

IZRADA OZUBLJENJA NA OSOVINI ELEKTROEROZIJOM

Kalmeta, Fran

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:819857>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

IZRADA OZUBLJENJA NA OSOVINI ELEKTROEROZIJOM

Kalmeta, Fran

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:819857>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2023-02-13**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ
STROJARSTVA

Fran Kalmeta

IZRADA OZUBLJENJA NA OSOVINI ELEKTROEROZIJOM

Diplomski rad

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ
STROJARSTVA

Fran Kalmeta

IZRADA OZUBLJENJA NA OSOVINI ELEKTROEROZIJOM

Diplomski rad

Mentor:

Dr.sc. Denis Kotarski

Karlovac, 2022.

**KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

Fran Kalmeta

**SPLINE SHAFT MANUFACTURING USING ELECTRICAL
DISCHARGE MACHINING**

FINAL PAPER

Mentor:

Dr.sc. Denis Kotarski

Karlovac, 2022.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, uz pomoć stručne literature i interneta, te pomoću mentora Denisa Kotarskog i tvrtke Bratelj.

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru Denisu Kotarskom na pristupačnosti, strpljenju, razumijevanju i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada. Veliko hvala Antoniu Skendroviću i tvrtki Bratelj koji su mi velikodušno omogućili izvedbu projekta i pružili mi novo korisno praktično iskustvo.

Karlovac, 2022.

Fran Kalmeta

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je izrada ozubljenja na osovini pomoću elektroerozijske tehnologije. Projekt će započeti konstrukcijom osovine u software-u Creo, nakon čega će se izraditi osovina na tokarskom stroju. Pomoću erozimata (bakrene elektrode) izradit će se ozubljenje na osovini te opisati cijela procedura rada na stroju. Cilj je steći novo teoretsko znanje istražujući ovu tehnologiju, te dobiti praktično iskustvo prilikom izrade osovine.

Ključne riječi: elektroerozija, ozubljenje, osovina, Creo

SUMMARY

The subject of this graduation thesis is spline shaft manufacturing using electrical discharge machining. The project will start with shaft construction in the Creo software. The shaft will be made on the lathe and the spline with a copper electrode using the electrical discharge machine. The goal of this project is to gain new theoretical knowledge and practical experience in this field of engineering.

Key words: electroerosion, spline, shaft, Creo

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	ELEKTROEROZIJSKA OBRADA.....	2
2.1.	POVIJESNI RAZVOJ TEHNOLOGIJE.....	2
2.2.	PROCES OBRADE ELEKTROEROZIJOM	4
2.3.	DIELEKTRIČNA TEKUĆINA	6
2.4.	RADNI STOL	7
2.5.	PODRUČJE PRIMJENE ELEKTROEROZIJE	10
2.6.	ELEKTROEROZIJA ŽICOM.....	10
2.6.1.	PRINCIP RADA	11
2.6.2.	ŽICA.....	12
2.6.3.	OSI I PUTANJA ŽICE.....	13
2.6.4.	PRIMJENA I KARAKTERISTIKE.....	14
2.7.	ELEKTROEROZIJA ŽIGOM	17
2.7.1.	ALAT.....	17
2.7.2.	IZVEDBE STROJEVA	19
2.7.3.	KARAKTERISTIKE I PRIMJENA.....	22
3.	KONSTRUKCIJA VRATILA U CREO PARAMETRIC SOFTWARE-U	25
3.1.	OPĆENITO O SOFTWARE-U	25
3.2.	POSTUPAK KONSTRUKCIJE VRATILA.....	25
4.	IZRADA VRATILA NA TOKARILICI.....	33
5.	POSTUPAK IZRADE OZUBLJENJA ELEKTROEROZIJOM ŽIGOM.....	36
5.1.	PRIPREMA	36

5.2. UMJERAVANJE TICALA.....	38
5.3. NULIRANJE OBRATKA.....	40
5.3. PROMJENA „GLAVE“ ALATA	42
5.4. KOMPARIRANJE ELEKTRODE.....	44
5.5. UZIMANJE EKSCENTRA ELEKTRODE.....	45
5.7. TESTNO ERODIRANJE	48
5.8. ODREĐIVANJE VISINE DIELEKTRIČNE TEKUĆINE	48
5.9. ERODIRANJE	49
6. POSTUPAK IZRADE KONUSA ELEKTROEROZIJOM ŽIGOM.....	52
7. PRIMJENA VRATILA	56
8. ZAKLJUČAK.....	57
LITERATURA	58

POPIS SLIKA

Slika 1 Proizvodi dobiveni elektroerozijskom obradom [1]	1
Slika 2 Priestley-ev eksperiment [2]	3
Slika 3 Svjetljika na principu električnog pražnjenja [2].....	3
Slika 4 Proces elektroerozije [4].....	5
Slika 5 Naponski i strujni impulsi [4].....	5
Slika 6 Proces električnog pražnjenja [5]	6
Slika 7 Primjer radnog stola za elektroeroziju žigom [8]	8
Slika 8 Proizvodi dobiveni elektroerozijom [4].....	10
Slika 9 Elektroerozijska obrada žicom [10].....	11
Slika 10 Fizikalno načelo odvajanja čestica elektroerozijom [11]	12
Slika 11 Kalemi žice [12]	13
Slika 12 Širina reza u odnosu na promjer žice [13].....	14
Slika 13 Shema stroja za elektroeroziju žicom [14]	15
Slika 14 Proizvodi dobiveni elektroerozijom žicom [15].....	16
Slika 15 Shema rada stroja elektroerozije žigom [16].....	17
Slika 16 Primjer alata (elektroda) za obradu [17].....	19
Slika 17 Elektroerozijsko bušenje [1].....	20
Slika 18 Planetarna elektroerozijska obrada [1]	21
Slika 19 Elektroerozijsko glodanje [1]	21
Slika 20 Zona utjecaja topine [18].....	23
Slika 21 Primjer elektroerozijske obrade kalupa bakrenom elektrodom (žigom) [19].....	23
Slika 22 Materijali dobiveni elektroerozijom žigom [20].....	24
Slika 23 Crtež za vratilo	26
Slika 24 Otvaranje novog projekta	27
Slika 25 Odabir koordinatne osi	27
Slika 26 Izgled alatne trake „Sketch“	27

Slika 27 Izgled nepotpuno definirane skice.....	28
Slika 28 Izgled potpuno definirane skice.....	29
Slika 29 Izgled alatne trake „Model“.....	29
Slika 30 „Revolve“ funkcija.....	30
Slika 31 „Središnja gnijezda“.....	31
Slika 32 „Hole“ funkcija.....	32
Slika 33 Oblik vratila za izradu na tokarilici.....	32
Slika 34 Fiksiranje sirovca.....	33
Slika 35 Obrada.....	34
Slika 36 Konačni izgled vratila.....	35
Slika 37 Alat i crtež za izradu ozubljenja.....	36
Slika 38 Fiksiranje obratka u steznu napravu.....	37
Slika 39 Postavljanje stezne naprave na magnet.....	37
Slika 40 Uređaj za pomicanje alata.....	38
Slika 41 Umjeravanje alata (bakrenog ticala) pomoću komparatora.....	39
Slika 42 Pozicioniranje ticala u središte vratila.....	40
Slika 43 Izgled sučelja i tipkovnice za unos podataka.....	41
Slika 44 Pridržavanje glave alata prije ispuštanja.....	42
Slika 45 Funkcija „Futr auf“ – ispuštanje glave alata.....	42
Slika 46 Stavljanje glave za prihvat elektrode.....	43
Slika 47 Pritezanje elektrode za prihvat.....	43
Slika 48 Kompariranje elektrode po x osi.....	44
Slika 49 Uzimanje ekscentra po y osi.....	45
Slika 50 Podešavanje visine erodiranja.....	46
Slika 51 Programiranje - ozubljenje.....	47
Slika 52 Mjerenje visine.....	48
Slika 53 Uranjavanje obratka u dielektrik.....	49
Slika 54 Obrada na „grubo“.....	49
Slika 55 Provjera stanja obrade.....	50

Slika 56 Obrada na „fino“.....	50
Slika 57 Ozubljenje na vratilu	51
Slika 58 Alat i crtež za izradu konusa.....	52
Slika 59 Uzimanje visine erodiranja pomoću etalona.....	53
Slika 60 Programiranje - konus	54
Slika 61 Erodiranje	55
Slika 62 Konus na vratilu	55
Slika 63 Plastični čep dobiven iz kalupa	56

POPIS TABLICA

Tablica 1 Usporedba dielektričnih tekućina [1].....	7
Tablica 2 Usporedba metalnih i grafitnih alata [1]	18

1. UVOD

Zadatak ovog diplomskog rada je upoznavanje s elektroerozijskom obradom i njenom primjenom. Iako ova tehnologija danas nije nepoznanica, njena popularnost je veoma porasla u zadnjih nekoliko desetljeća. Uzrok tome, osim napretka tehnologije, jesu zahtijevana visoka preciznost obrade materijala, koja bi se teško dobila konvencionalnim metodama obrade odvajanjem čestica. Elektroerozijska obrada pretežito se koristi za proizvodnju kalupa i matrica za masovnu proizvodnju. Osim toga, koristi se za izradu reznih alata, te za sitne dijelove visoke dimenzijske preciznosti složenih oblika napravljenih od teško obrađivih materijala. Ova obrada zastupljena je u mnogim granama industrije: automobilskoj, elektroničkoj, u proizvodnji medicinskih instrumenata, igračaka, u aeronautici itd.



Slika 1 Proizvodi dobiveni elektroerozijskom obradom [1]

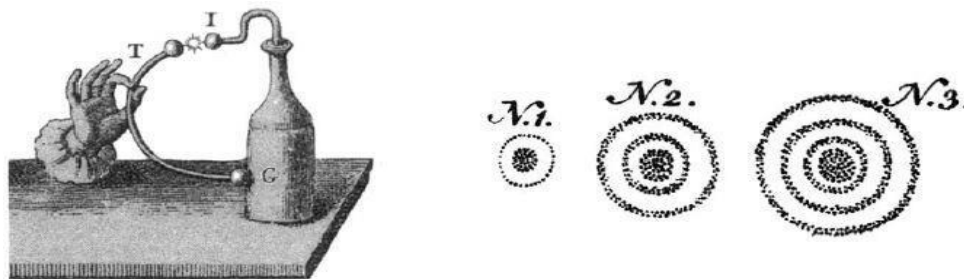
2. ELEKTROEROZIJSKA OBRADA

Elektroerozijska obrada radi samog fizikalnog načela obrade zahtjeva da elektroda i materijal obrade budu izrađeni od električki vodljivog materijala. Električnim pražnjenjem između elektrode i obratka (u razmaku otprilike 10 – 100 μm) vrši se odvajanje čestica. Proces se odvija obično u dielektričnoj tekućini (ulje ili deionizirana voda), no postoji i proces bez njegovog prisustva. („ Dry EDM “). Ova obrada prikladna je za obrađivanje visoko čvrstih i tvrdih materijala, raznih legura, pa i nekih vrsta keramike. Za razliku od konvencionalnih metoda obrade odvajanja čestica, kod elektroerozijske obrade tvrdoća obratka ne utječe na proces obrade. Ovdje ne postoji kontakt između obratka i alata, stoga nema ni mehaničke sile među njima, odnosno nemamo zadiranje alata u površinu obratka. Temperatura iskre između te dvije površine iznosi između 8000 – 12000 °C. Pojedinačnim električnim pražnjenjem odvaja se veoma malo materijala ($10^{-6} - 10^{-4} \text{ mm}^3$), no ovaj proces se ponavlja oko 10000 puta u sekundi.

Obrađeni materijali ovom metodom karakteristični su visokom dimenzijskom točnošću i visokom kvalitetom površine, odnosno malom hrapavošću. Prednost je i što se obrađeni alati ne moraju podvrgavati popuštanju i ponovnom kaljenju, pa se izbjegava rizik od stvaranja naprezanja i deformacija. Tijekom obrade nije potrebno rotirati obradak, a rotacija alata je potrebna onda kada je on cilindričan i kada ima mali poprečni presjek. U odnosu na tradicionalne metode, nedostaci su: relativno sporo uklanjanje materijala, promjena površinske strukture materijala obrade radi visokog utjecaja topline, te ograničena veličina obratka i alata.

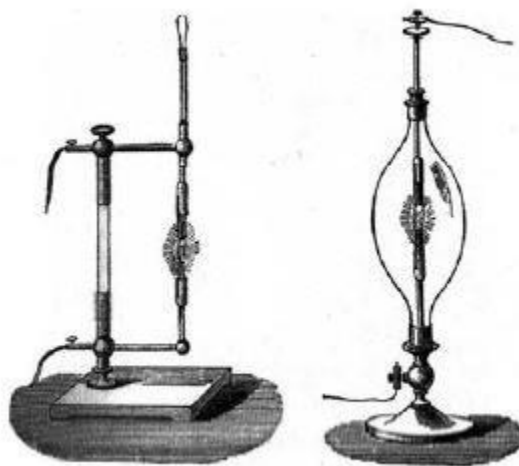
2.1. POVIJESNI RAZVOJ TEHNOLOGIJE

Elektroerozijska obrada javlja se 18. stoljeću fenomenom erozije metala iskrenjem koju je predstavio znanstvenik Benjamin Franklin. 1766. godine, Joseph Priestley, engleski kemičar i teoretičar prezentirao je erozijski učinak električnog pražnjenja na površini katode. Također, otkrio je i utjecaj vrste materijala elektrode i jakosti struje pražnjenja na veličinu kratera nastalog na površini elektrode.



Slika 2 Priestley-ev eksperiment [2]

1799. godine talijanski znanstvenik Alessandro Volta izumio je bateriju pomoću koje se ostvario kontinuirani proces električnih praženja. 1808. godine, Humphry Davy u Londonu na Kraljevskom institutu stvorio je stabilni proces električnog praženja koristeći veliku elektrokemijsku bateriju. Između dvije horizontalne ugljične elektrode ostavio je razmak pa ih spojio na bateriju. 1820. godine, Auguste Arthur de la Rive (švicarski filozof) dokazao je da se električno praženje može odvijati i u vakuumu. Iz staklene posude izvadio je zrak pa u nju umetnuo dvije elektrode te predstavio svjetiljku na principu električnog praženja.



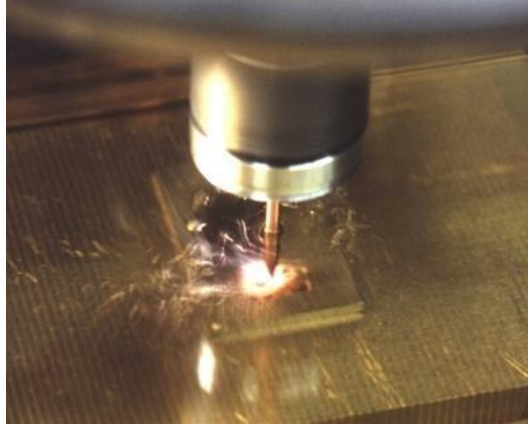
Slika 3 Svjetiljka na principu električnog praženja [2]

1943. godine, Boris i Nataly Lazarenko su u Moskvi predstavili elektroerozijsku tehnologiju obrade kakvu danas poznajemo. Eksperimentom uronjavanja elektroda u ulje primijetili su kako je proces električnog praženja više predvidljiv i ujednačen nego u okolini zraka. Radi toga, došli su do ideje da iskoriste ovakvo kontinuirano električno praženje za obradu odnosno uklanjanje viška materijala. Za vrijeme rata razvili su prvi elektroerozijski uređaj za obradu veoma tvrdih metala koji su se primjenjivali u vojnoj industriji. Razumijevanje elektroerozije i početak masivne

proizvodnje uređaja za obradu započeli su pedesetih godina dvadesetog stoljeća. Znatno poboljšanje kvalitete uređaja pridonio je razvoj poluvodiča. Elektroerozija žigom postala je mnogo pouzdanija i omogućila je kontrolu nad kvalitetom površine za vrijeme obrade. S druge strane, razvoj elektroerozije žicom tek je započinjao, a istaknula se sedamdesetih razvojem numeričkog upravljanja osima strojeva. Osamdesetih razvija se i mikro obrada. Idućih desetljeća pa do danas, ulaže se u razvoj automatizacije i upravljačkih sustava, servo sustava i robotike što doprinosi razvitku ove tehnologije iz dana u dan.

