

# Projektiranje i izrada grafitnih elektroda

---

**Predovan, Bruno**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:124818>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial 3.0 Unported / Imenovanje-Nekomercijalno 3.0](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Bruno Predovan**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Damir Ciglar, dipl. ing.

Dr. sc. Miho Klaić, mag. ing.

Student:

Bruno Predovan

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Damiru Ciglaru i komentoru dr. sc. Mihi Klaiću na korisnim savjetima i stručnoj pomoći prilikom izrade ovog rada. Posebno zahvaljujem prof. dr. sc. Tomi Udiljaku koji me motivirao tijekom studiranja.

Također, zahvaljujem se obitelji, prijateljima i kolegama na podršci i strpljenju.

Bruno Predovan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

|  |               |
|--|---------------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |               |
| Datum:   | Prilog:       |
| Klasa:   | 602-04/21-6/1 |
| Ur. broj:  | 15-1703-21    |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **BRUNO PREDOVAN** Mat. br.: 0035206953

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje i izrada grafitnih elektroda**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design and manufacture of graphite electrodes**

Opis zadatka:

Suvremeno tržište danas potražuje vrlo složene proizvode, kako konstrukcijski, tako i s obzirom na materijal od kojih su izrađeni. Ti materijali imaju poboljšana mehanička i fizikalna svojstva ali time utječu i na razvoj novih suvremenih postupaka obrade (konvencionalnih i nekonvencionalnih), koji će biti sposobni izraditi takve proizvode.

U radu je potrebno:

- dati podjelu i opisati nekonvencionalne postupke obrade
- detaljnije dati osvrt na obradu elektroerozijom (EDM-Electro Discharge machining)
- projektirati i detaljno opisati postupke izrade odabrane grafitne elektrode za elektroerozijsku obradu
- dati zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:  
2. prosinca 2021.

Predvideni datum obrane:  
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:   
prof. dr. sc. **Damir Ciglar**

Komentor:   
dr. sc. **Miho Klaić**

Predsjednica Povjerenstva:   
prof. dr. sc. **Biserka Runje**

## SADRŽAJ

|  |      |
|--|------|
| SADRŽAJ .....  | I    |
| POPIS SLIKA .....  | III  |
| POPIS TABLICA.....   | VI   |
| POPIS OZNAKA .....   | VII  |
| POPIS KRATICA .....  | VIII |
| SAŽETAK.....   | IX   |
| SUMMARY .....  | X    |
| 1. UVOD.....   | 1    |
| 2. NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM.....                               | 2    |
| 2.1. Značajke konvencionalnih i nekonvencionalnih postupaka obrade odvajanjem..... | 3    |
| 2.2. Podjela nekonvencionalnih postupaka obrade .....                              | 5    |
| 2.3. Mehanički nekonvencionalni postupci obrade.....                               | 7    |
| 2.3.1. Obrada vodenim mlazom (WJM) i obrada abrazivnim vodenim mlazom (AWJM).....  | 7    |
| 2.3.2. Obrada ultrazvukom (USM) .....  | 11   |
| 2.4. Elektrokemijski nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem.....              | 13   |
| 2.4.1. Elektrokemijska obrada (ECM) .....  | 13   |
| 2.5. Termoelektrični nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem .....             | 17   |
| 2.5.1. Obrada elektroerozijom (EDM).....   | 17   |
| 2.5.2. Obrada laserom (LJM).....   | 36   |
| 2.5.3. Obrada plazmom (PAM).....   | 40   |
| 2.5.4. Obrada snopom elektrona (EBM).....  | 44   |
| 2.6. Kemijski nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem .....                    | 48   |
| 2.6.1. Kemijsko glodanje (CHM).....  | 48   |
| 2.6.2. Fotokemijska obrada (PCM).....  | 51   |
| 3. PROJEKTIRANJE ELEKTRODA ZA ELEKTROEROZIJU.....                                  | 54   |

---

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Uvod u projektiranje elektroda .....                  | 54 |
| 3.2. Odabir materijala za izradu elektrode .....           | 55 |
| 3.3. Analiza površine za EDM i modeliranje elektrode ..... | 57 |
| 3.3.1. Analiza površine za EDM .....                       | 57 |
| 3.3.2. Modeliranje elektrode .....                         | 59 |
| 3.4. Izrada dokumentacije .....                            | 62 |
| 3.5. Izrada NC programa za obradu .....                    | 64 |
| 3.6. Obrada elektrode .....                                | 67 |
| 3.6.1. Priprema sirovca .....                              | 67 |
| 3.6.2. Obrada elektroda .....                              | 68 |
| 3.6.3. Usporedba mokrog i suhog glodanja grafita .....     | 69 |
| 3.7. Mjerenje i vizualna kontrola .....                    | 71 |
| 4. ZAKLJUČAK.....  | 74 |
| LITERATURA.....  | 75 |
| PRILOZI.....   | 78 |

## POPIS SLIKA

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Slika 1  | Primjeri proizvoda obrađenih nekonvencionalnim postupcima .....   | 3  |
| Slika 2  | Prikaz klasifikacije nekonvencionalnih postupaka prema vrsti energije koju primjenjuju .....  | 5  |
| Slika 3  | Shema sustava za obradu vodenim mlazom [4] .....  | 7  |
| Slika 4  | Stroj za obradu vodenim mlazom [5] .....  | 8  |
| Slika 5  | Princip stvaranja abrazivnog vodenog mlaza [7] .....  | 9  |
| Slika 6  | Sustav za obradu ultrazvukom [9] .....  | 11 |
| Slika 7  | Shematski prikaz sustava za obradu ultrazvukom [10] .....   | 12 |
| Slika 8  | Primjeri primjene elektrokemijske obrade [11] .....   | 14 |
| Slika 9  | Primjer kemijske reakcije elektrolize [2] .....   | 14 |
| Slika 10 | Sustav za elektrokemijsku obradu [8] .....  | 15 |
| Slika 11 | Proces električnog pražnjenja između elektrode i obratka [13] .....   | 18 |
| Slika 12 | Shema sustava za elektroerozijsku obradu žigom [12] .....   | 19 |
| Slika 13 | Primjer stroja za obradu elektroerozijom .....  | 20 |
| Slika 14 | Shematski prikaz utjecaja optimalnog ispiranja: a) kontaminacija dielektrika, b) utjecaj ispiranja na proizvodnost [8] .....        | 21 |
| Slika 15 | Načini ispiranja: a) injekcijsko , b) usisno, c) bočno [8] .....  | 21 |
| Slika 16 | Primjer bočnog ispiranja .....  | 22 |
| Slika 17 | Raspodjela energije pražnjenja: (a) raspodjela ukupne energije pražnjenja, (b) raspodjela energije pražnjenja na obratku [12] ..... | 23 |
| Slika 18 | Graf proizvodnost - trajanje impulsa [16] .....   | 24 |
| Slika 19 | Graf trošenje alata - trajanje impulsa [16] .....   | 25 |
| Slika 20 | Graf hrapavost površine ( $R_a$ ) - trajanje impulsa [16] .....   | 26 |
| Slika 21 | Površina elektrode nakon obrade na veliki $R_a$ .....   | 26 |
| Slika 22 | Zona utjecaja topline [12] .....  | 27 |
| Slika 23 | Površina nakon EDM obrade promatrana elektronskim mikroskopom [17] .....  | 28 |
| Slika 24 | Primjer EDM obrade utora kod izrade kalupa .....  | 29 |
| Slika 25 | Primjer rebra izrađenog pomoću EDM .....  | 30 |
| Slika 26 | Shematski prikaz WEDM obrade [18] .....   | 31 |
| Slika 27 | Stroj za WEDM .....   | 32 |



|          |  |    |
|----------|--|----|
| Slika 28 | Primjer vodilice žice.....   | 33 |
| Slika 29 | Problem rezanja uglova i radijusa [12].....                                  | 34 |
| Slika 30 | Sile koje djeluju na WEDM elektrodu (žicu) [12] .....                        | 35 |
| Slika 31 | Prikaz dielektričnog pražnjenja .....  | 35 |
| Slika 32 | Primjeri proizvoda izrađenih pomoći WEDM [20].....                           | 36 |
| Slika 33 | Shema laserske obrade [4].....   | 37 |
| Slika 34 | Lasersko rezanje metala [22].....  | 38 |
| Slika 35 | CNC stroj za rezanje laserom [25] .....                                      | 39 |
| Slika 36 | Prikaz plazma obrade: a) s prelaznim lukom, b) s neprelaznim lukom [27]..... | 41 |
| Slika 37 | Sustav za rezanje plazmom [26].....  | 42 |
| Slika 38 | Kvaliteta reza [26] .....  | 42 |
| Slika 39 | Rezanje plazmom pod vodom [28] .....   | 43 |
| Slika 40 | Shema sustava za obradu snopom elektrona [4] .....                           | 44 |
| Slika 41 | Stroj za obradu snopom elektrona [29] .....                                  | 45 |
| Slika 42 | Primjer obratka s provrtima malih promjera [29] .....                        | 46 |
| Slika 43 | Poprečni presjek zavara u aluminiju [29].....                                | 46 |
| Slika 44 | Površinska hrapavost obratka prije i nakon EBM obrade [29] .....             | 47 |
| Slika 45 | Shema postupka obrade kemijskog glodanja [4].....                            | 48 |
| Slika 46 | Premazan i uklonjen zaštitni sloj s područja za obradu [30].....             | 49 |
| Slika 47 | Faktor nagrizanja nakon CHM [4] .....  | 50 |
| Slika 48 | Shema sustava za fotokemijsku obradu [8].....                                | 52 |
| Slika 49 | Primjer velikog broja obradaka na jednom limu [31] .....                     | 53 |
| Slika 50 | Primjer složene bakrene elektrode .....                                      | 54 |
| Slika 51 | Primjer male i velike grafitne elektrode .....                               | 55 |
| Slika 52 | Karakteristike odabrane vrste grafita .....                                  | 57 |
| Slika 53 | Kalup za injekcijsko prešanje polimera.....                                  | 57 |
| Slika 54 | Prikaz uskih utora koje je potrebno obraditi elektroerozijom .....           | 58 |
| Slika 55 | Prikaz cijele površine izvučene iz 3D modela obratka.....                    | 59 |
| Slika 56 | Prikaz izrezane površine pripremljene za kreiranje elektrode.....            | 59 |
| Slika 57 | Modul za kreiranje elektrode.....  | 60 |
| Slika 58 | Definiranje prihvata i njegove pozicije .....                                | 60 |
| Slika 59 | 3D model kreirane elektrode s osnovnim elementima .....                      | 61 |
| Slika 60 | Pozicija erodiranja .....  | 61 |

---

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Slika 61 | Rezultat simulacije .....   | 62 |
| Slika 62 | Dokumentacija za EDM .....  | 63 |
| Slika 63 | Elektroda stegnuta u napravu za stezanje .....                              | 64 |
| Slika 64 | Gruba obrada elektroda .....  | 66 |
| Slika 65 | Provjera gotovog sirovca .....  | 66 |
| Slika 66 | Dodatna operacija za obradu malih radijusa .....                            | 67 |
| Slika 67 | Primjer pripremljenih sirovaca .....  | 68 |
| Slika 68 | Mokro glodanje grafita (lijevo), suho glodanje grafita (desno) .....        | 69 |
| Slika 69 | Prikaz trošenja stražnje površine glodala s radijusom pod mikroskopom ..... | 70 |
| Slika 70 | Prikaz trošenja stražnje površine kuglastog glodala pod mikroskopom .....   | 70 |
| Slika 71 | Prikaz oštećenja nakon suhog glodanja grafita .....                         | 70 |
| Slika 72 | Prikaz oštećenja nakon mokrog glodanja grafita .....                        | 71 |
| Slika 73 | Primjer CMM uređaja .....   | 72 |
| Slika 74 | Mjerenje elektrode na CMM uređaju .....                                     | 72 |
| Slika 75 | Rezultati mjerenja elektrode na CMM uređaju .....                           | 73 |

## POPIS TABLICA

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Tablica 1 | Usporedba značajki CO <sub>2</sub> i Nd:YAG lasera [24] .....      | 39 |
| Tablica 2 | Materijali za izradu elektroda i njihove karakteristike [32] ..... | 56 |
| Tablica 3 | Parametri obrade tijekom testiranja.....                           | 69 |

**POPIS OZNAKA**

| <b>Oznaka</b> | <b>Mjerna jedinica</b> | <b>Opis oznake</b>                                   |
|---------------|------------------------|--|
| $a_p$         | mm                     | Dubina rezanja                                       |
| $d$           | mm                     | Promjer alata  |
| $f$           | mm/okr                 | Posmak   |
| $n$           | min <sup>-1</sup>      | Učestalost vrtnje                                    |
| $R$           | mm                     | Radijus alata  |
| $R_a$         | μm                     | Srednje aritmetičko odstupanje profila neke površine |
| $t$           | min                    | Vrijeme obrade                                       |
| $v_c$         | m/min                  | Brzina rezanja                                       |

## POPIS KRATICA

| <b>Kratika</b> | <b>Opis</b>   |
|----------------|---|
| 3D             | Trodimenzionalan  |
| AFM            | Abrasive Flow Machining - obrada protokom abrazivnog fluida       |
| AJM            | Abrasive Jet Machining - obrada mlazom abraziva                   |
| AWJM           | Abrasive Water Jet Machining - obrada abrazivnim vodenim mlazom   |
| CAD            | Computer Aided Design – računalom potpomognuto oblikovanje        |
| CAM            | Computer Aided Manufacturing – proizvodnja potpomognuta računalom |
| CHM            | Chemical Milling - kemijsko glodanje                              |
| CMM            | Coordinate-measuring machine - koordinatni mjerni uređaj          |
| CNC            | Computer numerical control - računalno numeričko upravljanje      |
| EBM            | Electron Beam Machining - obrada snopom elektrona                 |
| ECG            | Electrochemical Grinding - elektrokemijsko brušenje               |
| ECM            | Electrochemical Machining - elektrokemijska obrada                |
| EDM            | Electro-Discharge machining - obrada elektroerozijom              |
| EJD            | Electro Jet Drilling - elektrokemijsko bušenje                    |
| HRC            | Tvrdoća po Rockwellu  |
| LJM            | Laser Jet Machining - obrada laserom                              |
| MAF            | Magnetic Abrasive Finishing - poliranje pomoću magnetskog polja   |
| PAM            | Plasma Arc Machining - obrada plazmom                             |
| PCM            | Photochemical Milling - fotokemijska obrada                       |
| PDF            | Portable document format  |
| SHIP           | Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje                    |
| STEP           | Standard for the Exchange of Product Data                         |
| USM            | Ultrasonic Machining - obrada ultrazvukom                         |
| WEDM           | Wire Electro-Discharge machining - elektroerozijska obrada žicom  |
| WJM            | Water Jet Machining - obrada vodenim mlazom                       |

## SAŽETAK

Razvoj suvremene proizvodnje i konstruiranje sve složenijih proizvoda definira smjer razvoja obradnih sustava. Primjenom suvremenih materijala znatno boljih mehaničkih i fizikalnih svojstava, nameće se pitanje efikasnosti konvencionalnih postupaka obrade. Uz kontinuirano unaprjeđenje suvremenih materijala i proizvoda, razvijaju se brojni nekonvencionalni i hibridni procesi obrade.

U ovom diplomskom radu opisani su svi značajniji nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem. Podijeljeni su na nekoliko skupina, ovisno o vrsti energije koju koriste tijekom procesa obrade. Detaljno su opisani principi rada, njihova primjena te prednosti i nedostaci svakog procesa obrade. Poseban je naglasak stavljen na elektroerozijsku obradu, kao jedan od najbitnijih postupaka obrade u alatničarskoj industriji. Nadalje, detaljno je opisan postupak projektiranja grafitne elektrode za elektroeroziju. Opisan je postupak odabira materijala, analize površina, modeliranje površina i kreiranja EDM elektrode pomoću Tebis-ovog softverskog modula za izradu elektroda, izrada dokumentacije i NC programa za obradu te završna kontrola i mjerenje na CMM uređaju.

Ključne riječi: nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem, obrada elektroerozijom, EDM elektrode, projektiranje grafitne elektrode

## **SUMMARY**

The development of modern production and the construction of increasingly complex products defines the direction of development of machining systems. By applying modern materials with significantly better mechanical and physical properties, the question of the efficiency of conventional processing procedures arises. With the continuous improvement of modern materials and products, numerous unconventional and hybrid machining processes are being developed.

This thesis describes all significant unconventional separation processes. They are divided into several groups, depending on the type of energy they use during the processing. The principles of operation, their application and the advantages and disadvantages of each processing are described in detail. Special emphasis is placed on EDM, as one of the most important machining processes in the tool industry. Furthermore, the process of designing a graphite electrode for electroerosion is described in detail. The procedure of material selection, surface analysis, surface modeling and EDM electrode creation using Tebis software module for electrode fabrication, documentation preparation and NC processing program, and final control and measurement on the CMM device is described.

Key words: unconventional machining processes, electrical discharge machining, EDM electrodes, graphite electrode design

## 1. UVOD

Suvremeno tržište znatno utječe na današnju industrijsku proizvodnju. Snažna konkurencija i sve veći zahtjevi potrošača uzrokuju dizajniranje i konstrukciju vrlo složenih proizvoda. Razvoj takvih proizvoda zahtijeva korištenje suvremenih materijala boljih mehaničkih i fizikalnih svojstava. Obrada suvremenih materijala predstavlja nove izazove za industrijsku proizvodnju. Njihova mehanička i fizikalna svojstva postaju sve bolja, ali strojna obrada postaje mnogo zahtjevnija, a često nedovoljno učinkovita. Razvijaju se brojni suvremeni postupci obrade koji su sposobni odgovoriti na takve promjene. Uz kontinuirano poboljšanje konvencionalnih postupaka, ubrzano se razvijaju nekonvencionalni i hibridni postupci obrade odvajanjem.

U ovom diplomskom radu opisani su najbitniji nekonvencionalni postupci obrade. Napravljena je osnovna podjela nekonvencionalnih postupaka s obzirom na vrstu energije koju koriste, opisane su njihove značajke te prikazane osnovne prednosti i nedostaci svakog pojedinog procesa. Naglasak je stavljen na postupak obrade elektroerozijom, kao jednog od najzastupljenijih nekonvencionalnih postupaka u današnjoj proizvodnji.

U završnom dijelu rada, projektirana je grafitna elektroda za elektroerozijsku obradu. Za projektiranje elektrode korišten je CAD/CAM softver Tebis kroz modul predviđen za elektrode. Detaljno je opisan cijeli postupak, od planiranja do završne kontrole. Cijeli projekt se radio u suradnji s tvrtkom Teh-Cut. Ona proizvodi specijalne alate za tlačni lijev aluminijske i injekcijske prešanje polimera. Razvija vlastite fleksibilne obradne sustave s implementiranim robotima, manipulatorima i sustavima stezanja s jedinstvenom nulom. U alatničarskoj industriji za izradu složenih 3D geometrija kalupa, uz glodanje, neizostavna je primjena elektroerozijskih postupaka obrade.



## 2. NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM

Razvojem industrijske proizvodnje i tehnologije kontinuirano raste potreba za poboljšanim novim materijalima boljih mehaničkih i fizikalnih svojstava. Odabirom ovakvih materijala omogućuje se konstrukcija mnogo kompleksnijih proizvoda nego ikad prije, ali često ima za posljedicu neefikasnost primjene konvencionalnih postupaka obrade. Obrada odvajanjem čestica primjenom konvencionalnih postupaka temelji se na tvrdoći reznih alata čija rezna oštrica mora biti veće tvrdoće od obrađivanog materijala. Stoga, potreban je razvoj novih suvremenih postupaka obrade koji će biti sposobni odgovoriti na sve zahtjevniju obradu poboljšanih materijala. Takvi postupci se još nazivaju i nekonvencionalni postupci obrade koji kao veliku prednost imaju neovisnost o mehaničkim svojstvima materijala te nemaju direktan fizički kontakt između alata i obratka. Nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem čestica koriste razne izvore energije za skidanje viška materijala, kao što su mehanička, toplinska, električna i kemijska energija pa se smatraju direktno energetskim postupcima. Kod ovakvih postupaka obrade, kod kojih mehanička svojstva ne nameću ograničenja u procesu uklanjanja materijala, mogu se izraditi veoma složene geometrije u tvrdim, čvršćim, žilavijim i materijalima otpornima na visoke temperature. Česta upotreba takvih materijala se pronalazi u zrakoplovstvu, elektronici, nuklearnoj, svemirskoj i automobilskoj industriji. Primjeri nekih teško obradivih materijala su: legure čelika, volframov karbid, titan, inconel, brzorezni čelik, kompoziti ojačani vlaknima, keramika te dijamant.

Nekonvencionalni postupci obrade imaju primjenu kod izrade složenih geometrijskih oblika specifične geometrije. Razne unutarnje i vanjske konture, jako mali provrti, površine uskih tolerancija te veoma tanki ili minijaturni obratci su pogodni za primjenu nekonvencionalnih postupaka [1].



**Slika 1** Primjeri proizvoda obrađenih nekonvencionalnim postupcima

### **2.1. Značajke konvencionalnih i nekonvencionalnih postupaka obrade odvajanjem**

Nekonvencionalni postupci obrade postaju neophodni u suvremenoj proizvodnji zbog svojih brojnih prednosti i širokih mogućnosti obrade. Implementacijom nekonvencionalnih postupaka u proizvodni proces postiže se brža, efikasnija i točnija proizvodnja obradaka kompleksnih geometrija koje često nije moguće obraditi klasičnim postupcima. Omogućuju obradu s uračunatim manjim dodatcima materijala u usporedbi s konvencionalnim postupcima i vrlo tankim rezovima čime se proizvodi manje otpadnog materijala, a samim time je znatno veća ekonomičnost, posebice kod skupljih materijala.

Površine koje su teško pristupačne konvencionalnim postupcima kao što su duboka i uska rebra, oštri bridovi, konstrukcije niske krutosti, duboki tolerirani provrti pogodni su za obradu nekonvencionalnim postupcima.

Razvojem industrije te implementacijom industrije 4.0 ovakvi se procesi mogu jednostavno automatizirati. Uvođenjem automatiziranih sustava postiže se mnogo veća efikasnost, rad u tri smjene bez prisutnosti čovjeka, smanjuje se faktor ljudske pogreške te se iskorištava sustav u potpunosti.

Značajke konvencionalnih postupaka obrade odvajanjem čestica su:

- alat mora biti tvrdi od obrađivanog materijala
- potreban je fizički kontakt između alata i obratka
- proizvodnost najčešće ovisi o mehaničkim svojstvima obratka (npr. tvrdoća, žilavost i čvrstoća)
- mehanizam odvajanja čestica je mehaničko usitnjavanje materijala.

Značajke nekonvencionalnih postupaka obrade odvajanjem čestica su:

- između alata i obratka nije potreban direktan kontakt
- nema mehaničkih sila između alata i obratka
- alat ne treba biti tvrdi od obratka
- proizvodnost obrade najčešće ovisi o fizikalnim svojstvima obratka (npr. električna vodljivost i toplinska vodljivosti)
- višak materijala se može odvajati isparavanjem, taljenjem, gibanjem iona ili kemijskim otapanjem [2].

Zbog brojnih prednosti nekonvencionalni postupci postaju sve zastupljeniji, ali ipak ne mogu u potpunosti zamijeniti konvencionalne postupke jer postoje ograničenja, a u određenim primjenama imaju manju učinkovitost.

Uslijed odabira tehnologije obrade te donošenja odluke između konvencionalnih ili nekonvencionalnih postupaka obrade potrebno je uzeti u obzir svojstva obrađivanog materijala, geometrijske značajke i mogućnosti odabranog postupaka obrade. Također, ekonomičnost i produktivnost se smatraju ključnim faktorom odabira optimalnog postupka obrade odvajanjem.

Kriterij odabira optimalnog nekonvencionalnog postupka prema [3] se treba temeljiti na sljedećim čimbenicima:

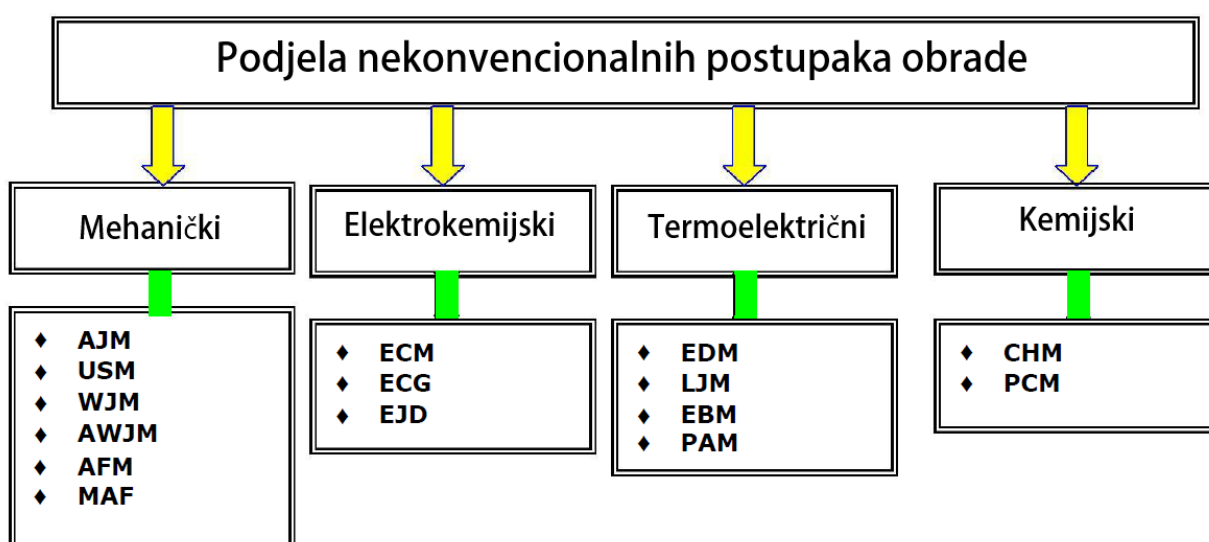
- parametri odabranog procesa
- geometrija obratka
- mogućnosti odabranog procesa obrade
- ekonomičnost.

Parametri obrade i mogućnosti nekog procesa kao što su brzine rezanja, kvaliteta i točnost obrade te produktivnost, znatno utječu na odabir odgovarajuće tehnologije obrade. Geometrija

obratka i konstrukcijski zahtjevi definiraju određene ograničavajuće faktore. Postupci obrade kao što su EDM i ECM su ograničeni na obradu isključivo elektrovodljivih materijala, dok je WJM ograničen na obradu materijala do određene tvrdoće. Također, ekonomičnost procesa je bitan faktor odabira tehnologije obrade. Proizvodnja mora biti agilna, relativno jeftina i konkurentna, što se može ostvariti ispravnim odabirom procesa obrade.

## 2.2. Podjela nekonvencionalnih postupaka obrade

Prema izvoru [3] najjednostavnija podjela nekonvencionalnih postupaka obrade temelji se na vrsti energije koja se koristi u procesu obrade. Najjednostavnija podjela je na četiri skupine nekonvencionalnih postupaka definirane na vrsti energije primijenjene u procesu obrade, a to su : mehanički, elektrokemijski, termoelektrični i kemijski postupci.



**Slika 2 Prikaz klasifikacije nekonvencionalnih postupaka prema vrsti energije koju primjenjuju**

U nastavku su navedeni svi značajniji nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem.

Mehanički postupci su:

- AJM – obrada mlazom abraziva (Abrasive Jet Machining)
- USM – obrada ultrazvukom (Ultrasonic Machining)
- WJM - obrada vodenim mlazom (Water Jet Machining)
- AWJM - obrada abrazivnim vodenim mlazom (Abrasive Water Jet Machining)
- AFM – obrada protokom abrazivnog fluida (Abrasive Flow Machining)
- MAF – poliranje potpomognuto magnetskim poljem (Magnetic Abrasive Finishing)

Elektrokemijski postupci su:

- ECM – elektrokemijska obrada (Electrochemical Machining)
- ECG – elektrokemijsko brušenje (Electrochemical Grinding)
- EJD – elektrokemijsko bušenje (Electro Jet Drilling)

Termoelektrični postupci su:

- EDM – obrada elektroerozijom (Electro-Discharge machining)
- LJM – obrada laserom (Laser Jet Machining)
- EBM – obrada snopom elektrona (Electron Beam Machining)
- PAM – obrada plazmom (Plasma Arc Machining)

Kemijski postupci su:

- CHM – kemijsko glodanje (Chemical Milling)
- PCM – fotokemijska obrada (Photochemical Milling)

Sve četiri osnovne skupine postupaka koriste samo jednu vrstu energije za uklanjanje viška materijala s obratka. Kombinacijom različitih postupaka obrade mogu se postići značajna poboljšanja procesa. Često se kombinira više nekonvencionalnih i konvencionalnih postupaka te se ta skupina postupaka obrade naziva hibridni postupci obrade. Na taj način postiže se učinkovitiji proces obrade iskorištavanjem prednosti svakog pojedinog procesa, a ujedno se nastoje izbjeći nedostaci nekih postupaka kad se primjenjuju pojedinačno. Primjer takvog procesa je kombinacija elektroerozijske obrade (EDM) i konvencionalnih postupaka pri čemu se postiže znatno veća produktivnost, bolja kvaliteta obrađene površine te mnogo veće mogućnosti procesa [4].

Konvencionalni postupci obrade odvajanjem čestica kao što je glodanje znatno gube na produktivnosti uslijed obrade uskih i dubokih toleriranih utora, provrta i rebara, a ujedno ograničava mogućnost izrade obradaka takvih geometrija. Obrada oštih bridova uz visoke stijenke i jako duboki utori predstavljaju karakteristična geometrijska ograničenja te ih nije moguće izraditi konvencionalnim postupcima. Klasičan primjer je izrada uskog rebra pri čemu je uslijed obrade potrebno koristiti glodala malih promjera kako bi rezni alat ušao u dubinu materijala, stoga je količina odvojene čestice u jedinici vremena jako mala. Iz tog razloga kombinacijom glodanja i elektroerozije nastoji se iskoristiti prednost i ukloniti nedostatke svakog od procesa obrade. Glodanje se koristi do faze u kojoj ima veću produktivnost od elektroerozije, a zatim se obradak dovršava elektroerozijom.

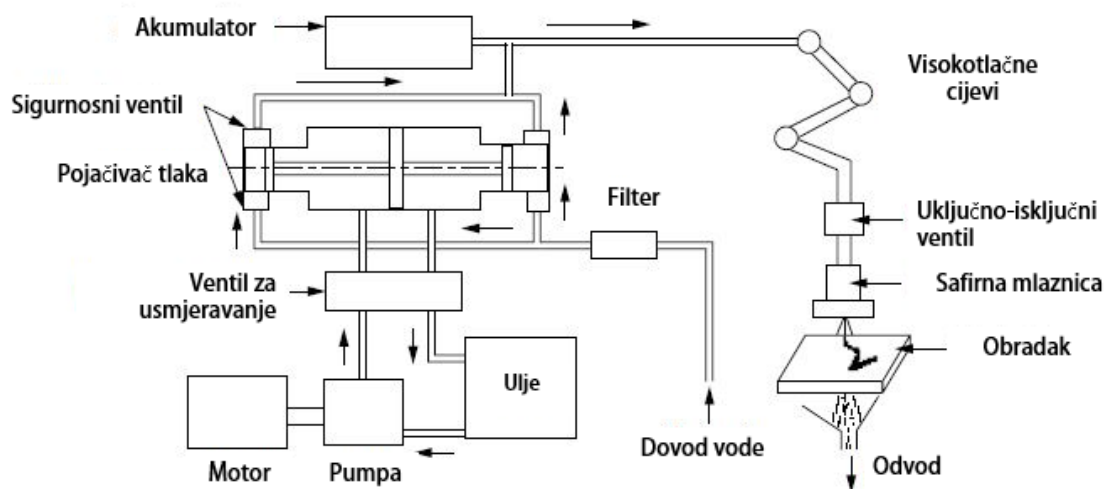
## 2.3. Mehanički nekonvencionalni postupci obrade

Mehanički nekonvencionalni postupci obrade aktivno primjenjuju mehaničku energiju u svrhu obrade sirovca, odnosno skidanja viška materijala. Tipični primjeri takvih postupaka su ultrazvučna obrada i obrada vodenim mlazom kod kojih se relativno gibanje između „alata“ i obratka odvija jako velikim brzinama ili frekvencijama [4].

