

Utjecaj trošenja alata i parametara obrade na raslojavanje pri bušenju kompozitnih materijala

Bartolin, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:310925>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-26**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Bartolin

Zagreb, 2015 godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Toma Udiljak, dipl. ing.

Student:

Ivan Bartolin

Zagreb, 2015 godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Tomi Udiljaku na podršci i korisnim savjetima pruženim tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem dr. sc. Tomislavu Staroveškom na vremenu, podršci, ustupljenom znanju i strpljenju bez kojih bi izrada ovog rada ne bi bila moguća.

Zahvaljujem dr. sc. Zoranu Domitranu na ustupljenim uzorcima za potrebe ispitivanja i pomoći pri obradi podataka.

Na kraju zahvaljujem svojoj obitelji na neizmjerne i bezuvjetnoj podršci tijekom studija i omogućavanju završavanja istog.

Ivan Bartolin



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Bartolin** Mat. br.: 0035175426

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ TROŠENJA ALATA I PARAMETARA OBRADE NA RASLOJAVANJE PRI BUŠENJU KOMPOZITNIH MATERIJALA**
Naslov rada na engleskom jeziku: **INFLUENCE OF TOOL WEAR AND CUTTING PARAMETERS ON DELAMINATION AT DRILLING OF COMPOSITE MATERIALS**
Opis zadatka:

Suvremeni trendovi u avionskoj, brodograđevnoj i auto industriji ukazuju na sve veću primjenu kompozitnih materijala za izradu konstrukcijskih dijelova. Istovremeno je važno naglasiti da je pri tome bušenje jedna od najvažnijih i najzastupljenijih operacija obrade odvajanjem. Ključni problem kod bušenja kompozitnih materijala je pojava raslojavanja, koja većim dijelom ovisi o geometriji reznog alata, parametrima obrade i stupnju istrošenosti reznog alata. Raslojavanje smanjuje mehanička svojstva materijala u zoni obrade, a dugoročno može nepovoljno utjecati na trajnost i krutost obrađene pozicije.

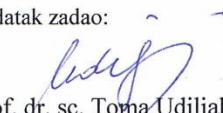
U radu je potrebno istražiti utjecaj stupnja istrošenosti i parametara obrade (posmaka i brzine rezanja) na raslojavanje polimernih priprema ojačanih staklenim vlaknima. Pri tome je potrebno koristiti svrdla jednake geometrije istupljena na četiri različita stupnja istrošenosti, a za svaki stupanj istrošenosti potrebno je provesti obradu na ukupno četiri vrijednosti posmaka i brzine rezanja.

Zadatak zadan:
7. svibnja 2015.

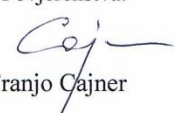
Rok predaje rada:
9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:
15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Toma Udiljak

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Čajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	3
2.1. Kompoziti s polimernom matricom (PMC – Polimer Matrix Composites).....	4
2.2. Kompoziti ojačani vlaknima	6
3. BUŠENJE	13
3.1.1. Alat za bušenje	13
3.1.2. Parametri obrade kod bušenja	15
3.1.3. Sile rezanja kod bušenja.....	17
3.2. Trošenje alata	18
3.2.1. Abrazijsko trošenje	18
3.2.2. Adhezijsko trošenje.....	19
3.2.3. Umor površine	19
3.2.4. Tribokorozija.....	19
3.2.5. Difuzijsko trošenje	19
3.2.6. Oksidacijsko trošenje	20
3.2.7. Oblici trošenja	20
3.2.8. Parametri trošenja	21
4. PREGLED RADOVA	22
5. EKSPERIMENTALNI DIO	30
5.1. Cilj i metodologija ispitivanja.....	30
5.2. Stroj.....	30
5.3. Mjerni sustav	33
5.3.1. Senzor sila.....	34
5.3.2. Vizijski sustav	36
5.3.3. Programaska podrška mjernog sustava.....	37
6. PLAN POKUSA I ANALIZA SIGNALA	40
6.1. Ispitni uzorci	40
6.2. Ispitno svrdlo.....	41
6.3. Planiranje pokusa	42
6.4. Određivanje istrošenosti svrdla.....	43
6.5. Snimanje i obrada signala sila rezanja	48
6.6. Snimanje i obrada signala jakosti struja.....	57
6.7. Određivanje iznosa raslojavanja	65

7. ZAKLJUČAK.....	70
LITERATURA.....	72
PRILOZI.....	74

POPIS SLIKA

Slika 1	Udio kompozitnih materijala u zrakoplovima od 1970g. [2]	1
Slika 2	Kompozit s polimernom matricom [9]	4
Slika 3	Podjela vlakana [6]	6
Slika 4	Različiti rasporedi vlakana [7]	7
Slika 5	TiB viskeri [5]	7
Slika 6	Primjeri proizvoda izrađenih od kompozita ojačanih vlaknima (epoksidna smola-ugljična vlakna) [10], [11], [12]	8
Slika 7	Jahta duljine 30,6 m izrađena od polimernog kompozita ojačanog staklenim vlaknima; Ferretti Custom line 100 [13]	8
Slika 8	Postupak proizvodnje ugljičnih vlakana [7]	9
Slika 9	Primjena ugljičnih vlakana [14], [15]	10
Slika 10	Primjena aramidnih vlakana u balistici [16]	10
Slika 11	Zaštitna oprema izrađena od aramidnih vlakana [17]	11
Slika 12	Glavno i posmično gibanje kod bušenja [18]	13
Slika 13	Geometrija spiralnog svrdla [19]	14
Slika 14	Rad svrdla u pojedinim cilindričnim presjecima [19]	15
Slika 15	Parametri obrade kod bušenja [3]	15
Slika 16	Parametri kod bušenja [18]	16
Slika 17	Promjena brzine rezanja duž oštrice svrdla [18]	16
Slika 18	Sile rezanja kod bušenja [3]	17
Slika 19	Jedinični događaj kod abrazije	18
Slika 20	Jedinični događaj kod adhezije	19
Slika 21	Jedinični događaj kod umora površine	19
Slika 22	Jedinični događaj kod tribokorozije	19
Slika 23	Oblici trošenja [21]	20
Slika 24	Parametri trošenja [3]	21
Slika 25	Svrdla korištena u ispitivanju [22]	22
Slika 26	Utjecaj posmaka, brzine rezanja i istrošenosti alata na aksijalnu silu [22]	23
Slika 27	Oštećenja na ulaznim stranama provrta [22]	24
Slika 28	Svrdla korištena u eksperimentu [23]	24
Slika 29	Ovisnost aksijalne sile o posmaku i dubini bušenja [23]	25
Slika 30	Utjecaj posmaka na faktor raslojavanja [23]	26
Slika 31	Ovisnost kvalitete rupe o posmaku [23]	26
Slika 32	Analiza sila u glavnom pokusu [3]	27
Slika 33	Analiza struja glavni pokus [3]	27
Slika 34	Usporedba sila i struja prije i nakon glavnog pokusa [3]	28
Slika 35	Utjecaj brzine rezanja i posmaka na raslojavanje [3]	28
Slika 36	Sinkroni servo motor s permanentnim magnetima tip APMSB04ADK [24]	31
Slika 37	Radni prostor stroja.	32
Slika 38	Struktura mjernog sustava [24]	33
Slika 39	Nabojno pojačalo Kistler 5017B [25]	34
Slika 40	Senzor sila Kistler 9257B [26]	35
Slika 41	Kamera tip DMK41AF02 i telecentrični objektiv TC2309 [24]	36
Slika 42	Korisničko sučelje mjerne aplikacije [24]	38
Slika 43	Primjer mjerne datoteke nastale nakon jednog ciklusa mjerenja	39
Slika 44	Shematski prikaz postupka namatanja vlakana [27]	40

Slika 45	Ispitni uzorci.....	40
Slika 46	Crtež svrdla A1163, Walter Titex	41
Slika 47	Područje izbora parametara obrade	42
Slika 48	Fotografije rezne oštrice.....	44
Slika 49	Određivanje širine trošenja stražnje površine alata [24]	45
Slika 50	Određivanje širine trošenja stražnje površine alata	46
Slika 51	Iznos srednje vrijednosti VB-a na oštrici 1 i 2	46
Slika 52	Dijagramski prikaz iznosa istrošenosti stražnje površine alata	47
Slika 53	Signali sila rezanja u frekvencijskom i vremenskom području.....	49
Slika 54	Ovisnost signala sila o posmaku i brzini rezanja za $f = 0,03\text{mmokri vc} = 30\text{mmin}$	50
Slika 55	Ovisnost signala sila o posmaku i brzini rezanja za $f = 0,06\text{mmokri vc} = 45\text{mmin}$	51
Slika 56	Ovisnost signala sila o posmaku i brzini rezanja za $f = 0,09\text{mmokri vc} = 15\text{mmin}$	52
Slika 57	Ovisnost signala sila o posmaku i brzini rezanja za $f = 0,12\text{mmokri vc} = 60\text{mmin}$	53
Slika 58	Ovisnost maksimalnog iznosa aksijalne sile o posmaku i brzini rezanja.....	54
Slika 59	Ovisnost maksimalnog iznosa rezultantne sile o posmaku i brzini rezanja	55
Slika 60	Površina ispod krivulja aksijalne sile u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja	55
Slika 61	Površina ispod krivulja rezultantne radialne sile u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja	56
Slika 62	Površina ispod krivulja rezultantne sile u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja... 56	
Slika 63	Ovisnost jakosti struja pogonskih motora o posmaku i brzini rezanja pri $f = 0,03\text{mmokri vc} = 30\text{mmin}$	58
Slika 64	Ovisnost jakosti struja pogonskih motora o posmaku i brzini rezanja pri $f = 0,06\text{mmokri vc} = 45\text{mmin}$	59
Slika 65	Ovisnost jakosti struja pogonskih motora o posmaku i brzini rezanja pri $f = 0,09\text{mmokri vc} = 15\text{mmin}$	60
Slika 66	Ovisnost jakosti struja pogonskih motora o posmaku i brzini rezanja pri $f = 0,12\text{mmokri vc} = 60\text{mmin}$	61
Slika 67	Ovisnost maksimalnog iznosa jakosti struje motora Z osi o posmaku i brzini rezanja	62
Slika 68	Ovisnost maksimalnog iznosa jakosti struje glavnog vretena o posmaku i brzini rezanja	63
Slika 69	Površina ispod krivulja jakosti struja motora Z osi u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja	63
Slika 70	Površina ispod krivulja jakosti struja glavnog vretena u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja	64
Slika 71	Površina ispod krivulja snage motora Z osi u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja	64
Slika 72	Površina ispod krivulja snage glavnog vretena u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja	65
Slika 73	Fotografiranje provrta.....	66
Slika 74	Postupak određivanje površine raslojavanja	66
Slika 75	Najudaljenija točka raslojavanja u odnosu na središte provrta [3].....	67
Slika 76	Ovisnost površine raslojavanja o posmaku i brzini rezanja	68
Slika 77	Ovisnost najudaljenije točke raslojavanja od središta provrta o posmaku i brzini rezanja	69

POPIS TABLICA

Tablica 1	Prednosti i nedostaci duromernih matrica [7]	5
Tablica 2	Karakteristike najčešće korištenih vlakana [6].....	11
Tablica 3	Usporedba svojstava polimernih kompozita ojačanih vlaknima i konvencionalnih materijala [6]	12
Tablica 4	Parametri obrade.....	25
Tablica 5	Karakteristike pogonskih motora [24].....	31
Tablica 6	Karakteristike stroja [24].....	31
Tablica 7	Popis veličina i mjernih sustava	34
Tablica 8	Osnovne tehničke karakteristike mjernog sustava sila rezanja [24].....	35
Tablica 9	Osnovne tehničke karakteristike vizijskog sustava [24]	37
Tablica 10	Preporučeni parametri za svrdlo A1163	41
Tablica 11	Režimi obrade korišteni u glavnom pokusu	43
Tablica 12	Iznosi istrošenosti stražnje površine alata	47
Tablica 13	Oznake i opisi značajki izdvojenih iz signala sila.....	48
Tablica 14	Oznake i opisi značajki izdvojenih iz signala jakosti struja.....	57

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a_p	mm	dubina bušenja
d	mm	promjer svrdla
f	mm/okr	posmak
F_c	N	glavna sila rezanja
F_f	N	posmična sila rezanja
F_p	N	natražna sila rezanja
F_r	N	rezultantna sile rezanja
F_x	N	komponenta rezultantne sile rezanja u smjeru X osi
F_y	N	komponenta rezultantne sile rezanja u smjeru Y osi
F_z	N	komponenta rezultantne sile rezanja u smjeru Z osi
I_s	A	jakost struje glavnog vretena
I_x	A	jakost struje posmičnog motora X osi
I_y	A	jakost struje posmičnog motora Y osi
I_z	A	jakost struje posmičnog motora Z osi
J	kgm ²	moment inercije
KB	mm	Širina kratera
KM	mm	udaljenost od oštrice do središta kratera
KT	mm	dubina kratera na prednjoj površini alata
l	mm	duljina
M	Nm	moment
n	min ⁻¹	učestalost vrtnje
P	W	snaga
t_b	s	vrijeme bušenja
T_{uz}	s	vrijeme uzorkovanja
VB	mm	širina trošenja stražnje površine alata
VB_{MAX}	mm	maksimalna vrijednost širine trošenja stražnje površine
VB_{MIN}	mm	minimalna vrijednost širine trošenja stražnje površine
v_c	m/min	brzina rezanja
v_f	mm/min	posmična brzina
α	°	kut stražnje površine
β	°	kut klina
γ	°	kut prednje površine
ε	°	vršni kut svrdla

SAŽETAK

Kompozitni materijali primjenjuju se u gotovo svim granama industrije, ponajprije zahvaljujući mogućnosti modeliranja njihovih svojstava. Tehnologije proizvodnje dijelova od polimernih kompozita uglavnom omogućuju proizvodnju dijelova na konačan oblik (*eng. net shape*) ili na oblik blizak konačnom (*eng. near net shape*) što smanjuje ili čak eliminira potrebu za obradom odvajanjem čestica (OOČ). Međutim, bušenje je u većini slučajeva još uvijek neophodan postupak OOČ korišten za obradu polimernih kompozita. Bušenje se koristi za izradu provrta koji u pravilu služe za spajanje dijelova, tj. montažu. Kao najveći problem kod bušenja ističe se raslojavanje ili delaminacija. Povećani iznosi raslojavanja značajno narušavaju svojstva materijala u zoni obrade, a napredovanjem duž matrice mogu izrazito nepovoljno djelovati na statička i dinamička svojstva konstrukcije. Do sada provedena ispitivanja pokazuju da najveći utjecaj na iznos raslojavanja u zoni obrade imaju parametri obrade (brzine rezanja i posmična brzina), geometrija svrdla i istrošenost svrdla. Stoga je u ovom radu ispitan utjecaj parametara obrade i istrošenosti svrdla na raslojavanje u zoni obrade. Ispitivanje je provedeno bušenjem kompozitnih uzoraka na način da su određene kombinacije parametara obrade ponavljane više puta pri različitim stupnjevima istrošenosti svrdla. Tijekom izvođenja pokusa, kontinuirano i periodički, snimani su signali koji su kasnije obrađeni i analizirani u cilju pronalaženja značajki osjetljivih na promjene u stupnju istrošenosti alata i raslojavanje obratka.

Ključne riječi: bušenje, polimerni kompoziti, raslojavanje, delaminacija, nadzor alata

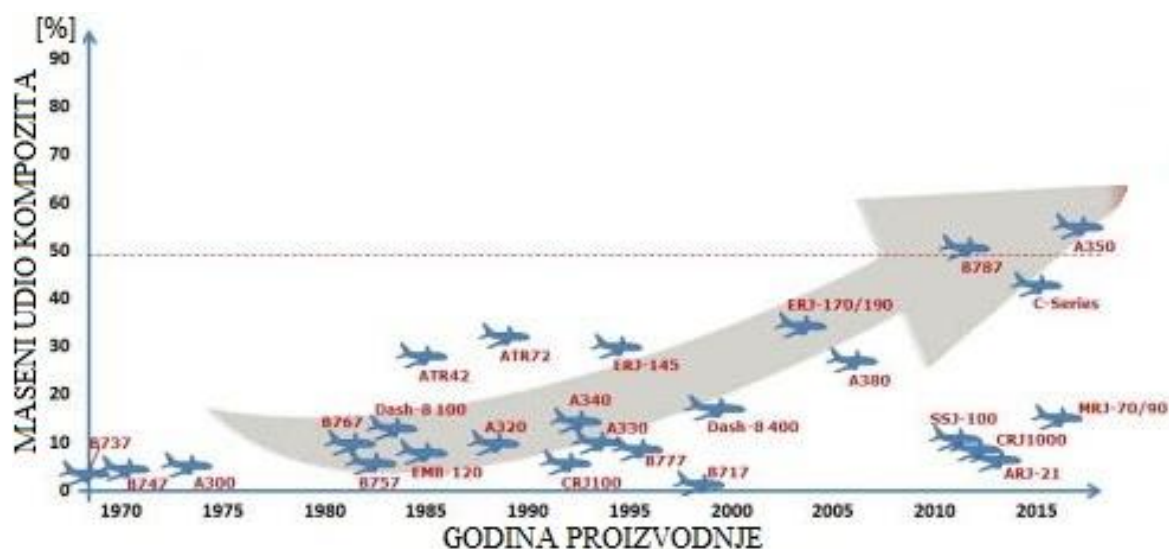
SUMMARY

Composite materials are widely used in a number of different industries such as shipbuilding, automotive, aviation, etc. One of the main reasons for their wide application range is possibility of customizing their mechanical properties. Polymer Composites with various types of reinforcements are most commonly used types of composites. Production technology for manufacturing parts of polymer composites enables the production of parts in net shape or a near net shape form which reduces or even eliminates the need for machining. However, drilling is still commonly used for machining polymer composites, mostly for making holes that typically serve for assembly purposes. The biggest problem related to drilling is delamination. High delamination amount can significantly impair material properties around processing zone and its progression along the matrix may compromise the structural integrity. Recent research reports show that the greatest impact on delamination in processing zone have the cutting parameters (cutting speed and feed rate), tool geometry and the tool wear. In this work the influence of processing parameters and the tool wear on the delamination is examined. The experiment was conducted by drilling a composite material using standard twist drill in a way that a several combinations of cutting parameters have been repeated several times for different degrees of tool wear. During the experiment, cutting force and motor drive currents were recorded to be processed by filtering and extracting a number of features potentially sensitive to the changes in tool wear. Delamination for each hole was analyzed in order to be correlated to the cutting parameters and the wear of the tool.

Key words: drilling, polymer composites, delamination, tool monitoring

1. UVOD

Zahtjevi koji se postavljaju pred proizvode i proizvođače istih sve su kompleksniji. Strelovit razvoj tehnologije, razvijanje različitih alata i filozofija za upravljanje procesima i proizvodnjom rezultat su nastojanja da se na te zahtjeve odgovori. Veliki napredak može se primijetiti i na području materijala. Raste primjena aluminijskih, magnezijских, titanovih legura, te polimernih, keramičkih i kompozitnih materijala, dok materijali na bazi željeza postižu zasićenje u proizvodnji i potrošnji [1]. Velik porast proizvodnje i uporabe bilježe kompozitni materijali svih vrsta (keramičke, metalne i polimerne matrice, različitih vrsta i oblika ojačala). Kompoziti pružaju mogućnost modeliranja svojstava, ali i postizanje nekih svojstava koje je teško postići drugim materijalima, npr. otpornost na povišene temperature, otpornost na trošenje i sl. Dok su kompoziti s keramičkom i metalnom matricom još uvijek poprilično "egzotični" materijali i kao takvi se koriste za specijalne primjene, kompoziti s polimernom matricom se već dugo primjenjuju i njihova je primjena u stalnom porastu. Slika 1 prikazuje rast udjela kompozitnih materijala u avioindustriji kroz posljednjih nekoliko desetljeća.



Slika 1 Udio kompozitnih materijala u zrakoplovima od 1970g. [2]

Kompozitni materijali s polimernom matricom (polimer matrix composites – PMC) su zahvaljujući dobrim svojstvima pronašli vrlo širok spektar primjene, a najčešće se govori o njihovoj primjeni u automobilskoj, zrakoplovnoj i brodograđevnoj industriji. Tehnologije proizvodnje polimernih kompozita (npr. ručno polaganje, naštrecavanje, pultrudiranje,

ubrizgavanje u kalup, namatanje itd.), u pravilu omogućuju proizvodnju dijelova na oblik blizak konačnom (eng. near net shape forming) ili na konačni oblik (eng. net shape), što znači da je potreba za naknadnom obradom svedena na minimum. Jedna od najčešćih operacija koja se izvodi je bušenje provrta. Koliko je zapravo bušenje zastupljeno govori podatak da je za sklapanje manje letjelice potrebno probušiti preko 100 000 provrta, a na komercijalnim putničkim zrakoplovima ta brojka prelazi 1 000 000 [3]. Problemi koji se najčešće javljaju pri bušenju PMC su izvlačenje vlakana, otkidanje vlakana i raslojavanje. Najveći problem od navedenih je raslojavanje pa se sukladno tome ulažu veliki naponi da bi se ono svelo na minimum. Ako pređe dozvoljene granice može doći do napredovanja pukotine, razaranja materijala, popuštanja spoja i sl., odnosno kompromitirana je sigurnost, funkcionalnost, životni vijek konstrukcije itd. Koliko se truda ulaže za stjecanje novih znanja iz ovog područja pokazuju sve brojnija istraživanja koja se u zadnje vrijeme provode. Tema ovog diplomskog rada je utjecaj istrošenosti alata i parametara obrade na raslojavanje polimernih kompozita prilikom bušenja i za potrebe rada provedeno je jedno takvo istraživanje.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

Kompozitni materijali su materijali dobiveni umjetnim spajanjem dvaju različitih materijala s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje ni jedna komponenta sama za sebe. [4]

Neke od općih prednosti kompozitnih materijala u odnosu na metale, keramiku i polimere su: mogućnost modeliranja mehaničkih svojstava, mogućnost izrade proizvoda složene geometrije, prigušivanje vibracija, dimenzionalna stabilnost s obzirom na promjenu temperature, mala gustoća, otpornost na koroziju, zamor i otapanje, mogućnost postizanja tvrde površine malog koeficijenta trenja i velike otpornosti na trošenje, trajnost, visoka vrijednost čvrstoće, modula elastičnosti i granice tečenja u odnosu na gustoću. [4], [5]

Neki od nedostataka kompozita su: heterogenost, anizotropija mehaničkih svojstava, visoka cijena nekih kompozita, loša recikličnost. [4]

Zahvaljujući mnogobrojnim prednostima i dobrim svojstvima kompozitni materijali imaju širok spektar primjene. Neka od područja u kojima su kompoziti našli široku primjenu [6]:

- svemirska tehnika – spremnici, kućišta, oplata, sapnice,
- avioindustrija - dijelovi oplata, krilca, kupole, elise helikoptera, krila,
- elektrotehnika i energetika – razna kućišta, izolacije, antene, kupole,
- građevinarstvo – oplata, montažne kuće, pregradni zidovi, dimnjaci, unutrašnje uređenje,
- opće strojarstvo – različita kućišta, cijevi, elementi strojeva i konstrukcija, oplata,
- brodogradnja – izrada malih i srednjih brodova, izrada sportskih plovila, izrada dijelova za velike brodove,
- željeznički promet – unutrašnje uređenje vagona, izrada kabina, izrada čeonih dijelova lokomotiva.

Svojstva kompozita ovise o [5]:

- svojstvima matrice i ojačala,
- veličini i rasporedu / raspodjeli konstituenata,
- volumnom udjelu konstituenata,
- obliku konstituenata,
- prirodi i jakosti veza među konstituentima.

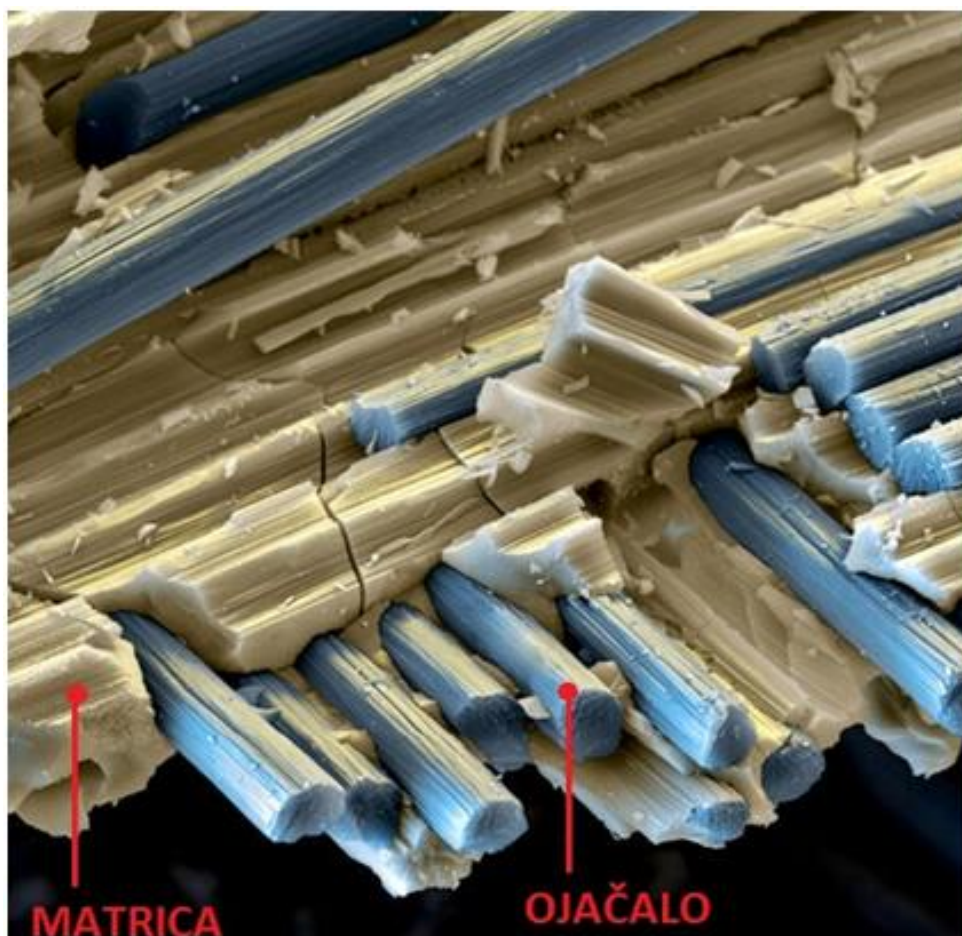
2.1. Kompoziti s polimernom matricom (PMC – Polimer Matrix Composites)

Kompoziti s polimernom matricom su najraširenija vrsta kompozita s obzirom na materijal matrice. Zahvaljujući brojnim prednostima, u odnosu na konvencionalne konstrukcijske materijale, zastupljeni su u gotovo svim granama industrije.

Neka od najistaknutijih povoljnih svojstava kompozitnih materijala s polimernom matricom su: visoka specifična čvrstoća, visoka krutost, relativno mala gustoća, otpornost na različite medije, mogućnost izrade složenih oblika, niski troškovi naknadne obrade te dimenzijska stabilnost u ekstremnim radnim uvjetima. [7], [8]

Nedostaci su: pojava raslojavanja i mrvljenja, širenje pukotina, naprezanja izazvana skupljanjem matrice te anizotropija svojstava. [7]

Polimerni kompoziti sastoje se od polimerne matrice i ojačala, koja su najčešće u obliku vlakana različitih duljina. Na slici 2 prikazan je polimerni kompozit.



Slika 2 Kompozit s polimernom matricom [9]

Zadatak matrice je da [6]:

- povezuje vlakna (najčešće se koriste kao ojačala),
- prenosi opterećenje na vlakna,
- štiti vlakna od oštećenja i vanjskih utjecaja,
- sprječava širenje pukotina
- štiti vlakna od mehaničkih i kemijskih utjecaja
- povećava žilavost konstrukcije
- osigurava dobru kvalitetu površine
- osigurava oblik i krutost konstrukcije

Matrica također ne smije kemijski reagirati s vlaknima, te mora dobro prijanjati uz vlakna. Najčešće se za polimerne matrice koriste duromeri i plastomeri. Najčešće korištene duromerne matrice su razne smole, npr. poliesterske, epoksidne, vinil-esterske, fenolne smole[5]. Pregled prednosti i nedostataka nekih duromernih matrica dan je u tablici 1.

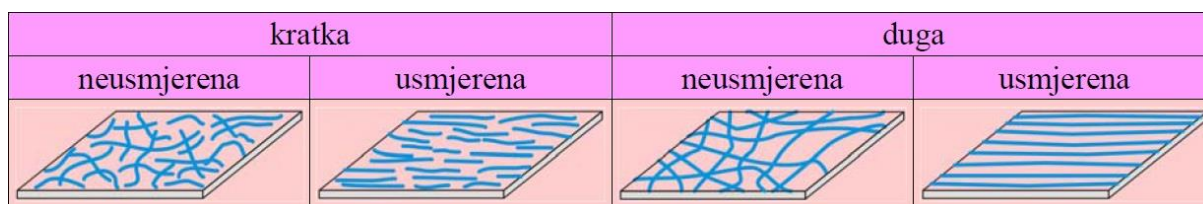
Tablica 1 Prednosti i nedostaci duromernih matrica [7]

Vrsta duromerne matrice	Prednosti	Nedostaci
Epoksidne smole	Izvršna mehanička svojstva, postojane na atmosferilije, otporne na djelovanje vode i agresivnih medija, otpornost na zamor materijala.	Osjetljive na djelovanje UV zračenja, pri povišenim temperaturama teško je ostvariti umrežavanje i žilavost
Poliesterske smole	Dobra kemijska postojanost, povišena rastezna i savojna čvrstoća, postojanost na atmosferilije, laka prerada, niska cijena.	Ograničen rok trajanja, lako se razgrađuju, isparavanje pri umrežavanju.
Fenolne smole	Postojane pri povišenim temperaturama, samogasive, povišena otpornost na djelovanje organskih otapala i kiselina, povišena tvrdoća.	Pri umrežavanju otpuštaju veliku količinu hlapljivih tvari, krhke su, mehanička svojstva su im slabija u odnosu na poliesterske i epoksidne smole.
Bismaelimidi	Otporne na gorenje, visoka čvrstoća, otporne na agresivne sredine (uglavnom se primjenjuju u aeronautici, svemirskoj tehnici).	Krhkost, cijena.

Materijali koji se najčešće koriste za plastomerne matrice su: polipropilen (PP), poliamid (PA), polietilen-tereftalat (PET), polibutilen-tereftalat (PBT), polisulfoni (PS), polieter-eter-keton (PEEK).

