

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машине алатке

Број индекса: 88/2016

Матеја А. Крстић

Машине за електроерозиону обраду завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Богдан Недић, ред. проф., ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Машинско инжењерство**
Студијско подручје: **Производно машинство**
Име и презиме: **Матеја Крстић**
Број индекса: **88/2016**

ПРИЈАВА ЗАВРШНОГ РАДА

Тема рада: **Машине за електроерозиону обраду**

Задатак: У оквиру завршног рада потребно је да кандидат прикупи и изврши систематизацију података о електроерозионој обради и машинама за електроерозиону обраду. Потребно је у посебном делу рада детаљно описати карактеристике савремених ЦНЦ машина за ЕДМ обраду.

Завршни рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Принцип и суштина електроерозионе обраде,
3. Производне операције електроерозионе обраде,
4. Машине за електроерозиону обраду,
5. Савремене ЦНЦ машине,
6. Закључци,
7. Литература.

Ментор:

Крагујевац, 13.05.2019.

Др Богдан Недић, редовни професор

Резиме рада

У оквиру овог завршног рада извршена је детаљна анализа и истраживање у вези машина за електроерозиону обраду, дат је осврт на савремене ЦНЦ машине за ЕДМ обраду. Уводним разматрањем приближен је историјски осврт на сам развој ових машина, као и потребе за њиховом употребом. Наведени су основни принципи и суштина електроерозионе обраде. Објашњене су физичке основе процеса електроерозионе обраде и основне операције које се могу извршити при истој. Представљене су производне операције, машине за електроерозиону обраду и њихова детаљна систематизација. Дат је историјски осврт на савремене ЦНЦ машине, начин програмира и типичне представнике савремених ЦНЦ машина.

Кључне речи

Електроерозиона обрада, ЦНЦ машине, Електрода, Жица

Summary of work

Within this paper analysis and research were made about machines for electroerosion processing, a review was given about modern CNC machines for EDM processing. At the beginning of the paper was presented historical developmet of this machines, as well as the need for their use. Within the first part of the paper, basic principals were listed and essence of the electroerosion processing. The main physical process of electroerosion were explained and also the main operations the production operation were explained, we are talking about machines for electroerosion processing and their detailed systematization. It was given the historical review of how the modern CNC machines were advanced and became irreplaceable tool in mechanical industry, the way you can program and tipical representative of the modern CNC machines.

Key words

Electroerosion processing, CNC machines, Electrode, Wire

Садржај:

1. Уводна разматрања	5
2. Принцип и суштина електроерозионе обраде	7
2.1 Физичке основе процеса електроерозије	7
2.2 Основне операције електроерозионе обраде	10
2.3 Технолошке карактеристике процеса	10
2.4 Производност електроерозионе обраде	11
2.5 Тачност при електроерозионој обради	13
2.6 Квалитет обрађене површине	15
2.7 Материјал за израду електрода и поступци који се користе при томе	16
3. Производне операције електроерозионе обраде	21
3.1 Пројектовање технолошког поступка електроерозионе обраде	21
3.2 Постројења за електроерозиону обраду	22
3.3 Генератор електричног импулса	23
3.4 Израда калупа за ковање и пресовање	26
3.5 Израда алата за просецање и пробијање	27
3.6 Израда делова са уским прорезима	29
3.7 Израда делова са малим и дубоким отворима	30
3.8 Израда делова сложеног облика	31
4. Машине за електроерозиону обраду	33
4.1 Машине	33
4.2 Агрегат за пречишћавање и циркулацију диелектрикума	37
4.3 Систем за праћење и управљање процесом обраде	38
5. Савремене ЦНЦ машине	40
5.1 Историјски осврт	40
5.2 Програмирање	41

5.3 Имплементација	42
5.4 Представници	42
6. Закључци	47
7. Литература	48

1. Уводна разматрања

Електроерозиона обрада, скрећено ЕДМ је савремени поступак обраде који тренутно у инжењерској пракси заузима примат. Потиснуо је конвенционалну методу резањем због својих многобројних технолошких предности, нарочито код тешкообрадивих материјала. Ова револуционарна метода обраде ступила је на снагу када је брачни пар Лазаренко (СССР) поставио основне принципе и поступлате за електроерозивну обраду, отворивши погон за ЕДМ обраду. [2]

У савременој технологији за обраду тешко обрадљивих материјала, упоредо са класичним методама обраде (резањем и пластичним деформисањем), све већу примену налазе неконвенционалне методе обраде, тј. специјалне методе. Примена ових метода које се и даље све више развијају, посебно у комбинацији са класичним методама, најефикаснија је у обради материјала и делова које врло тешко, или немогуће обрадити на класичним обрадним системима. Упоредо са освајањем нових алатних материјала у обради резањем, ради побољшања класичних метода обраде, освојене су и нове методе обраде засноване на сасвим новим принципима.

Иако су принципи електроерозионе обраде познати дуги низ година, она постаје све популарнија последњих неколико десетина година. Њеној популаризацији значајно је допринео напредак нарочито на подручју технологије, те захтеви за делове високе тачности израђених од материјала који се тешко обрађују конвенционалним методама обраде одвајањем честица. Захтев да електроерозиона обрада постане све популарнија, доступнија и поузданија за употребу био је развој на подручју регулационих система као целине и развој рачунарског система за моделирање и надзор целог процеса обраде. Данас је електроерозиона обрада један од најчешће коришћених неконвенционалних поступака обраде. Углавном се користи за производњу калупа и матрица за масовну производњу, врло ситних делова сложених облика и високе димензионе тачности направљених од тешкообрадљивих материјала, те за израду резних алата. Електроерозиона обрада користи се у многим гранама индустрије као што су: аутомобилска индустрија, електронска индустрија, сатови, аеронаутика, играчке, медицински инструменти, и многи други.

Уопштено, електроерозиона обрада је процес обраде одвајањем честица при чему је због самог физичког принципа обраде нужно да обрадак и електрода буду израђени од проводљивог материјала. Одвајање честица постиже се контролисаним електричним праћењем кроз мали зазор између електроде и обратка (приближно 10 - 50 μ m). Електрично праћење се одвија у окружењу диелектричног флуида, али постоје и процеси код којих се електрично праћење одвија без присуства диелектрика. Овом обрадом могуће је обрађивати материјале високе чврстоће и тврдоће, разне легуре, поликристални дијамант као и неке врсте керамике. Битно је нагласити да тврдоћа обратка не утиче на процес обраде, као што је то случај код конвенционалних метода обраде одвајањем честица. Код електроерозионе обраде не постоји контакт између алата и обратка. Према томе, нема ни механичке силе између њих које постоје код конвенционалних метода, где алат улази у површину обратка. Електроерозионом обрадом одваја се врло мало материјала након појединачног електричног праћења, али се тај поступак понавља отприлике 10000 пута у секунди. Квалитет површине након електроерозионе обраде је висока, односно мале је хрпавости и високе димензионе тачности. Код обраде нема ротације обратка, а

ротација алата је нужна у случају када је алат цилиндричног облика и малог попречног пресека. Недостаци у односу на традиционалне методе су: релативно ниска брзина уклањања материјала (ниска производност), промена површинске структуре обратка (зона утицаја тоpline) као и ограничена величина алата и обратка. Приликом електроерозионе обраде знатно је већа локална зона утицаја топлоте у односу на конвенционалне методе обраде одвајањем честица, јер се приликом обраде локално развија врло висока температура на површини обратка. Тако висока температура може довести до промена у кристалној структури матријала.

