstupanje	17,67	47	0,38			
Nedostatak podudaranja	16,67	42	0,40	1,98	0,2284	neznačajan
Čista greška	1,00	5	0,20			
Ukupno	59,24	53				

F-vrijednost modela od 18,43 ukazuje na značajnost modela, jer vjerojatnost da se pojavi tako velika vrijednost, uslijed šuma, iznosi samo 0,01%. Vrijednost $Prob > F$ manja od 0,05, za pojedine članove predloženog matematičkog modela, govori u prilog značajnosti njihovog utjecaja. U ovom modelu su, stoga, značajni faktori A, B, C i F.

F-vrijednost veličine *Nedostatak podudaranja* od 1,98 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na *Čistu grešku*. Postoji vjerojatnost od 22,84% da tako velika F-vrijednost veličine *Nedostatak podudaranja* nastaje zbog šuma. S obzirom da *Nedostatak podudaranja* nije značajno, model je prihvaćen.

U tablici 5.17 prikazane su statističke veličine koje opisuju kvalitetu linearnog matematičkog modela aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama.

Tablica 5.17 Statističke veličine koje opisuju kvalitetu linearnog matematičkog modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama

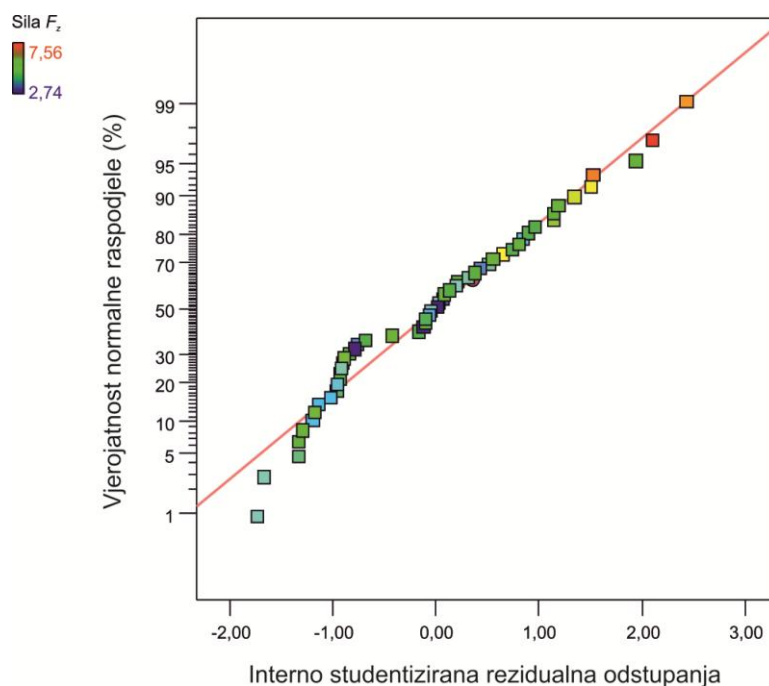
Standardna devijacija odstupanja modela	0,61
Aritmetička sredina	4,67
Koeficijent varijacije (%)	13,14
Predviđena suma kvadrata $PRESS$	23,72
Koeficijent determinacije R^2	0,7017
Prilagođeni koeficijent determinacije R^2_{adj}	0,6637
Predviđeni koeficijent determinacije R^2_{pred}	0,5997
Aдекватna preciznost AP	15,386

Razlike veličine R_{pre}^2 od 0,5997 i veličine R_{adj}^2 koja iznosi 0,6637 ne prelazi vrijednost 0,2. Adekvatna preciznost mjeri odnos veličina signala u odnosu na šum, a kako je omjer 15,386 veći od traženog minimuma koji iznosi 4, postoji primjeren signal. Stoga, ovaj model može koristiti za analizu u eksperimentalnom prostoru. Procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija koeficijenta (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance, za svaki član izrađenog linearnog matematičkog modela za izračunavanje momenta aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama, prikazani su u tablici 5.18.

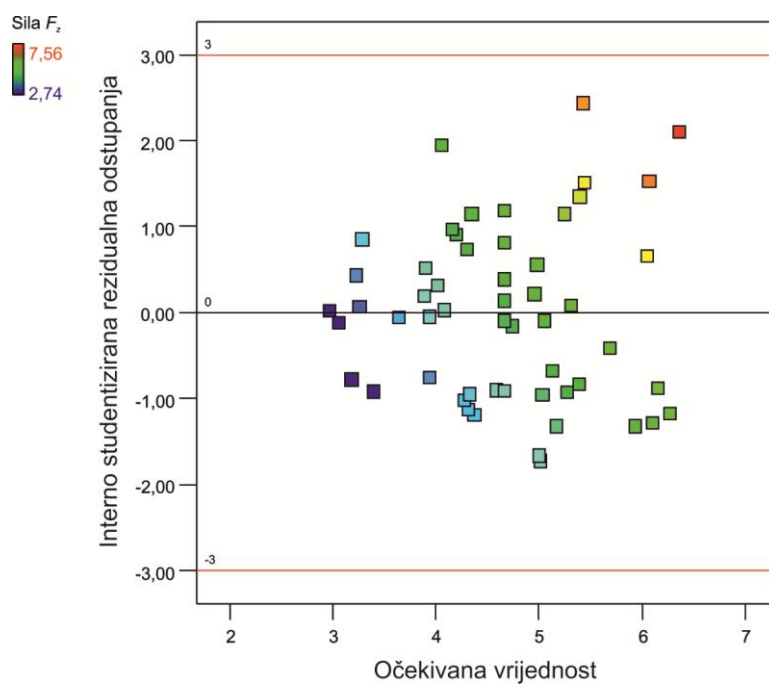
Tablica 5.18 Procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija koeficijenta (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance za svaki član izrađenog linearnog matematičkog modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama

Član modela	Procjena koeficijenta	Stupnjevi slobode	Standardna pogreška	95% interval povjerenja donja granica	95% interval povjerenja gornja granica	Faktor inflacije varijance
Slobodni član	4,67	1	0,08	4,5	4,83	
A-Frekv. vrtnje f_r	-0,56	1	0,13	-0,81	-0,31	1
B-Posmak f	0,99	1	0,13	0,74	1,25	1
C-Korak P	0,33	1	0,13	0,08	0,58	1
D-Omjer frekv. r_f	-0,15	1	0,13	-0,4	0,11	1
E-Amplituda A	-0,06	1	0,13	-0,31	0,19	1
F-Dubina L	0,55	1	0,13	0,3	0,8	1

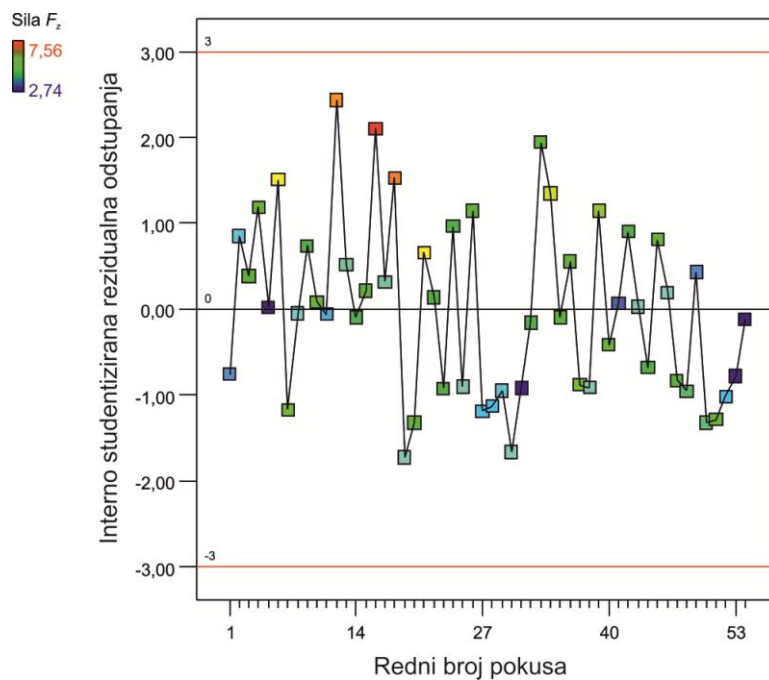
Na slikama 5.19 – 5.22. prikazano je ponašanje rezultata eksperimenta.



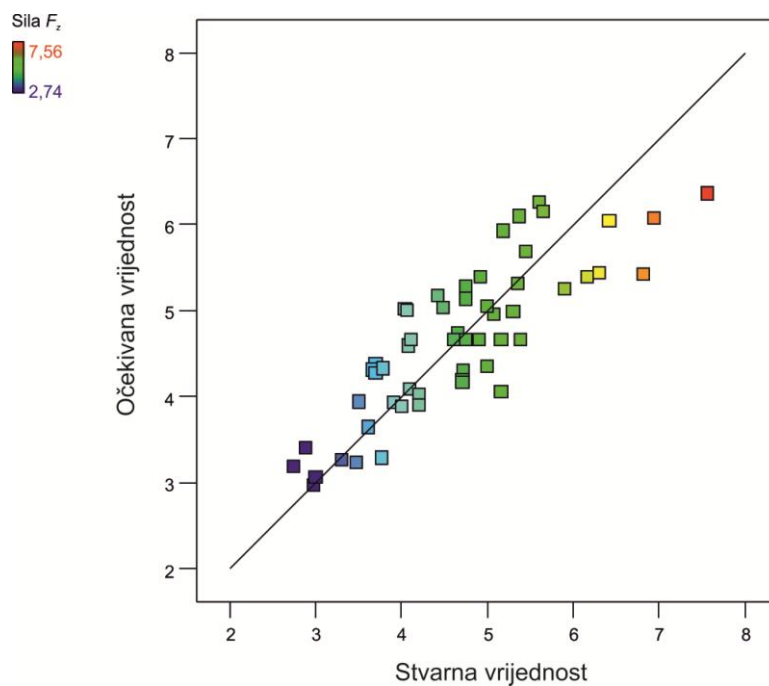
Slika 5.19 Dijagram interno studentiziranih rezidualnih odstupanja za linearni matematički model za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama



Slika 5.20 Dijagram rezidualnih odstupanja u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama



Slika 5.21 Slučajno rasipanje rezidualnih odstupanja u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za linearni matematički model za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama



Slika 5.22 Dijagram stvarnih vrijednosti u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje aksijalne sile mikrobušenja potpomognutoga vibracijama

Analiza varijance momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama prikazana je tablicom 5.19.

Tablica 5.19 Analiza varijance za izrađeni linearni matematički model za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Broj stupnjeva slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F - vrijednost	P-vrijednost Prob > F	Značajnost
Model	115,67	6	19,28	15,05	< 0,0001	značajan
Članovi modela						
A-Frek. vrtnje f_r	24,60	1	24,60	19,20	< 0,0001	značajan
B-Posmak f	10,14	1	10,14	7,91	0,0071	značajan
C-Korak P	50,17	1	50,17	39,16	0,0119	značajan
D-Omjer frekv. r_f	0,96	1	0,96	0,75	0,3911	neznačajan
E-Amplituda A	0,09	1	0,09	0,07	0,7880	neznačajan
F-Dubina L	29,70	1	29,70	23,18	< 0,0001	značajan
Rezidualno odstupanje	60,22	47	1,28			
Nedostatak podudaranja	57,49	42	1,37	2,50	0,1535	neznačajan
Čista greška	2,73	5	0,55			
Ukupno	175,89	53				

F-vrijednost modela od 15,05 ukazuje na značajnost modela, jer vjerojatnost da se pojavi tako velika vrijednost, uslijed šuma, iznosi samo 0,01%. Vrijednost $Prob > F$ manja od 0,05 za pojedine članove predloženog matematičkog modela, govori u prilog značajnosti njihovog utjecaja. U ovom modelu su, stoga, značajni faktori A, B, C i F.