2.2. Kompoziti ojačani vlaknima

Kompoziti ojačani vlaknima su najčešće korišteni kompoziti [7]. Vlakna su ojačala kojima je jedna dimenzija značajno veća od druge, tj. imaju velik omjer duljina/promjer. Vlakna se dijele prema duljini, pa se razlikuju duga i kratka, odnosno prema orijentaciji pa vlakna mogu biti usmjerena ili neusmjerena, što je prikazano na slici 3 [6].



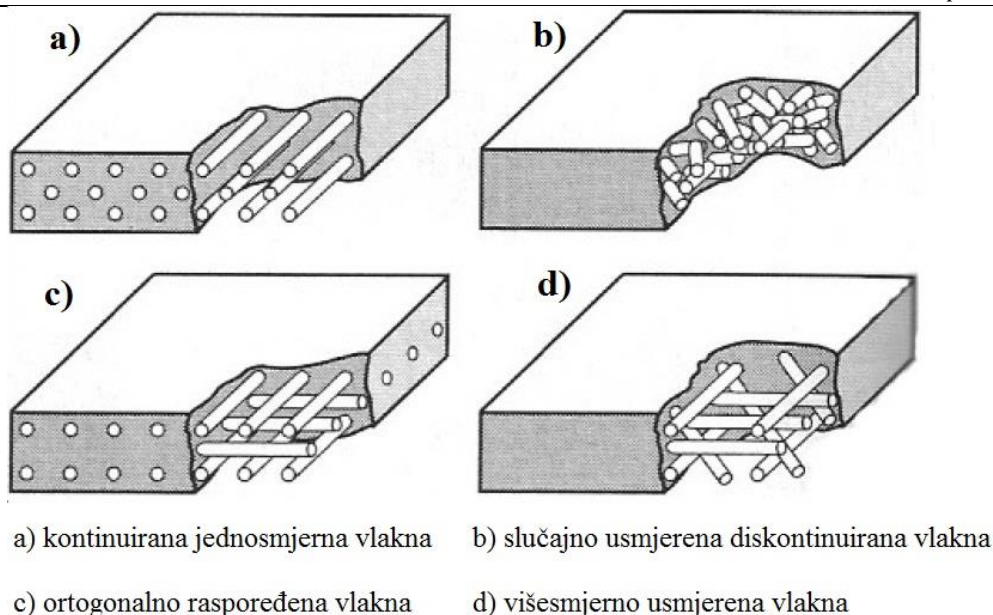
Slika 3 Podjela vlakana [6]

Kod kompozita koji su ojačani vlaknima do izražaja dolazi povećanje čvrstoće i specifične čvrstoće, žilavosti i krutosti što se postiže ulaganjem čvrstih, krutih i krhkih vlakana u duktilniju matricu.

Osnovni zadaci vlakana su [6]:

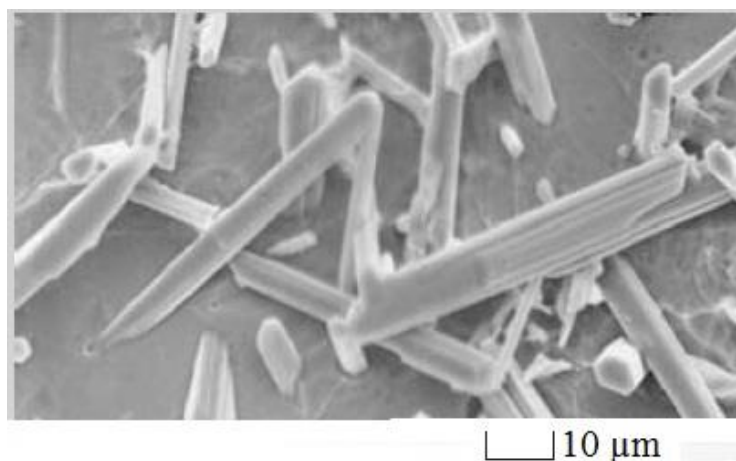
- prihvaćanje opterećenja (nose 70...90 % opterećenja),
- osiguravanje čvrstoće, krutosti i toplinske stabilnosti konstrukcije,
- ovisno o namjeni kompozita osiguravanje električne vodljivosti ili izolacije.

Kompoziti ojačani vlaknima su anizotropni materijali, odnosno imaju znatno bolja svojstva u smjeru vlakana. Anizotropnost se može korigirati laminiranjem u nekoliko slojeva od kojih svaki sloj ima vlakna usmjerena u drugom smjeru ili postavljanjem neusmjerenih vlakana. Prema rasporedu vlakana razlikuju se: kontinuirana jednosmjerna vlakna, slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, ortogonalno raspoređena vlakna i višesmjerno usmjerena vlakna [7]. Navedene mogućnosti prikazane su na slici 4.



Slika 4 Različiti rasporedi vlakana [7]

Prema promjeru i karakteru vlakna razlikujemo vlakna u užem smislu, viskere i žice. Viskeri su vrlo tanke niti monokristala koji imaju velik omjer duljine i promjera. Viskeri su najčvršći poznati materijal pa kompoziti ojačani viskerima imaju izuzetno dobra mehanička svojstva [8]. Iako imaju izuzetna mehanička svojstva viskeri imaju ograničenu primjenu zbog visoke cijene i kompliciranog postupka proizvodnje. Izrađuju se od grafita (C), SiC, silicij-nitrida (SiN) i aluminijsk-oksida (Al_2O_3) [12]. Na slici 5 je mikroskopski prikaz titan borid (TiB) viskera.



Slika 5 TiB viskeri [5]

Kompoziti s polimernom matricom ojačani vlaknima u užem smislu se najviše koriste. Vlakna također imaju velik omjer duljine i promjera, a izrađuju se od polimera ili keramike. Najčešće se koriste staklena, ugljična, aramidna vlakna, te vlakna bora, silicijevog karbida i aluminijskog oksida. Na slikama 6 i 7 su prikazani neki od primjera primjene.



Slika 6 Primjeri proizvoda izrađenih od kompozita ojačanih vlaknima (epoksidna smola-uglična vlakna) [10], [11], [12]



Slika 7 Jahta duljine 30,6 m izrađena od polimernog kompozita ojačanog staklenim vlaknima; Ferretti Custom line 100 [13]

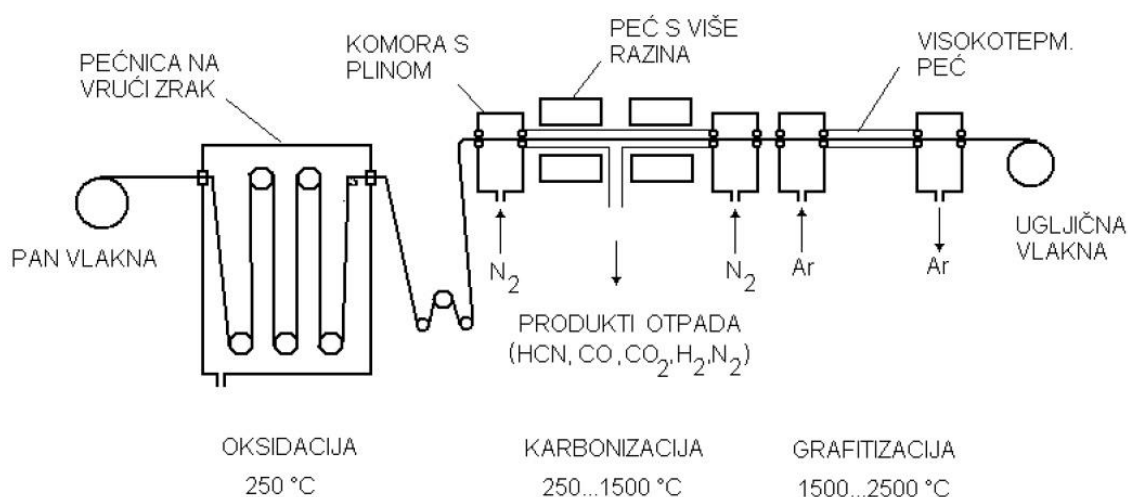
Staklena vlakna se najčešće primjenjuju kao ojačala u polimernim kompozitima (udio oko 90%). Dobre strane staklenih vlakana: kompozitima daju povišenu čvrstoću, visoka specifična čvrstoća, postojanost na visokim temperaturama, otpornost na koroziju, dimenzijska stabilnost, otpornost na starenje, velik broj proizvodnih postupaka – relativno jeftina izrada gotovih proizvoda te relativno niska cijena [7].

Razlikuje se nekoliko vrsta staklenih vlakana [8]:

- A-staklo: dobra kemijska otpornost, slaba električna svojstva
- C-staklo: specijalan sastav za primjenu s jako agresivnim kemikalijama
- E-staklo: najčešće se koristi, preko 50% svih staklenih ojačala, otporno je na utjecaj morske vode te ima dobru čvrstoću
- S-staklo: ima puno bolja mehanička svojstva od E-stakla, ali je nekoliko puta skuplje
- T-staklo: podnosi visoke temperature (do 1050°C), ima visoku čvrstoću i modul elastičnosti

Ugljična vlakna imaju izuzetna mehanička svojstva. Odlikuju se vrlo visokom čvrstoćom, vrlo malom gustoćom, otpornošću na koroziju, umor materijala i puzanje te imaju najveću krutost od svih komercijalno dostupnih vlakana [7]. Ograničenje u primjeni je vrlo visoka cijena vlakana u odnosu na ostala komercijalno dostupna vlakna. Također imaju nešto manju žilavost u odnosu na staklena i aramidna vlakna [8].

Ugljična vlakna se uglavnom proizvode kontroliranom oksidacijom, karbonizacijom i grafitizacijom ugljikom bogatih spojeva. Najčešće je to poliakrilonitril (PAN), a koji vlaknima daje najbolja svojstva, također se koristi celuloza i katran. Mijenjanjem parametara u proizvodnji dobivaju se vlakna visoke čvrstoće ili visokog modula elastičnosti. Postupak dobivanja vlakana shematski je prikazan na slici 8 [7].



Slika 8 Postupak proizvodnje ugljičnih vlakana [7]

Na slici 9 su neki primjeri primjene.



Poluosovina, Chevrolet Corvette C6, 52% manja masa od serijske, višestruko izdržljivija, cijena 2000\$



Formula 1, elementi ovjesa

Slika 9 Primjena ugljičnih vlakana [14], [15]

Aramidna vlakna, poznata još pod komercijalnim nazivima Kevlar, Nomex, Twaron, su aromatski poliamidi s benzenskim prstenovima. Komercijalizirana od strane tvrtke DuPont 70-ih godina prošlog stoljeća. Aramidna vlakna se odlikuju odličnom vlačnom čvrstoćom, otpornošću na udar i zamor materijala, niskom gustoćom te su toplinski vrlo stabilna. S druge strane imaju relativno nisku tlačnu čvrstoću, nisko talište, vrlo su osjetljiva na djelovanje UV zračenja te su higroskopna. Cijena im je između staklenih i ugljičnih vlakana [7]. Koriste u avioindustriji, građevini, u proizvodnji pneumatika, u proizvodnji optičkih vlakana, a vjerojatno su najpoznatija po intenzivnoj primjeni u balistici [8]. Primjeri primjene prikazani su na slici 10 i 11.



Slika 10 Primjena aramidnih vlakana u balistici [16]



Slika 11 Zaštitna oprema izrađena od aramidnih vlakana [17]

Hibridna vlakna/kompoziti se dobivaju kombiniranjem različitih vrsta vlakana s ciljem postizanja određenih svojstava. Najčešće kombinacije su: ugljična/aramidna vlakna – visoka vlačna i tlačna čvrstoća, dobra žilavost, niska gustoća, ali visoka cijena; aramidna/staklena vlakna – relativno visoka vlačna i tlačna čvrstoća, visoka žilavost, niska gustoća uz povoljnu cijenu; ugljična/staklena vlakna – također vrlo dobra kombinacija svojstava uz relativno nisku cijenu [4]. U tablici 2 su karakteristike najčešće korištenih vlakana, dok su u tablici 3 uspoređene karakteristike nekih polimernih kompozita ojačanih vlaknima s karakteristikama predstavnika nekih tipičnih materijala.

Tablica 2 Karakteristike najčešće korištenih vlakana [6]

Materijal	$\rho/\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$	$E/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	$R_m/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	$(E/\rho)/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$(R_m/\rho)/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Viskeri					
grafit, C	2,2	700	20,7	318	9,41
silicij-nitrid, Si_3N_4	3,2	350÷380	5÷7	109÷118	1,56÷2,2
aluminij-oksidi, Al_2O_3	4,0	700÷1500	10÷20	175÷375	2,5÷5,0
silicij-karbid, SiC	3,2	480	20	150	6,25
Vlakna					
aluminij-oksidi	3,95	379	1,38	96	0,35
aramid (Kevlar 49)	1,44	131	3,6÷4,1	91	2,5÷2,85
ugljik	1,78÷2,15	228÷724	1,5÷4,8	106÷407	0,70÷2,70
E-staklo	2,58	72,5	3,45	28	1,34
bor	2,57	400	3,6	156	1,40
silicij-karbid	3,0	400	3,9	133	1,30
PE-UHMW (Spektra 900)	0,97	117	2,6	121	2,68
Metalna žica					
visoko-čvrsti čelik	7,9	210	2,39	26,6	0,30
molibden	10,2	324	2,2	31,8	0,22
volfram	19,3	407	2,89	21,1	0,15

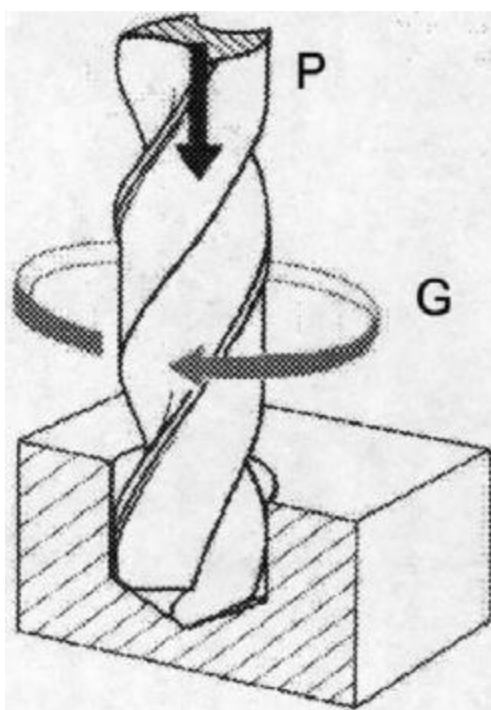
Tablica 3 Usporedba svojstava polimernih kompozita ojačanih vlaknima i konvencionalnih materijala [6]

Materijal	$\rho/\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$	$E/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	$R_m/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	$(E/\rho)/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$(R_m/\rho)/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$t_{\text{Max}}/^\circ\text{C}$
Metali						
lijevano Fe	7,0	100	0,14	14,3	0,02	230÷300
ugljični čelik	7,8	205	0,57	26,3	0,073	500÷650
legirani Al	2,7	73	0,45	27,0	0,17	150÷250
Polimeri						
poliamid 6	1,15	2,9	0,082	2,52	0,071	75÷100
polipropilen	0,9	1,4	0,033	1,55	0,037	50÷80
epoksid	1,25	3,5	0,069	2,8	0,055	80÷215
Keramike						
Al_2O_3	3,8	350	0,17	92,1	0,045	1425÷1540
MgO	3,6	205	0,06	56,9	0,017	900÷1000
K , kratka vlakna						
epoksid / 35 % staklo	1,90	25	0,30	8,26	0,16	80÷200
poliester / 35 % staklo	2,00	15,7	0,13	7,25	0,065	80÷125
poliamid / 35 % staklo	1,62	14,5	0,20	8,95	0,12	75÷110
K , usmjerena vlakna						
epoksid / 45 % staklo	1,81	39,5	0,87	21,8	0,48	80÷215
epoksid / 61 % ugljik	1,59	142	1,73	89,3	1,08	80÷215
epoksid / 53 % aramid	1,36	63,6	1,1	47,1	0,81	80÷215

3. BUŠENJE

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica koji se upotrebljava za bušenje provrta manjih promjera ili proširivanje provrta većih promjera, pri čemu provrt može biti zatvoren ili prolazni. Glavno gibanje je kružno kontinuirano, a posmično je pravolinijsko kontinuirano, kako je prikazano na slici 12. Ako se obrada izvodi na bušilicama sva gibanja su pridružena alatu.

Alat za bušenje je svrdlo, definirane geometrije reznog dijela, najčešće s dvije glavne oštrice i jednom poprečnom. Postoje i specijalne izvedbe svrdala s jednom ili više oštrica. Za bušenje je karakteristična mala krutost sustava, promjenjiva brzina rezanja duž glavne oštrice, promjenjivi kutevi rezanja duž glavne oštrice, otežano odvođenje odvojene čestice i dovođenje SHIP-a.



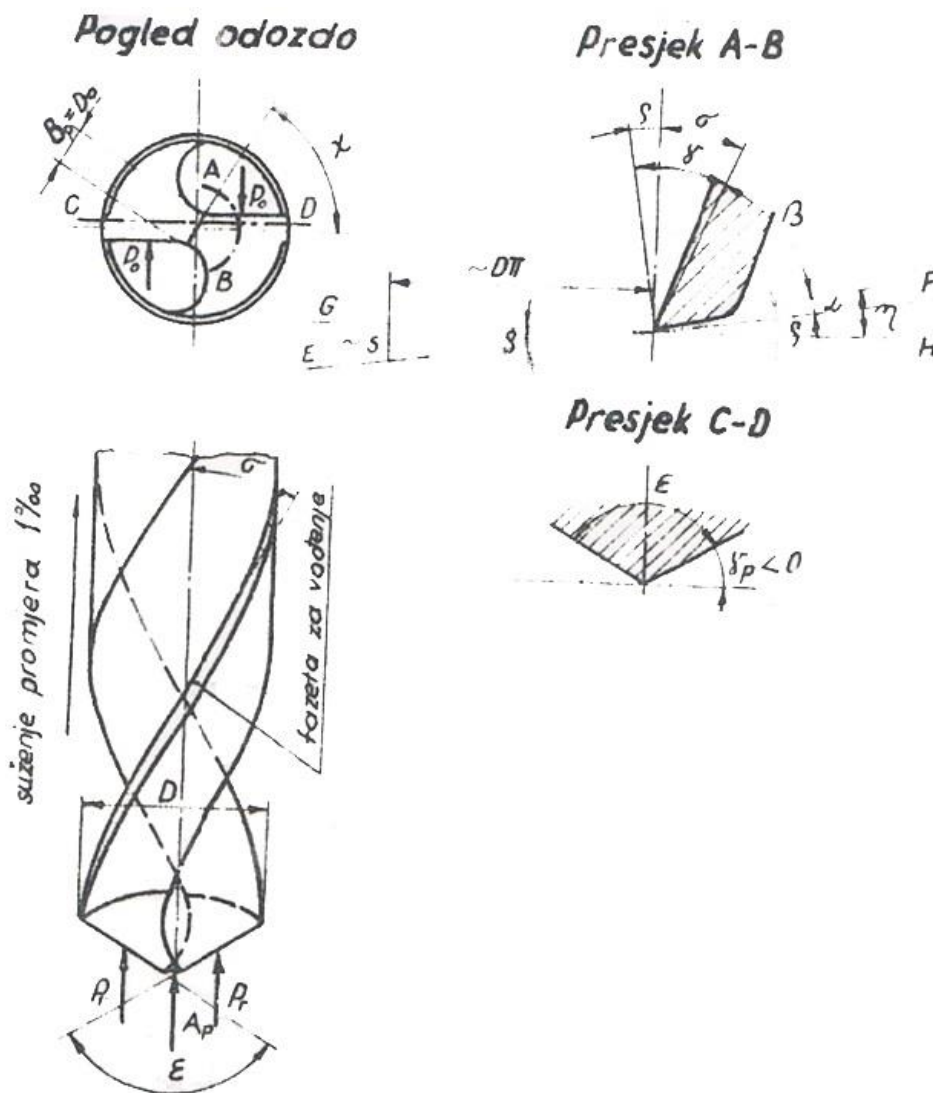
Slika 12 Glavno i posmično gibanje kod bušenja [18]

3.1.1. Alat za bušenje

Alati za bušenje i proširivanje su svrdla. Bušni alati i svrdla dijele se na [3]:

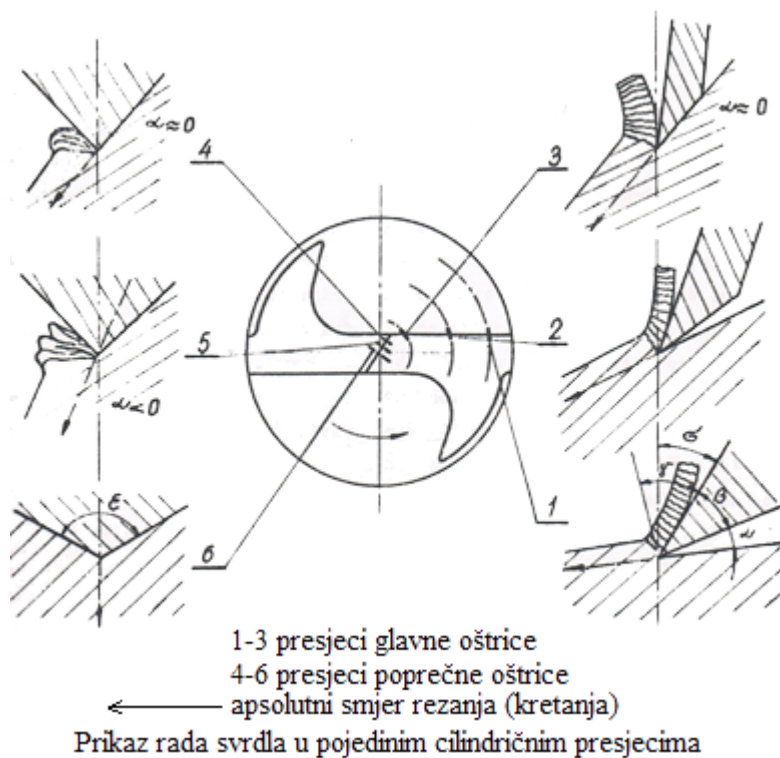
- spiralna svrdla
- svrdla s pločicama od tvrdog metala
- ravna svrdla
- zabušivala
- specijalna spiralna svrdla
- noževi i motke za bušenje

Najviše se koriste standardna spiralna svrdla s dvije glavne oštrice. Svrldo čine dvije dijametralno položene oštrice koje su međusobno spojene poprečnom oštricom. Oštrice se fazetom naslanjaju na rupu i tako vode svrdlo. Duž tijela svrdla nalazi se spirala određenog uspona, ovisno o materijalu koji se obrađuje [19]. Geometrija spiralnog svrdla prikazana je na slici 13.



Slika 13 Geometrija spiralnog svrdla [19]

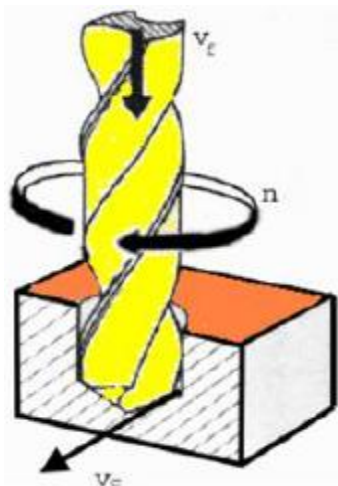
Na slici 14 shematski je prikazano rezanje i nastajanje odvojene čestice duž glavne i poprečne oštrice. Iz skice je vidljivo da poprečna oštrica radi u izuzetno nepovoljnim uvjetima. Da bi se taj problem djelomično riješio razvijeni su specijalni načini brušenja poprečne oštrice.



Slika 14 Rad svrdla u pojedinim cilindričnim presjecima [19]

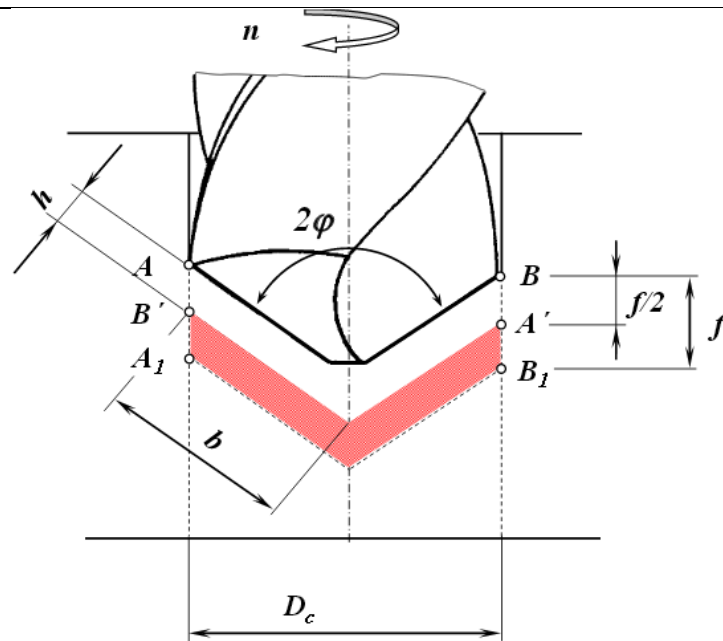
3.1.2. Parametri obrade kod bušenja

Osnovni parametri kod bušenja su posmak (f), brzina rezanja (v_c) i učestalost vrtnje (n) [3].



Slika 15 Parametri obrade kod bušenja [3]

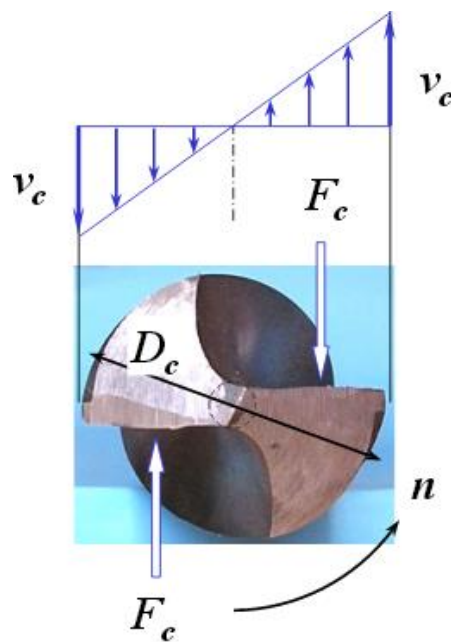
Posmak je udaljenost koju svrdlo prijeđe u smjeru osi alata za jedan okretaj alata. Posmak za jednu oštricu računa se prema: $fz = \frac{f}{z}$ [mm], gdje je z broj oštrica.



Slika 16 Parametri kod bušenja [18]

Posmična brzina računa se prema izrazu: $v_f = f * n = f_z * z * n$ [ms^{-1}].

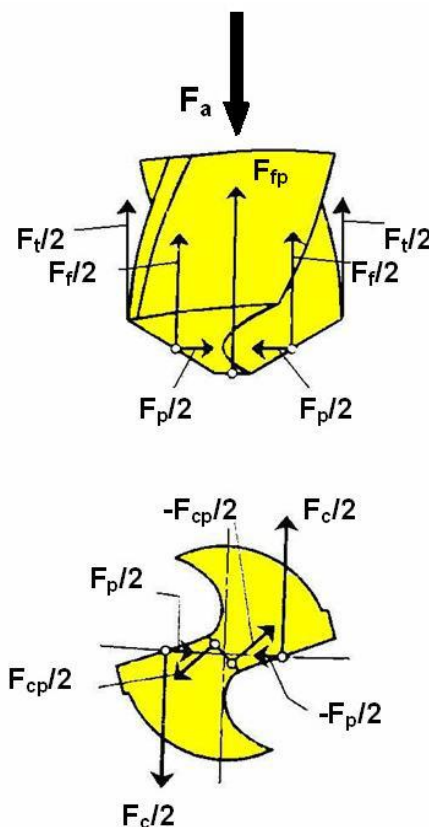
Brzina rezanja se mijenja duž rezne oštrice, kako je prikazano na slici 17. Iznos u osi svrdla joj je jednak nuli, dok je na obodu maksimalna. Izraz za brzinu rezanja je: $v_c = d * \pi * n$ [ms^{-1}].



Slika 17 Promjena brzine rezanja duž oštrice svrdla [18]

3.1.3. Sile rezanja kod bušenja

Sila rezanja kojom alat djeluje na obradak pri postupku bušenja određena je silama koje djeluju na svakoj reznjoj oštrici. Pri postupku bušenja kod svih alata poprečni presjek odvojene čestice jednak je na svakoj oštrici iz čega proizlazi da su i sile na oštricama jednake. Promatranjem samo jedne oštrice silu rezanja se može rastaviti na tri komponente: glavnu silu rezanja F_c , posmičnu silu F_f i natražnu silu F_p . Glavnu silu rezanja čine dvije komponente (za svrdla s dvije oštrice), $F_c/2$. Isto vrijedi za posmičnu i natražnu silu [3]. Navedene sile rezanja prikazane su na slici 18.



Slika 18 Sile rezanja kod bušenja [3]

Glavna sila rezanja poprečne oštrice označena je sa F_{cp} , a posmična sa F_{fp} . Također u sustavu je prisutna i sila trenja, F_t , koja je rezultat dodira i relativnog gibanja između alata, obratka i odvojene čestice.

3.2. Trošenje alata

Neizbježna posljedica trenja je trošenje. Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [20].

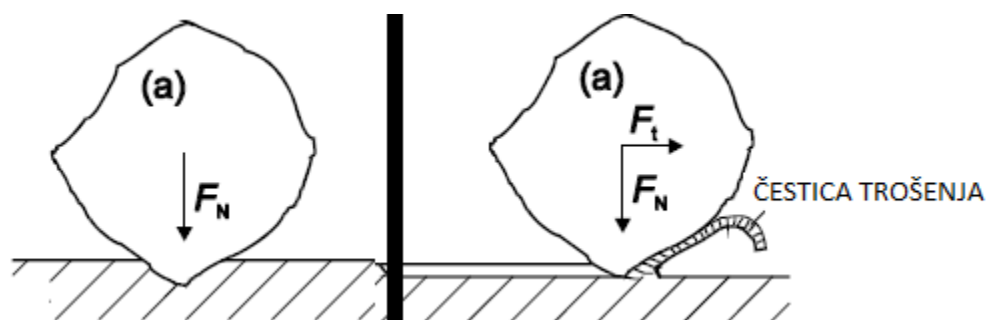
Postoje četiri osnovna mehanizma trošenja, a to su [20]:

- Abrazija
- Adhezija
- Umor površine
- Tribokorozija

Osim prethodno navedenih, osnovnih, mehanizama trošenja uz trošenje alata često se vežu difuzijsko i oksidacijsko trošenje. Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima, odnosno redosljedom događaja koji opisuju proces nastajanja pukotine, proces napredovanja pukotine i na poslijetku odvajanja čestice trošenja s trošene površine [20]. Vrlo je bitno imati kvalitetnu informaciju o stanju alata za vrijeme obrade, posebno danas kad se teži povećanju autonomnosti obradnih sustava. Porastom istrošenosti alata rastu sile rezanja i pada kvaliteta obrađene površine, a u krajnjem slučaju može doći do loma alata.