Код неконвенционалних метода обраде, поступак скидања материјала са обратка се постиже довођењем електричне или механичке, топлотне, светлосне и других видова енергије, директно у зону обраде. Све ове методе се могу поделити према енергији која се користи у зони обраде за скидање материјала са обратка. Једна од првих ЕДМ машина је AGITRON AZ 4, приказана је на слици 1.



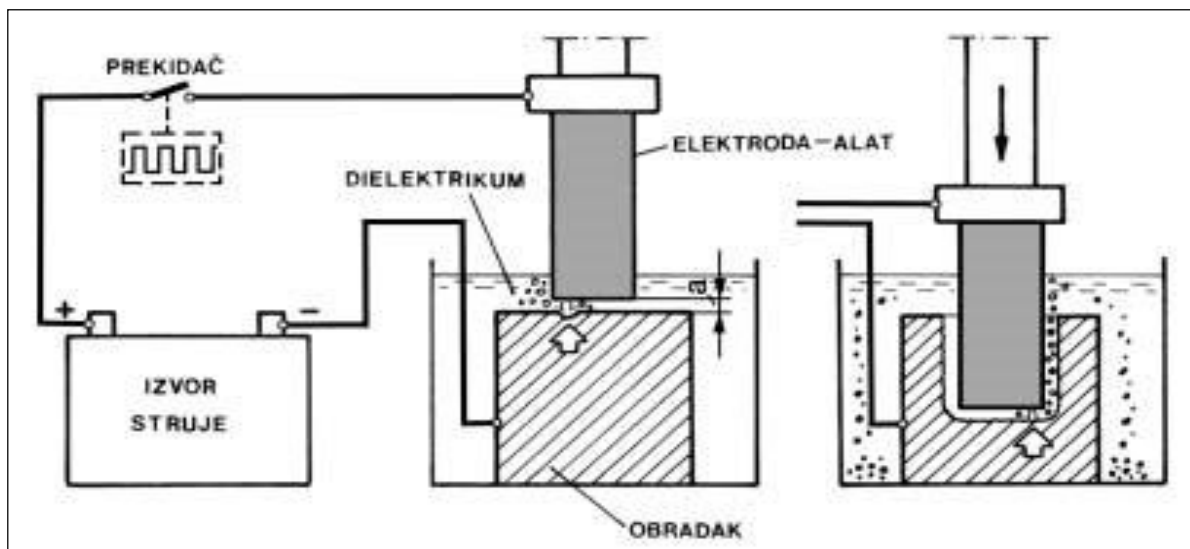
Слика 1. Прва ЕДМ машина[1]

2. Принципи и суштина електроерозионе обраде

2.1. Физичке основе процеса електроерозије

Обрадак и алат доводе се у положај да се не додирују. Између њих налази се простор испуњен диелектрикумом у затвореној посуди, односно кади. Цео систем прикључен је на извор једносмерне струје и на једном од проводника налази се прекидач. У почетку све док је прекидач отворен, између алата и обратка нема електричног напона. Прекидач се спушта и успоставља се електрични напон. У почетку између електрода није успостављена струја јер се налазе у диелектрику, међутим како се растојање између њих смањује на неко растојање a , доћи ће до пробоја диелектрика и појавиће се искра. Ово стање назива се критично стање све док је растојање између $0,005-0,5 \text{ mm}$. Пажњење се одвија кроз уски канал, електрична енергија претвара се у топлоту и простор између алата и обратка се интензивно загрева. Када се прекидач искључи, долази до хлађења. Увођењем електронског прекидача, поступак се понавља врло брзо и успостављена је фреквенција настајања великог броја кратера. Интензивније, брже и лакше односи се вишак материјала.

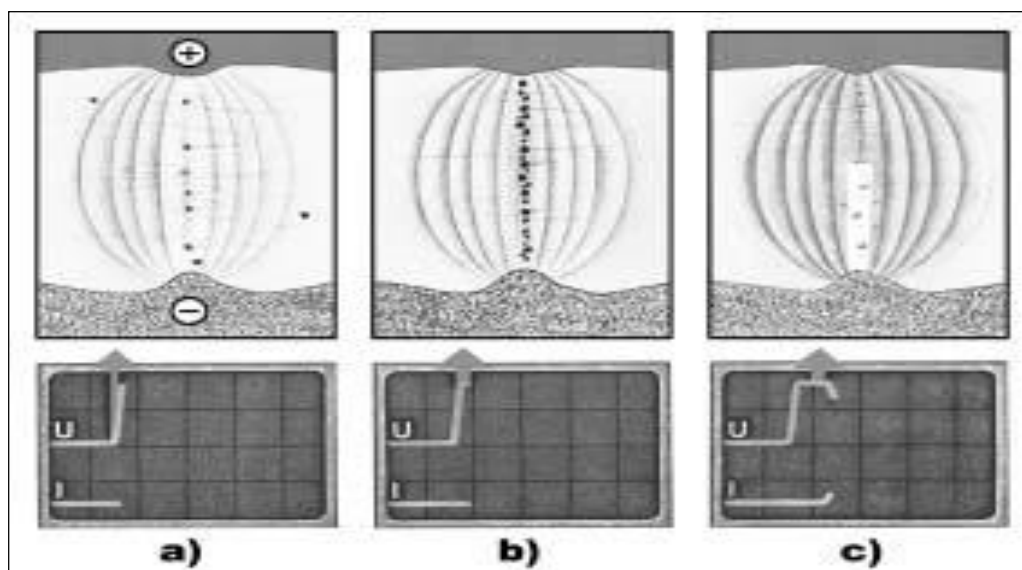
Прва фаза представља процес јонизације диелектрика, тј. формирање канала за прањење, друга процес прањења и трећа дејонизација диелектрикума.



Слика 2. Принцип електроерозионе обраде[2]

Фаза 1.