F-vrijednost veličine *Nedostatak podudaranja* od 1,98 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na *Čistu grešku*. Postoji vjerojatnost od 15,35% da tako velika F-vrijednost veličine *Nedostatak podudaranja* nastaje zbog šuma. S obzirom da *Nedostatak podudaranja* nije značajno, model je prihvaćen. U tablici 5.20 prikazane su statističke veličine koje opisuju kvalitetu linearnog matematičkog modela momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama.

Tablica 5.20 Statističke veličine koje opisuju kvalitetu linearnog matematičkog modela za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama

Standardna devijacija odstupanja modela	1,13
Aritmetička sredina	4,37
Koeficijent varijacije (%)	25,90
Predviđena suma kvadrata $PRESS$	79,40
Koeficijent determinacije R^2	0,6576
Prilagođeni koeficijent determinacije R^2_{adj}	0,6139
Predviđeni koeficijent determinacije R^2_{pred}	0,5486
Aдекватna preciznost AP	17,524

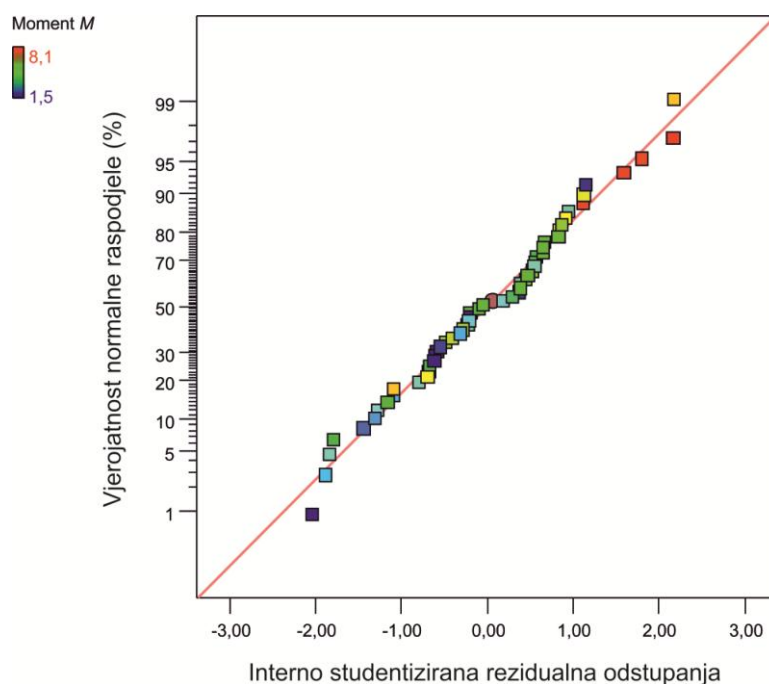
Razlika veličine R^2_{pred} od 0,5486 i veličine R^2_{adj} koja iznosi 0,6139 ne prelazi vrijednost 0,2. Adekvatna preciznost mjeri odnos veličina signala u odnosu na šum, a kako je omjer 17,524 veći od traženog minimuma koji iznosi 4, postoji primjeren signal. Stoga se ovaj model može koristiti za analizu u eksperimentalnom prostoru.

Procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija koeficijenta (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance za svaki član izrađenog linearnog matematičkog modela za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama prikazani su u tablici 5.21.

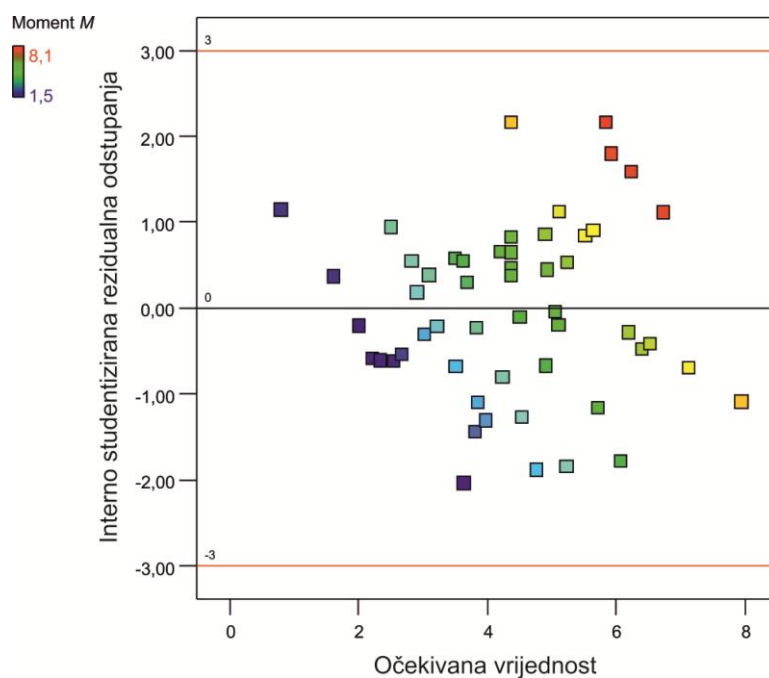
Tablica 5.21 Procjene koeficijenata, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija koeficijenta (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance za svaki član izrađenog linearnog matematičkog modela za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama

Član modela	Procjena koeficijenta	Stupnjevi slobode	Standardna pogreška	95% interval povjerenja donja granica	95% interval povjerenja gornja granica	Faktor inflacije varijance
Slobodni član	4,37	1	0,15	4,06	4,68	
A-Frekv. vrtnje f_r	-1,01	1	0,23	-1,48	-0,55	1
B-Posmak f	0,65	1	0,23	0,19	1,11	1
C-Korak P	1,45	1	0,23	0,98	1,91	1
D-Omjer frekv. r_f	-0,20	1	0,23	-0,66	0,26	1
E-Amplituda A	0,06	1	0,23	-0,40	0,53	1
F-Dubina L	1,11	1	0,23	0,65	1,58	1

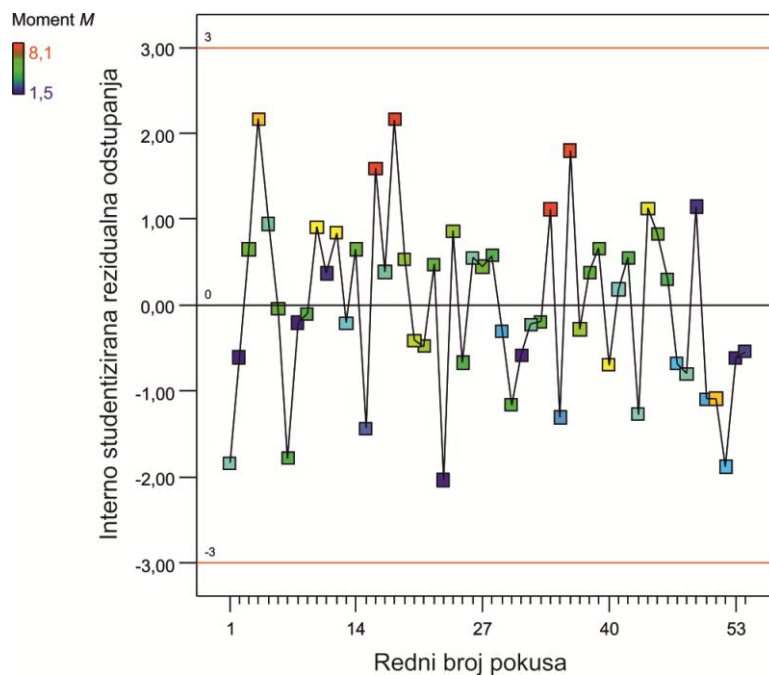
Na slikama 5.20 – 5.23 prikazano je ponašanje rezultata eksperimenta.



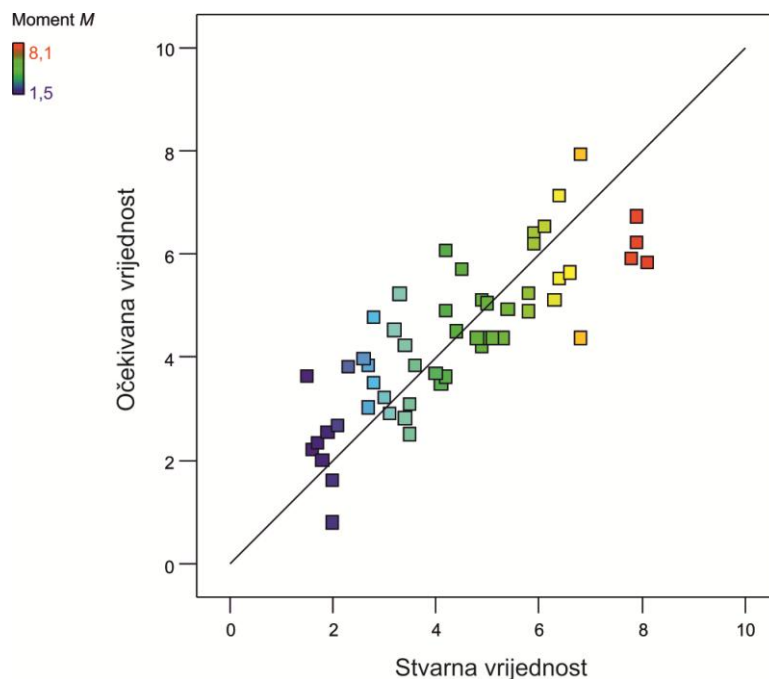
Slika 5.23 Dijagram interno studentiziranih rezidualnih odstupanja za linearni matematički model za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama



Slika 5.24 Dijagram rezidualnih odstupanja u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama



Slika 5.25 Slučajno rasipanje rezidualnih odstupanja u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za linearni matematički model za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama



Slika 5.26 Dijagram stvarnih vrijednosti u ovisnosti o očekivanim vrijednostima modela za izračunavanje momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama

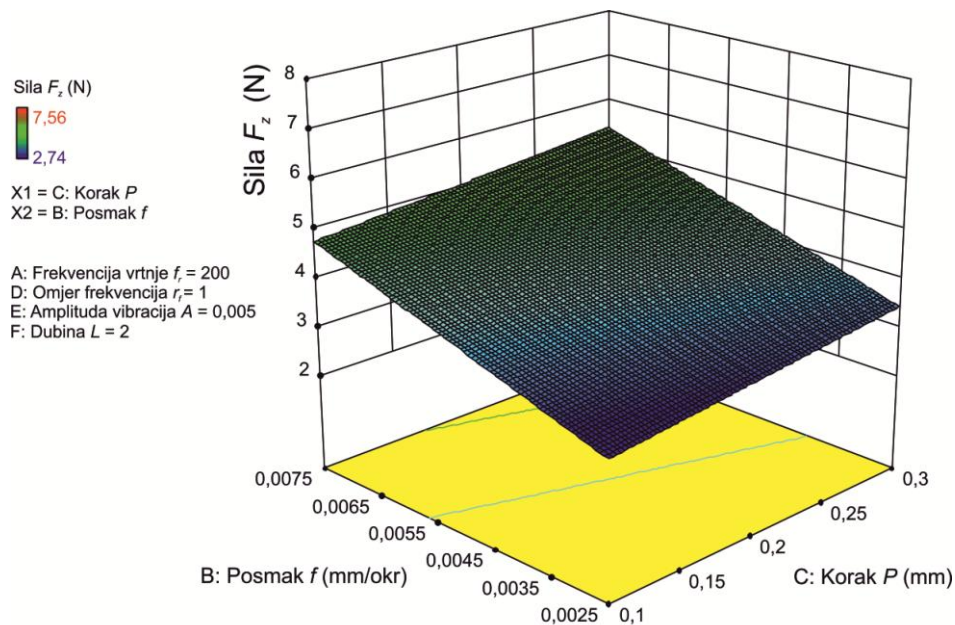
Matematički modeli aksijalne sile i momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama s periodičkim izvlačenjem svrdla, prikazani su jednadžbama:

$$F_z = 2,45 - 5,58 \cdot 10^{-3} \cdot f_r + 397,8 \cdot f + 3,27 \cdot P - 0,29 \cdot r_f - 23,17 \cdot A + 0,27 \cdot L \quad (5.25)$$