3.2.1. Abrazijsko trošenje

Abrazija je trošenje materijala istiskivanjem, a uzrokovano je tvrdim česticama i izbočinama. Jedinični događaj ima dvije faze, a to su: prodiranje abraziva u površinu materijala i istiskivanje materijala u obliku čestice trošenja. Jedinični događaj kod abrazije prikazan je na slici 19.

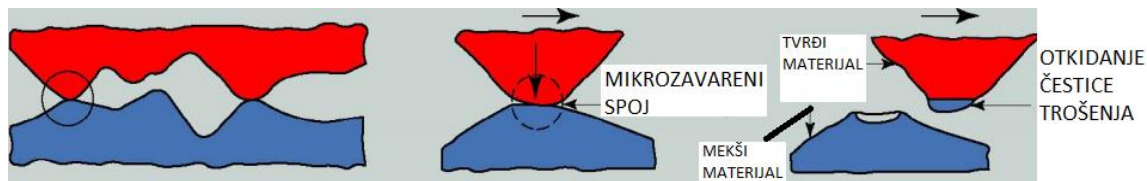


Slika 19 Jedinični događaj kod abrazije

Postoji nekoliko podjela abrazijskog trošenja prema različitim kriterijima. Ovisno o strukturi sustava razlikuje se abrazija u dodiru dva tijela i abrazija u dodiru tri tijela. S obzirom na interakciju trošene površine i abrazivnih čestica razlikuje se: mikrobrazdanje, mikrorezanje, mikronaprnuća i mikroumor. U ovisnosti o odnosu tvrdoće abradirane površine i abrazijskih čestica razlikuje se: čista abrazija, selektivna abrazija i nulta abrazija. [20]

3.2.2. Adhezijsko trošenje

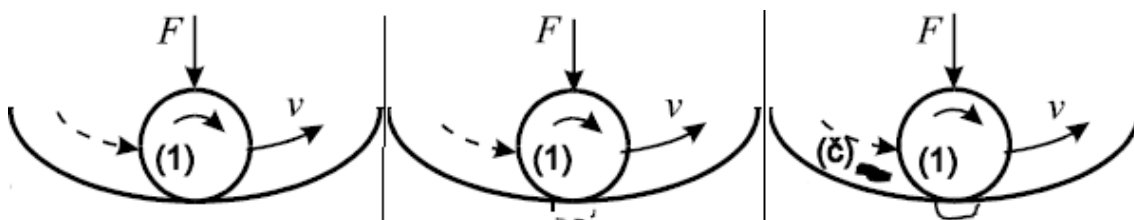
Kod adhezijskog trošenja dolazi do prijelaza materijala s jedne klizne plohe na drugu zbog mikrozarivanja. Jedinični događaj se sastoji od 3 faze: nastajanje adhezijskog spoja, raskidanje adhezijskog spoja, otkidanje čestice. Jedinični događaj prikazan je na slici 20. [20]



Slika 20 Jedinični događaj kod adhezije

3.2.3. Umor površine

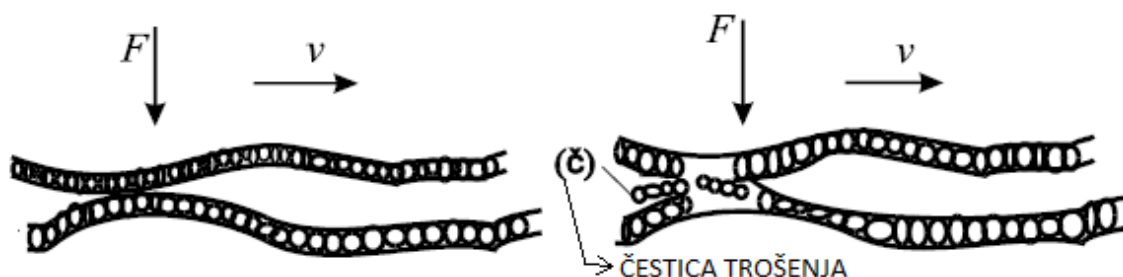
Umor površine je mehanizam trošenja kod kojeg dolazi do odvajanja čestice trošenja s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja. Jedinični događaj čine 3 faze: stvaranje mikropukotine (uglavnom ispod površine), napredovanje mikropukotine i ispadanje čestice trošenja. Jedinični događaj prikazan je na slici 21. [20]



Slika 21 Jedinični događaj kod umora površine

3.2.4. Tribokorozija

Tribokorozija je mehanizam trošenja kod kojeg do trošenja dolazi zbog kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem. Jedinični događaj sastoji se od dvije faze: stvaranje (ili obnavljanje) sloja produkata korozije i mjestimično razaranje slojeva produkata korozije. Jedinični događaj prikazan je na slici 22. [20]



Slika 22 Jedinični događaj kod tribokorozije

3.2.5. Difuzijsko trošenje

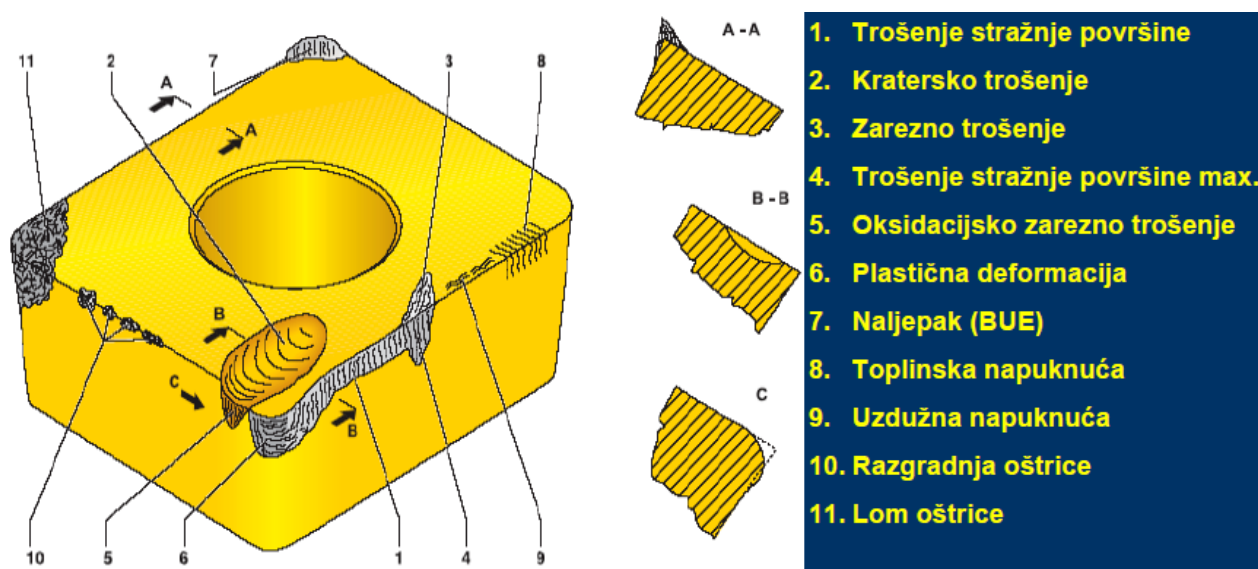
Difuzijsko trošenje je toplinski aktiviran proces koji je prisutan pri višim temperaturama obrade i čije se djelovanje povezuje s kemijskim opterećenjima uvjetovanim međusobnim afinitetom materijala alata i obratka. Ovaj se proces smatra glavnim uzrokom kraterskog trošenja [3].

3.2.6. Oksidacijsko trošenje

Oksidacijsko trošenje se također smatra toplinski aktiviranim procesom koji kod nekih alatnih materijala pri povišenim temperaturama obrade uz prisustvo zraka stvara okside različitih svojstava. Djelovanjem oksidacijskog trošenja nastaju žljebovi na oštrici alata u zonama gdje završava zahvat alata s obratkom [3].

3.2.7. Oblici trošenja

Oblici trošenja prikazani su i navedeni na slici 23.



Slika 23 Oblici trošenja [21]

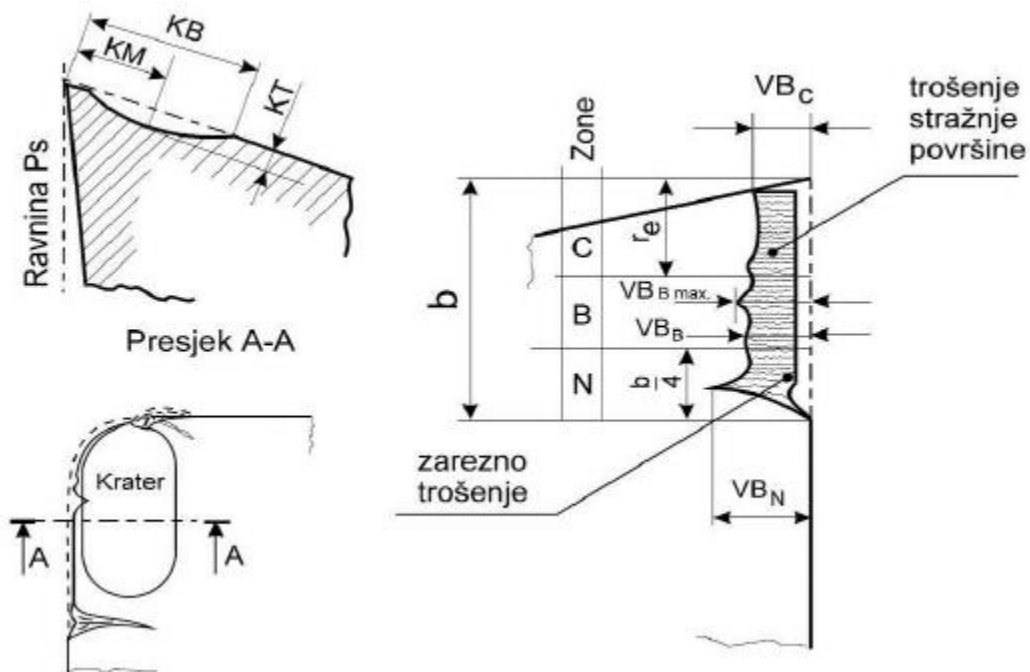
Trošenje stražnje površine alata posljedica je abrazivskih i adhezijskih mehanizama trošenja između stražnje površine alata i obrađivane površine. Intenzitet trošenja stražnje površine tijekom obrade se mijenja i može se podijeliti u tri faze. U prvoj fazi (period uhodavanja) prisutno je naglo ili početno trošenje, nakon čega slijedi faza normalnog (jednolikog) trošenja, koja naposljetku završava ulaskom u treću i posljednju fazu naglog (katastrofalnog) trošenja. Trošenjem stražnje površine alata povećava se kontaktna površina u zoni zahvata alata, što nepovoljno utječe na razvoj topline. Žljebovi na oštrici alata nastaju djelovanjem oksidacijskog i abrazivnog djelovanja na mjestu kontakta oštrice s obratkom. Pri pojavi žljebova stvara se određena koncentracija naprezanja koja može dovesti do loma alata. Lom alata je najgori i krajnji oblik trošena alata. Lom alata je stohastičan proces, iako uglavnom nastaje djelovanjem navedenih oblika trošenja. Ako se proces obrade pravovremeno ne zaustavi, pri lomu alata su

moгуće velike štete na obratku i na stroju. [3] Navedeni oblici trošenja opisuju se parametrima trošenja.

3.2.8. Parametri trošenja

Parametri trošenja su: širina trošenja stražnje površine alata – VB , najveća vrijednost širine trošenja stražnje površine alata - VB_{max} , dubina kratera na prednjoj površini alata - KT , udaljenost od oštice do središta kratera - KM i širina kratera – KB [21].

Navedeni parametri trošenja prikazani su na slici 24.

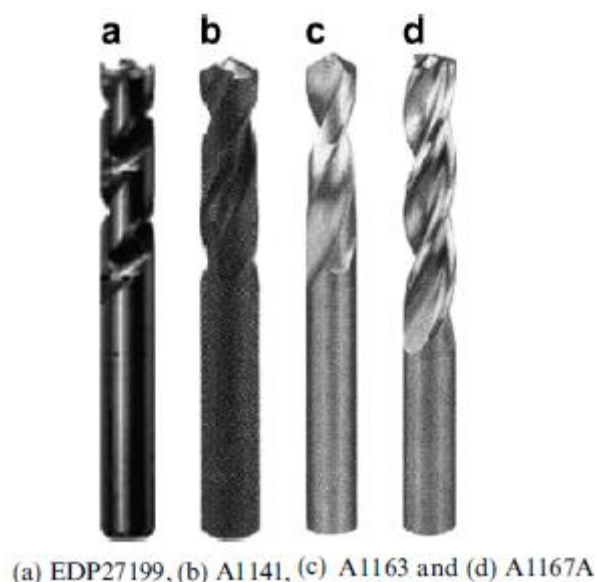


Slika 24 Parametri trošenja [3]

4. PREGLED RADOVA

Ispitivanjima koja se provode na kompozitima s polimernom matricom pokušava se utvrditi utjecaj režima obrade na kvalitetu obrade i potrošnju alata, ispituje se mogućnost visokobrzinske obrade, ispituju se razne prevlake i njihov utjecaj na kvalitetu obrade i trajnost alata itd. Također su aktualni pokušaji implementacije neuronskih mreža koje se primjenjuju u cilju praćenja stanja alata, optimiranja parametara s ciljem produženja vijeka trajanja alata, povećanja kvalitete obrade, smanjenja raslojavanja, smanjenja utroška energije itd. U nastavku je dan pregled nekoliko zanimljivih radova iz područja obrade PMC.

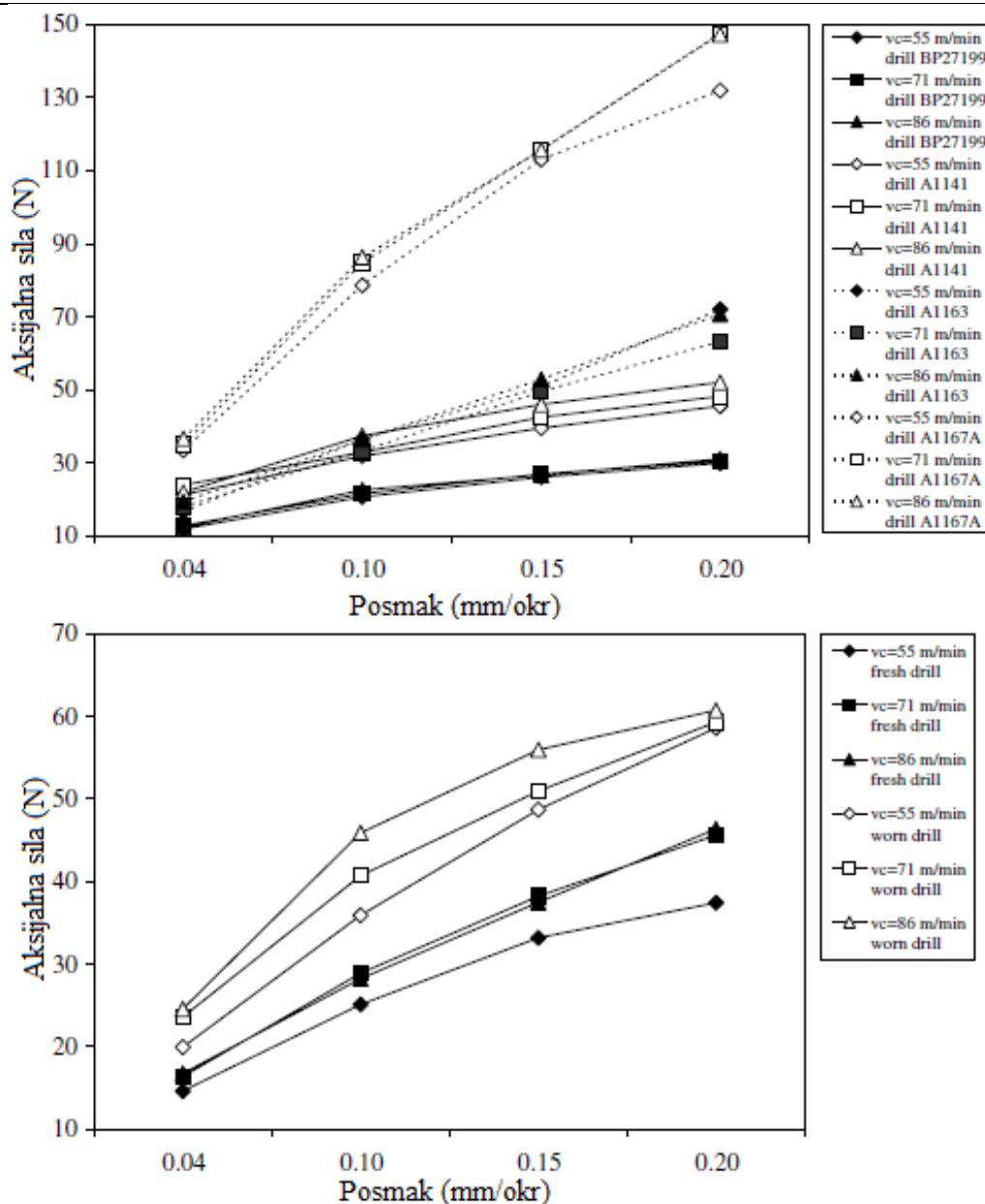
U [22] cilj je bio ispitati utjecaj geometrija alata na aksijalnu silu i raslojavanje. Ispitivanje je provedeno sa 4 svrdla različite geometrije i sastava. Svrkla su prikazana na slici 25.



Slika 25 Svrkla korištena u ispitivanju [22]

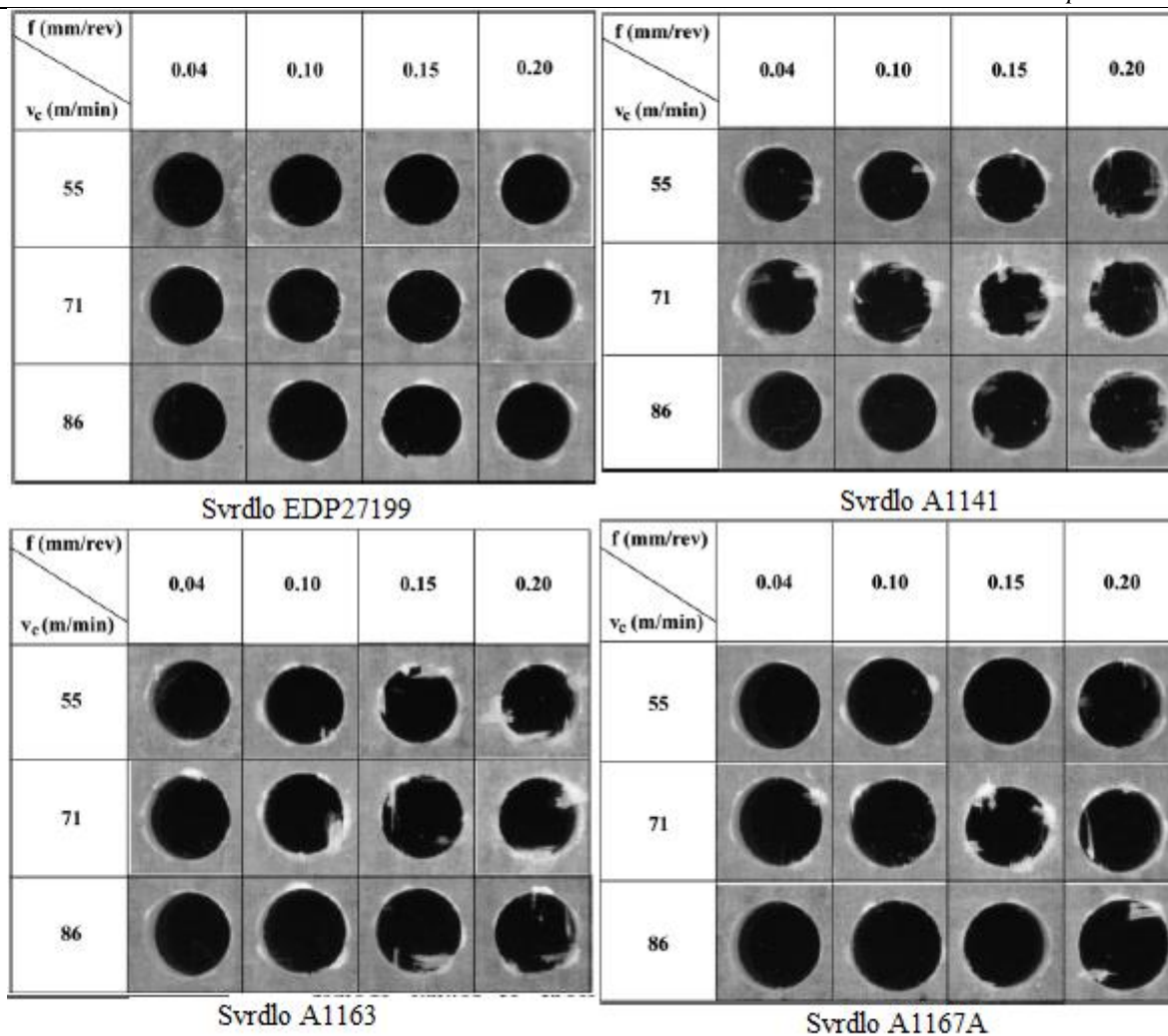
Materijal koji se koristio u ispitivanju je kompozit s matricom od epoksidne smole ojačan staklenim vlaknima. Proizveden je ručnim polaganjem, a maseni udio vlakana je 50%.

Na slici 26 prikazan je utjecaj posmaka i brzine rezanja na aksijalnu silu, te utjecaj istrošenosti alata na istu. Uočljivo je da aksijalna sila raste kako se povećava posmak, dok je utjecaj brzine rezanja malen. Također je uočljiv utjecaj geometrije alata na aksijalnu silu. Najmanja sila bila je potrebna prilikom bušenja sa svrdlom EDP27119, dok je najveća zabilježena kod bušenja sa svrdlom A1167A. Autori smatraju da je tome tako jer rezanje počinje na periferiji pa nema značajne plastične deformacije u osi svrdla gdje je brzina rezanja 0, kao kod klasičnog svrdla.



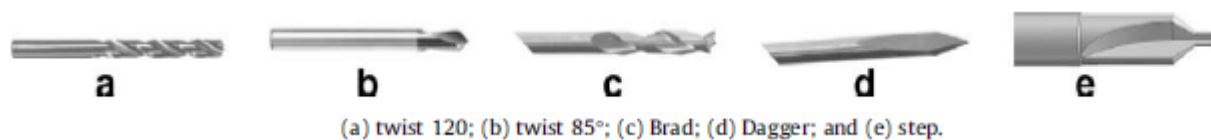
Slika 26 Utjecaj posmaka, brzine rezanja i istrošenosti alata na aksijalnu silu [22]

Na slici 27 vidi se kako posmak i brzina rezanja utječu na raslojavanje (bijeli dio oko rupa) kod različitih geometrija svrdala. Iz slika možemo zaključiti kako na raslojavanje veći utjecaj ima posmak, odnosno da je povećanjem posmaka veći i iznos raslojavanja. Najmanje raslojavanje zabilježeno je kod rupa bušenih svrdlom EDP27119 s kojim je prilikom bušenja ostvarena najmanja aksijalna sila. Drugi najbolji rezultat u pogledu minimalnog iznosa raslojavanja ostvaren je svrdlom A1167A, što je bilo svojevrsno iznenađenje zbog toga što je prilikom bušenja s tim svrdlom zabilježen najveći iznos aksijalne sile. Na temelju toga autori su u ovom slučaju zaključili da nema direktne veze između iznosa aksijalne sile i raslojavanja.



Slika 27 Oštećenja na ulaznim stranama provrta [22]

U [23] uspoređena su svrdla različite geometrije. Osim geometrije pratio se i utjecaj različitih posmaka na raslojavanje, aksijalnu silu i kvalitetu rupe. Korišteno je pet različitih svrdala prikazanih na slici 28.



Slika 28 Svrdla korištena u eksperimentu [23]

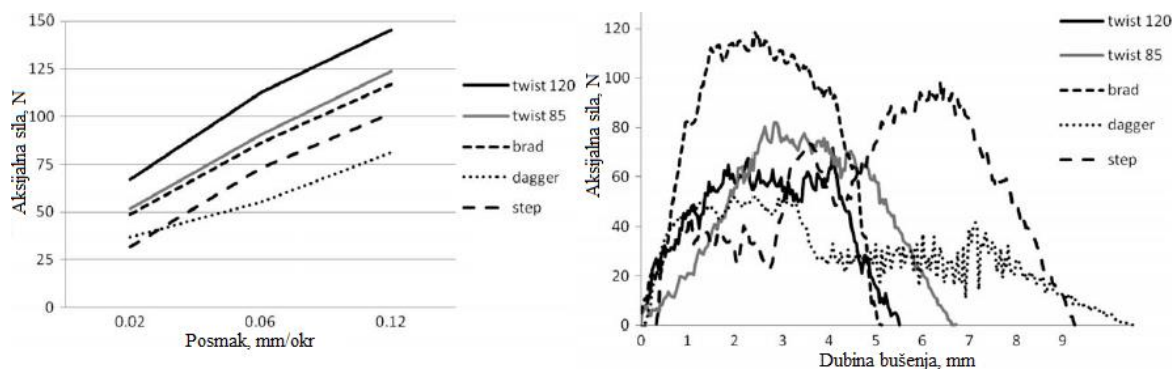
Parametri obrade dani su u tablici 4.

Tablica 4 Parametri obrade

Promjer svrdla, mm	Brzina rezanja, m/min	Broj okretaja glavnog vretena, min ⁻¹	Posmak, mm/okr	Posmična brzina, mm/min
6	53	2800	0,02	56
			0,06	168
			0,12	336

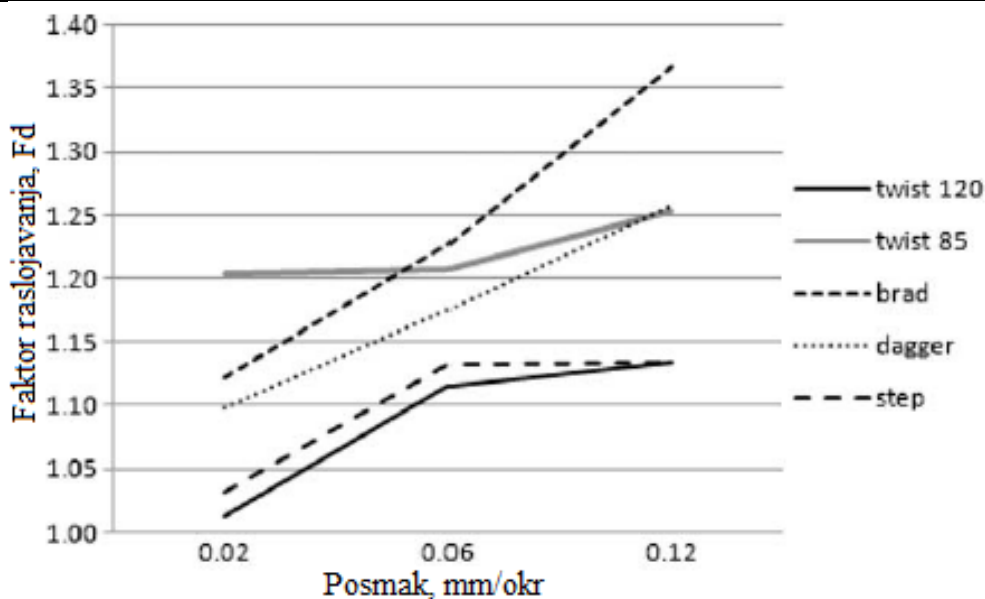
Ispitni uzorci izrađeni su od kompozitnog materijala komercijalne oznake CC1 60 ET 443. Debljina uzoraka bila je 4mm, sastavljena od 24 sloja. Uzorci su očvršćeni pod tlakom od 300 kPa na temperaturi od 130 °C u trajanju od 1 sat.

Kao što je i očekivano pokazalo se da najveći utjecaj na iznos aksijalne sile ima posmak, odnosno iznos aksijalne sile raste s posmakom. Sukladno tome za očekivati je da će i raslojavanje biti veće kad se obrada izvodi većim vrijednostima posmaka. Međutim pokazalo se da je temperatura alata viša kod manjih posmaka, konkretno nakon 6 izbušenih rupa višim posmacima temperatura svrdla je bila 50 °C dok je kod manjih posmaka iznosila 80 °C, pa i to treba uzeti u obzir kod predviđanja utjecaja posmaka na raslojavanje. Na slici 29 ilustriran je utjecaj posmaka na aksijalnu silu, te kretanje iznosa aksijalne sile tijekom bušenja.



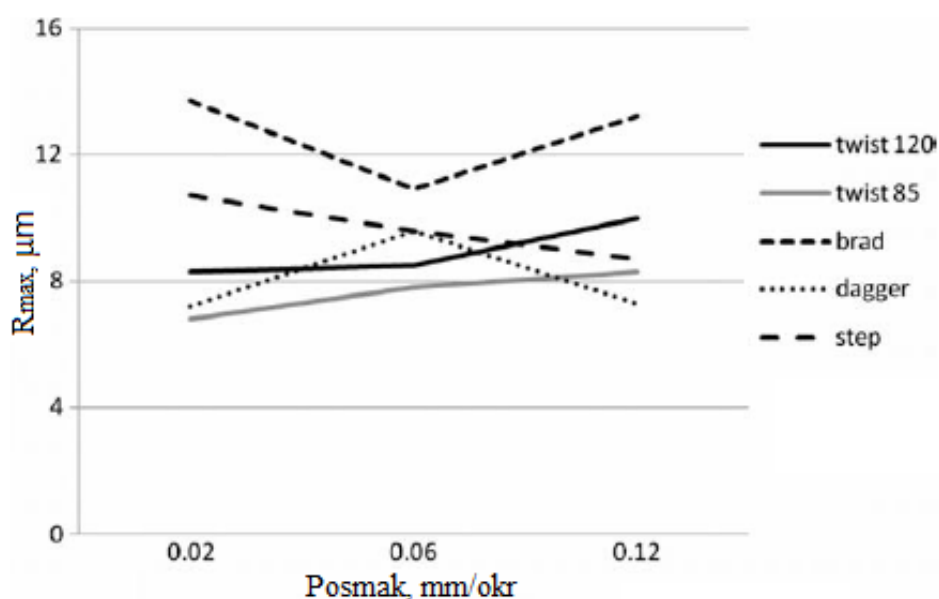
Slika 29 Ovisnost aksijalne sile o posmaku i dubini bušenja [23]

Eksperimentom je utvrđen jasan trend rasta faktora raslojavanja s povećanjem posmaka, što je prikazano na slici 30. Faktor raslojavanja F_d definiran je kao: $F_d = \frac{D_{max}}{D}$, gdje D predstavlja promjer provrta, a D_{max} najudaljeniju točku raslojavanja od središta provrta. Također je bitno uočiti da se klasično spiralno svrdlo s kutom vrha od 120°, za koje je aksijalna sila bila najveća, pokazalo najpovoljnijim kad je riječ o raslojavanju, odnosno da aksijalna sila i raslojavanje nisu nužno direktno povezani.