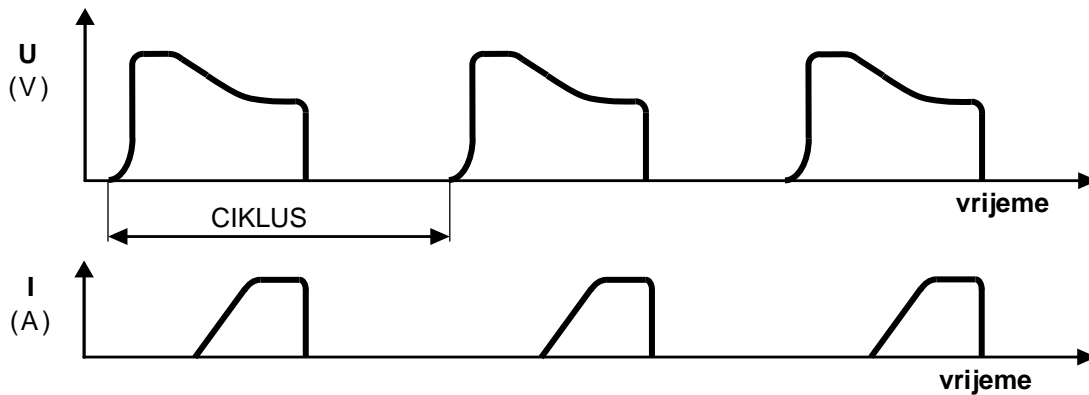
2.2. PROCES OBRADJE ELEKTROEROZIJOM

Kako bi ovaj proces bio izvediv, alat i obradak moraju biti uronjeni u dielektričnu tekućinu i moraju biti električki vodljivi jer se proces temelji na razlici njihovog potencijala. Tekućina ima izolacijska svojstva a naziva se još i dielektrik. Iskra između alata i obratka vrši odstranjivanje materijala. Prostor između (zazor) otprilike iznosi 10 – 100 μm , a regulira se pomoću radnog napona. Veličina zazora definira veličinu električnog polja koje nastaje razlikom potencijala alata i obratka. Obično je alat spojen na negativan pol istosmjernog izvora (katoda), a obradak na pozitivan (anoda). Stvaranjem električnog polja između anode (obradak) i katode (alat) javljaju se elektrostatičke sile koje djeluju na slobodne elektrone. Porastom napona, elektroni prelaze energetska barijeru (površinsku strukturu koja onemogućava elektronima njen prijelaz bez dodatne energije), te pod djelovanjem el. polja ubrzavaju prema obratku kroz dielektričnu tekućinu. Porastom brzine kretanja elektrona kroz tekućinu, dolazi do ionizacije molekula dielektrika, odnosno stvaranja većeg broja pozitivnih elektrona i iona. Onda kada njihova koncentracija znatno poraste, nastaje kanal plazme čiji je el. otpor vrlo malen. Plazma, odnosno velik broj elektrona i iona istovremeno će putovati od alata prema obratku i obrnuto, a to gibanje možemo primijetiti u obliku iskre. U ovome procesu, imamo pretvorbu električne energije u toplinsku. Utjecajem te toplinske energije i udaranjem plazme u površinu obratka, dolazi do erozije, odnosno odvajanja čestica s obratka, kao i s alata. Regulacijom napona povećava se kinetička energija i silina udarca plazme tj. elektrona i iona.

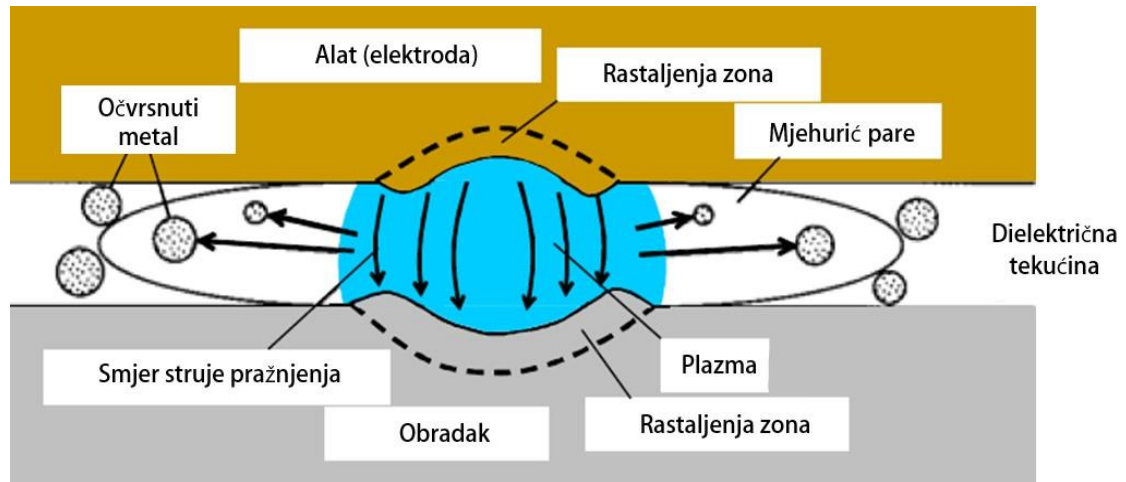


Slika 4 Proces elektroerozije [4]

Kako bi se postigla točna i kvalitetna obrada unutar uskih tolerancijskih polja, struja mora djelovati u kratkim impulsima. Vremenski period između dvije iskre nešto je veći od samog trajanja iskre. Da bi u jedinici vremena odstranili veći volumen materijala, el. impulsi putuju jedan za drugim velikom frekvencijom od 500 – 5000 iskri po sekundi.



Slika 5 Naponski i strujni impulsi [4]



Slika 6 Proces električnog pražnjenja [5]

2.3. DIELEKTRIČNA TEKUĆINA

Već je prvim ispitivanjima elektroerozijskog postupka dokazano da je puno veća erozija materijala i razmak među elektrodama puno manji ako koristimo dielektričnu tekućinu. Njen zadatak je da:

- Stvori pogodne uvjete za elektroerozijski proces (svojstvo izolatora dok ne postigne probojni napon između elektroda)
- Ispira i odnosi odvojene čestice iz međuelektrodnog razmaka
- Hladi obradak i alat

Dielektrik treba biti termički i kemijski postojan, mora biti što manjeg viskoziteta i imati antikorozivna svojstva. Niži viskozitet pruža veću točnost i kvalitetu obrađene površine jer onda zazor između obratka i elektrode može iznositi manje od 0.005 mm. Tekućina se treba ponašati kao izolator dok se ne pojavi probojni napon između anode i katode. Ona mora biti čista kako bi se omogućilo potrebno strujanje tekućine između obratka i alata da bi obrada bila efikasna.

Također, specifična gravitacija tekućine utječe na efikasnost erozije. Ulje niže specifične gravitacije uklanja djelotvornije veće odstranjene čestice s mjesta obrade te se tako eliminira mogućnost nekontroliranog el. pražnjenja i kontaminacije. Cirkulacija tekućine je bitna kako bi se čvrste čestice nastale tijekom obrade odstranile i filtrirale u glavni spremnik dielektrične tekućine. U početku obrade, boja dielektrika bi trebala biti čim prozirnija, a tijekom procesa obrade dolazi do tamnjenja odnosno kontaminacije. Prozirnost je važna da bi se mogao vidjeti uronjeni obradak kao i mjesto obrade. Tijekom obrade, prisutan je sumpor iz tekućine koji je nepoželjan.

Za svaku obradu bitno je pažljivo odabrati odgovarajuću tekućinu ovisno o materijalu alata i obratka i definiranim parametrima obrade. U tablici ispod možemo vidjeti usporedbu karakteristika deionizirane vode i ulja.

Tablica 1 Usporedba dielektričnih tekućina [1]

	ULJE	DEIONIZIRANA VODA
Elektrolitska oštećenja	Ne uzrokuje elektrolitska oštećenja	Može doći do elektrolitskog oštećenja
Toplinska oštećenja	Može doći do toplinskih oštećenja	Ne uzrokuje toplinska oštećenja
Otvrdnuće površine obratka	Može doći do otvrdnuća površine obratka	Ne dolazi do otvrdnuća površine obratka
Brzina obrade	Mala	Velika
Kvaliteta obrađene površine	Bolja	Lošija
Polaritet alata	Pozitivan	Negativan
Trošenje alata	Manje	Veće

2.4. RADNI STOL

Da bi se onemogućio pomak obratka za vrijeme procesa, stežemo ga na radni stol pomoću raznih steznih naprava. Stezne naprave su puno jednostavnije i ne moraju osigurati veliku krutost kao kod tradicionalnih obrada zato što kod elektroerozijskog procesa nema direktnog dodira između alata i obratka. Radi fizikalnih principa obrade potrebno je priključiti jedan pol istosmjernog izvora na steznu napravu na koju će biti učvršćen obradak.

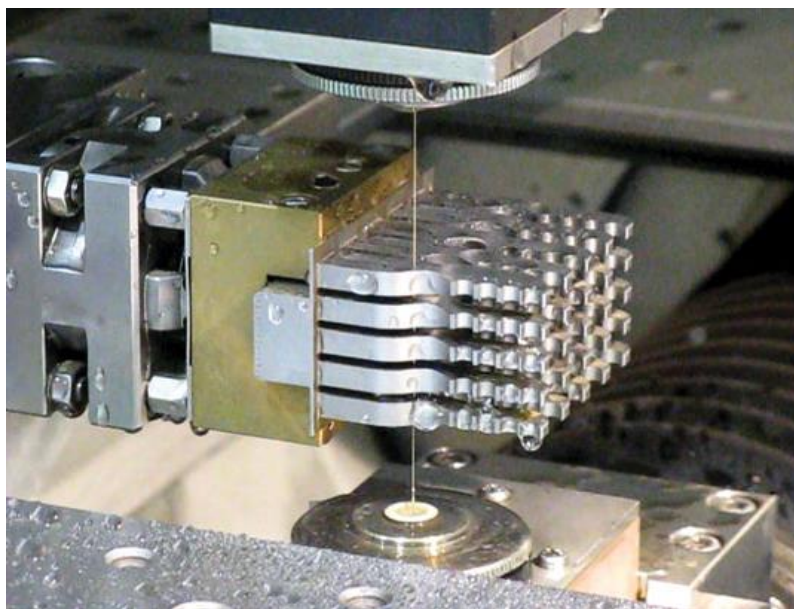
Na slici ispod možemo vidjeti primjer radnog stola stroja za elektroeroziju žigom. Alat se pomiče u smjeru vertikalne Z osi. Na horizontalni stol se pomoću steznih naprava steže obradak.

Sličan je način stezanja kao kod tradicionalnih metoda (npr. bušenje, glodanje, brušenje...) , no kod ovih metoda nužna je veća sila stezanja.



Slika 7 Primjer radnog stola za elektroeroziju žigom [8]

Na slici ispod možemo vidjeti radni stol za elektroeroziju žigom. Žica se kreće između donjeg i gornjeg sklopa valjka. Sklopovi imaju u sebi sustav za kontrolu napetosti žice i vodilice nalik koloturama. U ovom procesu obradak ne smije „ležati“ na površini stola, već mora biti slobodan barem s jedne bočne strane da bi obrada bila izvediva. Stoga, način stezanja i radni stol su drugačiji od stroja za elektroeroziju žigom.



Slika 7 Primjer radnog stola za elektroeroziju žicom [9]

Hrapavost površine, odnosno njena kvaliteta ovisi o energiji iskre. Ako ona ima malu energiju, imat će i vrlo finu hrapavost površine, a proizvodnost (brzina odvajanja materijala u jedinici vremena) bit će mala. Ako je iskra velike energije, hrapavost površine bit će gruba, a proizvodnost velika. Hrapavost uobičajeno iznosi $Ra = 0.4 - 0.8 \mu m$, ali može se i postići $Ra = 0.1 \mu m$ (zrcalni sjaj). Produktivnost obrade je niska, a ovisi o energiji iskre. Volumen odstranjenog materijala varira od 1 mm^3 do $250\,000 \text{ mm}^3/\text{min}$. S obzirom na to da nikakve mehaničke sile ne djeluju na obradak, eliminira se problem trošenja alata tako da je garantirana točnost dimenzija bez obzira na količinu obrađenih dijelova. Nisu potrebne stezne naprave za obradak što smanjuje vrijeme pripreme. Visoka kvaliteta obrađene površine ne zahtjeva dodatne operacije koje su potrebne kod konvencionalnih obrada. Ne postoji opasnost pri radu za operatera, te je postupak ekološki prihvatljiv. Tvrde čelične legure, titan i kaljeni čelici mogu se efikasno obrađivati bez straha od loma alata. Nije izvedivo glodanje četvrtastog udubljenja, ali elektroerozija žicom može postići dosta oštre bridove. Obradak na stroju se obrađuje na jednom stroju sa samo jednim alatom.

2.5. PODRUČJE PRIMJENE ELEKTROEROZIJE

- a) Velika prednost ove tehnologije je da se na istom stroju mogu provesti različite operacije.
Postoje dvije vrste strojeva: Stroj za elektroeroziju žicom
- b) Stroj za elektroeroziju žigom
- a) Elektroerozija se pomoću ovih strojeva može koristiti za: Bušenje
- b) Brušenje
- c) Rezanje
- d) Mljevenje
- e) Kaljenje
- f) Graviranje



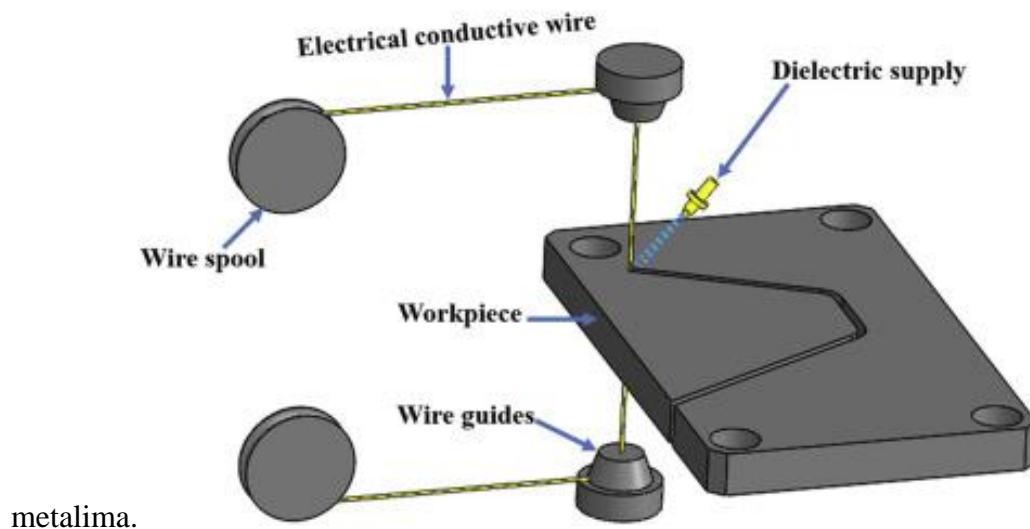
Slika 8 Proizvodi dobiveni elektroerozijom [4]

2.6. ELEKTROEROZIJA ŽICOM

U strojnoj obradi metala, elektroerozija žicom je jedna od značajnih inovacija radi njezine kvalitete obrade, produktivnosti, preciznosti pa i uštede. Prije početka primjene ove tehnologije, neke pozicije bilo je veoma skupo ili nemoguće izraditi. Danas precizno i ekonomično možemo izraditi razne strojne dijelove složenih geometrijskih oblika zahvaljujući numerički upravljanim elektroerozijskim strojevima. Iako elektroerozija i dalje pripada nekonvencionalnim postupcima, nakon glodanja, tokarenja i brušenja, smatra se četvrtom najzastupljenijom metodom strojne obrade.

2.6.1. PRINCIP RADA

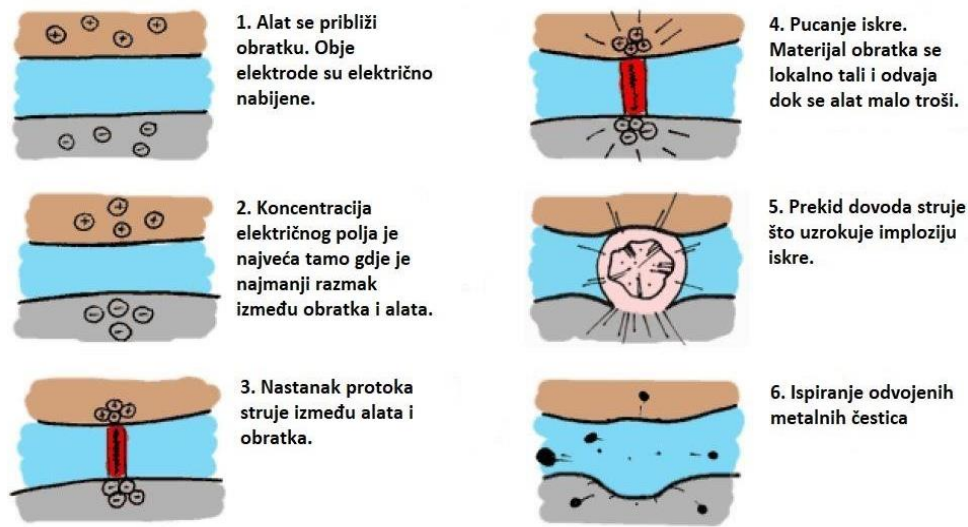
Ovaj postupak kao alat koristi kontinuirano pokretanu žicu promjera 0,1 - 0,3 mm, koja obrađuje materijal obrade prolaskom kroz njega. Obradak mora biti vodič i mora biti uronjen u dielektričnu tekućinu, a iskra između obratka i alata vrši eroziju. Stroj vrši funkciju glodalice, no točnost je puno veća nego kod konvencionalnih obrada, također i kod rada s posebno čvrstim



metalima.