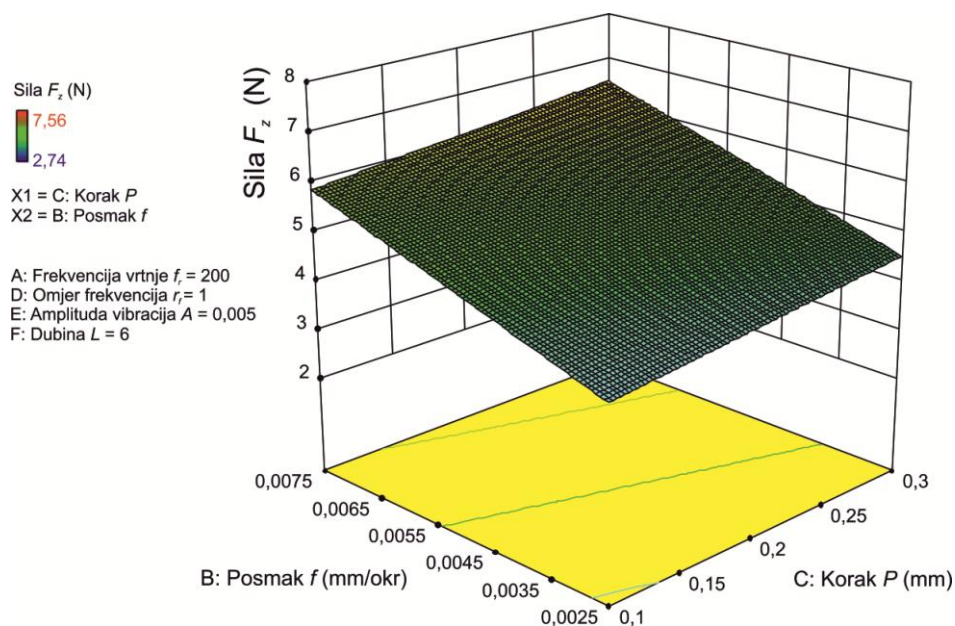
$$M = 0,25 - 0,01 \cdot f_r + 260 \cdot f + 14,46 \cdot P - 0,4 \cdot r_f + 25 \cdot A + 0,56 \cdot L \quad (5.26)$$

gdje je: F_z – aksijalna sila (N), M – moment (Nmm), f_r – frekvencija vrtnje svrdla (Hz), f – posmak (mm/okr.), P – dubina koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem (mm), r_f – omjer frekvencija, A – amplituda vibracija, L – dubina provrta (mm).

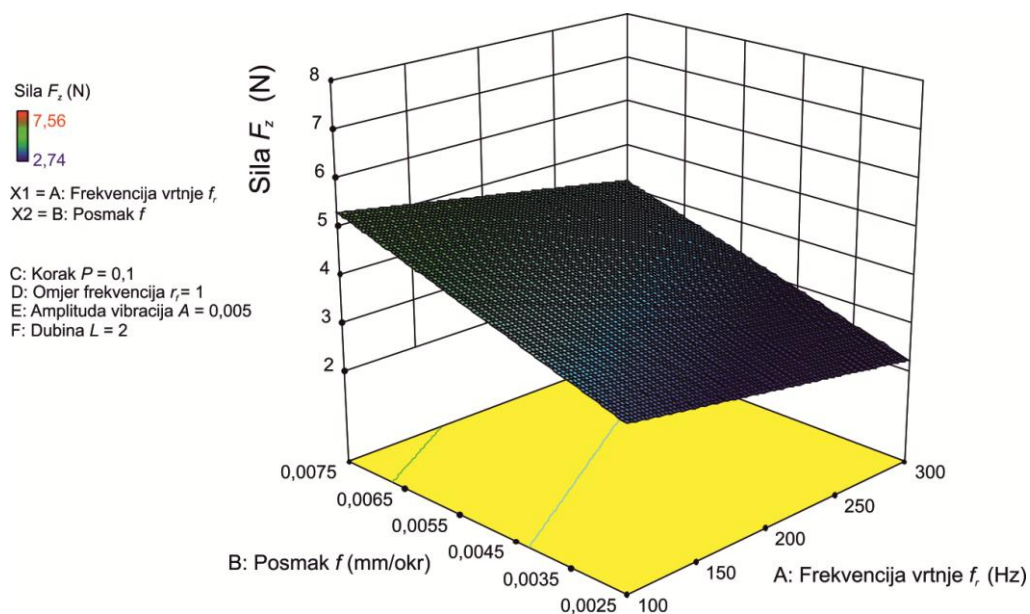
Potrebno je napomenuti da ove jednadžbe, dobivene regresijskom analizom eksperimentalnih podataka, vrijede za specifični obrađivani slučaj. 3D prikazi vrijednosti aksijalne sile i momenta bušenja, za različite kombinacije parametara modela prikazane su na slikama 5.27 – 5.35.



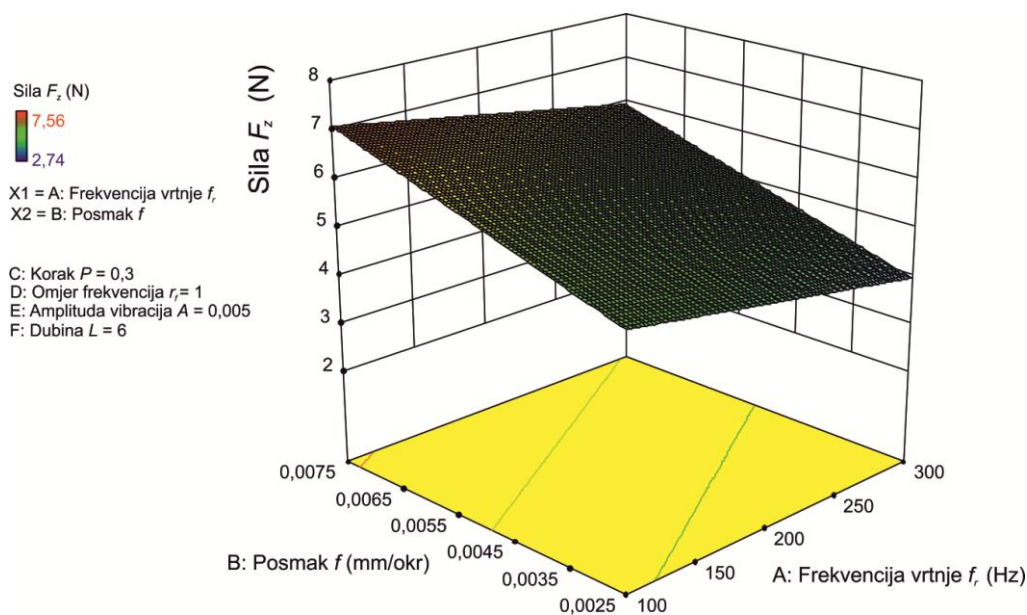
Slika 5.27 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti sile F_z mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 2$ mm, $n = 12000$ min⁻¹, $r_f = 1$, $A = 0,005$ mm)



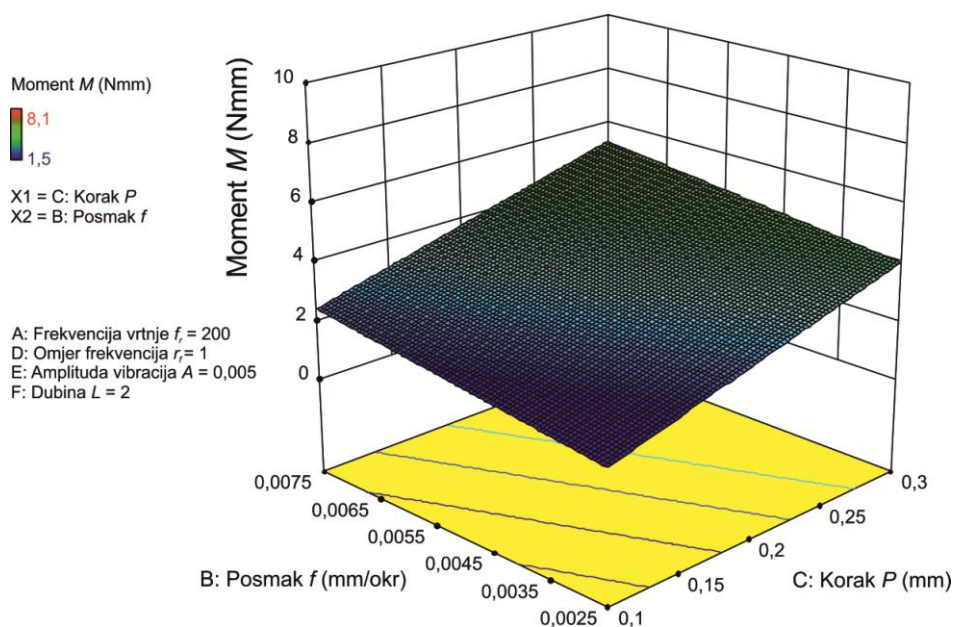
Slika 5.28 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti sile F_z mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 6$ mm, $n = 12000$ min⁻¹, $r_f = 1$, $A = 0,005$ mm)



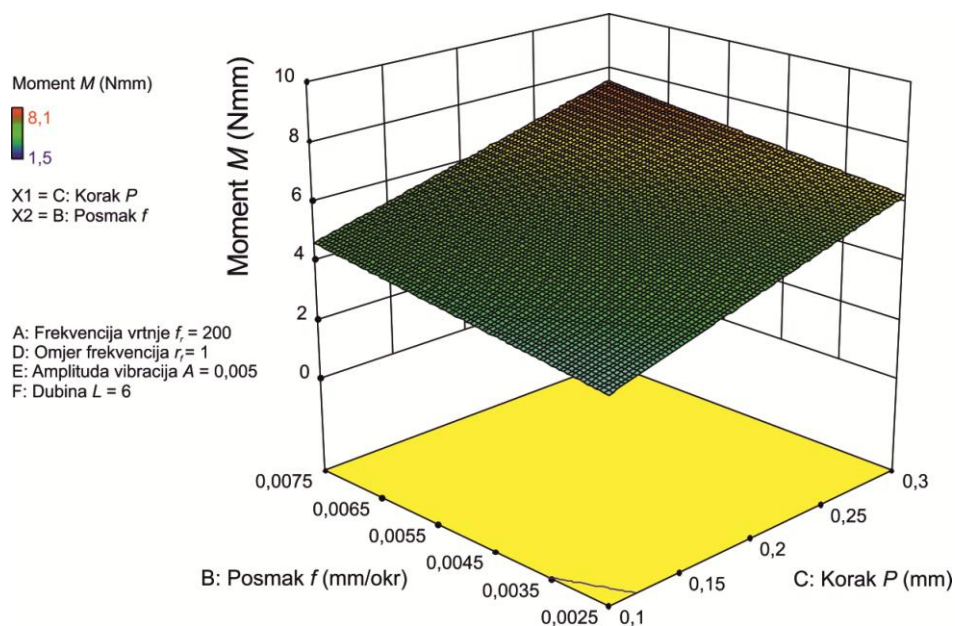
Slika 5.29 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti sile F_z mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i frekvenciji vrtnje f_r (dubina provrta $L = 2$ mm, $P = 0,1$ mm, $r_f = 1$, $A = 0,005$ mm)