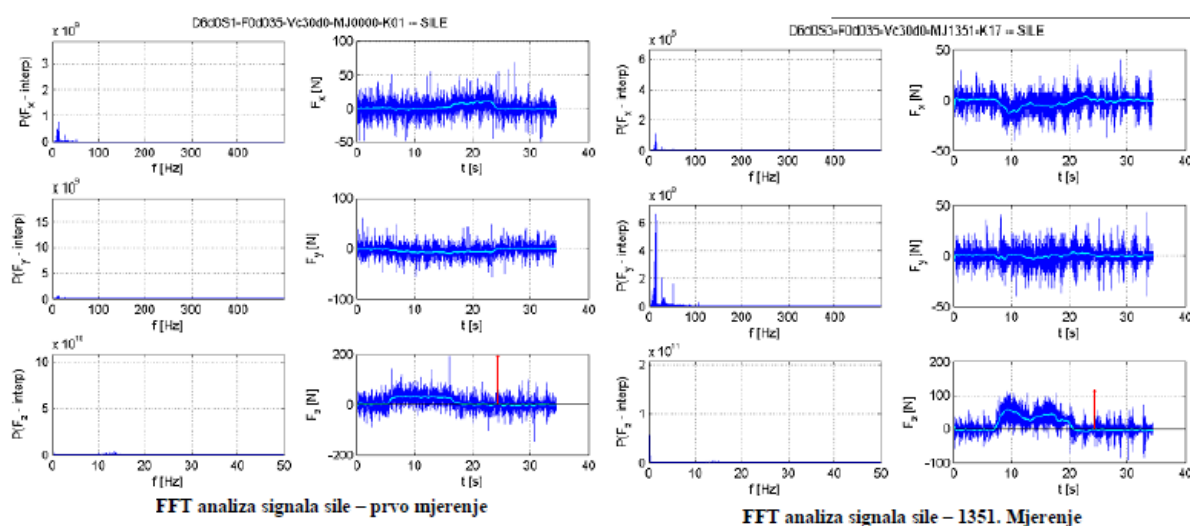
Slika 30 Utjecaj posmaka na faktor raslojavanja [23]

Dijagram na slici 31 prikazuje ovisnost kvalitete rupe o posmaku. Autori kvalitetu rupe ne smatraju dovoljno bitnim parametrom da bi utjecao na izbor alata. Razlog tome je činjenica da je rasipanje rezultata mjerenja veliko kao i velik broj faktora koji utječu na kvalitetu rupa, kao npr. broj i orijentacija vlakana i sl. Provrti bušeni klasičnim spiralnim svrdlima imali su najmanju hrapavost površine. Zaključak je da se lošija kvaliteta obrađene površine postiže obradom na srednjim vrijednostima posmaka, ali da utjecaj posmaka na kvalitetu rupe nije velik.

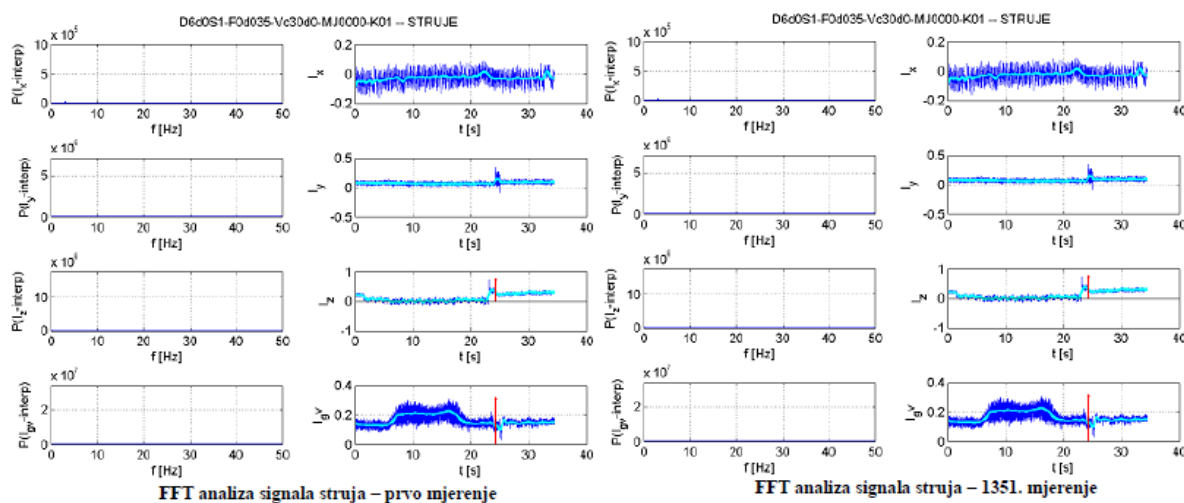


Slika 31 Ovisnost kvalitete rupe o posmaku [23]

U [3] je cilj bio istražiti utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na raslojavanje tijekom bušenja kompozita [3]. Tijekom eksperimenta snimani su signali struje posmičnih i glavnog motora, sile rezanja (X, Y, Z os) i vibracije (X, Y, Z os). Također je korišten senzor akustične emisije i vizijski sustav. Korišteno je spiralno svrdlo proizvođača Walter Titex, model A1163. Ispitni uzorci su bili izrađeni od polimernog kompozita ojačanog staklenim vlaknima Najprije je izveden pretpokus s ciljem utvrđivanja parametara za koje je raslojavanje najmanje, pošto je pri bušenju s kataloškim parametrima raslojavanje bilo neprihvatljivo veliko. Najmanje raslojavanje je bilo pri brzini rezanja 30 m/min i posmaku 0,035 mm/okr, pa su ti parametri odabrani za glavni pokus. U glavnom pokusu izvodilo se bušenje tijekom kojeg su snimani direktni i indirektni signali s ciljem izdvajanja značajki osjetljivih na istrošenost alata [3]. Na slikama 32 i 33 prikazane su neke izdvojene značajke sile i struja.

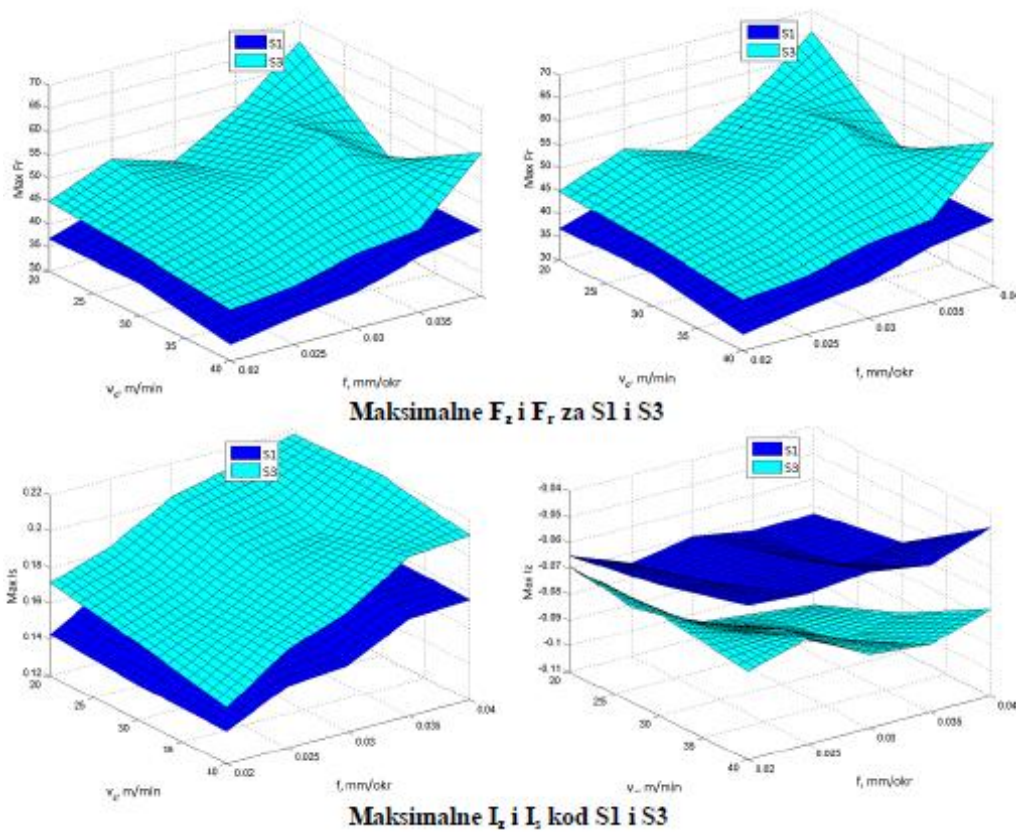


Slika 32 Analiza sile u glavnom pokusu [3]

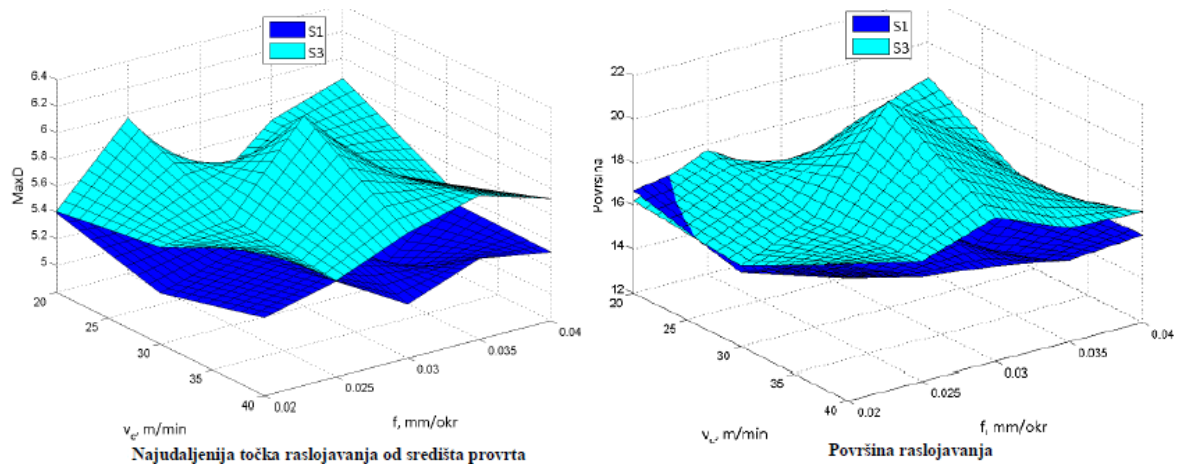


Slika 33 Analiza struja glavni pokus [3]

Nakon glavnog pokusa, proveden je još jedan pokus (s istrošenim svrdlom – S3) čiji su rezultati uspoređeni s onima iz pretpokusa (oštro svrdlo – S1). Kao što se vidi na 3D dijagramima površine se nigdje ne preklapaju, odnosno struje i sile su veće nakon glavnog pokusa nego prije njega, što je i logično zbog zatupljenja svrdla.



Slika 34 Usporedba sila i struja prije i nakon glavnog pokusa [3]



Slika 35 Utjecaj brzine rezanja i posmaka na raslojavanje [3]

Iz slike 35 se jasno vidi da su oba parametra raslojavanja veća nakon glavnog pokusa, što je također za očekivati zbog istrošenja svrdla.

Trend povećanja raslojavanja zbog trošenja alata za vrijeme glavnog pokusa nije uočen, što se pripisuje nedovoljno istrošenom alatu za vrijeme glavnog pokusa (izbušeno 1530 provrta) i nehomogenosti materijala.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Cilj i metodologija ispitivanja

Cilj ovog diplomskog rada je ispitati utjecaj stupnja istrošenosti alata i parametara obrade na kvalitetu obrade, točnije na raslojavanje pri bušenju polimernog kompozita ojačanog staklenim vlaknima. U tu je svrhu osmišljen pokus bušenja kompozita koji je proveden u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Pokus je proveden u dva dijela: pretpokus i glavni pokus.

Cilj pretpokusa bio je utvrditi parametre, brzinu rezanja i posmak/posmičnu brzinu, koji će se koristiti u glavnom pokusu.

Nakon pretpokusa uslijedilo je provođenje glavnog pokusa. Odabrane su 4 brzine rezanja i 4 posmaka, što zajedno daje 16 kombinacija posmaka i brzine rezanja. Svaka od 16 kombinacija za ukupno 4 stupnja istrošenosti ponavljana je 10 puta. Tijekom izvođenja glavnog pokusa kontinuirano su snimani signali sila rezanja i jakosti struja, a periodički je slikana i rezna oštrica. Takvo prikupljanje podataka osmišljeno je kako bi se u budućim istraživanjima mogli utvrditi korelacijski odnosi između značajki snimljenih signala i stanja rezne oštrice, odnosno parametara raslojavanja. Nakon što je završeno bušenje industrijskom kamerom fotografirane su ulazne i izlazne strane provrta. Prikupljene fotografije obrađene su u programskom paketu Catia V5R20 i na temelju njih je određena površina raslojavanja. Time su stvorene pretpostavke za realizaciju klasifikacijskih modela trošenja alata i raslojavanje površine.

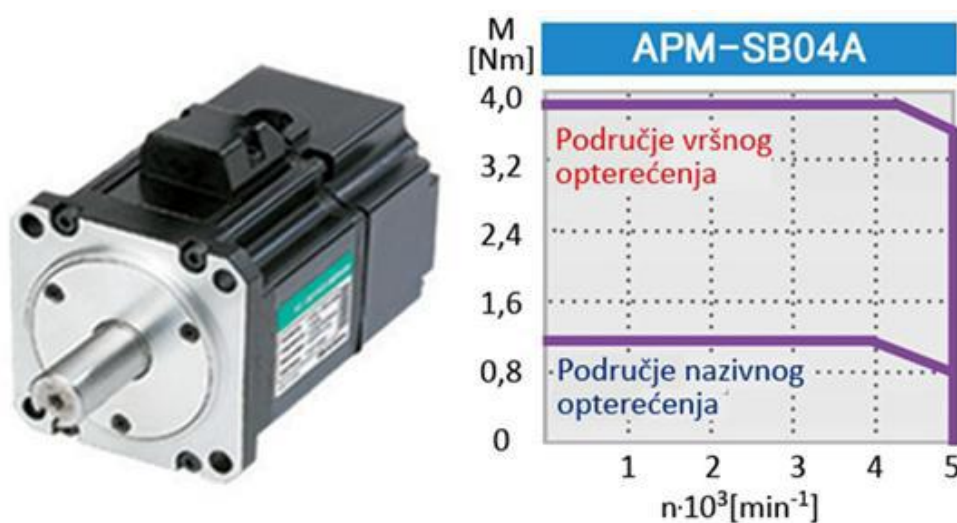
U nastavku rada dane su informacije o opremi, alatu i ispitnim uzorcima koji su korišteni u pokusima.

5.2. Stroj

Stroj na kojem se izvodilo bušenje je 3 osna glodalica, sa 3 translacijske osi i vertikalnim glavnim vretenom. Glavni prigon je izveden direktno, odnosno na motor je montiran odgovarajući prihvat alata. Posmični prigon je izveden kombinacijom kliznih vodilica i kugličnog navojnog vretena. Prigoni su dimenzionirani na način da očekivani poremećaji u signalima budu mjerljivi s obzirom na očekivane sile. Identični sinkroni servo motori s permanentnim magnetima odabrani su za glavni i posmični prigon. Tip motora je APMSB04ADK, a proizvođač je Mecapion Ltd. Karakteristike motora dane su u tablici 5.

Tablica 5 Karakteristike pogonskih motora [24]

	Vrijednost	Jedinica
Nazivna snaga	400	W
Nazivni moment	1,274	N·m
Maksimalni moment	3,822	N·m
Moment inercije	0,321	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\times 10^4$
Nazivna učestalost vrtnje	3000	min^{-1}
Nazivna jakost struje	2,89	A_{RMS}
Maksimalna učestalost vrtnje	5000	min^{-1}
Rezolucija enkodera	3000	impulsa/okretaju
Konstanta momenta vrtnje motora (K_T)	0,46	$\text{N}\cdot\text{m}/A_{\text{RMS}}$
Naponska konstanta vrtnje motora (K_V)	29,5	$V_{\text{RMS}}/(\text{min}^{-1}\times 10^3)$



Slika 36 Sinkroni servo motor s permanentnim magnetima tip APMSB04ADK [24]

Osnovne karakteristike stroja dane su u tablici 6.

Tablica 6 Karakteristike stroja [24]

		Iznos	Jedinica
Hod osi	X	350	mm
	Y	450	
	Z	55	
	C	± 360	°
Korak navojnog vretena osi	X,Y,Z	5	mm
Maksimalna posmična brzina osi	X,Y,Z	15	m/min
	C	18000	°/s
Maksimalni brzi hod osi	X,Y,Z	25	m/min
	C	30000	°/s
Nazivna učestalost vrtnje GV		3000	min^{-1}
Maksimalna učestalost vrtnje GV		5000	min^{-1}
Rezolucija pozicioniranja osi	X,Y,Z	0,4166	μm
	C	0,03	°
Dopušteno nazivno opterećenje osi	X,Y,Z	160	N
	C	1,274	
Maksimalno dopušteno opterećenje osi	X,Y,Z	500	N
	C	3,822	N·m

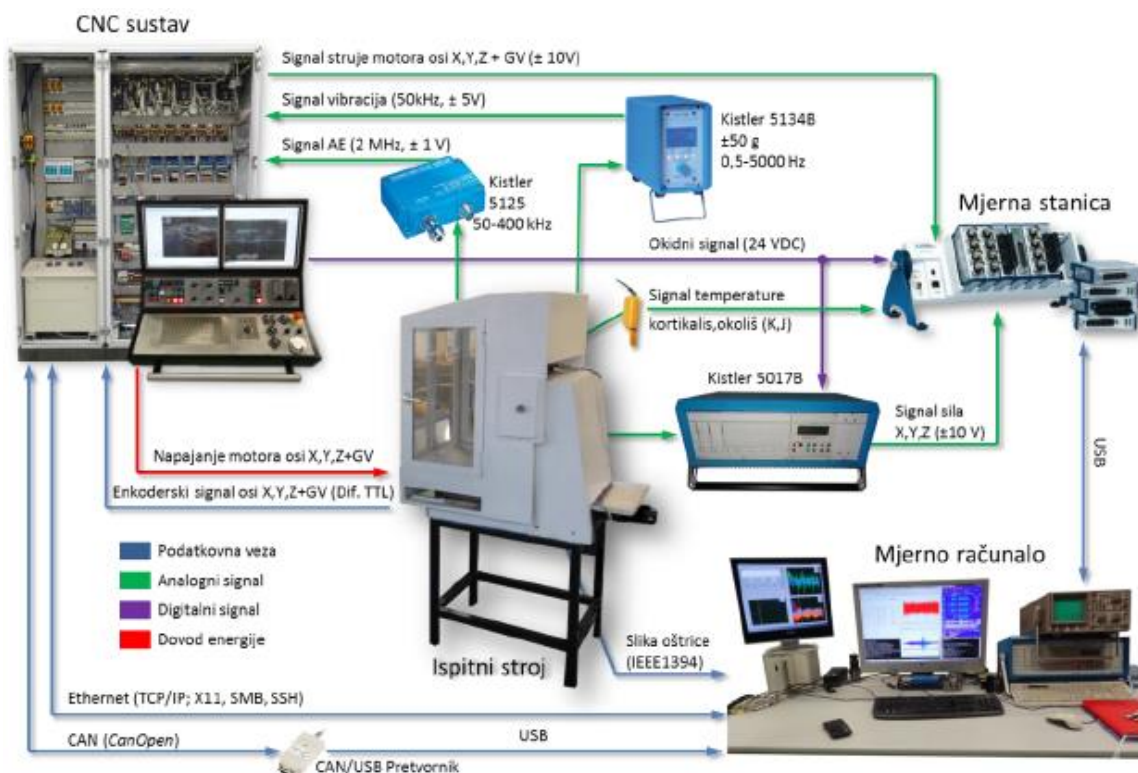


Slika 37 Radni prostor stroja; 1. Posmični prigon X osi, 2. Posmični prigon Y osi, 3. Posmični prigon Z osi, 4. Glavno vreteno, 5. Stezna naprava, 6. Senzor sile, 7. Ispitno svrdlo, 8. Industrijska kamera s rasvjetom, 9. Ispitni uzorak.

Na slici 37 prikazan je radni prostor stroja, gdje se vidi specijalna stezna naprava izrađena za potrebe izrade [3], senzor sile koji je smješten ispod stezne naprave, industrijska kamera s rasvjetom, kao i ostali osnovni dijelovi stroja.

5.3. Mjerni sustav

Mjerni sustav, čija je cjelovita struktura prikazana na slici 38, sastoji se od senzora sila i pripadajućeg pojačala, industrijske kamere s telecentričnim objektivom i rasvjetom, mjernog računala i mjerne aplikacije.



Slika 38 Struktura mjernog sustava [24]

Mjerno je računalo osim za pogon mjerne aplikacije istovremeno korišteno i kao poslužitelj za udaljeno prikazivanje korisničkog sučelja CNC sustava. Takvim je pristupom omogućena brza izmjena stanja pokusa, a time i brže izvođenje pokusa uz smanjenu mogućnost ljudske greške [24]. Popis veličina i mjernih sustava koji su korišteni kod izvođenja pokusa dan je u tablici 7.

Tablica 7 Popis veličina i mjernih sustava

Mjerena veličina	Mjerni sustav	Prikupljanje signala	
		Upravljačkim sustavom stroja	Vanjskim mjernim sustavom
Jakost struje posmičnih motora	Servo regulatori	✓	✓
Jakost struje glavnog motora		✓	✓
Sile rezanja u smjeru X, Y i Z osi	Senzor sila s pojačalom	✓	✓
Posredni parametri trošenja	Industrijska kamera		✓

5.3.1. Senzor sila

Za mjerenje signala sila korišten je mjerni sustav kojeg čine tro-komponentni piezo-električni senzor sila proizvođača Kistler Holding AG, model 9257B u kombinaciji s odgovarajućim nabojnim pojačalom također proizvođača Kistler Holding AG, model 5017B. Kao što je ranije spomenuto sam senzor ugrađen je ispod stezne naprave na posmičnom prigonu x osi. Pojačalo je prikazano na slici 39, senzor na slici 40.



Slika 39 Nabojno pojačalo Kistler 5017B [25]



Slika 40 Senzor sila Kistler 9257B [26]

U tablici 8 dane su osnovne tehničke karakteristike mjernog sustava.

Tablica 8 Osnovne tehničke karakteristike mjernog sustava sila rezanja [24]

		Područje	Jedinica
Senzor sila (tip 9257B)	Mjerno područje	F_x, F_y	-5 ... 5
		F_z	-5 ... 10
	Maksimalne dozvoljene sile	F_x, F_y	-7,5/7,5
		F_z	-7,5/15
	Osjetljivost	F_x, F_y	-7,5
		F_z	-3,7
	Prag osjetljivosti		<0,01
Linearnost u mjernog područja		<±1	%
Prag histereze mjernog područja		<0,5	%
Nabojno pojačalo (tip 5017B)	Broj kanala	3 (do 8)	
	Mjerno područje (podesivo po kanalu)	$\pm 10 \dots 10^6$	pC
	Frekvencijsko područje	0 ... 200	kHz
	Osjetljivost (podesiva po kanalu)	0,01 ... 9990	pC/N
	Skaliranje mjerne veličine (podesivo po kanalu)	$0,001 \dots 10^7$	N/V
	Izlazni signal (po kanalu)	±10	V

5.3.2. Vizijski sustav

Vizijski sustav koji je služio za periodičko direktno mjerenje istrošenosti rezne oštrice sastoji se od industrijske kamere proizvođača Imaging Source Europe GmbH model DMK41AF02, telecentričnog objektiva proizvođača Opto Engineering S.r.l. model TC2309 i prstenaste led rasvjete. Intenzitet rasvjete moguće je podešavati u nekoliko razina podešavanjem ulaznog napona (maksimalno 12V). Kompletan vizijski sustav smješten je na nosač fiksiran za posmični prigon X osi i orijentiran na način da u određenoj poziciji svrdla (jednoj od nul-točaka) optička os kamere odgovara normali glavne oštrice svrdla. Obradom fotografija snimljenih vizijskim sustavom kvantificirana je istrošenost mjerne oštrice mjerenjem širine područja trošenja na stražnjoj površini alata (VB , VB_{max}), odnosno parametra koji se u ovom slučaju smatra najznačajnijim parametrom trošenja. Na slici 41 prikazana je kamera i odgovarajući telecentrični objektiv.



Slika 41 Kamera tip DMK41AF02 i telecentrični objektiv TC2309 [24]

Osnovne tehničke karakteristike vizijskog sustava dane su u tablici 9.

Tablica 9 Osnovne tehničke karakteristike vizijskog sustava [24]

		Područje	Jedinica	
Kamera (DMK41AF02)	Rezolucija	1280x960	piksela	
	Osjetljivost	0,05	lx	
	Frekv. osvježavanja slike	3,75 ... 15	Hz	
	Format osjetilnog senzora	1/2	in	
	Izvedba osjetilnog senzora	CCD		
	Prihvat objektiva	C/CS		
Objektiv (TC2309)	Faktor povećanja	1,00 ±3 %		
	Vidno polje (za format senzora 1/2")	6,4x4,8	mm	
	Radna udaljenost	63,3±2	mm	
	Dubinska oštrina	0,9	mm	
	Distorzija	tipična	<0,04	%
		maksimalna	0,08	
	Telecentričnost	tipična	<0,08	°
		maksimalna	0,10	
Izvedba prihvata		C		
Rezolucija mjernog sustava u opisanoj konfiguraciji		5	µm	

5.3.3. Programska podrška mjernog sustava

Kao što se može vidjeti u tablici 7 tijekom bušenja je uz upravljački sustav stroja korištena i mjerna aplikacija razvijena u LabView-u, paketu proizvođača National Instruments. Mjerna aplikacija je u provođenju pokusa imala višeznačnu ulogu i korištena je za [24]:

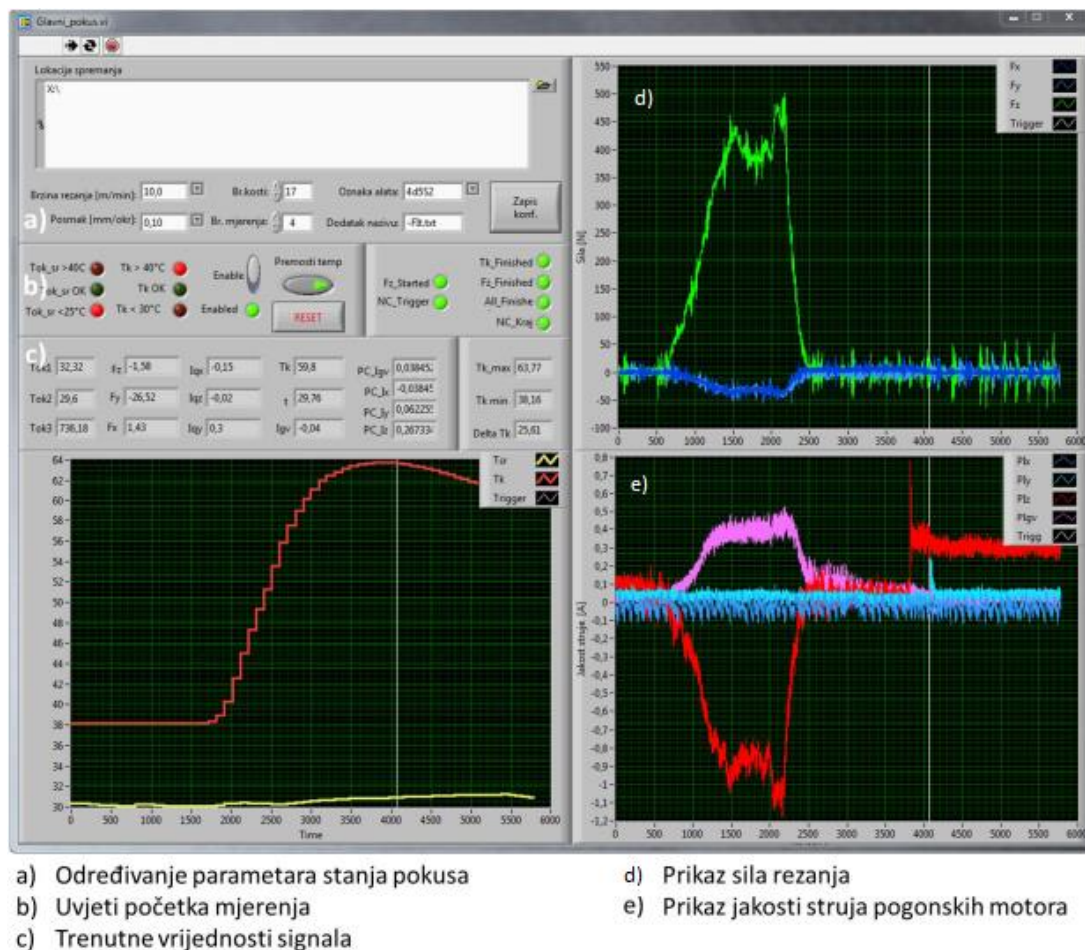
- zadavanje parametara stanja pokusa (parametara obrade) na osnovi kojih je generiran odgovarajući NC program
- kontinuirano snimanje svih signala procesa obrade povezanih s mjernom stanicom i CAN sabirnicom
- vizualnu i numeričku verifikaciju dobivenih rezultata, čime je uvjetovano prihvaćanje ili odbacivanje pojedinog ciklusa mjerenja
- generiranje mjerne datoteke.