Slika 9 Elektroerozijska obrada žicom [10]

Alat i obradak (elektrode) su spojeni na DC generator. Potopljeni su u dielektričnu tekućinu (deionizirana voda, ulje ili petrolej) a između njih je mala zračnost. Smanjivanjem zazora (razmaka) između elektroda na udaljenost od 5 do 500 μm , el. napon probija el. otpor dielektrika i struja počinje teći između elektroda. Temperatura iskrenja, odnosno svake novonastale iskre iznosi od 8000 do 12000 $^{\circ}\text{C}$. Posljedica toga je odstranjivanje materijala sa svake elektrode. Ovisno o proizvedenoj količini energije generatora, na površini obratka (anode) se formira krater, odnosno dolazi do erozije materijala. U odnosu na anodu, površina alata (katode) se troši samo oko 0.5%. Kada strujni signal prestane, novi dielektrik ulazi u prostor između elektroda (obnavljaju se izolacijska svojstva dielektrika) i odnosi čestice odstranjene s elektroda. Ovu pojavu zovemo ispiranje.



Slika 10 Fizikalno načelo odvajanja čestica elektroerozijom [11]

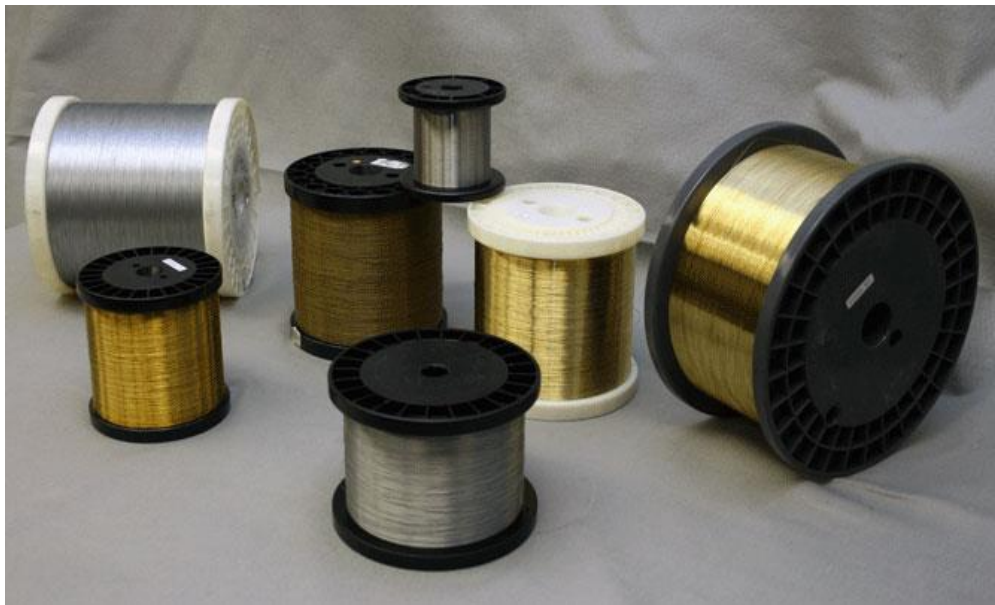
Za vrijeme ispiranja, električna svojstva i temperatura dielektrične tekućine mogu odstupati od nominalnih vrijednosti, a s vremenom mogu se i mijenjati. Razmak između obratka i alata je najbitniji parametar jer o njemu ovisi preciznost reza odnosno kvaliteta obrade. Problemi u radu mogu nastati ako dođe do kratkog spoja iskre s odvojenom česticom (krhotinom). Također, nemogućnost reakcije sustava kontrole impulsa na direktan kontakt anode i katode prouzročit će nekontrolirano odvajanje materijala. Osim toga, neadekvatno ispiranje dovest će do nedovoljnog obnavljanja izolacijskih svojstva dielektrične tekućine, pa će rezultat toga biti nedovoljna preciznost obrade.

2.6.2. ŽICA

Žica korištena u procesu obrade može biti izrađena od: bakra, mesinga (mjedi), molibdena, aluminij-mjed legure. Najviše je korištena žica od mesinga, ostale se koriste obično za rezanje određenih rijetkih materijala. Za grubu obradu debljina žice iznosi 0,3 mm, a za finiju obradu sa završnim prolazima 0,2 mm. Danas postoje i žice debljine svega 20 μm . Ovisno o obradi, napetost žice iznosi oko 60% njene vlačne čvrstoće. Napetost se povećava, odnosno smanjuje ovisno o vrsti i debljini materijala kao i o tehnologiji rezanja.

Korištenje žice je jednokratno s obzirom na to da je relativno jeftina. Brzina namatanja žice iznosi od 0.0025 m/s do 0.15 m/s. Kalemi žice su dosta dugački, npr. promjer žice 0,25 mm težine

8kg iznosi više od 19 kilometara. Električna vodljivost žice je veoma bitno svojstvo, a niska vodljivost može rezultirati padom napona i energije između točke rezanja i napajanja.

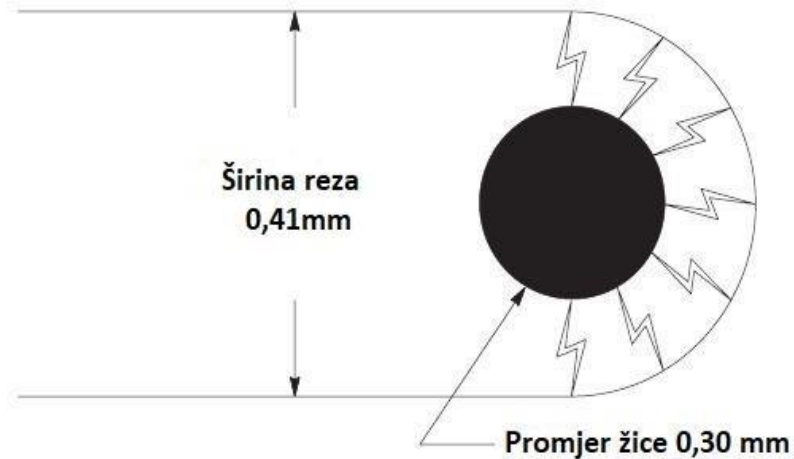


Slika 11 Kalemi žice [12]

2.6.3. OSI I PUTANJA ŽICE

Numerički upravljane dijamantne vodilice pomiču žicu po XY ravnini. Moderniji strojevi imaju mogućnost pomicanja gornje vodilice i po z-u-v osima, a to daje mogućnost izrade zatjevnijih geometrija rezanjem pod različitim kutevima. Gornja i donja vodilica obično su precizne do 0.004 mm, a širina reza žice promjera 0,1 mm može iznositi 0,12 mm.

Najekonomičnija i za izradu vremenski optimalna prosječna širina reza za mesing žicu promjera 0,25 mm iznosi 0,335 mm. Ako je žica tanja, uža je i širina reza i obrnuto. Veća širina reza od promjera žice posljedica je iskrenja između elektroda koje vrši eroziju. Na slici ispod možemo vidjeti shematski prikaz promjera žice i širine reza.



Slika 12 Širina reza u odnosu na promjer žice [13]

2.6.4. PRIMJENA I KARAKTERISTIKE

Prednosti obrade elektroerozije žicom jesu:

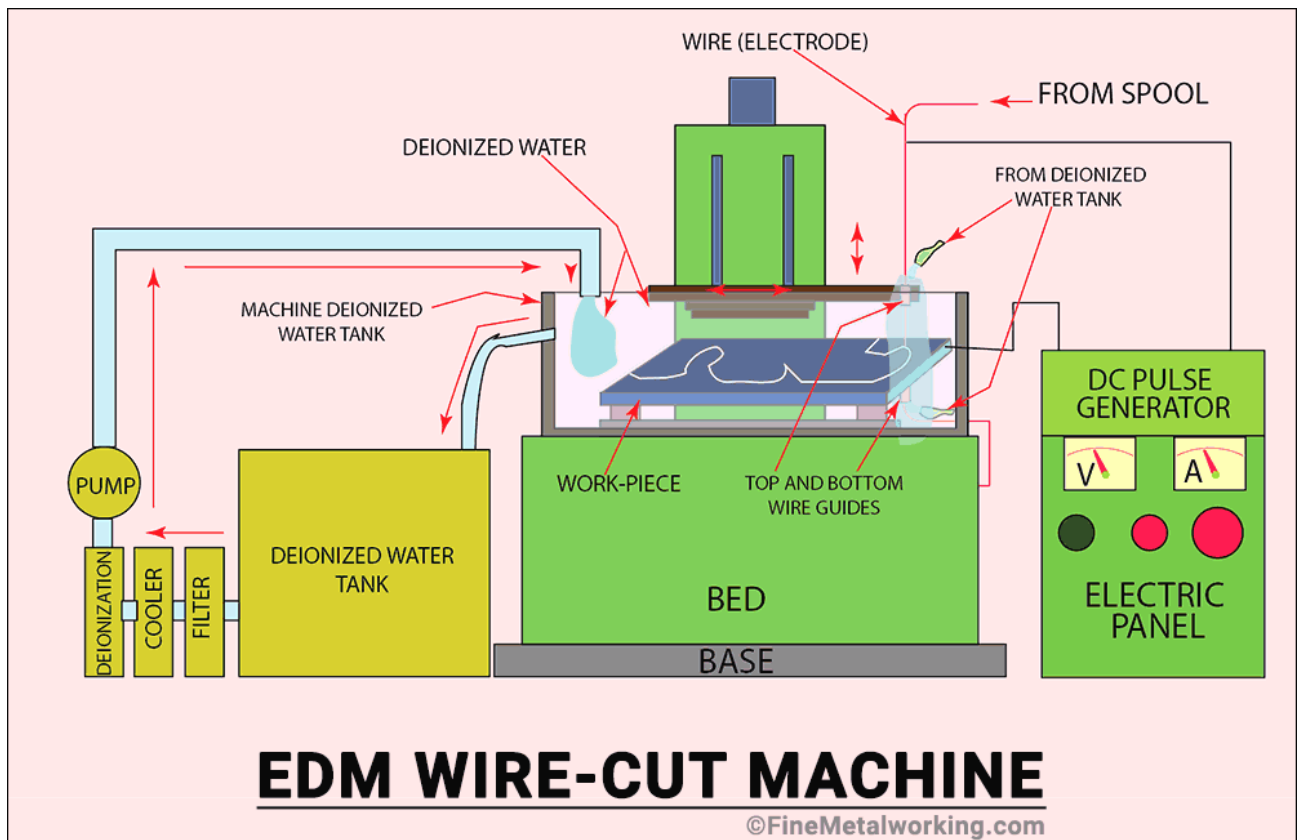
- mogućnost obrade veoma tvrdih materijala s uskim tolerancijama
- izrada pozicija složenih geometrija
- mogućnost izrade dijelova vrlo malih dimenzija
- ekonomična i brza izrada prototipa i malih serija
- moguća obrada osjetljivih materijala bez deformacije s obzirom na to da ne postoji direktni kontakt između elektroda (obratka i alata)
- kvaliteta površinske obrade
- jednaka kvaliteta obrade od prvog do posljednjeg obratka
- mogućnost rezanja pod različitim kutovima
- manja zaostala naprezanja u materijalu nakon obrade u odnosu na konvencionalne obrade

Nedostatci obrade žicom jesu:

- moguća primjena za isključivo elektrovodljive materijale
- dielektrici na bazi nafte stvaraju opasnost od požara
- niska brzina rezanja
- visoka potrošnja energije

Ova metoda je sve zastupljenija jer pruža ekonomičniju obradu određenih pozicija s velikom preciznošću i malim tolerancijama izrade bez dodatne obrade nakon završetka procesa. Žica obradi bez poteškoća neke pozicije složenijeg geometrijskog oblika koje bi bilo dosta teško obraditi na tradicionalan način. Radi dielektričnog ispiranja, proces obrade ne prenosi puno topline u obradak, te tvrdoća materijala ne utječe na obradu. Važno je istaknuti da ova obrada eliminira faktor trošenja alata jer se žica koristi samo jednom i konstantno namotava. Baš je radi toga kvaliteta obrade jednaka od prvog do posljednjeg obratka. Visoka potrošnja energije, mala brzina rezanja te nemogućnost obrade materijala koji nisu el. vodljivi, najveći su nedostaci ovog postupka.

Elektroerozija žicom najčešće se primjenjuje u izradi kalupa, alata za štancanje, savijanje, izradaka složenijih geometrijskih oblika, unutarnjih nazubljenja, manjih serija, prototipa, čahura za stezanje alata.



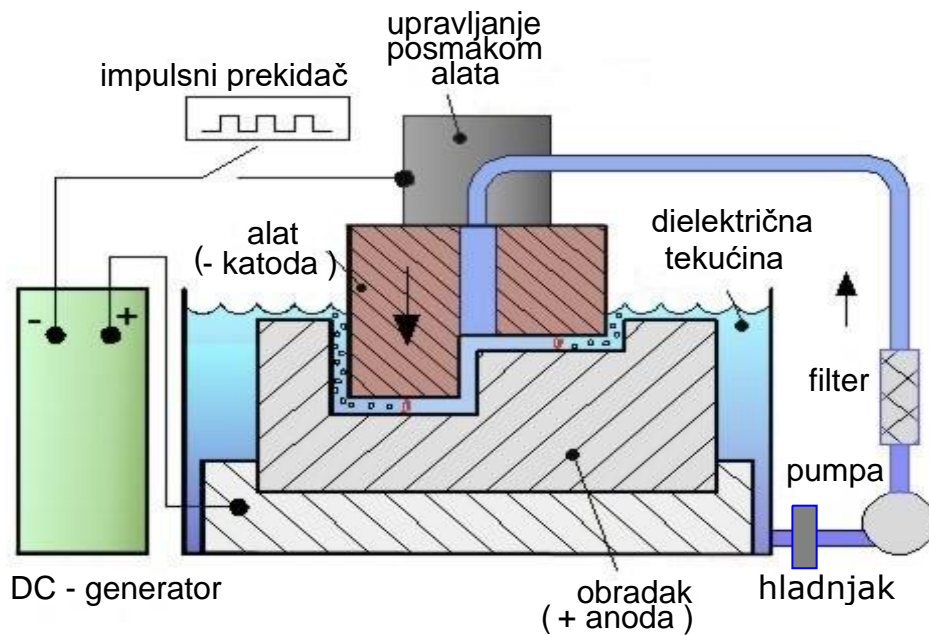
Slika 13 Shema stroja za elektroeroziju žicom [14]



Slika 14 Proizvodi dobiveni elektroerozijom žicom [15]

2.7. ELEKTROEROZIJA ŽIGOM

Elektroerozija žigom koristi se obično za izradu složenih trodimenzionalnih strojnih dijelova. Proces se odvija u dielektričnoj tekućini, a alat i obradak su također spojeni na istosmjerni izvor kao i kod obrade žicom. Da bi se odcrtao čim precizniji oblik žiga tijekom obrade, trošenje alata mora biti minimalno. Isto tako, bitno je mjerenjem struje i napona nadzirati proces u razmaku između obratka i alata. Proces električnog pražnjenja nastaje kada približimo alat obratku čime dolazi do el. proboja kroz dielektrik i formira se plazma. Ovu pojavu vidimo u obliku iskrenja i ponavlja se svake poluperiode izvora napajanja. Kako alat odstranjuje čestice obratka, zazor (razmak) raste, te se alat automatski približava obratku i proces se nastavlja.



Slika 15 Shema rada stroja elektroerozije žigom [16]

2.7.1. ALAT

Kod ove vrste elektroerozije alat za obradu materijala je u obliku žiga. Mjed, bakar, srebro, i grafit najčešći su odabir za izradu alata. Grafitni alati obično se primjenjuju za grubu obradu jer imaju dobru otpornost na trošenje. S druge strane, metalni alati radi njihovih fizikalnih svojstva pružaju veću kvalitetu obrađene površine pa se obično koriste za završnu obradu. S obzirom na to da se i

alat troši tijekom obrade, trebalo bi odabrati onaj koji ima veću otpornost na toplinsko trošenje nego materijal obratka. Trošenje alata kao i niska produktivnost nedostaci su ove obrade pa je zbog toga manje ekonomična.

