



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Dragan Rodić

**Optimizacija procesa elektroerozivne obrade savremenih
inženjerskih materijala**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2019.



KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

| | | |
|---|---|----------------|
| Redni broj, RBR : | | |
| Identifikacioni broj, IBR : | | |
| Tip dokumentacije, TD : | Monografska publikacija | |
| Tip zapisa, TZ : | Tekstualni štampani materijal | |
| Vrsta rada, VR : | Doktorska disertacija | |
| Autor, AU : | Dragan Rodić, master inženjer mašinstva | |
| Mentor, MN : | Dr Marin Gostimirović, redovni profesor | |
| Naslov rada, NR : | Optimizacija procesa elektroerozivne obrade savremenih inženjerskih materijala | |
| Jezik publikacije, JP : | Srpski | |
| Jezik izvoda, JL : | Srpski/Engleski | |
| Zemlja publikovanja, ZP : | Republika Srbija | |
| Uže geografsko područje, UGP : | AP Vojvodina | |
| Godina, GO : | 2019. | |
| Izdavač, IZ : | Autorski reprint | |
| Mesto i adresa, MA : | Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6 | |
| Fizički opis rada, FO : (poglavlja/strana/ citata/tabela/slika/grafika/priloga) | 10/159/151/95/127/0/0 | |
| Naučna oblast, NO : | Mašinsko inženjerstvo | |
| Naučna disciplina, ND : | Nekonvencionalni postupci obrade | |
| Predmetna odrednica/Ključne reči, PO : | Elektroerozivna obrada, grafitni prah, pomoćna elektroda, kvalitet obrađene površine, proizvodnost obrade, relativno trošenje alata, debljina defektnog sloja materijala obratka. | |
| UDK | | |
| Čuva se, ČU : | Biblioteka Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad | |
| Važna napomena, VN : | | |
| Izvod, IZ : | Predmet istraživanja ove disertacije predstavlja unapređenje, modelovanje i optimizacija procesa elektroerozivne obrade (EDM) savremenih inženjerskih materijala. Prvo su predstavljene dve inovativne metode: EDM u dielektrikum sa pomešanim prahom i EDM sa pomoćnom elektrodom, a zatim i njihova kombinacija. Za generisanje matematičkih modela primenjene su metodologija odzivne površine i alati veštačke inteligencije. U nastavku su postavljeni optimizacioni procesi određivanja ulaznih parametara sa jednom i više funkcija cilja koji su rešeni primenom klasičnih metoda optimizacije. U završnom osvrtu sprovedena je verifikacija dobijenih modela i optimalnih ulaznih parametara elektroerozivne obrade. | |
| Datum prihvatanja teme, DP : | 22.06.2017. | |
| Datum odbrane, DO : | | |
| Članovi komisije, KO : | Predsednik: Dr Pavel Kovač, redovni profesor | Potpis mentora |
| | Član: Dr Miroslav Radovanović, redovni profesor | |
| | Član: Dr Dragan Kukolj, redovni profesor | |
| | Član: Dr Milenko Sekulić, redovni profesor | |
| | Član, mentor: Dr Marin Gostimirović, redovni profesor | |



KEY WORDS DOCUMENTATION

| | |
|---|--|
| Accession number, ANO : | |
| Identification number, INO : | |
| Document type, DT : | Monographic publication |
| Type of record, TR : | Textual material, printed |
| Contents code, CC : | Doctoral Thesis |
| Author, AU : | Dragan Rodić, master in Mechanical engineering |
| Mentor, MN : | Marin Gostimirović, PhD, full professor |
| Title, TI : | Optimization of electrical discharge machining of advanced engineering materials |
| Language of text, LT : | Serbian |
| Language of abstract, LA : | Serbian/English |
| Country of publication, CP : | Republic of Serbia |
| Locality of publication, LP : | AP Vojvodina |
| Publication year, PY : | 2019. |
| Publisher, PB : | Authors reprint |
| Publication place, PP : | Novi Sad, Serbia |
| Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small> | 10/159/151/95/127/0/0 |
| Scientific field, SF : | Mechanical Engineering |
| Scientific discipline, SD : | Nonconventional Procedures in Processing |
| Subject/Key words, S/KW : | Electrical discharge machining, graphite powder, assisted electrode, surface quality, material removal rate, tool wear rate, defective layer thickness. |
| UC | |
| Holding data, HD : | Library of the Faculty of Technical Sciences |
| Note, N : | |
| Abstract, AB : | The subject of the research of this dissertation is the improvement, modeling and optimization of the electrical discharge machining (EDM) of advanced engineering materials. First, two innovation methods are presented: EDM in powder mixed dielectric fluid and EDM with assisted electrode and that their combination. The method of response surface and artificial intelligence tools were applied to generate mathematical models. The optimization problems of determining the input parameters with single and multiple target functions are solved by the application of classical optimization methods. Finally, verification of the obtained models and optimal input parameters of electrical discharge machining was carried out. |
| Accepted by the Scientific Board on, ASB : | 22.06.2017. |
| Defended on, DE : | |
| Defended Board, DB : | President: Prof. Pavel Kovac, PhD |
| | Member: Prof. Miroslav Radovanovic, PhD |
| | Member: Prof. Dragan Kukulj, PhD |
| | Member: Prof. Milenko Sekulic, PhD |
| | Member, Mentor: Prof. Marin Gostimirovic, PhD |
| | Mentor's sign |

SAŽETAK

Elektroerozivna obrada (*eng. Electrical Discharge Machining* – EDM) je nekonvencionalni postupak široke industrijske primene i naučnog interesovanja. EDM se koristi pri obradi elektroprovodljivih materijala, kad je njena primena opravdana uglavnom pri obradi delova specifične konstrukcije od teško obradivih materijala. Radi efikasnosti elektroerozivne obrade savremenih inženjerskih materijala permanentno se istražuju i unapređuju postojeći ili razvijaju inovacioni EDM procesi. U novije vreme tehnološko unapređenje procesa EDM postiže se sa tri inovativne metode: EDM u tečnom dielektrikumu sa pomešanim prahom (*eng. Powder Mixed Electrical Discharge Machining* – PMEDM), EDM sa pomoćnom elektrodom (*eng. Assisting Electrode Electrical Discharge Machining* – AEEDM) i EDM sa pomoćnom elektrodom u dielektrikumu sa pomešanim prahom (*eng. Assisting Electrode Powder Mixed Electrical Discharge Machining* – (AE+PM)EDM). Predmet istraživanja disertacije upravo se odnosi na problematiku unapređenja, modelovanja i optimizacije procesa PMEDM legure titanijuma i (AE+PM)EDM cirkonijum oksida. Osnovni cilj istraživanja je pronalaženje optimalnih ulaznih parametara PMEDM legure titanijuma (struja pražnjenja - I_e , dužina impulsa - t_i , koeficijent delovanja impulsa - τ i koncentracija grafitnog praha - GR) i (AE+PM)EDM cirkonijum oksida (ulazni parametri: I_e , t_i i GR), koji omogućuju dobijanje povoljnih izlaznih performansi obrada (srednja aritmetička hrapavost obrađene površine - R_a , proizvodnost obrade - MRR i relativno trošenje alata - TWR). Za ostvarivanje postavljenih ciljeva prvo su modelovani procesi PMEDM i (AE+PM)EDM. U ovom istraživanju za generisanje klasičnih matematičkih modela pri obradi legure titanijuma i cirkonijum oksida korišćena je metodologija odzivne površine (RSM). Za ocenu adekvatnosti dobijenih modela primenjena je analiza varijansi (ANOVA). Pored definisanja modela izlaznih performansi EDM procesa pomoću klasične metode kao što je RSM, izvršeno je i njihovo modelovanje pomoću alata veštačke inteligencije. U cilju dobijanja inteligentnih modela, za predikciju izlaznih performansi EDM korišćene su fazi logika i adaptivni neuro fazi sistemi. Verifikacija dobijenih modela izvršena je na osnovu skupa novih eksperimentalnih podataka. Optimizacija ulaznih parametara procesa PMEDM i (AE+PM)EDM sprovedena je primenom klasičnih metoda. Za jednokriterijumsku optimizaciju ulaznih parametara kod obrade legure titanijuma i cirkonijum oksida primenjena je Tagučijeva metoda, gde su izlazne performanse obrade bile: R_a , maksimalna visina neravnina obrađene površine - R_{max} , debljina defektnog sloja materijala obratka - DDS , MRR i TWR . U svrhu višekriterijumske optimizacije korišćena je metodologija odzivne površine, gde su za identifikaciju optimalnih ulaznih parametara obrade analizirane izlazne performanse R_a , MRR i TWR . Provera kvaliteta sprovedenih optimizacija, izvršena je verifikacijom usvojenih optimalnih režima PMEDM legure titanijuma i (AE+PM)EDM cirkonijum oksida. Rezultati stečeni ovim istraživanjem doprinose detaljnoj analizi savremene elektroerozivne obrade legure titanijuma i cirkonijum oksida.

ABSTRACT

Electrical Discharge Machining (EDM) is an unconventional process of wide industrial and scientific application. EDM is used in the machining of electroconductive materials, but its application is generally justified in the machining of complex geometry difficult-to-cut materials. In order to achieve the efficiency, electrical discharge machining of advanced engineering materials is constantly being researched and improved by existing or developing innovative EDM processes. More recently, the technological improvement of the EDM process can be achieved with three innovative methods: powder mixed EDM (PMEDM), assisting electrode EDM (AEEDM) and assisting electrode powder mixed EDM ((AE+PM)EDM). In this dissertation, the subject of the research is precisely the problem of improvement, modeling and optimization of PMEDM and (AE+PM)EDM processes in the machining of titanium alloy and zirconium oxide ceramic. The aim of research is to find optimal parameters of PMEDM titanium alloys (where input parameters were: discharge current - I_e , pulse duration - t_i , duty factor - τ and powder concentration - GR) and (AE+PM)EDM zirconium oxide ceramic (input parameters: I_e , t_i and GR), which enable obtain favorable output performance (average arithmetical mean surface roughness - R_a , material removal rate - MRR and tool wear rate - TWR). To achieve the set goals first, it was necessary to model PMEDM and (AE+PM)EDM processes. In this study, the response surface method - RSM was used to generate classical mathematical models in the machining of titanium alloy and zirconium oxide ceramic. An analysis of variance ANOVA was used to assess the model's adequacy. In addition to defining classical models by RSM, the artificial intelligence models have also been developed. In order to obtain intelligent models, for the prediction of EDM output performance, two approaches were implemented, using the fuzzy logic and the adaptive neuro fuzzy inference system. Verification obtained models were based on a set of new experimental data. The optimization of the PMEDM and (AE+PM)EDM processes was carried out using classical methods. For single-criterion optimization of input parameters for machining titanium alloy and zirconium oxide ceramic, Taguchi method was applied, where output performese were: R_a , maximum roughness height - R_{max} , defect layer thickness - DDS , MRR and TWR . For the purpose of multi-criteria optimization, the response surface methodology was used, where the output performance R_a , MRR and TWR was analyzed to identify the optimal input processing parameters. In order to verify the quality of the implemented optimization, verification of the adopted optimal PMEDM titanium alloy and (AE+PM)EDM zirconium oxide ceramic were performed. The results obtained by this research contribute to a detailed analysis of the newer methods of electrical discharge machining of titanium alloy and zirconium ceramic.

SADRŽAJ

| | |
|--|-----------|
| SPISAK SLIKA..... | VII |
| SPISAK TABELA..... | XI |
| SKRAĆENICE I SIMBOLI..... | XIV |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1 Struktura doktorske disertacije..... | 3 |
| 2. INOVACIONI PRAVCI RAZVOJA ELEKTROEROZIVNE OBRAD E..... | 3 |
| 2.1 Elektroerozivna obrada..... | 3 |
| 2.1.1 Osnovni princip obrade..... | 4 |
| 2.1.2 Fizičke osnove procesa obrade..... | 5 |
| 2.1.3 Parametri električnog impulsa elektroerozivne obrade..... | 6 |
| 2.1.4 Performanse elektroerozivne obrade..... | 8 |
| 2.1.4.1 Proizvodnost obrade..... | 8 |
| 2.1.4.2 Kvalitet obrade..... | 8 |
| 2.1.4.3 Tačnost obrade..... | 9 |
| 2.1.5 Primena elektroerozivne obrade..... | 10 |
| 2.2 Elektroerozivna obrada u dielektrikumu sa pomešanim prahom..... | 11 |
| 2.2.1 Princip PMEDM..... | 12 |
| 2.2.2 Tipovi elektroprovodljivog praha..... | 12 |
| 2.2.3 Uticaj dodavanja praha na izlazne performanse PMEDM..... | 14 |
| 2.3 Elektroerozivna obrada sa pomoćnom elektrodom..... | 16 |
| 2.3.1 Princip obrade sa pomoćnom elektrodom..... | 16 |
| 2.3.2 Tipovi pomoćnih elektroda..... | 17 |
| 2.3.3 Izlazne performanse AEEDM procesa..... | 20 |
| 2.4 EDM sa pomoćnom elektrodom u dielektrikumu sa pomešanim prahom..... | 23 |
| 2.5 Modelovanje i optimizacija elektroerozivne obrade..... | 24 |
| 2.5.1 Osnove teorije modelovanja i optimizacije..... | 25 |
| 2.5.2 Modelovanje i optimizacija procesa elektroerozivne obrade..... | 26 |
| 2.5.3 Pristupi kod obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom..... | 30 |
| 2.5.4 Pristupi kod obrade sa pomoćnom elektrodom..... | 31 |
| 2.6 Mogući pravci istraživanja inovativne elektroerozivne obrade..... | 32 |
| 3. PREDMET ISTRAŽIVANJA..... | 33 |
| 3.1 Cilj istraživanja..... | 34 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2 Hipoteze istraživanja..... | 35 |
| 3.3 Konceptija i metodologija istraživanja | 36 |
| 4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA | 39 |
| 4.1 Opšti uslovi pri eksperimentalnim ispitivanjima | 39 |
| 4.1.1 Mašina alatka | 39 |
| 4.1.2 Dielektrikum i aditivi | 40 |
| 4.1.3 Materijali obratka i alata | 41 |
| 4.2 Opis eksperimentalnih ispitivanja | 42 |
| 4.2.1 Postavka obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom | 42 |
| 4.2.2 Postavka obrade sa pomoćnom elektrodom | 44 |
| 4.3 Uslovi pri PMEDM legure titanijuma | 44 |
| 4.3.1 Struja pražnjenja..... | 44 |
| 4.3.2 Dužina impulsa..... | 45 |
| 4.3.3 Koeficijent delovanja impulsa..... | 46 |
| 4.3.4 Napon praznog hoda i napon pražnjenja..... | 46 |
| 4.3.5 Polaritet | 47 |
| 4.3.6 Aditivi pri PMEDM | 47 |
| 4.3.7 Sistematizovani izabrani parametri PMEDM legure titanijuma | 48 |
| 4.4 Uslovi pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida | 49 |
| 4.4.1 Struja pražnjenja..... | 49 |
| 4.4.2 Dužina impulsa..... | 50 |
| 4.4.3 Koeficijent delovanja impulsa..... | 50 |
| 4.4.4 Napon praznog hoda i napon pražnjenja..... | 51 |
| 4.4.5 Polaritet | 51 |
| 4.4.6 Aditivi pri (AE+PM)EDM | 51 |
| 4.4.7 Sistematizovani izabrani parametri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida | 52 |
| 4.5 Plan eksperimenta | 52 |
| 4.5.1 Centralni kompozicioni plan – PMEDM legure titanijuma | 52 |
| 4.5.2 Box-Behnken plan – (AE+PM)EDM cirkonijum oksida..... | 55 |
| 4.5.3 Taguči robusni plan..... | 56 |
| 4.5.3.1 Taguči plan pri PMEDM legure titanijuma..... | 57 |
| 4.5.3.2 Taguči plan pri obradi cirkonijum oksida | 57 |
| 4.6 Definisanje i merenje izlaznih performansi | 58 |
| 4.6.1 Proizvodnost obrade..... | 58 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.6.2 | Relativno trošenje alata | 59 |
| 4.6.3 | Hrapavost obrađene površine | 60 |
| 4.6.4 | Debljina defektnog sloja materijala obratka | 61 |
| 5. | REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA | 63 |
| 5.1 | Elektroerozivna obrada legure titanijuma..... | 63 |
| 5.1.1 | Centralni kompozicioni plan - izlazne performanse | 63 |
| 5.1.2 | Tagučni plan – izlazne performanse | 64 |
| 5.2 | Elektroerozivna obrada cirkonijum oksida | 65 |
| 5.2.1 | Box-Behnken plan – izlazne performanse | 65 |
| 5.2.2 | Tagučni plan – izlazne performanse | 65 |
| 6. | MODELOVANJE PROCESA ELEKTROEROZIVNE OBRAD E | 67 |
| 6.1 | Metodologija odzivne površine..... | 67 |
| 6.1.1 | Matematički modeli za PMEDM legure titanijuma | 68 |
| 6.1.1.1 | Model za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine | 69 |
| 6.1.1.2 | Model za proizvodnost obrade | 74 |
| 6.1.1.3 | Model za relativno trošenje alata..... | 78 |
| 6.1.2 | Matematički modeli za (AE+PM)EDM cirkonijum oksida | 81 |
| 6.1.2.1 | Model za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine | 82 |
| 6.1.2.2 | Model za proizvodnost obrade | 85 |
| 6.1.2.3 | Model za relativno trošenje alata..... | 89 |
| 6.2 | Metode veštačke inteligencije | 92 |
| 6.2.1 | Adaptivni neuro fazi sistem zaključivanja | 93 |
| 6.2.1.1 | Neuro fazi model za određivanje performansi PMEDM legure titanijuma | 95 |
| 6.2.2 | Fazi sistem zaključivanja | 98 |
| 6.2.2.1 | Fazi model izlaznih performansi kod (AE+PM)EDM cirkonijum oksida | 100 |
| 7. | OPTIMIZACIJA PROCESA ELEKTROEROZIVNE OBRAD E | 106 |
| 7.1 | Jednokriterijumska metoda optimizacije | 106 |
| 7.1.1 | Tagučni metoda..... | 107 |
| 7.1.1.1 | Optimizacija parametara PMEDM legure titanijuma..... | 109 |
| 7.1.1.2 | Optimizacija parametara pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida | 115 |
| 7.2 | Višekriterijumske metode optimizacije..... | 120 |
| 7.2.1 | Optimizacija parametara EDM pomoću metodologije odzivne površine | 120 |
| 7.2.1.1 | Optimizacija parametera procesa pri PMEDM legure titanijuma | 122 |
| 7.2.1.2 | Optimizacija parametera procesa pri AEEDM cirkonijum oksida..... | 124 |

| | |
|--|------------|
| 8. ANALIZA REZULTATA | 127 |
| 8.1 Analiza eksperimentalnih rezultata..... | 127 |
| 8.1.1 Analiza rezultata dobijenih pri PMEDM legure titanijuma | 127 |
| 8.1.1.1 Uticaj ulaznih parametara na srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine | 127 |
| 8.1.1.2 Uticaj ulaznih parametara na maksimalnu visinu neravnina obrađene površine | 129 |
| 8.1.1.3 Uticaj ulaznih parametara na debljinu defektnog sloja materijala obratka | 130 |
| 8.1.1.4 Uticaj ulaznih parametara na proizvodnost obrade | 131 |
| 8.1.1.5 Uticaj ulaznih parametara na relativno trošenje alata | 132 |
| 8.1.2 Analiza rezultata dobijenih pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida | 133 |
| 8.1.2.1 Uticaj ulaznih parametara na srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine | 133 |
| 8.1.2.2 Uticaj ulaznih parametara na maksimalnu visinu neravnina obrađene površine | 135 |
| 8.1.2.3 Uticaj ulaznih parametara na debljinu defektnog sloja obrađene površine | 136 |
| 8.1.2.4 Uticaj ulaznih parametara na proizvodnost obrade | 136 |
| 8.1.2.5 Uticaj ulaznih parametara na relativno trošenje alata | 138 |
| 8.2 Analiza modelovanja elektroerozivne obrade | 139 |
| 8.2.1 Analiza modela za PMEDM legure titanijuma | 139 |
| 8.2.2 Analiza modela za (AE+PM)EDM cirkonijum oksida | 142 |
| 8.3 Analiza optimizacije elektroerozivne obrade | 143 |
| 8.3.1 Analiza optimizacije za PMEDM legure titanijuma | 143 |
| 8.3.2 Analiza optimizacije za (AE+PM)EDM cirkonijum oksida | 146 |
| 9. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA..... | 148 |
| 9.1 Zaključci..... | 148 |
| 9.2 Pravci budućih istraživanja..... | 150 |
| 10. LITERATURA | 152 |

SPISAK SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 2-1. Osnovi princip elektroerozivne obrade | 3 |
| Slika 2-2. Mehanizam elektroerozivne obrade | 4 |
| Slika 2-3. Tipičan izgled postrojenja za elektroerozivnu obradu sa upuštanjem | 5 |
| Slika 2-4. Fizičke osnove procesa elektroerozivne obrade..... | 6 |
| Slika 2-5. Karakteristične veličine električnih impulsa pri elektroerozivnoj obradi:..... | 7 |
| Slika 2-6. Izgled površine nakon EDM pri različitim strujama pražnjenja za $TiAl_6V_4$: | 8 |
| Slika 2-7. Rastopljeni sloj i mikro pukotine kod EDM $TiAl_6V_4$:..... | 9 |
| Slika 2-8. Osnovne operacije elektroerozivne obrade | 10 |
| Slika 2-9. Primeri izrade složenih delova elektroerozivnom obradom | 10 |
| Slika 2-10. Primeri izrade delova složenog geometrijskog oblika elektroneprovodljive keramike | 11 |
| Slika 2-11. Usporedni prikaz klasične (a) i modifikovane (b) EDM (PMEDM)..... | 12 |
| Slika 2-12. Izgled erodirane površine čelika: a) klasična EDM; b) PMEDM – grafitni prah; c) PMEDM – silicijum prah; d) PMEDM – molibden prah | 13 |
| Slika 2-13. Usporedni prikaz EDM u kerozinu i kerozinu sa pomešanim grafitnim prahom.... | 14 |
| Slika 2-14. Primeri površine za različite uslove obrade: a) klasična EDM; b) modifikovana EDM (PMEDM) | 15 |
| Slika 2-15. Elektroerozivna obrada izolacione keramike sa primenom pomoćne elektrode.... | 16 |
| Slika 2-16. Ugljenični sloj nakon AEEDM izolacionih keramika | 17 |
| Slika 2-17. Šematski prikaz elektroerozivne obrade spoja metala (bakar) i keramike..... | 18 |
| Slika 2-18. Šematska ilustracija AEEDM izolacionih keramičkih materijala..... | 18 |
| Slika 2-19. Primeri formiranih pomoćnih elektroda u vidu grafitnog premaza | 19 |
| Slika 2-20. Hibridna pomoćna elektroda | 19 |
| Slika 2-21. Hrapavost obrađene površine nakon AEEDM pri različitim vrstama pomoćne elektrode (alat: bakar $\phi 5$ mm, $I_e = 15$ A, $t_i = 16$ μ s, $\tau = 50$ %) | 20 |
| Slika 2-22. Relacija između proizvodnosti obrade, hrapavosti obrađene površine i toplotne provodljivosti materijala obratka za Al_2O_3 | 21 |
| Slika 2-23. Promena relativnog trošenja alata i proizvodnosti obrade u zavisnosti dužine impulsa | 21 |
| Slika 2-24. Uticaj tipa alata na izlazne performanse AEEDM Al_2O_3 keramike..... | 22 |
| Slika 2-25. Tipična kriva skidanja materijala na primeru AEEDM Si_3N_4 | 22 |
| Slika 2-26. Elektroerozivna obrada sa pomoćnom elektrodom u tečnom dielektrikumu sa pomešanim prahom | 23 |
| Slika 2-27. Uticaj vrste i koncentracije praha na proizvodnost obrade kod (AE+PM)EDM ... | 24 |
| Slika 2-28. a) obradak ZrO_2 (sa dodatkom itrijum oksida Y_2O_3), b) komad uklonjen iz rupe, c) izrađena rupa..... | 24 |
| Slika 2-29. Teoretski modeli dostupni u literaturi za modelovanje EDM..... | 28 |
| Slika 2-30. Podela metoda optimizacije zastupljene kod EDM obrade | 29 |
| Slika 3-1. Identifikacija parametra procesa prema <i>Ishikawa</i> dijagramu | 36 |

| | |
|--|----|
| Slika 3-2. Uprošćena šema naučnog istraživanja primenjenog u radu | 38 |
| Slika 4-1. Elektroerozivno postrojenje <i>Agie Charmille</i> SP1-U..... | 39 |
| Slika 4-2. Materijali obratka pri EDM: a) $TiAl_6V_4$ i b) ZrO_2 | 41 |
| Slika 4-3. Alat za elektroerozivnu obradu od grafita TTK50..... | 42 |
| Slika 4-4. Tipovi PMEDM sistema: a) zatvoreni i b) otvoreni | 43 |
| Slika 4-5. Kadica sa elementima za pričvršćivanje i pozicioniranje obratka | 43 |
| Slika 4-6. Proces postavljanja pomoćne elektrode na izolacionu keramiku..... | 44 |
| Slika 4-7. Prikaz obrađene površine nakon probnog eksperimenta sa strujom pražnjenja | 45 |
| Slika 4-8. Prikaz promene performansi EDM u zavisnosti od dužine impulsa..... | 46 |
| Slika 4-9. Oštećenje površine usled visoke koncentracije grafitnog praha | 47 |
| Slika 4-10. Uticaj koncentracije grafitnog praha na izlazne performanse PMEDM | 48 |
| Slika 4-11. Izgled obrađene površine nakon AEEDM pri struji pražnjenja 3.2A | 49 |
| Slika 4-12. Uticaj dužine impulsa na izlazne performanse kod AEEDM ZrO_2 | 50 |
| Slika 4-13. Uticaj koncentracije grafitnog praha na performanse (AE+PM)EDM ZrO_2 | 51 |
| Slika 4-14. Tipovi centralnog kompozicionog plana..... | 53 |
| Slika 4-15. Box-Behnken plan u prostoru | 55 |
| Slika 4-16. Način definisanja dubine erodiranja i dužinskog trošenja alata..... | 59 |
| Slika 4-17. Abbe-ov uređaj za merenje dužine | 60 |
| Slika 4-18. Uređaj za merenje hrapavosti površine..... | 60 |
| Slika 4-19. Svetlosni mikroskop i primer pripremljenih uzoraka cirkonijum oksida i legure titanijuma..... | 61 |
| Slika 4-20. Primer definisanja debljine defektnog sloja nakon elektroerozivne obrade $TiAl_6V_4$, $DDS = 13.20 \mu m$ | 62 |
| Slika 4-21. Primer definisanja debljine defektnog sloja nakon elektroerozivne obrade ZrO_2 , $DDS = 17.93 \mu m$ | 62 |
| Slika 5-1. Debljine defektnog sloja materijala obratka pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 64 |
| Slika 5-2. Debljine defektnog sloja materijala obratka pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 66 |
| Slika 6-1. Normalizovani dijagram vrednosti ostatka modela za R_a pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 72 |
| Slika 6-2. Dijagram ostatka u odnosu na redosled izvođenja tačaka eksperimenta modela za R_a pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 73 |
| Slika 6-3. Konturni dijagram modela za R_a pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 73 |
| Slika 6-4. Prostorni dijagram modela za R_a pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 74 |
| Slika 6-5. Normalizovani dijagram vrednosti ostatka modela za MRR pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 76 |
| Slika 6-6. Dijagram ostatka u odnosu na redosled izvođenja eksperimenta modela za MRR pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 77 |
| Slika 6-7. Konturni dijagram modela za MRR pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 77 |
| Slika 6-8. Prostorni dijagram modela za MRR pri EDM $TiAl_6V_4$ | 78 |
| Slika 6-9. Normalizovani dijagram vrednosti ostatka modela za TWR pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 80 |
| Slika 6-10. Dijagram ostatka u odnosu na redosled izvođenja tačaka eksperimenta modela TWR pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 80 |
| Slika 6-11. Konturni dijagram modela za TWR pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 81 |

| | |
|--|-----|
| Slika 6-12. Prostorni dijagram modela za TWR pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 81 |
| Slika 6-13. Normalizovani dijagram vrednosti ostatka modela za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 84 |
| Slika 6-14. Dijagram ostatka u odnosu na redosled izvođenja tačaka eksperimenta modela za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 84 |
| Slika 6-15. Konturni dijagram modela za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 85 |
| Slika 6-16. Prostorni dijagram modela za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 85 |
| Slika 6-17. Normalizovani dijagram vrednosti ostatka modela za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 88 |
| Slika 6-18. Dijagram ostatka u odnosu na redosled izvođenja tačaka eksperimenta modela za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 88 |
| Slika 6-19. Konturni dijagram modela za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 88 |
| Slika 6-20. Prostorni dijagram modela za za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 89 |
| Slika 6-21. Normalizovani dijagram vrednosti ostatka modela za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 91 |
| Slika 6-22. Sistemska greška modela za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 91 |
| Slika 6-23. Konturni dijagram modela za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 91 |
| Slika 6-24. Prostorni dijagram modela za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 92 |
| Slika 6-25. Arhitektura adaptivne mreže ANFIS | 93 |
| Slika 6-26. ANFIS modeli za određivanje performansi procesa PMEDM legure titanijuma .. | 95 |
| Slika 6-27. Srednja kvadratna greška trening podataka pri obuci modela za određivanje R_a .. | 96 |
| Slika 6-28. Primer testiranja modela za određivanje R_a | 97 |
| Slika 6-29. Osnovni elementi fazi sistema zaključivanja [130] | 99 |
| Slika 6-30. Funkcije pripadnosti za ulazne i izlazne promenljive | 102 |
| Slika 6-31. MIMO model za određivanje izlaznih performansi kod (AE+PM)EDM cirkonijum oksida | 104 |
| Slika 6-32. Baza znanja MIMO modela od 11 produkcionih pravila | 105 |
| Slika 7-1. Blok šema primenjenih metoda optimizacije | 106 |
| Slika 7-2. Grafički prikaz S/N odnosa za R_a | 110 |
| Slika 7-3. Grafički prikaz S/N odnosa za R_{max} | 111 |
| Slika 7-4. Grafički prikaz S/N odnosa za DDS | 112 |
| Slika 7-5. Grafički prikaz S/N odnosa za MRR | 113 |
| Slika 7-6. Grafički prikaz S/N odnosa za TWR | 114 |
| Slika 7-7. Grafički prikaz S/N odnosa za R_a kod (AE+PM)EDM ZrO_2 | 116 |
| Slika 7-8. Grafički prikaz S/N odnosa za R_{max} pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 117 |
| Slika 7-9. Grafički prikaz S/N odnosa za DDS pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 118 |
| Slika 7-10. Grafički prikaz S/N odnosa za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 119 |
| Slika 7-11. Grafički prikaz S/N odnosa za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 120 |
| Slika 7-12. Bar dijagram sa vrednostima poželjnosti faktora i izlaznih parametara | 123 |
| Slika 7-13. Optimalni parametri PMEDM legure titanijuma dobijeni pomoću funkcije poželjnih odziva | 123 |

| | |
|---|-----|
| Slika 7-14. Konturni dijagram poželjnosti kod PMEDM legure titanijuma | 124 |
| Slika 7-15. Prostorni dijagram poželjnosti kod PMEDM legure titanijuma | 124 |
| Slika 7-16. Optimalni parametri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida dobijeni pomoću funkcije poželjnih odziva..... | 125 |
| Slika 7-17. Bar dijagram sa vrednostima poželjnosti faktora i izlaznih parametara (AE+PM)EDM procesa | 126 |
| Slika 7-18. Konturni dijagram poželjnosti kod (AE+PM)EDM cirkonijum oksida | 126 |
| Slika 7-19. Prostorni dijagram poželjnosti kod (AE+PM)EDM cirkonijum oksida | 126 |
| Slika 8-1. Odzivni ANOVA grafik za R_a pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 128 |
| Slika 8-2. Uticaj koncentracije grafitnog praha na R_a pri EDM $TiAl_6V_4$ | 129 |
| Slika 8-3. Odzivni ANOVA grafik za R_{max} pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 130 |
| Slika 8-4. Odzivni ANOVA grafik za DDS pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 130 |
| Slika 8-5. Odzivni ANOVA grafik za MRR pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 131 |
| Slika 8-6. Uticaj koncentracije grafitnog praha na MRR pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 132 |
| Slika 8-7. Odzivni ANOVA grafik za TWR pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 133 |
| Slika 8-8. Uticaj koncentracije grafitnog praha na TWR pri EDM $TiAl_6V_4$ | 133 |
| Slika 8-9. Odzivni ANOVA grafik za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 134 |
| Slika 8-10. Uticaj koncentracije grafitnog praha na R_a pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 135 |
| Slika 8-11. Odzivni ANOVA grafik za R_{max} pri EDM ZrO_2 | 135 |
| Slika 8-12. Odzivni ANOVA grafik za DDS pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 136 |
| Slika 8-13. Odzivni ANOVA grafik za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 137 |
| Slika 8-14. Uticaj koncentracije grafitnog praha na MRR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 137 |
| Slika 8-15. Odzivni ANOVA grafik za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 138 |
| Slika 8-16. Uticaj koncentracije grafitnog praha na TWR pri EDM ZrO_2 | 139 |
| Slika 8-17. Izmerene hrapavosti obrađene površine za optimalan režim pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 144 |
| Slika 8-18. Debljina defektnog sloja materijala obratka za optimalan režim pri PMEDM $TiAl_6V_4$, $DDS = 6.22 \mu m$ | 144 |
| Slika 8-19. Hrapavost obrađene površine za optimalan režim dobijen na osnovu višekriterijumske optimizacije pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 145 |
| Slika 8-20. Hrapavost obrađene površine za optimalan režim dobijen na osnovu jednokriterijumske optimizacije pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 146 |
| Slika 8-21. Debljina defektnog sloja materijala obratka za optimalan režim pri EDM ZrO_2 , $DDS = 10.51 \mu m$ | 147 |
| Slika 8-22. Hrapavost obrađene površine za optimalan režim dobijen na osnovu višekriterijumske optimizacije pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 147 |

SPISAK TABELA

| | |
|---|----|
| Tabela 4-1. Karakteristike ulja <i>Ilocut EDM 180 – Castrol</i> | 40 |
| Tabela 4-2. Svojstva materijala obratka | 42 |
| Tabela 4-3. Svojstva materijala alata..... | 42 |
| Tabela 4-4. Parametri električnog impulsa pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 48 |
| Tabela 4-5. Ne električni parametri pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 48 |
| Tabela 4-6. Parametri električnog impulsa pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 52 |
| Tabela 4-7. Ne električni parametri pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 52 |
| Tabela 4-8. Proračun broja eksperimentalnih tačaka..... | 53 |
| Tabela 4-9. Ograničenja faktora pri PMEDM legure titanijuma..... | 54 |
| Tabela 4-10. Centralni kompozicioni četvorofaktorni plan pri PMEDM legure titanijuma | 54 |
| Tabela 4-11. Parametri obrade i njihovi nivoi za CCD pri EDM TiAl ₆ V ₄ | 55 |
| Tabela 4-12. Ograničenja faktora pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 56 |
| Tabela 4-13. Parametri obrade i njihovi nivoi za BBD pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 56 |
| Tabela 4-14. Boks-Behnken trofaktorni plan pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 56 |
| Tabela 4-15. Parametri obrade i njihovi nivoi za Tagučići plan pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 57 |
| Tabela 4-16. Tagučići ortogonalni niz L ₉ (3 ⁴) pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 57 |
| Tabela 4-17. Parametri obrade i njihovi nivoi za Tagučići plan pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 58 |
| Tabela 4-18. Tagučići ortogonalni niz L ₉ (3 ⁴) pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 58 |
| Tabela 5-1. Plan eksperimenta i rezultati merenja prema CCD pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 63 |
| Tabela 5-2. Rezultati merenja za Tagučići ortogonalni niz L ₉ (3 ⁴) pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 64 |
| Tabela 5-3. Plan eksperimenta i rezultati merenja prema BBD pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 65 |
| Tabela 5-4. Rezultati merenja za Tagučići ortogonalni niz L ₉ (3 ⁴) L ₉ pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 66 |
| Tabela 6-1. Izbor modela za R_a na osnovu ANOVA analize pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 69 |
| Tabela 6-2. ANOVA predloženog 2FI linearnog modela za R_a pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 70 |
| Tabela 6-3. ANOVA redukovanog modela za R_a pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 71 |
| Tabela 6-4. Osnovni statistički podaci usvojenog modela za R_a pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 71 |
| Tabela 6-5. Izbor modela za MRR na osnovu ANOVA analize pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 74 |
| Tabela 6-6. ANOVA predloženog kvadratnog modela za MRR pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 75 |
| Tabela 6-7. ANOVA redukovanog modela za MRR pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 76 |
| Tabela 6-8. Osnovni statistički podaci usvojenog modela za MRR pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 76 |
| Tabela 6-9. Izbor modela za TWR na osnovu ANOVA analize pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 78 |
| Tabela 6-10. ANOVA predloženog kvadratnog modela za TWR pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 79 |
| Tabela 6-11. ANOVA redukovanog modela za TWR pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 79 |
| Tabela 6-12. Osnovni statistički podaci usvojenog modela za TWR pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 80 |
| Tabela 6-13. Izbor modela za R_a na osnovu ANOVA analize pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 82 |
| Tabela 6-14. ANOVA predloženog kvadratnog modela za R_a (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 83 |
| Tabela 6-15. ANOVA redukovanog modela za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 83 |
| Tabela 6-16. Osnovni statistički podaci usvojenog modela za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 84 |
| Tabela 6-17. Izbor modela za MRR na osnovu ANOVA analize pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 86 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 6-18. ANOVA predloženog kvadratnog modela za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 86 |
| Tabela 6-19. ANOVA redukovanog modela za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 87 |
| Tabela 6-20. Osnovni statistički podaci usvojenog modela za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 87 |
| Tabela 6-21. Izbor modela za TWR na osnovu ANOVA analize pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 89 |
| Tabela 6-22. ANOVA predloženog kvadratnog modela za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 90 |
| Tabela 6-23. Osnovni statistički podaci usvojenog modela za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 90 |
| Tabela 6-24. Trening i test podaci za kreiranje ANFIS modela pri PMEDM legure titanijuma | 98 |
| Tabela 6-25. Ulazne veličine i njihove jezičke promenljive | 101 |
| Tabela 6-26. Izlazne promenljive sa parametrima funkcije pripadnosti | 101 |
| Tabela 6-27. Baza pravila za MIMO model | 105 |
| Tabela 7-1. S/N odnosi za izlazne performanse PMEDM legure titanijuma..... | 109 |
| Tabela 7-2. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za R_a)..... | 110 |
| Tabela 7-3. Optimalno podešavanje ulaznih parametara za R_a | 111 |
| Tabela 7-4. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za R_{max})..... | 111 |
| Tabela 7-5. Optimalno podešavanje ulaznih parametara za R_{max} | 112 |
| Tabela 7-6. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za DDS)..... | 112 |
| Tabela 7-7. Optimalno podešavanje ulaznih parametara za DDS | 113 |
| Tabela 7-8. Odzivna tabela S/N odnosa ("veća vrednost je bolja" za MRR)..... | 113 |
| Tabela 7-9. Optimalno podešavanje parametara za MRR | 114 |
| Tabela 7-10. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za TWR)..... | 114 |
| Tabela 7-11. Optimalno podešavanje parametara za TWR | 115 |
| Tabela 7-12. S/N odnosi izlaznih performansi pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 115 |
| Tabela 7-13. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za R_a)..... | 116 |
| Tabela 7-14. Optimalno podešavanje parametara za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 116 |
| Tabela 7-15. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za R_{max})..... | 117 |
| Tabela 7-16. Optimalno podešavanje parametara za R_{max} pri EDM ZrO ₂ | 117 |
| Tabela 7-17. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za DDS)..... | 118 |
| Tabela 7-18. Optimalno podešavanje parametara za DDS pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 118 |
| Tabela 7-19. Odzivna tabela S/N odnosa ("veća vrednost je bolja" za MRR)..... | 119 |
| Tabela 7-20. Optimalno podešavanje parametara za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 119 |
| Tabela 7-21. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za TWR)..... | 120 |
| Tabela 7-22. Optimalno podešavanje parametara za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 120 |
| Tabela 7-23. Cilj, ograničenja, koeficijenti težine i važnosti kod PMEDM legure TiAl ₆ V ₄ . | 122 |
| Tabela 7-24. Lista pet najboljih kombinacija nivoa faktora pri PMEDM legure TiAl ₆ V ₄ | 122 |
| Tabela 7-25. Cilj, ograničenja, koeficijenti težine i važnosti kod (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 125 |
| Tabela 7-26. Lista pet najboljih kombinacija nivoa faktora pri (AE+PM)EDM ZrO ₂ | 125 |
| Tabela 8-1. Redukovana ANOVA tabela na osnovu plana L ₉ (3 ⁴) za R_a pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 128 |
| Tabela 8-2. Redukovana ANOVA tabela na osnovu plana L ₉ (3 ⁴) za R_{max} pri PMEDM TiAl ₆ V ₄ | 129 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 8-3. Redukovana ANOVA tabela na osnovu plana $L_9(3^4)$ za DSS pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 130 |
| Tabela 8-4. Analiza varijanse za MRR pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 131 |
| Tabela 8-5. Redukovana ANOVA tabela na osnovu plana $L_9(3^4)$ za TWR pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 132 |
| Tabela 8-6. ANOVA tabela na prema $L_9(3^4)$ za R_a pri (AE+PMEDM) ZrO_2 | 134 |
| Tabela 8-7. ANOVA tabela na prema $L_9(3^4)$ za R_{max} pri (AE+PMEDM) ZrO_2 | 135 |
| Tabela 8-8. ANOVA tabela na prema $L_9(3^4)$ za DDS pri (AE+PMEDM) ZrO_2 | 136 |
| Tabela 8-9. ANOVA tabela na prema $L_9(3^4)$ za MRR pri (AE+PMEDM) ZrO_2 | 136 |
| Tabela 8-10. Redukovana ANOVA tabela na prema $L_9(3^4)$ za TWR pri (AE+PMEDM) ZrO_2 | 138 |
| Tabela 8-11. Upporedni prikaz eksperimentalnih i modelskih vrednosti kod PMEDM $TiAl_6V_4$ | 140 |
| Tabela 8-12. Eksperimenti za verifikaciju modela kod PMEDM $TiAl_6V_4$ | 141 |
| Tabela 8-13. Rezultati verifikaciju eksperimenata | 141 |
| Tabela 8-14. Upporedni prikaz eksperimentalnih i modelskih vrednosti pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 142 |
| Tabela 8-15. Eksperimenti za verifikaciju modela pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 143 |
| Tabela 8-16. Rezultati verifikacionih podataka kod pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 143 |
| Tabela 8-17. Optimalni parametri jednokriterijumske optimizacije pri PMEDM $TiAl_6V_4$... | 144 |
| Tabela 8-18. Optimalni parametri višekriterijumske optimizacije pri PMEDM $TiAl_6V_4$ | 145 |
| Tabela 8-19. Upporedni prikaz optimalnih parametara pri (AE+PM)EDM ZrO_2 | 146 |
| Tabela 8-20. Optimalni parametri višekriterijumske optimizacije pri (AE+PM)EDM ZrO_2 . | 147 |

SKRAĆENICE I SIMBOLI

| Srpski nazivi | Oznake | Engleski nazivi |
|---|------------|--|
| Elektroerozivna obrada | EDM | <i>Electrical discharge machining</i> |
| Elektroerozivna obrada u tečnom dielektrikumu sa pomešanim prahom | PMEDM | <i>Powder mixed electrical discharge machining</i> |
| Elektroerozivna obrada sa pomoćnom elektrodom | AEEDM | <i>Assisting electrode electrical discharge machining</i> |
| Elektroerozivna obrada sa pomoćnom elektrodom u dielektrikumu sa pomešanim prahom | (AM+PM)EDM | <i>Assisting electrode powder mixed electrical discharge machining</i> |
| Pomoćna elektroda | AE | <i>Assisting electrode</i> |
| Struja pražnjenja | I_e | <i>Discharge current</i> |
| Dužina impulsa | t_i | <i>Pulse duration</i> |
| Vreme pauze | t_o | <i>Pulse pause</i> |
| Perioda impulsa | t_p | <i>Pulse period</i> |
| Napon praznog hoda | U_o | <i>Open gap voltage</i> |
| Napon pražnjenja | U_e | <i>Gap voltage</i> |
| Energija pražnjenja | E_f | <i>Discharge energy</i> |
| Frekvencija impulsa | f | <i>Pulse frequency</i> |
| Koeficijent delovanja impulsa | τ | <i>Duty cycle</i> |
| Koncentracija grafitnog praha | GR | <i>Concentration of graphite powder</i> |
| Radni zazor | a | <i>Gap distance</i> |
| Metodologija odzivne površine | RSM | <i>Response surface methodology</i> |
| Srednja aritmetička hrapavost obrađene površine | R_a | <i>Arithmetic average surface roughness</i> |
| Maksimalna visina neravnina | R_{max} | <i>Maximum roughness depth</i> |
| Debljina defektnog sloja | DDS | <i>Defect layer thickness</i> |
| Proizvodnost elektroerozivne obrade | MRR | <i>Material removal rate</i> |
| Relativno trošenje alata | TWR | <i>Tool wear rate</i> |
| Zona uticaja toplote | HAZ | <i>Heat affected zone</i> |
| Rastopljeni sloj | RL | <i>Recast layer</i> |
| Centralni kompozicioni plan | CCD | <i>Central composite design</i> |
| Box-Behnken plan | BBD | <i>Box-Behnken design</i> |
| Analiza varijansi | ANOVA | <i>Analysis of variance</i> |
| Plan eksperimenata | DOE | <i>Design of experiments</i> |
| Adaptivni neuro-fazi sistem zaključivanja | ANFIS | <i>Adaptive neuro-fuzzy inference system</i> |
| Više-ulazno više-izlazni | MIMO | <i>Multi-inputs multi-outputs</i> |
| Taguči metod | TM | <i>Taguchi method</i> |
| Fazi logika | FL | <i>Fuzzy logic</i> |
| Fazi sistem zaključivanja | FIS | <i>Fuzzy inference system</i> |

1. UVOD

Savremeni inženjerski materijali sve su prisutniji u proizvodnoj industriji raznih oblasti: avionska, automobilska, elektronska, mašinska, bioinženjering itd. [1]. Značajno povećane termičkih i mehaničkih osobina savremenih materijala daju ogromne ekonomske benefite industriji kroz poboljšane performanse i konstrukciju proizvoda [2]. Međutim, zbog fizičko-hemijskih osobina i metalografskog stanja, obradivost savremenih inženjerskih materijala je na relativno niskom nivou [3].

Elektroerozivna obrada (*eng. Electrical Discharge Machining – EDM*) je nekonvencionalni postupak obrade čija je primena u praksi veoma rasprostranjena. Predstavlja postupak skidanja materijala kojim se mogu obrađivati svi elektroprovodljivi materijali, bez obzira na njihova fizičko-metalurška svojstva [4]. Primenjuje se pri obradi teško obrađivih materijala i delova složenog geometrijskog oblika, koji se klasičnim metodama veoma teško ili nikako ne mogu obrađivati. Preduslov realizacije procesa EDM je da obradak ima bar minimalnu elektroprovodljivost [5].

Međutim, današnja primena EDM je ograničena zbog njenje relativno male proizvodnosti obrade i niskog kvaliteta obrađene površine. Moguće tehnološko unapređenje elektroerozivne obrade može se postići inovacijom postojećih procesa. Dodavanjem elektroprovodljivog praha u dielektrikum nastaje modifikovani proces uklanjanja materijala pod nazivom elektroerozivna obrada u tečnom dielektrikum sa pomešanim prahom (*eng. Powder Mixed Electrical Discharge Machining – PMEDM*), koja znatno utiče na izlazne performanse procesa EDM teško obrađivih materijala. Druga izdvojena inovativna metoda, koja omogućuje EDM proces elektroneprovodljivih materijala, naziva se elektroerozivna obrada sa pomoćnom elektrodom (*eng. Assisting Electrode Electrical Discharge Machining – AEEDM*). Kombinovanjem predhodne dve metode, nastaje EDM sa pomoćnom elektrodom u dielektrikum sa pomešanim prahom (*eng. Assisting Electrode Powder Mixed Electrical Discharge Machining – (AE+PM)EDM*).

Istraživanja su generalno podeljena na dva dela. Prvi deo se odnosi na elektroerozivnu obradu legure titanijuma - TiAl_6V_4 u dielektrikum sa pomešanim grafitnim prahom. Cilj istraživanja je pronalaženje optimalnih ulaznih parametara obrade (struja pražnjenja - I_e , dužina impulsa - t_i , koeficijent delovanja impulsa - τ i koncentracija grafitnog praha - GR) koji omogućuju dobijanje najpovoljnijih izlaznih performansi procesa (srednja aritmetička hrapavost obrađene površine - R_a , maksimalna visina neravnina obrađene površine - R_{max} , debljina defektnog sloja materijala obratka - DDS , proizvodnost obrade - MRR i relativno trošenje alata - TWR).

Drugi deo istraživanja se odnosi na elektroerozivnu obradu elektroneprovodljive keramike. Da bi se elektroneprovodljivi materijali, pre svega keramike, obrađivali EDM postupkom potrebno je obezbediti električni kontakt. Dodavanjem elektroprovodljivog sloja (označen kao pomoćna elektroda, *eng. Assisting Electrode – AE*) na površinu keramike, omogućuje se proces EDM elektroneprovodljivih keramičkih materijala. Jedan od predstavnika elektroneprovodljive keramike koja je korišćena u ovom istraživanju je cirkonijum oksid –

ZrO₂. Potrebno je naglasiti da se obrada ZrO₂ u ovom istraživanju takođe izvodi u dielektrikumu sa pomešanim prahom, odnosno primenom (AE+PM)EDM metode (*eng. Assisting Electrode Powder Mixed Electrical Discharge Machining*). Pri tome, osnovni cilj je realizovati praktičnu izvedbu i pronalaženje optimalnih parametara (I_e , t_i i GR) pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida u funkciji izlaznih performansi procesa (R_a , R_{max} , DDS , MRR i TWR).

Za ostvarivanje postavljenih ciljeva generisani su adekvatni modeli izlaznih performansi PMEDM i (AE+PM)EDM procesa. Za generisanje matematičkih modela pri obradi legure titanijuma i cirkonijum oksida korišćena je metodologija odzivne površine (*eng. Response Surface Methodology – RSM*). Modelovanje izlaznih performansi procesa (R_a , MRR i TWR) kod PMEDM legure titanijuma izvršeno je na osnovu eksperimenata prema centralnom kompozicionom planu eksperimenta (*eng. Central Composite Design – CCD*), dok je za (AE+PM)EDM cirkonijum oksida izvršeno prema Box-Behnken planu (*eng. Box-Behnken design – BBD*). Jedan od glavnih razloga primene BBD plana eksperimenta ogleda se u ograničenju podešavanja parametara mašine alatke, odnosno nemogućnosti postavljanja ulaznih parametara EDM na veći broj nivoa. Za ocenu adekvatnosti modela korišćena je analiza varijansi (*eng. ANalysis Of VAriance – ANOVA*). Na ovaj način su dobijena po tri matematička modela elektroerozivne obrade za svaki obrađivani materijal.

Pored definisanja modela izlaznih performansi EDM procesa pomoću klasične metode kao što je RSM, izvršeno je i njihovo modelovanje pomoću alata veštačke inteligencije. U cilju dobijanja inteligentnih modela, za predikciju izlaznih performansi procesa EDM korišćene su metode veštačke inteligencije. Prema centralnom kompozicionom planu (PMEDM legure titanijuma) kreirana su tri modela primenom adaptivnih neuro fazi sistema (*eng. Adaptive Neuro Fuzzy Inference System – ANFIS*), a prema Box-Behnken planu ((AE+PM)EDM cirkonijum oksida) kreiran je jedan više-ulazno-više-izlazni (*eng. Multi-Inputs-Multi-Outputs – MIMO*) model primenom fazi logike (*eng. Fuzzy logic – FL*). Iako se u praksi ANFIS metoda pokazala efikasnijom u odnosu na fazi logiku, zbog manjeg broja eksperimentalnih tačaka BBD plana, opravdana je primena fazi logike. Verifikacija dobijenih modela izvršena je na osnovu skupa novih eksperimentalnih ispitivanja.

Za jednokriterijumsku optimizaciju ulaznih parametara kod obrade legure titanijuma i cirkonijum oksida primenjena je Tagučići metoda, gde nije bio potreban matematički model već samo eksperimentalni podaci koji su dobijeni na osnovu Tagučići robusnog plana (*eng. Taguchi design - TD*). U ovom slučaju za izlazne performanse PMEDM i (AE+PM)EDM obrada izabrane su: R_a , R_{max} , DDS , MRR i TWR . Na osnovu Tagučići metode rangirani su ulazni parametri elektroerozivnih obrada po važnosti uticaja na vrednost odabrane izlazne promenljive.

Dobijeni modeli pomoću RSM predstavljali su osnovu za višekriterijumsku optimizaciju ulaznih parametara EDM. Za identifikaciju optimalnih ulaznih parametara PMEDM pri obradi legure titanijuma i (AE+PM)EDM pri obradi cirkonijum oksida analizirane su izlazne performanse R_a , MRR i TWR .

U svrhu provjere kvaliteta sprovedenih optimizacija, izvršena je verifikacija usvojenih optimalnih režima PMEDM legure titanijuma i (AE+PM)EDM cirkonijum oksida.

Rezultati stečeni ovim istraživanjem doprinose detaljnoj analizi novih načina elektroerozivne obrade savremenih inženjerskih materijala. Primenom usvojenih principa stiče se detaljnija slika o inovativnoj primeni elektroerozivne obrade u dielektrikum sa pomešanim prahom i elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom, kao i njihove kombinacije.

1.1 STRUKTURA DOKTORSKE DISERTACIJE

U **prvom poglavlju** data su uvodna razmatranja elektroerozivne obrade savremenih inženjerskih materijala. Objasnjeni su osnovni motivi i ukratko je predstavljen predmet istraživanja doktorske disertacije.

Inovacioni pravci razvoja u oblasti elektroerozivne obrade dati su u **drugom poglavlju**. Detaljno je prikazan pregled relevantne literature u području predmeta istraživanja. Predstavljeni su osnovni principi elektroerozivne obrade u dielektrikum sa pomešanim prahom (PMEDM) i elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom (AEEDM), kao i njihove kombinacije (AE+PM)EDM. Jasno su definisani pristupi modelovanja i optimizacije prethodno navedenih metoda.

U **trećem poglavlju** opširno je opisan predmet istraživanja, koji se upravo odnosi na problematiku unapređenja, modelovanja i optimizacije procesa elektroerozivnih obrada legure titanijuma i cirkonijum oksida. Opisani su glavni ciljevi, postavljene koncepcija i metodologija istraživanja. Na osnovu pregleda i analize literaturnih izvora u oblasti predmeta istraživanja taksativno su postavljene hipoteze istraživanja.

U skladu sa postavljenim ciljem i koncepcijom istraživanja u **četvrtom poglavlju** su opisana eksperimentalna istraživanja. Pored načina planiranja eksperimenta, uslova pri eksperimentalnim istraživanjima, prikazane su i postavke PMEDM i (AE+PM)EDM.

Na osnovu eksperimentalnih planova, rezultati istraživanja doktorske disertacije predstavljeni su u **petom poglavlju**.

U **šestom poglavlju** su prikazane teoretske osnove metoda koje su korišćene za modelovanje procesa elektroerozivne obrade. Takođe su dati postupci modelovanja za svaku istraživanu izlaznu performansu procesa PMEDM i (AE+PM)EDM, kao i izbor adekvatnog modela.

Optimizacija parametara procesa elektroerozivne obrade opisana je u **sedmom poglavlju**. Na osnovu primene jednokriterijumske i višekriterijumske metoda optimizacije procesa PMEDM legure titanijuma i (AE+PM)EDM cirkonijum oksida, dobijene su optimalne vrednosti ulaznih parametara elektroerozivnih obrada.

U **osmom poglavlju** je prezentovana analiza rezultata. Opisani su postupci verifikacije dobijenih modela na osnovu novih eksperimentalnih podataka i provjere dobijenih optimalnih režima elektroerozivne obrade na osnovu potvrdnih eksperimenata.

Na osnovu izvedenih eksperimentalnih istraživanja i analiza rezultata u **devetom poglavlju** dati su zaključci i pravci budućih istraživanja.

Deseto poglavlje čini spisak korišćene literature u istraživanju.

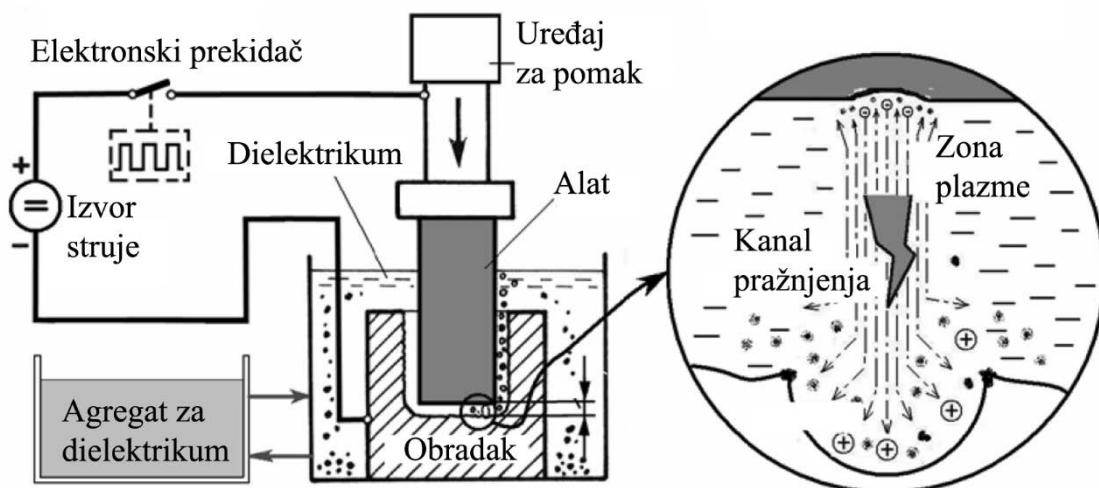
2. INOVACIONI PRAVCI RAZVOJA ELEKTROEROZIVNE OBRADE

Elektroerozivna obrada je široko zastupljen i ekonomski opravdan postupak koji pruža velike mogućnosti primena, a najčešće u izradi alata za oblikovanje materijala, specijalnih i mikrodelova, prototipova i sl. Elektroerozivnom obradom se obrađuju svi elektroprovodljivi materijali ali je primena uglavnom opravdana kod obrade visokolegiranih čelika, tvrdih metala i metalnih keramika. U novije vreme prisutni su razni inovacioni pravci razvoja elektroerozivne obrade u cilju obrade i drugih savremenih teško obradivih inženjerskih materijala.

2.1 ELEKTROEROZIVNA OBRADA

Princip elektroerozivne obrade (*eng. Electrical Discharge Machining – EDM*), tj., prenos naelektrisanih čestica preko električnog pražnjenja, uočio je *J. Priestley* davne 1770. godine. Međutim, industrijska primena ove obrade datira od 1943. kada je bračni par *B.R.* i *N.I. Lazarenko* definisao osnovne principe i izradio prvo EDM postrojenje [6]. Lazarenkov sistem je stvarao električne impulse pomoću otpornika i kondenzatora, primenom tzv. RC kola (*eng. Resistor–Capacitor - RC*), koje je korišćeno u široj upotrebi do 1950-ih, a kasnije je poslužio kao model za sukcesivan razvoj savremenih sistema elektroerozivne obrade [7].

Proces elektroerozivne obrade se temelji na uklanjanju materijala pomoću serije ponavljanja električnih pražnjenja između elektroda (alata i obratka) u prisustvu dielektrične tečnosti. Elektroerozivna obrada se razlikuje od većine postupka, time što alat ne stvara fizički kontakt za obratkom prilikom uklanjanja materijala. Na slici 2-1. je prikazan osnovni princip procesa elektroerozivne obrade [4].



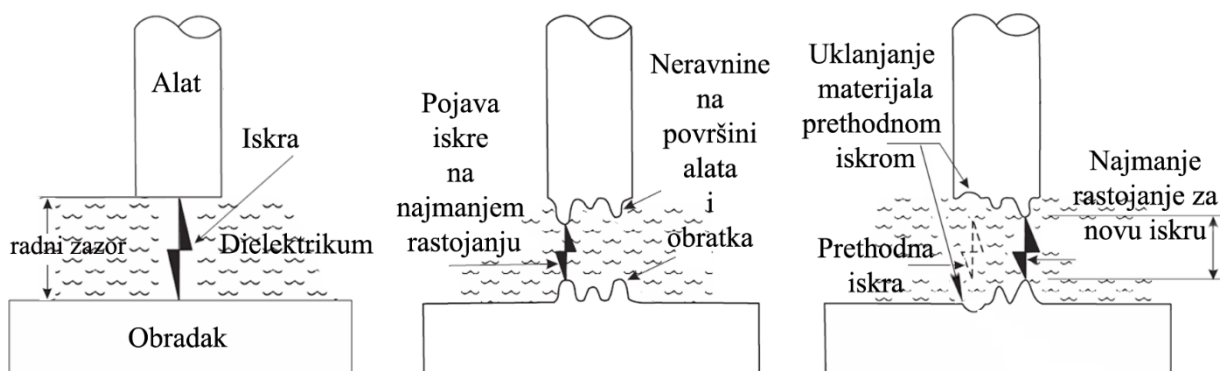
Slika 2-1. Osnovi princip elektroerozivne obrade [4]

2.1.1 Osnovni princip obrade

Elektroerozivna obrada predstavlja proces uklanjanja materijala korišćenjem precizno kontrolisanih električnih iskri (varnica) koje se javljaju između alata i obratka na najmanjem rastojanju u prisustvu tečnog dielektrikuma. Rastojanje između alata i obratka označava se kao "radni zazor" i zavisno od uslova koji se ostvaruju pri obradi kreće se u granicama 0.005÷0.5 mm.

Slika 2-2. ilustruje osnovni mehanizam elektroerozivne obrade [8]. U zoni pražnjenja nakon pojave iskre dolazi do uklanjanja materijala obratka i alata što inicira povećanje rastojanja na tom delu. Ovo uzrokuje pojavu nove iskre na najmanjem rastojanju između alata i obratka [9].

Proces električnog pražnjenja između alata i obratka otpočinje uspostavljanjem toka struje kroz uski kanal dielektrikuma. U relativno maloj zoni pražnjenja dolazi do transformacije električne u toplotnu energiju. Nastala toplotna energija dovodi do pojave visoke temperature koja uzrokuje topljenje, sagorevanje i isparavanje većeg dela materijala obratka i manjeg dela alata. Nakon prekida toka struje dolazi do prestanka električnog pražnjenja i naglog hlađenja usled cirkulacije dielektrikuma, koje dovodi do eksplozivnog izbacivanja produkata obrade. Ovim se na površini obratka obrazuju udubljenja, drugim rečima krateri. Formiranje kratera se odvija velikom brzinom i to na mestima gde je otpor struje najmanji. Visokom učestalošću električnih pražnjenja nastaje krater za kraterom, odnosno uklanjanje materijala.



Slika 2-2. Mehanizam elektroerozivne obrade [8]

Za održavanje konstantnog radnog zazor između alata i obratka koristi se regulator pomaka. Njegova uloga je da obezbedi pomeranje alata prema obratku kako ne bi došlo do prekida procesa usled uklanjanja materijala. S druge strane, u slučaju pojave kontinualnog toka struje regulator pomaka brzo podiže alat kako ne bi došlo do oštećenja uparenih elektroda.

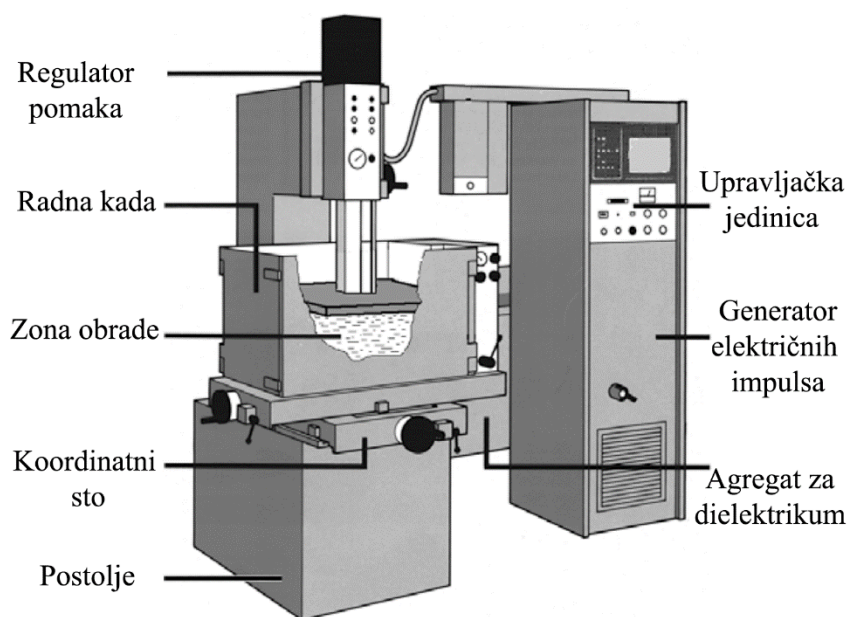
Postoji veliki broj različitih postrojenja za elektroerozivnu obradu, klasifikovanih prema nameni, području primene, kapacitetu ili stepenu automatizacije. Jedno od postrojenja koje je najčešće u upotrebi je elektroerozivna mašina za upuštanje sa punom elektrodom [4].

Karakteristične celine elektroerozivne mašine za upuštanje sa punom elektrodom čine sledeće jedinice:

- sistem mašine za upuštanje elektrode;

- generator električnih impulsa;
- agregat za cirkulaciju i prečišćavanje dielektrikuma i
- upravljačka jedinica.

Na slici 2-3. dat je šematski prikaz EDM postrojenja za upuštanje sa osnovnim jedinicama, tj. elementima [4].



Slika 2-3. Tipičan izgled postrojenja za elektroerozivnu obradu sa upuštanjem [4]

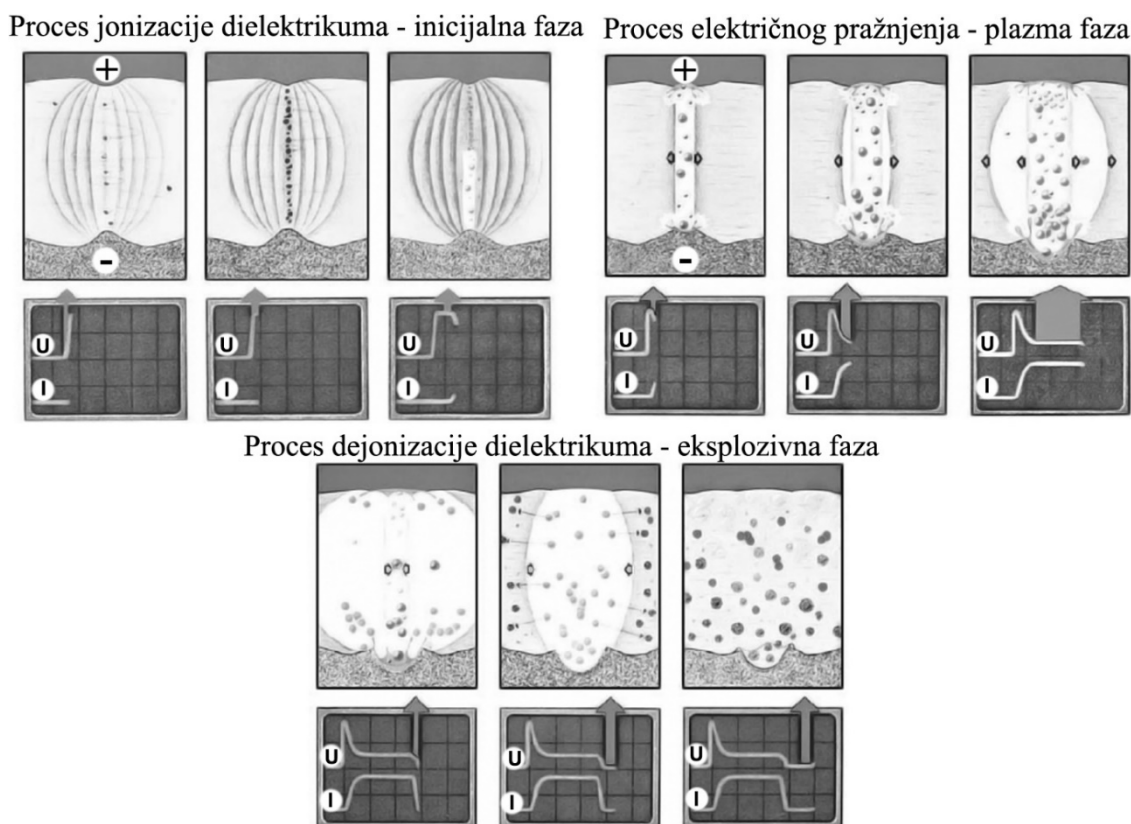
2.1.2 Fizičke osnove procesa obrade

Proces skidanja materijala za vreme jednog električnog pražnjenja je posledica vrlo složenih fizičkih pojava, koje se manifestuju kroz jonizaciju dielektrikuma, električno pražnjenje i dejonizaciju dielektrikuma [10], slika 2-4.

Inicijalnu fazu za stvaranje elektroprovodljivog kanala između alata i obratka kroz dielektrikum predstavlja proces jonizacije. Na mestu najmanjeg otpora prolaska struje stvara se jako električno polje u kome dolazi do nagomilavanja elektroprovodljivih čestica koje pod dejstvom magnetnih sila obrazuju elektroprovodljivi most. Nakon toga sa negativno naelektrisane elektrode (katoda) u pravcu pozitivno naelektrisane elektrode (anoda) dolazi do pokretanja elektrona koji se na svom putu sudaraju sa neutralnim česticama dielektrikuma i produktima obrade. Pri tome dolazi do cepanja čestica i stvaranja novih negativno i pozitivno naelektrisanih čestica. Na taj način se izaziva lančana reakcija uz mnoštvo naelektrisanih čestica. Ovaj proces se naziva jonizacija [11].

Nakon jonizacije počinje proces električnog pražnjenja, odnosno pretvaranja električne struje u toplotnu energiju. Visoka koncentracija naelektrisanih čestica omogućuje tok električne struje, koja rapidno raste prema maksimalnoj vrednosti čime započinje proces električnog

pražnjenja. Pri tome se ostvaruje ogromna koncentracija energije, do 30000 J/mm^3 , a zona plazme koja se javlja dostiže temperaturu do $40000 \text{ }^\circ\text{C}$, tj. na površini obratka do $10000 \text{ }^\circ\text{C}$ [12].



Slika 2-4. Fizičke osnove procesa elektroerozivne obrade [10]

Usled visoke temperature inicira se trenutno rastapanje i delimično isparavanje materijala. Takođe dolazi do nastajanja gasnog mehura koji se širi i tako dovodi do pojave lokalnog pritiska u zoni obrade.

Prekid procesa električnog pražnjenja naziva se dejonizacija. Nagli pad broja naelektrisanih čestica, nestanak kanala pražnjenja i pad pritiska posledica su prekida toka struje. Zbog povratnog pritiska na gasni mehur od strane dielektrikuma dolazi do njegovog pucanja i izbacivanja rastopina i čvrstih čestica materijala iz kratera. Gašenjem kanala pražnjenja nestaju pozitivno i negativno naelektrisane čestice i ostvaruje se dejonizacija lokalnog prostora. Ovim procesom se obezbeđuje stabilnost impulsnog pražnjenja i sprečava se kontinualni tok električne struje, odnosno pojava električnog luka [10, 13]

2.1.3 Parametri električnog impulsa elektroerozivne obrade

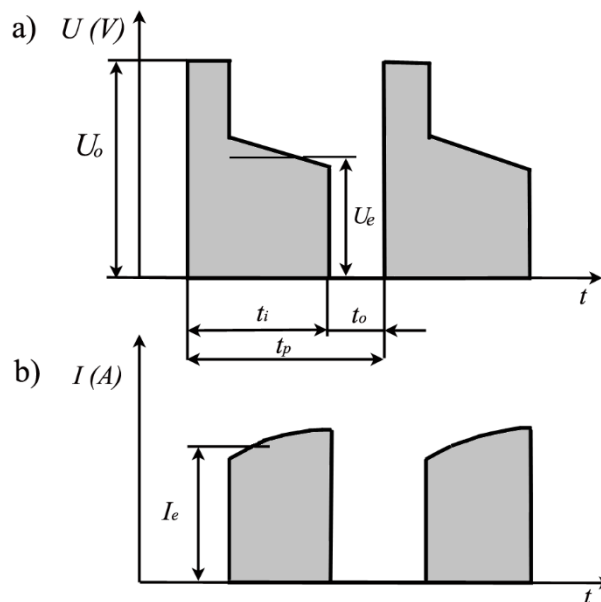
Tokom procesa električnog pražnjenja razlikuju se strujni i naponski impulsi. Osnovne karakteristične veličine električnih impulsa su [11]:

- *Dužina impulsa t_i* – vreme ukupnog trajanja impulsa izraženo u mikrosekundama. Uklanjanje materijala je direktno proporcionalno količini energije koja se ostvaruje

tokom ovog vremenskog perioda. Energija pražnjenja se kontroliše strujom pražnjenja i dužinom impulsa.

- *Vreme pauze* t_o – vreme pauze između dva impulsa. Ovo vreme omogućava da rastopljeni materijal očvrsne i putem strujanja dielektrikuma se izbací iz zone obrade. Ovaj parametar direktno utiče na brzinu obrade, ali ako je ovo vreme prekratko to će izazvati nestabilan proces.
- *Perioda impulsa* t_p – vreme između početka prethodnog i narednog impulsa, odnosno $t_p = t_i + t_o$.
- *Struja pražnjenja* I_e – vrednost struje za vreme jednog pražnjenja. Direktno je proporcionalna brzini uklanjanja materijala.
- *Napon praznog hoda* U_o – napon između alata i obratka pre početka pražnjenja.
- *Napon pražnjenja* U_e – srednja vrednost napona između elektroda za vreme električnog pražnjenja.

Na slici 2-5. prikazane su osnovne veličine električnih impulsa pri EDM [12].



Slika 2-5. Karakteristične veličine električnih impulsa pri elektroerozivnoj obradi:

a) naponski impulsi; b) strujni impulsi [12]

Izvedene veličine električnog impulsa koje su najčešće u upotrebi su:

- *Koeficijent delovanja impulsa* τ - procenat periode impulsa koji se koristi za koristan rad, tj. skidanje materijala, a predstavlja odnos dužine i periode impulsa, odnosno: $\tau = t_i / t_p$.
- *Energija pražnjenja* E_e – srednja vrednost električne energije koja se za vreme jednog impulsa pretvara u toplotu, odnosno: $E_e = U_e \cdot I_e \cdot t_e$.
- *Frekvencija impulsa* f – broj (učestalost) impulsa u jedinici vremena, odnosno: $f = 1 / t_p = 1 / (t_i + t_o)$.

2.1.4 Performanse elektroerozivne obrade

Kao i kod drugih postupaka obrade, osnovne performanse procesa EDM su proizvodnost obrade, tačnost obrade i kvalitet obrađene površine. Važnost ovih performansi je različita i uglavnom zavisi od uslova obrade i namene obrađenih delova [10]. Sa ekonomskog aspekta proizvodnost predstavlja najvažniju performansu obrade. Kvalitet i tačnost obrade su važne karakteristike u pogledu funkcije obrađenog dela, odnosno njegove namene.

2.1.4.1 Proizvodnost obrade

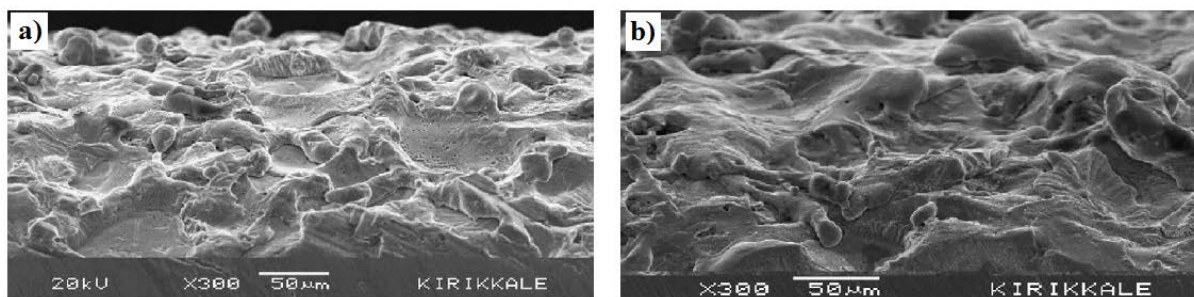
Proizvodnost obrade (*eng. Material removal rate - MRR*) predstavlja učinak pri EDM i obično se koristi za kvantifikaciju brzine pri kojoj se obrada odvija. Kod elektroerozivne obrade proizvodnost se obično izražava količinom skinutog materijala u jedinici vremena (mm^3/min). Uglavnom zavisi od sledećih faktora: materijala obratka, parametara električnog impulsa, uslova ispiranja radnog prostora, provodljivosti dielektrikuma, površine i materijala alata i dr. [11].

Potrebno je naglasiti da na obradivost nekog materijala utiču samo fizičko hemijske osobine, dok tvrdoća i druga mehanička svojstva praktično nemaju nikakvog uticaja. Obradivost pojedinih materijala se najčešće utvrđuje eksperimentalnim putem. Proizvodnost obrade i obradivost su dve direktno proporcionalne veličine, odnosno ukoliko materijal ima bolju obradivost onda je proizvodnost obrade veća.

2.1.4.2 Kvalitet obrade

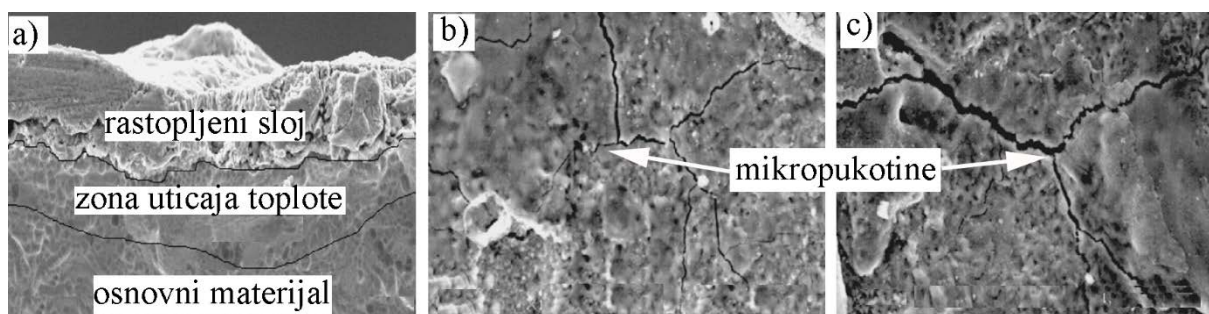
Kvalitet elektroerozivne obrade predstavlja opšte stanje obrađene površine. Izražava se preko komponenti kao što su hrapavost obrađene površine, zona uticaja toplote (*eng. Heat Affected Zone - HAZ*), stanje i debljina defektnog sloja, mikropukotine i sl.

Površina koja se dobija elektroerozijom je matirana i sastavljena od niza sitnih udubljenja, odnosno kratera. Na slici 2-6. je prikazan izgled obrađene površine nakon procesa EDM, za različite struje pražnjenja [14].



Slika 2-6. Izgled površine nakon EDM pri različitim strujama pražnjenja za TiAl_6V_4 :
a) $I_e = 3 \text{ A}$ i b) $I_e = 25 \text{ A}$ [14]

Nakon elektroerozije obrađena površina je presvučena slojem koji sačinjavaju naslage nečistoća i materijali elektroda (alata i obratka). Ovaj sloj je nepoželjna pojava koji nastaje zbog generisanja visokih temperatura u zoni obrade. Poznat je pod nazivom rastopljeni sloj (*eng. recast layer - RL*). Ispod površine rastopljenog sloja u većini slučajeva dolazi do pojave zone uticaja toplote, koja zajedno sa rastopljenim slojem sačinjava defektni sloj. Otklanjanje ovog sloja ostvaruje se mehaničkim ili hemijskim putem [4]. Na slici 2-7. dat je poprečni presek defektnog sloja, kao i mikropukotine koje se javljaju u zoni obrade [14].



Slika 2-7. Rastopljeni sloj i mikro pukotine kod EDM TiAl₆V₄ [14]:

- a) poprečni presek ($I_e = 6 \text{ A}$ i $t_i = 100 \text{ } \mu\text{s}$),
- b) mikropukotine pri $I_e = 6 \text{ A}$ i $t_i = 100 \text{ } \mu\text{s}$ i
- c) mikropukotine pri $I_e = 25 \text{ A}$ i $t_i = 100 \text{ } \mu\text{s}$

Ocena klase hrapavosti obrađene površine, dobijene elektroerozivnim postupkom izvodi se na osnovu VDI (*eng. Verein Deutscher Ingenieure - VDI*) normi, koje imaju 51 klasu. Najfinija VDI – 0 je sa vrednošću srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine $R_a = 0.1 \text{ } \mu\text{m}$, dok je najgrublja VDI – 51 sa $R_a = 31.5 \text{ } \mu\text{m}$. Kod EDM se praktično može ostvariti širok dijapazon hrapavosti obrađene površine od najfinije N5 do grube N12 [4].

