

Nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem

Pešić, Marija

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:777787>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marija Pešić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Studentica:

Marija Pešić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Tomi Udiljaku na stručnoj pomoći i savjetima prilikom izrade ovog završnog rada. Također se zahvaljujem svojim roditeljima na potpori tijekom cijelog studija.

Marija Pešić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marija Pešić**

Mat. br.: 0035206105

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Non-conventional machining processes**

Opis zadatka:

Nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem predstavljaju veliku skupinu postupaka obrade koja se ne temelji na primjeni reznih alata, a čija primjena je sve značajnija. U radu je potrebno dati pregled nekonvencionalnih postupaka obrade odvajanjem te njihovu podjelu obzirom na osnovni oblik energije koji se primjenjuje u procesu obrade. Kod značajki pojedinih procesa posebno se treba osvrnuti na obradu geometrijskih značajki dijelova koje je moguće obraditi i konvencionalnim postupcima obrade odvajanjem. Za sve postupke treba naznačiti proizvodnost postupka, hrapavost obrađene površine i zonu utjecaja topline. Potrebno je dati i pregled nekonvencionalnih postupaka obrade koji nalaze primjenu u hibridnim postupcima obrade odvajanjem.

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

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Zadatak zadao:

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.

2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.

3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.

2. rok (izvanredni): 3.7.2020.

3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Prof.dr.sc. Toma Udiljak

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | IV |
| POPIS TABLICA..... | VI |
| POPIS OZNAKA I KRATICA | VII |
| SAŽETAK..... | VIII |
| SUMMARY | IX |
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. Osnovne značajke konvencionalnih i nekonvencionalnih postupaka obrade | 3 |
| 1.2. Podjela nekonvencionalnih postupaka obrade odvajanjem..... | 4 |
| 2. MEHANIČKI NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRAD E | 6 |
| 2.1. Ultrazvučna obrada - Ultrasonic Machining (USM)..... | 6 |
| 2.1.1. Princip rada ultrazvučne obrade | 6 |
| 2.1.2. Glavne značajke postupka obrade ultrazvukom..... | 8 |
| 2.2. Obrada vodenim mlazom - Water Jet Machining (WJM)..... | 10 |
| 2.2.1. Princip rada obrade vodenim mlazom..... | 10 |
| 2.2.2. Glavne značajke postupka obrade vodenim mlazom | 12 |
| 2.3. Obrada abrazivnim vodenim mlazom - Abrasive Water Jet Machining (AWJM)..... | 14 |
| 2.4. Obrada mlazom leda - Ice Jet Machining (IJM) | 17 |
| 3. TERMOELEKTRIČNI NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRAD E | 19 |
| 3.1. Elektroerozijska obrada - Electric Discharge Machining (EDM) | 19 |
| 3.1.1. Elektroerozijska obrada žigom | 20 |
| 3.1.1.1. Princip rada elektroerozijske obrade žigom | 20 |
| 3.1.1.2. Glavne značajke elektroerozijske obrade žigom | 22 |
| 3.1.2. Elektroerozijska obrada žicom - Wire Electric Discharge Machining (WEDM) .. | 26 |
| 3.1.3. Usporedba EDM postupka žigom i žicom | 28 |
| 3.2. Obrada snopom elektrona - Electron Beam Machining (EBM)..... | 29 |
| 3.2.1. Princip rada obrade snopom elektrona | 29 |
| 3.2.2. Glavne značajke EBM obrade..... | 30 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.3. | Laserska obrada - Laser Beam Machining (LBM)..... | 32 |
| 3.3.1. | Princip rada LBM postupka | 33 |
| 3.3.2. | Glavne značajke LBM postupka | 34 |
| 3.3.3. | Usporedba LBM i AWJM postupka..... | 37 |
| 3.4. | Obrada snopom iona - Ion Beam Machining (IBM) | 37 |
| 3.4.1. | Princip rada obrade snopom iona | 37 |
| 3.4.2. | Glavne značajke IBM postupka | 38 |
| 3.5. | Obrada plazmom - Plasma Beam Machining (PBM)..... | 39 |
| 3.5.1. | Princip rada PBM obrade | 39 |
| 3.5.2. | Glavne značajke PBM obrade | 40 |
| 4. | KEMIJSKI NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADE..... | 43 |
| 4.1. | Kemijsko glodanje - Chemical Milling (CHM) | 43 |
| 4.1.1. | Princip rada CHM postupka | 43 |
| 4.1.2. | Glavne značajke CHM postupka..... | 44 |
| 4.2. | Fotokemijska obrada - Photochemical Machining (PCM)..... | 46 |
| 4.2.2. | Princip rada PCM postupka..... | 46 |
| 4.2.3. | Glavne značajke PCM postupka..... | 47 |
| 5. | ELEKTROKEMIJSKI NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADE..... | 49 |
| 5.1. | Elektrokemijska obrada - Electrochemical Machining (ECM)..... | 49 |
| 5.1.1. | Princip rada ECM postupka | 49 |
| 5.1.2. | Glavne značajke ECM postupka | 51 |
| 6. | HIBRIDNI POSTUPCI OBRADE..... | 53 |
| 6.1. | Miješani hibridni postupci - Combined or mixed-type processes..... | 54 |
| 6.1.1. | Elektrokemijsko brušenje - Electrochemical Grinding (ECG)..... | 54 |
| 6.1.2. | Elektroerozijsko brušenje - Electric Discharge Grinding (EDG)..... | 55 |
| 6.1.3. | Obrada elektrokemijskim pražnjenjem - Electrochemical Discharge Machining (ECDM)..... | 55 |
| 6.1.4. | Brušenje elektrokemijskim pražnjenjem - Electrochemical Discharge Grinding (EDCG) | 56 |

| | | |
|--------|---|----|
| 6.2. | Potpomognuti hibridni postupci - Assisted hybrid processes | 57 |
| 6.2.1. | Elektroerozijska obrada potpomognuta vibracijom - Vibration-Assisted EDM... | 57 |
| 6.2.2. | Elektrokemijski postupak potpomognut ultrazvučnim postupkom - Ultrasonic-Assisted ECM (USECM) | 58 |
| 6.2.3. | Obrade potpomognute laserom - Laser-Assisted machining | 58 |
| 7. | ZAKLJUČAK | 60 |
| | LITERATURA..... | 61 |
| | PRILOZI..... | 65 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Shematski prikaz klasifikacije prema vrsti energije koja se primjenjuje [3] | 4 |
| Slika 2. | Shema opreme za obradu ultrazvukom [6]..... | 7 |
| Slika 3. | Sustav za ultrazvučnu obradu [7] | 7 |
| Slika 4. | Primjer obrade ultrazvukom [9] | 8 |
| Slika 5. | Shematski prikaz abrazivnih čestica u zoni obrade [10] | 8 |
| Slika 6. | Kvalitativni prikaz ovisnosti brzine ultrazvučne obrade o amplitudi alata i veličini abrazivnih zrna [6]..... | 9 |
| Slika 7. | Shema rada postupka s vodenim mlazom [3]..... | 11 |
| Slika 8. | Sustav za obradu vodenim mlazom [13] | 11 |
| Slika 9. | Obrada aluminijskog vodenim mlazom [14]..... | 12 |
| Slika 10. | Utjecaj udaljenosti mlaznice na rez [15] | 13 |
| Slika 11. | Utjecaj brzine vodenog mlaza na rez [15]..... | 13 |
| Slika 12. | Dijelovi izrađeni AWJM postupkom [17]..... | 15 |
| Slika 13. | Obrada kamena [18] | 15 |
| Slika 14. | Princip rada abrazivnog vodenog mlaza [15]..... | 16 |
| Slika 15. | Kvaliteta površine reza ovisno o posmičnoj brzini [15] | 17 |
| Slika 16. | Višeosna AWJM obrada [20] | 17 |
| Slika 17. | Shema postupka obrade mlazom leda [21]..... | 18 |
| Slika 18. | Shema EDM obrade žigom [3]..... | 20 |
| Slika 19. | Elektroerozijska obrada žigom [2] | 21 |
| Slika 20. | Električno pražnjenje [3]..... | 21 |
| Slika 21. | Načini strujanja dielektrične tekućine [4] | 22 |
| Slika 22. | Prikaz izrade kalupa pomoću EDM žiga [23] | 22 |
| Slika 23. | Zone utjecaja topline [3]..... | 23 |
| Slika 24. | Izgled površine obrađene EDM-om pod elektronskim mikroskopom [4] | 24 |
| Slika 25. | Utjecaj srednje jakosti struje na proizvodnost pri različitom naponu [6]..... | 25 |
| Slika 26. | Proizvodnost i površinska hrapavost za različite materijale obratka pri istim parametrima obrade [4] | 26 |
| Slika 27. | Shema WEDM postupka [27] | 26 |
| Slika 28. | Prikaz WEDM obrade [28]..... | 27 |
| Slika 29. | Dijelovi izrađeni primjenom WEDM postupka [30]..... | 27 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 30. | Shema EBM uređaja [4]..... | 29 |
| Slika 31. | Uređaj za bušenje snopom elektrona [32]..... | 30 |
| Slika 32. | Polirana površina dva obratka: a) stvarni izgled [33], b) mikroskopski prikaz [34]. | 30 |
| Slika 33. | Presjek provrta u krom-molibden čeliku pod utjecajem jednog EBM impulsa [3]... | 32 |
| Slika 34. | Laserska obrada lima [35]..... | 33 |
| Slika 35. | Shematski prikaz laserske obrade [36]..... | 34 |
| Slika 36. | Prikaz utjecaja laserskog snopa na obradak [39]..... | 36 |
| Slika 37. | Laserska glava [40]..... | 37 |
| Slika 38. | Shematski prikaz IBM obrade [3]..... | 38 |
| Slika 39. | Prikaz rezanja plazmom [31]..... | 39 |
| Slika 40. | Prikaz plazma obrade s prenesenim i neprenesenim plazma lukom [42]..... | 40 |
| Slika 41. | Prikaz površine reza nastalog PBM postupkom [43]..... | 40 |
| Slika 42. | Podvodno plazma rezanje [44]..... | 42 |
| Slika 43. | Kemijski postupci: a) CHM, b) PCM [4]..... | 43 |
| Slika 44. | Shema CHM postupka [4]..... | 44 |
| Slika 45. | Prikaz dijela trupa aviona obrađenog CHM postupkom [45]..... | 44 |
| Slika 46. | Prikaz nagrivanja ispod maske [4]..... | 45 |
| Slika 47. | Shema PCM uređaja [4]..... | 47 |
| Slika 48. | Prikaz nekih PCM proizvoda [46]..... | 48 |
| Slika 49. | Sustav za PCM obradu [47]..... | 48 |
| Slika 50. | Prikaz nekih proizvoda obrađenih ECM postupkom [48]..... | 49 |
| Slika 51. | Kemijske reakcije ECM postupka [2]..... | 50 |
| Slika 52. | Shema ECM uređaja [4]..... | 51 |
| Slika 53. | ECM obrada [49]..... | 52 |
| Slika 54. | Shematski prikaz ECG postupka [50]..... | 54 |
| Slika 55. | Shematski prikaz EDG postupka [50]..... | 55 |
| Slika 56. | Shematski prikaz ECDM postupka [50]..... | 56 |
| Slika 57. | Shematski prikaz EDCG postupka [50]..... | 56 |
| Slika 58. | Princip EDM obrade potpomognute vibracijom [50]..... | 57 |
| Slika 59. | Shematski prikaz USECM postupka [3]..... | 58 |
| Slika 60. | Prikaz LAECM postupka [50]..... | 59 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Podjela postupaka prema DIN 8580 [1] | 1 |
| Tablica 2. Postupci obrade odvajanjem čestica (DIN 8580) [2] | 2 |
| Tablica 3. Odnos proizvodnosti i hrapavosti površine kod EDM obrade žigom [4] | 25 |
| Tablica 4. Razlike između EDM obrade žigom i žicom [31]..... | 28 |
| Tablica 5. Parametri i mogućnosti EBM procesa [3] | 31 |
| Tablica 6. Usporedba CO ₂ i Nd:YAG lasera [38] | 35 |
| Tablica 7. Usporedba LBM i AWJM postupka [41] | 37 |
| Tablica 8. Parametri PBM obrade [3] | 41 |

POPIS OZNAKA I KRATICA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|--------|---------------|---|
| USM | | Ultrasonic Machining |
| WJM | | Water Jet Machining |
| AWJM | | Abrasive Water Jet Machining |
| IJM | | Ice Jet Machining |
| EDM | | Electric Discharge Machining |
| EBM | | Electron Beam Machining |
| LBM | | Laser Beam Machining |
| IBM | | Ion Beam Machining |
| PBM | | Plasma Beam Machining |
| CHM | | Chemical Milling |
| PCM | | Photochemical Machining |
| ECM | | Electrochemical Machining |
| CARD | | Computer Aided Resonator Design |
| 3D | | trodimenzionalno |
| R_a | μm | srednje odstupanje profila |
| I | A | jakost struje |
| U | V | napon |
| A | mm^2 | površina |
| WEDM | | Wire Electric Discharge Machining |
| ϕ | mm | promjer |
| v | mm/min | brzina rezanja |
| DC | | Direct Current - istosmjerna struja |
| ECG | | Electrochemical Grinding |
| EDG | | Electric Discharge Grinding |
| ECDM | | Electrochemical Discharge Machining |
| EDCG | | Electrochemical Discharge Grinding |
| PCD | | polikristalni dijamant |
| USECM | | Ultrasonic-Assisted Electrochemical Machining |
| LAECM | | Laser-Assisted Electrochemical Machining |
| LAEDM | | Laser-Assisted Electric Discharge Machining |

SAŽETAK

Visoki zahtjevi koje današnje tržište postavlja industriji prevazišli su okvire konvencionalne obrade odvajanjem čestica. Specifični materijali, zahtjevnost konstrukcija i geometrija proizvoda, specijalne namjene i uvjeti kojima će proizvod biti izložen, potaknuli su razvoj modernih nekonvencionalnih postupaka obrade koji se ne temelje na primjeni reznih alata. Između alata i obratka nije potreban izravan kontakt. Danas postoji puno nekonvencionalnih postupaka koji se razlikuju po vrsti energije koju koriste, po namjeni, mogućnostima i područjima primjene. Kombiniranjem konvencionalnih i nekonvencionalnih postupaka i njihovim usavršavanjem sve značajnije mjesto u proizvodnji zauzimaju još napredniji hibridni postupci obrade.

Ključne riječi: nekonvencionalni postupci obrade, hibridni postupci obrade

SUMMARY

The high demands placed on the market by the industry have gone beyond conventional machining processes. Specific materials, demanding design and product geometry, special applications and conditions to which the product will be exposed, have stimulated the development of modern non-conventional machining processes that are not based on the use of cutting tools. Direct contact between the tool and the workpiece is not required. There are many non-conventional processes today that vary in the type of energy they use, capability, and application. By improving and combining conventional and non-conventional processes, even more advanced hybrid machining processes are becoming increasingly important in production.

Key words: non-conventional machining processes, hybrid machining processes

1. UVOD

Znanost i tehnologija, prateći potrebe suvremenog čovjeka, svakodnevno nastoje stvoriti što savršenije proizvode uz što manje troškove. Zbog toga se razvijaju novi proizvodni postupci i njihov broj se neprestano povećava.

U tehnologiji proizvodnje pod proizvodnim postupcima podrazumijevaju se svi postupci za izradu dijelova, a prema normi DIN 8580 svi proizvodni postupci podijeljeni su u šest osnovnih skupina [Tablica 1], ovisno o tome da li se postupkom kohezija materijala obratka stvara, održava, smanjuje ili povećava.

Tablica 1. Podjela postupaka prema DIN 8580 [1]

| PROMJENA | OBILKA | STVORITI POVEZANOST | ZADRŽATI POVEZANOST | UMANJITI POVEZANOST | UMNOŽITI POVEZANOST | |
|-----------|--|--|----------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| | | glavna skupina 1 | glavna skupina 2 | glavna skupina 3 | glavna skupina 4 | glavna skupina 5 |
| | PRA - OBLIKOVANJE | PRE - OBLIKOVANJE | ODVAJANJE | POVEZIVANJE (spajanje) | PREVLAČENJE (oslojavanje) | |
| | (stvaranje praoblika i prastrukture) | glavna skupina 6 | | | | |
| SVOJSTAVA | PROMJENA SVOJSTAVA IZRATKA (prestrukturiranje) | | | | | |
| | | premještanjem čestica tvari | izlučivanjem čestica tvari | unošenjem čestica tvari | | |
| | POSTUPCI STVARANJA OBLIKA | POSTUPCI PROMJENE OBLIKA i/ili SVOJSTAVA | | | | |

Osnovne skupine su: postupci praoblikovanja, preoblikovanja, odvajanja, povezivanja, prevlačenja i postupci promjene svojstava izratka.

Postupci praoblikovanja u osnovi imaju stvaranje kompaktnog obratka od bezobličnih tvari kao što su kapljvine, granulati i dr. Najznačajniji u ovoj skupini je postupak lijevanja.

Postupcima preoblikovanja polazni materijal dobiva novi oblik bez dodavanja ili uklanjanja materijala. Najznačajniji postupci ove skupine su valjanje, kovanje, izvlačenje i savijanje.

Postupci odvajanja u osnovi imaju raskidanje kohezijskih veza. Daljnja podjela je prikazana u tablici 2.

Postupcima spajanja između materijala se stvaraju nove kohezijske veze. Najvažniji postupci spajanja su zavarivanje, lemljenje i lijepljenje.

Postupcima prevlačenja obratku se dodaje novi prijanjajući sloj. To je npr. postupak galvanskog prevlačenja.

U postupke kojima se mijenjaju svojstva materijala spadaju postupci toplinske obrade, npr. žarenje i otvrdnjavanje. [1]

Tablica 2. Postupci obrade odvajanjem čestica (DIN 8580) [2]

| Postupci obrade odvajanjem čestica (DIN 8580) | | | |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|---|
| RUČNI | STROJNI | | |
| - ručnim alatima - turpijanje - bušenje - piljenje - glodanje | Rezni alat s oštricom | | Rezni alat bez oštrice |
| | Geometrijski definirana oštrica | Geometrijski nedefinirana oštrica | NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADNE |
| | - tokarenje | - brušenje | |
| | - glodanje | - superfiniš | |
| | - bušenje, upuštanje, razvrtavanje | - honanje | |
| | - blanjanje, dubljenje | - lepanje | |
| | - piljenje | | |
| | - provlačenje | | |

Postupci u kojima se obrada vrši reznim alatom s oštricom nazivaju se konvencionalni postupci obrade. Razvojem i proizvodnjom novih materijala kao što su nehrđajući čelici, titan, legure na bazi nikla, kobalta, molibdena i dr., nametnula se potreba za novim načinima obrade jer se postojećim konvencionalnim postupcima, zbog njihovih specifičnih svojstava, ovi materijali nisu mogli obrađivati ili se klasičnom obradom nisu mogli ispuniti potrebni zahtjevi proizvoda. Poseban problem predstavljala je izrada reznih alata za obradu novih materijala s obzirom da su dotadašnji alati imali lošija tehnička svojstva (manju tvrdoću i čvrstoću) od novih materijala. Stoga su razvijeni postupci obrade u kojima izravni kontakt između alata i obratka nije potreban. Takvi moderni postupci obrade odvajanjem nazvani su nekonvencionalnim postupcima obrade budući da su temeljeni na bitno drugačijim principima obrade u odnosu na konvencionalne postupke.

1.1. Osnovne značajke konvencionalnih i nekonvencionalnih postupaka obrade

Nekonvencionalni postupci obrade omogućili su vrlo preciznu i znatno bržu proizvodnju jako sitnih i izrazito složenih oblika proizvoda ili dijelova proizvoda od visokokvalitetnih metalnih i nemetalnih materijala.

Do danas je razvijeno puno različitih nekonvencionalnih postupaka obrade koji se po svojim karakteristikama sasvim razlikuju od konvencionalnih postupaka obrade ovisno o vrsti energije koju koriste, o osnovnom mehanizmu kojim se ostvaruje obrada, o prijenosnom mediju i izvoru energije.

Osnovne značajke konvencionalnih postupaka obrade odvajanjem su:

- potreban fizički kontakt između alata i obratka,
- alat mora biti tvrdi od obratka,
- osnovni mehanizam odvajanja čestica je mehaničko usitnjavanje.

Osnovne značajke nekonvencionalnih postupaka obrade odvajanjem su:

- između alata i obratka nije potreban izravan kontakt,
- alat može biti mekši od obratka,
- na proizvodnost obrade najčešće ne utječu mehanička nego fizikalna svojstva obratka,
- čestice se mogu odvajati topljenjem, isparavanjem, gibanjem iona ili kemijskim otapanjem. [2]

Nekonvencionalni postupci obrade omogućuju vrlo tanke rezove pa im je otpadni dio materijala puno manji nego kod konvencionalnih postupaka odvajanjem, čime se postiže veća ekonomičnost što je posebno značajno kod obrade skupih materijala.

Pogodni su za obradu površina koje su teško pristupačne klasičnim alatima, kod geometrijski složenih oblika, kod dijelova izrazito malih dimenzija, ali i kod obrade predmeta velikih dimenzija na kojima je potrebno izvršiti manje operacije obrade koje bi se teško izvele na velikim strojevima pa se za to primjenjuju nekonvencionalni postupci, a izvode se malom mobilnom opremom.

Ovi postupci također pružaju mogućnost visokog stupnja mehanizacije procesa obrade i potpune automatizacije.

Zbog svega navedenog nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem imaju sve značajniju primjenu, ali ipak ne mogu u potpunosti zamijeniti konvencionalne postupke obrade jer u određenim uvjetima ne mogu biti jednako učinkoviti.