Alat biramo prema sljedećim čimbenicima:

- 1) Trošak osnovnog materijala
- 2) Trošak proizvodnje
- 3) Električna vodljivost
- 4) Toplinska svojstva (temperatura taljenja)
- 5) Vrsta materijala
- 6) Otpornost na trošenje
- 7) Brzina odstranjivanja čestica materijala

Tablica 2 Usporedba metalnih i grafitnih alata [1]

	METALNI ALAT	GRAFITNI ALAT
Cijena	Niska	Visoka
Čvrstoća	Visoka	Niska
Iskustvo operatera	Dobar za neiskusne operatere	Nužan iskusan operater
Kvaliteta obradene površine	Visoka	Niska
Brzina obrade	Mala	Velika
Otpornost na trošenje	Niska	Visoka

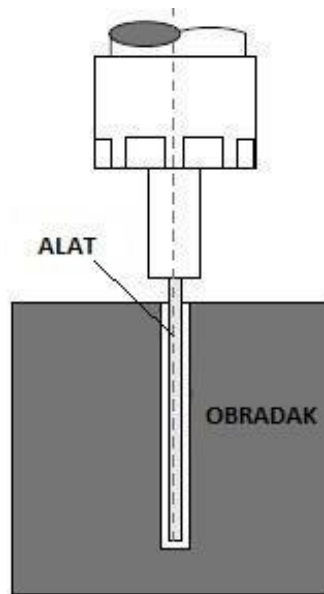


Slika 16 Primjer alata (elektroda) za obradu [17]

2.7.2. IZVEDBE STROJEVA

2.7.2.1. Elektroerozijsko bušenje

Stroj za elektroeroziju žigom može se koristiti za bušenje sitnih i dubokih provrta na teško obradivim materijalima. Najmanje veličine alata mogu biti i u mikroveličinama pa se postupak zove još i mikroelektroerozijsko bušenje. Alat je cilindričnog oblika i može biti od punog ili šupljeg materijala. Kroz provrt šupljeg alata prolazi dielektrik koji putuje u zonu obrade. Stroj mora imati mogućnost rotacije elektrode. Slika ispod prikazuje primjer elektroerozijskog bušenja.

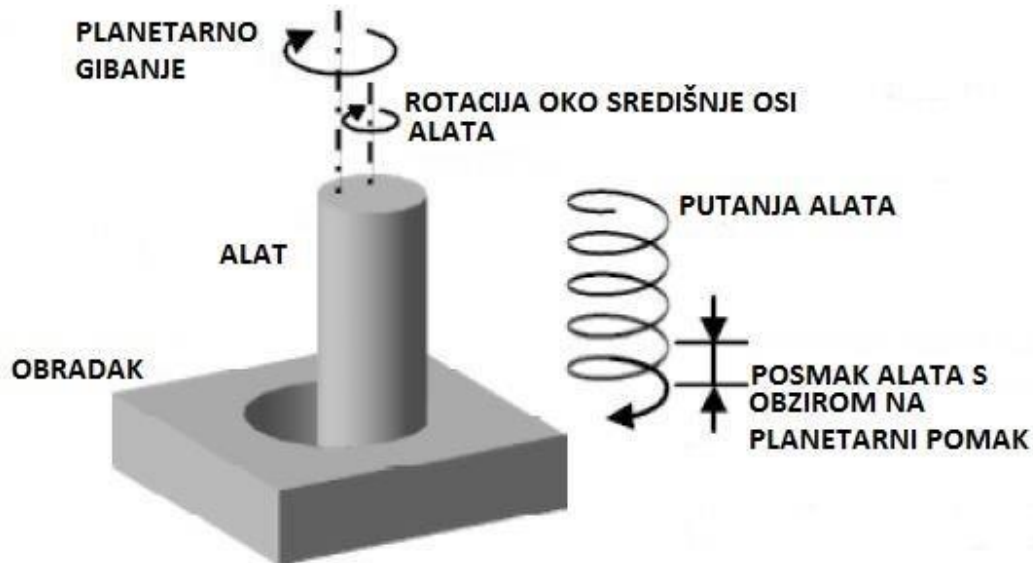


Slika 17 Elektroerozijsko bušenje [1]

2.7.2.2. Planetarna elektroerozijska obrada

Ova izvedba ima vertikalno gibanje alata u smjeru obratka i kružno gibanje u druge dvije osi. Promjer alata je manji od promjera provrta koji će se obraditi. Ovakav način kretanja alata pokazao se osobito koristan kod izrade mikroprovrti. Cirkulacija dielektrika se odvija u dosta širem zazoru između obratka i alata koji je stvorio alat svojim kretanjem, odnosno obradom.

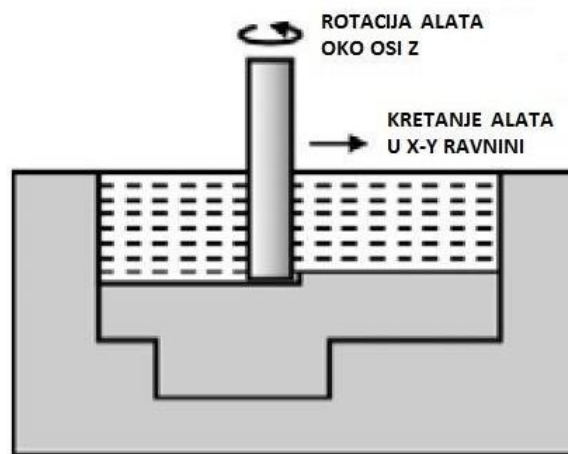
Radi toga povećana je učinkovitost ispiranja i obrade zbog smanjenja koncentracije odvojenih čestica, smanjenja su trošenja alata i povećane brzine odstranjivanja materijala. Posljedica ovih faktora je povećana kvaliteta obrađene površine i stabilnost obrade. Na slici ispod možemo vidjeti primjer planetarne obrade.



Slika 18 Planetarna elektroerozijska obrada [1]

2.7.2.3. Elektroerozijsko glodanje

U izradi kalupa elektroerozijsko glodanje s vremenom sve više zamjenjuje obradu žigom, s obzirom na to da u ovoj obradi nije nužan žig složene geometrije. Stoga, elektroerozijsko glodanje obično se koristi kada je predmet obrade geometrijski previše složen da bi se izradio žigom. Kao i kod planetarne obrade, prednost je bolji protok dielektrika odnosno ubrzano odvođenje čestica. Zbog ove tehnologije se ne izrađuju složeni žigovi. Alat je cilindričnog oblika, a giba se kao kod konvencionalne glodalice s 3 ili 5 osi. Pomoću upravljačkog računala stroja definira se putanja alata. Primjer elektroerozijskog glodanja i putanje kretanja alata možemo vidjeti na slici ispod.



Slika 19 Elektroerozijsko glodanje [1]

2.7.3. KARAKTERISTIKE I PRIMJENA

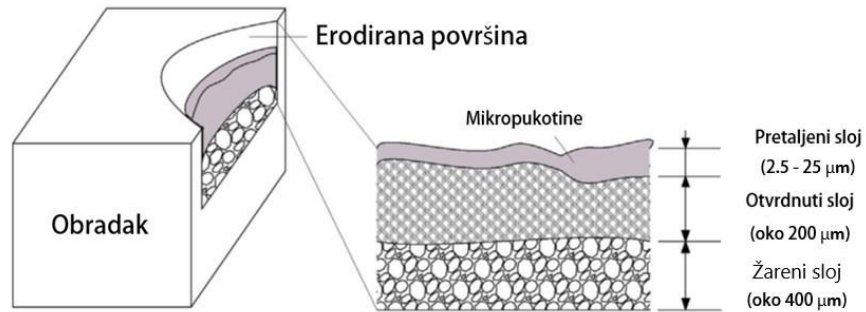
Prednosti elektroerozijske obrade žigom su:

- mogućnost obrade veoma tvrdih metala
- ne postoji kontakt između anode (obratka) i katode (alata)
- mogućnost obrade krhkih i tankih materijala
- mogućnost obrade veoma složenih geometrija
- ne postoji srh nakon obrade
- visoka dimenzijska točnost obrade
- mogućnost automatizacije procesa

Nedostatci elektroerozijske obrade žigom:

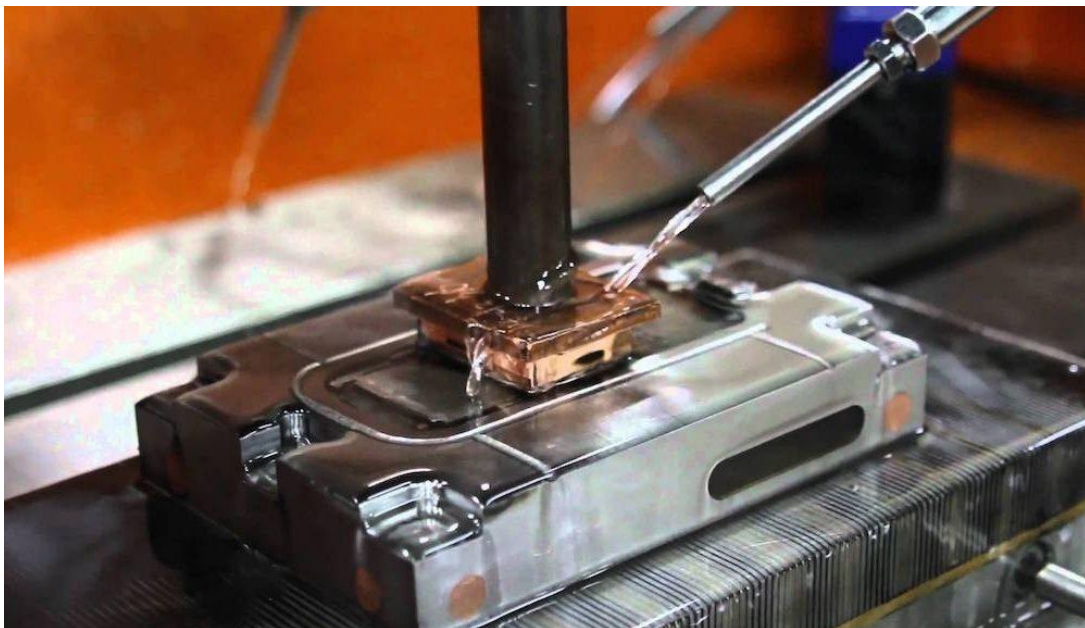
- mogućnost obrade isključivo elektrovodljivih materijala
- stvaranje zone utjecaja topline
- teže je postići oštre bridove, alat se troši
- postupak je sporiji od konvencionalnih metoda
- manja produktivnost

Prilikom obrade, utjecaj visoke temperature odvaja čestice obratka, ali također mijenja i površinsku strukturu materijala obrade. Moguće je primijetiti na obratku 3 različita sloja zone utjecaja topline: žareni sloj, otvrdnuti sloj i pretaljeni sloj. Rastaljeni materijal se izbacuje u tekućinu dielektričnim pražnjenjem, a veoma brzim skrućivanjem stvara sitne odvojene čestice. Nakon toga dolazi do lijepljenja tih čestica (nečistoća i kapljica metala) na obrađenu površinu i stvara se ponovo očvrnuti, tanak sloj koji je radi brzog hlađenja dosta krhak i tvrd. Ovaj sloj nazivamo još i „bijeli sloj“, a njegova debljina ovisi o energiji pražnjena (parametrima obrade) i iznosi od 2.5 – 25 μm . Otvrdnuti sloj nastaje radi kontinuiranog zagrijavanja i hlađenja. Oštećenje materijala i toplinska naprezanja posljedica su nastanka ovog sloja. Debljina sloja mu iznosi do 250 μm , te je veoma tvrd (oko 65 HRC). Dolazi do pada dinamičke izdržljivosti zbog nastanka pukotina po granicama zrna. Nadalje, ako materijal apsorbira ugljik iz dielektrika, doći će do nastanka nepoželjnih karbida i promjene kemijske strukture. U žarenom sloju struktura zrna se mijenja sve do 400 μm dubine.

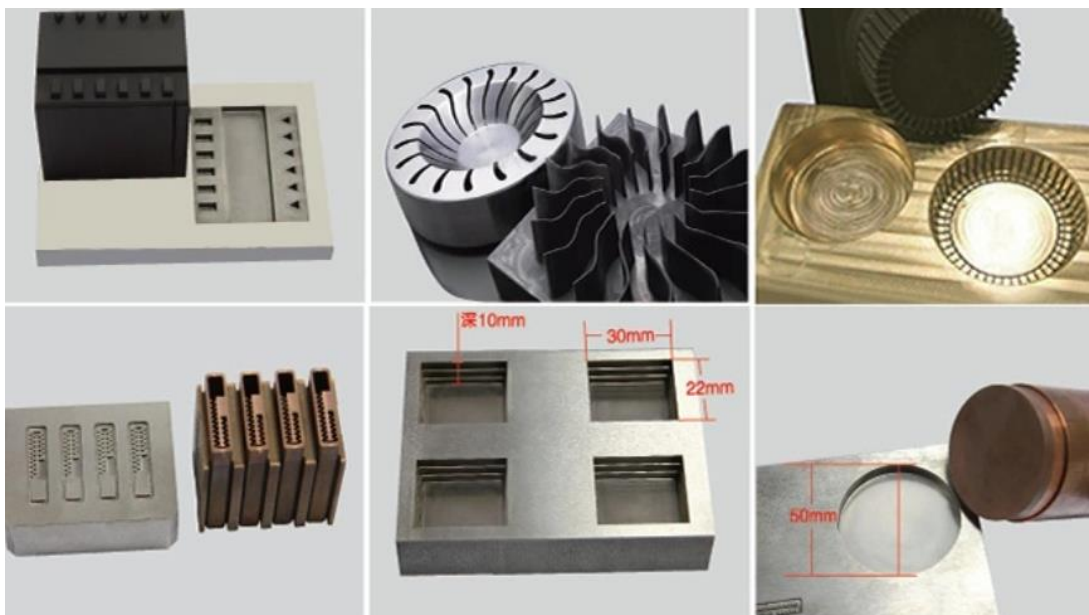


Slika 20 Zona utjecaja topine [18]

Elektroerozijska obrada žigom primjenjuje se neovisno o tvrdoći i žilavosti obrađivanih materijala. Nužna je jedino njihova elektrovodljivost. Kompleksne geometrije i teško obrađivi materijali koji nisu ekonomično obrađivi, obrađuju se ovom tehnologijom. To su obično: čelik, kaljeni čelik, tvrdi metali. Klasična primjena elektroerozije žigom je za izradu kalupa, alata, ozubljenja na osovini, dubokih rebara, toleriranih utora itd. Primjere obrade i materijala dobivenih elektroerozijom žigom mogu se vidjeti na slikama ispod.



Slika 21 Primjer elektroerozijske obrade kalupa bakrenom elektrodom (žigom) [19]



Slika 22 Materijali dobiveni elektroerozijom žigom [20]

3. KONSTRUKCIJA VRATILA U CREO PARAMETRIC SOFTWARE-U

3.1. OPĆENITO O SOFTWARE-U

Creo Parametric pripada grupi složenih programskih sustava za razvitak proizvoda koji prezentiraju najkompleksniju skupinu programskih sustava koji se primjenjuju u inženjerstvu. Primarna im je funkcija da pružaju realizaciju integriranog razvoja proizvoda primjenom posebnog programskog okruženja. To obuhvaća realizaciju svih etapa projektiranja: definiranje koncepta, izrada dokumentacije, programiranje, optimizaciju i verifikaciju programa itd.

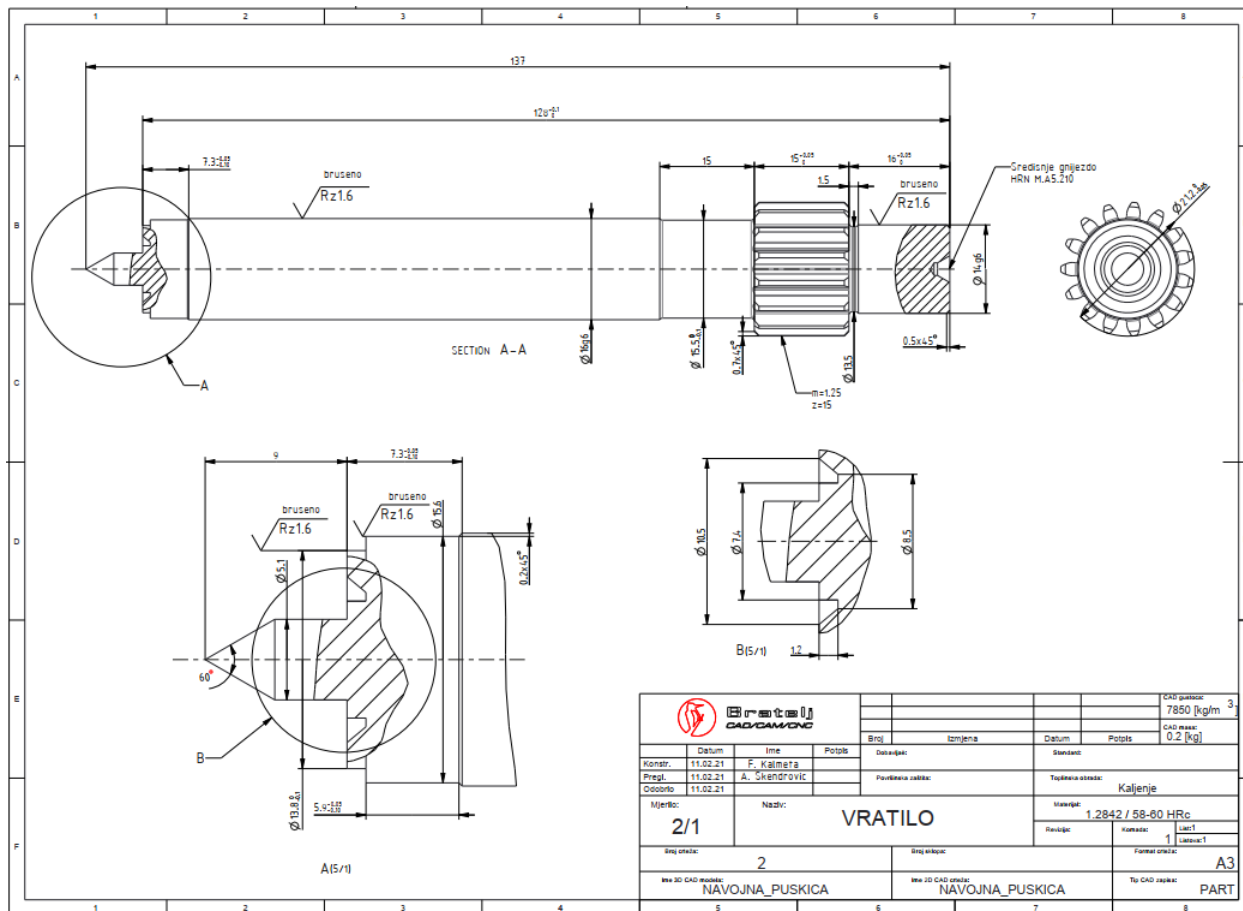
Funkcija CAM modula sustava Creo Parametric, stvara podatke nužne za pokretanje i rad CNC strojeva. To ostvaruje na način da osigurava potrebne alate inženjeru u proizvodnji, te mu dopuštaju da prati logički niz koraka za prijelaz s dizajnerskog modela na ASCII CL datoteke podataka koje se mogu naknadno postprocesirati u adekvatni G kod koji odgovara određenom alatu stroja.