2.1.4.3 Tačnost obrade

Tačnost obrade pri EDM uglavnom zavisi od opštih faktora kao što su tačnost mašine, krutost obradnog sistema, tačnost pozicioniranja alata i obratka, tačnosti izrade alata, toplotnih dilatacija elektroda, promene radnog zazora, trošenja alata i dr. [4].

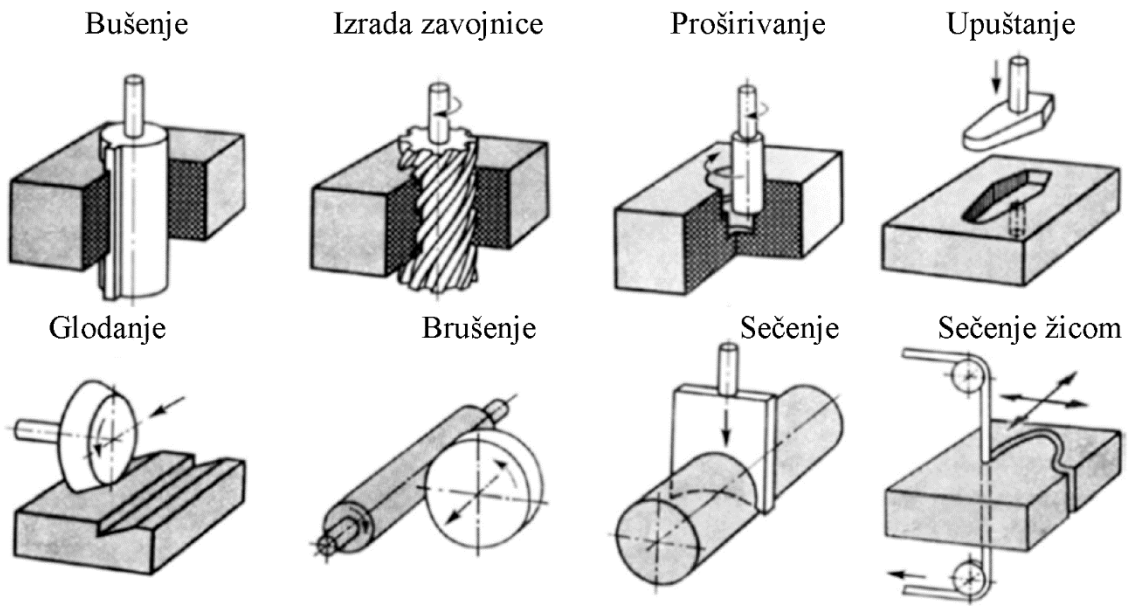
Kao posledica visoke temperature plazme koja se javlja u zoni pražnjenja, nastaje neizbežno trošenje alata – elektrode, koje ima veliki uticaj na tačnost EDM. Javlja se na čeonj površini, ali delimično i na bočnim površinama. Trošenje alata u najvećoj meri zavisi od karakteristika električnih impulsa, vrste materijala elektroda, uslova ispiranja radnog prostora, osetljivosti uređaja za pomak, itd... Razlikuju se sledeće vrste grešaka zbog trošenja alata: koničnost otvora – koje nastaje zbog bočnog trošenja alata; smanjenje dubine erodiranja – nastaje zbog čeonog trošenja elektrode; zaobljenje radnih ivica – koje nastaje usled intenzivnijih trošenja oštih ivica alata.

Trošenje alata može da se izražava u vidu relativnog trošenja koje predstavlja odnos razlike dužine alata pre i posle obrade prema dubini erodiranja materijala obratka.

2.1.5 Primena elektroerozivne obrade

Zbog prirode samog procesa, EDM se primenjuje za izradu delova složenih oblika i pri obradi teško obradivih čelika, tvrdih metala, metalnih keramika koji se konvencionalnim postupcima teško ili nikako ne mogu obrađivati.

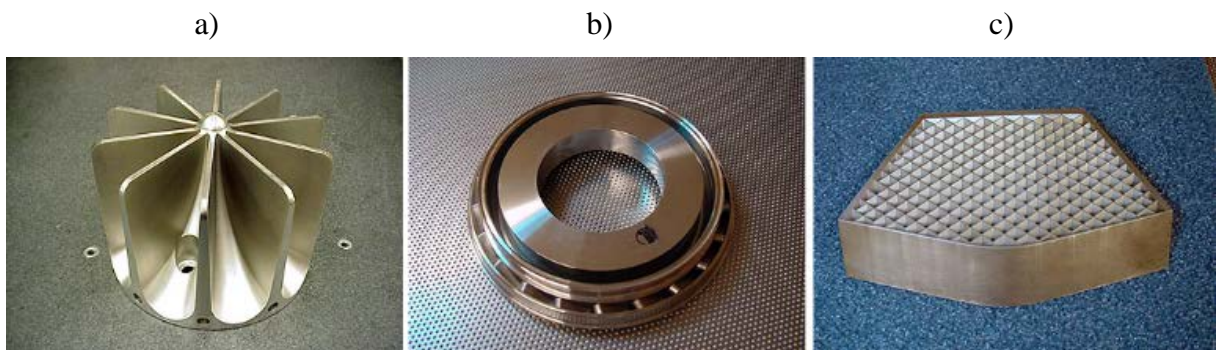
U zavisnosti od oblika alata, pomoću elektroerozivne obrade sa punom elektrodom, mogu da se izvode sledeće operacije: bušenje, proširivanje, upuštanje, glodanje, brušenje, prosecanje, sečenje i dr. slika 2-8. [4].



Slika 2-8. Osnovne operacije elektroerozivne obrade [4]

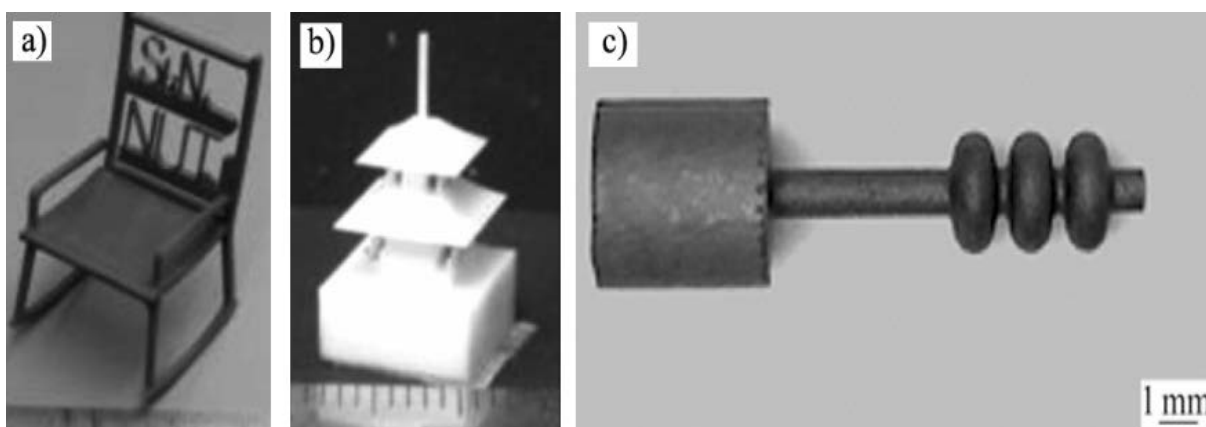
Područje primene EDM je veoma široko i prilično je dugačak spisak raznih vrsta delova koji se primenom ovog postupka mogu efikasno izrađivati. Najčešće se koristi pri izradi alata za plastično deformisanje, kokila za livenje, alata za preradu plastičnih masa, složenih, specijalnih i mikronskih delova, prototipova i dr.

Na slici 2-9. data je praktična primena elektroerozivne obrade teško obradivih materijala kao što su nerđajući čelik (2-9-a), legure inkonela (2-9-b) i titanijuma (2-9-c).



Slika 2-9. Primeri izrade složenih delova elektroerozivnom obradom

U novije vreme razvijene su metode pomoću kojih je moguća i elektroerozivna obrada pojedinih elektroneprovodljivih materijala. Primer proizvoda u obliku stolice, koji je izrađen od elektroneprovodljive keramike Si_3N_4 (silicijum nitrid) dat je na slici 2-10-a. Deo složenog geometrijskog oblika od elektroneprovodljive keramike ZrO_2 prikazan je na slici 2-10-b. Oba dela su izrađena od priprema kockastog oblika stranica 50 mm pomoću EDM sa žičanom elektrodom. Na slici 2-10-c prikazan je proizvod dobijen modifikovanim procesom, AEEDM sa žičanom elektrodom. Vreme izrade delova bilo je 24 sata. Obrada ovakvih delova primenom konvencionalnih postupaka je praktično nemoguća [15].



Slika 2-10. Primeri izrade delova složenog geometrijskog oblika elektroneprovodljive keramike [15]

2.2 ELEKTROEROZIVNA OBRADA U DIELEKTRIKUMU SA POMEŠANIM PRAHOM

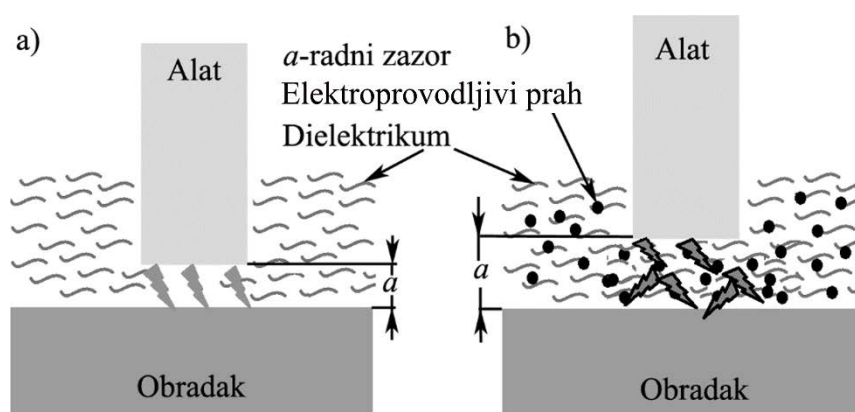
Tokom vremena, istraživanja elektroerozivne obrade su intenzivirana i prvi naučni radovi iz elektroerozivne obrade pojavljuju se 1960-ih godina [16, 17]. Već tada je primećena prednost ove tehnologije u pogledu mogućnosti obrade teško obradivih materijala [18]. Međutim, sa razvojem i usavršavanjem drugih postupaka obrade, primena EDM postaje ograničena sa stanovišta proizvodnosti obrade i kvaliteta obrađene površine.

Sedamdesetih godina prošlog veka, tačnije 1967. godine, *Karafuzi* je izneo ideju o unapređenju procesa EDM [19]. Dokazao je da se dodavanjem aditiva u dielektrikum, može postići povećanje proizvodnosti obrade. Vođen time *Pal* 1971. godine [20] definiše osnove EDM u dielektrikum sa pomešanim prahom (*eng. Powder Mixed Electrical Discharge Machining - PMEDM*), gde je sa dodavanjem grafitnog praha u razmeri 1.5 g/l došao do značajnog povećanja proizvodnosti obrade. Međutim, u ovom radu nije spomenuta krupnoća zrna praha niti je izneto objašnjenje vezano za stepen povećanja proizvodnosti obrade.

Shvativši ovu činjenicu autor *Jeswani* 1980. godine objavljuje istraživanje u kome jasno definiše uslove obrade i detaljno obrazlaže dobijene rezultate [21]. Pri sprovođenju eksperimenata upotrebio je grafitni prah krupnoće zrna 10 μm koji je pomešao sa kerozinom u razmeri 4 g/l. Analizom dobijenih rezultata najuočljivija zapažanja su povećanje proizvodnosti obrade do 60% i smanjenje trošenja alata do 15%.

2.2.1 Princip PMEDM

Elektroprovodljiv prah koji se dodaje u tečni dielektrikum redukuje izolaciona svojstva dielektrikuma i uzrokuje povećanje radnog zazora između alata i obratka. Povećanje radnog zazora implicira efikasniju cirkulaciju dielektrikuma, tj. ispiranje radnog prostora između alata i obratka. Na taj način EDM postaje stabilna, čime se unapređuju tehnološke karakteristike procesa, kao što su povećana proizvodnost obrade i smanjena hrapavost obrađene površine, a takođe dolazi i do manjeg trošenja alata [22]. Na slici 2-11. dat je uporedni prikaz klasične (a) i modifikovane (b) EDM (PMEDM).



Slika 2-11. Uporedni prikaz klasične (a) i modifikovane (b) EDM (PMEDM)

Prostor između alata i obratka, odnosno radni zazor, ispunjen je česticama elektroprovodljivog praha. Pod dejstvom napona jednosmerne struje, na najmanjem lokalnom rastojanju između površine alata i obratka, tj. na mestu najmanjeg otpora prolaska električne struje, obrazuje se jako elektromagnetno polje. U električnom polju dolazi do intenzivnog nagomilavanja čestica praha, čime se stvara efekat premošćavanja, gradeći pri tome svojevrstan elektroprovodljivi most, tj. takozvanu "cik cak" formu. Zbog povećanog efekta premošćavanja napon pražnjena i izolaciona svojstva dielektrikuma se smanjuju [23].

U isto vreme čestice praha menjaju svojstva kanala pražnjenja koji ujednačava raspoređivanje varničenja po česticama praha i time smanjuje gustinu struje. Na osnovu prethodno iznetog, zbog ove ravnomerne distribucije pražnjena dolazi do uniformne erozije, odnosno plitkih kratera na radnom predmetu, što dovodi do smanjenja hrapavosti obrađene površine, a samim tim i do povećanja tačnosti obrade [24].

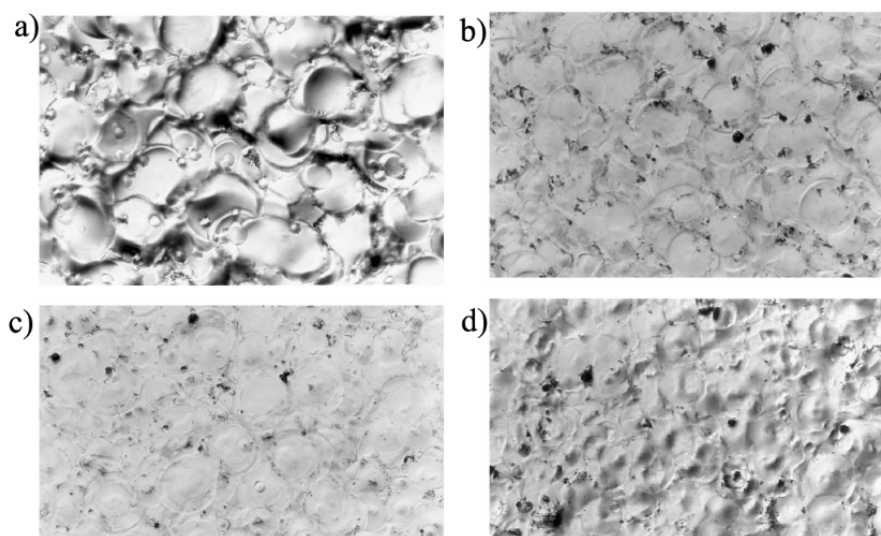
2.2.2 Tipovi elektroprovodljivog praha

Razni tipovi elektroprovodljivog praha se mogu mešati sa tečnim dielektrikumom, među kojima se izdvajaju: aluminijum, grafit, silicijum, bakar, silicijum karbid i drugi. Koji se tipovi praha mogu koristiti sa tečnim dielektrikumom, kojih krupnoća zrna, u kojoj koncentraciji i kakav je njihov uticaj na performanse PMEDM procesa istraživao je manji broj istraživača.

Do devedesete godine prošlog veka objavljen je mali broj radova koji se bave tematikom elektroerozivne obrade u dielektrikumom sa pomešanim prahom. Jedan od njih je i rad objavljen strane *Mohri-a*, koji je silicijum prah krupnoće zrna $10 \div 30 \mu\text{m}$ pomešao sa tečnim dielektrikumom [25]. Obrada je izvedena sa malim strujama pražnjenja ($0.5 \div 1 \text{ A}$), kratkim dužinama trajanja impulsa ($\leq 3 \mu\text{s}$) i negativnim polaritetom alata. Analizom procesa obrade primećeno je smanjenje hrapavosti obrađene površine na $R_a \leq 2 \mu\text{m}$. Na sličan način je i *Narumiya* pod specifičnim uslovima obrade koristio aluminijumski i grafitni prah, krupnoće zrna $15 \mu\text{m}$ i koncentracije u rangu od 2 do 15 g/l [26]. Ovde je takođe zabeleženo smanjenje srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine i to ispod $2 \mu\text{m}$.

Nešto veći broj radova objavljen je tokom devedesetih godina prošlog veka, čime se može zaključiti da dolazi do postepene ekspanzije postupka EDM u dielektrikumom sa pomešanim prahom. Sredinom devedesetih je *Ming* u kontrolisanim uslovima obrade od strane mikrokompjutera, dodavanjem elektroprovodljivog praha 4 g/l i tečnog aditiva 4 g/l u dielektrikum, pozitivno uticao na izlazne performanse procesa [27]. Došao je do znatnog povećanja proizvodnosti obrade, smanjenja relativnog trošenja alata i hrapavosti obrađene površine čak do $R_a \leq 1 \mu\text{m}$.

Wong je koristio prahove različite elektroprovodljivosti, kao što su grafit, silicijum, aluminijum, drobljeno staklo, silicijum karbid i molibden sulfat, a ispitao njihov uticaj na hrapavost obrađene površine [28]. Pri elektroerozivnoj obradi koristio je bakarni alat presvučen sa materijalom visoke električne otpornosti (silicijum) čime je postigao konstantnu struju tokom pražnjenja. Došao je do zaključka da prahovi: grafit (krupnoće zrna $40 \mu\text{m}$) i silicijum (krupnoće zrna $45 \mu\text{m}$), daju najbolje rezultate sa stanovišta hrapavosti obrađene površine. Postignuto je značajno smanjenje hrapavosti obrađene površine, odnosno $R_a = 0.62 \mu\text{m}$ i to sa silicijumovim prahom, dok je sa grafitnim prahom $R_a = 0.75 \mu\text{m}$, odnosno dobijena je površina sa visokim sjajem (efekat ogledala) što je suprotno od klasične EDM gde se uglavnom dobijaju matirane površine. Na slici 2-12. prikazane su erodirane površine čelika sa različitim vrstama prahova pomešanih u dielektrikumom.



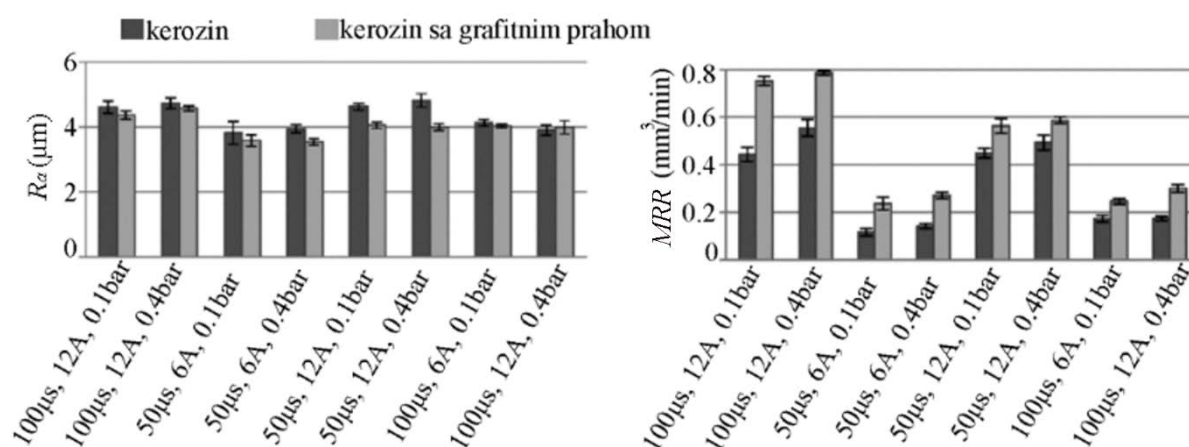
Slika 2-12. Izgled erodirane površine čelika [28]: a) klasična EDM; b) PMEDM – grafitni prah; c) PMEDM – silicijum prah; d) PMEDM – molibden prah

Prethodna istraživanja su prevashodno bazirana na korišćenju jednog tipa praha koji se meša sa dielektrikumom. Na ideju miksovanja različitih prahova došao je *Yan* koristeći kombinaciju praha hroma i aluminijuma pomešanih u dielektrikum, pri čemu je ispitao je njihov uticaj na izlazne performanse procesa [29]. Opravdao je hipotezu da se miksturom dielektrikuma sa prahovima hroma i aluminijuma, povećava radni zazor između alata i obratka, što dovodi do stabilnosti procesa i razgranavanja struje pražnjenja, tj. do smanjenja hrapavosti obrađene površine. Eksperimentalnim rezultatima je potvrdio da ako se pojedinačno pomeša prah hroma sa dielektrikumom, dolazi do veće mikrotvrdoće površinskog sloja na obratku nego pri miksturi praha aluminijuma.

2.2.3 Uticaj dodavanja praha na izlazne performanse PMEDM

Do početka novog milenijuma proces elektroerozivne obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom uglavnom je bio primenjen pri finim obradama, tj. akcenat je bio stavljan samo na kvalitet obrađene površine. *Zhao* je među prvima izveo eksperimentalna istraživanja vezana za proizvodnost obrade i kvalitet obrađene površine pri gruboj elektroerozivnoj obradi u dielektrikumu sa pomešanim prahom [30]. Poređenjem dobijenih rezultata sa klasičnom EDM, pri istim režimima obrade, došao je do saznanja da pri strujama pražnjenja većeg intenziteta (19 A) i kratkim vremenom dužine trajanja impulsa (10 μ s) dolazi do povećanja proizvodnosti obrade. Pod pomenutim uslovima PMEDM dobio je povećanje proizvodnosti obrade približno 70%.

Poboljšanje performansi elektroerozivne obrade legure titanijuma u kerozinu sa pomešanim grafitnim prahom krupnoće 37 μ m, prikazano je u radu [31]. Izvedeni eksperimenti su pokazali da upotreba grafitnog praha pomešanog sa kerozinom tokom obrade značajno povećava proizvodnost obrade, smanjuje hrapavost obrađene površine i relativno trošenje alata, slika 2-13.



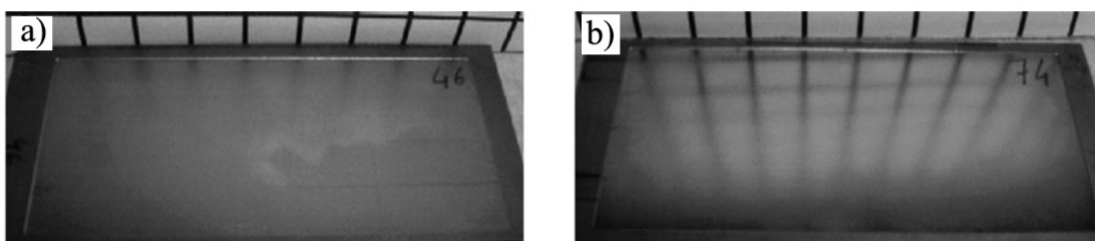
Slika 2-13. Uporedni prikaz EDM u kerozinu i kerozinu sa pomešanim grafitnim prahom [31]

Sledeći literaturni izvor još jednom potvrđuje povećanje proizvodnosti obrade i smanjenje hrapavosti obrađene površine upotrebom dielektrikuma koji je pomešan sa silicijumovim prahom [32]. U ovom istraživanju upotrebljeno je više alata različitog poprečnog preseka pri dva različita postupka obrade, sa i bez dodatog praha. Upotreba 2 g/l silicijum praha krupnoće zrna 10 μm dovodi do kraćeg vremena obrade, odnosno povećanja proizvodnosti obrade. Takođe je dobijena površina obrade visokog sjaja srednje aritmetičke hrapavosti $R_a = 0.09 \mu\text{m}$ za poprečni presek alata 1 cm^2 , odnosno $R_a = 0.59 \mu\text{m}$ za 64 cm^2 . Shodno ovome može se zaključiti da hrapavost obrađene površine varira sa promenom poprečnog preseka alata.

Zanimljivo je pomenuti i istraživanje predstavljeno u radu [33]. Ovde je pokazana klasifikacija parametara obrade i to na: električne (struja i napon pražnjenja, dužina trajanja impulsa, vreme pauze), ne električne (tip ispiranja radnog prostora, vreme obrade), parametre praha (vrsta, koncentracija, krupnoća zrna) i parametre alata (materijal i poprečni presek alata). Analizom eksperimenata došlo se do saznanja da na kvalitet obrađene površine i proizvodnost obrade kod PMEDM najveći uticaj imaju struja pražnjenja, dužina trajanja impulsa, vreme pauze i koncentracija praha u dielektrikumu. Shodno ovome, sa stanovišta kvaliteta obrađene površine se preporučuju parametri sa strujom pražnjenja manjeg intenziteta i kraćim dužinama trajanja impulsa.

Uprkos intenzivnom istraživanju procesa PMEDM postoji ograničeno znanje o kvantitativnom uticaju parametara obrade na prečnik i dubina kratera pri upotrebi većeg poprečnog preseka alata. Grupa naučnika iz Portugala, pod okriljem instituta superiornih tehnika iz Lisabona je realizovala istraživanje u okviru koga su izvedeni setovi eksperimenata za klasičan postupak EDM i PMEDM [34]. Došli su do saznanja da kod klasične EDM sa alatom većeg poprečnog preseka, zbog otežanog ispiranja radnog prostora, dolazi do pojave heterogenosti obrađene površine, odnosno do većih prečnika i dubina kratera na centralnim delovima obrađene površine. S druge strane, potvrđeno je da se primenom postupka PMEDM pozitivno utiče na visinu neravnina obrađene površine. Upotrebom postupka PMEDM se redukuje heterogenost površine odnosno dolazi do ujednačenja prečnika i dubine kratera. Još jednom je potvrđeno da se dodavanjem praha u dielektrikum, uticaj površine poprečnog preseka alata na kvalitet obrađene površine smanjuje, slika 2-14.

Površina alata: 3200 mm^2 Ispiranje radnog prostora: 1.5 l/min
Materijal alata: bakar Koncentracija silicijum praha: 2 g/l Vreme obrade: 100 min



Slika 2-14. Primeri površine za različite uslove obrade: a) klasična EDM; b) modifikovana EDM (PMEDM) [34]

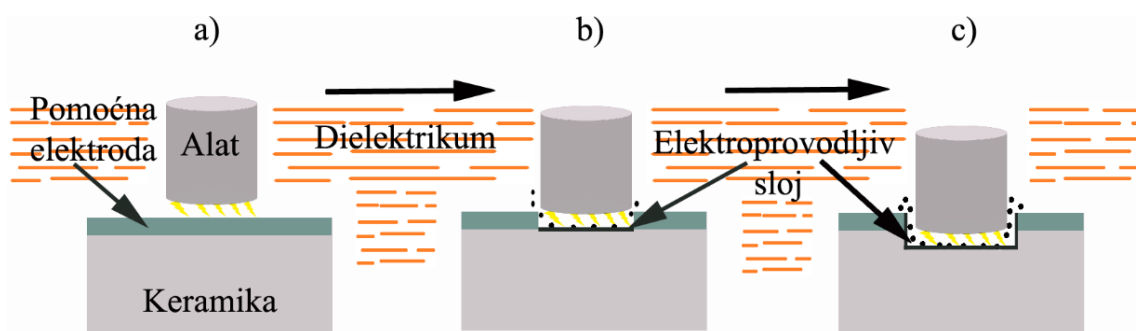
2.3 ELEKTROEROZIVNA OBRADA SA POMOĆNOM ELEKTRODOM

U narednom delu teksta ukratko su opisana istraživanja iz oblasti elektroerozivne obrade elektroneprovodljivih keramičkih materijala. U poređenju sa klasičnom elektroerozivnom obradom do sada je objavljeno samo nekoliko desetina radova iz oblasti elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom (*eng. Assisting Electrode Electrical Discharge Machining - AEEDM*). Od literaturnih izvora koji se bave ovom oblašću, izabrani su neki istaknuti radovi na osnovu čijih rezultata je prikazan pregled stanja u pomenutoj oblasti. Potrebno je naglasiti da se metoda obrade sa pomoćnom elektrodom primenjuje samo kod elektroerozije elektroneprovodljivih materijala.

2.3.1 Princip obrade sa pomoćnom elektrodom

Osnove elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom postavljene su početkom 90-ih godina prošlog veka. Prvo pojavljivanje tehnologije EDM sa pomoćnom elektrodom, u akademskim krugovima, zabeleženo je 1995. godine od strane japanskih naučnika *Fukuzawa, Tani, Iwane* i *Mohri* [35]. U ovom radu je opisana nova metoda koja omogućava elektroerozivnu obradu elektroneprovodljivih keramičkih materijala korišćenjem adhezivne metalne ploče (pomoćna elektroda) prilepljene na obradak i alata od mekog metalnog materijala. Došli su do zaključka da se elektroerozivna obrada ostvaruje zbog modifikacije površine keramike, odnosno kontinualnog nastajanja elektroprovodljivog sloja.

U tom kontekstu, elektroneprovodljive keramičke materijale je moguće obrađivati procesom EDM korišćenjem sloja pomoćne elektrode [36]. Proces EDM sa pomoćnom elektrodom (AEEDM) prikazan je na slici 2-15. Površina obratka prekrivena je elektroprovodljivim materijalom i na taj način se omogućuje inicijalno električno pražnjenje, odnosno pražnjenje između alata i pomoćne elektrode, slika 2-15-a. Nakon toga erodiranje se odvija neprekidno kroz provodljiv sloj do materijala obratka na kome se generiše ugljenični sloj (pirolitički sloj), slika 2-15-b. Tokom elektroerozivnog procesa na obratku se kontinualno generiše ugljenični provodljivi sloj koji je odgovoran za stabilnost procesa, slika 2-15-c.

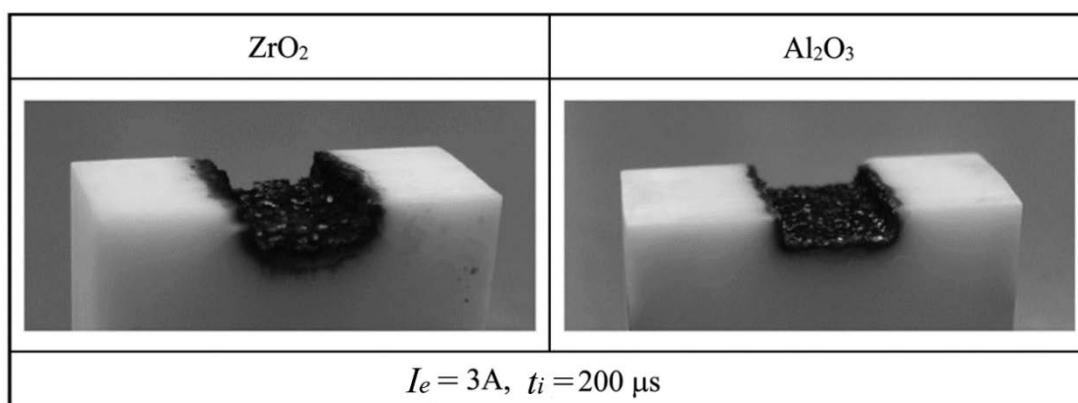


Slika 2-15. Elektroerozivna obrada izolacione keramike sa primenom pomoćne elektrode

Da bi AEEDM obrada elektroneprovodljivih keramičkih materijala bila moguća mora se koristiti dielektrikum na bazi ugljovodonika. Uspostavljanjem transformacije električne energije

u toplotnu energiju, nastala visoka temperatura ima vidan efekat na dielektrikum u zoni kanala pražnjenja. Pri odsustvu kiseonika u regionu iskre, visoka temperatura dovodi do termohemijske razgradnje dielektrikuma [37]. Razlaganje supstanci pod uticajem visoke temperature, bez uticaja drugih agensa naziva se piroliza [38]. Kao posledica pirolize dielektrikuma na bazi ugljovodonika nastaje ugljenični sloj (pirolitički sloj). Nastali ugljenični sloj korespondentan je rastopljenom sloju koji nastaje pri EDM obradi metala, a po strukturi je sličan grafitu, što ga i čini elektroprovodljivim [39, 40].

Ugljenični provodljivi sloj nastaje od elektroprovodljivih čestica, uglavnom ugljenika, koji nastaje kao rezultat rastvaranja komponenti dielektrikuma i produkata habanja alata tokom pražnjenja [41]. Ovaj elektroprovodljiv sloj je od suštinskog značaja za stabilno pražnjenje tokom AEEDM procesa [42]. Na slici 2-16. dati su izgledi ugljeničnog sloja pri obradi dve vrste izolacione keramike sa strujom pražnjenja 3A i dužinom impulsa 200 μ s [43].



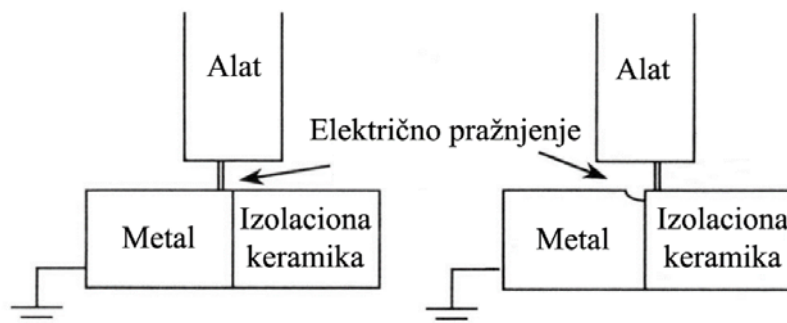
Slika 2-16. Ugljenični sloj nakon AEEDM izolacionih keramika [43]

Proces formiranja elektroprovodljivog sloja opisan je u radu [44]. Ovde je takođe napomenuto da dielektrikum, odnosno ulje mora biti na bazi ugljenika kako bi elektroerozivna obrada silicijum nitridne keramike bila stabilna. Praćenjem procesa pomoću digitalnog osciloskopa došlo se do zaključka da dolazi do dužeg dejstva strujnog impulsa, koji je duži nego što je podešen na mašini, a razlog za to je formiranje ugljeničnog sloja na površini keramike. Ustanovljeno je da generisani sloj sadrži preko 95% ugljenika, koji se crpi iz dielektrikuma. Takođe, u sastavu sloja većim delom učestvuju elementi nastali usled trošenja alata, a manji deo potiče od materijala pomoćne elektrode.

2.3.2 Tipovi pomoćnih elektroda

Fukuzawa i *Tani* su u svom istraživanju objasnili tri načina obrade elektroneprovodljivih keramičkih materijala [45]. Prvi je elektroerozivna obrada u elektrolitu, koja se pokazala kao veoma spora, jer je potrebno vreme obrade za dubinu od 100 μ m iznosilo 60 minuta. Drugi način predstavlja spoj keramike i metala, pri čemu se materijal sa bakarne elektrode deponuje na keramiku, tj. stvara se elektroprovodljiv sloj i na taj način se omogućuje obrada, slika 2-17. Ovom metodom nije moguća obrada rupa ili otvora i nije preporučljiva za precizne obrade.

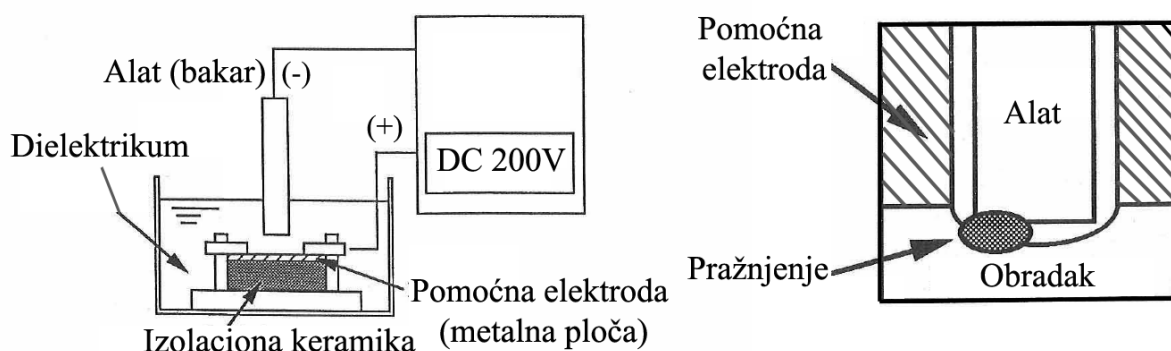
Metalna ploča debljine 5 mm, postavljena na gornju površinu obratka, predstavlja treći način elektroerozivne obrade (AEEDM) elektroneprovodljivih keramičkih materijala, slika 2-18. Ovim je omogućena obrada do dubine 5 mm.



Slika 2-17. Šematski prikaz elektroerozivne obrade spoja metala (bakar) i keramike [45]

Znači, uloga pomoćne elektrode je da obezbedi početni električni kontakt bez kojeg obrada elektroneprovodljive keramike procesom EDM ne bi bila moguća. Na površinu koja se obrađuje postavlja se tzv. pomoćna elektroda formirana od elektroprovodljivog materijala [46].

Kao pomoćna elektroda mogu da se primene različite metalne folije. Najčešće su u primeni aluminijumske i bakarne metalne folije koje se pričvršćuju na keramiku mehaničkim putem. Najveća prednost ove metode je njena jednostavnost [47]. Glavni nedostatak stezanja metalne folije za keramiku je nepostojanje čvrstog kontakta između metala i keramike. Zbog nepostojanja direktnog kontakta između folije i keramike otežano je formiranje ugljeničnog sloja što dovodi do nestabilnosti procesa AEEDM, odnosno do prekida obrade. Upotrebom metalne mrežice smanjuje se vreme formiranja ugljeničnog sloja [48].

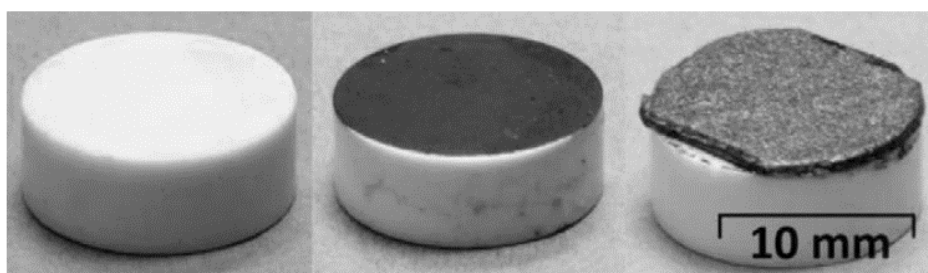


Slika 2-18. Šematska ilustracija AEEDM izolacionih keramičkih materijala [46]

Drugi način formiranja pomoćne elektrode je preko depozicije materijala. Hemijska depozicija slojeva filma ili prevlaka iz parne faze (*eng. Chemical Vapor Deposition - CVD*) i fizička depozicija pare (*eng. Physical Vapor Deposition - PVD*) mogu biti primjenjene. Pomoću ovih metoda depozicije se može obezbediti dobijanje elektroprovodljivog sloja na površini keramike. Međutim, da bi se obezbedio stabilan proces EDM, debljina nanetog filma mora biti

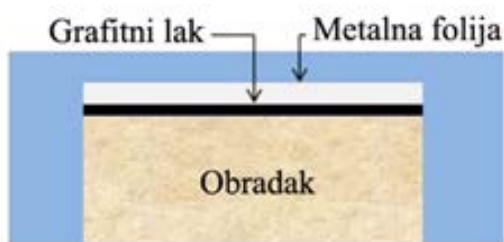
veća od 10 μm . Dobijanje metalnog sloja pomenute debljine ovim postupcima je veoma skupo zbog dugog vremena potrebnog za nanošenje. Osim toga oprema koju zahtevaju postupci CVD i PVD je skupa i nije lako dostupna [49].

Kao alternativa postupcima CVD i PVD može se koristiti grafitni premaz. Grafitni premaz se jednostavno nanosi na površinu elektroneprovodljive keramike. Nakon sušenja premaza u peći formira se elektroprovodljiv sloj koji služi kao pomoćna elektroda. Na ovaj način formirana celina omogućuje nesmetanu tranziciju od sloja pomoćne elektrode do pirolitičkog sloja i omogućuje stabilan proces AEEDM keramičkih materijala. Međutim, pomoćna elektroda formirana na ovaj način ima svoje mane. Nakon sušenja grafitnog premaza, formirana površina, odnosno površina pomoćne elektrode postaje krta što dovodi do toga da pri AEEDM sa višim energijama dolazi do pucanja premaza na neželjenim mestima [50, 51]. Na slici 2-19. prikazani su primeri formiranih pomoćnih elektroda u vidu grafitnih premaza.



Slika 2-19. Primeri formiranih pomoćnih elektroda u vidu grafitnog premaza [50]

Kombinacija metalne folije i grafitnog premaza naziva se hibridna pomoćna elektroda [46], slika 2-20. Metalna folija obezbeđuje robusnost, odnosno obezbeđuje čvrstinu pomoćne elektrode, dok grafitni premaz deluje adhezivno između metalne folije i keramike.



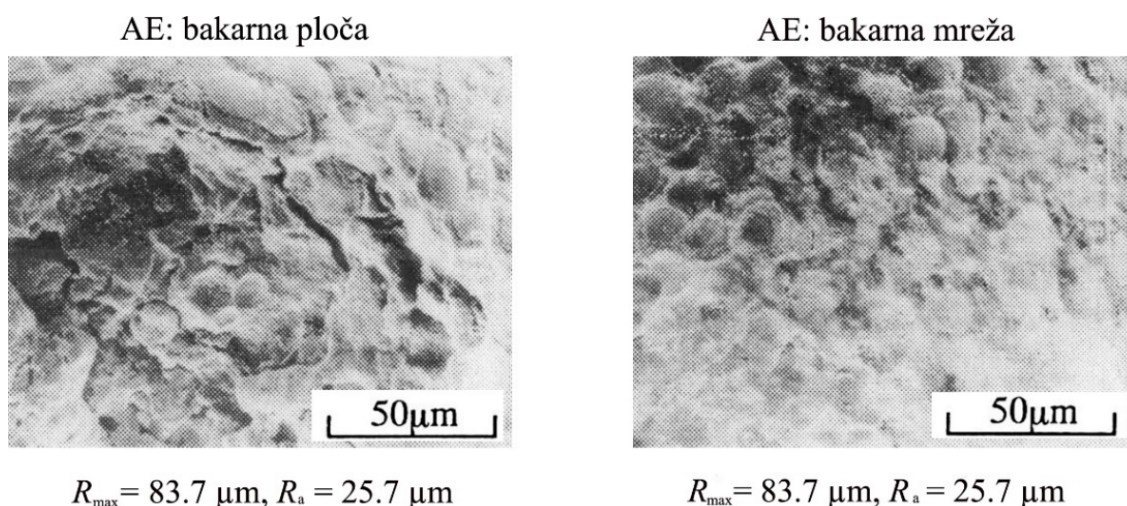
Slika 2-20. Hibridna pomoćna elektroda [47]

Primenom hibridne pomoćne elektrode tokom obrade obezbeđuje se lagan prelaz iz sloja metalne folije u ugljenični sloj. Pored toga ova vrsta pomoćne elektrode se relativno lako formira u poređenju sa postupcima depozicije materijala [52].

Dalje istraživanje procesa elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom je predstavljeno u radu [53], u okviru koga je pored metalne ploče korišćena i metalna mreža kao pomoćna elektroda. Proces obrade, koji je do tada bio sa tehnološkog aspekta jako zahtevan, je unapređen u smislu mogućnosti povećanja dubine obrade. Otkriveno je da debljina metalne ploče utiče na dubinu uklanjanja materijala obratka. Što je debljina ploče tanja to je i moguća dubina obrade manja, dok sa korišćenjem metalne mreže nema limita sa aspekta dubine obrade.

2.3.3 Izlazne performanse AEEDM procesa

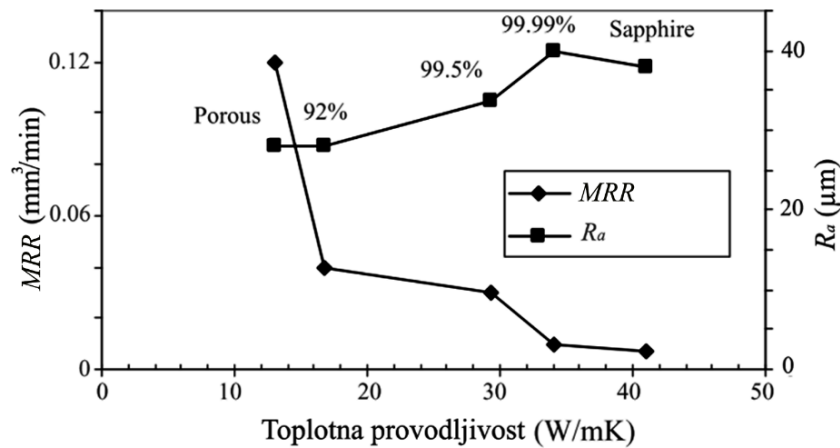
Uticaj materijala pomoćne elektrode na tehnološke karakteristike elektroerozivne obrade (AEEDM) je analiziran od strane autora Tani i dr [54]. U ovom radu je izvršeno poređenje različitih izvedbi pomoćne elektrode, prvo sa metalnom pločom, a zatim sa metalnom mrežom koja je postavljena u više slojeva. Ustanovljeno je da se primenom bakarne mreže znatno smanjuje hrapavost obrađene površine, slika 2-21. Takođe je istražen i uticaj različitih materijala pomoćne elektrode na izlazne performanse AEEDM, kao što su aluminijum, bakar, molibden i volfram pri obradi silicijum nitridne keramike (Si_3N_4). Rezultati ove analize pokazali su, da se sa upotrebom laminarne metalne mreže, znatno poboljšavaju proizvodnost obrade i kvalitet obrađene površine pri AEEDM. Isti autori su u svom radu [55] obrađivali cirkonijum oksid (ZrO_2) sa bakarnim i grafitnim alatom. Utvrdili su da se ugljenični sloj ne formira u potpunosti sa upotrebom bakarnog alata, što rezultira grubu hrapavost obrađene površine. Pri korišćenju grafitnog alata primećeno je znatno umanjeње hrapavosti obrađene površine. U prethodna dva istraživanja, došli su do zaključka da se nakon uklanjanja sloja pomoćne elektrode na površini keramike kontinualno generiše ugljenični elektroprovodljiv sloj bez kojeg obrada ne bi bila moguća.



Slika 2-21. Hrapavost obrađene površine nakon AEEDM pri različitim vrstama pomoćne elektrode (alat: bakar $\phi 5$ mm, $I_e = 15$ A, $t_i = 16$ μs , $\tau = 50$ %) [54]

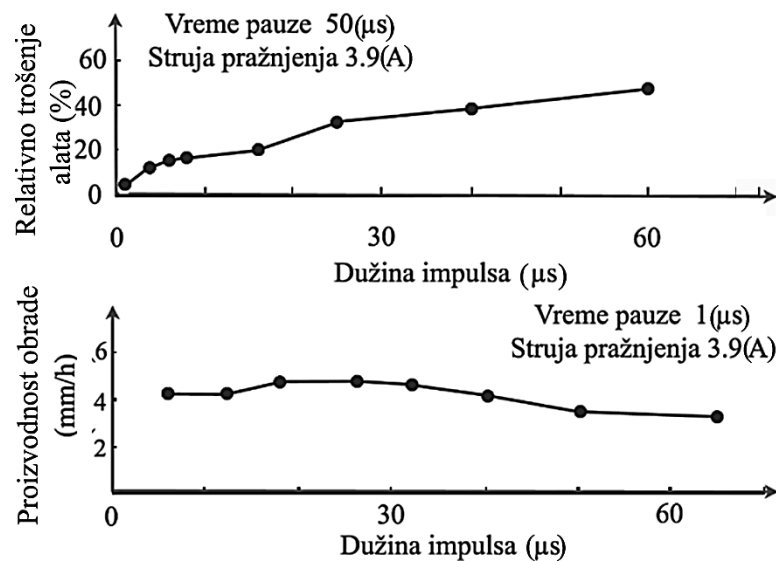
Aluminijum oksidna keramika (Al_2O_3) je široko rasprostranjena u savremenoj industriji i predstavlja teško obradiv materijal za pomenutu metodu. Do ovog saznanja su došli autori Fukuzawa i dr. [15], koji su ustanovili da dolazi do nestabilnog električnog pražnjenja tokom elektroerozivne obrade pomenute keramike. U svom istraživanju obrađivali su aluminijum oksid različite čistoće i došli do zaključka da na obradivost utiče čistoća i struktura obratka u korelaciji sa termičkim svojstvima.

U sledećem radu istih autora [56] ispitan je uticaj toplotne provodljivosti aluminijum oksida čistoće 99.99% na proizvodnost obrade. Pri većim vrednostima toplotne provodljivosti materijala dobija se veća proizvodnost obrade, slika 2-22.



Slika 2-22. Relacija između proizvodnosti obrade, hrapavosti obrađene površine i toplotne provodljivosti materijala obratka za Al_2O_3 [56]

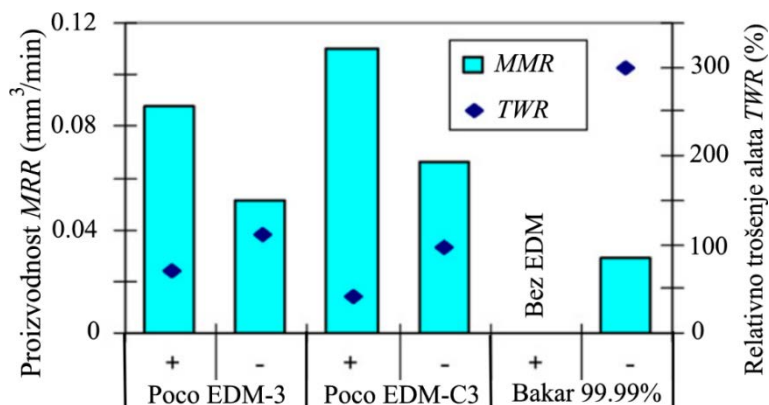
Sledeći literaturni izvor još jednom potvrđuje smanjenje proizvodnosti obrade sa povećanjem dužine trajanja impulsa prilikom AEEDM cirkonijum oksida [57]. Utvrđeno je da pri rasponu dužine trajanja impulsa $16 \mu s \sim 40 \mu s$ dolazi do minimalnog trošenja alata i maksimalne proizvodnosti obrade. Takođe se navodi i mišljenje da sa povećanjem struje pražnjenja raste proizvodnost obrade, ali se smanjuje stabilnost procesa obrade, jer struja pražnjenja većeg intenziteta pravi veće kratere na obratku i direktno utiče na postojanost elektroprovodljivog sloja.



Slika 2-23. Promena relativnog trošenja alata i proizvodnosti obrade u zavisnosti dužine impulsa [57]

Efekat materijala elektrode pri elektroerozivnoj obradi aluminijum oksidne keramike (Al_2O_3), čistoće 95%, sprovedena je od strane autora *Muttamara* i dr. [58]. Bakar (99.99% čistoće), grafit (Poco EDM-3) i bakar-grafit (Poco EDM-C3) su alati koji su korišćeni, a ispitivan je njihov uticaj na izlazne performanse obrade, slika 2-24. Rezultati istraživanja su pokazali da se znatno veća proizvodnost obrade i manje relativno trošenje alata dobija korišćenjem alata Poco EDM-C3. Izraženo u procentima, postignuto je povećanje

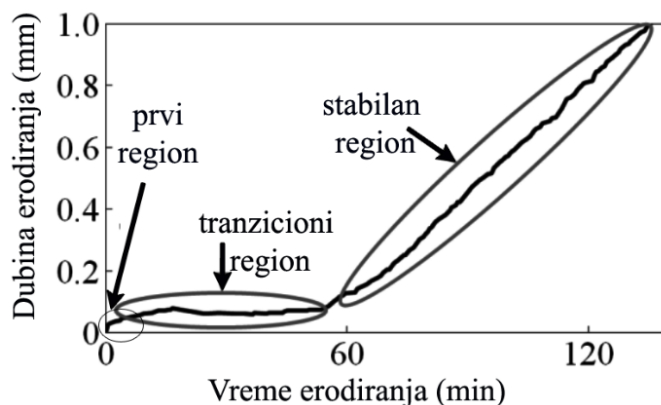
proizvodnosti obrade čak do 80% sa alatom EDM-C3 i 60% sa Poco EDM-C3, u odnosu na bakarni alat pri istim režimima obrade. Osim pomenutih prednosti koje se dobijaju korišćenjem grafitnog alata, ovde je zabeleženo i smanjenje hrapavosti obrađene površine.



Slika 2-24. Uticaj tipa alata na izlazne performanse AEEDM Al₂O₃ keramike [58]

U radu [59] je takođe izvršena elektroerozivna obrada aluminijum oksida primenom visoke energije pražnjenja. Korišćeni su visok napon pražnjenja i veoma velika kapacitivnost po jedinici površine, što rezultira veoma visokom energijom pražnjenja i eksplozivnu silu. Zaključili su da je takav proces u stanju da obrađuje elektroneprovodljive keramike. Efekti otpornika koji ograničava struju, polariteta alata, kapacitivnosti i napona pražnjenja na performanse procesa su takođe istraženi pri analizi pojedinačnog pražnjenja, odnosno jedne iskre. Polaritet alata je primarni faktor koji utiče na zapreminu i dubinu kratera, kao i na relativno trošenje alata. Sa povećanjem kapacitivnosti povećavaju se vrednosti dimenzija kratera i trošenja alata. Performanse procesa se takođe povećavaju sa naponom i strujom pražnjenja. Što se tiče kapacitivnosti, smanjenjem otpornosti se povećava struja pražnjenja, a samim tim i energija pražnjenja.

Karakteristike elektroerozivne obrade tri vrste silicijum nitridne keramike, sa različitim udelom aluminijum oksidne keramike, istražene su u radu [60]. Ovde je definisana tipična kriva erodiranja pri AEEDM elektroneprovodljivih materijala sa pomoćnom elektrodom. Kriva je podeljena na tri regiona, slika 2-25.



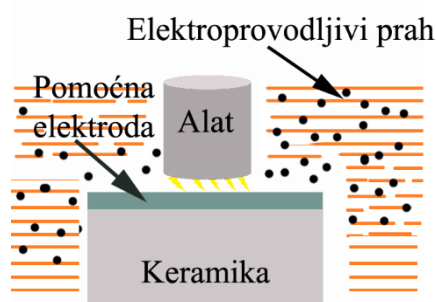
Slika 2-25. Tipična kriva skidanja materijala na primeru AEEDM Si₃N₄ [60]

Pod prvim regionom se podrazumeva uklanjanje sloja pomoćne elektrode, drugi, odnosno tranzicioni region, predstavlja vreme formiranja ugljeničnog sloja, dok treći, region stabilnosti procesa, predstavlja erodiranje materijala obratka. Zaključak je da sa povećanjem procentualnog sadržaja aluminijum oksida u nitridnoj keramici, se poboljšavaju proizvodnost obrade i smanjuje relativno trošenje alata, dok na hrapavost obrađene površine nema uticaja.

2.4 EDM SA POMOĆNOM ELEKTRODOM U DIELEKTRIKUMU SA POMEŠANIM PRAHOM

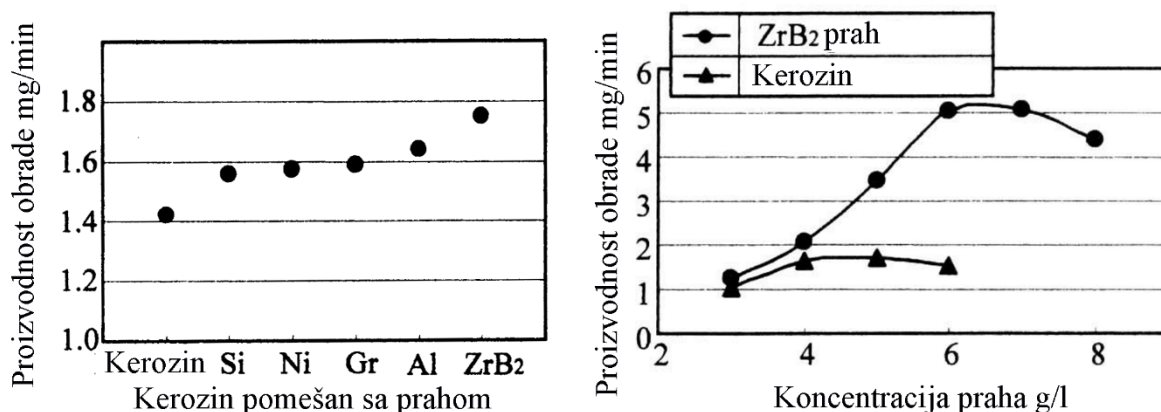
Pri elektroerozivnoj obradi elektroneprovodljivih materijala sa pomoćnom elektrodom, dodavanjem elektroprovodljivog praha u dielektrikum nastaje hibridni proces uklanjanja materijala pod nazivom elektroerozivna obrada sa pomoćnom elektrodom u tečnom dielektrikum sa pomešanim prahom (*eng. Assisting Electrode Powder Mixed Electrical Discharge Machining – (AE+PM)EDM*)), prikazan na slici 2-26.

Na sličan način kao i kod PMEDM, dodavanjem elektroprovodljivog praha, redukuju se izolaciona svojstva dielektrikuma što dovodi do povećanja radnog zazora, čime se postiže efikasnije ispiranje radnog prostora između alata i obratka. Princip obrade je sličan kao i kod opisane metode AEEDM u poglavlju 2.3.1.



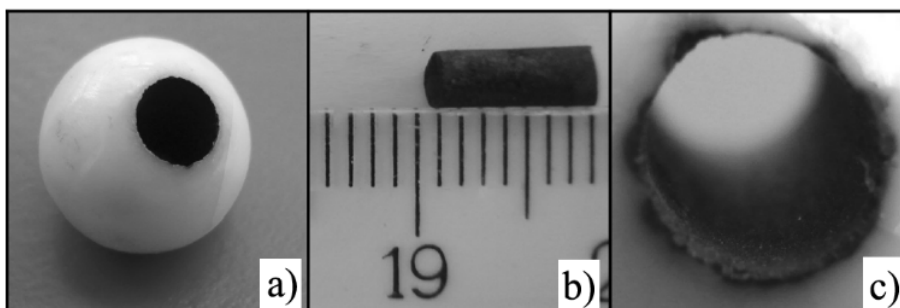
Slika 2-26. Elektroerozivna obrada sa pomoćnom elektrodom u tečnom dielektrikum sa pomešanim prahom

Prve osnove tehnologije elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom u dielektrikum sa pomešanim prahom postavljene su 2002. godine, od strane naučnika Tani i dr. [61]. Primenom postupka (AE+PM)EDM), upotrebom nekoliko vrsta prahova različite krupnoće (silicijum prah, nikel prah, grafitni prah, aluminijumski prah i cirkonijum borid prah), uspešno su izvršili obradu izolacione silicijum nitridne keramike (Si_3N_4). Dobijeni rezultati pokazuju da je proizvodnost obrade poboljšana sa upotrebom svih pet vrsta prahova, a najviše upotrebom cirkonijum boridovog praha, slika 2-27. Međutim, suprotno njihovim očekivanjima, nije došlo do značajnog poboljšanja hrapavosti obrađene površine, jer je tokom obrade generisano duže trajanje impulsa, nego što je prvobitno bilo podešeno na mašini. Ovaj fenomen je česta pojava kod elektroerozivne obrade materijala visoke otpornosti. Došli su do zaključka da sa smanjenjem dužine impulsa ispod vrednosti od $24 \mu\text{s}$, se poboljšava hrapavost obrađene površine, jer se na taj način onemogućuje nastajanje prekomerne dužine impulsa, koja direktno utiče na povećanje energije pražnjenja.



Slika 2-27. Uticaj vrste i koncentracije praha na proizvodnost obrade kod (AE+PM)EDM

Primena procesa elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom u dielektrikumu sa pomešanim prahom prikazano je u radu [62]. U ovom radu je izvršena obrada nekoliko vrsta elektroneprovodljivih materijala sa bakarnim alatom spoljašnjeg prečnika 3.5 mm i unutrašnjeg prečnika 3 mm, i to u dielektrikumu sa pomešanim grafitnim prahom krupnoće zrna 30 μm . U pomenutom istraživanju nije jasno navedeno, koji je doprinos dodavanja grafitnog praha u dielektrikum. Sprovedena je obrada različitih materijala od kojih su samo neki bili elektroneprovodljivi, i to samo sa jednim režimom obrade ($I_e = 1.5 \text{ A}$, $t_i = 50 \mu\text{s}$ i $U_0 = 100\text{V}$). Na slici 2-27. je prikazan jedan od obrađivanih materijala metodom (AE+PM)EDM, odnosno keramika na bazi cirkonijum oksida, dopirana itrijum oksidom.


 Slika 2-28. a) obradak ZrO₂ (sa dodatkom itrijum oksida Y₂O₃), b) komad uklonjen iz rupe, c) izrađena rupa

2.5 MODELOVANJE I OPTIMIZACIJA ELEKTROEROZIVNE OBRADNE

Modelovanje i optimizacija predstavljaju neizbežne tehnike za usavršavanje bilo kog procesa obrade, od povećanja proizvodnosti i kvaliteta obrade, pa do redukcije troškova obrade. Svrha modelovanja nekog procesa obrade je da se: realno predvide rezultati procesa, steknu nova znanja o pojedinim fazama procesa koja će pomoći projektovanju samog procesa, brzo i realno izvrši optimizacija procesa, izvedu zaključci o praćenju i upravljanju procesom. Dobijeni modeli nekog procesa omogućuju da se u fazi postavljanja proizvodnje izvrše provere performansi posmatranog sistema. U tom kontekstu, glavni uslov za uspešnu optimizaciju posmatranog sistema je dobijanje pouzdanog matematičkog modela.

2.5.1 Osnove teorije modelovanja i optimizacije

Modelovanje stvarnog procesa je prvi korak pri istraživanju bilo kog procesa, bilo da se radi o analizi, proučavanju, proveru, predviđanju ili optimizaciji stanja i ponašanja sistema. Modelovanje omogućuje da se posmatrani sistem zameni matematičkim modelom, kako bi postupak analize i optimizacije bio brži i efikasniji. Matematički model opisuje sistem pomoću skupova promenljivih veličina i jednačina koje opisuju odnose između promenljivih ulazno-izlaznih veličina [63].

Pod stvarnim sistemom se podrazumeva apstraktna celina za koju se smatra da nema interakciju sa okolinom i da postoji kao nezavisna. U mnogim slučajevima posmatrani realni sistem se definiše matematičkim relacijama između ulaznih i izlaznih veličina, kao npr. pomoću skupa jednačina, neuronskih mreža, fazi logikom itd. [64, 65].

Promenljive veličine u modelu mogu da predstavljaju izlazne performanse procesa obrade, kao npr. kod elektroerozivne obrade: hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade, relativno trošenje alata, struja pražnjenja, dužina impulsa itd. U modelu mogu postojati različiti tipovi promenljivih: ulazne i izlazne; zavisne i nezavisne; funkcionalne i slučajne itd. Unutar svakog od navedenih tipova može biti više promenljivih pa je uobičajeno iste predstavljati vektorima.

Matematički modeli se sastoje od promenljivih veličina, koeficijenata i matematičkih operatora i mogu se podeliti na:

- Linearne i nelinearne
 - Modeli se smatraju linearnim ako jednačine modela u grafičkom predstavljanju promenljive pokazuju linearnost, u protivnom slučaju se smatraju nelinearnim.
- Determinističke i stohastičke
 - Ako je svaki skup promenljivih tačno određen parametrima u modelu i skupovima prethodnih stanja ovih promenljivih, onda se model smatra determinističkim. Za posmatrani skup vrednosti rezultat je uvek isti.
 - Kod stohastičkih modela stanja promenljivih nisu opisana tačno određenim vrednostima nego raspodelom verovatnoće. Ovakvi modeli sadrže u sebi slučajnost.
- Statičke i dinamičke
 - Kod statičkog modela je matematički opis posmatranog sistema u stacionarnom stanju gde su ulazne i izlazne promenljive konstantne, u nekim slučajevima i jednake jedne drugima. Statički modeli ne zavise od vremena.
 - Za razliku od statičkih modela, dinamički modeli zavise od vremena pa su promenljive veličine prikazane kao diferencijalne jednačine.
- Diskretne i kontinuirane
 - Diskretni matematički modeli ne uzimaju u obzir vreme. Promene veličina se prikazuju preko histograma jer su vrednosti promenljivih međusobno nepovezane i nezavisne.
 - Kod kontinuiranih modela promenljive se menjaju tokom vremena.
- Deduktivne, induktivne i plivajuće
 - Kod deduktivnih modela logička struktura utemeljena je na teoriji i zaključivanju.
 - Induktivni modeli se ne mogu formalno dokazati.

- Plivajući modeli se zasnivaju na proceni očekivanih, odnosa između promenljivih.

Verifikacija ili procena predstavlja važan deo postavke matematičkog modela, čime se proverava da li model opisuje posmatrani sistem tačno ili ne [66-68]. Postoji nekoliko načina verifikacije modela:

- Provera sličnosti ili poklapanja izlaznih vrednosti modela i eksperimentalnih podataka.
- Odvajanje podataka na skup za učenje ili trening i skup za predviđanje ili verifikaciju modela. Skupom za učenje se vrši procena parametara modela. Pre procene modela potrebno je odrediti dopušteno odstupanje ili tačnost.
- Provera adekvatnosti parametara samog modela. U ovom slučaju postoji više statističkih analiza za testiranje parametara u modelu.
- Procena primenljivosti modela. Na različitim skupovima podataka proverava se slaganje izlaznih vrednost modela i realnog sistema.
- Ako je svrha modelovanja poboljšanje razumevanja posmatranog sistema, vrednost modela nije samo u poklapanju sa eksperimentalnim podacima. Model mora imati sposobnost predikcije novih situacija, tj. onih koje nisu ugrađene u model.

U praksi se često mogu sresti različiti pristupi matematičkom modelovanju: analitički, mehanistički, empirijski, numerički, modeli zasnovani na veštačkoj inteligenciji itd...

Razvoj eksplicitnog matematičkog modela, koji prezentuje realan sistem, je prvi neophodni korak za opimizaciju parametara procesa obrade. Postoji nekoliko tipova optimizacije pomoću matematičkih modela:

- Nelinearna optimizacija,
- Račun verovatnosti,
- Prognoza optimuma,
- Matematička statistika.

Optimizacija obradnih procesa se generalno može podeliti na dve grupe, na makro i mikro tehnoekonomsku optimizaciju. Izbor obradnog sistema, postupka obrade, redosleda operacija, tehnološke metode itd., predstavljaju primere makro tehnoekonomske optimizacije. Sa druge strane, optimizacija kvaliteta, troškova i vremena obrade itd., smatraju se mikro tehnoekonomskom optimizacijom. Postupak izbora najpovoljnijeg rešenja iz skupa mogućih rešenja predstavlja definiciju optimizacije [69].

Generalno posmatrano, glavni ciljevi optimizacije obradnih procesa su smanjenje troškova i vremena obrade, kao i povećanje proizvodnosti obrade. Ako se svaki cilj sagledava posebno onda je reč o jednokriterijumskoj optimizaciji. Takođe, može se posmatrati i više ciljeva istovremeno pa je tada u pitanju višekriterijumska optimizacija [70].

2.5.2 Modelovanje i optimizacija procesa elektroerozivne obrade

Elektroerozivna obrada je zahtevan proces čiji je mehanizam uklanjanja materijala veoma složen i ne sasvim razumljiv. Stoga je teško uspostaviti adekvatan matematički model i njegovo optimalno podešavanje koje može precizno predvideti izlazne performanse obrade [71]. Za

ispitivanje odnosa i parametarskih interakcija između ulaznih parametara i izlaznih performansi uglavnom se koriste klasične i metode bazirane na veštačkoj inteligenciji [72].

Na proces elektroerozivne obrade utiče mnogo ulaznih faktora. Različite tehnike modelovanja kao što su dimenziona analiza, metode na bazi veštačke inteligencije i termalno modelovanje mogu se primeniti za predviđanje izlaznih performansi EDM. Uglavnom se za izlazne performanse EDM uzimaju proizvodnost obrade, relativno trošenje alata i hrapavost obrađene površine [73].

Modelovanje procesa EDM zasnovano na naučnim principima omogućava bolje razumevanje i proučavanje ovog složenog postupka. Prvo modelovanje EDM sproveo je *Jeswani* 1979. korišćenjem dimenzione analize za predikciju trošenja alata [74]. Dobijena jednačina daje količinu trošenja materijala alata u zavisnosti od energije i gustine impulsa, toplotne provodljivosti, specifične toplote i latentne toplote isparavanja materijala alata. Istu metodologiju primenili su autori *Yahya* i *Manning* pri određivanju brzine uklanjanja materijala obratka kod elektroerozivne obrade [75]. Uspostavili su relaciju između ulaznih faktora, kao što su dužina impulsa, napon pražnjenja, frekvencija impulsa i struja pražnjenja, i proizvodnosti obrade. Rezultati modela pokazali su dobro slaganje sa eksperimentalnim vrednostima.

Paralelno sa razvojem matematičko statističkih metoda uvedene su i nove metode modelovanja za predviđanje izlaznih performansi EDM. Poluempirijski model, za predikciju hrapavosti obrađene površine, proizvodnosti obrade i relativnog trošenja alata, pri obradi različitih materijala je dobijen dimenzionom analizom [76]. Primenom metode planiranja eksperimenta identifikovani su ulazni parametri: struja pražnjenja, dužina impulsa, polaritet alata i osobine materijala obratka. Konačni rezultati su pokazali da je prosečna greška pri određivanju hrapavosti obrađene površine iznosila 10%, dok je za proizvodnost obrade iznosila 20%.

Analitički model elektroerozivne obrade anodnog materijala razvijen je od strane autora *Patel* i ostali [77]. Razvijena je jednačina koja kao graničan uslov koristi energiju pražnjenja, a ne temperaturu plazma zone. Model je dobijen pod pretpostavkom da se toplota širi po Gausovoj raspodeli na anodnom materijalu [77].

Model promenljive mase je predstavljen u radu [78]. Ovaj model se sastoji od tri diferencijalne jednačine, jedna za dinamiku tečnosti, druga za energetski balans i treća predstavlja jednačinu stanja plazme.

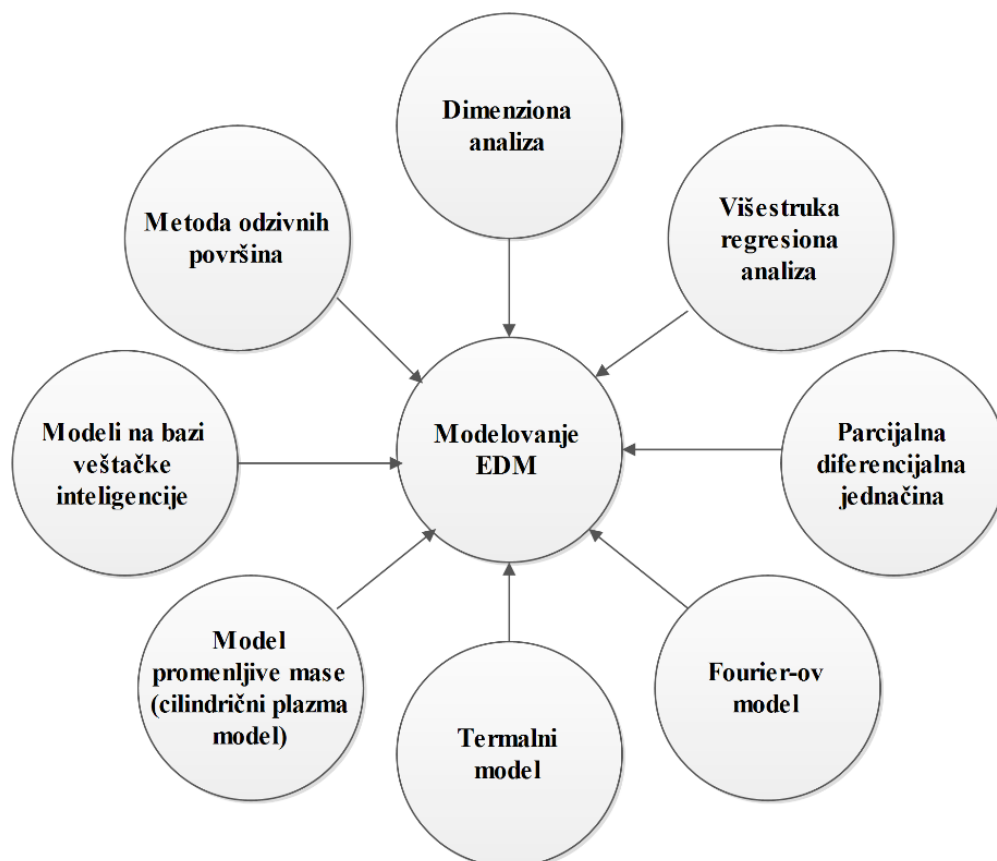
Dvodimenzionalni model prenosa toplote, uz pretpostavku da je izvor toplote plazma kanala u obliku diska, razvijen je u radu [79]. Model je korišćen za proučavanje efekata ulaznih parametara (dužina impulsa, energija pražnjenja i materijal obratka) na brzinu uklanjanja materijala i oblik kratera.

Istraživanje profila obrađene površine alatnog čelika pod različitim uslovima obrade pokazano je u radu [80]. Utvrđeno je da se hrapavost obrađene površine povećava sa povećanjem struje pražnjenja, dužine impulsa i pritiska ispiranja dielektrikumom. Dobijene informacije površinskog profila su digitalizovane i zatim modelovane u oblik Fourierove serije.

Autori *Gopalakannan* i *Senthilvelan* su izvršili modelovanje izlaznih performansi EDM primenom teorije planiranja eksperimenta [81]. U ovom istraživanju razmatran je uticaj struje

i napona pražnjenja, dužine impulsa i vremena pauze na proizvodnost obrade, relativno trošenje alata i hrapavost obrađene površine. Za identifikaciju ulaznih parametara procesa primenjen je metod odzivne površine (eng. *Response Surface Method – RSM*). Razvijeni matematički modeli pokazali su dobro slaganje sa eksperimentalnim vrednostima u korelaciji 95%.

Na slici 2-29. je prikazan jednostavan prikaz teoretskih modela koji su korišćeni za modelovanje EDM.



Slika 2-29. Teoretski modeli dostupni u literaturi za modelovanje EDM

U novije vreme metode zasnovane na veštačkoj inteligenciji nalaze sve veću primenu pri modelovanju i optimizaciji procesa, pa tako i u oblasti elektroerozivne obrade. Prema literaturi [63, 82-84], primarni cilj modelovanja je razvoj predvidivih mogućnosti izlaznih performansi u nameri da se olakša efektivno planiranje operacija obrade za postizanje optimalnih vrednosti. U radovima [85-88] pomoću metoda veštačke inteligencije, korišćenjem fazi logike i neuro-fazi sistema je izvršeno modelovanje elektroerozivne obrade.

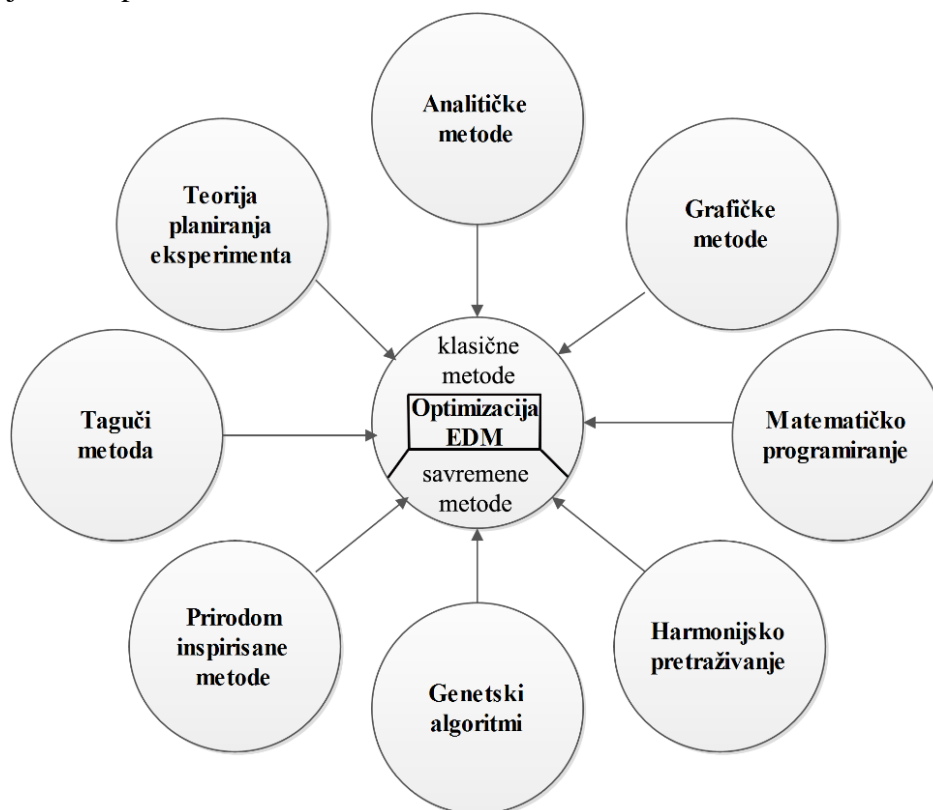
Na osnovu dostupnih literaturnih izvora, proces EDM uglavnom određuju ulazni parametri kao što su: struja pražnjenja, dužina impulsa, vreme pauze, napon pražnjenja, koeficijent delovanja impulsa itd. Kao izlazne performanse EDM procesa najčešće se razmatraju: proizvodnost obrade, hrapavost obrađene površine materijala obratka i relativno trošenje alata. Dakle, modelovanjem se definiše matematički odnos između ulaznih parametara i izlaznih performansi EDM procesa. Glavni nedostatak razvijenih modela predstavlja činjenica da oni ne uzimaju u obzir sve ulazne parametre EDM procesa, pošto bi takvi modeli bili jako složeni i

teško primenjivi u praksi. Stoga se ulazni parametri uglavnom dele na one koje model obuhvata i one koje ne obuhvata.

Dakle, istraživanjem procesa elektroerozivne obrade, može se zaključiti da je na osnovu eksperimentalnih istraživanja moguće dobiti pouzdane matematičke modele za izlazne performanse procesa obrade, kao što su proizvodnost obrade, kako primenom klasičnih metoda tako i primenom metoda zasnovanih na veštačkoj inteligenciji. Dobijeni adekvatni modeli, predstavljaju osnovu za jednokriterijumsku i višekriterijumsku optimizaciju ulaznih parametara elektroerozivne obrade [89, 90].

Veliki broj metoda je razvijen za rešavanje optimizacionih problema kod EDM. Na slici 2-30. su prikazane neke od metoda koje se mogu podeliti u dve grupe: klasične i savremene.

Kao primer klasične metode optimizacije elektroerozivne obrade teško obradivog čelika, *Nikalje* i ostali su primenili Tagučijev metod [91]. Za realizaciju eksperimenta koristili su Tagučijev ortogonalni niz L9 (3^4) prema kome su ulazni parametri obrade struja pražnjenja, dužina impulsa i vreme pauze varirani na tri nivoa. Nakon primene Tagučijev metode (preko S/N odnosa) određene su optimalne vrednosti ulaznih parametara, tj. određena je signifikantnost ulaznih parametara. Jednokriterijumskom optimizacijom, prvo u funkciji minimalne hrapavosti obrađene površine, a onda u funkciji minimalnog trošenja alata, dobijene su iste optimalne vrednosti ulaznih parametara obrade, dok su u funkciji maksimalne proizvodnosti obrade dobijene različite optimalne vrednosti ulaznih parametara obrade. Dodatnom proverom preko ANOVA analize potvrđeni su rezultati Tagučijev metode. Zaključili su da je struja pražnjenja najuticajniji ulazni parametar EDM.



Slika 2-30. Podela metoda optimizacije zastupljene kod EDM obrade

Generalno posmatrano, važnost izlaznih performansi EDM je različita i zavisi od uslova obrade i namene izrađenih delova. Tako je proizvodnost obrade najvažnija tehnološka karakteristika sa ekonomskog aspekta ostvarivanja maksimalne dobiti. Tačnost obrade i kvalitet obrađene površine su važne karakteristike sa aspekta funkcije obrađenog dela, odnosno njegove namene. Pri tome, proizvodnost i kvalitet obrade su protivurečne jedna drugoj, tj. povećanjem proizvodnosti obrade dobija se lošiji kvalitet obrađene površine i manja tačnost obrade. Zbog toga je optimizacija izlaznih performansi jedno od najvažnijih pitanja pri EDM [4].

2.5.3 Pristupi kod obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom

U poređenju sa klasičnom elektroerozivnom obradom, pri modelovanju i optimizaciji PMEDM, pored već prethodno pomenutih uticajnih ulaznih faktora uzima se i parametar vrste, krupnoće i koncentracije praha u dielektrikumu.

Analiza promene hrapavosti obrađene površine u zavisnosti od ulaznih parametara pri elektroerozivnoj obradi u dielektrikumu pomešanim sa prahom hroma je obrađena u radu [92]. Dobijeni rezultati pokazuju da struja pražnjenja i koncentracija praha u dielektrikumu imaju najveći uticaj na hrapavost obrađene površine pri obradi ugljeničnog čelika. Primenom metode odzivne površine postavljen je model koji omogućava određivanje optimalnih režima obrade pri čemu je funkcija cilja bila minimalna hrapavost obrađene površine.

Slično istraživanje, takođe pri obradi alatnih čelika izvršeno je od strane *Batish-a* [93], u kome je razvijen matematički model za određivanje optimalnih ulaznih parametara EDM u zavisnosti od postavljenih funkcija cilja, kao što su minimalno trošenje alata, maksimalna proizvodnost i tačnost obrade. Analizom je utvrdio da struja pražnjenja, dužina trajanja i koncentracija praha najviše utiču na proizvodnost obrade, relativno trošenje alata i tačnost obrade. Povećanjem koncentracije praha u dielektrikumu poboljšavaju se performanse elektroerozivne obrade, ali do određene granice zbog pojave kratkog spoja. Zaključak je da koncentracija praha ne treba da bude veća od 10 g/l.