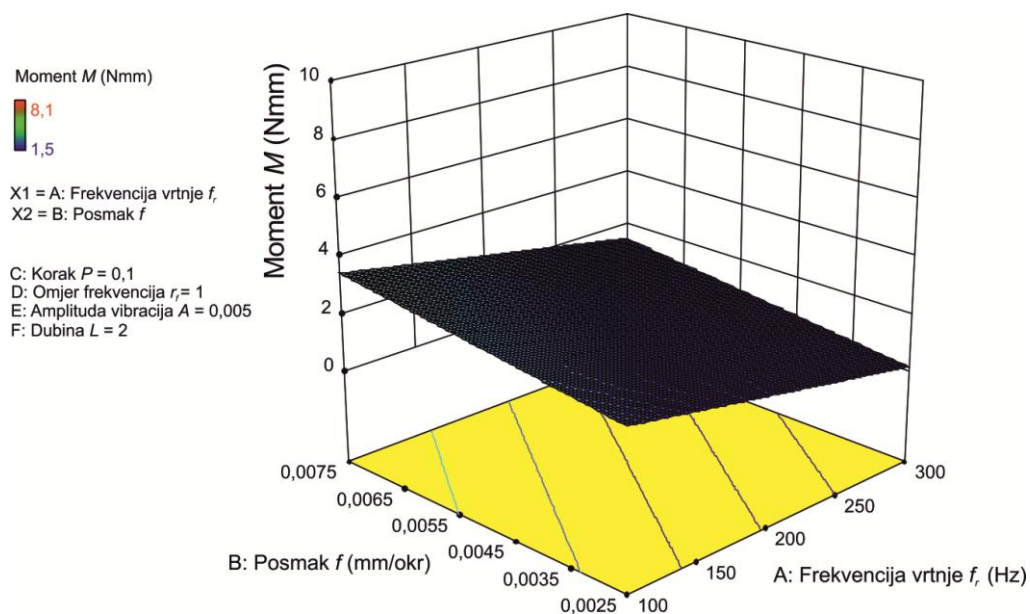
Slika 5.30 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti sile F_z mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i frekvenciji vrtnje f_r (dubina provrta $L = 6$ mm, $P = 0,3$ mm, $r_f = 1$, $A = 0,005$ mm)



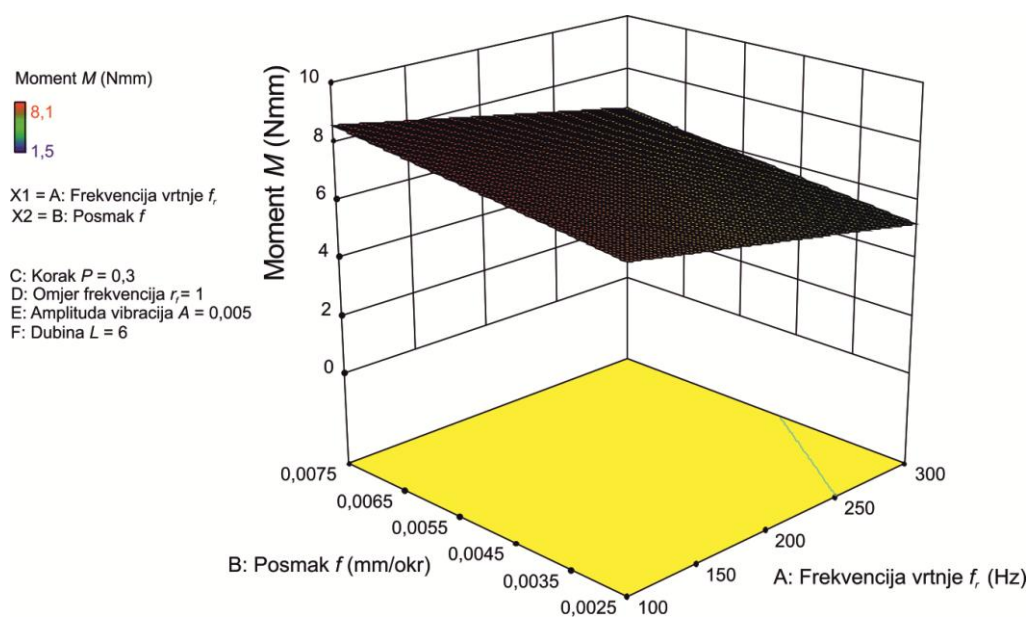
Slika 5.31 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti momenta M mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 2$ mm, $n = 12000$ min⁻¹, $r_f = 1$, $A = 0,005$ mm)



Slika 5.32 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti momenta M mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i dubini koraka P (dubina provrta $L = 6$ mm, $n = 12000$ min⁻¹, $r_f = 1$, $A = 0,005$ mm)



Slika 5.33 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti momenta M mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i frekvenciji vrtnje f_r (dubina provrta $L = 2$ mm, dubina koraka $P = 0,1$ mm, $r_f = 1$, $A = 0,005$ mm)



Slika 5.34 3D prikaz matematičkog modela ovisnosti momenta M mikrobušenja potpomognutoga vibracijama o posmaku f i frekvenciji vrtnje f_r (dubina provrta $L = 6$ mm, dubina koraka $P = 0,3$ mm, $r_f = 1$, $A = 0,005$ mm)

Analiza rezultata izvršena je preko dijagrama perturbacije koji pomažu u određivanju veličine utjecaja svakog pojedinog faktora u određenom stanju plana pokusa. Odziv se dobiva promjenom razine samo analiziranog faktora dok se, istovremeno, svi ostali drže konstatni. U modelima su svi odzivi linearni i prikazani su kao pravci i iz njihovih nagiba može se zaključiti o veličini utjecaja pojedinog faktora. Što je veći nagib pravca, veći je utjecaj faktora na odziv.

Zaključci iz eksperimentalnog istraživanja mikrobušenja aluminijskog svrdla uz periodičko izvlačenje svrdla bez vibracija su:

1. Za promatrani raspon parametara utvrđeno je kako dubina koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla ima najveći utjecaj na aksijalnu silu bušenja, zatim posmak i dubina provrta.
2. Za promatrani raspon parametara utvrđeno je kako učestalost vrtnje nema bitniji utjecaj na aksijalnu silu bušenja.
3. Za promatrani raspon parametara utvrđeno je kako dubina koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla ima najveći utjecaj na moment bušenja te zatim dubina provrta.
4. Za promatrani raspon parametara učestalost vrtnje i posmak nemaju bitniji utjecaj na moment bušenja.

Zaključci iz eksperimentalnog istraživanja mikrobušenja aluminijskog svrdla uz vibracije su:

1. Za promatrani raspon parametara utvrđeno je kako posmak i dubina koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla imaju najveći utjecaj na aksijalnu silu bušenja, zatim dubina provrta i učestalost vrtnje.
2. Za promatrani raspon parametara utvrđeno je kako omjer frekvencija i amplituda nemaju bitniji utjecaj na aksijalnu silu bušenja.

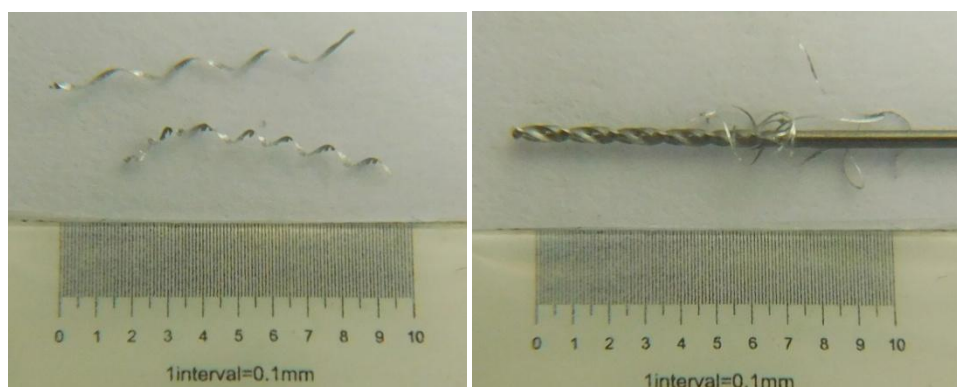
3. Za promatrani raspon parametara utvrđeno je kako dubina koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla ima najveći utjecaj na moment bušenja, zatim dubina provrta, posmak i učestalost vrtnje.
4. Za promatrani raspon parametara utvrđeno je kako omjer frekvencija i amplituda nemaju bitniji utjecaj na moment bušenja.

Za oba modela aksijalne sile mikrobušenja bez vibracija i mikrobušenja potpomognutoga vibracijama, korak bušenja, posmak i dubina provrta su značajni parametri. Razlika između ova dva modela je u tome što model bušenja potpomognutoga vibracijama uzima u obzir i učestalost vrtnje kao značajan parametar, no ona ima najmanji utjecaj od sva četiri značajna parametra. Povećanjem učestalosti vrtnj, smanjuje se aksijalna sila kod modela bušenja potpomognutoga vibracijama.

Za oba modela momenta mikrobušenja, bez vibracija i momenta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama, korak bušenja i dubina provrta su značajni parametri. Razlika između ova dva modela je u tome što model bušenja potpomognutoga vibracijama uzima u obzir posmak i učestalost vrtnje kao značajan parametar. Povećanjem učestalosti vrtnje, smanjuje se moment kod modela bušenja potpomognutoga vibracijama, no ona ima najmanji utjecaj od sva četiri značajna parametra

Izostanak posmaka kao parametra u modelu mikrobušenja bez vibracija, može se objasniti činjenicom kako je za raspon promatranih vrijednosti posmaka, u ispitivanjima, aksijalna debljina čestice prije deformiranja bila ispod vrijednosti radijusa oštice svrdla, dok je kod mikrobušenja ona veća, zbog periodički superponirane amplitude vibracija na posmak. Povećanjem učestalosti vrtnje, smanjuje se moment bušenja kod modela bušenja potpomognutoga vibracijama, no ona ima najmanji utjecaj od sva četiri značajna parametra. Činjenica da niti omjer frekvencija niti amplituda vibracija nemaju bitni utjecaj na model aksijalne sile i momenta bušenja potpomognutoga vibracijama, može se objasniti relativno uskim područjem ispitivanja oba parametra, zbog negativnih efekata na vijek trajanja svrdla koji su ustanovljeni njihovim prekoračenjem, prilikom preliminarnog dijela eksperimentalnog ispitivanja. Elastičnost elemenata sustava za bušenje i generiranje vibracija, koji, ponajprije, čine svrdlo i elementi stezne naprave te uređaj za generiranje vibracija, također mogu imati utjecaj na prigušenje vibracija i time mijenjanje uvjeta mikrobušenja potpomognutoga vibracijama.

Odvojene čestice, prikazane na slikama 6.1 i 6.2, pokazuju značajnu razliku između procesa dubokoga mikrobušenja bez i uz pomoć vibracija. Prikazane odvojene čestice formirane su u početnom dijelu bušenja, pošto nije moguće jednostavno prikupiti odvojene čestice iz dubokog provrta u obliku u kojem su formirane, jer su one do izlaska na površinu obratka donekle segmentirane, uslijed loma tijekom prolaza kroz spiralni utor svrdla i sami provrt. Stoga, analiza ovisnosti veličine čestice o parametrima bušenja i vibracija kod dubokoga bušenja s neprolaznim provrtom nije provedena u ovom radu.