Moguće obrade koje modul podržava su:

- a) Bušenje
- b) Glodanje
- c) Elektroerozija žicom
- d) Tokarenje
- e) Kombinirana obrada glodanjem i tokarenjem

3.2. POSTUPAK KONSTRUKCIJE VRATILA

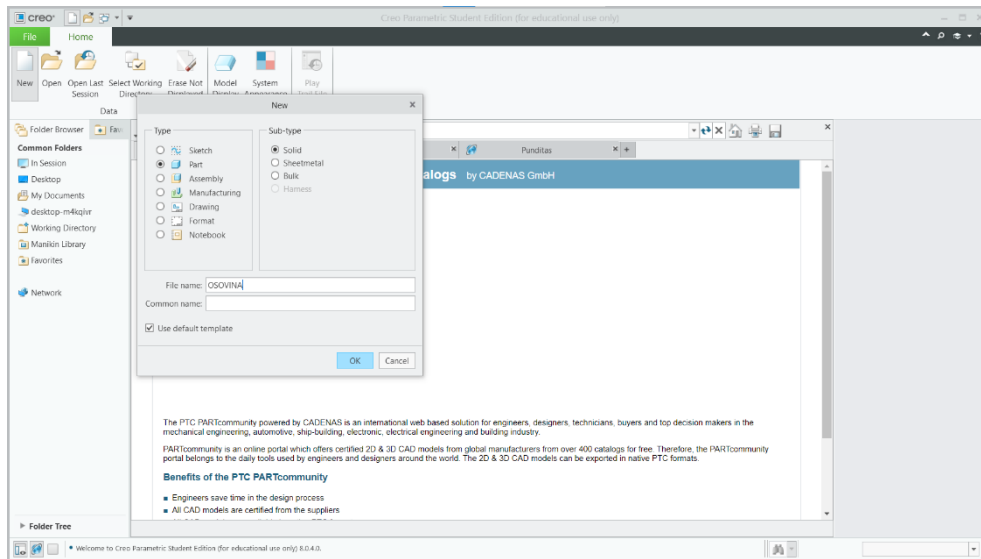
S obzirom na to da „osovina“ prenosi okretni moment u svojoj funkciji, u radu će se od sada na dalje koristiti termin „vratilo“.Prvi korak je izrada skice u Creo software-u iz koje će se kasnije stvoriti model vratila. Skica je izrađena prema crtežu na slici ispod, a crtež je izrađen na temelju zahtjevanih dimenzija kupca.



Slika 23 Crtež za vratilo

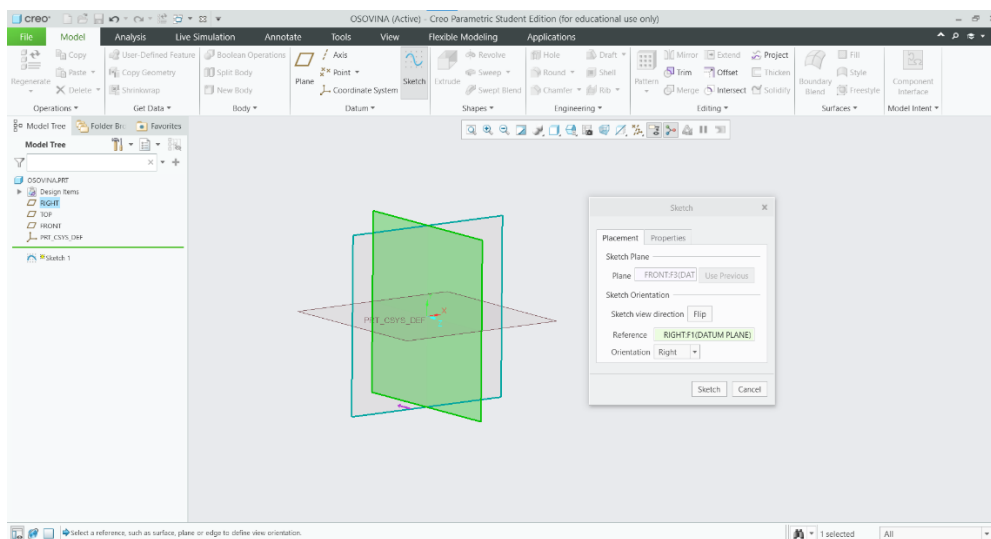
Izvor: Autor

Za početak potrebno je izraditi novi projekt. Na alatnoj traci odabire se funkcija „New“, zatim funkcija „Part“, kako bi se izradio željeni strojni dio (Slika 24). Software nadalje otvara koordinatni sustav gdje se odabire ravnina u kojoj će se izraditi skica a kasnije i model (slika 25).



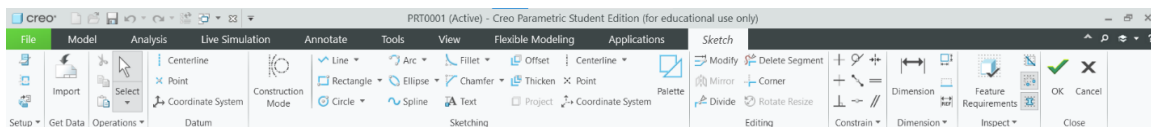
Slika 24 Otvaranje novog projekta

Izvor: Autor



Slika 25 Odabir koordinatne osi

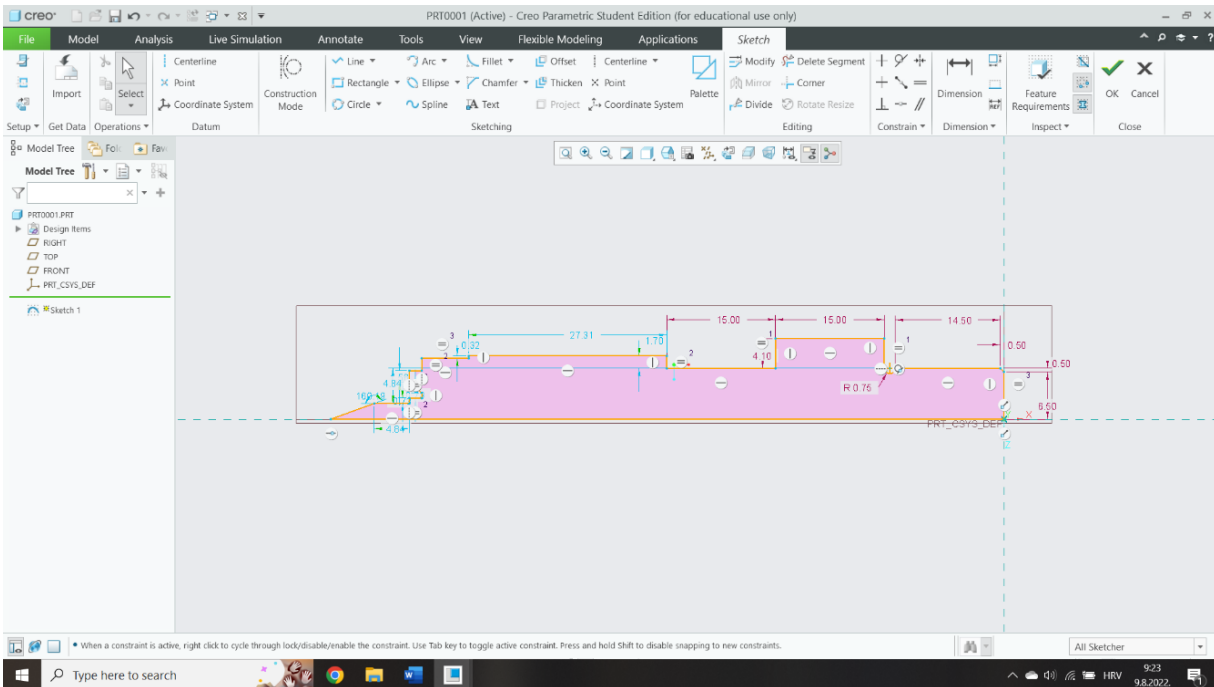
Izvor: Autor U odabranoj koordinatnoj ravnini, izrađuje se skica pomoću alatne trake pod nazivom „Sketch“ (slika 26).



Slika 26 Izgled alatne trake „Sketch“

Izvor: Autor

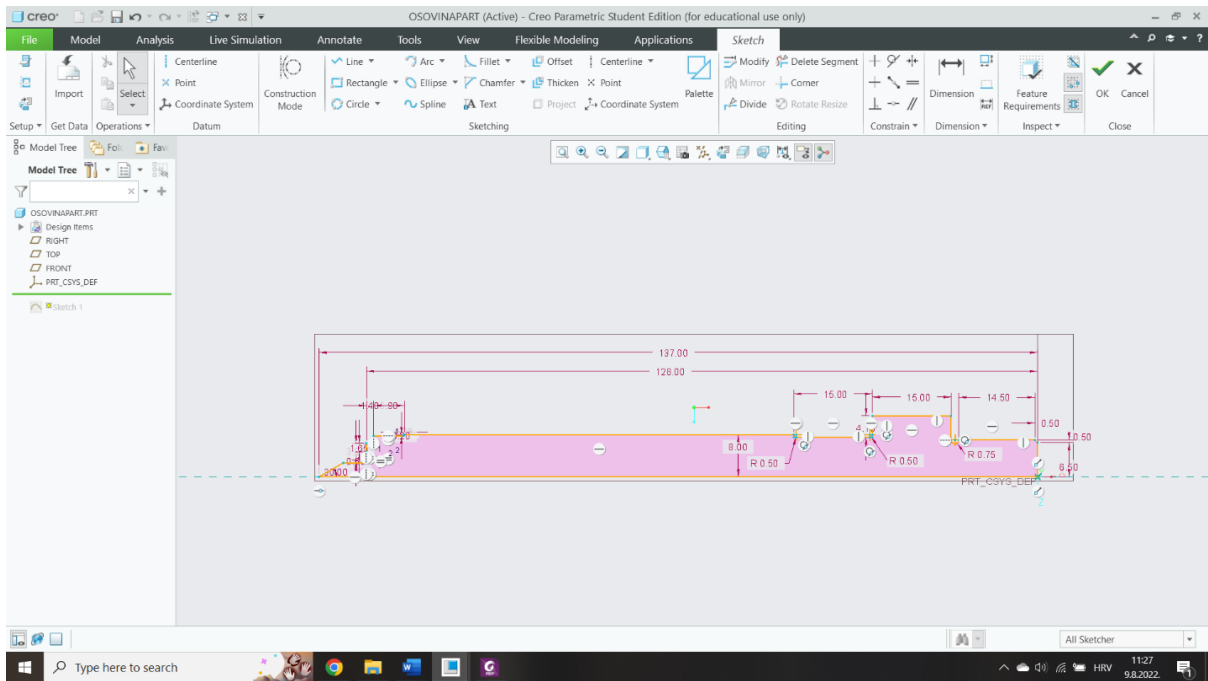
Izradom željene konture, treba paziti da se odrede sve dimenzije skice. Ako dimenzija nije definirana, označena je plavom bojom. Tek kada je cijela kontura „crvena“ skica je potpuno definirana. Također, treba paziti na to da skica ne bude „predefinirana“, odnosno da ne sadrži više kota nego što je potrebno.



Slika 27 Izgled nepotpuno definirane skice

Izvor: Autor

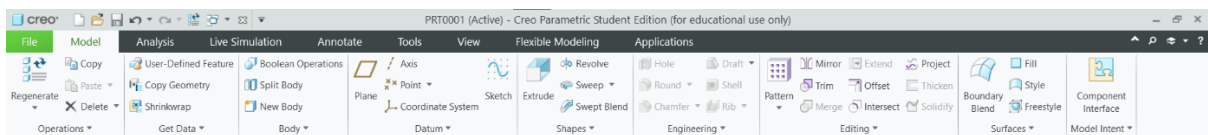
Kada je skica potpuno definirana i kote pregledno pozicionirane, treba iz nje izraditi model. Odabirom na „Ok“ na alatnoj traci u gornjem desnom kutu, potvrđuje se skica i izlazi se iz „sketch moda“.



Slika 28 Izgled potpuno definirane skice

Izvor: Autor

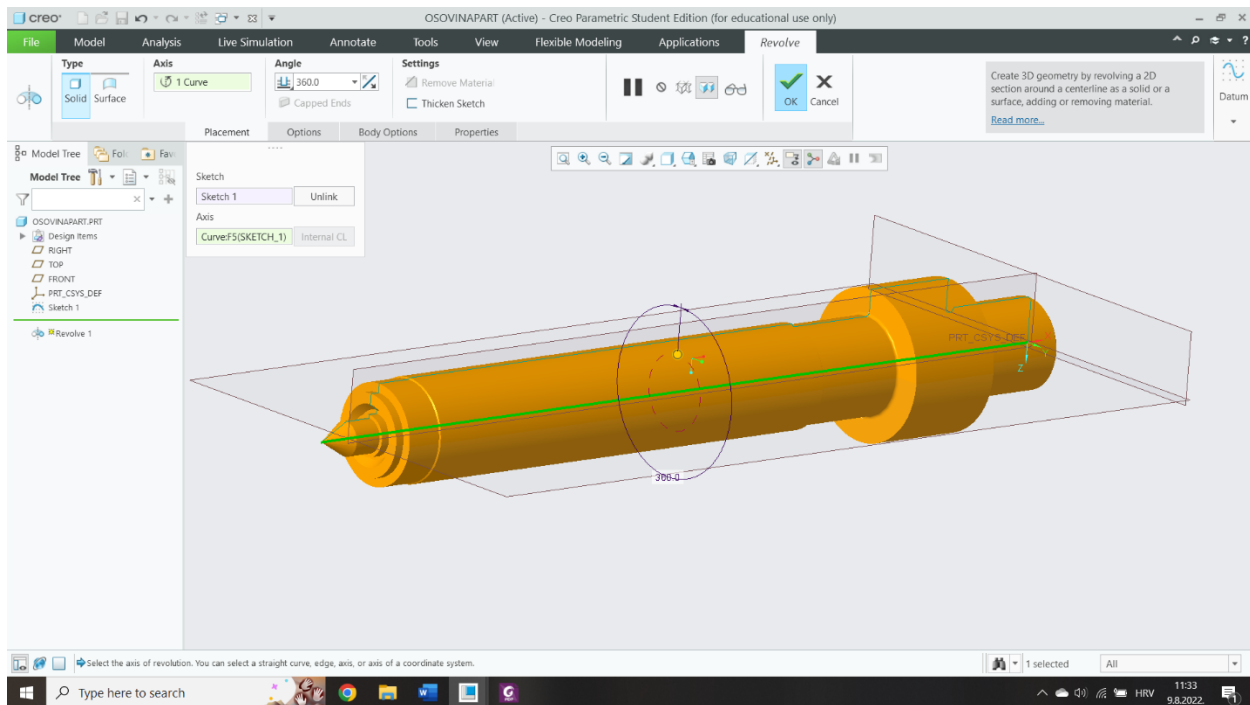
Na alatnoj traci „Model“ (slika 29) , odabire se način izrade modela. S obzirom da je „sketch“ izrađen u obliku presjeka, funkcija „Revolve“ zarotirati će skicu za 360° i stvoriti vratilo definiranih dimenzija.



Slika 29 Izgled alatne trake „Model“

Izvor: Autor

Slika ispod prikazuje izgled konstruiranog 3D modela. Odabirom „Ok“ na alatnoj traci, prihvaća se kreirani model.