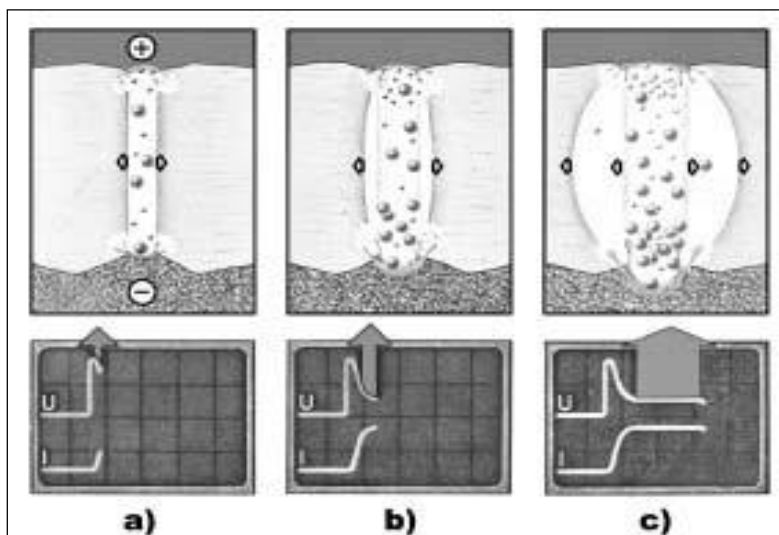
Дејство електричног напона успоставља јако електрично поље, привлачно електромагнетно поље доводи до нагомилавања вишка наелектрисаних честица. Образује се сноп честица које личе на мостић и долази до прерасподеле електрона преко мостића из подручија негативно наелектрисаних честица у правцу позитивно наелектрисане електроде. Електрони се сударају са неутралним честицама диелектрика, цепају их, при чему настају и позитивно и негативно наелектрисане честице. Ослобођени електрони у том маху изазивају даље сударе и настаје ланчана реакција у којој се ствара огроман број јона. Због тога се овај процес назива јонизација.



Слика 3. Шематски приказ фазе 1[2]

Фаза 2.

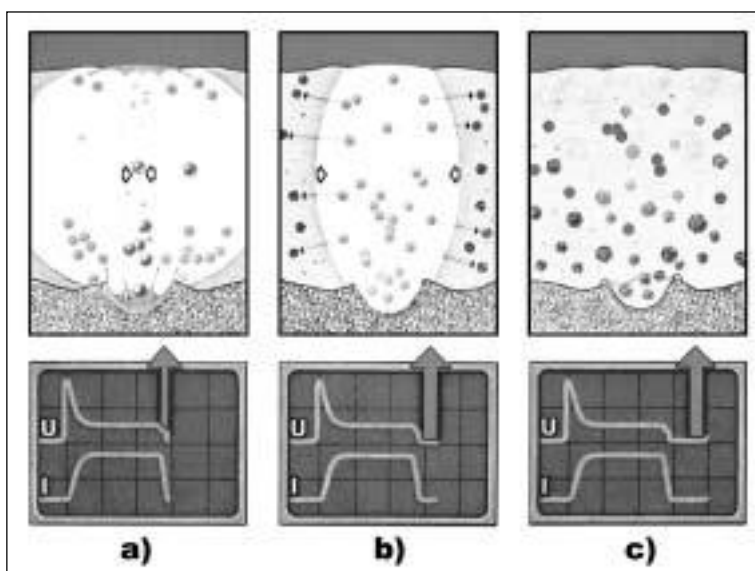
Велики број позитивних честица креће ка негативним и обрнуто, тако да се успоставља ток електричне струје која има тенденцију пораста ка масималној вредности. При судару електрона са електродом долази до претварања електричне енергије у снагу Џулових губитака у уском каналу за пражњење. Ствара се плазма која достиже температуру од 8000 до 12000°C. Долази до моменталног распадања и испаравања најтежих материјала за обраду. Образује се и гасни мехур и притисак у диелектрику моментално скаче.



Слика 4. Шематски приказ фазе 2[2]

Фаза 3.

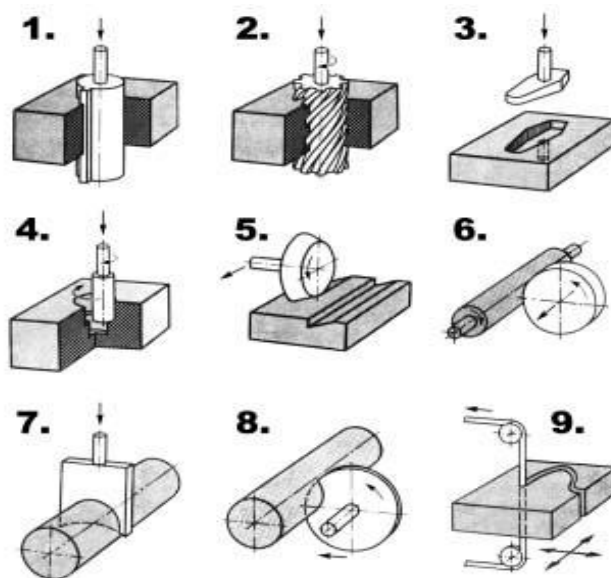
Нагли пад броја наелектрисаних честица у покрету, пад притиска и нестанак канала за пражњење прекида ток једносмерне струје. Неутралне честице диелектрикума притисканју гасни мехур и смањују га док га сасвим не анулирају. Диелектрик ће преплавити растопљени метал, а он ће пливати по њему у виду малих грумена. Такође ће настати и графитне честице и мали гасни мехури. Нестајањем канала за јонизацију нестаће позитивне и негативне честице и обавиће се дејонизација.



Слика 5. Шематски приказ фазе 3[2]

2.2. Основне операције електроерозивне обраде

Сви електропроводљиви материјали подложни су електроерозивној обради, без обзира на механичка својства самог материјала. Међутим, електроерозивна обрада економична је само код тврдог челика велике чистоће, као и код осталих тврдых материјала, који се поступком класичне обраде не могу обрадити. Економична је такође и код обраде сложених површина на меким материјалима. Посебна примена се нашла у авио и ракетној индустрији. На слици налазе се основне операције које се могу начинити електроерозијом.



Слика 6. Основне операције електроерозивне обраде[2]

2.3. Технолошке карактеристике процеса

Најважније технолошке карактеристике процеса: производност, тачност израде и квалитет обрађене површине. Приоритетност ових карактеристика варира од услова обраде и намене обрађених делова. Са економског аспекта производност је најважнија карактеристика. Са аспекта намене најважнији су тачност и квалитет обрађене површине.

У пракси често долази до противречности технолошких карактеристика. Примера ради, повећањем производности долази до лошијег квалитета и мање тачности. Избор оптималних технолошких карактеристика је једно од најважнијих питања, не само у електроерозији већ у свим гранама индустрије.

2.4. Производност електроерозионе обраде

Количина одстрњеног материјала при електроерозионој обради обично се израчунава у (mm^3/min) и претежно зависи од следећих карактеристика: материјала обратка и електроде, параметара напонских и струјних импулса, површине електроде, врсте диелектрикума и брзине испирања радног простора.