Interesantni rezultati istraživačkog rada jednokriterijumske optimizacije postupka PMEDM predstavljeni su u radu [94]. Cilj istraživanja je bio da se dobiju optimalni ulazni parametri pri gruboj i završnoj elektroerozivnoj obradi. Obrađivane su tri vrste alatnih čelika, sa tri vrste alata, prvo u dielektrikumu sa pomešanim aluminijumskim, a zatim u dielektrikumu sa grafitnim prahom. Za optimizaciju procesa korišćena je Tagučijeva metoda prema planu eksperimenta L_{27} (3^{13}). Na osnovu Tagučijevih metoda dobijeni su drugačiji optimalni ulazni parametri obrade za različite čelike, što govori o složenosti sistema PMEDM.

Procena efikasnosti PMEDM pri obradi materijala Inconel 718 je predstavljeno u radu [95]. U ovom istraživanju korišćena su dva tipa alata, bakar i bakar sa kriogenim hlađenjem. Relativno trošenje alata igra značajnu ulogu sa stanovišta dimenzione stabilnosti i cene procesa, shodno tome upotrebom kriogenog hlađenja alata postignuto je značajno smanjenje trošenja alata. Optimalne vrednosti i ocena signifikantnosti ulaznih parametara obrade dobijeni su pomoću Tagučijevih metoda sa planom eksperimenta prema ortogonalnom nizu L_{36} ($2^2 \times 3^6$).

2.5.4 Pristupi kod obrade sa pomoćnom elektrodom

Na osnovu dosadašnjih istraživanja, modelovanje i optimizacija elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom su izvršene različitim metodama. U tu svrhu najčešće su korišćene statističke metode kao što je regresiona analiza i Tagučijeva metoda.

Optimizacija procesa AEEDM cirkonijum oksida korišćenjem Tagučijevih metoda predstavljena je u radu [96]. Adhezivna bakarna i aluminijumska folija predstavljale su pomoćne elektrode koje su prilepljene bez dodatne operacije na elektroneprovodljiv materijal. Izlazne karakteristike elektroerozivnog procesa kao što su proizvodnost obrade, relativno trošenje alata i hrapavost obrađene površine su istražene pomoću $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ ortogonalnog niza Tagučijevog eksperimentalnog dizajna. Sprovedena je analiza varijanse na osnovu koje je ispitan uticaj ulaznih parametara obrade na izlazne performanse procesa. Eksperimentalni rezultati su pokazali da struja pražnjenja i dužina impulsa značajno utiču na proizvodnost obrade i hrapavost obrađene površine, dok materijal pomoćne elektrode utiče na relativno trošenje alata.

Sabur i dr. su u radu [97] definisali da na formiranje i stabilnost ugljeničnog sloja, pored materijala obratka i alata, vrste dielektrikuma i polariteta alata, utiče i energija pražnjenja, koja predstavlja proizvod napona, struje pražnjenja i dužine impulsa. Cilj eksperimenta je bio da se ispita uticaj energije pražnjenja na proizvodnost obrade i da se istraži mehanizam uklanjanja materijala prilikom elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom cirkonijum oksida. Eksperimentalni rezultati su pokazali da se uklanjanje materijala većim delom vrši termičkom erozijom i povećava se sa povećanjem energije pražnjenja. U drugom radu istih autora [98] razvijen je matematički model za određivanje hrapavosti obrađene površine i izvršena je optimizacija ulaznih parametara AEEDM pomoću Tagučijevih metoda. Takođe se navodi da su napon pražnjenja i kapacitivnost uticajni parametri na hrapavost obrađene površine pri izradi mikro rupa. Ovo isto je potvrđeno i u radu [47]. Kapacitivnost kao ulazni parametar uglavnom se upotrebljava pri izradi mikrorupa i otvora [99].

U istraživanju [100], *Ojha* je detaljno proučio i analizirao proces elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom elektroneprovodljivih keramičkih materijala. Izvršeno je praćenje procesa pomoću savremene akvizicione tehnike i optimizacija na osnovu Tagučijevih metoda i centralno kompozicionog plana eksperimenta (metodologija odzivne površine). Deo materije iz ove doktorske disertacije je ranije publikovan u naučnom radu [101].

Osnovne ciljeve optimizacije procesa elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom, uglavnom predstavljaju maksimalna proizvodnost obrade i minimalna hrapavost obrađene površine. Tako je i *Lin* izvršio optimizaciju ulaznih parametara obrade pomoću Tagučijevih metoda koristeći dva principa, "veće je bolje" za proizvodnost obrade i "manje je bolje" za hrapavost obrađene površine [43]. Prema eksperimentalnim rezultatima i statističkoj analizi varijanse došao je do zaključka da su najuticajniji parametri struja pražnjenja i dužina impulsa.

Istraživanje hrapavosti obrađene površine pri elektroerozivnom procesu sa pomoćnom elektrodom u dielektrikumu sa pomešanim prahom (AE+PM)EDM sprovedeno je i od strane *Sabur* i dr. [102]. Napon pražnjenja i koncentracija praha tantal karbida (TaC) su predstavljali promenljive, dok su ostali parametri držani na konstantnom nivou. Izvršeno je modelovanje i analiza pomoću metodologije odzivnih površina. Primećeno je da napon pražnjenja ima veći

uticaj na hrapavost obrađene površine nego koncentracija praha. Predstavljene su i optimalne vrednosti napona pražnjenja i koncentracije praha, 94 V i 6 g/l respektivno, pri kojima se dobija minimalna hrapavost obrađene površine.

2.6 MOGUĆI PRAVCI ISTRAŽIVANJA INOVATIVNE ELEKTROEROZIVNE OBRAD

Prema literaturnim izvorima među najvažnijim izlaznim performansama savremene elektroerozivne obrade su proizvodnost obrade, relativno trošenje alata i hrapavost obrađene površine. Performanse elektroerozivne obrade uglavnom zavise od električnih parametara impulsa, od kojih su najvažniji: struja i napon pražnjenja, dužina trajanja impulsa, vreme pauze i koncentracija praha u dielektrikumu, odnosno vrsta pomoćne elektrode. Optimalnim podešavanjem pomenutih ulaznih parametara procesa obrade, može se značajno uticati na izlazne performanse procesa obrade.

Sledeći pravci razvoja i istraživanja u oblasti inovacione elektroerozivne obrade (PMEDM i AEEDM) su identifikovani analizom pregleda dosadašnjih istraživanja:

- Istraživanja EDM u dielektrikumu sa pomešanim prahom pokazuju da ulazni parametri značajno utiču na izlazne performanse EDM u različitim intervalima varijacija.
- PMEDM je uglavnom primenjena na obradu čelika gde je kvalitet obrađene površine bio na visokom nivou. Međutim, obrada savremenih inženjerskih materijala kao što su legure titanijuma, inkonela i drugih nije u potpunosti istražena.
- Za uspostavljanje relacija između ulaznih faktora i performansi procesa EDM sa pomoćnom elektrodom uglavnom su korišćene metode regresione analize, dok su metode veštačke inteligencije za modelovanje slabo zastupljene.
- Uglavnom je kod AEEDM rešavan problem jednokriterijumske optimizacije na osnovu čega su identifikovane optimalne vrednosti parametara obrade. U tu svrhu je obično korišćena Taguči metoda optimizacije. Problem višekriterijumske optimizacije, koji obuhvata hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade i relativno trošenje alata je neznatno istraživan.
- Kombinacija metoda AEEDM i PMEDM, odnosno ((AE+PM)EDM) elektroneprovodljive keramike u dielektrikumu sa pomešanim prahom je još uvek u početnoj fazi istraživanja. Stoga je prostor istraživanja postupka ((AE+PM)EDM) veoma širok.

3. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Dodavanjem elektroprovodljivog praha u tečni dielektrikum realizuje se elektroerozivni proces skidanja materijala pod nazivom elektroerozivna obrada u tečnom dielektrikumu sa pomešanim prahom (eng. *Powder Mixed Electrical Discharge Machining* - PMEDM) [103]. Elektroprovodljiv prah redukuje izolaciona svojstva dielektrikuma i uzrokuje povećanje radnog zazora između alata i obratka. Kao rezultat ostvaruje se efikasnija cirkulacija dielektrikuma, tj. ispiranje radnog prostora. Na taj način proces EDM postaje stabilniji uz poboljšanje izlaznih performansi procesa, kao što su povećana proizvodnost obrade, smanjena hrapavost obrađene površine i manje relativno trošenje alata [22]. Razni tipovi elektroprovodljivog praha se mešaju sa tečnim dielektrikumom, među kojima je najpristupačniji i najčešće u upotrebi grafitni prah [104]. Iako postoji veliki broj publikacija na temu PMEDM, jedinstven odgovor na pitanje pri kojoj koncentraciji praha u kombinaciji sa ulaznim parametrima obrade se dobijaju najbolje izlazne performanse je i dalje sporno. Inkoherentnost u izboru optimalnih ulaznih parametara obrade (struja i napon pražnjenja, dužina impulsa, vreme pauze i polaritet) sprečava odgovarajuće poređenje postojećih istraživanja. Zbog prethodno navedenih razloga, jedan od zadataka disertacije je pronalaženje kompleksnih veza između ulaznih promenljivih parametara i izlaznih performansi procesa elektroerozivne obrade koje će dati odgovor na postavljeno pitanje u vezi optimalne kombinacije koncentracije praha i ulaznih parametara obrade.

Uprkos svojim izuzetnim svojstvima u poređenju sa metalnim materijalima, keramički materijali se samo postepeno prihvataju od strane metaloprerađivačke industrije [105]. Jedan od razloga za to treba tražiti u vezi sa procesom sinterovanja koji ograničava stvaranje složenih geometrija, kao i zbog ograničenja mogućnosti obrade finalnog proizvoda [106]. Različite metode obrade, kao što su brušenje dijamantskim alatima, ultrazvučna obrada, obrada laserom, obrada abrazivnim vodenim mlazom, obrada jonskim snopom i sl., mogu se koristiti za obradu keramičkih materijala [107]. Međutim, za ove metode obrade postoje neka ograničenja vezana za proizvodnost, kvalitet i ekonomičnost obrade, odnosno nezadovoljavaju u potpunosti zahteve savremene proizvodnje [108]. Stoga je potrebno uzeti u obzir i druge metode pri kojima se mogu obrađivati keramički materijali [109].

Postavljanjem elektroprovodljivog sloja (pomoćna elektroda, eng. *Assisting Electrode* - AE) na površinu obratka omogućuje se obrada elektroneprovodljivih keramičkih materijala pod nazivom elektroerozivna obrada sa pomoćnom elektrodom (eng. *Assisting Electrode Electrical Discharge Machining* AEEDM) [110]. Pomoćna elektroda omogućuje inicijalno električno pražnjenje između alata i obratka [53]. Nakon uklanjanja sloja pomoćne elektrode, usled visoke temperature u zoni pražnjenja, dolazi do razlaganja dielektrikuma nakon čega se čestice ugljenika deponuju na površinu obratka formirajući elektroprovodljivi sloj [50, 51]. Najčešće su u primeni adhezivne aluminijumske i bakarne metalne folije, kao i grafitni premaz [47]. Kombinacija metalne folije i grafitnog premaza naziva se hibridna pomoćna elektroda [46, 48]. Rezultati dosadašnjih istraživanja, kojih nema mnogo, ukazuju na činjenicu da prilikom

AEEDM elektroneprovodljivih keramičkih materijala dolazi do znatno manje proizvodnosti obrade nego kod EDM metalnih materijala.

S druge strane, obrada elektroneprovodljive keramike primenom elektroerozivne obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom je tek u ranoj fazi ispitivanja [111]. Ovo predstavlja kombinaciju metoda PMEDM i AEEDM, a posebno je interesantna sa stanovišta unapređenja izlaznih performansi obrade savremenih inženjerskih materijala. Mali broj naučnika su se bavili istraživanjem procesa (AE+PM)EDM i pronalaženjem kompleksnih veza između ulaznih promenljivih i izlaznih performansi procesa obrade.

U tom kontekstu, predmet istraživanja disertacije je unapređenje, modelovanje i optimizacija procesa elektroerozivne obrade specifičnih inženjerskih materijala, kao što su $TiAl_6V_4$ i ZrO_2 . Inovativni pravci razvoja i primene u okviru nekonvencionalnih postupaka su dve metode koje će biti istražene:

- EDM u tačnom dielektrikumu sa pomešanim prahom – PMEDM $TiAl_6V_4$,
- EDM sa pomoćnom elektrodom u dielektrikumu sa pomešanim prahom – (AE+PM)EDM ZrO_2 .

Prvi deo predmeta istraživanja se odnosi na problematiku elektroerozivne obrade legure titanijuma - $TiAl_6V_4$ u dielektrikumu sa pomešanim grafitnim prahom. Pored grafitnog praha u dielektrikum se dodaje i surfaktant koji ima ulogu da obezbedi homogenost smeše. Drugi deo predmeta istraživanja, odnosi se na elektroerozivnu obradu elektroneprovodljive keramike. Jedan od predstavnika elektroneprovodljive keramike, a koja je korišćena u ovom istraživanju je cirkonijum oksid – ZrO_2 , i obrađivana je primenom (AE+PM)EDM metode (*eng. Assisting Electrode Powder Mixed Electrical Discharge Machining*). Težište je dato na analizu mogućnosti i opravdanosti primene metoda modelovanja izlaznih performansi procesa i optimizacije ulaznih parametara elektroerozivne obrade.

3.1 CILJ ISTRAŽIVANJA

I pored značajnih prednosti koje pruža EDM obrada, njene mogućnosti nisu u potpunosti istražene. Delimičan razlog za ovo je i činjenica da se ova obrada bazira u velikoj meri na obradi čeličnih materijala, a manje na obradi savremenih inženjerskih materijala kao što su legura titanijuma i cirkonijum oksida. U širem smislu, cilj istraživanja u okviru ovog doktorskog rada je davanje doprinosa razvoju i primeni elektroerozivne obrade savremenih inženjerskih materijala.

Istraživanje je koncipirano na taj način da se postigne sveobuhvatno razumevanje EDM savremenih inženjerskih materijala, koje će omogućiti smernice budućim istraživanjima u oblasti procesa PMEDM i (AE+PM)EDM. Znači, konkretan cilj je teoretsko i eksperimentalno istraživanje uz optimizaciju obrade savremenih inženjerskih materijala primenom metoda PMEDM i (AE+PM)EDM.

Prema podacima dobijenim iz velikog broja literaturnih izvora, pomoću metode PMEDM mogu se značajno poboljšati izlazne performanse obrade teško obrađivih materijala, kao što je: povećanje proizvodnosti obrade, smanjenje hrapavosti obrađene površine i smanjenje

relativnog trošenja alata. Na osnovu literaturnih izvora moguća je uspešna obrada elektroneprovodljive keramike pomoću metode AEEDM. U poređenju sa klasičnom elektroerozivnom obradom metalnih materijala, proces AEEDM se odlikuje manjom proizvodnošću obrade, većom hrapavošću obrađene površine i povećanim trošenjem alata. Stoga je jedan od glavnih doprinosa istraživanja primena (AE+PM)EDM, u cilju unapređenja pomenutih izlaznih performansi procesa. Pregledom literature, takođe se može zaključiti da je modelovanje i optimizacija procesa (AE+PM)EDM elektroneprovodljivih keramika, slabo istraživano.

Shodno napred rečenom, osnovni cilj u okviru ovog istraživanja je da se naprave pomaci u smeru generisanja klasičnih i inteligentnih modela izlaznih performansi elektroerozivne obrade legure titanijuma i cirkonijum oksida, kao i određivanje optimalnih parametara obrade zasnovanih na primeni klasičnih metoda optimizacije. Akcenat je posebno stavljen na rezultate koji su od ključnog značaja za ocenu mogućnosti iskorišćenja i implementacije pomenutih metoda obrade u raznim industrijskim granama.

3.2 HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

Pregledom i analizom literaturnih izvora u oblasti elektroerozivne obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom i pomoćnom elektrodom, postavljene su sledeće hipoteze:

Hipoteza 1:

Proces elektroerozivne obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom ostvaruje povoljnije izlazne performanse u odnosu na klasičnu elektroerozivnu obradu legure titanijuma.

Hipoteza 2:

Primena postupka elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom omogućuje obradu elektroneprovodljivog keramičkog materijala tj. cirkonijum oksida.

Hipoteza 3:

Kombinovanjem postupaka elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom i elektroerozivne obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom, pri obradi elektroneprovodljive keramike, postiže se dodatno poboljšanje izlaznih performansi.

Hipoteza 4:

Moguće je dobiti pouzdane matematičke modele za izlazne performanse u funkciji ulaznih parametara elektroerozivne obrade legure titanijuma i cirkonijum oksida primenom klasičnih i inteligentnih metoda.

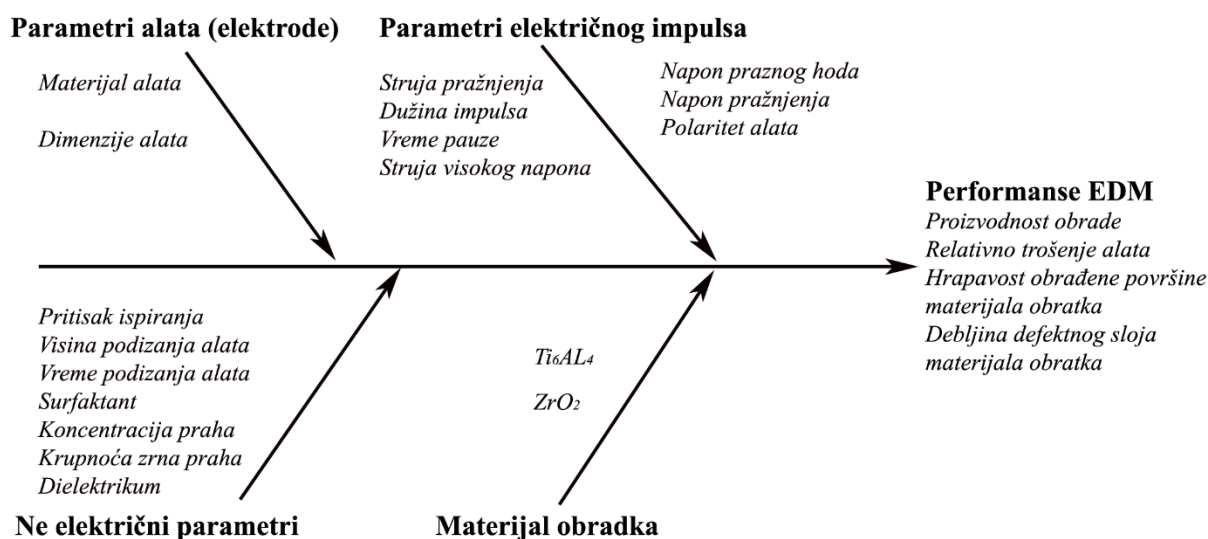
Hipoteza 5:

Na osnovu adekvatnih matematičkih modela moguće je odrediti optimalne parametre elektroerozivne obrade na bazi jednog i više kriterijuma, odnosno funkcija cilja.

3.3 KONCEPCIJA I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

U svrhu dokazivanja postavljenih hipoteza, definisana je odgovarajuća koncepcija istraživanja. Koncepcija istraživanja elektroerozivne obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom i elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom, zasnovana je na identifikaciji najuticajnijih ulaznih parametara obrade kako bi se definisali adekvatni modeli.

U cilju identifikacije ulaznih parametara procesa, koji mogu uticati na izlazne performanse EDM savremenih inženjerskih materijala, izrađen je *Ishikawa* dijagram, slika 3-1.



Slika 3-1. Identifikacija parametra procesa prema *Ishikawa* dijagramu

Od primarnog je značaja istražiti odnos između ulaznih faktora, kao što su: parametri električnog impulsa, ne električni parametri, parametri materijala alata i izlaznih performansi, kao što su: proizvodnost obrade, relativno trošenje alata, kvalitet i integritet obrađene površine. Pošto raspoloživa elektroerozivna mašina alatka SPIU ne poseduje tehnološke podloge za obradu legure titanijuma i cirkonijum oksida, odnosno ne postoje preporuke date od strane proizvođača kolike treba da budu vrednosti ulaznih parametara procesa obrade, javlja se potreba za razvijanjem iste. Od najvećeg značaja je spoznati koji ulazni parametri imaju najznačajniji uticaj na izlazne performanse obrade. Istovremeno, cilj je da razvijene tehnološke podloge budu u primeni i na drugim EDM mašinama, koje imaju mogućnost sličnog variranja ulaznih parametara obrade.

Metodologija istraživanja koja je predstavljena u disertaciji obuhvata primenu naučnih metoda koje mogu biti podeljene na četiri celine, slika 3.2:

1. Preliminarna ispitivanja,
2. Planiranje i izvođenje eksperimenata,
3. Modelovanje izlaznih performansi procesa EDM,
4. Optimizacija ulaznih parametara EDM.

U prvoj celini, određene su granične vrednosti ulaznih parametara za PMEDM legure titanijuma i (AE+PM)EDM cirkonijum oksida. Na osnovu literaturnih izvora usvojene su vrednosti koeficijenta delovanja impulsa, dok su na osnovu preliminarnih ispitivanja usvojeni ulazni parametri elektroerozivne obrade (struja pražnjenja i dužina impulsa).

U okviru druge celine izvedene su četiri grupe eksperimentalnih istraživanja prema različitim planovima u zavisnosti od materijala obratka. Kroz prvu grupu eksperimenata, izvršena je PMEDM legure titanijuma prema centralnom kompozicionom planu (CCD), sa ukupno 30 eksperimenata. Ulazni parametri PMEDM (struja pražnjenja - I_e , dužina impulsa - t_i , koeficijent delovanja impulsa - τ , koncentracija grafitnog praha - GR) su varirani na pet nivoa, dok su za izlazne performanse PMEDM izabrane: srednja aritmetička hrapavost obrađene površine (R_a), proizvodnost obrade (MRR) i relativno trošenje alata (TWR).

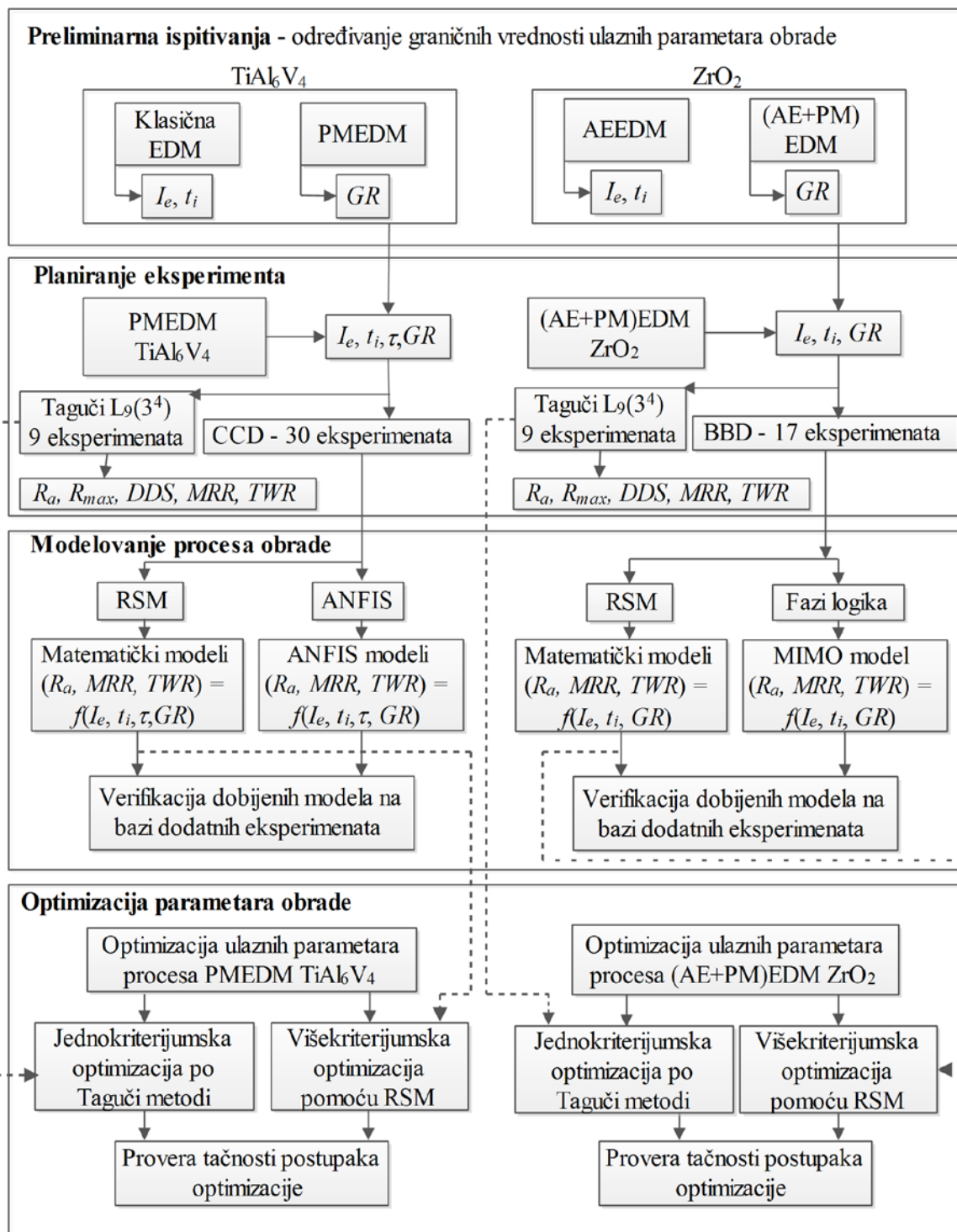
Druga grupa eksperimenata sprovedena je takođe pri PMEDM legure titanijuma prema Tagučići ortogonalnom nizu $L_9(3^4)$, tj. sa četiri ulazna faktora na tri nivoa, što čini 9 eksperimenata. Ulazni parametri obrade (I_e , t_i , τ , GR) varirani na tri nivoa, dok su kao izlazne performanse posmatrane: R_a , maksimalna visina neravnina (R_{max}), debljina defektnog sloja materijala obratka (DDS), MRR i TWR .

Treća i četvrta grupa eksperimenata obuhvata (AE+PM)EDM cirkonijum oksida prema Box-Behnken planu (BBD) i Tagučići planu (TD). Na bazi Box-Behnken plana sprovedeno je 17 eksperimenata, gde su ulazni parametri (I_e , t_i , GR) varirani na tri nivoa, a za izlazne performanse (AE+PM)EDM cirkonijum oksida izabrani su R_a , MRR i TWR . Poslednja grupa od 9 eksperimenata, izvedena prema Tagučići planu, za ulazne parametre koristi iste uslove kao prema BBD, dok su za izlazne performanse izabrane R_a , R_{max} , DDS , MRR i TWR .

Treća celina predstavlja modelovanje izlaznih performansi procesa elektroerozivne obrade. U istraživanju, modelovanje izlaznih performansi EDM započinje primenom metodologije odzivne površine (RSM) prema CCD planu (obrada legure titanijuma) i BBD planu (obrada cirkonijum oksida) u cilju dobijanja matematičkih modela za hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade i relativno trošenje alata. Na ovaj način se dobijaju po tri matematička modela za svaki materijal obratka posebno. Primenom metode veštačke inteligencije, odnosno adaptivnog neuro fazi sistema (ANFIS) kreirana su tri modela za predviđanje izlaznih performansi prema CCD planu pri elektroerozivnoj obradi legure titanijuma. Modelovanje (AE+PM)EDM cirkonijum oksida izvedeno je pomoću fazi logike (FL). Kreiran je jedan model koji obuhvata sve posmatrane izlazne performanse prema BBD planu. Na taj način nastaje više-ulazni-više-izlazni fazi model (*eng. Multi-Inputs-Multi-Outputs Fuzzy Inference System – MIMO FIS*). Na osnovu proračuna greške i najmanjeg odstupanja od eksperimentalnih rezultata vrši se poređenje kreiranih modela. Verifikacija dobijenih modela je urađena na osnovu novih eksperimentalnih podataka.

Optimizacija ulaznih parametara PMEDM i (AE+PM)EDM predstavlja četvrtu celinu istraživanja. Jednokriterijumska optimizacija ulaznih parametara PMEDM legure titanijuma i (AE+PM)EDM cirkonijum oksida je izvedena preko klasične Tagučići metode. S druge strane, dobijeni adekvatni matematički modeli predstavljaju osnovu za višekriterijumsku optimizaciju.

Predloženi optimalni ulazni parametri PMEDM legure titanijuma i (AE+PM)EDM cirkonijum oksida podvrgnuti su potvrdnim eksperimentima u cilju verifikacije.



Slika 3-2. Uprošćena šema naučnog istraživanja primenjenog u radu

4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju izloženi su opšti uslovi pri kojima su sprovedena ekperimentalna istraživanja. Pored postavki EDM u dielektrikumu sa pomešanim prahom i EDM sa pomoćnim elektrodom, definisana je metodologija određivanja izlaznih performansi obrade, kao što su proizvodnost obrade, relativno trošenje alata, parametri hrapavosti obrađene površine i debljina defektnog sloja materijala obratka. Takođe su prikazani i uslovi elektroerozivne obrade legure titanijuma i cirkonijum oksida prema različitim planovima eksperimenta.

4.1 OPŠTI USLOVI PRI EKSPERIMENTALNIM ISPITIVANJIMA

Opšti uslovi pri ekperimentalnim ispitivanjima se odnose na izbor mašine alatke, medijuma u kome se vrši obrada, kao i materijala alata i obratka.

4.1.1 Mašina alatka

Za potrebe obrade materijala korišćena je elektroerozivna mašina za upuštanje sa punom elektrodom, proizvođača *Agie Charmille* oznake SP1-U, prikazana na slici 4-1.



Slika 4-1. Elektroerozivno postrojenje *Agie Charmille* SP1-U

Opšte kretanje korišćene elektroerozivne mašine alatke u prostoru karakteriše tri translacije, duž osa prostornog koordinatnog sistema (X, Y i Z). Opseg kretanja po X, Y i Z osama je 320, 250 i 250 mm, respektivno. Maksimalne težine alata i obratka, koje mašina podržava su 60 kg i 400 kg. Radna kada sa elementima za pričvršćivane i pozicioniranje služi za smeštaj, prihvatanje i potapanje obratka u dielektrikum. Dimenzije radne kade su 1200×550×360 mm, kapaciteta 178 litara. Mašina poseduje rezervoar za dielektrikum zapremine 290 litara i sistem za brzo punjenje i pražnjenje radne kade sa pumpom koja ostvaruje protok 20 - 120 l/min. Mašina je opremljena sistemom za CNC upravljanje, gde minimalno pomeranje po sve tri ose iznosi 1 µm, čime se može postići vrlo visoka tačnost pozicioniranja alata u odnosu na obradak. Mašina je opremljena generatorom električnih impulsa jednosmerne struje, prividne snage 10 kVA, koji proizvodi maksimalnu struju pražnjenja od 50 A.

4.1.2 Dielektrikum i aditivi

Dielektrikum *Ilocut EDM 180* proizvođača *Castrol* je korišćen tokom eksperimentalnih istraživanja. To je mineralno ulje niskog viskoziteta koje obezbeđuje uspešno ispiranje radnog prostora. Takođe je formulisano da obezbedi visok stepen uklanjanja materijala, nizak stepen habanja alata i dobar kvalitet obrađene površine. Ovo ulje se preporučuje od strane proizvođača mašina *Agie Charmille* za elektroerozivnu obradu svih obojenih i neobojenih metala, kako za grubu tako i za završnu obradu. Osnovne karakteristike ulja su date u tabeli 4-2.

Tabela 4-1. Karakteristike ulja *Ilocut EDM 180 – Castrol*

| Naziv | Standard | Jedinica | Vrednost |
|---------------------|------------|--------------------|-------------|
| Izgled | Providan | - | |
| Viskozitet na 40°C | DIN 51562 | mm ² /s | 2 – 2.6 |
| Viskozitet na 100°C | ASTM D 446 | SUS | 32.5 – 34.5 |
| Tačka paljenja | ISO 2719 | °C | Min. 100 |
| Korozijska bakra | ISO 2160 | 3 časa na 100 °C | Max. 1b |

Prednosti ovog ulja su da obezbeđuje dobro hlađenje i ispiranje radnog prostora pri niskim vrednostima radnog zazora. Ne iritirajući miris i providnost dielektrikuma rezultiraju sigurno i prijatno radno okruženje. Odlična sposobnost filtracije i visoka stabilnost oksidacije pružaju dug vek trajanja dielektrikuma.

Aditivi poput grafitnog praha i surfaktanta (reagent) dodaju se u dielektrikum radi boljeg ispiranja zone obrade i izbegavanja aglomeracije čestica (skupljanje i gomilanje). Tokom postupka obrade, aditivi koji se dodaju u prostor obrade smanjuju izolaciona svojstva dielektrikuma, povećavajući na taj način radni zazor. Povećanje radnog zazora rezultira boljom cirkulaciji dielektrikuma. Istovremeno, proces obrade postaje stabilniji, odnosno dolazi do poboljšanja izlaznih karakteristika procesa elektroerozivne obrade [24].

Grafitni prah *Asbury PM19* je korišćen tokom elektroerozivne obrade legure titanijuma (PMEDM) i cirkonijum oksida (AE+PM)EDM. Ovaj prah je izabran zbog svoje visoke elektroprovodljivosti, čime se mešanjem sa dielektrikumom postiže povećanje radnog zazora i

ispiranje radnog prostora. Čistoća ovog grafitnog praha iznosi 95.5%, dok je krupnoće zrna 19 μm (granulacija).

Surfaktant *Tween 20* $C_{58}H_{114}O_{26}$ je prozirna tečnost visoke gustine. Uloga surfaktanta je da spreči skupljanje i gomilanje čestica grafitnog praha, respektivno, da obezbedi homogenu smešu praha i dielektrikuma pri obradama PMEDM i (AE+PM)EDM.

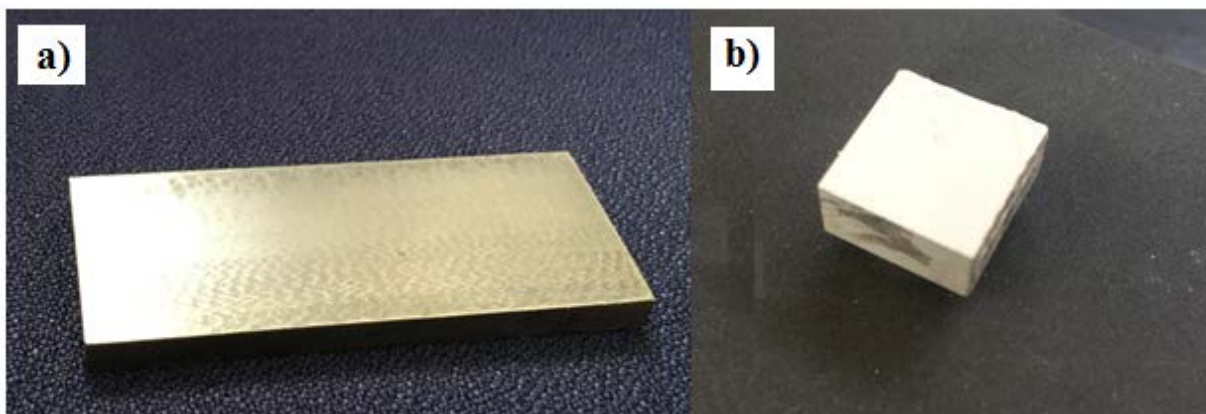
4.1.3 Materijali obratka i alata

Ekperimentalna ispitivanja su izvršena na dva materijala obratka. Kao teško obradivi materijal odabrana je legura titanijuma $TiAl_6V_4$. Za elektroneprovodljivi materijal izabrana je jedna vrsta keramike, tačnije cirkonijum oksid ZrO_2 .

Izabrana legura titanijuma zbog svojih izuzetnih karakteristika, kao što su visoka temperaturna i korozivna otpornost, našla je primenu u avio industriji, biomedicini i mnogim drugim granama tehnike. Zahvaljujući svojim inherentnim osobinama, obradivost ovog materijala sa ekonomskog gledišta nije pogodna. $TiAl_6V_4$ je veoma reaktivan sa gotovo svim materijalima reznog alata, pa je zbog svoje niske toplotne provodljivosti i niskog modula elastičnosti mašinska obrada ovog materijala otežana. Uzimajući u obzir ova svojstva, tradicionalne metode nisu najbolji izbor za obradu ove legure titanijuma. S druge strane, jedan od često primenjivanih nekonvencionalnih postupaka za obradu ove legure je elektroerozivna obrada. Pripremak je bio pločastog oblika dimenzija 100 x 50 x 5 mm, slika 4-2-a.

ZrO_2 , izolacioni keramički materijal, zbog svojstava kao što su niska toplotna provodljivost i otpornost na oksidaciju, ima široku industrijsku i inženjersku primenu (komponente pumpi, delovi izloženi habanju, gasni senzori, medicinske komponente itd.). Zbog svojih odličnih fizičkih i hemijskih osobina koristi se dugi niz godina u automobilskoj industriji kao električni izolator otporan na visoke temperature. U novije vreme, cirkonijum oksid se primenjuje u proizvodnji alata za rezanje, ležajeva, lopatice turbina, izmenjivača toplote, širokog spektra protetičkih proizvoda i dr. Obrada je izvedena na pripremcima dimenzija 15 x (15-20) x 5 mm, slika 4-2-b.

Svojstva materijala obradaka, $TiAl_6V_4$ i ZrO_2 prikazana su u tabeli 4-2.

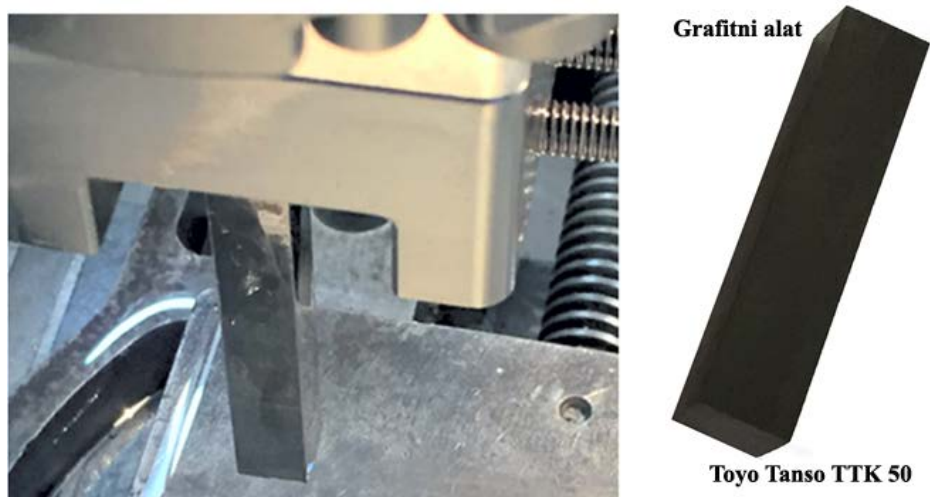


Slika 4-2. Materijali obratka pri EDM: a) $TiAl_6V_4$ i b) ZrO_2

Tabela 4-2. Svojstva materijala obratka

| Materijal | Fizičke karakteristike | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| | Gustina [g/cm ³] | Tačka topljenja °C | Specifična toplota J/Kg ^o ·C | Termalna provodljivost W/m·K | Električna otpornost [μΩ cm] |
| TiAl₄V₆ | 4-4.4 | 1650 | 526.3 | 16.4 | 178 |
| ZrO₂ | 5.68 | 2720 | 400 | 2 | 1010 |

Za elektroerozivnu obradu oba materijala obratka korišćen je alat od grafita oznake *Toyo Tanso TTK50*, slika 4-3. Svojstva materijala alata prikazana su u tabeli 4-4. Ovaj materijal alata je već dugo u upotrebi i pruža visok kvalitet obrađene površine zbog svoje visoke gustine i otpornosti na habanje.



Slika 4-3. Alat za elektroerozivnu obradu od grafita TTK50

Tabela 4-3. Svojstva materijala alata

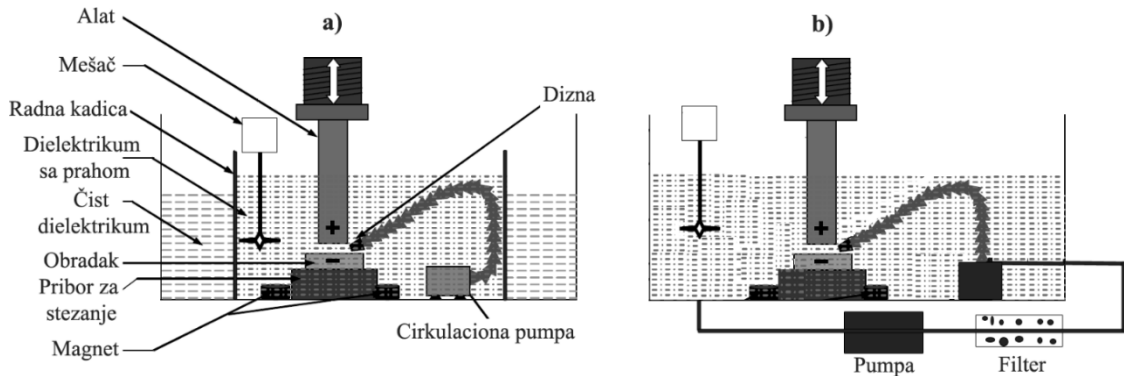
| Materijal | Gustina [g/cm ³] | Tvrdoća [šore] | Električna otpornost [μΩm] | Otpornost na savijanje [MPa] | Krupnoća zrna [μm] | Dimenzije [mm] |
|---------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Grafit TTK50 | 1.80 | 70 | 13 | 60 | 6 | 10x10x50 |

4.2 OPIS EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA

4.2.1 Postavka obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom

Prema dostupnoj literaturi postoje dva tipa sistema PMEDM: otvoreni i zatvoreni sistem. Kod otvorenog PMEDM procesa prisutan je standardni sistem cirkulacije dielektrikuma uz specijalne filtere, slika 4-4-b [112]. Smeša dielektrikuma, praha i produkata obrade prolazi kroz filter čiji je cilj da pročisti miksturu medijuma i obezbedi ponovnu upotrebu praha. Održavanje ovakvog sistema je veoma skupo pa se u svrhu eksperimentalnih istraživanja uglavnom koristi zatvoreni PMEDM sistem.

Osnovni deo zatvorenog PMEDM sistema je radna kadica koja se kao modularan deo postavlja u radni prostor klasične mašine za elektroerozivnu obradu. Radna kadica je uglavnom opremljena sa mešačem i cirkulacionom potapajućom pumpom. Elektroerozivna obrade se vrši kao prema slici 4-4-a [113].

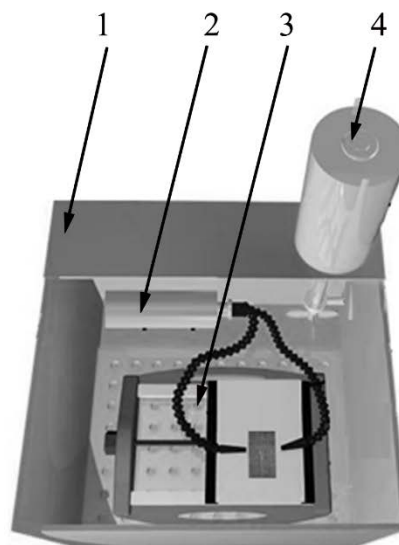


Slika 4-4. Tipovi PMEDM sistema: a) zatvoreni i b) otvoreni [111, 112]

Shodno prethodnoj konstataciji, za potrebe elektroerozivne obrade u dielektrikum sa pomešanim prahom, dizajnirana i izrađena je kadica sa elementima za pričvršćivanje i pozicioniranje obratka zatvorenog tipa, slika 4-5. Na ovaj način se sprečava prljanje elektroerozivne mašine grafitnim prahom što dovodi do minimizacije troškova. Dimenzije kadice su 330×330×330 mm, kapaciteta 20 litara. U ovakvom, prilagođenom sistemu potrebno je obezbediti pravilnu distribuciju praha, kao i ispiranje radnog prostora.



1. Radna kadica
2. Potapajuća pumpa
3. Pribor za stezanje
4. Mešač sa motorom



Slika 4-5. Kadica sa elementima za pričvršćivanje i pozicioniranje obratka

U kadicu je smeštena potapajuća pumpa protoka 1200 l/čas u cilju obezbeđenja ispiranja radnog prostora. Na gornju ivicu kadice postavljen je motor sa regulatorom broja obrtaja snage 500 W. Na osovinu motora pričvršćen je mešač koji ima ulogu da obezbedi pravilnu smešu praha i dielektrikuma.

4.2.2 Postavka obrade sa pomoćnom elektrodom

Imajući u vidu više tipova pomoćnih elektroda koje su zastupljene u literaturi, sa aspekta dostupnosti i cene izrade pomoćnih elektroda, za ovo istraživanje izabran je hibridni način postavljanja. Kao pomoćna elektroda pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida korišćena je kombinacija samolepljive bakarne metalne folije i grafitnog premaza, tzv. hibridna pomoćna elektroda, slika 4-6.

Grafitni sloj se jednostavno nanosi na površinu izolacione keramike pomoću spreja *Graphit 33* proizvođača *Kontakt Chemie*. Nakon sušenja nanetog sloja u peći (60 min na 200°C) formiran je elektroprovodljivi sloj koji obezbeđuje električni kontakt. Samolepljiva bakarna traka *3M grade 1181* se potom postavlja na formirani grafitni sloj. Na ovaj način formirana pomoćna elektroda pruža stabilno generisanje ugljeničnog sloja na površini obratka.



Slika 4-6. Proces postavljanja pomoćne elektrode na izolacionu keramiku

4.3 USLOVI PRI PMEDM LEGURE TITANIJUMA

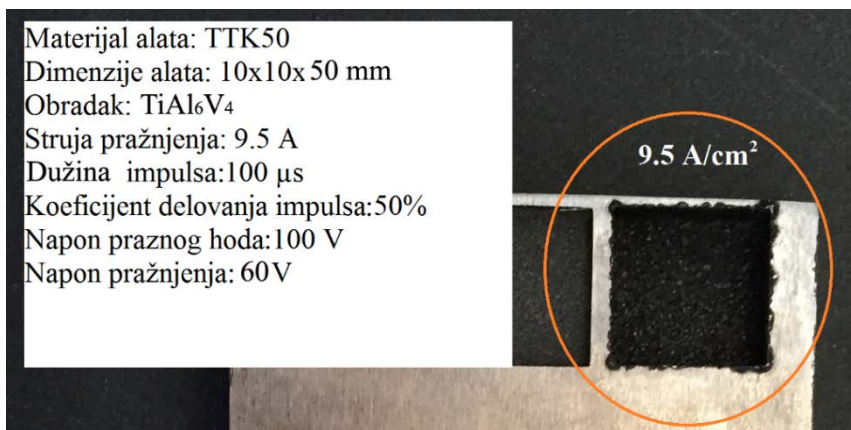
Pre planiranja eksperimentalnih ispitivanja potrebno je utvrditi raspon variranja adekvatnih ulaznih parametara obrade, kao i ostale faktore čije vrednosti su konstantne tokom ispitivanja. Na osnovu dostupnih literaturnih izvora i preliminarnih eksperimentalnih istraživanja usvojeni su adekvatni uslovi pri elektroerozivnoj obradi $TiAl_6V_4$. U ovom delu je takođe dat prikaz preliminarnih istraživanja sa rezultatima, kao i uticaj ulaznih parametara na neke izlazne performanse EDM za koje se smatra da su najvažniji.

4.3.1 Struja pražnjenja

Jačina struje pražnjenja je ograničena dimenzijama čeone površine elektrode, tj. gustinom struje. Ovde se kao merodavna površina alata uzima projekcija u ravni koja je normalna na pravac kretanja alata. Prema preporuci proizvođača elektroda *Toyo Tanso* i literaturnih izvora maksimalna gustina struje za grafit TTK50 kod grube obrade se kreće u granicama $10 \div 20$

A/cm² u zavisnosti od vrste sparenih materijala [11, 14]. U svrhu određivanja gornje granice struje pražnjenja izveden je probni eksperiment sa jačinom struje 9.5 A. Sa slike 4-7. se može uočiti da je površina obratka oštećena i veoma lošeg kvaliteta.

Stoga je u ovom eksperimentalnom istraživanju pri EDM legure titanijuma bez mešanja grafitnog praha sa dielektrikumom, korišćena jačina struje pražnjenja u rasponu od 1.5 ÷ 7.5 A, a s obzirom na varijacije koje su moguće na mašini alatki.



Slika 4-7. Prikaz obrađene površine nakon probnog eksperimenta sa strujom pražnjenja od 9.5 A

4.3.2 Dužina impulsa

Dužina impulsa predstavlja vreme trajanja impulsa u mikrosekundama za koje struja teče u svakom ciklusu. Tokom ovog vremena uspostavlja se napon između alata i obratka. Prema istraživanjima objavljenim u radovima [14, 114] kod obrade legure titanijuma gornja granica dužine trajanja impulsa je iznosila od 200 ÷ 500 μs. Na osnovu literature zaključeno je da sa povećanjem dužine impulsa dolazi do povećanja proizvodnosti obrade. Međutim, postoji optimalna vrednost dužine impulsa kojoj odgovara maksimalna proizvodnost obrade [11]. Shodno tome, u svrhu određivanja raspona dužine impulsa sprovedena su preliminarna eksperimentalna ispitivanja za dve vrednosti struje pražnjenja 3.2 i 7.5 A, pri čemu je dužina impulsa varirana. Obrada je takođe izvršena bez dodavanja grafitnog praha.

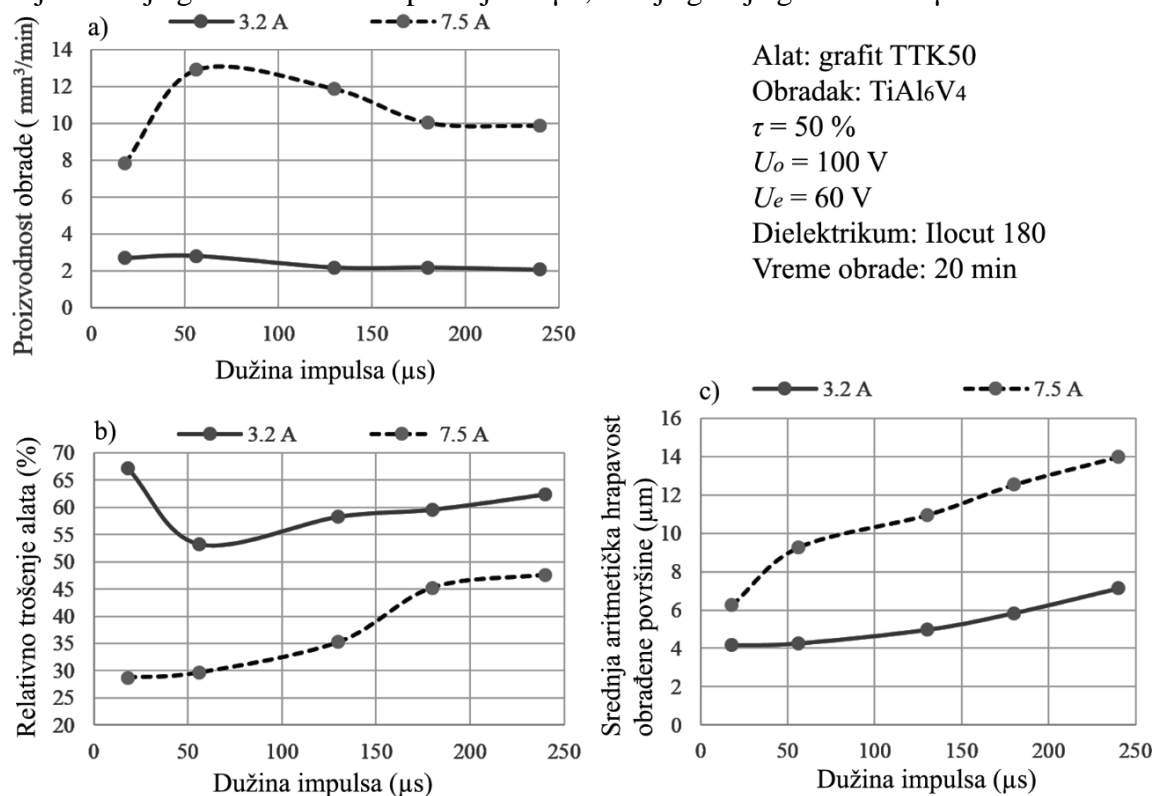
Na osnovu preliminarnih ispitivanja, prikazana je tipična zavisnost proizvodnosti obrade, relativnog trošenja alata i srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine od struje pražnjenja i dužine impulsa, slika 4-8.

Povećanjem dužine impulsa, pri konstantnoj struji pražnjenja u iznosu 7.5 A, povećava se proizvodnost obrade do vrednosti dužine impulsa od 56 μs. Daljim povećanjem dužine impulsa do 180 μs proizvodnost obrade opada. U rasponu od 180 ÷ 240 μs nije primećena promena proizvodnosti obrade. Za struju pražnjenja 3.2 A, sa povećanjem dužine impulsa nema značajne promene proizvodnosti obrade, slika 4-8-a.

S druge strane, za struju pražnjenja 7.5 A, sa povećanjem dužine impulsa povećava se relativno trošenje alata. Pri dužini impulsa 24 μs i struji pražnjenja 3.2 A ustanovljeno je najveće relativno trošenje alata, slika 4-8-b.

Kao što se vidi sa slike 4-8-c., za postizanje manje vrednosti srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine, struja pražnjenja i dužina impulsa bi trebalo da budu što manje.

Na osnovu napred iznetog, za potrebe istraživanja elektroerozivne obrade TiAl_6V_4 usvojena donja granica dužine impulsa je $24 \mu\text{s}$, dok je gornja granica $240 \mu\text{s}$.



Slika 4-8. Prikaz promene performansi EDM u zavisnosti od dužine impulsa

4.3.3 Koeficijent delovanja impulsa

Koeficijent delovanja impulsa predstavlja procenat periode impulsa koji se koristi za koristan rad, tj. skidanje materijala, a predstavlja odnos dužine i periode impulsa:

$$\tau = \frac{t_i}{t_i + t_o} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

Za postizanje veće proizvodnosti obrade preporučljivo je da koeficijent delovanja impulsa bude što veći. Međutim, povećanje ima svoju granicu, kako za date uslove obrade ne bi došlo do stvaranja električnog luka ili kratkog spoja. Prema raspoloživim literaturnim podacima, vrednost koeficijenta delovanja impulsa preko 50% , nepovoljno utiče na integritet obradene površine legure titanijuma [115-117].

U tom kontekstu, u ovom istraživanju za elektroerozivnu obradu u dielektrikum sa pomešanim prahom TiAl_6V_4 , koeficijent delovanja impulsa je variran u granicama od $30 \div 70 \%$.

4.3.4 Napon praznog hoda i napon pražnjenja

Na mašini alatki koja je korišćena u ovom istraživanju, napon praznog hoda je bilo moguće podesiti samo na 100 V ili 300 V . Ovaj napon direktno utiče na performanse obrade. Literaturni izvori pokazuju da proizvodnost obrade raste sa povećanjem napona praznog hoda uz

istovremeno smanjenje relativnog trošenja elektrode [14, 115]. Pri tome, povećanje ovog napona je uslovljeno pojavom električnog luka, pa je stoga za ovo istraživanje izabran napon praznog hoda od 100 V. Prema preporukama proizvođača korišćene mašine alatke, pri elektroerozivnoj obradi u dielektrikumu sa pomešanim prahom TiAl_6V_4 , izabran je napon pražnjenja od 60 V.

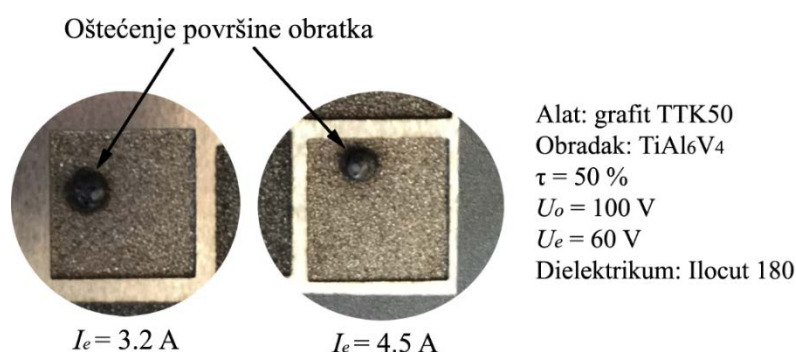
4.3.5 Polaritet

Tokom izvođenja eksperimenata, pri elektroerozivnoj obradi u dielektrikumu sa pomešanim prahom legure titanijuma, korišćen je negativan polaritet alata.

Poznato je da se kod obrade čelika i ostalih metalnih materijala uglavnom koristi pozitivan polaritet alata, međutim kod obrade legure titanijuma to nije slučaj. Razlozi za to se mogu pronaći u rezultatima pojedinih istraživanja. Autori *Klocke* i ostali, sproveli su komparativnu studiju uticaja polariteta alata na proizvodnost obrade kod obrade čelika i legure titanijuma [22]. Zaključili su da je proizvodnost obrade veoma mala kod obrade ove legure pri pozitivnom polaritetu alata. Takođe, debljina defektnog sloja materijala obratka je veća nego kod obrade sa negativnim polaritetom alata.

4.3.6 Aditivi pri PMEDM

Pregledom literature ustanovljeno je da se koncentracija grafitnog praha obično kreće u granicama od $0 \div 20$ g/l za razne uparene materijala alata i obratka [93, 118, 119]. U ovom istraživanju, da bi se utvrdila gornja granica koncentracije grafitnog praha sprovedeni su probni eksperimenti pri koncentraciji praha od 20 g/l. Pri tome je došlo do oštećenja površine obratka, slika 4-9.

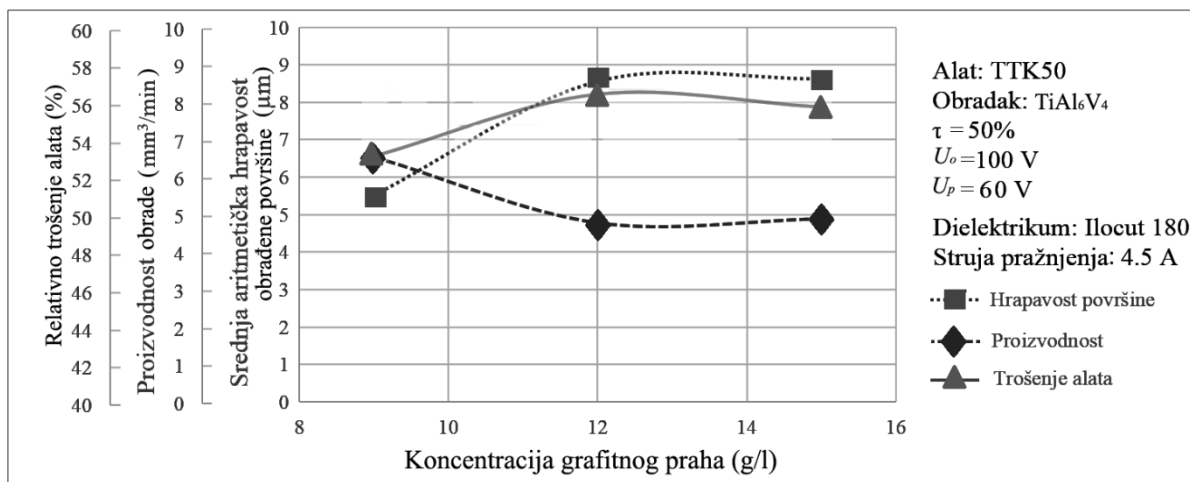


Slika 4-9. Oštećenje površine usled visoke koncentracije grafitnog praha

Nakon određivanja gornje granice koncentracije praha, sprovedena su dodatna tri probna eksperimenta sa različitim koncentracijama grafitnog praha u dielektrikumu. Na slici 4-10. prikazan je uticaj koncentracije grafitnog praha na izlazne performanse EDM. U tom kontekstu, za elektroerozivnu obradu TiAl_6V_4 u ovom istraživanju koncentracija praha je varirana u rasponu od $0 \div 15$ g/l.

Preporučena vrednost koncentracije surfaktanta se kreće od $0.5 \div 15$ g/l. Prema istraživanjima [118, 120] dodavanje surfaktanta preko 10 g/l nema uticaja na izlazne performanse obrade. Na osnovu prethodne konstatacije, za ova ekperimentalna istraživanja

korišćena je koncentracija surfaktanta od 10 g/l i usvojena je kao konstantna vrednost tokom ispitivanja.



Slika 4-10. Uticaj koncentracije grafitnog praha na izlazne performanse PMEDM

4.3.7 Sistematizovani izabrani parametri PMEDM legure titanijuma

Parametri koji utiču na izlazne performanse elektroerozivne obrade legure titanijuma mogu se podeliti u dve grupe: parametri električnog impulsa i ne električni parametri procesa. Sistematizovani uslovi pri obradi legure titanijuma prikazani su u tabelama 4-4. i 4-5.

Tabela 4-4. Parametri električnog impulsa pri PMEDM TiAl₆V₄

| Električni parametri EDM | Oznaka | Vrednost | Jedinica |
|-------------------------------|--------|-----------|----------|
| Struja pražnjenja | I_e | 1.5 ÷ 7.5 | A |
| Dužina impulsa | t_i | 24 ÷ 240 | µs |
| Vreme pauze | t_o | 24 ÷ 240 | µs |
| Napon praznog hoda | U_o | 100 | V |
| Napon pražnjenja | U_e | 60 | V |
| Pomoćna struja pražnjenja | I_H | 0 | A |
| Polaritet | Pol | (-) | / |
| Koeficijent delovanja impulsa | τ | 30 ÷ 70 | % |

Tabela 4-5. Ne električni parametri pri PMEDM TiAl₆V₄

| Ne električni parametri EDM | Oznaka | Vrednost | Jedinica |
|-----------------------------|--------|----------|----------|
| Protok dielektrikuma | Q | 20 | l/min |
| Visina podizanja alata | UP | 1.5 | mm |
| Vreme podizanja alata | DN | 2 | s |
| Grafitni prah | GR | 0 ÷ 12 | g/l |
| Surfaktant | SR | 10 | g/l |

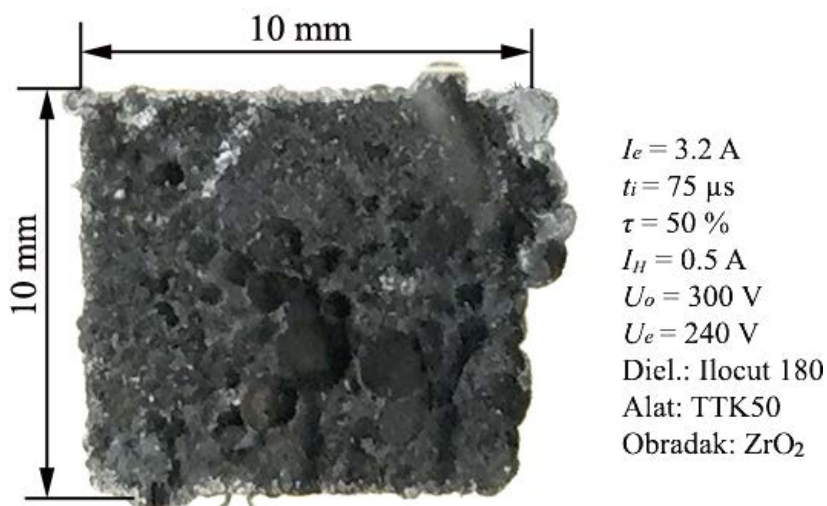
Pri izvođenju eksperimenata korišćeno je bočno ispiranje dielektrikumom sa protokom od 20 l/min, preko jedne mlaznice prečnika 4 mm i druge mlaznice poprečnog preseka 2x8 mm. Vreme podizanja alata iznosilo je 2 sekunde i to na razdaljinu od 1.5 mm. Vreme erodiranja svake eksperimentalne tačke iznosilo je 60 min.

4.4 USLOVI PRI (AE+PM)EDM CIRKONIJUM OKSIDA

Rasponi variranja ulaznih parametara (AE+PM)EDM cirkonijum oksida određeni su na osnovu literaturnih izvora i preliminarnih ispitivanja. U narednim poglavljima prikazani su rezultati preliminarnih istraživanja za pojedine parametre obrade.

4.4.1 Struja pražnjenja

Prema do sada objavljenim istraživanjima u oblasti AEEDM, za površine elektrode do 1 cm² korišćene su struje pražnjenja do 6 A [106, 121]. Jasno je da se sa povećanjem struje pražnjenja povećava energija pražnjenja, što rezultira bolju efikasnosti obrade, ali za veće vrednosti energije pražnjenja proces obrade može postati nestabilan čime dolazi do pojave velikih kratera na površini obratka, slika 4-11. Pri preliminarnim uslovima obrade: struja pražnjenja 3.2 A, dužina impulsa 75 μs, koeficijent delovanja impulsa 50 %, pomoćna struja pražnjenja 0.5 A, napon praznog hoda 300 V, dobijena je obrađena površina sa velikom hrapavošću, koju nije bilo moguće izmeriti.



Slika 4-11. Izgled obrađene površine nakon AEEDM pri struji pražnjenja 3.2A

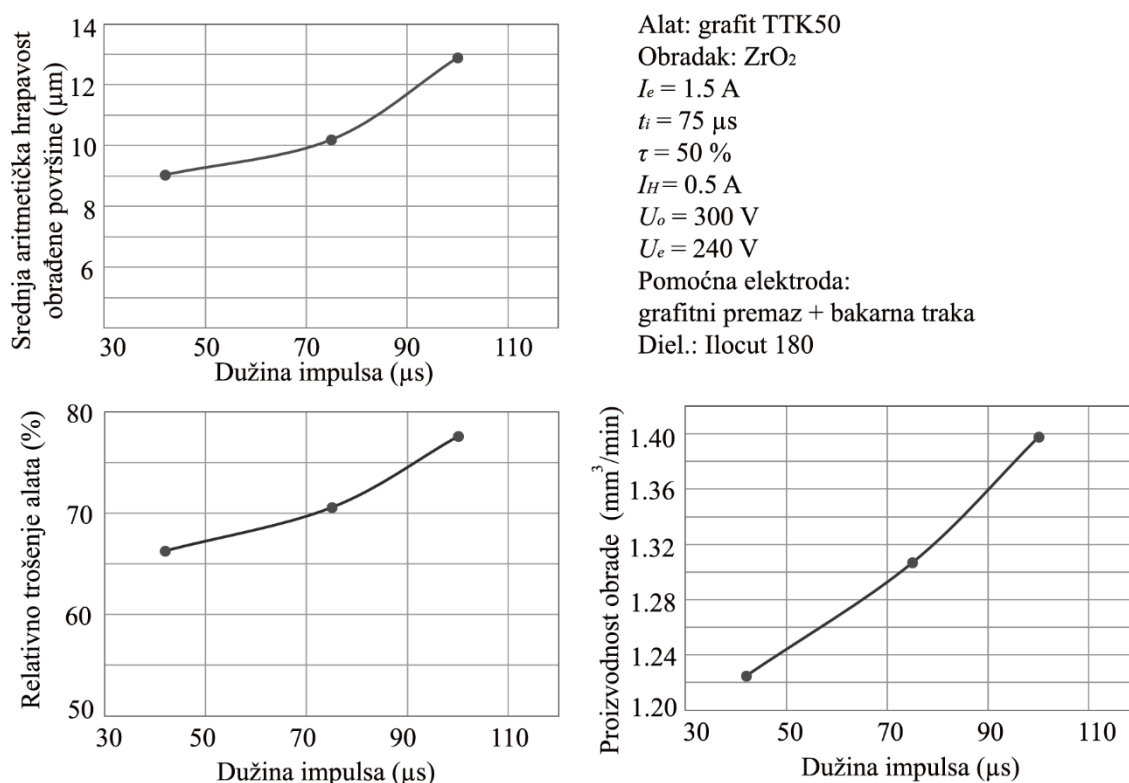
Shodno navedenom, u ovom istraživanju za elektroerozivnu obradu cirkonijum oksida izabrana struja pražnjenja je varirana u granicama 1 ÷ 2 A.

U ovim eksperimentalnim ispitivanjima, pomoćna struja pražnjenja ima ulogu da poveća energiju, kako bi se omogućila tranzicija sloja pomoćne elektrode u ugljenični sloj, bez koga obrada izolacionih materijala ne bi bila moguća. Kada se aktivira pomoćna struja, upravljački sistem mašine automatski napon praznog hoda prebacuje na 300 V.

4.4.2 Dužina impulsa

Sa povećanjem dužine impulsa, pri konstantnoj struji pražnjenja, povećavaju se proizvodnost obrade, relativno trošenje alata i hrapavost površine obrađene površine [15, 62, 122]. Za postavljene uslove obrade u svrhu određivanja dužine impulsa do koje je proces EDM stabilan, sproveden je probni eksperiment pri konstantnoj struji pražnjenja od 1.5 A. Primećeno je da se pri dužini impulsa preko 100 μs , hrapavost obrađene površine znatno pogoršava, a proces je nestabilan (dolazi do neželjenog prekida procesa), slika 4-12.

Stoga, pri AEEDM cirkonijum oksida dužina impulsa je varirana u granicama od 42 ÷ 100 μs . Za dužine impulsa ispod 42 μs nije došlo do formiranja ugljeničnog sloja na površini keramike, usled čega proces AEEDM ZrO_2 nije uopšte bio izvodljiv.



Slika 4-12. Uticaj dužine impulsa na izlazne performanse kod AEEDM ZrO_2

4.4.3 Koeficijent delovanja impulsa

Za obradu metalnih materijala važi preporuka da koeficijent delovanja impulsa treba da iznosi i do 95%. Međutim, pri obradi keramike povećanje ima svoju granicu, kako bi se za date uslove obrade omogućilo formiranje ugljeničnog sloja. Na osnovu literaturnih izvora prilikom obrade keramike koeficijent delovanja impulsa se kreće u granicama od 20 ÷ 50 % [42, 123, 124]. Kada se obrada izvodi sa većim strujama pražnjenja i dužinama impulsa poželjno je da ovaj koeficijent ide ka manjim vrednostima.

Kako je u ovom istraživanju izabrana gornja granica struje pražnjenja od 2 A, što predstavlja relativno malu struju pražnjenja, izabrani koeficijent delovanja impulsa pri obradi cirkonijum oksida iznosi 50%.

4.4.4 Napon praznog hoda i napon pražnjenja

Kao što je već rečeno, napon praznog hoda je moguće podesiti na 100 V ili 300 V. Puštanjem u rad mašine alatke sa naponom od 100 V, bilo je otežano započeti AEEDM ZrO_2 zbog izuzetno male energije. Da bi se energija povećala mašina poseduje opciju za uključivanje pomoćne struje pražnjenja (struja visokog napona). Pri uključivanju ove opcije napon praznog hoda iznosi 300 V.

Za ove uslove obrade, na napon pražnjenja se ne može uticati. Tokom obrade automatski se uspostavlja vrednost napona približno 240 V, koji je izmeren meračem napona jednosmerne struje.

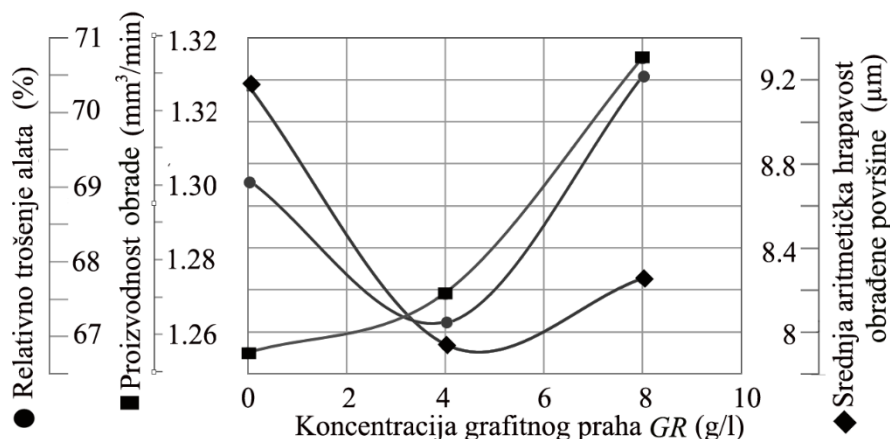
4.4.5 Polaritet

Tokom ovog istraživanja, prilikom (AE+PM)EDM cirkonijum oksida, korišćen je negativan polaritet alata. Prema literaturi [15, 43, 45, 60] kod AEEDM izolacionih materijala sa negativnim polaritetom alata proces je znatno stabilniji. Takođe je vreme tranzicije sloja pomoćne elektrode u ugljenični sloj kraće nego pri pozitivnom polaritetu alata.

4.4.6 Aditivi pri (AE+PM)EDM

Da bi se utvrdila gornja granica koncentracije grafitnog praha pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida sprovedeni su probni eksperimenti pri jačini struje od 1.5 A. Sa slike 4-13. se može zaključiti da proizvodnost obrade ima tendenciju rasta sa povećanjem koncentracije grafitnog praha, dok relativno trošenje alata i hrapavost obrađene površine imaju najmanju vrednost pri srednjoj vrednosti koncentracije grafitnog praha.

Pregledom literature ustanovljeno je da se koncentracija grafitnog praha u dielektrikumu pri obradi izolacione keramike kreće u granicama od 0 ÷ 12 g/l. Stoga je za ovo istraživanje, na osnovu probnih eksperimenata i literaturnih izvora koncentracija grafitnog praha varirana u granicama 0 ÷ 8 g/l. Tokom (AE+PM)EDM cirkonijum oksida kao konstantna vrednost korišćena je koncentracija surfaktanta od 10 g/l.



Slika 4-13. Uticaj koncentracije grafitnog praha na performanse (AE+PM)EDM ZrO_2

4.4.7 Sistematizovani izabrani parametri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida

Kao i kod obrade legure titanijuma parametri obrade su podeljeni u dve grupe. Sistematizovani uslovi pri (AE+PM)EDM ZrO₂ prikazani su u tabelama 4-6. i 4-7.

Tabela 4-6. Parametri električnog impulsa pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| Parametri električnog impulsa | Oznaka | Vrednost | Jedinica |
|-------------------------------|--------|----------|----------|
| Struja pražnjenja | I_e | 1 ÷ 2 | A |
| Dužina impulsa | t_i | 42 ÷ 100 | μs |
| Vreme pauze | t_o | 42 ÷ 100 | μs |
| Napon praznog hoda | U_0 | 300 | V |
| Napon pražnjenja | U_e | 240 | V |
| Pomoćna struja pražnjenja | I_H | 0.5 | A |
| Polaritet | Pol | (-) | / |
| Koeficijent delovanja impulsa | τ | 50 | % |

Tabela 4-7. Ne električni parametri pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| Ne električni parametri | | Oznaka | Vrednost | Jedinica |
|----------------------------|----------------|----------------------|----------|----------|
| Pomoćna elektroda | Bakarna traka | <i>3M grade 1181</i> | ≈ 0.66 | mm |
| | Grafitni sprej | <i>Graphite 33</i> | ≈ 20 | μm |
| Povlačenje elektrode | | <i>UP</i> | 1.5 | mm |
| Vreme povlačenja elektrode | | <i>DN</i> | 2 | s |
| Grafitni prah | | <i>GR</i> | 0 ÷ 8 | g/l |
| Surfaktant | | <i>SR</i> | 10 | g/l |
| Protok dielektrikuma | | <i>Q</i> | 20 | l/min |

4.5 PLAN EKSPERIMENTA

Za potrebe istraživanja, u cilju proučavanja uticaja različitih parametara elektroerozivne obrade na izlazne performanse, primenjene su različite tehnike planiranja eksperimenta. U zavisnosti od broja parametara i njihovog razmatranog nivoa korišćeni su sledeći planovi eksperimenta: centralni kompozicioni plan (*eng. Central Composite Design – CCD*), Boks-Behnken plan (*eng. Box–Behnken Design – BBD*) i Tagučići plan (*eng. Taguchi Design - TD*).

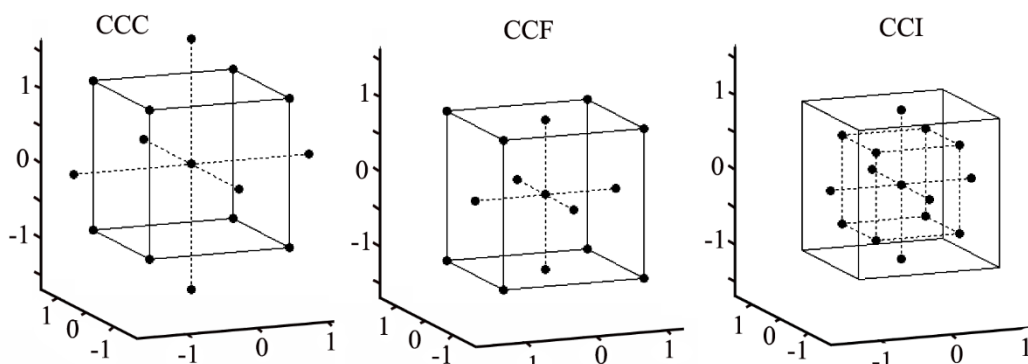
4.5.1 Centralni kompozicioni plan – PMEDM legure titanijuma

Centralni kompozicioni plan se sastoji od 2^k faktornih tačaka (pun faktorni plan), $2k$ aksijalnih tačaka $\pm\alpha$ (zvezda plan) i n_0 centralnih tačaka (broj ponavljanja centralnih tačaka). Faktorni deo plana se koristi za uklapanje svih linearnih i interakcijskih uslova i podrazumeva izvedbu eksperimentalnih tačaka na -1 i +1 nivoima, dok se kod zvezda plana izvodi na nivoima $-\alpha$ i $+\alpha$. Pri izvedbi zvezda plana vrednost α predstavlja aksijalnu udaljenost od centralne tačke

plana. Aksijalne tačke obezbeđuju dodatne nivoe za potrebe procene kvadratnih termina. Centralna tačka predstavlja nulte nivoe svih faktora. Ponavljanjem eksperimentalne centralne tačke u oblasti plana se omogućava procena greške i takođe doprinosi proceni kvadratnih termina. Vrednost n_0 uglavnom se definiše proizvoljno.

Aksijalno rastojanje do zvezdanih tačaka predstavlja ujedno i faktorski opseg. Tipično, α vrednost varira od 1 (centralna tačka) do vrednosti 2 (izvan kuba). U zavisnosti od vrednosti alfa razlikuju se tri tipa CCD, slika 4-14:

- **Sferni CCD** (eng. *Circumscribed CCD – CCC*), gde su tačke zvezde na udaljenosti od $|\alpha| > 1$. Ovi modeli imaju kružnu, sferičnu ili hipersferičnu simetriju i zahtevaju pet nivoe za svaki faktor ($-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$). Na osnovu rastojanja tačke zvezde definišu se ekstremne vrednosti faktora i to prema kriterijumu: $|\alpha| = (n_k)^{1/4} = (2^k)^{1/4}$. Ukoliko je zadovoljen kriterijum govori se o rotirajućem CCC. Za slučaj kada se ispituju dva faktora tada je $|\alpha| = 1,41$, ako se ispituju tri faktora $|\alpha| = 1,68$ i za slučaj od četiri faktora $|\alpha| = 2$.
- **Ka centru orijentisan CCD** (eng. *Face-Centred CCD – CCF*), $|\alpha| = 1$ i kod koga se svi faktori ispituju na tri nivoe ($-1, 0, +1$),
- **Upisani CCD** (eng. *Inscribed CCD – CCI*), $|\alpha| < 1$ i kod koga se svaki faktor se ispituje na pet nivoe ($-1, -1/\alpha, 0, +1/\alpha, +1$).



Slika 4-14. Tipovi centralnog kompozicionog plana

Proračun broja eksperimentalnih tačaka za CCD pri PMEDM legure titanijuma prikazan je u tabeli 4-8.

Tabela 4-8. Proračun broja eksperimentalnih tačaka

| $N = n_k + n_\alpha + n_0 = 2^k + 2k + n_0$ | |
|---|----|
| N – broj eksperimenata | 30 |
| k – broj parametara (faktora) | 4 |
| n_k – broj tačaka na temenu kuba | 16 |
| n_α – broj tačaka na centralnoj osi | 8 |
| n_0 – broj tačaka u centru | 6 |

Izabrani varirani parametri PMEDM su struja pražnjenja I_e , dužina impulsa t_i , koeficijent delovanja impulsa τ i koncentracija grafitnog praha GR . Ograničenja za izabrane parametre su određena u poglavlju 4.3, a prikazana u tabeli 4-9.

Na osnovu odabranih parametara i nivoa varijacije generisan je sferni centralni kompozicioni plan gde je za slučaj četiri faktora $|\alpha| = 2$, tabela 4-10.