Mjerna je aplikacija izvedena na način da se izvršava u više niti, od kojih se prva koristi za upravljanje mjernom stanicom, druga za prikupljanje signala jakosti struja iz CAN sabirnice, a treća za prikaz podataka u sklopu korisničkog sučelja. Tijekom samog bušenja mjerene veličine su prikazivane samo numerički. Grafički su prikazivane tek nakon završenog ciklusa bušenja, s ciljem vizualne verifikacije rezultata, kako ne bi došlo do nepovoljnog utjecaja na frekvenciju

uzorkovanja. Parametri određenog stanja pokusa ručno su unášani u korisničko sučelje, a za svako stanje pokusa potrebno je bilo definirati sljedeće parametre [24]:

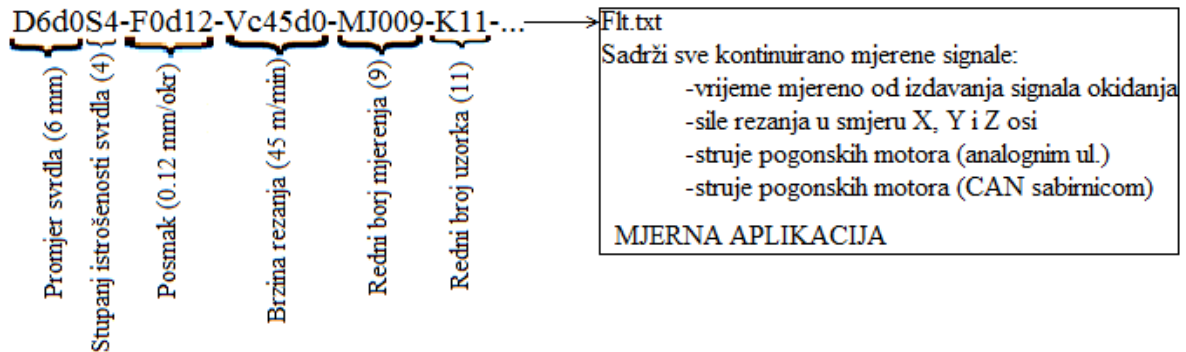
- parametri obrade:
 - o posmak (mm/okretaju svrdla),
 - o brzina rezanja (m/min);
- redni broj uzorka;
- broj ponavljanja pokusa;
- promjer svrdla i stupanj istrošenosti svrdla.

Nakon unošenja i potvrde potrebnih parametara generira se NC kod, koji se onda mrežnim putem prebacuje u NC računalo. Zadani parametri definiraju učestalost vrtnje glavnog vretena (brzinu rezanja) i posmičnu brzinu. NC kod također opisuje trajektoriju. Tim dijelom određena je dubina bušenja (18mm) i razmak između središta susjednih provrta (21mm), čime je osiguran prolaz cilindričnog dijela svrdla kroz čitavu debljinu uzorka, odnosno razmak pri kojem se smatralo da raslojavanje iz prethodnog provrta neće utjecati na raslojavanje susjednog provrta. Na slici 42 prikazano je korisničko sučelje mjerne aplikacije.



Slika 42 Korisničko sučelje mjerne aplikacije [24]

Nakon završetka svakog mjernog ciklusa generirana je datoteka koja sadrži signale prikupljene kontinuiranim snimanjem tijekom obrade. Datotekama su dodjeljivani nazivi iz kojih se lako iščitava stanje pokusa i vrsta signala pohranjenog u datoteci (slika 43).



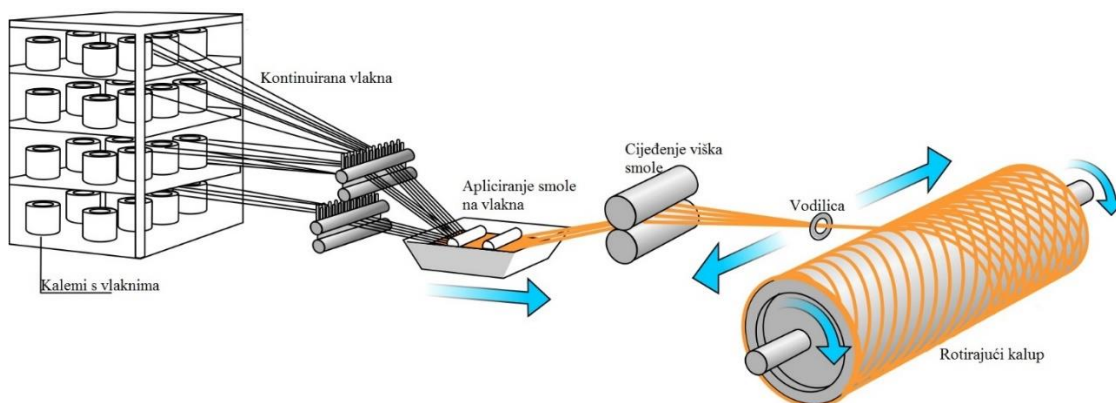
Slika 43 Primjer mjerne datoteke nastale nakon jednog ciklusa mjerenja

6. PLAN POKUSA I ANALIZA SIGNALA

U ovom poglavlju detaljno je opisan plan pokusa, mjerenje parametara procesa i njihova analiza. U prvom dijelu opisan je plan pokusa, ispitni uzorci, alat i način izvedbe pokusa. U nastavku su prikazani signali i analizirana je njihova ovisnost o stupnju istrošenosti rezne oštrice i utjecaj na iznos raslojavanja.

6.1. Ispitni uzorci

Ispitni uzorci izrezani su iz kompozitne cijevi proizvođača tvrtke Domitran Novitas d.o.o. Materijal cijevi je kompozit s polimernom matricom (nezasićena poliesterska smola) ojačan staklenim vlaknima, s udjelom ojačala od oko 60%. Dimenzije uzoraka su 180x100x10 mm. Cijev je izrađena postupkom namatanja kontinuiranih vlakana na rotirajući kalup, koji je shematski prikazan na slici 44.



Slika 44 Shematski prikaz postupka namatanja vlakana [27]

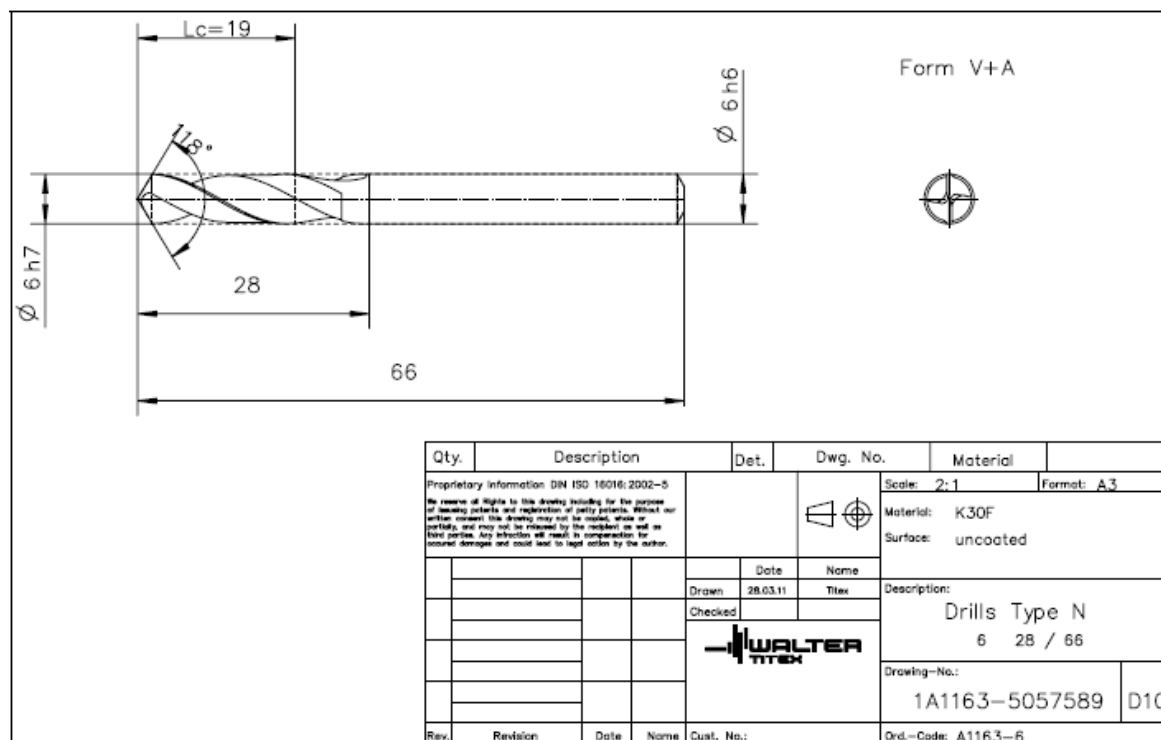
Ispitni uzorci prikazani su na slici 45.



Slika 45 Ispitni uzorci

6.2. Ispitno svrdlo





Za izvođenje pokusa odabrano je svrdlo izrađeno od tvrdog metala, model A1163, proizvođača Walter Titex. Promjer svrdla je 6 mm, vršni kut 118°, a ostale dimenzije prikazane su na slici 46. Ispitana su 4 stupnja istrošenosti navedenog svrdla.



Slika 46 Crtež svrdla A1163, Walter Titex

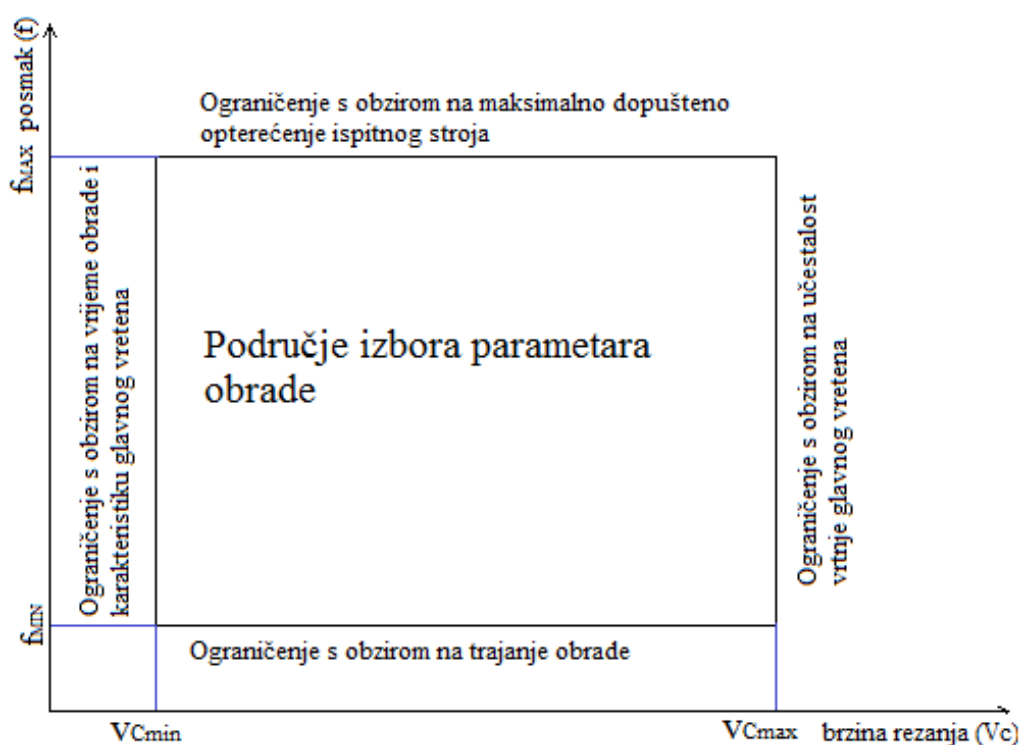
Preporučeni parametri obrade za navedeno svrdlo dani su u tablici 10.

Tablica 10 Preporučeni parametri za svrdlo A1163

A1163		Feed F (mm) for dia. (mm)																														
N		VRR																														
DIN 6539																																
1.00 – 12.00		2	2,5	4	5	6	8	10	12	15	20																					
K30F		1	0,007	0,008	0,013	0,017	0,018	0,021	0,024	0,026	0,029	0,033																				
uncoated		2	0,013	0,017	0,027	0,033	0,037	0,042	0,047	0,052	0,058	0,067																				
B 36		3	0,020	0,025	0,040	0,050	0,055	0,063	0,071	0,077	0,087	0,10																				
		4	0,027	0,033	0,053	0,067	0,073	0,084	0,094	0,10	0,12	0,13																				
		5	0,033	0,042	0,067	0,083	0,091	0,11	0,12	0,13	0,14	0,17																				
		6	0,040	0,050	0,080	0,10	0,11	0,13	0,14	0,15	0,17	0,20																				
																																
																																
																																
<table border="1"> <tr> <td>V_r</td> <td>VRR</td> <td></td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>12</td> <td>E O</td> </tr> <tr> <td>67</td> <td>5</td> <td>L</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>5</td> <td>L</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>5</td> <td>L</td> </tr> <tr> <td>67</td> <td>5</td> <td>L</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>5</td> <td>L</td> </tr> </table>		V _r	VRR		40	12	E O	67	5	L	30	5	L	20	5	L	67	5	L	20	5	L										
V _r	VRR																															
40	12	E O																														
67	5	L																														
30	5	L																														
20	5	L																														
67	5	L																														
20	5	L																														

6.3. Planiranje pokusa

Planiranje pokusa sastojalo se od više faza. Najprije je bilo potrebno odabrati i izraditi uzorke, te odabrati alat. Uzorci i alat prethodno su detaljno opisani. Nakon odabira alata i ispitnih uzoraka uslijedilo je izvođenje pretpokusa s ciljem utvrđivanja parametara obrade za glavni pokus. Kriterij za gornju granicu parametara (brzina rezanja i posmak) je bilo maksimalno dopušteno opterećenje ispitnog stroja, te nazivna i maksimalna učestalost vrtnje glavnog vretena. S druge strane minimalna brzina rezanja uvjetovana je karakteristikom glavnog motora, dok je minimalni posmak uvjetovan minimalnim prihvatljivim vremenom obrade. Područje izbora parametara prikazano je na slici 47.



Slika 47 Područje izbora parametara obrade

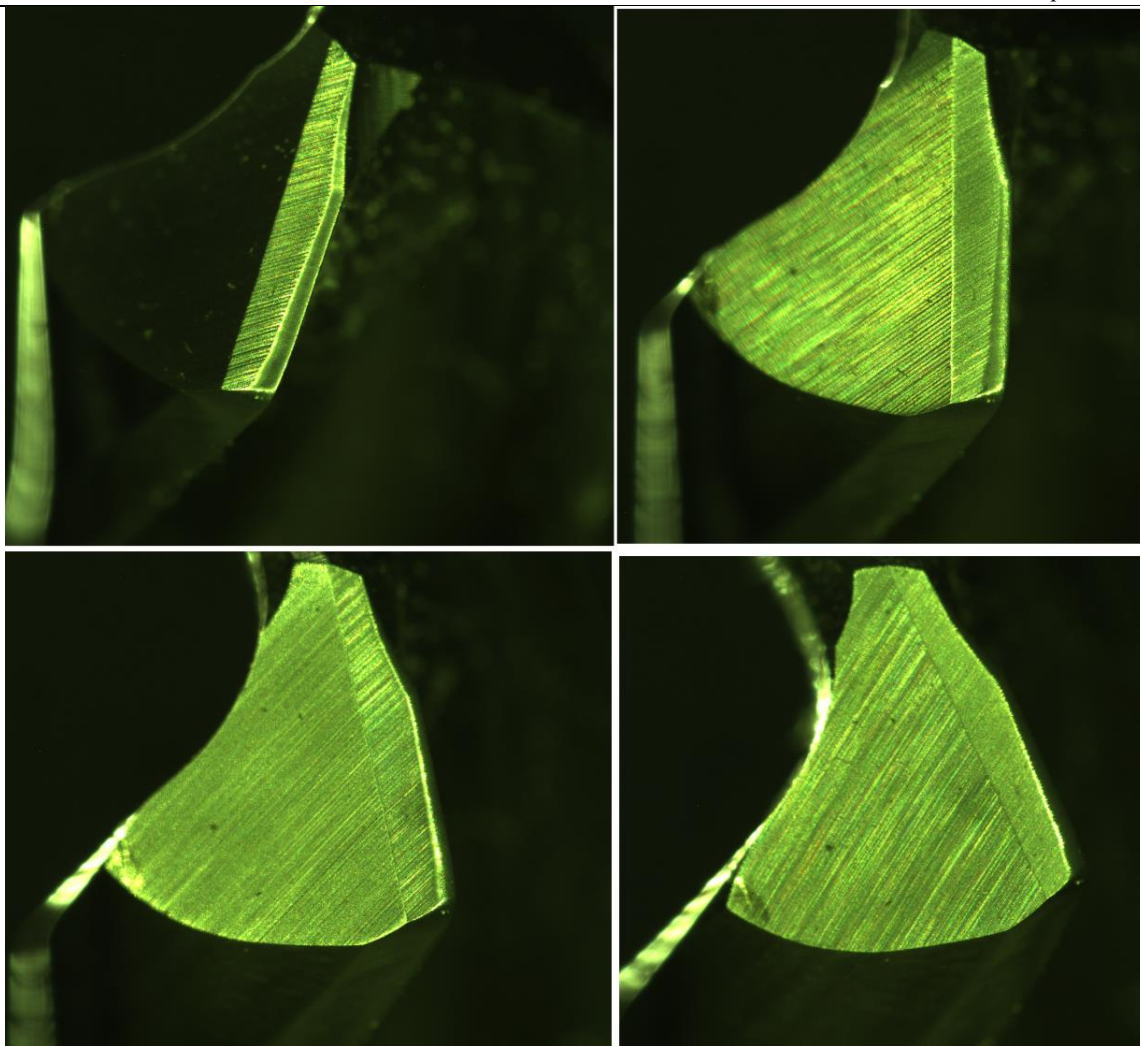
Nakon što su utvrđeni parametri uslijedilo je izvođenje glavnog pokusa. Odabrane su 4 brzine rezanja i 4 posmaka, što daje 16 različitih kombinacija posmaka i brzina rezanja. Postavljeno je ukupno 64 stanja pokusa, odnosno svaka od 16 kombinacija posmaka i brzine rezanja je za svaki od 4 stupnja istrošenosti svrdla (S1, S2, S3 i S4) ponovljena 10 puta, čime je ukupno prikupljeno 640 mjerenja. U tablici 11 prikazani su režimi obrade odabrani u pretpokusu.

Tablica 11 Režimi obrade korišteni u glavnom pokusu

Promjer svrdla	Brzina rezanja	Posmak	Učestalost vrtnje G.V.	Posmična brzina	Dubina bušenja	Vrijeme bušenja	Broj ponavljanja za svaki stupanj istrošenosti
d_1	v_c	f	$n = \frac{v_c * 10^3}{d_1 * \pi}$	$v_f = f * n$	a_p	$t_b = \frac{a_p * 60}{v_f}$	
mm	m/min	mm/okr.	min ⁻¹	mm/min	mm	s	
6	15	0,03	796,2	23,9	18	45,2	10
	30		1592,4	47,8		22,6	
	45		2388,5	71,7		15,1	
	60		3184,7	95,5		11,3	
	15	0,06	796,2	47,8		22,6	
	30		1592,4	95,5		11,3	
	45		2388,5	143,3		7,5	
	60		3184,7	191,1		5,7	
	15	0,09	796,2	71,77		15	
	30		1592,4	143,3		7,5	
	45		2388,5	215		5	
	60		3184,7	286,6		3,8	
	15	0,12	796,2	95,5		11,3	
	30		1592,4	191,1		5,7	
	45		2388,5	286,6		3,8	
	60		3184,7	382,2		2,8	

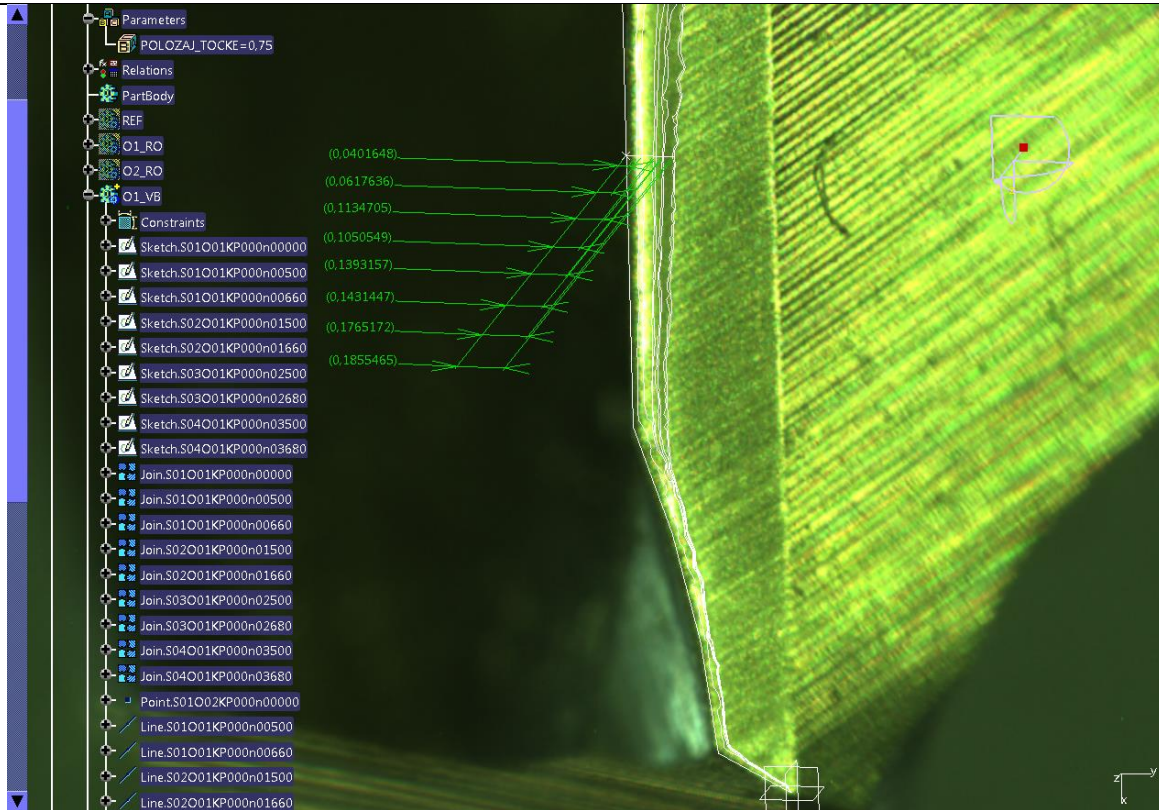
6.4. Određivanje istrošenosti svrdla

Istrošenost se direktno određivala na temelju fotografija oštrice reznog alata. Za svaki stupanj istrošenosti oštrice su fotografirane 2 puta, prije i nakon izvođenja kompleta bušenja (npr. za 3. stupanj istrošenosti - S3 svrdlo je fotografirano nakon izbušenih 2500 provrta i nakon 2660 izbušenih provrta). Fotografiranje se izvodilo pomoću odgovarajućeg NC programa. Nakon pokretanja NC programa zatvorena je regulacijska petlja glavnog vretena po poziciji (C os) i svrdlo je dovedeno u prethodno zapamćenu nul-točku odabranu na način da optička os kamere odgovara normali glavne oštrice svrdla. Svrdlo je zauzimalo 7 različitih pozicija s obzirom na C os prilikom čega su snimane fotografije. Za određivanje iznosa trošenja korištene su fotografije oštrice pod kutom od 0°, dok su ostale služile kao pomoć kod identifikacije oblika trošenja. Slika 48 prikazuje primjer fotografiranja jedne oštrice iz 4 različita kuta .



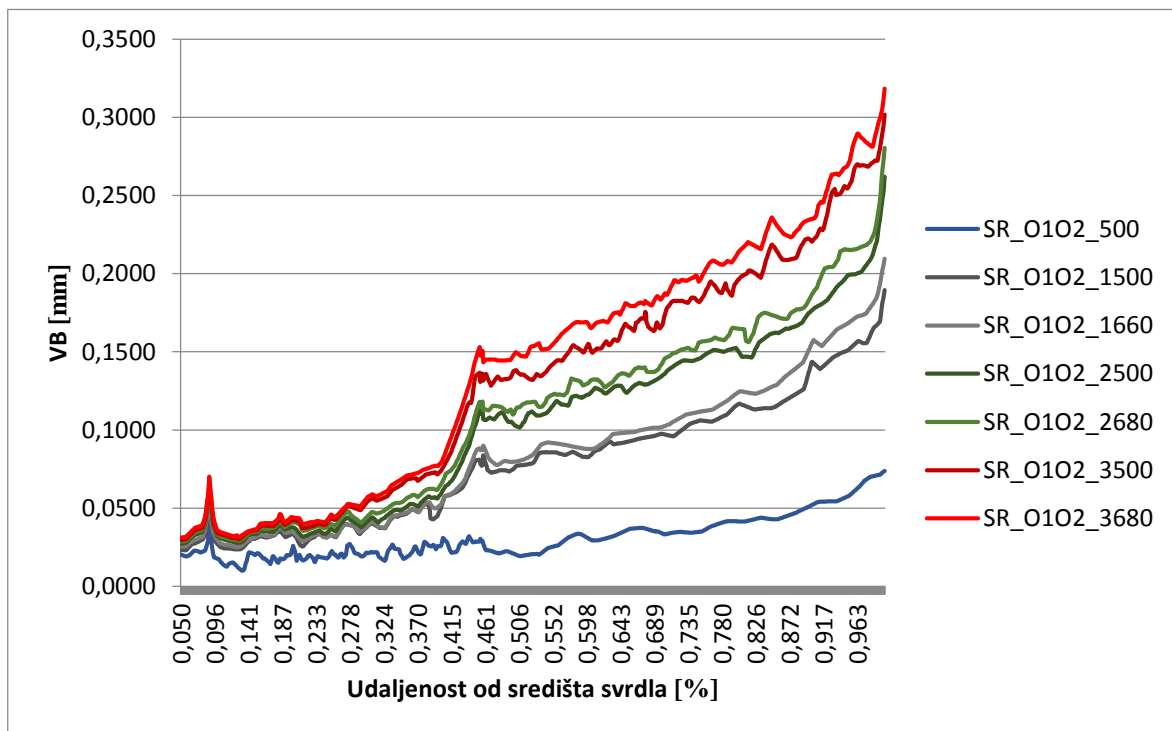
Slika 48 Fotografije rezne oštrice

Nakon prikupljanja fotografija primijenjen je paket Catia V5R20 kako bi se odredili dominantni oblici trošenja i njihovi iznosi. Analiza se provodila ručno u nekoliko koraka. Fotografije oštrice svrdla umjerene su prema prethodno izmjerenim geometrijskim veličinama svrdla i prema fotografiji potpuno oštrog svrdla, te je iscrtan početni oblik svrdla. Nakon toga su fotografije oštrice određenog stupnja istrošenosti pridruživane referentnoj ravnini i referentnom koordinatnom sustavu, a nakon čega je slijedilo iscertavanje rubova zone trošenja. Time su dobivene karakteristične krivulje trošenja određenih oblika trošenja za određene stupnjeve istrošenosti alata. Pregledom fotografija utvrđeno je da je dominantan oblik trošenja, trošenje stražnje površine oštrice. Osim trošenja stražnje površine alata uočeno je i zaobljenje rezne oštrice (od eng. rounding). U daljnjem razmatranju određivao se iznos srednje i maksimalne širine trošenja stražnje površine oštrice.



Slika 50 Određivanje širine trošenja stražnje površine alata

U nastavku su dani dobiveni rezultati.

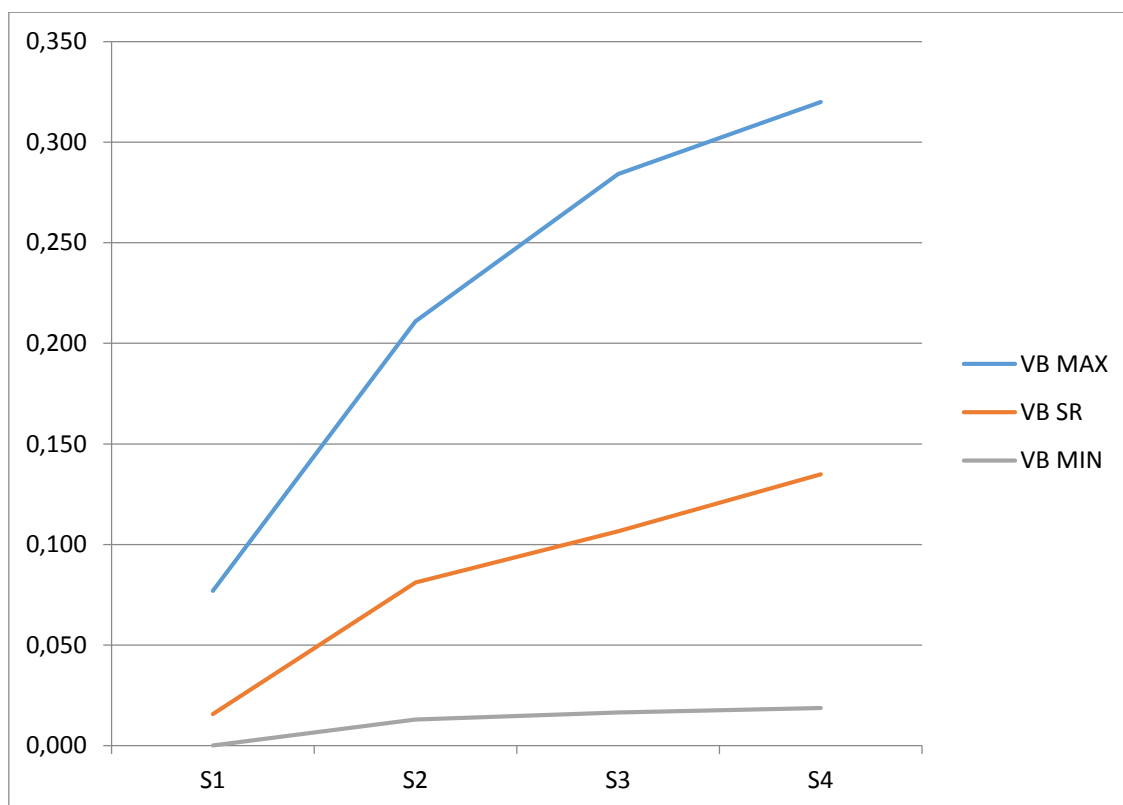


Slika 51 Iznos srednje vrijednosti VB-a na oštrici 1 i 2

Rezultati su pokazali, kao što je i očekivano zbog promjenjive brzine rezanja duž oštrice, relativno malo trošenje stražnje površine alata na dijelu svrdla koji je bliži središtu. Približavanjem vanjskom promjeru oštrice, gdje su brzine rezanje veće, uočava se brža progresija trošenja stražnje površine alata. Na sljedećim slikama i tablicama dane su kvantitativne vrijednosti maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti istrošenosti stražnje površine alata.