### 2.3.1. Obrada vodenim mlazom (WJM) i obrada abrazivnim vodenim mlazom (AWJM)

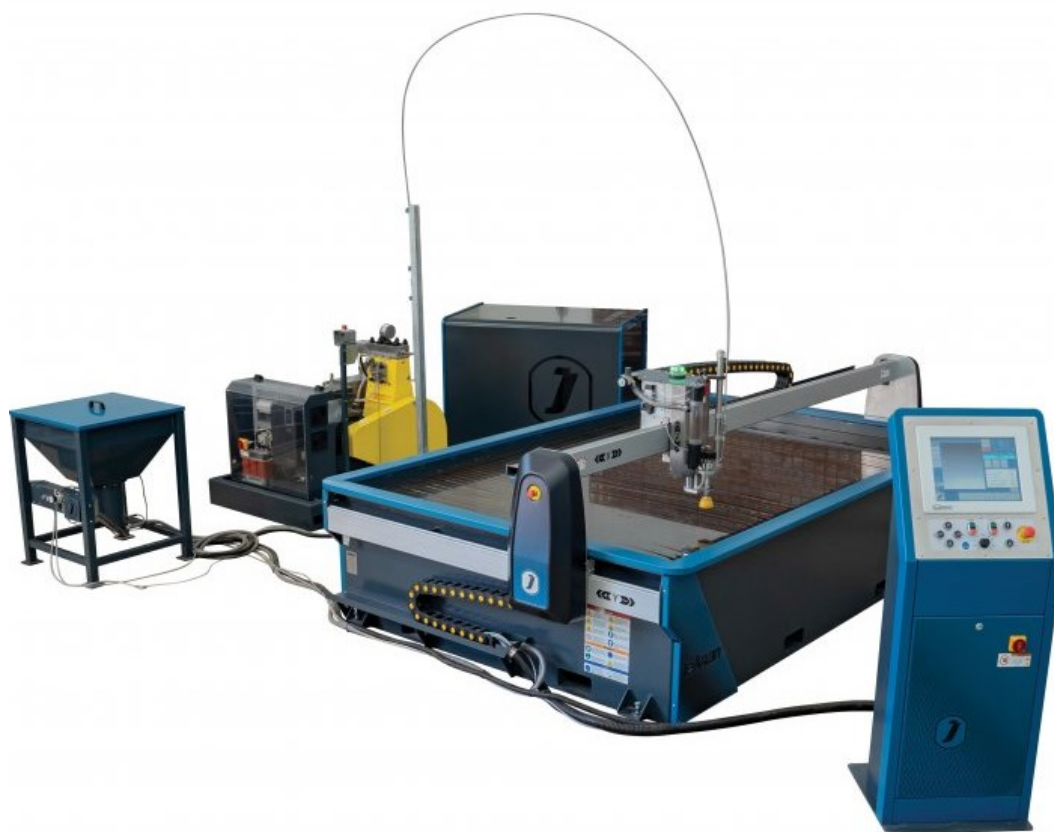
Odvajanje čestica kod obrade vodenim mlazom, kao što samo ime govori, ostvaruje se pomoću usmjerenog vodenog mlaza. Vodeni mlaz se giba jako velikim brzinama pri djelovanju visokog tlaka te prolaskom kroz uski otvor mlaznice razvija dovoljnu snagu za odvajanje materijala. Mlaz služi kao rezni alat pomoću čijeg se erozivnog djelovanja tankim rezovima uklanja višak materijala [4].

Obrada, odnosno rezanje materijala vodenim mlazom, je pogodna za mekše materijale kao što su: drvo, plastika, guma, kompoziti, papir itd.



Slika 3 Shema sustava za obradu vodenim mlazom [4]

Sustav za obradu vodenim mlazom se sastoji od nekoliko osnovnih elemenata kao što su: pumpe, pojačivač tlaka, sigurnosni ventili, akumulator, cijevi, filteri i mlaznica. Hidraulička pumpa napaja sustav uljem te pokreće klipnu pumpu koja uz pomoć akumulatora i pojačivača tlaka razvija tlak veći od 3800 bara. Akumulator osigurava konstantni protok te jednoliki tlak vode koja se visokotlačnim cijevima odvodi do safirne mlaznice. Ispod obratka je potrebno osigurati prostor za hvatanje mlaza i prikupljanja vode. Iskorištena voda se pumpa natrag u sustav nakon što prođe kroz odgovarajuće filtere.



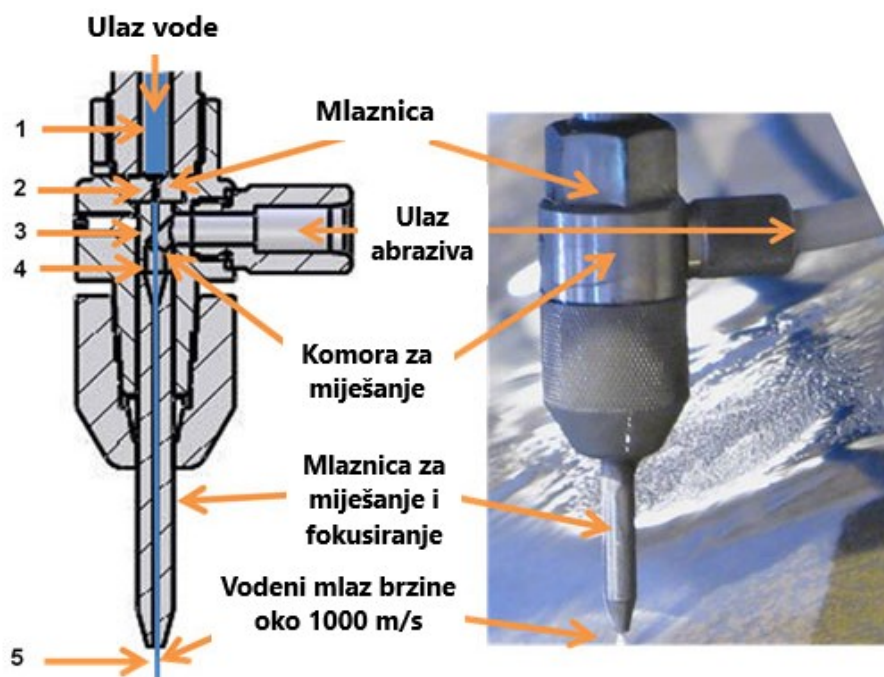
**Slika 4 Stroj za obradu vodenim mlazom [5]**

Postupak obrade u kojem se u vodeni mlaz dodaju sitna zrnca abrazivnog materijala (najčešće silicijev karbid -  $\text{SiC}$ , silicijev oksid –  $\text{SiO}_2$  i aluminijski oksid –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) naziva se obrada abrazivnim vodenim mlazom. Postiže se znatno veća produktivnost te daleko veće mogućnosti obrade od čistog vodenog mlaza. Ovaj postupak omogućuje obradu, odnosno rezanje gotovo svih materijala. Mogu se rezati metali, nemetali i kompoziti širokog raspona tvrdoće, raznih geometrija i debljina bez unošenja dodatne topline što je veoma bitno kod materijala osjetljivih na unos topline [6].

Princip rada je sličan obradi vodenim mlazom bez abraziva, ali je sustav malo složeniji zbog dovoda i miješanja abrazivnog sredstva s vodom (Slika 5). Abraziv se dovodi iz spremnika posebnom cijevi te ga vakuum stvoren uslijed velikog ubrzanja vode usisava u komoru za miješanje pri čemu se miješa s vodom. Takva smjesa čini abrazivni mlaz koji se dalje upućuje kroz mlaznicu za miješanje i fokusiranje. Na izlazu iz mlaznice abrazivni mlaz može ostvariti brzine preko 1000 m/s te na taj način postiže dovoljnu snagu za rezanje materijala, odnosno na taj način postaje rezni alat. Produktivnost, odnosno brzina rezanja se povećava dodavanjem više abrazivnog sredstva, ali treba biti precizno doziran kako bi se izbjegla točka

zasićenja nakon koje brzina počinje opadati. Danas se razvijaju CNC sustavi za preciznu kontrolu i upravljanje količinom abraziva koji smije ući u sustav. Normalna količina abrazivnog sredstva korištena u procesu obrade je oko 30 % ukupne smjese, a izražava se masenim protokom.

Rezna glava s mlaznicom (Slika 5) ima najveći utjecaj na kvalitetu vodenog mlaza, a samim time i na kvalitetu reza. Mlaznica je najčešće izrađena od rubina, safira ili dijamanta [6], [7].



Slika 5 Princip stvaranja abrazivnog vodenog mlaza [7]

Princip stvaranja abrazivnog vodenog mlaza prema [7] prikazan je na slici 5 te sadrži sljedeće faze:

1. Dovod vode pod visokim tlakom (3500 bara ili više) koja ulazi relativno malom brzinom
2. Voda povećava brzinu prolaskom kroz mlaznicu jako malog promjera (0,5 do 1,2 mm i duljine od 50 do 100 mm)
3. Velika brzina mlaza stvara vakuum u komori za miješanje te usisava potrebnu količinu abrazivnog sredstva
4. Abrazivna smjesa se u ovom dijelu potpuno miješa te nastavlja ubrzavati gotovo na izlaznu brzinu mlaza
5. Izlaz abrazivnog vodenog mlaza potrebnom brzinom i snagom za rezanje materijala.



Kvaliteta rezanja uvjetovana je s nekoliko parametara. Jedan od najbitnijih parametara je udaljenost mlaznice od obratka. Potrebno je održavati optimalnu udaljenost jer se s većom udaljenošću mlaz više raspršuje. Također brzina mlaza ima velik utjecaj na točnost obrade. Pri većim brzinama mlaza povećava se kut između vrha i dna obratka. Zbog toga je širina reza veća pri vrhu [7].

Prednosti postupka obrade vodenim mlazom:

- postupkom obrade vodenim mlazom može se postići visoka kvaliteta obrađene površine bez promjene u mikrostrukturi
- mogu se obrađivati zahtjevni geometrijski oblici
- obradom se ne stvara toplina te nema toplinskih deformacija materijala
- kako nema unosa topline te ne dolazi do zagrijavanja ovo je najprikladniji postupak obrade koji se može primjenjivati u eksplozivnim okruženjima
- postupak je ekonomičan jer voda kao alat ne zahtjeva održavanje, oštrenje, podmazivanje i ne troši se kao klasični rezni alat, jeftina je i lako dobavljiva
- isti sustav osim za obradu može služiti za čišćenje
- buka je minimalna
- postupak je prikladan i za obradu toksičnih materijala jer ne stvara toksičnu prašinu kao kod konvencionalnih postupaka [4].

Ograničenja i nedostaci postupka obrade vodenim mlazom su:

- uslijed rezanja nije moguće dobiti oštre bridove jer je mlaz kružnog oblika
- ograničen je broj materijala koji se mogu ekonomično rezati
- obratci većih debljina se ne mogu precizno i ekonomično rezati
- pojavljuje se netočnost uslijed neravnomjerne debljine reza [7].

### 2.3.2. Obrada ultrazvukom (USM)

Obrada ultrazvukom koristi aksijalno oscilirajući alat za obradu tvrdih i krhkih materijala. Alat oscilira na ultrazvučnim frekvencijama 18 – 40 kHz pri amplitudama od 10 – 50  $\mu\text{m}$ . Tijekom osciliranja alata, u zonu obrade se kontinuirano dovodi abrazivna smjesa  $\text{B}_4\text{C}$  i  $\text{SiC}$ , te se pod utjecajem visokih frekvencija i kontinuirane statičke sile, abrazivne čestice zabijaju u površinu i uzrokuju odvajanje sitnih čestica obratka. Alat je izrađen od mekšeg materijala nego obradak, najčešće od čelika ili mesinga [8].

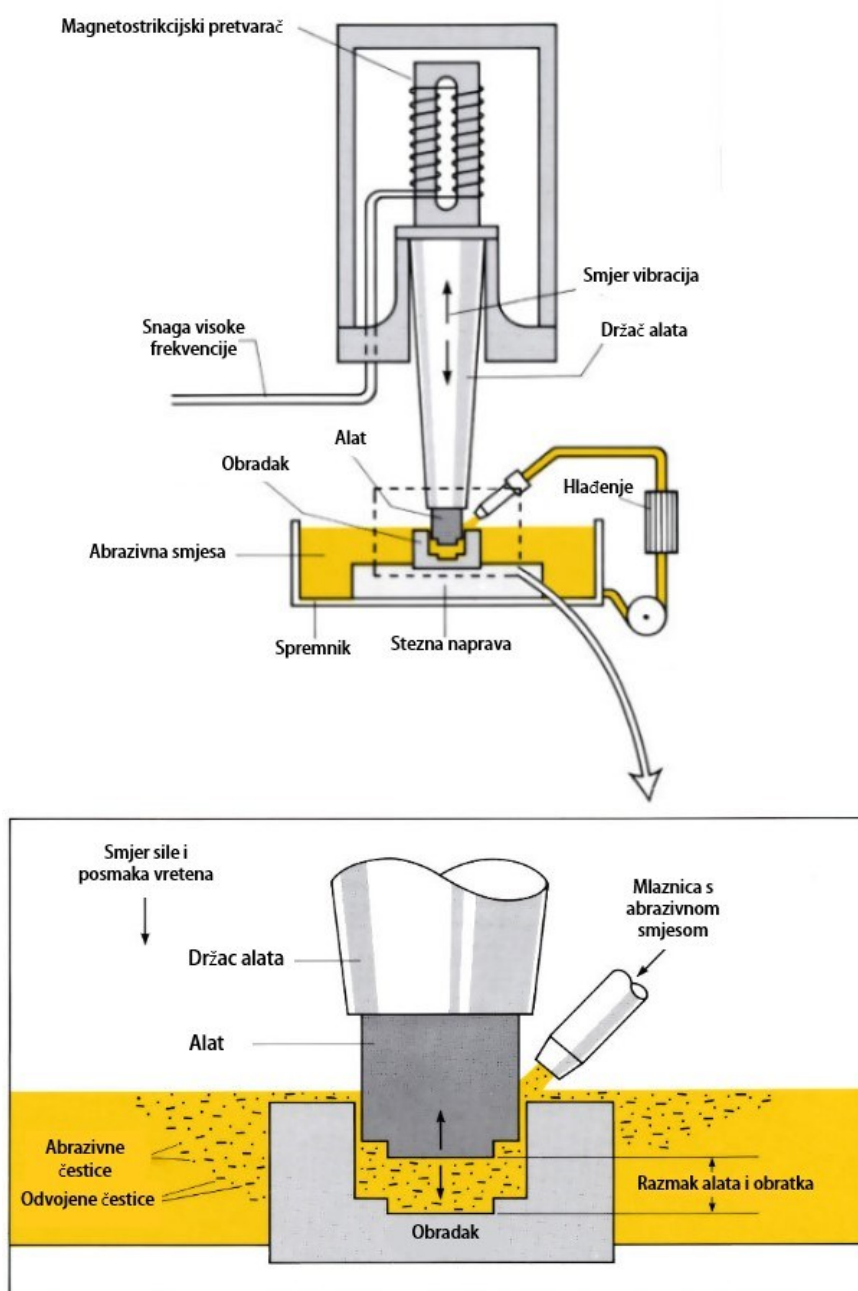


Slika 6 Sustav za obradu ultrazvukom [9]

Sustav za obradu ultrazvukom sastoji se od oscilirajućeg sustava, visokofrekventnog generatora i sustava za kontinuirano dovodenje abrazivne smjese. Oscilirajući sustav prenosi mehaničku energiju na obradak. Sastoji se od oscilatora, sonotrode i alata. Oscilator ili elektroakustični pretvarač razvija mehaničke oscilacije pod utjecajem električnih impulsa. Mogu biti magnetrostriksijski ili piezoelektrični.

Magnetrostriksijski oscilator ili pretvarač se sastoji od jezgre i bakrenog namotaja. Visoko frekventni generator konstantno napaja namotaje izmjeničnom strujom te stvara promjenjivo magnetsko polje jako visokih frekvencija. Pod utjecajem promjenjivog magnetskog polja dolazi do promjene dimenzije jezgre.

Na istom principu rade i piezoelektrični oscilatori, ali su mnogo jednostavniji te ostvaruju velik stupanj iskoristivosti, često do 95 %. Također velika prednost piezoelektričnih oscilatora je jako malo zagrijavanje, dok je kod magnetrostriksijkih neophodno hlađenje [8].



Slika 7 Shematski prikaz sustava za obradu ultrazvukom [10]

Ovaj postupak obrade ima primjenu kod tvrdih i krhkih materijala kao što su: staklo, keramika, kompozitni materijali, karbidi, volfram, itd. Može se koristiti za bušenje, izradu utora, 3D površine, izradu elektroda za elektroeroziju, poliranje, graviranje na staklu ili obradu dijamanta.

Brzina odvajanja čestice je jedna od najbitnijih čimbenika obrade, a na nju utječu brojni faktori. Najveći utjecaj ima amplituda osciliranja alata, pri čemu se brzina odvajanja čestica povećava s porastom amplitude vibracija alata. Amplituda utječe na brzinu abrazivnih čestica

u zoni obrade, a povećanje amplitude raste kinetička energija čestica čime se pojačava odvajanje čestica. Amplituda se može povećavati do pojave prskanja, pri čemu se smanjuje broj aktivnih abrazivnih čestica u zoni obrade, a samim time dolazi do smanjenja brzine odvajanja čestica.

Postoje još mnogobrojni čimbenici koji utječu na kvalitetu i točnost obrađene površine. Na točnost obrade jako utječe veličina abrazivnih čestica. Velike abrazivne čestice daju veću brzinu odvajanja materijala, ali mnogo lošiju kvalitetu i hrapavost površine obratka. Korištenjem manjih abrazivnih čestica može postići hrapavost površine do 0,25  $\mu\text{m}$  [4].

Također, hrapavost je veća kod obrade krhkih materijala kao što su staklo ili keramika [8].

Prema izvoru [3] prednosti obrade ultrazvukom:

- mogu se obrađivati svi materijali bez obzira na njihovu vodljivost
- jednostavno se mogu obrađivati jako krhki materijali
- može se postići jako dobra i precizna završna površina bez promjena u mikrostrukturi
- nema zagrijavanja ni toplinskog utjecaja na obrađivanu površinu.

Nedostatci obrade ultrazvukom:

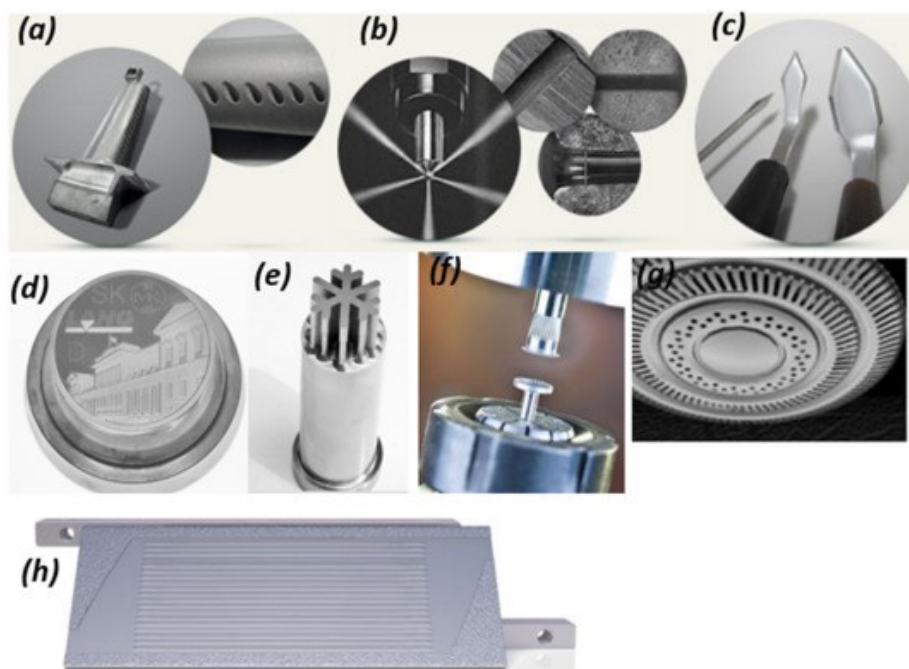
- obrada ultrazvukom ima mnogo veću potrošnju energije i manju brzinu odvajanja materijala od tradicionalnih postupaka obrade
- jako brzo trošenje alata uslijed obrade
- ograničena je površina i dubina obrade.

## **2.4. Elektrokemijski nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem**

### **2.4.1. Elektrokemijska obrada (ECM)**

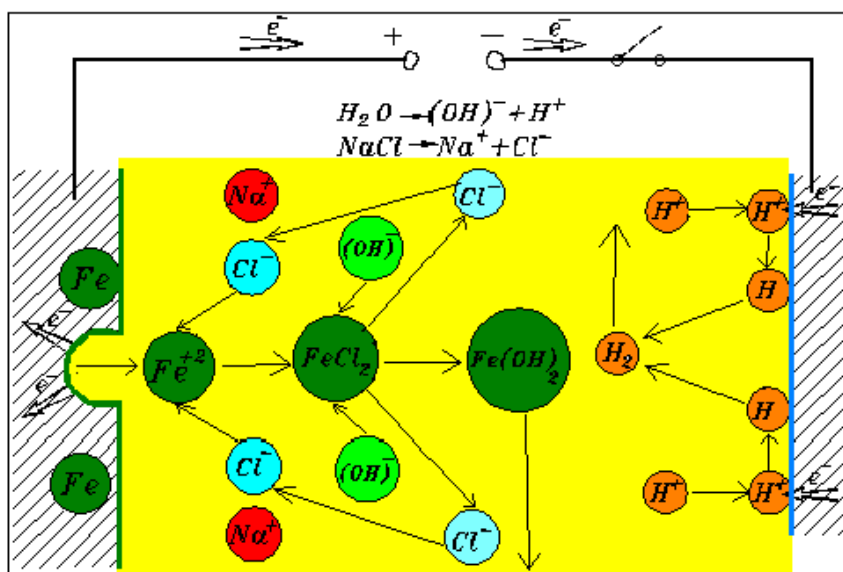
Elektrokemijska obrada je nekonvencionalni postupak obrade koji primjenjuje dva oblika energije za odvajanje materijala. Ovaj suvremeni proces obrade koristi električnu i kemijsku energiju za elektrokemijsku razgradnju materijala pomoću procesa elektrolize [4].

Elektrokemijska obrada ima široku primjenu u serijskoj proizvodnji tvrdih, teško obradivih, ali elektrovodljivih materijala. Čestu primjenu pronalazi kod obrade složenih geometrijskih oblika kao što su: kalupne šupljine, lopatice turbine, duboki provrti, površine oštih bridova, mikro geometrijski oblici [8].



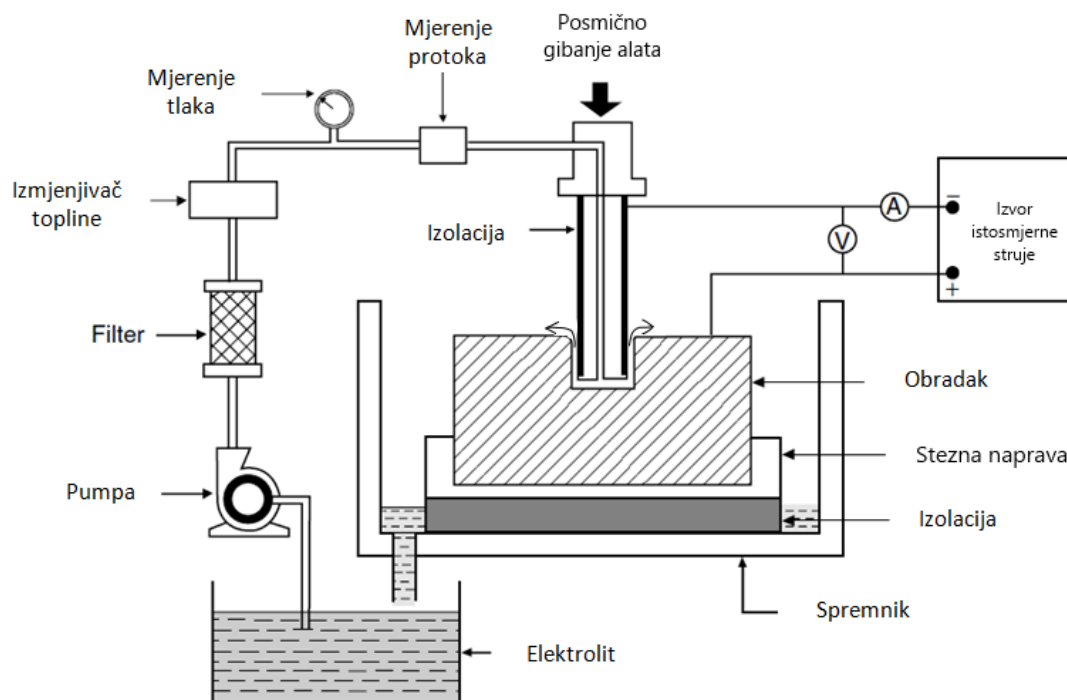
Slika 8 Primjeri primjene elektrokemijske obrade [11]

Proces elektrolize se odvija na pozitivnoj i negativnoj elektrodi potopljenoj u vodljivoj otopini elektrolita. Elektrode su spojene na istosmjerni izvor struje čime obradak postaje pozitivna (anoda), a alat negativna (katoda) elektroda. Sustav elektroda i elektrolita, u kojemu se odvija proces elektrolize naziva se elektrolitička ćelija, a kemijske reakcije se nazivaju anodne ili katodne reakcije. Kemijsko rastvaranje materijala anode, odnosno obratka čini osnovu za elektrokemijsku obradu metala [4].



Slika 9 Primjer kemijske reakcije elektrolize [2]

Elektrokemijska reakcija prikazana na slici 9 odvija se u elektrolitu vodene otopine natrijevog klorida, a obrađivani materijala anode je željezo. Provođenjem struje kroz elektrolit ostvaruje se proces elektrolize uslijed čega se otpuštaju pozitivni ioni metalnog obratka te putuju prema katodi, dok negativni putuju ka anodi. Stoga, elektrolit pomoću sustava za cirkulacije ima bitnu ulogu u njihovom odvođenju iz zone obrade, kako ne bi došlo do taloženja na alatu, odnosno katodi (Slika 10). Količina otopljenih iona je definirana Faraday-evim zakonom i kaže da je proporcionalna jakosti struje i vremenu u kojem su joj elektrode izložene [2], [8].



**Slika 10 Sustav za elektrokemijsku obradu [8]**

Značajke elektrokemijske obrade prema izvoru [2] su:

- mogu se obrađivati svi tvrdi i teško obradivi materijali, pod uvjetom da su električki vodljivi
- elektrokemijska obrada se najčešće koristi za obradu kompleksnih dijelova koji su teško obradivi drugim postupcima
- nema kontakta alata i obratka pa je ova obrada pogodna za tankostjene profile i krhke materijale
- nema trošenja alata
- nema zaostalih naprezanja i zone utjecaja topline

- koristi se istosmjerni generator koji stvara napon od 8 do 30 V i istosmjernu struju od 50 do 40000 A
- za točnu i učinkovitu obradu gustoća struje se kreće od 10 do 500 A/cm<sup>2</sup>
- posmično gibanje se vrši utiskivanjem alata u obradak
- posmak alata se kreće u rasponu od 0,1 do 20 mm/min
- produkti otapanja materijala, toplina i plinovi se odvođuju strujanjem elektrolita u prostoru između alata i obratka pri brzinama od 5 do 50 m/s
- razmak između alata i obratka je oko 0,1 mm
- može se postići hrapavost površine od 0,1 do 2,5 μm.

Otapanjem materijala obratka složena geometrija kontinuiranim utiskivanjem alata koji je zrcalan geometriji obratka, ali umanjen za vrijednost praznine između alata i obratka. Alat treba biti dobar vodič i korozijski postojan. Najčešće je izrađen od bakra, bronce, mesinga ili nehrđajućih čelika. Elektroliti su visoko vodljive otopine anorganskih soli u vodi, najčešće NaCl, KCl ili NaNO<sub>3</sub> ili njihove mješavine. Imaju veliku ulogu kod produktivnosti, točnosti dimenzija i završne obrade. Otopina NaNO<sub>3</sub> se pokazala kao najučinkovitija, ali ujedno i najskuplja. Uz pravi odabir elektrolita, potrebno je odabrati optimalnu gustoću struje koja također ima veliki utjecaj na produktivnost obrade. Mehanička svojstva materijala nemaju velik utjecaj na proizvodnost obrade. Odabirom dobrih parametra obrade postiže se velika proizvodnost (oko 50000 mm<sup>3</sup>/min) [2], [8].

Prednosti elektrokemijske obrade prema izvoru [2] su:

- visoka proizvodnost procesa
- nema zaostalih naprezanja, zone utjecaja toplini i srha
- nema trošenja alata i ne mora biti tvrđi od obratka
- dobra dimenzijska točnost (od 0,02 do 0,2 mm)
- visoka kvaliteta obrađene površine (R<sub>a</sub> od 0,1 do 0,25 μm).

Nedostaci elektrokemijske obrade:

- oprema je jako skupa i velik je utrošak energije
- oprema zahtjeva veliku površinu za instalaciju
- mogu se obrađivati samo električki vodljivi materijali
- elektrolit izaziva koroziju opreme
- proces nije potpuno ekološki bezopasan.

## 2.5. Termoelektrični nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem

Termoelektrični postupci obrade spadaju u skupinu nekonvencionalnih postupaka obrade koji primjenom različitih izvora toplinske energije ostvaruju željeni oblik obratka. Temelje se na principu primjene toplinske i električne energije, pri čemu dolazi do taljenja, isparavanja ili sagorijevanja materijala, pod utjecajem jako visokih temperatura. Razvojem suvremene industrijske proizvodnje, razvijaju se i brojni teško obradivi, napredni materijali. Stoga, neophodna je primjena raznih izvora toplinske energije i medija kroz koje se prenosi.

Neki od izvora toplinske energije kod termoelektričnih postupaka:

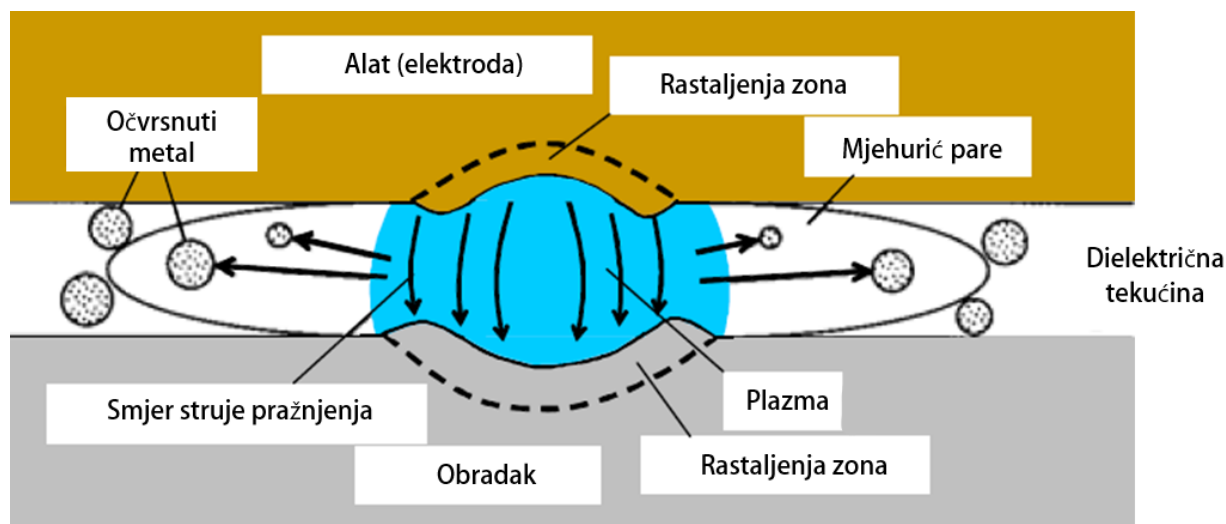
- električna iskra
- plazmeni luk
- laserska zraka
- elektronska zraka.