Tabela 4-9. Ograničenja faktora pri PMEDM legure titanijuma

| minimum | Parametar (faktor) | maximum |
|---------|--------------------|---------|
| 1.5 | I_e (A) | 7.5 |
| 24 | t_i (μ s) | 240 |
| 30 | τ (%) | 70 |
| 0 | GR (g/l) | 12 |

Tabela 4-10. Centralni kompozicioni četvorofaktorni plan pri PMEDM legure titanijuma

| Redni broj | Kod faktora | | | | | Faktor | | | | |
|--|-------------|-------|-------|-------|-------|-----------|------------------|------------|--------|----|
| | x_0 | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | I_e (A) | t_i (μ s) | τ (%) | GR g/l | |
| Faktorne tačke 2^k | 1. | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 3.2 | 75 | 40 | 3 |
| | 2. | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 6 | 75 | 40 | 3 |
| | 3. | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 3.2 | 180 | 40 | 3 |
| | 4. | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 6 | 180 | 40 | 3 |
| | 5. | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 3.2 | 75 | 60 | 3 |
| | 6. | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 6 | 75 | 60 | 3 |
| | 7. | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 3.2 | 180 | 60 | 3 |
| | 8. | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 6 | 180 | 60 | 3 |
| | 9. | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 3.2 | 75 | 40 | 9 |
| | 10. | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 6 | 75 | 40 | 9 |
| | 11. | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 3.2 | 180 | 40 | 9 |
| | 12. | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 6 | 180 | 40 | 9 |
| | 13. | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 3.2 | 75 | 60 | 9 |
| | 14. | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 6 | 75 | 60 | 9 |
| | 15. | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 3.2 | 180 | 60 | 9 |
| | 16. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 | 180 | 60 | 9 |
| Aksijalne tačke $2k$ $-\alpha$ i α | 17. | 1 | -2 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 130 | 50 | 6 |
| | 18. | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 7.5 | 130 | 50 | 6 |
| | 19. | 1 | 0 | -2 | 0 | 0 | 4.5 | 24 | 50 | 6 |
| | 20. | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 4.5 | 240 | 50 | 6 |
| | 21. | 1 | 0 | 0 | -2 | 0 | 4.5 | 130 | 30 | 6 |
| | 22. | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 4.5 | 130 | 70 | 6 |
| | 23. | 1 | 0 | 0 | 0 | -2 | 4.5 | 130 | 50 | 0 |
| | 24. | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 4.5 | 130 | 50 | 12 |
| Centralna tačka n_0 | 25. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 130 | 50 | 6 |
| | 26. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 130 | 50 | 6 |
| | 27. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 130 | 50 | 6 |
| | 28. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 130 | 50 | 6 |
| | 29. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 130 | 50 | 6 |
| | 30. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 130 | 50 | 6 |

Uz pretpostavku da su matematičke relacije faktora i performansi procesa EDM složena i nelinearna, izabrano je pet nivoa za svaki ulazni parametar. Nivoi ulaznih parametara elektroerozivne obrade predstavljeni su u tabeli 4-11.

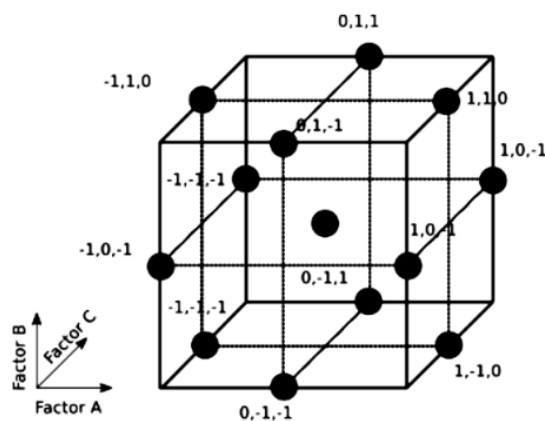
Tabela 4-11. Parametri obrade i njihovi nivoi za CCD pri PMEDM TiAl₆V₄

| Parametri | Oznaka | Jedinica | Nivoi | | | | |
|-------------------------------|--------|----------|-------|-----|-----|-----|-----|
| | | | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 |
| Struja pražnjenja | I_e | A | 1.5 | 3.2 | 4.5 | 6 | 7.5 |
| Dužina impulsa | t_i | μs | 24 | 75 | 130 | 180 | 240 |
| Koeficijent delovanja impulsa | τ | % | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| Koncentracija grafitnog praha | GR | g/l | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 |

4.5.2 Box-Behnken plan – (AE+PM)EDM cirkonijum oksida

Box-Behnken plan eksperimenta je izrađen 1960. godine od strane *George Box-a* i *Donald Behnken-a*. Metoda odzivne površine se takođe može sprovesti pomoću ovog plana koji ujedno predstavlja alternativu centralnom kompozicionom planu. Box-Behnken plan nije baziran na punom faktornom planu, odnosno ne sadrži tačke na vrhovima kocke i za svaki ispitivani faktor zahteva tri nivoa.

Prema slici 4-15., u ovom planu kombinacije nivoa faktora čine glavna stanja eksperimenta koja se nalaze na polovinama stranica eksperimentalnog prostora. Na ovaj način eksperimentalni prostor je ograničen i onemogućeno je izvođenje eksperimentalnih tačaka na vrhovima kocke, na primer +1 i +1. Ovo ujedno predstavlja prednost Box-Behnken plana jer je smanjen broj eksperimentalnih tačaka.



Slika 4-15. Box-Behnken plan u prostoru

U ovom istraživanju primenjen je trofaktorni Box-Behnken plan na tri nivoa (+1, 0, -1). Glavni razlog primene ovog tipa plana eksperimenta je ograničenje variranja uticajnih parametara.

U tabeli 4-12. data su ograničenja faktora, odnosno ulaznih parametara kod (AE+PM)EDM cirkonijum oksida, određena u poglavlju 4.4. Nivoi parametara koji su bili varirani tokom

eksperimentalnih istraživanja dati su u tabeli 4-13. U tabeli 4-14. prikazan je trofaktorni plan koji je korišćen pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida.

Tabela 4-12. Ograničenja faktora pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| minimum | Parametar (faktor) | maximum |
|---------|--------------------|---------|
| 1 | I_e (A) | 2 |
| 42 | t_i (μs) | 130 |
| 0 | GR (g/l) | 8 |

Tabela 4-13. Parametri obrade i njihovi nivoi za BBD pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| Parametri | Oznaka | Jedinica | Nivoi | | |
|-------------------------------|--------|----------|-------|-----|-----|
| | | | -1 | 0 | 1 |
| Struja pražnjenja | I_e | A | 1 | 1.5 | 2 |
| Dužina impulsa | t_i | μs | 42 | 75 | 130 |
| Koncentracija grafitnog praha | GR | g/l | 0 | 4 | 8 |

Tabela 4-14. Boks-Behnken trofaktorni plan pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| Redni broj | Kod faktora | | | | Faktor | | |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|------------|--------|
| | x ₀ | x ₁ | x ₂ | x ₃ | I_e (A) | t_i (μs) | GR g/l |
| 1. | 1 | -1 | -1 | 0 | 1 | 42 | 4 |
| 2. | 1 | 1 | -1 | 0 | 2 | 42 | 4 |
| 3. | 1 | -1 | 1 | 0 | 1 | 100 | 4 |
| 4. | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 100 | 4 |
| 5. | 1 | -1 | 0 | -1 | 1 | 75 | 0 |
| 6. | 1 | 1 | 0 | -1 | 2 | 75 | 0 |
| 7. | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 75 | 8 |
| 8. | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 75 | 8 |
| 9. | 1 | 0 | -1 | -1 | 1.5 | 42 | 0 |
| 10. | 1 | 0 | 1 | -1 | 1.5 | 100 | 0 |
| 11. | 1 | 0 | -1 | 1 | 1.5 | 42 | 8 |
| 12. | 1 | 0 | 1 | 1 | 1.5 | 100 | 8 |
| 13. | 1 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 75 | 4 |
| 14. | 1 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 75 | 4 |
| 15. | 1 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 75 | 4 |
| 16. | 1 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 75 | 4 |
| 17. | 1 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 75 | 4 |

4.5.3 Tagučići robusni plan

Početkom 1980-tih *Genichi Taguchi* razvio je metodu koja omogućava smanjenje broja eksperimentalnih tačaka pomoću ortogonalnih nizova i minimiziranje efekata izvan uticajnih parametara. Tagučići ortogonalni niz L₉(3⁴) je prvenstveno korišćen pri PMEDM legure titanijuma i (AE+PM)EDM cirkonijum oksida u cilju detaljnije optimizacije i analize uticaja

ulaznih parametara na kvalitet obrađene površine (hrapavost obrađene površine i stanje površinskog sloja materijala obratka). Kao pokazatelji kvaliteta obrađene površine izabrani su srednja aritmetička hrapavost i maksimalna visina neravnina obrađene površine, dok se stanje površinskog sloja materijala obratka prikazuje preko defektnog sloja koga čine rastopljeni sloj i zona uticaja toplote. Pored navedenih pokazatelja kvaliteta obrađene površine, kao i prethodno istovremeno su praćeni proizvodnost obrade i relativno trošenje alata.

4.5.3.1 Tagučić plan pri PMEDM legure titanijuma

Kod eksperimentalnog ispitivanja tehnoloških karakteristika procesa PMEDM legure titanijuma izabrani su sledeći ulazni parametri obrade: struja pražnjenja, dužina impulsa, koeficijent delovanja impulsa i koncentracija grafitnog praha. Parametri obrade i njihovi nivoi su prikazani u tabeli 4-15. U tabeli 4-16. je dat eksperimentalni plan prema Tagučić ortogonalnom nizu $L_9(3^4)$. Ortogonalni niz se sastoji od četiri kolone (faktori) i devet redova (tačke eksperimenta).

Tabela 4-15. Parametri obrade i njihovi nivoi za Tagučić plan pri PMEDM $TiAl_6V_4$

| Parametri | Oznaka | Jedinica | Nivoi | | |
|-------------------------------|--------|----------|-------|-----|-----|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Struja pražnjenja | I_e | A | 1.5 | 3.2 | 6 |
| Dužina impulsa | t_i | μs | 32 | 75 | 180 |
| Koeficijent delovanja impulsa | τ | % | 30 | 50 | 70 |
| Koncentracija grafitnog praha | GR | g/l | 0 | 6 | 12 |

Tabela 4-16. Tagučić ortogonalni niz $L_9(3^4)$ pri PMEDM $TiAl_6V_4$

| Redni broj | Kod faktora | | | | Faktor | | | |
|------------|-------------|---|---|---|-----------|-------------------|------------|----------|
| | A | B | C | D | I_e (A) | t_i (μs) | τ (%) | GR g/l |
| 1. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1.5 | 32 | 30 | 0 |
| 2. | 1 | 2 | 2 | 2 | 1.5 | 75 | 50 | 6 |
| 3. | 1 | 3 | 3 | 3 | 1.5 | 180 | 70 | 12 |
| 4. | 2 | 1 | 2 | 3 | 3.2 | 32 | 50 | 12 |
| 5. | 2 | 2 | 3 | 1 | 3.2 | 75 | 70 | 0 |
| 6. | 2 | 3 | 1 | 2 | 3.2 | 180 | 30 | 6 |
| 7. | 3 | 1 | 3 | 2 | 6 | 32 | 70 | 6 |
| 8. | 3 | 2 | 1 | 3 | 6 | 75 | 30 | 12 |
| 9. | 3 | 3 | 2 | 1 | 6 | 180 | 50 | 0 |

4.5.3.2 Tagučić plan pri obradi cirkonijum oksida

Kod planiranja eksperimenta prema Tagučić ortogonalnom nizu pri obradi cirkonijum oksida, zadržani su isti parametri obrade i broj nivoa kao prema Box-Behnken planu.

U tabeli 4-17. dati su parametri obrade i nivoi variranja. Izabrani su ulazni parametri obrade: struja pražnjenja, dužina impulsa i koncentracija grafitnog praha. Potrebno je naglasiti da je koeficijent delovanja impulsa usvojen kao konstanta vrednost tokom elektroerozivne obrade cirkonijum oksida, prema poglavlju 4.4.3.

Plan elektroerozivne obrade cirkonijum oksida prema Tagučić planu $L_9(3^4)$ prikazan je u tabeli 4-18. Tagučić ortogonalni niz se sastoji od tri kolone (faktori) i devet redova (tačke eksperimenta).

Tabela 4-17. Parametri obrade i njihovi nivoi za Tagučić plan pri (AE+PM)EDM ZrO_2

| Parametri | Oznaka | Jedinica | Nivoi | | |
|-------------------------------|--------|----------|-------|-----|-----|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Struja pražnjenja | I_e | A | 1 | 1.5 | 2 |
| Dužina impulsa | t_i | μs | 42 | 75 | 100 |
| Koncentracija grafitnog praha | GR | g/l | 0 | 4 | 8 |

Tabela 4-18. Tagučić ortogonalni niz $L_9(3^4)$ pri (AE+PM)EDM ZrO_2

| Redni broj | Kod faktora | | | | Faktor | | |
|------------|-------------|---|---|---|--------------|----------------------|-------------|
| | A | B | C | D | I_e (A) | t_i (μs) | GR g/l |
| 1. | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 42 | 0 |
| 2. | 1 | 2 | 2 | 0 | 1 | 75 | 4 |
| 3. | 1 | 3 | 3 | 0 | 1 | 100 | 8 |
| 4. | 2 | 1 | 2 | 0 | 1.5 | 42 | 4 |
| 5. | 2 | 2 | 3 | 0 | 1.5 | 75 | 8 |
| 6. | 2 | 3 | 1 | 0 | 1.5 | 100 | 0 |
| 7. | 3 | 1 | 3 | 0 | 2 | 42 | 8 |
| 8. | 3 | 2 | 1 | 0 | 2 | 75 | 0 |
| 9. | 3 | 3 | 2 | 0 | 2 | 100 | 4 |

4.6 DEFINISANJE I MERENJE IZLAZNIH PERFORMANSI

4.6.1 Proizvodnost obrade

Proizvodnost obrade ili brzina uklanjanja materijala (*eng. Material Removal Rate - MRR*) pri elektroerozivnoj obradi se obično izražava količinom skinutog materijala u jedinici vremena (mm^3/min). Uglavnom zavisi od sledećih faktora: materijala obratka, parametara električnih impulsa, uslova ispiranja radnog prostora, materijala elektrode i dr.

Na osnovu literaturnih izvora primenjuje se nekoliko načina definisanja proizvodnosti kod EDM [11, 125, 126]. Jedan od načina je preko mase skinutog materijala u jedinici vremena, gde se pre i posle obrade vrši merenje obratka na analitičkoj vagi. Razlika dobijenih vrednosti predstavlja količinu uklonjenog materijala obratka.

Drugi način definisanja proizvodnosti obrade, a koji je primenjen i u ovom istraživanju, je preko zapremine skinutog materijala u jedinici vremena, dat jednačinom:

$$MRR = \frac{\text{Površina elektrode (mm}^2\text{)} \cdot \text{Dubina erodiranja (mm)}}{\text{Vreme obrade (min)}} \quad \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right] \quad (4.1)$$

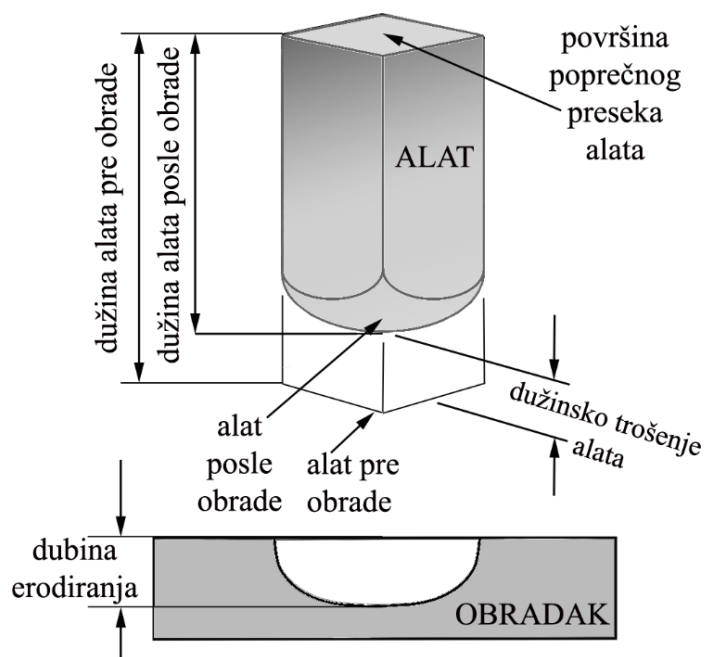
Dubina erodiranja je direktno očitavana sa displeja mašine alatke i posle svake obrade je proveravana komparatorom tačnosti ± 0.02 mm.

4.6.2 Relativno trošenje alata

Kao i kod proizvodnosti obrade postoji nekoliko načina definisanja relativnog trošenja alata. Jedan od njih je preko mase alata, gde se vrši merenje mase pre i posle obrade. Međutim kako se radi o grafitnom alatu koji je hidroskopan, odnosno poseduje osobinu da upija tečnost iz dielektrikuma, nije praktično određivati trošenje preko izgubljene mase, jer je potrebno vreme za sušenje alata posle obrade veoma dugo. Stoga je u ovom istraživanju relativno trošenje alata određivano preko smanjenja dužine alata. Na slici 4-16. prikazan je način definisanja dubine erodiranja i dužinskog smanjenja alata.

Relativno trošenje alata (*eng. Tool Wear Rate - TWR*) je definisano na sledeći način. Pre svake obrade, ukupna dužina alata je merena pomoću *Abbe*-ovog mikroskopa za merenje dužine. Nakon obrade alat je ponovo izmeren da bi se utvrdila dužina posle obrade. Razlika dveju dužina pokazuje dužinsko trošenje elektrode. Kada se ova vrednost podeli sa dubinom erodiranja dobija se tzv. relativno trošenje alata:

$$TWR = \frac{\text{Dužinsko trošenje elektrode (mm)}}{\text{Dubina erodiranja (mm)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.2)$$

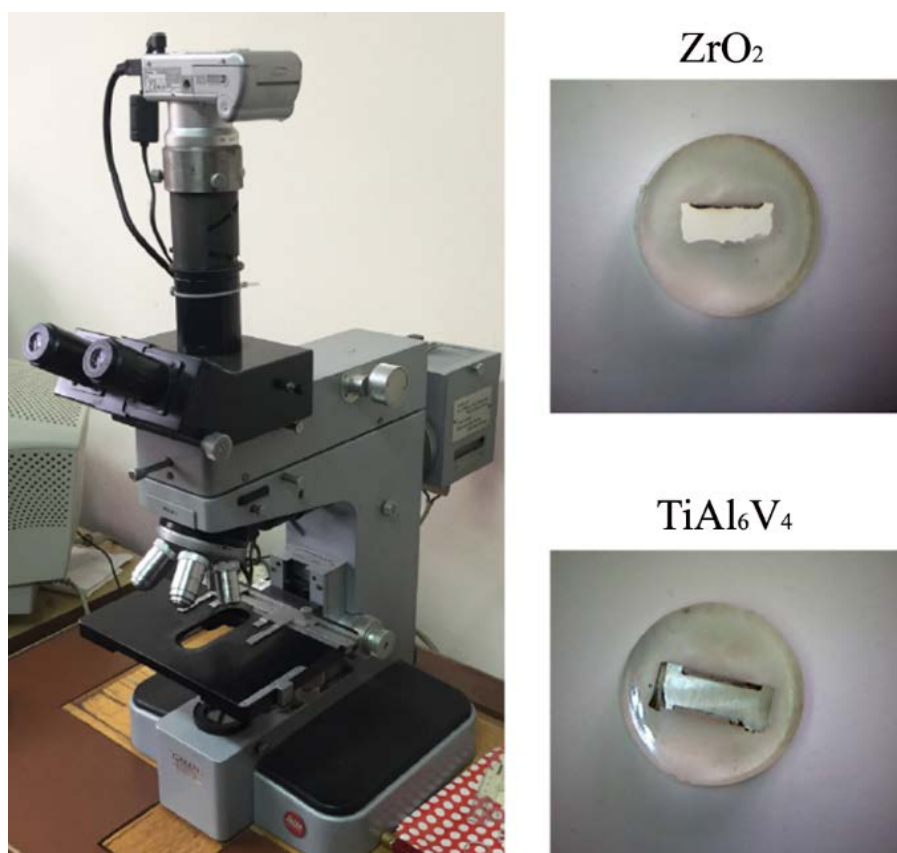


Slika 4-16. Način definisanja dubine erodiranja i dužinskog trošenja alata

4.6.4 Debljina defektnog sloja materijala obratka

Kako se pri elektroerozivnoj obradi u radnom prostoru javljaju ekstremno visoke temperature, za očekivati je pojavu termičkih defekata u površinskom sloju materijala obratka. S obzirom da navedene promene utiču na promene stanja u površinskog sloja, koji mogu znatno da umanje funkciju dela, njima se mora posvetiti posebna pažnja.

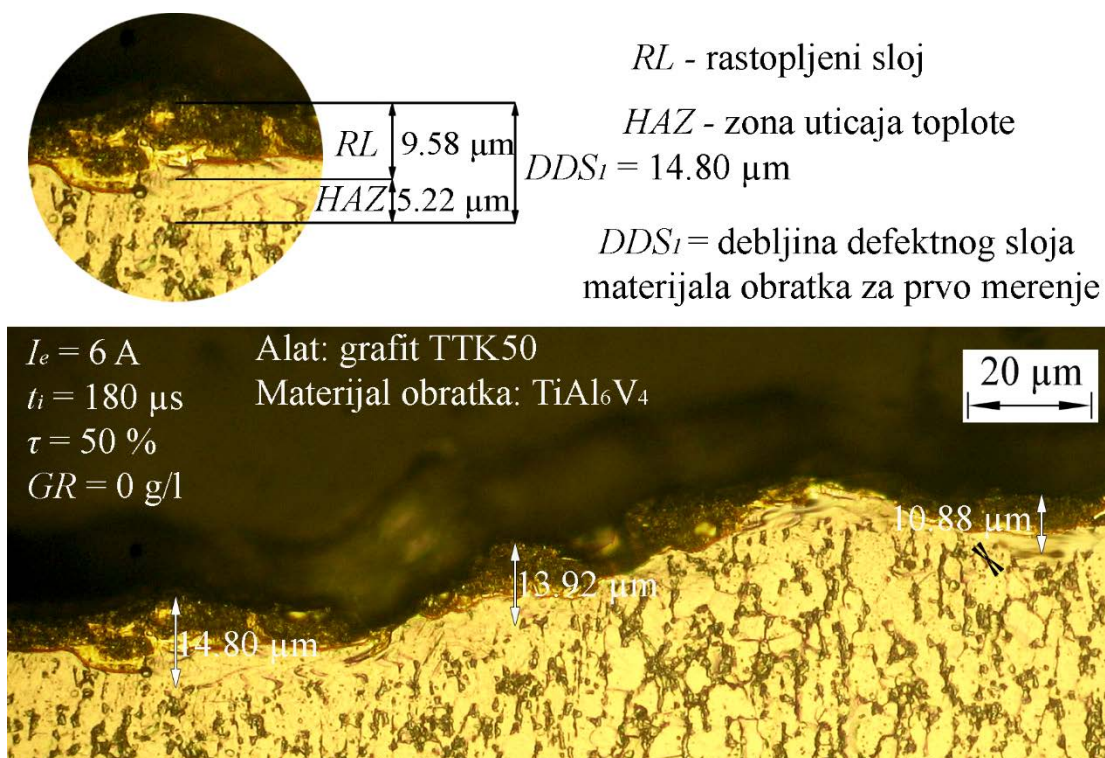
U cilju merenja debljine defektnog sloja materijala obratka *DDS* korišćen je svetlosni mikroskop maksimalnog uvećanja do 500x. Na slici 4-19. prikazan je svetlosni mikroskop sa fotoaparatom, kao i polirani uzorci cirkonijum oksida i legure titanijuma.



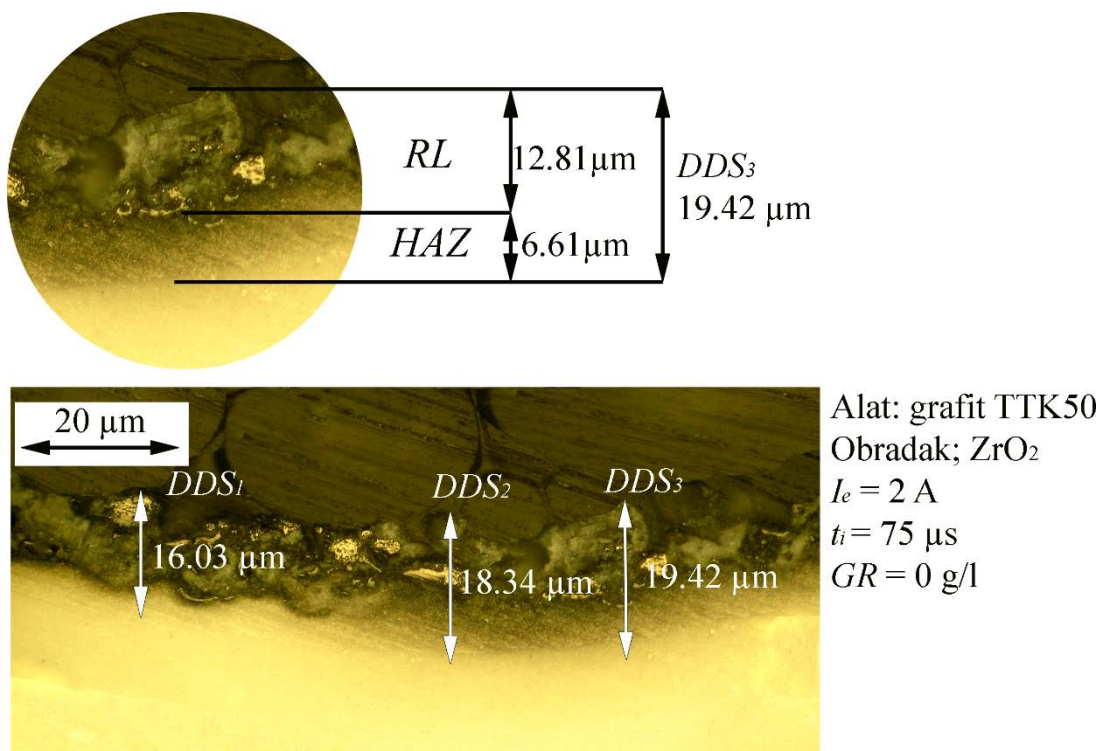
Slika 4-19. Svetlosni mikroskop i primer pripremljenih uzoraka cirkonijum oksida i legure titanijuma

Definisanje debljine defektnog sloja materijala obratka je sprovedeno kroz tri merenja na mestima gde je debljina najveća. Defektni sloj se sastoji od rastopljenog sloja i zone uticaja toplote [127, 128]. Primer definisanja debljine defektnog sloja kod elektroerozivne obrade legure titanijuma pokazan je na slici 4-20.

Merenje je sprovedeno u softveru *CorelDraw X5* pomoću alatke *Dimension Tool* uz prethodno skaliranje prema rezoluciji slike dobijene sa svetlosnog mikroskopa. Isti princip primenjen je na uzorcima keramike, slika 4-21.



Slika 4-20. Primer definisanja debljine defektnog sloja nakon elektroerozivne obrade TiAl_6V_4 ,
 $DDS = 13.20 \mu\text{m}$



Slika 4-21. Primer definisanja debljine defektnog sloja nakon elektroerozivne obrade ZrO_2 ,
 $DDS = 17.93 \mu\text{m}$

5. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA

5.1 PMEDM LEGURE TITANIJUMA

Eksperimentalna istraživanja elektroerozivne obrade legure titanijuma su prvo sprovedena prema CCD planu, a zatim prema TD planu. Eksperimenti su sprovedeni pri uslovima koji su opisani u prethodnom poglavlju (4.3).

5.1.1 Centralni kompozicioni plan - izlazne performanse

Eksperimentalna matrica i rezultati merenja pri PMEDM TiAl₆V₄ su prikazani u tab. 5-1.

Tabela 5-1. Plan eksperimenta i rezultati merenja prema CCD pri PMEDM TiAl₆V₄

| Redni broj | Kod faktora | | | | | Faktor | | | | Performanse | | |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|---------------------|-------|--------|---------------------|----------------------------|---------|
| | x ₀ | x ₁ | x ₂ | x ₃ | x ₄ | I _e (A) | t _i (μs) | τ (%) | GR g/l | R _a (μm) | MRR (mm ³ /min) | TWR (%) |
| 1. | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 3.2 | 75 | 40 | 3 | 3.81 | 1.55 | 35.85 |
| 2. | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 6 | 75 | 40 | 3 | 8.15 | 8.56 | 27.78 |
| 3. | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 3.2 | 180 | 40 | 3 | 4.16 | 2.22 | 44.27 |
| 4. | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 6 | 180 | 40 | 3 | 11.78 | 4.98 | 31.99 |
| 5. | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 3.2 | 75 | 60 | 3 | 3.95 | 1.66 | 42.87 |
| 6. | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 6 | 75 | 60 | 3 | 8.52 | 9.81 | 29.79 |
| 7. | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 3.2 | 180 | 60 | 3 | 4.25 | 2.35 | 44.97 |
| 8. | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 6 | 180 | 60 | 3 | 11.95 | 5.34 | 33.83 |
| 9. | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 3.2 | 75 | 40 | 9 | 3.98 | 1.62 | 36.62 |
| 10. | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 6 | 75 | 40 | 9 | 7.81 | 8.65 | 24.88 |
| 11. | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 3.2 | 180 | 40 | 9 | 4.01 | 4.01 | 40.98 |
| 12. | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 6 | 180 | 40 | 9 | 11.65 | 5.15 | 29.78 |
| 13. | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 3.2 | 75 | 60 | 9 | 4.12 | 1.74 | 37.95 |
| 14. | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 6 | 75 | 60 | 9 | 7.85 | 9.47 | 30.78 |
| 15. | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 3.2 | 180 | 60 | 9 | 4.23 | 2.45 | 39.04 |
| 16. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 | 180 | 60 | 9 | 8.63 | 6.19 | 31.03 |
| 17. | 1 | -2 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 130 | 50 | 6 | 1.95 | 0.51 | 52.66 |
| 18. | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 7.5 | 130 | 50 | 6 | 12.56 | 11.23 | 26.67 |
| 19. | 1 | 0 | -2 | 0 | 0 | 4.5 | 24 | 50 | 6 | 5.25 | 3.75 | 25.08 |
| 20. | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 4.5 | 240 | 50 | 6 | 7.32 | 2.88 | 37.23 |
| 21. | 1 | 0 | 0 | -2 | 0 | 4.5 | 130 | 30 | 6 | 6.52 | 3.98 | 33.01 |
| 22. | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 4.5 | 130 | 70 | 6 | 6.85 | 5.34 | 41.26 |
| 23. | 1 | 0 | 0 | 0 | -2 | 4.5 | 130 | 50 | 0 | 8.52 | 3.91 | 40.58 |
| 24. | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 4.5 | 130 | 50 | 12 | 6.25 | 5.06 | 34.25 |
| 25. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 130 | 50 | 6 | 7.01 | 4.77 | 40.39 |
| 26. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 130 | 50 | 6 | 6.85 | 4.34 | 39.26 |
| 27. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 130 | 50 | 6 | 5.96 | 4.66 | 38.18 |
| 28. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 130 | 50 | 6 | 6.23 | 4.42 | 41.99 |
| 29. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 130 | 50 | 6 | 6.42 | 4.93 | 37.81 |
| 30. | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 130 | 50 | 6 | 6.59 | 4.66 | 37.79 |

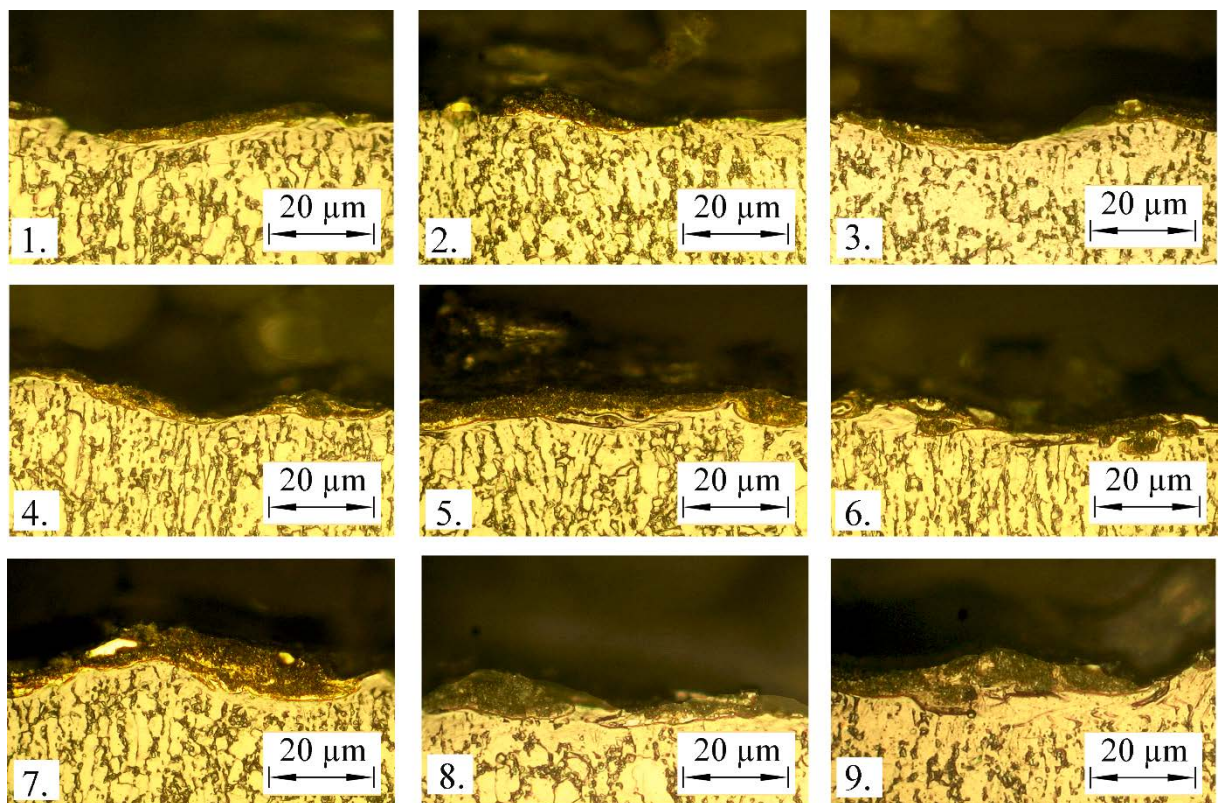
5.1.2 Tagučni plan – izlazne performanse

Slično prema prethodno navedenoj proceduri su realizovana i eksperimentalna istraživanja prema Tagučni ortogonalnom nizu $L_9(3^4)$. Rezultati eksperimentalnih istraživanja su prikazani u tabeli 5-2.

Rezultati merenja debljine defektnog sloja materijala obratka na osnovu Tagučni plana eksperimenta $L_9(3^4)$ pri elektroerozivnoj obradi legure titanijuma prikazani su na slici 5-1.

Tabela 5-2. Rezultati merenja za Tagučni ortogonalni niz $L_9(3^4)$ pri PMEDM TiAl₆V₄

| Redni broj | Faktor | | | | Izlazne performanse | | | | |
|------------|-----------|------------------|------------|--------|---------------------|----------------------|----------------|----------------------------------|---------|
| | I_e (A) | t_i (μ s) | τ (%) | GR g/l | R_a (μ m) | R_{max} (μ m) | DDS (μ m) | MRR (mm^3/min) | TWR (%) |
| 1. | 1.5 | 32 | 30 | 0 | 1.78 | 10.77 | 6.51 | 0.39 | 57.33 |
| 2. | 1.5 | 75 | 50 | 6 | 2.01 | 11.44 | 6.54 | 0.48 | 54.71 |
| 3. | 1.5 | 180 | 70 | 12 | 2.61 | 12.54 | 6.92 | 0.65 | 49.53 |
| 4. | 3.2 | 32 | 50 | 12 | 3.47 | 17.78 | 9.33 | 3.74 | 32.36 |
| 5. | 3.2 | 75 | 70 | 0 | 4.11 | 25.33 | 10.52 | 3.57 | 44.27 |
| 6. | 3.2 | 180 | 30 | 6 | 4.47 | 23.58 | 11.31 | 5.11 | 37.25 |
| 7. | 6.0 | 32 | 70 | 6 | 8.12 | 37.23 | 12.60 | 7.22 | 25.34 |
| 8. | 6.0 | 75 | 30 | 12 | 7.16 | 41.44 | 11.51 | 8.22 | 27.41 |
| 9. | 6.0 | 180 | 50 | 0 | 9.84 | 52.44 | 13.20 | 7.94 | 29.31 |



Slika 5-1. Debljine defektnog sloja materijala obratka pri PMEDM TiAl₆V₄

5.2 (AE+PM)EDM CIRKONIJUM OKSIDA

Eksperimentalna istraživanja (AE+PM)EDM cirkonijum oksida su planirana i realizovana korišćenjem Box-Behnken i Tagučići planova. Eksperimenti su sprovedeni pri uslovima koji su opisani u prethodnom poglavlju (4.4).

5.2.1 Box-Behnken plan – izlazne performanse

Plan eksperimenta i rezultati merenja prema Box-Behnken planu su prikazani u tabeli 5-3.

Tabela 5-3. Plan eksperimenta i rezultati merenja prema BBD pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| Redni broj | Kod faktora | | | | Faktor | | | Performanse | | |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|---------------------|----------|---------------------|----------------------------|---------|
| | x ₀ | x ₁ | x ₂ | x ₃ | I _e (A) | t _i (μs) | GR (g/l) | R _a (μm) | MRR (mm ³ /min) | TWR (%) |
| 1. | 1 | -1 | -1 | 0 | 1 | 42 | 4 | 5.89 | 0.98 | 81.25 |
| 2. | 1 | 1 | -1 | 0 | 2 | 42 | 4 | 8.99 | 2.02 | 53.21 |
| 3. | 1 | -1 | 1 | 0 | 1 | 100 | 4 | 7.83 | 1.12 | 96.78 |
| 4. | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 100 | 4 | 12.74 | 2.61 | 58.65 |
| 5. | 1 | -1 | 0 | -1 | 1 | 75 | 0 | 7.75 | 0.95 | 90.05 |
| 6. | 1 | 1 | 0 | -1 | 2 | 75 | 0 | 14.96 | 2.23 | 59.22 |
| 7. | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 75 | 8 | 7.75 | 1.01 | 79.56 |
| 8. | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 75 | 8 | 12.85 | 2.59 | 58.44 |
| 9. | 1 | 0 | -1 | -1 | 1.5 | 42 | 0 | 9.04 | 1.12 | 66.25 |
| 10. | 1 | 0 | 1 | -1 | 1.5 | 100 | 0 | 12.89 | 1.25 | 77.58 |
| 11. | 1 | 0 | -1 | 1 | 1.5 | 42 | 8 | 9.21 | 1.36 | 62.25 |
| 12. | 1 | 0 | 1 | 1 | 1.5 | 100 | 8 | 10.55 | 1.42 | 72.65 |
| 13. | 1 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 75 | 4 | 8.21 | 1.38 | 64.74 |
| 14. | 1 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 75 | 4 | 8.61 | 1.39 | 62.44 |
| 15. | 1 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 75 | 4 | 9.02 | 1.42 | 63.11 |
| 16. | 1 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 75 | 4 | 8.88 | 1.31 | 62.99 |
| 17. | 1 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 75 | 4 | 8.62 | 1.38 | 61.51 |

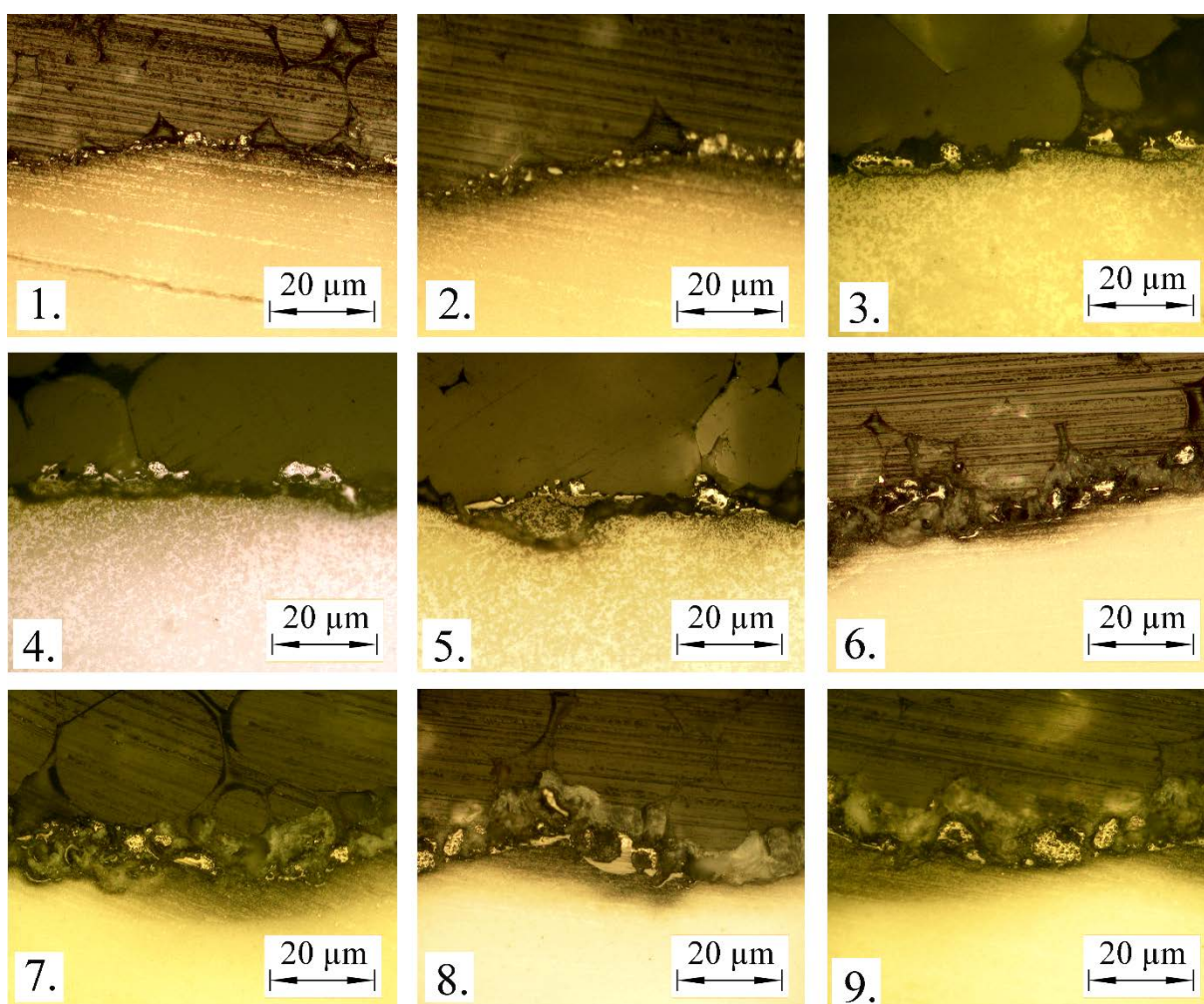
5.2.2 Tagučići plan – izlazne performanse

U tabeli 5-4. data je matrica plana eksperimenta sa rezultatima merenja za srednju aritmetičku hrapavost i maksimalnu visinu neravnina obrađene površine, debljinu defektnog sloja materijala obratka, proizvodnosti obrade i relativnog trošenja alata pri (AE+PM)EDM ZrO₂.

Rezultati merenja debljine defektnog sloja materijala obratka na osnovu Tagučići plana eksperimenta L₉(3⁴) pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida prikazani su na slici 5-2.

Tabela 5-4. Rezultati merenja za Taguči ortogonalni niz $L_9(3^4)$ L9 pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| Redni broj | Faktor | | | | Merene veličine | | | | |
|------------|-----------|------------------|----------|-----|------------------|----------------------|----------------|----------------------------------|---------|
| | I_e (A) | t_i (μ s) | GR (g/l) | D | R_a (μ m) | R_{max} (μ m) | DDS (μ m) | MRR (mm^3/min) | TWR (%) |
| 1. | 1.0 | 42 | 0 | 0 | 5.44 | 29.33 | 10.11 | 1.03 | 83.85 |
| 2. | 1.0 | 75 | 4 | 0 | 7.81 | 44.88 | 11.80 | 0.98 | 91.23 |
| 3. | 1.0 | 100 | 8 | 0 | 7.55 | 39.99 | 11.92 | 1.11 | 96.78 |
| 4. | 1.5 | 42 | 4 | 0 | 8.11 | 51.19 | 12.33 | 1.33 | 65.33 |
| 5. | 1.5 | 75 | 8 | 0 | 8.25 | 41.86 | 15.13 | 1.39 | 70.45 |
| 6. | 1.5 | 100 | 0 | 0 | 12.37 | 63.44 | 16.72 | 1.40 | 77.01 |
| 7. | 2.0 | 42 | 8 | 0 | 12.55 | 63.74 | 17.93 | 2.51 | 52.35 |
| 8. | 2.0 | 75 | 0 | 0 | 14.47 | 75.47 | 18.51 | 1.99 | 56.11 |
| 9. | 2.0 | 100 | 4 | 0 | 11.98 | 58.54 | 19.73 | 2.68 | 62.77 |

Slika 5-2. Debljine defektnog sloja materijala obratka pri (AE+PM)EDM ZrO₂

6. MODELOVANJE PROCESA ELEKTROEROZIVNE OBRADNE

Na osnovu izmerenih i proračunatih vrednosti izlaznih performansi pristupilo se modelovanju inovativnih procesa EDM. U cilju dobijanja klasičnih adekvatnih matematičkih modela korišćen je softver *Design Expert 7*. Na osnovu ovog programskog paketa, rezultati merenja su statistički obrađeni i izrađeni su matematički modeli za opisivanje uticaja ulaznih faktora na merene veličine. S druge strane, primenom metoda veštačke inteligencije, odnosno adaptivnog fazi neuro sistema i fazi logike, kreirani su inteligentni modeli za predviđanje izlaznih performansi inovativnih EDM. U svrhu kreiranja inteligentnih modela korišćen je softver *MatLab 16*.

Na osnovu proračuna greške i najmanjeg odstupanja od eksperimentalnih rezultata, izvršeno je poređenje kreiranih modela. Verifikacija dobijenih modela je izvršena na osnovu rezultata dodatnih eksperimentalnih ispitivanja.

6.1 METODOLOGIJA ODZIVNE POVRŠINE

Metodologija odzivne površine (*eng. Response Surface Methodology - RSM*) predstavlja skup matematičkih i statističkih metoda koje se primenjuju za generisanje empirijskih modela i analizu uticaja više ulaznih faktora (nezavisne promenljive) na posmatrani odziv. Odziv ili zavisno promenljiva predstavlja merljivu veličinu kvaliteta posmatranog procesa. Uspostavljanjem zakonitosti preko matematičkog oblika između nezavisno promenljivih, odnosno odzivne funkcije, može se doneti konkretan zaključak o prirodi posmatrane pojave. Matematički oblik odziva može poslužiti kao podloga za optimizaciju nezavisno promenljivih veličina.

Osnovna ideja RSM metode je uspostavljanje odnosa između nezavisno i zavisno promenljivih veličina kroz odzivnu funkciju. Takođe je moguće razložiti efekte pojedinih članova modela, kao glavne efekte ili interakcije. Glavni uslov za upotrebu RSM metode je postojanje minimalno dve nezavisno promenljive veličine (x_1 i x_2) i jedne zavisno promenljive (y). Prilikom primene metode odzivne površine koriste se kodirane vrednosti ulaznih veličina koje su bezdimenzione, a funkcija ima oblik:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (6.1)$$

Ako se polazi od činjenice da je funkcija odziva nepoznata, onda se ona aproksimira višestrukim linearnim modelom (*eng. Linear*). U procesu modelovanja izlaznih performansi nekog sistema ova funkcija uzima u obzir samo linearne uticaje pojedinačnih faktora. Analitički oblik linearnog regresionog modela (za ukupan broj parametara k) ima oblik:

$$\hat{y} = b_0 x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \varepsilon \quad (6.2)$$

gde su: \hat{y} – odziv sistema,
 b_0 – odsečak ili parametar slobodnog člana modela,
 b_i – koeficijent ispitivanih faktora,
 ε – ostatak.

Kod višestrukog lineranog modela pojavljuju se samo članovi nultog i prvog reda. U slučaju da višestruki linearni model nije adekvatan, prelazi se na model sa međusobnim uticajima, odnosno model sa interakcijama između dva ispitivana faktora (*eng. 2-Factor Interactions – 2FI*). Analiza modela *2FI* sprovodi se u sledećem obliku:

$$\hat{y} = b_0x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (6.3)$$

gde je $b_{ii} x_i y_j$ – član sa interakcijama dva faktora.

Kao odgovarajući oblik odzivne funkcije pokazao se polinom, zbog činjenice da se kvalitet modela može poboljšati povećanjem stepena polinoma. Uglavnom je u primeni polinom kvadratnog oblika (*eng. Quadratic*) koji je posebno pogodan za rešavanje optimizacionih problema jer opisuje interakcije velikog broja faktora. Kubni model (*eng. Cubic*) zbog svoje kompleksnosti je retko u upotrebi.

Prelazak na funkciju odziva u obliku polinoma kvadratnog oblika realizuje se u slučaju da model sa međusobnim uticajima nije adekvatan:

$$\hat{y} = b_0x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j>i}^k b_{ij} x_i x_j \pm \varepsilon \quad (6.4)$$

gde je: $b_{ii} x_i^2$ – kvadratni član.

U matematičkom modelu ostatak ε se sastoji iz dva dela. Prvi deo predstavlja grešku modela, dok se drugi deo odnosi na eksperimentalnu grešku. Vrednost ostatka se izračunava na osnovu eksperimentalnih tački koje se ponavljaju.

Ako je krajnji cilj modeliranja optimizacija, onda je neophodno koristiti funkcije većeg stepena za opisivanje izlaznih performansi. U tom slučaju svaki od posmatranih faktora mora da ima tri ili pet nivoa u zavisnosti od primenjenog plana eksperimenta. Najčešće korišćeni planovi eksperimenta su: centralni kompozicioni plan, Box-Behnken, potpuni eksperimentalni plan i dr.

Analiza disperzije predloženih modela primenom softvera *Design Expert 7* vrši se pomoću analize varijanse (*eng. ANalysis Of VAriances - ANOVA*). ANOVA je analitički model koji ukupnu disperziju deli na više segmenata, pri čemu se svaki od njih tretira posebnim sistemom variranja tako da je moguće identifikovati izvor variranja i doprinos svakog segmenta u ukupnoj disperziji. Ova metoda uzima u obzir sve varijabilitete i njihov međusobni uticaj, što je teško proceniti na drugi način.

6.1.1 Matematički modeli za PMEDM legure titanijuma

Ključni korak u primeni metode odzivne površine je izbor odgovarajućeg eksperimentalnog plana. Za potrebe istraživanja pri obradi legure titanijuma usvojen je potpuni eksperimentalni plan CCD (centralni kompozicioni plan) sa četiri faktora na pet nivoa, definisan u poglavlju 4.5.1. Ovde su nezavisno promenljive veličine bile: struja pražnjenja, dužina impulsa, koeficijent delovanja impulsa i koncentracija grafitnog praha. Zavisno promenljive veličine, odnosno odzivi sistema su bili srednja aritmetička hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade i relativno trošenje alata.

6.1.1.1 Model za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine

Analizom varijanse (ANOVA) određena je signifikantnost modela i njegovih članova. U tabeli 6-1. su prikazani podaci sa sugestijom za izbor odgovarajućeg modela za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine.

Tabela 6-1. Izbor modela za R_a na osnovu ANOVA analize pri PMEDM $TiAl_6V_4$

| <i>Response 1 Hrapavost površine obrađene površine Transform: None</i> | | | | | | |
|--|-----------------------|------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|
| <i>Sequential Model Sum of Squares [Type I]</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Sum of Squares</i> | <i>df</i> | <i>Mean Square</i> | <i>F Value</i> | <i>p-value Prob > F</i> | |
| <i>Mean vs Total</i> | 1377.03 | 1 | 1377.03 | | | |
| <i>Linear vs Mean</i> | 190.69 | 4 | 47.67 | 64.45 | < 0.0001 | <i>Suggested</i> |
| <i>2FI vs Linear</i> | 11.25 | 6 | 1.87 | 4.92 | 0.0034 | |
| <i>Quadratic vs 2FI</i> | 2.01 | 4 | 0.50 | 1.44 | 0.2692 | |
| <i>Cubic vs Quadratic</i> | 3.91 | 9 | 0.43 | 1.97 | 0.2104 | <i>Aliased</i> |
| <i>Residual</i> | 1.32 | 6 | 0.22 | | | |
| <i>Total</i> | 1586.21 | 30 | 52.87 | | | |
| <i>Lack of Fit Tests</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Sum of Squares</i> | <i>df</i> | <i>Mean Square</i> | <i>F Value</i> | <i>p-value Prob > F</i> | |
| <i>Linear</i> | 17.73 | 20 | 0.89 | 5.83 | 0.0299 | <i>Suggested</i> |
| <i>2FI</i> | 6.48 | 14 | 0.46 | 3.04 | 0.1126 | |
| <i>Quadratic</i> | 4.47 | 10 | 0.45 | 2.94 | 0.1227 | |
| <i>Cubic</i> | 0.56 | 1 | 0.56 | 3.69 | 0.1129 | <i>Aliased</i> |
| <i>Pure Error</i> | 0.76 | 5 | 0.15 | | | |
| <i>Model Summary Statistics</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Std.Dev.</i> | <i>R-Squared</i> | <i>Adjusted R-Squared</i> | <i>Predicted R-Squared</i> | <i>PRESS</i> | |
| <i>Linear</i> | 0.86 | 0.9059 | 0.8975 | 0.8642 | 28.40 | <i>Suggested</i> |
| <i>2FI</i> | 0.62 | 0.9596 | 0.9471 | 0.8854 | 23.98 | |
| <i>Quadratic</i> | 0.59 | 0.9700 | 0.9516 | 0.8715 | 26.89 | |
| <i>Cubic</i> | 0.47 | 0.9892 | 0.9695 | | | <i>Aliased</i> |

Ukupna suma kvadrata (eng. *Sum of Squares*), predstavlja sumu kvadrata odstupanja vrednosti posmatrane promenljive od srednje vrednosti. To je zbir sume kvadrata odstupanja regresivnih vrednosti od srednje vrednosti i rezidualne sume kvadrata.

Ako se sume kvadrata podele sa odgovarajućim stepenima slobode dobija se sredina kvadrata (eng. *Mean Square*), koje predstavljaju nezavisne procene segmenata disperzije.

Predlog odgovarajućeg modela se sprovodi na osnovu sugestije koja je bazirana na statističkoj oceni adekvatnosti datog modela pomoću F – testa i signifikantnosti odstupanja od modela (eng. *Lack of Fit Tests*). Polazeći od elemenata tabele ANOVA: sume kvadrata, stepeni slobode (eng. *degrees of freedom - df*), sredine kvadrata, moguće je sprovesti F-test u cilju određivanja značajnosti posmatranih modela. Postupak F – testa se sprovodi preko kritične

oblasti gde je prema Fišerovoj raspodeli zadat nivo značajnosti. Ukoliko dobijena F – vrednost (eng. **F Value**) pripada kritičnoj oblasti, model se odbacuje.

Takođe, značajnost modela se može ustanoviti i na osnovu p – vrednosti (eng. **p - value**), koja predstavlja verovatnoću da je model značajan (statistička značajnost). U statistici postoje dva standarda za testiranje statističke značajnosti: 0.01 i 0.05, odnosno 1% i 5%. Npr. sa stanovišta standarda 5%, kada je vrednost testa statističke značajnosti iznad 0.05 posmatrani model nema tendenciju da bude značajan.

S druge strane, na izbor modela utiče i vrednost koeficijenata determinacije R – kvadrata (eng. **R-Squared**) koji uzima vrednost iz intervala [0,1]. Međim, zbog pristrasnosti R – kvadrata uvodi se korigovani koeficijent R - kvadrata (eng. **Adjusted R-Squared**) čija vrednost je uvek manja od pravog koeficijenta determinacije. Dok koeficijent predikcije (eng. **Predicted R-Squared**) predstavlja meru odstupanja podataka dobijenih pomoću modela. Posmatrani model je bolji ako su koeficijenti determinacije bliži jedinici.

Za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine predložen je linearni model *2FI* sa međusobnim uticajima. Kod predloženog linearnog modela pojavljuju se članovi nultog i prvog reda, kao i njihove interakcije, tabela 6-2.

Interakcije između članova mogu imati zanemarljiv uticaj na odziv zbog čega se pristupa redukciji modela primenom metode unazad (*backward*). Kada je vrednost **Prob>F** za određene članove odzivne funkcije manja od 0.05 onda su ti članovi značajni. Drugim rečima, da je verovatnoća dobijanja velike vrednosti **F-value** usled šuma manja od 5%. Svi članovi čija je p – vrednost manja od 0.05 imaju uticaj na odziv i sačinjavaju model. U ovom slučaju članovi A, B, D i AB su uticajni.

Tabela 6-2. ANOVA predloženog *2FI* linearnog modela za R_a pri PMEDM TiAl₆V₄

| ANOVA for Response Surface 2FI Model | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------|--------------------|----------------|----------------------------|------------------------|
| <i>Response 1 Hrapavost površine obrađene površine</i> | | | | | | |
| <i>Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]</i> | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| <i>Model</i> | 201.93 | 10 | 20.19 | 52.95 | < 0.0001 | <i>significant</i> |
| <i>A-Ie</i> | 174.39 | 1 | 174.39 | 457.31 | < 0.0001 | |
| <i>B-ti</i> | 10.36 | 1 | 10.36 | 27.18 | < 0.0001 | |
| <i>C-t</i> | 0.031 | 1 | 0.031 | 0.082 | 0.7774 | |
| <i>D-GR</i> | 2.95 | 1 | 2.95 | 7.75 | 0.0118 | |
| <i>AB</i> | 7.44 | 1 | 7.44 | 19.51 | 0.0003 | |
| <i>AC</i> | 0.60 | 1 | 0.60 | 1.58 | 0.2246 | |
| <i>AD</i> | 1.28 | 1 | 1.28 | 3.36 | 0.0825 | |
| <i>BC</i> | 0.63 | 1 | 0.63 | 1.66 | 0.2132 | |
| <i>BD</i> | 0.58 | 1 | 0.58 | 1.52 | 0.2329 | |
| <i>CD</i> | 0.72 | 1 | 0.72 | 1.88 | 0.1864 | |
| <i>Residual</i> | 7.25 | 19 | 0.38 | | | <i>not significant</i> |
| <i>Lack of Fit</i> | 6.48 | 14 | 0.46 | 3.04 | 0.1126 | |
| <i>Pure Error</i> | 0.76 | 5 | 0.15 | | | |
| <i>Cor Total</i> | 209.18 | 29 | | | | |

U tabeli 6-3. je prikazana ANOVA analiza za redukovani model sa međusobnim uticajima drugog reda za značajne članove A, B, D i AB. Može se uočiti da nisu svi članovi redukovanog modela uticajni. Sa stanovišta odstupanja tačnosti rezultata merenja članovi čije su p – vrednosti kreću u granicama 0.05 – 0.1 ne treba uvek odbaciti (u ovom slučaju član AD ostaje član odzivne funkcije).

Tabela 6-3. ANOVA redukovanog modela za R_a pri PMEDM TiAl₆V₄

| <i>ANOVA for Response Surface Reduced 2FI Model</i> | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------|--------------------|----------------|----------------------------|------------------------|
| <i>Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Sum of Squares</i> | <i>df</i> | <i>Mean Square</i> | <i>F Value</i> | <i>p-value Prob > F</i> | |
| <i>Model</i> | 199.35 | 5 | 39.87 | 97.34 | < 0.0001 | <i>significant</i> |
| <i>A-Ie</i> | 174.39 | 1 | 174.39 | 425.77 | < 0.0001 | |
| <i>B-ti</i> | 10.36 | 1 | 10.36 | 25.30 | < 0.0001 | |
| <i>D-GR</i> | 3.01 | 1 | 3.01 | 7.34 | 0.0122 | |
| <i>AB</i> | 7.44 | 1 | 7.44 | 18.16 | 0.0003 | |
| <i>AD</i> | 1.28 | 1 | 1.28 | 3.12 | 0.0899 | |
| <i>Residual</i> | 9.83 | 24 | 0.41 | | | <i>not significant</i> |
| <i>Lack of Fit</i> | 9.07 | 19 | 0.48 | 3.14 | 0.1045 | |
| <i>Pure Error</i> | 0.76 | 5 | 0.15 | | | |
| <i>Cor Total</i> | 209.18 | 29 | | | | |

F – value - (F – vrednost) za redukovani model iznosi 97.34, što implicira da je model signifikantan. Postoje šanse od samo 0.01% (p -value < 0.0001) da je tako velika vrednost posledica šuma.

Lack of Fit - je veličina koja govori o varijaciji vrednosti merene veličine kod tačaka ponavljanja eksperimenta oko njihovih prosečnih vrednosti. Ako je ova vrednost značajna, onda je varijacija ponavljanja eksperimenta veća od varijacije vrednosti za pojedine tačke eksperimenta predviđene modelom. Nedostatak sposobnost prilagođavanja F - vrednosti (**Lack of Fit F-value**), iznosi 3.14, i u ovom slučaju nije signifikantan. To ukazuje da varijacija vrednosti merene veličine kod ponavljanja eksperimenta nije značajna.

U tabeli 6-4. prikazani su osnovni statistički podaci o dobijenom modelu koji opisuju kvalitet izrađenog modela.

Tabela 6-4. Osnovni statistički podaci usvojenog modela za R_a pri PMEDM TiAl₆V₄

| | | | |
|------------------|-------|-----------------------|--------|
| <i>Std. Dev.</i> | 0.64 | <i>R-Squared</i> | 0.9530 |
| <i>Mean</i> | 6.78 | <i>Adj R-Squared</i> | 0.9432 |
| <i>C.V. %</i> | 9.45 | <i>Pred R-Squared</i> | 0.9170 |
| <i>PRESS</i> | 17.35 | <i>Adeq Precision</i> | 39.869 |

Koeficijent determinacije **R – squared** za izabrani model iznosi 0.9530, odnosno upada u granice prema lestvici Čedoka (Chaddock) $0.64 \div 1$. To znači da između modelskih i eksperimentalnih podataka postoji čvrsta veza.

Za vrednosti **R – kvadrata** prilagođen broju članova veće od 75% model se može smatrati značajnim. Vrednosti **Adjusted R-Squared** i **Predicted R-Squared** iznose 0.9432 i 0.9170, respektivno 94.32% i 91.70%, što zadovoljava uslov i čine model značajnim.

Adeq Precision - Adekvatna preciznost predstavlja odnos signal – šum, odnosno vrednost raspona predviđanog odziva u odnosu na njegovu grešku. Poželjno je da vrednost adekvatne preciznosti bude veća od 4. Adekvatna preciznost za dobijeni model iznosi 39.869, čime zadovoljava pomenutu preporuku.

C.V. % - Koeficijent varijacije izražen u procentima koji predstavlja relativnu meru rasipanja oko aritmetičke sredine. Veći koeficijent varijacije pokazuje manju reprezentativnost aritmetičke sredine, odnosno veću raspršenost rezultata. Vrednost od 9.45 u potpunosti zadovoljava i čini model preporučljivim.

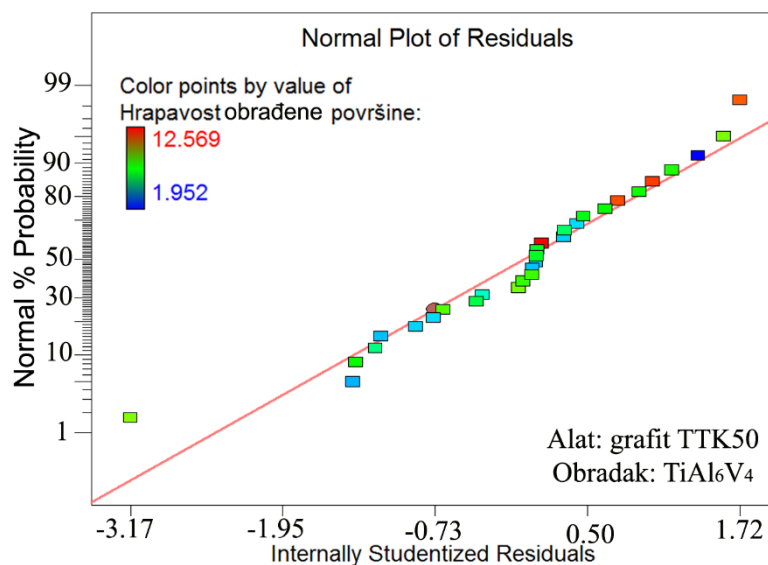
PRESS - Suma kvadrata predviđene greške ostataka je u tabeli označena sa **PRESS**.

Rezultati ANOVA testa posmatranog odziva pokazuju da na vrednost hrapavosti obrađene površine statistički značajno utiču tri parametra: struja pražnjenja, dužina impulsa i koncentracija grafitnog praha. Koeficijent delovanja impulsa nema značajan uticaj na prikazani model. Nakon sprovedene analize model za hrapavost obrađene površine R_a u obliku polinoma sa međusobnim uticajima u kodiranom obliku dat je u jednačini 6.5. U jednačini 6.6. prikazan je model u dekodiranom obliku.

$$R_a = +6.66 + 2.82 \cdot A + 0.65 \cdot B - 0.35 \cdot D + 0.73 \cdot A \cdot B - 0.30 \cdot A \cdot D \quad (6.5)$$

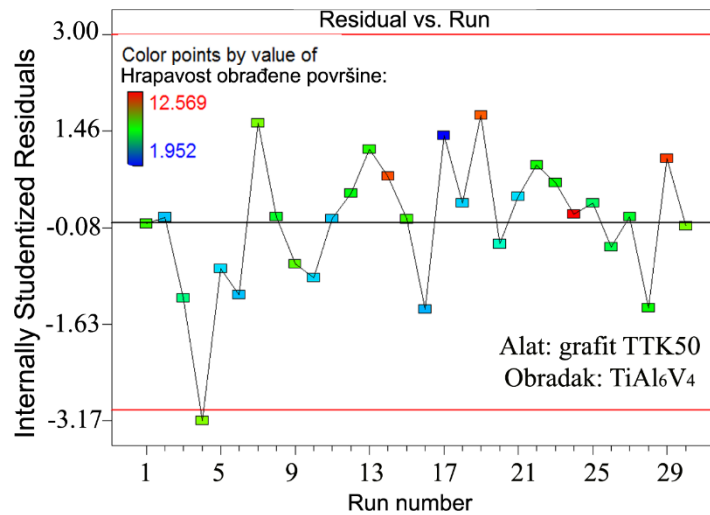
$$R_a = +0.83088 + 1.10097 \cdot I_e - 0.029281 \cdot t_i + 0.18453 \cdot GR + +0.00927 \cdot I_e \cdot t_i - 0.067269 \cdot I_e \cdot GR \quad (6.6)$$

Na slici 6-1. je prikazan normalizovani dijagram vrednosti ostatka u odnosu na vrednost predviđenog odziva. Na dijagramu su prikazane sve tačke eksperimenta pojedinačno. Ukoliko postoji preveliko odstupanje odziva modela od eksperimentalne tačke ovaj dijagram će to pokazati. Model je dobar ako sve tačke prate liniju normalne raspodele.



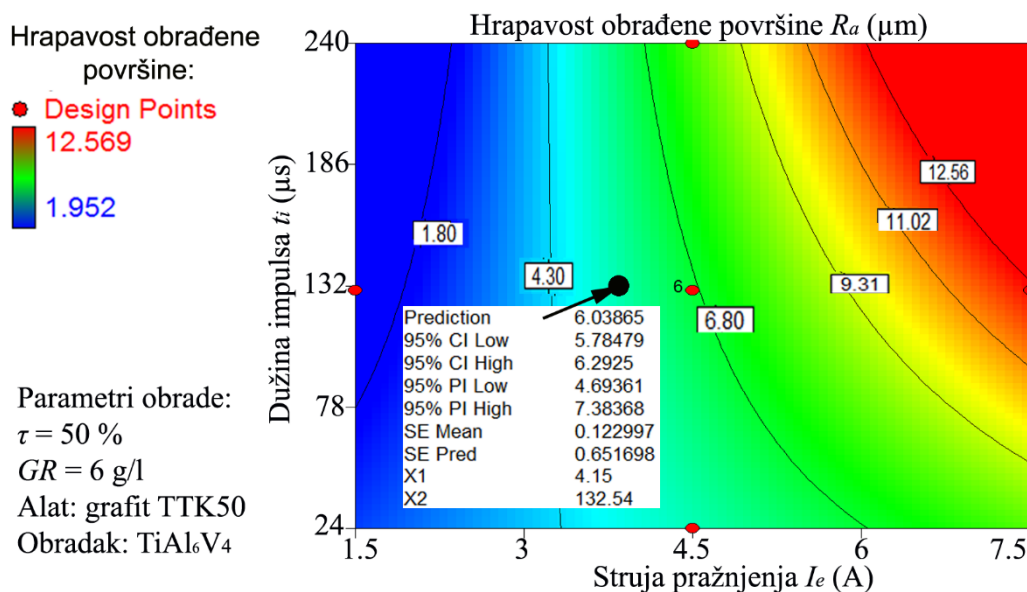
Slika 6-1. Normalizovani dijagram vrednosti ostatka modela za R_a pri PMEDM TiAl₆V₄

Na slici 6-2. je prikazan dijagram ostatka u odnosu na redosled izvođenja plana eksperimenta. Prikazani dijagram služi za proveru systemske greške koja može uticati na odziv tokom izvođenja eksperimenta, odnosno pokazuje slučajno rasipanje ostatka u odnosu na redosled izvođenja plana eksperimenta. Sa dijagrama se vidi da ne postoji systemska greška u pogledu na redosled izvođenja eksperimenta.

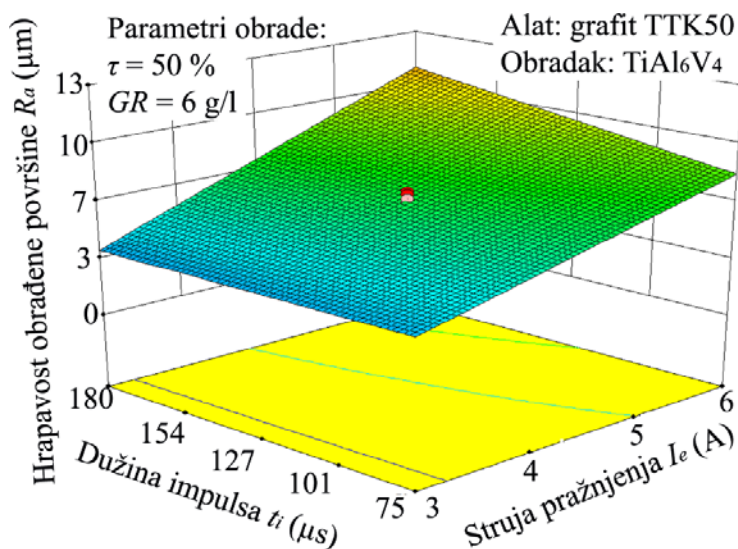


Slika 6-2. Dijagram ostatka u odnosu na redosled izvođenja tačaka eksperimenta modela za R_a pri PMEDM TiAl₆V₄

Predstavljanje modela preko konturnog 2D dijagrama prikazano je na slici 6-3. Pokazana je zavisnost hrapavosti obrađene površine od parametara obrade. Na dijagramu je otkrivena jedna tačka sa određenim ulaznim faktorima kako bi se pokazalo da model ima sposobnost predviđanja uz određeni interval poverenja. Za struju pražnjenja od 4.15 A, dužinu impulsa 132 μ s, koeficijent delovanja impulsa 50% i pri koncentraciji praha 6 g/l model predviđa srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine od 6.03 μ m sa verovatnoćom od 95%. Dobijeni model se takođe može predstaviti preko 3D dijagrama, slika 6-4.



Slika 6-3. Konturni dijagram modela za R_a pri PMEDM TiAl₆V₄


 Slika 6-4. Prostorni dijagram modela za R_a pri PMEDM TiAl₆V₄

6.1.1.2 Model za proizvodnost obrade

Ista metodologija analize varijanse sprovedena je u postupku razvoja modela za proizvodnost obrade. U tabeli 6-5. je prikazana ANOVA analiza za izbor modela.

 Tabela 6-5. Izbor modela za MRR na osnovu ANOVA analize pri PMEDM TiAl₆V₄

| Response 2 Proizvodnost obrade Transform: None | | | | | | |
|---|----------------|-----------|--------------------|---------------------|------------------|------------------|
| Sequential Model Sum of Squares [Type I] | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| Mean vs Total | 656.51 | 1 | 656.51 | | | |
| Linear vs Mean | 168.53 | 4 | 42.13 | 30.38 | < 0.0001 | |
| 2FI vs Linear | 26.10 | 6 | 4.35 | 9.63 | < 0.0001 | |
| Quadratic vs 2FI | 6.26 | 4 | 1.57 | 10.12 | 0.0004 | <i>Suggested</i> |
| Cubic vs Quadratic | 1.58 | 9 | 0.18 | 1.43 | 0.3432 | <i>Aliased</i> |
| Residual | 0.74 | 6 | 0.12 | | | |
| Total | 859.72 | 30 | 28.66 | | | |
| Lack of Fit Tests | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| Linear | 34.43 | 20 | 1.72 | 35.48 | 0.0004 | |
| 2FI | 8.34 | 14 | 0.60 | 12.27 | 0.0059 | |
| Quadratic | 2.08 | 10 | 0.21 | 4.28 | 0.0610 | <i>Suggested</i> |
| Cubic | 0.50 | 1 | 0.50 | 10.23 | 0.0240 | <i>Aliased</i> |
| Pure Error | 0.24 | 5 | 0.049 | | | |
| Model Summary Statistics | | | | | | |
| Source | Std.Dev. | R-Squared | Adjusted R-Squared | Predicted R-Squared | PRESS | |
| Linear | 1.18 | 0.8294 | 0.8021 | 0.7343 | 53.99 | |
| 2FI | 0.67 | 0.9578 | 0.9356 | 0.9121 | 17.87 | |
| Quadratic | 0.39 | 0.9886 | 0.9779 | 0.9399 | 12.22 | <i>Suggested</i> |
| Cubic | 0.35 | 0.9964 | 0.9824 | | + | <i>Aliased</i> |

Na osnovu analize koja je bazirana na statističkoj oceni adekvatnosti datog modela i signifikantnosti odstupanja od modela, iz tabele 6-5., za proizvodnost obrade je preporučen kvadratni model koji je i izabran za dalju analizu. U tabeli 6-6. data je analiza uticajnosti članova kvadratnog modela.

Statistički gledano, prema p – vrednosti koja označava verovatnoću, odnosno da apsolutna vrednost testirane veličine bude približno jednaka vrednosti testirane veličine dobijene na osnovu eksperimentalnih vrednosti, prema tabeli 6-6., može se uočiti da su signifikantni članovi A, B, C, D, AB, AC, BD, A², B².

Tabela 6-6. ANOVA predloženog kvadratnog modela za *MRR* pri PMEDM TiAl₆V₄

| <i>ANOVA for Response Surface Quadratic Model</i> | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------|--------------------|----------------|----------------------------|------------------------|
| <i>Response 1 Proizvodnost obrade</i> | | | | | | |
| <i>ANOVA for Response Surface Quadratic Model</i> | | | | | | |
| <i>Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Sum of Squares</i> | <i>df</i> | <i>Mean Square</i> | <i>F Value</i> | <i>p-value Prob > F</i> | |
| <i>Model</i> | 200.89 | 14 | 14.35 | 92.78 | < 0.0001 | <i>significant</i> |
| <i>A-Ie</i> | 158.63 | 1 | 158.63 | 1025.65 | < 0.0001 | |
| <i>B-ti</i> | 4.32 | 1 | 4.32 | 27.95 | < 0.0001 | |
| <i>C-t</i> | 0.92 | 1 | 0.92 | 5.93 | 0.0278 | |
| <i>D-GR</i> | 1.09 | 1 | 1.09 | 7.04 | 0.0180 | |
| <i>AB</i> | 23.67 | 1 | 23.67 | 153.04 | < 0.0001 | |
| <i>AC</i> | 1.32 | 1 | 1.32 | 8.53 | 0.0105 | |
| <i>AD</i> | 0.10 | 1 | 0.10 | 0.67 | 0.4251 | |
| <i>BC</i> | 0.32 | 1 | 0.32 | 2.09 | 0.1685 | |
| <i>BD</i> | 0.58 | 1 | 0.58 | 3.77 | 0.0713 | |
| <i>CD</i> | 0.13 | 1 | 0.13 | 0.82 | 0.3803 | |
| <i>A²</i> | 2.46 | 1 | 2.46 | 15.92 | 0.0012 | |
| <i>B²</i> | 2.69 | 1 | 2.69 | 17.38 | 0.0008 | |
| <i>C²</i> | 5.431E-004 | 1 | 5.431E-004 | 3.511E-003 | 0.9535 | |
| <i>D²</i> | 0.041 | 1 | 0.041 | 0.27 | 0.6136 | |
| <i>Residual</i> | 2.32 | 15 | 0.15 | | | <i>not significant</i> |
| <i>Lack of Fit</i> | 2.08 | 10 | 0.21 | 4.28 | 0.0610 | |
| <i>Pure Error</i> | 0.24 | 5 | 0.049 | | | |
| <i>Cor Total</i> | 203.21 | 29 | | | | |

Nakon primene metode unazad dobija se redukovani kvadratni model za proizvodnost obrade, prikazan u tabeli 6-7. Može se uočiti da su svi članovi redukovanog modela uticajni. Ovde je primetno da mera odstupanja od modela (*Lack of Fit*) nije signifikantna, što ovaj model čini prihvatljivim za dalju analizu.

Osnovni statistički podaci redukovanog kvadratnog modela za proizvodnost obrade prikazani su u tabeli 6-8. Koeficijent determinacije *R – squared* iznosi 0.9856, što znači da postoji čvrsta veza između modelskih i eksperimentalnih podataka. Obe vrednosti *R – kvadrata* (*Adj R-Squared* i *Pred R-Squared*) su blizu jedinice čime se potvrđuje značajnost modela. Značajnost modela potvrđuje i adekvatna preciznost (*Adeq Precision*) koja iznosi 47.802. Poželjno je da vrednost adekvatne preciznosti bude veća od 4. Vrednosti koeficijenta varijacije *C.V.%* i greške ponavljanja pojedinih tačaka eksperimenta *PRESS* takođe potvrđuju značajnost modela.

Nakon sprovedene analize varijanse dobija se model kvadratnog oblika u kodiranom i dekodiranom obliku, jednačine 6.7. i 6.8.

Tabela 6-7. ANOVA redukovanog modela za MRR pri PMEDM $TiAl_6V_4$

| ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model | | | | | | | |
|--|----------------|----|-------------|---------|------------------|-------------|-----------------|
| Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III] | | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | | |
| Model | 200.29 | 9 | 22.25 | 152.52 | < 0.0001 | significant | |
| A-Ie | 158.71 | 1 | 158.71 | 1087.72 | < 0.0001 | | |
| B-ti | 4.32 | 1 | 4.32 | 29.62 | < 0.0001 | | |
| C-t | 0.90 | 1 | 0.90 | 6.14 | 0.0222 | | |
| D-GR | 1.05 | 1 | 1.05 | 7.23 | 0.0141 | | |
| AB | 23.67 | 1 | 23.67 | 162.22 | < 0.0001 | | |
| AC | 1.32 | 1 | 1.32 | 9.05 | 0.0069 | | |
| BD | 0.58 | 1 | 0.58 | 4.00 | 0.0593 | | |
| A ² | 2.67 | 1 | 2.67 | 18.31 | 0.0004 | | |
| B ² | 2.73 | 1 | 2.73 | 18.68 | 0.0003 | | |
| Residual | 2.92 | 20 | 0.15 | | | | not significant |
| Lack of Fit | 2.68 | 15 | 0.18 | 3.68 | 0.0786 | | |
| Pure Error | 0.24 | 5 | 0.049 | | | | |
| Cor Total | 203.21 | 29 | | | | | |

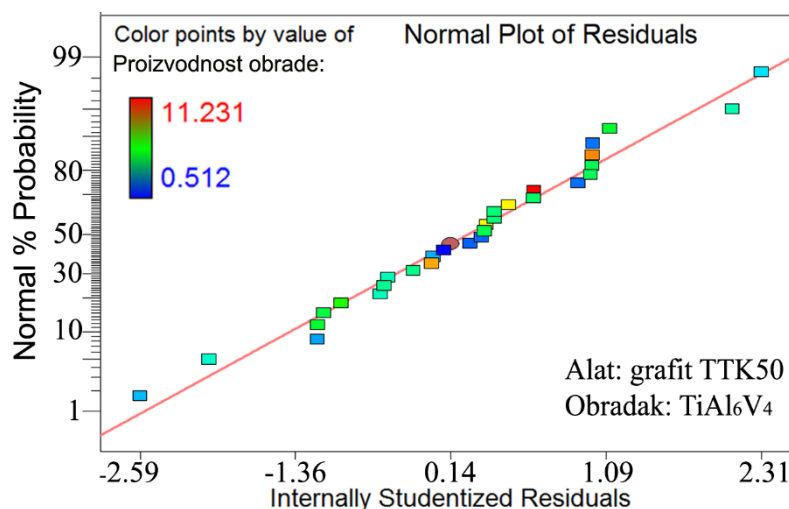
Tabela 6-8. Osnovni statistički podaci usvojenog modela za MRR pri PMEDM $TiAl_6V_4$

| | | | |
|-----------|------|----------------|--------|
| Std. Dev. | 0.38 | R-Squared | 0.9856 |
| Mean | 4.68 | Adj R-Squared | 0.9792 |
| C.V. % | 8.17 | Pred R-Squared | 0.9560 |
| PRESS | 8.94 | Adeq Precision | 47.802 |

$$MRR = +4.60 + 2.70 \cdot A - 0.42 \cdot B + 0.19 \cdot C + 0.21 \cdot D - 1.30 \cdot A \cdot B + 0.31 \cdot A \cdot C + 0.19 \cdot B \cdot D + 0.31 \cdot A^2 - 0.29 \cdot B^2 \quad (6.7)$$

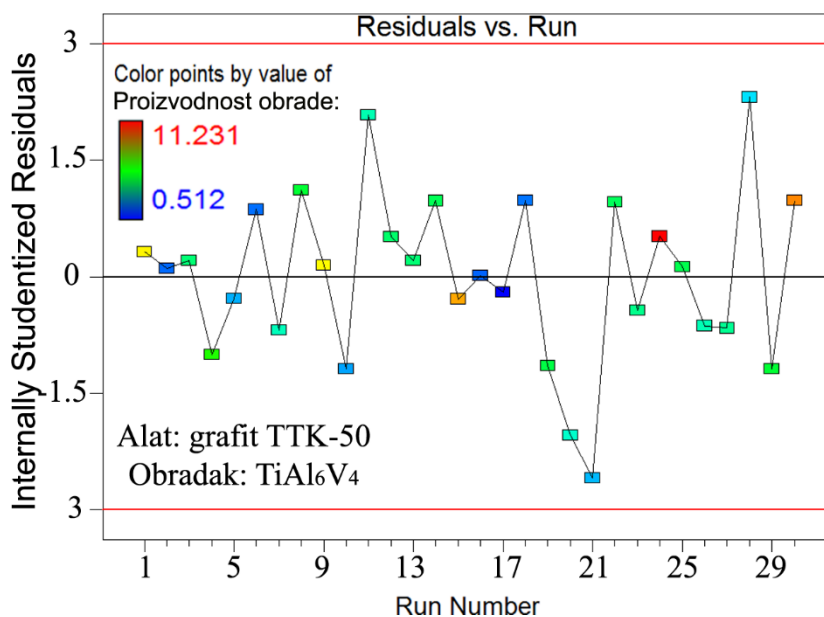
$$MRR = -6.74 + 1.636 \cdot I_e + 0.08631 \cdot t_i - 0.0727 \cdot \tau - 0.0836 \cdot GR - 0.01652 \cdot I_e \cdot t_i + 0.0204 \cdot I_e \cdot \tau + 0.001205 \cdot t_i \cdot GR + 0.1383 \cdot I_e^2 - 0.000107 \cdot t_i^2 \quad (6.8)$$

Normalizovani dijagram vrednosti ostatka u odnosu na vrednost predviđanog odziva za model proizvodnosti prikazan je na slici 6-5.