2.4.1. Утицај материјала обратка на производност

Поступком електроерозије можемо обрађивати само материјале који проводе или полупроводе електричну струју, што би подразумевало само метале и њихове легуре, укључујући и карбидну, ондносно металну керамику. Не обрађује се сваки метал подједнако добро, па сваки од њих има своју карактеристичну електрообрадљивост електроерозијом. Показатељи могу бити производност, квалитет обрађене површине, застаривање електроде алата, специфични узорак енергије по јединици скинутог материјала и многи други фактори. Највише се обраћа пажња на количину скинутог материјала у јединици времена. Обрадљивост неког материјала по оваквом критеријуму је обрнуто сразмерна коефицијенту Палаткина и гласи : $K_{sp}t = \cdot \rho \lambda \cdot T_{top}$ где је:

- c (J/kgK) специфична топлота,
- ρ (kg/m) специфична густина,
- λ (W/mK) коефицијент специфичне проводљивости,
- T_{top} (K) температура топљења. [2]

Коефицијент Палаткина приказује који ће се од два међусобно упоређена материјала при идентичним условима брже загрејати до тачке топљења. Које је коефицијент већи треба више времена да се загреје, односно обрадљивост електрерозијом му је слабија. На основу једначине закључићемо да на обрадљивост електроерозијом утиче само хемијски састав, док тврдоћа практично и нема икаквог утицаја. Због тога челици се и пре и после каљења могу подједнако добро обрађивати. Након механичке обраде могу се појавити мали деформитети који знатно умањују њену тачност и не могу се отклонити бушењем као у последњој производној операцији, али га зато можемо третирати електроерозивном обрадом и након каљења.

Специфична производност зависи од врсте спарених материјала и електрода. Ова вредност се може изразити на сличан начин као и релативна обрадљивост и утврђује се експериментално. На производност утичу: струја пражњења, напон пражњења, дужина електричног импулса и дужина паузе између два суседна импулса. У постројења за електроерозиону обраду, данас, уграђују се импулсни генератори који се управљају преко транзистора. Они могу да независно подешавају напон празног хода, струју пражњења, дужину импулса и дужину паузе.

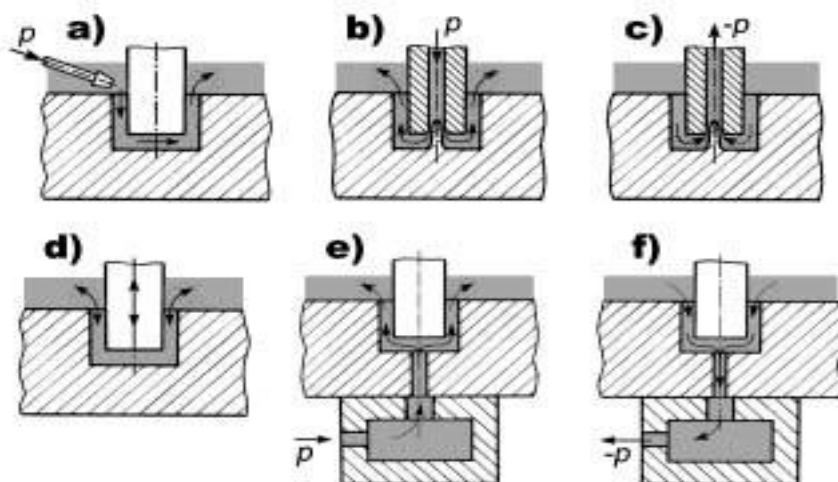
2.4.2. Утицај испирања радног простора на производљивост

Испирање се обавља тако што диелектрикум циркулише кроз радни простор између електроде и обратка. Електрична проводност чистог диелектрикума је много

мања него код задрљаног, тако да је код задрљаног потребно више времена да се радни зазор премости. Продукти ерозије поспешују побољшање радних услова, јер смањују отпор диелектрикума и то олакшава даља пражњења. На неким местима радног простора, садржај продуката ерозије је превелик и то доводи до неправилних пражњења и појаве електричног лука. Те појаве делују јако штетно на електроду и обрадак, сходно с тим, испирање не сме да буде превише слабо, ни превише интензивно. Контролисање испирања радног простора може се вршити перманентним мерењем електропроводљивости диелектрикума. Испирање се може вршити природним или принудним путем.

Природно испирање врши се циркулацијом диелектрика која настаје под дејством хидрауличних таласа, који настају током појаве пражњења, као и због температурне разлике у радном простору и кади. Природно испирање најчешће није најефикасније, па је због тога настало принудно испирање.

Принудно испирање радног простора са попречном циркулацијом диелектрикума је најједноставније али може се применити само код малих дубина еродирања. Такође постоји циркулација кроз електроду: под притиском и са сталним или периодичним карактером усисавања. То се може обавити и уздужним осциловањем, обртањем или одмицањем и примицањем електроде, што остварује таласање диелектрикума и чишћење радног простора.



Слика 7. Начини принудног испирања радног простора[2]

2.4.3. Утицај врсте диелектрикума на производност

Најважније карактеристике су вискозитет и температура паљења. Већи вискозитет се користи код грубе обраде, а мањи код fine. Радни зазор између електроде и обратка код fine обраде је врло мали и диелектрикум већег вискозитета би тешко циркулисао, па би испирање радног простора било отежано, а самим тиме би и производност опала.

Температура је друга најважнија карактеристика, течности са ниском температуром паљења лакше испаравају, па новонастали гасови смањују производност. Код електроерозионе обраде данас се најчешће користе следеће течности : минерална уља, петролеум и дестилована вода.

Најчешће се користе минерална уља као диелектрикуми. Нафтне рафинерије производе минерална уља разних чистоћа. Код грубе обраде највише се користе минерална уља великог вискозитета, јер се тако постиже већа производност при обради.

За фину и врло фину обраду најчешће се користи петролеум са врло малим вискозитетом, посебно је погодан за обраду тврдог метала која ће се обавити кратким импулсима. Еколошки свесно користи се петролеум без мириса.

Дејонизована вода се користи за обраду микро отвора и на машинама за сечење помоћу жице. Из обичне воде технолошким поступком одстрањују се растворени минерали, односно тим поступком вода постаје електронепроводљива и омогућава се испирање радног простора.

2.4.4. Утицај материјала електроде на производност

За електроде електро алата најчешће се користе: чист бакар и његове легуре, чист графит и његове легуре, алуминијумске легуре (силумин), чист волфрам и његове легуре. Како је раније истакнуто, највише од материјала електроде зависи напон пражњења, самим тим и енергија импулса, затим и производност. За материјал електроде су такође везана и топлотна својства и брзина дејонизације радног простора. Ниво ефективне снаге одговара свако одређеном материјалу, која може да се реализује при датом ефективном напону. Ако је топлотна проводљивост неког материјала електроде већа, самим тим већа је и ова снага, утолико и производљивост. Утврђено је да су графит и бакар од набројаних материјала најбољи за израђивање електрода, јер пружају највећу прозводност и најмање трошење електроде.