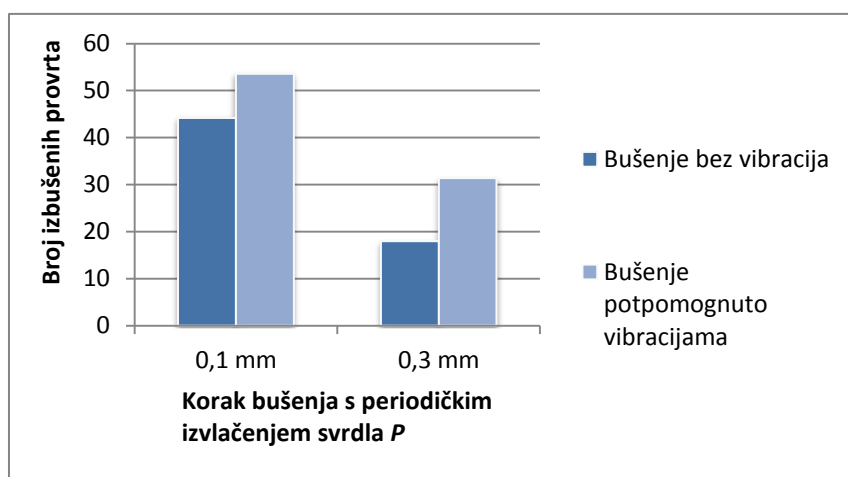
Slika 6.1 Primjeri veličine odvojenih čestica kod bušenja bez primjene vibracija a) s početka bušenja, b) ostatak odvojenih čestica na svrdlu



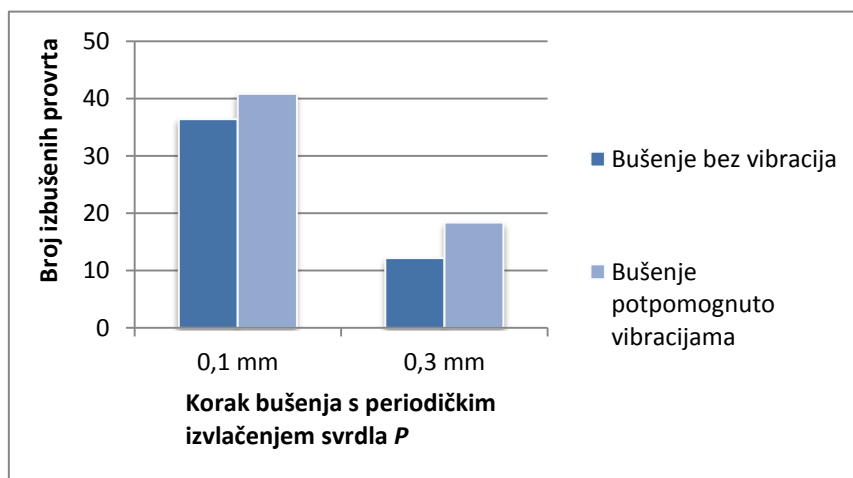
Slika 6.2 Primjer veličine odvojenih čestica kod bušenja potpomognutoga vibracijama

Usporedbom vrijednosti momenta za duboko bušenje kod $L / d = 12$, moguće je kod većih vrijednosti dubina koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla ostvariti do 25% manji moment bušenja kod mikrobušenja potpomognutoga vibracijama uz slične vrijednosti aksijalne sile bušenja, što se pripisuje boljem odvođenju manjih odvojenih čestica, čime se smanjuje trenje između odvojenih čestica, svrdla i obratka.

Ispitan je utjecaj parametara bušenja i vibracija na broj izbušenih provrta prije loma svrdla. Dubina provrta bila je 6 mm ($L / d = 12$), a vrijednost parametra učestalost vrtnje za sva bušenja bila je $n = 18000 \text{ min}^{-1}$. Varirali su se parametri bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla - posmak f (0,0025 i 0,0075 mm/okr.) i korak P (0,1 i 0,3 mm). Kod bušenja potpomognutoga vibracijama vrijednosti parametara vibracija bile su konstantne za sva bušenja potpomognuta vibracijama i iznosile su $f_v = 300 \text{ Hz}$ ($r_f = 1$) i amplituda $A = 0,005 \text{ mm}$. Rezultati su prosječne vrijednosti broja izbušenih provrta od 5 svrdala za svaku kombinaciju parametara bušenja bez i uz pomoć vibracija te je u ovom ispitivanju ukupno korišteno 40 svrdala za bušenje 1275 provrta. Rezultati vijeka trajanja svrdla prikazani su na slikama 6.3 i 6.4.



Slika 6.3 Usporedba vijeka trajanja svrdla kod bušenja provrta dubine $L = 6 \text{ mm}$, bez vibracija i bušenja potpomognutoga vibracijama, s parametrima bušenja $n = 18000 \text{ min}^{-1}$, $f = 0,0025 \text{ mm/okr.}$ i parametrima vibracija $f_v = 300 \text{ Hz}$, $A = 0,005 \text{ mm}$



Slika 6.4 Usporedba vijeka trajanja svrdla za bušenje provrta dubine $L = 6 \text{ mm}$, bez vibracija i bušenja potpomognutoga vibracijama, s parametrima bušenja $n = 18\,000 \text{ min}^{-1}$, $f = 0,0075 \text{ mm/okr.}$ i parametrima vibracija $f_v = 300 \text{ Hz}$, $A = 0,005 \text{ mm}$

Iz rezultata prikazanih na dijagramima, vidljivo je kako povećanje koraka značajno utječe na smanjenje vijeka trajanja svrdla. Također je vidljivo kako povećanje posmaka f smanjuje vijek trajanja svrdla, što je izraženije kod većeg koraka P . Za sve ispitane slučajeve, bušenje potpomognuto vibracijama omogućilo je prosječno veći broj izbušenih provrta prije loma. Usporedbom rezultata, može se reći kako je razlika vijeka trajanja svrdla dubokoga mikrobušenja bez vibracija i dubokoga mikrobušenja potpomognutoga vibracijama, kod manjeg koraka P i većeg posmaka f , na razini statističke pogreške, pošto je u ispitivanju korišten relativno mali broj svrdala. U slučaju manjeg koraka P , ne nastaje toliko odvojenih čestica na dnu provrta i one se tada lakše mogu odvesti te postoji manja vjerojatnost da će doći do začepjenja utora spirale svrdla te time nema pozitivnog utjecaja vibracija.

S druge strane, pozitivan utjecaj vibracija na vijek trajanja svrdla izraženiji je kod bušenja s većim korakom P . Na ispitnom uzorku od 5 svrdala, vijek trajanja svrdla produžen je u prosjeku za preko 50%. Ova činjenica objašnjava se, prvenstveno, smanjenjem momenta na svrdlo kod bušenja potpomognutoga vibracijama, što je posljedica manjeg nakupljanja dužih čestica u provrtu kod veće dubine koraka P . Povećanje amplitude ili neodgovarajući odabir frekvencije vibracija može povećati aksijalnu silu koja ima negativni utjecaj na vijek trajanja svrdla. Pokazalo se kako je moguća uspješna primjena vibracija kod dubokog mikrobušenja svrdlima promjera 0,5 mm, s omjerima frekvencije vibracija i frekvencije vrtnje u rasponu od 0,5 do 1,5 te vrijednostima amplitude vibracija do 7,5 μm .

Rezultati ovog rada pokazuju kako, za oba slučaja, niže vrijednosti posmaka i koraka mikrobušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla pozitivno djeluju na vijek trajanja mikrosvrdla, dok prednosti primjene superponiranih vibracija dolaze do izražaja kod većih vrijednosti posmaka i koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla. Primjenom većih vrijednosti navedenih parametara dubokoga mikrobušenja potpomognutoga vibracijama omogućuje se kraće vrijeme obrade, uz veću pouzdanost procesa.

U ovom je radu obrađena problematika dubokoga mikrobušenja koje, u usporedbi s konvencionalnim bušenjem, ima bitno drugačije glavne karakteristike procesa, a jedna od njih je prerani gubitak funkcije svrdla, tj. najčešće dolazi do loma svrdla prije no što je došlo do gubitka funkcije uslijed trošenja. Smanjena čvrstoća svrdla i, vezano uz nju, promijenjena geometrija svrdla radi povećanja krutosti, nemogućnost dobave sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje u duboki provrt malog promjera, neki su od izazova primjene dubokoga mikrobušenja u proizvodnim industrijama. Nakupljene ili duge odvojene čestice u provrtu, naliježljene na oštricu svrdla ili u spiralnom utoru svrdla često su uz malu krutost svrdla glavni uzrok loma svrdla. Proizvodnost je ograničena primjenom procesa bušenja s periodičkim izvačenjem svrdla i relativno malim posmakom, zbog povećanja aksijalne sile koja negativno djeluje na vijek trajanja svrdla zbog male krutosti svrdla. S druge strane, manji posmak dovodi do manjeg omjera debljine odvojene čestice prije deformacije i radijusa oštrice svrdla, što dovodi do promjene iz procesa rezanja u proces utiskivanja s većom natražnom silom. Brzina rezanja načelno je manja od konvencionalne, jer veća učestalost vrtnje svrdla dovodi do negativnog dinamičkog utjecaja na stabilnost procesa mikrobušenja

Jedan od postupaka koji može povećati pouzdanost procesa dubokoga mikrobušenja je bušenje potpomognuto vibracijama, gdje se vibracije superponiraju u aksijalnom smjeru na svrdlo. Cilj primjene vibracija je prvenstveno stvaranje manjih odvojenih čestica koje bi se, kod bušenja duktilnih materijala, lakše odvodile iz provrta. Vibracije mijenjaju proces bušenja periodički mijenjajući kutove i sile rezanja te debljinu odvojene čestice prije deformiranja.

U preliminarnom dijelu eksperimentalnog rada utvrđeno je kako duboko mikrobušenje bez periodičkog izvlačenja svrdla ima za rezultat iznimno kratak vijek trajanja svrdla, uzrokovan preranim lomom svrdla te je u radu analizirano isključivo mikrobušenje s periodičkim izvlačenjem svrdla. Također je utvrđen optimalni raspon frekvencije vibracija u ovisnosti o brzini vrtnje svrdla te kako velika vrijednost amplitude vibracija povećava aksijalnu silu koja, u konačnici, ima negativni utjecaj na vijek trajanja svrdla. U eksperimentalnom dijelu rada bušenja aluminija AlMg3 svrdlima promjera 0,5 mm, provrta omjera dubine i promjera $L / d = 12$, mjerenjem aksijalne sile i momenta bušenja varirani su parametri bušenja prema Box-Behnkenovom modelu plana pokusa. Kreirani su matematički modeli aksijalne sile i momenta mikrobušenja te mikrobušenja potpomognutog vibracijama.

Matematički modeli mikrobušenja pokazali su kako su dubina provrta, korak bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla i posmak najutjecajniji faktori na veličine aksijane sile i momenta kod dubokoga mikrobušenja provrta, s omjerom dubine i promjera većim od 10. To vrijedi za slučaj bušenja bez i uz pomoć vibracija.

U usporedbi s bušenjem bez vibracija bušenje uz pomoć vibracija može povećati maksimalne vrijednosti aksijalne sile, što negativno djeluje na opterećenje svrdla. To je posebno izraženo povećanjem amplitude vibracija. Nasuprot tome, mikrobušenje potpomognuto vibracijama omogućava smanjenje momenta bušenja stvaranjem manjih odvojenih čestica. Utvrđeno je kako je pouzdano bušenje potpomognuto vibracijama svrdlima promjera 0,5 mm moguće kod vibracija s amplitudama ispod 0,01 mm. Također je utvrđeno kako je za bušenje pri učestalosti vrtnje n od 6000 do 18000 optimalni raspon omjera frekvencije vrtnje i frekvencije vibracija r_f između 0,5 i 1,5.

U usporedbi s konvencionalnim dubokim mikrobušenjem kod bušenja potpomognutoga vibracijama zabilježeno je prosječno povećanje vijeka trajanja svrdla kod većih vrijednosti posmaka i koraka bušenja s periodičkim izvlačenjem svrdla, tj. pri parametrima koji pružaju kraće vrijeme obrade i veću proizvodnost procesa.

Ovaj rad i prezentirani model dubokoga mikrobušenja potpomognutog vibracijama predstavlja temeljne smjernice za daljnje istraživanje, koje bi obuhvaćalo ispitivanje mikrobušenja u drugim materijalima osim aluminijske legure, ispitivanje bušenja različitim promjerima svrdala za različite dubine provrta. Uslijed stohastičke prirode procesa i utjecaja različitih čimbenika i time varijabli procesa, preporuča se korištenje naprednih metoda umjetne inteligencije, primjerice neuronskih mreža te istraživanje u smjeru razvoja adaptivnog upravljanja procesom mikrobušenja.