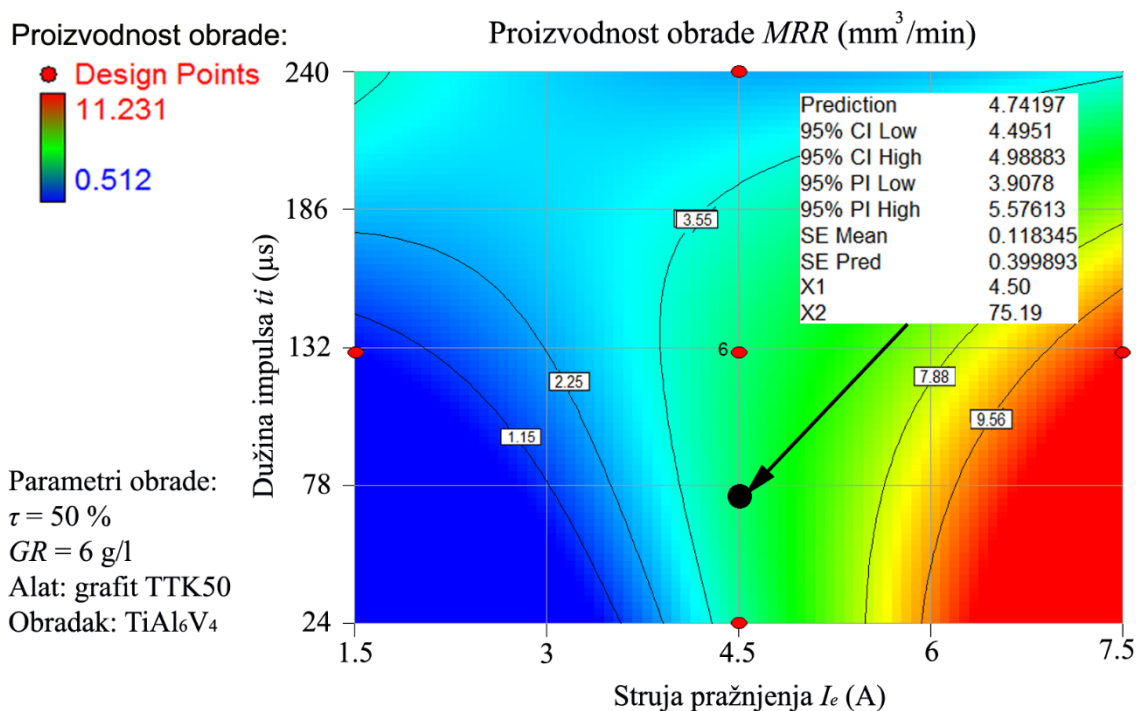
Slika 6-5. Normalizovani dijagram vrednosti ostatka modela za MRR pri PMEDM $TiAl_6V_4$

Dijagram ostatka u odnosu na redosled izvođenja eksperimentalnih tačaka prikazan je na slici 6-6.

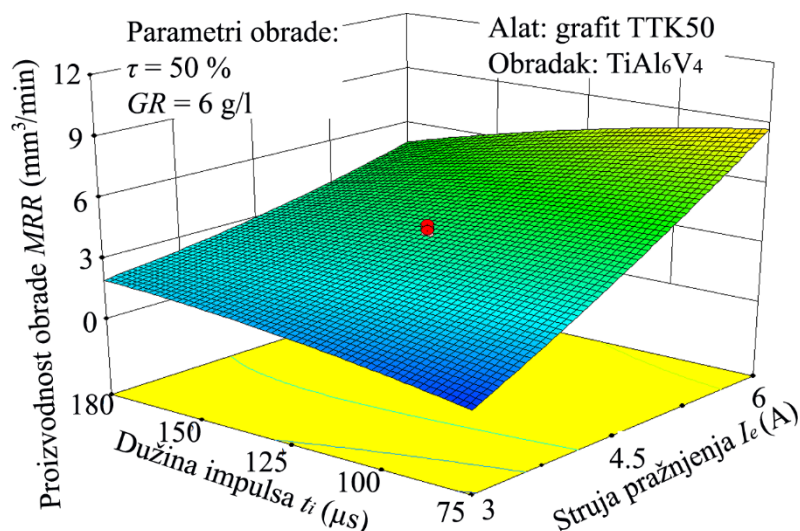


Slika 6-6. Dijagram ostatka u odnosu na redosled izvođenja eksperimenta modela za *MRR* pri PMEDM TiAl₆V₄

Model za proizvodnost obrade se takođe može prikazati preko konturnog dijagrama, slika 6-7. Odziv modela u 3D obliku preko prostornog dijagrama prikazan je na slici 6-8.



Slika 6-7. Konturni dijagram modela za *MRR* pri PMEDM TiAl₆V₄


 Slika 6-8. Prostorni dijagram modela za MRR pri EDM TiAl₆V₄

6.1.1.3 Model za relativno trošenje alata

U skladu sa prethodnim analizama varijansi i u slučaju modela za relativno trošenje alata primenjena je ista metodologija. U tabeli 6-9. je prikazana ANOVA analiza pri izboru modela za relativno trošenje alata.

 Tabela 6-9. Izbor modela za TWR na osnovu ANOVA analize pri PMEDM TiAl₆V₄

| Response 3 Relativno trošenje alata Transform: None | | | | | | |
|--|----------------|-----------|--------------------|---------------------|------------------|------------------|
| Sequential Model Sum of Squares [Type I] | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| Mean vs Total | 39510.01 | 1 | 39510.01 | | | |
| Linear vs Mean | 991.04 | 4 | 247.76 | 30.17 | < 0.0001 | |
| 2FI vs Linear | 22.55 | 6 | 3.76 | 0.39 | 0.8758 | |
| Quadratic vs 2FI | 129.59 | 4 | 32.40 | 9.15 | 0.0006 | <u>Suggested</u> |
| Cubic vs Quadratic | 35.42 | 9 | 3.94 | 1.33 | 0.3751 | <u>Aliased</u> |
| Residual | 17.71 | 6 | 2.95 | | | |
| Total | 40706.32 | 30 | 1356.88 | | | |
| Lack of Fit Tests | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| Linear | 191.11 | 20 | 9.56 | 3.37 | 0.0909 | |
| 2FI | 168.55 | 14 | 12.04 | 4.25 | 0.0596 | |
| Quadratic | 38.96 | 10 | 3.90 | 1.38 | 0.3813 | <u>Suggested</u> |
| Cubic | 3.54 | 1 | 3.54 | 1.25 | 0.3142 | <u>Aliased</u> |
| Pure Error | 14.17 | 5 | 2.83 | | | |
| Model Summary Statistics | | | | | | |
| Source | Std.Dev. | R-Squared | Adjusted R-Squared | Predicted R-Squared | PRESS | |
| Linear | 2.87 | 0.8284 | 0.8010 | 0.7546 | 293.60 | |
| 2FI | 3.10 | 0.8473 | 0.7669 | 0.6775 | 385.79 | |
| Quadratic | 1.88 | 0.9556 | 0.9141 | 0.7834 | 259.09 | <u>Suggested</u> |
| Cubic | 1.72 | 0.9852 | 0.9284 | | + | <u>Aliased</u> |

Na osnovu analize preporučen je kvadratni model koji je i izabran za dalju analizu. Analiza varijansi za preostale članove modela prikazana je u tabeli 6-10. Prema tabeli 6-10 uočljivo je da su signifikantni članovi A, B, C, D, BC, B², C² i D².

Redukovani kvadratni model za relativno trošenje alata prikazan je u tabeli 6-11. Može se uočiti da nisu svi članovi redukovanog modela uticajni. Stoga, članovi čije su p – vrednosti veće od 0.1 ukazuje na beznačajan uticaj na odziv i izdvajaju se iz dalje analize.

Tabela 6-10. ANOVA predloženog kvadratnog modela za TWR pri PMEDM TiAl₆V₄

| ANOVA for Response Surface Quadratic Model | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------|--------------------|----------------|----------------------------|------------------------|
| <i>Response 1 Relativno trošenje alata</i> | | | | | | |
| ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model | | | | | | |
| <i>Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]</i> | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| <i>Model</i> | 1143.19 | 14 | 81.66 | 23.06 | < 0.0001 | <i>significant</i> |
| <i>A-Ie</i> | 758.65 | 1 | 758.65 | 214.20 | < 0.0001 | |
| <i>B-ti</i> | 135.57 | 1 | 135.57 | 38.28 | < 0.0001 | |
| <i>C-t</i> | 50.03 | 1 | 50.03 | 14.12 | 0.0019 | |
| <i>D-GR</i> | 45.81 | 1 | 45.81 | 12.93 | 0.0026 | |
| <i>AB</i> | 0.72 | 1 | 0.72 | 0.20 | 0.6592 | |
| <i>AC</i> | 0.77 | 1 | 0.77 | 0.22 | 0.6472 | |
| <i>AD</i> | 2.71 | 1 | 2.71 | 0.77 | 0.3954 | |
| <i>BC</i> | 12.55 | 1 | 12.55 | 3.54 | 0.0794 | |
| <i>BD</i> | 4.26 | 1 | 4.26 | 1.20 | 0.2901 | |
| <i>CD</i> | 1.59 | 1 | 1.59 | 0.45 | 0.5129 | |
| <i>A²</i> | 0.025 | 1 | 0.025 | 7.187E-003 | 0.9336 | |
| <i>B²</i> | 119.62 | 1 | 119.62 | 33.78 | < 0.0001 | |
| <i>C²</i> | 11.18 | 1 | 11.18 | 3.16 | 0.0958 | |
| <i>D²</i> | 8.82 | 1 | 8.82 | 2.49 | 0.1353 | |
| <i>Residual</i> | 53.13 | 15 | 3.54 | | | <i>not significant</i> |
| <i>Lack of Fit</i> | 38.96 | 10 | 3.90 | 1.38 | 0.3813 | |
| <i>Pure Error</i> | 14.17 | 5 | 2.83 | | | |
| <i>Cor Total</i> | 1196.31 | 29 | | | | |

Tabela 6-11. ANOVA redukovanog modela za TWR pri PMEDM TiAl₆V₄

| ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------|--------------------|----------------|----------------------------|--------------------|
| <i>Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]</i> | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| <i>Model</i> | 1133.10 | 8 | 141.64 | 47.06 | < 0.0001 | <i>significant</i> |
| <i>A-Ie</i> | 765.10 | 1 | 765.10 | 254.18 | < 0.0001 | |
| <i>B-ti</i> | 134.89 | 1 | 134.89 | 44.81 | < 0.0001 | |
| <i>C-t</i> | 50.92 | 1 | 50.92 | 16.92 | 0.0005 | |
| <i>D-GR</i> | 45.22 | 1 | 45.22 | 15.02 | 0.0009 | |
| <i>BC</i> | 12.55 | 1 | 12.55 | 4.17 | 0.0539 | |
| <i>B²</i> | 123.78 | 1 | 123.78 | 41.12 | < 0.0001 | |
| <i>C²</i> | 11.68 | 1 | 11.68 | 3.88 | 0.0621 | |
| <i>D²</i> | 9.24 | 1 | 9.24 | 3.07 | 0.0944 | |
| <i>Residual</i> | 63.21 | 21 | 3.01 | | | |
| <i>Lack of Fit</i> | 49.04 | 16 | 3.07 | 1.08 | 0.5093 | |
| <i>Pure Error</i> | 14.17 | 5 | 2.83 | | | |
| <i>Cor Total</i> | 1196.31 | 29 | | | | |

Osnovni statistički podaci redukovanog kvadratnog modela za relativno trošenje alata prikazani su u tabeli 6-12. Vrednosti osnovnih statističkih podataka takođe potvrđuju značajnost modela.

Tabela 6-12. Osnovni statistički podaci usvojenog modela za TWR pri PMEDM $TiAl_6V_4$

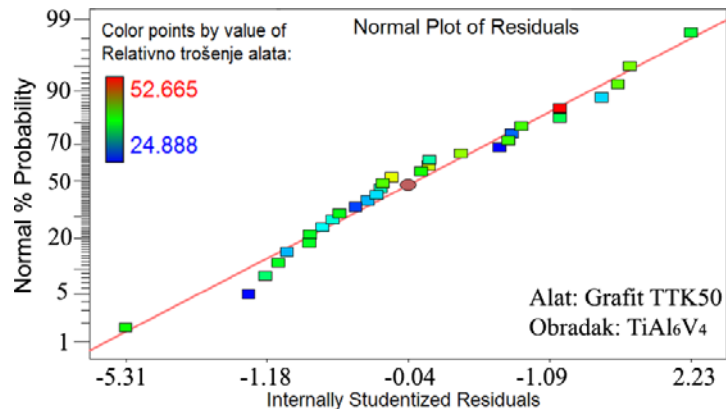
| | | | |
|------------------|--------|-----------------------|--------|
| <i>Std. Dev.</i> | 1.73 | <i>R-Squared</i> | 0.9472 |
| <i>Mean</i> | 36.29 | <i>Adj R-Squared</i> | 0.9270 |
| <i>C.V. %</i> | 4.78 | <i>Pred R-Squared</i> | 0.8613 |
| <i>PRESS</i> | 165.89 | <i>Adeq Precision</i> | 28.515 |

Kao i kod prethodna dva modela, nakon izvršene analize dobija se model za relativno trošenje alata u kodiranom 6.9. i dekodiranom obliku 6.10.

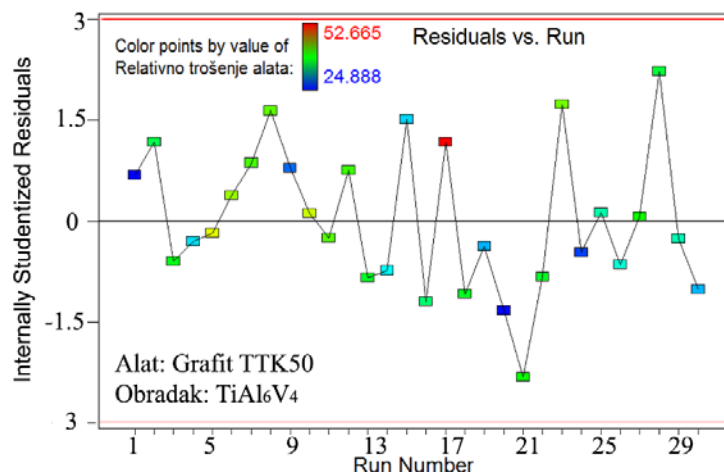
$$TWR = +39.05 - 5.90 \cdot A + 2.35 \cdot B + 1.46 \cdot C - 1.37 \cdot D - 0.89 \cdot B \cdot C - 2.00 \cdot B^2 - 0.65 \cdot C^2 - 0.57 \cdot D^2 \quad (6.9)$$

$$TWR = 5.5 - 3.934 \cdot I_e + 0.3138 \cdot t_i + 1.007 \cdot \tau + 0.311 \cdot GR - 0.001686 \cdot t_i \cdot \tau - 0.000724 \cdot t_i^2 - 0.00646 \cdot \tau^2 - 0.0639 \cdot GR^2 \quad (6.10)$$

Na slici 6-9. sa normalizovanog dijagrama vrednosti ostatka vidljivo je da sve tačke prate liniju normalne raspodele.

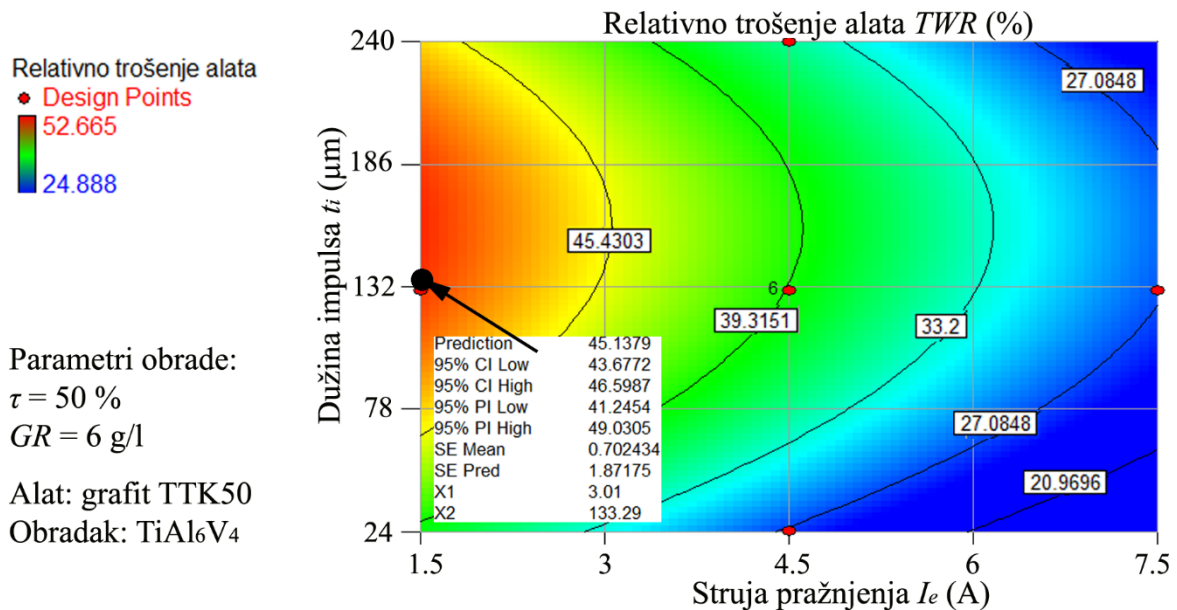


Slika 6-9. Normalizovani dijagram vrednosti ostatka modela za TWR pri PMEDM $TiAl_6V_4$

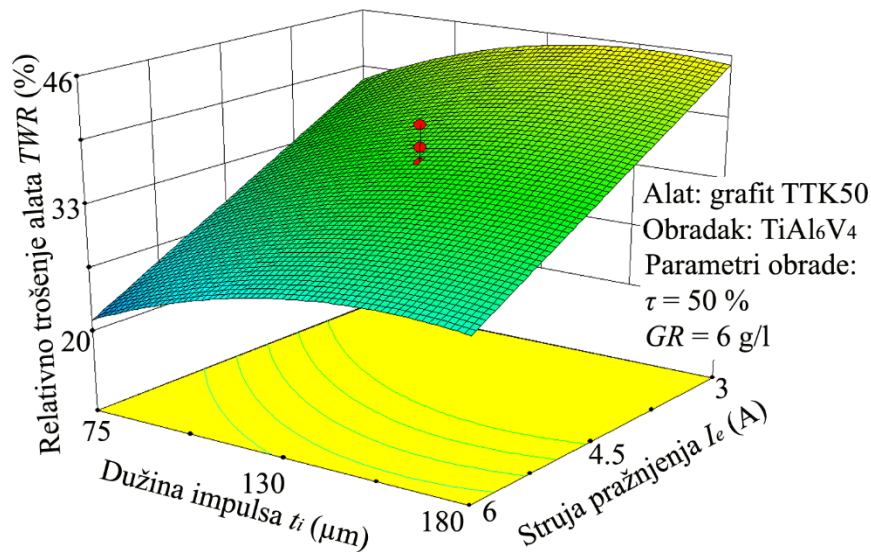


Slika 6-10. Dijagram ostatka u odnosu na redosled izvođenja tačaka eksperimenta modela TWR pri PMEDM $TiAl_6V_4$

Model za relativno trošenje alata takođe ima sposobnost predviđanja, kao što je prikazano na konturnom dijagramu, slika 6-11. Trodimenzionalni oblik odzivne površine za dobijeni model je prikazan na slici 6-12.



Slika 6-11. Konturni dijagram modela za TWR pri PMEDM TiAl₆V₄



Slika 6-12. Prostorni dijagram modela za TWR pri PMEDM TiAl₆V₄

6.1.2 Matematički modeli za (AE+PM)EDM cirkonijum oksida

Za potrebe istraživanja pri obradi cirkonijum oksida primenjen je BBD eksperimentalni plan (*eng. Box-Behnken Design*) sa tri faktora na tri nivoa. Ovde su nezavisno promenljive veličine bile: struja pražnjenja, dužina trajanja impulsa i koncentracija grafitnog praha. Zavisno promenljive veličine su bile: srednja aritmetička hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade i relativno trošenje alata.

6.1.2.1 Model za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine

U tabeli 6-13. su prikazani podaci sa predlogom za izbor odgovarajućeg modela za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine pri obradi cirkonijum oksida.

Tabela 6-13. Izbor modela za R_a na osnovu ANOVA analize pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| <i>Response 1 Hrapavost obrađene površine Transform: None</i> | | | | | | |
|---|-----------------------|------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|
| <i>Sequential Model Sum of Squares [Type I]</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Sum of Squares</i> | <i>df</i> | <i>Mean Square</i> | <i>F Value</i> | <i>p-value Prob > F</i> | |
| <i>Mean vs Total</i> | 1579.22 | 1 | 1579.22 | | | |
| <i>Linear vs Mean</i> | 68.55 | 3 | 22.85 | 13.73 | 0.0003 | |
| <i>2FI vs Linear</i> | 3.75 | 3 | 1.25 | 0.70 | 0.5742 | |
| <i>Quadratic vs 2FI</i> | 15.41 | 3 | 5.14 | 14.52 | 0.0022 | <i>Suggested</i> |
| <i>Cubic vs Quadratic</i> | 2.08 | 3 | 0.69 | 7.09 | 0.0445 | <i>Aliased</i> |
| <i>Residual</i> | 0.39 | 4 | 0.098 | | | |
| <i>Total</i> | 1669.41 | 17 | 98.20 | | | |
| <i>Lack of Fit Tests</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Sum of Squares</i> | <i>df</i> | <i>Mean Square</i> | <i>F Value</i> | <i>p-value Prob > F</i> | |
| <i>Linear</i> | 21.24 | 9 | 2.36 | 24.07 | 0.0039 | |
| <i>2FI</i> | 17.50 | 6 | 2.92 | 29.73 | 0.0028 | |
| <i>Quadratic</i> | 2.08 | 3 | 0.69 | 7.09 | 0.0445 | <i>Suggested</i> |
| <i>Cubic</i> | 0.000 | 0 | | | | <i>Aliased</i> |
| <i>Pure Error</i> | 0.39 | 4 | 0.098 | | | |
| <i>Model Summary Statistics</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Std.Dev.</i> | <i>R-Squared</i> | <i>Adjusted R-Squared</i> | <i>Predicted R-Squared</i> | <i>PRESS</i> | |
| <i>Linear</i> | 1.29 | 0.7601 | 0.7048 | 0.5580 | 39.86 | |
| <i>2FI</i> | 1.34 | 0.8017 | 0.6826 | 0.2234 | 70.04 | |
| <i>Quadratic</i> | 0.59 | 0.9725 | 0.9372 | 0.6249 | 33.83 | <i>Suggested</i> |
| <i>Cubic</i> | 0.31 | 0.9957 | 0.9826 | | + | <i>Aliased</i> |

Na osnovu statističke ocene pomoću F – testa i maksimalne vrednosti koeficijenata determinacije R – kvadrata, predložen je adekvatan kvadratni model. Kod predloženog kvadratnog modela pojavljuju se članovi nultog, prvog i drugog reda, kao i njihove interakcije, tabela 6-14.

Iz tabele 6-14. uočljivo je da nisu svi članovi predloženog modela uticajni. Na osnovu toga sprovedena je redukcija modela metodom unazad. Još jedan razlog za redukciju modela je i to što je mera odstupanja od modela (*Lack of Fit*) signifikantna, što ovaj model čini nepoželjnim. Analiza varijanse za redukovani kvadratni model prikazan je u tabeli 6-15.

Tabela 6-14. ANOVA predloženog kvadratnog modela za R_a (AE+PM)EDM ZrO₂

| ANOVA for Response Surface Quadratic Model | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------|--------------------|----------------|----------------------------|--------------------|
| <i>Response 1 Hrapavost obrađene površine</i> | | | | | | |
| <i>Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]</i> | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| <i>Model</i> | 87.71 | 9 | 9.75 | 27.54 | 0.0001 | <i>significant</i> |
| <i>A-Ie</i> | 49.68 | 1 | 49.68 | 140.39 | < 0.0001 | |
| <i>B-ti</i> | 14.82 | 1 | 14.82 | 41.87 | 0.0003 | |
| <i>C-GR</i> | 1.94 | 1 | 1.94 | 5.49 | 0.0516 | |
| <i>AB</i> | 1.09 | 1 | 1.09 | 3.09 | 0.1224 | |
| <i>AC</i> | 1.11 | 1 | 1.11 | 3.13 | 0.1202 | |
| <i>BC</i> | 1.55 | 1 | 1.55 | 4.37 | 0.0749 | |
| <i>A²</i> | 0.38 | 1 | 0.38 | 1.09 | 0.3321 | |
| <i>B²</i> | 0.028 | 1 | 0.028 | 0.080 | 0.7852 | |
| <i>C²</i> | 14.56 | 1 | 14.56 | 41.16 | 0.0004 | |
| <i>Residual</i> | 2.48 | 7 | 0.35 | | | <i>significant</i> |
| <i>Lack of Fit</i> | 2.08 | 3 | 0.69 | 7.09 | 0.0445 | |
| <i>Pure Error</i> | 0.39 | 4 | 0.098 | | | |
| <i>Cor Total</i> | 90.19 | 16 | | | | |

Tabela 6-15. ANOVA redukovanog modela za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model | | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------|--------------------|----------------|----------------------------|--------------------|------------------------|
| <i>Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]</i> | | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | | |
| <i>Model</i> | 87.28 | 7 | 12.47 | 38.68 | < 0.0001 | <i>significant</i> | |
| <i>A-Ie</i> | 49.68 | 1 | 49.68 | 154.08 | < 0.0001 | | |
| <i>B-ti</i> | 14.81 | 1 | 14.81 | 45.93 | < 0.0001 | | |
| <i>C-GR</i> | 1.94 | 1 | 1.94 | 6.03 | 0.0364 | | |
| <i>AB</i> | 1.09 | 1 | 1.09 | 3.39 | 0.0989 | | |
| <i>AC</i> | 1.11 | 1 | 1.11 | 3.44 | 0.0968 | | |
| <i>BC</i> | 1.55 | 1 | 1.55 | 4.80 | 0.0562 | | |
| <i>C²</i> | 14.99 | 1 | 14.99 | 46.48 | < 0.0001 | | |
| <i>Residual</i> | 2.90 | 9 | 0.32 | | | | <i>not significant</i> |
| <i>Lack of Fit</i> | 2.51 | 5 | 0.50 | 5.12 | 0.0694 | | |
| <i>Pure Error</i> | 0.39 | 4 | 0.098 | | | | |
| <i>Cor Total</i> | 90.19 | 16 | | | | | |

Prema tabeli 6-15., za p – vrednosti manje od 0.05 članovi A, B i C su uticajni. Kao što je rečeno, da sa stanovišta odstupanja tačnosti rezultata članove čije su p – vrednosti 0.05 ÷ 0.1 ne treba uvek odbaciti. Stoga su u modelu ostavljeni članovi AB, AC, BC i C².

Osnovni statistički podaci za dobijeni model su prikazani u tabeli 6-16. Vrednosti statističkih podataka potvrđuju značajnost usvojenog modela.

Rezultati analize varijanse ukazuju da na hrapavost obrađene površine utiču sva tri posmatrana faktora. Model za hrapavost obrađene površine R_a u kodiranom obliku dat je u jednačini 6.11., dok je u jednačini 6.12. prikazan model u dekodiranom obliku.

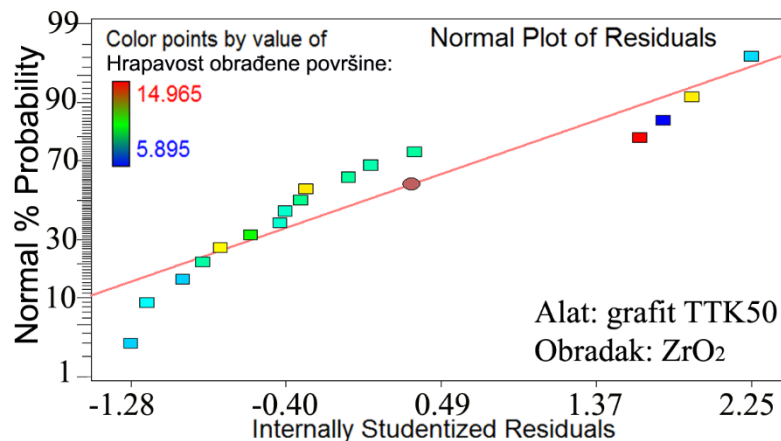
Tabela 6-16. Osnovni statistički podaci usvojenog modela za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO_2

| | | | |
|------------------|-------|-----------------------|--------|
| <i>Std. Dev.</i> | 0.57 | <i>R-Squared</i> | 0.9678 |
| <i>Mean</i> | 9.64 | <i>Adj R-Squared</i> | 0.9428 |
| <i>C.V. %</i> | 5.89 | <i>Pred R-Squared</i> | 0.8161 |
| <i>PRESS</i> | 16.59 | <i>Adeq Precision</i> | 23.330 |

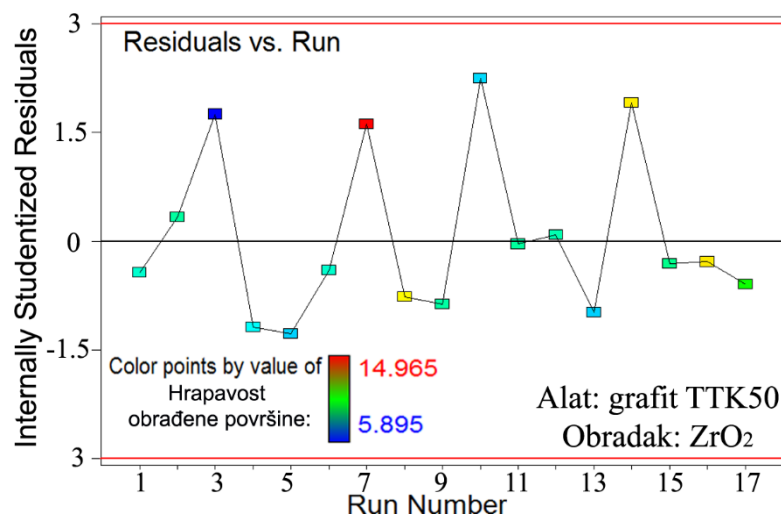
$$R_a = 8.65 + 2.50 \cdot A + 1.35 \cdot B - 0.50 \cdot C + 0.52 \cdot A \cdot B - 0.53 \cdot A \cdot C - 0.62 \cdot B \cdot C + 1.88 \cdot C^2 \quad (6.11)$$

$$R_a = 0.93019 + 3.51369 \cdot I_e + 0.014234 \cdot t_i - 0.29084 \cdot GR + 0.035860 \cdot I_e \cdot t_i - 0.26312 \cdot I_e \cdot GR - 0.000535 \cdot t_i \cdot GR + 0.11757 \cdot GR^2 \quad (6.12)$$

Prema slici 6-13., na osnovu normalizovanog dijagrama vrednosti, ne postoji preveliko odstupanje odziva modela od eksperimentalnih tačaka. Sistemska greška sa stanovišta redosleda izvođenja eksperimenta prikazana je na slici 6-14.

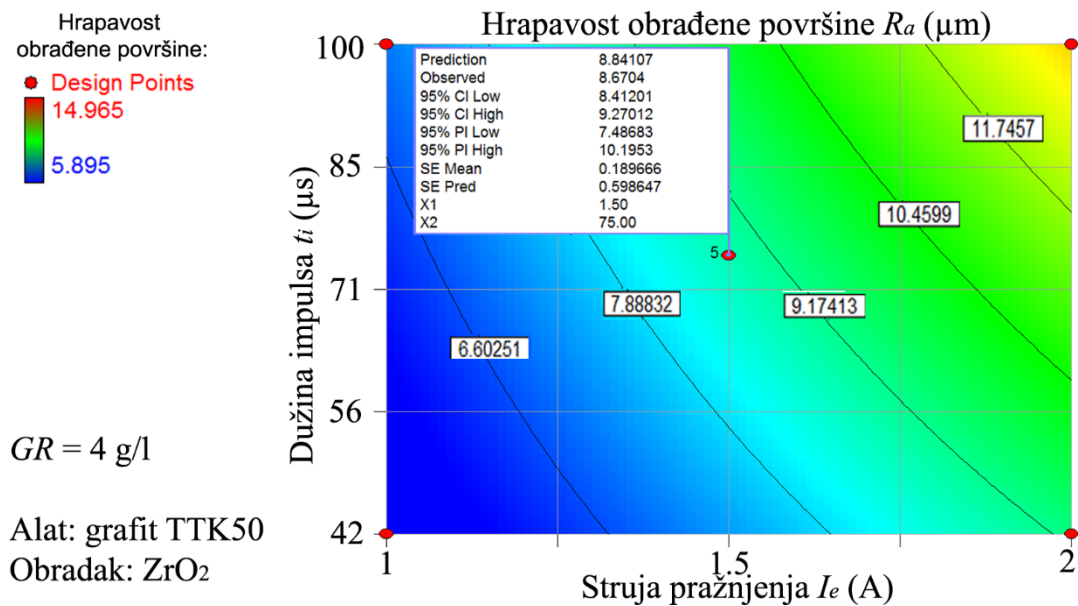


Slika 6-13. Normalizovani dijagram vrednosti ostatka modela za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO_2



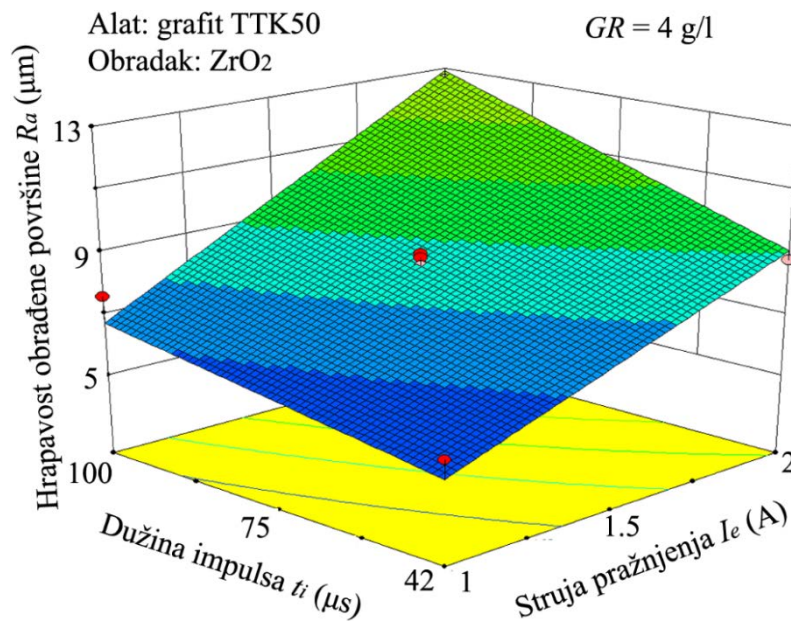
Slika 6-14. Dijagram ostatka u odnosu na redosled izvođenja tačaka eksperimenta modela za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO_2

Konturni dijagram modela za hrapavost obrađene površine pri elektroerozivnoj obradi cirkonijum oksida prikazan je na slici 6-15.



Slika 6-15. Konturni dijagram modela za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO₂

Prostorni dijagram modela za hrapavost obrađene površine u trodimenzionalnom obliku odzivne površine prikazan je na slici 6-16.



Slika 6-16. Prostorni dijagram modela za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO₂

6.1.2.2 Model za proizvodnost obrade

Predloženi modeli za proizvodnost obrade pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida prikazani su u tabeli 6-17.

Tabela 6-17. Izbor modela za *MRR* na osnovu ANOVA analize pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| Response 2 Proizvodnost obrade Transform: None | | | | | | |
|---|----------------|-----------|--------------------|---------------------|------------------|--------------------------|
| Sequential Model Sum of Squares [Type I] | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| Mean vs Total | 38.51 | 1 | 38.51 | | | |
| Linear vs Mean | 3.85 | 3 | 1.28 | 24.59 | < 0.0001 | |
| 2FI vs Linear | 0.086 | 3 | 0.029 | 0.49 | 0.6993 | |
| Quadratic vs 2FI | 0.54 | 3 | 0.18 | 24.75 | 0.0004 | <i>Suggested Aliased</i> |
| Cubic vs Quadratic | 0.044 | 3 | 0.015 | 8.25 | 0.0346 | |
| Residual | 7.100E-003 | 4 | 1.775E-003 | | | |
| Total | 43.04 | 17 | 2.53 | | | |
| Lack of Fit Tests | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | |
| Linear | 0.67 | 9 | 0.075 | 42.05 | 0.0013 | <i>Suggested Aliased</i> |
| 2FI | 0.59 | 6 | 0.098 | 54.96 | 0.0008 | |
| Quadratic | 0.044 | 3 | 0.015 | 8.25 | 0.0346 | |
| Cubic | 0.000 | 0 | | | | |
| Pure Error | 7.100E-003 | 4 | 1.775E-003 | | | |
| Model Summary Statistics | | | | | | |
| Source | Std.Dev. | R-Squared | Adjusted R-Squared | Predicted R-Squared | PRESS | |
| Linear | 0.23 | 0.8502 | 0.8156 | 0.7104 | 1.31 | <i>Suggested Aliased</i> |
| 2FI | 0.24 | 0.8692 | 0.7908 | 0.4536 | 2.48 | |
| Quadratic | 0.085 | 0.9887 | 0.9743 | 0.8368 | 0.74 | |
| Cubic | 0.042 | 0.9984 | 0.9937 | | + | |

Na osnovu statističke ocene predložen je adekvatan kvadratni model. Članovi za predložen kvadratni model dati su u tabeli 6-18.

Tabela 6-18. ANOVA predloženog kvadratnog modela za *MRR* pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| ANOVA for Response Surface Quadratic Model | | | | | | | |
|---|----------------|----|-------------|---------|------------------|--------------------|--------------------|
| Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III] | | | | | | | |
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | p-value Prob > F | | |
| Model | 4.48 | 9 | 0.50 | 68.27 | < 0.0001 | <i>significant</i> | |
| A-Ie | 3.53 | 1 | 3.53 | 484.68 | < 0.0001 | | |
| B-ti | 0.11 | 1 | 0.11 | 14.70 | 0.0064 | | |
| C-GR | 0.086 | 1 | 0.086 | 11.75 | 0.0110 | | |
| AB | 0.060 | 1 | 0.060 | 8.18 | 0.0244 | | |
| AC | 0.025 | 1 | 0.025 | 3.47 | 0.1049 | | |
| BC | 1.559E-003 | 1 | 1.559E-003 | 0.21 | 0.6578 | | |
| A ² | 0.54 | 1 | 0.54 | 73.81 | < 0.0001 | | |
| B ² | 5.338E-003 | 1 | 5.338E-003 | 0.73 | 0.4205 | | |
| C ² | 6.737E-003 | 1 | 6.737E-003 | 0.92 | 0.3684 | | |
| Residual | 0.051 | 7 | 7.291E-003 | | | | |
| Lack of Fit | 0.044 | 3 | 0.015 | 8.25 | 0.0346 | | <i>significant</i> |
| Pure Error | 7.100E-003 | 4 | 1.775E-003 | | | | |
| Cor Total | 4.53 | 16 | | | | | |

Zbog činjenice da nisu svi članovi modela uticajni i da je mera odstupanja od modela signifikantna, urađena je redukcija modela. Analiza varijanse za redukovani kvadratni model data je u tabeli 6-19.

Tabela 6-19. ANOVA redukovanog modela za *MRR* pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| <i>ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model</i> | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------|--------------------|----------------|----------------------------|------------------------|
| <i>Response 2 Proizvodnost obrade</i> | | | | | | |
| <i>Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Sum of Squares</i> | <i>df</i> | <i>Mean Square</i> | <i>F Value</i> | <i>p-value Prob > F</i> | |
| <i>Model</i> | 4.47 | 6 | 0.74 | 113.92 | < 0.0001 | <i>significant</i> |
| <i>A-Ie</i> | 3.53 | 1 | 3.53 | 540.88 | < 0.0001 | |
| <i>B-ti</i> | 0.11 | 1 | 0.11 | 17.36 | 0.0019 | |
| <i>C-GR</i> | 0.084 | 1 | 0.084 | 12.90 | 0.0049 | |
| <i>AB</i> | 0.060 | 1 | 0.060 | 9.13 | 0.0129 | |
| <i>AC</i> | 0.025 | 1 | 0.025 | 3.87 | 0.0775 | |
| <i>A²</i> | 0.53 | 1 | 0.53 | 80.92 | < 0.0001 | |
| <i>Residual</i> | 0.065 | 10 | 6.533E-003 | | | <i>not significant</i> |
| <i>Lack of Fit</i> | 0.058 | 6 | 9.706E-003 | 5.47 | 0.0610 | |
| <i>Pure Error</i> | 7.100E-003 | 4 | 1.775E-003 | | | |
| <i>Cor Total</i> | 4.53 | 16 | | | | |

Iz tabele 6-19. vidljivo je da su članovi modela A, B, C, AB i A² uticajni. Član AC čija je p – vrednost 0.0775 takođe ostaje kao član modela, zbog činjenice da se članovi sa p – vrednosti većim od 0.1 smatraju neznačajnim.

Vrednosti osnovnih statističkih podataka prikazanih u tabeli 6-20. potvrđuju značajnost usvojenog modela.

Tabela 6-20. Osnovni statistički podaci usvojenog modela za *MRR* pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| | | | |
|------------------|-------|-----------------------|--------|
| <i>Std. Dev.</i> | 0.081 | <i>R-Squared</i> | 0.9856 |
| <i>Mean</i> | 1.51 | <i>Adj R-Squared</i> | 0.9769 |
| <i>C.V. %</i> | 5.37 | <i>Pred R-Squared</i> | 0.9421 |
| <i>PRESS</i> | 0.26 | <i>Adeq Precision</i> | 30.829 |

Model za proizvodnost obrade pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida u kodiranom i dekodiranom obliku prikazan je u jednačinama 6.13. i 6.14.

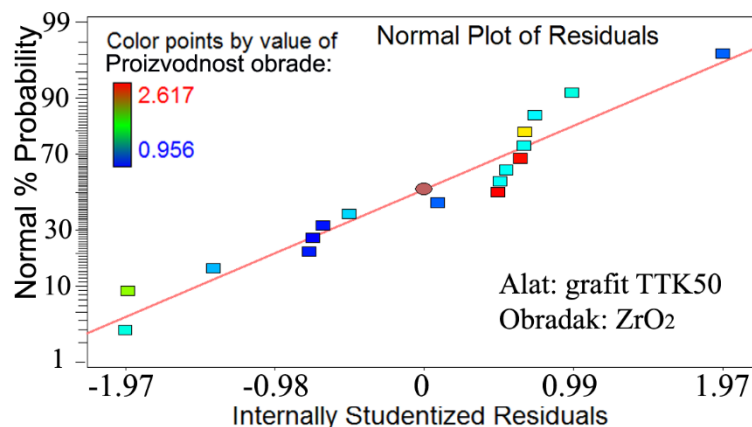
$$MRR = +1.33 + 0.67 \cdot A + 0.12 \cdot B + 0.10 \cdot C + 0.12 \cdot A \cdot B + 0.080 \cdot A \cdot C + 0.35 \cdot A^2 \quad (6.13)$$

$$MRR = +3.24496 - 3.65821 \cdot I_e - 0.00805 \cdot ti - 0.033969 \cdot GR + 0.00807 \cdot I_e \cdot ti + 0.039750 \cdot I_e \cdot GR + 1.41324 \cdot I_e^2 \quad (6.14)$$

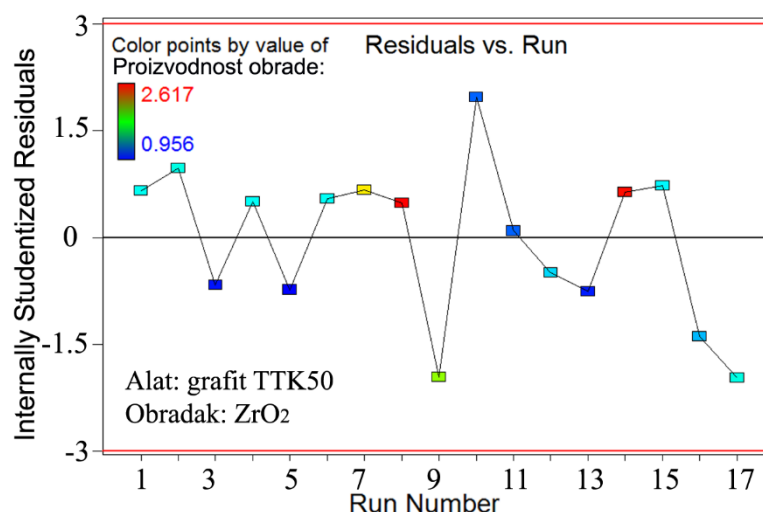
Normalizovani dijagram vrednosti ostatka u odnosu na vrednost predviđanog odziva dat je na slici 6-17. Sa slike se vidi da nema prevelikih odstupanja modela.

Dijagram na slici 6-18. pokazuje da je prihvatljiv redosled izvođenja eksperimenta pri određivanju proizvodnosti obrade (AE+PM)EDM cirkonijum oksida.

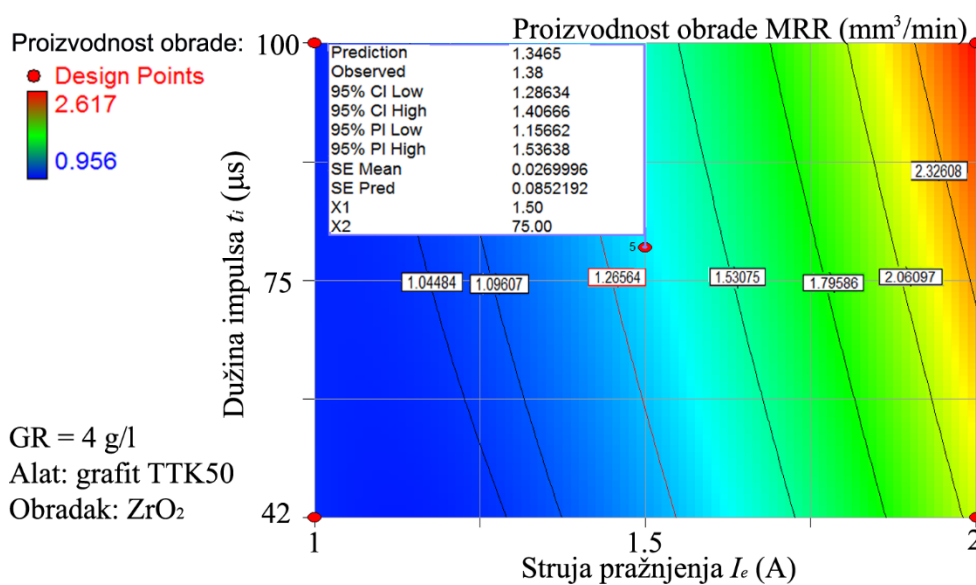
Odziv modela u 2D obliku preko konturnog dijagrama je dat na slici 6-19., dok je 3D oblik odziva dat na slici 6-20. preko prostornog dijagrama.



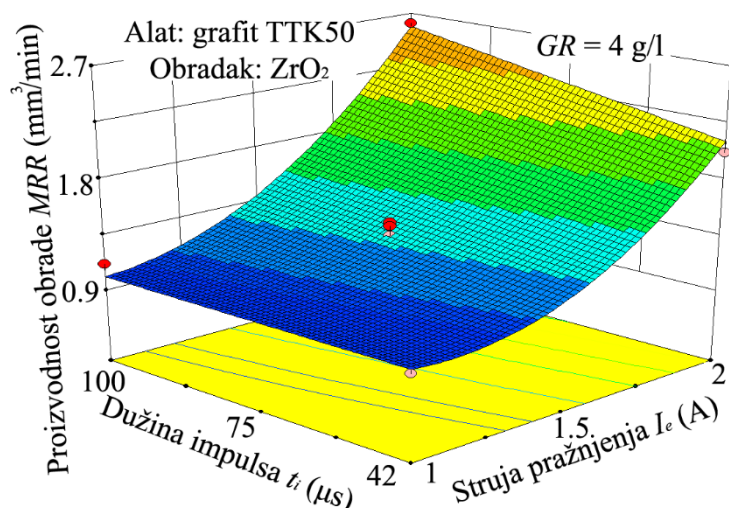
Slika 6-17. Normalizovani dijagram vrednosti ostatka modela za *MRR* pri (AE+PM)EDM ZrO₂



Slika 6-18. Dijagram ostatka u odnosu na redosled izvođenja tačaka eksperimenta modela za *MRR* pri (AE+PM)EDM ZrO₂



Slika 6-19. Konturni dijagram modela za *MRR* pri (AE+PM)EDM ZrO₂


 Slika 6-20. Prostorni dijagram modela za za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO_2

6.1.2.3 Model za relativno trošenje alata

Analiza varijanse za izbor modela za relativno trošenje alata pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida data je u tabeli 6-21. Na osnovu analize predložen je adekvatni kvadratni model. Članovi predloženog modela su prikazani u tabeli 6-22.

 Tabela 6-21. Izbor modela za TWR na osnovu ANOVA analize pri (AE+PM)EDM ZrO_2

| <i>Response 3 Relativno trošenje alata Transform: None</i> | | | | | | |
|--|-----------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|
| <i>Sequential Model Sum of Squares [Type I]</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Sum of Squares</i> | <i>df</i> | <i>Mean Square</i> | <i>F Value</i> | <i>p-value Prob > F</i> | |
| <i>Mean vs Total</i> | 80623.49 | 1 | 80623.49 | | | |
| <i>Linear vs Mean</i> | 1995.44 | 3 | 665.15 | 23.22 | < 0.0001 | |
| <i>2FI vs Linear</i> | 44.49 | 3 | 14.83 | 0.45 | 0.7214 | |
| <i>Quadratic vs 2FI</i> | 291.54 | 3 | 97.18 | 18.68 | 0.0010 | <i>Suggested</i> |
| <i>Cubic vs Quadratic</i> | 30.84 | 3 | 10.28 | 7.38 | 0.0416 | <i>Aliased</i> |
| <i>Residual</i> | 5.57 | 4 | 1.39 | | | |
| <i>Total</i> | 82991.38 | 17 | 4881.85 | | | |
| <i>Lack of Fit Tests</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Sum of Squares</i> | <i>df</i> | <i>Mean Square</i> | <i>F Value</i> | <i>p-value Prob > F</i> | |
| <i>Linear</i> | 366.87 | 9 | 40.76 | 29.26 | 0.0027 | |
| <i>2FI</i> | 322.38 | 6 | 53.73 | 38.57 | 0.0017 | |
| <i>Quadratic</i> | 30.84 | 3 | 10.28 | 7.38 | 0.0416 | <i>Suggested</i> |
| <i>Cubic</i> | 0.000 | 0 | | | | <i>Aliased</i> |
| <i>Pure Error</i> | 5.57 | 4 | 1.39 | | | |
| <i>Model Summary Statistics</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Std.Dev.</i> | <i>R-Square d</i> | <i>Adjusted R-Squared</i> | <i>Predicted R-Squared</i> | <i>PRESS</i> | |
| <i>Linear</i> | 5.35 | 0.8427 | 0.8064 | 0.7541 | 582.36 | |
| <i>2FI</i> | 5.73 | 0.8615 | 0.7784 | 0.6275 | 881.97 | <i>Suggested</i> |
| <i>Quadratic</i> | 2.28 | 0.9846 | 0.9649 | 0.7889 | 499.82 | <i>Aliased</i> |
| <i>Cubic</i> | 1.18 | 0.9976 | 0.9906 | | + | |

Tabela 6-22. ANOVA predloženog kvadratnog modela za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| <i>ANOVA for Response Surface Quadratic Model</i> | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------|--------------------|----------------|----------------------------|--------------------|
| <i>Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]</i> | | | | | | |
| <i>Source</i> | <i>Sum of Squares</i> | <i>df</i> | <i>Mean Square</i> | <i>F Value</i> | <i>p-value Prob > F</i> | |
| <i>Model</i> | 2331.17 | 8 | 291.40 | 63.50 | < 0.0001 | <i>significant</i> |
| <i>A-Ie</i> | 1691.39 | 1 | 1691.39 | 368.58 | < 0.0001 | |
| <i>B-ti</i> | 227.90 | 1 | 227.90 | 49.66 | 0.0001 | |
| <i>C-GR</i> | 50.97 | 1 | 50.97 | 11.11 | 0.0103 | |
| <i>AB</i> | 20.60 | 1 | 20.60 | 4.49 | 0.0670 | |
| <i>AC</i> | 23.60 | 1 | 23.60 | 5.14 | 0.0531 | |
| <i>A^2</i> | 142.87 | 1 | 142.87 | 31.13 | 0.0005 | |
| <i>B^2</i> | 81.69 | 1 | 81.69 | 17.80 | 0.0029 | |
| <i>C^2</i> | 38.84 | 1 | 38.84 | 8.46 | 0.0196 | |
| <i>Residual</i> | 36.71 | 8 | 4.59 | | | |
| <i>Lack of Fit</i> | 31.14 | 4 | 7.78 | 5.59 | 0.0621 | |
| <i>Pure Error</i> | 5.57 | 4 | 1.39 | | | |
| <i>Cor Total</i> | 2367.88 | 16 | | | | |

Iz tabele 6-22. uočljivo je da svi članovi modela imaju p – vrednost manju od 0.1 i svi se smatraju značajnim za predloženi model. U ovom slučaju redukcija modela nije potrebna, što potvrđuje i mera odstupanja od modela koje nije signifikantna. Osnovni statistički podaci koji potvrđuju značajnost usvojenog modela su prikazani u tabeli 6-23.

Tabela 6-23. Osnovni statistički podaci usvojenog modela za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO₂

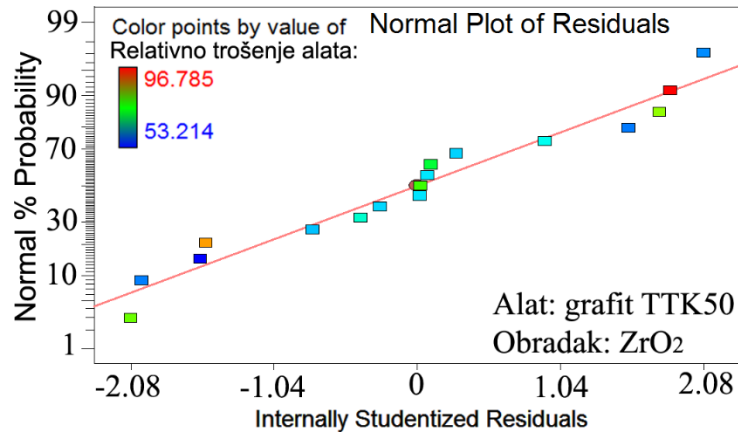
| | | | |
|------------------|--------|-----------------------|--------|
| <i>Std. Dev.</i> | 2.14 | <i>R-Squared</i> | 0.9845 |
| <i>Mean</i> | 68.87 | <i>Adj R-Squared</i> | 0.9690 |
| <i>C.V. %</i> | 3.11 | <i>Pred R-Squared</i> | 0.7909 |
| <i>PRESS</i> | 495.23 | <i>Adeq Precision</i> | 25.594 |

Usvojen model za relativno trošenje alata u kodiranom obliku dat je u jednačini 6.15. U jednačini 6.16. prikazan je model u dekodiranom obliku.

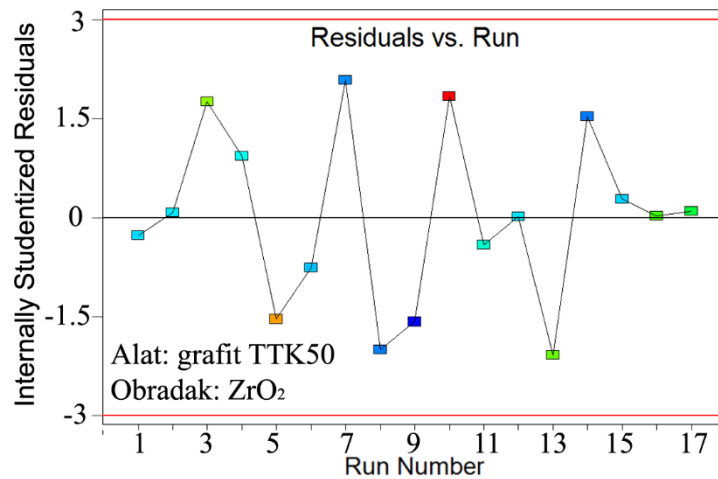
$$TWR = 62.14 - 14.61 \cdot A + 5.34 \cdot B - 2.52 \cdot C - 2.26 \cdot A \cdot B + 2.43 \cdot A \cdot C + 5.83 \cdot A^2 + 4.51 \cdot B^2 + 3.04 \cdot C^2 \quad (6.15)$$

$$TWR = 168.63046 - 92.91856 \cdot I_e - 0.34423 \cdot t_i - 3.9714 \cdot GR - 0.15575 \cdot I_e \cdot t_i + 1.21450 \cdot I_e \cdot GR + 23.30050 \cdot I_e^2 + 0.00536 \cdot t_i^2 + 0.18984 \cdot GR^2 \quad (6.16)$$

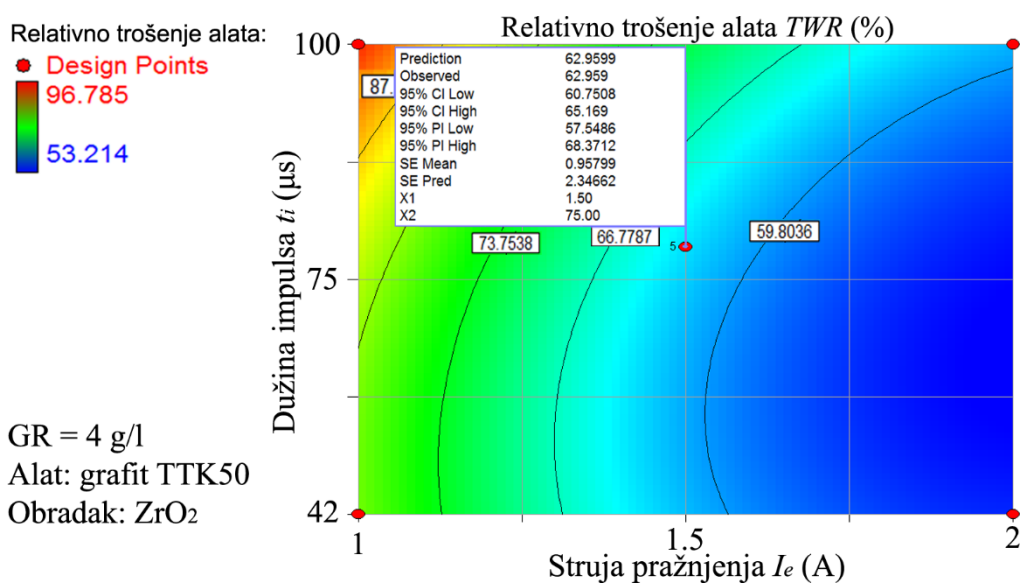
Normalizovani dijagram vrednosti ostatka za usvojeni model dat je na slici 6-21. Sa slike 6-22. uočljivo je da ne postoji sistemska greška redosleda izvođenja eksperimenta. Konturni dijagram odziva modela za relativno trošenje alata prikazan je na slici 6-23. Prostorni dijagram usvojenog modela prikazan je na slici 6-24.



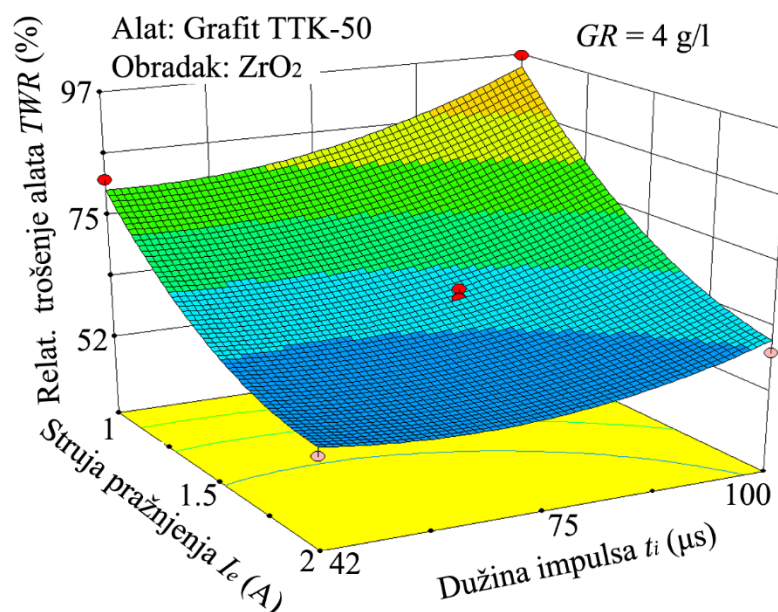
Slika 6-21. Normalizovani dijagram vrednosti ostatka modela za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2



Slika 6-22. Sistemska greška modela za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2



Slika 6-23. Konturni dijagram modela za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2

Slika 6-24. Prostorni dijagram modela za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO₂

6.2 METODE VEŠTAČKE INTELIGENCIJE

Računarska inteligencija (*eng. Computational Intelligence* ili *eng. Soft Computing*) spada u oblast veštačke inteligencije, koja je usmerena ka rešavanju složenih problema gde klasične matematičke teorije pokazuju nepreciznost i nesigurnost. U ovu oblast ubrajaju se: sistemi zasnovani na znanju (ekspertni sistemi), neuro računarstvo, fazi logika, evoluciono računarstvo i hibridni inteligentni sistemi [129].

U novije vreme, fazi logika nalazi sve veću primenu u inženjerskim i naučnim delatnostima, jer omogućava jednostavan i razumljiv način da se dođe do konačnog rešenja. Zahvaljujući logičkom matematičkom konceptu, utemeljenom na prirodnom jeziku i visokoj toleranciji prema nepreciznim podacima, fazi logika pruža jednostavan način da se konkretizuje adekvatno rešenje.

Za generisanje modela osnovnih izlaznih performansi procesa, tj. za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade i relativno trošenje alata, kod PMEDM legure titanijuma korišćen je hibridni inteligentni sistem, odnosno adaptivni neuro fazi sistem zaključivanja (ANFIS). Aktuelnost ANFIS metode se ogleda kroz mnogobrojne radove u kojima je uspešno primenjena [86, 130, 131].

S druge strane za generisanje modela izlaznih performansi procesa (AE+PM)EDM cirkonijum oksida (srednja aritmetička hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade i relativno trošenje alata) korišćena je fazi logika. Iako su se u pojedinim istraživanjima hibridni inteligentni sistemi pokazali boljim u odnosu na fazi logiku [132-134], zbog manjeg broja eksperimentalnih tačaka (BBD plan) opravdana je primena fazi logike. Još jedan od razloga primene fazi logike je mogućnost dobijanja jednog modela koji obuhvata sve performanse obrade, odnosno više-ulaznog više-izlaznog model.

6.2.1 Adaptivni neuro fazi sistem zaključivanja

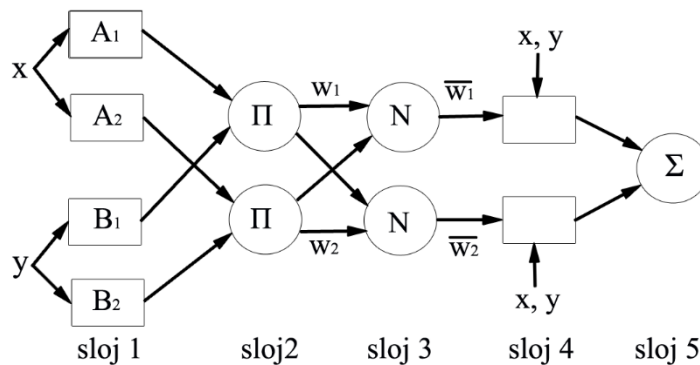
Adaptivni neuro-fazi sistem zaključivanja (*eng. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System – ANFIS*) predstavlja najšire korišćenu kombinaciju veštačke neuronske mreže i fazi sistema zaključivanja [129]. Ova metoda kombinuje tehnike neuro učenja i fazi logike na osnovu posmatranog skupa ulazno/izlaznih podataka. Neuronske mreže i fazi sistemi dinamično obavljaju paralelnu obradu kako bi ocenili relaciju između ulaznih i izlaznih podataka, i to samo učenjem na osnovu dobijenog uzorka, tj. bez primene matematičkog modela. Na taj način fazi sistemi adaptivno zaključuju i podešavaju svoje veze, dok neuronske mreže usavršavaju fazi pravila na osnovu numeričkih podataka.

Zbog jednostavnijeg opisa adaptivne mreže sa fazi logičkim zaključivanjem, razmatra se mreža sa dva ulaza x , y i jednim izlazom z . Veličine x , y su ulazne fazi promenljive, pri čemu je prvi ulaz određen sa n , a drugi sa m funkcija pripadnosti. Baza pravila sadrži k fazi pravila AKO-ONDA Sugeno tipa, prikazanih u jednačini 6.24.

$$\begin{aligned} \text{Pravilo } 1 &= \text{AKO } x \text{ je } A_1 \text{ i } y \text{ je } B_1 \text{ ONDA je } f_1 = p_1 \cdot x + q_2 \cdot y + r_1 \\ \text{Pravilo } k &= \text{AKO } x \text{ je } A_k \text{ i } y \text{ je } B_k \text{ ONDA je } f_k = p_k \cdot x + q_k \cdot y + r_k \end{aligned} \quad (6.24)$$

gde su A_1 do A_k i B_1 do B_k funkcije pripadnosti svakog ulaza x , y uzročnog dela, dok su p_k , q_k , r_k linearni parametri posledičnog dela.

Prema slici 6-25. arhitektura adaptivne mreže se sastoji od pet slojeva, gde se svaki sloj sastoji od čvorova. Postoje dva tipa čvorova: kvadratni (podesivi parametri) i kružni (nepodesivi parametri - fiksni) [135].



Slika 6-25. Arhitektura adaptivne mreže ANFIS

Sloj 1. Podesivi parametri svakog čvora prvog sloja sadrže funkciju sledećeg oblika:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x); \quad O_i^1 = \mu_{B_i}(y) \quad (6.25)$$

gde su veličine x i/ili y su ulazi u svaki čvor, dok je A_i lingvistička oznaka posmatrane funkcije čvora.

Veličina O_i^1 je funkcija pripadnosti skupa A_i i označava stepen do koga ulazna veličina x zadovoljava kvantifikator A_i . U upotrebi su i funkcije kao što su trapeznog i trougaonog oblika, Gausove funkcije itd. Najčešće se uzima da je μ_{A_i} funkcija oblika zvona, gde je maksimum funkcije jednak 1, a minimum funkcije je 0. Funkcija zvona prikazana je jednačinom:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_1}{a_1} \right)^2 \right]^{b_1}}, \text{ ili}$$

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) = \exp \left\{ - \left[\left(\frac{x - c_1}{a_1} \right)^2 \right]^{b_1} \right\}, \quad (6.26)$$

gde su a_i, b_i, c_i parametri koji definišu oblik funkcije. Broj čvorova ovog sloja je određen brojem ulaznih veličina. Ovaj sloj definiše parametre uslovnog dela AKO-ONDA pravila.

Sloj 2. Sloj koji se sastoji od fiksnih čvorova. Uloga ovog kružnog čvora, koji je označen sa Π , je množenje ulaznih signala i prosljeđivanje proizvoda prema izlazu. Broj kružnih čvorova jednak je broju pravila. Primer množenja je predstavljen u jednačini:

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2 \quad (6.27)$$

gde je w_i izlaz iz sloja 2.

Sloj 3. Treći sloj se takođe sastoji od kružnih slojeva i označen je sa N . Izlaz iz ovog čvora predstavlja normalizovani intenzitet izvršavanja svakog pravila, koji se računa kao odnos intenziteta i -tog pravila i sume intenziteta svih pravila:

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^k w_j}, \quad i = 1, 2 \quad (6.28)$$

gde \bar{w}_i predstavlja izlaz is sloja tri.

Sloj 4. Svaki kvadratni čvor ovog sloja je predstavljen funkcijom sledećeg oblika:

$$O_i^4 = \bar{w}_i \cdot f_i = \bar{w}_i(p_i \cdot x + q_i \cdot y + r_i), \quad i = 1, 2 \quad (6.29)$$

gde su veličine p_i, q_i, r_i predstavljaju podesive parametre posledičnog dela pravila. Takođe, broj čvorova ovog sloja je jednak proju pravila.

Sloj 5. Ovaj sloj čini jedan kružni čvor označen sa Σ . Zadatak ovog čvora je sumiranje svih signala koji dolaze iz četvrtog sloja. Izlaz petog sloja opisuje konačan izlaz adaptivne mreže, i izražava se preko jednačine:

$$Q_i^5 = f(x, y) = \sum_i \bar{w}_i \cdot f_i = \bar{w}_i \cdot f_1 + \bar{w}_i \cdot f_2 = \frac{\sum_i w_i \cdot f_i}{\sum_i w_i} \quad (6.30)$$

Postoje različite metode za regulisanje podesivih parametara. Najčešće je u upotrebi gradijentna metoda sa kombinacijom metode najmanjih kvadrata. Primer je metoda sa opadajućim gradijentom, odnosno algoritam prostiranja greške unazad. Algoritam traži minimum funkcije greške, gde se rešenjem problema smatra ona kombinacija parametara koja daje minimalnu vrednost funkcije. Funkcija greške, čija vrednost se minimizira, predstavlja srednju vrednost sume kvadrata pojedinačnih grešaka.

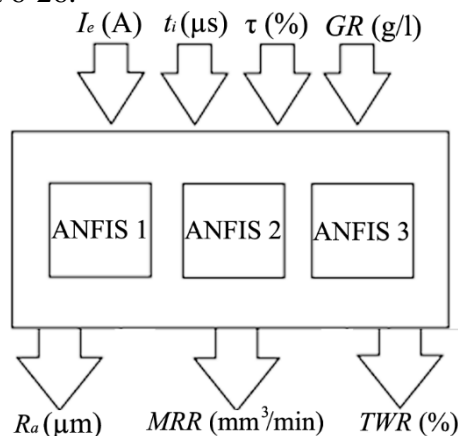
Tačnost predikcije ANFIS modela se inicijalno testira preko tri skupa podataka: trening, test i verifikacija podataka. Prema literaturi odnos ovih podataka se kreće okvirno 70/15/15, odnosno od 100% ukupnih podataka, 70% se koristi za trening, a po 15% za test i verifikaciju modela [136, 137]. Za svaki ulazni skup podataka, predikcija ANFIS modela se upoređuje sa eksperimentalnom vrednošću preko srednje kvadratne greške:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i - p_i)^2 \quad (6.31)$$

gde su N – broj podataka, e – eksperimentalna vrednost i p – vrednost predikcije modela.

6.2.1.1 Neuro fazi model za određivanje performansi PMEDM legure titanijuma

Proces dobijanja adekvatnih inteligentnih modela izlaznih performansi procesa PMEDM legure titanijuma sproveden je pomoću adaptivnog neuro fazi sistema. Kod ANFIS modela se pomoću adaptivne mreže automatski podešavaju parametri funkcije pripadnosti na osnovu skupa ulazno/izlaznih podataka. Za određivanje performansi obrade kreirana su tri ANFIS modela i to za: srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade i relativno trošenje alata, slika 6-26.



Slika 6-26. ANFIS modeli za određivanje performansi procesa PMEDM legure titanijuma

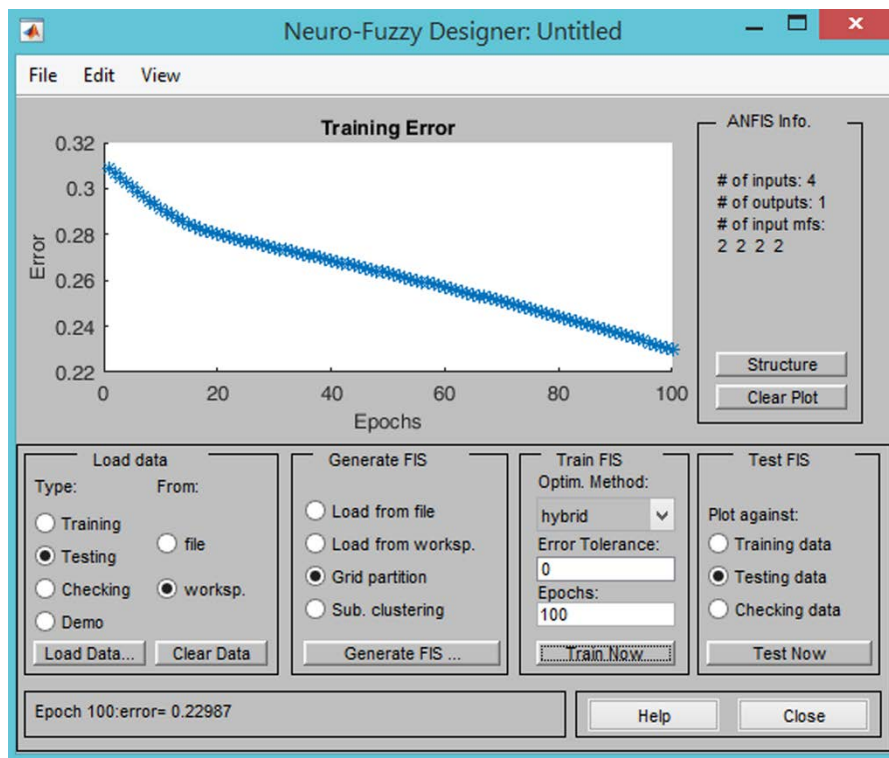
Na osnovu centralnog kompozicionog plana - CCD (poglavlje 5.1.1) korišćeni su eksperimentalni podaci za kreiranje ANFIS modela. Centralne eksperimentalne tačke (25-30, ukupno 6 tačaka) uzete su kao jedna srednja vrednost. Shodno tome, ukupno 25 eksperimentalnih tačaka su korišćene za kreiranje ANFIS modela, tabela 6-24.

Za kreiranje ANFIS modela korišćen je alat *Neuro Fuzzy Designer* u softveru *Matlab*. Za obuku modela upotrebljena su dva skupa ulazno/izlaznih podataka. Jedan skup podataka od 16 eksperimentalnih tačaka korišćen je za trening, dok su 9 eksperimentalnih tačaka uzete za testiranje adaptivne mreže.

Sledeći korak u modelovanju ANFIS modela je generisanje fazi sistema zaključivanja gde se definiše broj i tip funkcija pripadnosti za svaku ulaznu promenljivu: struju pražnjenja, dužinu impulsa, koeficijent delovanja impulsa i koncentraciju grafitnog praha.

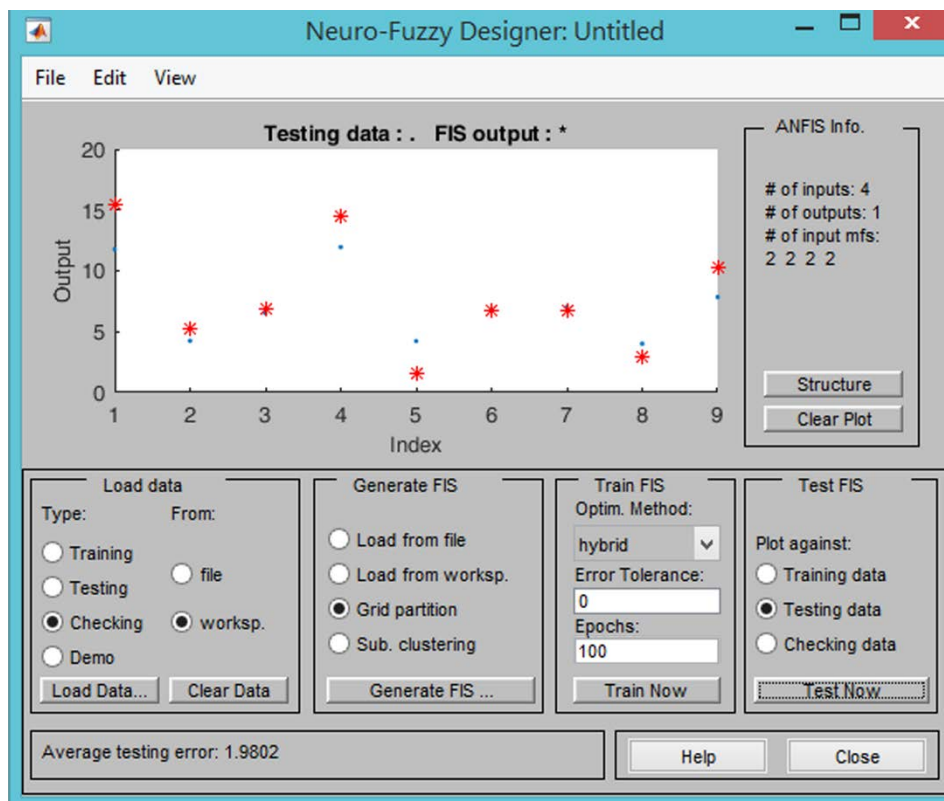
Kod izrade modela za određivanje srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine, proizvodnosti obrade i relativnog trošenja alata, za svaku ulaznu promenljivu izabrano je po dve Gausove funkcije pripadnosti (*gaussmf*). Za sve modele broj funkcija pripadnosti ulaznih promenljivih je definisan na dva, tako da je time i definisani broj pravila za svaki model jednak $2^4 = 16$.

Nakon generisanja fazi sistema zaključivanja sledi proces treniranja pomoću adaptivne mreže. Izabran je hibridni metod optimizacije i broj epoha 100. Tokom procesa treniranja dolazi do promena oblika funkcija pripadnosti u odnosu na početno stanje, dok se srednja kvadratna greška ne svede na minimum. Pri tome, postignuta vrednost srednje kvadratne greške za određivanje R_a je 0.229, slika 6-27. Srednja kvadratna greška modela za određivanje MRR iznosila je 0.636, dok je kod modela za TWR iznosila 1.753.



Slika 6-27. Srednja kvadratna greška trening podataka pri obuci modela za određivanje R_a

Pošto su dobijene vrednosti greške treniranja zadovoljavajuće, prelazi se na testiranje dobijenog modela, slika 6-28. Postignuta srednja kvadratna greška testiranja modela za određivanje R_a iznosila je 1.9802, za MRR je 1.9293 i za TWR je 1.9344. Iako su srednje kvadratne greške testiranja izlaznih performansi PMEDM procesa lošije od vrednosti grešaka treniranja ANFIS modela, dobijena greška testiranja za sva tri modela je prihvatljiva.



Slika 6-28. Primer testiranja modela za određivanje R_a

Opisani pristup modelovanju ANFIS sistema podrazumeva samostalan izbor broja funkcija pripadnosti pridruženih svakom ulazu, kao i broj epoha za obuku fazi sistema. Ove karakteristike modela se određuju na osnovu intuicije i iskustva stvaraoca modela.

Pre definisanja konačnih ANFIS modela za određivanje performansi procesa PMEDM, prethodno su testirani svi modeli sa različitim tipovima funkcija pripadnosti. Najbolje rezultate su pokazali modeli sa Gausovom funkcijom pripadnosti na ulazima. Najveći uticaj na tačnost sva tri modela imao je broj funkcija pripadnosti svakog ulaza. Prihvatljive greške su postignute sa dve funkcije pripadnosti po svakom ulazu. Sa povećanjem broja funkcija pripadnosti preko dva, tačnost modela se povećava uz eksponencijalno povećanje vremena obuke. Međutim, pri kreiranju modela, sa tri funkcije pripadnosti na svakom ulazu, došlo je do pojave prevelikog podudaranja trening podataka, tzv. *overfitting*. Drugim rečuma, stvorila se situacija u kojoj je model savršeno vršio predikciju trening podataka, ali je pri tome imao veoma slabu sposobnost predikcije test podataka. Broj epoha obuke modela je prvobitno podešen na 500, gde se nakon 100 epoha srednja kvadratna greška modela nije menjala. Zanimljivo mali ili nikakvi efekti se ne postižu daljim povećanjem broja epoha. Ove činjenice su potvrđene i u literaturi [138, 139].