2.5. Тачност при електроерозионој обради

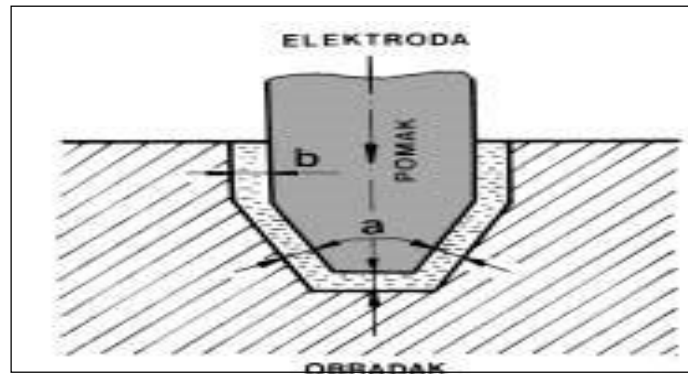
Остваривање тачности при електроерозионом поступку зависи од: фактора и параметара саме машине, тачности израђене електроде, топлотне дилатације при самом поступку промене радног зазора, трошење електроде и многи други.

Фактори машина су последица несавршености њених органа, а то се одражава на тачност електроерозије путем грешака позиционирања електроде, недовољне крутости машине, недовољне осетљивости уређаја за помак и многи други. Данас су ове грешке код савремених електроерозионих машина сведене на минимум. Тачност израђене електроде има директан утицај на тачност обраде. Свака мања или већа грешка директно ће се осликати на обрадак. Због тога се мора узети у разматрање и грешка на изради електроде на свеобухватну грешку при изради обратка.

У пракси, електрода мора да се направи са двоструко већом тачношћу од оне која треба да се добије при електроерозији. Због различитих коефицијената температурног ширења бакра, челика и других метала, грешке које настају због ширења материјала када температура диелектрикума достигне око 40 °C. Али ово питање се регулисало коришћењем уређаја за хлађење у систему за циркулацију диелектрикуму и пречишћавањем истог. Аутоматски се температура одржава на константном нивоу који не изазива оштећења електрода и обратка, па се ова грешка тиме свела на минимум. Радни зазор одваја при електроерозионој обради электроду и обрадак и постоје две врсте зазора: чеони и бочни.

Чеони- то је заправо нормално одстојање између површине обратка и површине електроде које стоје под оређеним углом у односу на правац помоћног кретања и остварује електрично пуњење.

Бочни- то је нормално растојање између површина електроде и обратка, које су паралелне са правцем помоћног кретања и преко њега се не остварује електрично пражњење.



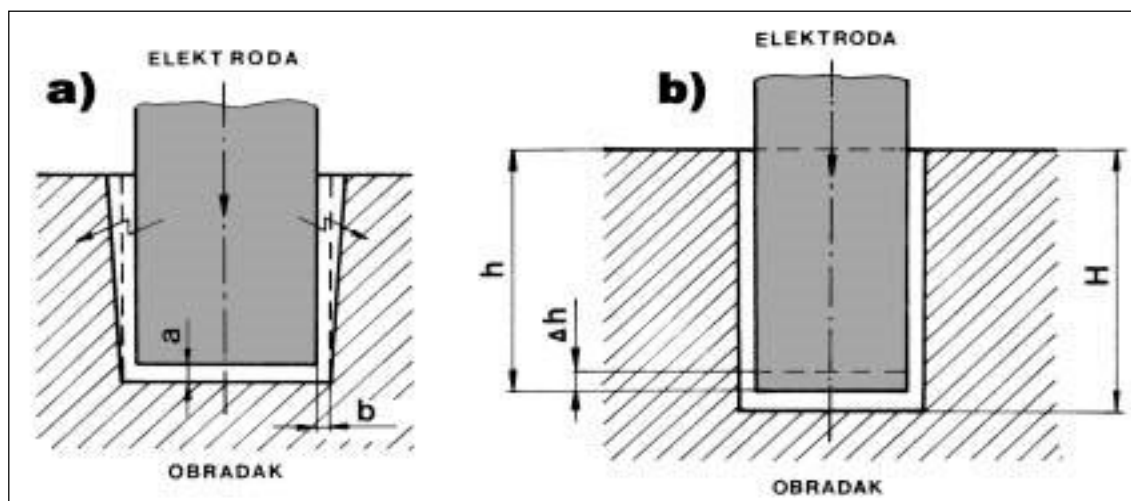
Слика 8. Зазори[2]

Дакле, величина бочног зазора је много већа од величине чеоног зазора. На основу параметара електричног импулса, за дате услове, одређује се величина зазора. Данас, аутоматски је регулисана величина зазора уређајем за помак електроде код чеоног зазора, а код бочног остаје непроменљив током поступка обраде. Овако регулисани зазори не утичу на тачност обраде, јер је то већ урачунато при самој конструкцији електроде. Само њихове промене утичу на тачност при самом поступку електроерозије. А они су последица варијације струјних импулса и осталих радних услова при обради. Овакве грешке тешко је и готово немогуће предвидети, али пажљивим одабиром улазних параметара можемо их свести на минимум.

На тачност електроерозионе обраде велики утицај има још и трошење електроде. Трошење највише зависи од електричних параметара који се подешавају генератором импулса. Постоје две врсте грешака код трошења електроде и то:

а) коничност отвора- Настаје због бочног трошења електроде, које настаје као последица непожељног бочног пражњења преко продуката ерозије. Ово се може знатно умањити или ануирати употребом принудне циркулације диелектрикума, усисавањем кроз электроду или обрадак,

б) смањење дубине еродирања– која настаје због чеоних оштећења електроде. У неком не исувише сложенем проблему, ова грешка се може узети у обзир при конструкцији електроде. У пракси углавном се занемарује.



Слика 9. Грешке због трошења електроде[2]

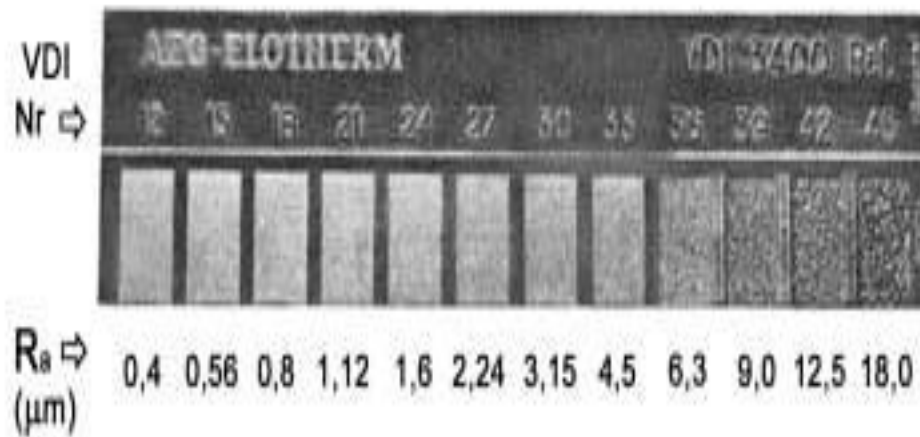
Чеono трошење електроде није хомогено по читавој површини електроде, најинтензивније се троше оштре ивице и отвор за испирање, а најмање радне површи електроде. То се израчунава као релативно запремиско трошење v .