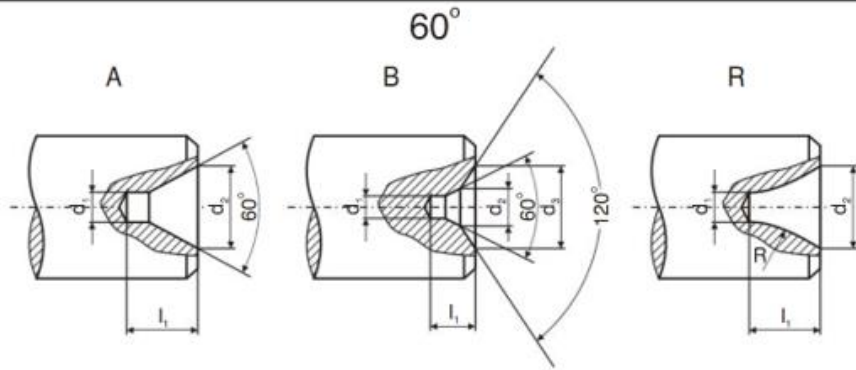


Slika 30 „Revolve“ funkcija

Izvor: Autor

Idući korak bio je konstrukcija središnjeg gnijezda. Kako bi se to izvelo, prvo je potrebno u „sketchu“ nacrtati točku („point“), a zatim iz nje pomoću funkcije „Hole“ stvoriti „gnijezdo“. Iz crteža (slika 23) vidimo standardnu oznaku središnjeg „gnijezda“: HRN M.A5.210. Pomoću tablice sa slike ispod (slika 31) očitane su dimenzije i prema njima je konstruirano središnje gnijezdo.

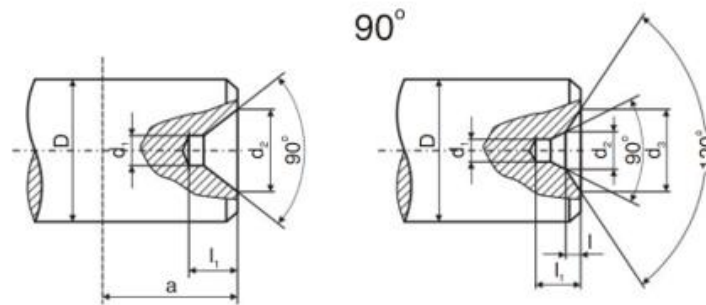
JUS M.A5.210, JUS M.A5.211 DIN 332



Primer označavanja: SREDIŠNJE GNEZDO B 3,15 JUS M.A5.210

Nazivni prečnik d_1	Dimenzije u (mm)					Nazivni prečnik d_1	Dimenzije u (mm)				
	l_1 min.	d_2	d_3	R min. max.			l_1 min.	d_2	d_3	R min. max.	
(0,5)	0,8	1,6	-	-	-	2,5	3,1	5,30	8,0	6,3	8,0
(0,63)	0,9	1,32	-	-	-	3,15	3,9	6,70	10,0	8,0	10,0
(0,8)	1,1	1,70	-	-	-	4,0	5,0	8,50	12,5	10,0	12,5
1,0	1,3	2,12	3,15	2,5	3,15	(5,0)	6,3	10,60	16,0	12,5	16,0
(1,25)	1,6	2,65	4,0	3,15	4,0	6,3	8,0	13,20	18,0	16,0	20,0
1,6	2,0	3,35	5,0	4,0	5,0	(8,0)	10,1	17,0	22,4	20,0	25,0
2,0	2,5	4,25	6,3	5,0	6,3	10,0	12,8	21,2	28,0	25,0	31,5

Vrednosti u zagradama, po mogućstvu treba izbegavati



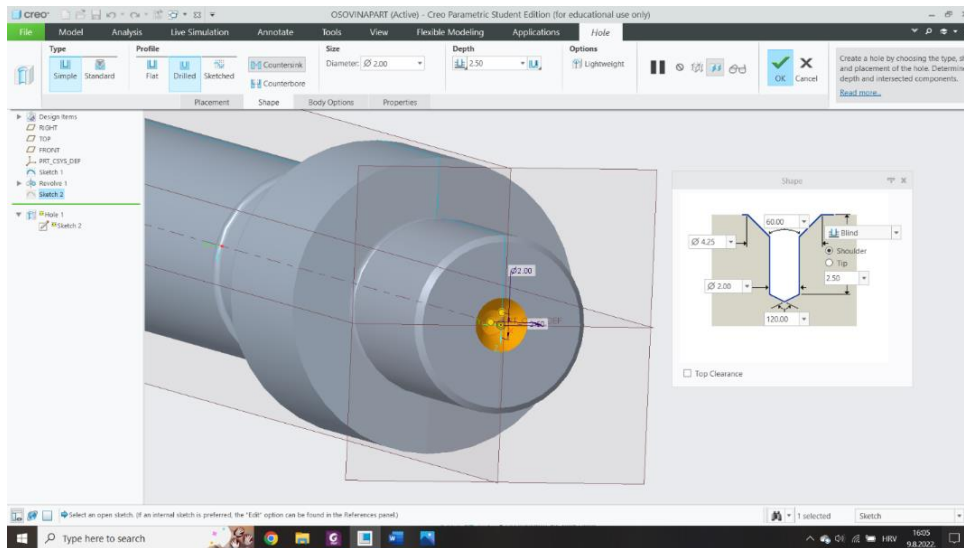
Gnezda sa srednjim uglom 90° (JUS M.A5.211) upotrebljavaju se za delove sa masom većom od 100kg i pri obradi sa većim silama rezanja.

Prečnik D	Dimenzije u (mm)						
	d_1	d_2	d_3	l_1	l_2	l	a^*
25... 63	3	9	12,5	4,5	5,5	1,0	8
63...100	5	13	18,0	6,5	8,0	1,5	11
100...160	8	22	29,0	11,0	13,0	2,0	18

a^* - mera za mesto reza na predmetu na kome ne sme ostati gnezdo

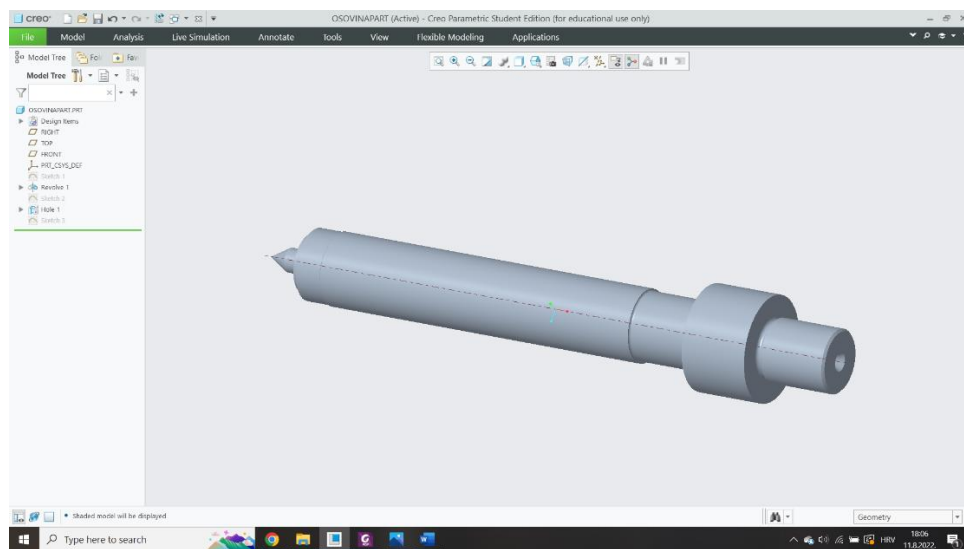
Slika 31 Središnja gnijezda [22]

Odabirom na funkciju „Hole“ alatna traka nudi vrste provrta koji se mogu izraditi. Odabire se „Simple“ → „Drilled“ → „Countersink“. Funkcija „Shape“ s alatne trake otvara prozor s izgledom provrta i dopušta definiciju svih njegovih dimenzija.



Slika 32 „Hole“ funkcija

Izvor: Autor



Slika 33 Oblik vratila za izradu na tokarilici

Izvor: Autor

4. IZRADA VRATILA NA TOKARILICI

Vratilo identičnih dimenzija modeliranu u Creo software-u, potrebno je izraditi na tokarilici. Kao sirovina za izradu uzeta je šipka promjera 25 mm od materijala Č3840. Uzima se promjer čim bliži konačnim dimenzijama vratila kako bi se smanjio otpad (škart), odnosno strugotina proizvedena obradom. Sirovac je potrebno fiksirati u „steznu glavu“ odnosno njene „stezne čeljusti“. Bitno je da su „čeljusti“ pravilno postavljene kako bi se obradak rotirao bez nepotrebne translacije.



Slika 34 Fiksiranje sirovca

Izvor: Autor

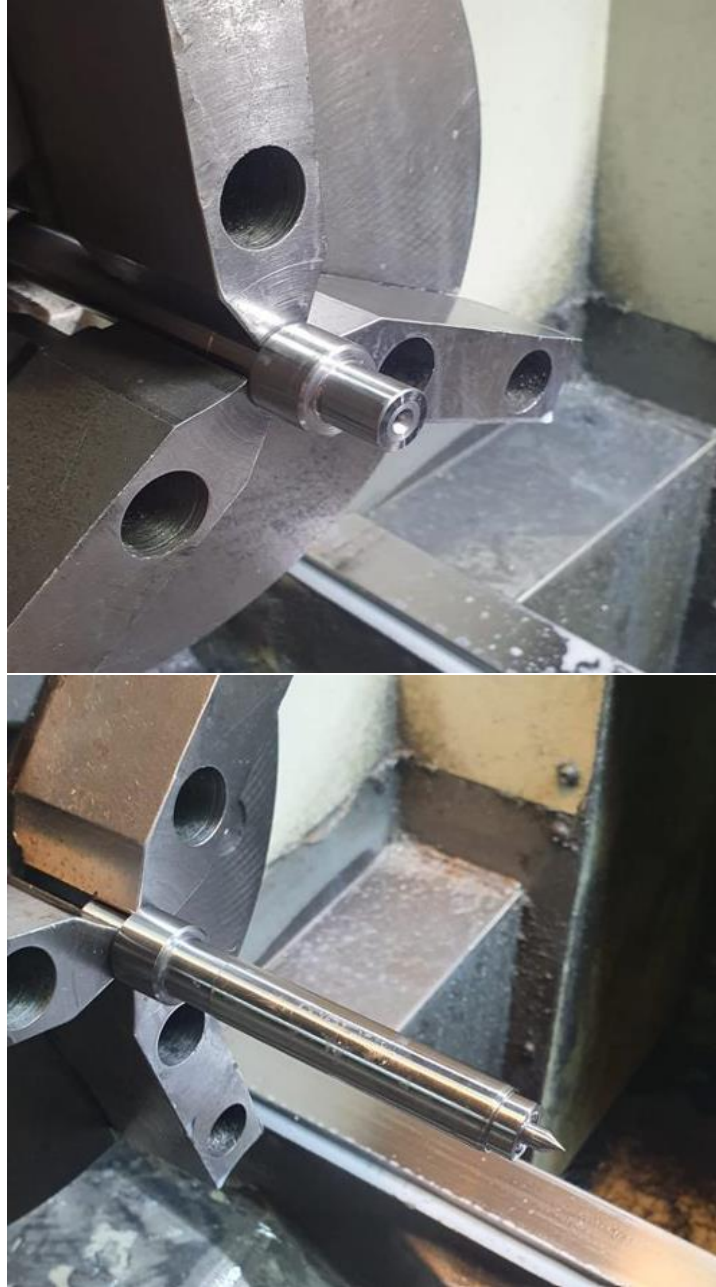
Da bi mogli započeti obradu, potrebno je nulirati alat a nakon toga upustiti središnje gnijezdo. Ono nam osigurava preciznosti i sigurnosti obrade. Njime sprječavamo oštećenja obratka, stroja ili ozljedu na radnom mjestu. Kada je središnje gnijezdo izrađeno, obradak se pričvršćuje šiljkom konjića tokarskog stroja. Brzinu okretaja u minuti podešava se ovisno o vrsti i dimenzijama obratka. Ona ovisi i o dijelu vratila koji se obrađuje, odnosno o alatu (nožu) koji se koristi (u ovom slučaju iznosila je između 400 - 700 o/min). Tijekom obrade, bitno je spriječiti porast temperature obrade, a to se ostvaruje prskanjem emulzije po obrađivanom strojnom dijelu.



Slika 35 Obrada

Izvor: Autor

Kada je vratilo obrađeno, mjeri se i provjerava jesu li njezine dimenzije unutar zadanih tolerancija. Izrađeno vratilo na slici ispod (slika 36) prije erodiranja mora biti kaljena te joj mora biti izrađen specijalan navoj. Ove obrade rade vanjske firme.



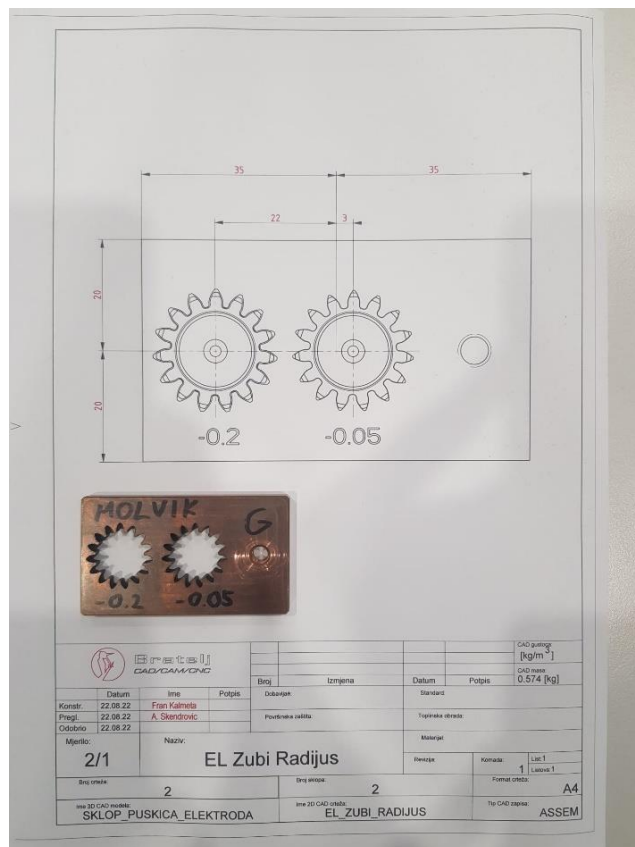
Slika 36 Konačni izgled vratila

Izvor: Autor

5. POSTUPAK IZRADE OZUBLJENJA ELEKTROEROZIJOM ŽIGOM

5.1. PRIPREMA

Kako bi započeo rad na stroju, potrebno je pripremiti materijal obrade (vratilo), alat (elektrode) te dokumentaciju (crteže). Osim elektrode za ozubljenje, koristit će se i elektroda za izradu konusa. Elektrode su bakrene i moguće ih je koristiti otprilike pet puta za ovakav isti proces. Nadalje biti će objašnjen postupak izrade ozubljenja od pripreme do samog erodiranja.



Slika 37 Alat i crtež za izradu ozubljenja

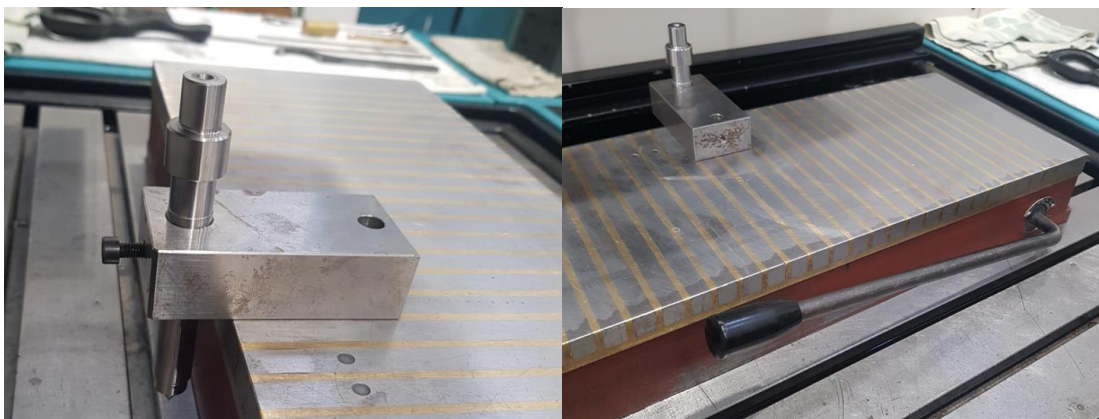
Izvor: Autor Za početak, potrebno je fiksirati obradak u steznu napravu koja se pričvršćuje na magnet na postolju stroja. Vratilo u napravi mora biti nepomično, ali opet ne previše stegnuta da se ne bi oštetila. (slika 38).