U tabeli 6-24. prikazani su rezultati ANFIS modela sa vrednostima srednjih kvadratnih grešaka za trening i test skupove podataka. Rezultati pokazuju da su broj podataka za treniranje i testiranje, broj funkcija pripadnosti, metod optimizacije i broj epoha, opravdano izabrani sa stanovišta vrednosti prosečne srednje kvadratne greške.

Tabela 6-24. Trening i test podaci za kreiranje ANFIS modela pri PMEDM legure titanijuma

| Redni broj | Faktor | | | | Eksperimentalne vrednosti | | | ANFIS vrednosti | | |
|---|--------------|---------------------|---------------|-----------|---------------------------|-------------------------------|------------|---------------------|-------------------------------|-------------|
| | I_e (A) | t_i (μ s) | τ (%) | GR g/l | R_a (μ m) | MRR (mm ³ /min) | TWR (%) | R_a (μ m) | MRR (mm ³ /min) | TWR (%) |
| Trening podaci | | | | | | | | | | |
| 1. | 3.2 | 75 | 40 | 3 | 3.81 | 1.55 | 35.85 | 3.81 | 1.28 | 34.74 |
| 2. | 6 | 75 | 40 | 3 | 8.15 | 8.56 | 27.78 | 8.15 | 8.15 | 26.90 |
| 3. | 3.2 | 180 | 40 | 3 | 4.16 | 2.22 | 44.27 | 4.16 | 2.22 | 44.76 |
| 4. | 3.2 | 75 | 60 | 3 | 3.95 | 1.66 | 42.87 | 3.95 | 1.39 | 42.56 |
| 5. | 6 | 75 | 60 | 3 | 8.52 | 9.81 | 29.79 | 8.52 | 9.40 | 29.61 |
| 6. | 3.2 | 75 | 40 | 9 | 3.98 | 1.62 | 36.62 | 3.98 | 1.35 | 35.71 |
| 7. | 6 | 75 | 40 | 9 | 7.81 | 8.65 | 24.88 | 7.81 | 8.24 | 24.14 |
| 8. | 6 | 180 | 40 | 9 | 11.65 | 5.15 | 29.78 | 11.65 | 5.15 | 29.90 |
| 9. | 3.2 | 75 | 60 | 9 | 4.12 | 1.74 | 37.95 | 4.12 | 1.47 | 37.58 |
| 10. | 6 | 180 | 60 | 9 | 8.63 | 6.19 | 31.03 | 8.63 | 6.19 | 31.81 |
| 11. | 1.5 | 130 | 50 | 6 | 1.95 | 0.51 | 52.66 | 1.95 | 0.51 | 52.59 |
| 12. | 7.5 | 130 | 50 | 6 | 12.56 | 11.23 | 26.67 | 12.56 | 6.97 | 26.13 |
| 13. | 4.5 | 24 | 50 | 6 | 5.25 | 3.75 | 25.08 | 5.79 | 6.09 | 31.02 |
| 14. | 4.5 | 240 | 50 | 6 | 7.32 | 2.88 | 37.23 | 7.83 | 3.02 | 38.84 |
| 15. | 4.5 | 130 | 50 | 0 | 8.52 | 3.91 | 40.58 | 8.03 | 4.04 | 38.05 |
| 16. | 4.5 | 130 | 50 | 12 | 6.25 | 5.06 | 34.25 | 5.69 | 5.19 | 33.93 |
| Prosečna srednja kvadratna greška (%): | | | | | | | | 0.26 | 0.64 | 1.75 |
| Test podaci | | | | | | | | | | |
| 17. | 6 | 180 | 40 | 3 | 11.78 | 4.98 | 31.99 | 15.37 | 2.51 | 32.57 |
| 18. | 3.2 | 180 | 60 | 3 | 4.25 | 2.35 | 44.97 | 5.30 | 1.84 | 46.58 |
| 19. | 4.5 | 130 | 30 | 6 | 6.52 | 3.98 | 33.01 | 6.86 | 4.32 | 34.69 |
| 20. | 6 | 180 | 60 | 3 | 11.95 | 5.34 | 33.83 | 14.50 | 2.99 | 35.39 |
| 21. | 3.2 | 180 | 60 | 9 | 4.23 | 2.45 | 39.04 | 1.54 | 2.42 | 39.82 |
| 22. | 4.5 | 130 | 70 | 6 | 6.85 | 5.34 | 41.26 | 6.70 | 4.91 | 38.27 |
| 23. | 4.5 | 130 | 50 | 6 | 7.01 | 4.77 | 40.39 | 6.78 | 4.61 | 36.42 |
| 24. | 3.2 | 180 | 40 | 9 | 4.01 | 4.01 | 40.98 | 2.88 | 2.25 | 41.00 |
| 25. | 6 | 75 | 60 | 9 | 7.85 | 9.47 | 30.78 | 10.32 | 9.06 | 30.51 |
| Prosečna srednja kvadratna greška (%): | | | | | | | | 1.98 | 1.93 | 1.94 |

6.2.2 Fazi sistem zaključivanja

Fazi sistem zaključivanja (*eng. Fuzzy Inference System – FIS*) se može definisati kao proces preslikavanja veličine iz određenog ulaza (*input*) do izlaza (*output*) primenjujući teoriju

fazi skupova. Model koji preslikava ulazne promenljive u izlaznu vrednost u osnovi se sastoji od ulaza, fazi kontrolera i izlaza. Preslikavanje ulaza u izlaz se odvija kroz sledeće faze pretvaranja: ulazne veličine u ulazne funkcije pripadnosti, ulazne funkcije pripadnosti u pravila, pravila u skup izlaznih karakteristika, izlazne karakteristike u izlazne funkcije pripadnosti i izlazne funkcije pripadnosti u jednu vrednost izlaza [129].

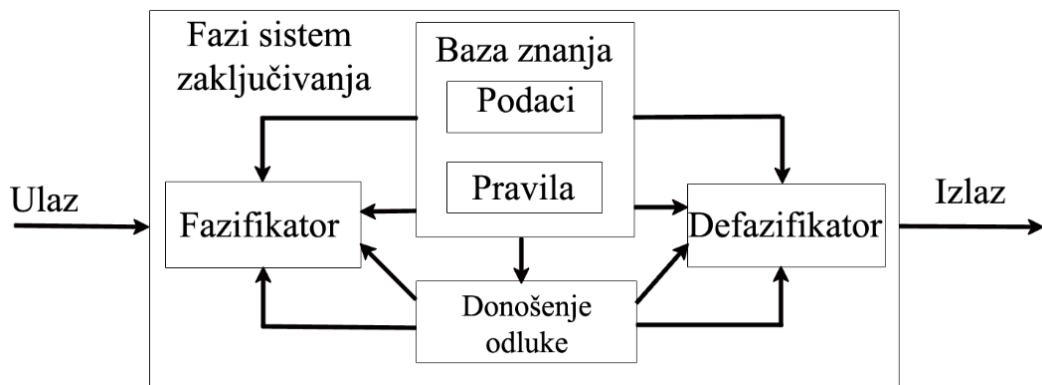
Osnovni elementi fazi logičkog kontrolera, koji čini jezgro svakog fazi sistema su: fazifikator, baza znanja, jedinica za donošenje odluka i defazifikator. Na slici 6-25. predstavljeni su osnovni elementi fazi sistema zaključivanja.

Fazifikator - element koji pretvara jednoznačne diskretne ulazne vrednosti u lingvističke fazi skupove. Najčešće su ulazne vrednosti predstavljene brojem, pri čemu se želi da i izlazna vrednost bude u brojanom obliku. Proces fazifikacije predstavlja definisanje stepena pripadnosti ulaznih promenljivih odgovarajućem skupu realnih vrednosti u intervalu od 0 do 1.

Baza znanja – predstavlja kompilaciju činjenica i postupaka posmatrane oblasti i sastoji se od dva elementa: baze podataka i baze pravila. Definisanje funkcija pripadnosti ulaznih/izlaznih promenljivih, koje se koriste u fazi pravilima, predstavlja bazu podataka. Uspešnost fazi sistema je u direktnoj vezi sa raspoloživom bazom podataka. Preko forme *AKO-ONDA* od niza fazi pravila sačinjena je baza pravila. Baza pravila sadrži znanja o tome kako najbolje kontrolisati sistem.

Jedinica za donošenje odluka – predstavlja modul koji omogućuje odlučivanje i sastoji se od dve faze: aktivacija i agregacija. Aktivacija predstavlja zaključak koji se izvodi u *ONDA* delu pravila. Postoje dve metode aktivacije fazi skupa i to su metoda *MIN* i metoda *PROD*. Metoda *MIN* vrši odsecanje, dok metodama *PROD* (produkt) vrši skaliranje – proporcionalno smanjenje. Svi aktivirani delovi fazi skupa se akumuliraju na različite načine i to preko metoda *MAKS* i *SUM*. Upoređujući skup fazifikovanih vrednosti sa memorisanim znanjem, kao izlaz ovog modula dobija se fazi skup.

Defazifikator – jedinica koja fazi skup pretvara u diskretne izlazne vrednosti. Defazifikacija fazi skupa se vrši metodama kao što su: centar gravitacije (*COG*), centar gravitacije za singleton (*COGS*), polovljenje prostora (*BOA*), srednja vrednost maksimuma (*MOM*), strana najvećeg maksimuma (*LM* - *levi maksimum* ili *RM* – *desni maksimum*).



Slika 6-29. Osnovni elementi fazi sistema zaključivanja [130]

Generisanje više-ulaznog više-izlaznog modela (AE+PM)EDM cirkonijum oksida, koji obuhvata izlazne performanse srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade i relativno trošenje alata, sprovedeno je primenom fazi logike. Za takvo modelovanje, pogodno je *Matlab* okruženje koje poseduje odgovarajući modul za modelovanje fazi sistema kao što je *Fuzzy Logic Toolbox*.

6.2.2.1 Fazi model izlaznih performansi kod (AE+PM)EDM cirkonijum oksida

Pomoću fazi logike kreiran je više-ulazno-više-izlazni (*Multiple-Input-Multiple-Output MIMO*) [140] model koji određuje izlazne performanse (AE+PM)EDM cirkonijum oksida: srednja aritmetička hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade i relativno trošenje alata.

Fazi sistem razlikuje dva tipa zaključivanja: *Mamdani* i *Sugeno* [138]. Ovi tipovi zaključivanja se razlikuju prema načinu definisanje izlaznih vrednosti. *Mamdani* tip sistema pretpostavlja da je izlazna veličina procesa zaključivanja fazi skup. Ovakav fazi skup zahteva agregacioni proces u postupku defazifikacije. Rezultujući fazi skupovi se kombinuju pomoću operatora agregacije: i (*AND*), ili (*OR*) i ne (*NOT*).

U mnogim slučajevima je potrebno koristiti jednu vrednost (singleton) kao izlazni fazi skup za svako pravilo zaključivanja, a ne distribuirani fazi skup. Ovakvo pojednostavljenje ubrzava računski postupak prilikom defazifikacije i čini zaključivanje efikasnijim. Umesto integracionog postupka dvodimenzionalne izlazne funkcije, koriste se težinski faktori pojedinačnih izlaznih tačaka. *Sugeno* tip podržava ovakav tip izlaznih funkcija, tj. podataka, u osnovi je veoma sličan *Mamdani* tipu fazi zaključivanja.

Prednost *Mamdani* tipa je u tome što se može koristiti za fazi sisteme sa više izlaza. Takođe ovaj tip zaključivanja obezbeđuje dobre rezultate sa relativno jednostavnom strukturom, kako zbog intuitivne, tako i interpretativne prirode. Stoga je u ovom istraživanju za kreiranje *MIMO* modela korišćen *Mamdani* tip zaključivanja.

Bez obzira na tip zaključivanja baza znanja generalno ima isti oblik. U sistemu sa jednim ulazom i jednim izlazom (*single-input-single-output - SISO*) baza znanja *R* sadrži *n* pravila u sledećem obliku:

$$R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\} \quad (6.17)$$

gde svako pravilo ima sledeći oblik:

$$AKO \ X \ je \ A \ ONDA \ Y \ je \ B \quad (6.18)$$

ili u matematičkom obliku:

$$\{AKO \ (uzrok) \ ONDA \ (posledica)\}_{i=1}^n \quad (6.19)$$

gde su *A* i *B* lingvističke vrednosti definisane fazi skupom sa rasponom od *X* do *Y*. *AKO* deo pravila “*X je A*” predstavlja ulazno stanje i može biti u složenijem obliku, npr. sa tri ulazne promenljive itd. Dok se deo pravila “*Y je B*” naziva posledicom, predstavlja izlazno stanje, koje takođe može biti u složenom obliku.

Za određivanje srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine, proizvodnosti obrade i relativnog trošenja alata, modelovan je proces (AE+PM)EDM cirkonijum oksida pomoću tri ulazna parametara: struje pražnjenja, dužine impulsa i koncentracije grafitnog praha.

Fazi izrazi za ulazne promenljive dati su u tabeli 6-25. Na slici 6-30.a prikazani su fazi skupovi za ulaznu promenljivu struja pražnjenja, gde su dodeljeni fazi izrazi za svaki skup. Stepenn pripadnosti svakog skupa jednak je 1 kada su vrednosti struje pražnjenja 1, 1.5 i 2 A. Na slikama 6-30.b i 6-30.c dati su stepeni pripadnosti za ostale ulazne promenljive. Broj funkcija pripadnosti (skupova) za svaku ulaznu promenljivu zavisi od broja variranja iste.

Tabela 6-25. Ulazne veličine i njihove jezičke promenljive

| <i>Ulazne promenljive</i> | Fazi skupovi | | |
|---|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Struja pražnjenja I_e Parametri MF: a, b, c | 1 [0.2 2.5 1] | 1.5 [0.2 2.5 1.5] | 2 [0.2 2.5 2] |
| Dužina impulsa t_i Parametri MF: a, b, c | 42 [11.6 2.5 42] | 75 [11.6 2.5 75] | 100 [11.6 2.5 100.2] |
| Konc. grafitnog praha GR Parametri MF: a, b, c | 0 [1.6 2.5 0] | 4 [1.6 2.5 4] | 8 [1.6 2.5 8] |

U tabeli 6-26. dati su nazivi funkcija pripadnosti (*eng. Membership Functions - MF*) sa parametrima podešavanja zvonaste funkcije (a, b, c). Za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine definisano je šest funkcija pripadnosti od najmanje ÷ veće, dok je za proizvodnost obrade i relativno trošenje alata izabrano sedam od najmanje ÷ najveće. Precizniji rezultati se mogu dobiti korišćenjem većeg broja funkcija pripadnosti za izlaz. Funkcije pripadnosti za izlazne promenljive prikazane su na slikama 6-30.d do 6-30.f.

Tabela 6-26. Izlazne promenljive sa parametrima funkcije pripadnosti

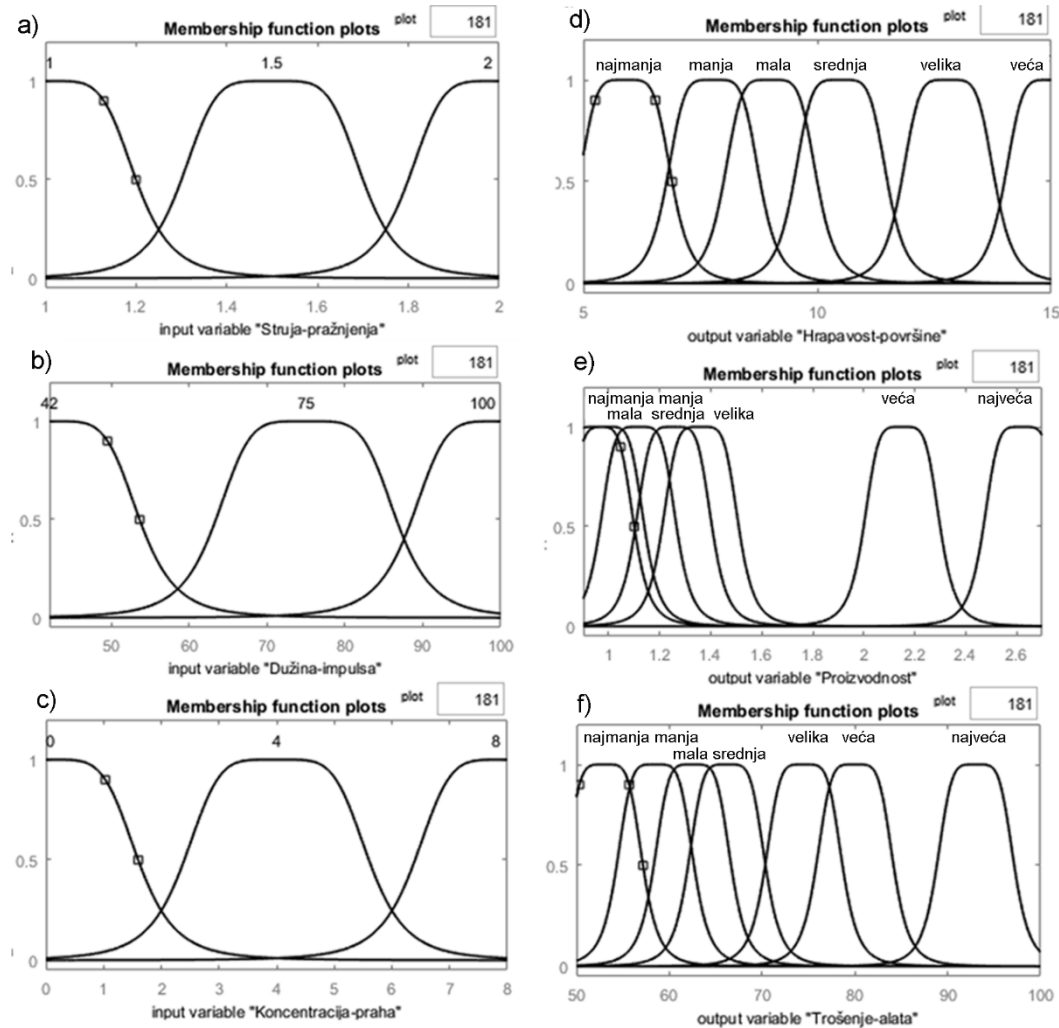
| <i>Izlaz</i> | Fazi skupovi | | | | | | |
|--------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|
| | najmanja | manja | mala | srednja | velika | veća | najveća |
| R_a a, b, c | 1 2.5 5.9 | 1 2.5 7.8 | 1 2.5 9 | 1 2.5 10.5 | 1 2.5 12.8 | 1 2.5 15 | / |
| MRR a, b, c | 0.15 2.5 1 | 0.15 2.5 1 | 0.15 2.5 1 | 0.15 2.5 1. | 0.15 2.5 1 | 0.15 2.5 2 | 0.15 2.5 2 |
| TWR a, b, c | 4.1 2.5 53 | 4.1 2.5 58.5 | 4.1 2.5 62.5 | 4.1 2.5 66.2 | 4.1 2.5 74.5 | 4.1 2.5 80 | 4.1 2.5 93 |

Postoji mnogo oblika funkcija pripadnosti, kao što su: trougaona, trapezna, Gausova itd. Sa aspekta jednostavnosti, pogodnosti i efikasnosti za izradu MIMO modela korišćena je zvonasta funkcija pripadnosti, definisana jednačinom.

$$f(a, b, c) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x-c}{a} \right)^2 \right]^b} \quad (6.20)$$

gde su a, b i c parametri koji definišu oblik funkcije za ulaznu veličinu x .

Oblik zvona zavisi od tri parametra a , b , c , gde se promenom ovih parametara definiše oblik funkcije pripadnosti.



Slika 6-30. Funkcije pripadnosti za ulazne i izlazne promenljive

Koncept fazi logičkog zaključivanja sa tri ulaza i tri izlaza opisan je na sledeći način: baza znanja sastoji se od grupe AKO-ONDA pravila za tri ulaza: x_1 – struja pražnjenja, x_2 – dužina impulsa i x_3 – koncentracija grafitnog praha i tri izlaza: y_1 – srednja aritmetička hrapavost obrađene površine, y_2 – proizvodnost obrade i y_3 – relativno trošenje alata. Opšti oblik sistema sa više ulaza i više izlaza opisan je kroz sledeću jednačinu:

Ulaz: x_1 je I_{e_i} je x_2 je t_{i_i} i x_3 je GR_i

R_1 : x_1 je I_{e_1} i x_2 je t_{i_1} i x_3 je GR_1 ONDA y_1 je R_{a_1} i y_2 je MRR_1 i y_3 je TWR_1

R_2 : x_1 je I_{e_2} i x_2 je t_{i_2} i x_3 je GR_2 ONDA y_1 je R_a i y_2 je MRR_2 i y_3 je TWR_2

⋮

R_i : x_1 je I_{e_i} i x_2 je t_{i_i} i x_3 je GR_i ONDA y_1 je R_a i y_2 je MRR_i i y_3 je TWR_i

$$\text{Izlaz: } y_1 \text{ je } R_a' \text{ i } y_2 \text{ je } MRR_i \text{ } y_3 \text{ je } TWR' \quad (6.21)$$

Ovde su x_1 , x_2 i x_3 ulazne promenljive fazi sistema, odnosno y_1 , y_2 i y_3 izlazne promenljive koje su definisane kroz lingvističke vrednosti I_{ei} , t_{ii} i GR_i za ulazne veličine i R_{ai} , MRR_i i TWR_i za izlazne veličine. Nakon definisanja stepena pripadnosti za svaki skup sledi proces implikacije (ishod konjunkcije prema logičkim operatorima), koji modifikuje fazi skup na osnovu prethodnih stepena pripadnosti (*antecedent*). Najčešći način za modifikovanje izlaznog fazi skupa je skraćivanje pomoću funkcije *MIN*.

Svako pravilo iz postojeće baze pravila prolazi kroz fazu implikacije, pa se svako pravilo može predstaviti preko jednačine:

$$\begin{aligned} \mu_{Ri} &= \mu_{(I_{ei} \wedge t_{ii} \wedge GR_i \Rightarrow R_{ai} \wedge MRR_i \wedge TWR_i)}(x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3) = \\ &= [\mu_{I_{ei}}(x_1) \wedge \mu_{t_{ii}}(x_2) \wedge \mu_{GR_i}(x_3)] \Rightarrow \mu_{R_{ai}}(y_1) \wedge \mu_{MRR_i}(y_2) \wedge \mu_{TWR_i}(y_3) \end{aligned} \quad (6.22)$$

gde su $\mu_{I_{ei}}$, $\mu_{t_{ii}}$, μ_{GR_i} stepen pripadnosti fazi skupovima ulaznih promenljivih I_e , t_i , GR , dok su μ_{R_a} , μ_{MRR} , μ_{TWR} stepen pripadnosti fazi skupovima izlaznih promenljivih R_a , MRR , TWR .

Za proces implikacije korišćen je *Mamdani MIN* operator. Pri čemu operator implikacije kao ulaznu funkciju prethodnika (*antecedent*) $\mu_{I_{ei}}(x_1) \wedge \mu_{t_{ii}}(x_2) \wedge \mu_{GR_i}(x_3)$ dok je funkcija $\mu_{R_a}(y_1) \wedge \mu_{MRR}(y_2) \wedge \mu_{TWR}(y_3)$ posledica (*consequent*). Svako pravilo ima svoj težinski broj od 0 do 1.

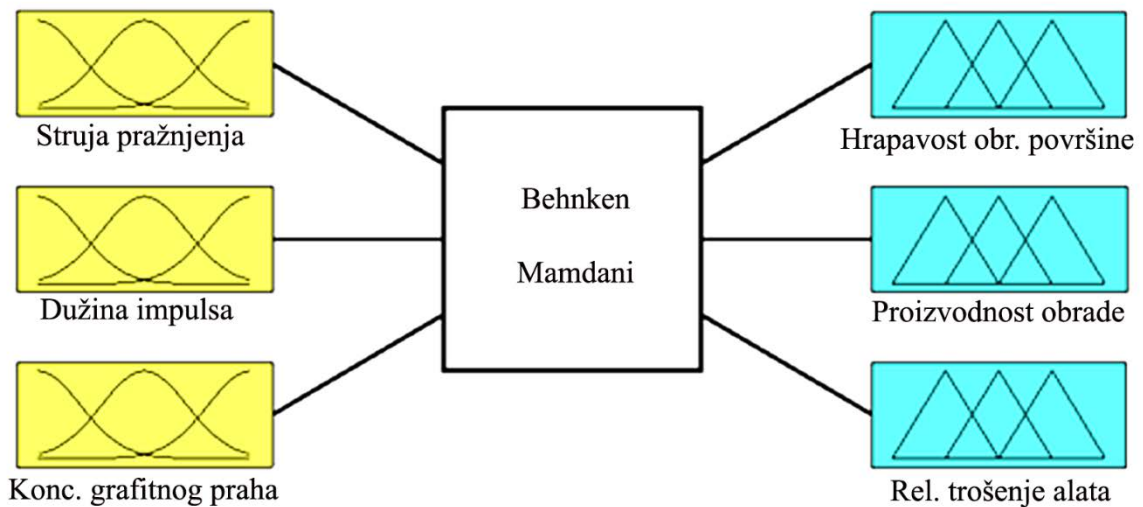
Metoda defazifikacije se koristi za transformaciju fazi izlazne vrednosti u diskretnu vrednost y . Za kreiranje ovog modela izabrana je metoda centar gravitacije (COG). Brojčana vrednost y je apcisa centra gravitacije fazi skupa, a koja se dobija akumulacijom izlaznih skupova svakog pravila. Brojčane vrednosti za model sa tri izlaza se definišu preko sledeće jednačine:

$$y_1' = \frac{\sum_{i=1}^n y_1 \mu_{R_{ai}}(y_1)}{\sum_{i=1}^n \mu_{R_{ai}}(y_1)} \quad \wedge \quad y_2' = \frac{\sum_{i=1}^n y_2 \mu_{MRR_i}(y_2)}{\sum_{i=1}^n \mu_{MRR_i}(y_2)} \quad \wedge \quad y_3' = \frac{\sum_{i=1}^n y_3 \mu_{TWR_i}(y_3)}{\sum_{i=1}^n \mu_{TWR_i}(y_3)} \quad (6.23)$$

gde su y_1' , y_2' i y_3' defazifikovane diskretne izlazne vrednosti, odnosno predstavljaju vrednosti za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade i relativno trošenje alata. Veličine $\mu_{R_a}(y_1)$, $\mu_{MRR}(y_2)$ i $\mu_{TWR}(y_3)$ predstavljaju funkcije pripadnosti nakon procesa agregacije, dok su y_1 , y_2 i y_3 izlazne promenljive, odnosno srednja vrednost centra regiona posmatranog fazi skupa.

Na slici 6-31. prikazan je MIMO model za određivanje izlaznih performansi kod (AE+PM)EDM cirkonijum oksida.

Fazi pravila se predstavljaju u formi AKO-ONDA i imaju ključno mesto u fazi sistemu zaključivanja. Baza pravila za predstavljeni fazi sistem koju čini skup pravila, je zasnovana na eksperimentalnim podacima prema BBD planu. Kao što je predstavljeno u radu *Khalaj* i ostali [141] ljudska stručnost je takođe neophodna da bi se dobili zadovoljavajući rezultati modela. U tabeli 6-27. je data redukovana baza pravila za MIMO model.



Slika 6-31. MIMO model za određivanje izlaznih performansi kod (AE+PM)EDM cirkonijum oksida

Iz tabele 6-27. se vidi da pravila pod rednim brojevima 2 i 3 poseduju identične izlazne skupove E, G, B. Nije preporučljivo da se u bazi nalaze pravila sa istim ishodom pa se pristupilo redukciji. Umesto pravila 2 i 3 uvedeno je jedno pravilo, odnosno:

Pravilo 2:

Ako je $I_e = 2$ i Ako je $t_i = 75$ i Ako je $GR = 8$ ONDA je $R_a =$ velika i $MRR =$ najveća i $TWR =$ manja.

Pravilo 3:

Ako je $I_e = 2$ i Ako je $t_i = 100$ i Ako je $GR = 4$ ONDA je $R_a =$ velika i $MRR =$ najveća i $TWR =$ manja.

redukuje se pravilo:

Ako je $I_e = 2$ i Ako je $t_i =$ ne 42 i Ako je $GR =$ ne 0 ONDA je $R_a =$ velika i $MRR =$ najveća i $TWR =$ manja.

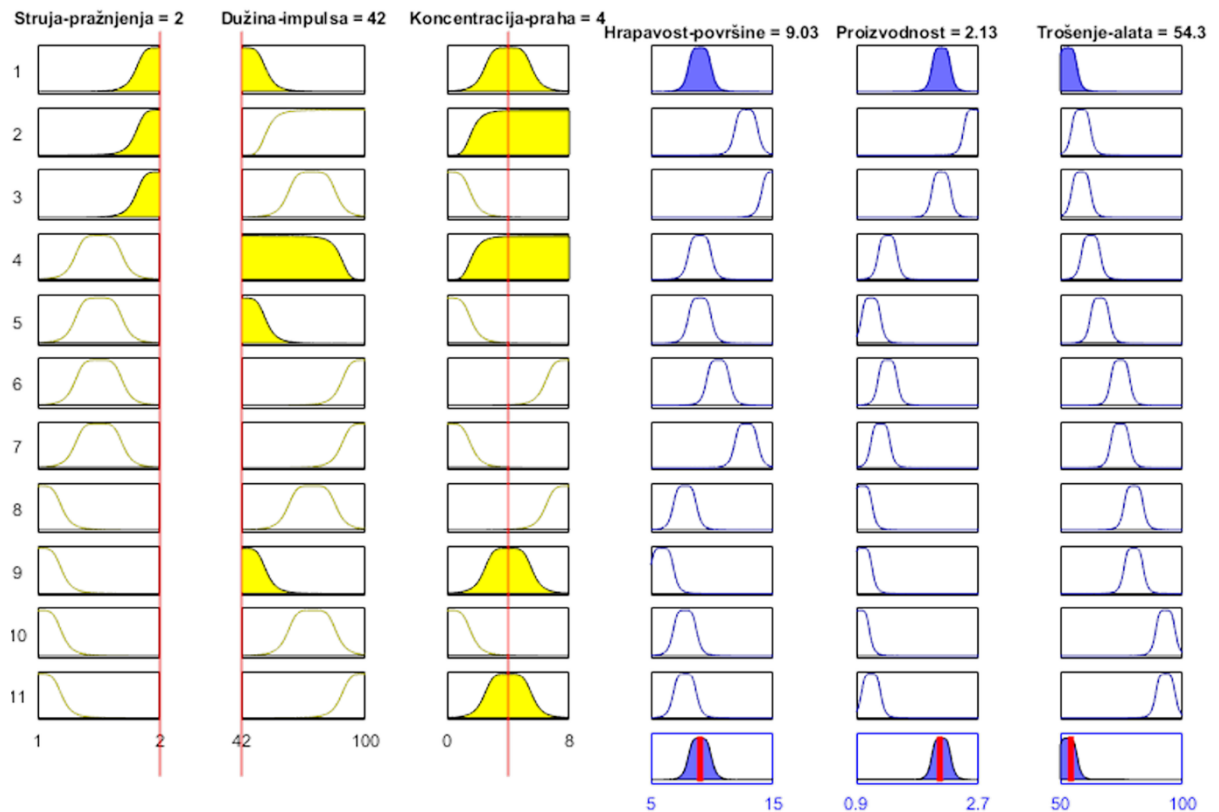
Isti princip primenjen je na pravila 5. i 6. Redukciono pravilo koje zamenjuje pravila 5. i 6. glasi:

Ako je $I_e = 1.5$ i Ako je $t_i =$ ne 100 i Ako je $GR =$ ne 0 ONDA je $R_a =$ mala i $MRR =$ velika i $TWR =$ najveća.

Nakon analize i redukcije pravila, baza znanja se sastoji od 11 produkcionih pravila. Na slici 6-32. prikazana je baza znanja MIMO modela.

Tabela 6-27. Baza pravila za MIMO model

| Redni broj | Ulazne promenljive | | | Izlazne promenljive | | |
|--------------------------|--------------------|---------------|-------------|---------------------|----------------|--------------|
| | I_e | t_i | GR | R_a | MRR | TWR |
| 1. | 2 | 42 | 4 | mala | veća | najmanja |
| 2. | 2 | 75 | 8 | velika | najveća | manja |
| 3. | 2 | 100 | 4 | velika | najveća | manja |
| Redukcija 2. i 3. | 2 | ne 42 | ne 0 | velika | najveća | manja |
| 4. | 2 | 75 | 0 | veća | veća | manja |
| 5. | 1.5 | 42 | 8 | mala | velika | mala |
| 6. | 1.5 | 75 | 4 | mala | velika | mala |
| Redukcija 5. i 6. | 1.5 | ne 100 | ne 0 | mala | velika | mala |
| 7. | 1.5 | 42 | 0 | mala | mala | srednja |
| 8. | 1.5 | 100 | 8 | srednja | velika | velika |
| 9. | 1.5 | 100 | 0 | velika | srednja | velika |
| 10. | 1 | 75 | 8 | manja | manja | veća |
| 11. | 1 | 42 | 4 | najmanja | manja | veća |
| 12. | 1 | 75 | 0 | manja | najmanja | najveća |
| 13. | 1 | 100 | 4 | manja | mala | najveća |

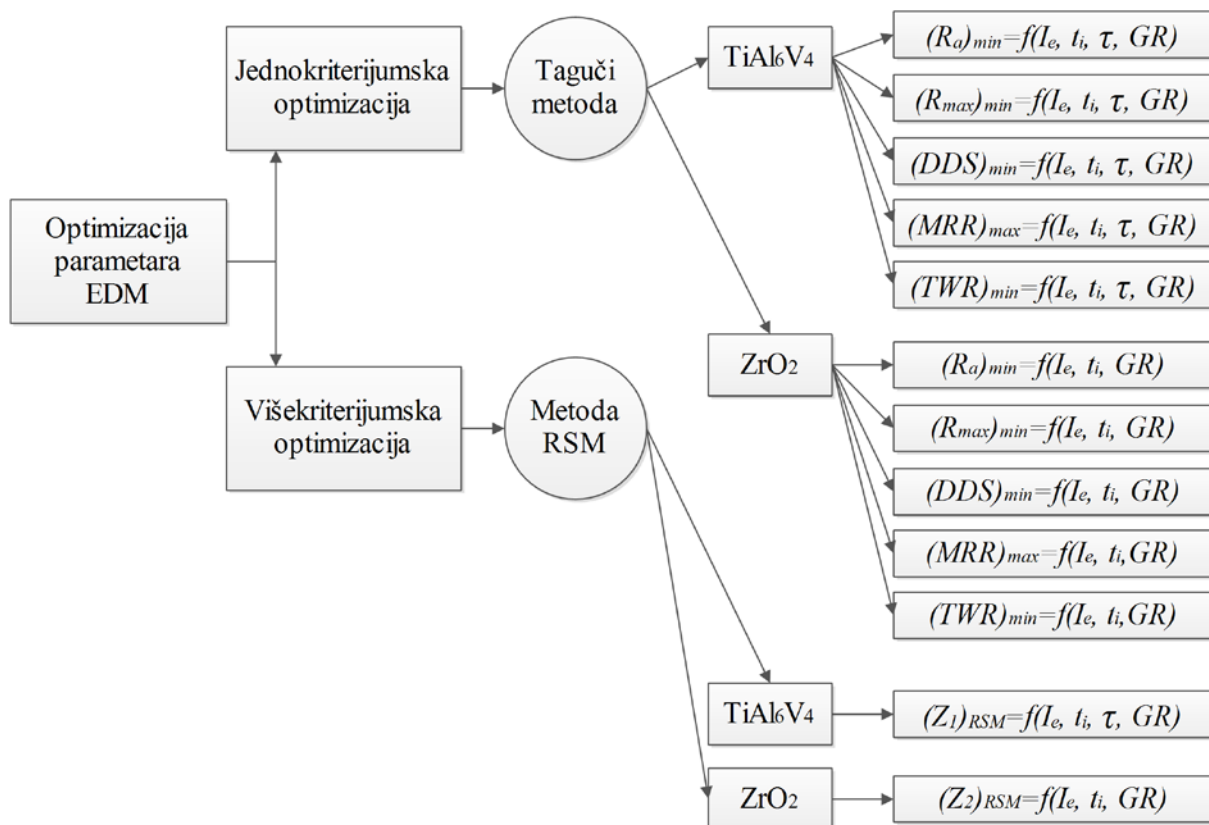


Slika 6-32. Baza znanja MIMO modela od 11 produkcionih pravila

7. OPTIMIZACIJA PROCESA ELEKTROEROZIVNE OBRADE

Optimizacija ulaznih parametara obrade predstavlja jedno od glavnih polja istraživanja u oblasti EDM. Prema dostupnoj literaturi jednako se primenjuju jednokriterijumske i višekriterijumske metode optimizacije [142-145]. Pravilnim izborom ulaznih parametara i metode optimizacije, izlazne performanse procesa se mogu značajno poboljšati. Potrebno je istaći da se u nekim slučajevima, pri optimalnom podešavanju ulaznih parametara u zavisnosti od jedne funkcije cilja, mogu pogoršati druge izlazne performanse. Shodno tome, ključno je kvantifikovati relacije ulaznih parametara i performansi obrade modelovanjem, nakon čega se primenom različitih metoda definišu optimalni uslovi obrade.

Na slici 7-1. je prikazan blok dijagram primenjenih metoda optimizacije, kako jednokriterijumskih, tako i višekriterijumskih pri EDM oba materijala obratka.



Slika 7-1. Blok šema primenjenih metoda optimizacije

7.1 JEDNOKRITERIJUMSKA METODA OPTIMIZACIJE

U cilju jednokriterijumske optimizacije PMEDM i (AE+PM)EDM parametara primenjena je Tagučih metoda, gde su optimizovane izlazne performanse R_a , R_{max} , DDS , MRR i TWR , pri eksperimentima izvedenim na osnovu Tagučih ortogonalnog niza $L_9(3^4)$ kod PMEDM legure

titanijuma i (AE+PM)EDM cirkonijum oksida. Ova metoda ne zahteva generisanje matematičkog modela i predstavlja jedan alternativni pristup za identifikaciju optimalnih ulaznih parametara. Prednosti Tagučij metode se ogledaju u jednostavnom i sistemski efikasnom pristupu optimizaciji [146, 147].

7.1.1 Tagučij metoda

Japanski naučnik Geniči Tagučij uvođenjem pristupa optimizacije je proširio koncept eksperimentalnog projektovanja. Njegov pristup se ogleda u podeli problema optimizacije u dve kategorije, gde se logaritamska funkcija posmatranog odziva koristi kao ciljna funkcija optimizacije poznata pod nazivom signal-šum S/N (*eng. signal-to-noise – S/N*).

U prvu kategoriju problema optimizacije spadaju statički problemi gde više kontrolisanih ulaznih parametara određuju vrednost izlazne promenljive. U cilju određivanja uticaja svake ulazne promenljive na posmatrani odziv, potrebno je izračunati odnos signal-šum S/N (*signal-to-noise*). Odnos signal-šum interpretira meru za analizu i ocenu eksperimentalnih rezultata. Na osnovu S/N odnosa se može proceniti uticaj promene ulaznih parametara na izlaznu veličinu. Dinamički problemi spadaju u drugu grupu problema optimizacije, gde jedan ulazni parametar direktno određuje vrednost izlazne promenljive.

Razlikuju se tri pristupa problemu statičke optimizacije: manje je bolje (*smaller-the-better*), veće je bolje (*larger-the-better*) i nominalno je bolje (*nominal-is-better*).

Pristup "manje je bolje" primenjuje se za slučaj kada se teži minimalnoj vrednosti odziva, jednačina:

$$(S/N)_j = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_{ij}^2], \quad j = 1 \dots m \quad (7.1)$$

Kada se teži maksimalnoj ciljnoj vrednosti odziva primenjuje se pristup "veće je bolje", jednačina:

$$(S/N)_j = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{y_{ij}^2} \right] \right], \quad j = 1 \dots m \quad (7.2)$$

Za slučaj kada se teži ka srednjoj vrednosti odziva koristi se "nominalno je bolje", jednačina:

$$(S/N)_j = 10 \log \frac{\bar{y}}{s_y^2} \quad (7.3)$$

Ovde su: n – broj ponavljanja eksperimenta

y_{ij} – izmerena vrednost izlazne vrednosti

\bar{y} – srednja vrednost izmerenih izlaznih veličina

s_y^2 – disperzija od veličine y .

U zavisnosti od razmatranja tipa izlaznih parametara, različiti pristupi Tagučići metode se koriste. Za svaki izabrani tip izlaznih vrednosti važi da veći S/N odnos predstavlja bolji rezultat.

Analiza rezultata eksperimenta prema Tagučići planu se uglavnom sprovodi kroz niz statističkih proračuna, kao što su: proračuni srednjih efekata nivoa faktora i optimalnih uslova, kao i procena izlazne veličine na optimalnom nivou.

Srednji efekat faktora A na nivou 1, za Tagučići ortogonalni niz $L_9(3^4)$ se računa prema jednačini:

$$\bar{A}_1 = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} = \frac{y_{A1}}{3} \quad (7.4)$$

U jednačini 7.4. je prikazan primer proračuna srednjeg efekta faktora A na prvom nivou gde su varirana četiri faktora na tri nivoa. Ovde su y_1 , y_2 i y_3 rezultati eksperimenata za koji faktor A ima prvi nivo. Na sličan način može se izračunati srednji efekat faktora za ostale ulazne parametre.

Prosek svih rezultata eksperimenata ili srednja vrednost izmerenih izlaznih performansi za ortogonalni niz $L_9(3^4)$ se računa prema jednačini:

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_9}{9} \quad (7.5)$$

Doprinos svakog ulaznog faktora, kada je postavljen na željeni nivo, predstavlja razliku srednjeg efekta faktora i ukupnog proseka performanse. Primer računanja doprinosa faktora, kada je postavljen na nivo 1 se može predstaviti preko jednačine:

$$A = \bar{A}_1 - \bar{y} \quad (7.6)$$

Procena izlazne veličine pri optimalnim vrednostima ulaznih parametara se dobija sabiranjem svih doprinosa svakog ulaznog faktora sa srednjom vrednosti izlaznih performansi. Ako je optimalna kombinacija ulaznih parametara za posmatranu izlaznu karakteristiku ortogonalnog niza $L_9(3^4)$ A = 1, B = 2 i C = 3, očekivani optimalni nivoi se mogu izračunati prema jednačini:

$$y_{opt} = \bar{y} + (\bar{A}_1 - \bar{y}) + (\bar{B}_2 - \bar{y}) + (\bar{C}_3 - \bar{y}) \quad (7.7)$$

Korišćenjem optimalnih nivoa ulaznih faktora može se izračunati očekivani S/N odnos optimalnih nivoa:

$$S/N_{opt} = \bar{S}/N + \sum_{i=1}^p (S/N_{i_{opt}} - \bar{S}/N) \quad (7.8)$$

gde je:

$$\bar{S/N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S/N_i \quad (7.9)$$

gde su:

- S/N_{opt} – S/N odnos i -tog faktora na optimalnom nivou
- $\bar{S/N}$ – ukupna vrednost S/N odnosa
- p – broj faktora koji utiču na izlaznu karakteristiku
- S/N_i – S/N odnos u i -tom eksperimentu.

Očekivana izlazna vrednost na optimalnom nivou se može izračunati na osnovu očekivanog S/N odnosa na optimalnom nivou u zavisnosti od pristupa koji je primenjen (manje je bolje i sl.). Primer računanja izlazne vrednosti na optimalnom nivou za pristup manja je bolja prikazan je u jednačini:

$$y_{opt} = 10^{\frac{-S/N_{opt}}{20}} \quad (7.10)$$

Za statističku obradu podataka prema opisanim jednačinama korišćen je softverski alat *MiniTab* 17.

7.1.1.1 Optimizacija parametara PMEDM legure titanijuma

Na osnovu izmerenih vrednosti R_a , R_{max} , DDS , MRR i TWR izračunat je S/N odnos za svih 9 eksperimenata. Vrednosti S/N odnosa za R_a , R_{max} , DDS i TWR su izračunate na osnovu Taguči karakteristike kvaliteta "manje je bolje", dok je za MRR S/N odnos izračunat na osnovu kriterijuma "veće je bolje", tabela 7-1.

Tabela 7-1. S/N odnosi za izlazne performanse PMEDM legure titanijuma

| Redni broj | Faktor | | | | S/N odnosi izlaznih performansi | | | | |
|------------|--------------|---------------------|---------------|-------------|-----------------------------------|-----------|--------|-------|--------|
| | I_e (A) | t_i (μ s) | τ (%) | GR g/l | R_a | R_{max} | DDS | MRR | TWR |
| 1. | 1.5 | 32 | 30 | 0 | -5.01 | -20.64 | -16.27 | -8.18 | -35.17 |
| 2. | 1.5 | 75 | 50 | 6 | -6.06 | -21.16 | -16.31 | -6.38 | -34.76 |
| 3. | 1.5 | 180 | 70 | 12 | -8.33 | -21.96 | -16.80 | -3.74 | -33.89 |
| 4. | 3.2 | 32 | 50 | 12 | -10.81 | -24.99 | -19.39 | 11.46 | -30.20 |
| 5. | 3.2 | 75 | 70 | 0 | -12.27 | -28.07 | -20.44 | 11.05 | -32.92 |
| 6. | 3.2 | 180 | 30 | 6 | -13.01 | -27.45 | -21.06 | 14.17 | -31.42 |
| 7. | 6.0 | 32 | 70 | 6 | -18.19 | -31.41 | -22.01 | 17.17 | -28.07 |
| 8. | 6.0 | 75 | 30 | 12 | -17.09 | -32.34 | -21.22 | 18.29 | -28.75 |
| 9. | 6.0 | 180 | 50 | 0 | -19.86 | -34.39 | -22.41 | 17.99 | -29.34 |

Rezultati dobijeni pomoću Tagučić metode su potvrđeni u poglavlju 8.1.1 pomoću ANOVA analiza. Uobičajeni način analize i sumiranja rezultata je i preko ANOVA (*analiza varijacija*) tabele. Analiza varijanse (ANOVA) je statistička tehnika koja se koristi za procenu relativnog značaja svakog faktora procesa. Glavni cilj ANOVA analize je da iz rezultata eksperimenta dobije odgovor, koliko varijacija svakog faktora utiče na ukupnu varijaciju posmatranog rezultata.

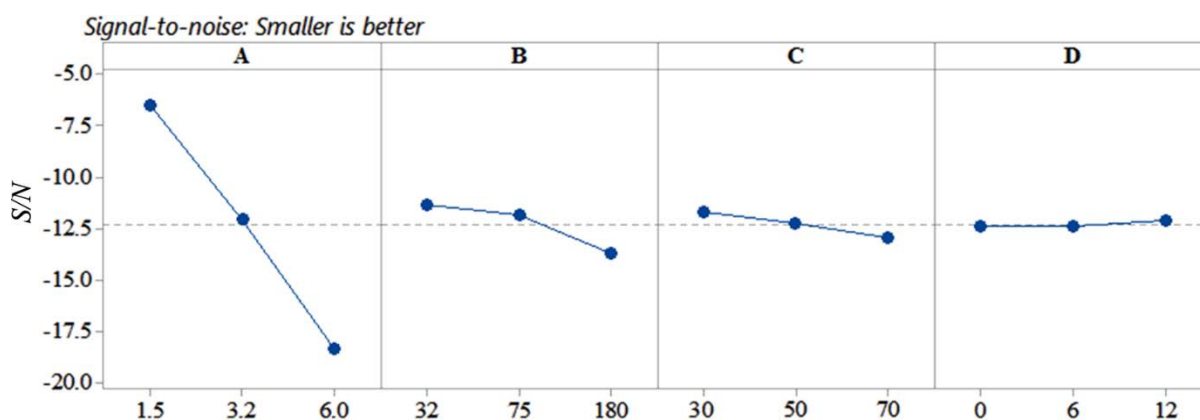
Srednja aritmetička hrapavost obrađene površine

U tabeli 7-2. prikazani su S/N odnosi sa svaki faktor i odgovarajući nivo za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine. Faktori sa najvećom razlikom srednjih vrednosti (max-min) imaju najveći uticaj na izlaznu veličinu. Iz tabele se vidi da najveći uticaj na R_a ima struja pražnjenja, zatim dužina impulsa, pa koeficijent delovanja impulsa i koncentracija grafitnog praha.

Tabela 7-2. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za R_a)

| Redni broj | Faktori | S/N odnos | | | max-min | Rang |
|------------|--|-------------|--------|--------|---------|------|
| | | Nivoi | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1. | (A) Struja pražnjenja | -6.46 | -12.03 | -18.38 | 11.91 | 1 |
| 2. | (B) Dužina impulsa | -11.33 | -11.81 | -13.73 | 2.39 | 2 |
| 3. | (C) Koeficijent delovanja impulsa | -11.71 | -12.24 | -12.93 | 1.22 | 3 |
| 4. | (D) Koncentracija grafitnog praha | -12.38 | -12.42 | -12.07 | 0.34 | 4 |

Uticaj pojedinih ulaznih parametara na izlazne performanse procesa obrade se može predstaviti pomoću odzivnog grafika, koji pokazuje promenu odnosa S/N u trenutku promene nivoa upravljačkog parametra od 1 do 3. Shodno tome, uticaj pojedinih parametara na izlaznu karakteristiku procesa obrade izražen je grafički pomoću ugla nagiba prave koja povezuje različite nivoe parametara. Posmatranjem nagiba pravih vidi se da je najstrmija prava kod faktora A, pa onda B, pa C i na kraju D. Ovaj redosled odgovora izračunatom rang (tabela 7-2). Prema slici 7-2. najveći S/N odnos pokazuje optimalan nivo svakog faktora. Stoga, na osnovu kriterijuma "manja je bolja", optimalna kombinacija ulaznih parametara PMEDM legure titanijuma u funkciji minimalne srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine je A=1, B=1, C=1 i D=3.



Slika 7-2. Grafički prikaz S/N odnosa za R_a

Predikcija vrednosti izlazne performanse ($R_a = 1.72 \mu\text{m}$) i proračun odgovarajućeg S/N odnosa ($S/N = -19.42$) na osnovu optimalne kombinacije ulaznih parametara dati su u tabeli 7-3.

Tabela 7-3. Optimalno podešavanje ulaznih parametara za R_a

| Ulazni parametri | Nivo | Podešavanje parametara | Dobijeno R_a primenom Taguči metode |
|--|------|------------------------|---|
| Struja pražnjenja I_e (A) | 1 | 1.5 | $S/N = -4.71$ $R_a = 1.72 \mu\text{m}$ |
| Dužina impulsa t_i (μs) | 1 | 32 | |
| Koeficijent delovanja impulsa τ (%) | 1 | 30 | |
| Koncentracija grafitnog praha GR (g/l) | 3 | 12 | |

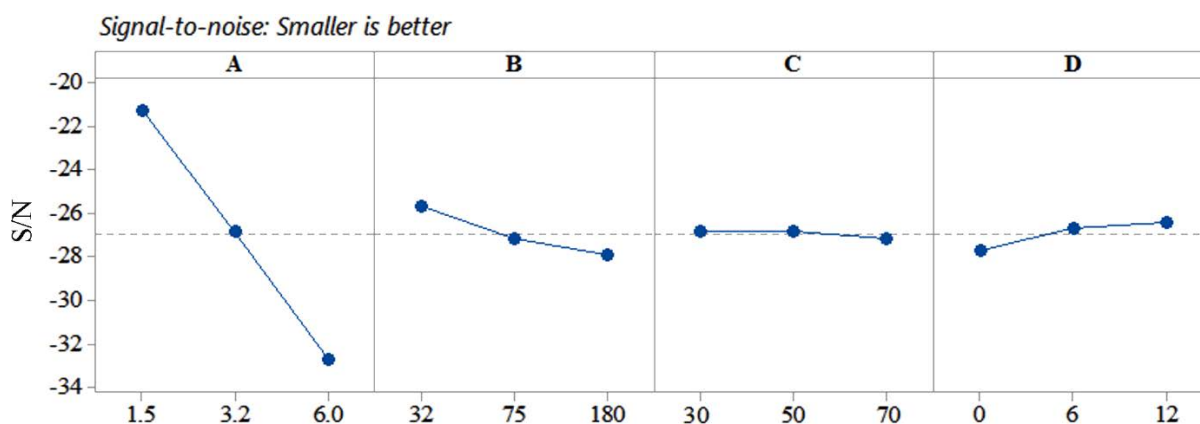
Maksimalna visina neravnina obrađene površine

Optimizacija ulaznih parametara u funkciji maksimalne visine neravnina obrađene površine je urađena prema kriterijumu "manja je bolje". Dobijene vrednosti S/N odnosa za svaki ulazni parametar i odgovarajući nivo prikazane su u tabeli 7-4.

Tabela 7-4. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za R_{max})

| Redni broj | Faktori | S/N odnos | | | max-min | Rang |
|------------|-----------------------------------|-------------|--------|--------|---------|------|
| | | Nivoi | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1. | (A) Struja pražnjenja | -21.26 | -26.84 | -32.72 | 11.46 | 1 |
| 2. | (B) Dužina impulsa | -25.69 | -27.20 | -27.94 | 2.25 | 2 |
| 3. | (C) Koeficijent delovanja impulsa | -26.81 | -26.85 | -27.15 | 0.34 | 4 |
| 4. | (D) Koncentracija grafitnog praha | -27.7 | -26.68 | -26.44 | 1.27 | 3 |

Na osnovu vrednosti S/N odnosa iz tabele 7-4. dobijeni su grafici prikazani na slici 7-3. Može se videti da najveći uticaj na maksimalnu visinu neravnina ima struja pražnjenja, pa onda dužina impulsa, koncentracija grafitnog praha i koeficijent delovanja impulsa.



Slika 7-3. Grafički prikaz S/N odnosa za R_{max}

Optimalna kombinacija parametara je $A = 1$, $B = 1$, $C = 2$ i $D = 3$ na osnovu kriterijuma "manja je bolja", omogućava minimalnu vrednost maksimalne visine neravnina obrađene površine. Vrednost S/N odnosa na optimalnom nivou iznosi -19.42, dok je predikcija maksimalne visine neravnina pri optimalnim parametrima $R_{max} = 9.35 \mu\text{m}$, tabela 7-5.

 Tabela 7-5. Optimalno podešavanje ulaznih parametara za R_{max}

| Ulazni parametri | Nivo | Podešavanje parametara | Dobijeno R_{max} primenom Taguči metode |
|--|------|------------------------|--|
| Struja pražnjenja I_e (A) | 1 | 1.5 | $S/N = -19.42$ $R_{max} = 9.35 \mu\text{m}$ |
| Dužina impulsa t_i (μs) | 1 | 32 | |
| Koeficijent delovanja impulsa τ (%) | 2 | 50 | |
| Koncentracija grafitnog praha GR (g/l) | 3 | 12 | |

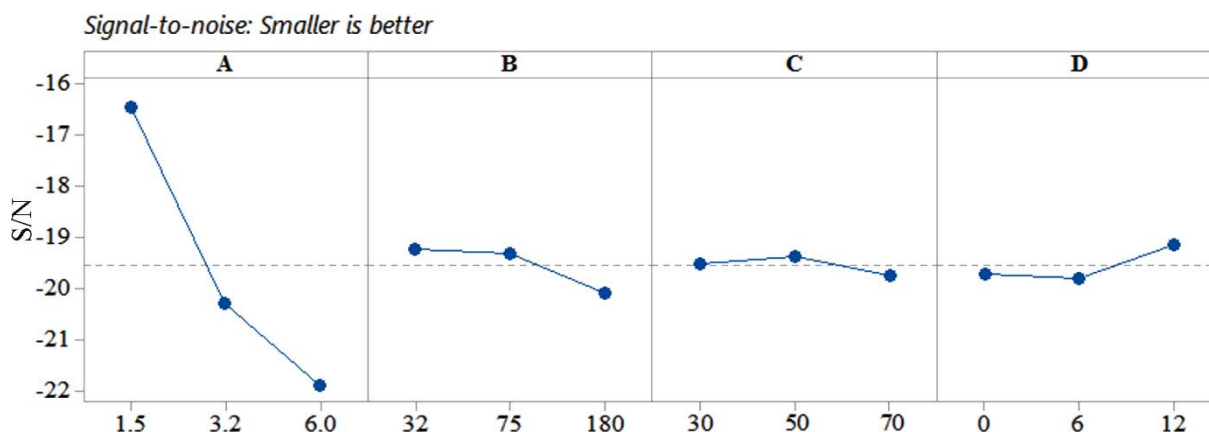
Debljina defektnog sloja materijala obratka

Vrednosti S/N odnosa za faktore i njihove nivoe sa obzirom na debljinu defektnog sloja materijala obratka, date su u tabeli 7-6. Za ulazne parametre procesa prikazan je S/N grafik na slici 7-4.

 Tabela 7-6. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za DDS)

| Redni broj | Faktori | S/N odnos | | | max-min | Rang |
|------------|-----------------------------------|-------------|--------|--------|---------|------|
| | | Nivoi | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1. | (A) Struja pražnjenja | -16.46 | -20.3 | -21.88 | 5.42 | 1 |
| 2. | (B) Dužina impulsa | -19.23 | -19.32 | -20.09 | 0.87 | 2 |
| 3. | (C) Koeficijent delovanja impulsa | -19.52 | -19.37 | -19.75 | 0.38 | 4 |
| 4. | (D) Koncentracija grafitnog praha | -19.71 | -19.8 | -19.14 | 0.66 | 3 |

Uočljivo je da najveći uticaj na debljinu defektnog sloja materijala obratka ima struja pražnjenja, zatim dužina impulsa, koncentracija grafitnog praha i koeficijent delovanja impulsa.


 Slika 7-4. Grafički prikaz S/N odnosa za DDS

Optimizacija parametara PMEDM legure titanijuma, s obzirom na ponuđene nivoe, predlaže optimalnu kombinaciju ulaznih parametara $A = 1$, $B = 1$, $C = 2$ i $D = 3$, a koja omogućava optimalnu vrednost debljine defektnog sloja, tabela 7-7.

Tabela 7-7. Optimalno podešavanje ulaznih parametara za DDS

| Ulazni parametri | Nivo | Podešavanje parametara | Dobijeno DDS primenom Taguči metode |
|--|------|------------------------|--|
| Struja pražnjenja I_e (A) | 1 | 1.5 | $S/N = -15.56$ $DDS = 5.99 \mu\text{m}$ |
| Dužina impulsa t_i (μs) | 1 | 32 | |
| Koeficijent delovanja impulsa τ (%) | 2 | 50 | |
| Koncentracija grafitnog praha GR (g/l) | 3 | 12 | |

Optimalna vrednost debljine defektnog sloja iznosi $DDS = 5.99 \mu\text{m}$ za dobijeni S/N odnos od -15.56.

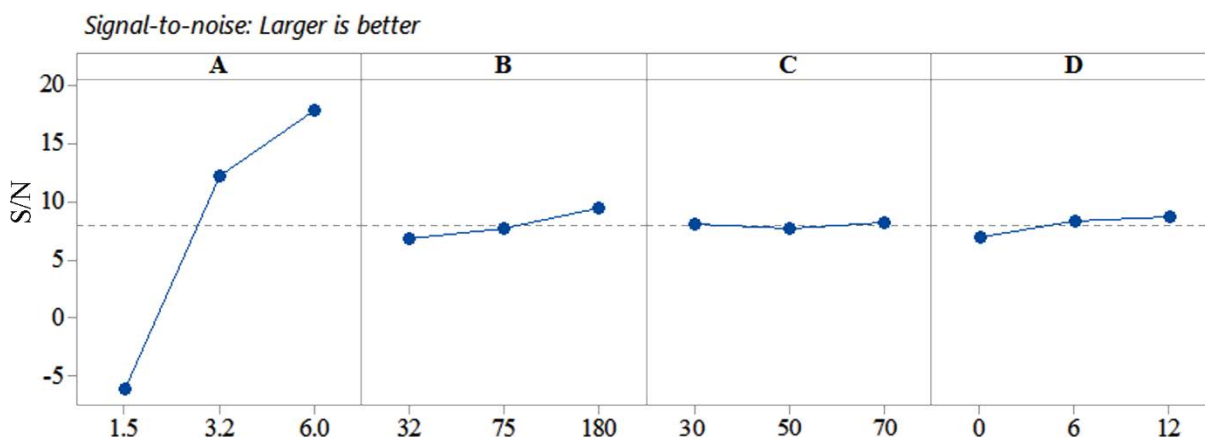
Proizvodnost obrade

Pri optimizaciji parametara elektroerozivne obrade u funkciji proizvodnosti obrade dobijeni su S/N odnosi, prikazani u tabeli 7-8.

Tabela 7-8. Odzivna tabela S/N odnosa ("veća vrednost je bolja" za MRR)

| Redni broj | Faktori | S/N odnos | | | max-min | Rang |
|------------|-----------------------------------|-------------|--------|--------|---------|------|
| | | Nivoi | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1. | (A) Struja pražnjenja | -6.099 | 12.226 | 17.822 | 23.92 | 1 |
| 2. | (B) Dužina impulsa | 6.816 | 7.659 | 9.474 | 2.658 | 2 |
| 3. | (C) Koeficijent delovanja impulsa | 8.096 | 7.693 | 8.161 | 0.468 | 4 |
| 4. | (D) Koncentracija grafitnog praha | 6.957 | 8.321 | 8.671 | 1.714 | 3 |

Na slici 7-5. dat je grafički prikaz S/N odnosa dobijen na osnovu tabele 7-8. Najveći uticaj na proizvodnost obrade ima struja pražnjenja, pa onda dužina impulsa, koncentracija grafitnog praha i koeficijent delovanja impulsa.

Slika 7-5. Grafički prikaz S/N odnosa za MRR

Na osnovu najveće vrednosti S/N odnosa prema tabeli 7-8., dobija se optimalna kombinacija parametara $A = 3$, $B = 3$, $C = 3$ i $D = 3$, na osnovu kriterijuma "veće je bolje". Kombinacija ovih parametara omogućuje dobijanje optimalne vrednosti proizvodnosti obrade pri PMEDM legure titanijuma, $MRR = 10.21 \text{ mm}^3/\text{min}$.

 Tabela 7-9. Optimalno podešavanje parametara za MRR

| Ulazni parametri | Nivo | Podešavanje parametara | Dobijeno MRR primenom Taguchi metode |
|--|------|------------------------|--|
| Struja pražnjenja I_e (A) | 3 | 6 | $S/N = 20.18$ $MRR = 10.21 \text{ mm}^3/\text{min}$ |
| Dužina impulsa t_i (μs) | 3 | 180 | |
| Koeficijent delovanja impulsa τ (%) | 3 | 70 | |
| Koncentracija grafitnog praha GR (g/l) | 3 | 12 | |

Relativno trošenje alata

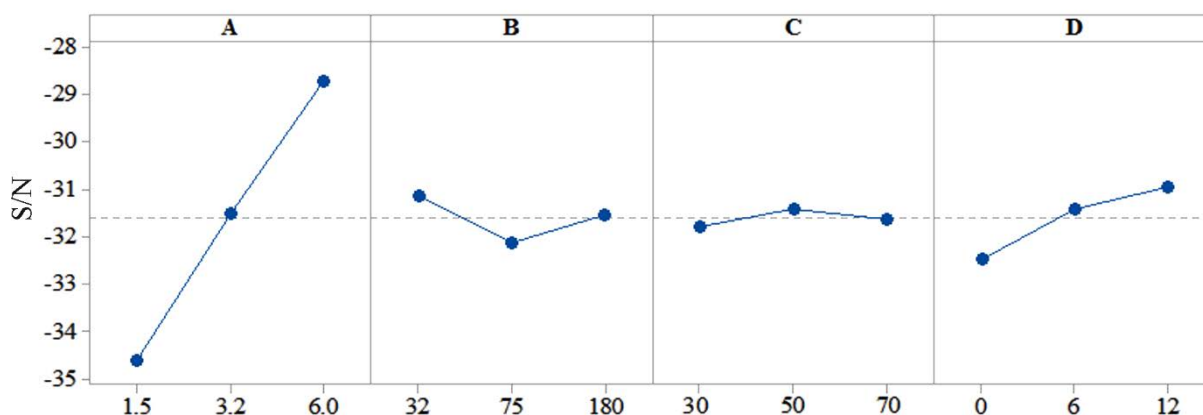
Na kraju, za svaki ulazni parametar i odgovarajući nivo dobijene su vrednosti S/N odnosa i u funkciji relativnog trošenja alata, tabela 7-10.

 Tabela 7-10. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za TWR)

| Redni broj | Faktori | S/N odnos | | | max-min | Rang |
|------------|-----------------------------------|-------------|--------|--------|---------|------|
| | | Nivoi | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1. | (A) Struja pražnjenja | -34.61 | -31.51 | -28.72 | 5.88 | 1 |
| 2. | (B) Dužina impulsa | -31.15 | -32.15 | -31.55 | 1 | 3 |
| 3. | (C) Koeficijent delovanja impulsa | -31.78 | -31.43 | -31.63 | 0.35 | 4 |
| 4. | (D) Koncentracija grafitnog praha | -32.48 | -31.42 | -30.95 | 1.52 | 2 |

Za ulazne parametre elektroerozivne obrade, primenom vrednosti za S/N iz tabele 7-10, nacrtan grafik je prikazan na slici 7-6. Vidi se da najveći uticaj na relativno trošenje alata ima struja pražnjenja, zatim koncentracija grafitnog praha, dužina impulsa i koeficijent delovanja impulsa.

Signal-to-noise: Smaller is better


 Slika 7-6. Grafički prikaz S/N odnosa za TWR

Na osnovu kriterijuma "manja je bolja", dobijena je optimalna kombinacija $A = 3$, $B = 1$, $C = 2$ i $D = 3$, koja omogućava dobijanje relativnog trošenja alata na optimalnom nivou, $TWR = 23.47$ (%).

Tabela 7-11. Optimalno podešavanje parametara za TWR

| Ulazni parametri | Nivo | Podešavanje parametara | Dobijena TWR primenom Tagučić metode |
|--|------|------------------------|--|
| Struja pražnjenja I_e (A) | 3 | 6 | $S/N = -27.41$ $TWR = 23.47$ (%) |
| Dužina impulsa t_i (μs) | 1 | 32 | |
| Koeficijent delovanja impulsa τ (%) | 2 | 50 | |
| Koncentracija grafitnog praha GR (g/l) | 3 | 12 | |

7.1.1.2 Optimizacija parametara pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida

Kao i kod optimizacije ulaznih parametara pri obradi legure titanijuma, isti princip je primenjen i pri optimizaciji (AE+PM)EDM cirkonijum oksida. S obzirom na eksperimentalne vrednosti izlaznih performansi R_a , R_{max} , DDS , MRR i TWR dobijen je S/N odnos za sve tačke eksperimenta prema planu $L_9(3^4)$. Kriterijum "manje je bolje" primenjen je na R_a , R_{max} , DDS i TWR , dok je kriterijum "veće je bolje" korišćen pri dobijanju S/N odnosa za MRR , tabela 7-12. Rezultati dobijeni primenom Tagučić metode pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida su potvrđeni u poglavlju 8.1.2 pomoću ANOVA analiza.

Tabela 7-12. S/N odnosi izlaznih performansi pri (AE+PM)EDM ZrO_2

| Redni broj | Faktor | | | | S/N odnosi izlaznih performansi | | | | |
|------------|-----------|-------------------|------------|-----|-----------------------------------|-----------|---------|-------|--------|
| | I_e (A) | t_i (μs) | GR (g/l) | D | R_a | R_{max} | DDS | MRR | TWR |
| 1. | 1.0 | 42 | 0 | 0 | -14.71 | -29.35 | -20.093 | 0.25 | -38.47 |
| 2. | 1.0 | 75 | 4 | 0 | -17.85 | -33.04 | -21.430 | -0.17 | -39.20 |
| 3. | 1.0 | 100 | 8 | 0 | -17.55 | -32.03 | -21.520 | 0.91 | -39.71 |
| 4. | 1.5 | 42 | 4 | 0 | -18.18 | -34.18 | -21.810 | 2.47 | -36.30 |
| 5. | 1.5 | 75 | 8 | 0 | -18.32 | -32.43 | -23.590 | 2.86 | -36.95 |
| 6. | 1.5 | 100 | 0 | 0 | -21.84 | -36.04 | -24.460 | 2.92 | -37.73 |
| 7. | 2.0 | 42 | 8 | 0 | -21.97 | -36.08 | -25.071 | 7.99 | -34.37 |
| 8. | 2.0 | 75 | 0 | 0 | -23.21 | -37.55 | -25.340 | 5.97 | -34.98 |
| 9. | 2.0 | 100 | 4 | 0 | -21.57 | -35.34 | -25.900 | 8.56 | -35.95 |

Srednja aritmetička hrapavost obrađene površine

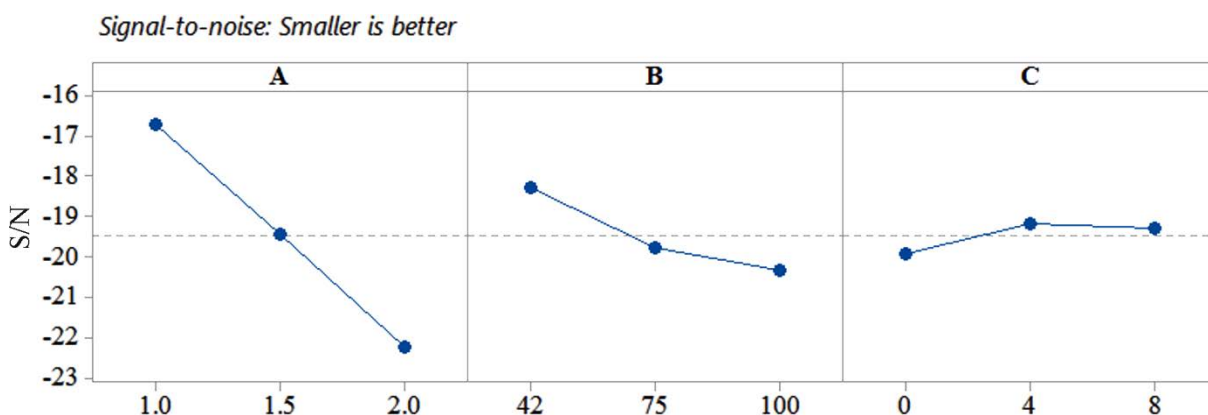
Tabela 7-13. prikazuje S/N odnose faktora po određenim nivoima. Struja pražnjenja ima najveći uticaj na srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine. Nešto manji uticaj ima dužina impulsa, dok koncentracija grafitnog praha ima najmanji uticaj.

Tabela 7-13. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za R_a)

| Redni broj | Faktori | S/N odnos | | | max-min | Rang |
|------------|-----------------------------------|-------------|--------|--------|---------|------|
| | | Nivoi | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1. | (A) Struja pražnjenja | -16.71 | -19.45 | -22.25 | 5.54 | 1 |
| 2. | (B) Dužina impulsa | -18.29 | -19.80 | -20.33 | 2.04 | 2 |
| 3. | (C) Koncentracija grafitnog praha | -19.92 | -19.20 | -19.29 | 0.72 | 3 |

Na slici 7-7. dati su dijagrami uticaja tri ulazna promenljiva parametra na srednju aritmetičku hrapavost obrađene pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida.

Posmatranjem uticaja ulaznih promenljivih na ovu performansu obrade, moguće je definisati vrednosti nivoa neophodnih za dobijanje optimalnog nivoa. Vidi se da je najstrmija prava kod faktora A, onda B, na kraju C. Ovaj redosled odgovora izračunatom rangju prema tabeli 7-13. Predložena optimalna kombinacija ulaznih parametara je A = 1, B = 1 i C = 2.

Slika 7-7. Grafički prikaz S/N odnosa za R_a kod (AE+PM)EDM ZrO_2

U tabeli 7-14. prikazani su optimalni parametri za podešavanje mašine pri elektroerozivnoj obradi cirkonijum oksida.

Tabela 7-14. Optimalno podešavanje parametara za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO_2

| Ulazni parametri | Nivo | Optimalni parametri | Dobijeno R_a primenom Taguči metode |
|--|------|---------------------|---------------------------------------|
| Struja pražnjenja I_e (A) | 1 | 1 | $S/N = -15.26$ $R_a = 5.79 \mu m$ |
| Dužina impulsa t_i (μs) | 1 | 42 | |
| Koncentracija grafitnog praha GR (g/l) | 2 | 4 | |

Maksimalna visina neravnina obrađene površine

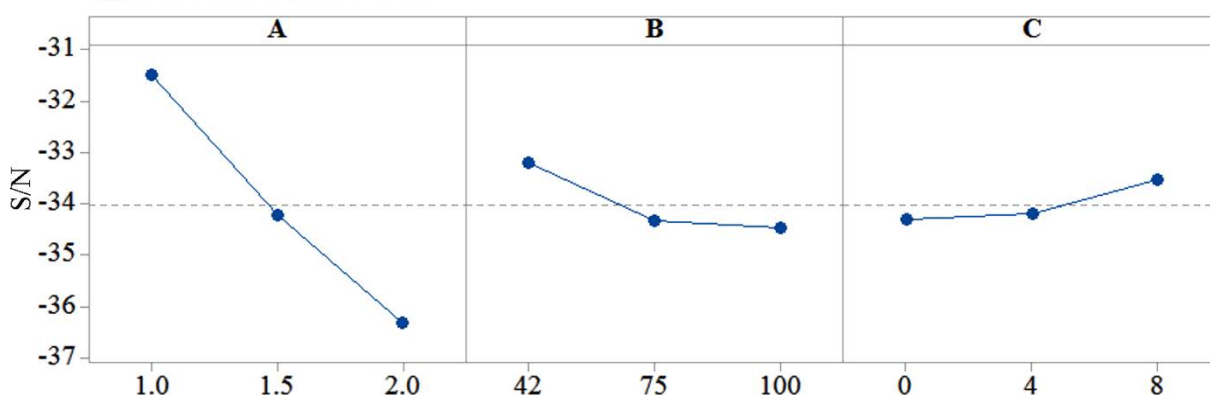
U tabeli 7-15. su prikazane srednje vrednosti S/N odnosa za svaki faktor i svaki njegov nivo, kao i izračunate max-min vrednosti za R_{max} . Faktor sa najvećom razlikom max-min je struja pražnjenja, koja predstavlja najuticajniji parametar.

Tabela 7-15. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za R_{max})

| Redni broj | Faktori | S/N odnos | | | max-min | Rang |
|------------|-----------------------------------|-------------|--------|--------|---------|------|
| | | Nivoi | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1. | (A) Struja pražnjenja | -31.48 | -34.22 | -36.33 | 4.86 | 1 |
| 2. | (B) Dužina impulsa | -33.21 | -34.34 | -34.48 | 1.27 | 2 |
| 3. | (C) Koncentracija grafitnog praha | -34.32 | -34.19 | -33.52 | 0.8 | 3 |

Dijagrami uticaja tri faktora na maksimalnu visinu neravnina obrađene površine pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida, dati su na slici 7-8. Za dobijanje maksimalne visine neravnina na optimalnom nivou, predložena je kombinacija ulaznih parametara $A = 1$, $B = 1$ i $C = 3$.

Signal-to-noise: Smaller is better

Slika 7-8. Grafički prikaz S/N odnosa za R_{max} pri (AE+PM)EDM ZrO_2

Optimalni parametri za podešavanje mašine pri elektroerozivnoj obradi cirkonijum oksida za dobijanje minimalne vrednosti R_{max} sa predikcijom prikazani su tabeli 7-16.

Tabela 7-16. Optimalno podešavanje parametara za R_{max} pri EDM ZrO_2

| Ulazni parametri | Nivo | Optimalni parametri | Dobijeno R_{max} primenom Taguchi metode |
|--|------|---------------------|--|
| Struja pražnjenja I_e (A) | 1 | 1 | $S/N = -30.18$ $R_{max} = 32.28 \mu m$ |
| Dužina impulsa t_i (μs) | 1 | 42 | |
| Koncentracija grafitnog praha GR (g/l) | 3 | 8 | |

Debljina defektnog sloja materijala obratka

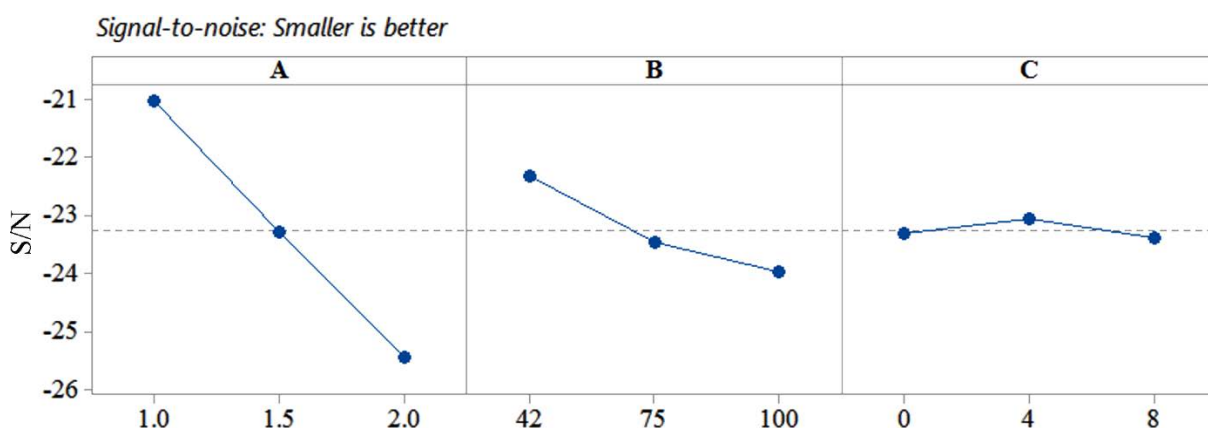
U tabeli 7-17. su dati S/N odnosi za svaki faktor i odgovarajući nivo pri optimizaciji parametara za dobijanje minimalne debljine defektnog sloja. Najveća razlika srednjih vrednosti S/N odnosa je dobijena za prvi faktor. Iz tabele se vidi da najveći uticaj na debljinu defektnog sloja ima struja pražnjenja, zatim dužina impulsa i na kraju koncentracija grafitnog praha.

Na osnovu tabele 7-17. dobija se grafički prikaz S/N odnosa, odnosno uticaja faktora na posmatranu izlaznu promenljivu, slika 7-9. Najveći S/N odnos pokazuje optimalan nivo svakog faktora.

Tabela 7-17. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za DDS)

| Redni broj | Faktori | S/N odnos | | | max-min | Rang |
|------------|-----------------------------------|-------------|--------|--------|---------|------|
| | | Nivoi | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1. | (A) Struja pražnjenja | -21.02 | -23.29 | -25.44 | 4.42 | 1 |
| 2. | (B) Dužina impulsa | -22.33 | -23.46 | -23.96 | 1.64 | 2 |
| 3. | (C) Koncentracija grafitnog praha | -23.3 | -23.05 | -23.4 | 0.34 | 3 |

Na osnovu kriterijuma "manja je bolja" optimalna kombinacija parametara elektroerozivne obrade sa aspekta debljine defektnog sloja materijala obratka je $A = 1$, $B = 1$ i $C = 2$.

Slika 7-9. Grafički prikaz S/N odnosa za DDS pri (AE+PM)EDM ZrO_2

Optimalni parametri za podešavanje mašine pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida za dobijanje minimalne vrednosti DDS sa predikcijom prikazani su tabeli 7-18.

Tabela 7-18. Optimalno podešavanje parametara za DDS pri (AE+PM)EDM ZrO_2

| Ulazni parametri | Nivo | Optimalni parametri | Predikcija DDS primenom Tagučić metode |
|--|------|---------------------|--|
| Struja pražnjenja I_e (A) | 1 | 1 | $S/N = -19.89$ $DDS = 9.87 \mu m$ |
| Dužina impulsa t_i (μs) | 1 | 42 | |
| Koncentracija grafitnog praha GR (g/l) | 2 | 4 | |

Proizvodnost obrade

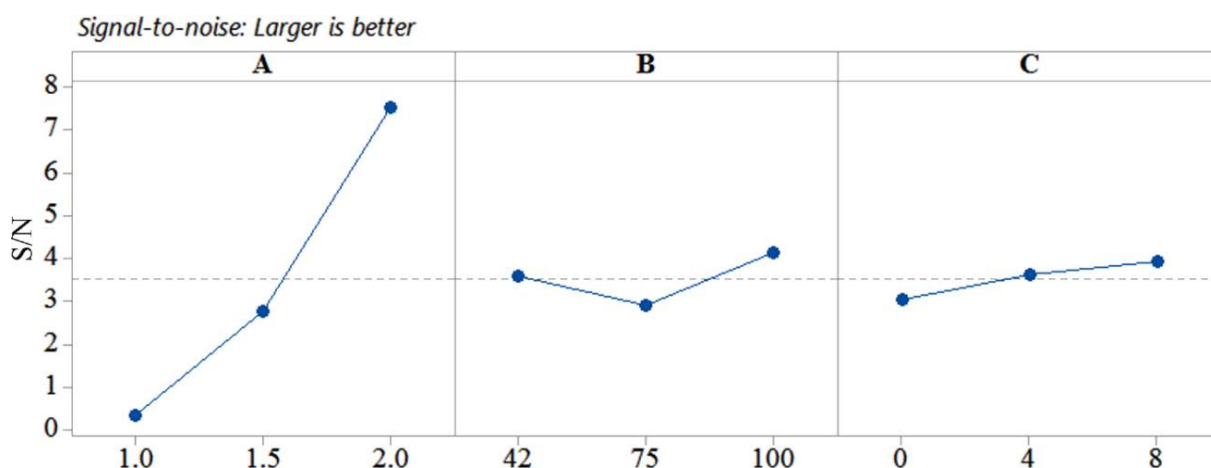
U tabeli 7-19. prikazani su S/N odnosi za svaki faktor i odgovarajući nivo, u cilju dobijanja proizvodnosti obrade na optimalnom nivou. Kao i kod prethodne tri izlazne performanse najveći uticaj na proizvodnost obrade ima struja pražnjenja.