Pri odabiru konvencionalnih ili nekonvencionalnih postupaka obrade uvijek se u obzir uzimaju

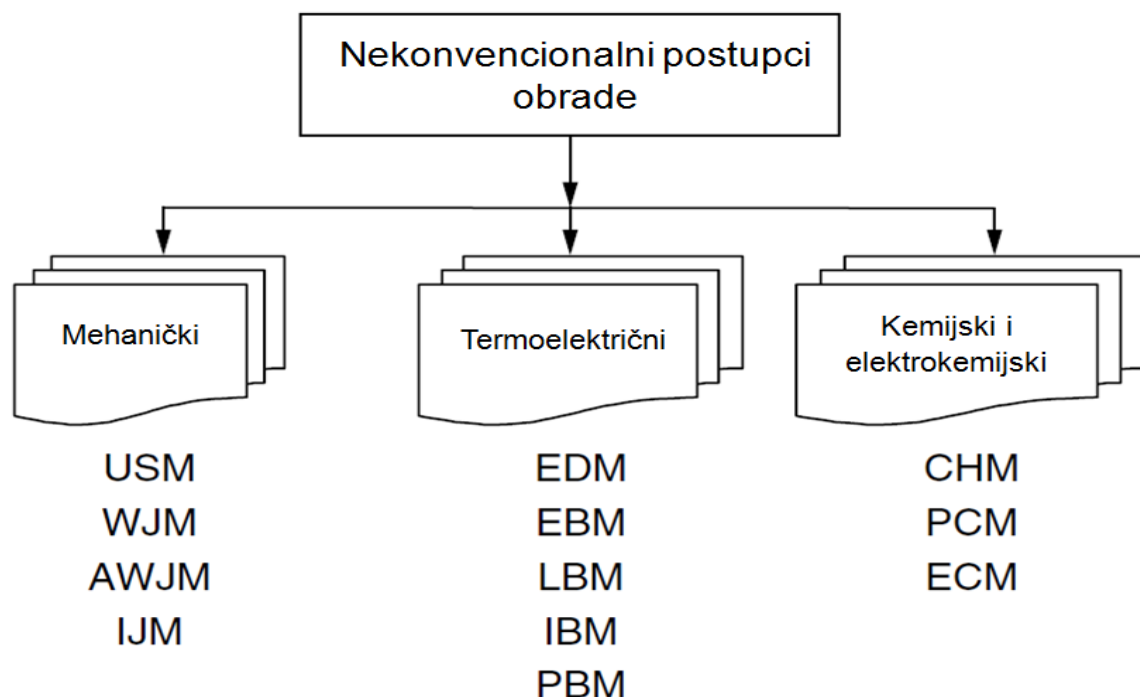
svojstva materijala i geometrijske značajke dijelova ili proizvoda, parametri i mogućnosti postupaka obrade te faktori njihove ekonomske isplativosti.

1.2. Podjela nekonvencionalnih postupaka obrade odvajanjem

Osnovni kriterij prema kojem se dijele nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem je vrsta energije koja se primjenjuje u procesu obrade. Postoje različite podjele ovisno o autorima. Prema autoru prof. dr. sc. H. El-Hoffyju, ovisno o vrsti primijenjene energije, razlikuju se tri glavne skupine nekonvencionalnih postupaka: mehanički, termoelektrični, kemijski i elektrokemijski postupci [Slika 1]. [3]

Uz navedene skupine postoji i posebna skupina tzv. hibridnih postupaka u kojima se kombiniraju dvije ili više vrsta nekonvencionalnih i konvencionalnih postupaka.

Osim prema vrsti energije nekonvencionalni postupci mogu se podijeliti i prema osnovnom mehanizmu kojim se ostvaruje odvajanje čestica: rezanje, erozija, gibanje iona, fuzija i isparavanje te prema vrsti medija kojim se energija prenosi, a to su: mehanički kontakt, elektroni, ionski mlaz, elektroliti i dr. [4]



Slika 1. Shematski prikaz klasifikacije prema vrsti energije koja se primjenjuje [3]

Mehanički postupci:

- USM - ultrazvučna obrada (Ultrasonic Machining)
- WJM - obrada vodenim mlazom (Water Jet Machining)
- AWJM - obrada abrazivnim vodenim mlazom (Abrasive Water Jet Machining)
- IJM - obrada mlazom leda (Ice Jet Machining)

Termoelektrični postupci:

- EDM - elektroerozijska obrada (Electric Discharge Machining)
- EBM - obrada snopom elektrona (Electron Beam Machining)
- LBM - laserska obrada (Laser Beam Machining)
- IBM - obrada snopom iona (Ion Beam Machining)
- PBM - obrada plazmom (Plasma Beam Machining)

Kemijski i elektrokemijski postupci:

- CHM - kemijsko glodanje (Chemical Milling)
- PCM - fotokemijska obrada (Photochemical Machining)
- ECM - elektrokemijska obrada (Electrochemical Machining)

2. MEHANIČKI NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADJE

U mehaničkim postupcima obrade kao osnovni oblik energije koristi se mehanička energija. Odvajanje čestica materijala vrši se brzim oscilirajućim alatom pri ultrazvučnim frekvencijama (USM), erozivnim djelovanjem vodenoga mlaza (WJM) kojemu se mogu dodavati i abrazivne čestice (AWJM) ili ledom (IJM).

2.1. Ultrazvučna obrada - Ultrasonic Machining (USM)

Ultrazvučna obrada se izvodi pomoću aksijalno oscilirajućeg alata, koji nije u izravnom kontaktu s obratkom, amplitude 10 - 40 μm na ultrazvučnim frekvencijama 18 - 20 kHz. Koristi se pri izradi provrta ili šupljina na tvrdim i krhkim materijalima. Alat se izrađuje od čelika ili mesinga. Tijekom oscilacije između obratka i alata dovodi se abrazivna suspenzija B_4C ili SiC . Te abrazivne čestice na površini obratka uzrokuju odvajanje čestica obratka. [3]

2.1.1. Princip rada ultrazvučne obrade

Glavni elementi ultrazvučnog sustava su oscilirajući sustav, visokofrekventni generator i sustav za dovođenje abrazivne suspenzije.

Oscilirajući sustav je najvažniji element, a sastoji se od elektroakustičnog pretvarača - oscilatora, sonotrode i alata.

Sonotroda prenosi mehaničku energiju na alat, koncentrira snagu na ciljano područje obrade i pojačava amplitudu. [4]

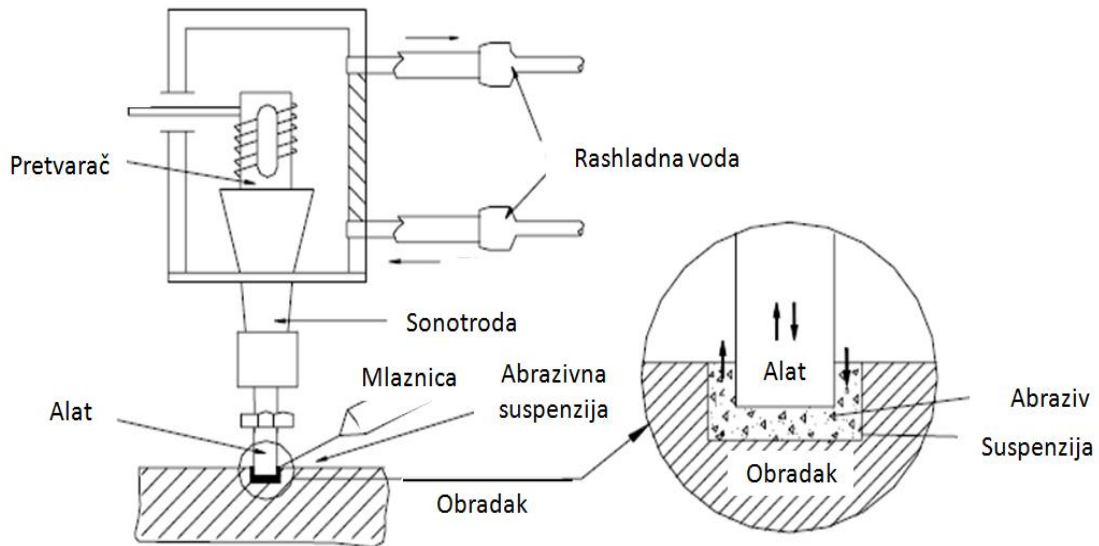
Za pravilnu koncentraciju energije duž obratka važnu ulogu ima oblik sonotrode. Ona može biti stožastog, eksponencijalnog i stepenasto-cilindričnog oblika. Za prijenos maksimalne energije cijeli sklop za ultrazvučnu obradu mora biti podešen na istu frekvenciju. Ako bi osnovna i rezonantna frekvencija bile različite, pojavile bi se vibracije različitih frekvencija što bi dovelo do gubitka energije i oštećenja određenih komponenti. Za konstruiranje sonotroda se koristi softver CARD (Computer Aided Resonator Design). [5]

Oscilator pretvara električne impulse u mehaničke oscilacije. Postoje dva tipa: magnetrostrikijski i piezoelektrični.

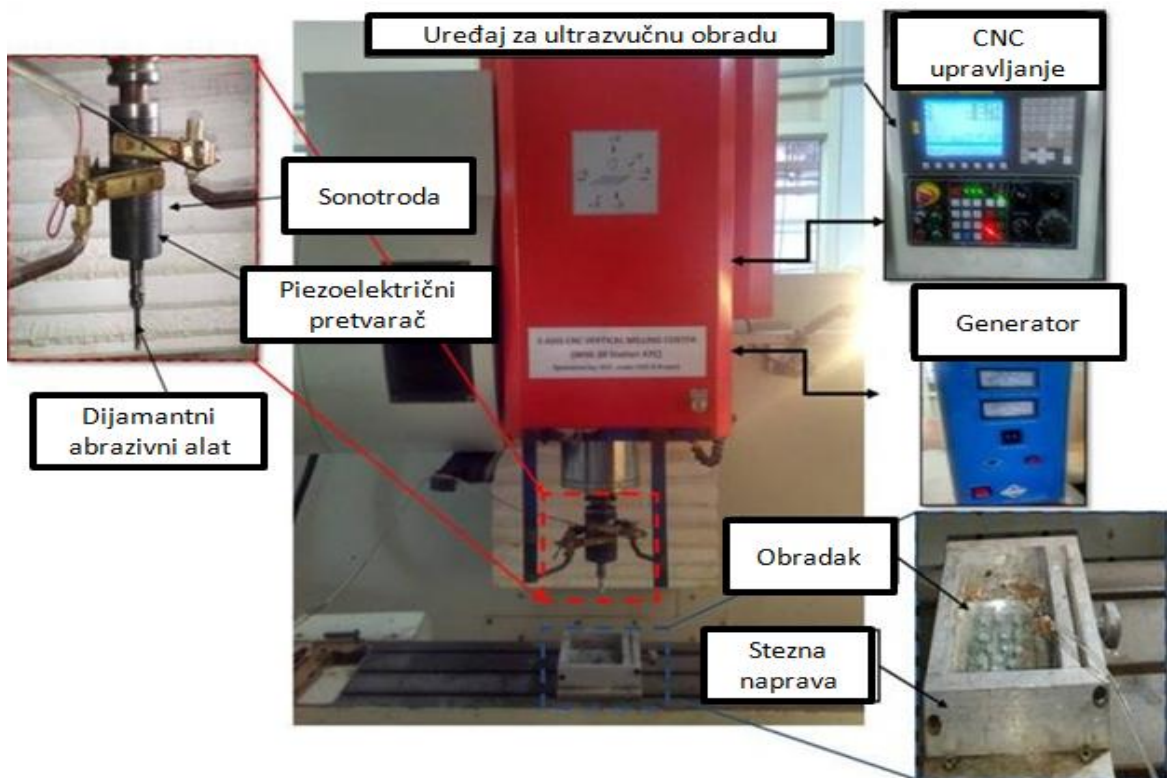
Magnetrostrikijski pretvarač je jezgra oko koje se nalazi bakreni namotaj. Kada se nađe u promjenjivom magnetskom polju mijenja dimenzije ovisno o jačini polja. Visokofrekventni generator napaja namotaje izmjeničnom strujom i stvara promjenjivo magnetsko polje visoke frekvencije. Jezgra promjenom dimenzija izaziva mehaničke oscilacije. Glavni mu je nedostatak

velik gubitak energije koja se pretvara u toplinu te je potrebno hlađenje.

Piezoelektrični pretvarači rade na istom principu, ali su puno jednostavniji, ne zagrijevaju se i ostvaruju visok stupanj iskoristivosti (do 95%). [4]



Slika 2. Shema opreme za obradu ultrazvukom [6]

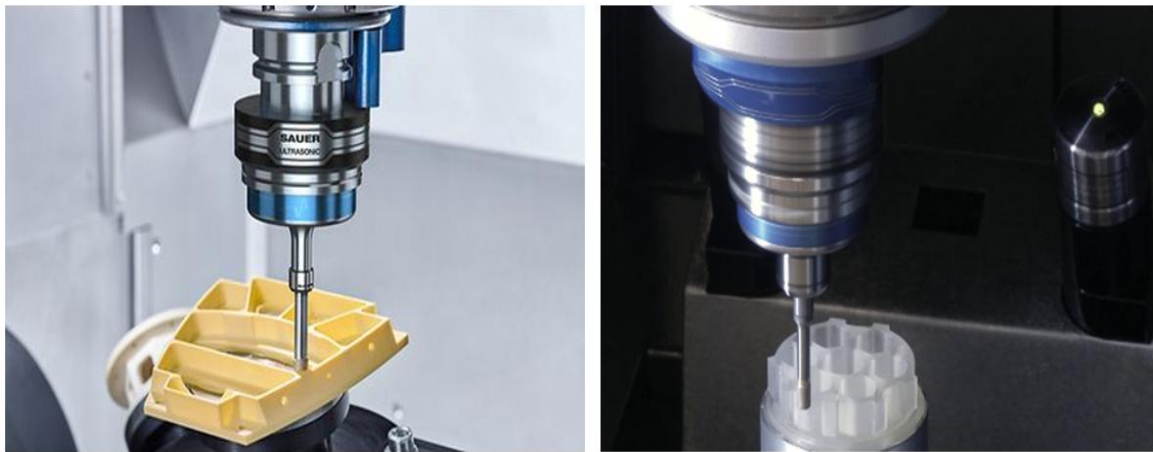


Slika 3. Sustav za ultrazvučnu obradu [7]

2.1.2. Glavne značajke postupka obrade ultrazvukom

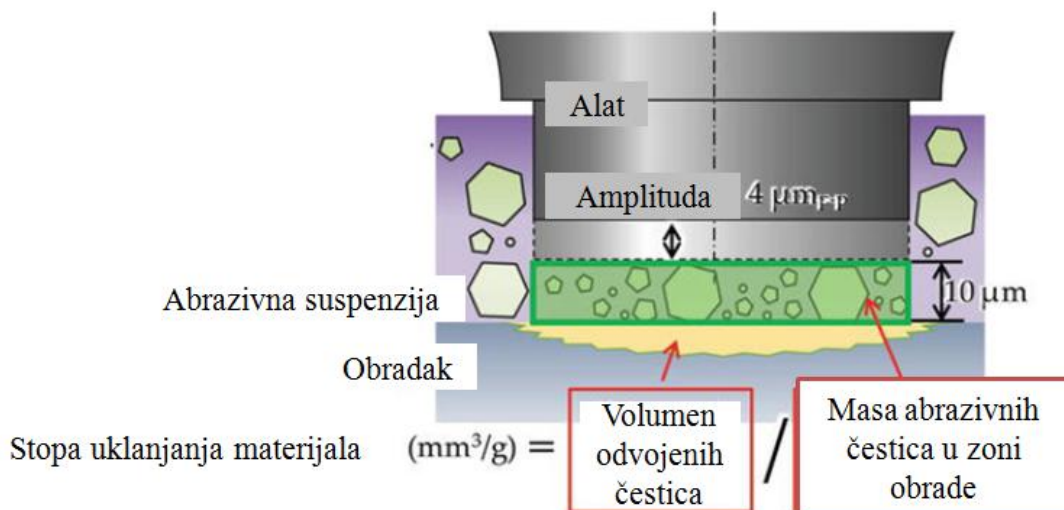
Ultrazvučnom obradom obrađuju se materijali tvrdoće od 40 do 60 HRC poput karbida, keramike i volframovog stakla koji se ne mogu obraditi konvencionalnim postupcima. Koristi se za obradu okruglih, kvadratnih i nepravilno oblikovanih površina i šupljina zakrivljenih ili spiralnih središnjih linija. [8]

Mogu se izvoditi radnje poput bušenja, brušenja i glodanja. [Slika 4]



Slika 4. Primjer obrade ultrazvukom [9]

Točnost obrade značajno ovisi o granulaciji abrazivnih zrna. Većim zrnima postiže se brža obrada, ali je niža kvaliteta obrađene površine. Na slici 5 su prikazane abrazivne čestice u zoni obrade.

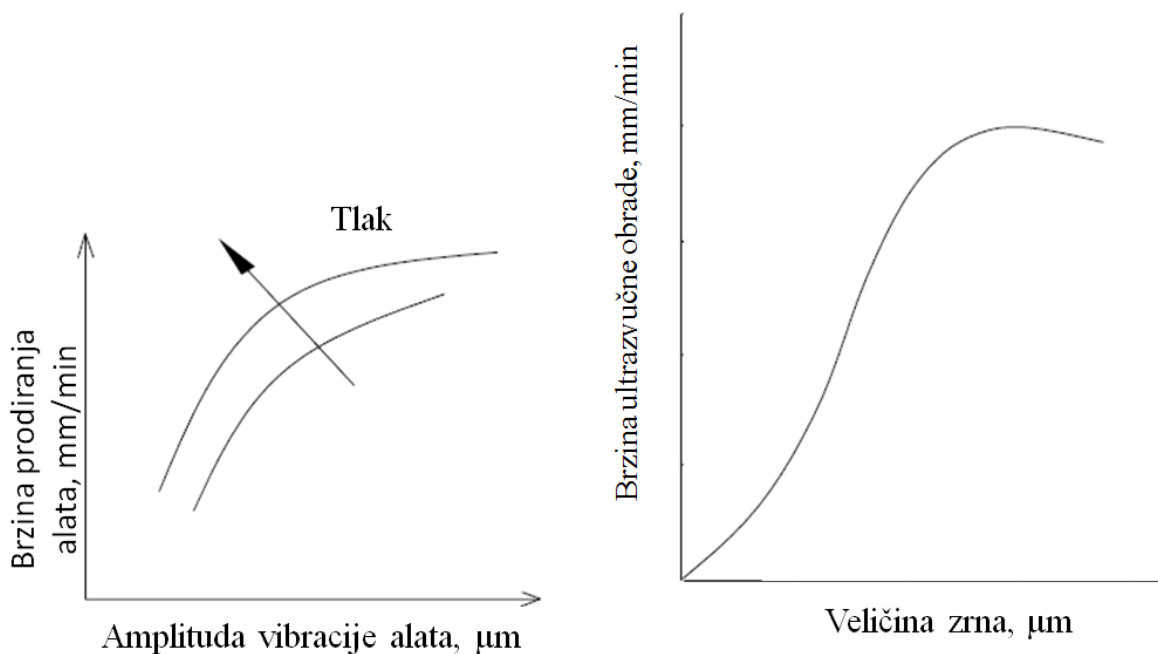


Slika 5. Shematski prikaz abrazivnih čestica u zoni obrade [10]

Hrapavost površine obrađene ultrazvučnim postupkom ujednačena je u svim pravcima s tim da je kvaliteta obrade bočnih površina, zbog poprečnih oscilacija alata, nešto manja nego kod čelnih površina. [3]

Proizvodnost ultrazvučne obrade uglavnom ovisi o sljedećim parametrima: amplitudi i frekvenciji alata, veličini i vrsti abrazivnih zrna, vrsti tekućine i koncentraciji abraziva u suspenziji, načinu dovođenja abrazivne suspenzije, materijalu alata i materijalu obratka, silama pritiska alata, površini koja se obrađuje i dr. Kvalitativni prikaz ovisnosti brzine o amplitudi alata i veličini zrna dan je na slici 6.

Proizvodnost raste povećanjem amplitude i frekvencije, kao i povećanjem granulacije abrazivnih zrna. [8]



Slika 6. Kvalitativni prikaz ovisnosti brzine ultrazvučne obrade o amplitudi alata i veličini abrazivnih zrna [6]

Prednosti ultrazvučne obrade [11],[12]:

- u radu se ne stvara toplina, stoga nema promjena u mikrostrukturi radnog materijala kao ni u kemijskim i fizikalnim svojstvima;
- trošak uklanjanja materijala je nizak;
- na obratku nema zaostalih naprezanja;
- mogu se izrađivati vrlo precizni profili s dobrom završnom obradom;

- rad je siguran i ne proizvodi buku.

Ograničenja i nedostaci postupka [11],[12]:

- ultrazvučna obrada ima veću potrošnju energije i manju stopu uklanjanja materijala nego konvencionalni postupci;
- trošenje alata je relativno veliko;
- područje obrade i dubina su ograničeni;
- visoki su početni troškovi obrade i alata;
- ovim se postupkom teško obrađuju mekši materijali;
- potrebno je vrijeme za zamjenu suspenzije;
- proizvodnost je niska.

2.2. Obrada vodenim mlazom - Water Jet Machining (WJM)

Pri obradi vodenim mlazom vodeni mlaz pod visokim tlakom izlazi kroz vrlo mali otvor vrlo velikom brzinom te u sudaru s obratkom izaziva odvajanje čestica materijala obratka stvarajući uski utor - rez. Na taj način mlaz vode zapravo služi kao rezni alat.

Ova metoda koristi se uglavnom za obradu mekših materijala i nije pogodna za tvrde materijale.

2.2.1. Princip rada obrade vodenim mlazom

Postrojenje za obradu vodenim mlazom sadrži hidrauličku pumpu, pojačivač tlaka, akumulator, visokotlačne cijevi, mlaznicu i hvatač vode.

Hidraulička pumpa se napaja strujom iz elektromotora i klipnu pumpu opskrbljuje uljem. Ona osigurava fleksibilnost reznog mlaza.

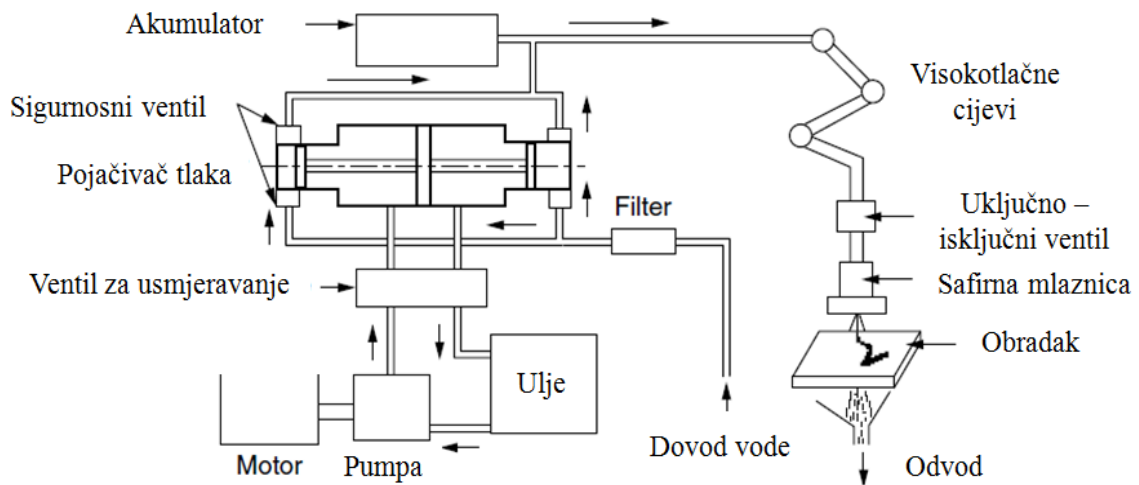
Pojačivač tlaka prihvaća vodu niskoga tlaka te je pomoću akumulatora istiskuje pod vrlo visokim tlakom (3800 bara ili više). Ima klip na obje strane. Na jednoj strani ima ulazni hod niskoga tlaka, a na drugoj izlazni visokoga tlaka. Tijekom hoda ulaznog klipa voda ulazi u područje visokog tlaka te, nakon što se klip okrene, komprimirana izlazi pod visokim tlakom.