S obzirom na izvor toplinske energije, najpoznatiji termoelektrični postupci su: elektroerozija, obrada laserom, obrada snopom elektrona i obrada plazmom [12].

### 2.5.1. Obrada elektroerozijom (EDM)

Elektroerozija je nekonvencionalni postupak obrade odvajanjem koji je široko rasprostranjen u industrijskoj proizvodnji. Obrada se temelji na eroziji materijala električnim pražnjenjem, odnosno iskrenjem između alata (elektrode) i obratka, pri čemu su uronjeni u dielektričnu tekućinu. Ona ne provodi električnu struju već služi kao izolator pri niskim naponima, ali pojavom dovoljno velike razlike potencijala između alata i obratka dolazi do ioniziranja dielektrične tekućine, stvaranja električnog luka i preskakanja iskre na mjestu najmanjeg razmaka između elektroda. Razvija se velika količina toplinske energije, te se obradak na mjestima iskrenja zagrijava, tali i isparava, a kao posljedica ostaju mali krateri (Slika 11). Uz poželjnu pojavu trošenja obratka, dolazi do pojave trošenja alata uslijed apsorpcije dijela energije. Odabirom odgovarajućih parametara obrade, trošenje alata se svodi na jako niske razine. Dielektrična tekućina struji kroz mali razmak između alata i obratka te odnosi sitne odvojene čestice iz zone obrade. Iz tog razloga, neophodno je omogućiti hlađenje i strujanje uz filtriranje sitnih odvojenih čestica iz dielektrične tekućine [8].





Slika 11 Proces električnog pražnjenja između elektrode i obratka [13]

Postupak elektroerozije je pogodan za razne operacije kao što su:

- oblikovanje kompleksnih 3D površina
- obrada uskih i dubokih rebara
- bušenje provrta i narezivanje navoja
- rezanje
- brušenje [8].

Elektroerozijska obrada nije ograničena mehaničkim svojstvima materijala pa se mogu obrađivati razni materijali bez obzira na čvrstoću, tvrdoću i žilavost, dok je elektrovodljivost alata i obratka najznačajnije svojstvo, a ujedno jedini ograničavajući faktor [8].

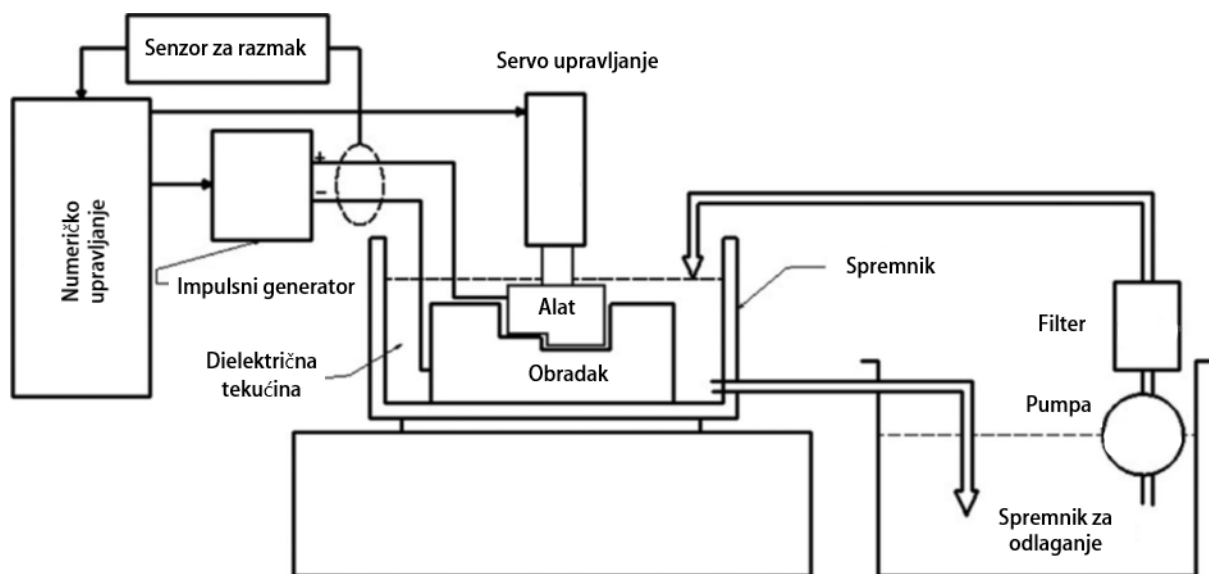
S obzirom na vrstu alata, postupak se dijeli na dvije skupine:

1. elektroerozijska obrada žigom
2. elektroerozijska obrada žicom.

#### 2.5.1.1. Elektroerozijska obrada žigom

Elektroerozijska obrada žigom kao alat koristi upravo žig odnosno elektrodu za oblikovanje tražene geometrije. Osnovni elementi ovakvog sustava su impulsni generator istosmjerne struje i na njega povezane dvije elektrode. Obradak je najčešće elektroda pozitivnog pola (anoda), dok je alat najčešće negativnog pola (katoda). Obradak je stegnut steznim napravama i potopljen u dielektričnu tekućinu. Jako je bitno održavanje konstantnog razmaka između alata i obratka. Stoga, koristi se numeričko upravljanje servomotorima za automatsko održavanje potrebnog posmaka i konstantnog razmaka. Servomehanizam dobiva informaciju o razmaku

pomoću senzora očitavanjem razlike stvarnog napona i referentne vrijednosti, odnosno parametarski zadanog napona. Alat se približava do pojave kratkog spoja u prostoru između alata i obratka, uzrokujući promjenu smjera posmičnog gibanja, pri čemu se alat odmiče s ciljem uspostavljanja kontrole nad naponom. Stroj je opremljen pumpom i sustavom za filtriranje dielektrične tekućine [8].



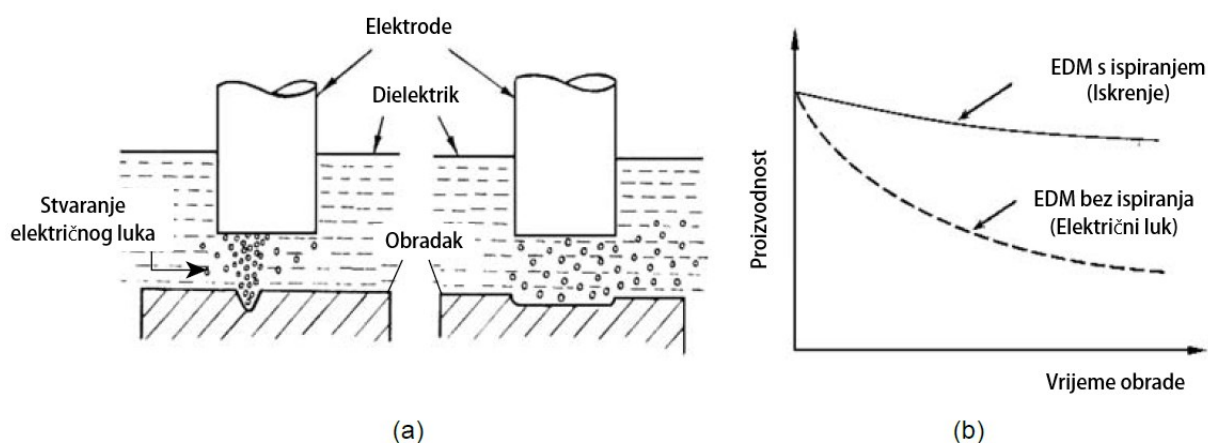
Slika 12 Shema sustava za elektroerozijsku obradu žigom [12]

Razlika potencijala dvije elektrode uzrokuje preskakanje iskre s alata na obradak i električno pražnjenje na čemu se temelji elektroerozijska obrada. Iskrenjem dolazi do zagrijavanja u zoni obrade, uslijed čega se postižu jako visoke temperature od 6000 do 12000 °C [2].



**Slika 13** Primjer stroja za obradu elektroerozijom

Materijal obratka se troši taljenjem i isparavanjem, te sitne čestice odvojenog materijala taloženjem stvaraju fini sloj mulja. Stoga, kako bi se spriječilo nakupljanje mulja u zoni obrade potrebno je ispiranje, odnosno strujanje dielektrične tekućine. Zaostajanjem dijela otpadnih čestica u zoni obrade smanjuju se izolacijska svojstva dielektrika, a nakupljene čestice djeluju kao most između elektroda. Visokom koncentracijom čestica može doći do stvaranja električnog luka i oštećenja alata i obratka (Slika 14). Stoga, kontaminacija dielektrične tekućine se treba kontrolirati kako bi se postigli optimalni uvjeti obrade i visok stupanj produktivnosti [8].

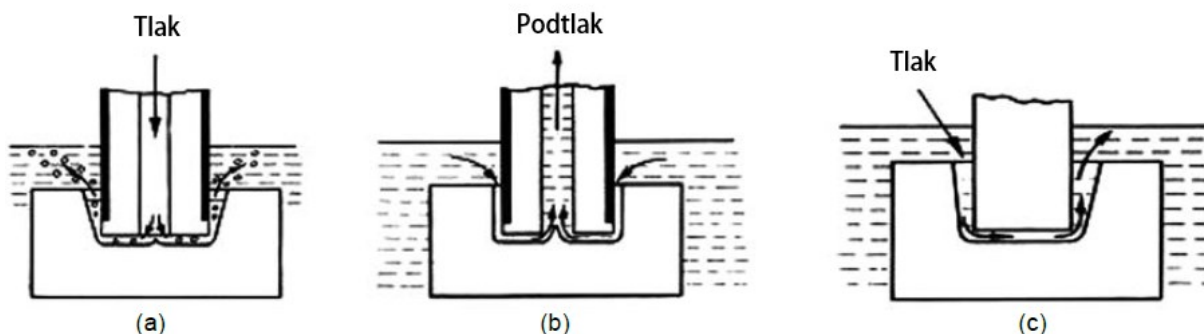


**Slika 14 Shematski prikaz utjecaja optimalnog ispiranja: a) kontaminacija dielektrika, b) utjecaj ispiranja na proizvodnost [8]**

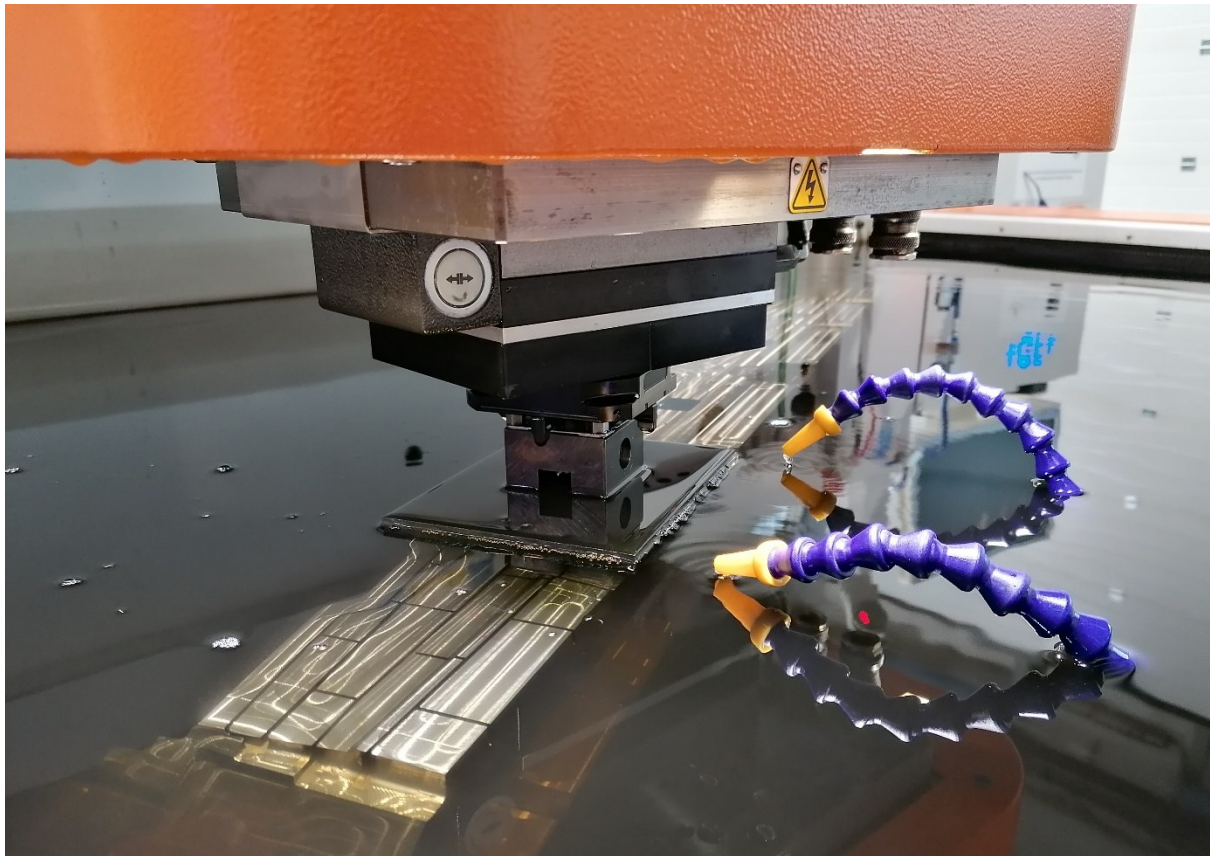
Postoji nekoliko načina strujanja dielektrične tekućine, a prema izboru [8] tri osnovna su:

- injekcijsko strujanje
- bočno strujanje
- usisno strujanje.

Injekcijskim ispiranjem stvara se blagi konus na bočnim stranicama uslijed strujanja odvojenih čestica po bokovima, dolazi do pojačanog električnog pražnjenja. Taj problem nestaje primjenom usisnog strujanja jer se čestice materijala usisavaju iz zone obrade te se postiže jednoliko odvajanje po bočnim stranicama alata (Slika 15). Bočnim ispiranjem također nastaje blagi konus na strani izlaza dielektrične tekućine iz zone obrade. Kontaminacija dielektrične tekućine odvojenim česticama povećava se strujanjem prema izlazu [8].



**Slika 15 Načini ispiranja: a) injekcijsko , b) usisno, c) bočno [8]**



**Slika 16** Primjer bočnog ispiranja

Mnoge tekućine se mogu koristiti kao dielektrična tekućina. Najčešće su to smjese mineralnih ulja odnosno ugljikovodika kod obrade žigom, dok deionizirana voda ima češću primjenu kod elektroerozijske obrade žicom.

Zbrinjavanje dielektričnih tekućina nosi sa sobom brojne ekološke probleme i dodatne troškove. Vrlo su zapaljive, hlapljive i nerazgradive. Također, elektroerozijska obrada otpušta opasne i toksične plinove, pare, neugodne mirise i jako sitne čestice opasne po zdravlje dugotrajnim izlaganjem. U novije vrijeme razvijaju se mnoge varijante elektroerozijske obrade kao što su: suha i gotovo suha EDM, EDM u vodi, EDM u prahu i EDM na ultrazvučnim vibracijama.

Suha i gotovo suha obrada elektroerozijom je primjer ekološki znatno prihvatljivije obrade, a istraživanja pokazuju da ima brojne prednosti.

Suhim obradama se može povećati brzina uklanjanja materijala, povećava se hrapavost površine, smanjuje se trošenje alata, a ujedno su pogodnije za zdravlje čovjeka i ekološki prihvatljivije. Kao dielektrični medij se koristi plin koji struji malim razmakom između

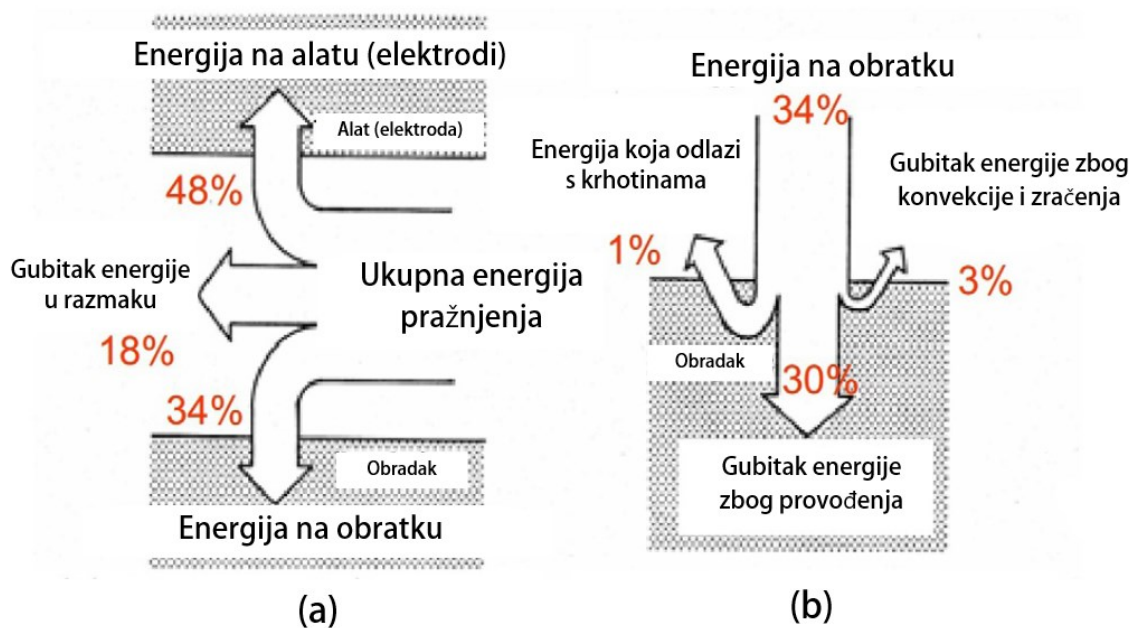
elektrode i obratka te odnosi čestice materijala. Najčešće se koristi kisik, ali mogu se koristiti plinovi kao što su helij i argon [14].

Značajke suhe elektroerozijske obrade prema izvoru [15] su:

- trošenje elektroda je mnogo manje, bez obzira na trajanje impulsa
- manja su zaostala naprezanja i tanja je zona utjecaja topline
- manji je razmak između alata i obratka
- nema opasnosti od požara i nema stvaranja opasnih para
- moguća je obrada u vakuumu
- proces je ekološki prihvatljiviji od klasičnog EDM procesa
- stroj može biti kompaktniji jer nije potreban spremnik za dielektričnu tekućinu.

Ipak, dielektrične tekućine na bazi ugljikovodičnih ulja ostvaruju najstabilniju obradu. Kod EDM obrade žicom najčešću primjenu imaju dielektrici na bazi vode koji su ekološki prihvatljivi, ali se pojavljuje problem korozije metalnih obradaka te jače trošenje alata kod EDM obrade žigom.

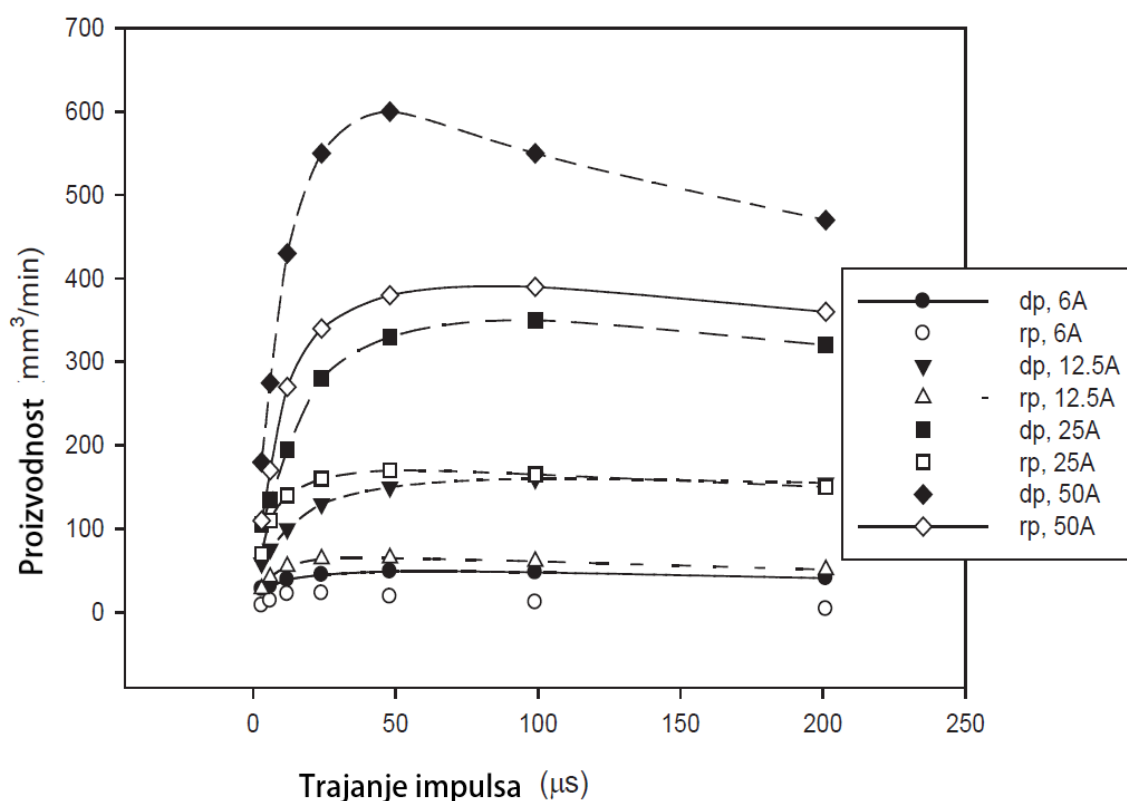
Raspodjela energije pražnjenja između anode, katode i dielektrične tekućine prikazuje količinu uklanjanja materijala koja ovisi o nekoliko parametara. Glavni parametri koji utječu na raspodjelu su: duljina trajanja impulsa, polaritet alata i obratka, materijali alata i obratka te jakost struje [12].



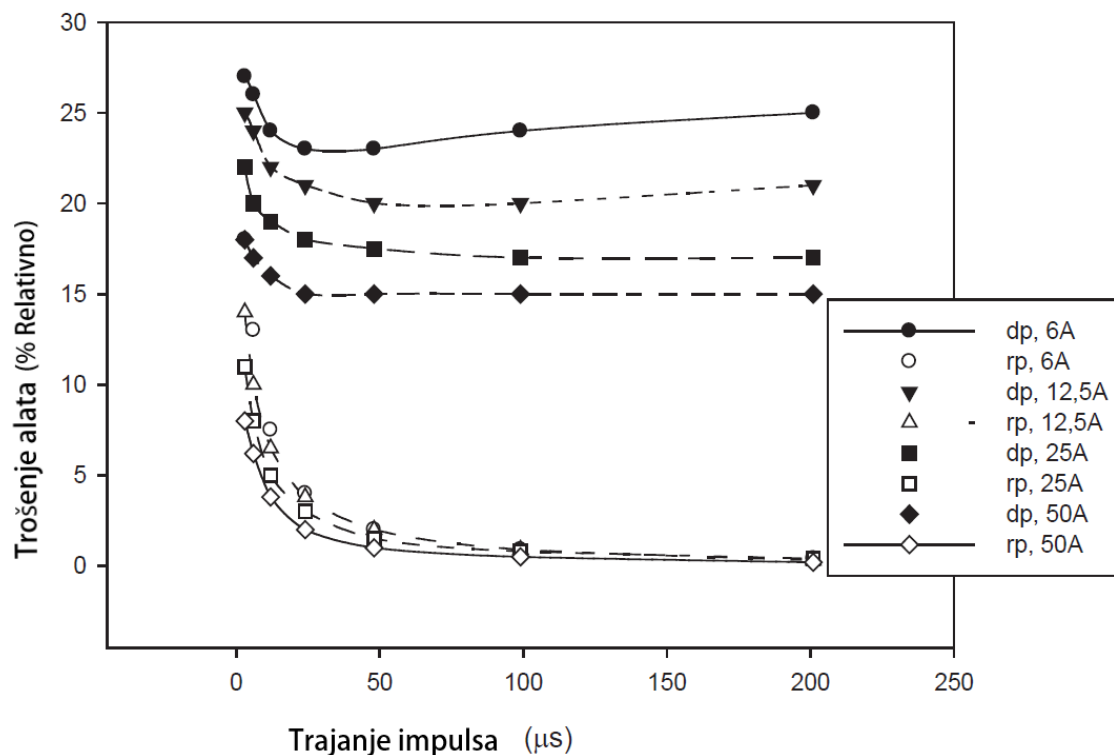
Slika 17 Raspodjela energije pražnjenja: (a) raspodjela ukupne energije pražnjenja, (b) raspodjela energije pražnjenja na obratku [12]

Na slici 16 je shematski prikazana raspodjela energije pražnjenja za slučaj negativnog polariteta alata (eng. direct polarity – dp) pri čemu oko 48 posto energije odlazi na elektrodu, dok 34 posto odlazi na obradak. Ostatak energije (oko 18 posto) gubi se u razmaku između alata i obratka, a troši se na stvaranje plazme odnosno iskrenje. Stoga, može se zaključiti da anoda apsorbira najveći dio energije u procesu [12].

Obrnutim polaritetom (eng. reverse polarity – rp) obradak postaje anoda. Na taj način postiže se znatno manje trošenje alata bez obzira na ostale parametre. Razgradnjom mineralnih ulja na visokim temperaturama otpuštaju se čestice ugljika te zbog veće disipacije energije na anodi, nakuplja se sloj ugljika koji štiti površinu alata od trošenja. S povećanjem jakosti struje proporcionalno raste energija pražnjenja koja osigurava veću proizvodnost. Produljenjem trajanja impulsa proizvodnost proporcionalno raste. Međutim, trajanjem impulsa dulje od 48  $\mu\text{s}$  pojavljuje se nestabilno i neravnomjerno iskrenje. Električni luk postaje neučinkovit, a duljim trajanjem impulsa povećava se temperatura dielektrika i proizvodnost opada (Slika 18). Elektrodom negativnog polariteta se ostvaruje veća proizvodnost zbog većeg relativnog trošenja alata i obratka [16].



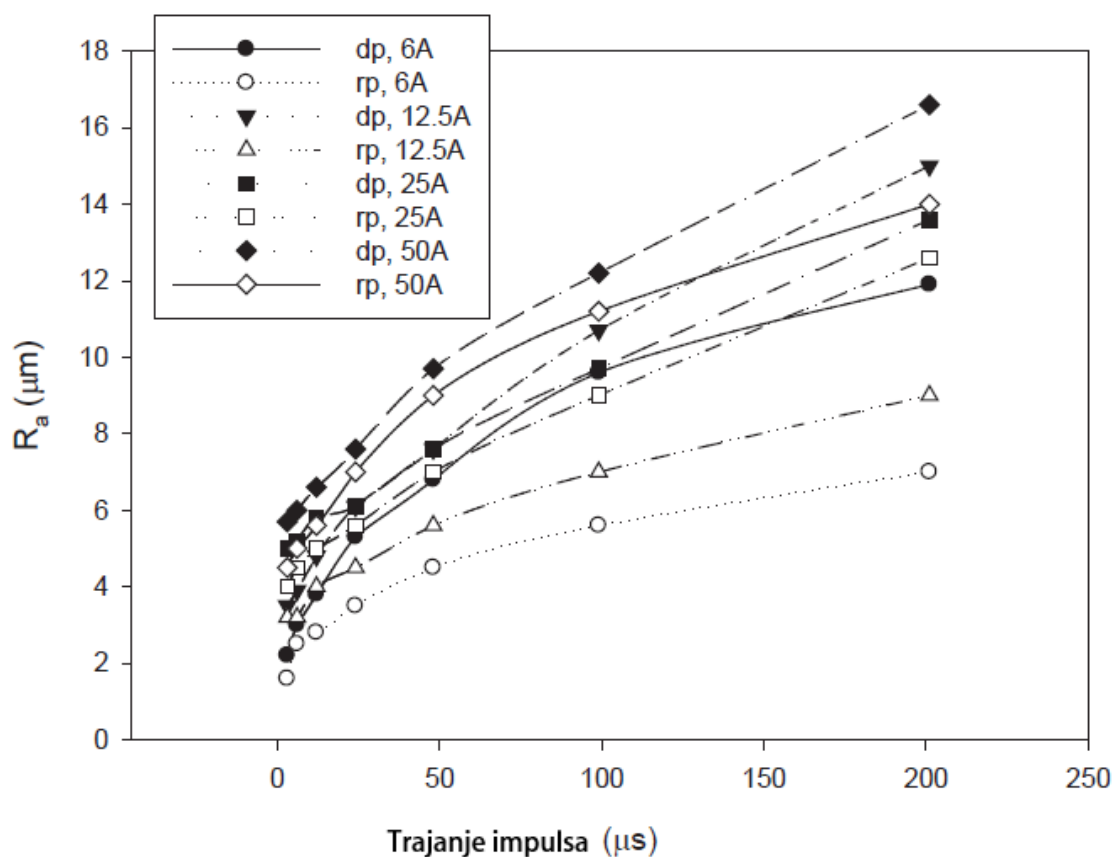
Slika 18 Graf proizvodnost - trajanje impulsa [16]



Slika 19 Graf trošenje alata - trajanje impulsa [16]

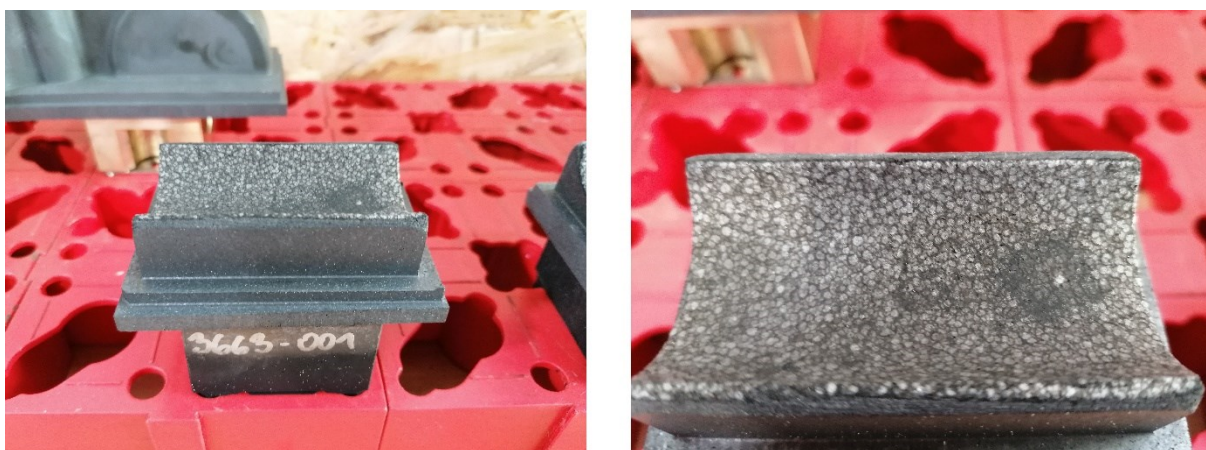
Krateri na površini obratka dobiveni obrnutim polaritetom su mnogo plići, međutim, hrapavost površine ( $R_a$ ) se povećava s povećanjem duljine trajanja impulsa i jakosti struje bez obzira na polaritet (Slika 20). Jaka električna vodljivost elektroda omogućuje iskre visokog intenziteta koje udaraju o površinu obratka. Stoga, povećanje jakosti struje i duljine trajanja impulsa proizvodi veću energiju pražnjenja i udarnu silu iskrenja, a samim time i veću hrapavost površine. Za postizanje boljih završnih obrada površine potrebno je smanjiti jakost struje i vrijeme trajanja impulsa te alat s pozitivnim polaritetom. Iako je mnogo manje trošenje alata primjenom suprotnog polariteta, ne može se zanemariti daleko veći stupanj uklanjanja materijala odnosno proizvodnost primjenom alata negativnog polariteta. Istraživanja pokazuju da je proizvodnost 25 – 81 posto manja primjenom suprotnog polariteta. Što ukazuje da je polaritet alata i obratka vrlo važan faktor za proizvodnost, trošenje alata i hrapavost površine [16].