Код скуних геометријски сложених електрода, дакле за обраду гравура, бирају се такви параметри који дају изузетно мало трошење електроде. Обрада при изради ових сложених захтева користи се више електрода, с тим што се релативно запреминско трошење не узима у обзир при планирању и пројекту израде електрода. За обраду је најчешће потребно две или три електроде (груба и фина) или (груба, средња и фина), респективно. Електродом за грубу обраду се уклања највећи део материјала и на ту велику количину уклоњеног материјала обратка уклоњено ће бити око један проценат електроде. Трошење електроде у финој и средњој обради знатно је веће него код грубе, ипак то се не одражава у великој мери на тачност обраде веома мале количине материјала. Развојем индустрије електроерозионог поступка подигнута је и толеранција израде која може да задовољи и најстроже индустријске захтеве.

2.6. Квалитет обрађене површине

Под термином квалитета обрађене површине разматраћемо не само храпавост површи, већ и стање површинског слоја материјала обратка. Обрађена површина добијена електроерозионом обрадом знатно се разликује од оне добијене конвенционалним методама, односно машинским поступцима резањем. Резана има трагове резног алата, односно паралелне канале, док је површ добијена електроерозионим поступком састављена од ситних канала различитих дубина и полупречника.

Храпавост на чеоним површинама већа је него на бочним. Оцена класе храпавости добијене електроерозијом по СРПС и ИСО стандардима превише је груба, због тога су уведене нове норме. Изабрано је 12 подкласа, дијапазон од најфинијих до најгрубљих, направљени су еталони за одређивање храпавости обрађене површине. Технологи их користе при процени класе храпавости, а и радници на машинама за електроерозију.



Слика 10. Еталон за визуелну процену храпавости површине[3]

2.7. Материјал за израду електрода и поступци који се користе при томе

Трошкови електроде могу износити и до 50% укупних трошкова. Због тога се избору материјала, методама израде и броју примењених електрода поклања посебна пажња.

За израду електрода се практично могу користити сви електро проводљиви материјали, али са мање или више успеха. У принципу су материјали који имају високу тачку топљења и малу електричну отпорност најпогоднији за ту сврху.

Све материјале за израду електрода можемо поделити у три основне групе и то:

- Метални материјали од којих се углавном користе:

- електролитички бакар,
- легуре телура, хрома или олова са бакром,
- легуре волфрама и бакра,
- легуре волфрама и сребра,
- алуминијумске легуре,
- месинг,
- волфрам и
- челик

-Неметални материјали од којих се користи само графит и

-Комбинација металних и неметалних материјала од којих се углавном користи легура графита и бакра.

2.7.1. Метални материјали за израду електрода

Електролитички бакар, чистоће 99,99%, се веома много користи за израду електрода. Има широк дијапазон примена и користи се при обради челика свих врста, тврдог метала, као и самог бакра. Основна карактеристика му је да обезбеђује стабилан рад у широком дијапазону режима обраде.

Израда бакарних електрода може се изводити на следеће начине: пластичним деформисањем (ковање и пресовање), истискивањем или извлачењем (примењује се код великосеријске израде електрода константног попречног пресека), обрадом резањем (примењују се сви поступци) и галванским поступком (примењује се код израде тродимензионалних електрода поготово ако су великих димензија и са финим детаљима).

Галвански се примењује, за израду великих просторних електрода које служе за обраду алата за пресовање лима у аутомобилској индустрији или за израду великих алата за бризгање пластике односно за израду тродимензионалних електрода са финим детаљима, примера ради код израде кованог новца и медаља. Овим поступком се добијају бакарне електроде у облику шкољке, које су и код израде алата великих димензија релативно лаке и погодне за манипулацију и рад на машини. [4]

Легуре телура, хрома или олова са бакром са додатком незнатне количине (1-3%) телура, хрома или олова електролитичком бакру добија се легура са знатно бољом обрадљивости резањем него од чистог бакра. Тако се олакшава обрада конвенционалним поступцима обраде резањем и добијање комплексних просторних облика електроде. Међутим, могућности ове легуре при електроерозији су лошије у поређењу са електролитичким бакром. Трошење електроде је веће за 15÷25% уз истовремено смањење производности за око 10%. Поступак нагризања могућ је и код ове легуре применити идентично успешно као и код електролитичког бакра.

Легура волфрама и бакра: састав ове легуре варира, зависно од квалитета и произвођача, у следећим границама: волфрам између 50÷80% и бакар између 50÷20%. Теже се легура са већим процентом волфрама обрађује, док се при електроерозији остварује мања потрошња електроде. За израду електрода користе се конвенционални поступци обраде резањем, тј. стругање, бушење, глодање и многи други. Квалитетно се обрађује, а због високе чврстоће неће се деформисати при обради. Могу се постићи врло fine површине и тачне мере таквом обрадом. Због тога је ова легура веома погодна за израду врло прецизних електрода. Легура волфрама и бакра се не може лити нити ковати. Изузетно је скупа и најчешће се користи за електроде за бушење дубоких отвора, прецизну обраду са финим контурама и обраду делова са врло оштрим ивицама.

Алуминијумске легуре (силумин) су веома добре за израду електрода при обради великих тродимензионалних облика који не захтевају висок квалитет обрађене површине. Састав ове легуре варира зависно од произвођача и углавном је следећи: 85% алуминијум; 11% силицијум; (0,4-0,6)% магнезијум; 1%; гвожђе; 1% бакар; 1% манган. Израда силуминских електрода веома ефикасно се обавља применом конвенционалних поступака обраде резањем или ливењем. Да би се спречило стварање ваздушних мехурића у одливцима, дебљина зидова не сме да буде већа од 10÷15 mm. Смањење димензија електроде могуће је остварити нагризањем у 40% раствору натријумхидроксида и то брзином од око 0,02 mm/min. Рад са натријумхидроксидом је веома опасан па је потребно придржавати се строгих мера заштите.

Искључиво код грубе обраде челика и неких специјалних материјала који се користе у авионској индустрији се примењује цилумин и то за ерозију гравура велике површине (веће од 0,5 dm²).