- [1] T. Masuzawa, »State of the art of micromachining,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 49, pp. 473-488, 2000.
- [2] D. Allen, H. Almond i P. Logan, »A technical comparison of micro-electrodischarge machining, microdrilling and copper vapour laser machining for the fabrication of ink jet nozzles,« u *Proc. SPIE*, 2000.
- [3] M. Imran, P. T. Mativenga, A. Gholinia i P. J. Withers, »Comparison of tool wear mechanisms and surface integrity for dry and wet micro-drilling of nickel-base superalloys,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 76, pp. 49-60, 2014.
- [4] M. Hasan, J. Zhao i Z. Jiang, »A review of modern advancements in micro drilling techniques,« *Journal of Manufacturing Processes*, svez. 29, pp. 343-375, 2017.
- [5] M. Imran, P. T. Mativenga, A. Gholinia i P. J. Withers, »Assessment of surface integrity of Ni superalloy after electrical-discharge, laser and mechanical micro-drilling processes,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 79, pp. 1303-1311, 2015.
- [6] M. Imran, P. T. Mativenga, S. Kannan i D. Novovic, »An experimental investigation of deep-hole microdrilling capability for a nickel-based superalloy,« *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, svez. 222, pp. 1589-1596, 2008.
- [7] L. A. Kudla, »Fracture phenomena of microdrills in static and dynamic conditions,« *Engineering fracture mechanics*, svez. 78, pp. 1-12, 2011.
- [8] B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A. E. Tekkaya, R. Neugebauer i D. McIntosh, »Hybrid processes in manufacturing,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 63, pp. 561-583, 2014.
- [9] Z. Yang, Q. Tan i L. Wang, »Principle of precision micro-drilling with axial vibration of low frequency,« *International journal of production research*, svez. 40, pp. 1421-1427, 2002.

- [10] Y. Nanbu, »High-Aspect-Ratio Microdrilling Assisted by Low-Frequency Vibration-Optimum Vibration Conditions,« *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, svez. 78, p. 155, 2012.
- [11] J. B. Mann, Y. Guo, C. Saldana, W. D. Compton i S. Chandrasekar, »Enhancing material removal processes using modulation-assisted machining,« *Tribology International*, svez. 44, pp. 1225-1235, 2011.
- [12] Q. Hong, L. Z. Gu i C. J. Xiang, »Research Progress of Low-frequency Vibration Cutting and Its Development Tendency,« u *Applied Mechanics and Materials*, 2010.
- [13] E. J. A. Armarego, »Some fundamental and practical aspects of twist drills and drilling,« *Journal of materials processing technology*, svez. 44, pp. 189-198, 1994.
- [14] B. Boswell, M. N. Islam i I. J. Davies, »A review of micro-mechanical cutting,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-18, 2017.
- [15] W. S. Chen i K. F. Ehmann, »Experimental investigation on the wear and performance of micro-drills,« u *Proceedings of the 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 1994.
- [16] H. C. Chyan i K. F. Ehmann, »Development of curved helical micro-drill point technology for micro-hole drilling,« *Mechatronics*, svez. 8, pp. 337-358, 1998.
- [17] H. C. Chyan i K. C. Ehmann, »Curved helical drill points for microhole drilling,« *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, svez. 216, pp. 61-75, 2002.
- [18] M. S. Cheong, D.-W. Cho i K. F. Ehmann, »Identification and control for micro-drilling productivity enhancement,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 39, pp. 1539-1561, 1999.
- [19] L. Kudla, »Prevention against breakage of miniature drills,« *Periodica Polytechnica. Engineering. Mechanical Engineering*, svez. 50, p. 77, 2006.
- [20] L. A. Kudla, »Deformations and strength of miniature drills,« *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, svez. 220, pp. 389-396, 2006.
- [21] L. Kudla, »Influence of feed motion features on small holes drilling process,« *Journal of Materials Processing Technology*, svez. 109, pp. 236-241, 2001.
- [22] I. N. Tansel, »Monitoring micro-drilling operations using neural networks,« u *Key*

- Engineering Materials*, 1998.
- [23] A. Guo, S. Batzer i J. Roth, »Time and frequency domain investigation of the static and dynamic characteristics of micro-drilling,« u *Proceedings of ASME IMECE International Mechanical Engineering Congress and Expo, Washington, DC, USA*, 2003.
 - [24] E. Kondo, R. Kamo i H. Murakami, »Monitoring of burr and prefailure phase caused by tool wear in micro-drilling operations using thrust force signals,« *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, svez. 6, pp. 885-897, 2012.
 - [25] E. Kondo i K. Shimana, »Monitoring of prefailure phase and detection of tool breakage in micro-drilling operations,« *Procedia CIRP*, svez. 1, pp. 581-586, 2012.
 - [26] T. Szalay, K. Patra i B. Z. Farkas, »Experimental Investigation of Tool Breakage in Micro Drilling of EN AW-5083 Aluminium,« u *Key Engineering Materials*, 2014.
 - [27] G. Hemanth, G. L. Samuel i N. J. Vasa, »Influence of machining parameters on microdrill performance,« *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, svez. 22, pp. 124-144, 2011.
 - [28] X. H. Zheng, Z. Q. Liu, Q. L. An, M. Chen i C. Y. Wang, »Experimental research on the high speed drilling of PCB using microdrill,« u *Advanced Materials Research*, 2012.
 - [29] F. Klocke, K. Gerschwiler i M. Abouridouane, »Size effects of micro drilling in steel,« *Production Engineering*, svez. 3, pp. 69-72, 2009.
 - [30] M. Percin, K. Aslantas, I. Ucun, Y. Kaynak i A. Cicek, »Micro-drilling of Ti-6Al-4V alloy: The effects of cooling/lubricating,« *Precision Engineering*, svez. 45, pp. 450-462, 2016.
 - [31] Z. F. Liu i T. Guo, »Experimental Study on Ultrasonic Vibration Drilling of Stainless Steel 0Cr17Ni4Cu4Nb Micro-Deep-Hole,« u *Applied Mechanics and Materials*, 2014.
 - [32] K. Iwata, T. Moriwaki i T. Hoshi, »Basic study of high speed micro deep drilling,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 30, pp. 27-30, 1981.
 - [33] D. Biermann i M. Kirschner, »Experimental investigations on single-lip deep hole drilling of superalloy Inconel 718 with small diameters,« *Journal of Manufacturing Processes*, svez. 20, pp. 332-339, 2015.
 - [34] R. Heinemann, S. Hinduja, G. Barrow i G. Petuelli, »The performance of small

- diameter twist drills in deep-hole drilling,« *Journal of manufacturing science and engineering*, svez. 128, pp. 884-892, 2006.
- [35] Y. Nambu, K. Ochiai, K. Horio, J. Kaneko, T. Watanabe i S. Matsuda, »Attempt to increase step feed by adding ultrasonic vibrations in micro deep drilling,« *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, svez. 5, pp. 129-138, 2011.
- [36] Y. Nambu, K. Ochiai, K. Horio, J. Kaneko, T. Watanabe i S. Matsuda, »High-Aspect-Ratio Microdrilling Assisted by Ultrasonic Vibration-High-Aspect-Ratio Microdrilling of Fuel Injection Nozzle,« *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, svez. 77, pp. 306-310, 2011.
- [37] D. W. Kim, Y. S. Lee, M. S. Park i C. N. Chu, »Tool life improvement by peck drilling and thrust force monitoring during deep-micro-hole drilling of steel,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 49, pp. 246-255, 2009.
- [38] M. C. Shaw i J. O. Cookson, *Metal cutting principles*, svez. 2, Oxford university press New York, 2005.
- [39] H. K. Tönshoff, W. Spintig, W. König i A. Neises, »Machining of holes developments in drilling technology,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 43, pp. 551-561, 1994.
- [40] J. Audy, »A study of computer-assisted analysis of effects of drill geometry and surface coating on forces and power in drilling,« *Journal of Materials Processing Technology*, svez. 204, pp. 130-138, 2008.
- [41] Y. Gong i K. F. Ehmann, »Mechanistic model for dynamic forces in micro-drilling,« u *2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2001.
- [42] Y. Gong, K. F. Ehmann i C. Lin, »Analysis of dynamic characteristics of micro-drills,« *Journal of Materials Processing Technology*, svez. 141, pp. 16-28, 2003.
- [43] Z.-j. Yang, Y.-h. Chen i Y.-h. Yang, »Study on the life distribution of microdrills,« *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, svez. 216, pp. 301-305, 2002.
- [44] Y. Gong, C. Lin i K. F. Ehmann, »Dynamics of initial penetration in drilling: part 1-mechanistic model for dynamic forces,« *Transactions of the ASME-B-Journal of Manufacturing Science and Engineering*, svez. 127, pp. 280-288, 2005.
- [45] B.-W. Huang, »The drilling vibration behavior of a twisted microdrill,« *Transactions of the ASME-B-Journal of Manufacturing Science and Engineering*, svez. 126, pp. 719-

- 726, 2004.
- [46] K. Lee i D. A. Dornfeld, »Micro-burr formation and minimization through process control,« *Precision Engineering*, svez. 29, pp. 246-252, 2005.
 - [47] W.-R. Chen, »Parametric studies on buckling loads and critical speeds of microdrill bits,« *International journal of mechanical sciences*, svez. 49, pp. 935-949, 2007.
 - [48] I. Rahamathullah i M. S. Shunmugam, »Analyses of forces and hole quality in micro-drilling of carbon fabric laminate composites,« *Journal of Composite Materials*, svez. 47, pp. 1129-1140, 2013.
 - [49] D.-W. Kim, M.-W. Cho, T.-I. Seo i E.-S. Lee, »Application of design of experiment method for thrust force minimization in step-feed micro drilling,« *Sensors*, svez. 8, pp. 211-221, 2008.
 - [50] D.-Y. Chang i S.-Y. Lin, »Tool wear, hole characteristics, and manufacturing tolerance in alumina ceramic microdrilling process,« *Materials and Manufacturing Processes*, svez. 27, pp. 306-313, 2012.
 - [51] H. Shi, H. Shi, X. Lin, X. Lin, Y. Wang i Y. Wang, »Characterization of drill bit breakage in PCB drilling process based on high-speed video analysis,« *Circuit World*, svez. 43, pp. 89-96, 2017.
 - [52] L. J. Zheng, C. Y. Wang, Y. P. Qu, Y. X. Song i L. Y. Fu, »Interaction of cemented carbide micro-drills and printed circuit boards during micro-drilling,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 77, pp. 1305-1314, 2015.
 - [53] L. Fu, J. Qu i H. Chen, »Mechanical drilling of printed circuit boards: the state-of-the-art,« *Circuit World*, svez. 33, pp. 3-8, 2007.
 - [54] Y. Zhuang i others, »Optimizing the economic efficiency by micro-drill life improvement during deep-hole drilling in the 212-Valve manufacturing process,« 2013.
 - [55] X. Liu, R. E. DeVor, S. G. Kapoor i K. F. Ehmann, »The mechanics of machining at the microscale: assessment of the current state of the science,« *Journal of manufacturing science and engineering*, svez. 126, pp. 666-678, 2004.
 - [56] J. Chae, S. S. Park i T. Freiheit, »Investigation of micro-cutting operations,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 46, pp. 313-332, 2006.
 - [57] F. Vollertsen, D. Biermann, H. N. Hansen, I. S. Jawahir i K. Kuzman, »Size effects in manufacturing of metallic components,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*,

- svez. 58, pp. 566-587, 2009.
- [58] D. Dornfeld, S. Min i Y. Takeuchi, »Recent advances in mechanical micromachining,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 55, pp. 745-768, 2006.
 - [59] M. E. Merchant, »Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip,« *Journal of applied physics*, svez. 16, pp. 267-275, 1945.
 - [60] K. S. Woon, M. Rahman, F. Z. Fang, K. S. Neo i K. Liu, »Investigations of tool edge radius effect in micromachining: a FEM simulation approach,« *Journal of Materials Processing Technology*, svez. 195, pp. 204-211, 2008.
 - [61] D. A. Lucca, R. L. Rhorer i R. Komanduri, »Energy dissipation in the ultraprecision machining of copper,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 40, pp. 69-72, 1991.
 - [62] J.-D. Kim i D. S. Kim, »Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultra-precision machining,« *Journal of Materials Processing Technology*, svez. 49, pp. 387-398, 1995.
 - [63] R. S. Anand, K. Patra i M. Steiner, »Size effects in micro drilling of carbon fiber reinforced plastic composite,« *Production Engineering*, svez. 8, pp. 301-307, 2014.
 - [64] R. S. Anand i K. Patra, »Extracting specific cutting force coefficients in micro drilling with tool edge radius effects,« u *Applied Mechanics and Materials*, 2015.
 - [65] R. S. Anand i K. Patra, »Cutting force and hole quality analysis in micro-drilling of CFRP,« *Materials and Manufacturing Processes*, pp. 1-9, 2017.
 - [66] X. Liu, R. E. DeVor i S. G. Kapoor, »An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micromachining,« *Journal of manufacturing science and engineering*, svez. 128, pp. 474-481, 2006.
 - [67] M. Pirtini i I. Lazoglu, »Forces and hole quality in drilling,« *International journal of machine tools and Manufacture*, svez. 45, pp. 1271-1281, 2005.
 - [68] Z. Katz i A. Poustie, »On the hole quality and drill wandering relationship,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 17, pp. 233-237, 2001.
 - [69] Z.-j. Yang, Q. Tan i E. Shiju, »On-line monitoring of drilling torques of microdrills,« *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, svez. 218, pp. 1735-1740, 2004.