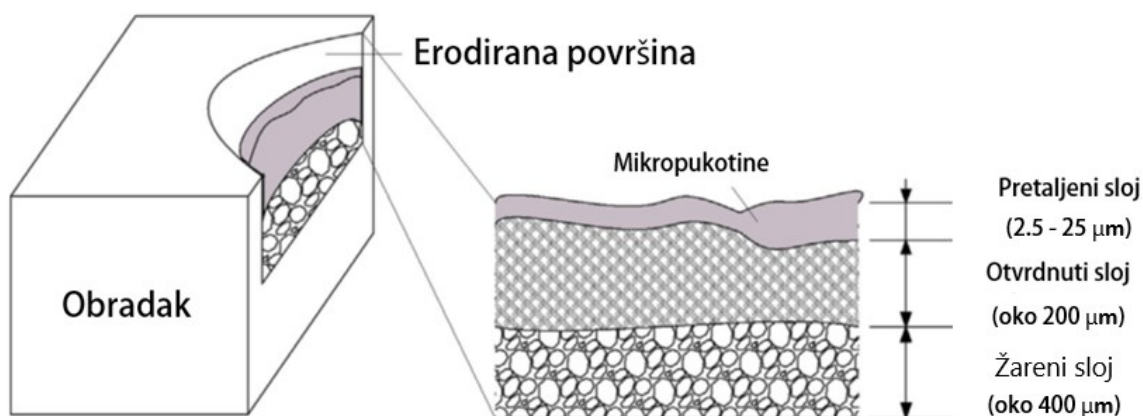


Slika 20 Graf hrapavost površine ( $R_a$ ) - trajanje impulsa [16]

Na slici 21 prikazana je površina grafitne elektrode nakon obrade pod velikom jakosti struje (oko 80 A). Elektroda negativnog polariteta ostvarila je hrapavost površine ( $R_a$ ) 12  $\mu\text{m}$ , ali uz relativno velike kratere na površini obratka, vidljiva su i oštećenja površine elektrode.

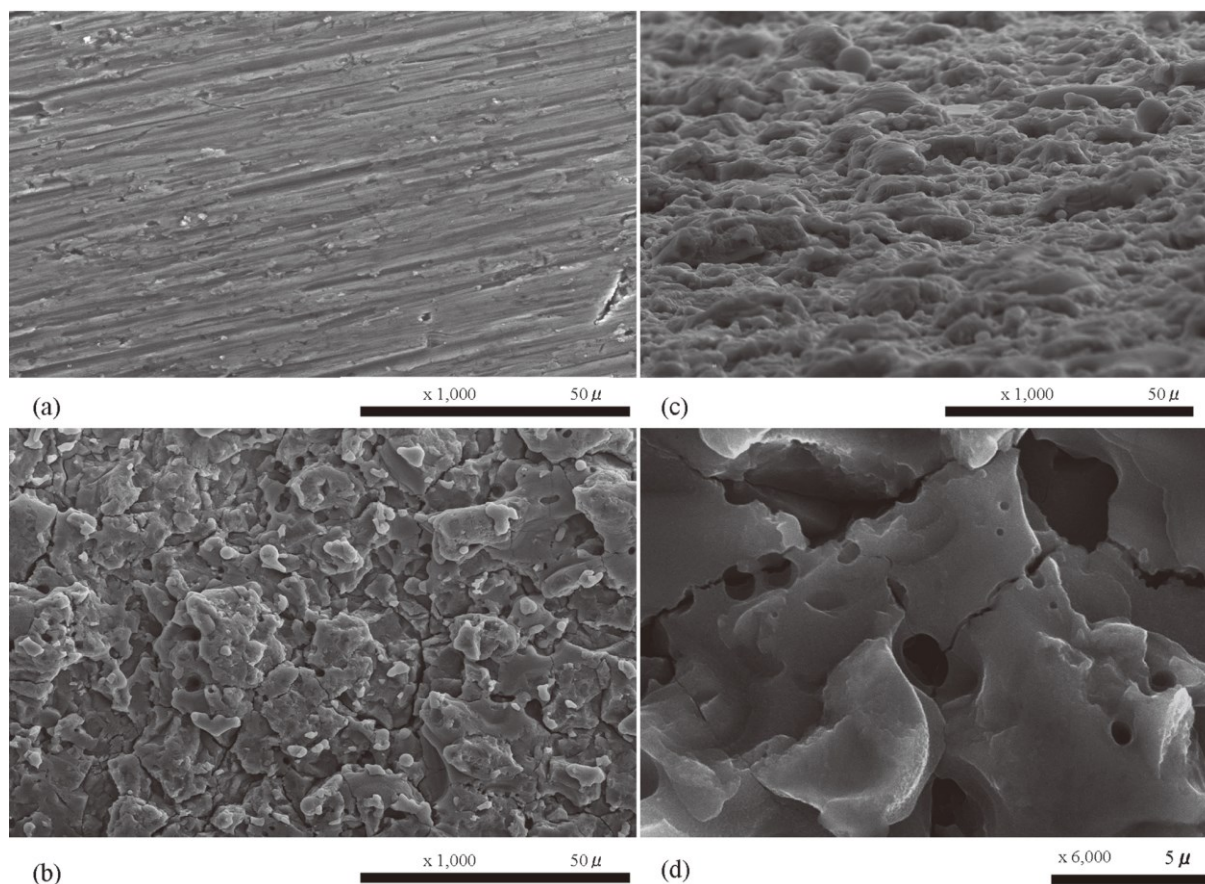


Slika 21 Površina elektrode nakon obrade na veliki  $R_a$



Slika 22 Zona utjecaja topline [12]

Obrada elektroerozijom razvija jako visoke temperature u zoni obrade, nerijetko do 12000 °C. Visoka temperatura je odgovorna odvajanje materijala obratka, ali njenim utjecajem dolazi do promjena u strukturi površinskog sloja materijala. Mogu se uočiti tri različita sloja zone utjecaja topline: pretaljeni sloj, otvrdnuti sloj i žareni sloj. Dielektričnim pražnjenjem rastaljeni materijal izbacuje se u dielektričnu tekućinu, a skrućivanjem stvara sitne odvojene čestice. Međutim, dio rastaljenog materijala se brzo ohladi i skruti u krateru. Pretaljene kapljice metala i nečistoće se lijepe na obrađenu površinu. Nastaje tanak, ponovno očvrnuti sloj, koji je zbog brzog hlađenja tvrd i krhak. Još je poznat pod nazivom bijeli sloj, a debljina mu je oko 2.5 – 25 μm i ovisi o parametrima obrade odnosno energiji pražnjenja. Ispod pretaljenog sloja nastaje područje pod utjecajem kontinuiranog zagrijavanja i hlađenja. Ono uzrokuje toplinska naprezanja i oštećenja materijala. Ova zona ima visoku tvrdoću (oko 65 HRC), a debljina sloja seže do 250 μm. Nastaju pukotine po granicama zrna što uzrokuje smanjenje dinamičke izdržljivost materijala. Ukoliko materijal apsorbira ugljik iz dielektričnog ulja dolazi do promjene kemijske strukture i stvaranje nepoželjnih karbida. Ispod otvrdnutog sloja mijenja se struktura zrna sve do 400 μm dubine [12].



**Slika 23 Površina nakon EDM obrade promatrana elektronskim mikroskopom [17]**

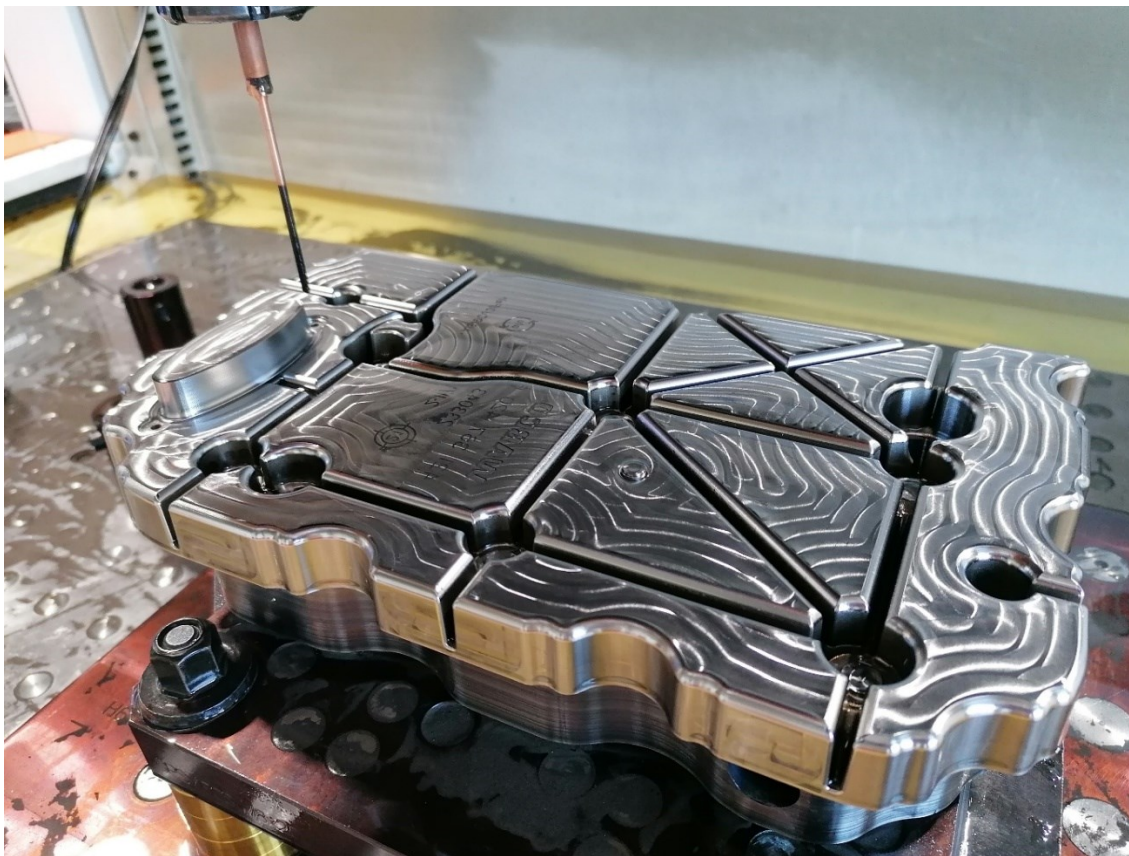
Konvencionalni postupci obrade površinu obratka ostavljaju s neravninama kao posljedica djelovanja rezne oštrice alata. Površinska hrapavost ovisi o geometriji alata, razmaku između dva prolaza, parametrima obrade, itd. Na površinama koje su obrađene postupkom elektroerozije ne postoje tragovi alata, ali mogu se uočiti pukotine i krateri nastali dielektričnim pražnjenjem.

Na slici 23 prikazana je površina obratka od titana korištenog u medicinskoj industriji. Prije obrade elektroerozijom (Slika 23a) obradak ima uzdužne tragove obrade nekim od konvencionalnih postupaka. Na ostalim slikama se mogu uočiti nepravilnosti površine nakon elektroerozijske obrade. Slika 23b i 23c prikazuju isto područje iz dvije perspektive te slika 23d koja još detaljnije prikazuje izgled površine obratka. Mogu se uočiti nastali krateri, pukotine i poroznost površine.



**Slika 24** Primjer EDM obrade utora kod izrade kalupa

Elektroerozijska obrada žigom koristi se za obradu raznih elektrovodljivih materijala bez obzira na njihovu tvrdoću i žilavost. Primjenu pronalazi pri obradi teškoobradivih materijala i kompleksnih geometrija koje nije moguće ili nije ekonomično obraditi konvencionalnim postupcima obrade odvajanjem. Materijali koji se najčešće obrađuju su: čelik, kaljeni čelik, tvrdi metali, itd. EDM obradom sa žigom se najčešće koristi za izradu: alata, kalupa, površina kompleksnih geometrija, dubokih rebara i toleriranih utora, itd. [8].



**Slika 25** Primjer rebra izrađenog pomoću EDM

Prema izvoru [8] prednosti elektroerozijske obrade žigom su:

- mogu se obrađivati jako tvrdi materijali
- nema kontakta između alata i obratka, mogu se obrađivati tankostijeni i krhki materijali
- mogu se obrađivati jako složeni oblici koje ponekad nije moguće izraditi konvencionalnim postupcima obrade
- obrada ne ostavlja srh
- visoka dimenzijska točnost obrade
- proces se može automatizirati.

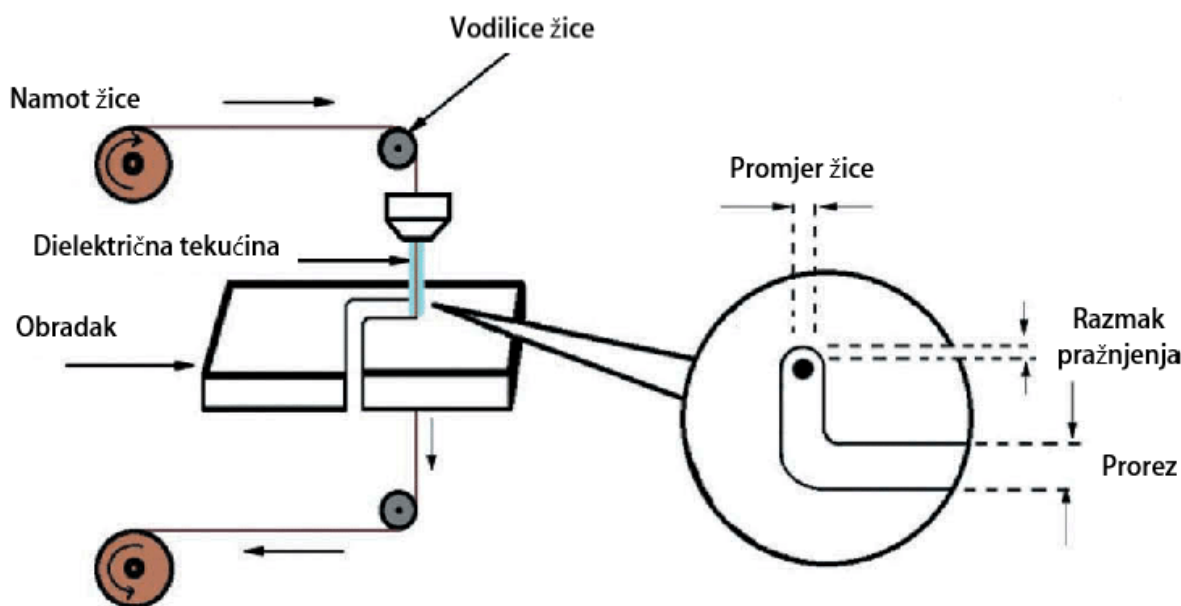
Nedostatci elektroerozijske obrade žigom:

- mogu se obrađivati samo elektrovodljivi materijali
- nastaje zona utjecaja topline
- alat se troši, teže je postići oštre bridove
- postupak ima manju produktivnost i sporiji je u usporedbi s konvencionalnim postupcima.

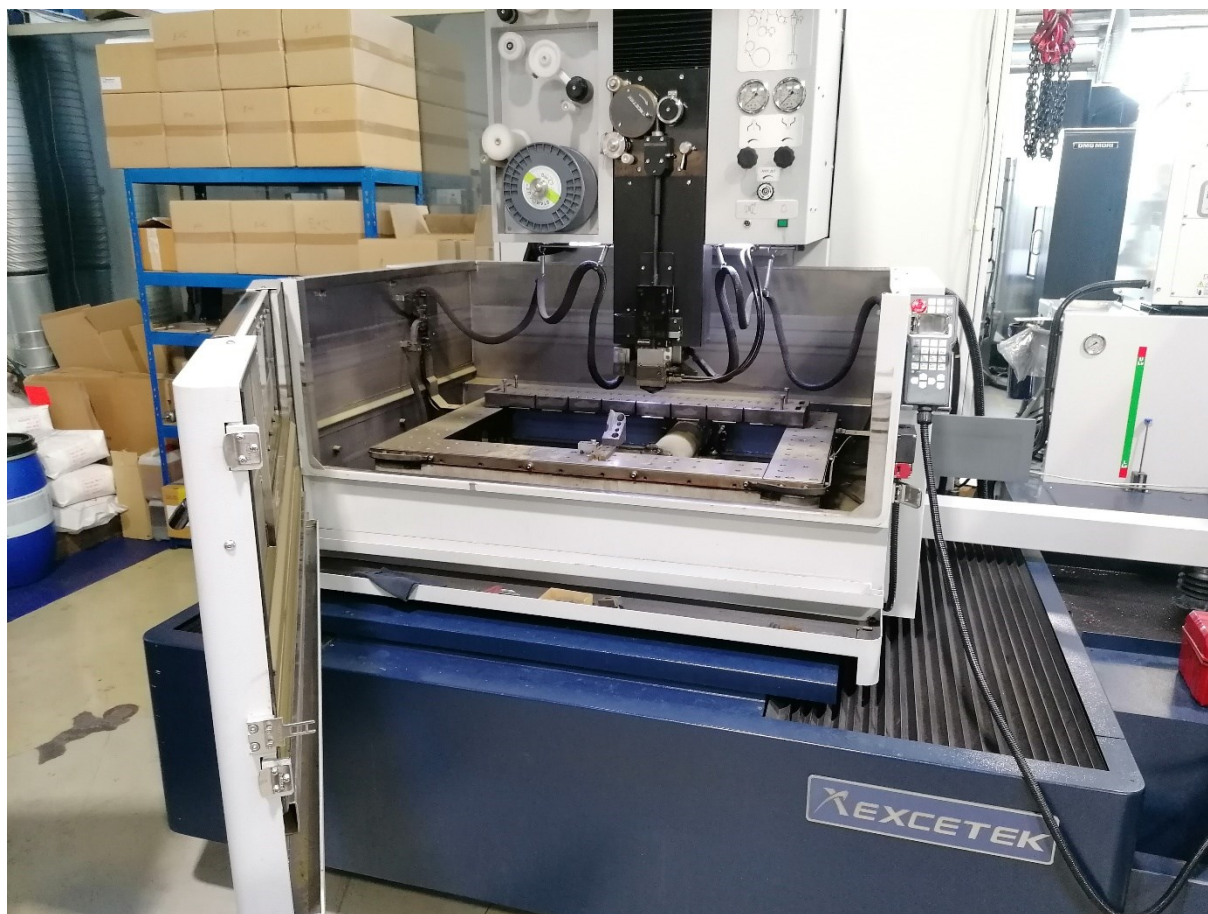
### 2.5.1.2. Elektroerozijska obrada žicom (WEDM)

Elektroerozijska obrada žicom ili rezanje žicom je EDM postupak koji je sličan rezanju NC tračnom pilom. Žica se kontinuirano kreće i reže obradak po zamišljenoj putanji. Princip rada kao i kod EDM obrade žigom, temelji se na dielektričnom pražnjenju između dvije elektrode, pri čemu žica zamjenjuje žig. Žica se namata s jedne koloture na drugu, prolazeći kroz safirne vodilice kako bi se osigurala točnost putanje. Numerički upravljani stol se pomiče u vodoravnoj ravnini, dok su vodilice na istoj poziciji. Pomicanjem vodilica omogućuje se rezanje konusnih geometrija do nagiba od  $30^\circ$ . Moderni strojevi za WEDM mogu sadržavati okretni stol te simultano pomicati vodilice, čime se postiže više stupnjeva slobode [8].

Mogu se obrađivati svi elektrovodljivi materijali bez obzira na tvrdoću. Neke napredne legure titana, inkel, tvrdi metali, elektrovodljiva keramika, visoko kaljeni i poboljšani čelici su samo primjeri materijala kod kojih konvencionalni postupci dostižu svoja ograničenja, stoga primjena WEDM postaje neophodna i sve popularnija. WEDM primjenu pronalazi u avioindustriji, medicinskoj industriji, proizvodnji elektroničkih komponenti, alatničarskoj industriji, itd. [12].



Slika 26 Shematski prikaz WEDM obrade [18]



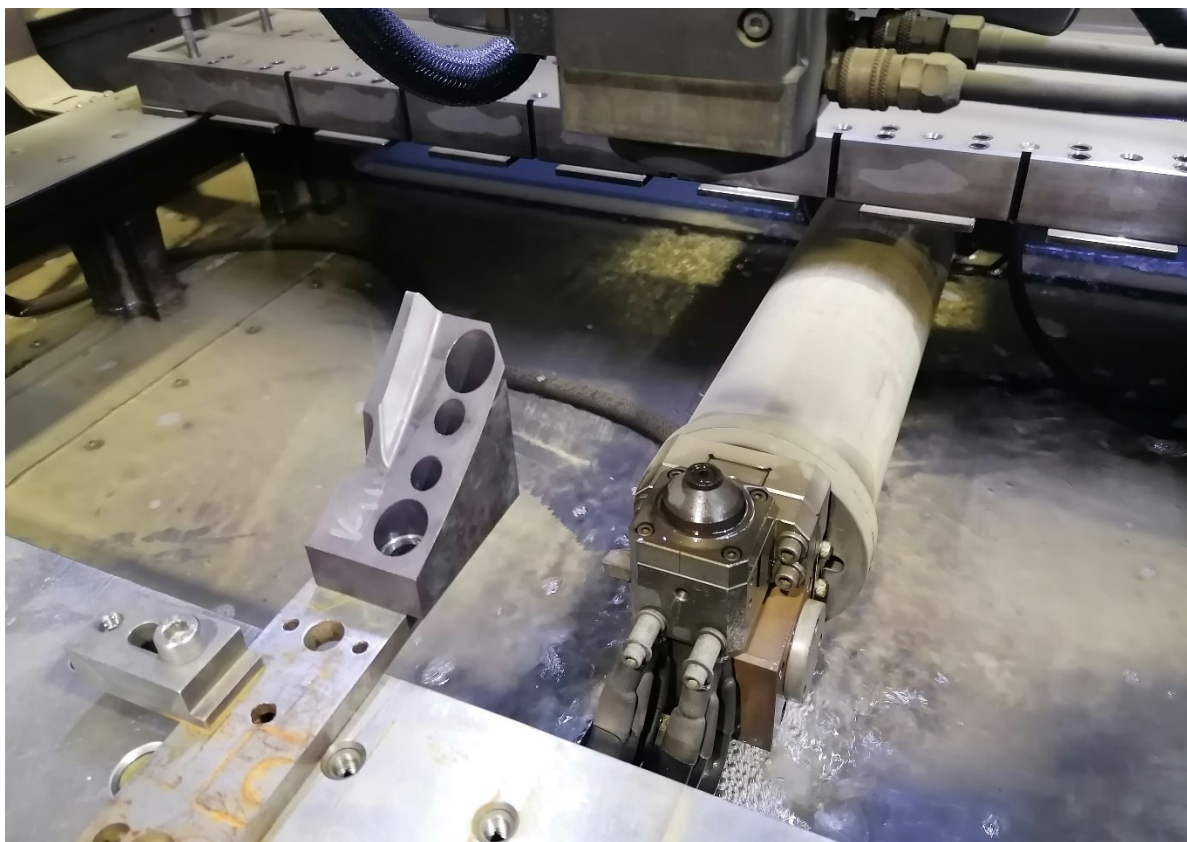
Slika 27 Stroj za WEDM

Prema izvoru [12] osnovni elementi sustava za WEDM obradu su:

- elektrode (žica i obradak)
- mehanička struktura stroja
- impulsni generator
- CNC upravljačka jedinica
- sustav za vođenje žice
- sustav za opskrbu dielektrične tekućine.

Žica kao osnovni element i alat WEDM procesa je postavljena između dvije pokretane koloture i zateznog mehanizma te precizno vođena dvjema safirnim vodilicama. Žica i obradak su povezani na izvor istosmjerne struje na način da žica djeluje kao katoda, a obradak kao anoda. Generator stvara impulse visokih frekvencija, a postavljanjem žice dovoljno blizu obratka dolazi do dielektričnog pražnjenja i odvajanja materijala obratka. Tijekom procesa troši se i dio materijala žice, koja se zatim premotava na drugu koloturu ili se sakuplja u otpadni spremnik i reže na komadiće. Obradak je uronjen u dielektričnu tekućinu, najčešće

deioniziranu vodu koja osigurava odlično ispiranje, hlađene, a ujedno je ekološki prihvatljiva i nezapaljiva.



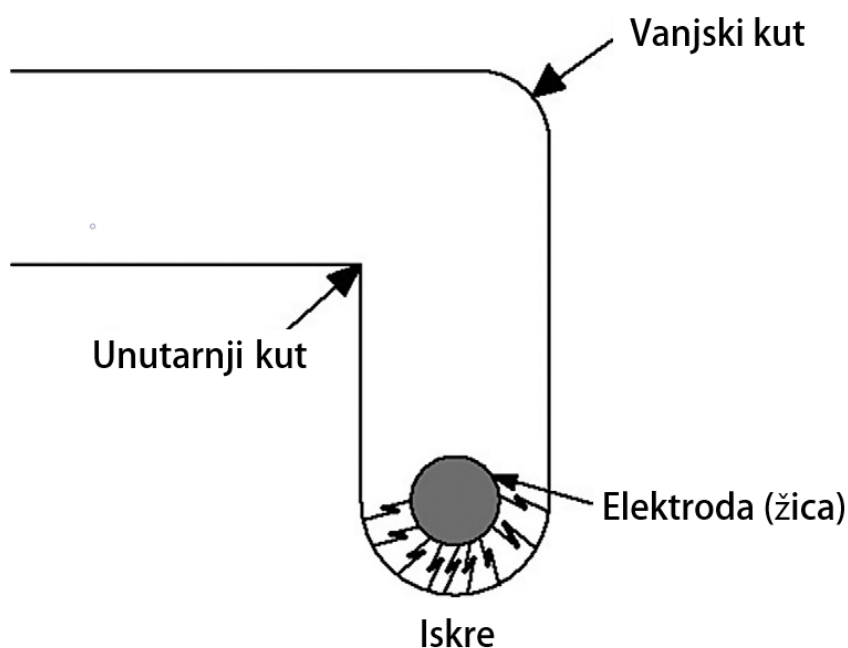
**Slika 28** Primjer vodilice žice

CNC sustav kontrolira osnovne funkcije poput dodavanja žice, kretanja stola, cirkulacije dielektrične tekućine i parametre obrade. Servo upravljanje kontrolira brzinu žice i održavanje optimalnog razmaka između žice i obratka. Kao i kod EDM obrade žigom, razlika između referentnog i stvarnog napona je osnovni ulazni signal za upravljanje razmakom. Napon se obično kreće od 50 – 300 V, a frekvencije koje razvija impulsni generator su u rasponu od 50 – 300 kHz s jakosti struje od 1 – 30 A.

Žica se provlači kroz provrt na unaprijed predviđenom mjestu, a potrebno ga je izbušiti prije obrade. Neki moderni uređaji imaju sustav za automatsko provlačenje žice i bušenje provrta, čime se uvelike pojednostavljuje proces obrade [12].

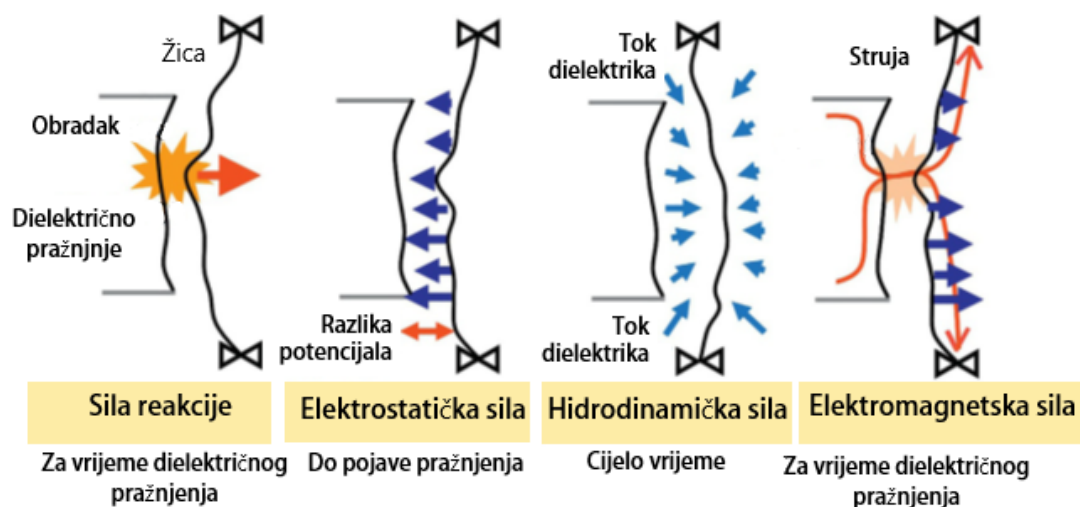
Žica se izrađuje od visoko vodljivog materijala. Najčešće od bakra, volframa ili mjedi. Bakrena žica je standardne debljine od 0,25 mm, dok je volframova i molibdenova promjera 0,02 – 0,08 mm, ali su znatno skuplje [2].





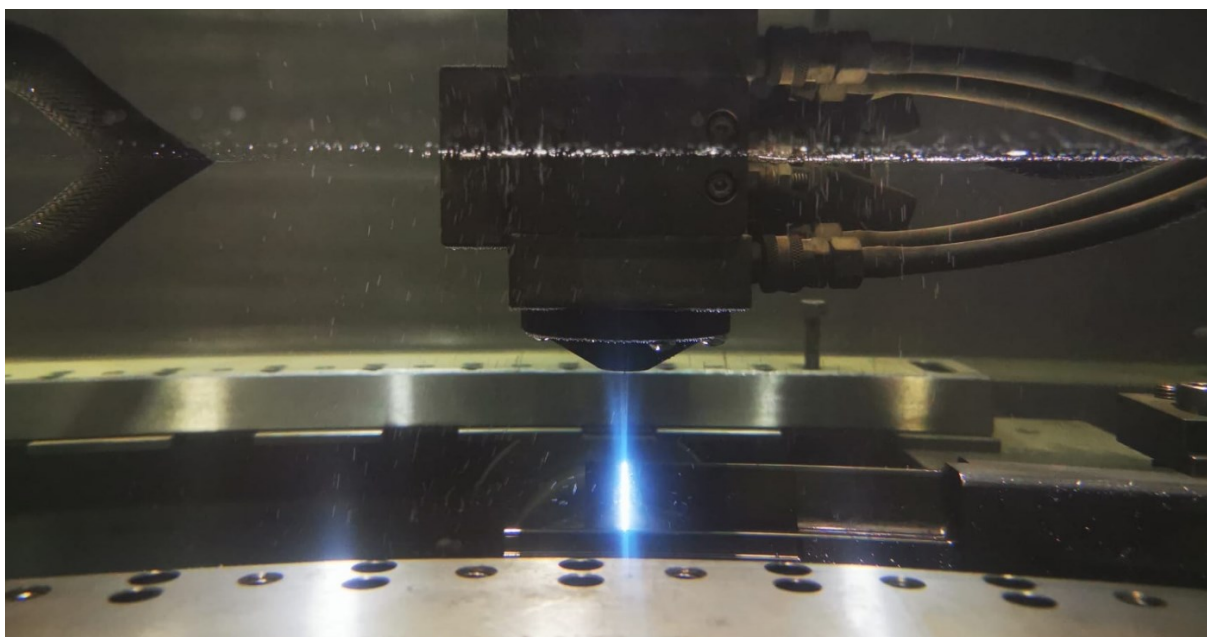
**Slika 29 Problem rezanja uglova i radijusa [12]**

Bakrena žica zbog svoje duktilnosti relativno jednostavno postiže ravan oblik u usporedbi s mjedenom. Međutim, mjedena žica može izdržati mnogo veća vlačna naprezanja. Skretanjem žice na uglovima nastaje mali radijus na vanjskom kutu. Slika 29 prikazuje utjecaj uglova i radijusa na završnu konturu obratka. Na veličinu radijusa najviše utječu promjer žice, brzina rezanja i razmak između žice i obratka. Za postizanje oštarih kutova i bolje preciznosti tijekom obrade potrebno je koristiti žicu što manjeg promjer, a veće vlačne čvrstoće. U takvim slučajevima koriste se volframovae i molibdenove žice. Također, mogu se koristiti višeslojne žice. Na primjer bakrene ili čelične jezgre premazane cinkom, cinkovim legurama ili grafitom. Omogućuju veću vlačnu čvrstoću, veću točnost i brzinu obrade.