Slika 38 Fiksiranje obratka u steznu napravu

Izvor: Autor

Idući korak je postavljanje stezne naprave zajedno s obratkom na magnet (slika 39). Vratilo ne smije dirati postolje stroja.



Slika 39 Postavljanje stezne naprave na magnet i pritezanje magneta

Izvor: Autor

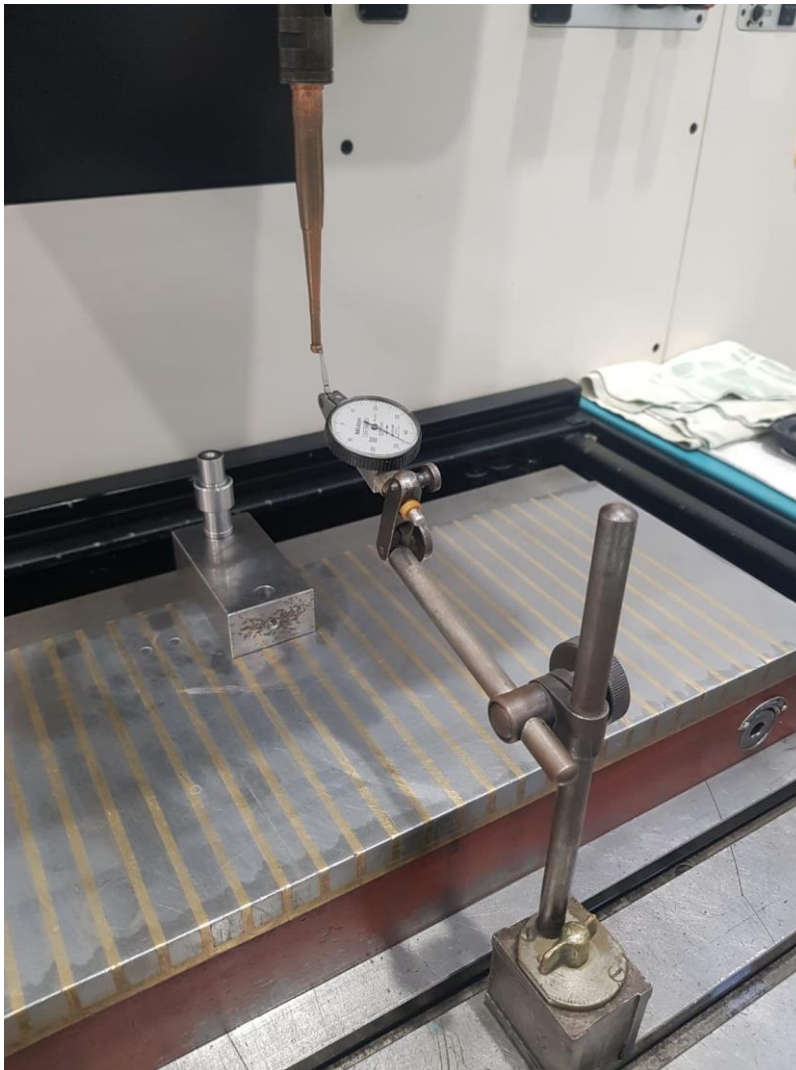
5.2. UMJERAVANJE TICALA

U narednim koracima potrebno je provjeriti vertikalnost alata (bakrenog ticala) koji će kasnije služiti za nuliranje obratka. Alat se pomiče prema ticalu komparatora s ciljem da ga dotakne minimalnom silom. Pomak alata u x, y, z osima ostvaruje se pritiskom na odgovarajuće tipke na stroju (slika 41). Moguće je rotirati i zakretati alat, te namjestiti pomak alata od milimetra do mikrometra.



Slika 40 Uređaj za pomicanje alata

Izvor: Autor
Rotira se bakreno ticalo i gleda za to vrijeme pomak kazaljke na komparatoru. Dozvoljeno odstupanje na komparatoru je jednu stotu milimetra. U suprotnom je potrebno ticalo ručno „poravnati“ da zadovolji tolerancijsko polje.



Slika 41 Umjeravanje alata (bakrenog ticala) pomoću komparatora

Izvor: Autor

5.3. NULIRANJE OBRATKA

Kada je ticalo (alat) umjereno, pomoću njega se nulira obradak. Za početak potrebno je pozicionirati ticalo u središte obratka.



Slika 42 Pozicioniranje ticala u središte vrtila

Izvor: Autor

Nakon toga, unose se parametri za mjerenje obratka u sustav stroja. Unesene vrijednosti pružaju stroju informacije o dimenziji obratka, te njegovu poziciju u prostoru. Unosi se i toleranciju mjerenja te promjer kugle ticala. Na slici ispod može se vidjeti sučelje na kojemu se pomoću tipkovnice unose parametri za x, y i z os. (slika 44).

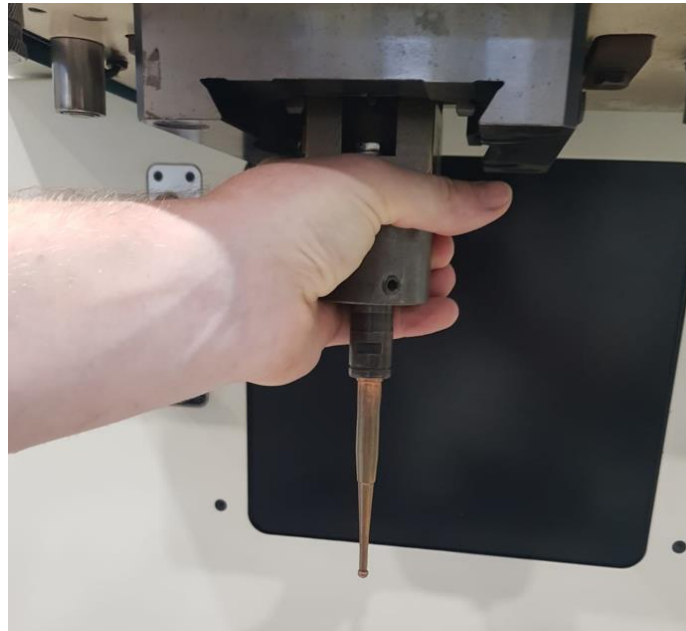


Slika 43 Izgled sučelja i tipkovnice za unos podataka

Izvor: Autor

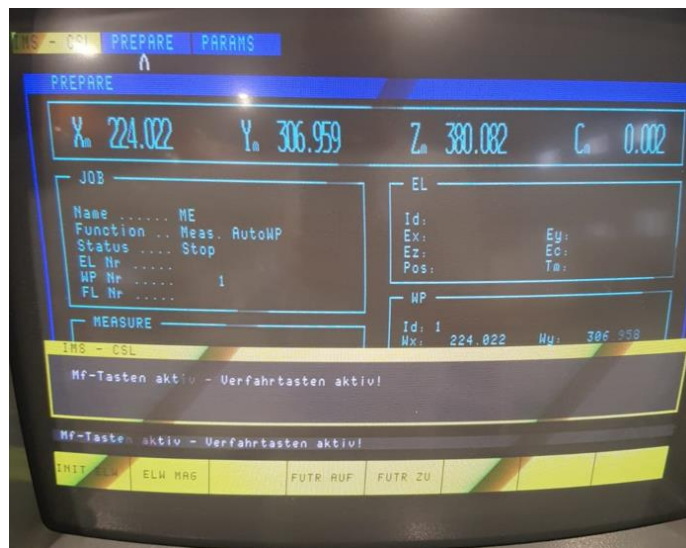
5.3. PROMJENA „GLAVE“ ALATA

Dosad korištenu „glavu“ alata treba nakon nuliranja zamijeniti s „glavom“ za prihvat elektrode. Stroj pruža pneumatsku zamjenu koja se aktivira odabirom funkcije „Futr auf“, čime stroj ispušta „glavu“. Prije odabira ove funkcije, nužno je rukom prihvatiti „glavu“ alata kako ne bi ispala na postolje stroja. Funkcijom „Futr zu“ ubacuje se nova „glavu“ u stroj.



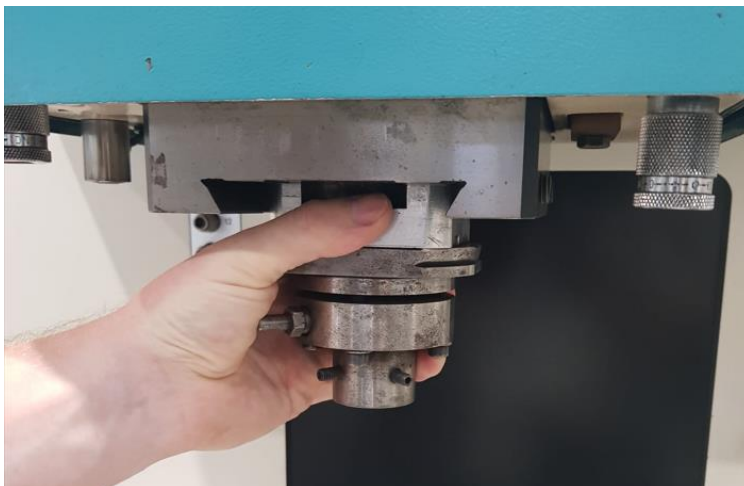
Slika 44 Pridržavanje glave alata prije ispuštanja

Izvor: Autor



Slika 45 Funkcija „Futr auf“ – ispuštanje glave alata

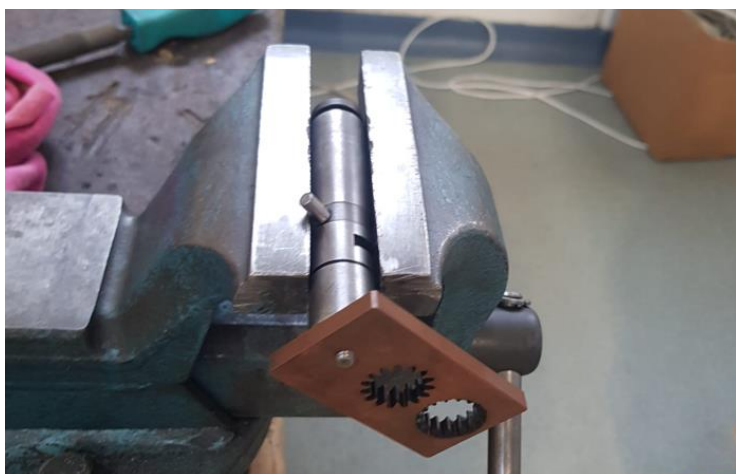
Izvor: Autor



Slika 46 Umetanje glave za prihvat elektrode

Izvor: Autor

Idući korak je pritezanje bakrene elektrode na čeličnu pinolu koja ulazi u glavu stroja. Ručno je stegnuta pinola u bakrenu elektrodu, a zatim pomoću škripca dodatno stegnuta. Ovdje je također vrlo bitno paziti da se elektroda ne stegne pre jako da ne bi došlo do oštećenja. Elektrodu prije stezanja valja očistiti.



Slika 47 Pritezanje elektrode za prihvat

Izvor: Autor

5.4. KOMPARIANJE ELEKTRODE

Kada je pričvršćena elektroda s pinolom u glavu stroja, treba ju „izravnati“ u prostoru pomoću komparatora. Ticalo komparatora mora minimalnom silom dodirivati elektrodu. Odokativno se pozicionira ticalo u sredinu elektrode a zatim pomiče po ticalu komparatora i prati oscilacija kazaljke. Da bi elektroda bila „poravnata“ u određenoj osi, koristi se uređaj za pomicanje alata (slika 41). U ovom slučaju, ne smije postojati oscilacija kazaljke, što znači da nema tolerancija kao kod umjeravanja ticala. Isti postupak provodi se za x i y os. Cilj je postići paralelnost elektrode s obratkom.

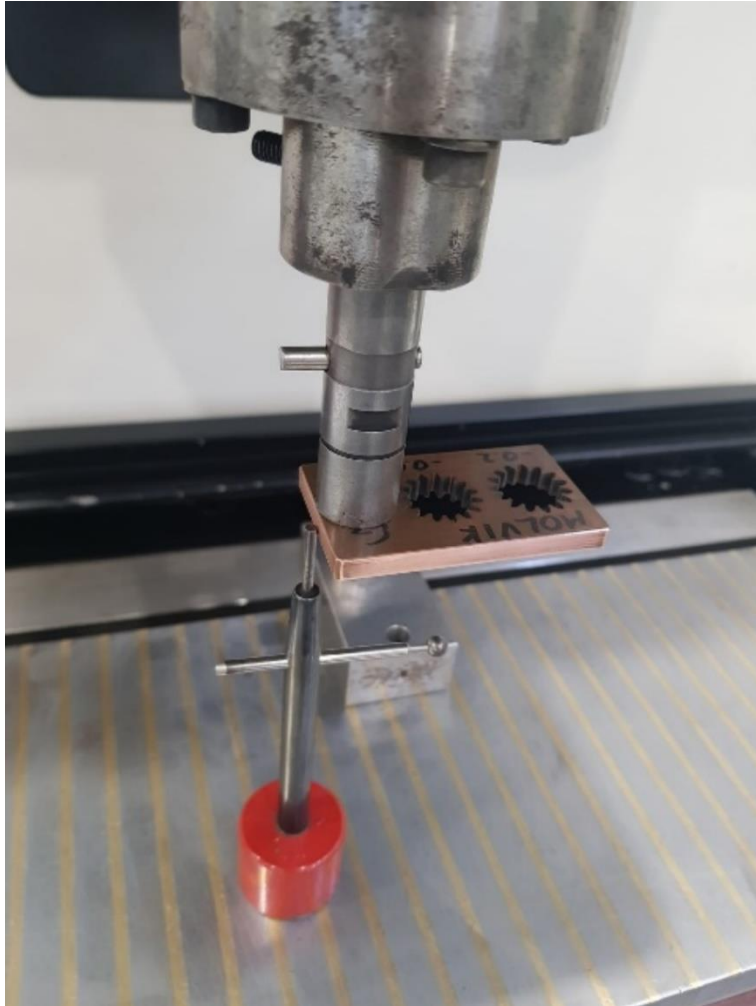


Slika 48 Kompariranje elektrode po x osi

Izvor: Autor

5.5. UZIMANJE EKSCENTRA ELEKTRODE

U ovom koraku potrebno je uzeti ekscentar elektrode u x i y osi, pa nakon toga uzeti i visinu erodiranja. Odokativno se postavlja ticalo naprave za mjerenje ekscentra u sredinu elektrode pa podesi putanja elektrode tako da dotakne ticalo minimalnom silom šest puta. Elektroda se zakrene na suprotnu stranu i ponovi radnju. Isto ponovi i za y os. Cilj ovog postupka je dati stroju informacije o dimenzijama elektrode a samim time i poziciju njenog središta.

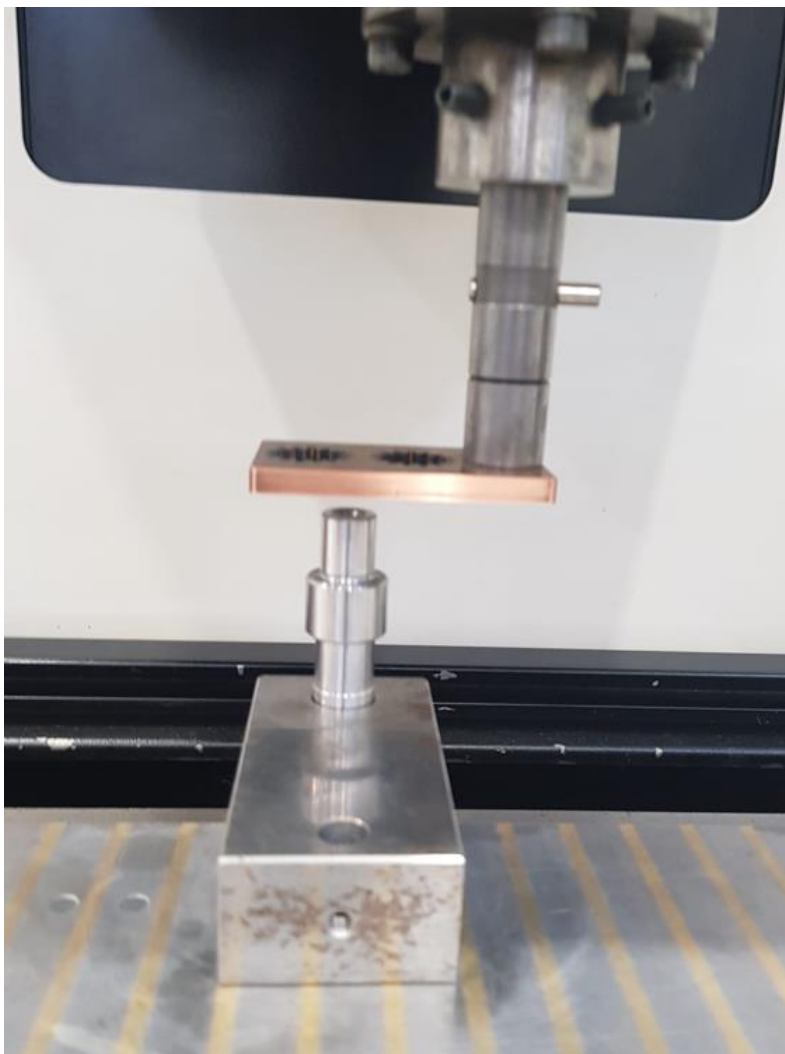


Slika 49 Uzimanje ekscentra po y osi

Izvor: Autor

Visina erodiranja se podešava tako da se prvo pozicionira središte ozubljenog provrta elektrode paralelno sa središtem vratila, pa unese u sustav duljina pomicanja alata po z osi. Bitno je da pomak obuhvati mjesto na vratilu predviđeno za ozubljenje. Treba paziti da pomak nije pre velik da ne bi

elektroda zahvatila steznu napravu. Kada je unesena vrijednosti pomaka, radi se testna simulacija prvo iznad obratka („u zraku“), a zatim na obratku.