Akumulator održava kontinuirani protok vode, a visokotlačne cijevi prenose vodu do rezne glave.

Ispod obratka nalazi se hvatač koji prihvaća iskorištenu vodu i odvodi je. [3]

Najvažniji dio uređaja je rezna glava s mlaznicom. Ona direktno utječe na kvalitetu mlaza, a time i reza.

Mlaznica se izrađuje od rubina, safira ili dijamanta. Promjer joj je od 0,05 do 0,5 mm, a brzina vodenog mlaza je oko 900 m/s. [2]



Slika 7. Shema rada postupka s vodenim mlazom [3]



Slika 8. Sustav za obradu vodenim mlazom [13]

2.2.2. Glavne značajke postupka obrade vodenim mlazom

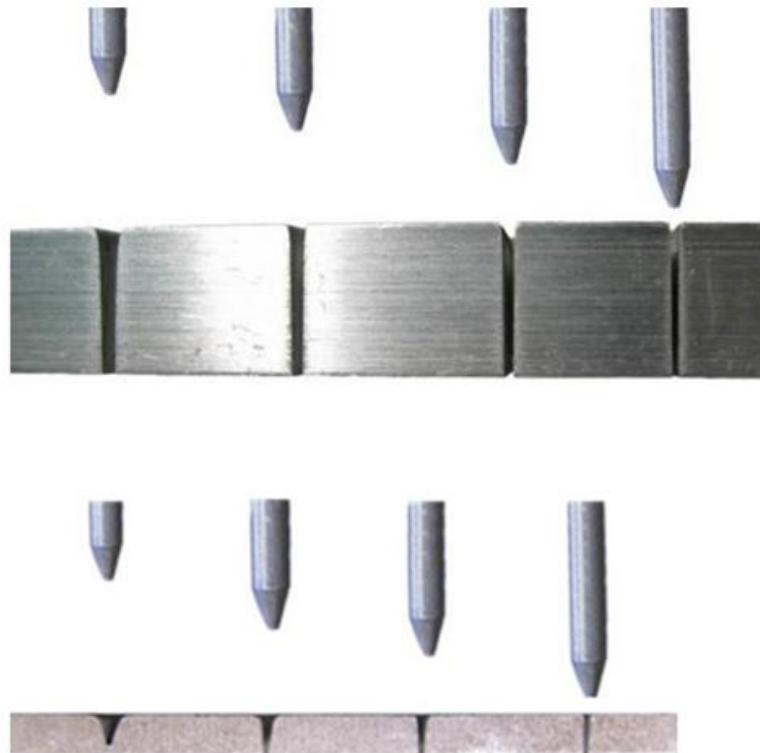
Postupak obrade vodenim mlazom primjenjuje se za obradu mekših materijala i nije učinkovit za obradu tvrdih materijala. Za tvrde materijale primjenjuje se obrada abrazivnim vodenim mlazom.

[3]



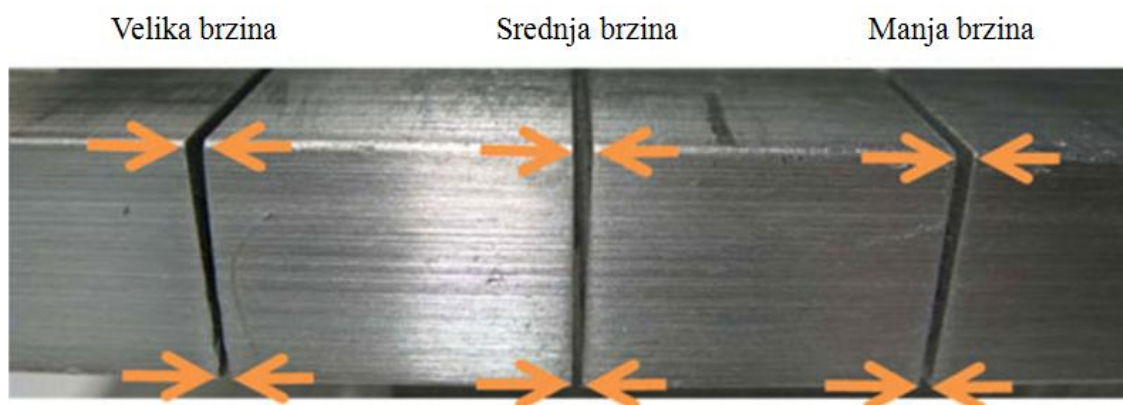
Slika 9. Obrada aluminija vodenim mlazom [14]

Za najbolju kvalitetu rezanja potrebno je održavati optimalnu udaljenost između mlaznice i obratka. Povećanjem udaljenosti mlaz se raspršuje. Upravljanje vodenim mlazom mora biti automatsko.



Slika 10. Utjecaj udaljenosti mlaznice na rez [15]

Pri velikim brzinama mlaza povećava se kut između vrha i dna obratka pa je širina reza veća na vrhu. Stoga je obrada točnija pri manjim brzinama mlaza. [15]



Slika 11. Utjecaj brzine vodenog mlaza na rez [15]

Kao prednosti postupka može se uzeti sljedeće [3]:

- postupkom obrade vodenim mlazom postiže se visoka kvaliteta obrađene površine bez mikrostrukturnih promjena;

- mogu se obrađivati vrlo zahtjevni geometrijski oblici;
- prilikom rezanja ne stvara se toplina pa nema toplinske deformacije materijala;
- budući da ne dolazi do zagrijavanja, ovo je najprikladniji postupak za obradu u eksplozivnim okruženjima;
- postupak obrade vodenim mlazom prihvatljiv je s ekonomskog stajališta; voda kao alat ne zahtijeva oštrenje, podmazivanje, a i ne troši se kao klasični rezni alati; jeftina je i dostupna;
- osim obrade, moguće je istim sustavom izvršiti i čišćenje;
- buka je svedena na minimum;
- prikladan je i za obradu kancerogenih i toksičnih materijala kao što su azbest ili staklena vuna jer se ne stvara toksična prašina kao kod konvencionalnih postupaka.

Ograničenja i nedostaci su [11],[15]:

- kod rezanja nije moguće dobiti savršeno oštre bridove jer je mlaz okrugao;
- ograničen je broj materijala koji se mogu isplativo rezati;
- dijelovi veće debljine ne mogu se ekonomično i precizno odvojiti;
- pojavljuje se netočnost u vidu koničnosti.

U usporedbi s konvencionalnim postupcima obrade, kao što je npr. glodanje, prednost obrade vodenim mlazom je kraće ukupno vrijeme obrade jer je postavljanje i učvršćivanje obratka kod glodanja zahtjevnije. Vodenim mlazom se također mogu obraditi i materijali koje je nemoguće obraditi glodanjem.

Na proizvodnost utječu mnogi faktori od kojih su najznačajniji: konstrukcija mlaznice, materijal i obrada unutrašnjeg profila mlaznice, vrsta materijala koji se obrađuje, kut udara mlaza, broj prolaza, širina reza, debljina materijala i dr. [16]

2.3. Obrada abrazivnim vodenim mlazom - Abrasive Water Jet Machining (AWJM)

Postupak obrade abrazivnim vodenim mlazom kao rezni alat koristi vodeni mlaz kojemu se dodaje abrazivno sredstvo. Time se znatno povećava učinak rezanja. Ovim se postupkom, za razliku od postupka obrade samim vodenim mlazom mogu obrađivati i tvrdi materijali (npr. kamen), točnije gotovo svi materijali. Kod AWJM obrade redovito se koriste i višeosni sustavi koji omogućavaju gibanje alata po nekoliko osi pod različitim kutovima [Slika 16].



Slika 12. Dijelovi izrađeni AWJM postupkom [17]



Slika 13. Obrada kamena [18]

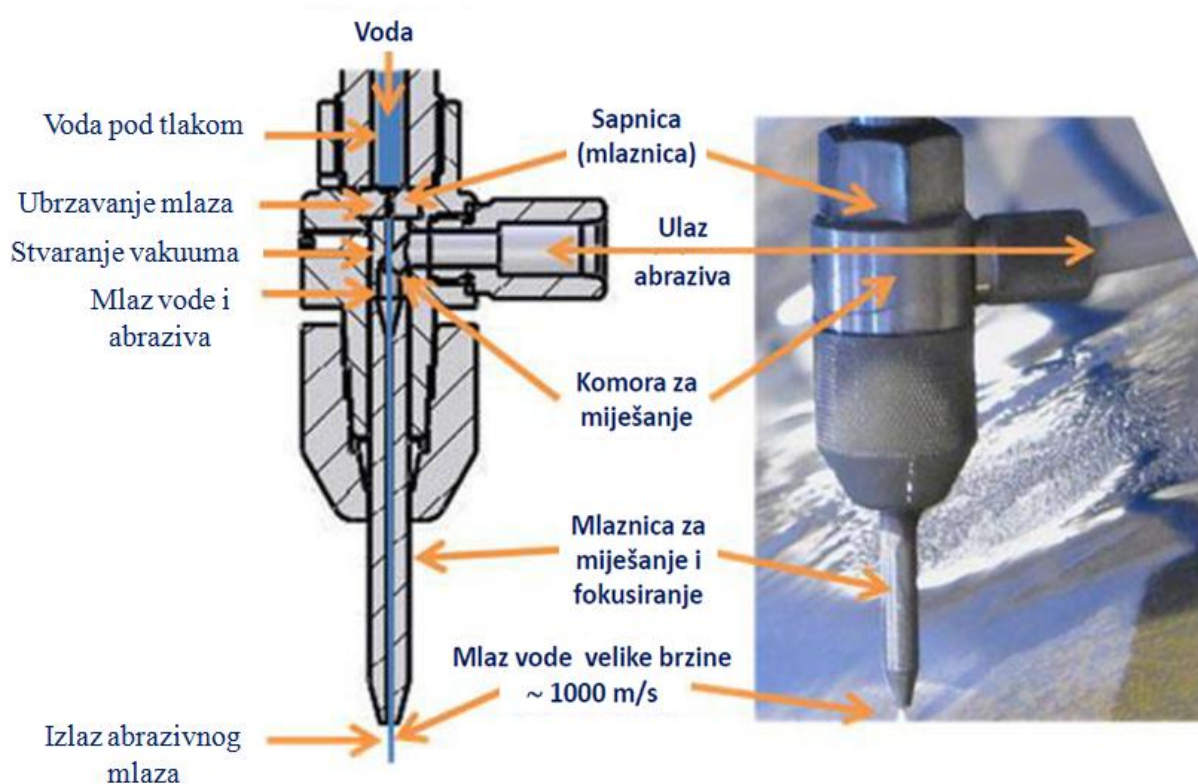
Princip rada isti je kao i kod postupka obrade vodenim mlazom, ali je samo postrojenje nešto složenije jer mora sadržavati dovod abrazivnog sredstva i komoru za njegovo miješanje s vodom. U komoru za miješanje velikom brzinom ulazi vodeni mlaz i stvara vakuum. Vakuum usisava

abrazivno sredstvo pomiješano sa zrakom i ono se, u komori za miješanje, miješa s vodom. Kroz mlaznicu za abraziv prolazi abrazivni mlaz koji služi kao rezni alat. [3]

Kao abrazivno sredstvo koriste se sitna zrna SiO_2 , SiC i Al_2O_3 , nepravilnog oblika i različitih veličina (10 - 50 μm). Maseni protok abrazivnog sredstva kreće se u rasponu 2 - 20 g/min. Postoje i sustavi kojima se abrazivi nakon upotrebe mogu reciklirati.

Veličina abrazivnih zrna utječe na protok abraziva i porastom brzine protoka abraziva povećava se proizvodnost. Nakon postizanja optimalne vrijednosti proizvodnost opada s daljnjim povećanjem brzine protoka abraziva. Proizvodnost također raste i s porastom tlaka. [19]

Mlaznica se izrađuje od tvrdoga metala (safir, WC, B_4C), promjer joj je od 0,5 do 1,2 mm, a dužina 50 do 100 mm. [2]



Slika 14. Princip rada abrazivnog vodenog mlaza [15]

Abrazivni mlaz, kao i vodeni, u procesu obrade nema topline pa nema ni strukturnih deformacija na površini obratka. Jedan abrazivni mlaz može izvesti niz postupaka obrade kao što su rezanje, piljenje, bušenje, glodanje, za što bi trebalo nekoliko alata konvencionalne obrade.

Kvaliteta površine ovisi o dubini obrade. [15]



Slika 15. Kvaliteta površine reza ovisno o posmičnoj brzini [15]



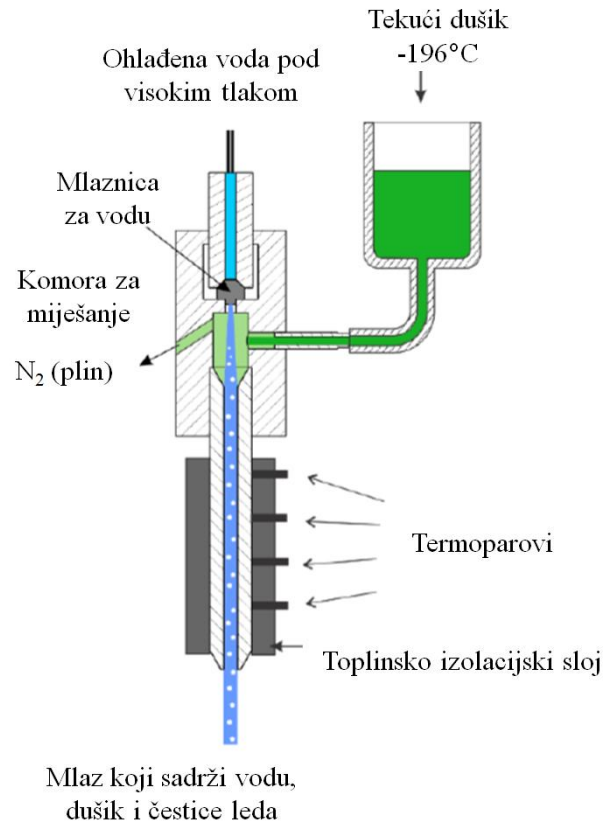
Slika 16. Višeosna AWJM obrada [20]

2.4. Obrada mlazom leda - Ice Jet Machining (IJM)

Postupak obrade mlazom leda sličan je postupku obrade abrazivnim vodenim mlazom samo se kao abrazivno sredstvo koristi led.

Abrazivne čestice leda mogu se dobiti na dva načina:

1. led se stvara u reznoj glavi tako što se u komoru za miješanje abraziva dodaje tekući dušik;
2. led nastao izvan postrojenja dovodi se u komoru za miješanje. [21]



Slika 17. Shema postupka obrade mlazom leda [21]

Ovim postupkom mogu se obrađivati gotovo sve vrste materijala neovisno o njihovom sastavu, strukturi, tvrdoći ili drugim fizikalnim svojstvima, što nije moguće konvencionalnim postupcima obrade.

Ima sve prednosti abrazivnog vodenog mlaza, ali je unaprijeđena čistoća postupka jer nema drugog otpadnog materijala osim vode.

Postupak je izuzetno pogodan za primjenu u medicinskoj i prehrambenoj industriji gdje su poželjne što niže temperature obrade kako bi se spriječio rast bakterija. [21]

3. TERMOELEKTRIČNI NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADÉ

Termoelektrični postupci obrade rade na principu toplinske i električne energije i predstavljaju najznačajniju grupu nekonvencionalnih postupaka obrade. Lokaliziranom koncentracijom topline dolazi do taljenja, isparavanja ili sagorijevanja materijala obratka. Pri tom izvori topline i prijenosni mediji mogu biti različiti pa ovisno o njima postoje i različite vrste termoelektričnih postupaka:

- elektroerozijski,
- obrada snopom elektrona,
- obrada laserom,
- obrada snopom iona,
- obrada plazmom.

3.1. Elektroerozijska obrada - Electric Discharge Machining (EDM)

Elektroerozijski postupci obrade pojavili su se među prvim nekonvencionalnim postupcima obrade.

Glavne značajke elektroerozijske obrade [4]:

- Temelje se na električnoj energiji koja se pretvara u toplinsku te se njome otklanja neželjeni dio materijala kako bi se na obratku postigao traženi oblik.
- Ovim se postupcima mogu izvoditi razne vrste operacija, npr. bušenje, rezanje, brušenje, 3D oblikovanje, a imaju i izuzetnu važnost u mikroobradama.
- Kao alat se koriste elektrode.
- Nema mehaničkih vibracija kao kod konvencionalnih postupaka obrade pa na površini nema mehanički uzrokovanih deformacija, ali je zato izuzetno važan toplinski utjecaj na površinu.
- Kod elektroerozijskih postupaka obrade najznačajnije svojstvo je električna vodljivost alata i obratka jer se ovaj postupak može primjenjivati samo kod elektrovodljivih materijala.
- Mehanička svojstva, kao što su čvrstoća, tvrdoća i žilavost, nemaju presudnu važnost.

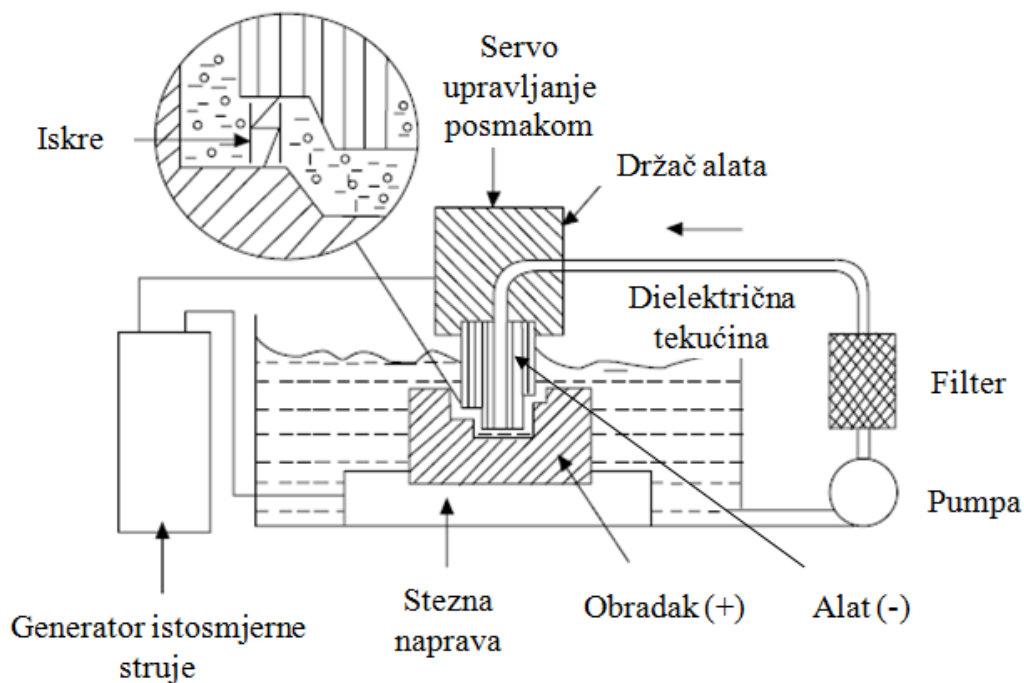
Postoje dvije osnovne vrste elektroerozijskih postupaka:

1. elektroerozijska obrada žigom,
2. elektroerozijska obrada žicom.

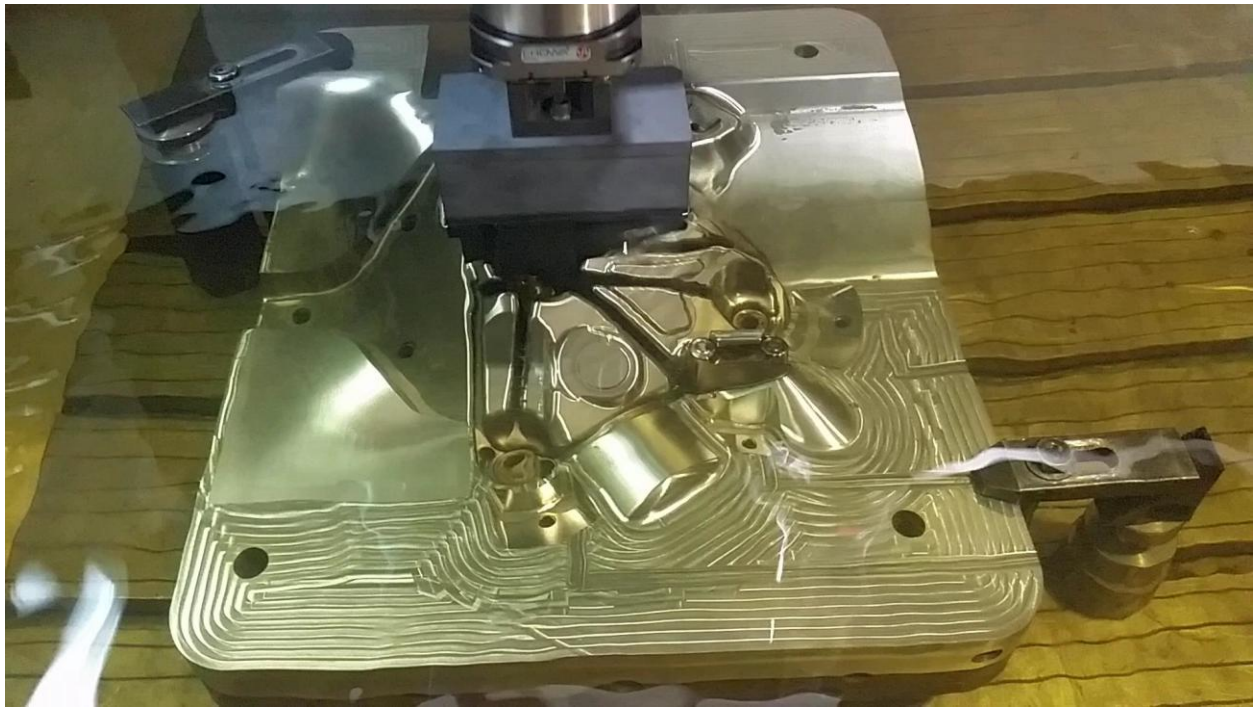
3.1.1. Elektroerozijska obrada žigom

3.1.1.1. Princip rada elektroerozijske obrade žigom

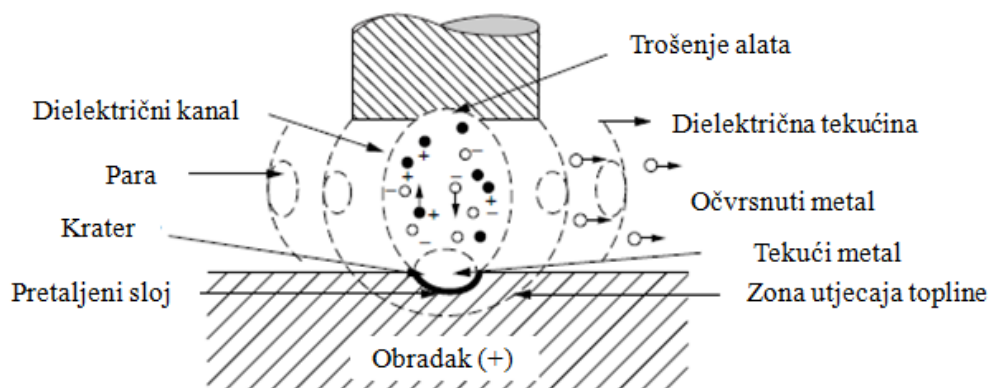
Sustav za elektroerozijsku obradu žigom sastoji se od impulsnog generatora istosmjerne struje na kojeg su spojene dvije elektrode. Alat je najčešće negativna elektroda - katoda, a obradak je pozitivna elektroda - anoda. Elektrode su uronjene u dielektričnu tekućinu i međusobno su razmaknute. Postupak se zasniva na principu električnog pražnjenja između elektroda [Slika 18]. Oslobođeni elektroni i protoni preskakanjem s jedne elektrode na drugu i sudaranjem stvaraju iskre i zagrijavaju područje obrade pri čemu dolazi do vrlo visokih temperatura od 6000 do 12000°C. Nastala toplinska energija generirana u iskrama izaziva taljenje i isparavanje obradnog materijala. Elektrode alata se izrađuju od materijala koji imaju dobru električnu vodljivost i visoko talište. To su najčešće legure bakra, grafit, legure aluminija i nehrđajući čelici. [22]



Slika 18. Shema EDM obrade žigom [3]



Slika 19. Elektroerozijska obrada žigom [2]

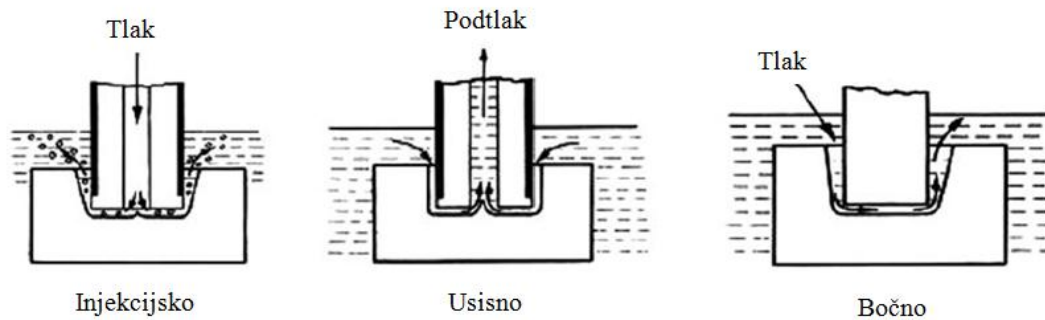


Slika 20. Električno pražnjenje [3]

Dielektrična tekućina je izolator između alata i obratka koji služi za koncentraciju energije i kao medij za hlađenje i odvođenje otpadnih čestica. Obično su to ugljikovodici, ali se može koristiti i tehnička voda. Ona se, nakon što prođe postupak filtriranja, ponovno vraća u sustav.