Slika 30 Sile koje djeluju na WEDM elektrodu (žicu) [12]

Proces elektroerozijske obrade žicom je mnogo složeniji u usporedbi s elektroerozijskom obradom pomoću žiga zbog utjecaja brojnih parametara. Djelovanjem raznih sila uzrokuje deformacije i vibracije žice te smanjuje točnost obrade (Slika 30). Održavanjem optimalne napetosti i upravljanjem razmakom između vodilica može se ostvariti jako dobra točnost obrade reda veličine  $0,2 \mu\text{m}$ . Kvaliteta završne obrade i hrapavost površine uvelike ovise o parametrima obrade. Manjim unosom energije tijekom završne obrade ostvaruje se odlična hrapavost površine ( $R_a$ ) od  $0,8$  do  $0,1 \mu\text{m}$  [12].



Slika 31 Prikaz dielektričnog pražnjenja

Prednosti elektroerozijske obrade žicom prema izvoru [19] su:

- mogu se obrađivati jako tvrdi i krhki materijali
- postižu se jako precizne završne obrade
- alat i obradak se ne dodiruju, pogodno za izradu tankostjenih obradaka
- nema potrebe za skidanjem srha nakon obrade
- konture se mogu učitati iz CAD softvera.

Nedostatci elektroerozijske obrade žicom:

- mogu se obrađivati samo elektrovodljivi materijali
- mogu se pojaviti mikro pukotine na površini obratka
- obrada je spora
- pojava korozije zbog dielektrične tekućine
- najčešće je potreban provrt za ulaz žice.

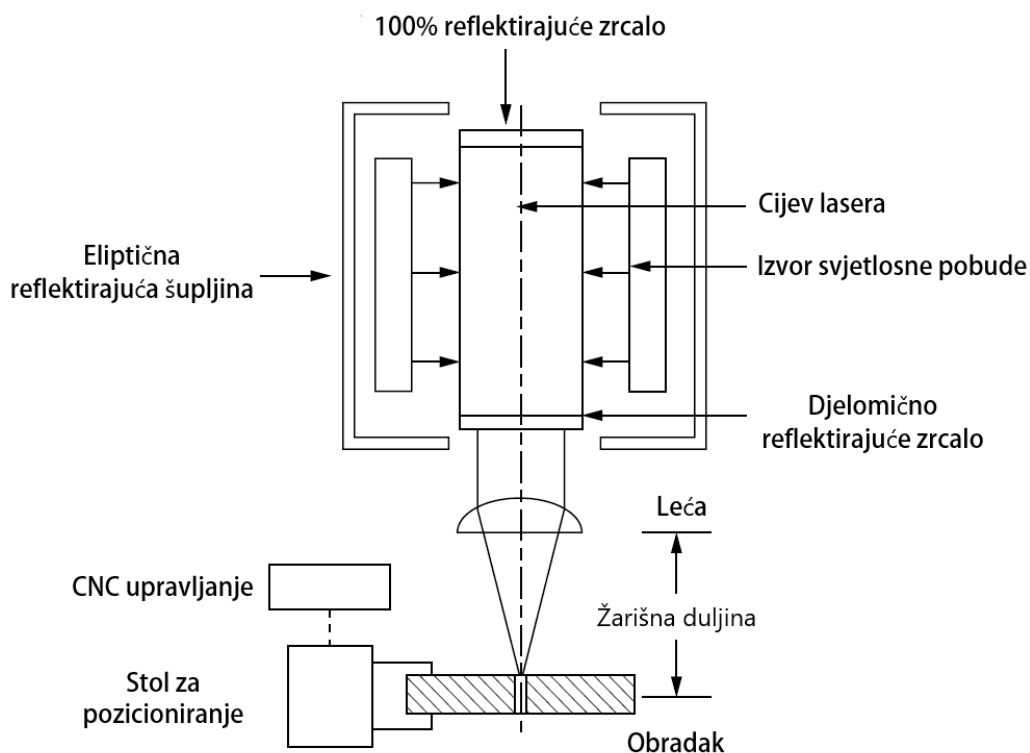


Slika 32 Primjeri proizvoda izrađenih pomoći WEDM [20]

### 2.5.2. Obrada laserom (LJM)

Postupak obrade odvajanjem čestica laserom spada u termoelektrične nekonvencionalne postupke obrade. Kao alat se koristi usmjerena laserska zraka velike gustoće snage. Konvencionalna obrada teško obradivih materijala zahtjeva velike sile rezanja, jako tvrde oštrice alata, a nerijetko predstavlja značajna ograničenja u industrijskoj proizvodnji. Stoga, obrada laserom pronalazi široku primjenu kod toplinski otpornih legura visoke čvrstoće, tvrdih metala, kompozitnih materijala ojačanih vlaknima, keramika, raznih limova, itd.

Pomoću laserske zrake visoke gustoće mogu se izvoditi razne operacije poput toplinske obrade, zavarivanja, rezanja, bušenja, i graviranja [4].



Slika 33 Shema laserske obrade [4]

Kontrolirana laserska zraka usmjeravanjem u točku obratka ponaša se na nekoliko načina uključujući refleksiju, apsorpciju i raspršenje svjetlosti. Apsorbirana energija razvija visoku temperaturu na površini obratka, a uklanjanje materijala se odvija taljenjem, isparavanjem i kemijskom razgradnjom materijala. Odvojeni materijal se uklanja iz zone obrade strujanjem inertnog plina pod visokim tlakom, najčešće kisika ili dušika.

Produktivnost obrade laserom znatno ovisi o toplinskim i optičkim svojstvima materijala, dok mehanička svojstva gotovo da nemaju utjecaj. Stoga, materijali koji imaju nisku toplinsku vodljivost, malu refleksiju, bez obzira na tvrdoću i krhkost, predstavljaju idealne materijale za lasersku obradu. Energija između lasera i materijala se prenosi zračenjem pa nema sila rezanja, trošenja alata i vibracija [21].



**Slika 34 Lasersko rezanje metala [22]**

Laserska zraka putuje od izvora svjetlosti, kroz optički sustav za vođenje i usmjeravanje zrake, građene od zrcala i mlaznice te prolazi laserskim medijem koji može biti u čvrstom, plinovitom ili tekućem stanju. Danas se najčešće primjenjuju CO<sub>2</sub> i Nd:YAG laseri, dok se u novije vrijeme sve češće pojavljuju i diodni laseri. Osnovna im je razlika vrsta aktivnog medija u kojem se odvija svjetlosno pojačanje.

CO<sub>2</sub> laser koristi plin kao laserski medij. Najčešće je to mješavina plinova CO<sub>2</sub>, He i N<sub>2</sub>, dok Nd:YAG laser ima čvrstu jezgru od kristala Ytrij-Aluminij-Granata [21].

Diodni laseri su građeni od poluvodičkih materijala. Karakterizira ih mala potrošnja energije, dok im je učinkovitost i do 30 posto veća. Imaju valnu duljinu oko 0,8 – 1,1 μm [23].

Glavna prednost laserske zrake je mogućnost fokusiranja na jako malo područje. To je moguće postići zbog sljedećih svojstava ovakve svjetlosne zrake [24]:

- monokromatska
- koherentna
- usmjerena.

Laserska zraka je monokromatska, odnosno ima jednu valnu duljinu. Valovi su iste faze i amplitude, što čini zraku koherentnom.

Svaki laser ima nekoliko glavnih karakteristika kao što su valna duljina, snaga, kvaliteta obrade, mogućnosti obrade, itd. Osnovne značajke CO<sub>2</sub> i Nd:YAG lasera su prikazane u tablici 1.

Tablica 1 Usporedba značajki CO<sub>2</sub> i Nd:YAG lasera [24]

| Vrsta lasera                          | CO <sub>2</sub>                                   | Nd:YAG   |
|---------------------------------------|---|--|
| Aktivni medij                         | Plinoviti (CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> i He) | Nd:YAG kristal                                   |
| Uzbuda                                | Električno pražnjenje                             | Lampe  |
| Valna duljina, μm                     | 10,6  | 1,06   |
| Srednja snaga, kW                     | 0,1 - 45  | 0,1 – 5,5  |
| Vršna snaga, kW                       | 0,1 - 50  | 0,1 – 100  |
| Frekvencija impulsa, kHz              | cw - 100  | cw - 50  |
| Iskoristivost, %                      | 5 - 15  | 1 – 4  |
| Kvaliteta snopa, M <sup>2</sup>       | 1 - 3   | 1 – 2 specijalna primjena<br>10 – 100 uobičajeno |
| Potrošni dijelovi                     | Plinovi CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> i He     | Lampe  |
| Transmisijska optika                  | ZnSe, GaAs  | Kvarc  |
| Reflektivna optika                    | Metal   | Metal ili dielektrik                             |
| Optičko vlakno                        | Nema  | Kvarc  |
| Sigurnosni nepropusni materijal       | Akril, staklo                                     | Filteri  |
| Investicijski trošak prema snazi, €/W | 50 – 200  | 100 - 400  |



Slika 35 CNC stroj za rezanje laserom [25]

Prednosti obrade laserom prema izvoru [6] su:

- nema mehaničkih sila, mogu se rezati jako tvrdi i krhki materijali
- nema trošenja alata
- obrada je fleksibilna i ekonomična
- mogu se izraditi dijelovi malih dimenzija
- proces se može automatizirati
- mogu se obrađivati razni materijali
- mala zona utjecaja topline.

Nedostatci obrade laserom:

- ograničena je debljina materijala koja se može obrađivati (do 50 mm)
- visoki troškovi početnog ulaganja i održavanja
- potreban je inertni plin
- potrebno je ukloniti nalijepljeni višak materija s površine.

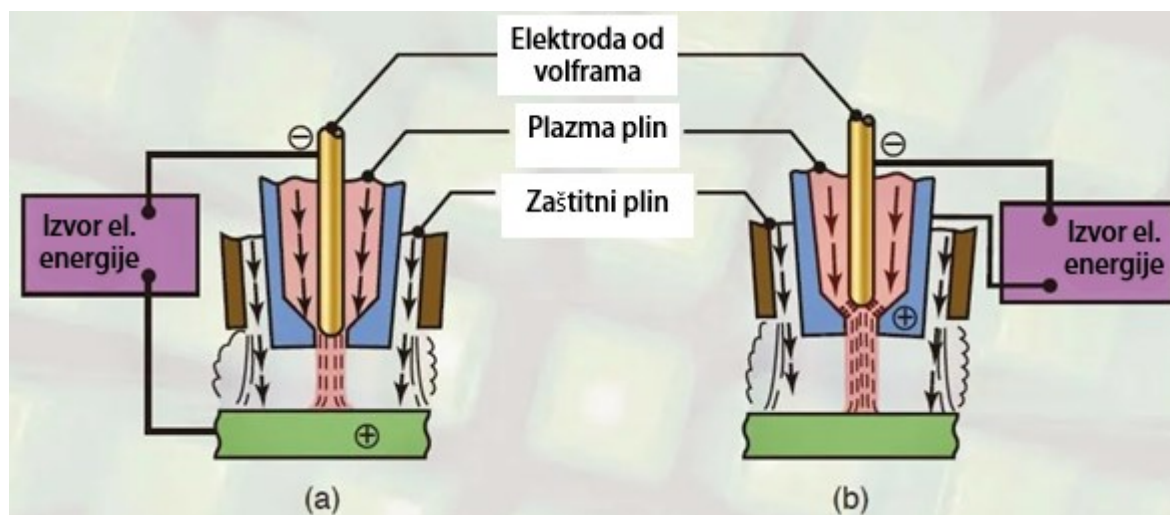
### **2.5.3. Obrada plazmom (PAM)**

Postupak obrade plazmom razvija se od 50-ih godina prošlog stoljeća, kao alternativna metoda rezanja nehrđajućih čelika, aluminijskih i ostalih obojanih metala. Rezanje se ostvaruje pod utjecajem mlaza ioniziranog plina velike brzine i visoke temperature, koji se naziva plazma [4].

Kod obrade plazmom stvara se kontinuirani luk između zagrijane volframove katode i anode, koja može biti hladena bakrena sapnica ili obradak (Slika 36). Stoga, razlikuju se dvije vrste obrade plazmom [26]:

- obrada plazmom s prelaznim lukom (anoda je obradak)
- obrada plazmom s neprelaznim lukom (anoda je bakrena sapnica).

Obrada prelaznim lukom se najčešće koristi za zavarivanje i rezanje, dok se neprelaznim lukom izvode operacije navarivanja i oplemenjivanja površine metala.

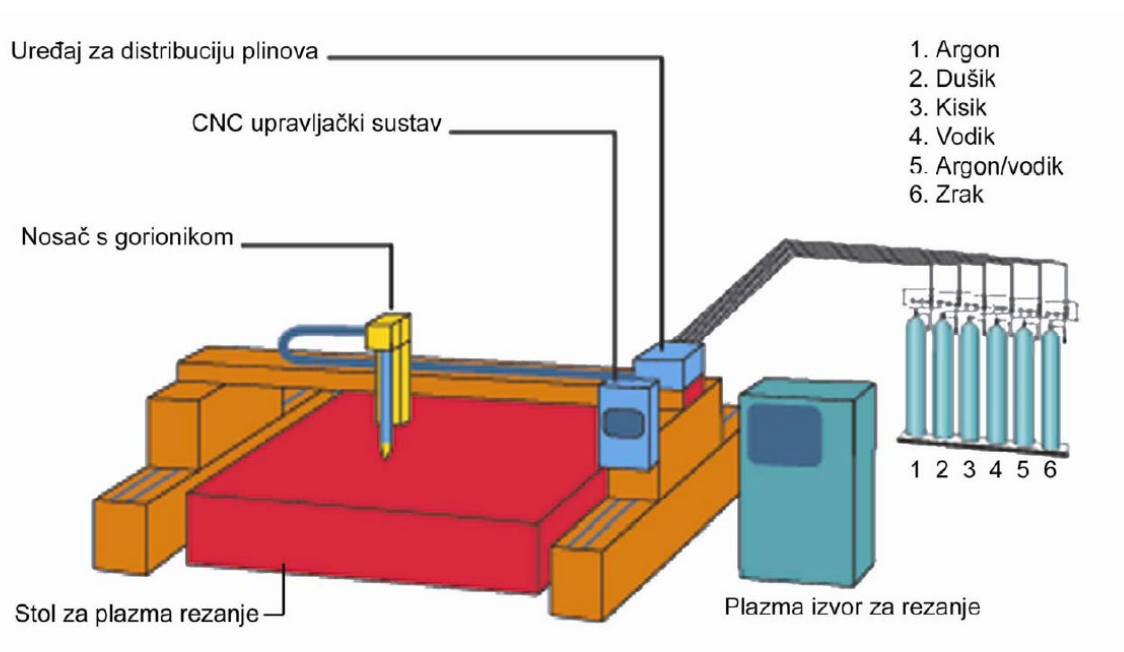


Slika 36 Prikaz plazma obrade: a) s prelaznim lukom, b) s neprelaznim lukom [27]

Kod katode se uvodi plazma plin i zagrijava se na jako visoke temperature te usmjerava kroz hladenu bakrenu mlaznicu na površinu obratka. Plin velike brzine i temperature do 30000 °C, jako brzo ostvaruje zagrijavanje obratka, koji se zatim tali i isparava [4].

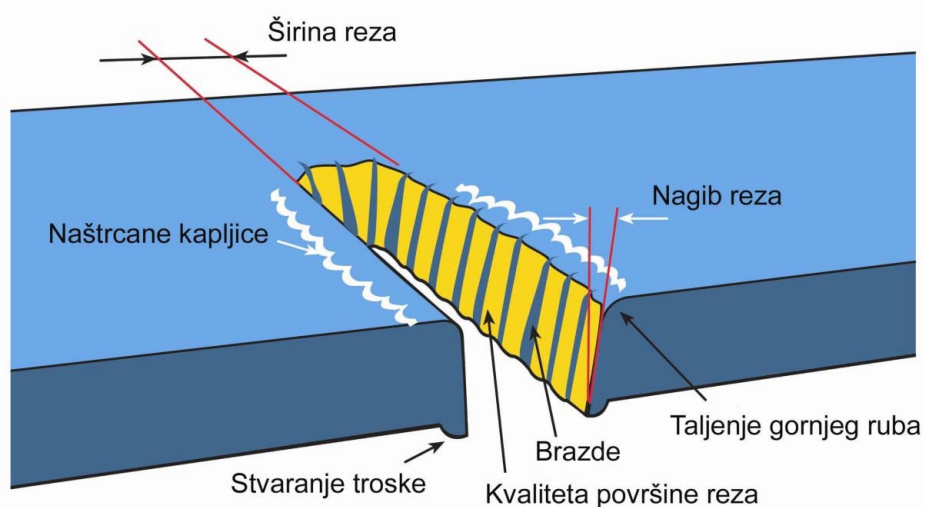
Plinovi koji se koriste za plazmeni luk su: argon (Ar), vodik (H<sub>2</sub>), dušik (N<sub>2</sub>) i njihove mješavine (Ar/ H<sub>2</sub>), zrak ili kisik (O<sub>2</sub>). Argon osigurava stabilniji luk, dok dušik ima veću gustoću i zahtjeva viši napon ionizacije pa ima znatno veću koncentraciju energije. Ugljični čelici se režu plazmom sa zrakom, a legirane i obojene metale plazmom argona ili mješavinom argona i vodika. Zbog velikog unosa topline u obradak nastaje zona utjecaja topline, a naglim hlađenjem može doći do oštećenja površine i pojave pukotina. Područje reza posebno je osjetljivo na koroziju i ostale utjecaje iz okoline. Iz tog razloga koriste se inertni zaštitni plinovi koji štite zonu obrade od utjecaja iz okoline, povećavaju koncentraciju luka i povećavaju kvalitetu reza. Odabir zaštitnog plina ovisi isključivo o materijalu obratka. Za obradu aluminija, nehrđajućih čelika i drugih obojenih metala često se koristi vodik kao zaštitni plin, dok se za čelike može koristiti zrak ili kisik [26].





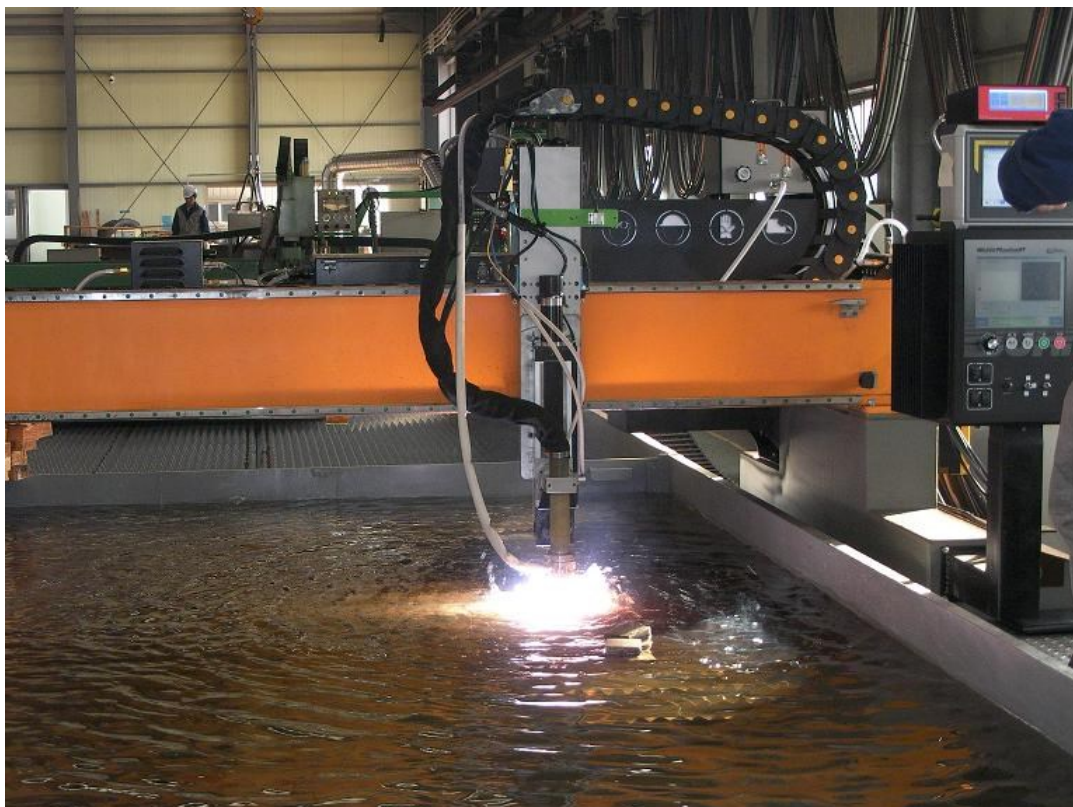
Slika 37 Sustav za rezanje plazmom [26]

Na kvalitetu reza znatno utječu parametri obrade, kao što su brzina rezanja, jakost struje, udaljenost sapnice od komada, promjer sapnice, vrsta zaštitnog medija, vrsta i debljina materijala, itd. Jakost struje rezanja ovisi o veličini sapnice i o materijalu obratka. Za optimalnu produktivnost koristi se najveći promjer sapnice i najjača struja, dok se manjim brzinama, promjerom sapnice i manjom jakosti struje postiže kvalitetniji rez s manjim nagibom. Širina reza je obično oko 1 do 2 puta veća od promjera sapnice [26].



Slika 38 Kvaliteta reza [26]

Proces rezanja plazmom može se odvijati pod vodom. Na taj način znatno se smanjuje utjecaj procesa na okoliš i na operatere. Rezanjem u vodi smanjuje se stvaranje štetnih plinova, razina buke i svjetlosti, te se razvija manja zona utjecaja topline. Obradak i sapnica su uronjeni do 10 cm ispod površine vode, pa se za vrijeme rezanja ne može utvrditi kvalitetu reza. Rezanje se izvodi na strojevima s posebnim stolovima koji imaju mogućnost potapanja obratka (Slika 39) [26].



Slika 39 Rezanje plazmom pod vodom [28]

Prednosti obrade plazmom prema izvoru [27] su:

- uska sapnica razvija veliku koncentraciju energije na malom prostoru
- stabilna obrada i nema refleksije
- velika brzina obrade
- male deformacije obratka
- niža početna ulaganja u usporedbi s obradom pomoću lasera.

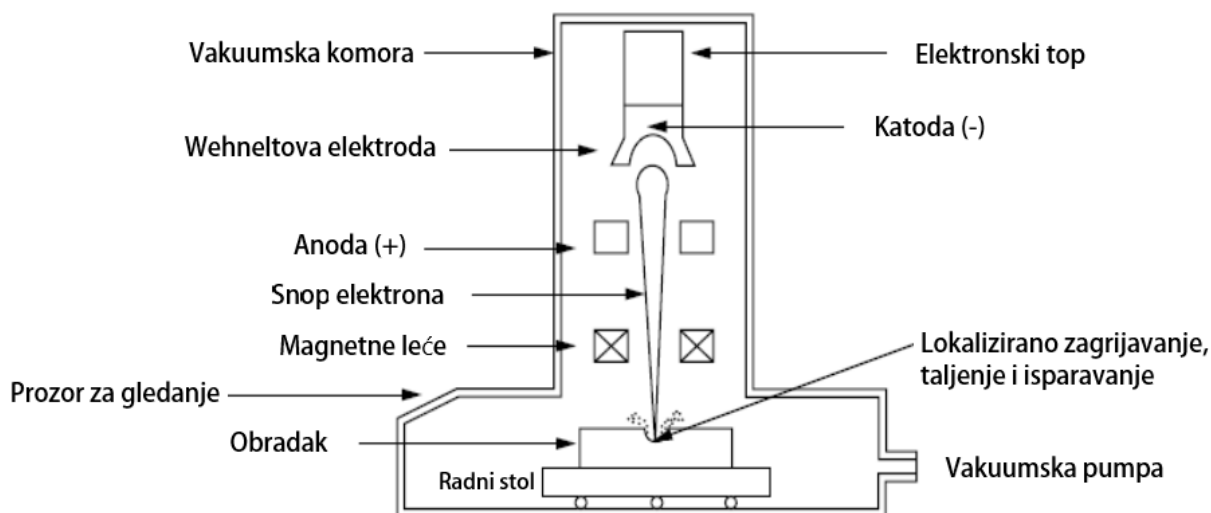
Nedostatci obrade plazmom:

- potrebno je mijenjati sapnice
- skupa oprema
- potrebna je kvalificirana radna snaga.

#### 2.5.4. Obrada snopom elektrona (EBM)

Obrada snopom elektrona pojavljuje se u industrijskoj proizvodnji od 60-ih godina prošlog stoljeća. U početku se koristila isključivo za zavarivanje u nuklearnoj i zrakoplovnoj industriji, dok danas široku primjenu pronalazi kod bušenja malih provrta, rezanja, graviranja i toplinskih obrada u industriji poluvodiča, kemijskoj industriji te području mikroobrada.

Proces se odvija u vakuumskoj komori gdje se električnom strujom zagrijava katoda od volframa na temperature oko 2500 – 3000 °C, koja na taj način emitira elektrone. Wehneltova elektroda konkavnog oblika se nalazi između katode i anode, a kontrolom struje snopa kontrolira broj elektrona. Pod utjecajem visokog napona elektroni ubrzavaju, a fokusirani snažnim električnim poljem tvore elektronski snop i putuju kroz otvor na anodi ka površini obratka. Visoki napon (oko 150 kV) ubrzava elektronski snop na brzine oko  $228 \times 10^3$  km/s, a zatim se precizno usmjeravaju u područje obrade pomoću magnetskog ili elektroničkog sustava leća. Kinetička energija elektrona se brzo pretvara u toplinu i zagrijava područje obrade, pri čemu dolazi do taljenja i isparavanja materijala oblikujući traženu geometriju. Snop elektrona može ostvariti gustoću snage od  $1,55 \text{ MW/mm}^2$ , što je dovoljno za obradu gotovo svih inženjerskih materijala [4].



Slika 40 Shema sustava za obradu snopom elektrona [4]



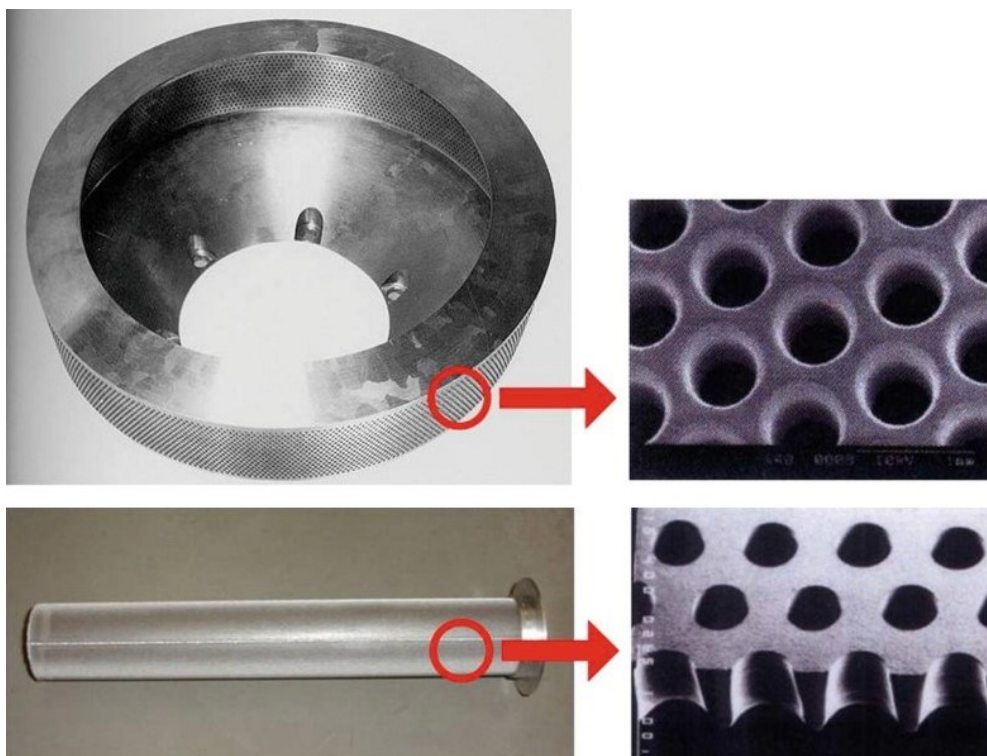
**Slika 41 Stroj za obradu snopom elektrona [29]**

Vrsta procesa obrade određuje potrebnu gustoću snage elektronske zrake. Male gustoće snage s niskom strujom snopa i malom veličinom površine na koju je snop usmjeren pogone su za obradu elektroničkih sklopova, dok su za operacije zavarivanja ili bušenja potrebne znatno veće gustoće snage, iznosi struje i napona.

Najznačajniji parametri koju utječu na snagu snopa i proizvodnost su:

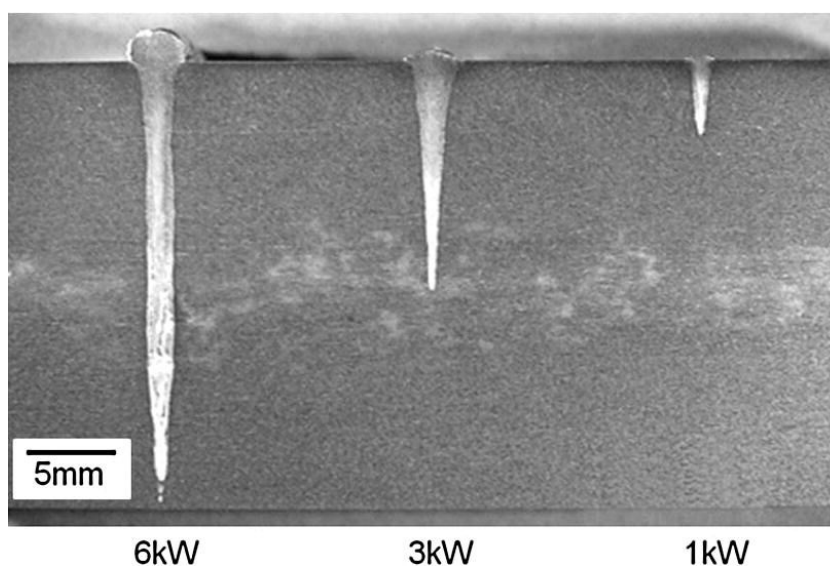
- napon i jakost struje
- promjer površine na koju je snop usmjeren
- žarišna udaljenost magnetskih leća.

Postupak obrade snopom elektrona jednostavnom kontrolom brzine i mogućnošću dubokog prodiranja u materijal ostvaruje odlične rezultate kod bušenja velikog broja malih provrta. Mogu se bušiti obratci debljine svega nekoliko milimetara, ali je proces iznimno brz od 100000 provrta u sekundi u slučaju malih provrta promjera do 100  $\mu\text{m}$ . Na slici 42 su prikazana dva obratka s velikim brojem sitnih provrta, promjera oko 0,25 mm. Postupak se može primijeniti na sve teškoobradive materijale poput keramike, nehrđajućih čelika, legura nikla ili titana [29].