Tablica 12 Iznosi istrošenosti stražnje površine alata

	S1	S2	S3	S4
VB_MAX	0,077	0,211	0,284	0,320
VB_SR	0,016	0,081	0,106	0,135
VB_MIN	0,000	0,013	0,017	0,019



Slika 52 Dijagramski prikaz iznosa istrošenosti stražnje površine alata

6.5. Snimanje i obrada signala sila rezanja

Signali sila snimani su u smjeru X, Y i Z osi, pomoću ranije opisanog mjernog sustava. Frekvencija uzorkovanja bila je 1 kHz ($T_{uz} = 1$ ms). Nakon završetka pokusa prikupljeni signali analizirani su u vremenskom i frekvencijskom području. Kao što je i očekivano aksijalna sila F_z , koja je vezana uz rezanje glavnih i poprečne oštrice u smjeru bušenja, bila je dominantna po iznosu. Radijalne sile F_x i F_y , koje su vezane uz interakciju između faznog dijela svrdla i stijenke provrta i uz radijalne pomake svrdla, bile su značajno nižih iznosa. Rezultantna sila dobivena je prema izrazu 1:

$$\mathbf{F_r} = \sqrt{\mathbf{F_x^2} + \mathbf{F_y^2} + \mathbf{F_z^2}}. \quad 1$$

Razmatrana je i sila F_d , resultantna sila u radijalnom smjeru izračunata prema izrazu 2:

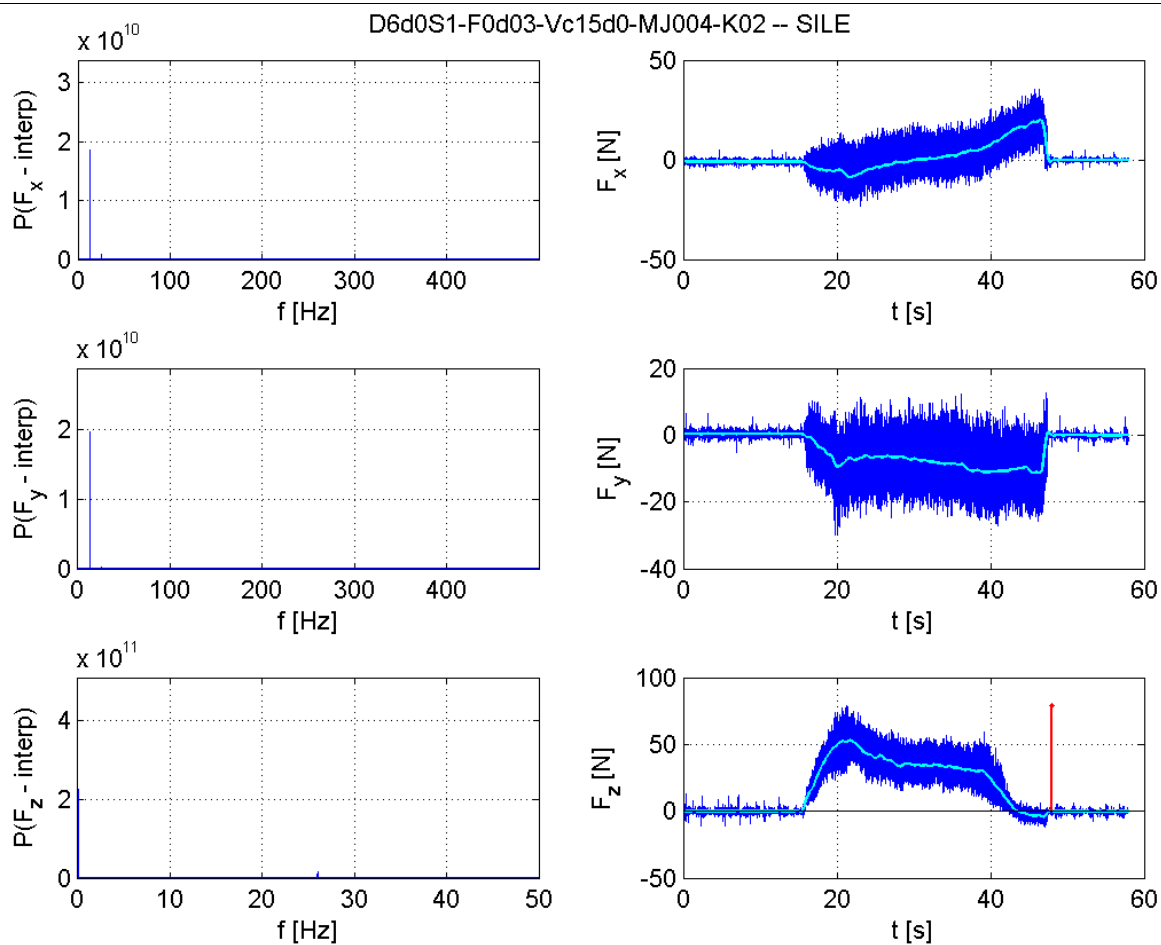
$$\mathbf{F_d} = \sqrt{\mathbf{F_x^2} + \mathbf{F_y^2}}. \quad 2$$

Primjenom programskog paketa MATLAB dobiveni su 3D dijagrami koji prikazuju ovisnost rezultata mjerenja – sila, o ulaznim promatranim parametrima – posmaku i brzini rezanja. U tablici 13 dane su oznake i opisi značajki koje su izdvojene iz signala sila.

Tablica 13 Oznake i opisi značajki izdvojenih iz signala sila

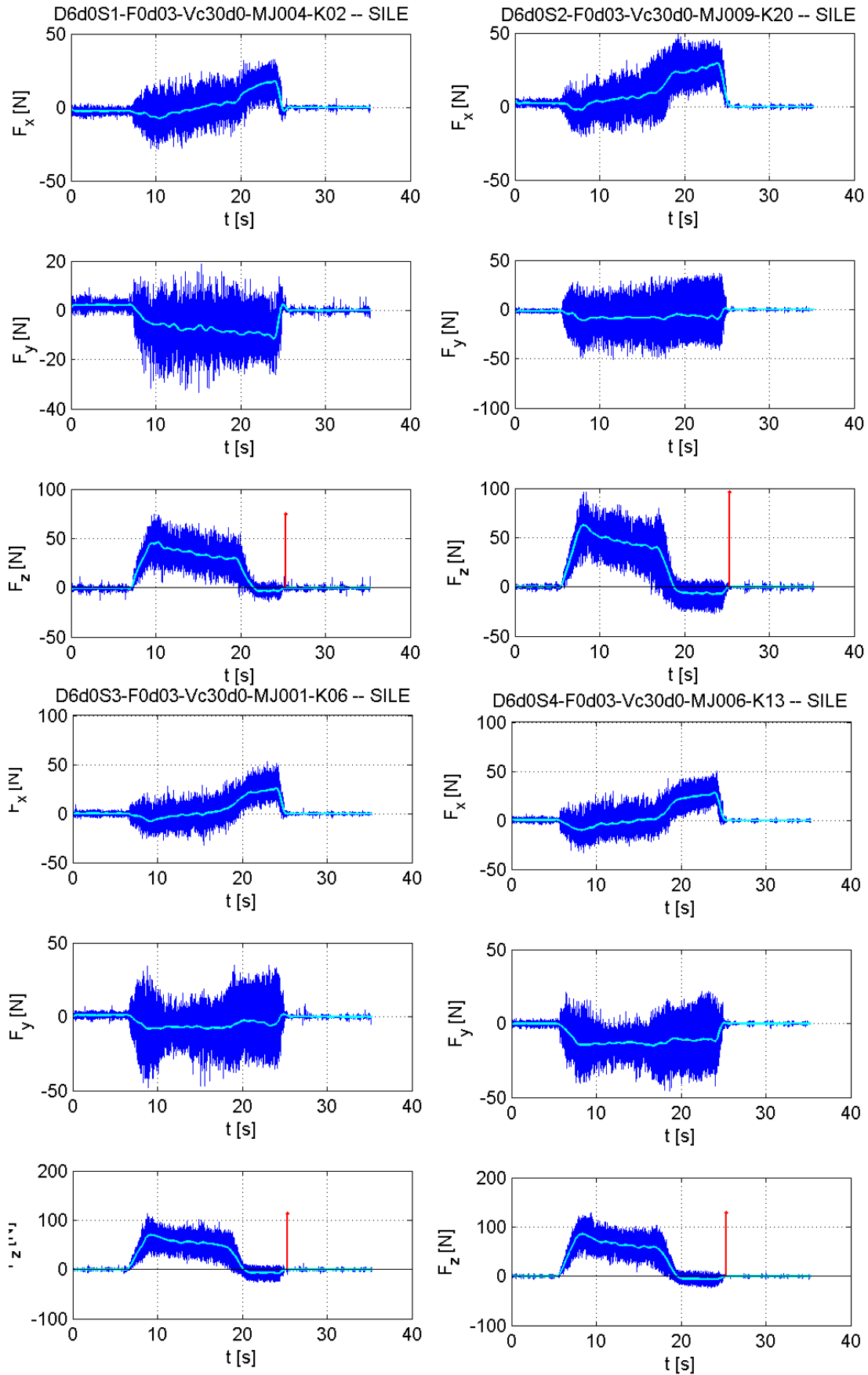
Oznaka	Opis
Max_Fr	Maksimalni iznos sile Fr
Max_Fz	Maksimalni iznos sile Fz
Surf_Fr	Površina ispod krivulje sile Fr
Surf_Fz	Površina ispod krivulje sile Fz
Surf_Fd	Površina ispod krivulje sile Fd

U cilju izdvajanja značajki signala sila rezanja i jakosti struja provedena je Fourierova transformacija, na osnovi čega je određena granična frekvencija i vrsta niskopropusnog filtra. Slika 53 prikazuje primjere signala sila rezanja u frekvencijskom i vremenskom području iz kojih su uočljive dominantne spektralne komponente signala isključivo na frekvenciji oštrice. Svi ostali prikupljeni signali pokazali su identičan trend. Stoga je za filtriranje u vremenskom području odabran niskopropusni Butterworthov filter granične frekvencije 2 Hz. Izvorni, nefiltrirani, signali svih senzora označeni su tamno plavom bojom, dok svjetlo plava boja pokazuje filtrirani signal.

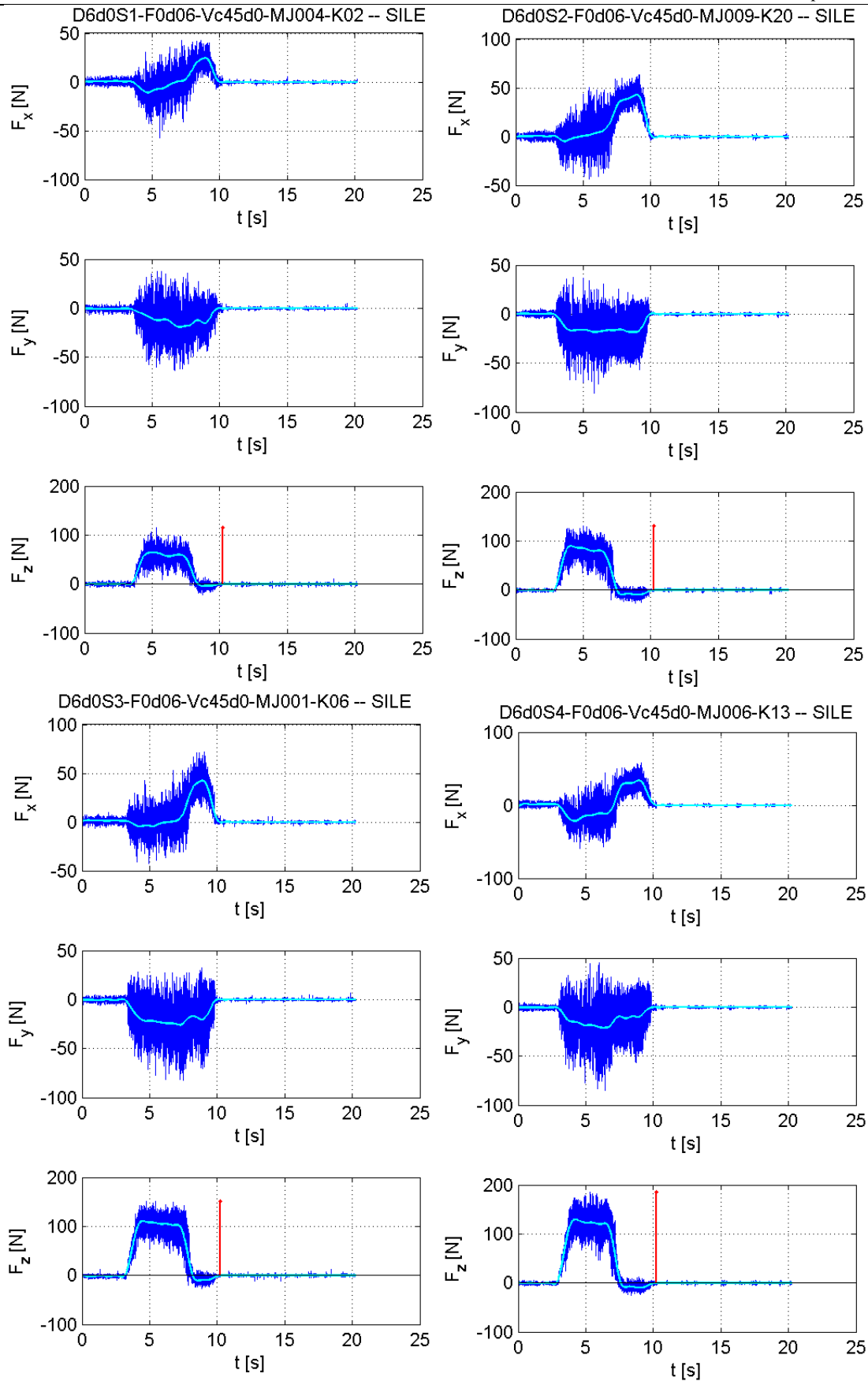


Slika 53 Signali sila rezanja u frekencijskom i vremenskom području

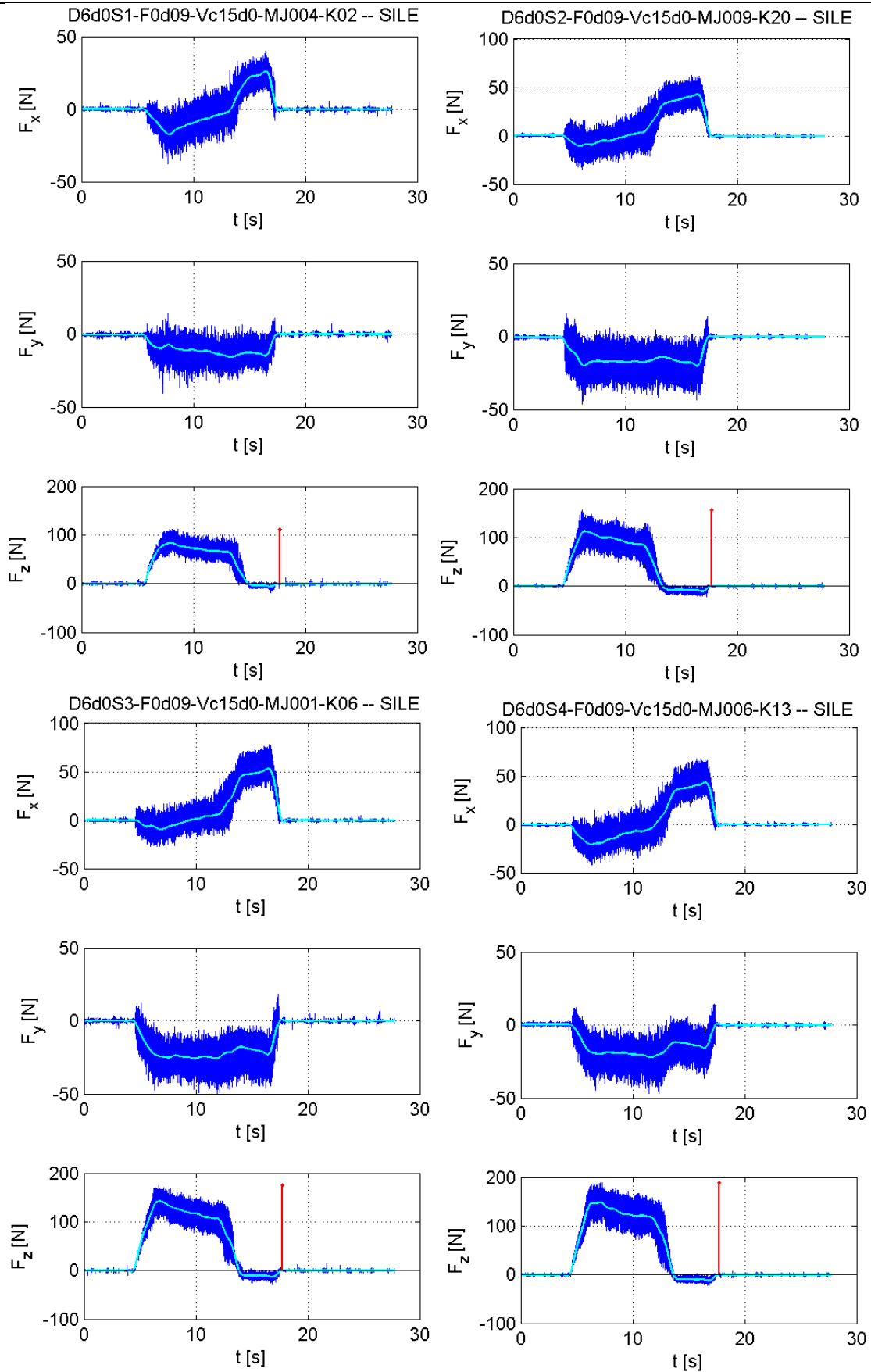
U nastavku su dani neki od rezultata obrade podataka prikupljenih mjerenjem signala sila rezanja.



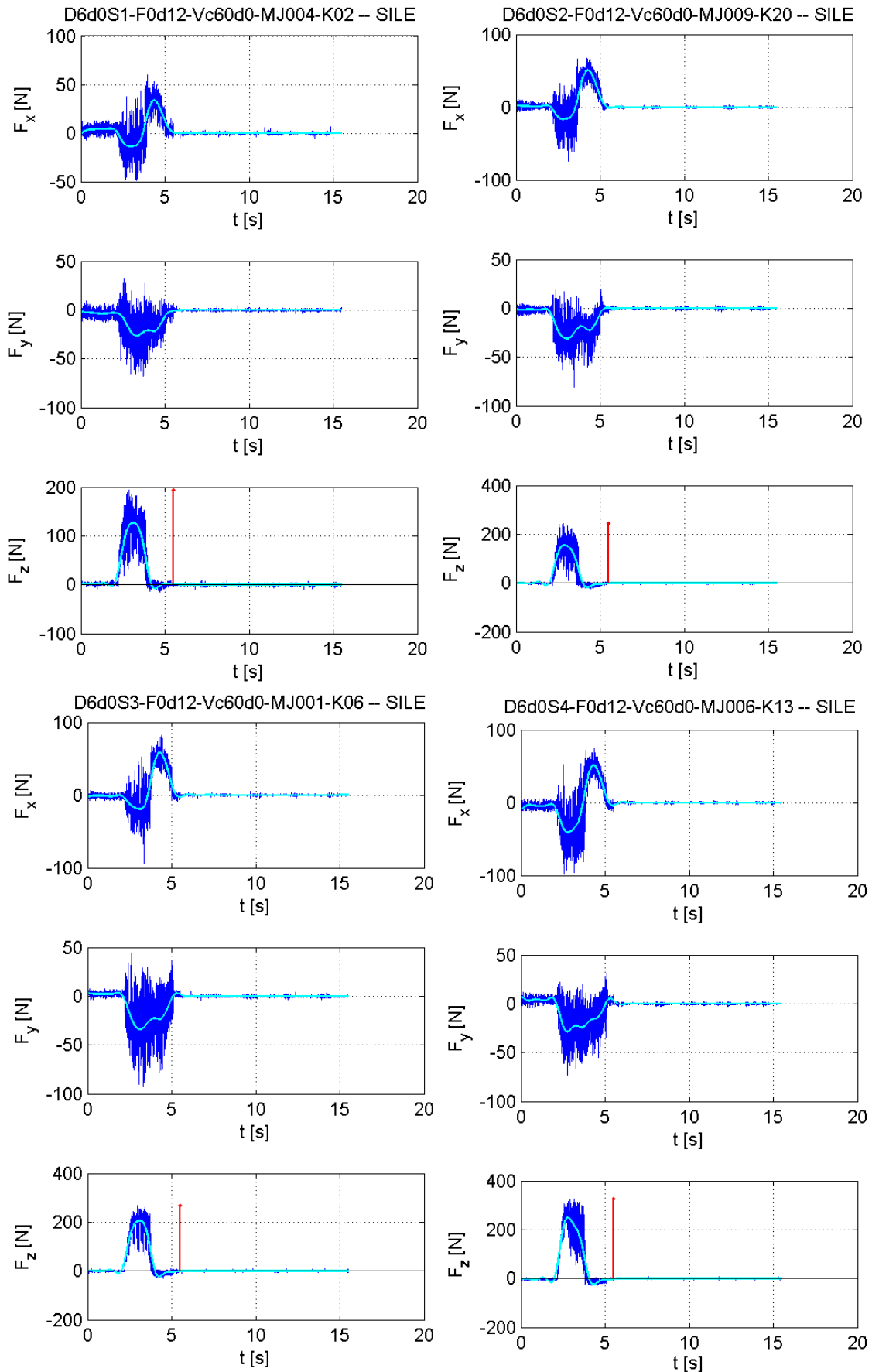
Slika 54 Ovisnost signala sila o posmaku i brzini rezanja za $f = 0,03 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ i $v_c = 30 \frac{\text{m}}{\text{min}}$



Slika 55 Ovisnost signala sila o posmaku i brzini rezanja za $f = 0,06 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ i $v_c = 45 \frac{\text{m}}{\text{min}}$

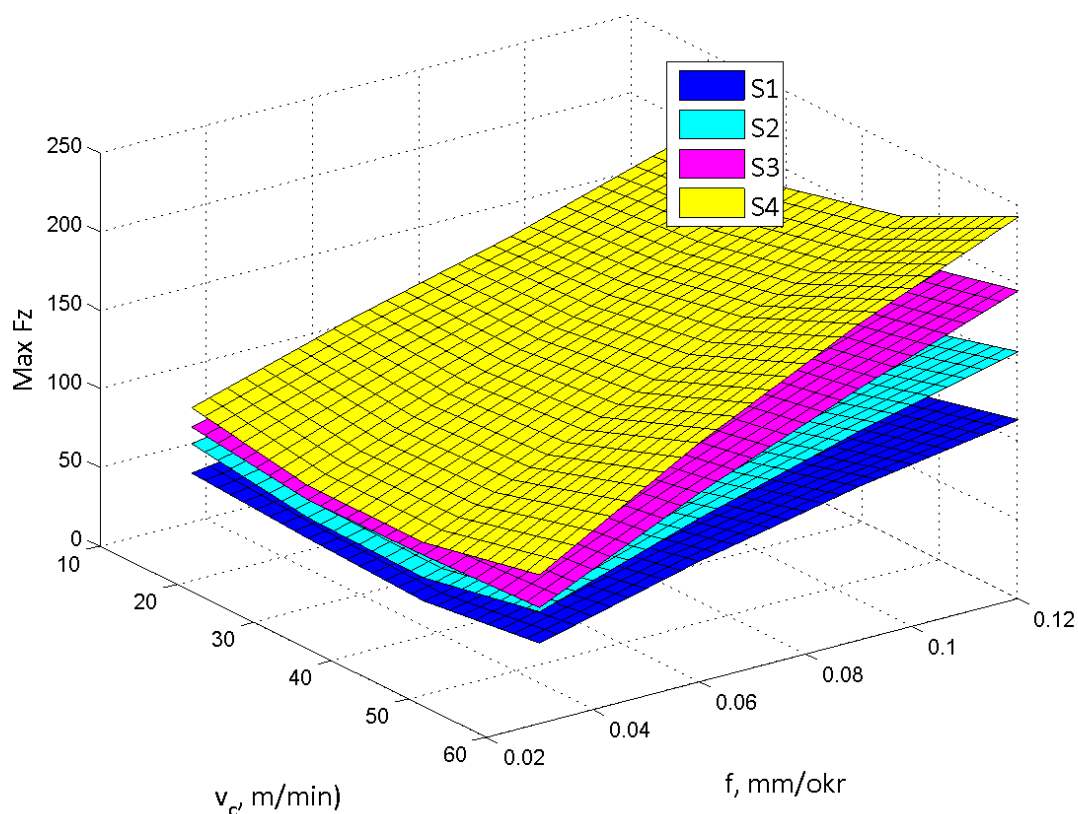


Slika 56 Ovisnost signala sila o posmaku i brzini rezanja za $f = 0,09 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ i $v_c = 15 \frac{\text{m}}{\text{min}}$

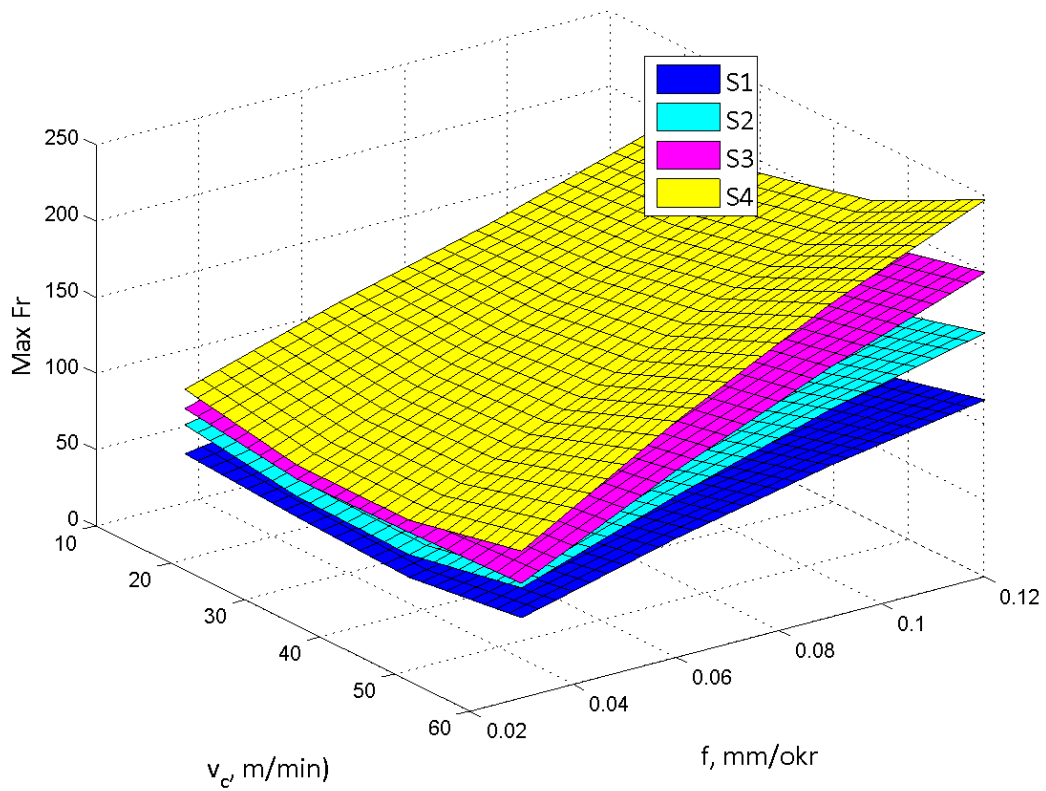


Slika 57 Ovisnost signala sila o posmaku i brzini rezanja za $f = 0,12 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ i $v_c = 60 \frac{\text{m}}{\text{min}}$

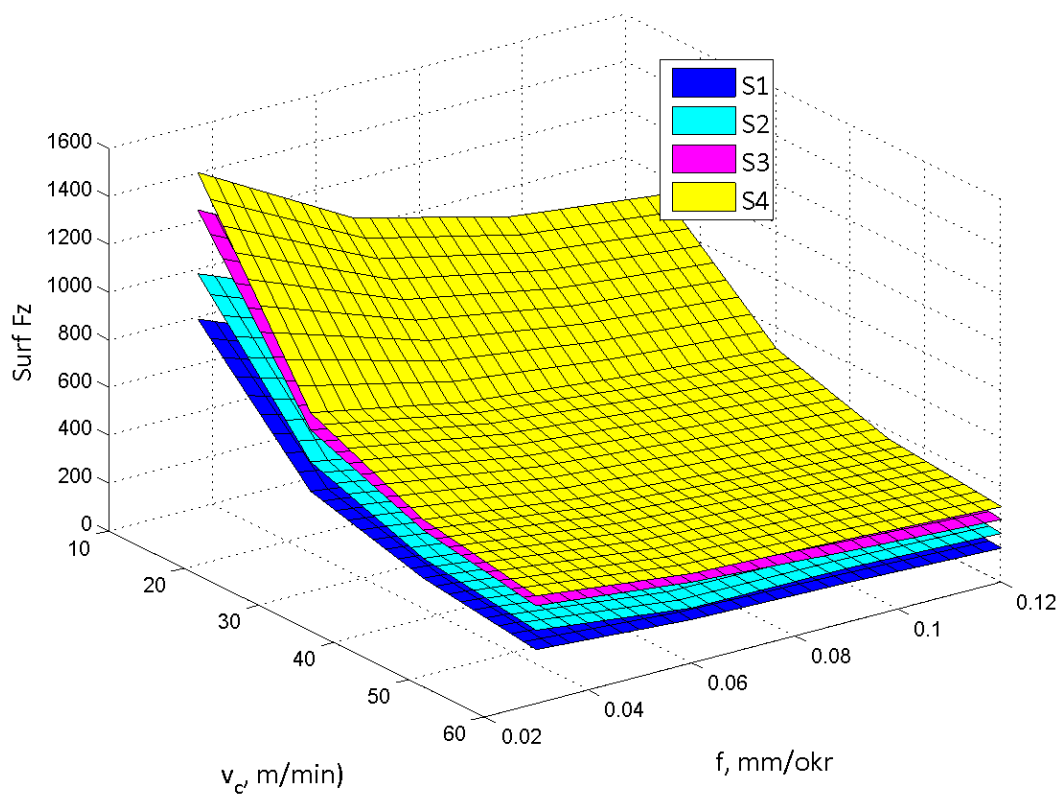
Na slikama 54-57 vidi se kretanje iznosa sile tijekom izvođenja pokusa po pojedinim osima. Na slikama su prikazni podaci za 4 različite kombinacije brzine rezanja i posmaka, za sva 4 stupnja istrošenosti. Kao što je vidljivo iz dijagrama postoji jasna povezanost između stupnja istrošenosti svrdla i porasta aksijalne sile (F_z), što je logično i očekivano. Tipično je aksijalna sila bila najveća na početku bušenja, nakon čega je ulaskom svrdla u puni zahvat lagano padala. Radijalne sile (F_x i F_y) su pokazale neosjetljivost na stupanj istrošenosti svrdla, što je i očekivano budući da su vezane uz interakciju fazete svrdla i stijenke provrta te uz radijalne pomake alata. Zbog vrlo velikog poklapanja krivulja radijalnih sila, i po iznosu i po obliku krivulja, mjereno za istu kombinaciju parametara obrade kroz sve stupnjeve istrošenosti može ih se povezati s pojavama koje su bile konstante procesa, npr. konstrukcija stroja, zračnosti osi, nemogućnost apsolutno točnog stezanja alata i sl. Utjecaj radijalnih sila na resultantnu silu je vrlo malen, što je vidljivo iz dijagrama.