- [70] W. H. Kao, Y. L. Su, S. H. Yao, H. C. Huang i M. S. Chen, »The study of high speed micro-drilling performance and machining quality of coated micro-drills with Zr-C: H coatings,« u *Advanced Materials Research*, 2012.
- [71] R. K. Heinemann, »The effect of starting hole geometry on borehole quality and tool life of twist drills,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 60, pp. 519-526, 2012.
- [72] R. Heinemann, S. Hinduja, G. Barrow i G. Petuelli, »Effect of MQL on the tool life of small twist drills in deep-hole drilling,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 46, pp. 1-6, 2006.
- [73] M. Elhachimi, S. Torbaty i P. Joyot, »Mechanical modelling of high speed drilling. 1: predicting torque and thrust,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 39, pp. 553-568, 1999.
- [74] S. S. F. Chang i G. M. Bone, »Thrust force model for vibration-assisted drilling of aluminum 6061-T6,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 49, pp. 1070-1076, 2009.
- [75] R. S. Anand, K. Patra, M. Steiner i D. Biermann, »Mechanistic modeling of micro-drilling cutting forces,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 88, pp. 241-254, 2017.
- [76] J. C. Roukema i Y. Altintas, »Kinematic model of dynamic drilling process,« u *ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2004.
- [77] J. C. Roukema i Y. Altintas, »Time domain simulation of torsional--axial vibrations in drilling,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 46, pp. 2073-2085, 2006.
- [78] J. C. Roukema i Y. Altintas, »Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 47, pp. 1455-1473, 2007.
- [79] J. C. Roukema i Y. Altintas, »Generalized modeling of drilling vibrations. Part II: Chatter stability in frequency domain,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 47, pp. 1474-1485, 2007.
- [80] H. Zhang, X. Wang i S. Pang, »A mathematical modeling to predict the cutting forces in microdrilling,« *Mathematical Problems in Engineering*, svez. 2014, 2014.
- [81] K. Sambhav, P. Tandon, S. G. Kapoor i S. G. Dhande, »Mathematical modeling of

- cutting forces in microdrilling,« *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, svez. 135, p. 014501, 2013.
- [82] D. Zhang i L. Wang, »Investigation of chip in vibration drilling,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 38, pp. 165-176, 1998.
- [83] L. P. Wang, L. J. Wang, Y. H. He i Z. J. Yang, »Prediction and computer simulation of dynamic thrust and torque in vibration drilling,« *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, svez. 212, pp. 489-497, 1998.
- [84] H. G. Toews, W. D. Compton i S. Chandrasekar, »A study of the influence of superimposed low-frequency modulation on the drilling process,« *Precision engineering*, svez. 22, pp. 1-9, 1998.
- [85] L.-B. Zhang, L.-J. Wang, X.-Y. Liu, H.-W. Zhao, X. Wang i H.-Y. Luo, »Mechanical model for predicting thrust and torque in vibration drilling fibre-reinforced composite materials,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 41, pp. 641-657, 2001.
- [86] P. N. Chhabra, B. Ackroyd, W. D. Compton i S. Chandrasekar, »Low-frequency modulation-assisted drilling using linear drives,« *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, svez. 216, pp. 321-330, 2002.
- [87] L. Zhang, L. Wang i X. Wang, »Study on vibration drilling of fiber reinforced plastics with hybrid variation parameters method,« *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, svez. 34, pp. 237-244, 2003.
- [88] J. Ramkumar, S. Aravindan, S. K. Malhotra i R. Krishnamurthy, »An enhancement of the machining performance of GFRP by oscillatory assisted drilling,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 23, pp. 240-244, 2004.
- [89] J. Ramkumar, S. K. Malhotra i R. Krishnamurthy, »Effect of workpiece vibration on drilling of GFRP laminates,« *Journal of Materials Processing Technology*, svez. 152, pp. 329-332, 2004.
- [90] L.-J. Wang, X. Wang i H.-F. Zhao, »Effect of the cutting ratio on cutting forces and the drill life in vibration drilling,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 24, pp. 865-872, 2004.
- [91] H. Paris, S. Tichkiewitch i G. Peigne, »Modelling the vibratory drilling process to

- foresee cutting parameters,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 54, pp. 367-370, 2005.
- [92] S. Arul, L. Vijayaraghavan, S. K. Malhotra i R. Krishnamurthy, »The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 46, pp. 252-259, 2006.
- [93] G. F. Moraru, »Nonlinear dynamics in drilling and boring operations assisted by low frequency vibration,« u *Proceedings of ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences \& Computers and Information in Engineering Conference*, 2007.
- [94] L. J. Ma, X. B. Wang, G. J. Liu, X. Q. Chen i J. X. Du, »Study on torsional vibration performance of twist drill in axial vibration drilling,« u *Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2009. ICMTMA'09. International Conference on*, 2009.
- [95] K. Okamura, H. Sasahara, T. Segawa i M. Tsutsumi, »Low-frequency vibration drilling of titanium alloy,« *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, svez. 49, pp. 76-82, 2006.
- [96] L. J. Ma, X. B. Wang, G. J. Liu, X. Q. Chen i S. F. Fu, »Failure Mechanism of Twist Drill in Vibration Drilling of Duralumin,« u *Advanced Materials Research*, 2010.
- [97] J. S. Zhou, B. Y. Ye i X. Y. Lai, »A Study on Chip Breakage in Mini-Pore Vibration Drilling for Hard-to-Cut Material of Austenitic Stainless Steel,« u *Key Engineering Materials*, 2011.
- [98] L. J. Ma, X. B. Wang, G. J. Liu i Q. Feng, »Prediction of Chip Dimension of Separate Type Vibration Drilling,« u *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference on*, 2011.
- [99] H. F. Shi i R. Z. Yang, »Study on the Temperature of Workpiece in Low-Frequency Vibration Drilling,« u *Advanced Materials Research*, 2013.
- [100] O. Pecat i I. Meyer, »Low frequency vibration assisted drilling of aluminium alloys,« u *Advanced Materials Research*, 2013.
- [101] O. Pecat i E. Brinksmeier, »Tool wear analyses in low frequency vibration assisted drilling of CFRP/Ti6Al4V stack material,« *Procedia CIRP*, svez. 14, pp. 142-147, 2014.
- [102] O. Pecat i E. Brinksmeier, »Low damage drilling of CFRP/titanium compound materials for fastening,« *Procedia CIRP*, svez. 13, pp. 1-7, 2014.

- [103] R. S. Joshi i H. Singh, »An investigation on flank wear mechanism of tungsten carbide drills during conventional and modulation assisted drilling,« *Machining Science and Technology*, svez. 18, pp. 99-119, 2014.
- [104] A. Sadek, M. Meshreki i M. H. Attia, »Effect of tool kinematics on the drilling forces and temperature in low frequency high amplitude vibration assisted drilling,« u *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2014.
- [105] E. Brinksmeier, O. Pecht i R. Rentsch, »Quantitative analysis of chip extraction in drilling of Ti 6 Al 4 V,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 64, pp. 93-96, 2015.
- [106] X. Lai, C. Yan, C. Zhan, B. Ye i W. Li, »Machining parameters optimization on micro hole vibration drilling using grey system theory,« u *Mechatronics and Automation (ICMA), 2015 IEEE International Conference on*, 2015.
- [107] M. LADONNE, O. CAHUC, J. Y. K'NEVEZ, Y. LANDON i M. CHERIF, »DYNAMIC MODELLING OF VIBRATIONS ASSISTED DRILLING«.
- [108] Y. Guo i J. B. Mann, »Experimental Evaluation of Cutting Kinematics and Chip Evacuation in Drilling With Low-Frequency Modulation-Assisted Machining,« u *ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing*, 2017.
- [109] Y. Guo, S. E. Lee i J. B. Mann, »Piezo-Actuated Modulation-Assisted Drilling System With Integrated Force Sensing,« *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, svez. 139, p. 014501, 2017.
- [110] K. Debnath i I. Singh, »Low-frequency modulation-assisted drilling of carbon-epoxy composite laminates,« *Journal of Manufacturing Processes*, svez. 25, pp. 262-273, 2017.
- [111] C. Kuo, C. Wang i M. Liu, »Interpretation of force signals into mechanical effects in vibration-assisted drilling of carbon fibre reinforced plastic (CFRP)/aluminium stack materials,« *Composite Structures*, svez. 179, pp. 444-458, 2017.
- [112] K. Okamura i H. Sasahara, »Prediction of drilling temperature during low-frequency vibration drilling of titanium alloy,« *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, svez. 11, pp. JAMDSM0036--JAMDSM0036, 2017.

- [113] Z. Yang, W. Li, Y. Chen i L. Wang, »Study for increasing micro-drill reliability by vibrating drilling,« *Reliability engineering \& system safety*, svez. 61, pp. 229-233, 1998.
- [114] H. Kubota, »Improvement of drilling performance by vibratory cutting,« *Journal for Manufacturing Science and Production*, svez. 2, pp. 117-124, 1999.
- [115] L. Kiesewetter i M. G. Rothenburg, »Schwingungsunterstütztes Mikrobohren,« *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, svez. 98, pp. 46-49, 2003.
- [116] Z. J. Li, M. S. Hong, H. Su i Y. L. Wei, »Machining accuracy analysis for step multi-element varying-parameter vibration drilling of laminated composite materials,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 21, pp. 760-768, 2003.
- [117] X. Wang, L. J. Wang i J. P. Tao, »Investigation on thrust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics,« *Journal of Materials Processing Technology*, svez. 148, pp. 239-244, 2004.
- [118] S. M. Bhatia, P. C. Pandey i H. S. Shan, »The thermal condition of the tool cutting edge in intermittent cutting,« *Wear*, svez. 61, pp. 21-30, 1980.
- [119] Z. Palmi, »Cutting temperature in intermittent cutting,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 27, pp. 261-274, 1987.
- [120] D. E. Brehl i T. A. Dow, »Review of vibration-assisted machining,« *Precision engineering*, svez. 32, pp. 153-172, 2008.
- [121] A. Sadek, M. H. Attia, M. Meshreki i B. Shi, »Characterization and optimization of vibration-assisted drilling of fibre reinforced epoxy laminates,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 62, pp. 91-94, 2013.
- [122] P. N. H. Thomas i V. I. Babitsky, »Experiments and simulations on ultrasonically assisted drilling,« *Journal of Sound and Vibration*, svez. 308, pp. 815-830, 2007.
- [123] S. S. F. Chang i G. M. Bone, »Burr size reduction in drilling by ultrasonic assistance,« *Robotics and computer-integrated manufacturing*, svez. 21, pp. 442-450, 2005.
- [124] S. S. F. Chang i G. M. Bone, »Burr height model for vibration assisted drilling of aluminum 6061-T6,« *Precision Engineering*, svez. 34, pp. 369-375, 2010.
- [125] B. Azarhoushang i J. Akbari, »Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 47, pp. 1027-1033,