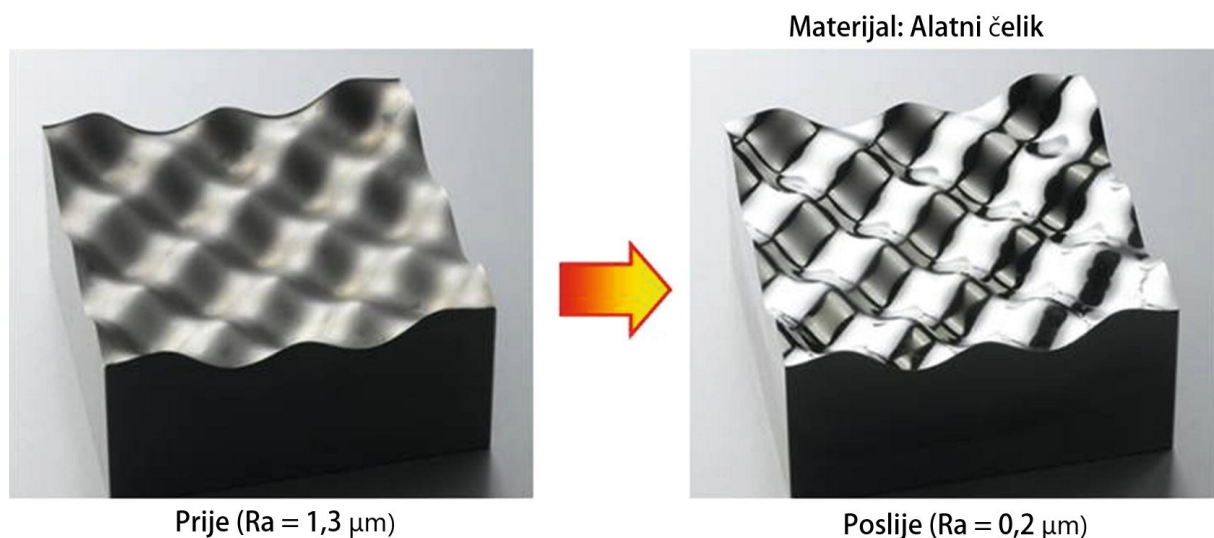
**Slika 42** Primjer obratka s provrtima malih promjera [29]

Slika 43 prikazuje poprečni presjek zavora u aluminiju nakon zavarivanja snopom elektrona. Može se uočiti znatna razlika u dubini prodiranja primjenom različite snage elektronskog snopa. Upotrebom snage snopa oko 6 kW postiže se dubina od 23 mm, dok je širina zavora samo 2 mm [29].



**Slika 43** Poprečni presjek zavora u aluminiju [29]

Postupak obrade snopom elektrona se može primijeniti za poliranje površine obratka. Koristi se zraka velike gustoće bez fokusiranja elektronskog snopa. Kao rezultat nastaje zraka velike površine s maksimalnim promjerom 60 mm koja se koristi za trenutno taljenje metalne površine. Slika 44 prikazuje površinsku obradu kalupa, prije i nakon obrade snopom elektrona. U nekoliko minuta se hrapavost površine ( $R_a$ ) smanjila s  $1,3 \mu\text{m}$  na  $0,2 \mu\text{m}$ . Na površini nastaje tanak pretaljeni sloj modificirane strukture, što dovodi do povećanja otpornosti na koroziju i vodoodbojnosti. Ova metoda se primjenjuje za površinsku obradu kalupnih šupljina i obradaka od bio-titanskih legura [29].



**Slika 44** Površinska hrapavost obratka prije i nakon EBM obrade [29]

Prednosti obrade snopom elektrona prema [4] su:

- moguće je izvoditi operacije bušenja velikim brzinama
- mogu se izrađivati oštri bridovi
- mogu se jednostavno mijenjati parametri obrade tijekom bušenja
- mogu se obrađivati svi materijali bez obzira na tvrdoću, žilavost i refleksiju površine
- visoka točnost i ponovljivost obrade
- postiže se najbolja završna obrada površine u usporedbi s ostalim procesima
- relativno jeftin postupak u usporedbi s ostalim procesima koji se koriste za bušenje jako malih i dubokih provrta.

Nedostatci obrade snopom elektrona:

- skupa oprema
- duže vrijeme proizvodnje zbog vremena potrebnog za stvaranje vakuuma

- na površini ostaje tanki pretaljeni sloj i zona utjecaja topline
- potrebna je kvalificirana radna snaga.

## 2.6. Kemijski nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem

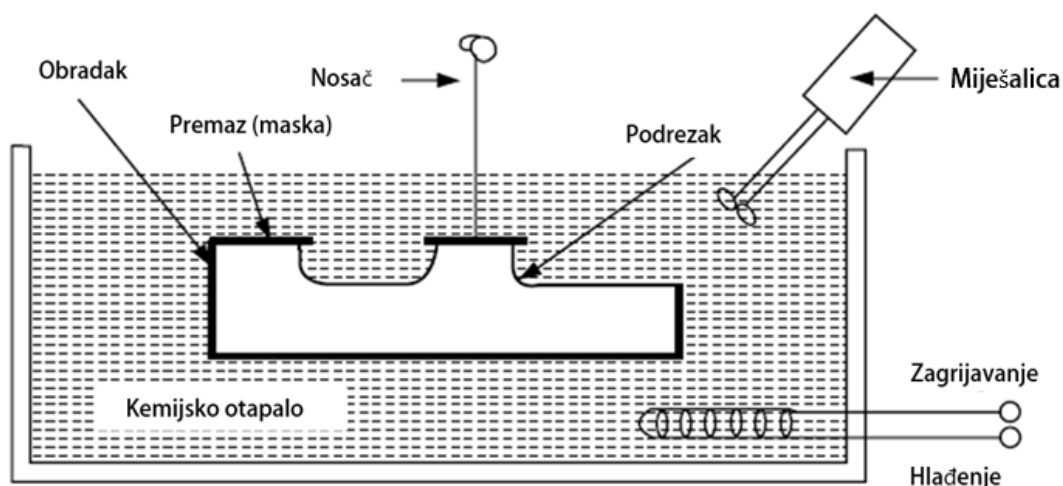
Kemijska obrada je nekonvencionalni postupak koji se temelji na kontroliranom nagrizanju materijala obratka pomoću jakog kemijskog otapala. Kontrolirano otapanje nalikuje ubrzanoj korozivskoj reakciji s brzinom prodiranja u površinu materijala od 0,0025 – 0,1 mm/min. Odvajanje materija izvodi se jakim kemijskim otapalima kao što su kiseline, lužine ili soli.

Postupak se najčešće koristi za izradu malih i tankih metalnih dijelova bez unosa topline i stvaranja zaostalih naprezanja [6].

Kemijska obrada se dijeli na postupak kemijskog glodanja i fotokemijske obrade.

### 2.6.1. Kemijsko glodanje (CHM)

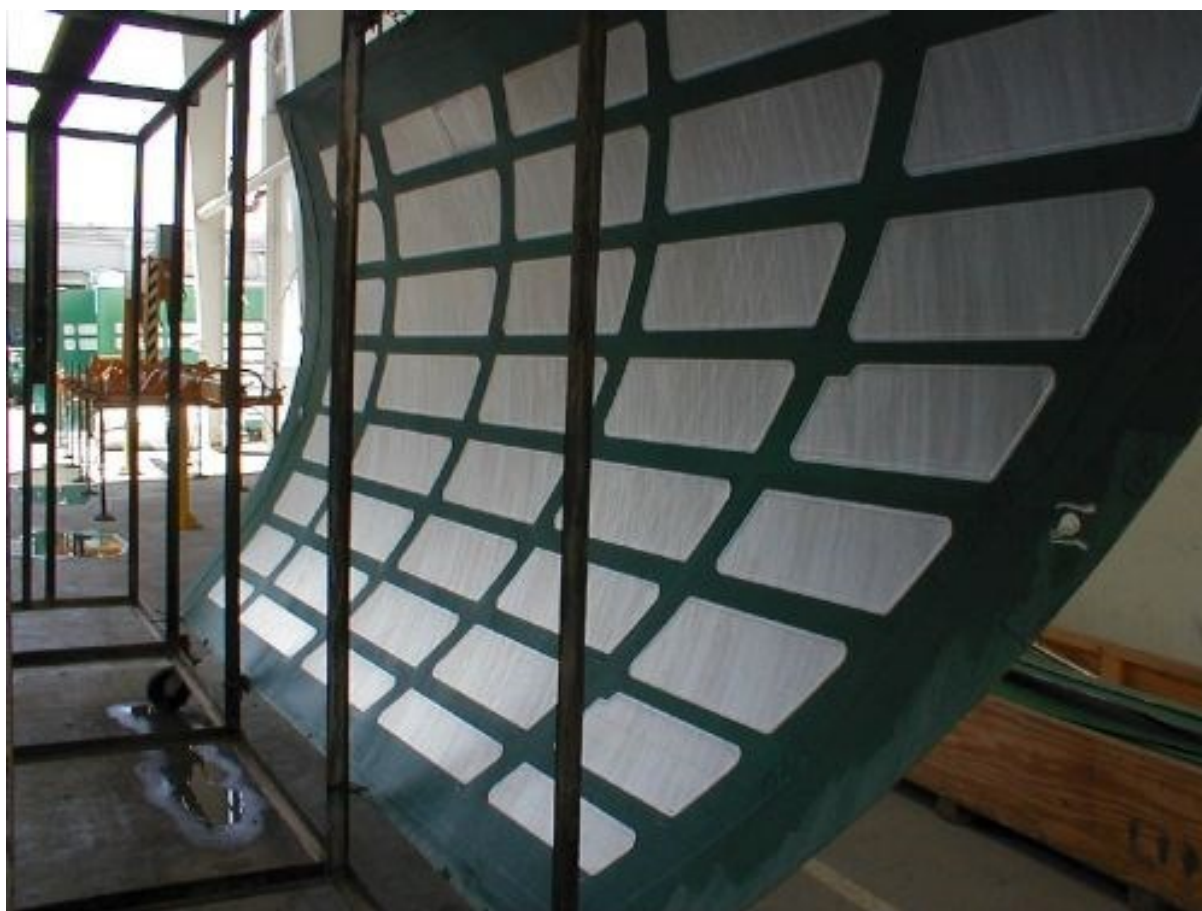
Kemijskog glodanja je postupak kontroliranog kemijskog otapanja materijala obratka pomoću jakog reagensa. Primjenjuje se za obradu plitkih džepova i 3D oblika na pločama, limovima, i ostalim oblicima velikih površina. Obradak se pridržava nosačima i uranja u spremnik s otapalom koje djeluje na cijelu njegovu površinu (Slika 45). Stoga, područja koja nije potrebno obraditi treba zaštititi. Na obradak se nanose razne prevlake otporne na kemijske utjecaje otapala koje štite površinu i određuju područje obrade [4].



Slika 45 Shema postupka obrade kemijskog glodanja [4]

Proces kemijskog glodanja prema izvoru [4] sastoji se od sljedećih koraka:

- obradak je potrebno očistiti kako bi se postiglo bolje prianjanje zaštitnog materijala i uklonile nečistoće
- nanosi se zaštitni premaz (tzv. maska) koji se lako uklanja s površine, ima kemijsku otpornost na reagense, dovoljno dobro prianja za površinu obratka te je pogodan za rukovanje
- premaz se nanosi po predlošcima kako bi ostala otkrivena prvenstveno područja za obradu (Slika 46)
- obradak se uranja i nagriza te zatim ispiri i uklanja maska



**Slika 46 Premazan i uklonjen zaštitni sloj s područja za obradu [30]**

Parametri koji imaju najznačajniji utjecaj na proces kemijskog glodanja su: svojstva otapala i maske te temperatura pri kojoj se odvija proces. Oni imaju veliki utjecaj na kvalitetu i točnost završne obrade te na faktor i brzinu nagrivanja.

Vrijeme koje je obradak izložen nagrivanju definira dubinu džepova. Kako bi se postigla ravnomjerna obrada potrebno je održavati konstantnu temperaturu i koncentraciju otapala duž

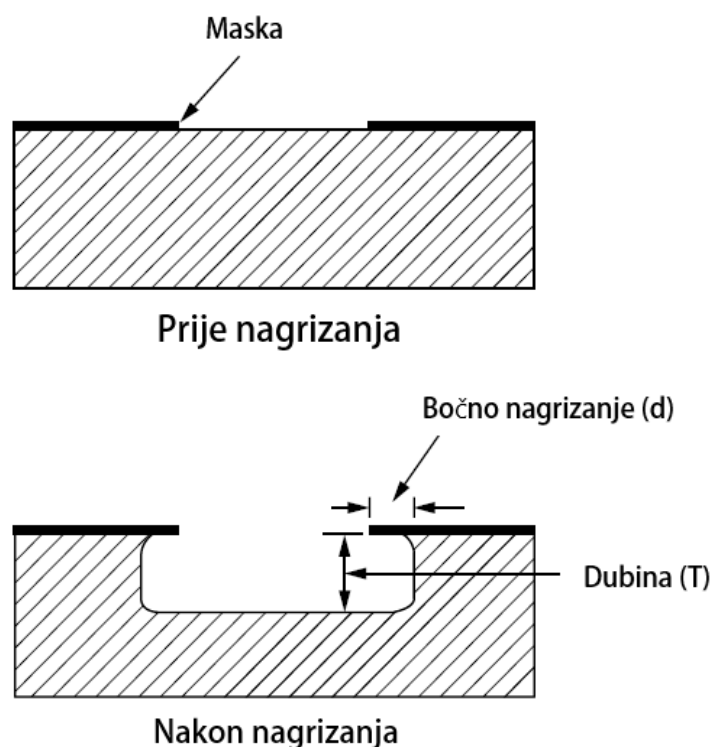


cijelog spremnika. Koriste se grijači za kontrolu temperature i razne miješalice za postizanje ravnomjernijeg sastava otopine. Temperatura otapala se obično kreće od 37 – 85 °C. Viša temperatura i jača koncentracija otapala uzrokuju brže nagrivanje [4]. Kao kemijski reagensi najčešće se koriste visoko koncentrirane kiseline ili alkalne otopine definiranog raspona kemijskog sastava i temperature. Na primjer, za obradu legura aluminija koristi se željezov (III) klorid ( $\text{FeCl}_3$ ) pri temperaturama oko 50 °C, dok se za obradu čelika koristi otopina s udjelom dušične kiseline ( $\text{HNO}_3$ ) od 10 – 15 % [8].

Osnovni cilj kemijskih reagensa prema [8] je:

- osigurati dobru završnu obradu površine
- ravnomjerno uklanjanje materijala
- osigurati sigurnost radnika, kvalitetu zraka i okoliša

Kao maske se najčešće koriste sintetički ili materijali na osnovi elastomera [8]. Korištenjem maski, osim u dubinu događa se i bočno nagrivanje materijala (Slika 47). Takva pojava se označava faktorom nagrivanja. Faktor nagrivanja ili jetkanja je omjer bočnog podrezivanja ( $d$ ) i dubine nagrivanja ( $T$ ). Tipični faktor nagrivanja od 1:1 javlja se na dubini od 1,27 mm. Prilikom nanošenja maski taj omjer treba uzeti u obzir. Korekcijom šablone maske faktor nagrivanja se može smanjiti na omjer 1:3 [4].



Slika 47 Faktor nagrivanja nakon CHM [4]

Prednosti postupka obrade kemijskim glodanjem prema [4] su:

- moguće je smanjenje težine velikih obradaka i obrada složenih geometrija velikih površina koje je teško obraditi konvencionalnim postupcima obrade
- mogu se istovremeno obrađivati više obradaka
- istovremeno se obrađuju sve površine, čime se povećava produktivnost
- nema zaostalih naprezanja i unosa topline u materijal
- dobra završna obrada površina
- konstrukcijske promjene se mogu jednostavno implementirati
- mala cijena obrade

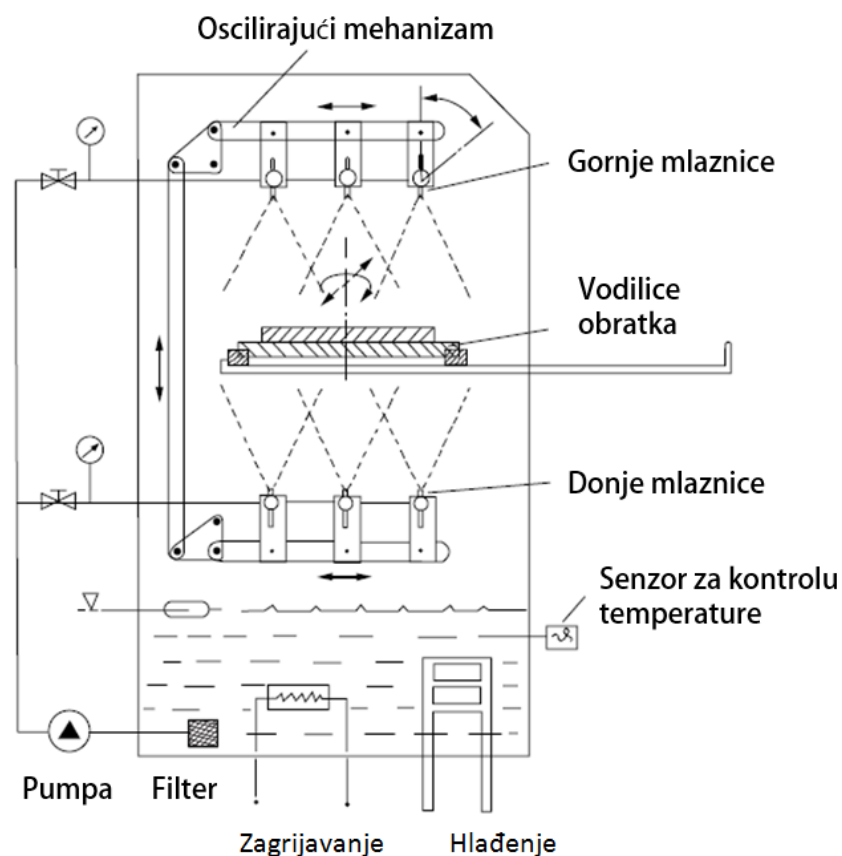
Nedostatci postupka obrade kemijskim glodanjem:

- mogu se postići samo plitke geometrije
- zahtjevno je rukovanje i odlaganje kemikalija
- duga priprema obrade (priprema, nanošenje i skidanje maski)
- početno stanje površine utječe na završnu kvalitetu obrade
- komplicirane geometrije je teže izraditi te postaju skuplje
- kod obrade zavarenih konstrukcija nejednoliko se nagriza osnovni materijal i materijal zavara

### **2.6.2. Fotokemijska obrada (PCM)**

Fotokemijska obrada ili fotokemijsko glodanje je postupak obrade jako sličan kemijskom glodanju, pri čemu se maska na obradak nanosi fotografskim tehnikama. Način izlaganju kemijskom reagensu više nije uranjanje u spremnik, već kontinuirano raspršivanje reagensa mlaznicama na površinu obratka. Stoga, dubina nagrivanja se kontrolira vremenom prskanja svježeg reagensa. Postupak se primjenjuje za preciznu obradu jako tankih obradaka poput folija i limova debljine od 0,013 – 1,5 mm. Fotokemijska obrada je pogodna za obradu gotovo svih tvrdih i krhkih materija, a primjenjuje se u elektroničkoj, automobilskoj, zrakoplovnoj, medicinskoj i dekorativnoj industriji za obradu hladnjaka, brtvi, konektora, enkodera ili nakita [8].

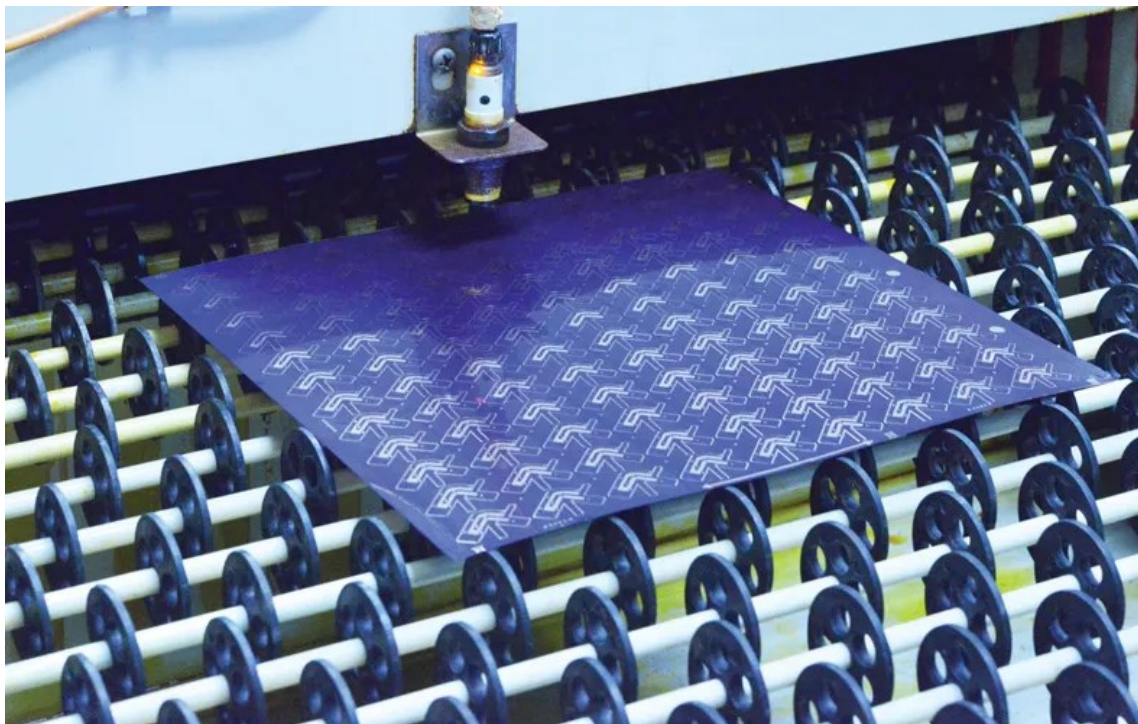
Slika 48 prikazuje shemu sustava za fotokemijsku obradu na kojoj se jasno vidi položaj mlaznica i obratka tijekom obrade.



Slika 48 Shema sustava za fotokemijsku obradu [8]

Postupak fotokemijske obrade prema [8] se sastoji od nekoliko faza kao što su:

1. Priprema površine kemijskim čišćenjem.
2. Nanošenje fotoosjetljivog UV premaza s obje strane obratka.
3. Izlaganje fotoosjetljive prevlake UV svjetlu pri čemu se pomoću fotografske opreme reproducira obris obratka. Fotografska oprema služi kao matrica, a kreirana je pomoću CAD-a. Ostali dijelovi su izloženi UV svjetlu, polimeriziraju i tvore zaštitni sloj.
4. Uklanjanje nepolimeriziranog dijela premaza.
5. Raspršivanje otopine kiseline koja postupkom kemijskog nagrizanja otapa izloženi materijal, dok područje pod premazom ostaje potpuno neoštećeno.
6. Uklanjanje zaštitnog premaza s lima. Obratci ostaju spojeni na početni lim pomoću unaprijed planiranih spojnih točaka (Slika 49). Zatim se provode postupci odvajanja obradaka od lima i dodatne kontrole.



**Slika 49** Primjer velikog broja obradaka na jednom limu [31]

Prethodno navedene prednosti postupka kemijskog glodanja vrijede i za postupak fotokemijske obrade. Uz to treba naglasiti da PCM obrada postiže jako precizne i oštre rezove, ne izaziva deformacije obratka te omogućuje preciznu izradu sitnih detalja [8].

### 3. PROJEKTIRANJE ELEKTRODA ZA ELEKTROEROZIJU

#### 3.1. Uvod u projektiranje elektroda

Širom primjenom suvremenih materijala konvencionalni postupci obrade postaju manje učinkoviti. Iz tog razloga, primjena nekonvencionalnih postupaka obrade postaje neophodna u industrijskoj proizvodnji. Najčešće se koristi kombinacija konvencionalnih i nekonvencionalnih postupaka obrade, ovisno o njihovoj efikasnosti i tehničkim zahtjevima. Elektroerozijska obrada je primjer nekonvencionalnog postupka obrade koji ima široku primjenu u obradi teškoobrađivih suvremenih materijala.

Osnovni elementi elektroerozijske obrade su:

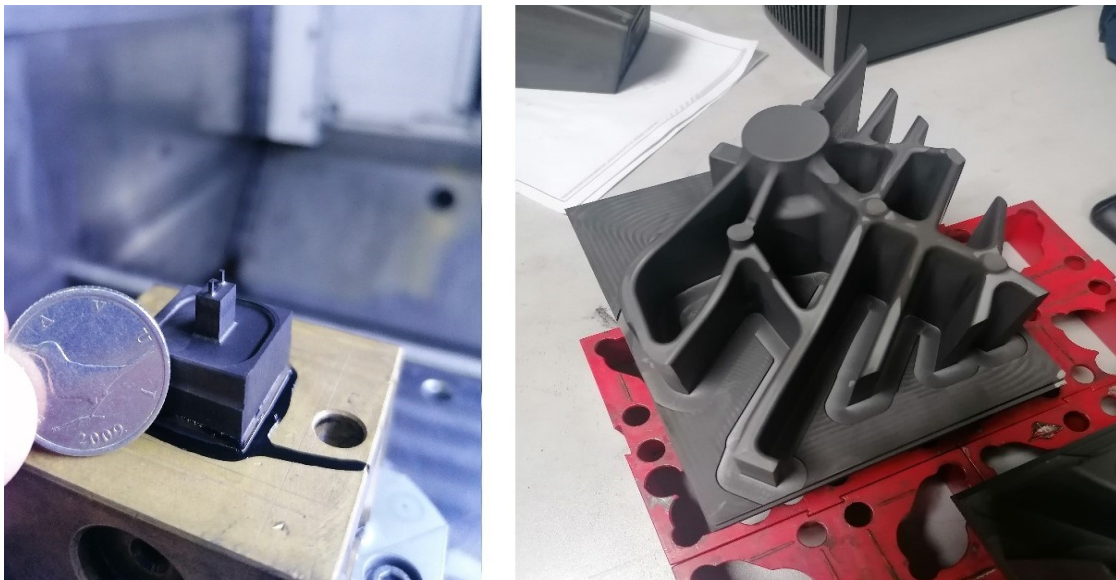
- elektroda (alat)
- obradak
- generator istosmjerne struje
- dielektrična tekućina
- mehanička struktura stroja.

Ulogu alata kod EDM obrade preuzima elektroda u obliku žice ili žiga. Žig služi za izradu složenih 3D geometrija i predstavlja negativ završne površine obratka. Takva elektroda je posebno konstruirana za svaki obradak te može biti jako kompleksne geometrije (Slika 50).



**Slika 50** Primjer složene bakrene elektrode

Elektrode mogu biti veličine svega nekoliko desetinki milimetra do nekoliko stotina milimetara, (Slika 51).



**Slika 51** Primjer male i velike grafitne elektrode

Projektiranje EDM elektrode se sastoji od sljedećih koraka:

1. odabira materijala
2. analiza površine za EDM i modeliranje elektrode
3. izrada dokumentacije
4. izrada NC programa za obradu
5. obrada elektrode
6. mjerenje i vizualna kontrola

### 3.2. Odabir materijala za izradu elektrode

S obzirom da su elektrode najčešće najskuplji dio EDM obrade, potrebno je pažljivo odabrati materijal i parametre procesa kako bi se postigli najbolji rezultati.

Na odabir materijala elektrode utječe:

- električna vodljivost materijala
- temperatura tališta i isparavanja
- kvaliteta završne obrade
- cijena materijala i dostupnost
- obradivost
- otpornost na trošenje
- krutost pri visokim temperaturama.

Najčešće korišteni materijali za izradu elektroda su grafit, bakar i mjed. Grafit je najzastupljeniji materijal zbog svoje visoke točke tališta i dobre obradivosti. Također, ima jako dobru električnu vodljivost, a odabirom veličine zrna može se kontrolirati kvaliteta završne obrade, trošenje alata i proizvodnost. Veličina zrna se kreće od nekoliko mikrometara do 20  $\mu\text{m}$ . Grafit krupnog zrna je znatno jeftiniji pa se koristi za grubu obradu, dok kvalitetniji manjeg zrna ima primjenu kod završne obrade. Grafit manjeg zrna je znatno skuplji, ali postiže najbolju završnu obradu površine. Bakar i mesing imaju bolju produktivnost, ali visok stupanj trošenja alata. Legure bakra i volframa ostvaruju veoma malo trošenje alata i visoku produktivnost, ali loša obradivost i visoka cijena ograničava njihovu primjenu [8].

Tablica 2 prikazuje najčešće korištene materijale za izradu elektroda te njihove najbitnije karakteristike.

**Tablica 2 Materijali za izradu elektroda i njihove karakteristike [32]**

| Materijal                  | Proizvodnost<br>( $\text{mm}^3/\text{min}$ ) | Omjer<br>trošenja alata<br>i obratka | Obradivost | Cijena<br>materijala | Primjena             |
|----------------------------|--|--------------------------------------|------------|----------------------|----------------------|
| Grafit                     | Velika                                       | Mali                                 | Dobra      | Visoka               | Svi metali           |
| Bakar                      | Visoka kod<br>grube obrade                   | Mali                                 | Dobra      | Visoka               | Svi metali           |
| Mesing                     | Visoka kod<br>grube obrade                   | Visoki                               | Dobra      | Niska                | Svi metali           |
| Volfram                    | Mala   | Mali                                 | Loša       | Visoka               | Mali provrti         |
| Legura<br>volframa i bakra | Mala   | Mali                                 | Loša       | Visoka               | Precizni<br>dijelovi |
| Čelik                      | Mala   | Visoki                               | Dobra      | Niska                | Završna<br>obrada    |
| Legure cinka               | Visoka kod<br>grube obrade                   | Visoki                               | Dobra      | Niska                | Svi metali           |

U izradi ovog diplomskog zadatka korišten je grafit srednje kvalitete tvrtke Meusburger, čije su karakteristike prikazane na slici 52.

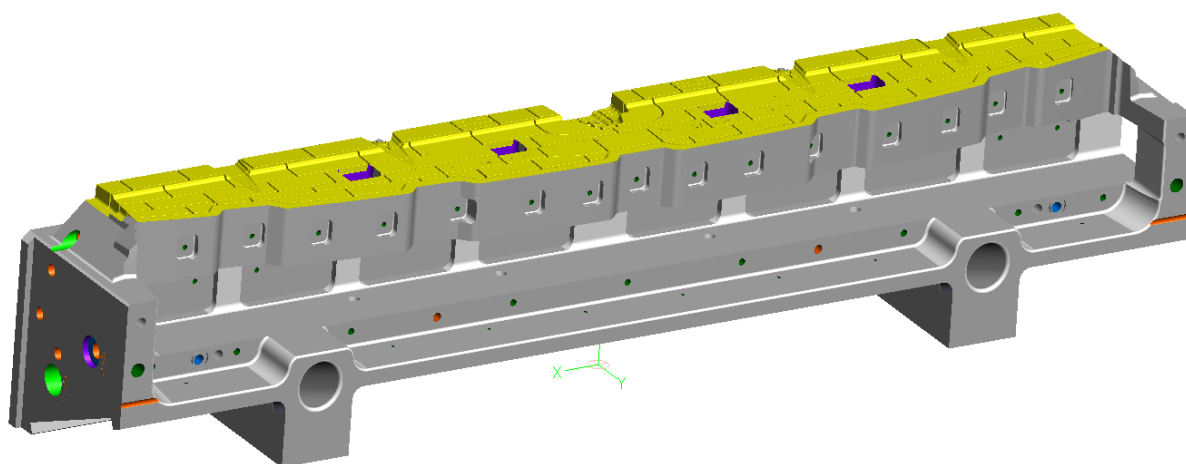
|                            | Q70  | Q60                             | Q40                            |
|----------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------|
| Average grain size         | 7 $\mu\text{m}$  | 6 $\mu\text{m}$                 | 4 $\mu\text{m}$                |
| Attainable surface quality | VDI 27 (2.2 $\mu\text{m Ra}$ ) -<br>VDI 24 (1.6 $\mu\text{m Ra}$ ) | VDI 22 (1.26 $\mu\text{m Ra}$ ) | VDI 20 (1.0 $\mu\text{m Ra}$ ) |
| Density                    | 1,83 g/cm <sup>3</sup>   | 1,86 g/cm <sup>3</sup>          | 1,82 g/cm <sup>3</sup>         |
| Electrical resistance      | 12,5 $\mu\Omega/\text{m}$  | 12 $\mu\Omega/\text{m}$         | 16,5 $\mu\Omega/\text{m}$      |
| Bending strength           | 54 N/mm <sup>2</sup>   | 65 N/mm <sup>2</sup>            | 66 N/mm <sup>2</sup>           |
| Hardness                   | 62 Shore   | 60 Shore                        | 72 Shore                       |

**Slika 52** Karakteristike odabrane vrste grafita

### 3.3. Analiza površine za EDM i modeliranje elektrode

#### 3.3.1. Analiza površine za EDM

Glodanje i elektroerozijska obrada su dva najbitnija procesa u alatničarskoj industriji. Zahtjevi za sve složenijim 3D geometrijama ponekad onemogućuju obradu klasičnim metodama. Na primjer, obrada kalupa za injekcijsko prešanje polimera sadrži sve više malih detalja uskih tolerancija koje je gotovo nemoguće obraditi operacijama kao što su glodanje. Na slici 53 prikazan je 3D model kalupa za injekcijsko prešanje polimera od kaljenog čelika tvrdoće 48 HRC.