Grafički prikaz uticaja tri faktora na proizvodnost obrade dat je na slici 7-10. Na osnovu kriterijuma "veće je bolje", najveće vrednosti S/N odnosa pokazuju koji nivo je optimalan za dati ulazni parametar.

Tabela 7-19. Odzivna tabela S/N odnosa ("veća vrednost je bolja" za MRR)

| Redni broj | Faktori | S/N odnos | | | max-min | Rang |
|------------|-----------------------------------|-------------|------|------|---------|------|
| | | Nivoi | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1. | (A) Struja pražnjenja | 0.33 | 2.75 | 7.51 | 7.18 | 1 |
| 2. | (B) Dužina impulsa | 3.58 | 2.89 | 4.13 | 1.24 | 2 |
| 3. | (C) Koncentracija grafitnog praha | 3.05 | 3.62 | 3.92 | 0.86 | 3 |

Optimizacija parametara elektroerozivne obrade cirkonijum oksida, s obzirom na ponuđene nivoe, predlaže optimalnu kombinaciju ulaznih parametara $A = 3$, $B = 3$ i $C = 3$, čime se omogućava dobijanje optimalne vrednosti proizvodnosti obrade, tabela 7-20.

Slika 7-10. Grafički prikaz S/N odnosa za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO_2 Tabela 7-20. Optimalno podešavanje parametara za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO_2

| Ulazni parametri | Nivo | Optimalni parametri | Predikcija MRR primenom Taguchi metode |
|--|------|---------------------|--|
| Struja pražnjenja I_e (A) | 3 | 2 | $S/N = 8.49$ $MRR = 2.69 \text{ mm}^3/\text{min}$ |
| Dužina impulsa t_i (μs) | 3 | 100 | |
| Koncentracija grafitnog praha GR (g/l) | 3 | 8 | |

Relativno trošenje alata

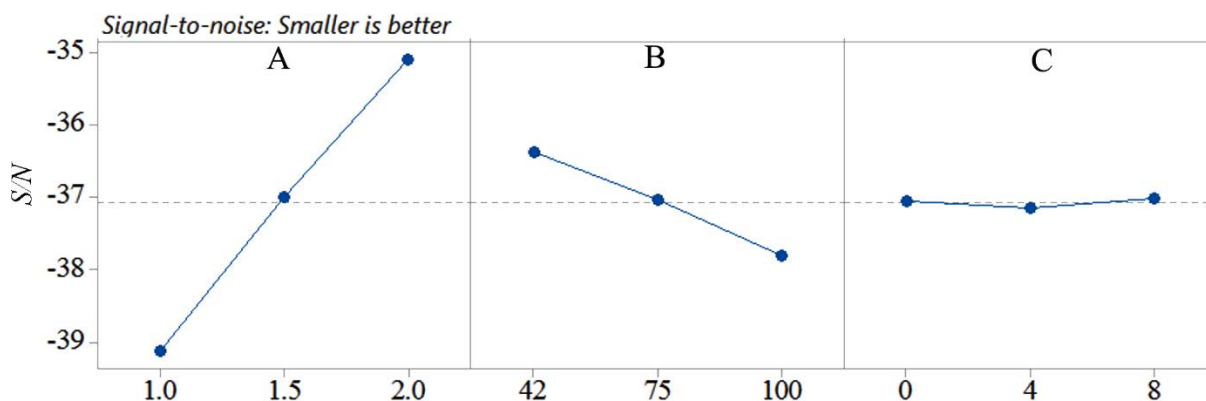
Za svaki faktor i odgovarajući nivo dobijene su vrednosti S/N odnosa u funkciji relativnog trošenja alata pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida, tabela 7-21. U tabeli se mogu videti srednje vrednosti S/N odnosa za svaki nivo faktora. Najveća vrednost razlike max-min označava najuticajniji faktor.

Uticaj ulaznih parametara prikazan je na slici 7-11. Na osnovu kriterijuma "manje je bolje", najveće vrednosti S/N odnosa pokazuju koji nivo faktora je optimalan za dobijanje minimalnog trošenja alata.

Za dobijanje minimalnog trošenja alata pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida predložena je kombinacija ulaznih parametara $A = 2$, $B = 1$ i $C = 3$.

Tabela 7-21. Odzivna tabela S/N odnosa ("manja vrednost je bolja" za TWR)

| Redni broj | Faktori | S/N odnos | | | max-min | Rang |
|------------|-----------------------------------|-------------|--------|--------|---------|------|
| | | Nivoi | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1. | (A) Struja pražnjenja | -39.13 | -37.01 | -35.1 | 4.02 | 1 |
| 2. | (B) Dužina impulsa | -36.38 | -37.05 | -37.8 | 1.42 | 2 |
| 3. | (C) Koncentracija grafitnog praha | -37.06 | -37.15 | -37.02 | 0.14 | 3 |

Slika 7-11. Grafički prikaz S/N odnosa za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2

Predikcija relativnog trošenja alata pri elektroerozivnoj obradi cirkonijum oksida za optimalne faktore data je u tabeli 7-22.

Tabela 7-22. Optimalno podešavanje parametara za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2

| Ulazni parametri | Nivo | Optimalni parametri | Predikcija TWR primenom Tagučić metode |
|--|------|---------------------|--|
| Struja pražnjenja I_e (A) | 1 | 2 | $S/N = -34.35$ $TWR = 51.28\%$ |
| Dužina impulsa t_i (μs) | 1 | 42 | |
| Koncentracija grafitnog praha GR (g/l) | 3 | 8 | |

7.2 VIŠEKRITERIJUMSKE METODE OPTIMIZACIJE

Za potrebe višekriterijumske optimizacije parametara PMEDM i (AE+PM)EDM primenjena je metodologija odzivne površine RSM, gde su analizirane izlazne performanse R_a , MRR i TWR . Metodologija odzivne površine, pored planiranja eksperimenta i generisanja matematičkih modela, uspešno se koristi za rešavanje optimizacionih zadataka [148, 149]. Za identifikaciju optimalnih parametara korišćen je softver *Design Expert 7*.

7.2.1 Optimizacija parametara EDM pomoću metodologije odzivne površine

Višekriterijumska optimizacija bazirana na RSM sprovedena je u nekoliko koraka korišćenjem funkcije poželjnih odziva. Računanje indeksa poželjnosti d_i za odgovarajuće

funkcije odziva se vrši preko jednačina predloženih od strane *Derringer*-a i *Suich*-a. Postoje tri oblika funkcije poželjnosti prema karakteristikama odziva \hat{y}_i :

- **Nominalni-je-bolji**: određivanje vrednosti \hat{y}_i je neophodna da bi se postigao željeni cilj T_i . Kada je \hat{y}_i jednak T_i vrednost poželjnosti je 1 i predstavlja željeni odziv. Ako vrednost \hat{y}_i prelazi opseg definisanog cilja, vrednost poželjnosti je 0, onda ta vrednost predstavlja najgori slučaj. Funkcija poželjnosti **nominalni-je-bolji** prikazana je u jednačini:

$$d_i = \begin{cases} \left(\frac{\hat{y}_i - y_{min}}{T_i - y_{min}} \right)^s, & y_{min} \leq \hat{y}_i \leq T_i, s \geq 0 \\ \left(\frac{y_i - y_{max}}{T_i - y_{max}} \right)^t, & T_i \leq \hat{y}_i \leq y_{max}, t \geq 0 \\ 0 \end{cases} \quad (7.11)$$

gde su y_{max} i y_{min} vrednosti gornje i donje granice tolerancije za \hat{y}_i , dok s i t predstavljaju faktore težine.

- **Veći-je-bolji**: Očekivana veća vrednost za \hat{y}_i je bolja. Kada \hat{y}_i prelazi određenu vrednost kriterijuma koja se može posmatrati kao zahtev, vrednost poželjnosti je 1. Ako je \hat{y}_i manja od vrednosti postavljenog kriterijuma koja je neprihvatljiva, poželjnost je jednaka 0. Funkcija **veći-je-bolji** ja data u jednačini:

$$d_i = \begin{cases} 0, & \hat{y}_i \leq y_{min} \\ \left(\frac{\hat{y}_i - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \right)^r, & y_{min} \leq \hat{y}_i \leq y_{max}, r \geq 0 \\ 1, & \hat{y}_i \geq y_{max} \end{cases} \quad (7.12)$$

- **Manji-je-bolji**: Kada je \hat{y}_i manje od vrednosti postavljenog kriterijuma, vrednost poželjnosti je 1. Pri vrednosti poželjnosti 0 funkcija je neprihvatljiva. Funkcija poželjnosti za **manji-je-bolji** data je u jednačini:

$$d_i = \begin{cases} 0, & \hat{y}_i \leq y_{min} \\ \left(\frac{y_{max} - \hat{y}_i}{y_{max} - y_{min}} \right)^r, & y_{min} \leq \hat{y}_i \leq y_{max}, r \geq 0 \\ 1, & \hat{y}_i \geq y_{max} \end{cases} \quad (7.13)$$

gde eksponent r predstavlja težinski faktor.

Individualni indeksi poželjnosti za sve odzive kombinuju jednu formu pod nazivom kompozitna poželjnost d_G prema jednačini:

$$d_G = (d_1^{w_1}, d_2^{w_2}, d_3^{w_3}, \dots, d_n^{w_n})^{\frac{1}{W}} = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{r_i} \right)^{\frac{1}{\sum r_i}} \quad (7.14)$$

gde je d_i individualna poželjnost dok je w_i težinski faktor za posmatranu \hat{y}_i . Eksponent W predstavlja sumu svih individualnih težina.

EkspONENTI r , s , w i W , odnosno težinski faktori, dodatno određuju koliko je bitno dostizanje ciljnih vrednosti T_i i definišu oblik funkcije poželjnih odziva. Vrednosti ovih faktora se kreću od 0.1 do 10. Ako se za težinske faktore uzme vrednost 1 onda d_i varira od 0 do 1.

7.2.1.1 Optimizacija parametara procesa pri PMEDM legure titanijuma

Na osnovu metode odzivne površine, CCD plana eksperimenta, ANOVA analize i usvojenih empirijskih modela, izvršena je identifikacija ulaznih parametara PMEDM legure titanijuma (I_e , t_i , τ , GR), pri čemu se optimizuju izlazne performanse obrade (R_a , MRR , TWR).

U tabeli 7-23. su dati ciljevi optimizacije, ograničenja parametara elektroerozivne obrade, koeficijenti težine i koeficijenti važnosti. Pri određivanju individualnih indeksa poželjnosti za R_a i TWR korišćena je funkcija "manje-je-bolje" (minimizacija), dok je funkcija "veće-je-bolje" (maksimizacija) korišćena pri određivanju individualnih indeksa poželjnosti za MRR . Odabrane funkcije ujedno predstavljaju ciljeve optimizacije, odnosno funkcije cilja. Ograničenja parametara elektroerozivne obrade su usvojena prema rangu eksperimentalnih podataka, gde su za y_{min} korišćene minimalne vrednosti, a za y_{max} maksimalne vrednosti nivoa faktora. Pri određivanju koeficijenta važnosti faktora, uzeto je u obzir da se radi o elektroerozivnoj obradi koja se uglavnom primenjuje kao završna obrada, tj. da je od primarnog značaja kvalitet obrađene površine u odnosu na proizvodnost obrade i relativno trošenje alata.

Tabela 7-23. Cilj, ograničenja, koeficijenti težine i važnosti kod PMEDM legure $TiAl_6V_4$

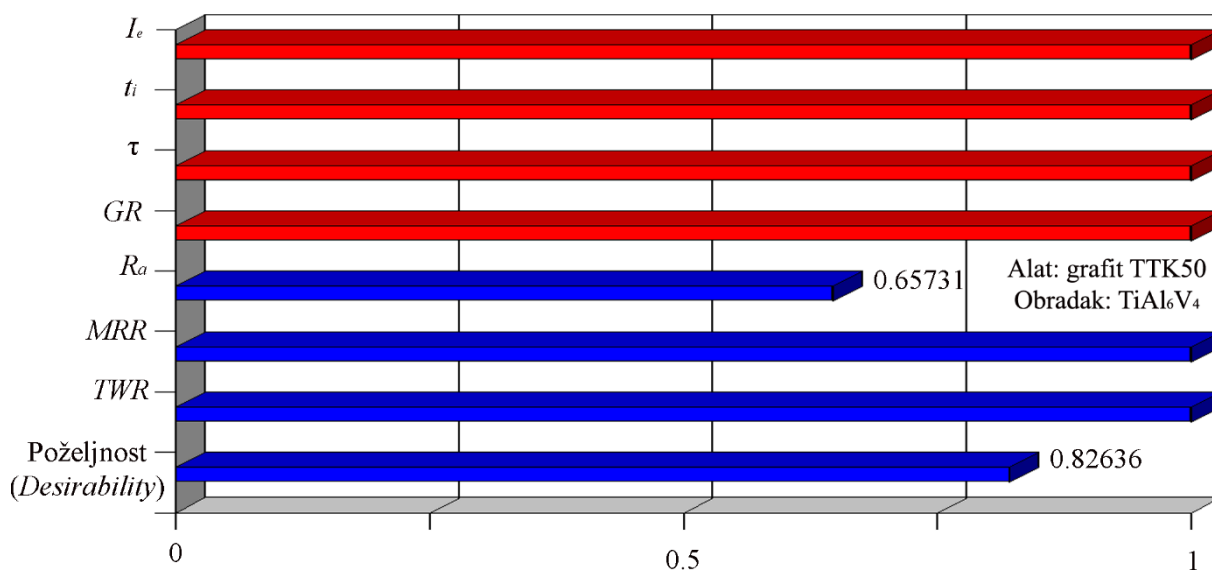
| Parametar | Cilj | Ograničenja | | Koeficijent težine r | Koeficijent važnosti W |
|--|----------------|-------------|-----------|------------------------|--------------------------|
| | | y_{min} | y_{max} | | |
| Struja pražnjenja I_e (A) | opseg | 1.5 | 7.5 | 1 | 3 |
| Dužina impulsa t_i (μs) | opseg | 24 | 240 | 1 | 3 |
| Koef. delovanja impulsa τ (%) | opseg | 30 | 70 | 1 | 3 |
| Koncentracija graf. praha GR (g/l) | opseg | 0 | 12 | 1 | 3 |
| Sr. aritm. hrap. obr. površine R_a (μm) | manje-je-bolje | 1.952 | 12.569 | 1 | 5 |
| Proizvodnost obrade MRR (mm^3/min) | veće-je-bolje | 0.512 | 11.231 | 1 | 3 |
| Relativno trošenje alata TWR (%) | manje-je-bolje | 24.888 | 52.665 | 1 | 4 |

Lista izdvojenih, 5 najboljih vrednosti maksimalne funkcije poželjnih odziva, prikazana je u tabeli 7-24.

Tabela 7-24. Lista pet najboljih kombinacija nivoa faktora pri PMEDM legure $TiAl_6V_4$

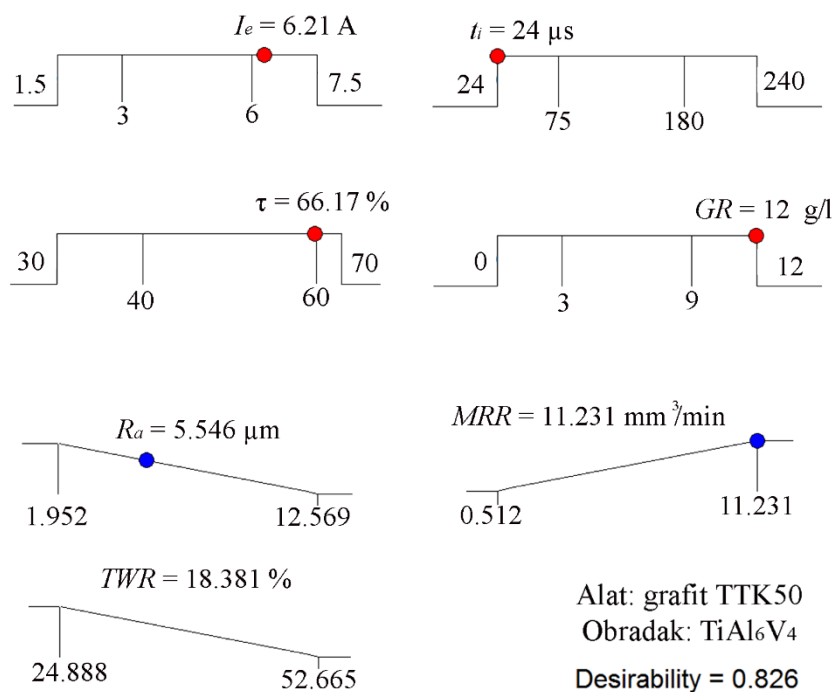
| Redni broj | I_e (A) | t_i (μs) | τ (%) | GR (g/l) | R_a (μm) | MRR (mm^3/min) | TWR (%) | <i>Desirability</i> (Poželjnost) |
|------------|-----------|-------------------|------------|------------|-------------------|----------------------|-----------|----------------------------------|
| 1. | 6.21 | 24.00 | 66.17 | 12.00 | 5.54608 | 11.231 | 18.383 | 0.842 |
| 2. | 6.16 | 24.98 | 69.94 | 12.00 | 5.55002 | 11.2309 | 19.047 | 0.842 |
| 3. | 6.22 | 24.03 | 65.39 | 12.00 | 5.55213 | 11.231 | 18.2597 | 0.842 |
| 4. | 6.28 | 24.00 | 60.24 | 12.00 | 5.58567 | 11.231 | 17.197 | 0.840 |
| 5. | 6.31 | 24.00 | 58.57 | 12.00 | 5.59843 | 11.2343 | 16.777 | 0.839 |

Vrednosti poželjnih odziva za pojedine parametre su prikazane preko *bar* dijagrama na slici 7-12.



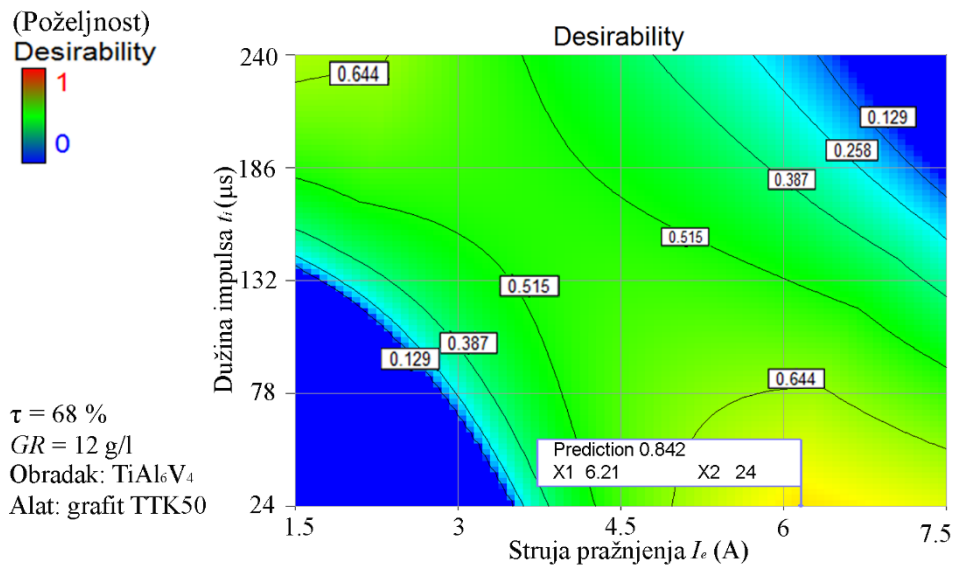
Slika 7-12. Bar dijagram sa vrednostima poželjnosti faktora i izlaznih parametara

Na slici 7-13. preko *Ramps* dijagrama prikazane su optimalne vrednosti ulaznih parametara kao i njihova ograničenja. Takođe su date optimalne vrednosti izlaznih performansi PMEDM procesa.

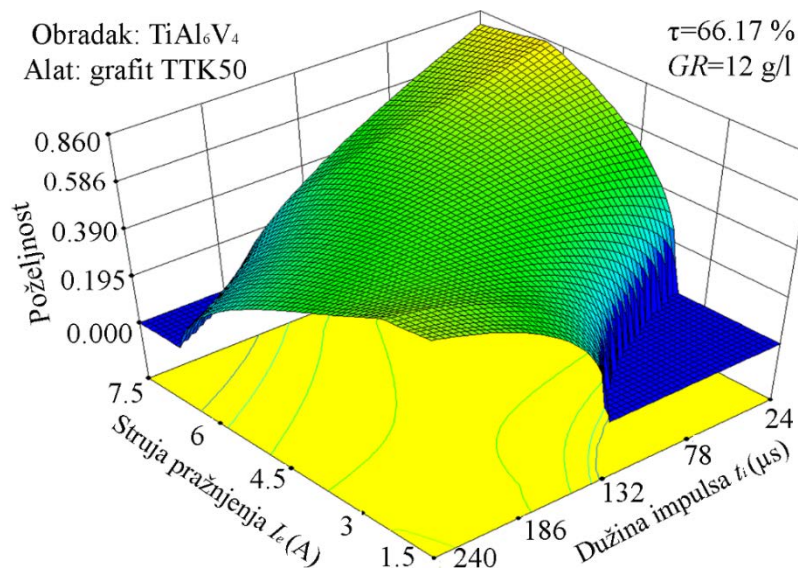


Slika 7-13. Optimalni parametri PMEDM legure titanijuma dobijeni pomoću funkcije poželjnih odziva

Preko konturnih i 3D grafika takođe je moguće predstaviti dobijene rezultate poželjnih odziva, slika 7-14. i 7.15.



Slika 7-14. Konturni dijagram poželjnosti kod PMEDM legure titanijuma



Slika 7-15. Prostorni dijagram poželjnosti kod PMEDM legure titanijuma

7.2.1.2 Optimizacija parametara procesa pri AEEDM cirkonijum oksida

Na osnovu Box-Behnken plana eksperimenta, analize varijanse i usvojenih modela sprovedena je optimizacija ulaznih parametara PMEDM (I_e , t_i i GR) za izlazne performanse procesa i to za hrapavost obrađene površine, proizvodnost obrade i relativno trošenje alata. Izračunati su indeksi poželjnosti prema Deringerovoj funkciji slično kao i u prethodnom poglavlju.

U tabeli 7-25. prikazani su kriterijumi, ograničenja i koeficijenti težine i važnosti. Ranije je rečeno, da je glavni nedostatak procesa AEEDM cirkonijum oksida, loš kvalitet obrađene površine. Iz tog razloga je, prilikom određivanja koeficijenata važnosti, najveća važnost data srednjoj aritmetičkoj hrapavosti obrađene površine.

Tabela 7-25. Cilj, ograničenja, koeficijenti težine i važnosti kod (AE+PM)EDM ZrO₂

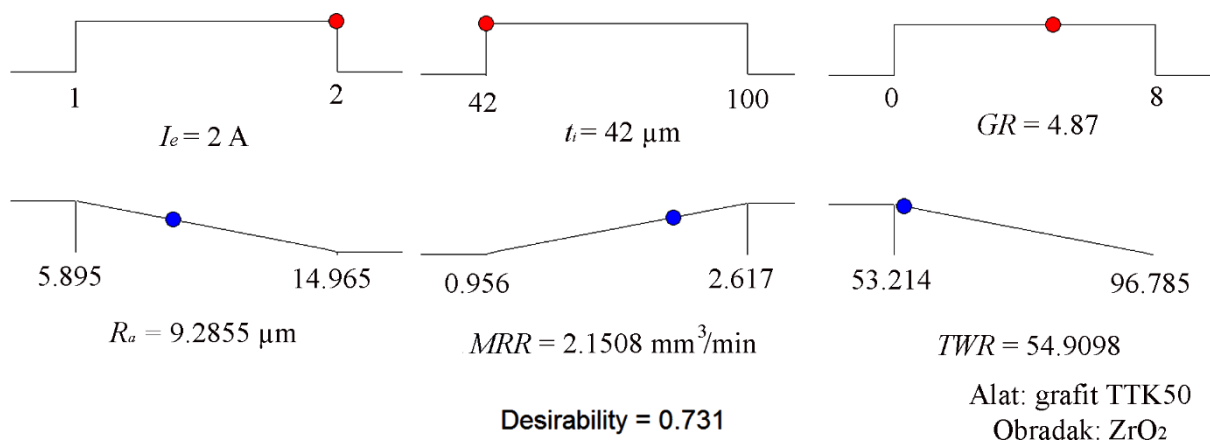
| Parametar | Cilj | Ograničenja | | Koeficijent težine r | Koeficijent važnosti W |
|--|----------------|-------------|-----------|------------------------|--------------------------|
| | | y_{min} | y_{max} | | |
| Struja pražnjenja I_e (A) | opseg | 1 | 2 | 1 | 3 |
| Dužina impulsa t_i (μ s) | opseg | 42 | 100 | 1 | 3 |
| Koncentracija graf. praha GR (g/l) | opseg | 0 | 8 | 1 | 3 |
| Sr. aritm. hrap. obr. površine R_a (μ m) | manje-je-bolje | 5.895 | 14.965 | 1 | 5 |
| Proizvodnost obrade MRR (mm ³ /min) | veće-je-bolje | 0.956 | 2.617 | 1 | 3 |
| Relativno trošenje alata TWR (%) | manje-je-bolje | 53.214 | 96.785 | 1 | 3 |

Najboljih 5 vrednosti funkcija poželjnih odziva prikazane su u tabeli 7-26. Optimalne vrednosti izlaznih performansi kod (AE+PM)EDM cirkonijum oksida dobijaju se kombinacijom parametara i to za struju pražnjenja 2 A, dužinu impulsa 42 μ s i koncentraciju grafitnog praha od 4.87 g/l.

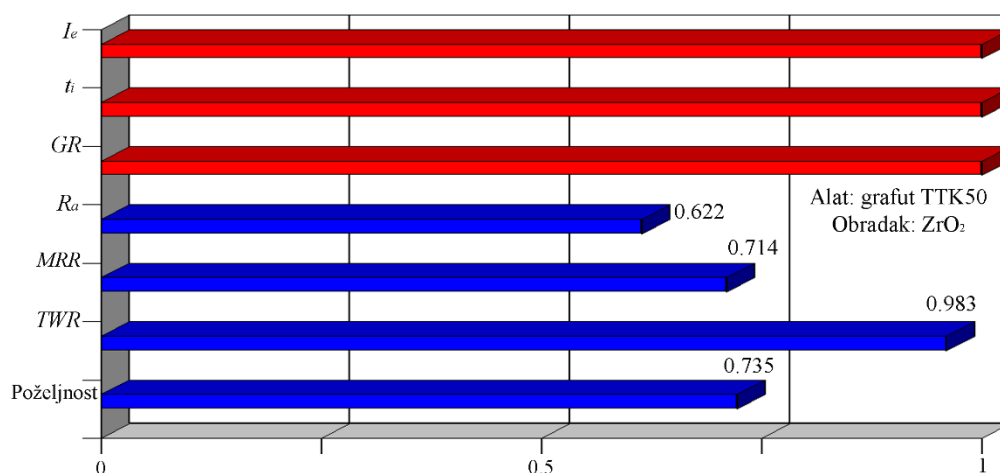
Tabela 7-26. Lista pet najboljih kombinacija nivoa faktora pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| Redni broj | I_e (A) | t_i (μ s) | GR (g/l) | R_a (μ m) | MRR (mm ³ /min) | TWR (%) | <i>Desirability</i> (Poželjnost) |
|------------|-----------|------------------|------------|------------------|------------------------------|-----------|----------------------------------|
| 1 | 2.00 | 42.00 | 4.87 | 9.2855 | 2.15083 | 54.9098 | 0.731 |
| 2 | 2.00 | 42.00 | 4.83 | 9.28186 | 2.14917 | 54.8988 | 0.731 |
| 3 | 2.00 | 42.00 | 4.91 | 9.28997 | 2.15267 | 54.9228 | 0.731 |
| 4 | 2.00 | 42.00 | 4.76 | 9.2753 | 2.14572 | 54.8779 | 0.731 |
| 5 | 2.00 | 42.22 | 4.87 | 9.29876 | 2.15274 | 54.8665 | 0.731 |

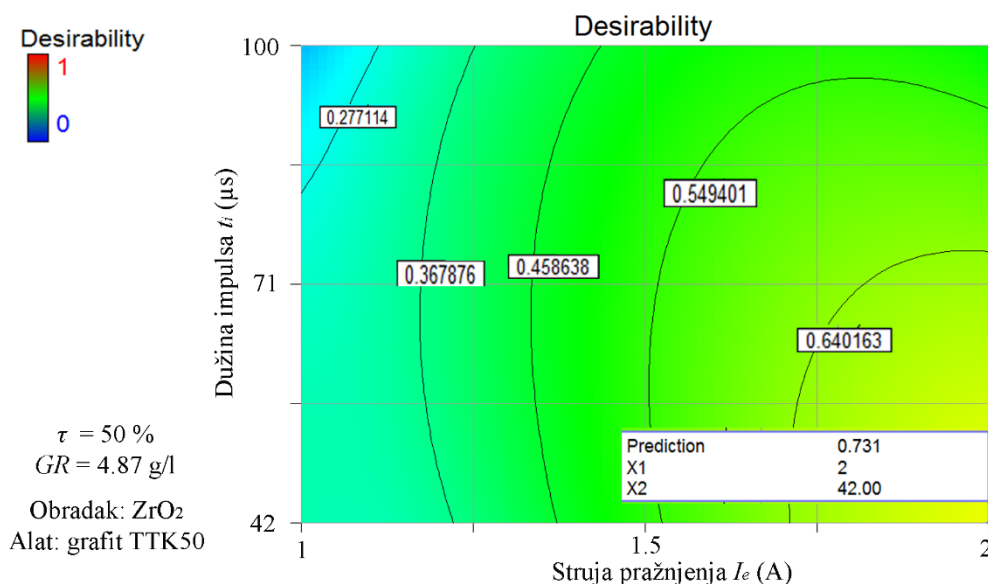
Preko *Ramps* dijagrama prikazane su na slici 7-16. dobijene vrednosti optimalnih parametara i optimalnih izlaznih performansi obrade. Na slici 7-17. su prikazane vrednosti poželjnih odziva za ulazne i izlazne parametre. Takođe je moguće i grafički predstaviti dobijene rezultate preko konturnog i 3D dijagrama, slika 7-18. i 7-19.



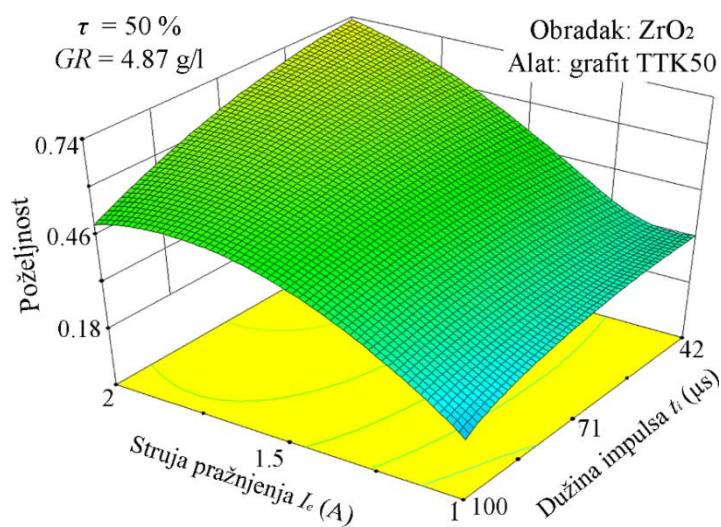
Slika 7-16. Optimalni parametri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida dobijeni pomoću funkcije poželjnih odziva



Slika 7-17. Bar dijagram sa vrednostima poželjnosti faktora i izlaznih parametara (AE+PM)EDM procesa



Slika 7-18. Konturni dijagram poželjnosti kod (AE+PM)EDM cirkonijum oksida



Slika 7-19. Prostorni dijagram poželjnosti kod (AE+PM)EDM cirkonijum oksida

8. ANALIZA REZULTATA

Na osnovu sprovedenih istraživanja u okviru disertacije, analiza rezultata se može prezentovati kroz tri grupe:

- Analiza eksperimentalnih rezultata,
- Analiza modelovanja procesa elektroerozivne obrade,
- Analiza optimizacije procesa elektroerozivne obrade.

8.1 ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

Prva grupa obuhvata analizu eksperimentalnih rezultata dobijenih na osnovu preliminarnih istraživanja, planova eksperimenta pri PMEDM legure titanijuma i (AE+PM)EDM cirkonijum oksida.

Najčešće se analiza rezultata sprovodi preko statističke tehnike analize varijanse (ANOVA) bazirana na Taguču planu eksperimenta. Osnovni cilj ANOVA analize je procena relativnog značaja pojedinačno za svaki faktor posmatranog procesa. Analiza varijanse se uglavnom predstavlja preko statističkih tabela F-testa sa 95% poverenja i odzivnih grafika. U statističkoj tabeli figurišu: stepen slobode, suma kvadrata, varijacija, F-test i procentualno učešće pojedinih faktora. Za izradu statističkih tabela i odzivnih grafika upotrebljen je softver *Minitab*.

8.1.1 Analiza rezultata dobijenih pri PMEDM legure titanijuma

Uticaj ulaznih parametara, kao što su struja pražnjenja (faktor A), dužina impulsa (faktor B), koeficijent delovanja impulsa (faktor C) i koncentracija grafitnog praha (faktor D) na izlazne performanse PMEDM legure titanijuma, je analizirana i predstavljena u ovom poglavlju.

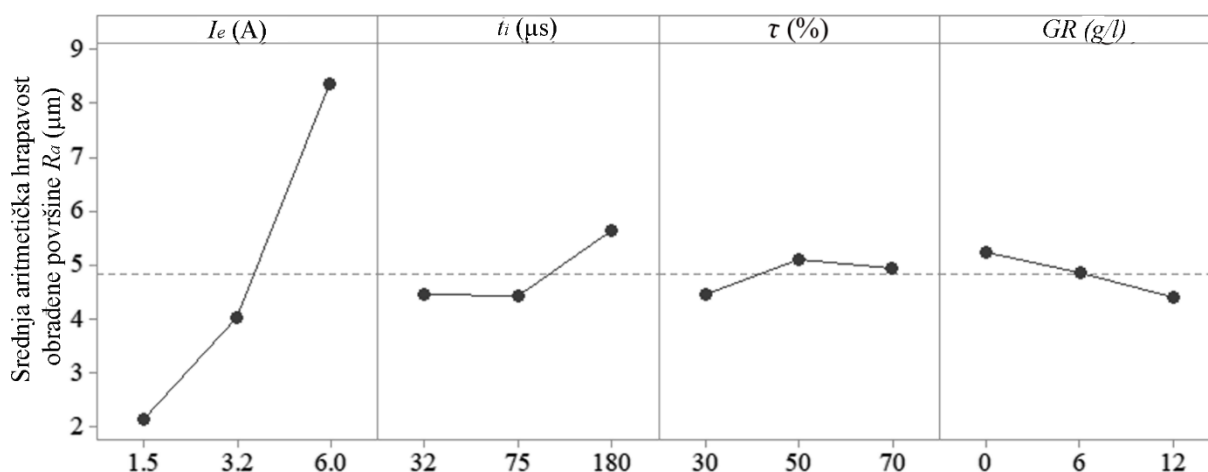
8.1.1.1 Uticaj ulaznih parametara na srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine

Prema Taguču planu $L_9(3^4)$ (tabela 5-2. poglavlje 5.1.2) na osnovu ANOVA analize, sprovedene preko F-testa, može se videti uticajnost, odnosno procentualno učešće svakog faktora pri PMEDM legure titanijuma na srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine. Faktori čija je F-vrednost manja od 1 su isključeni iz analize, što je bio slučaj za koeficijent delovanja impulsa (faktor C) i koncentraciju grafitnog praha (faktor D). Nakon isključivanja beznačajnih faktora, ANOVA analiza za preostale članove prikazana je u redukovanoj tabeli 8-1., gde je dato procentualno učešće za faktore A i B. Najveći uticaj na srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine ima struja pražnjenja, procentualno 93.08%. Procentualno učešće od 4.35% zauzima dužina impulsa za postavljene uslove obrade. Prikazana ANOVA analiza potvrđuje rezultate dobijenih pomoću Taguču metode (poglavlje 7.1.1.1).

Tabela 8-1. Redukovana ANOVA tabela na osnovu plana $L_9(3^4)$ za R_a pri PMEDM $TiAl_6V_4$

| Faktor | Stepen Slobode | Suma kvadrata | Varijacija | F-test | Procenat % |
|-----------------------------|----------------|---------------|------------|--------|------------|
| A - I_e | 2 | 61.465 | 30.7325 | 72.55 | 93.08 |
| B - t_i | 2 | 2.873 | 1.4367 | 3.39 | 4.35 |
| Greška | 4 | 1.694 | 0.4236 | | 2.57 |
| Ukupno | 8 | 66.033 | | | |

ANOVA grafici omogućavaju vizuelnu identifikaciju uticaja ulaznih parametara u intervalu koji je definisan eksperimentalnim prostorom. Odzivni ANOVA grafici za izlazne parametre obrade su dati na slici 8-1. Uočljivo je da uticaj posmatranih parametara na srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine izražen preko ugla nagiba prave koja povezuje svaki nivo faktora.

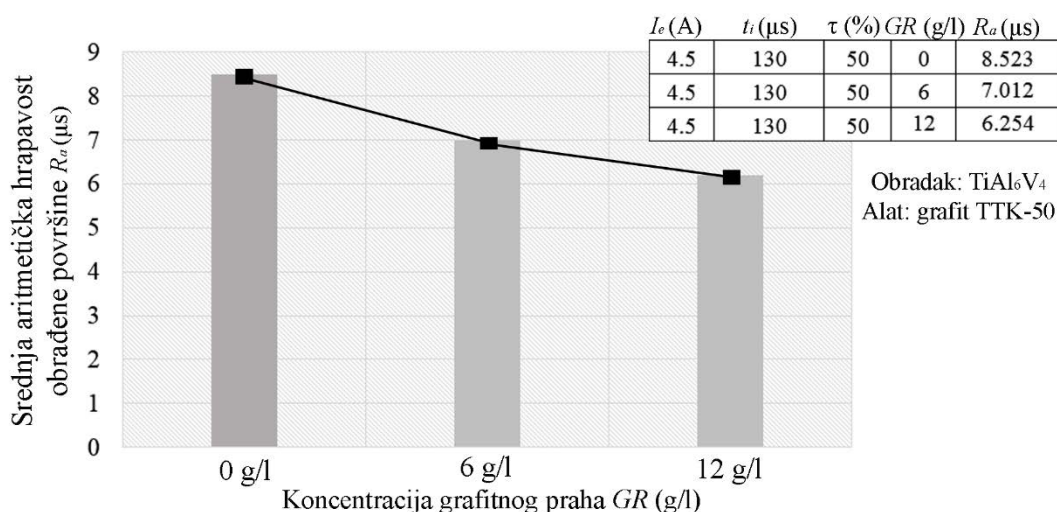
Slika 8-1. Odzivni ANOVA grafik za R_a pri PMEDM $TiAl_6V_4$

Ovom analizom je potvrđen redosled uticaja ulaznih parametara obrade, u poređenju sa objavljenim istraživanjima vezanim za PMEDM legure titanijuma. Pored struje pražnjenja koja je očekivano imala najveći uticaj na R_a , dužina impulsa, koeficijent delovanja impulsa i koncentracija grafitnog praha su imali manji uticaj od očekivanog. Ovo se može objasniti rezultatima preliminarnih istraživanja. Prema podacima iznetim u poglavlju 4.3.2 može se zaključiti da dužina impulsa ima veći uticaj pri PMEDM legure titanijuma za veće struje pražnjenja. U tom slučaju za postavljene uslove obrade, pri struji intenziteta 7.5 A, odnosno gustini struje od 7.5 A/cm^2 , sa porastom dužine impulsa znatno se povećavala srednja aritmetička hrapavost obrađene površine.

Objašnjenje isključenja koeficijenta delovanja impulsa iz ANOVA analize opravdava se činjenicom da taj parametar pri relativno manjim dužinama impulsa, u ovom istraživanju do 180 μs , nema bitan uticaj na srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine. Značajan uticaj koeficijenta delovanja impulsa se može očekivati pri vrednostima dužine impulsa većim od 200 μs jer dolazi do veće energije pražnjenja. Veća energija pražnjenja ima štetan uticaj na integritet

površine obrađivane legure titaanijuma ako je premalo vreme pauze (preračunato u $\tau > 90\%$), što je potvrđeno u istraživanjima [150, 151].

Rezultati eksperimentalnih istraživanja ukazuju da koncentracija grafitnog praha ima značajan uticaj na srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine pri struji pražnjenja od 4.5 A. Procentualno smanjenje vrednosti za R_a iznosilo je približno 27% za date uslove obrade, slika 8-2. Za ostale vrednosti struje pražnjenja nije bilo primećeno značajno smanjenje srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine.



Slika 8-2. Uticaj koncentracije grafitnog praha na R_a pri EDM TiAl₆V₄

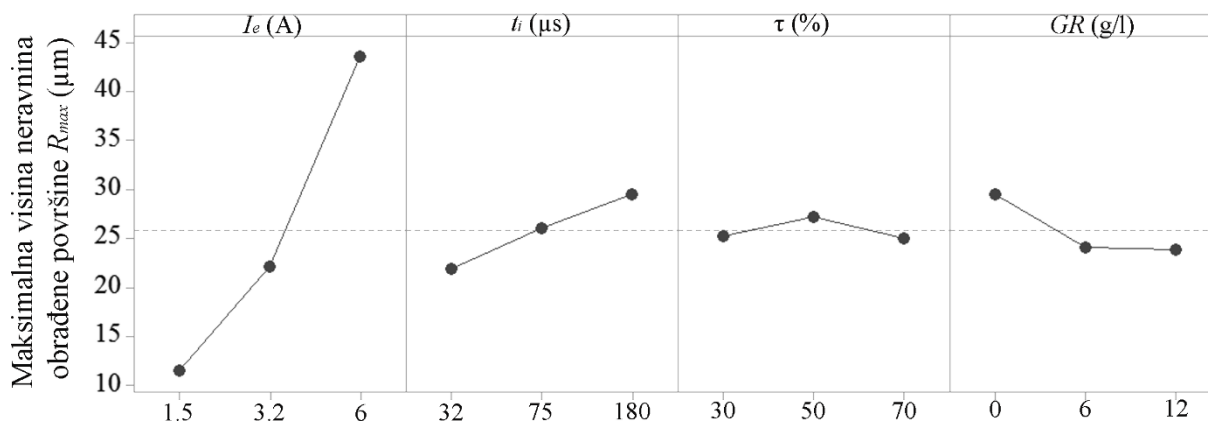
8.1.1.2 Uticaj ulaznih parametara na maksimalnu visinu neravnina obrađene površine

U redukovanoj tabeli 8-2. je data ANOVA analiza za maksimalnu visinu neravnina obrađene površine bazirana na Taguchi planu eksperimenta L₉(3⁴). Slično sa analizom R_a i ovde najveći uticaj ima struja pražnjenja, procentualno 91.14 %. Zatim slede dužina impulsa i koncentracija grafitnog praha u iznosu od 4.92% i 3.41%. Ovde je iz istih razloga kao i kod R_a , F – vrednost manja od 1, isključen iz analize parametar koeficijent delovanja impulsa.

Tabela 8-2. Redukovana ANOVA tabela na osnovu plana L₉(3⁴) za R_{max} pri PMEDM TiAl₆V₄

| Faktor | Stepen Slobode | Suma kvadrata | Varijacija | F-test | Procenat % |
|-----------------------------|----------------|---------------|------------|--------|------------|
| A - I_e | 2 | 1606.15 | 803.075 | 185.40 | 91.14 |
| B - t_i | 2 | 86.73 | 43.364 | 10.01 | 4.92 |
| D - GR | 2 | 60.80 | 30.398 | 7.02 | 3.41 |
| Greška | 2 | 8.66 | 4.331 | | 0.53 |
| Ukupno | 8 | 1762.34 | | | |

Na slici 8-3. prikazan je uticaj ulaznih parametara obrade na R_{max} . Izraženo preko ugla nagiba prave, sa grafika se jasno vidi da najveći uticaj ima struja pražnjenja. Uticaj koncentracije grafitnog praha na R_{max} je više izražen nego kod analize R_a .



Slika 8-3. Odzivni ANOVA grafik za R_{max} pri PMEDM TiAl₆V₄

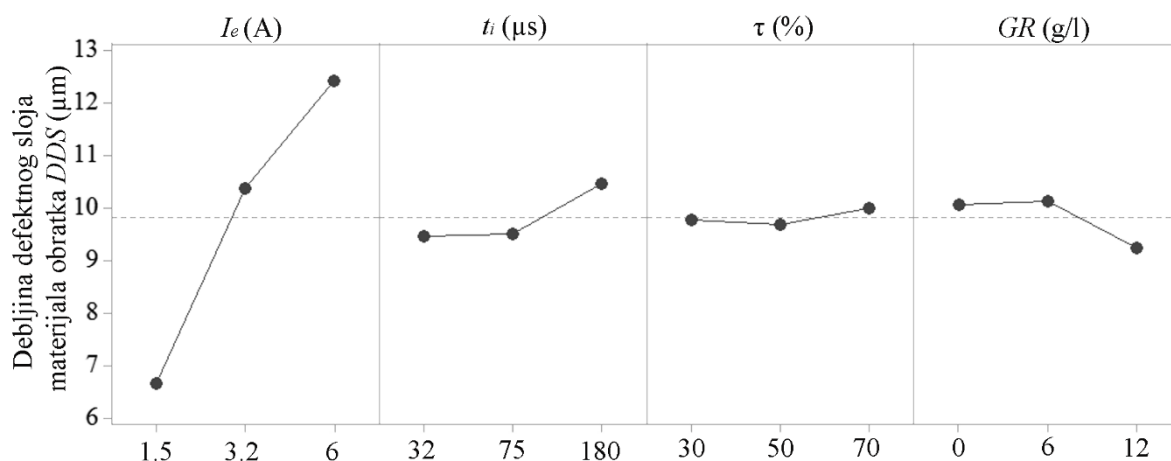
8.1.1.3 Uticaj ulaznih parametara na debljinu defektnog sloja materijala obratka

Na osnovu Taguchi plana eksperimenta u tabeli 8-3. je data ANOVA analiza za debljinu defektnog sloja materijala obratka kod PMEDM legure titanijuma. Takođe, kao i kod R_a i R_{max} najveći uticaj na debljinu defektnog sloja ima struja pražnjenja od 93.53 %. Dužina impulsa procentualno utiče sa 3.46 %, dok koncentracija grafitnog praha utiče sa svega 2.68 %. Iz analize je isključen koeficijent delovanja impulsa iz prethodno navedenih razloga kao kod analize R_a .

Tabela 8-3. Redukovana ANOVA tabela na osnovu plana L₉(3⁴) za DSS pri PMEDM TiAl₆V₄

| Faktor | Stepen Slobode | Suma kvadrata | Varijacija | F-test | Procenat % |
|-----------------------------|----------------|---------------|------------|--------|------------|
| A - I_e | 2 | 51.5238 | 25.7619 | 306.57 | 93.53 |
| B - t_i | 2 | 1.9041 | 0.952 | 11.33 | 3.46 |
| D - GR | 2 | 1.4873 | 0.7436 | 8.85 | 2.68 |
| Greška | 2 | 0.1681 | 0.084 | | 0.33 |
| Ukupno | 8 | 55.0832 | | | |

Odzivni ANOVA grafici za debljinu defektnog sloja prikazani su na slici 8-4. Vidljiv je porast debljine defektnog sloja sa porastom intenziteta struje pražnjenja.



Slika 8-4. Odzivni ANOVA grafik za DDS pri PMEDM TiAl₆V₄

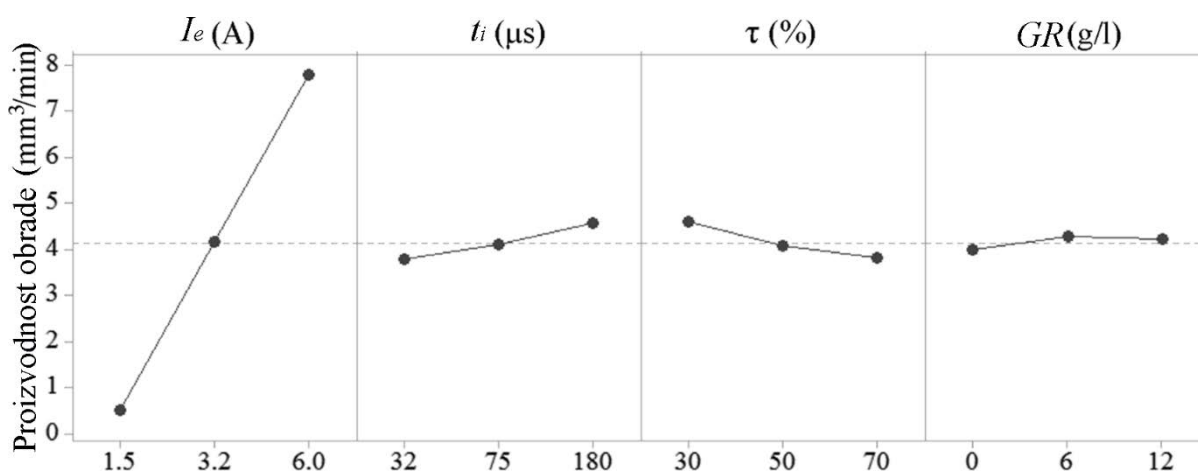
8.1.1.4 Uticaj ulaznih parametara na proizvodnost obrade

ANOVA analiza uticaja ulaznih parametara na proizvodnost obrade pri PMEDM legure titanijuma data je u redukovanoj tabeli 8-4. Procentualno učešće od 97.55% očekivano zauzima struja pražnjenja. Zanemarljiv uticaj na proizvodnost obrade imaju dužina impulsa, koeficijent delovanja impulsa i koncentracija grafitnog praha, koji su pridodati procentualnom učešću greške od 2.45%.

Tabela 8-4. Analiza varijanse za *MRR* pri PMEDM $TiAl_6V_4$

| Faktor | Stepen Slobode | Suma kvadrata | Varijacija | F-test | Procenat % |
|-----------|----------------|---------------|------------|---------|------------|
| A - I_e | 2 | 79.643 | 39.8217 | 119.890 | 97.55 |
| Greška | 6 | 1.993 | 0.3322 | | 2.45 |
| Ukupno | 8 | 81.636 | | | |

Slika 8-5. prikazuje vizuelni uticaj ulaznih parametara PMEDM na proizvodnost obrade. Vidljivo je da najveći uticaj ima struja pražnjenja, dok ostali parametri nemaju značajan uticaj.

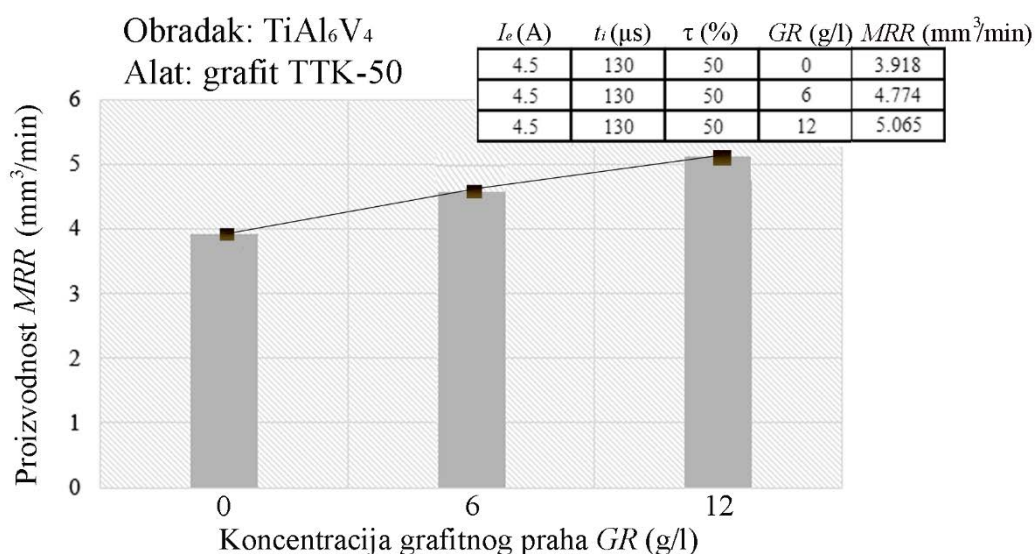


Slika 8-5. Odzivni ANOVA grafik za *MRR* pri PMEDM $TiAl_6V_4$

Dobijena ANOVA analiza je u saglasnosti sa rezultatima koji su dobijeni na osnovu Taguchi metode odzivne površine (poglavlje 7.1.1.1).

S druge strane, na osnovu preliminarnih eksperimentalnih ispitivanja prikazanih na slici 4-8. u poglavlju 4.3.2, dužina impulsa ima znatno veći uticaj pri struji pražnjenja većeg intenziteta. Vidljivo je da sa porastom dužine impulsa do 56 μs pri struji pražnjenja 7.5 A, dolazi do povećanja proizvodnosti obrade. Daljim povećanjem dužine impulsa (>56 μs) dolazi do pada proizvodnosti obrade. Ovo se objašnjava nekontrolisanim porastom količine skinutog materijala, što dovodi do zagušenja procesa i pada proizvodnosti obrade. Do sličnih rezultata su došli i *Gostimirović* i dr.[11].

Uticaj koncentracije grafitnog praha na proizvodnost elektroerozivne obrade legure titanijuma prikazan je na slici 8-6. Dodavanjem grafitnog praha u koncentraciji 6 g/l za postavljene uslove obrade postiže se povećanje proizvodnosti obrade za približno 20%.

Slika 8-6. Uticaj koncentracije grafitnog praha na MRR pri PMEDM $TiAl_6V_4$

8.1.1.5 Uticaj ulaznih parametara na relativno trošenje alata

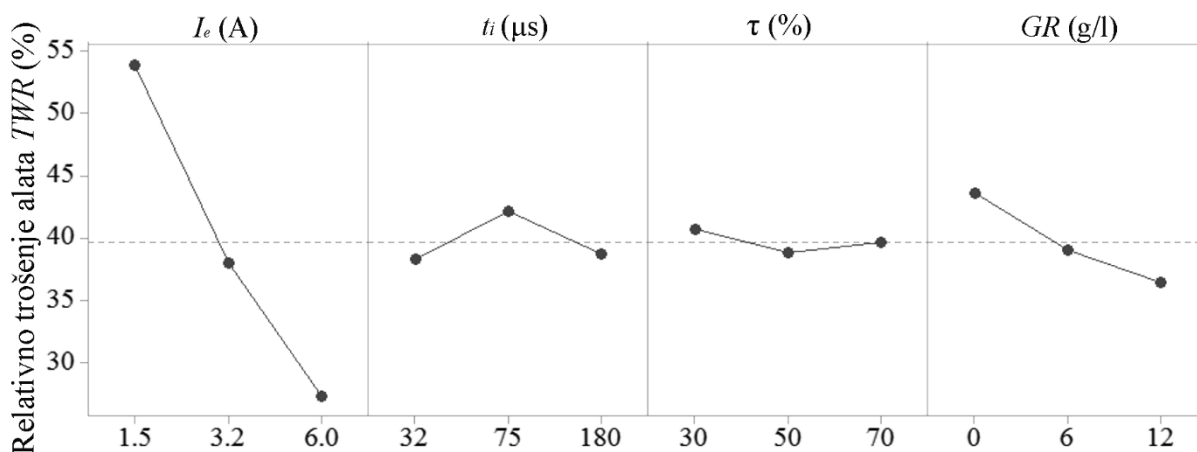
U redukovanoj tabeli 8-5. prikazana je ANOVA analiza za relativno trošenje alata pri PMEDM legure titanijuma. Struja pražnjenja ima najveće procentualno učešće u iznosu 90.57%, zatim koncentracija grafitnog praha 6.75% i na kraju dužina impulsa sa 2.22% učešća. Koeficijent delovanja impulsa je isključen iz analize jer procentualno utiče na relativno trošenje alata manje od 0.5%.

Tabela 8-5. Redukovana ANOVA tabela na osnovu plana $L_9(3^4)$ za TWR pri PMEDM $TiAl_6V_4$

| Faktor | Stepen Slobode | Suma kvadrata | Varijacija | F-test | Procentat |
|-----------------------------|----------------|---------------|------------|--------|-----------|
| A - I_e | 2 | 1067.63 | 533.816 | 203.52 | 90.57 % |
| B - t_i | 2 | 26.25 | 13.126 | 5 | 2.22 |
| D - GR | 2 | 79.58 | 39.79 | 15.17 | 6.75 |
| Greška | 2 | 5.25 | | | 0.46 |
| Ukupno | 8 | 1178.71 | | | |

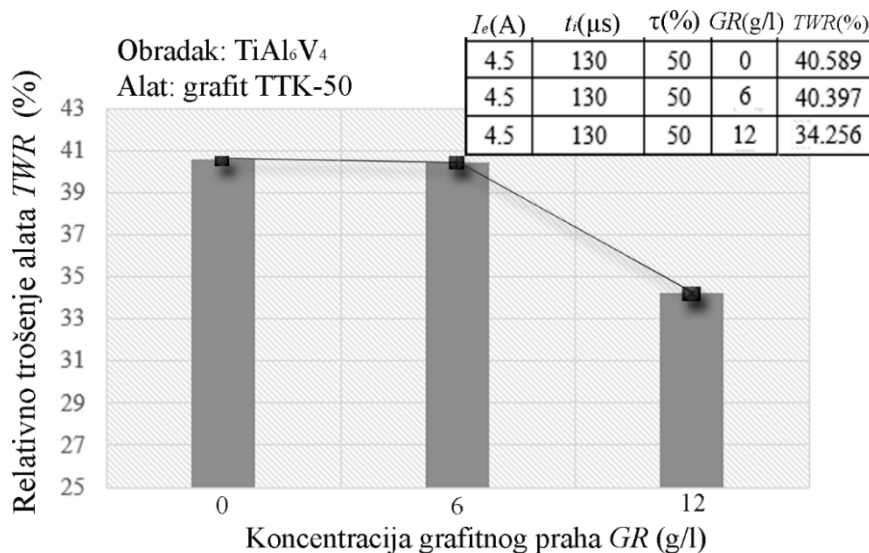
Na slici 8-7. su prikazani grafici koji opisuju uticaj ulaznih parametara na relativno trošenje alata. Uočljivo je da sa porastom struje pražnjenja opada relativno trošenje alata, što nije slučaj kod elektroerozivne obrade čelika. Ovaj fenomen se objašnjava porastom energije pražnjenja, usled čega dolazi do formiranja debljeg sloja titanijum karbida na površini obratka. Formirani sloj titanijum karbida direktno utiče na smanjenje relativnog trošenja alata što je konstatovano i od strane *Hascalik*-a i *Caydas*-a [14].

Na osnovu preliminarnih istraživanja dokazano je da sa povećanjem dužine impulsa dolazi do smanjenja relativnog trošenja alata (poglavlje 4.3.2). Ovaj trend je prisutan za struju pražnjenja 7.5 A i dužine impulsa do 200 μ s, pri konstantnoj vrednosti koeficijenta delovanja impulsa od 50%. Uticaj dužine impulsa je manji kada je struja pražnjenja manja od 7.5 A.



Slika 8-7. Odzivni ANOVA grafik za TWR pri PMEDM TiAl₆V₄

Na slici 8-8. prikazan je uticaj koncentracije grafitnog praha na relativno trošenje alata. Sa koncentracijom od 12 g/l dolazi do smanjenja relativnog trošenja alata za približno 14%.



Slika 8-8. Uticaj koncentracije grafitnog praha na TWR pri EDM TiAl₆V₄

8.1.2 Analiza rezultata dobijenih pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida

Analiza uticaja ulaznih faktora, kao što su struja pražnjenja (faktor A), dužina impulsa (faktor B) i koncentracija grafitnog praha (faktor C), na izlazne performanse (AE+PM)EDM cirkonijum oksida, predstavljena je u ovom poglavlju.

8.1.2.1 Uticaj ulaznih parametara na srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine

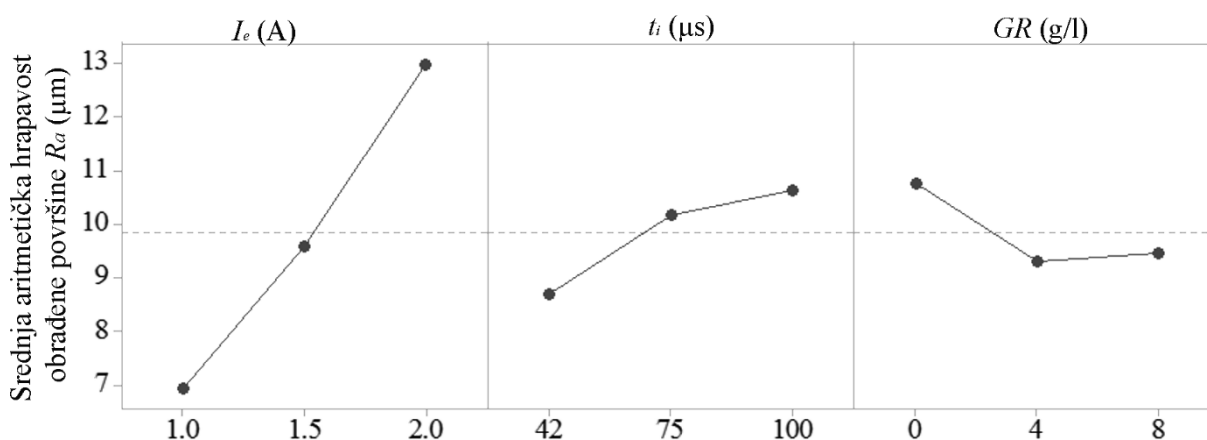
U tabeli 8-6. je prikazana početna ANOVA analiza za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida. Procentualno učešće struje pražnjenja je najveće i iznosi 75.01%. Dužina impulsa zauzima drugo mesto sa učešćem od 8.27%, dok je

koncentracija grafitnog praha na poslednjem mestu sa 5.22%. Zbog isključivanja četvrte kolone iz analize, jer su pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida varirana samo tri faktora, procentualno učešće greške je veće nego kod ANOVA analize PMEDM legure titanijuma prema Tagučić planu $L_9(3^4)$. Kao što je već rečeno, kada je greška manja od 50%, analiza se smatra uspešnom.

Tabela 8-6. ANOVA tabela na prema $L_9(3^4)$ za R_a pri (AE+PMEDM) ZrO_2

| Faktor | Stepen Slobode | Suma kvadrata | Varijacija | F-test | Procenat % |
|-----------------------------|----------------|---------------|------------|--------|------------|
| A - I_e | 2 | 55.511 | 27.755 | 6.53 | 75.06 |
| B - t_i | 2 | 6.127 | 3.063 | 0.72 | 8.27 |
| C - GR | 2 | 3.87 | 1.935 | 0.46 | 5.22 |
| Greška | 2 | 8.499 | 4.25 | | 11.45 |
| Ukupno | 8 | 74.007 | | | |

Poznato je da se F – vrednost dobija deljenjem varijacija pojedinih faktora sa varijacijom greške. Pod pretpostavkom da je visoka vrednost greške nastala usled isključivanja jedne kolone iz plana eksperimenta, dužina impulsa i koncentracija grafitnog praha u ovom slučaju nisu isključeni iz analize, iako su njihove F – vrednosti bile manje od 1. Sa prikazanih grafika na slici 8-9. se može videti da sa povećanjem struje pražnjenja i dužine impulsa raste i srednja aritmetička hrapavost obrađene površine. Kako pokazuje analiza eksperimentalnih podataka, dobijenih na osnovu Tagučić plana eksperimenta $L_9(3^4)$, sa povećanjem koncentracije grafitnog praha dolazi do smanjenja hrapavosti obrađene površine.

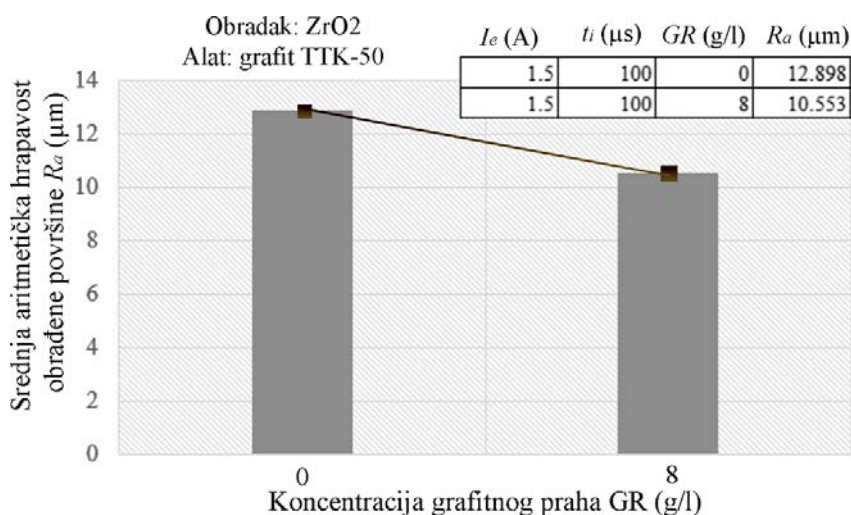


Slika 8-9. Odzivni ANOVA grafik za R_a pri (AE+PM)EDM ZrO_2

Prema preliminarnim ispitivanjima pri konstantnoj struji pražnjenja postoji granična dužina impulsa od 100 µs nakon koje proces AEEDM cirkonijum oksida postaje nestabilan (poglavlje 4.4.2).

Rezultati ANOVA analize su u saglasnosti sa rezultatima dobijenih na osnovu Tagučić metode (poglavlje 7.1.1.2), gde je potvrđen redosled uticajnosti faktora.

Na slici 8-10. dat je uticaj koncentracije praha na R_a za posmatrane režime obrade. Pri konstantnoj struji pražnjenja 1.5 A i dužini impulsa 100 µs dolazi do smanjenja srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine približno za 18% pri dodavanju u dielektrikum grafitnog praha koncentracije 8 g/l.



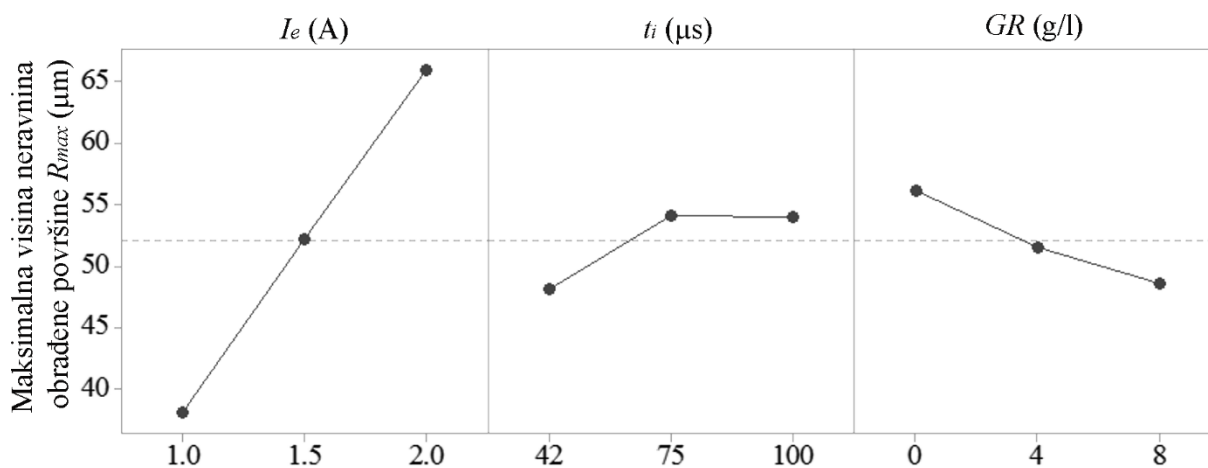
Slika 8-10. Uticaj koncentracije grafitnog praha na R_a pri (AE+PM)EDM ZrO₂

8.1.2.2 Uticaj ulaznih parametara na maksimalnu visinu neravnina obrađene površine

Kao što se vidi iz tabele 8-7., na maksimalnu visinu neravnina obrađene površine procentualno utiču sva tri ulazna parametra: struja pražnjenja 69.74%, dužina impulsa 4.21% i koncentracija grafitnog praha 5.17%. Ovde je iz istih razloga kao i kod R_a , F – vrednosti su manje od 1, zbog visokog procentualnog učešća greške, nisu isključeni iz analize parametari dužina i koeficijent delovanja impulsa. Procentualno učešće greške je izraženije nego kod prethodnih analiza. Na slici 8-1. je dat grafički prikaz uticaja ulaznih parametara.

Tabela 8-7. ANOVA tabela na prema $L_9(3^4)$ za R_{max} pri (AE+PMEDM) ZrO₂

| Faktor | Stepen Slobode | Suma kvadrata | Varijacija | F-test | Procenat % |
|-----------------------------|----------------|---------------|------------|--------|------------|
| A - I_e | 2 | 1163.49 | 581.75 | 3.29 | 69.47 |
| B - t_i | 2 | 70.66 | 35.33 | 0.2 | 4.21 |
| C - GR | 2 | 86.68 | 43.34 | 0.25 | 5.17 |
| Greška | 2 | 353.8 | 176.9 | | 21.15 |
| Ukupno | 8 | 1674.63 | | | |



Slika 8-11. Odzivni ANOVA grafik za R_{max} pri EDM ZrO₂

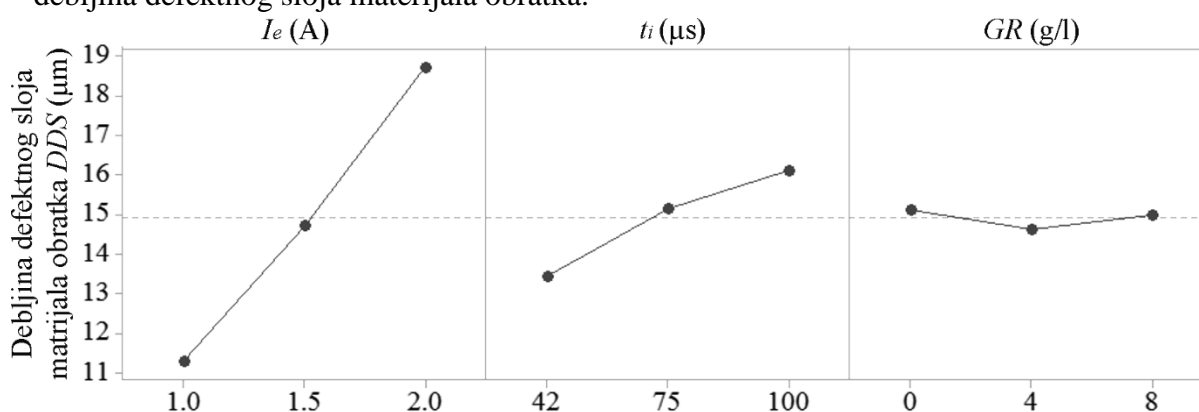
8.1.2.3 Uticaj ulaznih parametara na debljinu defektnog sloja obradene površine

Debljina defektnog sloja obradene površine za postavljene uslove kod elektroerozivne obrade cirkonijum oksida varira u granicama od $11 \div 19 \mu\text{m}$. Procentualno učešće od 85.96% ima struja pražnjenja, zatim dužina impulsa sa 11.26%. ANOVA analizom prema Taguchi planu koncentracija grafitnog praha pokazuje zanemarljiv uticaj sa 0.4% učešća.

Tabela 8-8. ANOVA tabela na prema $L_9(3^4)$ za DDS pri (AE+PMEDM) ZrO_2

| Faktor | Stepen Slobode | Suma kvadrata | Varijacija | F-test | Procenat |
|-----------------------------|----------------|---------------|------------|--------|----------|
| A - I_e | 2 | 83.3287 | 41.6643 | 36.25 | 85.96 |
| B - t_i | 2 | 10.9211 | 5.4605 | 4.75 | 11.26 |
| C - GR | 2 | 0.3972 | 0.1986 | 0.17 | 0.4 |
| Greška | 2 | 2.299 | | | 2.36 |
| Ukupno | 8 | 96.9459 | | | |

Prema slici 8-12. vidljivo je da sa povećanjem struje pražnjenja i dužine impulsa raste debljina defektnog sloja materijala obratka.



Slika 8-12. Odzivni ANOVA grafik za DDS pri (AE+PM)EDM ZrO_2

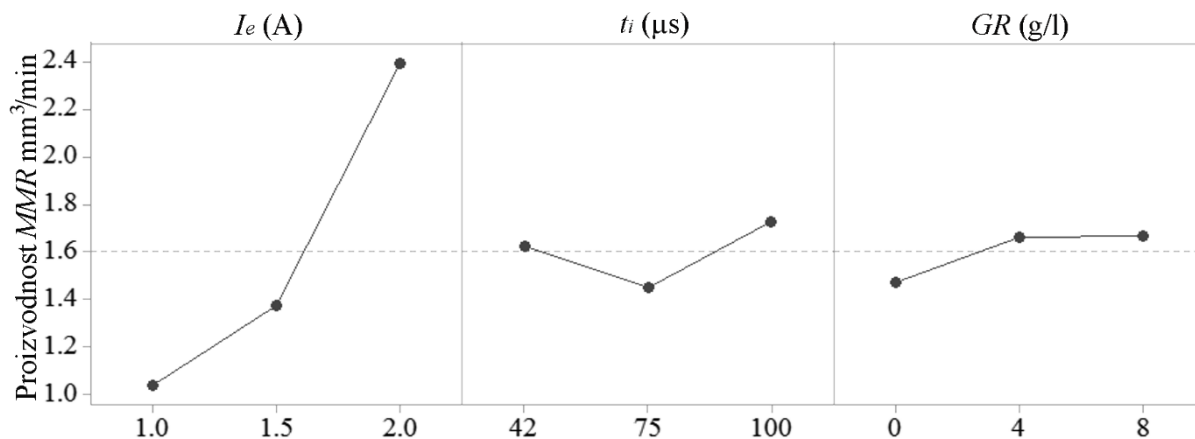
8.1.2.4 Uticaj ulaznih parametara na proizvodnost obrade

U tabeli 8-9. je data ANOVA analiza za proizvodnost obrade pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida.

Tabela 8-9. ANOVA tabela na prema $L_9(3^4)$ za MRR pri (AE+PMEDM) ZrO_2

| Faktor | Stepen Slobode | Suma kvadrata | Varijacija | F-test | Procenat % |
|-----------------------------|----------------|---------------|------------|--------|------------|
| A - I_e | 2 | 2.98302 | 1.49151 | 38.1 | 91.69 |
| B - t_i | 2 | 0.11682 | 0.05841 | 1.49 | 3.56 |
| C - GR | 2 | 0.07482 | 0.03741 | 0.96 | 2.34 |
| Greška | 2 | 0.07829 | 0.03914 | | 2.41 |
| Ukupno | 8 | 3.25296 | | | |

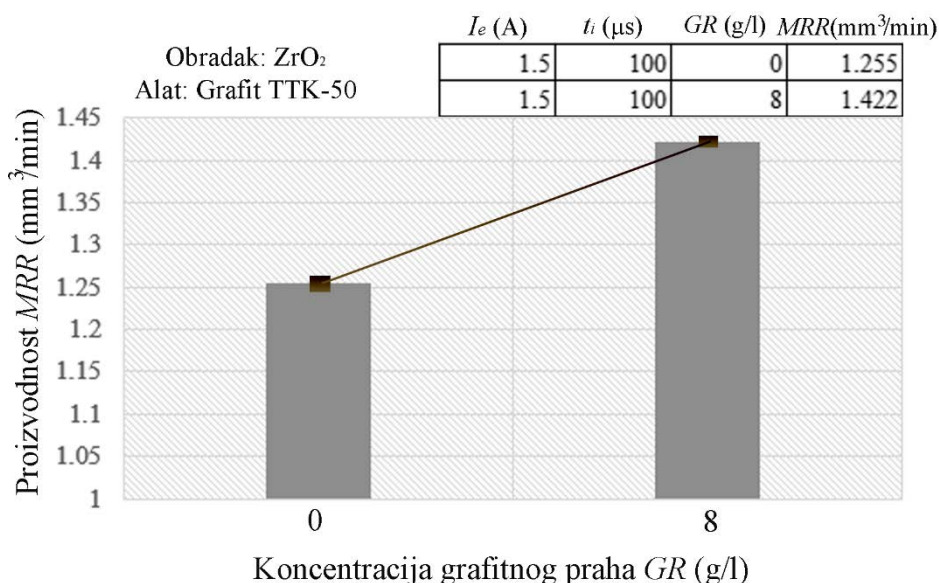
Tipična zavisnost proizvodnosti obrade od ulaznih parametara (AE+PM)EDM procesa, dobijena na osnovu ANOVA analize prikazana je na slici 8-13. Kao što se vidi sa grafika, za postizanje veće proizvodnosti obrade trebala bi struja pražnjenja da bude što veća.



Slika 8-13. Odzivni ANOVA grafik za MRR pri (AE+PM)EDM ZrO_2

Preliminarnim ispitivanjima je utvrđeno da se povećanjem dužine impulsa povećava proizvodnost obrade (poglavlje 4.4.2). Uočeno je da pri konstantnoj struji pražnjenja od 1.5 A sa dužinom impulsa do 100 µs proces ostaje stabilan. Razlog nestabilnosti procesa nakon pomenute dužine impulsa je povećanje energije pražnjenja, gde može doći do razaranja materijala.

Na slici 8-14. prikazan je uticaj koncentracije grafitnog praha na proizvodnost obrade pri istim jačinama struje i dužina impulsa. Kao što se vidi, povećanje proizvodnosti obrade od 12% je moguće sa dodavanjem 8 g/l grafitnog praha u dielektrikum.



Slika 8-14. Uticaj koncentracije grafitnog praha na MRR pri (AE+PM)EDM ZrO_2

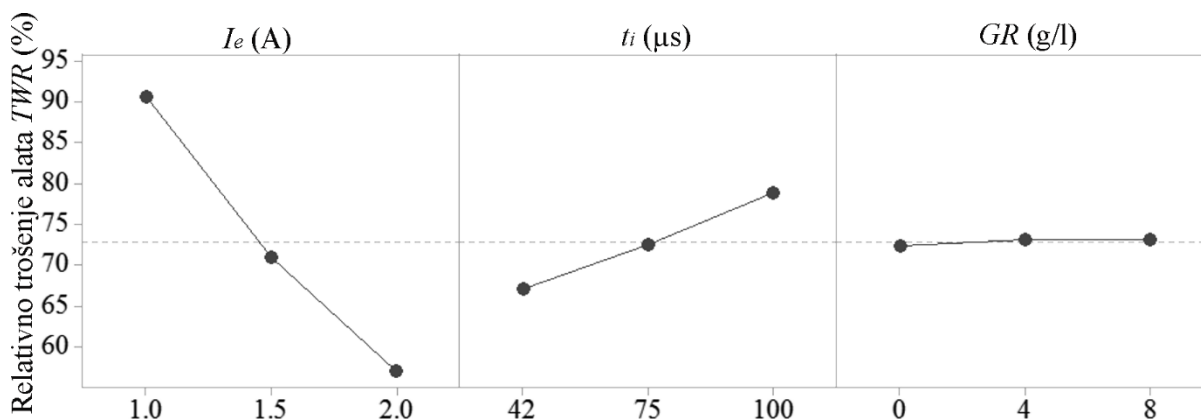
8.1.2.5 Uticaj ulaznih parametara na relativno trošenje alata

U tabeli 8-10. je prikazana ANOVA analiza za relativno trošenje alata kod (AE+PM)EDM cirkonijum oksida. Najveće procentualno učešće ima struja pražnjenja 89.11%, zatim dužina impulsa 10.71%. Prema analizi, koja je bazirana na eksperimentalnim rezultatima dobijenim prema Taguči planu, koncentracija grafitnog praha ima zanemarljiv uticaj na relativno trošenje alata.