Postoje tri načina strujanja dielektrične tekućine [4]:

- injekcijsko,
- usisno,
- bočno.



Slika 21. Načini strujanja dielektrične tekućine [4]

3.1.1.2. Glavne značajke elektroerozijske obrade žigom

Elektroerozijski postupak obrade žigom koristi se za obradu tvrdih teškoobradivih materijala i gotovo je nezamjenjiv u današnjoj proizvodnji. Upotrebljava se za izradu kalupa, šipki, alata, kalupa za proizvodnju odljevaka, ukovnja i preciznu izradu profila različitih složenih oblika. [4]



Slika 22. Prikaz izrade kalupa pomoću EDM žiga [23]

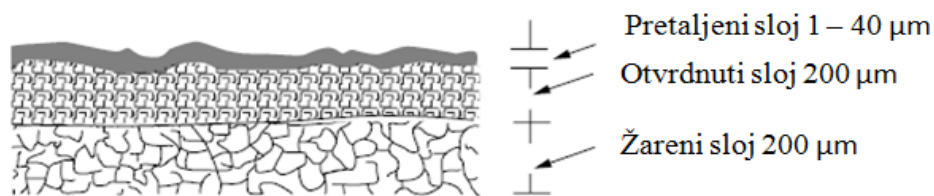
Prednosti EDM obrade žigom [24]:

- mogu se obrađivati vrlo tvrdi, teškoobradivi materijali;
- ovaj postupak pruža i mogućnost obrade tankih i krhkih dijelova;
- mogućnost izrade složenih oblika;
- postiže se visoka točnost obrade.

Glavni nedostaci i ograničenja su [25]:

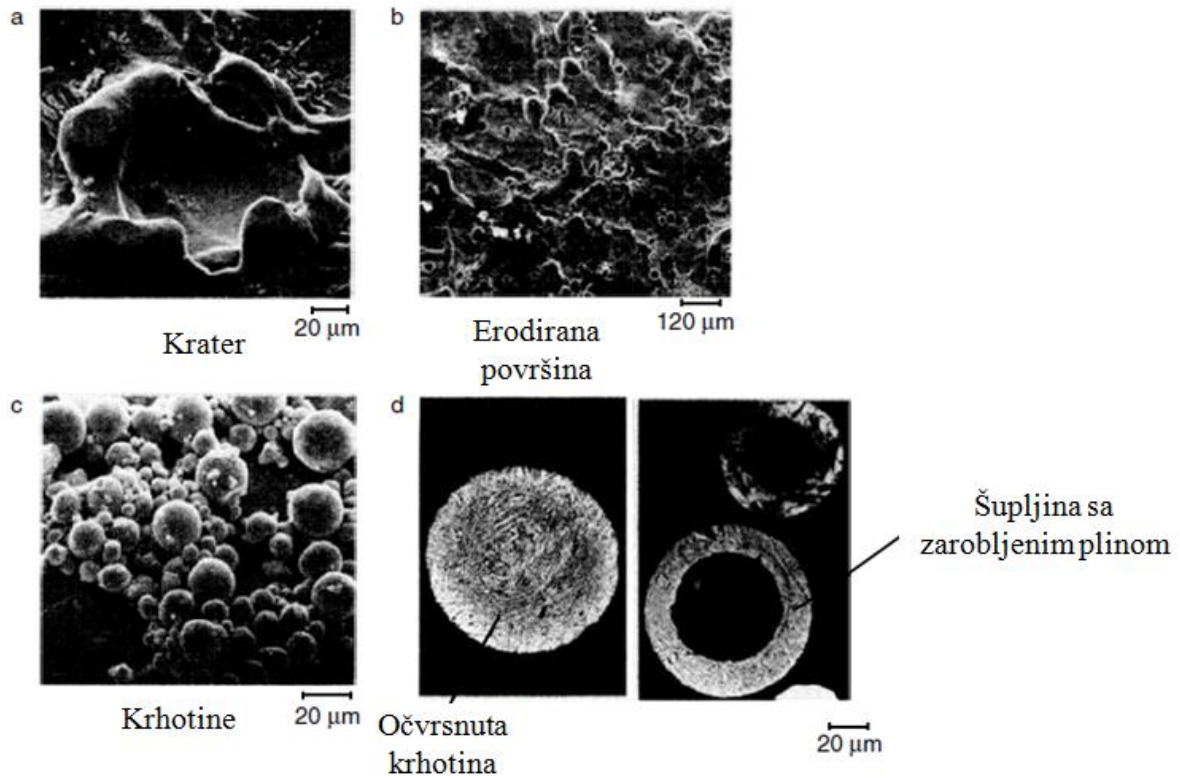
- mogućnost primjene samo kod elektrovodljivih materijala;
- stvaranje zona pod utjecajem topline;
- trošenje alata;
- postupak je spor u odnosu na konvencionalne postupke;
- ima nisku proizvodnost;
- pri većim brzinama ima slabiju kvalitetu završne obrade.

Budući da je postupak obrade žigom termički proces, značajan utjecaj na obradu ima toplina. Uslijed visokih temperatura pražnjenja, dolazi do promjena u površinskom sloju obratka i ispod samog površinskog sloja. Stvaraju se zone pod utjecajem topline [Slika 23]. Na površini obratka lijepe se i učvršćuju pretopljene kapljice metala i zaostalog otpadnog materijala i čine tzv. bijeli sloj utjecaja topline čija dubina ovisi o energiji i trajanju impulsa. Ispod njega je zona otvrdnutog dijela u kojoj se događaju i promjene u kemijskoj mikrostrukturi i još dublje - zona žarenog sloja. Efekt žarenja može se ublažiti odgovarajućim odabirom elektrode alata. [25]



Slika 23. Zone utjecaja topline [3]

Površine obrađene elektroerozijskim postupkom razlikuju se od površina obrađenih konvencionalnim postupcima. Dok na konvencionalno obrađenim površinama ostaju tragovi reznog alata, na elektroerozijski obrađenim površinama ostaju pukotine nastale termičkim djelovanjem, kao što je prikazano na slici 24. Na hrapavost utječe trošenje elektroda i ispiranje dielektričnom tekućinom, jakost struje i brzina obrade te jakost i trajanje impulsa. [26]



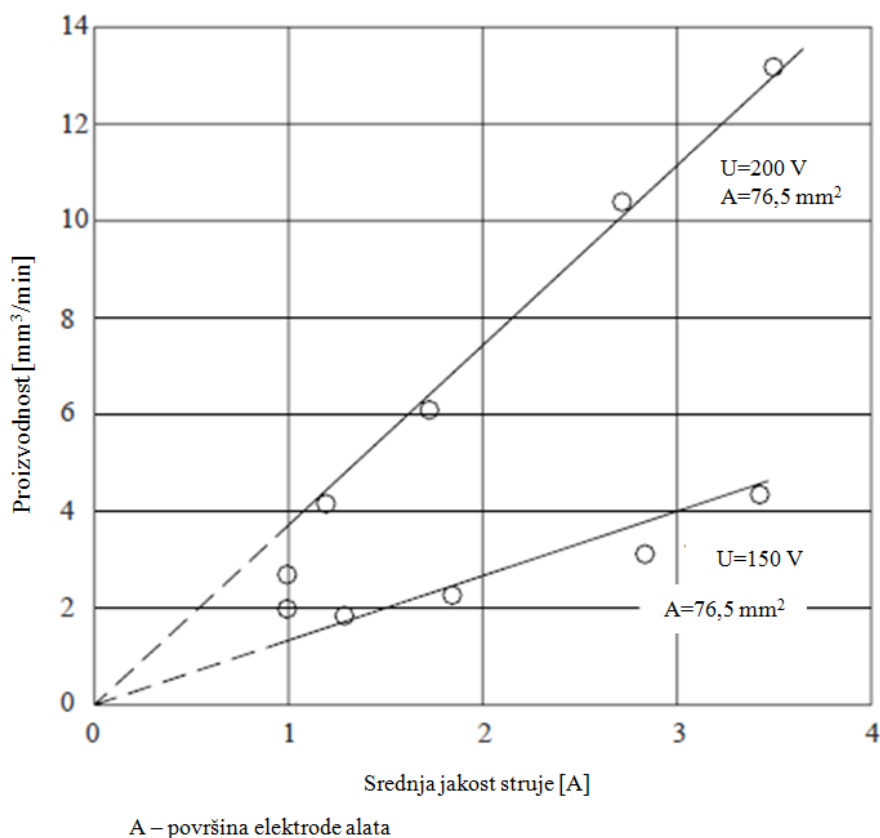
Slika 24. Izgled površine obrađene EDM-om pod elektronskim mikroskopom [4]

Proizvodnost uglavnom ovisi o materijalu obratka, vrsti materijala elektrode alata, parametrima električnih impulsa, jakosti električne struje, vrsti i svojstvima dielektrične tekućine i dr.

Proizvodnost je veća kod obrade materijala nižeg tališta. Trošenje elektroda smanjuje proizvodnost, a ona raste većom toplinskom vodljivošću materijala elektrode. Povećanjem postotka trajanja impulsa u odnosu na trajanje ciklusa, proizvodnost također raste.

Na slici 25 prikazan je utjecaj jakosti struje i visine napona na proizvodnost.

Optimalne vrijednosti proizvodnosti postižu se pri većim jakostima struje i brzinama obrade. [26]

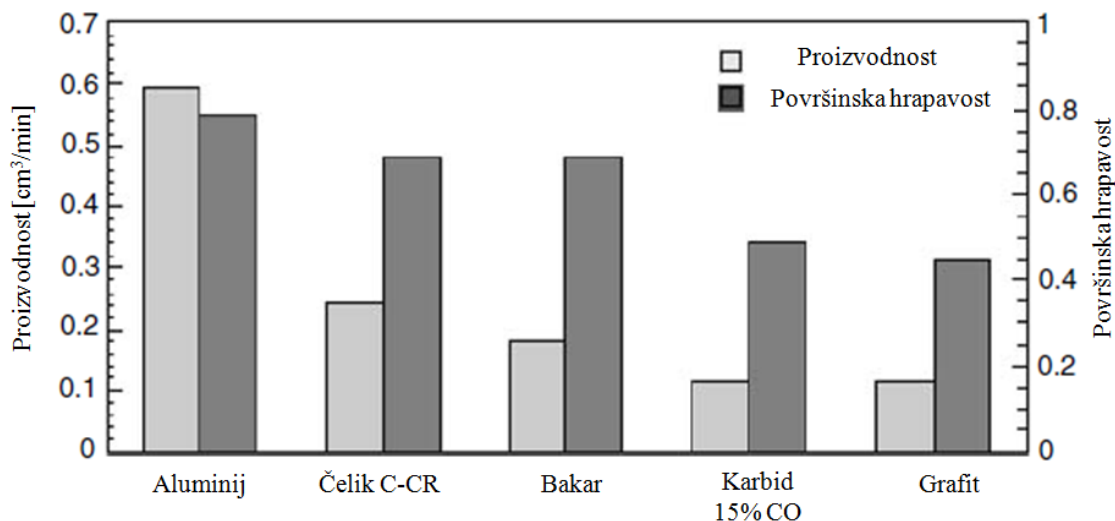


Slika 25. Utjecaj srednje jakosti struje na proizvodnost pri različitom naponu [6]

Iz tablice 3 vidljivo je da je proizvodnost veća kod grublje obrade.

Tablica 3. Odnos proizvodnosti i hrapavosti površine kod EDM obrade žigom [4]

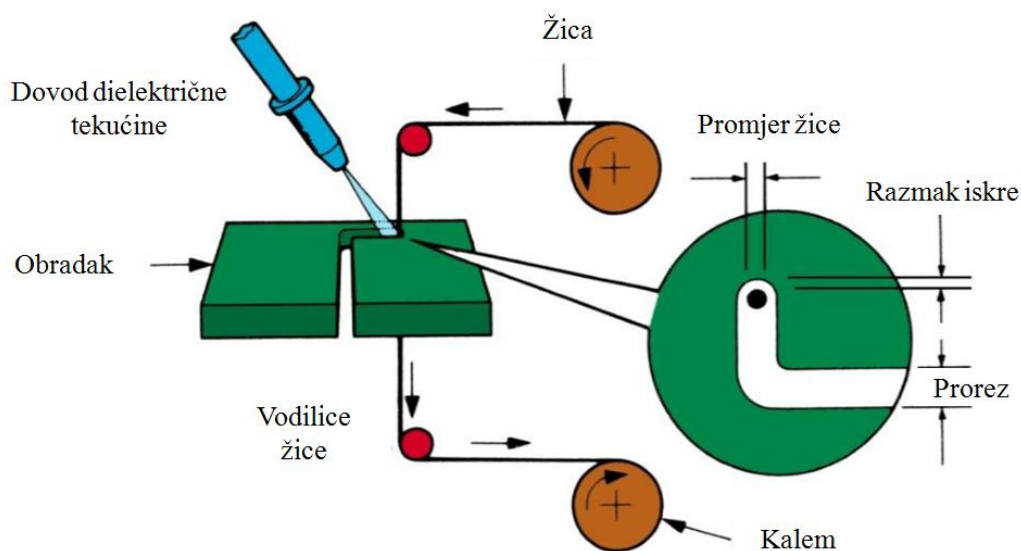
| | Proizvodnost [mm ³ /min] | R _a [μm] |
|--------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Metalne elektrode | | |
| Fina obrada | 0,75 | <1,6 |
| Završna obrada | 0,75-1,5 | 1,6-3,2 |
| Normalna obrada | 1,5-110 | 3,2-6,3 |
| Grafitne elektrode | | |
| Gruba obrada | 110-400 | 6,3-12,5 |
| Vrlo gruba obrada | >400 | >12,5 |



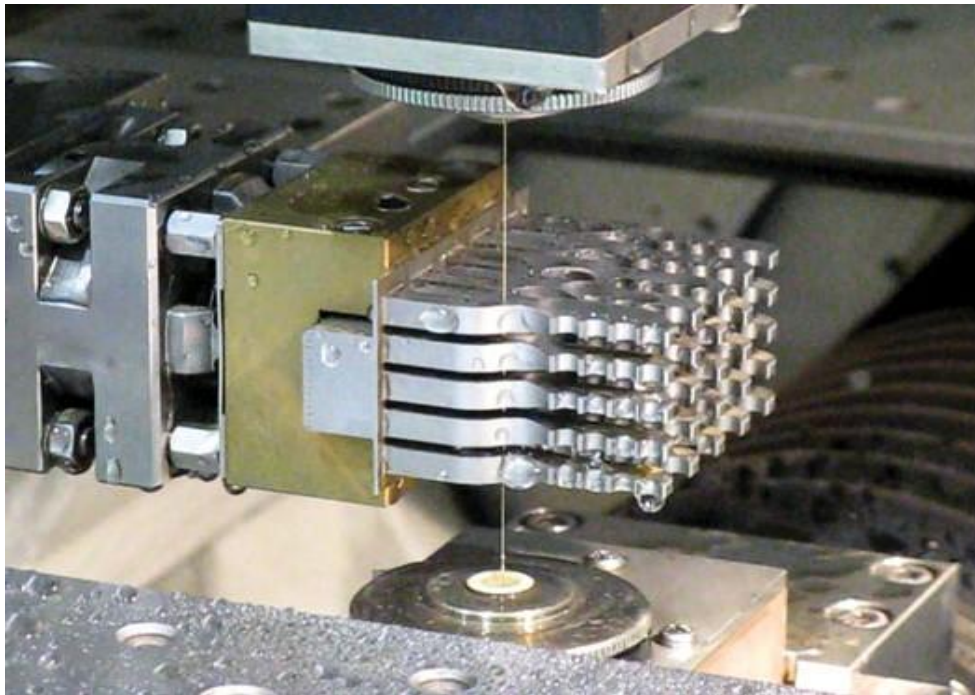
Slika 26. Proizvodnost i površinska hrapavost za različite materijale obratka pri istim parametrima obrade [4]

3.1.2. Elektroerozijska obrada žicom - Wire Electric Discharge Machining (WEDM)

Elektroerozijski postupak obrade žicom vrlo je sličan postupku obrade žigom s tim što ulogu alata - elektrode preuzima pokretna žica. Dielektrična tekućina (deionizirana voda) je lokalizirana na područje obrade. Obradak i žica su priključeni na odgovarajući generator. Osnovni princip rada je, kao i kod obrade žigom, električno pražnjenje i stvaranje iskre koje vrše eroziju materijala na obratku. Temperature iskre procjenjuju se na 15000 - 21000 °C.



Slika 27. Shema WEDM postupka [27]



Slika 28. Prikaz WEDM obrade [28]

Ovim se postupkom precizno obrađuju komponente složenih, geometrijski nepravilnih oblika te minijaturni dijelovi od titana, cirkonija, silicija, različitih legura, cementiranih karbida i dr. [29]



Slika 29. Dijelovi izrađeni primjenom WEDM postupka [30]

Žica je najznačajniji dio ovog postupka. Ona ima ulogu alata. Prolazi kroz obradak, ali ga ne dodiruje. Izrađuje se od bakra (koji ima izvrsnu električnu vodljivost, ali nisku vlačnu čvrstoću što predstavlja ograničavajući faktor), mjedi i volframa. Žice izrađene od legura nikla ili titana mogu povećati proizvodnost za 40 ili 70%, ali su skuplje. [29]

Žice od bakrene legure su promjera ϕ 0,25 mm, a od volframa ϕ 0,02 - 0,08 mm. Žica je alat koji

se troši i nakon upotrebe baca. Namotana je između dva kalema i vodi se safirnim vodilicama koje se ne troše. Brzina gibanja žice u xy ravnini utječe na širinu reza. Za žicu promjera ϕ 0,2 mm uz $v = 1$ mm/min daje širinu reza od 0,25 mm. [2] Može biti finije i grublje izrade.

Značajan parametar u postupku obrade žicom je njezina napetost i brzina. Ne smije biti previše napeta kako ne bi došlo do loma niti premalo kako se ne bi vukla.

Upravljanje žicom vrši se servo sustavom.

Zbog visoke temperature u području obrade, na površini obratka i ispod nje, stvaraju se zone utjecaja topline kao i kod obrade žigom.

Na hrapavost površine utječu vrijeme uključenog impulsa, vršna struja (maksimalna struja koju impuls može dosegnuti) i brzina rezanja. Njihovim porastom raste i hrapavost. Veće vrijednosti ovih parametara koriste se pri grubim obradama, obradama šupljina i obradama većih površina.

Tehnička provodljivost i specifični toplinski kapacitet su najvažniji faktori materijala obratka koji utječu na proizvodnost. Veće vrijednosti uzrokuju pad proizvodnosti. [29]

3.1.3. Usporedba EDM postupka žigom i žicom

Tablica 4. Razlike između EDM obrade žigom i žicom [31]

| EDM OBRADA ŽIGOM | WEDM |
|---|--|
| Kao alat se koristi žig. | Kao alat se koristi žica. |
| Može se primijeniti za 3D profile. | Postupak nije prikladan za 3D obradu. |
| Mogu se izraditi slijepe značajke (poput provrta koji nisu otvoreni u donjem dijelu). | Primjenjivo je samo za rezanje profila kroz otvore s obje strane. |
| Obrada se može započeti na bilo kojem mjestu . | Ne može započeti obradu na bilo kojem mjestu, nego samo od ruba ili nekog početnog otvora. |
| Koristi se za 3D konturiranje. | Koristi se za rezanje profila visoke preciznosti. |

Sličnosti postupaka [31]:

- oba postupka temeljena su na toplinskoj energiji;
- osnovni princip rada je električno pražnjenje i stvaranje iskri koje vrše eroziju materijala na obratku;

- u oba postupka se koristi dielektrična tekućina;
- nema zaostalih napreznaja;
- nužna je električna vodljivost materijala;
- mehanička svojstva materijala nisu presudna za obradu.

WEDM postupak je brži od postupka obrade žigom.