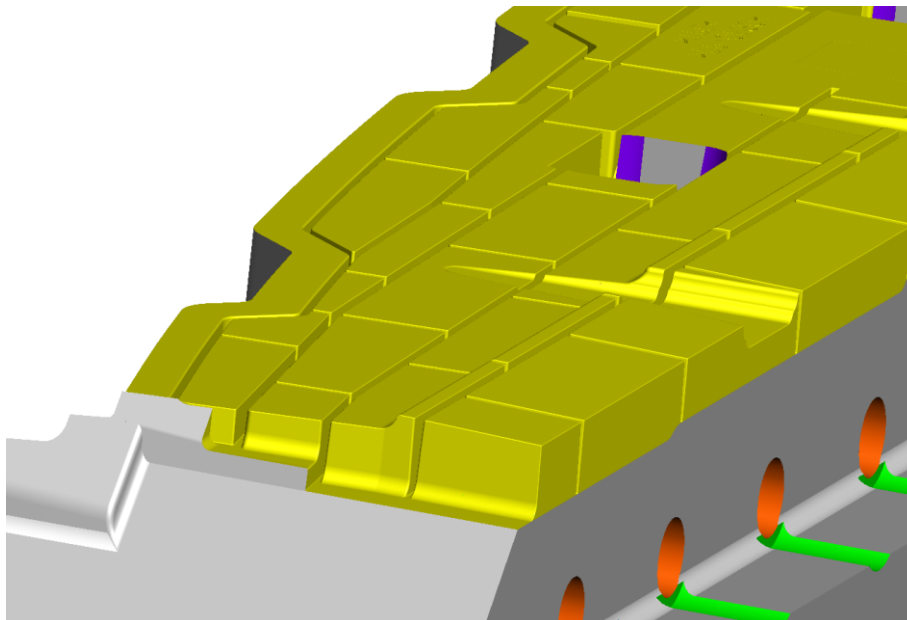


**Slika 53** Kalup za injekcijsko prešanje polimera

Obradak prikazan na slici 53 izrađen je kombinacijom obrade glodanjem i elektroerozije, pri čemu je glodanjem obrađeno sve do sitnih detalja označenih žutom bojom, dok su uska rebra i



dio 3D geometrije izrađeni elektroerozijom, Slika 54. Tehnologija obrade glodanjem ima znatno veću produktivnost u usporedbi elektroerozijom. Iz tog razloga, prvi korak u planiranju procesa obrade je upravo određivanje površina koje će biti obrađene glodanjem, a koje pomoću EDM. Većina geometrijskih oblika i tolerancija se obrađuje postupkom glodanja, dok se granica između dviju tehnologija obrade najčešće određuje iskustveno.



**Slika 54** Prikaz uskih utora koje je potrebno obraditi elektroerozijom

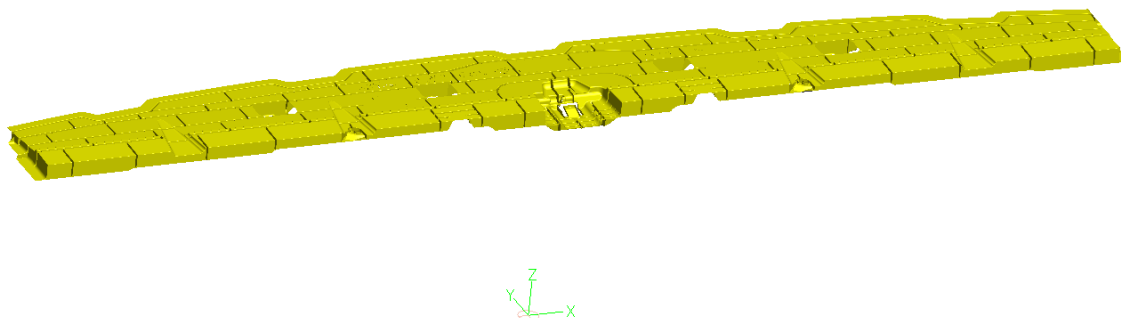
Analizom površine za EDM potrebno je utvrditi da li je moguće cijelu površinu obraditi s jednom elektrodom ili je potrebno geometriju razlomiti na nekoliko dijelova, odnosno više elektroda. Najčešće su maksimalne dimenzije ograničene geometrijom elektrode i radnim hodom stroja na kojemu se elektroda obrađuje. Obično se elektroerozija izvodi s grubom i finom elektrodom, pa je potrebno izraditi dvije elektrode za svaku erodiranu površinu. One se mogu razlikovati kvalitetom grafita i u razmaku između elektrode i obratka. Razmak (eng. *gap*) označava vrijednost koliko je elektroda odmaknuta (smanjena) u odnosu na površinu obratka. Vrijednosti razmaka za finu elektrodu se najčešće kreće oko -0,20 mm, dok je za grubu obradu razmak oko -0,35 mm.

Na određivanje broja potrebnih elektroda utječe:

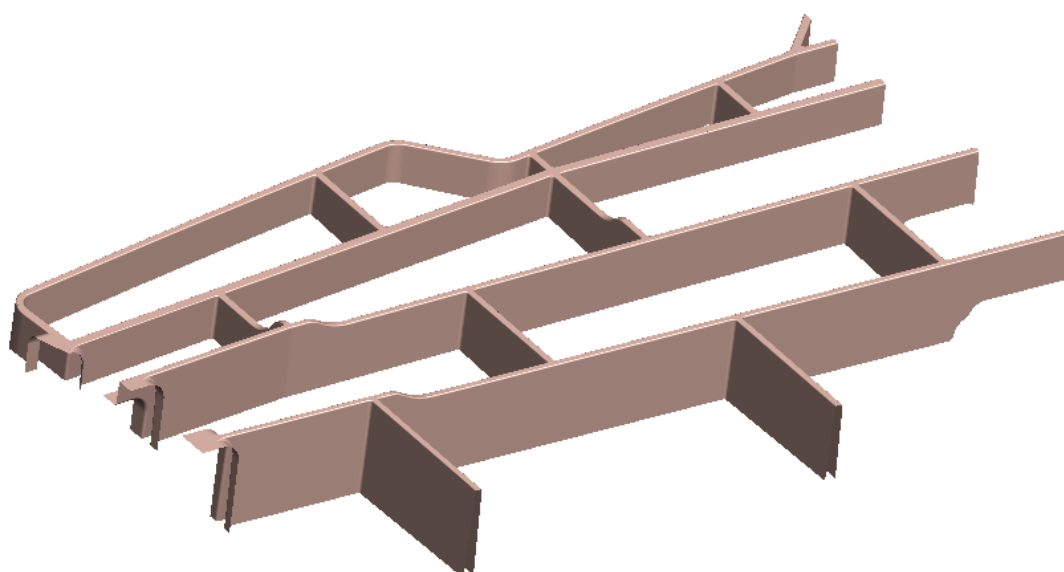
- veličina površine
- složenost površine
- uvjeti obrade (elektrode za grubu i finu obradu)
- količina odvojenog materijala

### 3.3.2. Modeliranje elektrode

Za modeliranje EDM elektrode koriste se razni CAD/CAM softveri. Kompanije kao što su Tebis, Open Mind (hyperMILL), Siemens NX ili Mastercam, kroz svoje softvere razvijaju module predviđene za izradu EDM elektroda. S obzirom da je elektroda negativ geometrije obratka, površine obratka se izvlače iz 3D modela i formiraju polazišnu geometriju elektrode (Slika 55 i Slika 56). Danas se ubrzano razvija metoda automatiziranog prepoznavanja geometrije za EDM obradu i zatvaranje nepotrebnih šupljina koje su odrađene u ranijim fazama obrade. Za ovaj diplomski zadatak korišten je CAD/CAM softver Tebis, te je kroz nekoliko koraka opisan postupak izrade EDM elektrode.

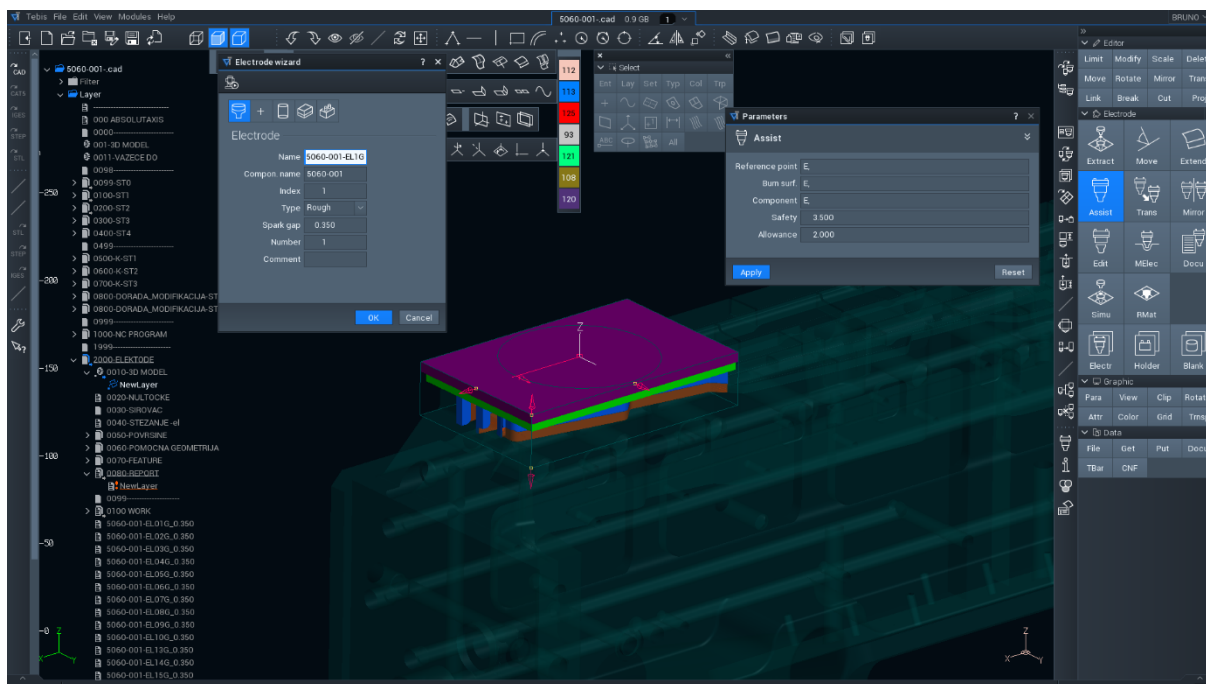


**Slika 55** Prikaz cijele površine izvučene iz 3D modela obratka

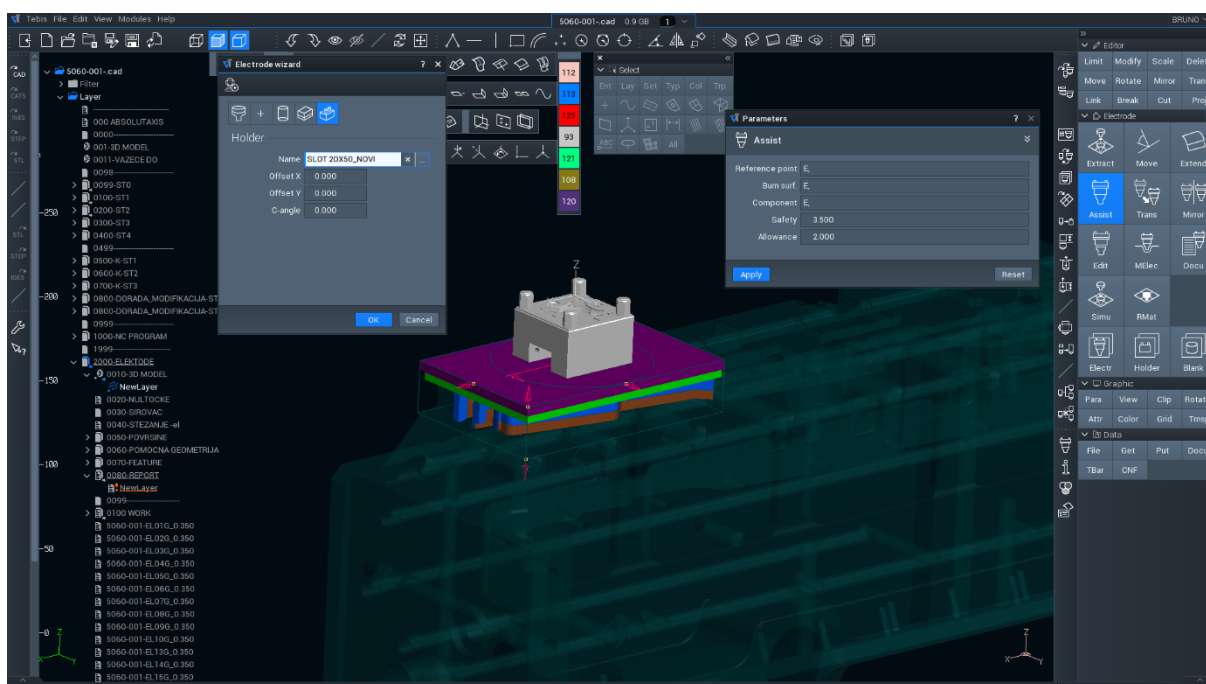


**Slika 56** Prikaz izrezane površine pripremljene za kreiranje elektrode

Na slikama 57 i 58 prikazan je modul za kreiranje elektrode pomoću kojega se definiraju osnovni parametri i informacije kao što su: nul-točka, naziv, vrijednost razmaka, dimenzije sirovca, visina tijela elektrode, skošenje za orijentaciju, prihvat i pozicija prihвата. U ovom slučaju koristi se Erowa prihvat za automatizirano stezanje pomoću sustava s jedinstvenom nulom.

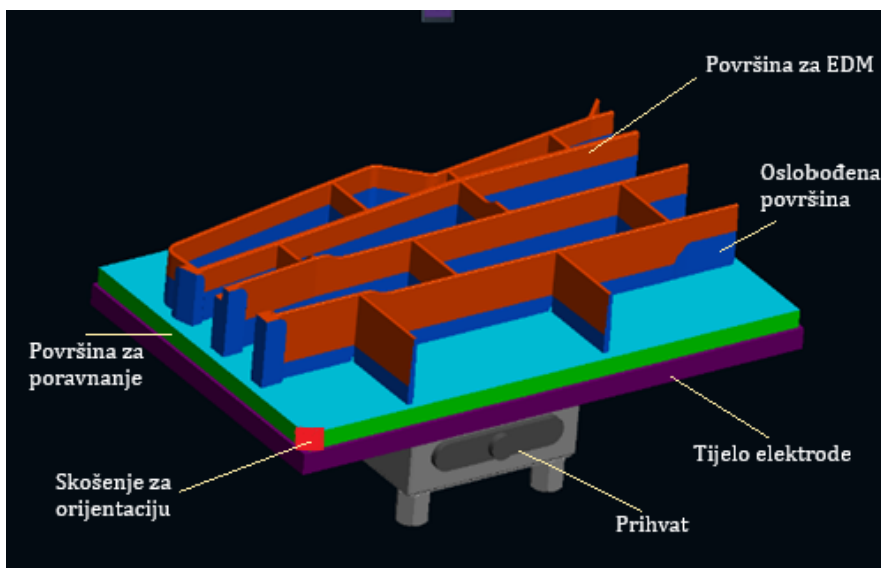


Slika 57 Modul za kreiranje elektrode



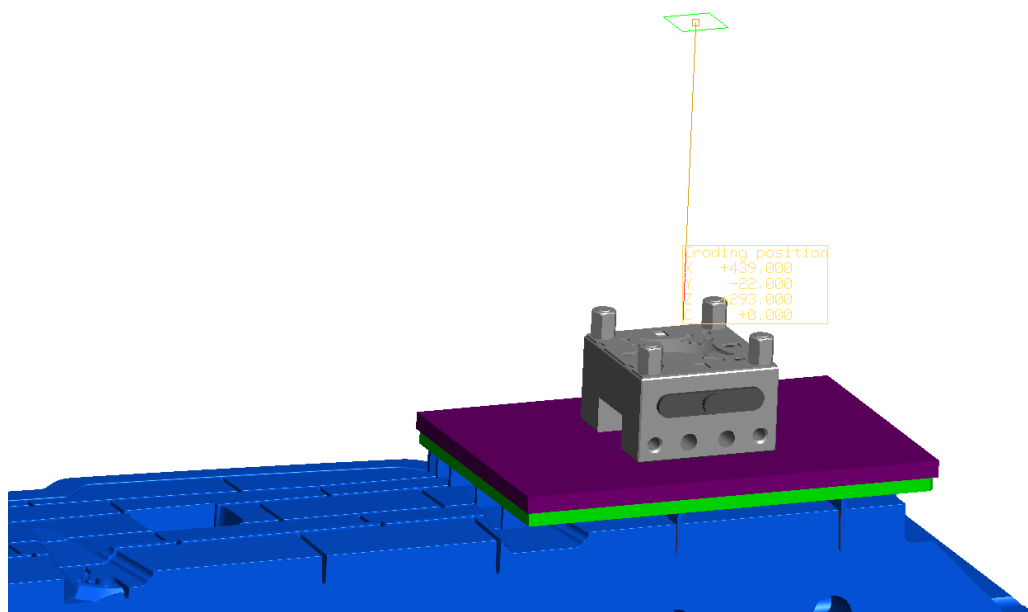
Slika 58 Definiranje prihвата i njegove pozicije

Na slici 59 prikazan je 3D model elektrode s osnovnim elementima definiranim prilikom kreiranja. Tijelo sa skošenjem za orijentaciju, površinom za poravnanje, veličina sirovca te oslobođeni dio elektrode se kreira parametarski. To bi značilo da se prilikom kreiranja elektrode pomoću njenih dimenzija automatski definira veličina sirovca, a ostale se dimenzije prilagođavaju automatski. Takve mogućnosti softvera pomažu u automatizaciji cijelog procesa i znatno skraćuju vrijeme izrade elektroda.



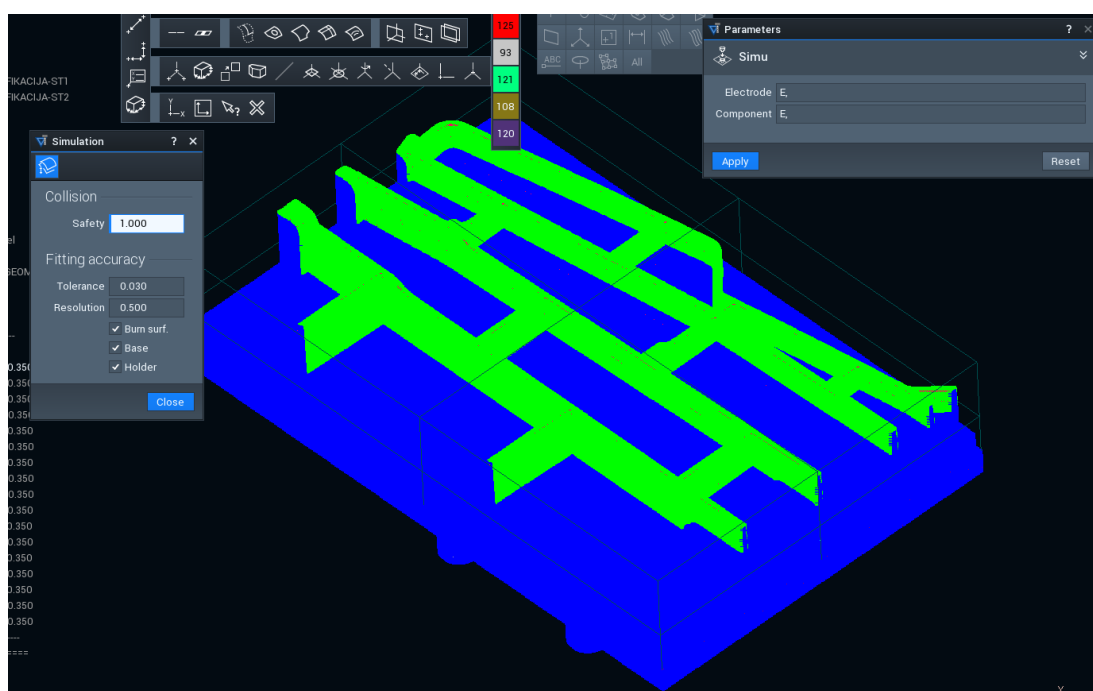
**Slika 59** 3D model kreirane elektrode s osnovnim elementima

Zatim se definira pozicija erodiranja s obzirom na nul-točku obratka, pri čemu se dobije točna koordinata i kut zakreta elektrode (ako ga ima) (Slika 60).



**Slika 60** Pozicija erodiranja

Osim nul-točke, bitno je provjeriti kreirane elektrode. Cilj provjere 3D modela elektrode je minimiziranje greški i sprječavanje kolizija. Površine elektrode koje tvore završnu geometriju obratka moraju biti jedinstvene, zatvorene i bez nepostojećih izbočina. Greške na takvim površinama direktno uzrokuju greške na gotovom proizvodu, a u najgorem slučaju škartni komad. U modulu za simulaciju se odabire 3D model elektrode i obratka te se definira tolerancija i sigurnosna udaljenost. Na slici 61 prikazan je rezultat simulacije pri čemu zelena boja označava površine u tolerancijskom području, plava označava površine koje nisu u dodiru s obratkom, dok su područja izvan tolerancijskog polja označena crvenom bojom i u ovom slučaju ih nema.



Slika 61 Rezultat simulacije

Potvrđeno je da je 3D model ispravan, a za daljnje korake potrebno je izraditi posebnu CAD datoteku s 3D modelom elektrode. U CAD datoteci se elektrodi pridjeljuje koordinatni sustav za glodanje.

### 3.4. Izrada dokumentacije

Izrada dokumentacije se sastoji od označavanja glavnih koordinata za određivanje nul-točke i provjeru pozicije obratka. Dokumentacija u PDF formatu služi operateru isključivo kao izvor informacija o dimenzijama potrebnog sirovca, orijentaciji elektrode te svim potrebnim koordinatama za EDM obradu, mjerenje i poziciji stezanja obratka, Slika 62.

**Electrode documentation**

|            |                  |                   |                   |
|------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Elektrode: | 5060-001-EL01G_  | CAD datoteka:     | 5060-001.cad      |
| Number:    | 1                | Part designation: |                   |
| Sirovac:   | 152 x 98 x 33 mm | Prihvati:         | SLOT 20X50_NOVI   |
| Materijal: | Graphit          | Holder displ.:    | X Y               |
| Spark gap: | -0,20            |                   | 0,000 mm 0,000 mm |
| Komentar:  | GIF              |                   |                   |

| Kontakt Koordinate |         |         |         | Kut   |                 |              |            |
|--------------------|---------|---------|---------|-------|-----------------|--------------|------------|
|                    | X       | Y       | Z       | C     | Rotate around Z | Tilting in A | Burn depth |
| of:                | 439,000 | -22,000 | 400,000 | 0,000 | 0,000           | 0,000        | 25,000     |
| about:             | 439,000 | -22,000 | 318,000 | 0,000 |                 |              |            |
| to:                | 439,000 | -22,000 | 283,000 | 0,000 |                 |              |            |
|                    |         |         |         |       |                 |              |            |
|                    |         |         |         |       |                 |              |            |
|                    |         |         |         |       |                 |              |            |
|                    |         |         |         |       |                 |              |            |
|                    |         |         |         |       |                 |              |            |

|        |             |         |
|--------|-------------|---------|
| Resp.: | Rezni alat: | Eroder: |
| Datum: | Datum:      | Datum:  |

© TEBis AG, 2018      TEBis Technische Informationssysteme AG      www.tebis.com      Page: 1

**Electrode documentation**

**Electrode documentation**

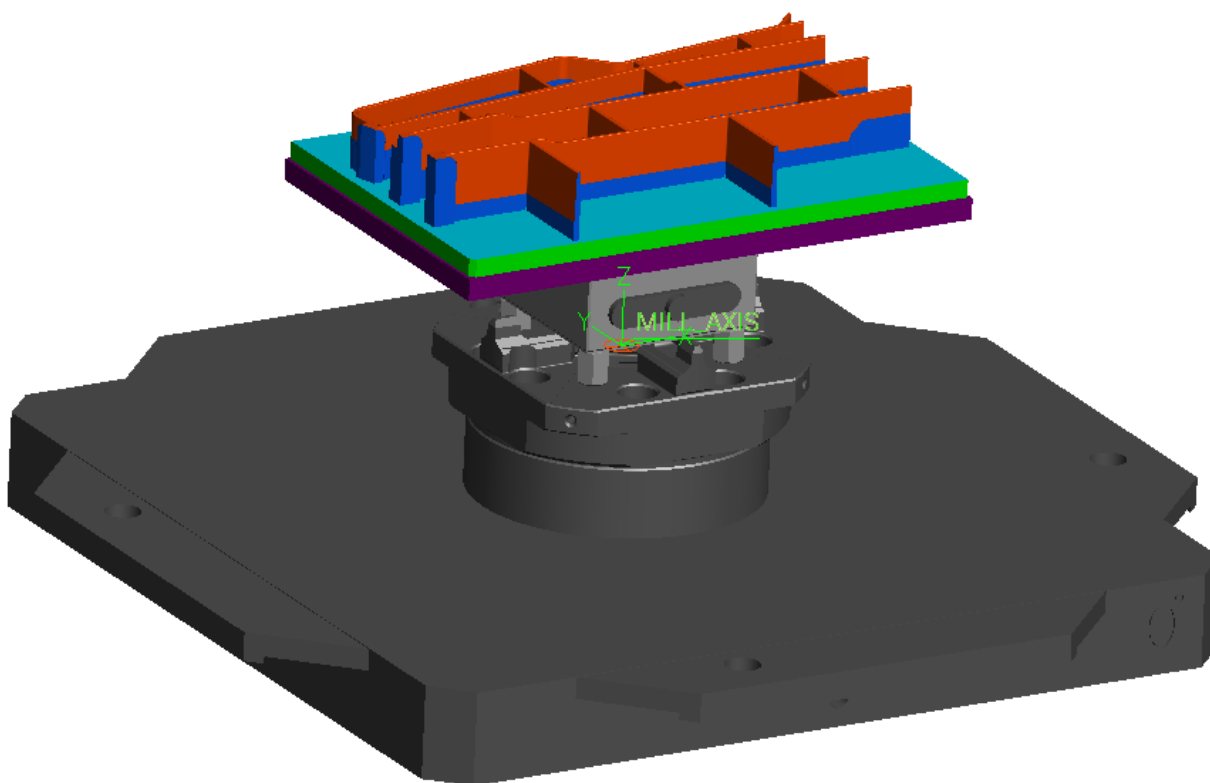
**Electrode documentation**

**Slika 62 Dokumentacija za EDM**

### 3.5. Izrada NC programa za obradu

Za izradu NC programa koristi se CAD datoteka s 3D modelom elektrode na koji je automatski postavljen koordinatni sustav za glodanje. Razlika tog koordinatnog sustava je u orijentaciji Z osi koja ima pozitivan smjer prema gore, dok je položaj elektrode u EDM stroju rotiran za  $180^\circ$ , odnosno Z os je usmjerena u suprotnom smjeru. Iz tog razloga, bitna je izrada skošenja za orijentaciju na elektrodi, kako bi operater dobio točnu informaciju o orijentaciji i načinu stezanja elektrode u EDM stroj.

Postavljanje elektrode na napravu za stezanje prikazuje Slika 63, pri čemu se može uočiti orijentacija nul-točke za glodanje. Za stezanje elektrode korišten je paletni sustav s jedinstvenom nul-točkom koji postiže ponovljivost pozicije stezanja od  $0,005 \mu\text{m}$ . Implementacijom paletnog i Erowa sustava omogućuje se fleksibilno i precizno stezanje, a primjenom pneumatike sustav postaje automatiziran. Dodatnom primjenom manipulatora ili robota za izmjenu obradaka postiže se visok stupanj automatizacije, rad u tri smjene, vikendom i praznicima.



Slika 63 Elektroda stegnuta u napravu za stezanje

U početnoj fazi je potrebno označiti dijelove modela za glodanje, zaštićene dijelove (stezni sustav i bazu elektrode), nul-točku i odabrati stroj. Zatim se kopira gotovi predložak NC programa u kojemu su postavljeni gotovo svi potrebni alati i parametri obrade. NC program je strukturiran na način da se najprije obrade površine elektrode s većim alatima na grubo (obično na dodatak od 0,5 mm), a zatim s manjim alatima izvrši fina obrada.

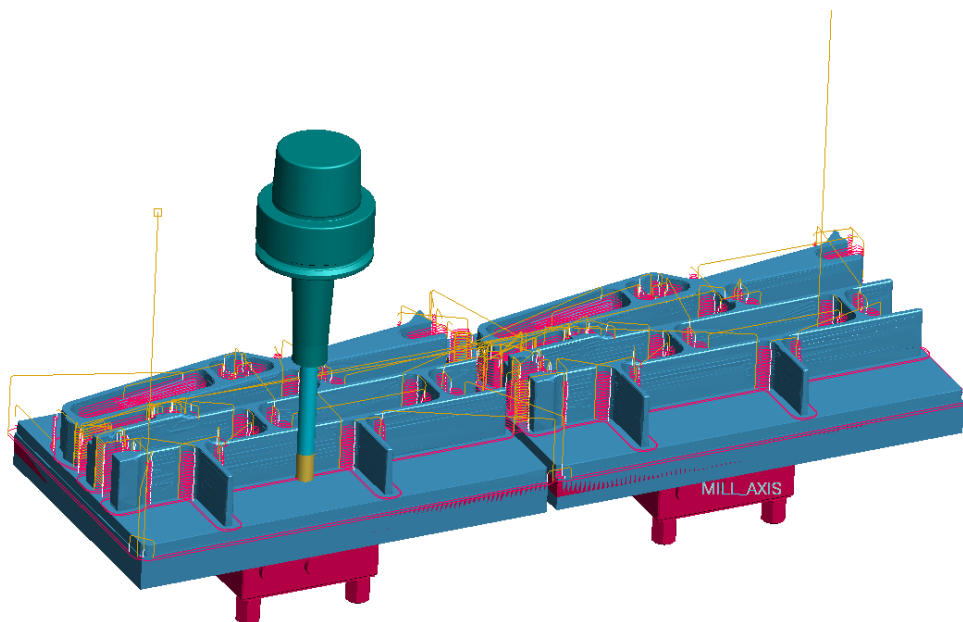
Obrada se svodi na 3 dijela:

1. Za prvu fazu programa se koriste glodaće glave i glodala za grubo glodanje grafita, a početni oblik je pravokutni sirovac predviđenih dimenzija.
2. Druga faza je fina obrada vertikalnih površina s glodalima promjera od 2 – 12 mm, s radijusom od 0,3 – 2 mm.
3. Treća faza je obrada vertikalnih površina s kuglastim glodalima promjera od 0,2 – 12 mm. Između putanja alata fine obrade vertikalnih i horizontalnih površina potrebno je postići preklop za veličinu radijusa alata.