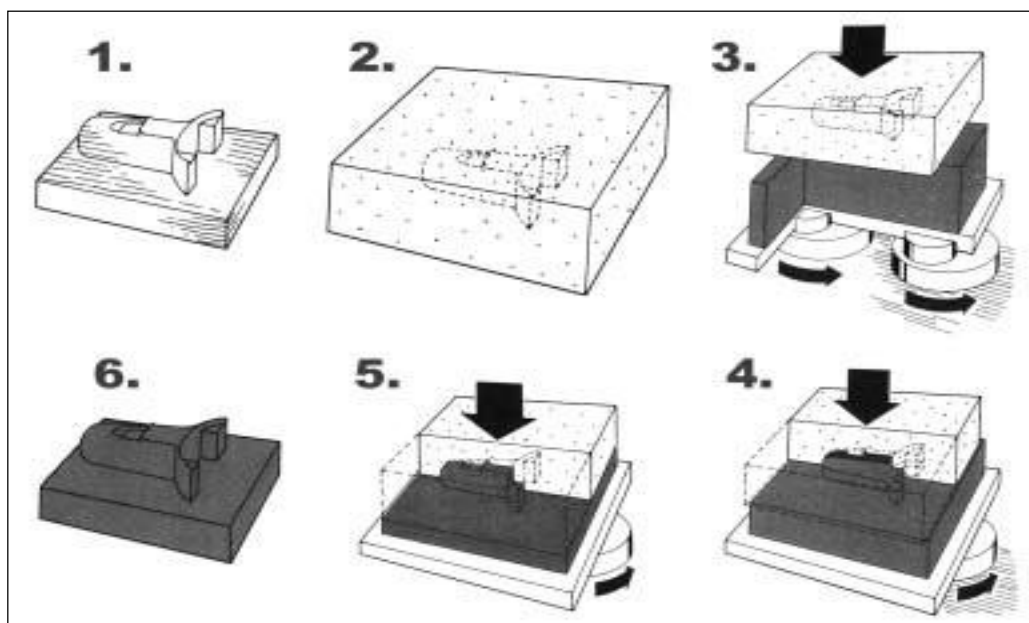
Месинг се све ређе користи због великог трошења електроде, као материјал за израду сложенијих електрода. Једино се добри резултати постижу при доради неких врста титанових легура. Он се такође веома много користи за израду жице која се користи при раду на машинама за електроерозионо сечење.

Волфрам се углавном користи за електроде које се користе при обради микроотвора пречника испод 1 mm. Фино калибрисана волфрамова жица (где је толеранција мања од 0,01 mm) се користи код прецизног електроерозионог сечења тврдог метала.

Челик је могуће веома добро користити као материјал за израду електрода. Најбољи резултати примене пара челичних електрода постижу се при изради алата за пресовање, прераду пластичних маса и ливење под притиском. Код алата за пресовање лима, горњи део алата могуће је користити и као электроду у поступку обраде којим се остварује замена поступка туширања површина, који је иначе врло незхвалан и дуготрајан посао.

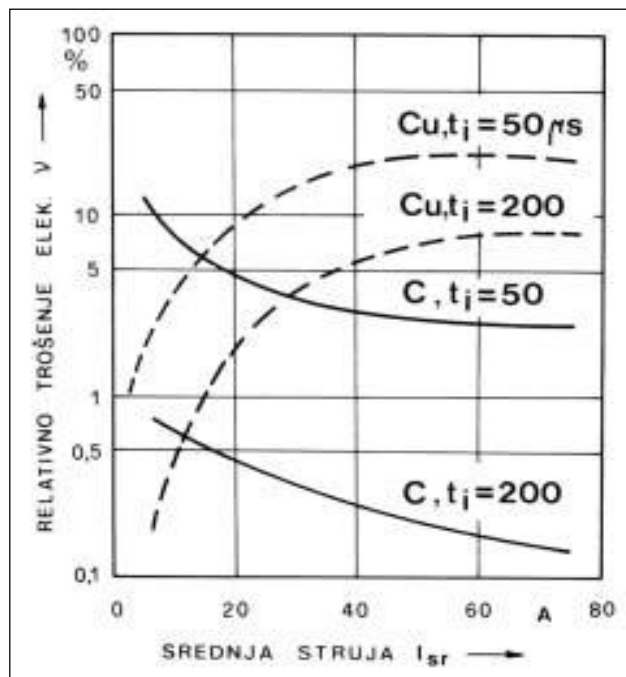
2.7.2. Неметални материјали за израду електрода

Од неметалних материјала за израду електрода користи се само графит. Увођењем импулсних генератора, при електроерозионој обради, графит је постао највише примењивани материјал за израду електрода. Примена графита код релаксационих генератора није препоручљиво због велике нестабилности процеса. Термичка и електрична својства графита могу да варирају у широком дијапазону, зависно од његове густине. Графит мање густине је анизотропан, а графит веће густине је изотропан. Специфична густина графита представља важан показатељ производности при обради. Тако је производност графитом веће густине ($1,6 \div 1,7 \text{ g/cm}^3$) мања него при обради графитом мање густине ($1,80 \div 1,85 \text{ g/cm}^3$). У осталом, трошење електроде, посебно њених оштрих ивица, је много мање код графита са већом специфичном густином. Финоћа зрна графита утиче и на квалитет обрађене површине и на квалитет површине електроде. Тако да, графит веће финоће зрна даје бољи квалитет обрађене површине и обрнуто. Чврстоћа оштрих ивица електроде од графита са ситнијим зрнцима већа је него са крупнијим. Израда графитних електрода врши се углавном применом конвенционалних метода обраде резањем, пре свега стругањем, глодањем и брушењем. При овим обрадама користе се разни алати специфичне геометрије уз одговарајући метод обраде, о чему се можемо информисати у специјализованој литератури. Обрада ће се обавити без примене средстава за хлађење и подмазивање, али уз обавезно примењивање уређаја за усисавање прашине. Код израде електрода великих димензија или код сложенијих облика, у циљу штедње материјала или времена израде, исте компоненте се могу израђивати из више мањих делова који се на послетку састављају лепљењем или механичким притезањем. У данашње време, развијена је и једна специјална метода за обраду графитних електрода такозвано просторно брушење, чије су фазе рада приказане на слици.



Слика 11. Израда графитних електрода[4]

Алат за брушење најчешће је израђен од пластичне масе са додатим абразивом (корунда или ситних челичних опиљака) и то у облику негативне електроде. Поступак се састоји у томе да алат под притиском делује на блок од графита, из кога треба да се добије позитив, то јест позитивна електрода, који врше осцилаторно кретање помоћу ексцентара, абразивно средство врши равномерно скидање материјала са целе површине графитног блока брзином помоћног кретања од око 80 mm/min, помоћу течности под притиском скинути материјал се из зоне обраде одводи. Графитне електроде се најчешће користе при обради челика свих врста, док је за обраду тврдог метала неприлагођен. Упоредни дијаграм релативног трошења електроде у зависности од средње радне струје за бакарне и графитне електроде, као два материјала који се највише користе при електроерозији.