3.2. Obrada snopom elektrona - Electron Beam Machining (EBM)

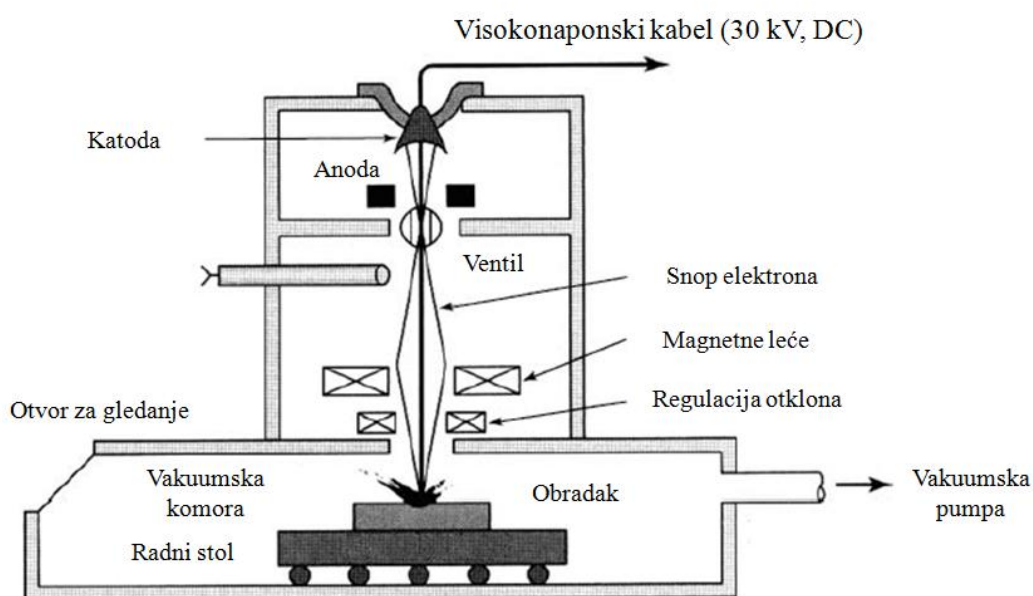
3.2.1. Princip rada obrade snopom elektrona

Proces obrade snopom elektrona odvija se u vakuumskoj komori. U gornjem dijelu komore nalazi se katoda od volframa koja se električnim putem zagrijava na temperaturu od 2500 - 3000 °C i emitira elektrone. Ispod katode nalazi se anoda. Između katode i anode djeluje snažno električno polje. Visoki napon, obično oko 150 kV, ubrzava elektrone i oni se velikom brzinom, kroz otvor u anodi, u snopu gibaju prema obratku u donjem dijelu komore. [3]

Između katode i anode smještena je Wehneltova elektroda u obliku čaše koja regulira struju kontrolirajući broj elektrona. Ona djeluje i kao prekidač struje snopa. [4]

Snop elektrona se magnetskim ili elektroničkim lećama precizno usmjerava na mjesto obrade.

Giba se brzinom od 220×10^3 km/s i udara u površinu obratka. Pri tom se njegova kinetička energija pretvara u toplinsku te se isparavanjem, taljenjem i sagorijevanjem suvišnih čestica obratka vrši obrada. Snop elektrona zapravo ima ulogu alata. [3]



Slika 30. Shema EBM uređaja [4]

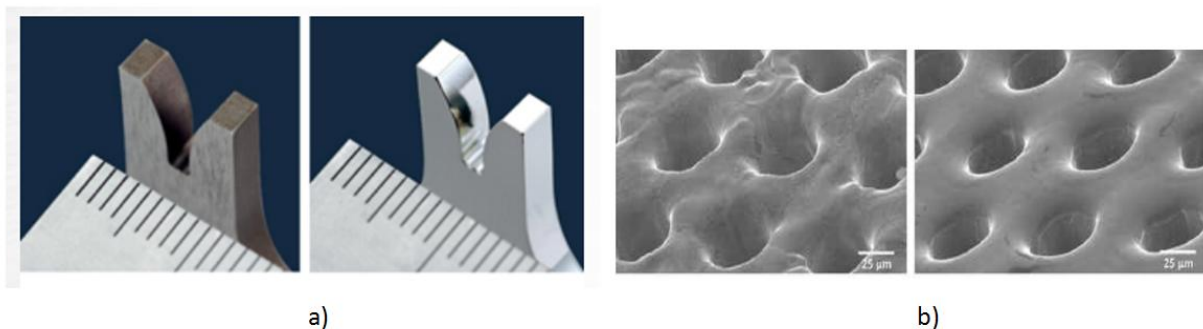
3.2.2. Glavne značajke EBM obrade

Postupak obrade snopom elektrona primjenjuje se za bušenje malih provrta, rezanje, graviranje, zavarivanje i termičku obradu te u proizvodnji poluvodiča i mikrodijelova.



Slika 31. Uređaj za bušenje snopom elektrona [32]

U najnovije vrijeme se koristi još i u završnoj obradi za poliranje površina gdje se postiže višestruko manji R_a (oko 22 nm). [34]



Slika 32. Polirana površina dva obratka: a) stvarni izgled [33], b) mikroskopski prikaz [34]

Proizvodnost pri obradi ovisi o nizu faktora kao što su: vrijeme trajanja i prekida impulsa, broj impulsa, površina na koju je snop usmjeren, brzina kretanja obratka, fizikalne karakteristike materijala koji se obrađuje i dr. Izražava se na više načina ovisno o namjeni. Raste povećanjem napona i brzine obrade. [3]

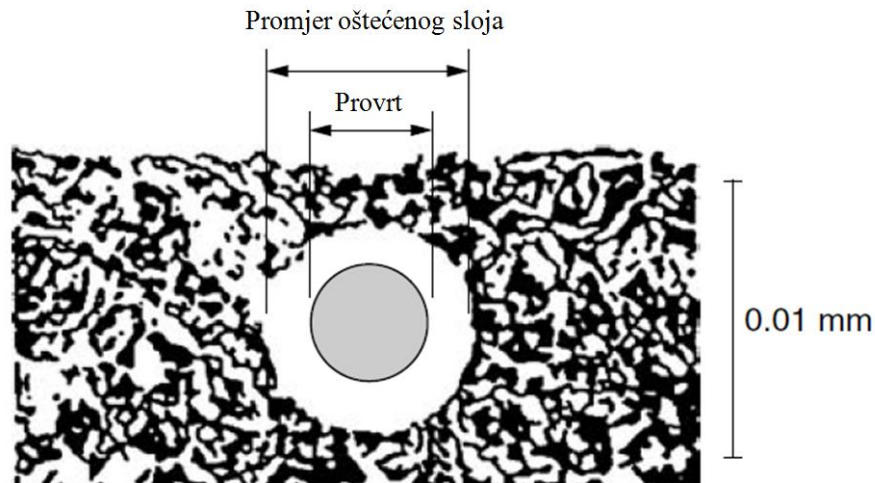
Tablica 5. Parametri i mogućnosti EBM procesa [3]

| EBM parametar | |
|----------------------------|---|
| Napon | 50 - 60 kV |
| Jakost snopa elektrona | 100 μ A |
| Snaga snopa | 0,5 - 50 kW |
| Vrijeme impulsa | 4 - 64000 μ s |
| Frekvencija impulsa | 0,1 - 16000 Hz |
| Vakuum | 0,01 - 0,0001 mm žive |
| Veličina provrta | 0,013 - 0,025 mm |
| Raspon otklona | 6,4 mm ² |
| Intenzitet snopa | 1,55 x 10 ⁵ - 1,55 x 10 ⁹ W/cm ² |
| Dubina reza | do 6,4 mm |
| Najuži rez | 0,025 mm u metalu debljine 0,025 mm |
| Raspon provrta | 0,025 mm u metalu debljine 0,02 mm 1,0 mm u metalu debljine 5 mm |
| Konus provrta | 1° - 2° |
| Kut provrta prema površini | 20° - 90° |
| Stopa uklanjanja | 40 mm ³ /s |
| Stopa prodiranja | 0,25 mm/s |
| Stopa bušenja | do 5000 provrta/s |
| Tolerancije | \pm 10% dubine reza |
| Površinska hrapavost | 1 μ m R_a |

Budući da je površina obratka izložena utjecaju topline, oko provrta se stvara bijeli prsten oštećenog sloja, što je prikazano na slici 33. Promjer oštećenog sloja povećava se trajanjem impulsa i promjerom provrta. Zona zahvaćena toplinom može biti i do 0,25 mm što može narušiti strukturu obrađenih dijelova.

Kvaliteta površine ovisi o vrsti materijala.

Površinska hrapavost je proporcionalna jačini i trajanju impulsa i za male provrte iznosi $R_a=1\mu\text{m}$. [3]



Slika 33. Presjek provrta u krom-molibden čeliku pod utjecajem jednog EBM impulsa [3]

Prednosti EDM obrade [4]:

- mogućnost obrade bilo kojeg materijala bez obzira na njegova svojstva;
- mogućnost bušenja sitnih provrta velikom brzinom;
- veće brzine i ekonomičnija obrada nego kod EDM i ECM obrade;
- visoka točnost i ponovljivost;
- mogućnost mijenjanja parametara obrade tijekom samog postupka;
- nema problema sa šiljastim kutovima;
- mogućnost visokog stupnja automatizacije i produktivnosti.

Nedostaci [4]:

- visoka početna ulaganja;
- gubitak vremena na stvaranje vakuuma;
- postojanje zone utjecaja topline;
- potreban pomoćni potporni materijal;
- potrebni kvalificirani radnici.

3.3. Laserska obrada - Laser Beam Machining (LBM)

Postupak odvajanja čestica laserom je termoelektrični postupak u kojem se kao alat koriste laserske zrake.

Služi za izvođenje različitih operacija obrade kao što su rezanje, bušenje, zavarivanje, graviranje,

oblaganje, termička obrada, legiranje. Značajnu primjenu i doprinos ima kod mikroobrada. Primjenjuje se kod toplinski otpornih legura visoke čvrstoće, materijala ojačanih vlaknima, keramike, aluminijskih limova i brojnih drugih materijala. [3]



Slika 34. Laserska obrada lima [35]

3.3.1. Princip rada LBM postupka

U laserskom rezonatoru nastaje laserska zraka koja se zrcalima usmjerava prema mlaznicama. Nakon prolaska kroz mlaznice, zraka se giba prema obratku, sudara se s obratkom, prodire u njega i na taj način vrši obradu.

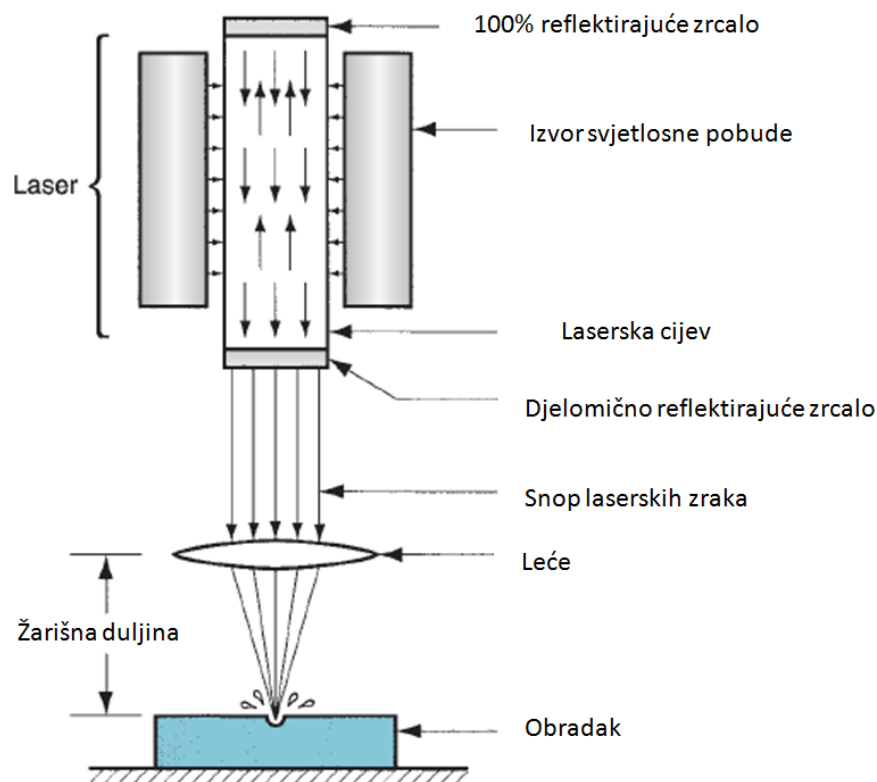
Uz laserske zrake u obradi sudjeluje i inertni plin koji s površine uklanja rastopljene čestice materijala. To je najčešće kisik ili dušik. Kisik se upotrebljava pri obradi srednje tvrdih čelika malom brzinom kako se ne bi izazvala kemijska reakcija kisika i materijala (korozija). Dušik se upotrebljava pri obradi aluminijskih limova i nehrđajućih čelika. Pogodan je za veće brzine, ali je skup.

Za brzinu i kvalitetu obrade značajni su položaj i karakteristike zrake, položaj i udaljenost laserske glave od mjesta obrade i vrsta inertnog plina.

Laserska zraka je debljine manje od 0,3 mm. Pri operaciji rezanja prvo buši početni provrt, a tek nakon 15 s vrši rezanje.

Tijekom postupka gibanje može vršiti obradak, laserska glava ili oboje.

Obrada u kojoj se giba laserska glava je najbrža. [35]



Slika 35. Shematski prikaz laserske obrade [36]

3.3.2. Glavne značajke LBM postupka

Dvije su najznačajnije vrste lasera:

- CO₂ - laser,
- Nd:YAG - laser.

CO₂ laser je laser na bazi plina. Radi na principu mješavine plinova, od kojih je glavni aktivator CO₂, koji se električki stimuliraju i stvaraju laserske zrake.

Nd:YAG je čvrsti laser. Ima krutu jezgru od itrij-aluminijevog granata (YAG). Laserska zraka nastaje međudjelovanjem kristalnog nosača i plina neodimija. [35]

Usporedba CO₂ i Nd:YAG lasera prikazana je u tablici 6.

U novije vrijeme u industriji se sve više upotrebljavaju diodni laseri. U usporedbi s drugim vrstama lasera, diodni laseri troše vrlo malo energije. Većina diodnih lasera ima pad napona manji od 2 V. Učinkovitost im je za 30% veća. Izrađeni su od poluvodičkih materijala. Zbog velike fleksibilnosti i male veličine imaju vrlo široko područje primjene. [37]

Tablica 6. Usporedba CO₂ i Nd:YAG lasera [38]

| CO ₂ laser | Nd:YAG laser |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • ima 10x veću valnu duljinu od Nd:YAG-a; • može obrađivati širi spektar materijala (drvo, plastiku i dr.); • koristi se za obradu metala; • jeftiniji su i zastupljeniji | <ul style="list-style-type: none"> • prednost mu je manja valna duljina; • može vršiti precizniju obradu; • pogodan je i za obradu reflektirajućih materijala; • ne može se koristiti kod kože, drva, plastike; • primjenjuje se u autoindustriji |

Glavni parametri obrade laserom svrstavaju se u tri skupine:

1. parametri laserskog snopa,
2. parametri procesa proizvodnje,
3. parametri materijala.

Parametri laserskog snopa su: snaga i intenzitet, kvaliteta i polarizacija laserske zrake.

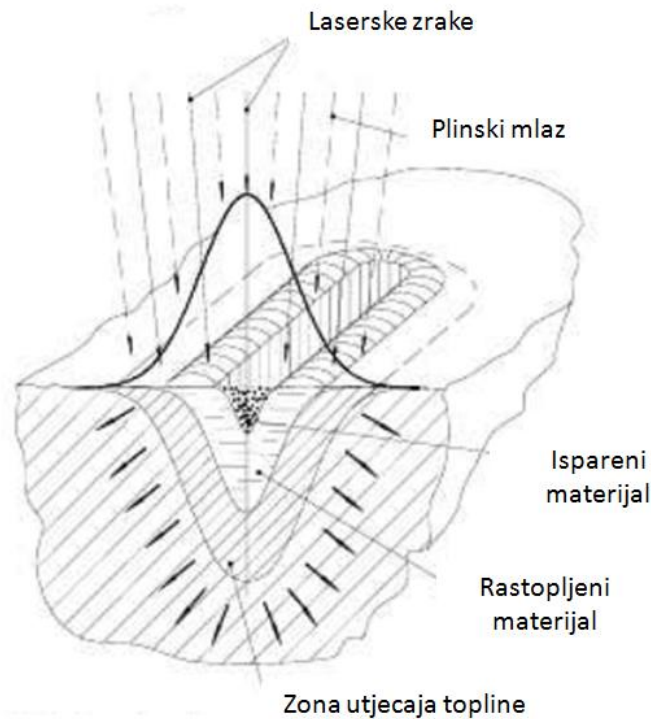
Parametri proizvodnog procesa su: kontinuirana ili impulsna zraka, žarišna duljina, brzina rezanja, tlak plinova i karakteristike mlaznica.

Parametri materijala su fizikalna svojstva materijala.

Svi navedeni parametri utječu na proizvodnost, točnost i kvalitetu obrade.

Povećanjem jakosti zrake i brzine obrade, povećava se proizvodnost i hrapavost, a opada kvaliteta površine. [35]

Kao kod svih termičkih postupaka obrade, na hrapavost i kvalitetu površine značajan utjecaj ima toplina. Velikom koncentracijom topline na vrlo malom području dolazi do efekta isparavanja. Ta pojava na obrađenoj površini ostavlja neravnine u vidu udubljenja koje su najizraženije na uskom području oko djelovanja osi laserskog snopa. Zone utjecaja topline na laserom obrađenu površinu prikazane su na slici 36. [39]



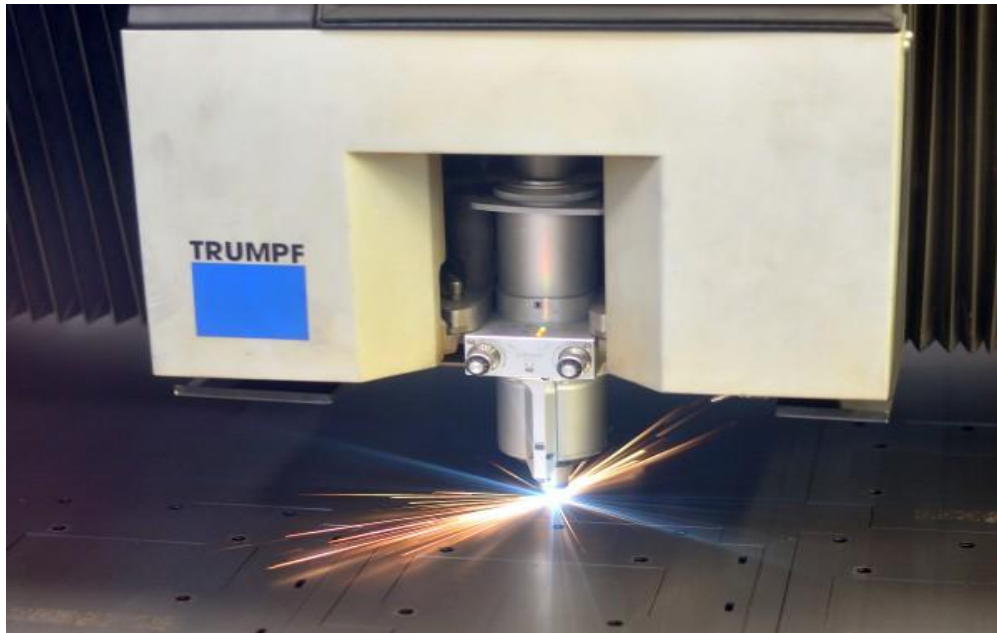
Slika 36. Prikaz utjecaja laserskog snopa na obradak [39]

Prednosti LBM postupka su [3]:

- nema trošenja alata;
- moguće je precizno postaviti poziciju obrade pomoću optičkog sustava;
- moguće je ostvariti provrte malih promjera;
- pogodan je za obradu širokog spektra materijala;
- obrada je brza i ekonomična;
- moguće je bušenje pod kutom;
- moguća je visoka automatizacija.

Nedostaci i ograničenja postupka su [3]:

- velika početna ulaganja;
- pojava koničnosti;
- teško izvođenje slijepih provrta;
- debljina materijala obratka ograničena je na 50 mm;
- potrebno je uklanjanje suvišnih čestica.



Slika 37. Laserska glava [40]

3.3.3. Usporedba LBM i AWJM postupka

Tablica 7. Usporedba LBM i AWJM postupka [41]

| LBM | AWJM |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - ne može obrađivati reflektirajuće materijale - velik utjecaj topline na površinu - skuplji od AWJM postupka - veća brzina rezanja | <ul style="list-style-type: none"> - može obrađivati reflektirajuće materijale - nema termičkih deformacija i zona utjecaja topline - sigurniji od LBM postupka |

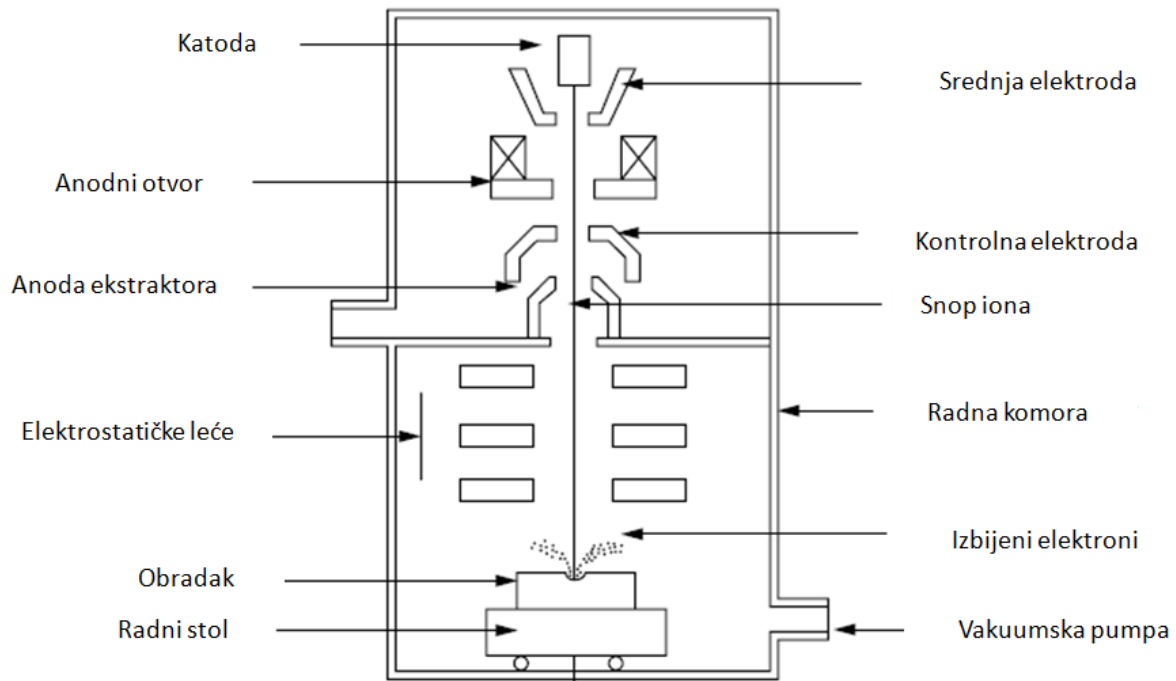
3.4. Obrada snopom iona - Ion Beam Machining (IBM)

3.4.1. Princip rada obrade snopom iona

Postupak obrade snopom iona je suvremeni postupak koji se ne koristi često.