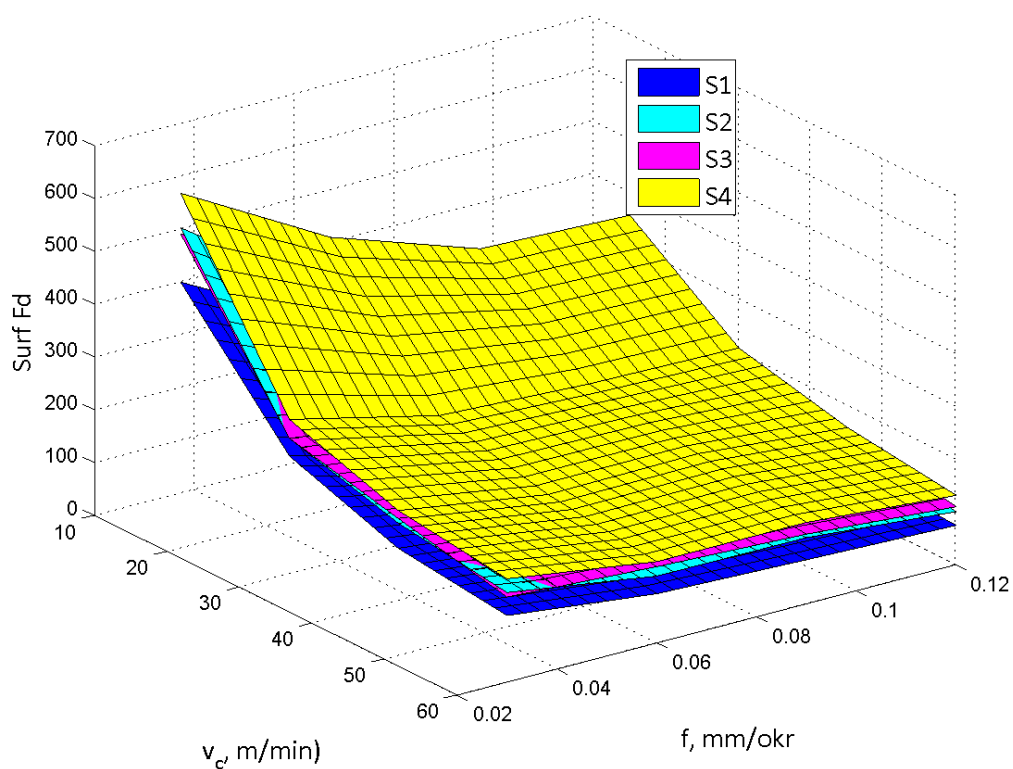
Slika 58 Ovisnost maksimalnog iznosa aksijalne sile o posmaku i brzini rezanja



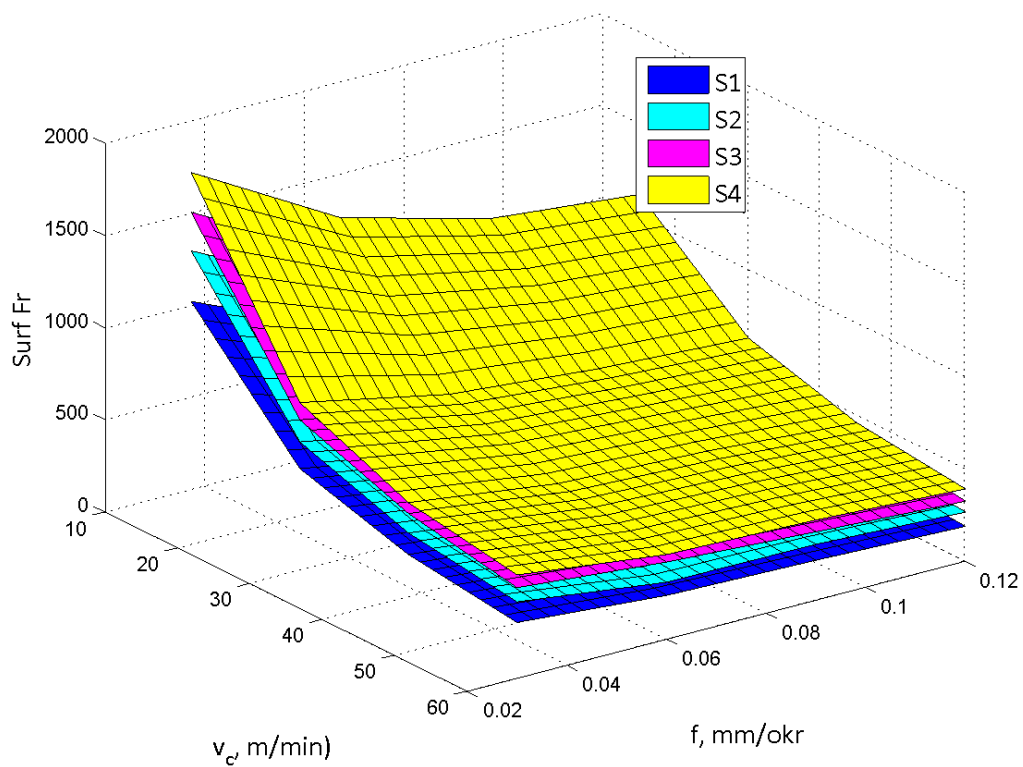
Slika 59 Ovisnost maksimalnog iznosa rezultantne sile o posmaku i brzini rezanja



Slika 60 Površina ispod krivulja aksijalne sile u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja



Slika 61 Površina ispod krivulja rezultantne radijalne sile u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja



Slika 62 Površina ispod krivulja rezultantne sile u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja

Kako se vidi iz dijagrama prikazanim na slikama nema preklapanja, odnosno dvosmislenih rezultata ni u jednom području obrade. Iz toga se može zaključiti kako su signali sila pokazali osjetljivost na trošenje alata.

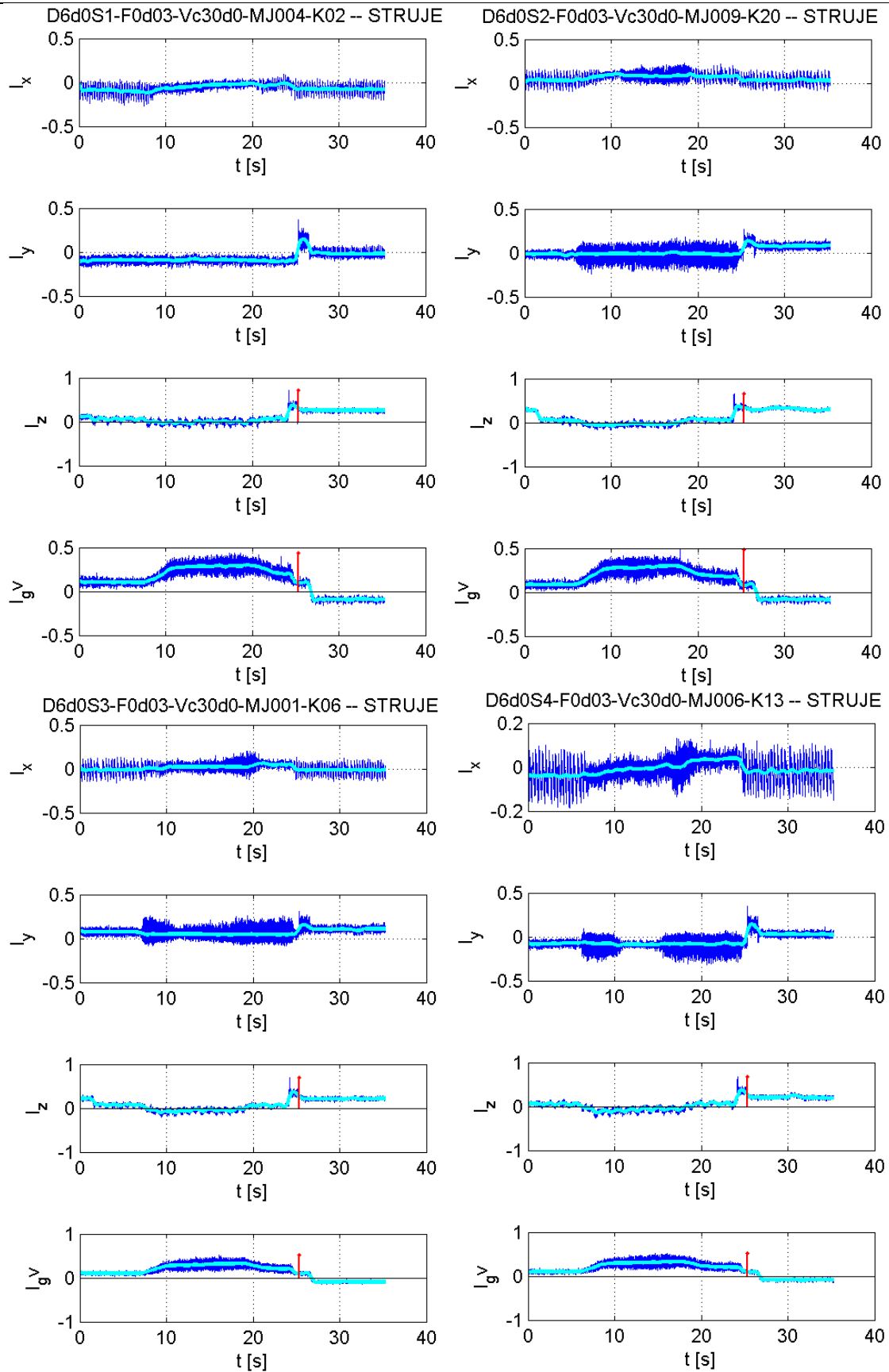
6.6. Snimanje i obrada signala jakosti struja

Snimani su signali jakosti struja posmičnih motora I_x , I_y i I_z osi te signal jakosti struje glavnog vretena, I_s . Signali jakosti struja pojedinih motora snimani su kontinuirano pomoću modula s A/D (analogno-digitalnim) pretvornicima i pomoću CAN sabirnice uz korištenje odgovarajućeg CAN/USB pretvornika. Frekvencija uzorkovanja bila je, kao i kod snimanja signala sila, 1 kHz. Iz literature i pregledanih radova poznato je da postoji snažna povezanost između signala sila i jakosti struja, što je i logično, a što je analizom prikupljenih signala i međusobnom usporedbom potvrđeno i u ovom pokusu. Modeliranje povezanosti između signala sila i jakosti struja, u svrhu zamjene signala sila signalima struje u sustavima nadzora, je vrlo interesantno zbog načina mjerenja sila koja često karakterizira skupa oprema. U tablici 14 dane su oznake i opisi značajki izdvojenih iz signala jakosti struja

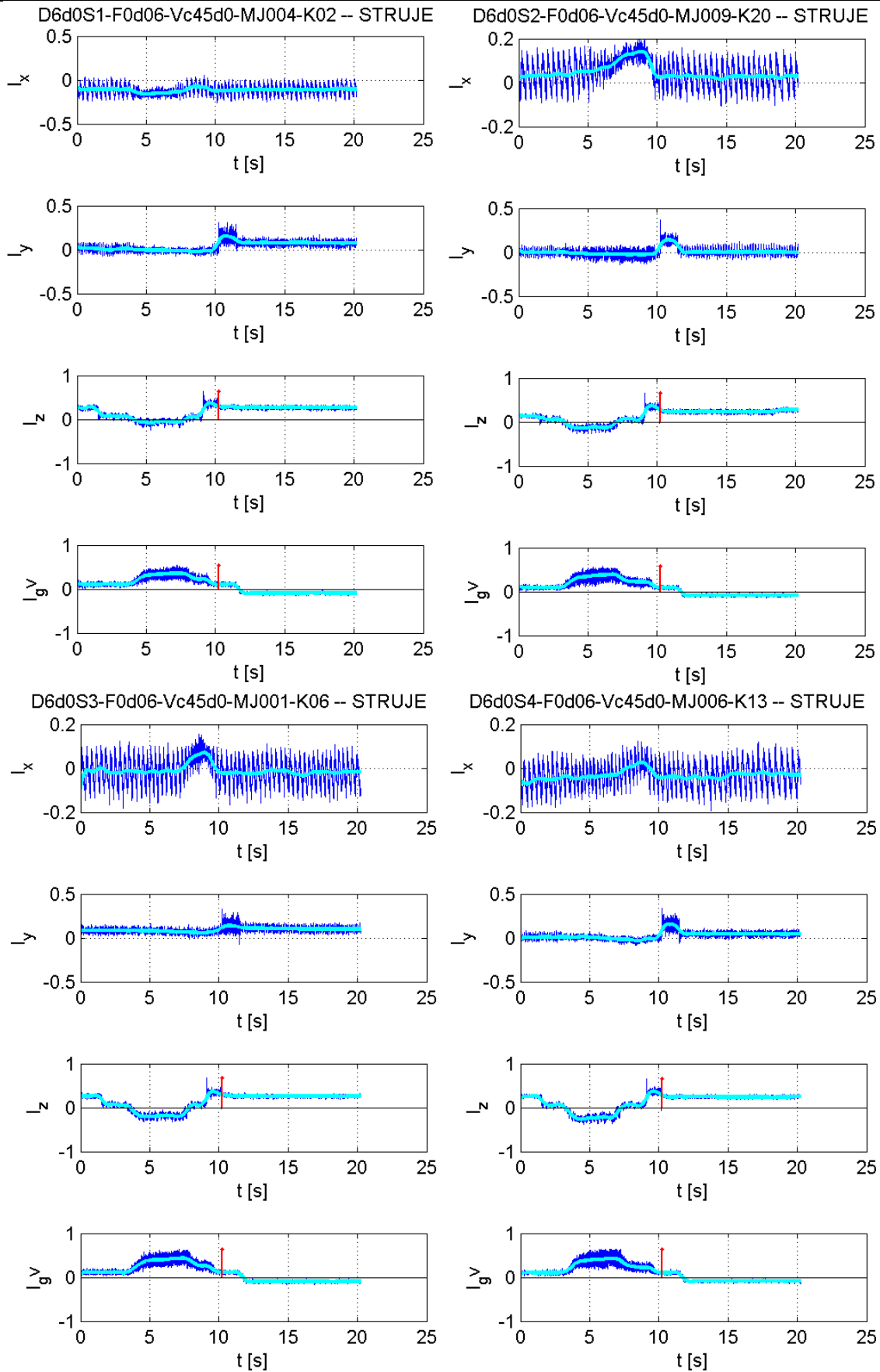
Tablica 14 Oznake i opisi značajki izdvojenih iz signala jakosti struja

Oznaka	Opis
Max_Iz	Maksimalan iznos struje I_z (posmični motor)
Max_Is	Maksimalni iznos struje na glavnom vretenu
Surf_Iz	Površina ispod krivulje I_z
Surf_Is	Površina ispod krivulje I_s
Surf_Pz	Površina ispod krivulje snage posmičnog motora Z osi
Surf_Ps	Površina ispod krivulje snage glavnog vretena

U nastavku su dani neki od rezultata dobiveni obradom signala struja prikupljeni tijekom izvođenja pokusa.

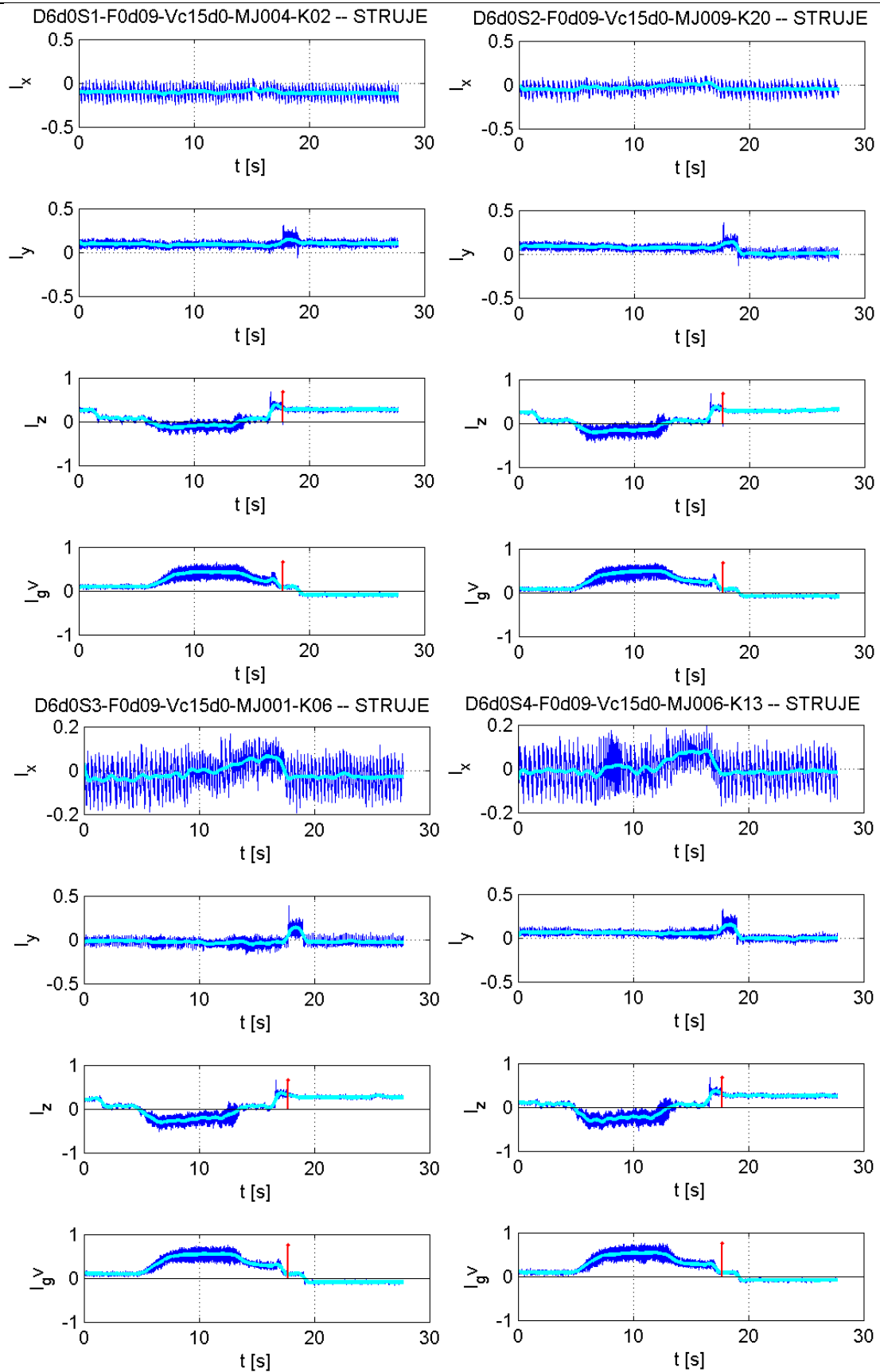


Slika 63 Ovisnost jakosti struja pogonskih motora o posmaku i brzini rezanja pri $f = 0,03 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ i $v_c = 30 \frac{\text{m}}{\text{min}}$

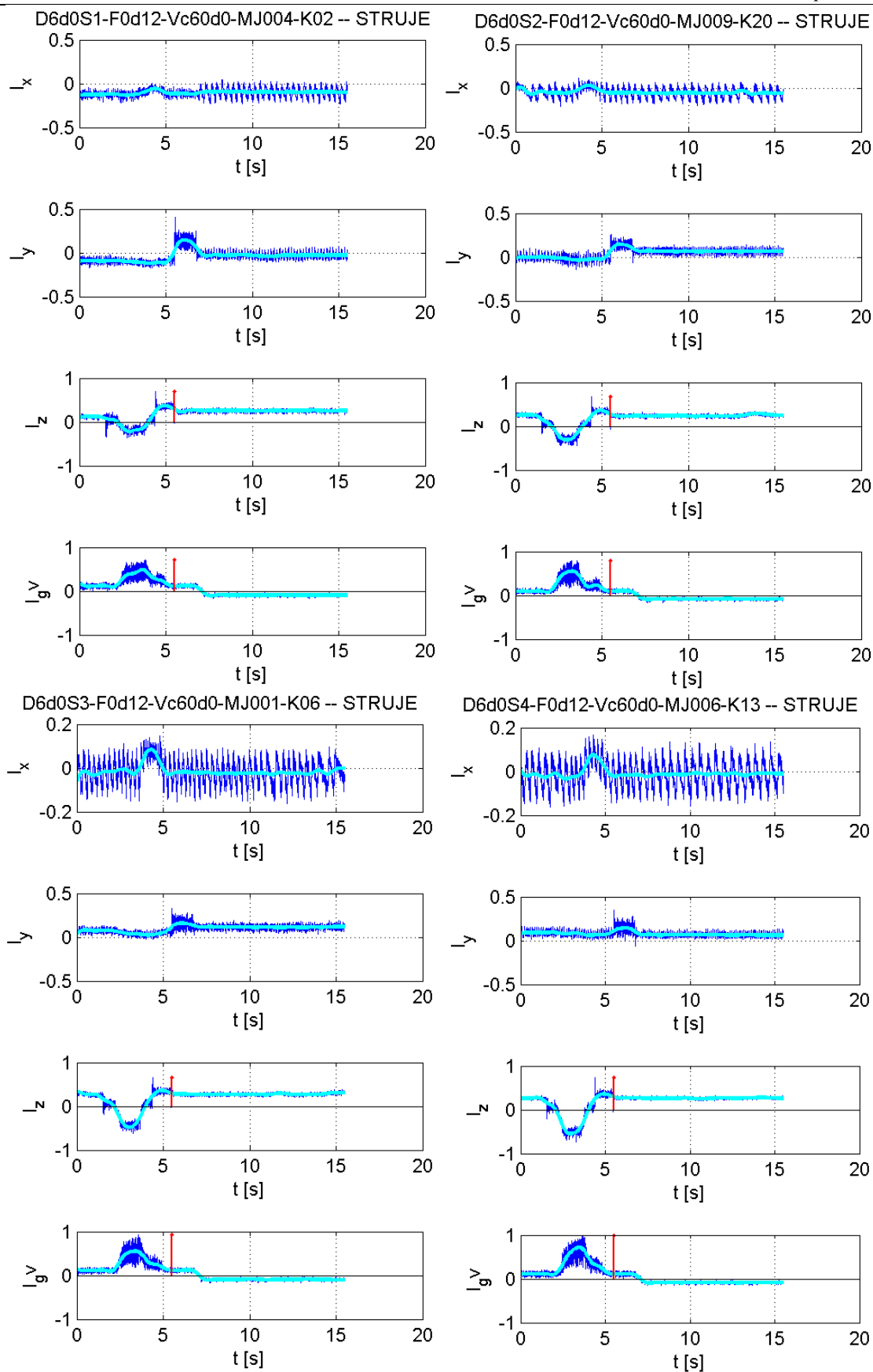


Slika 64 Ovisnost jakosti struja pogonskih motora o posmaku i brzini rezanja pri

$$f = 0,06 \frac{\text{mm}}{\text{okr}} \text{ i } v_c = 45 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

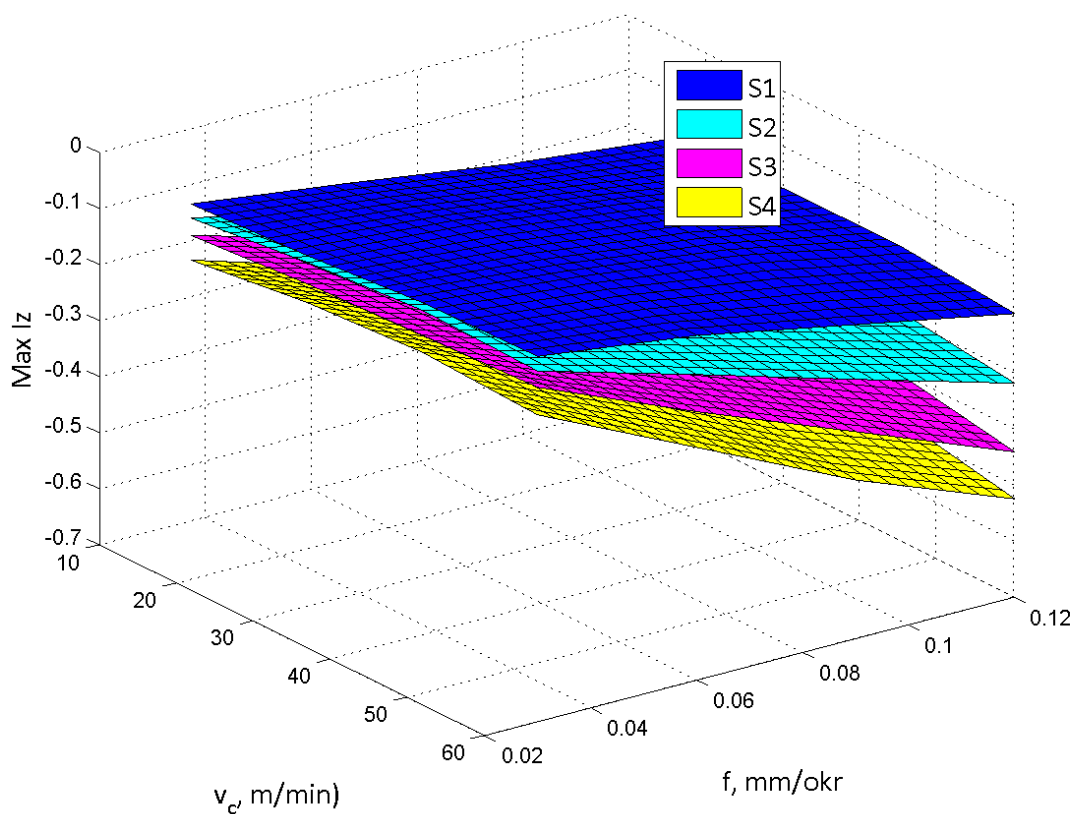


Slika 65 Ovisnost jakosti struja pogonskih motora o posmaku i brzini rezanja pri $f = 0,09 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ i $v_c = 15 \frac{\text{m}}{\text{min}}$

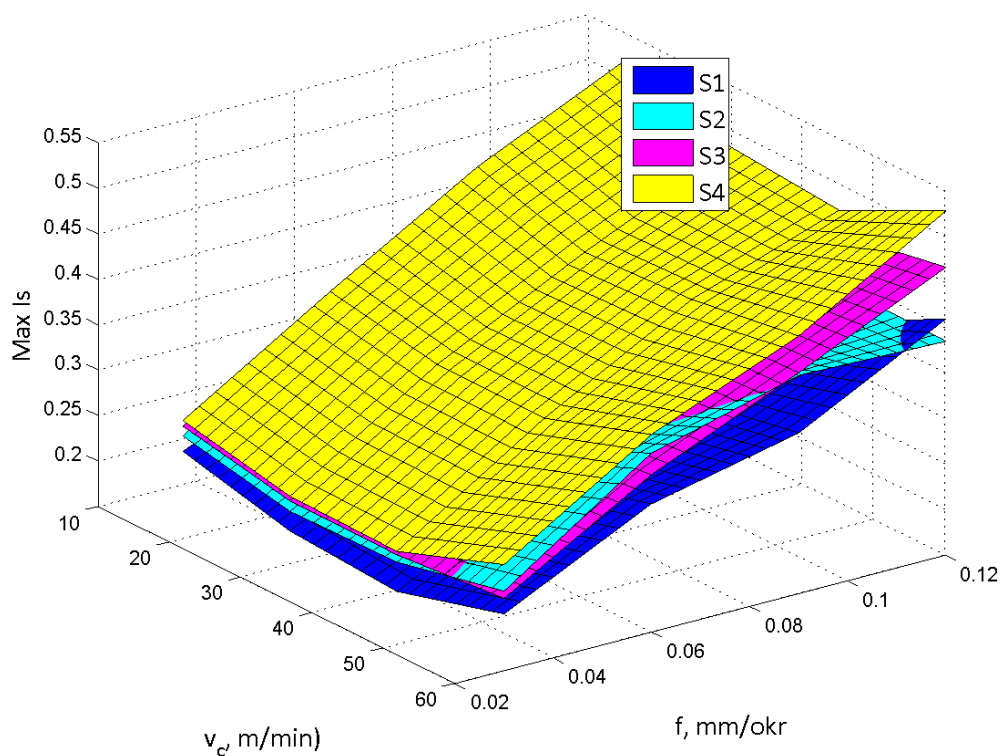


Slika 66 Ovisnost jakosti struja pogonskih motora o posmaku i brzini rezanja pri $f = 0,12 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ i $v_c = 60 \frac{\text{m}}{\text{min}}$

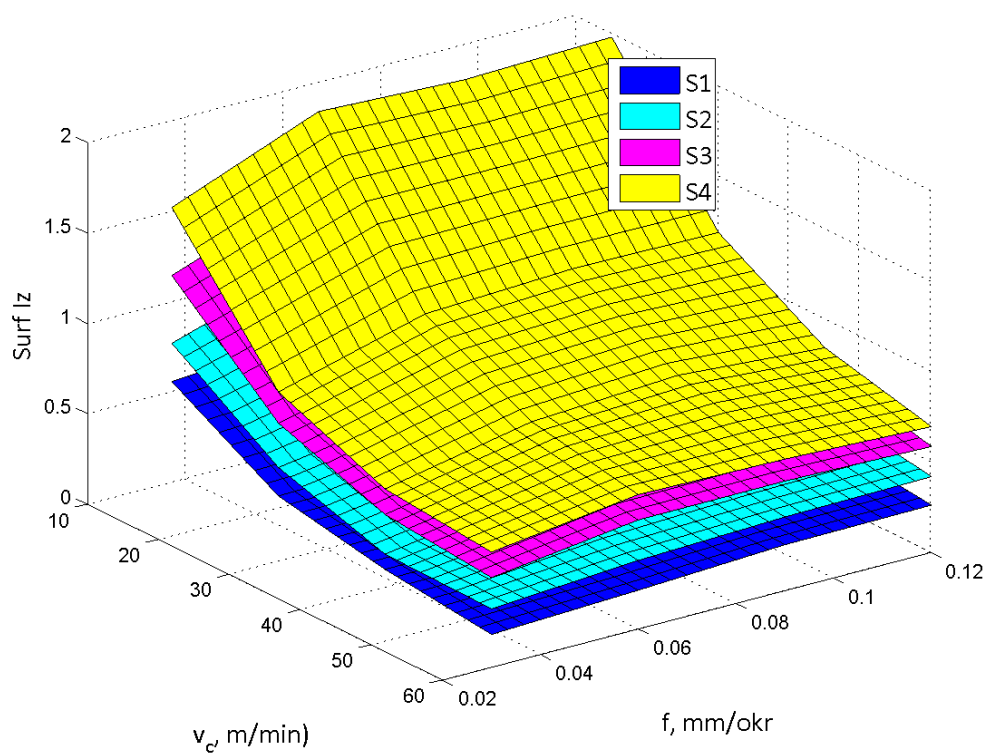
Uočljiva je povezanost između prirasta iznosa sila i jakosti struja. Osim struje motora X, Y i Z osi, snimana je i struja na glavnom vretenu. Nakon snimanja krivulja izračunate su snage motora posmične Z osi i motora glavnog vretena. Također su izračunate i dijagramski prikazane površine ispod krivulja snage, kao i površine ispod krivulja struja. Dijagrami su dani u nastavku.