Slika 50 Podešavanje visine erodiranja

Izvor: Autor

5.6. PROGRAMIRANJE

Da bi stroj odradio proces prema željenim konačnim dimenzijama, treba ga programirati, odnosno unijeti mu određene parametre obrade. S obzirom na to da se na ovom stroju obrađuju razni strojni dijelovi, u sustavu je pohranjen veći broj dosad korištenih programa. Odabire se program prikladan razmotrenoj obradi te mu se mijenjaju određeni parametri prema zadanim uvjetima hrapavosti površine koju je zatražio kupac. Neki od tih parametara su frekvencija i duljina puštanja napona, jačina iskre, duljina podizanja elektrode, osnovna pozicija, upis pozicije erodiranja prema crtežu itd.



Slika 51 Programiranje - ozubljenje

Izvor: Autor

5.7. TESTNO ERODIRANJE

S obzirom na to da je postupak elektroerozije posljednji korak u tehnološkom procesu, potrebno je svaki korak provjeriti, a na kraju izvršiti i testno erodiranje kako bi se osigurala ispravnost provedbe prethodnih koraka. Jednom kad se stroj pusti u pogon i kada alat zahvati obradak, ako je napravljena greška, dobiva se škart.

5.8. ODREĐIVANJE VISINE DIELEKTRIČNE TEKUĆINE

Kako se proces obrade mora odvijati u dielektričnoj tekućini, mora se u sustav unijeti podatak koliko je potrebno podići razinu dielektrika. Izmjerena udaljenost od postolja do promjera na vratilu na kojem započinje obrada je 140 mm. Taj podatak unosimo u sustav koji iz sigurnosnih razloga dodaje još 20 mm na unesenih 140 mm.

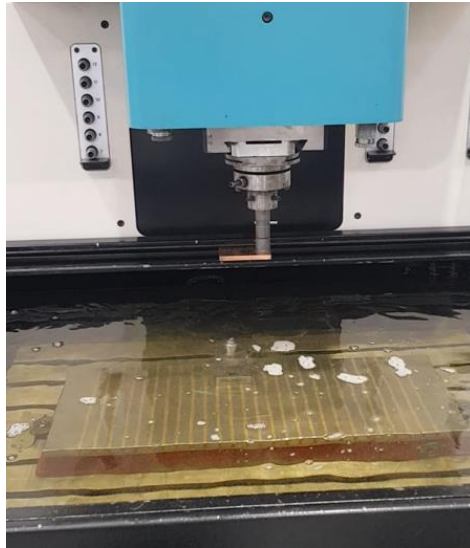


Slika 52 Mjerenje visine

Izvor: Autor

5.9. ERODIRANJE

Kada je proces pušten u pogon, treba biti prisutan uz stroj nekoliko minuta kako bi se provjerilo dali stroj javlja nekakvu grešku. Proces započinje ispunjavanjem radnog postolja dielektričnom tekućinom do razine koja je unijeta u sustav (140 mm + 20 mm).



Slika 53 Uronjavanje obratka u dielektrik

Izvor: Autor

Nakon popunjavanja postolja dielektričnom tekućinom, alat se prema unesenim koordinatama centrira na središte vrtila i približavanjem obratku dolazi do stvaranje iskre koja vrši eroziju. Obrada ne zahtijeva nikakve dodatne pothvate i ne treba koristiti nikakvu zaštitnu opremu. Proces obrade na „grubo“ trajao je 1 h i 40 minuta.



Slika 54 Obrada na „grubo“

Izvor: Autor

Stroj je podešen da prvo odradi eroziju na grubo. To se odnosi na ozubljeni provrt na elektrodi s oznakom -0,2 (slika 53). U bilo kojem trenutku može se zaustaviti obrada i provjeriti stanje.



Slika 55 Provjera stanja obrade

Izvor: Autor

Ovom prvom („grubom“) erozijom cilj je postići oblik pri čemu se zanemaruje konačna tražena hrapavost površine. To znači da je u toj obradi jačina iskre veća, a kvaliteta obrađene površine manja. Kada je odrađena „grubu“ erozija, slijedi „fina“. Potrebno je vratiti se se u fazu programiranja, prilagoditi parametre „finoj“ obradi te započeti njen proces. Ovom drugom obradom ispunjeni su uvjeti hrapavosti zatraženi od strane kupca. Obrada je trajala oko 35 minuta.



Slika 56 Obrada na „fino“

Izvor: Autor

Nakon završetka obrade, stroj vraća dielektričnu tekućinu na početnu razinu, rukavicama se skida alat i obradak te se briše krpom. Nakon toga nanosi se antikorozivno sredstvo na obradak i izrada ozubljenja je dovršena. Na slici ispod može se vidjeti izgled izrađenog ozubljenja.

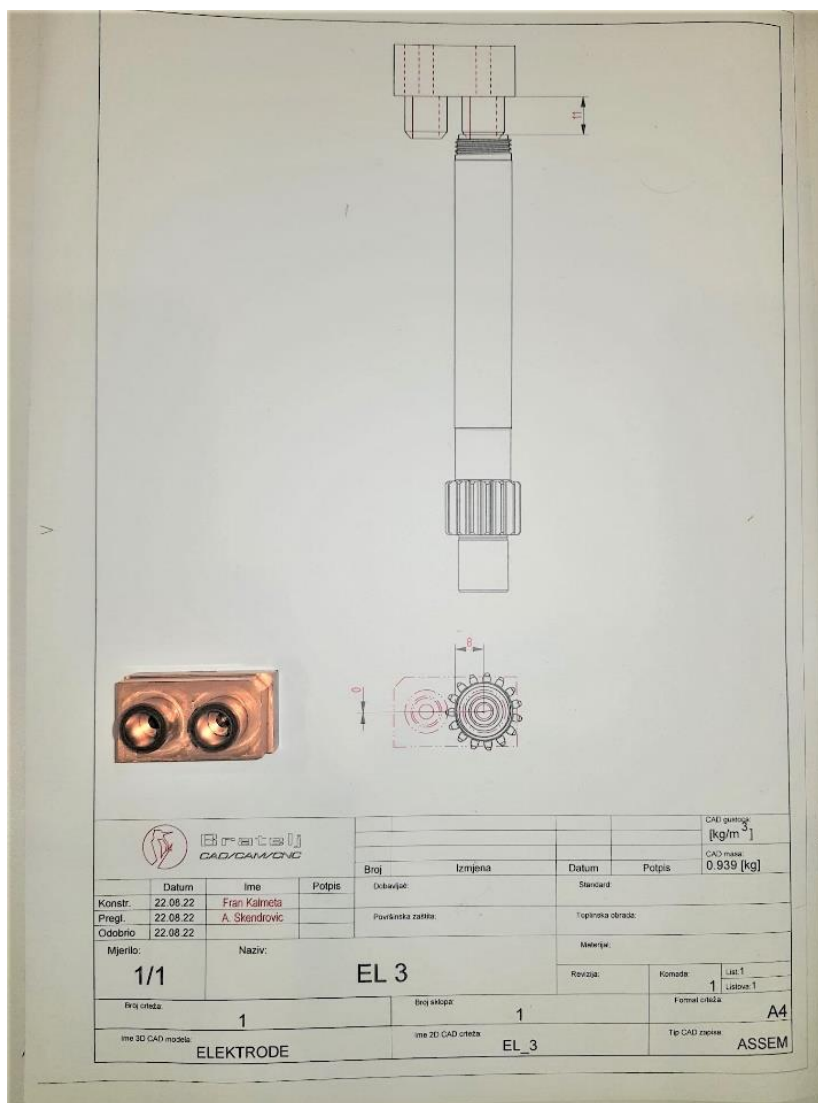


Slika 57 Ozubljenje na vratilu

Izvor: Autor

6. POSTUPAK IZRADE KONUSA ELEKTROEROZIJOM ŽIGOM

Postupak izrade konusa je gotovo identičan kao kod izrade ozubljenja. Bitno je proći sve navedene korake, jedino postoji razlika kod uzimanja visine erodiranja i programiranja s obzirom na to da je elektroda drugačijih dimenzija i u drugačijem položaju u odnosu na prethodni crtež.



Slika 58 Alat i crtež za izradu konusa

Izvor: Autor

U ovom slučaju kod uzimanja visine erodiranja korišten je etalon dimenzija 20 x 35 x 9 mm. Cilj je pozicionirati elektrodu na obradak kao što je prikazano na slici 58. Da bi se to ostvarilo postavlja se etalon između baze elektrode i obratka. Približava se alat po stotu čim bliže etalonu tako da razmak elektrode i obratka bude gotovo jednak 20 mm (visini etalona). Udaljenost alata od postolja u tom trenutku iznosila je 183 mm. Miče se etalon, pa računa vrijednost koju je

potrebno unijeti kako bi baza elektrode bila udaljena 11 mm od vratila kao što je prikazano na crtežu. 183 mm (udaljenost po z osi) $- 20 \text{ mm}$ (visina etalona) $+ 11 \text{ mm}$ (udaljenost s crteža) $+ 0,1 \text{ mm}$ (za sigurnost). Vrijednost visine alata koja se unosi u sustav iznosi $174,1 \text{ mm}$.



Slika 59 Uzimanje visine erodiranja pomoću etalona

Izvor: Autor

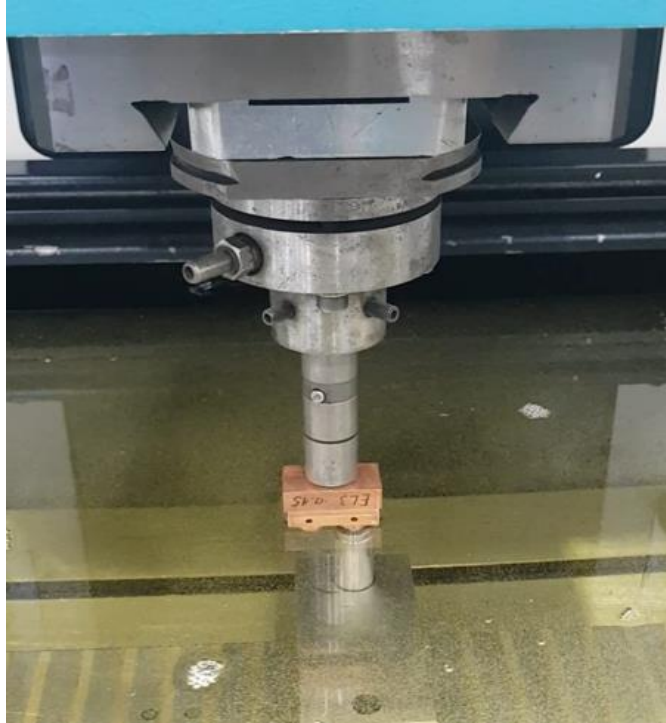
Kod programiranja, za razliku od izrade ozubljenja, ovdje treba unijeti funkciju planetarnog gibanja alata kako bi stroj mogao izraditi konus identičnih dimenzija s crteža. Osim pozicija elektrode i kvalitete obrade, ostali parametri ostaju isti.



Slika 60 Programiranje - konus

Izvor: Autor

Nakon programiranja, obavlja se testno ispitivanje unesenih parametara i nakon toga započinje obrada. Kao i kod prethodne obrade, prvo se obrađuje na „grubo“ pa nakon toga na „fino“. Ukupno vrijeme obrade trajalo je oko 20 minuta.



Slika 61 Erodiranje

Izvor: Autor



Slika 62 Konus na vratilu

Izvor: Autor

7. PRIMJENA VRATILA

Izrađeno vratilo je dio sklopa u kalupu za injekcijsko prešanje. Kalup sadrži u sebi šest vratila. Ubrizgavanjem rastaljene plastike u njega pa skrućivanjem, dobivaju se čepovi koji se koriste za tube u prehrambenoj industriji (slika 64).



Slika 63 Plastični čep dobiven iz kalupa [21]

Tvrтка koja je kupila ovakav kalup može proizvesti šest čepova po jednom ciklusu injekcijskog prešanja. Naravno, za to mora posjedovati stroj prilagođen toj obradi.

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je izraditi ozubljenje na vratilu elektroerozijskom tehnologijom u tvrtki Bratelj. Izrada ozubljenja jedan je od odrađenih projekata kojeg sam dobio priliku ponoviti kako bi naučio način funkcioniranja stroja i princip rada elektroerozije. Tvrtka se bavi CNC obradom te pretežito izradom kalupa za injekcijsko prešanje, a izrađeno vratilo je samo dio sklopa kalupa. S obzirom na to da je elektroerozijska obrada obično posljednji korak u tehnološkom procesu, veoma je bitna preciznost u programiranju i pripremi stroja za obradu. Bilo kakva greška prouzročit će netočnost konačnih dimenzija te će se u većini slučajeva dobiti škart, a samim time velike financijske gubitke i nepovjerenje kupaca.

Vratilo je izrađeno prema crtežu na tokarilici pa se onda kalila na 58-60 HRC. Nakon toga, urezivao se specijalan navoj te je nakon toga slijedilo erodiranje. Vanjski suradnici su odradili prva tri postupka, a tvrtka Bratelj zadnji postupak erodiranja. Obrada je odrađena na stroju za elektroeroziju žigom. Postoje razne vrste žigova koji se primjenjuju ovisno o obliku koji se želi postići. Žigovi (bakrene elektrode) također tvrtka samostalno konstruira te izrađuje. Testiranje kalupa se provodi na stroju za injekcijsko prešanje kako bi se provjerila ispravnost proizvoda.

Proces erodiranja je siguran, ekološki prihvatljiv, no brzina obrade može biti mana ako se obrađuju veliki strojni dijelovi. Održavanje stroja, njegova priprema te programiranje traže dosta uloženog vremena kako bi se savladali i potpuno razumjeli. Dvostruka provjera svakog koraka povećava vjerojatnost točnosti. Također, iskustvo u radu koje se dobiva svakom novom obradom izuzetno je bitno kako bi se maksimalno reducirale greške i kako bi obrada bila učinkovita te čim isplativija.

LITERATURA

- [1] Electrical discharge machining EDM (eBook) - M.P. Jahan
- [2] Characterization of electrical discharge machining plasmas – Antoine DESCOEUDRES
- [3] Current Advanced Research Development of Electric - Dr. R.S Jadoun
- [4] http://www.ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm_document_id=538&dm_dnl=1
(25.07.2022.)
- [5] Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P., Schumacher B. M., Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process
- [6] <https://uawildoleft.com/u%C4%8Dinite-to-sami/8270-vrste-edm-i-obra-da-metala.html>
(25.07.2022.)
- [7] Study on Electro Discharge Machining (Edm) - Dhirendra nath mishra , Aarti Bhatia ,
Vaibhav
- [8] Machining of Complex Shape Design by Electrical Discharge Machining Process - grupa
autora
- [9] <https://www.inotechlaser.com/services-wireedm.html> (29.07.2022.)
- [10] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/wire-electrical-discharge-machining>
(30.07.2022.)
- [11] GF Machining Solutions: *User Manual (CUT 20 P – CUT 30 P)*, Švicarska, 2015ž
- [12] <https://www.ewt3dcnc.com/edm-wire/> (04.08.2022.)
- [13] Carl, Steve, Phil Sommer: *Complete EDM handbook*, www.reliableedm.com
- [14] <https://finemetalworking.com/wire-edm> (04.08.2022.)
- [15] <http://www.kenson.id/2016/09/wire-cut-edm.html?m=1> (04.08.2022.)
- [16] Nekoventionalni postupci obrada – EDM dr.sc. S. Škorić
- [17] <https://www.edmsammlite.com/how-does-spark-erosion-work/> (05.08.2022.)
- [18] Bhattacharyya B., *Modern Machining Technology: Machining processes utilizing thermal energy*, 2020.
- [19] <https://www.rapiddirect.com/blog/what-is-electrical-discharge-machining/> (05.08.2022.)
- [20] <https://www.edm-machines.com/productimage/56492371.html> (07.08.2022.)
- [21] <http://www.molvik.hr/hr/sadrzaj/pregled/zatvaraci-za-aluminijske-tube/609?c=95>
(22.09.2022.)

[22] <https://dokumen.tips/documents/k-miroslav-stosic-tehnicke-tablice.html?page=1>
(04.08.2022.)

Prilog: CD-R