Odvija se u vakuumskoj komori snopom nabijenih iona koji se izbacuju iz ionskog izvora pomoću ubrzavajućeg napona i putuju prema obratku. Proces ionizacije pospješuje plin argon. Obradak se montira na nagibni radni stol. Pri udaru visokoenergetskog ionskog snopa o površinu obratka ioni predaju svoju energiju atomima obratka. Dolazi do pucanja kemijskih veza i

odvajanja ioniziranih atoma s površine obratka. [3] Na slici ispod prikazana je shema IBM obrade.



Slika 38. Shematski prikaz IBM obrade [3]

3.4.2. Glavne značajke IBM postupka

- Koristi se pri obradi malih dimenzija 10 - 100 nm.
- Ostvaruje glodanje elemenata širine od 0,2 μm .
- Upotrebljava se za oblikovanje i poliranje elemenata u staklu, siliciju ili dijamantu.
- Omogućuje brzu promjenu parametara obrade.
- Proizvodi vrlo čiste površine.
- Dolazi do pojave koničnosti reda veličine 1 μm .
- Točnost obrade iznosi $\pm 1\%$.
- Hrapavost završnog sloja površine iznosi manje od 1 μm .

Proizvodnost ovisi o vrsti materijala koji se obrađuje, vrsti iona, njihovoj energiji i kutu upada. [3]

Postupak zahtijeva visoka početna ulaganja, cijena elemenata obrađenih ovim postupkom je visoka pa nema osobito veliku proizvodnost.

3.5. Obrada plazmom - Plasma Beam Machining (PBM)

3.5.1. Princip rada PBM obrade

Postupak obrade plazmom nastao je sredinom prošlog stoljeća kao rezultat usavršavanja metode rezanja nehrđajućeg čelika, aluminija i drugih obojenih metala plamenom.

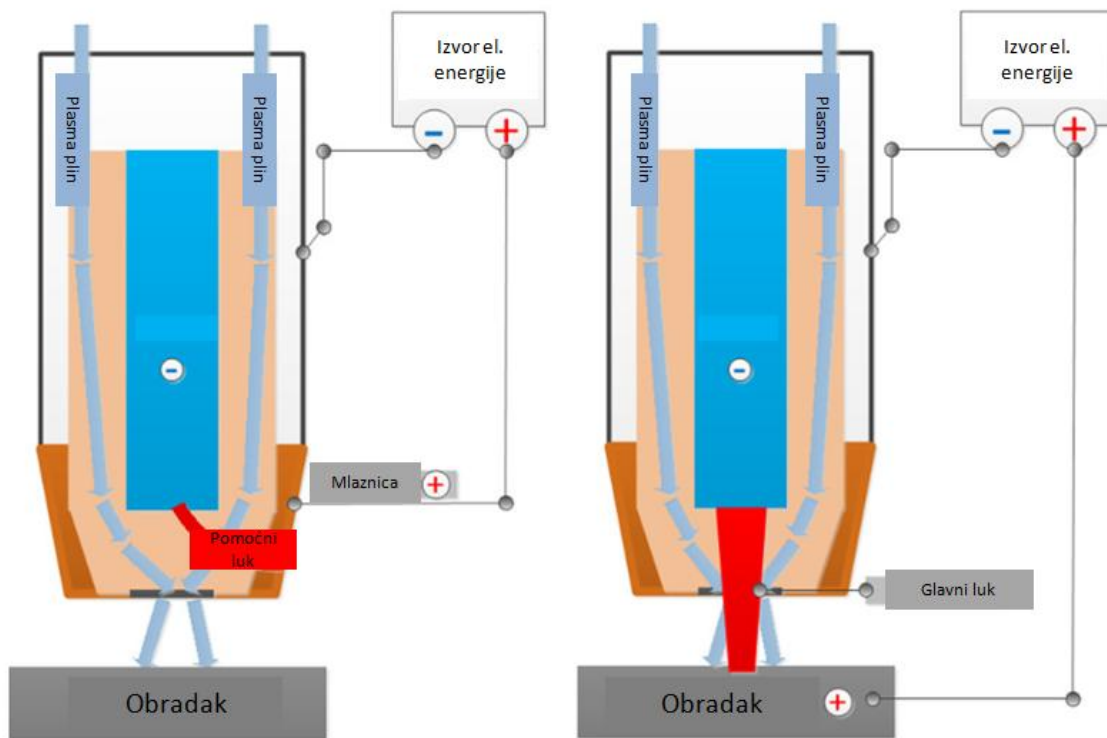


Slika 39. Prikaz rezanja plazmom [31]

Plazma nastaje zagrijavanjem plina na temperaturu iznad 30000 °C. [3] Ionizirani atomi plina izlaze iz električnog luka u obliku plazme. Ovisno o tome da li je električni luk izveden između dvije elektrode ili između jedne elektrode - katode i obratka koji ima ulogu anode, razlikuju se dvije vrste obrade plazmom [Slika 40]:

- obrada s prenesenim lukom (zavarivanje, rezanje)
- obrada s neprenesenim lukom (navarivanje, oplemenjivanje) [42].

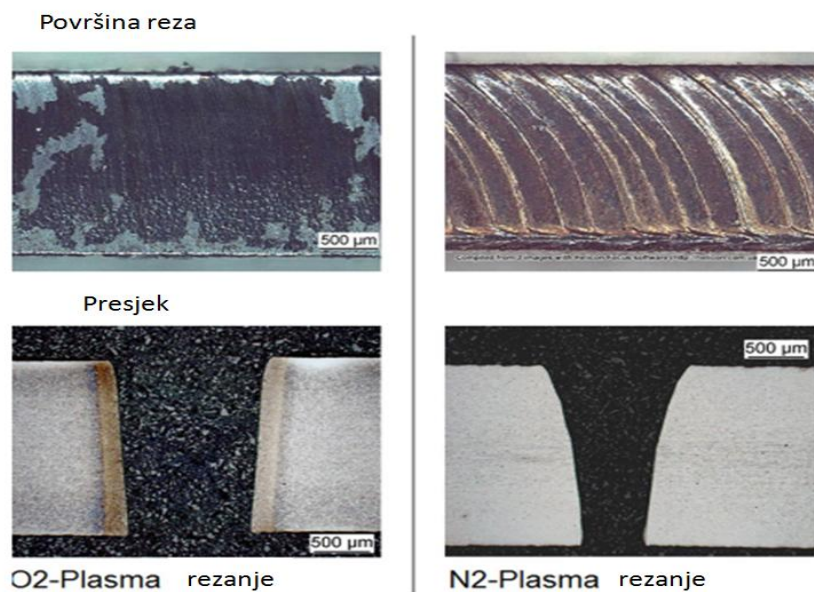
Ulogu alata vrši nastali mlaz plazme koji svojom kinetičkom i toplinskom energijom izvodi obradu.



Slika 40. Prikaz plazma obrade s prenesenim i neprenesenim plazma lukom [42]

3.5.2. Glavne značajke PBM obrade

Toplina ima značajan utjecaj na površinu obratka. Mogu se pojaviti pukotine zbog brzog hlađenja. [3]



Slika 41. Prikaz površine reza nastalog PBM postupkom [43]

Tablica 8. Parametri PBM obrade [3]

| Parametar | Vrijednosti |
|---------------------------|-----------------------------|
| Brzina mlaza | 500 m/s |
| Proizvodnost | 150 cm ³ /min |
| Specifična energija | 100 W/(cm ³ min) |
| Raspon snage | 2 - 200 kW |
| Napon | 30 - 250 V |
| Jakost struje | do 600 A |
| Brzina obrade | 0,1 - 7,5 m/min |
| Maksimalna debljina ploče | 200 mm |

Proizvodnost ovisi o obratku, o tipu rezanja, o vrsti plinova koji određuju maksimalnu brzinu prijenosa topline. Brzina se smanjuje većom debljinom obratka i debljinom reza. Proizvodnost je veća kod veće snage i većeg protoka plina. [3]

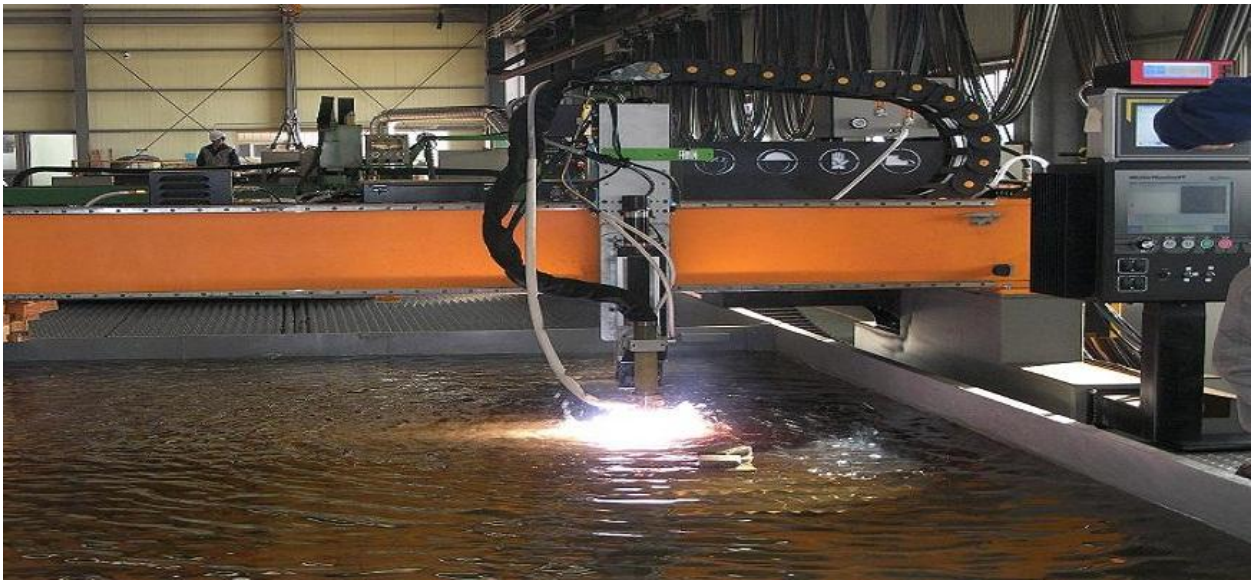
Prednosti PBM obrade su [3]:

- mogućnost rezanja materijala velike debljine;
- niski investicijski troškovi;
- visoka proizvodnost;
- niža cijena izratka.

Nedostaci postupka su [3]:

- veća širina reza;
- pojava zone utjecaja topline;
- moguće je izobličenje obratka;
- stvaranje potencijalno štetnih para.

Postupak obrade plazmom često se koristi u metaloprerađivačkoj industriji i brodogradnji. Jedan je od najčešće korištenih termoelektričnih postupaka obrade metala.



Slika 42. Podvodno plazma rezanje [44]

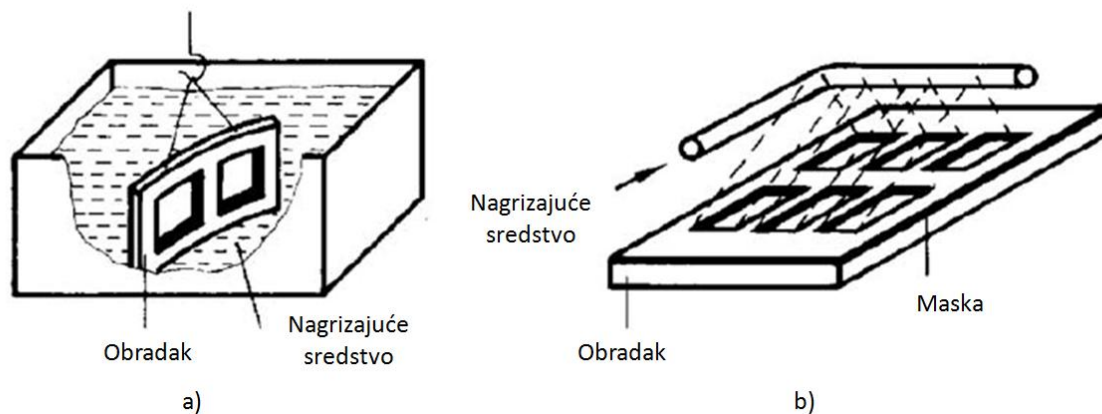
U usporedbi s laserom, plazma zahtijeva niža početna ulaganja, niže su cijene održavanja, ima veći toplinski utjecaj na obratke, manju brzinu i točnost rezanja.

4. KEMIJSKI NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADE

Kemijski postupci obrade odvajanjem u osnovi imaju kemijsku reakciju između obratka i sredstva za nagrizanje. Sredstva za nagrizanje mogu biti kiseline, lužine ili soli. Proces obrade provodi se uranjanjem obratka u sredstvo ili prskanjem.

Primjenjuje se pri obradi metala i njihovih legura relativno velike površine.

Kemijskim postupkom izvodi se kemijsko glodanje i fotokemijska obrada.



Slika 43. Kemijski postupci: a) CHM, b) PCM [4]

4.1. Kemijsko glodanje - Chemical Milling (CHM)

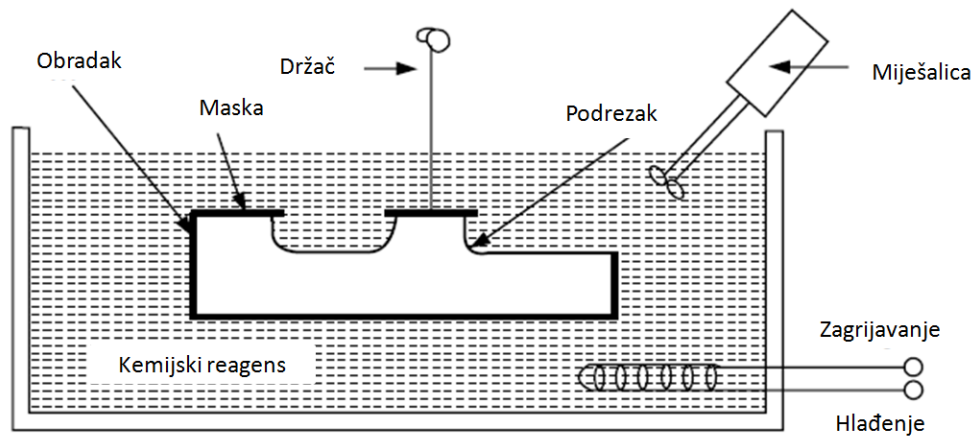
4.1.1. Princip rada CHM postupka

U postupku kemijskog glodanja alat obrade je kemijski reagens koji je kao alat relativno jeftin i jednostavan za primjenu.

Prije uranjanja obradak se mora očistiti, a nakon toga se na njega nanose posebne prevlake tzv. maske koje moraju biti otporne na kemijske utjecaje sredstva za nagrizanje. One štite površine ili dijelove površina obratka koje se ne obrađuju i definiraju područje obrade. Nakon obrade se uklanjaju. Za maske se najčešće koriste sintetski materijali koji moraju ispunjavati sljedeće zahtjeve [4]:

- biti inertni na kemijski reagens koji se upotrebljava u postupku;
- moći podnijeti toplinu nastalu postupkom;
- biti pogodni za rukovanje;
- dobro prijanjati za površinu obratka;
- moći se lako ukloniti s površine.

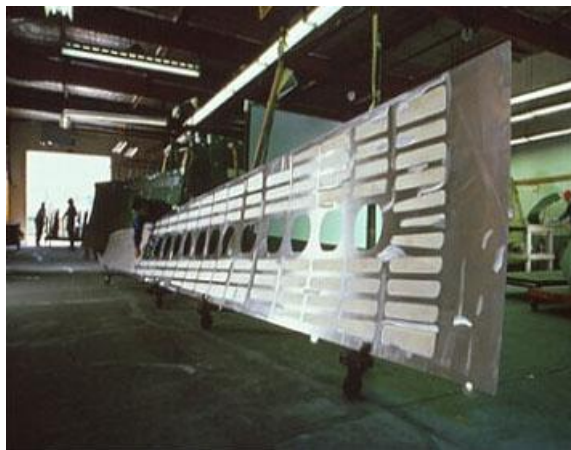
Za postupak je nužno korištenje pomoćne opreme za pridržavanje i manipulaciju obratkom.



Slika 44. Shema CHM postupka [4]

4.1.2. Glavne značajke CHM postupka

Postupak kemijskog glodanja najviše se upotrebljava u zrakoplovnoj industriji, za izradu 3D udubljenja relativno većih površina, za oblikovanje lima te poboljšavanje površinskih svojstava uklanjanjem izbočina s konvencionalno obrađenih elemenata složenih geometrijskih oblika.



Slika 45. Prikaz dijela trupa aviona obrađenog CHM postupkom [45]

Najvažniji parametri kemijskog glodanja su vrsta i koncentracija reagensa, radna temperatura i svojstva maske. Oni izravno utječu na [3]:

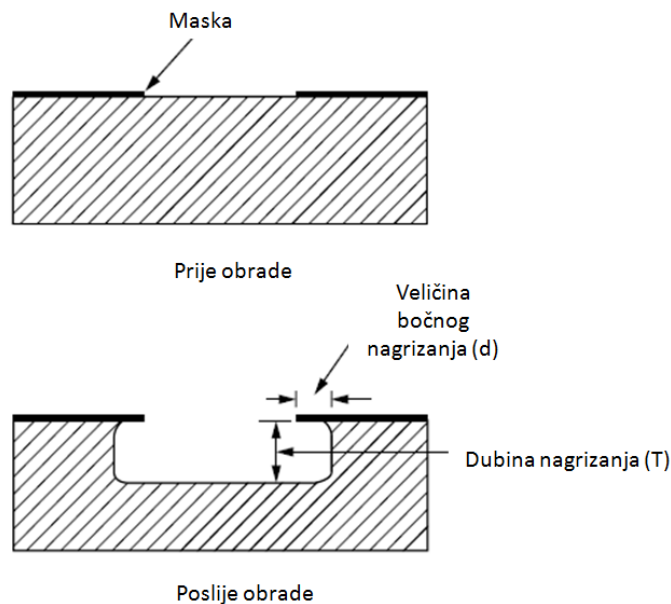
- faktor nagrizanja,
- brzinu nagrizanja i obrade,

- tolerancije,
- završnu obradu površine.

Temperatura reagensa kreće se od 37 °C do 85 °C. Kako bi se postigla ujednačena obrada odstupanja ne smiju prelaziti ± 5 °C.

Nagrizanje (jetkanje) je brže pri višim temperaturama i koncentracijama.

Pri definiranju obrade u obzir se mora uzeti i faktor nagrizanja, tj. bočno djelovanje reagensa ispod maske (d/T), što prikazuje slika 46.



Slika 46. Prikaz nagrizanja ispod maske [4]

Brzina nagrizanja kreće se od 20 do 40 $\mu\text{m}/\text{min}$.

Faktori nagrizanja su visoki za tvrde materijale, a niski za meke. Općenito, kod visokog faktora nagrizanja, hrapavost je niska i strože su tolerancije obrade. R_a se kreće od 0,1 do 0,3 μm , ovisno o početnoj hrapavosti, a u posebnim uvjetima, može postići vrijednost od 0,025 do 0,05 μm .

Proizvodnost se izražava brzinom nagrizanja materijala koja iznosi 20 - 40 $\mu\text{m}/\text{min}$, što je relativno malo. No, budući da se obrada vrši istovremeno na velikim površinama i to s više strana, proizvodnost je relativno velika. [4]

Glavne prednosti CHM postupka su [4]:

- omogućuje smanjenje težine uz očuvanje mehaničkih svojstava na elementima geometrijski složenih oblika teško obradivih konvencionalnim postupcima, što je posebno važno u proizvodnji zrakoplova;

- mogućnost istovremene obrade više dijelova;
- mogućnost istovremene obrade svih površina, što povećava proizvodnost;
- minimalno izobličenje, mogućnost obrade osjetljivih dijelova;
- mali početni troškovi i troškovi alata;
- potreban je manje kvalificiran radnik;
- niska stopa otpadnog materijala.

Nedostaci i ograničenja postupka su [4]:

- teško je izvesti duboke rezove;
- problematično rukovanje kemikalijama;
- gubici vremena na pripremu (postavljanje i skidanje maske);
- na kvalitetu obrade utječe početno stanje površine;
- nije pogodan za obradu poroznih materijala;
- zavarene zone ne nagriza se istom brzinom kao osnovni materijal.

4.2. Fotokemijska obrada - Photochemical Machining (PCM)

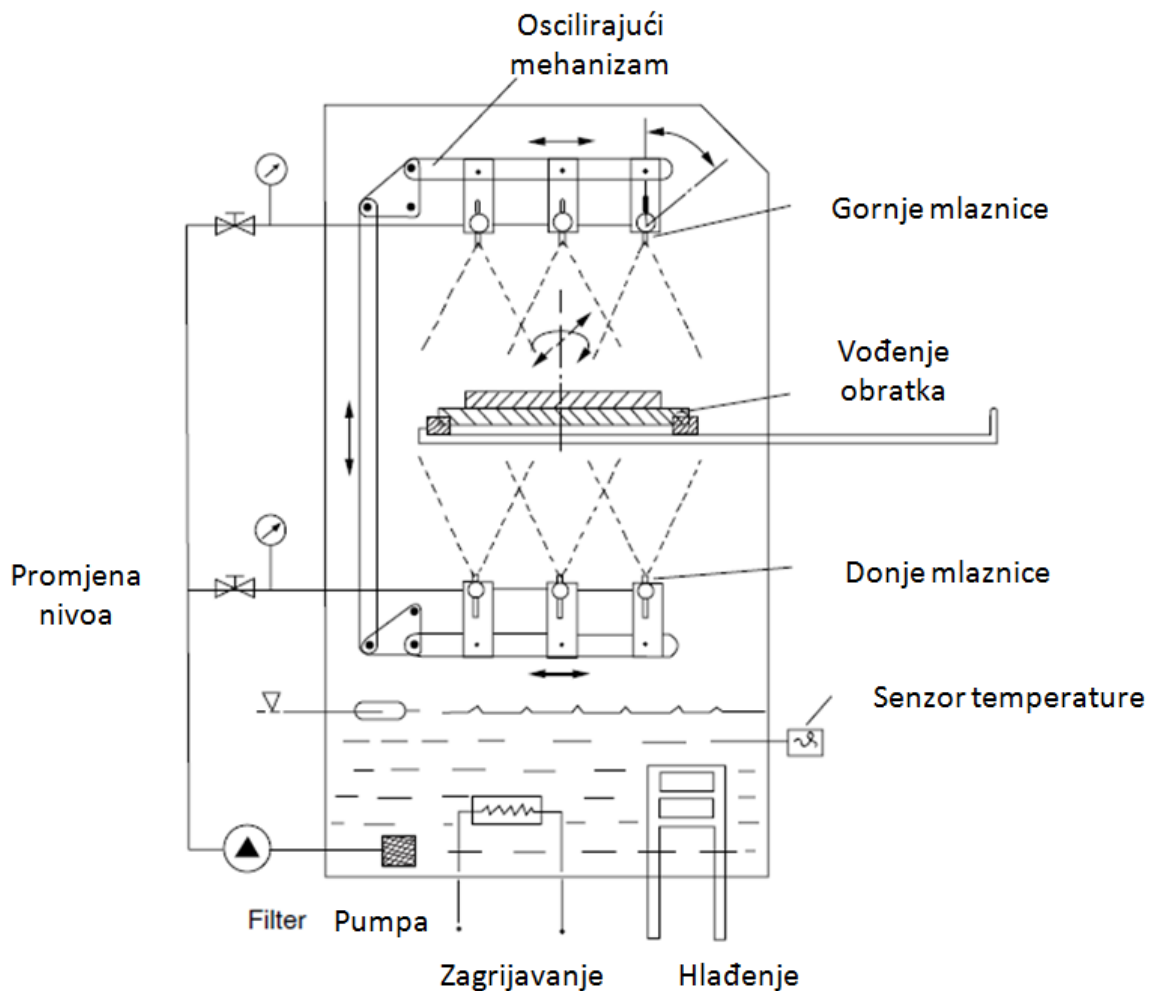
4.2.2. Princip rada PCM postupka

Postupak fotokemijske obrade vrlo je sličan postupku kemijskog glodanja s tim da se glodanjem obrađuju 3D dijelovi već oblikovani drugim postupcima, a fotokemijskom obradom ravni i vrlo tanki materijali (debljine 0,013 - 1,5 mm) za dobivanje točnih mikro oblika.