Označene površine za finu obradu su programski korigirane za vrijednost razmaka između obratka i elektrode (-0,20 ili -0,35 mm). Na ovaj način se jednostavno izrađuje elektroda umanjena za vrijednost razmaka, bez potrebe za korekcijom 3D modela. Ovaj postupak se može izvesti i direktnim pomakom površina 3D modela, čime se dobije točnija geometrija, ali zbog jednostavnosti i zanemarive razlike u geometriji, ipak se najčešće koristi metoda s programskim korigiranjem razmaka.

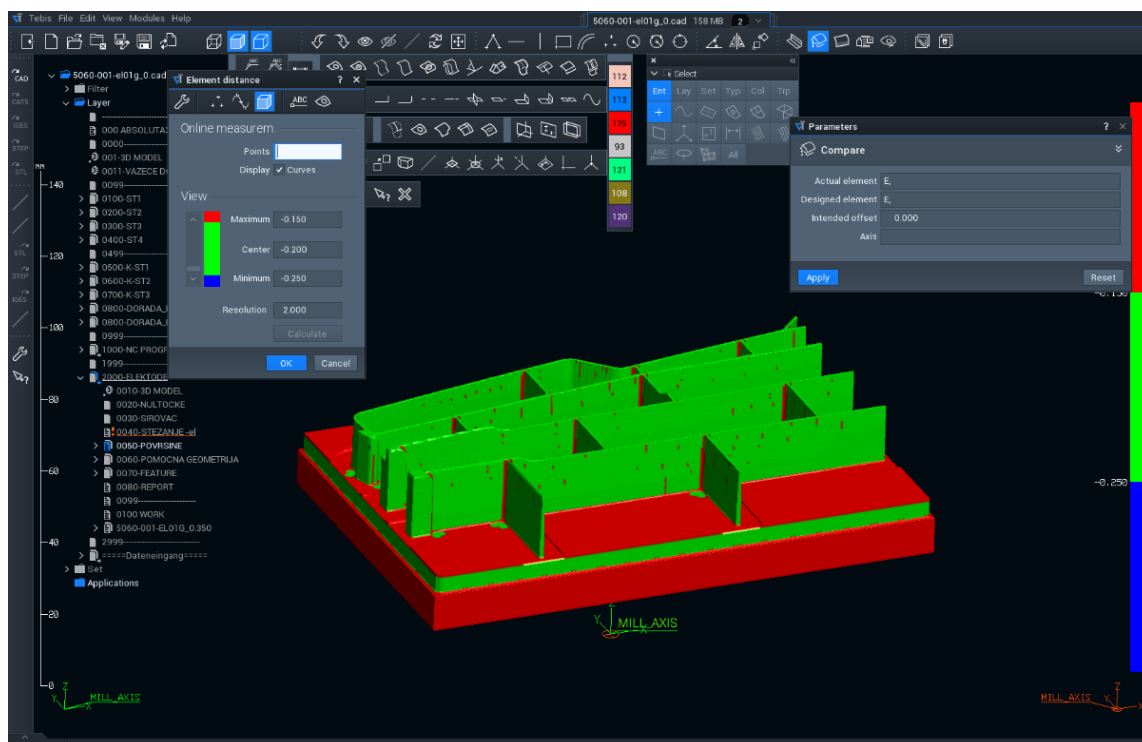
U ovom diplomskom zadatku dio elektroda je obrađen na 5-osnom glodaćem centru, a ostatak na 3-osnom. Na slici 64 prikazana je gruba obrada na 3-osnom obradnom centru, pri čemu su paralelno obrađivane dvije elektrode (gruba i fina).



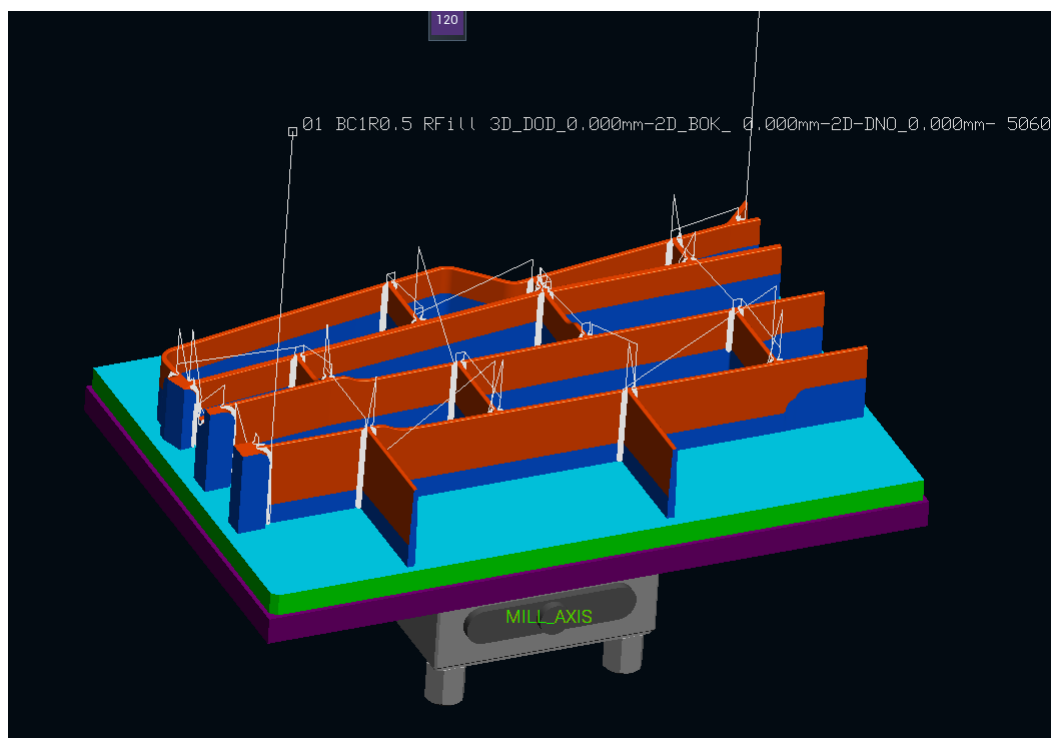


Slika 64 Gruba obrada elektroda

Nakon izrade NC programa koristi se simulacija za provjeru gotovog sirovca. Odabire se tolerancijsko polje te se sirovac uspoređuje s 3D modelom. Na slici 65 se može uočiti dodatak na malim radijusima koje je potrebno dodatno obraditi. Za takve operacije koriste se alati malog promjera (Slika 66).



Slika 65 Provjera gotovog sirovca



Slika 66 Dodatna operacija za obradu malih radijusa

### 3.6. Obrada elektrode

#### 3.6.1. Priprema sirovca

Za obradu elektrode potrebno je pripremiti sirovce grafita. Prva faza je rezanje grafita na potrebne dimenzije predviđene u fazi planiranja. Grafit se reže tračnom pilom iz bloka veličine nekoliko desetaka kilograma ili se kupuje sirovac definiranih standardnih dimenzija. Tijekom rezanja grafita obavezna je zaštita radnika od štetnih sitnih čestica grafita. U drugoj fazi se sirovac pričvršćuje na Erowa prihvat. Može se pričvrstiti mehanički pomoću vijaka ili lijepljenjem tj. korištenjem specijalnog ljepila za grafit. Metoda pomoću ljepila je znatno jednostavnija i ne iziskuje potrebu za bušenjem provrta za vijke, a uz to postiže dovoljnu čvrstoću spoja i otpornost na visokim temperaturama.

Sirovci se označavaju i pridjeljuje im se naziv elektrode i NC programa. Primjer pripremljenih sirovaca je prikazan na slici 67.



Slika 67 Primjer pripremljenih sirovaca

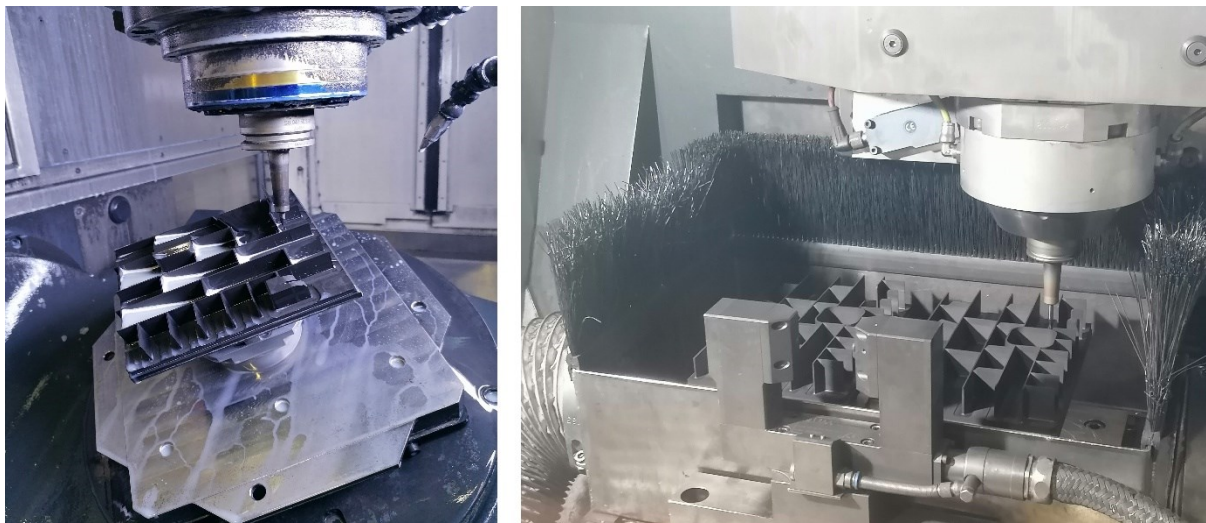
### 3.6.2. Obrada elektroda

Obrada se vrši konvencionalnim metodama, u ovom slučaju glodanjem pomoću specijalnih alata za grafit. Glodala za grafit su izrađena od tvrdog metala s dijamantnom prevlakom, a pogodna su za preciznu visokobrzinsku obradu. Brzina rezanja se obično kreće od 150 - 400 m/min.

Dio elektroda je obrađen na 5-osnom obradnom centru mokrim glodanjem (korištenjem SHIP-a), dok je ostatak obrađen na 3-osnom obradnom centru suhim glodanjem (bez uporabe SHIP-a) (slika 68).

Obrada grafita suhim glodanjem zahtjeva korištenje usisavača kako bi se nastala prašina i sitne odvojene čestice uklonile iz zone obrade i atmosfere. Hlađenje alata i ispuhivanje odvojenih čestica se odvija strujom stlačenog zraka.

Mokra obrada zahtjeva filtriranje SHIP-a posebnim sustavom za filtriranje. Odvojene čestice grafita su znatno manje nego metalne, pa je potrebno nekoliko faza filtriranja kako bi se SHIP mogao ponovno koristiti. Potrebno je češće čišćenje transportera za odvođenje odvojenih čestica te promjena SHIP-a na stroju barem jednom godišnje.



Slika 68 Mokro glodanje grafita (lijevo), suho glodanje grafita (desno)

### 3.6.3. Usporedba mokrog i suhog glodanja grafita

Nakon obrađenih nekoliko elektroda moglo se usporediti stanje alata kod suhog i mokrog glodanja grafita. Korišteni su alati: glodalo promjera 6 mm i radijusa 0,5 mm, te kuglasto glodalo promjera 6 mm. Testiranje se provodilo na sličnim geometrijama elektroda pri istim parametrima obrade prikazanim u tablici 3.

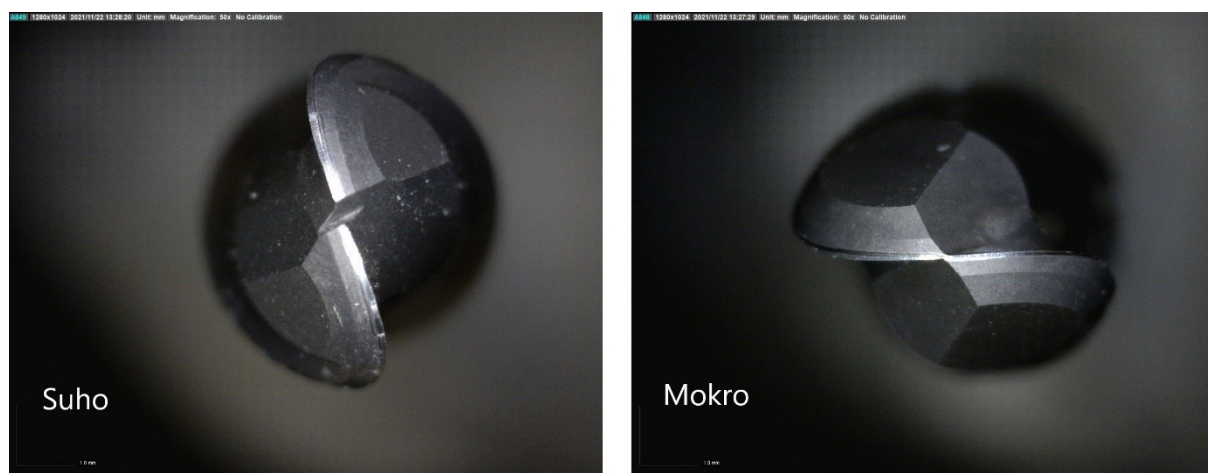
Tablica 3 Parametri obrade tijekom testiranja

| Naziv alata         | Promjer alata ( $d$ ), mm | Radijus alata, mm | Brzina rezanja ( $v_c$ ), m/min | Učestalost vrtnje ( $n$ ), $\text{min}^{-1}$ | Posmak ( $f$ ), mm/okr. | Dubina rezanja ( $a_p$ ), mm | Vrijeme obrade ( $t$ ), min | Broj zubi |
|---------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------|--|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------|
| Glodalo s radijusom | 6                         | 0,5               | 350                             | 18568  | 3620                    | 0,5                          | 600                         | 3         |
| Kuglasto glodalo    | 6                         | 3                 | 380                             | 20160  | 1734                    | 0,2                          | 600                         | 2         |

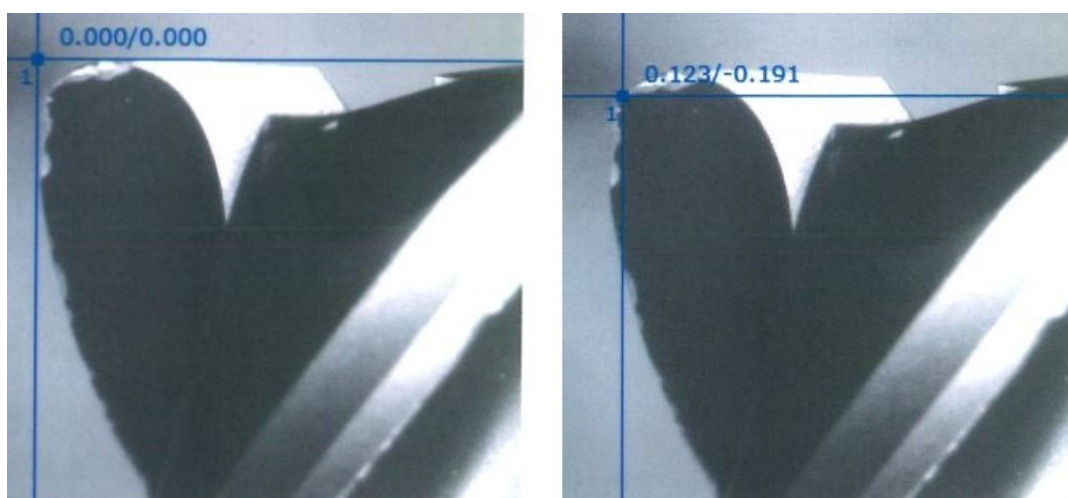
Nakon 600 minuta obrade alati su snimljeni pod mikroskopom uvećanjem od 50 puta (Slika 69 i Slika 70) i izmjereni na uređaju za kontrolu oštećenja (Slika 71 i Slika 72), pri čemu su zamijećena oštećenja rezne oštrice. Uočava se lom rezne oštrice i značajno trošenje stražnje oštrice alata.



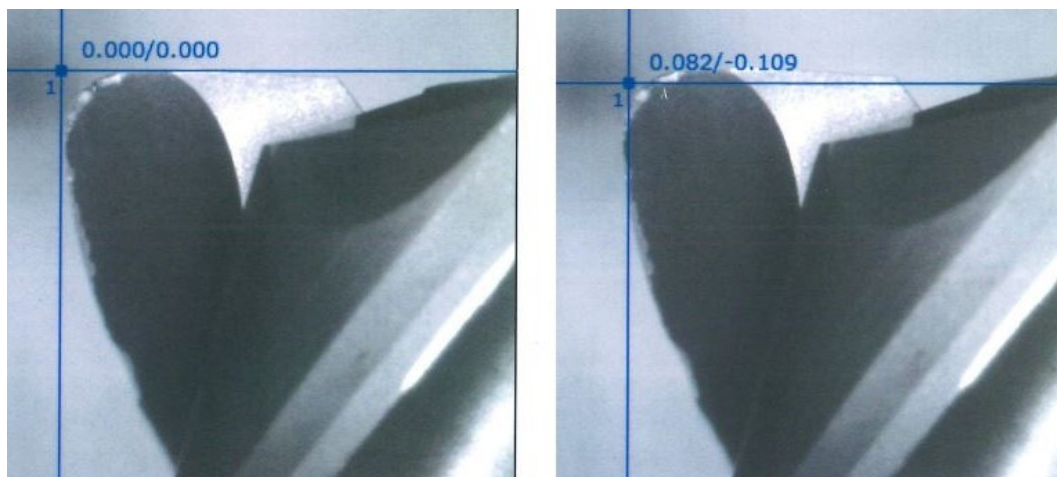
**Slika 69** Prikaz trošenja stražnje površine glodala s radijusom pod mikroskopom



**Slika 70** Prikaz trošenja stražnje površine kuglastog glodala pod mikroskopom



**Slika 71** Prikaz oštećenja nakon suhog glodanja grafita



**Slika 72 Prikaz oštećenja nakon mokrog glodanja grafita**

Analizom oštećenja reznih oštrica utvrđena je znatna razlika. Na glodalu s radijusom i kuglastom glodalu primjenom mokrog glodanja grafita ostvareno je 30 - 40 % manje trošenje alata.

Dakle, obradom grafita mokrim glodanjem uz korištenje SHIP-a ostvaruje se znatno manje trošenje alata, ali ipak u suvremenoj proizvodnji prevladava suho glodanje. Na strojevima za mokro glodanje se mogu obrađivati više materijala poput čelika, bakra ili grafita, proizvode manje prašine te ih je lakše čistiti. Međutim, strojevi korišteni za suho glodanje su ekološki prihvatljiviji, ne zahtijevaju sustav za filtriranje i redovito mijenjanje SHIP-a čime se smanjuju ukupni troškovi obrade.

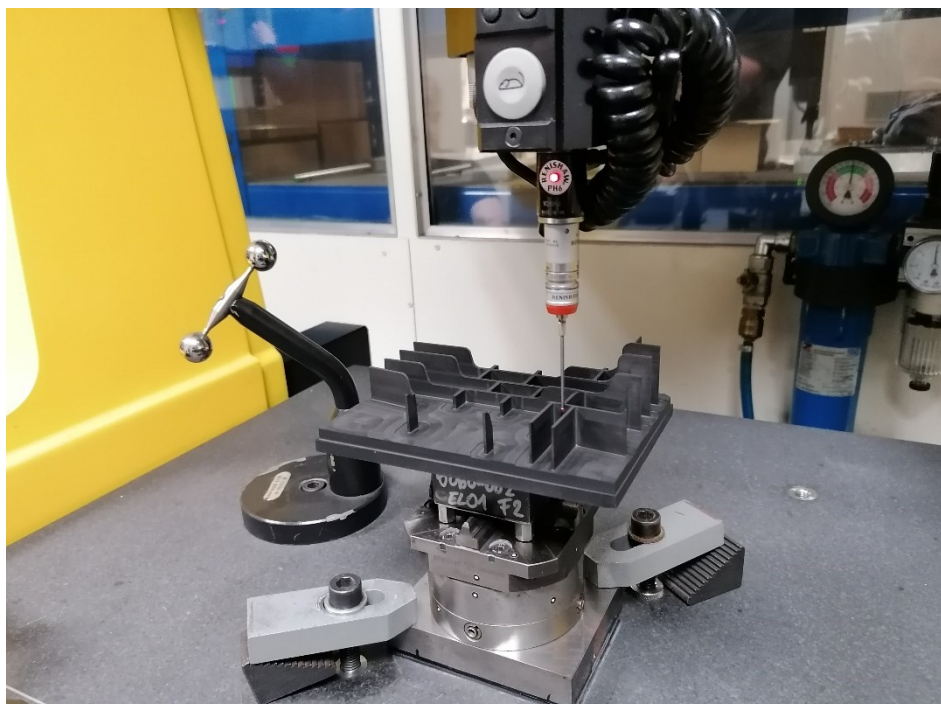
### **3.7. Mjerenje i vizualna kontrola**

Nakon obrade elektroda se provjerava vizualno, a zatim mjerenjem pomoću koordinatnog mjernog uređaja (CMM). Elektroda se steže u napravu na radnom stolu CMM uređaja, Slika 73. Naprava ima Erowa princip stezanja te definiranu i umjerenu nul-točku. Pozicija elektrode se određuje u odnosu na nul-točku naprave. CMM uređaj informacije o 3D modelu elektrode obično preuzima korištenjem STEP datoteke.



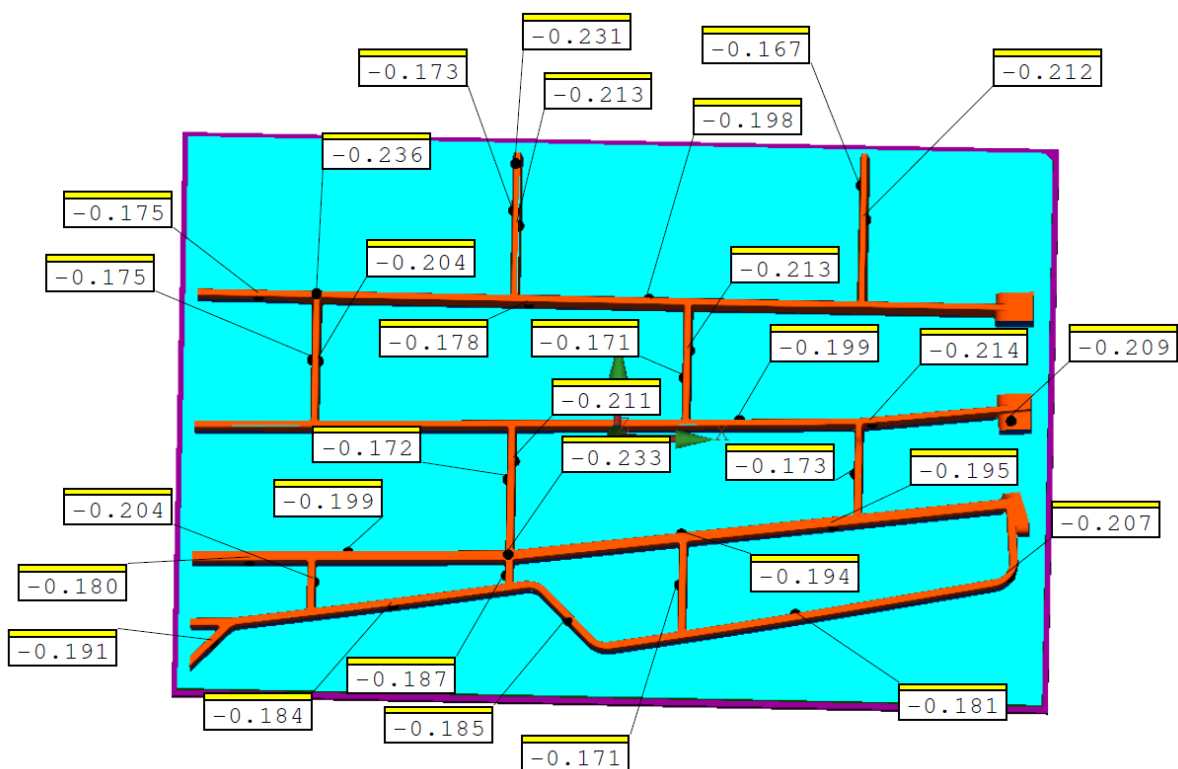
**Slika 73 Primjer CMM uređaja**

Mjerenje elektrode se izvodi pomoću ticala s kuglicom kao što je prikazano na slici 74. Odabiru se točke na 3D modelu koje se žele provjeriti, dok CMM uređaj mjerenje izvršava samostalno. Preciznost uređaja i temperatura okoline utječu na točnost mjerenja. Veličina kuglice definira koliko se detalja može izmjeriti. Za mjerenje malih unutarnjih radijusa potrebno je imati jako malu kuglicu.



**Slika 74 Mjerenje elektrode na CMM uređaju**

Slika 75 prikazuje rezultate mjerenja na CMM uređaju. Dobiveni rezultati su u tolerancijskom polju te je odlučeno da je elektroda dobra i nisu potrebne nikakve dorade. Na mjernom izvještaju se može uočiti da je vrijednost dobivenih odstupanja negativnog predznaka, iznosa oko -0,20 mm što je upravo vrijednost ranije definiranog razmaka alata i obratka.



**Slika 75** Rezultati mjerenja elektrode na CMM uređaju

Završnom kontrolom elektrode mogu se otkriti greške poput nepredviđenih dodataka ili manjka materijala, zamak elektrode i slično. Greške kao što su zamak korigiraju se na stroju za EDM, dok višak materijala zahtijeva dorade ili u najgorem slučaju izradu nove elektrode.



## 4. ZAKLJUČAK

Suvremena proizvodnja je suočena s brojnim izazovima današnjice. Jačanje konkurencije, zahtjevi kupaca, materijali poboljšanih svojstava, pojedinačna i personalizirana proizvodnja te ekološka održivost čine ogroman teret industrijskoj proizvodnji. Kao odgovor na takve uvjete tržišta, razvijaju se brojne nove tehnologije obrade. Neizostavna skupina procesa obrade, kao što su nekonvencionalni postupci danas zauzima značajno mjesto u suvremenoj proizvodnji. Nekonvencionalni postupci obrade nemaju direktan kontakt alata i obratka, čime se omogućuje ogroman napredak pri obradi teško obradivih suvremenih materijala. Postupci obrade kao što su EDM i ECM ne ovise o mehaničkim svojstvima materijala (tvrdoći i čvrstoći), već samo o fizikalnom svojstvu električne vodljivosti.

Najčešće se obrada vrši kombinacijom konvencionalnih i nekonvencionalnih postupaka obrade. Takav primjer se uočava prilikom EDM obrade, pri čemu je za izradu elektrode korištena tehnologija glodanja. Taj primjer odlično ilustrira suvremenu proizvodnju koja kombinacijom raznih procesa obrade iskorištava potencijal svakog procesa s ciljem postizanja najboljih rezultata.

Testiranjem raznih metoda obrade poput mokrog i suhog glodanja grafita, uspoređuju se mogućnosti i ekonomičnost obrade. Analizom trošenja alata utvrđeno je 30 – 40 % veće trošenje alata suhim glodanjem grafita. Ipak, uz ostvarivanje znatno boljih rezultata mokrim glodanjem grafita, takav postupak obrade se danas sve manje koristi zbog pitanja ekonomičnosti kao i velikog naglaska na ekološku prihvatljivost SHIP-a.

## LITERATURA

- [1] Rajesh Kumar. V, Naresha K, Harish U, A comparative study of process parameters in the selecton of non-traditional machining (NTM) processes for optimization, Mechanical Engineering Department Visvesvaraya Technological University Bangalore, India, 2016.
- [2] Udiljak, T.: Nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem čestica, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [3] Non-traditional machining, <http://www.tgpcet.com/MECH-NOTES/8/Advanced-Manufacturing-Technique.pdf>, Pristupljeno: 20.06.2021.
- [4] El-Hofy, H.: Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes, McGraw-Hill, 2005.
- [5] X-MW 105-CNC Waterjet Cutting System, <https://www.machineryhouse.com.au/w08702>, Pristupljeno 10.09.2021.
- [6] Jagadeesha, T.: Non Traditional Manufacturing Processes - An overview, [http://www.nitc.ac.in/dept/me/jagadeesha/mev303/OVERVIEW\\_OF\\_NTM\\_PROCESS\\_ES.pdf](http://www.nitc.ac.in/dept/me/jagadeesha/mev303/OVERVIEW_OF_NTM_PROCESS_ES.pdf), National Institute of Technology, Calicut, Pristupljeno 11.07.2021.
- [7] <https://wardjet.com/waterjet/university/precision-quality>, Pristupljeno 11.07.2021.
- [8] Youssef, H. A., El-Hofy, H.: Machining Technology: Machine Tools and Operations, CRC Press, 2008.
- [9] OptiSonic 1200 Series Overview, <https://www.optipro.com/optical-manufacturing/ultrasonic-machining/optisonic-1200/>, Pristupljeno 20.09.2021.
- [10] Ultrasonic machining (USM), <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/ultrasonic-machining-usm>, Pristupljeno 20.09.2021.
- [11] Kumar Saxena K., Qian J., Reynaerts D., A review on process capabilities of electrochemical micromachining and its hybrid variants, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018.
- [12] Bhattacharyya B., Modern Machining Technology: Machining processes utilizing thermal energy, 2020.
- [13] Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P., Schumacher B. M., Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process

- 
- [14] Singh K., Gianender, Agarwal A. K., Ajit, Yadav R., Effect of Dielectric fluids used on EDM Performance: A Review, International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER), 2017.
- [15] Choudhary S. K., Jadoun R. S, Current Research development in Dry Electric Discharge Machining (DEDM): Review Paper, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2014.
- [16] Özerkan H. B., Effect of changing polarity of graphite tool/ Hadfield steel workpiece couple on machining performances in die sinking EDM, Gazi University Vocational School of Technical Sciences, 2017.
- [17] Otsuka F., Kataoka Y., Miyazaki T., Enhanced osteoblast response to electrical discharge machining surface, Dent Mater J., 2012.
- [18] Priyadarshini M., Kumar Biswas C., Behera A., Machining of sub-cooled low carbon tool steel by wire-EDM, Materials and Manufacturing Processes, 2019.
- [19] Wire EDM, <https://www.manufacturingguide.com/en/wire-edm>, Pristupljeno 20.10.2021.
- [20] Wire cut EDM, <http://www.kenson.id/2016/09/wire-cut-edm.html>, Pristupljeno 20.10.2021.
- [21] Dubey A. K., Yadava V., Laser beam machining—A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008,
- [22] Lasersko rezanje metala i nemetala, <https://techcut.hr/>, Pristupljeno 25.10.2021.
- [23] Laser Diode Technology, <https://www.newport.com/t/laser-diode-technology>, Pristupljeno 25.10.2021.
- [24] Bauer B.; Predavanja: Rezanje laserom, IWE (tečaj)
- [25] <https://hr accurlaser.com/3kw-laser-cutting-machine-industrial-laser-cutter-cutting-machine.html>, Pristupljeno 15.11.2021.
- [26] Bauer B.; Predavanja: Rezanje plazmom, IWE (tečaj)
- [27] Plasma Arc Welding Process- Principle, Main Parts, Working, Advantages and Disadvantages with Application, <https://www.theweldingmaster.com/plasma-arc-welding/>, Pristupljeno 15.11.2021.
- [28] CNC underwater plasma cutting machine, <https://www.ecvv.com/product/4678662.html>, Pristupljeno 15.11.2021.
- [29] Okada A., Electron Beam Machining, Department of Mechanical Engineering, Okayama University, Japan, 2019.

- [30] Chemical Milling Environmental Improvements, Aerospace is Green and Growing, <https://www.pfonline.com/articles/chemical-milling-environmental-improvements-aerospace-is-green-and-growing>, Pristupljeno 25.11.2021.
- [31] Fabricating thin with photochemical etching, <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/shopmanagement/fabricating-thin-with-photochemical-etching>, Pristupljeno 25.11.2021.
- [32] Ranganath B.J., Thermal Metal Cutting Processes, I.K. International, 2008.

## **PRILOZI**

I. CD-R disk