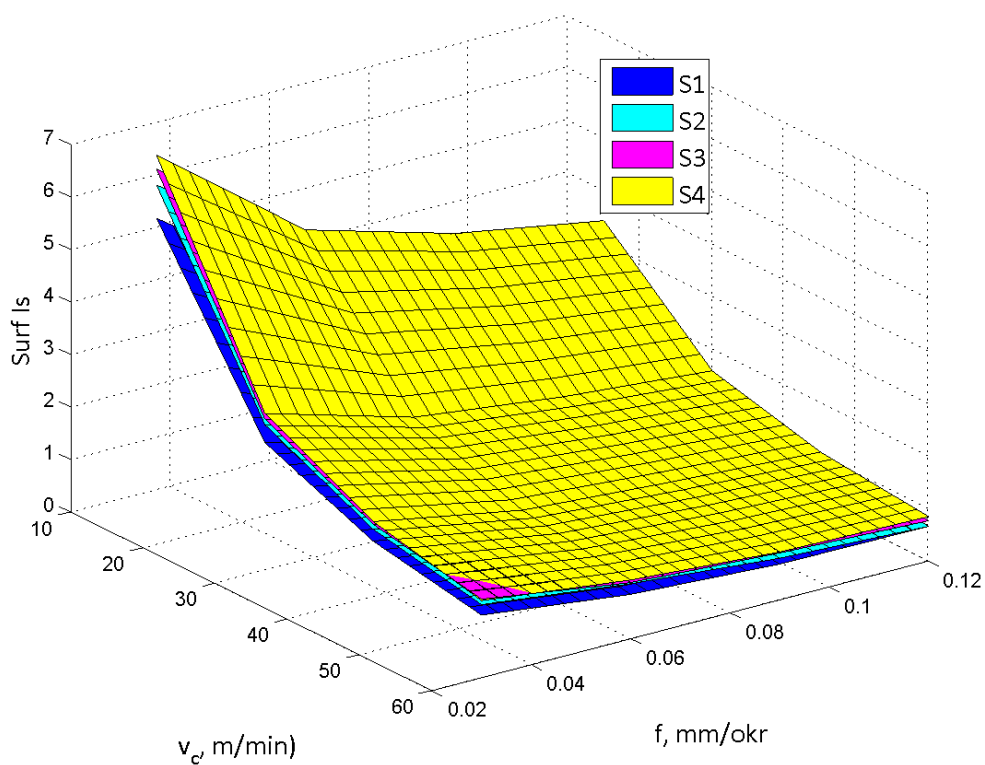
Slika 67 Ovisnost maksimalnog iznosa jakosti struje motora Z osi o posmaku i brzini rezanja



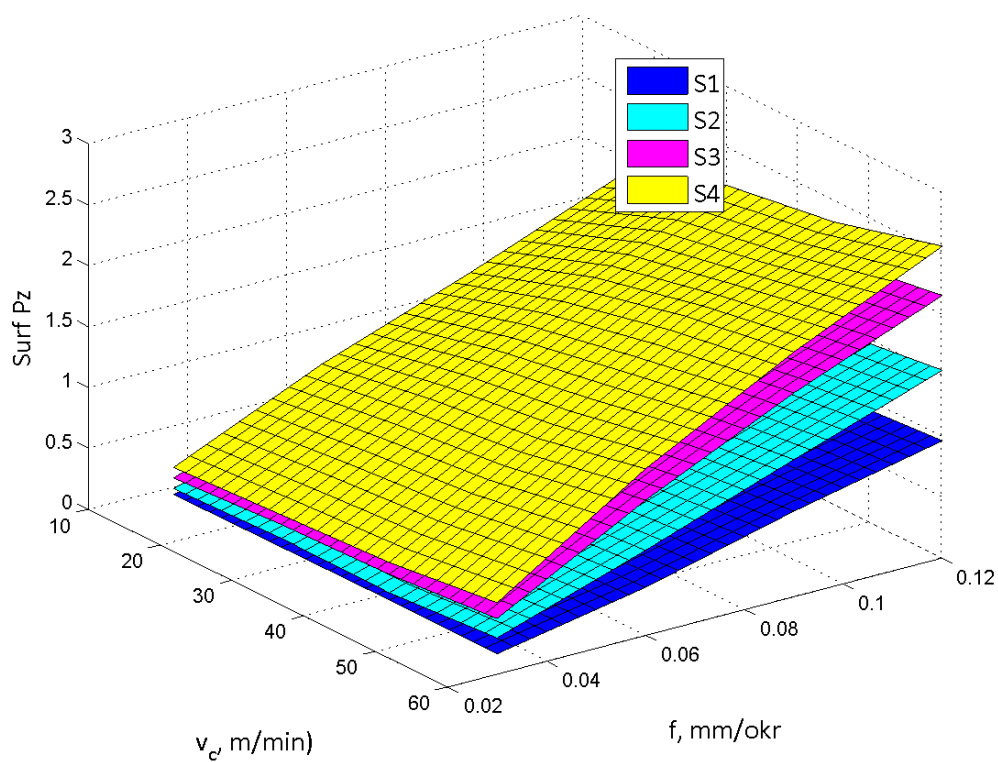
Slika 68 Ovisnost maksimalnog iznosa jakosti struje glavnog vretena o posmaku i brzini rezanja



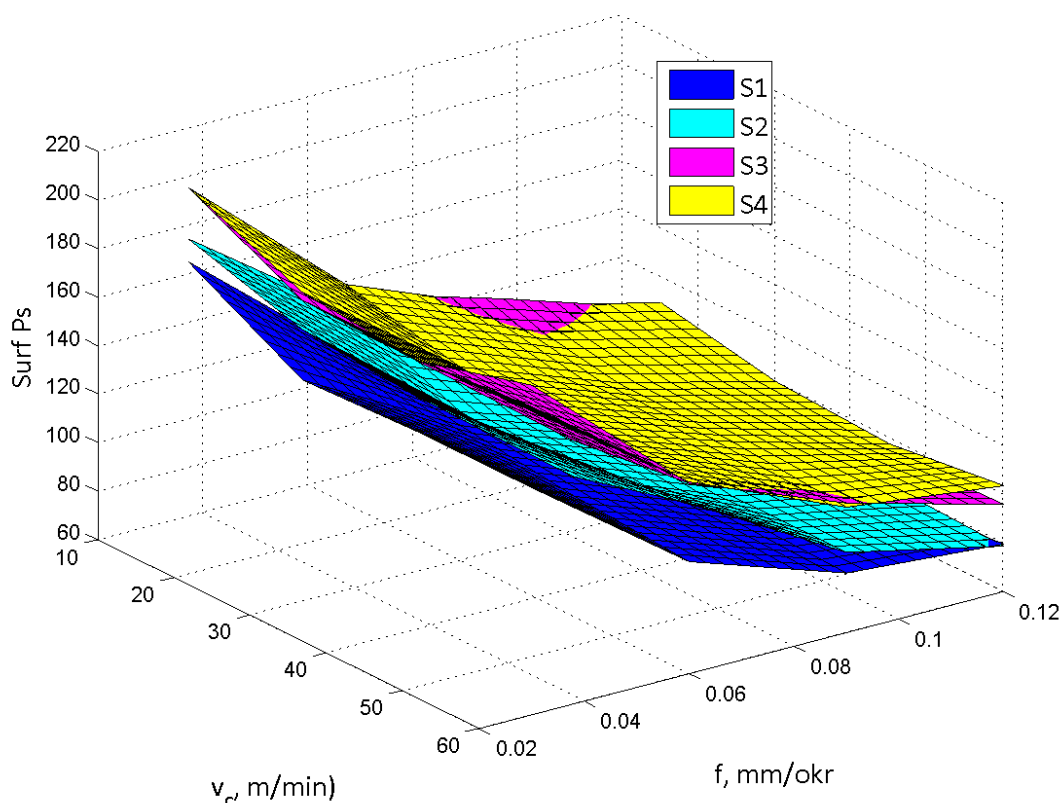
Slika 69 Površina ispod krivulja jakosti struja motora Z osi u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja



Slika 70 Površina ispod krivulja jakosti struja glavnog vretena u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja



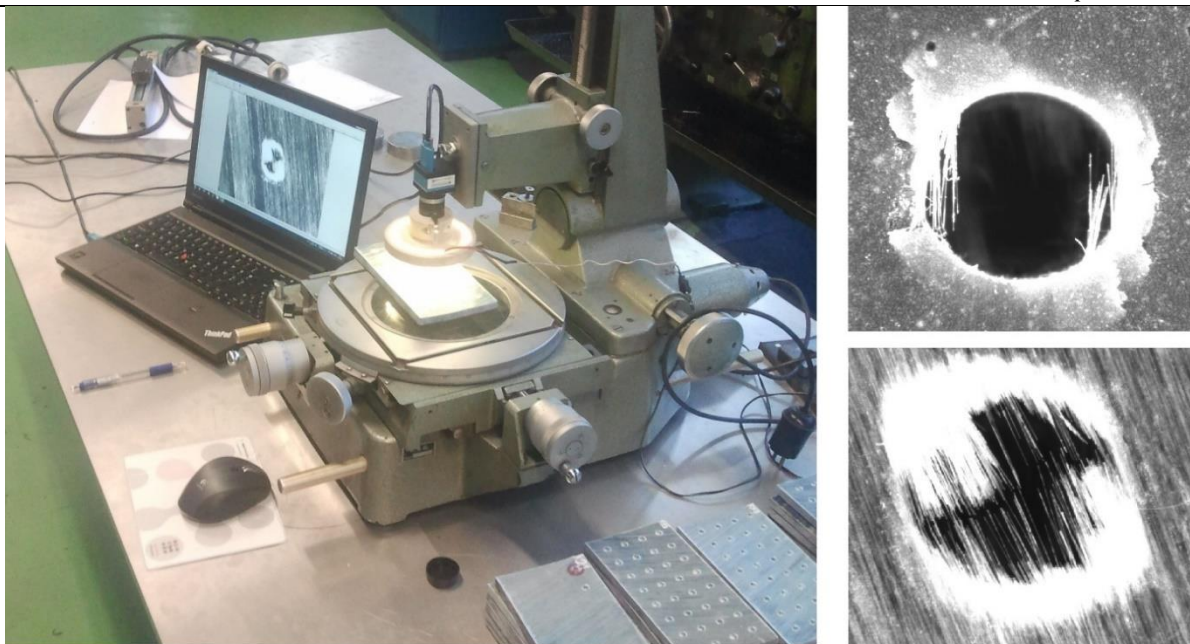
Slika 71 Površina ispod krivulja snage motora Z osi u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja



Slika 72 Površina ispod krivulja snage glavnog vretena u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja
 Kao što se može vidjeti u dijagramima iznosi jakosti struja su pokazali osjetljivost na promjenu istrošenosti alata i može ih se u određenoj mjeri povezati s iznosima sila, ali ipak osjetljivost signala sila je veća te samim time pouzdanija za procjenu stanja rezne oštrice. Od snimanih signala jakosti struja najosjetljivijim su se pokazali signali jakosti struja motora posmičnog prigona Z osi i oni glavnog vretena.

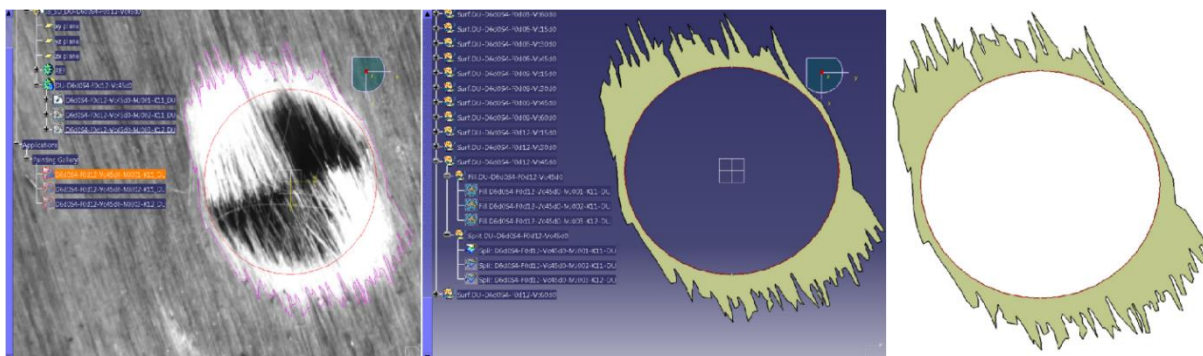
6.7. Određivanje iznosa raslojavanja

Raslojavanje se određivalo na temelju fotografija provrta koje su snimljene nakon glavnog pokusa. Fotografirana je ulazna i izlazna strana provrta za svih 640 mjerenja, odnosno prikupljeno je 1280 fotografija. Provrta su fotografirani istom industrijskom kamerom koja je korištena za fotografiranje oštrice alata. Kamera je ugrađena na alatni mikroskop. Postupak fotografiranja je prikazan na slici 73.



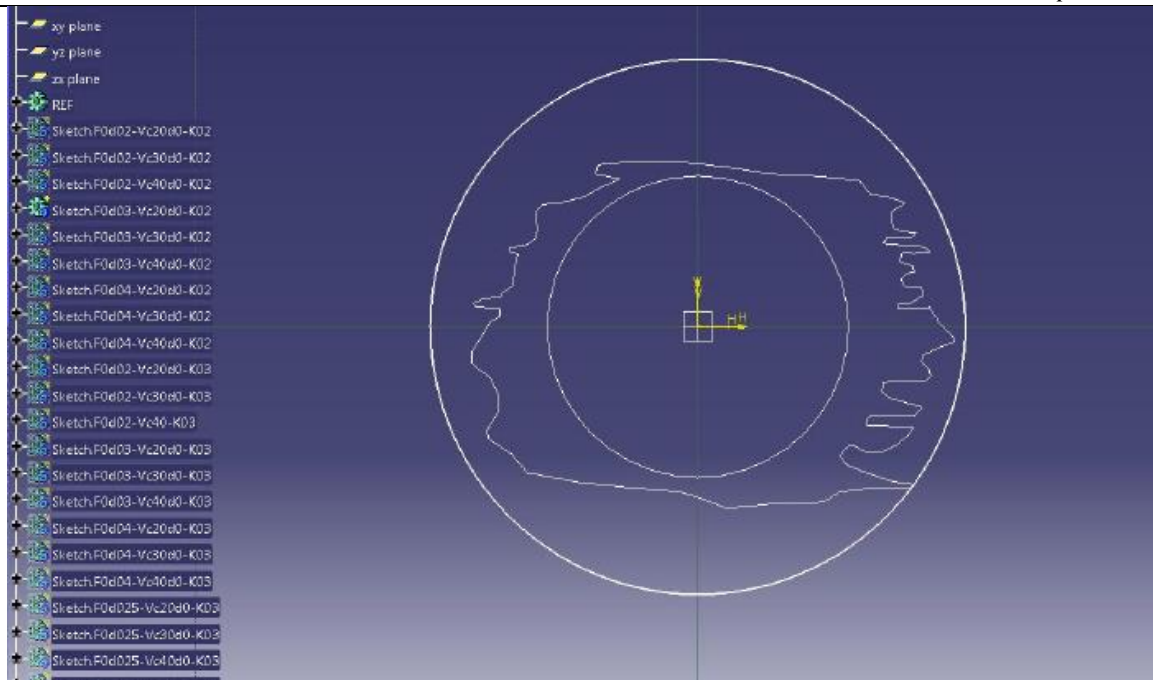
Slika 73 Fotografiranje provrta

Nakon prikupljanja fotografija uslijedila je obrada u paketu CATIA V5R20. Parametri kojima je određivan iznos raslojavanja su površina raslojavanja i najudaljenija točka na krivulji raslojavanja u odnosu na središte provrta. Površina raslojavanja dobivena je na način da je najprije ručno iscrtana kontura (konturna linija mora biti zatvorena krivulja) oko površine raslojavanja. Nakon iscrtavanja izračunata je površina unutar krivulje od koje je onda oduzeta površina provrta. Postupak određivanja površine raslojavanja prikazan je na slici 74.



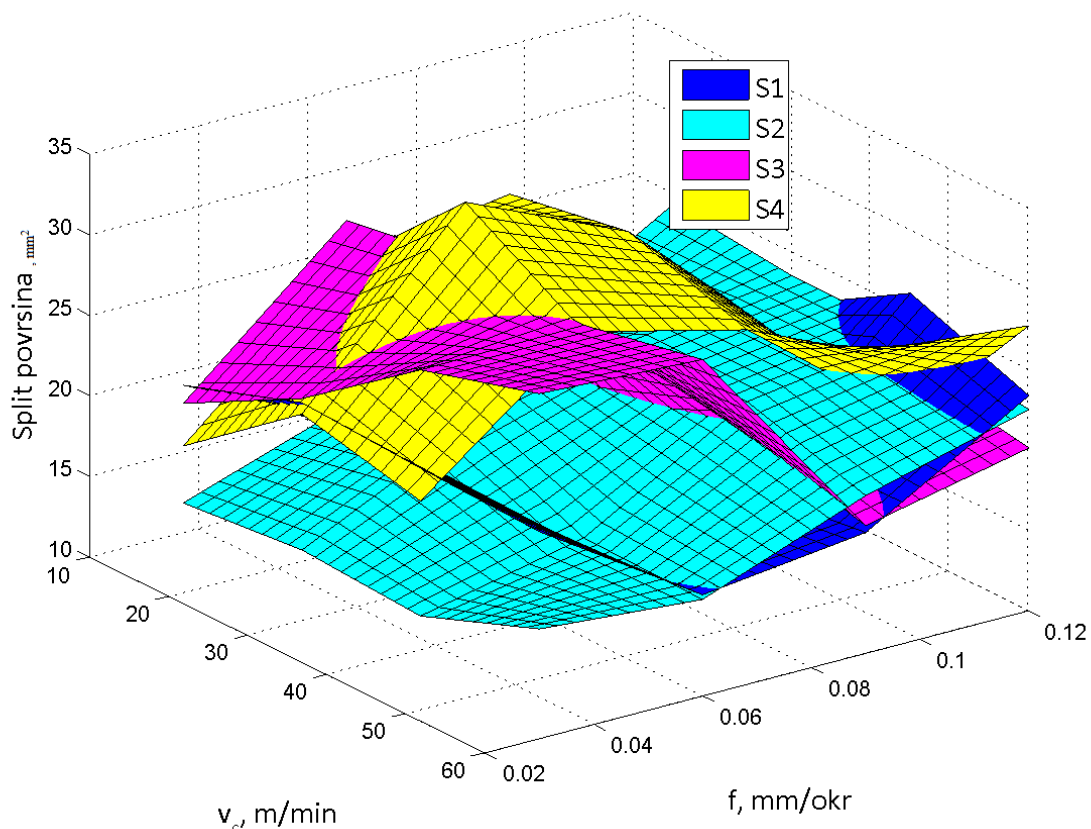
Slika 74 Postupak određivanje površine raslojavanja

Najudaljenija točka raslojavanja u odnosu na središte provrta određena je iterativnim putem, odnosno makro funkcijom u paketu CATIA V5R20. Radijus nacrtane kružnice na slici predstavlja upravo najudaljeniju točku raslojavanja u odnosu na središte provrta.



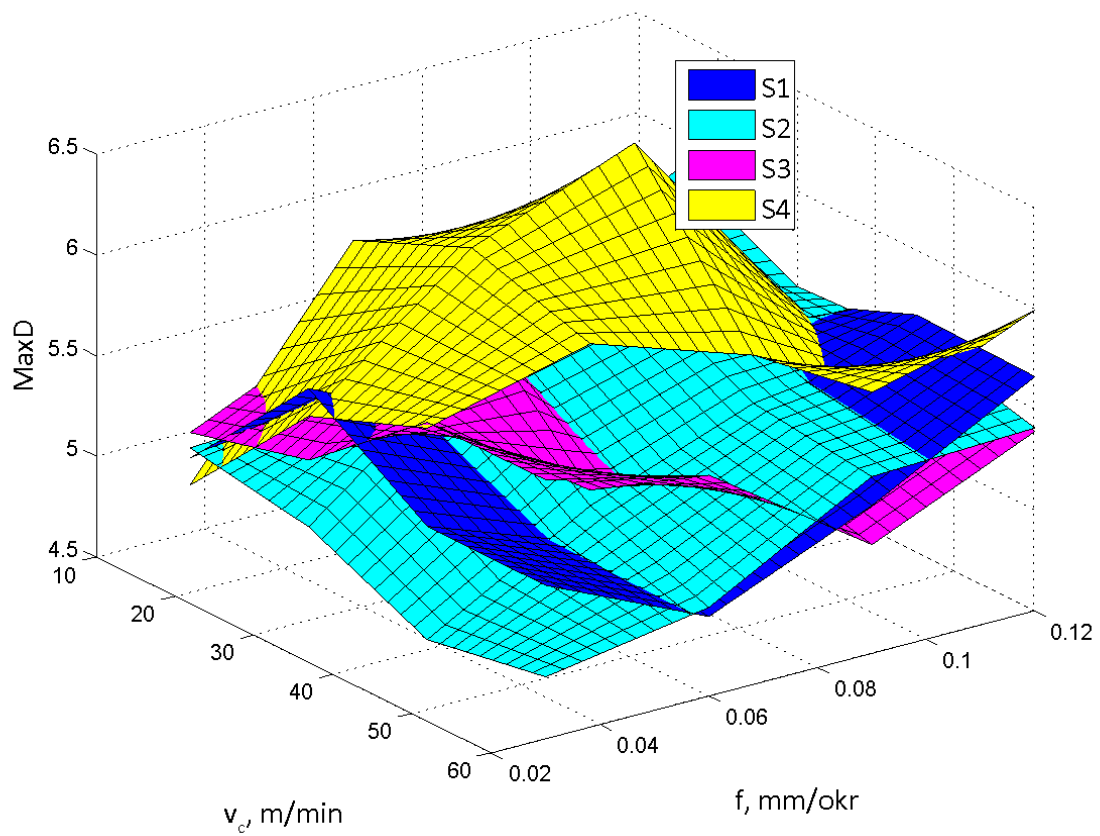
Slika 75 Najudaljenija točka raslojavanja u odnosu na središte provrta [3]

Na osnovi analiziranih podataka može se zaključiti kako postoji funkcijska ovisnost raslojavanja o parametrima obrade i stupnju istrošenosti. Međutim njihov odnos je izrazito nelinearan, što se može vidjeti iz dijagrama na slici 76 i 77.



Slika 76 Ovisnost površine raslojavanja o posmaku i brzini rezanja

Najveći utjecaj istrošenosti svrdla vidljiv je na nižim i srednjim vrijednostima posmaka, kroz gotovo čitav raspon brzina rezanja, gdje je vidljivo da su površine raslojavanja značajno manje za stupanj istrošenosti S1 i S2 u odnosu na S3 i S4. Maksimalan iznos površine raslojavanja dobiven je za stupanj istrošenosti S4 pri srednjim brzinama rezanja i posmacima. Za stupanj istrošenosti S1 i S2 zabilježen je porast trenda raslojavanja s porastom posmaka, dok je utjecaj brzine rezanja razmjerno malen. Ovaj trend nije zabilježen za stupnjeve istrošenosti S3 i S4 gdje su uočljive izrazito nelinearne ovisnosti raslojavanja o parametrima obrade. Međutim, uočljivo je kako je raslojavanje kod tih stupnjeva istrošenosti najmanje pri većim brzinama rezanja i većim posmacima. Slični zaključci mogu se donijeti i promatranjem dijagrama koji prikazuje kretanje najudaljenije točke raslojavanja, prikazanog na slici 78.



Slika 77 Ovisnost najudaljenije točke raslojavanja od središta provrta o posmaku i brzini rezanja

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je provesti istraživanje o utjecaju parametara obrade i istrošenosti alata na raslojavanje pri bušenju polimernih kompozita ojačanih staklenim vlaknima za zadane kombinacije alata i obratka. Upravo je raslojavanje najveći problem koji se veže uz obradu kompozita, dok je bušenje najčešće primjenjivani postupak OOČ. U svrhu ostvarivanja zadanog cilja proveden je pokus u Laboratoriju za alatne strojeve, Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Pokus se sastojao od pretpokusa i glavnog pokusa. Nakon što su pretpokusom utvrđeni parametri obrade za glavni pokus, uslijedilo je provođenje istog.

Glavni pokus proveden je na način da se određeni broj kombinacija parametara obrade (brzine rezanja i posmaka) ponavljao 10 puta, prilikom čega su kontinuirano snimane sile rezanja i jakosti struja posmičnih motora. Također su periodički prikupljane fotografije svrdla, koje su služile za direktno određivanje iznosa i oblika trošenja. Nakon završetka bušenja prikupljene su fotografije provrta, koje su poslužile za određivanje raslojavanja.

Analizom prikupljenih fotografija oštrice alata uočeno je trošenje stražnje površine alata i zaobljenje rezne oštrice. Trošenje stražnje površine prepoznato je kao dominantan oblik trošenja te je istrošenost alata kvantificirana upravo putem mjerenja srednje i maksimalne širine trošenja. Jasno je da se trošenje alata povećavao kako se povećavao broj izbušenih provrta. Trošenje stražnje površine bilo je manje u blizini središta i postupno se povećavalo do maksimalnih vrijednosti na maksimalnom promjeru svrdla.

Analiza sila rezanja potvrdila je pretpostavku ovisnosti aksijalne sile o stupnju istrošenosti svrdla. Pokusom je također potvrđena korelacija između sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora. Najveću osjetljivost pokazali su signali jakosti struja posmičnog motora Z osi i motora glavnog vretena. Iako je osjetljivost signala jakosti struja manja od osjetljivosti signala sila rezanja, oni i dalje pružaju značajne i relativno pouzdane značajke osjetljive na promjene u stupnju istrošenosti svrdla. Time se otvara mogućnost razvoja sustava za nadzor stanja alata zasnovanog na značajkama signala struja, što može povoljno utjecati na cijenu takvih sustava.

Na posljetku su obrađene fotografije na temelju kojih je određen iznos raslojavanja preko površine raslojavanja i najudaljenije točke raslojavanja od središta provrta. Pokazalo se da je raslojavanje izrazito nelinearan proces. Također se pokazalo da postoji utjecaj stupnja istrošenosti svrdla na raslojavanje koji je izraženiji pri manjim posmacima. Stoga je posmak prepoznat kao utjecajni parametar obrade na iznos raslojavanja. Analizom dobivenih

dijagrama može se, za kombinaciju alata i materijala korištenih u pokusu, preporučiti obrada višim posmacima i višim brzinama rezanja.

Daljnja istraživanja biti će usmjerena razvoju modela trošenja alata i raslojavanja obratka pri čemu će se koristiti podaci prikupljeni u ovom radu. Slična će se istraživanja također provoditi primjenom različitih svrdala i različitih materijala.

LITERATURA

- [1] T.Filetin, F.Kovačićek, J.Indof; Svojstva i primjena materijala; FSB, Zagreb 2007
- [2] Dostupno 11.09.2014 na: <http://www.compositesworld.com/blog/post/sampe-europe-highlights-composites-face-challenges-in-next-commercial-airframes>
- [3] Domagoj Lovrić: Utjecaj parametara obrade i trošenja svrdla na raslojavanje kompozitnih materijala, Diplomski rad, Zagreb 2014.
- [4] G.Marić: Predavanja – Polimeri i kompoziti, FSB, Zagreb, 2012/2013
- [5] G.Marić, T.Filetin: Predavanja – Napredne tehnologije materijala – Postupci proizvodnje kompozita, FSB, Zagreb, 2013
- [6] Dostupno na: www.ffri.uniri.hr/markodundjer/Materijali/08%20Kompoziti.pdf, 21.08.2013
- [7] M. Šercer: Predavanja – Proizvodnja kompozitnih tvorevina, FSB, Zagreb
- [8] Z. Schauerl: Predavanja – Kompozitni materijali, FSB, Zagreb, 2009/2010
- [9] Dostupno na: <http://simulatemoore.mscsoftware.com/lightweight-high-performance-composites-what-is-a-composite-material/>, 21.08.2013
- [10] Dostupno na: <http://www.bikeexchange.com.au/article/frames-time-trial-bike>, 21.08.2013
- [11] Dostupno na: <http://www.oneidasuzuki.com/store/parts-accessories/joe-rocket-rkt-101-carbon-helmet-clon.html>, 21.08.2013
- [12] Dostupno na: <http://www.mitstil.com/carbonorchester-von-luis-and-clark/1872/>, 21.08.2013
- [13] Dostupno na: http://luxurylaunches.com/transport/ferretti_custom_line_100_targets_the_younger_breed_of_yacht_lovers.php, 21.08.2013
- [14] Dostupno na: <http://www.southerncarparts.com/corvette-pfadt-carbon-fiber-drive-shaft-assembly-p-3785.html>, 21.08.2013
- [15] Dostupno na: <http://www.formula1.com/photos/597x478/manual/suspension01.jpg>, 21.08.2013
- [16] Dostupno na: <http://www.libnot.com/2009/04/19/new-helmet-program-focuses-on-stopping-power/>, 21.08.2013
- [17] Dostupno na: <http://www.vpcam.com/page/924125>, 21.08.2013
- [18] Predavanja Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem, dio Obrada odvajanjem, 2009, FSB Zagreb, prof.dr.sc. Stephan Škorić

- [19] Rudolf Zdenković; Obrada metala skidanjem – osnovi teorije i prakse; FSB; Zagreb 1965
- [20] Ivan Bartolin: Tribološka svojstva legiranih čelika, seminarski rad Tribologija, Zagreb 2014
- [21] Predavanja Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem, dio Obrada odvajanjem, 2009, FSB Zagreb, dr.sc. Damir Ciglar
- [22] A.M.Abrao, J.C.Campos Rubio, P.E.Faria, J.P. Davim; The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite; 2007; Materials & Design, str.509-513
- [23] Luis Miguel P. Durao, Danisel J.S. Goncalves, Joao Manuel R.S. Tavares, Victor Hugo C. de Albuquerque, A. Aguiar Vieira, A. Torres Marques; Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates; 2009; Composite structures, str.1545-1550
- [24] Tomislav Staroveški: Modeliranje trošenja medicinskog svrdla, Doktorski rad, Zagreb 2013.
- [25] Dostupno na:
http://www.intertechnology.com/Kistler/pdfs/ACC_5017B_Charge_Amplifier.pdf,
24.06.2015
- [26] Dostupno na: <https://www.hofstragroup.com/product/kistler-9257b-triaxial-force-sensor-load-cell/>, 24.06.2015
- [27] Dostupno na: <http://www.nuplex.com/composites/processes/filament-winding>,
24.06.2015

PRILOZI

I. CD-R disc