- 2007.
- [126] U. Heisel, J. Wallaschek, R. Eisseler i C. Potthast, »Ultrasonic deep hole drilling in electrolytic copper ECu 57,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 57, pp. 53-56, 2008.
 - [127] J. Pujana, A. Rivero, A. Celaya i L. N. L. Lacalle, »Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 49, pp. 500-508, 2009.
 - [128] B. V. Azghandi, M. A. Kadivar i M. R. Razfar, »An Experimental Study on Cutting Forces in Ultrasonic Assisted Drilling,« *Procedia CIRP*, svez. 46, pp. 563-566, 2016.
 - [129] K. Alam, A. V. Mitrofanov i V. V. Silberschmidt, »Experimental investigations of forces and torque in conventional and ultrasonically-assisted drilling of cortical bone,« *Medical engineering & physics*, svez. 33, pp. 234-239, 2011.
 - [130] Y. S. Liao, Y. C. Chen i H. M. Lin, »Feasibility study of the ultrasonic vibration assisted drilling of Inconel superalloy,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 47, pp. 1988-1996, 2007.
 - [131] F. Makhdum, L. T. Jennings, A. Roy i V. V. Silberschmidt, »Cutting forces in ultrasonically assisted drilling of carbon fibre-reinforced plastics,« u *Journal of Physics: Conference Series*, 2012.
 - [132] R. Neugebauer i A. Stoll, »Ultrasonic application in drilling,« *Journal of materials processing technology*, svez. 149, pp. 633-639, 2004.
 - [133] V. I. Babitsky, V. K. Astashev i A. Meadows, »Vibration excitation and energy transfer during ultrasonically assisted drilling,« *Journal of Sound and Vibration*, svez. 308, pp. 805-814, 2007.
 - [134] Z. Zhang i V. I. Babitsky, »Finite element modeling of a micro-drill and experiments on high speed ultrasonically assisted micro-drilling,« *Journal of Sound and Vibration*, svez. 330, pp. 2124-2137, 2011.
 - [135] G.-L. Chern i H.-J. Lee, »Using workpiece vibration cutting for micro-drilling,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 27, pp. 688-692, 2006.
 - [136] S. A. Batzer, A. M. Gouskov i S. A. Voronov, »Modeling vibratory drilling dynamics,« *Journal of vibration and acoustics*, svez. 123, pp. 435-443, 2001.

- [137] J. Jallageas, J.-Y. K'nevez, M. Chérif i O. Cahuc, »Modeling and optimization of vibration-assisted drilling on positive feed drilling unit,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-12, 2013.
- [138] N. Guibert i H. Paris, »Influence of the ploughing effect on the vibratory drilling behaviour,« *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, svez. 3, pp. 34-51, 2008.
- [139] H. Paris, D. Brissaud, A. Gousskov, N. Guibert i J. Rech, »Influence of the ploughing effect on the dynamic behaviour of the self-vibratory drilling head,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 57, pp. 385-388, 2008.
- [140] M. Ukrainczyk, »Design of Experiments in Industry,« *Hrvatski glasopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam*, svez. 5, pp. 96-105, 2010.
- [141] J. B. Mann, C. J. Saldana, Y. Guo, H. Yeung, W. D. Compton i S. Chandrasekar, »Effects of controlled modulation on surface textures in deep-hole drilling,« *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, svez. 6, pp. 24-32, 2012.
- [142] J. B. Mann, Y. Guo, C. Saldana, H. Yeung, W. D. Compton i S. Chandrasekar, »Modulation-assisted machining: a new paradigm in material removal processes,« u *Advanced Materials Research*, 2011.
- [143] N. Guibert, H. Paris, J. Rech i C. Claudin, »Identification of thrust force models for vibratory drilling,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 49, pp. 730-738, 2009.
- [144] H. Watanabe, H. Tsuzaka i M. Masuda, »Microdrilling for printed circuit boards (PCBs)_influence of radial run-out of microdrills on hole quality,« *Precision Engineering*, svez. 32, pp. 329-335, 2008.
- [145] C. Nath i M. Rahman, »Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 48, pp. 965-974, 2008.
- [146] R. Kountanya, »Cutting tool temperatures in interrupted cutting_the effect of feed-direction modulation,« *Journal of Manufacturing Processes*, svez. 10, pp. 47-55, 2008.
- [147] R. Heinemann, S. Hinduja i G. Barrow, »Use of process signals for tool wear progression sensing in drilling small deep holes,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 33, pp. 243-250, 2007.
- [148] T. Arvajah i F. Ismail, »Machining stability in high-speed drilling_part 1: modeling vibration stability in bending,« *International Journal of Machine Tools and*

- Manufacture*, svez. 46, pp. 1563-1572, 2006.
- [149] T. Arvajah i F. Ismail, »Machining stability in high speed drilling_part 2: time domain simulation of a bending--torsional model and experimental validations,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 46, pp. 1573-1581, 2006.
- [150] P. Yongchen, T. Qingchang i Y. Zhaojun, »A study of dynamic stresses in micro-drills under high-speed machining,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 46, pp. 1892-1900, 2006.
- [151] Y. Gong, C. Lin i K. F. Ehmann, »Dynamics of initial penetration in drilling: part 2-motion models for drill skidding and wandering with experimental verification,« *Transactions of the ASME-B-Journal of Manufacturing Science and Engineering*, svez. 127, pp. 289-297, 2005.
- [152] A. Langella, L. Nele i A. Maio, »A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials,« *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, svez. 36, pp. 83-93, 2005.
- [153] J. A. Yang, V. Jaganathan i R. Du, »A new dynamic model for drilling and reaming processes,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 42, pp. 299-311, 2002.
- [154] E. O. Ezugwu i C. I. Okeke, »Tool life and wear mechanisms of TiN coated tools in an intermittent cutting operation,« *Journal of Materials Processing Technology*, svez. 116, pp. 10-15, 2001.
- [155] M. Elhachimi, S. Torbaty i P. Joyot, »Mechanical modelling of high speed drilling. 2: predicted and experimental results,« *International Journal of machine tools and Manufacture*, svez. 39, pp. 569-581, 1999.
- [156] S. A. Basile, »Modeling transverse motions of a drill bit for process understanding,« *Precision engineering*, svez. 15, pp. 258-265, 1993.
- [157] S. Kaldor i S. Malkin, »A common denominator for optimal cutting tool geometry,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 35, pp. 41-44, 1986.
- [158] A. R. Watson, »Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. I_initial cutting lip model,« *International Journal of Machine Tool Design and Research*, svez. 25, pp. 347-365, 1985.
- [159] S. Kaldor i E. Lenz, »Drill point geometry and optimization,« *Journal of Engineering for Industry*, svez. 104, pp. 84-90, 1982.

- [160] J. Kaminski i R. Crafoord, »Positional accuracy of holes when drilling in inclined workpiece surfaces Part 1: experimental results,« *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, svez. 208, pp. 129-139, 1994.
- [161] A. Feifer, »Drilling micro-size deep holes,« *Tool. Prod.*, svez. 55, pp. 58-60, 1989.
- [162] E. Bagci i B. Ozcelik, »Investigation of the effect of drilling conditions on the twist drill temperature during step-by-step and continuous dry drilling,« *Materials & design*, svez. 27, pp. 446-454, 2006.
- [163] E. Shamoto i T. Moriwaki, »Study on elliptical vibration cutting,« *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, svez. 43, pp. 35-38, 1994.
- [164] R. K. Mittal, S. Yadav i R. K. Singh, »Mechanistic Force and Burr Modeling in High-speed Microdrilling of Ti6Al4V,« *Procedia CIRP*, svez. 58, pp. 329-334, 2017.
- [165] K. Patra, A. K. Jha, T. Szalay, J. Ranjan i L. Monostori, »Artificial neural network based tool condition monitoring in micro mechanical peck drilling using thrust force signals,« *Precision Engineering*, svez. 48, pp. 279-291, 2017.
- [166] I. Rahamathullah i M. S. Shunmugam, »Mechanistic approach for prediction of forces in micro-drilling of plain and glass-reinforced epoxy sheets,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 75, pp. 1177-1187, 2014.
- [167] L. Zheng, C. Wang, L. Yang, Y. Song i L. Fu, »Characteristics of chip formation in the micro-drilling of multi-material sheets,« *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, svez. 52, pp. 40-49, 2012.
- [168] X. H. Suganthi, U. Natarajan i N. Ramasubbu, »A review of accuracy enhancement in microdrilling operations,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 81, pp. 199-217, 2015.
- [169] L. Fu, X. Li i Q. Guo, »Development of a micro drill bit with a high aspect ratio,« *Circuit World*, svez. 36, pp. 30-34, 2010.
- [170] K. Patra, R. S. Anand, M. Steiner i D. Biermann, »Experimental analysis of cutting forces in microdrilling of austenitic stainless steel (X5CrNi18-10),« *Materials and Manufacturing Processes*, svez. 30, pp. 248-255, 2015.
- [171] A. A. Rahman, A. Mamat i A. Wagiman, »Effect of machining parameters on hole quality of micro drilling for brass,« *Modern applied science*, svez. 3, p. 221, 2009.

- [172] M. Imran, P. T. Mativenga i P. J. Withers, »Assessment of machining performance using the wear map approach in micro-drilling,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 59, pp. 119-126, 2012.
- [173] I. Pavlić, »Statistička teorija i primjena. Tehnička knjiga. Zagreb,« 1971.
- [174] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers i K. Ye, Probability and statistics for engineers and scientists, svez. 5, Macmillan New York, 1993.

Rajko Todić rođen je 4. svibnja 1977. godine u Šibeniku, gdje je završio osnovnoškolsko obrazovanje i potom Gimnaziju Antuna Vrančića, prirodoslovno-matematički smjer. Godine 1995. upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (FSB), studij strojarstva, konstrukcijski smjer. Diplomirao je u ožujku 2002. godine na usmjerenju *Strojarske konstrukcije*, s temom diplomskog rada *Sustav za upravljanje parametrima konstrukcije pri timskom radu*.

U listopadu 2002. godine upisuje poslijediplomski studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, smjer *Teorija konstrukcija*. Iste se godine zapošljava u svojstvu znanstvenog novaka na Katedri za konstruiranje i razvoj proizvoda, Zavoda za konstruiranje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Aktivno sudjeluje u izvođenju vježbi iz kolegija *Znanost o konstruiranju*, *Konstruiranje pomoću računala* i *Uvod u računala*. Također sudjeluje u izvođenju vježbi *Tehničko crtanje i dokumentacija* i *Uvod u uredsko poslovanje* na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu.

2004. godine zapošljava se kao konstruktor u tvrtki HSTec d.d. Zadar. Iste godine mijenja smjer poslijediplomskog studija na smjer *Strojarske tehnologije* te sudjeluje u izvođenju vježbi iz kolegija *Fleksibilni obradni sustavi* na Veleučilištu u Karlovcu. 2008. godine zapošljava se u tvrtki ZM-Vikom d.o.o. Šibenik kao voditelj projekta, 2009. godine polaže stručni ispit pri Ministarstvu graditeljstva i prostornog uređenja, a 2013. godine završava tečaj za međunarodnog inženjera za zavarivanje (IWE/EWE) pri Hrvatskom društvu za tehniku zavarivanja. 2014. godine ponovno se zapošljava u tvrtki HSTec d.d. Zadar kao projektant.

Tijekom poslijediplomskog studija sudjeluje u nekoliko znanstvenih i tehnologijskih projekata financiranih od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta. Bavi se istraživanjima na području proizvodnog inženjerstva, a do sada je kao autor ili koautor objavio 5 znanstvenih radova

Govori i piše engleskim jezikom, a služi se njemačkim jezikom. Oženjen je i otac dvoje djece.