Način nanošenja reagensa je različit pa se i dubina nagrivanja različito kontrolira, kod CHM postupka - vremenom uranjanja, a kod PCM postupka - vremenom raspršivanja nagrivačkog sredstva. [4] Na izbor nagrivačkog sredstva utječe cijena, kvaliteta, dubina nagrivanja i brzina uklanjanja materijala. [3]

Sustav za fotokemijsku obradu sadrži [4]:

- gornje i donje mlaznice,
- višestruki transporter,
- jedinicu za pripremu obratka,
- jedinicu za mjerenje i kontrolu reagensa,
- jedinicu za pregled.

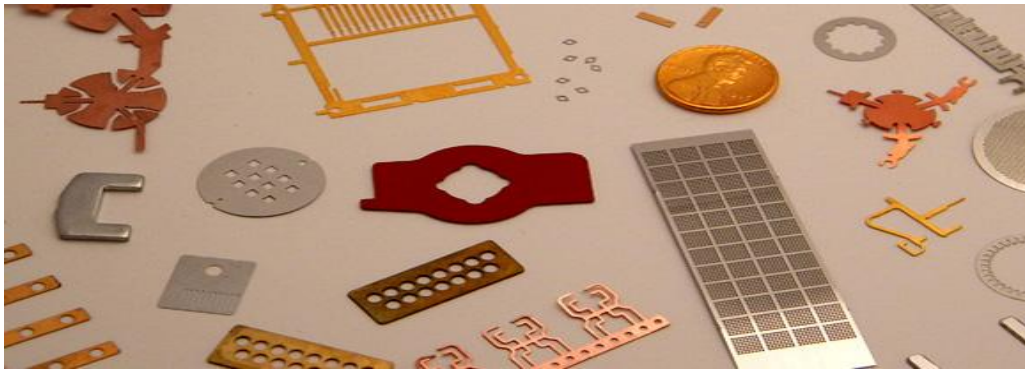


Slika 47. Shema PCM uređaja [4]

Prije same obrade pripremaju se dva foto - negativa u stvarnoj veličini. Oni se nanose na obradni materijal s gornje i donje strane, čime se minimalizira neželjeno nagrizanje i smanjuje vrijeme obrade. Foto - maske definiraju traženi oblik obratka.

4.2.3. Glavne značajke PCM postupka

Ovim se postupkom može obrađivati aluminij, bakar, cink, čelik, titan, nikal, olovo, staklo, keramika i dr. Pogodan je za obradu vrlo krhkih elemenata kod kojih bi konvencionalna obrada mogla izazvati naprezanja i lom. Proizvodi nastali ovim postupkom primjenjuju se u elektronici, zrakoplovstvu, telekomunikacijama i medicini. [4]



Slika 48. Prikaz nekih PCM proizvoda [46]

Visser i suradnici tvrde da je stopa skidanja materijala fotokemijskim postupkom 5 do 10 puta veća nego postupkom kemijskog glodanja.

Prednosti i nedostaci ovog postupka slični su kao i kod CHM postupka s tim da se kao prednost još može navesti [4]:

- vrijeme same obrade je kratko u usporedbi s konvencionalnim postupcima obrade;
- ne izaziva nikakve deformacije ni iskrivljenja;
- točnost i brzina obrade znatno su veće nego kod ECM postupka;
- uzorke foto - maski moguće je pohraniti i ponovno reproducirati.

Nedostaci postupka su [4]:

- skuplja oprema;
- zahtijeva visoko kvalificirane operatere.



Slika 49. Sustav za PCM obradu [47]

5. ELEKTROKEMIJSKI NEKONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADE

5.1. Elektrokemijska obrada - Electrochemical Machining (ECM)

Elektrokemijski postupak obrade koristi dva osnovna oblika energije, električnu i kemijsku energiju. Upotrebljava se u serijskoj proizvodnji pri obradi elektrovodljivih materijala koji se teško obrađuju i pri obradi geometrijski složenih oblika, npr. kalupa, ukovnja, alata, dijelova turbina i reaktora. [2]

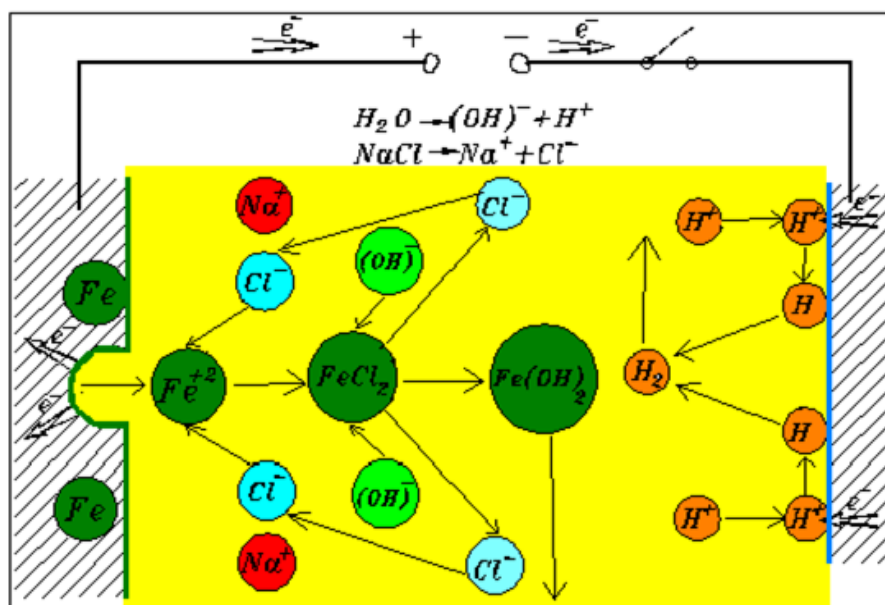


Slika 50. Prikaz nekih proizvoda obrađenih ECM postupkom [48]

5.1.1. Princip rada ECM postupka

Elektrokemijski postupak obrade je moderan postupak koji se temelji na uklanjanju materijala obratka elektrokemijskom razgradnjom na principu elektrolize.

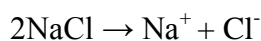
Elektrolizu izazivaju dvije elektrode spojene na izvor istosmjerne struje i uronjene u elektrolit. Obradak je pozitivna elektroda, a alat negativna (najčešće od legura bakra). Između elektroda (alata i obratka) prolazi struja i dolazi do reakcije raskidanja kemijskih veza na anodi, tj. obratku. Na taj način se zapravo vrši obrada.



Slika 51. Kemijske reakcije ECM postupka [2]

Primjer elektrokemijske reakcije na željeznom obratku kada je elektrolit vodena otopina natrijevog klorida:

- disocijacija $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + (\text{OH})^-$

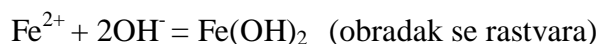


- pozitivni ioni putuju prema katodi, negativni prema anodi;

- reakcija na anodi: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ (Fe gubi dva elektrona)

- reakcija na katodi: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ (izdvaja se plin vodik)

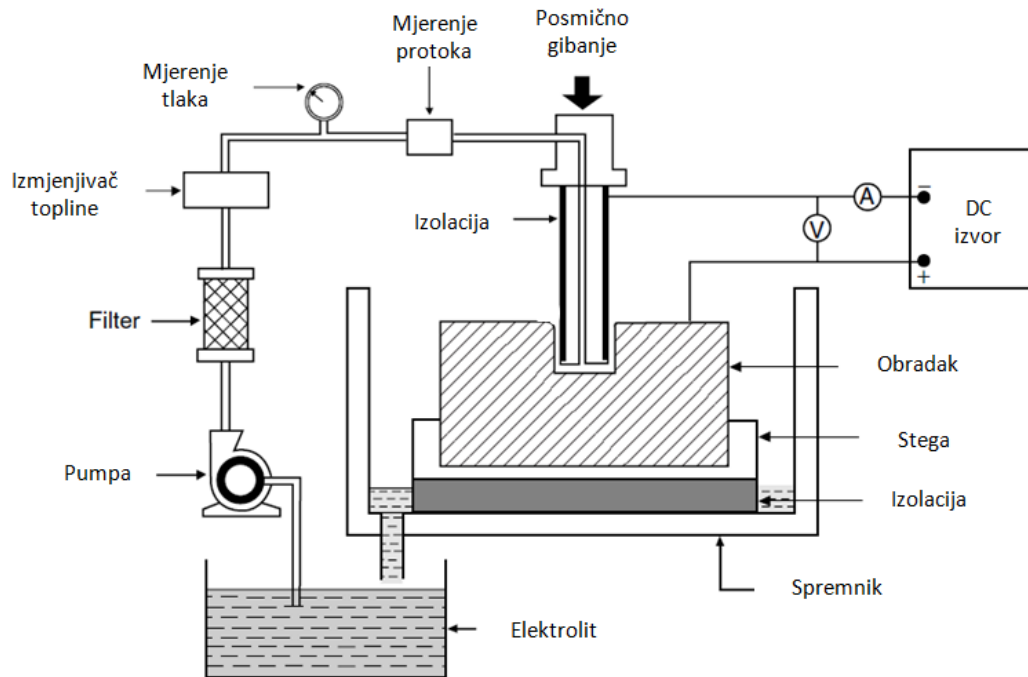
- Ioni željeza spajaju se s hidroksilnom skupinom, tvore željezni hidroksid i izlučuju se.



Količina rastvorene mase proporcionalna je količini električne energije.

Kao elektroliti koriste se NaCl i NaNO₃. NaNO₃ je učinkovitiji, ali skuplji.

Osim što stvarajući uvjete za anodno otapanje materijala provodi strujnu obradu, elektrolit ima ulogu uklanjanja produkata elektrokemijske reakcije. [3]



Slika 52. Shema ECM uređaja [4]

5.1.2. Glavne značajke ECM postupka

- ECM postupkom mogu se obraditi različiti materijali koji su elektrovodljivi;
- U obradku se utiskuje oblik alata;
- Alat se skoro i ne troši, glavni trošak alata nastaje zbog njegove pripreme;
- Zaostalih naprezanja gotovo da i nema;
- Nema zona utjecaja toplote;
- Koristi se istosmjerni generator, napon od 5 do 30 V, jakost 50 do 40000 A; [4]
- Upotrebljava se za izradu složenih dijelova koje je teže obraditi drugim postupcima;
- Postupak je pogodan za krte i tankostijene materijale budući da između alata i obratka nema kontakta;
- Udaljenost između alata i obratka je oko 0,1 mm;
- Posmak alata je od 0,1 do 20 mm/min;
- Brzina strujanja elektrolita je od 5 do 50 m/s. [2]

Za veću proizvodnost, točnost i bolju završnu obradu površine važno je odabrati pravi kemijski sastav i koncentraciju elektrolita te gustoću struje. [3]

Mehanička svojstva materijala nemaju utjecaja na produktivnost obrade. Proizvodnost je velika i

kreće se oko $50000 \text{ mm}^3/\text{min}$. [2]

Zbog različitih uvjeta obrade i karakteristika obratka dolazi do znatnih razlika u završnoj obradi. Uslijed početnih neravnina na obratku može doći do nepravilne raspodjele gustoće struje što za posljedicu ima mikroskopske izbočine i udubljenja koji čine površinsku hrapavost. [3]

Srednje odstupanje profila, R_a iznosi 0,1 do $2,5 \mu\text{m}$. [2]

Prednosti ECM postupka su [2]:

- na površini obratka nema zaostalih naprezanja;
- nema formiranja srha;
- alat ne mora biti izrađen od tvrdih materijala jer se ne troši;
- proizvodnost je velika;
- točnost dimenzija izratka je od 0,02 do 0,2 mm;
- visoka kvaliteta obrade.

Kao nedostatke ECM postupka može se navesti [2]:

- oprema je skupa, zauzima puno prostora i zahtijeva velik utrošak energije pa je postupak isplativ samo u serijskoj proizvodnji;
- obrađivati se mogu samo elektrovodljivi materijali;
- potrebna je oprema otporna na koroziju;
- kod postupka postoji ekološka opasnost.



Slika 53. ECM obrada [49]

6. HIBRIDNI POSTUPCI OBRADNE

Iako su razvojem nekonvencionalnih postupaka otklonjeni neki nedostaci postupaka obrade odvajanjem i ispunjeni zahtjevi novih materijala i proizvoda u odnosu na konvencionalne postupke, i jedni i drugi postupci pojedinačno još uvijek imaju puno nedostataka i ograničenja.

Konvencionalni postupci su, zbog karakteristika reznog alata, u primjeni ograničeni mehaničkim svojstvima materijala koji se obrađuje. Nekonvencionalnim postupcima obrade uglavnom je otklonjen utjecaj mehaničkih svojstava na obradu, ali su zato ograničeni fizikalnim svojstvima materijala, kao što su npr. električna ili toplinska vodljivost.

Pored navedenih ograničenja u području primjene, svaki postupak ima i po nekoliko drugih značajnih nedostataka. Ovisno o pojedinom postupku, nedostaci mogu biti: velika potrošnja energije, niska proizvodnost, visoka hrapavost, visoka cijena opreme, veliki gubitak vremena na pripremu postupka, otežana manipulacija obratkom, nedovoljna točnost obrade, opasnost po zdravlje ljudi, nepovoljan utjecaj na okoliš, prevelika buka, loša iskoristivost materijala i brojni drugi. Stoga se, nastojeći poboljšati proizvodne postupke, razvila hibridna tehnologija.

Hibridna tehnologija zasniva se na objedinjavanju dvaju ili više postupaka konvencionalne ili nekonvencionalne obrade u jedan postupak kako bi se prednosti jednog i drugog učinkovitije koristile, a nedostaci otklonili ili sveli na minimum.

Hibridna proizvodnja polazi od načela "1+1=3" što znači da su pozitivna svojstva i učinak novog tzv. hibridnog postupka veći od zbroja prednosti pojedinačnih postupaka obrade od kojih je hibridni postupak nastao.

Cilj hibridnih postupaka je povećati fleksibilnost, brzinu i kvalitetu obrade uz što manju cijenu. Uz to se teži ispunjenju sve složenijih tehnoloških zahtjeva kao što su: obrada nepristupačnih provrta, obrada dubokih provrta na zakrivljenoj površini, bušenje velikog broja usko razmaknutih provrta, obrada vrlo složenih i sitnih dijelova i obrada geometrijski složenih oblika. Hibridni postupci mogu objedinjavati različite izvore energije koji sudjeluju u procesu obrade ili objedinjavati korake u procesu na način da se nešto što se prije izvodilo u dva ili više koraka svede na jedan. [50]

U skladu s tim, razvili su se i hibridni alatni strojevi koji na jednom obradnom stroju objedinjuju aditivne tehnologije i tehnologije obrade odvajanjem čestica.

Hibridni postupci odvajanja čestica dijele se u dvije osnovne skupine i to su [50]:

- miješani postupci u kojima svi postupci izravno sudjeluju u odvajanju materijala;

- potpomognuti postupci u kojima samo jedan postupak izravno uklanja materijal, a drugi mu pomaže olakšavajući uvjete obrade.

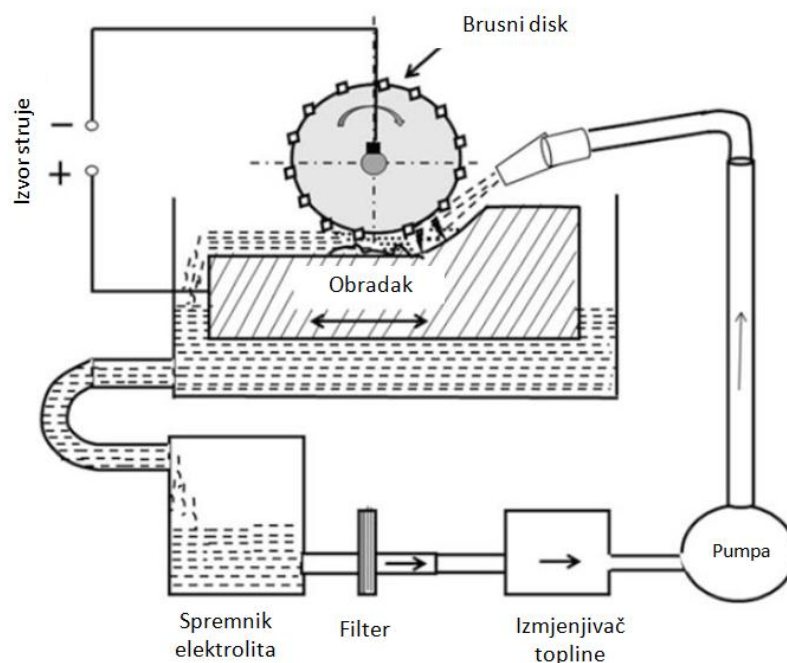
6.1. Miješani hibridni postupci - Combined or mixed-type processes

Najznačajniji miješani hibridni postupci su: elektrokemijsko brušenje, elektroerozijsko brušenje, obrada elektrokemijskim pražnjenjem i brušenje elektrokemijskim pražnjenjem. [50]

6.1.1. Elektrokemijsko brušenje - Electrochemical Grinding (ECG)

Budući da konvencionalni postupci obrade geometrijski nedefiniranom oštricom imaju veliko trošenje alata i nisku proizvodnost, nastoje se unaprijediti. Jedan od načina unapređenja je i hibridni postupak elektrokemijskog brušenja. ECG je kombinacija elektrokemijske obrade i konvencionalnog postupka brušenja kako bi se učinkovito i ekonomično, uz zadržavanje korisnih svojstava materijala, mogli obrađivati teškoobrađivi i krhki elektrovodljivi materijali. Elektrokemijskim brušenjem može se dobiti obradak visoke točnosti, površina bez zaostalih naprezanja, neravnina i zona utjecaja topline.

Brusni disk je spojen na izvor električne struje kao katoda, a obradak kao anoda. Između elektroda prolazi tok elektrolita koji odvođi odvojene čestice. Abrazivne čestice imaju zadatak održavati razmak između elektroda i uklanjati s obratka pasivni sloj nastao kemijskom reakcijom. [50]

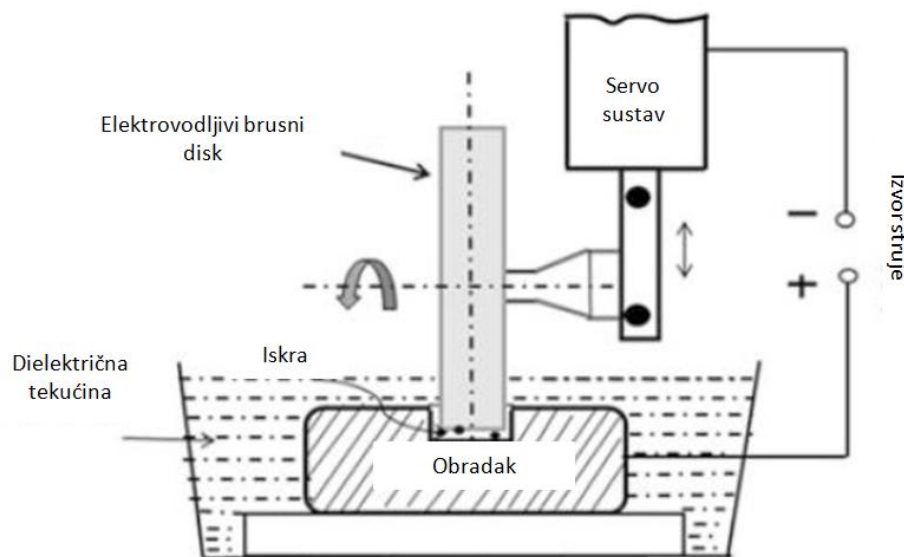


Slika 54. Shematski prikaz ECG postupka [50]

6.1.2. Elektroerozijsko brušenje - *Electric Discharge Grinding (EDG)*

Uređaj za elektroerozijsko brušenje sastoji se od elektrovodljivog brusnog diska, dielektrične tekućine, servo sustava i izvora struje. Brusni disk je na izvor struje spojen kao katoda, a obradak kao anoda. Uklanjanje materijala se vrši električnim pražnjenjem.