Tabela 8-10. Redukovana ANOVA tabela na prema $L_9(3^4)$ za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2

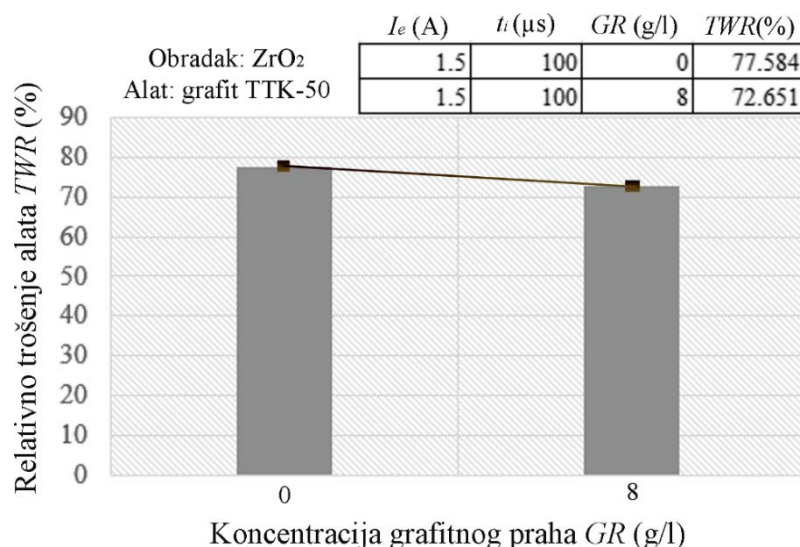
| Faktor | Stepen Slobode | Suma kvadrata | Varijacija | F-test | Procentat % |
|-----------------------------|----------------|---------------|------------|--------|-------------|
| A - I_e | 2 | 1704.77 | 852.383 | 965.75 | 89.11 |
| B - t_i | 2 | 204.87 | 102.433 | 116.06 | 10.71 |
| Greška | 2 | 3.53 | 0.883 | | 0.18 |
| Ukupno | 8 | 1913.16 | | | |

Uzimajući u obzir grafike prikazane na slici 8-15., uočljivo je da sa smanjenjem struje pražnjenja dolazi do smanjenja relativnog trošenja alata. Ovo se opravdava činjenicom da se pri manjim strujama pražnjenja veće vreme utroši na uklanjanje materijala pomoćne elektrode i formiranje ugljeničnog sloja, gde se upravo najviše troši alat. Ovome doprinosi i ograničeno vreme eksperimenta od 60 min, gde je u nekim slučajevima vreme potrebno za formiranje sloja iznosilo približno 30 min. Sličan zaključak proistekao je iz istraživanja autora *Fukuzawa* i ostali [35]. U ovom istraživanju je relativno trošenje alata praćeno kroz tri faze: a) uklanjanje materijala pomoćne elektrode, b) formiranje tranzicionog sloja i c) uklanjanje osnovnog materija. Najveće relativno trošenje alata primećeno je u prvoj i drugoj fazi, dok u trećoj fazi dolazi do znatnog smanjenja. Povećanje dužine impulsa takođe doprinosi povećanju relativnog trošenja alata.



Slika 8-15. Odzivni ANOVA grafik za TWR pri (AE+PM)EDM ZrO_2

Prema podacima sa slike 8-16. nije vidljiv značajan uticaj koncentracije grafitnog praha na relativno trošenje alata. Međutim, pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida sa konstantnim vrednostima struje pražnjenja i dužine impulsa od 1.5 A i 100 µs, dodavanjem grafitnog praha od 8 g/l je moguće smanjenje trošenja alata za približno 6% (slika 8-17.).

Slika 8-16. Uticaj koncentracije grafitnog praha na TWR pri EDM ZrO₂

8.2 ANALIZA MODELOVANJA ELEKTROEROZIVNE OBRADNE

U drugu grupu spadaju analize matematičkih modela dobijenih na osnovu metodologije odzivne površine, prvo za elektroerozivnu obradu legure titanijuma, a zatim za obradu cirkonijum oksida. Takođe su analizirani i modeli dobijeni primenom alata veštačke inteligencije.

8.2.1 Analiza modela za PMEDM legure titanijuma

Osnovni matematički oblici modela izlaznih performansi elektroerozivne obrade legure titanijuma dobijeni su primenom metode odzivne površine prema centralnom kompozicionom planu eksperimenta. Na osnovu analize varijansi polaznih četvorofaktornih polinomnih modela, različitih značajnosti pojedinih članova i njihovih međusobnih uticaja, dobijeni su različiti oblici matematičkih modela za pojedine izlazne performanse.

Za srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine usvojen je linearni model sa interakcijama gde figurišu tri od četiri polazna faktora (jednačina 6.6., poglavlje 6.1.1.1.). Zbog visoke p-vrednosti, koeficijent delovanja impulsa je isključen iz modela. Za proizvodnost obrade i relativno trošenje alata nakon redukcije (odbacivanje beznačajnih članova) usvojeni su kvadratni modeli (jednačina 6.8., poglavlje 6.1.1.2., odnosno jednačina jednačina 6.10., poglavlje 6.1.1.3.)

Inteligentnih modeli posmatranih izlaznih performansi elektroerozivne obrade legure titanijuma su generisani primenom adaptivnog neuro fazi sistema (ANFIS) na osnovu podataka centralnog kompozicionog plana. Za svaku posmatranu izlaznu performansu kreiran je po jedan ANFIS model (poglavlje 6.1.2.). Vrednosti srednje kvadratne greške treniranja i testiranja dobijenih modela za određivanje R_a , MRR i TWR su na zadovoljavajućem nivou.

U tabeli 8-11. dat je uporedni prikaz eksperimentalnih i modelskih vrednosti (RSM i ANFIS) za izlazne performanse obrade pri elektroerozivnoj obradi legure titanijuma.

Tabela 8-11. Uporedni prikaz eksperimentalnih i modelskih vrednosti kod PMEDM TiAl₆V₄

| Redni broj | R_a (μm) | | | MRR (mm^3/min) | | | TWR (%) | | |
|----------------------------|----------------------------|-------------|-------------|---------------------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| | Eksp. | RSM | ANFIS | Eksp. | RSM | ANFIS | Eksp. | RSM | ANFIS |
| 1. | 3.81 | 4.29 | 3.81 | 1.55 | 1.70 | 1.28 | 35.85 | 37.62 | 34.74 |
| 2. | 8.15 | 8.75 | 8.15 | 8.56 | 7.52 | 8.15 | 27.78 | 26.60 | 26.90 |
| 3. | 4.16 | 4.33 | 4.16 | 2.22 | 2.73 | 2.22 | 44.27 | 44.10 | 44.76 |
| 4. | 11.78 | 11.52 | 15.37 | 4.98 | 3.69 | 2.51 | 31.99 | 33.08 | 32.57 |
| 5. | 3.95 | 4.29 | 3.95 | 1.66 | 1.55 | 1.39 | 42.87 | 42.31 | 42.56 |
| 6. | 8.52 | 8.75 | 8.52 | 9.81 | 8.52 | 9.40 | 29.71 | 31.29 | 29.61 |
| 7. | 4.25 | 4.34 | 5.30 | 2.35 | 2.58 | 1.84 | 44.99 | 45.25 | 46.58 |
| 8. | 11.95 | 11.52 | 14.50 | 5.34 | 4.69 | 2.99 | 33.83 | 34.23 | 35.39 |
| 9. | 3.98 | 4.11 | 3.98 | 1.62 | 1.74 | 1.35 | 36.62 | 34.87 | 35.71 |
| 10. | 7.81 | 7.44 | 7.81 | 8.65 | 7.56 | 8.24 | 24.88 | 23.86 | 24.14 |
| 11. | 4.01 | 4.14 | 2.88 | 4.01 | 3.53 | 2.25 | 40.98 | 41.36 | 41.00 |
| 12. | 11.65 | 10.20 | 11.65 | 5.15 | 4.49 | 5.15 | 29.78 | 30.34 | 29.90 |
| 13. | 4.12 | 4.10 | 4.12 | 1.74 | 1.59 | 1.47 | 37.95 | 39.57 | 37.58 |
| 14. | 7.85 | 7.44 | 10.32 | 9.47 | 8.56 | 9.06 | 30.78 | 28.55 | 30.51 |
| 15. | 4.23 | 4.14 | 1.54 | 2.45 | 3.39 | 2.42 | 39.04 | 42.51 | 39.82 |
| 16. | 8.63 | 10.21 | 8.63 | 6.19 | 5.49 | 6.19 | 31.03 | 31.49 | 31.81 |
| 17. | 1.95 | 0.98 | 1.95 | 0.51 | 1.40 | 0.51 | 52.66 | 50.96 | 52.59 |
| 18. | 12.56 | 12.41 | 12.56 | 11.23 | 9.48 | 6.97 | 26.67 | 27.36 | 26.13 |
| 19. | 5.25 | 5.37 | 5.79 | 3.75 | 3.91 | 6.09 | 25.08 | 26.65 | 31.02 |
| 20. | 7.32 | 8.06 | 7.83 | 2.88 | 1.96 | 3.02 | 37.23 | 34.94 | 38.84 |
| 21. | 6.52 | 6.69 | 6.86 | 3.98 | 3.81 | 4.32 | 33.01 | 33.74 | 34.69 |
| 22. | 6.85 | 6.69 | 6.70 | 5.34 | 4.58 | 4.91 | 41.26 | 39.41 | 38.27 |
| 23. | 8.52 | 7.40 | 8.03 | 3.91 | 3.76 | 4.04 | 40.58 | 39.60 | 38.05 |
| 24. | 6.25 | 5.98 | 5.69 | 5.06 | 4.63 | 5.19 | 34.25 | 34.11 | 33.93 |
| 25. | 7.01 | 6.69 | 6.78 | 4.77 | 4.20 | 4.61 | 40.39 | 39.16 | 36.42 |
| 26. | 6.85 | 6.69 | 6.78 | 4.34 | 4.20 | 4.61 | 39.26 | 39.16 | 36.42 |
| 27. | 5.96 | 6.69 | 6.78 | 4.66 | 4.20 | 4.61 | 38.18 | 39.16 | 36.42 |
| 28. | 6.23 | 6.69 | 6.78 | 4.42 | 4.20 | 4.61 | 41.99 | 39.16 | 36.42 |
| 29. | 6.42 | 6.69 | 6.78 | 4.93 | 4.20 | 4.61 | 37.81 | 39.16 | 36.42 |
| 30. | 6.59 | 6.69 | 6.78 | 4.66 | 4.20 | 4.61 | 37.79 | 39.16 | 36.42 |
| Prosečna greška (%) | | 7.02 | 9.15 | | 7.26 | 13.15 | | 3.40 | 4.09 |

Kvantitativna mogućnost predikcije je ocenjena u odnosu na procenat odstupanja (devijacije) između dobijenih i očekivanih vrednosti za R_a , MRR i TWR , drugim rečima preko relativne greške RG :

$$RG = \left| \frac{EV - MV}{EV} \cdot 100\% \right| \quad (8.1)$$

gde su EV – eksperimentalna vrednost i MV – modelska vrednost.

Na osnovu proračuna relativne greške svake tačke eksperimenta izračunata je prosečna greška posmatranih modela. Generisani modeli na bazi metodologije odzivne površine i veštačke inteligencije, pokazali su dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima. Prema tabeli 8-12. može se zaključiti da ANFIS modeli imaju najmanju prosečnu grešku, odnosno imaju bolju sposobnost predikcije rezultata nego RSM modeli.

Verifikacija tačnosti dobijenih modela, je sprovedena pomoću četiri dodatna eksperimenta koji nisu učestvovali u postupku generisanja modela. U tabeli 8-12. dati su parametri elektroerozivne obrade dodatnih eksperimenata. Prikaz rezultata potvrdnog testa procesa verifikacije tačnosti dobijenih modela dat je u tabeli 8-13.

Tabela 8-12. Eksperimenti za verifikaciju modela kod PMEDM $TiAl_6V_4$

| Redni broj | Faktor | | | |
|------------|--------------|---------------------|---------------|-----------|
| | I_e (A) | t_i (μ s) | τ (%) | GR g/l |
| 1. | 3.2 | 130 | 50 | 0 |
| 2. | 3.2 | 180 | 50 | 0 |
| 3. | 3.2 | 180 | 30 | 6 |
| 4. | 6 | 32 | 70 | 6 |

Tabela 8-13. Rezultati verifikaciju eksperimenata

| Performanse | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|-----------|-------------|--------------|
| R_a (μ m) | | | MRR (mm^3/min) | | | TWR (%) | | |
| Eksp. | RSM | ANFIS | Eksp. | RSM | ANFIS | Eksp. | RSM | ANFIS |
| 4.97 | 4.39 | 4.63 | 2.17 | 2.09 | 1.66 | 48.23 | 44.71 | 43.37 |
| 5.84 | 4.42 | 5.39 | 2.16 | 2.11 | 1.99 | 49.55 | 44.96 | 46.25 |
| 4.45 | 4.22 | 3.50 | 4.12 | 3.04 | 2.23 | 37.25 | 40.79 | 43.18 |
| 7.12 | 6.96 | 9.20 | 8.25 | 10.69 | 9.76 | 25.34 | 25.81 | 29.45 |
| Prosečna greška (%): | 10.85 | 16.27 | / | 15.44 | 23.88 | / | 6.97 | 12.21 |

Na osnovu verifikacionih eksperimenata, prosečna greška dobijenih modela se kreće u granicama od 6.97 ÷ 23.88 %. Prema dosadašnjim istraživanjima model se smatra sposobnim za predikciju ako prosečna greška iznosi približno do 15%. U tom kontekstu, pojedini modeli za predikciju izlaznih performansi PMEDM, dobijeni pomoću metoda RSM i ANFIS se mogu smatrati sposobnim za predikciju jer se njihova prosečna greška kreće u dozvoljenim granicama. Zbog veće greške modeli za predikciju MRR (RSM i ANFIS), kao i model za R_a (ANFIS), se smatraju delimično pouzdanim. Da bi se povećala pouzdanost dobijenih modela potreban je veći broj podataka koji bi se koristili za kreiranje modela.

8.2.2 Analiza modela za (AE+PM)EDM cirkonijum oksida

Primenom metode odzivne površine na osnovu BBD plana, dobijeni su osnovni matematički oblici modela za izlazne performanse (AE+PM)EDM cirkonijum oksida. Analizom varijansi polaznih četvorofaktornih polinomnih modela, nakon odbacivanja beznačajnih članova i redukcije, usvojeni su trofaktorni modeli drugog reda za R_a , MRR i TWR (jednačine 6.12., 6.14. i 6.16., poglavlje 6.1.2.)

Inteligentni više-ulazno više-izlazni (MIMO) model posmatranih izlaznih performansi (AE+PM)EDM je nastao primenom fazi logike. Izlazne performanse R_a , MRR i TWR su integrisane u jedan model, čime je ostvarena ušteda u vremenu koje bi bilo utrošeno na kreiranje više modela.

Poređenje matematičkih modela izlaznih performansi elektroerozivne obrade cirkonijum oksida dobijenih pomoću metode odzivne površine i fazi logike može se izvršiti na osnovu njihove relativne tačnosti u odnosu na eksperimentalne vrednosti. U tabeli 8-14. je data uporedna prosečna relativna greška podataka dobijenih na osnovu modela RSM i MIMO. Modeli dobijeni pomoću RSM i fazi logike pokazali su dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima gde je prosečna greška za sve modele iznosila ispod 4%. Može se zaključiti da modeli dobijeni primenom RSM i fazi logike imaju približna odstupanja u poređenju sa eksperimentalnim podacima.

Tabela 8-14. Uporedni prikaz eksperimentalnih i modelskih vrednosti pri (AE+PM)EDM ZrO_2

| Redni broj | R_a (μm) | | | MRR (mm^3/min) | | | TWR (%) | | |
|----------------------------|-------------------------|-------------|-------------|------------------------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| | Eksp. | RSM | MIMO | Eksp. | RSM | MIMO | Eksp. | RSM | MIMO |
| 1. | 5.89 | 5.32 | 6.11 | 0.98 | 1.02 | 1.03 | 81.24 | 79.49 | 79.67 |
| 2. | 8.99 | 9.28 | 9.03 | 2.02 | 2.11 | 2.12 | 53.24 | 54.79 | 54.21 |
| 3. | 7.83 | 6.98 | 7.88 | 1.11 | 1.01 | 1.12 | 96.78 | 94.68 | 92.41 |
| 4. | 12.74 | 13.04 | 12.74 | 2.61 | 2.59 | 2.52 | 58.65 | 60.94 | 58.94 |
| 5. | 7.75 | 8.20 | 7.88 | 0.95 | 0.99 | 1.01 | 90.05 | 91.69 | 92.25 |
| 6. | 14.96 | 14.41 | 14.22 | 2.23 | 2.20 | 2.12 | 59.22 | 57.00 | 58.94 |
| 7. | 7.75 | 8.10 | 7.84 | 1.00 | 1.04 | 1.03 | 79.56 | 81.79 | 79.74 |
| 8. | 12.85 | 12.20 | 12.70 | 2.59 | 2.57 | 2.53 | 58.44 | 56.81 | 58.94 |
| 9. | 9.04 | 9.06 | 9.01 | 1.11 | 1.11 | 1.15 | 66.25 | 66.87 | 66.55 |
| 10. | 12.89 | 13.00 | 12.67 | 1.25 | 1.35 | 1.28 | 77.58 | 77.55 | 74.52 |
| 11. | 9.20 | 9.31 | 8.98 | 1.36 | 1.31 | 1.38 | 62.25 | 61.83 | 62.92 |
| 12. | 10.55 | 10.78 | 10.47 | 1.42 | 1.55 | 1.37 | 72.65 | 72.50 | 74.52 |
| 13. | 8.20 | 8.84 | 9.04 | 1.38 | 1.35 | 1.38 | 64.74 | 62.96 | 63.20 |
| 14. | 8.61 | 8.84 | 9.04 | 1.39 | 1.35 | 1.38 | 62.44 | 62.96 | 63.20 |
| 15. | 9.02 | 8.84 | 9.04 | 1.42 | 1.35 | 1.38 | 63.10 | 62.96 | 63.20 |
| 16. | 8.88 | 8.84 | 9.04 | 1.30 | 1.35 | 1.38 | 62.99 | 62.96 | 63.20 |
| 17. | 8.62 | 8.84 | 9.04 | 1.38 | 1.35 | 1.38 | 61.50 | 62.96 | 63.20 |
| Prosečna Graška (%) | | 3.81 | 2.42 | | 3.49 | 3.03 | | 1.78 | 1.62 |

Na osnovu tri dodatna eksperimenta, koji nisu učestvovali pri kreiranju RSM i MIMO modela za određivanje izlaznih performansi (AE+PM)EDM cirkonijum oksida, sprovedena je verifikacija modela, tabela 8-15.

Tabela 8-15. Eksperimenti za verifikaciju modela pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| Redni broj | Faktor | | |
|------------|-----------|------------|----------|
| | I_e (A) | t_i (μs) | GR (g/l) |
| 1. | 1.5 | 75 | 0 |
| 2. | 1.5 | 42 | 4 |
| 3. | 2 | 75 | 0 |

Prosečna greška svih dobijenih modela je na zadovoljavajućem nivou. Stoga se RSM i MIMO modeli za određivanje performansi EDM mogu smatrati pouzdanim, tabela 8-16.

Tabela 8-16. Rezultati verifikacionih podataka kod pri (AE+PM)EDM ZrO₂

| Redni broj | Performanse | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------|-------------|--------------|---------|-------------|-------------|
| | R_a (μm) | | | MRR (mm ³ /min) | | | TWR (%) | | |
| | Eksp. | RSM | MIMO | Eksp. | RSM | MIMO | Eksp. | RSM | MIMO |
| 1. | 10.201 | 11.297 | 10.901 | 1.307 | 1.216 | 1.601 | 70.547 | 68.521 | 74.861 |
| 2. | 8.11 | 8.191 | 9.014 | 1.33 | 1.196 | 1.381 | 65.33 | 61.312 | 63.043 |
| 3. | 14.47 | 14.398 | 14.225 | 1.99 | 2.175 | 2.129 | 56.11 | 56.996 | 58.945 |
| Prosečna Greška (%): | / | 4.08 | 6.56 | / | 8.74 | 11.11 | / | 3.53 | 4.88 |

8.3 ANALIZA OPTIMIZACIJE ELEKTROEROZIVNE OBRADNE

U okviru treće grupe analize, sprovedena je analiza optimizacije vrednosti ulaznih parametara procesa EDM, dobijenih pomoću metoda jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacije. U prvom slučaju je to urađeno za PMEDM legure titanijuma, a drugom za (AE+PM)EDM cirkonijum oksida.

8.3.1 Analiza optimizacije za PMEDM legure titanijuma

Za jednokriterijumsku optimizaciju ulaznih faktora pri elektroerozivnoj obradi legure titanijuma, primenjena je klasična Taguchi metoda (poglavljje 7.1.1.). Prema kriterijumima "manje je bolje" za R_a , R_{max} , DDS i TWR i "veće je bolje" za MRR izvršena je optimizacija ulaznih parametara. Upporedni prikaz optimalnih parametara PMEDM, dobijenih na osnovu Taguchi analize, prema planu L₉(3⁴), dat je u tabeli 8-17.

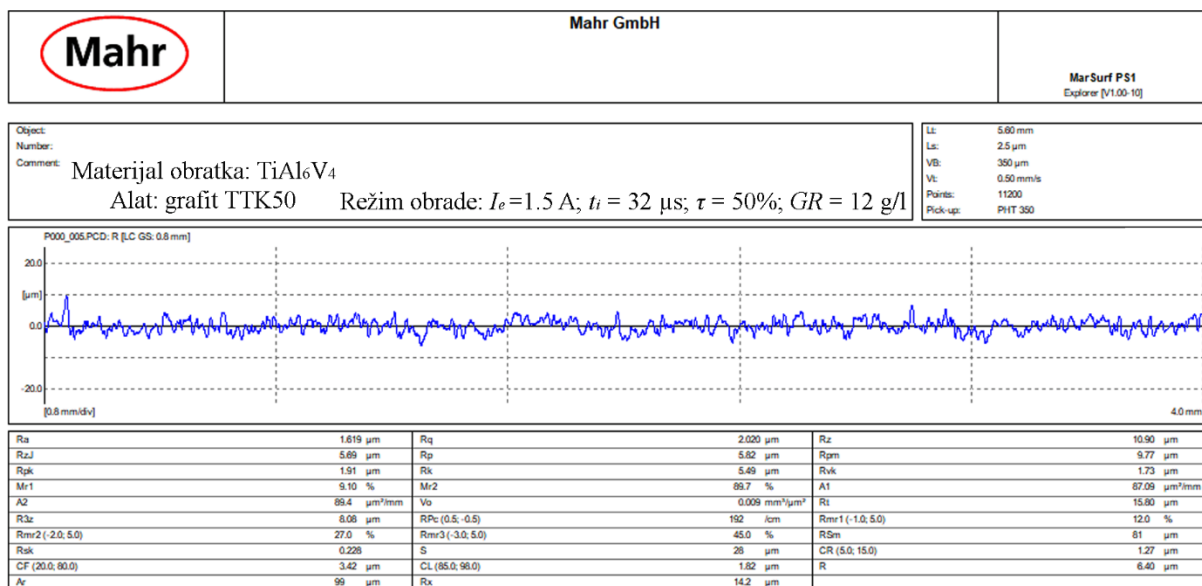
Poređenjem optimalnih parametara elektroerozivne obrade za posmatrane izlazne performanse (poglavljje 7.1.1.1), uočljivo je da su za izlazne performanse PMEDM procesa R_a , R_{max} i DDS dobijeni isti nivoi ulaznih faktora, za struju pražnjenja, dužinu impulsa i koncentraciju grafitnog praha, dok se razlikovao samo koeficijent delovanja impulsa, i to kod izlazne performanse R_a ($\tau = 30\%$). ANOVA analizom, bazirana na Taguchi planu, utvrđeno je

da koeficijent delovanja impulsa pokazao najmanju uticajnost na izlazne performanse PMEDM procesa. Stoga se zbog ekonomičnosti, za izlazne performanse R_a , R_{max} i DDS sproveo jedan potvrdni eksperiment, gde je usvojena vrednost koeficijenta delovanja impulsa iznosila 50%.

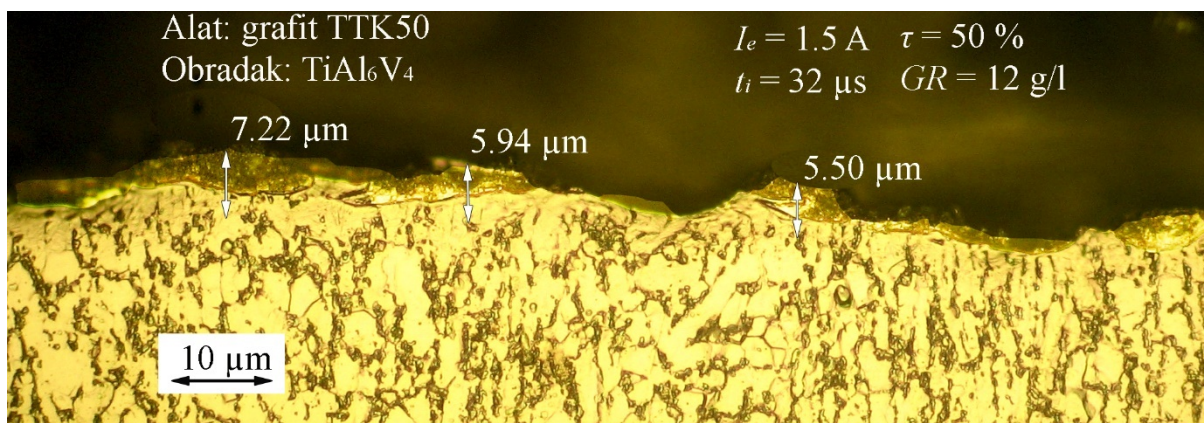
Tabela 8-17. Optimalni parametri jednokriterijumske optimizacije pri PMEDM TiAl₆V₄

| Izlazna performansa | Optimalni parametri | | | | Predikcija | Potvrdni eksperiment | Prosečna Greška % |
|------------------------------|---------------------|------------|------------|------------|------------|----------------------|-------------------|
| | I_e (A) | t_i (μs) | τ (%) | GR (g/l) | | | |
| R_a (μm) | 1.5 | 32 | 50 | 12 | 1.72 | 1.62 | 8.37 |
| R_{max} (μm) | | | | | 9.35 | 10.90 | |
| DDS (μm) | | | | | 5.99 | 6.22 | |
| MRR (mm ³ /min) | 6 | 180 | 70 | 12 | 10.21 | 9.98 | |
| TWR (%) | 6 | 32 | 50 | 12 | 23.47 | 20.33 | |

Na slikama 8-17. i 8-18. dati su primeri izmerenih izlaznih performansi elektroerozivne obrade legure titanijuma (R_a , R_{max} i DDS), pri optimalnim režimima obrade.



Slika 8-17. Izmerene hrapavosti obrađene površine za optimalan režim pri PMEDM TiAl₆V₄



Slika 8-18. Debljina defektnog sloja materijala obratka za optimalan režim pri PMEDM TiAl₆V₄, $DDS = 6.22$ μm

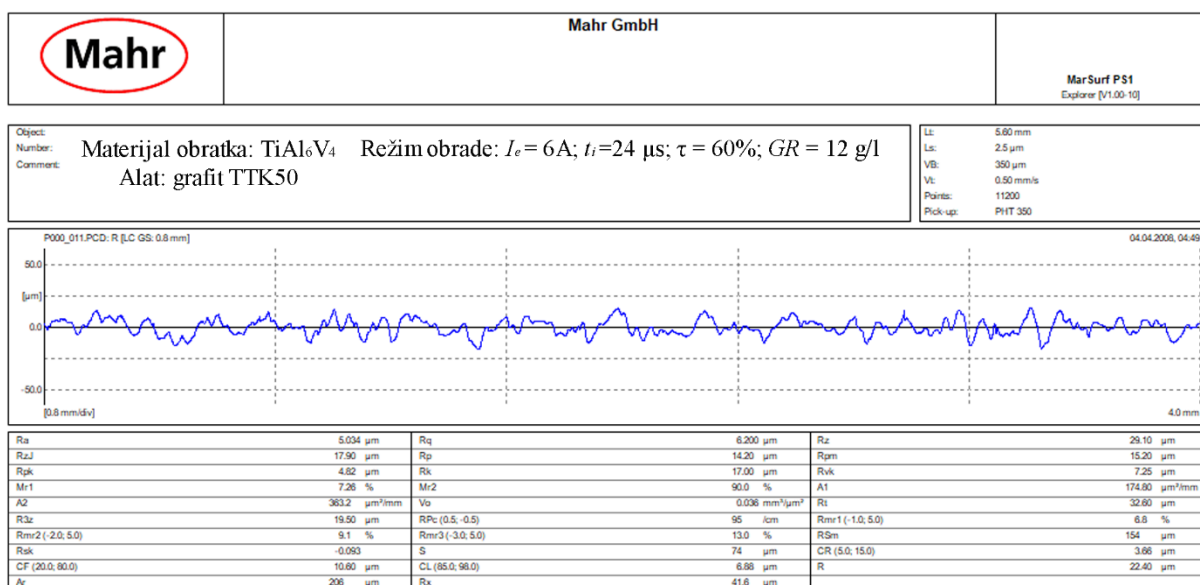
Prosečna greška između vrednosti izlaznih performansi EDM, koje su dobijene predikcijom na osnovu Tagučii analize i vrednosti koje su dobijene nakon eksperimenata verifikacije (sa optimalnim vrednostima ulaznih parametra), iznosila je samo 8.37%. Shodno tome, jednokriterijumska optimizacija ulaznih parametara elektroerozivne obrade se može smatrati uspešnom.

Rezultati višekriterijumske optimizacije su dobijeni primenom metodologije odzivne površine, na osnovu eksperimentalnih rezultata iz centralnog kompozicionog plana eksperimenta (poglavlje 7.2.1.1.). Za identifikaciju optimalnih parametara analizirane su izlazne performanse R_a , MRR i TWR . Optimalni parametri višekriterijumske analize pri PMEDM legure titanijuma dati su u tabeli 8-18.

Tabela 8-18. Optimalni parametri višekriterijumske optimizacije pri PMEDM $TiAl_6V_4$

| Izlazna performansa | Optimalni parametri | | | | Predikcija | Potvrđni eksperiment | Prosečna Greška % |
|------------------------------|--|------------|------------|------------|------------|----------------------|-------------------|
| | I_e (A) | t_i (μs) | τ (%) | GR (g/l) | | | |
| R_a (μm) | Predložene vrednosti 6.21 24.00 66.17 12.00 | | | | 5.55 | 5.03 | 9.95 |
| MRR (mm ³ /min) | Usvojene vrednosti 6 24 60 12 | | | | 11.23 | 10.55 | |
| TWR (%) | | | | | 18.38 | 21.03 | |

Zbog ograničenja mašine alatke, prilikom izvođenja potvrđnog eksperimenta, vrednosti ulaznih parametara su podešene na približne vrednosti. Poređenjem vrednosti izlaznih performansi potvrđnog eksperimenta, sa prediktivnim vrednostima dobijenim na osnovu RSM, izračunata je prosečna greška koja je iznosila 9.95%. Shodno tome, optimalne vrednosti ulaznih parametara, koje su dobijene pomoću višekriterijumske optimizacije na osnovu RSM, mogu se smatrati validnim.



Slika 8-19. Hrapavost obrađene površine za optimalan režim dobijen na osnovu višekriterijumske optimizacije pri PMEDM $TiAl_6V_4$

8.3.2 Analiza optimizacije za (AE+PM)EDM cirkonijum oksida

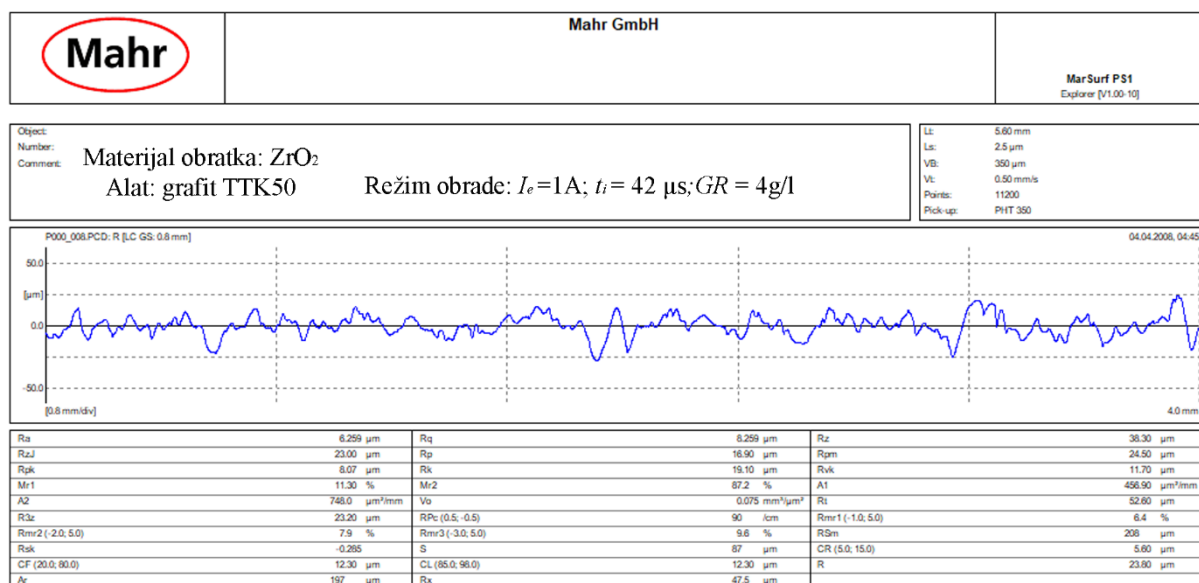
Jednokriterijumska optimizacija ulaznih parametara (AE+PM)EDM oksida keramike sprovedena je pomoću Tagučić metode (poglavlje 7.1.1.2.). Za R_a , R_{max} , DDS i TWR primenjen je kriterijum "manje je bolje", dok je za MRR primenjen kriterijum "veće je bolje". U tabeli 8-19. date su kombinacije optimalnih ulaznih parametara pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida dobijenih jednokriterijumskom optimizacijom.

Tabela 8-19. Upporedni prikaz optimalnih parametara pri (AE+PM)EDM ZrO_2

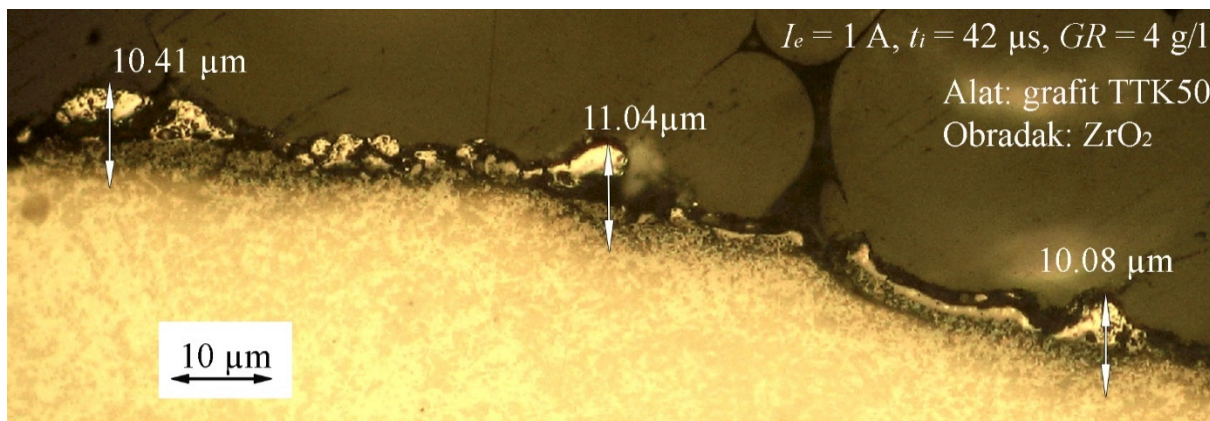
| Izlazna performansa | Optimalni parametri | | | Predikcija | Potvrđni eksperiment | Prosečna greška % |
|------------------------------|---------------------|------------|----------|------------|----------------------|-------------------|
| | I_e (A) | t_i (μs) | GR (g/l) | | | |
| R_a (μm) | 1 | 42 | 4 | 5.79 | 6.26 | 9.01% |
| R_{max} (μm) | | | | 32.28 | 38.30 | |
| DDS (μm) | | | | 9.87 | 10.51 | |
| MRR (mm ³ /min) | 2 | 100 | 8 | 2.69 | 2.78 | |
| TWR (%) | 2 | 42 | 8 | 51.28 | 55.61 | |

Prilikom Tagučić analize za izlazne performanse (AE+PM)EDM cirkonijum oksida R_a , R_{max} i DSS dobijene su iste optimalne vrednosti ulaznih parametara obrade (I_e i t_i). Dok se koncentracija grafitnog praha razlikovala samo kod R_{max} ($GR = 8$ g/l). Na osnovu ANOVA analize (poglavlje 8.1.2.2.) koncentracija grafitnog praha utiče svega 5% na R_{max} . Shodno tome usvojeni su optimalni režimi obrade sa udelom grafitnog praha od 4 g/l.

Na osnovu prethodno navedenog, ukupno si izvedena tri potvrđna eksperimenta. Na slici 8-20. i 8-21. dati su rezultati potvrđnog eksperimenta za R_a , R_{max} i DDS . Dodatna dva potvrđna eksperimenta sprovedena su i za izlazne performanse MRR i TWR . Srednja prosečna greška za posmatrane izlazne performanse iznosi 9.01%, što ukazuje na uspešnu jednokriterijumsku optimizaciju ulaznih parametara (AE+PM)EDM cirkonijum oksida.



Slika 8-20. Hrapavost obrađene površine za optimalan režim dobijen na osnovu jednokriterijumske optimizacije pri (AE+PM)EDM ZrO_2

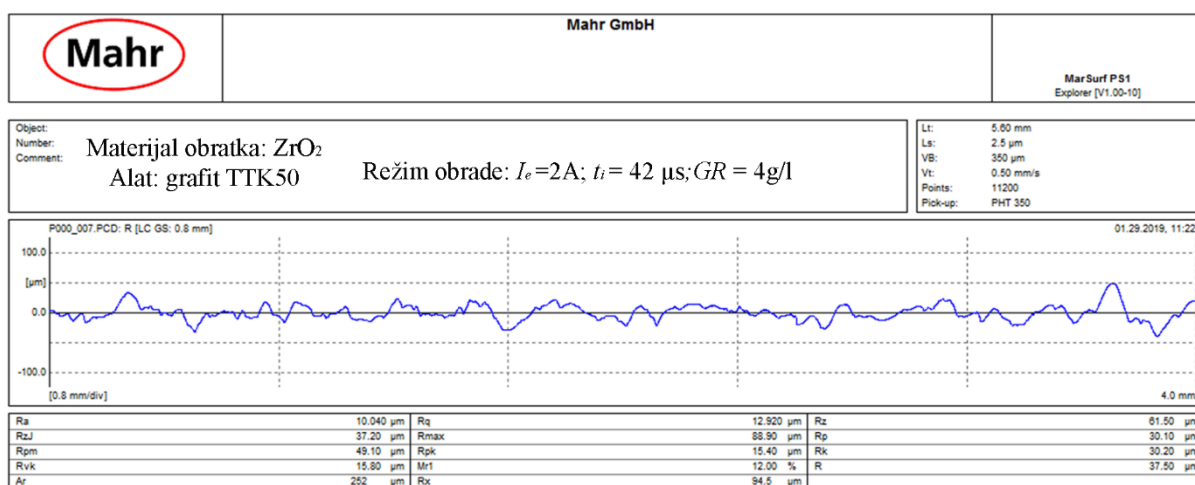


Slika 8-21. Debljina defektnog sloja materijala obratka za optimalan režim pri EDM ZrO_2 , $DDS = 10.51 \mu m$

Primenom metodologije odzivne površine na osnovu, Box-Behnken plana eksperimenta, dobijeni su rezultati višekriterijumske optimizacije (7.2.1.2.). Optimalni parametri višekriterijumske analize izlaznih performansi R_a , MRR i TWR prikazani su u tabeli 8-20.

Tabela 8-20. Optimalni parametri višekriterijumske optimizacije pri (AE+PM)EDM ZrO_2

| Izlazna performansa | Optimalni parametri | | | Predikcija | Potvrdni eksperiment | Prosečna greška % |
|----------------------|----------------------|-------------------|------------|------------|----------------------|-------------------|
| | I_e (A) | t_i (μs) | GR (g/l) | | | |
| R_a (μm) | Predložene vrednosti | | | 9.28 | 10.04 | 8.31 |
| MRR (mm^3/min) | 2 | 42 | 4.87 | 2.15 | 1.99 | |
| TWR (%) | Usvojene vrednosti | | | 54.91 | 60.03 | |
| | 2 | 42 | 4 | | | |



Slika 8-22. Hrapavost obrađene površine za optimalan režim dobijen na osnovu višekriterijumske optimizacije pri (AE+PM)EDM ZrO_2

9. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Na osnovu sprovedenih teorijskih i eksperimentalnih istraživanja, kao i izvršenih analiza, mogu se izvesti zaključci i pravci budućih istraživanja

9.1 ZAKLJUČCI

U disertaciji prikazani su rezultati eksperimentalnih istraživanja sprovedenih sa ciljem modelovanja i optimizacije procesa elektroerozivne obrade savremenih inženjerskih materijala, kao što su legure titanijuma i keramike na bazi cirkonijum oksida. U cilju dokazivanja postavljenih hipoteza izvedena su eksperimentalna istraživanja pri elektroerozivnoj obradi legure titanijuma (TiAl_6V_4) u dielektrikumu sa pomešanim prahom (PMEDM) i pri elektroerozivnoj obradi cirkonijum oksida (ZrO_2) pri čemu je u dielektrikum takođe dodat prah grafita, uz prisustvo pomoćne elektrode ((AE+PM)EDM). Sprovedeno je modelovanje izlaznih performansi EDM procesa, za oba materijala obratka, primenom metodologije odzivne površine (RSM) i metoda veštačke inteligencije (ANFIS i fazi logika). Takođe je izvršena i ocena uticaja ulaznih parametara na izlazne performanse procesa, kao i primena dobijenih rezultata na optimalno upravljanje procesom elektroerozivne obrade radi povećanja proizvodnosti i kvaliteta obrade, kao i smanjenja relativnog trošenja alata.

Na osnovu Tagučii metode i ANOVA analize, sprovedena je detaljna analiza uticaja ulaznih parametara, kao što su struja pražnjenja, dužina impulsa, koeficijent delovanja impulsa i koncentracija grafitnog praha na izlazne performanse PMEDM legure titanijuma (srednja aritmetička hrapavost obrađene površine - R_a , maksimalna visina neravnina obrađene površine - R_{max} , debljina defektnog sloja materijala obratka - DDS , proizvodnost obrade - MRR i relativno trošenje alata - TWR). Za postavljene uslove obrade, prosečno posmatrano za sve izlazne promenljive, najveći uticaj ima struja pražnjenja - I_e , zatim dužina impulsa - t_i , koncentracija grafitnog praha GR i na kraju koeficijent delovanja impulsa τ . Ista metodologija je primenjena i na eksperimentalne rezultate koji su dobijeni pri ((AE+PM)EDM) cirkonijum oksida. Sprovedena analiza je pokazalo isti redosled signifikantnosti ulaznih parametara na izlazne performanse procesa ((AE+PM)EDM), kao i pri obradi legure TiAl_6V_4 .

Shodno navedenom, potvrđene su prve tri hipoteze istraživanja, odnosno:

- Analizom rezultata elektroerozivne obrade legure titanijuma u dielektrikumu sa pomešanim prahom dokazana je *Hipoteza 1: Proces elektroerozivne obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom ostvaruje povoljnije izlazne performanse u odnosu na klasičnu elektroerozivnu obradu legure titanijuma*. Uticaj koncentracije grafitnog praha je bio najizraženiji pri struji pražnjenja 4.5 A, gde je procentualno smanjenje srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine iznosilo približno 27% (pri $GR = 12$ g/l), povećanje proizvodnosti obrade 20% (pri $GR = 6$ g/l) i smanjenje relativnog trošenja alata za 14% (pri $GR = 12$ g/l).

- Izvođenjem preliminarnih ispitivanja AEEDM cirkonijum oksida dokazana je Hipoteza 2: Primena postupka elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom omogućuje obradu elektroneprovodljivog keramičkog materijala tj. cirkonijum oksida. Nanošenjem grafitnog premaza i postavljanjem adhezivne bakarne trake na gornju površinu keramike ostvarena je hibridna pomoćna elektroda, koja je zaslužna za uspešnu izvedbu elektroerozivne obrade cirkonijum oksida.
- Na osnovu analize rezultata (AE+PM)EDM cirkonijum oksida dokazana je i Hipoteza 3: Kombinovanjem postupaka elektroerozivne obrade sa pomoćnom elektrodom i elektroerozivne obrade u dielektrikum sa pomešanim prahom, pri obradi elektroneprovodljive keramike, postiže se dodatno poboljšanje izlaznih performansi. Dodavanje grafitnog praha u dielektrikum pri obradi keramike na bazi cirkonijum oksida, uz prisustvo pomoćne elektrode, dovodi do smanjenja srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine za 18%, povećanja proizvodnosti obrade za 12% i smanjenja relativnog trošenja alata za 6%. Navedena poboljšanja izlaznih performansi se dobijaju pri struji pražnjenja 1.5 A, dužini impulsa 100 μ s i koncentraciji grafitnog praha 8 g/l. U poređenju sa elektroerozivnom obradom legure titanijuma, obradu cirkonijum oksida odlikuje manja proizvodnost obrade, veća hrapavost obrađene površine i veće relativno trošenje alata.

Strukturni oblici matematičkih modela za izlazne performanse R_a , MRR i TWR dobijeni su primenom metode odzivne površine, za PMEDM legure titanijuma prema centralno kompozicionom planu, a za (PM+AE)EDM cirkonijum oksida, prema Box-Behnken planu. Takođe, na osnovu navedenih planova eksperimenta, kreirani su inteligentni modeli primenom fazi logike, pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida, odnosno adaptivnih neuro fazi sistema pri PMEDM obradi legure titanijuma.

Ako je cilj modelovanja poboljšanje razumevanja posmatranih procesa, valjanost modela nije samo u poklapanju sa eksperimentalnim podacima na osnovu kojih je generisan model. Model mora imati sposobnost predikcije novih situacija i to onih koje nisu ugrađene u model. Na osnovu eksperimenata koji nisu učestvovali pri dobijanju modela izvedena je verifikacija modela, odnosno ocena sposobnosti predikcije izlaznih performansi sa novim eksperimentalnim podacima. Greška modela dobijena verifikacionim eksperimentima pri PMEDM legure titanijuma za RSM modele iznosila je 10.85% za R_a , 15.44 % za MRR i 6.97 % za TWR , a za (AE+PM)EDM cirkonijum oksida 4.08% za R_a , 8.74% za MRR i 3.53% za TWR . Takođe je sprovedena verifikacija dobijenih inteligentnih modela, gde je greška ANFIS modela pri PMEDM legure titanijuma iznosila 16.27% za R_a , 23.88 % za MRR i 12.21 % za TWR , dok je kod MIMO modela pri (AE+PM)EDM cirkonijum oksida iznosila 6.56% za R_a , 11.11% za MRR i 4.88% za TWR . Modeli čija je greška ispod 15% mogu se smatrati sposobnim za predikciju rezultata, dok se ostali modeli smatraju delimično pouzdanim.

U tom kontekstu može se konstatovati:

- Izračunavanjem relativne greške i sagledavanjem najmanjeg odstupanja rezultata modela od eksperimentalnih vrednosti, zbog prosečne greške verifikacije, delimično je dokazana Hipoteza 4: Moguće je dobiti pouzdane matematičke modele za izlazne

performanse u funkciji ulaznih parametara elektroerozivne obrade legure titanijuma i cirkonijum oksida primenom klasičnih i inteligentnih metoda. Prosečna greška verifikacije svih dobijenih modela se kreće u granicama $4.08 \div 23.88\%$.

Optimizacija procesa PMEDM legure titanijuma i (AE+PM)EDM cirkonijum oksida sprovedena je primenom klasičnih metoda. Primenom jednokriterijumske Taguči metode određeni su optimalni režimi elektroerozivne obrade. Primenom metodologije odzivne površine na osnovu CCD (za leguru titanijuma) i Box-Behnken (za cirkonijum oksid) plana eksperimenta određene su optimalne vrednosti ulaznih parametara elektroerozivne obrade na osnovu višekriterijumske optimizacije. Na osnovu sprovedenog može se konstatovati:

- Analizom rezultata klasičnih metoda optimizacije, odnosno Taguči metode pri jednokriterijumskoj i RSM pri višekriterijumskoj optimizaciji uspešno je dokazano da je *Na osnovu adekvatnih matematičkih modela moguće je odrediti optimalne parametre elektroerozivne obrade na bazi jednog i više kriterijuma.* Za proveru određenih optimalnih vrednosti ulaznih parametara obrade, dobijenih Taguči metodom izvedeni su potvrdni eksperimenti koji dokazuju uspešnost jednokriterijumske optimizacije pri elektroerozivnoj obradi oba materijala. Prosečna greška potvrdnih eksperimenata je ispod 10%. Potvrdnim eksperimentima je još jednom dokazana hipoteza 5, gde je izvršena provera optimalnih vrednosti ulaznih parametara obrade, dobijenih metodologijom odzivne površine pri višekriterijumskoj optimizaciji, za koje je prosečna greška takođe iznosila ispod 10%.

Na kraju se sa sigurnošću može reći da rezultati istraživanja koji su predstavljeni u disertaciji omogućavaju bolje razumevanje postupaka PMEDM, AEEDM i (AE+PM)EDM, što će doprineti njihovoj većoj konkurentnosti u industriji, koja je sada na strani klasičnog postupka elektroerozivne obrade. Primenom matematičkih modela, optimalnih režima obrade i smernica definisanih u ovom istraživanju navedeni postupci se mogu upotrebiti sa visokom pouzdanošću.

S obzirom da su PMEDM, AEEDM i (AE+PM)EDM relativno novi postupci obrade, koji još nisu u potpunosti istraženi, svakako da postoji mogućnost njihovog daljeg kontinualnog poboljšanja i usavršavanja.

9.2 PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA

Inovativni pravci razvoja elektroerozivne obrade PMEDM, AEEDM i (AE+PM)EDM, kao i primenjena metodologija modeliranja i optimizacije koje su predstavljene u ovom radu podigli su EDM na jedan viši nivo, posebno sa aspekta ekonomičnosti i produktivnosti. U tom kontekstu, postavljeni ciljevi istraživanja su u potpunosti dostignuti. Međutim, istraživanja koja su sprovedena u ovom radu obuhvataju samo jedan manji deo oblasti elektroerozivne obrade savremenih inženjerskih materijala.

Kroz istraživanja u okviru disertacije otvorena su neka pitanja novih naučnih saznanja, koja se nameću kao pravci daljeg razvoja i buduće primene inovativnih metoda elektroerozivne obrade. Buduća istraživanja u području unapređenja, modelovanja i optimizacije procesa elektroerozivne obrade savremenih inženjerskih materijala, mogu biti usmerene u nekoliko različitih pravaca:

1. Istraživanje EDM u tečnom dielektrikumu sa pomešanim prahom – PMEDM:

- Ispitivanje procesa PMEDM legure titanijuma uzimajući u obzir veći broj i šire intervale ulaznih faktora, kao i istraživanja za različite dubine erodiranja.
- Istražiti elektroerozivnu obradu legure titanijuma u dielektrikumu sa titanijumovim prahom i u dielektrikumu sa elektroneprovodljivim prahom.
- Uticaj granulacije grafitnog praha može biti jedan od ulaznih faktora, koji bi mogao da utiče na izlazne performanse EDM savremenih inženjerskih materijala. Pored granulacije, oblik zrna grafitnog praha, takođe može biti značajan faktor.
- Istraživanja u području modifikacije površina, dodavanjem praha od različitih materijala u dielektrikuma, što bi proširilo spektar primene biokompatibilnih materijala koji se koriste u medicini.
- Zbog velikog uticaja poprečnog preseka alata na proizvodnost i kvalitet obrade, potrebno je ispitati do kog poprečnog preseka ima smisla koristiti metodu PMEDM sa aspekta efikasnog ispiranja zone obrade.
- Sa obzirom da se EDM najčešće primenjuje za izradu složenih prostornih površina, dodavanjem praha takođe se može postići značajno smanjenje trošenja alata, posebno bitno sa aspekta troškova obrade.

2. Istraživanje EDM sa pomoćnom elektrodom – AEEDM:

- Ispitivanje maksimalne dubine erodiranja primenom postupka AEEDM.
- Istraživanjem novih materijala i načina postavljanja pomoćnih elektroda, moguće je napraviti nove pomake u pravcu efikasnosti EDM izolacionih keramičkih materijala.
- Sprovesti ispitivanje mogućnosti primene AEEDM i kod drugih savremenih elektroneprovodljivih materijala koji imaju sve veću primenu u globalnoj industriji.
- Istražiti sve mogućnosti kombinovanja postupaka AEEDM i PMEDM, u cilju dobijanja efikasnog hibridnog procesa (AE+PM)EDM.
- Sagledati mogućnosti elektroerozivne obrade izolacionih materijala sa pomoćnom elektrodom, koja je potpomognuta ultrazvučnim oscilacijama.

3. Modelovanje i optimizacija inovativnih metoda EDM:

- Unaprediti matematičko modelovanje primenom novih ili poboljšanih metoda, npr. integracija fazi logike i genetskih algoritama, neuronskih mreža i regresione analize itd.
- Dodatna analiza efikasnosti eksperimentalnih planova koji se koristi za kreiranje klasičnog ili inteligentnog modela. Npr. primena centralnog kompozicionog ili Box-Behnken plana za obučavanje neuronskih mreža.
- Optimizacija procesa EDM primenom drugih savremenih metoda i pristupa. Kombinacijom različitih optimizacionih metoda, moguće je unaprediti sam postupak optimizacije, što će doprineti povećanju ekonomičnosti i produktivnosti EDM.

10. LITERATURA

1. A. Okada, Ceramic technologies for automotive industry: Current status and perspectives. *Materials Science and Engineering: B* 161, 182-187 (2009).
2. C. R. Dandekar, Y. C. Shin, J. Barnes, Machinability improvement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) via LAM and hybrid machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50, 174-182 (2010).
3. P. Kovac, D. Milikic, *Rezanje metala*. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, (1998).
4. M. Gostimirovic, *Nekonvencionalni postupci obrade*. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, (2012).
5. J. H. Zhang, T. C. Lee, W. C. Lau, Study on the electro-discharge machining of a hot pressed aluminum oxide based ceramic. *Journal of Materials Processing Technology* 63, 908-912 (1997).
6. B. R. Lazarenko, To invert the effect of wear on electric power contacts. *Russian*, (1943).
7. E. M. Williams, *Theory of Electric Spark Machining*. AIEE Trans. (Application and Industry), New York, (1952).
8. E. C. Jameson, *Electrical discharge machining*. Society of Manufacturing Engineers, (2001).
9. M. Gostimirovic, P. Kovac, M. Sekulic, B. Savkovic, The research of discharge energy in EDM process, *Proceedings of the 34th international conference on production engineering*, 2011.
10. D. Milikić, *Nekonvencionalni postupci obrade: priručnik za studije i praksu*. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, (2002).
11. M. Gostimirovic, P. Kovac, M. Sekulic, B. Skoric, Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM. *Journal of Mechanical Science and Technology* 26, 173-179 (2012).
12. M. Gostimirović, P. Kovač, B. Skorić, M. Sekulić M, Effect of electrical pulse parameters on the machining performance in EDM. *Indian Journal of Engin.&Materials Sciences* 18, 411-415 (2011).
13. K. Rajurkar, Nontraditional manufacturing processes. *Handbook of Design, Manufacturing and Automation*, 211-241 (1994).
14. A. Haşçalık, U. Çaydaş, Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Applied Surface Science* 253, 9007-9016 (2007).
15. Y. Fukuzawa, N. Mohri, H. Gotoh, T. Tani, Three-dimensional machining of insulating ceramics materials with electrical discharge machining. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 19, 150-156 (2009).
16. K. Inoue, *Method of Electrical Discharge Machining*. Nikkan Kogyo Shimbun Ltd, Tokyo, Japan, (1962).
17. A. L. Livshits, Introduction, in: *Electro-erosion Machining of Metals*. Butterworth & Co., London, (1960).
18. B. I. Lazarenko, N. I. Lazarenko, *Technological Characteristics of Electrosark Machining of Current Conducting Materials*. Electrosark Machining of Metals Consultants Bureau, New York, (1964).
19. H. Karafuzi, K. Suda, Study of electrical discharge machining. *Proc. 1st All-India Machine Tool Design and Research Conf., Jadavpur* (1967).
20. M. N. Pal, P. K. Mishra, A. Bhattacharyya, Optimization of circuit parameters of a relaxation circuit in EDM. *Proc. 4th All-India Machine Tool Design and Research Conf., Madras*, (1970).
21. M. L. Jeswani, Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining. *Wear* 70, 133-139 (1980).

22. F. Klocke, D. Lung, G. Antonoglou, D. Thomaidis, The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electrodischarge machining with small discharge energies. *Journal of Materials Processing Technology* 149, 191-197 (2004).
23. F. Q. Hu, F. Y. Cao, B. Y. Song, P. J. Hou, Y. Zhang, K. Chen, J. Q. Wei, Surface Properties of SiCp/Al Composite by Powder-Mixed EDM. *Procedia CIRP* 6, 101-106 (2013).
24. H. K. Kansal, S. Singh, P. Kumar, Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining (PMEDM). *Journal of Materials Processing Technology* 184, 32-41 (2007).
25. N. Mohri, J. Tsukamoto, M. Fujino, Surface modification by EDM - an innovation in EDM with semi-conductive electrodes. *Proceedings of Winter Annual Meet ASME* 34, 21-30 (1988).
26. H. Narumiya, N. Mohri, N. Saito, H. Otake, Y. Tsnekawa, T. Takawashi, K. Kobayashi, EDM by powder suspended working fluid. *Proceedings of 9th ISEM* 5-8 (1989).
27. Q. Y. Ming, Y. H. Liu, Powder-suspension dielectric fluid for EDM. *Journal of Materials Processing Technology* 52, 44-54 (1995).
28. Y. S. Wong, L. C. Lim, I. Rahuman, W. M. Tee, Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric. *Journal of Materials Processing Technology* 79, 30-40 (1998).
29. B. H. Yan, Y. C. Lin, F. Y. Huang, C. H. Wang, Surface modification of SKD 61 during EDM with metal powder in the dielectric. *Materials Transactions* 42, 2597-2604 (2001).
30. W. S. Zhao, Q. S. Meng, Z. L. Wang, The application of research on powder mixed EDM in rough machining. *Journal of Materials Processing Technology* 129, 30-33 (2002).
31. E. Unses, C. Cogun, Improvement of Electric Discharge Machining (EDM) Performance of Ti-6Al-4V Alloy with Added Graphite Powder to Dielectric. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 61, 409-418 (2015).
32. P. Peças, E. Henriques, Influence of silicon powder-mixed dielectric on conventional electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43, 1465-1471 (2003).
33. H. K. Kansal, S. Singh, P. Kumar, Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology. *Journal of Materials Processing Technology* 169, 427-436 (2005).
34. P. Peças, E. Henriques, Electrical discharge machining using simple and powder-mixed dielectric: The effect of the electrode area in the surface roughness and topography. *Journal of Materials Processing Technology* 200, 250-258 (2008).
35. Y. Fukuzawa, T. Tani, E. Iwane, N. Mohri, A New Machining Method for Insulating Ceramics with an Electrical Discharge Phenomenon. *Journal of the Ceramic Society of Japan* 103, 1000-1008 (1995).
36. T. Tani, Y. Fukuzawa, T. Kawase, K. Furutani, N. Mohri, N. Saito, Machining Characteristics of ZrO₂ Ceramics by Electrical Discharge Machining. *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers* 32, 18-26 (1998).
37. K. Liu, D. Reynaerts, B. Lauwers, Influence of the pulse shape on the EDM performance of Si₃N₄-TiN ceramic composite. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58, 217-220 (2009).
38. B. K. Kwiecińska, S. Pusz, Pyrolytic carbon — Definition, classification and occurrence. *International Journal of Coal Geology* 163, 1-7 (2016).
39. A. Sabur, A. Moudood, M. Y. Ali, M. A. Maleque, Investigation of surface roughness in micro-electro discharge machining of nonconductive ZrO₂ for MEMS application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 53, 012090 (2013).
40. D. Rodic, M. Gostimirovic, P. Kovac, M. Sekulic, B. Savković, Principle of electrical discharge machining of non-conductive zirconia ceramics, *International Scientific Conference "Flexible Technologies" - MMA* (13; Novi Sad; 2018), 2018.
41. C. S. Trueman, J. Huddleston, Material removal by spalling during EDM of ceramics. *Journal of the European Ceramic Society* 20, (2000).

-
42. K. Kaneko, Y. Fukuzawa, Characteristics of Micro EDM for Insulating Aluminum Nitride Ceramics. *Advanced Materials Research* 579, 86-91 (2012).
 43. Y. C. Lin, J. C. Hung, H. M. Chow, A. C. Wang, Optimization of EDM parameters for ZrO₂ and Al₂O₃ ceramics using Taguchi method. *Journal of Ceramic Processing Research* 16, 249-257 (2015).
 44. N. Mohri, Y. Fukuzawa, T. Tani, N. Saito, Layer Generation Process on Work-piece in Electrical Discharge Machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52, 157-160 (2003).
 45. Y. Fukuzawa, T. Tani, E. Iwane, N. Mohri, Some Machining Methods of Insulating Materials by an Electrical Discharge Machine. *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers* 29, 11-21 (1995).
 46. A. Sabur, M. Y. Ali, M. A. Maleque, A. A. Khan, Investigation of Material Removal Characteristics in EDM of Nonconductive ZrO₂ Ceramic. *Procedia Engineering* 56, 696-701 (2013).
 47. A. Banu, M. Y. Ali, M. A. Rahman, Micro-electro discharge machining of non-conductive zirconia ceramic: investigation of MRR and recast layer hardness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 75, 257-267 (2014).
 48. Y. Guo, P. Hou, D. Shao, Z. Li, L. Wang, L. Tang, High-Speed Wire Electrical Discharge Machining of Insulating Zirconia with a Novel Assisting Electrode. *Materials and Manufacturing Processes* 29, 526-531 (2014).
 49. M. J. Hampden-Smith, T. T. Kodas, in Part 1. An overview of CVD processes. (WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 1995), chap. Part 1. An overview of CVD processes, pp. 5-34.
 50. R. Gadow, R. Landfried, F. Kern, Electrical Discharge Machining (EDM) of High-Performance Ceramics. *Proceedings of the III Advanced Ceramics and Applications Conference*, 25-32 (2016).
 51. Y.-C. Lin, J.-C. Hung, H.-M. Chow, A.-C. Wang, Optimization of EDM parameters for ZrO₂ and Al₂O₃ ceramics using Taguchi method. *Journal of Ceramic Processing Research* 16, 249-257 (2015).
 52. A. Sabur, M. Y. Ali, M. A. Maleque, M. A. Moudood, Micro-edm for micro-channel fabrication on nonconductive ZrO₂ ceramic. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 10, 1841-1851 (2014).
 53. N. Mohri, Y. Fukuzawa, T. Tani, N. Saito, K. Furutani, Assisting Electrode Method for Machining Insulating Ceramics. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 45, 201-204 (1996).
 54. T. Tani, Y. Fukuzawa, N. Mohri, N. Saito, Effects of assisting electrode material on the EDM-ed characteristics for insulating sialon ceramics. *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers* 30, 17-24 (1996).
 55. T. Tani, Y. Fukuzawa, T. Kawase, K. Futurani, N. Mohri, N. Saito, Machining Characteristics of ZrO₂ Ceramics by Electrical Discharge Machining. *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers* 32, 18-26 (1998).
 56. Y. Fukuzawa, N. Mohri, T. Tani, A. Muttamara, Electrical discharge machining properties of noble crystals. *Journal of Materials Processing Technology* 149, 393-397 (2004).
 57. Y. F. Guo, G. Q. Deng, J. C. Bai, Z. S. Lu, Electrical Discharge Machining (EDM) Phenomena of Insulating ZrO₂ Ceramics with Assisting Electrode. *Key Engineering Materials* 375-376, 313-317 (2008).
 58. A. Muttamara, Y. Fukuzawa, N. Mohri, T. Tani, Effect of electrode material on electrical discharge machining of alumina. *Journal of Materials Processing Technology* 209, 2545-2552 (2009).
 59. J. Renije, L. Yonghong, Z. Yanzehn, F. Wang, C. Baoping, F. Xingsheng, Single discharge machining insulating Al₂O₃ ceramic with high instantaneous pulse energy in kerosene. *Materials and Manufacturing Processes* 27, 676-682 (2012).
-

-
60. D. Hanaoka, Y. Fukuzawa, K. Kaneko, T. Harada, Discharge Machining of Insulating Si₃N₄ Ceramics with added Al₂O₃. The 16th International Symposium on Electromachining, (2014).
 61. T. Tani, Y. Fukuzawa, K. Nanbu, N. Mohri, Machining phenomena in EDM of insulating ceramics with powder mixed oil. Journal of the JAPAN society of electrical machining engineers 36, 39-46 (2002).
 62. G. Kucukturk, C. Cogun, A New Method for Machining of Electrically Nonconductive Workpieces Using Electric Discharge Machining Technique. Machining Science and Technology 14, 189-207 (2010).
 63. M. Sekulić, M. Gostimirović, P. Kovač, B. Savković, Z. Jurković, Optimization of cutting parameters based on tool-chip interface temperature in turning process using Taguchi's method. Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, (2011).
 64. M. Radovanovic, M. Madić, Modeling the plasma arc cutting process using ANN. Nonconventional Technologies Review, 43-48 (2011).
 65. M. Radovanovic, M. Madić, Methodology of neural network based modeling of machining processes. International Journal of Modern Manufacturing Technologies 2, 77-82 (2010).
 66. M. Sekulic, V. Pejic, M. Brezocnik, M. Gostimirović, M. Hadzistevic, Prediction of surface roughness in the ball-end milling process using response surface methodology, genetic algorithms, and grey wolf optimizer algorithm. Advances in Production Engineering & Management 13, 18-30 (2018).
 67. P. Kovac, M. Gostimirovic, D. Rodic, B. Savkovic, Using the temperature method for the prediction of tool life in sustainable production. Measurement 133, 320-327 (2019).
 68. P. Kovac, D. Rodic, V. Pucovsky, B. Savkovic, M. Gostimirovic, Application of fuzzy logic and regression analysis for modeling surface roughness in face milling. Journal of Intelligent manufacturing 24, 755-762 (2013).
 69. G. Cukor, Z. Jurković, M. Sekulić, Rotatable central composite design of experiments versus Taguchi method in the optimization of turning. Metalurgija 50, 17-20 (2011).
 70. M. Gostimirovic, V. Pucovsky, M. Sekulic, M. Radovanovic, M. Madic, Evolutionary multi-objective optimization of energy efficiency in electrical discharge machining. Journal of Mechanical Science and Technology 32, 4775-4785 (2018).
 71. M. Gostimirovic, M. Radovanovic, M. Madic, D. Rodic, N. Kulundzic, Inverse electro-thermal analysis of the material removal mechanism in electrical discharge machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-11 (2018).
 72. M. Radovanović, Multi-objective optimization of multi-pass turning AISI 1064 steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-14 (2018).
 73. N. M. Abbas, D. G. Solomon, M. F. Bahari, A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). International Journal of machine tools and Manufacture 47, 1214-1228 (2007).
 74. M. Jeswani, Dimensional analysis of tool wear in electrical discharge machining. Wear 55, 153-161 (1979).
 75. A. Yahya, C. Manning, Determination of material removal rate of an electro-discharge machine using dimensional analysis. Journal of Physics D: Applied Physics 37, 1467 (2004).
 76. P.-J. Wang, K.-M. Tsai, Semi-empirical model on work removal and tool wear in electrical discharge machining. Journal of materials processing technology 114, 1-17 (2001).
 77. M. R. Patel, M. A. Barrufet, P. T. Eubank, D. D. DiBitonto, Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model. Journal of applied physics 66, 4104-4111 (1989).
 78. P. T. Eubank, M. R. Patel, M. A. Barrufet, B. Bozkurt, Theoretical models of the electrical discharge machining process. III. The variable mass, cylindrical plasma model. Journal of applied physics 73, 7900-7909 (1993).
-

-
79. S. T. Jilani, P. Pandey, Analysis and modelling of EDM parameters. *Precision Engineering* 4, 215-221 (1982).
 80. C. Coğun, B. Kocabaş, A. Özgedik, Elektro Erozyon ile İşlemede (EEİ) İşparçası Yüzey Pürüzlülük Profilinin Deneysel Ve Teorik Olarak İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 19, (2004).
 81. S. Gopalakannan, T. Senthilvelan, EDM of cast Al/SiC metal matrix nanocomposites by applying response surface method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67, 485-493 (2013).
 82. M. Sekulic, P. Kovac, M. Gostimirovic, D. Kramar, Optimization of high-pressure jet assisted turning process by Taguchi method. *Advances in Production Engineering & Management* 8, 5-12 (2013).
 83. M. Gostimirović, M. Sekulić, J. Kopač, P. Kovač, Optimal Control of Workpiece Thermal State in Creep-Feed Grinding Using Inverse Heat Conduction Analysis. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 57, 730-738 (2011).
 84. L. Selvarajan, C. S. Narayanan, R. JeyaPaul, Optimisation of EDM Parameters on Machining Si₃N₄-TiN Composite for Improving Circularity, Cylindricity and Perpendicularity. *Materials and Manufacturing Processes* 31, 405-412 (2015).
 85. C. Lin, J. Lin, T. Ko, Optimisation of the EDM process based on the orthogonal array with fuzzy logic and grey relational analysis method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 19, 271-277 (2002).
 86. U. Çaydaş, A. Haşçalık, S. Ekici, An adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model for wire-EDM. *Expert Systems with Applications* 36, 6135-6139 (2009).
 87. M. Shabgard, M. Badamchizadeh, G. Ranjbary, K. Amini, Fuzzy approach to select machining parameters in electrical discharge machining (EDM) and ultrasonic-assisted EDM processes. *Journal of Manufacturing Systems* 32, 32-39 (2013).
 88. D. Rodic, M. Gostimirovic, P. Kovac, M. Radovanovic, B. Savkovic, Comparison of fuzzy logic and neural network for modelling surface roughness in EDM. *International Journal of Recent Advances in Mechanical Engi*, (2014).
 89. P. Sengottuvel, S. Satishkumar, D. Dinakaran, Optimization of Multiple Characteristics of EDM Parameters Based on Desirability Approach and Fuzzy Modeling. *Procedia Engineering* 64, 1069-1078 (2013).
 90. S. Tripathy, D. K. Tripathy, Multi-attribute optimization of machining process parameters in powder mixed electro-discharge machining using TOPSIS and grey relational analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19, 62-70 (2016).
 91. A. Nikalje, A. Kumar, K. S. Srinadh, Influence of parameters and optimization of EDM performance measures on MDN 300 steel using Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69, 41-49 (2013).
 92. K. Ojha, R. K. Garg, K. K. Singh, Effect of chromium powder suspended dielectric on surface roughness in PMEDM process. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces* 5, 165-171 (2013).
 93. A. Batish, A. Bhattacharya, N. Kumar, Powder Mixed Dielectric: An Approach for Improved Process Performance in EDM. *Particulate Science and Technology* 33, 150-158 (2014).
 94. A. Bhattacharya, A. Batish, G. Singh, V. K. Singla, Optimal parameter settings for rough and finish machining of die steels in powder-mixed EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 61, 537-548 (2011).
 95. A. Kumar, S. Maheshwari, C. Sharma, N. Beri, Machining Efficiency Evaluation of Cryogenically Treated Copper Electrode in Additive Mixed EDM. *Materials and Manufacturing Processes* 27, 1051-1058 (2012).
 96. Y. F. Chen, Y. J. Lin, S. L. Chen, Y. C. Lin, L. R. Hsu, Optimization of electrodischarge machining parameters on ZrO₂ ceramic using the Taguchi method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 224, 195-205 (2010).
-

-
97. A. Sabur, M. Y. Ali, A. Malaque, A. A. Khan, Investigation of material removal characteristics in EDM of nonconductive ZrO₂ ceramic. *Procedia Engineering* 56, 696-701 (2013).
 98. A. Sabur, M. A. Moudood, M. Y. Ali, M. A. Maleque, Investigation of surface roughness in micro-electro discharge machining of nonconductive ZrO₂ for MEMS application. *Materials Science and Engineering* 53, 1-6 (2013).
 99. F. Zeller, T. Hosel, C. Muller, Microstructuring of non-conductive electrical discharge machining. *Microsystem Technologies* 20, 1875-1880 (2014).
 100. N. Ojha, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg (2016).
 101. N. Ojha, T. Hosel, C. Muller, H. Reinecke, Characterization of the conductive layer formed during μ - electric discharge machining of non-conductive ceramics. *Materials Science & Technology 2012 Conference and Exhibition* 6, 423-428 (2012).
 102. A. Sabur, S. M. Mehdi, M. Y. Ali, M. A. Maleque, M. A. Moudood, Investigation of Surface Roughness in Micro-EDM of Nonconductive ZrO₂ Ceramic with Powder Mixed Dielectric Fluid. *Advanced Materials Research* 1115, 16-19 (2015).
 103. A. Batish, A. Bhattacharya, V. K. Singla, G. Singh, Study of Material Transfer Mechanism in Die Steels Using Powder Mixed Electric Discharge Machining. *Materials and Manufacturing Processes* 27, 449-456 (2012).
 104. N. Mohd Abbas, D. G. Solomon, M. Fuad Bahari, A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, 1214-1228 (2007).
 105. C. S. Treuman, J. Huddleston, Material removal by spalling during EDM of ceramics. *Journal of the European ceramic society* 20, 1629-1635 (2000).
 106. B. Lauwers, J. Vleugels, O. Malek, K. Brans, K. Liu, Electrical discharge machining of composites. *Machining technology for composite materials*, 202-241 (2012).
 107. M. Sekulic, Inovacione tehnologije obrade, Skripta. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, (2013).
 108. V. K. Jain, S. Adhikary, On the mechanism of material removal in electrochemical spark machining of quartz under different polarity conditions. *Journal of Materials Processing Technology* 200, 460-470 (2008).
 109. K. H. Ho, S. T. Newman, State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43, 1287-1300 (2003).
 110. A. M. Gadalla, B. Bozkurt, N. M. Faulk, Modeling of Thermal Spalling During Electrical Discharge Machining of Titanium Diboride. *Journal of the American Ceramic Society* 74, 801-806 (1991).
 111. M. R. Shabgard, A. Gholipour, H. Baseri, A review on recent developments in machining methods based on electrical discharge phenomena. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 87, 2081-2097 (2016).
 112. P. Pecas, E. Henriques, Influence of silicon powder-mixed dielectric on conventional electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43, 1465-1471 (2003).
 113. H. Kansal, S. Singh, P. Kumar, Effect of silicon powder mixed EDM on machining rate of AISI D2 die steel. *Journal of Manufacturing processes* 9, 13-22 (2007).
 114. Y. C. Lin, B. H. Yan, Y. S. Chang, Machining characteristics of titanium alloy (Ti-6Al-4V) using a combination process of EDM with USM. *Journal of Materials Processing Technology* 104, 171-177 (2000).
 115. J. Kao, C. Tsao, S. Wang, C. Hsu, Optimization of the EDM parameters on machining Ti-6Al-4V with multiple quality characteristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 47, 395-402 (2010).
 116. B. Jabbaripour, M. Sadeghi, S. Faridvand, M. Shabgard, Investigating the effects of EDM parameters on surface integrity, MRR and TWR in machining of Ti-6Al-4V. *Machining Science and Technology* 16, 419-444 (2012).
 117. F. Klocke, M. Holsten, L. Hensgen, A. Klink, Experimental investigations on sinking-EDM of seal slots in gamma-TiAl. *Procedia CIRP* 24, 92-96 (2014).
-

-
118. M. Kolli, A. Kumar, Effect of dielectric fluid with surfactant and graphite powder on Electrical Discharge Machining of titanium alloy using Taguchi method. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 18, 524-535 (2015).
 119. G. Mohanty, G. Mondal, B. Surekha, S. Tripathy, Experimental Investigations on Graphite Mixed Electric discharge Machining of En-19 Alloy Steel. *Materials Today: Proceedings* 5, 19418-19423 (2018).
 120. K. L. Wu, B. H. Yan, F. Y. Huang, S. C. Chen, Improvement of surface finish on SKD steel using electro-discharge machining with aluminum and surfactant added dielectric. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45, 1195-1201 (2005).
 121. B. Lauwers, J. P. Kruth, W. Liu, W. Eeraerts, B. Schacht, P. Bleys, Investigation of material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials. *Journal of Materials Processing Technology* 149, 347-352 (2004).
 122. Y. H. Liu, X. P. Li, R. J. Ji, L. L. Yu, H. F. Zhang, Q. Y. Li, Effect of technological parameter on the process performance for electric discharge milling of insulating Al₂O₃ ceramic. *Journal of Materials Processing Technology* 208, 245-250 (2008).
 123. H. Gotoh, T. Tani, N. Mohri, EDM of Insulating Ceramics by Electrical Conductive Surface Layer Control. *Procedia CIRP* 42, 201-205 (2016).
 124. D. Hanaoka, Y. Fukuzawa, C. Ramirez, P. Miranzo, M. I. Osendi, M. Belmonte, Electrical Discharge Machining of Ceramic/Carbon Nanostructure Composites. *Procedia CIRP* 6, 95-100 (2013).
 125. L. Li, L. Zhao, Z. Y. Li, L. Feng, X. Bai, Surface characteristics of Ti-6Al-4V by SiC abrasive-mixed EDM with magnetic stirring. *Materials and Manufacturing Processes* 32, 83-86 (2016).
 126. M. Gostimirović, D. Milikić, M. Sekulić, *Osnove tehnologije obrade skidanjem materijala*. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, (2015).
 127. F. L. Amorim, L. J. Stedile, R. D. Torres, P. C. Soares, C. A. H. Laurindo, Performance and surface integrity of Ti6Al4V after sinking EDM with special graphite electrodes. *Journal of materials engineering and performance* 23, 1480-1488 (2014).
 128. M. Holsten, P. Koshy, A. Klink, A. Schwedt, Anomalous influence of polarity in sink EDM of titanium alloys. *CIRP Annals*, (2018).
 129. M. Gostimirovic, *Baza podataka obradnih procesa*. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, (2015).
 130. R. B. Azhiri, R. Teimouri, M. G. Baboly, Z. Leseman, Application of Taguchi, ANFIS and grey relational analysis for studying, modeling and optimization of wire EDM process while using gaseous media. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 71, 279-295 (2014).
 131. X. H. Suganthi, U. Natarajan, S. Sathiyamurthy, K. Chidambaram, Prediction of quality responses in micro-EDM process using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68, 339-347 (2013).
 132. D. Rodic, M. Gostimirovic, P. Kovac, I. Mankova, V. Pucovsky, Predicting of Machining Quality in Electric Discharge Machining using Intelligent Optimization Techniques. *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering* 3, 1-9 (2014).
 133. J.-S. Jang, ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 23, 665-685 (1993).
 134. L. A. Zadeh, in *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, And Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi A Zadeh*. (World Scientific, 1996), pp. 775-782.
 135. D. Kukolj, *Sistemi zasnovani na računarskoj inteligenciji*. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, (2007).
 136. O. Castillo, P. Melin, O. M. Ross, R. S. Cruz, W. Pedrycz, *Theoretical advances and applications of fuzzy logic and soft computing*. Springer Science & Business Media, (2007).
-

-
137. P. Kovač, M. Tarić, D. Rodić, B. Nedić, B. Savković, D. Ješić, RSM and Neural Network Modeling of Surface Roughness During Turning Hard Steel, The International Symposium for Production Research, 2018.
 138. D. Kukolj, Design of adaptive Takagi–Sugeno–Kang fuzzy models. *Applied Soft Computing* 2, 89-103 (2002).
 139. D. Kukolj, E. Levi, Identification of complex systems based on neural and Takagi–Sugeno fuzzy model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 34, 272-282 (2004).
 140. P. Kovac, D. Rodic, V. Pucovsky, B. Savkovic, M. Gostimirovic, Multi-output fuzzy inference system for modeling cutting temperature and tool life in face milling. *Journal of Mechanical Science and Technology* 28, 4247-4256 (2014).
 141. G. Khalaj, H. Yoozbashizadeh, A. Khodabandeh, A. Nazari, Modeling hardness of Nb-microalloyed steels using fuzzy logic. *Neural Computing and Applications* 23, 207-214 (2013).
 142. M. Hadad, L. Q. Bui, C. T. Nguyen, Experimental investigation of the effects of tool initial surface roughness on the electrical discharge machining (EDM) performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 95, 2093-2104 (2018).
 143. S. Ezeddini, E. Bayraktar, M. Boujelbene, S. B. Salem, in *Mechanics of Composite, Hybrid and Multifunctional Materials, Volume 5*. (Springer, 2019), pp. 47-57.
 144. C. Huang, A. Yang, C. Hsu, The optimization of micro EDM milling of Ti–6Al–4V using a grey Taguchi method and its improvement by electrode coating. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96, 3851-3859 (2018).
 145. V. Pejic, Modelovanje i optimizacija procesa glodanja vretenastim glodalima, Doktorska disertacija. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, (2016).
 146. S. Pal, A. Verma, A. Dixit, Parametric Optimization of Electric Discharge Drill Machine using Taguchi and ANOVA Approach. (2018).
 147. K. Kakkar, N. Rawat, A. Jamwal, A. Aggarwal, Optimization of Surface Roughness, Material Removal Rate and Tool Wear Rate in EDM using Taguchi Method. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology* 4, 16-24 (2018).
 148. V. Srinivasan, P. Palani, L. Selvarajan, Experimental investigation on electrical discharge machining of ceramic composites (Si₃N₄-TiN) using RSM. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering* 7, 104-115 (2018).
 149. S. Kumar, A. Mandal, A. R. Dixit, Investigation of powder mixed EDM process parameters for machining Inconel alloy using response surface methodology. *Materials Today: Proceedings* 5, 6183-6188 (2018).
 150. P. Fonda, Z. Wang, K. Yamazaki, Y. Akutsu, A fundamental study on Ti–6Al–4V's thermal and electrical properties and their relation to EDM productivity. *Journal of Materials Processing Technology* 202, 583-589 (2008).
 151. M. Kumar, S. Datta, R. Kumar, Electro-discharge Machining Performance of Ti–6Al–4V Alloy: Studies on Parametric Effect and Phenomenon of Electrode Wear. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-16 (2018).