Postupak osigurava veću proizvodnost i bolju kvalitetu obrađene površine u usporedbi s EDM postupkom zbog učinkovitijeg ispiranja. [50]

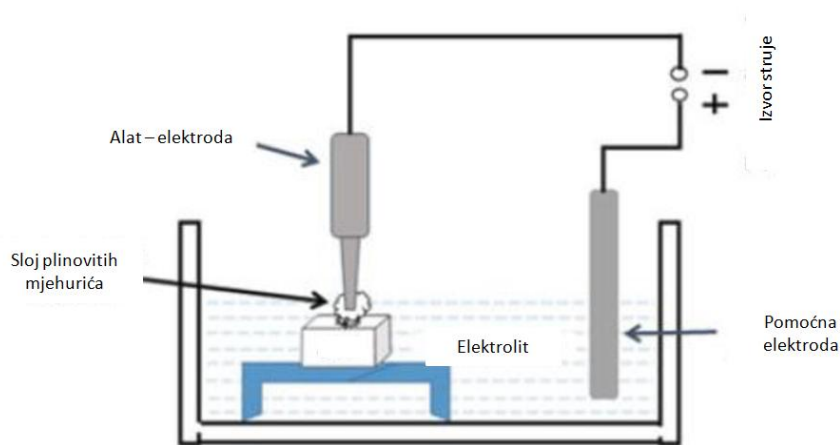


Slika 55. Shematski prikaz EDG postupka [50]

6.1.3. Obrada elektrokemijskim pražnjenjem - *Electrochemical Discharge Machining (ECDM)*

Obrada elektrokemijskim pražnjenjem je kombinacija elektroerozijske (EDM) i elektrokemijske (ECM) obrade. Na izvor struje spojena je elektroda - alat kao katoda, a pomoćna elektroda kao anoda. Na katodi se, povećanjem napona između elektroda, stvaraju mjehurići plina H_2 koji tvore izolacijski sloj između elektrode i elektrolita. Djelovanjem električne struje dolazi do rastvaranja izolacijskog sloja i započinje električno pražnjenje.

Ovaj postupak koristi se za materijale koji nisu elektrovodljivi kao što su polimeri, keramika, staklo i dr. Osigurava se bolja kvaliteta površine i veća proizvodnost. [50]



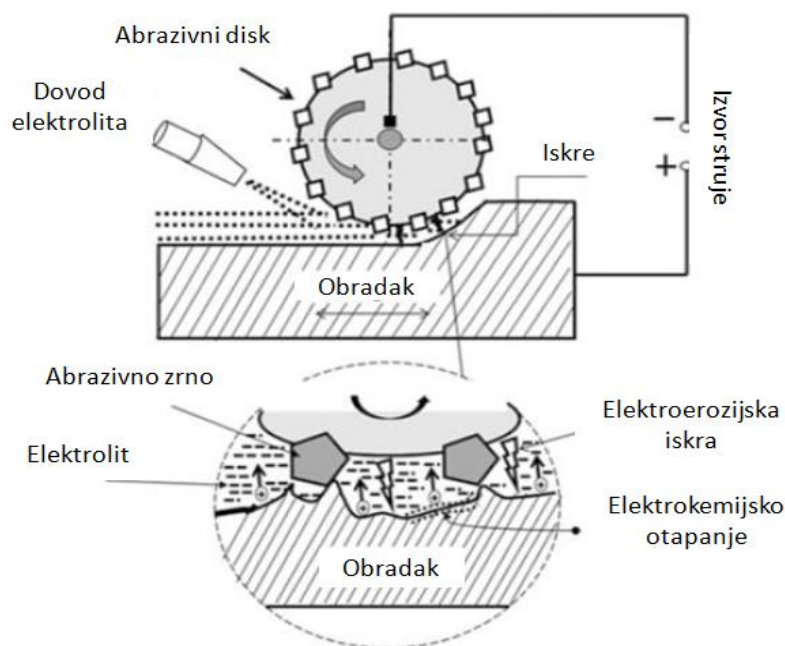
Slika 56. Shematski prikaz ECDM postupka [50]

6.1.4. Brušenje elektrokemijskim pražnjenjem - *Electrochemical Discharge Grinding (EDCG)*

Brušenje elektrokemijskim pražnjenjem objedinjuje elektroerozijsku obradu (EDM), elektrokemijsku (ECM) obradu i konvencionalno brušenje.

Zbog elektrokemijske reakcije na obratku (anodi) dolazi do otapanja. Uslijed elektrokemijske reakcije dolazi do stvaranja pasivnog oksidnog sloja na površini obratka koji se potom uklanja. Potom se iskrenjem reaktivnost ponovno povećava.

Ovim postupkom se povećava učinkovitost elektrokemijskog otapanja, a time i proizvodnost postupka. [50]



Slika 57. Shematski prikaz EDCG postupka [50]

6.2. Potpomognuti hibridni postupci - Assisted hybrid processes

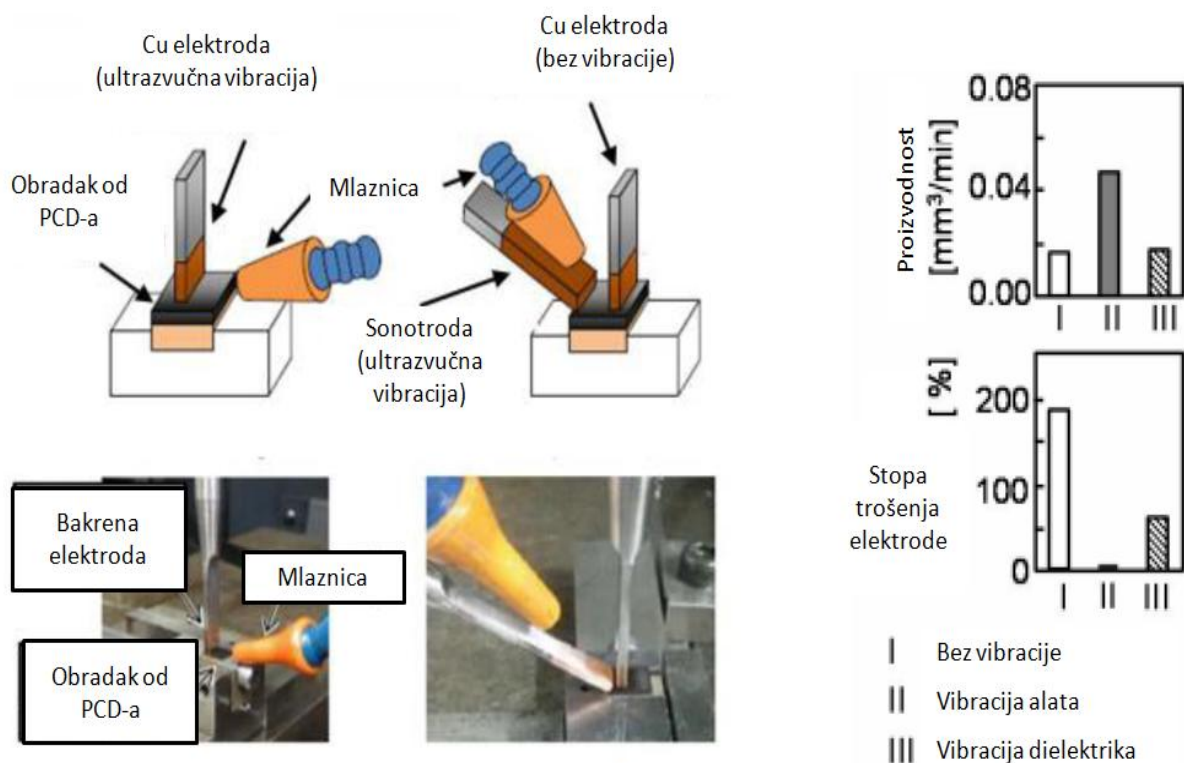
Potpomognuti hibridni postupci dijele se na vibracijski potpomognute i toplinski potpomognute postupke. Kod vibracijskih postupaka najčešće se koristi ultrazvučni postupak obrade, a kod toplinskih je najčešći laser. Uz laser se koriste i plazma te snop elektrona.

Najznačajniji potpomognuti hibridni postupci su: elektroerozijska obrada potpomognuta vibracijom, elektrokemijski postupak potpomognut ultrazvučnim postupkom i obrade potpomognute laserom. [50]

6.2.1. Elektroerozijska obrada potpomognuta vibracijom - Vibration-Assisted EDM

Elektroerozijskom postupku se kao pomoćni postupak dodaje vibracijsko gibanje alata, obratka ili dielektrične tekućine kako bi se povećala učinkovitost ispiranja čime se dobiva veća proizvodnost i stabilnost procesa. Ovaj postupak se često primjenjuje i kod mikro obrada.

Na slici 58 prikazan je princip EDM obrade potpomognute vibracijom na obratku od polikristalnog dijamanta. Vidljivo je da je pri jednakim parametrima obrade najveća proizvodnost postupka i najmanje trošenje elektrode kod vibracije alata. [50]

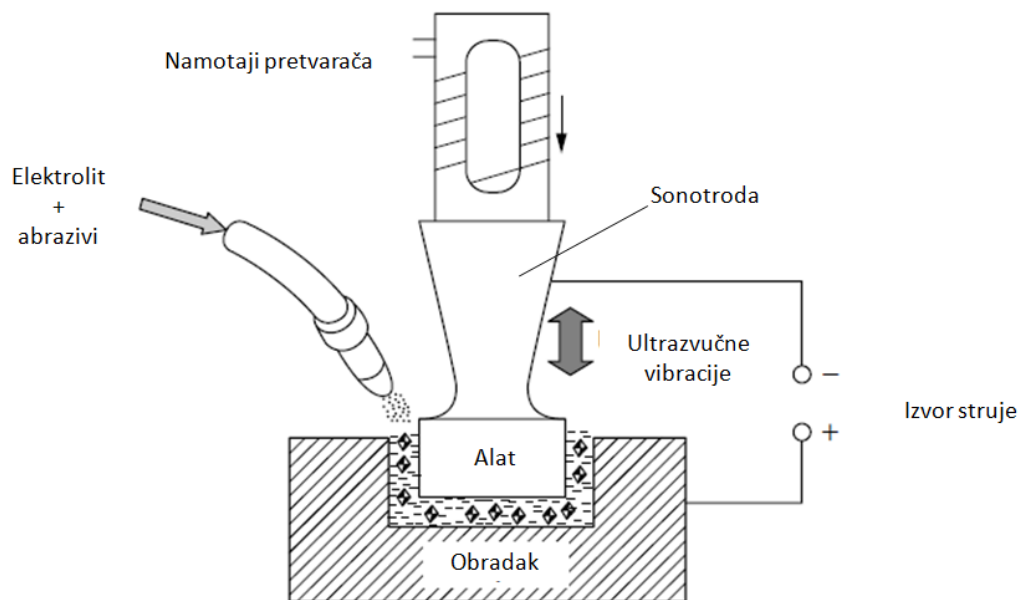


Slika 58. Princip EDM obrade potpomognute vibracijom [50]

6.2.2. *Elektrokemijski postupak potpomognut ultrazvučnim postupkom - Ultrasonic-Assisted ECM (USECM)*

Hibridni postupak USECM kombinira elektrokemijsku i ultrazvučnu obradu za uklanjanje elektrovodljivih i nevodljivih čestica.

Kombiniranjem oba postupka, zbog većih brzina i nižeg trošenja alata, postiže se veća proizvodnost. Postiže se i bolja kvaliteta površine. [3]



Slika 59. Shematski prikaz USECM postupka [3]

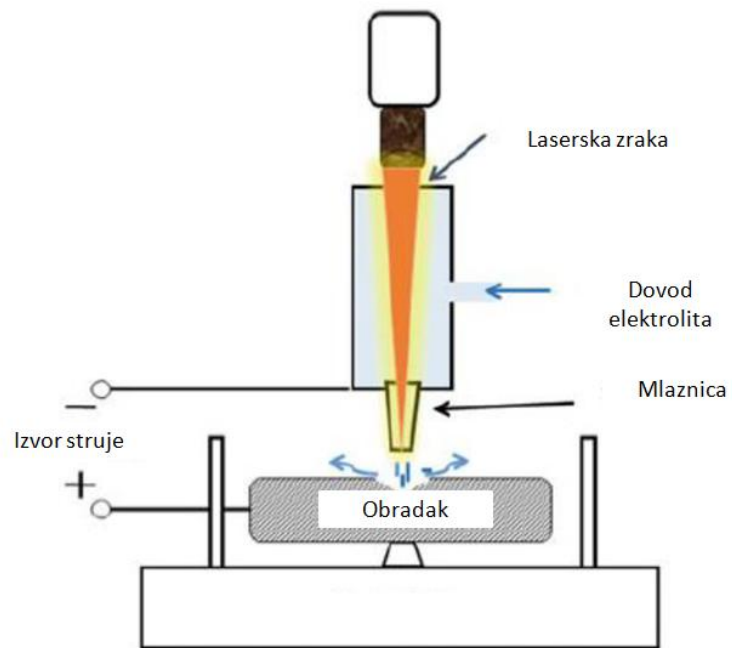
6.2.3. *Obrade potpomognute laserom - Laser-Assisted machining*

Laser djeluje kao vanjski izvor topline. Korištenjem vanjskog izvora topline poboljšava se obradivost tako što se minimiziraju sile u postupku, produljuje vijek trajanja alata i poboljšava kvaliteta površine.

Dva najčešća postupka potpomognuta laserom su:

- ECM obrada potpomognuta laserom - Laser-Assisted ECM (LAECM);
- EDM obrada potpomognuta laserom - Laser-Assisted EDM (LAEDM).

Kod LAECM postupka uloga lasera je poboljšanje lokalizacije procesa otapanja. Elektrolitičkim otapanjem, zbog dodatne topline dovedene laserom, poboljšano je uklanjanje materijala i smanjen je stupanj pasivizacije. [50]



Slika 60. Prikaz LAECM postupka [50]

LAEDM postupkom se smanjuje vrijeme proizvodnje i eliminiraju se pretaljeni površinski sloj i zone utjecaja topline nastali laserskim djelovanjem.

Najčešće se koristi u mikro obradama.

7. ZAKLJUČAK

Nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem čestica danas su vrlo značajni u industrijskoj proizvodnji. Njima je omogućena obrada novih teškoobrađivih materijala specifičnih svojstava koji se konvencionalnim postupcima nisu mogli obrađivati. Odvajanjem čestica bez izravnog kontakta između reznog alata i obratka i uvođenjem novih vrsta energije, otvorila se nova perspektiva u pogledu obrade odvajanjem čestica. Iako postoji velik broj različitih nekonvencionalnih postupaka obrade i svaki od njih u nekom segmentu predstavlja unapređenje i poboljšanje obrade, nijedan ne može u potpunosti odgovoriti na sve veće zahtjeve proizvoda i tržišta. Konvencionalni i nekonvencionalni postupci obrade zapravo se upotpunjuju u proizvodnji i ne predstavljaju međusobnu konkurenciju u svim područjima primjene.

Kao rezultat nastojanja da se postigne veća proizvodnost i kvaliteta, razvijaju se novi hibridni postupci koji objedinjuju više konvencionalnih i nekonvencionalnih postupaka.

Može se očekivati razvoj još naprednijih postupaka, pogotovo u smjeru mikroobrade.

LITERATURA

- [1] Überblick über Fertigungsverfahren, Institut für Integrierte Produktion Hannover
[<https://www.iph-hannover.de/de/dienstleistungen/fertigungsverfahren/uebesicht-fertigungsverfahren/>]
- [2] Udiljak, T.: Nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem čestica, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [3] El-Hofy, H.: Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes, McGraw-Hill, 2005.
- [4] Youssef, H. A., El-Hofy, H.: Machining Technology: Machine Tools and Operations, CRC Press, 2008.
- [5] Tadvi, M., Pandey, A., Prajapati, J., Shah, J.: Design and Development of Sonotrode for Ultrasonic Drilling, IMECE2015, 2015, Houston, Texas
- [6] Paulo Davim, J.: Machining : fundamentals and recent advances, Springer, 2008.
- [7] Sharma, A., Babbar, A., Jain, V., Gupta, D.: Enhancement of surface roughness for brittle material during rotary ultrasonic machining
[https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-complete-rotary-ultrasonic-machining-setup_fig1_329535299]
- [8] Jagadeesha, T.: Non Traditional Machining, National Institute of Technology, Calicut
[http://www.nitc.ac.in/dept/me/jagadeesha/mev303/Chapter_3_USM.pdf]
- [9] DMG MORI, Ultrasonic 85
[<https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic/ultrasonic-universal-monoblock/ultrasonic-85>]
- [10] Wang, J.: Ultrasonic Machining: A Total Mechanical Machining Technology Using Loose Abrasive Particles, IntechOpen, 2018.
[<https://www.intechopen.com/books/abrasive-technology-characteristics-and-applications/ultrasonic-machining-a-total-mechanical-machining-technology-using-loose-abrasive-particles>]
- [11] Jagadeesha, T.: Non Traditional Manufacturing Processes - An overview, National Institute of Technology, Calicut
[http://www.nitc.ac.in/dept/me/jagadeesha/mev303/OVERVIEW_OF_NTM_PROCESSES.pdf]

- [12] Vemana, P.: Ultra Sonic Machining: Working, Characteristics, Advantages and Applications, 2016.
- [13] Omax 5555 Water Jet Machining Center
[<https://edgerton.mit.edu/student-shops/n51-shop/tools/omax-5555-water-jet-machining-center>]
- [14] Waterjet Cutting: Take a closer look, MetalForming Magazine, 2017.
[https://www.metalformingmagazine.com/magazine/article/?/2017/2/1/Waterjet_Cutting:_Take_a_Closer_Look]
- [15] <https://wardjet.com/waterjet/university/precision-quality>
- [16] <http://waterjets.org/archive/about-waterjets/overview-of-waterjets/>
- [17] Kumar, P.: Water Jet & Abrasive Water Jet Machining, 2017.
[<https://www.slideshare.net/dpksobs/water-jet-abrasive-water-jet-machining>]
- [18] Waterjet technology takes the saw out of cutting glass and metal
[<https://libn.com/2009/08/28/waterjet-technology-takes-the-saw-out-of-cutting-glass-and-metal/>]
- [19] Mistri Ankit, N., Shah Hardil, D., Patel Urvin, R., Maisuria, M., Patel, D.: A Review on Abrasive Jet Machining, Journal for Research, 2017., 3, str. 12 - 18
[https://www.academia.edu/33502587/A_Review_on_Abrasive_Jet_Machining]
- [20] [<https://www.omax.com/accessories/rotary-axis>]
- [21] Jerman, M., Lebar, A., Sabotin, I., Drešar, P., Valentinčić, J.: Ice Jet Technology, MM Science Journal, 2018.
[<https://www.researchgate.net/publication/325613834>]
- [22] Ciglar, D.: ECM i EDM, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [23] Electrical Discharge Machining
[http://faculty.mercer.edu/jenkins_he/documents/MAE250ElectricalDischargeMachiningEDM.pdf]
- [24] Waldron, P: Advantages and Disadvantages EDM, EDM Precision Technologies, 2015.
[<https://edmprecision.com/advantages-and-disadvantages-edm/>]
- [25] Kumar, S., Singh, R., Singh, T.P., Sethi, B.L.: Surface modification by electrical discharge machining: A review, Journal of Materials Processing Technology, 2009., 209, str. 3675-3687
[<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092401360800705X>]
- [26] Jamwal, A., Aggarwal, A., Gautam, N., Devarapalli, A.: Electro - Discharge Machining:

- Recent Developments and Trends, IRJET, 2018., 5, str. 433-448
[https://www.researchgate.net/publication/327306190_Electro-Discharge_Machining_Recent_Developments_and_Trends]
- [27] Mahto, D., Singh, N.: Experimental Study of Process Parameters through Dissimilar Form of Electrodes in EDM Machining, 2016.
[https://www.researchgate.net/publication/306082278_Experimental_Study_of_Process_Parameters_through_Dissimilar_Form_of_Electrodes_in_EDM_Machining]
- [28] Understanding the power of wire EDM
[<https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/metalworking/understanding-the-power-of-wire-edm>]
- [29] Ghodsiyeh, D., Golshan A., Shirvanehdeh, J. A.: Review on Current Research Trends in Wire Electrical Discharge Machining (WEDM), Indian Journal of Science and Technology, 2013., 6, str. 4128-4140
[https://www.academia.edu/8659812/Review_on_Current_Research_Trends_in_Wire_Electrical_Discharge_Machining_WEDM]
- [30] Application of wire cut EDM machining, Kingred Electrical And Mechanical Technology Co., 2011.
[<http://www.kingedms.com/blog/index.php/2011/11/application-of-wire-cut-edm-machining/>]
- [31] Difference Between Die Sinking EDM and Wire - EDM
[<http://www.difference.minaprem.com/ntm/difference-between-die-sinking-edm-and-wire-edm/>]
- [32] [<https://www.sst-ebeam.com/en/sst-machines/perforation-machines.html>]
- [33] Electron Beam PIKA Finish Machine, Sodick
[<http://sodick.businesscatalyst.com/products/ebmpolishing.htm>]
- [34] Murray, J.W., Kinnell, P.K., Cannon, A.H., Bailey, B., Clare, A.T.: Surface finishing of intricate metal mould structures by large-area electron beam irradiation, Precision Engineering, 2013., 37, str. 443 - 450
[https://www.academia.edu/28770402/Surface_finishing_of_intricate_metal_mould_structures_by_large-area_electron_beam_irradiation]
- [35] Osnovni principi rada laserskog rezanja metala, Laser ing, 2018.
[<http://www.laser-ing.hr/blog/princip-rada-laserskog-rezanja-metala/>]
- [36] Laser Beam Machining, Me mechanical, 2020.

- [<https://me-mechanicalengineering.com/laser-beam-machining/>]
- [37] [<https://www.newport.com/t/laser-diode-technology>]
- [38] CO₂ Lasers vs. Nd:YAG Lasers, Litron, 2015.
[<http://www.litron.com/wp/co2-lasers-vs-ndyag-lasers/>]
- [39] Slatineanu, L., Coteata, M., Besliu, I., Dodun, O.: Thermal phenomena at the Laser Beam Machining, International Journal of Material Forming, 2010., 3, str. 1103-1106
[https://www.academia.edu/7987267/Thermal_Phenomena_at_the_Laser_Beam_Machining]
- [40] [<https://www.kaeppler-pausch.de/en/technologies/id-2d-laser-cutting-cnc-stamping>]
- [41] Badgujar, P. P., Rathi, M. G.: Abrasive Waterjet Machining - A State of Art, IOSR - JMCE, 2014., 11, str. 59 - 64
[<http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol11-issue3/Version-6/I011365964.pdf>]
- [42] Understanding Plasma Arc Cutting, Thomas Industry
[<https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/understanding-plasma-arc-cutting/>]
- [43] Quality requirements - thermal cutting, Hera
[<https://www.hera.org.nz/quality-requirements-thermal-cutting/>]
- [44] [<http://www.laser-ing.hr/blog/rezanje-plazmom-postupci-tehnike/>]
- [45] Chem Mill, Ducommun
[<https://www.ducommun.com/structuralsolutions/chemMill.aspx>]
- [46] Photo-etched precision metal parts, Orbel
[<https://www.orbel.com/photo-etched-precision-metal-parts>]
- [47] [<https://schmid-group.com/en/business-units/electronics/photo-chemical-milling/>]
- [48] Electro Chemical Machining (ECM), Köppernechm
[<http://www.koepfern-ecm-electrochemical-machining.de/>]
- [49] Electro Chemical Machining
[<https://www.pmprecision.com/competences/manufacturing/electro-chemical-machining-ecm/>]
- [50] Ramkumar, J., Singh, M.: Overview of Hybrid Machining Processes (HMPs)
[<http://home.iitk.ac.in/~jrkumar/download/Chapter%20%20-%20Overview%20of%20Hybrid%20Machining%20processes.pdf>]

PRILOZI

I. CD-R disc