Слика 12. Релативно трошење електроде у зависности од средње радне струје при различитим дужинама електричног импулса за графит и бакар[3]

Разлика је очигледна. Трошење електроде код бакра расте са повећањем јачине струје, код графита се смањује. Код обе електроде долази до знатног смањења трошења електрода са повећањем дужине импулса, што је и раније констатовано.

Занимљиво је уочити да већ код дужине импулса од 200 μ s и средње радне струје веће од 10 А, трошење графитне електроде спадне испод 0,5%, што је најважнија карактеристика са аспекта тачности обраде.

Због свега горе изнетог, при обради графитним електродама могу се добити релативно оштре ивице, а са једном електродом може се израдити и много више делова, што је пресудно са економског аспекта.

3. Производне операције електроерозивне обраде

3.1. Пројектовање технолошког поступка електроерозивне обраде

Узевши претходна разматрања о утицају појединих параметара електроерозивне обраде на производност, тачност и квалитет обраде, сва потребна предзнања да се приступи пројектовању технолошког поступка електроерозивне обраде су стечена. Произвођачи опреме за електроерозивну обраду обично дају разрађене табеле и дијаграме који омогућују оптималан избор појединих параметара обраде због специфичности ове врсте обраде и немогућности да се користе знања и искуства која се односе на конвенционалне методе обраде резањем (стругање, глодање, бушење, брушење и други).

Данас се подаци за избор и оптимизацију параметара ЕДМ обраде дају у виду база података које корисницима омогућују знатно једноставнији и лакши рад. Подаци који су дати на један од ова два начина, резултат су теоретских прорачуна, практичних испитивања или дугогодишњег радног искуства.

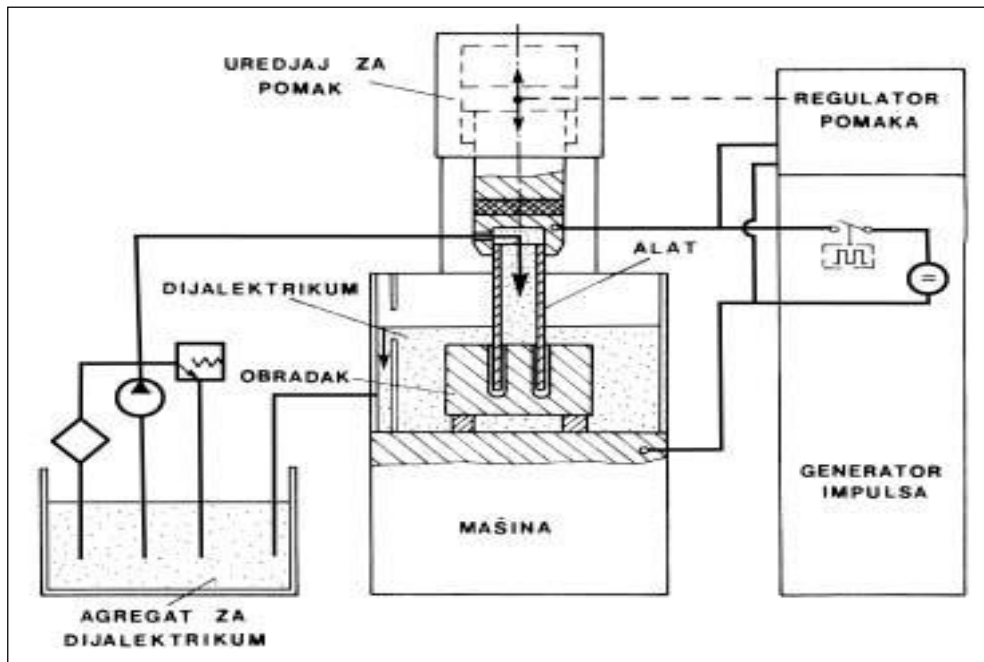
Они су код сваког произвођача опреме систематизовани на специфичан начин и по правилу важе само за дати тип генератора електричних импулса, односно искључиво за једну машину, па се као такви не могу користити на машинама других произвођача. На тај начин, сваки произвођач интелектуално заштитити своја знања и искуство од својих конкурената.

Пројектовање технолошког поступка електроерозивне обраде обавља се на основу задатих величина које треба остварити при обради неког дела, а који се првенствено односе на тачност и квалитет обраде, и то обухвата одређивање следећих елемената:

-броја електрода (за грубу, средњу и фину обраду);

- материјала појединих електрода;
- параметара електричних импулса;
- димензија електрода;
- производности;
- трошења електроде;
- времена обраде и

-других услова који се остварују при обради, као што су нпр. врста диелектрикума, начин испирања радног простора и остали.



Слика 13. Шема електроерозивног постројења за електроерозивну обраду[2]

До сада стечена знања из технолошке подлоге које дају произвођачи електроерозионе опреме користе се за одређивање наведених елемената технолошког поступка.

За одређивање параметара електричних импулса из табела и дијаграма, као полазне величине користе:

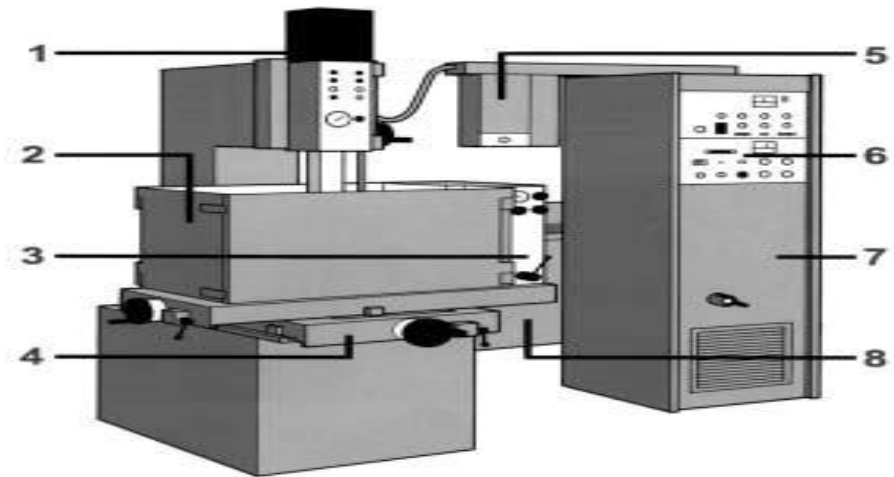
- За грубу обраду- минимална површина попречног пресека електроде и
- За фину обраду- храпавост обрађене површине.

У зависности од ове две величине одређују се параметри електричних импулса за грубу и фину обраду према врсти спарених материјала обратка и електроде. Ови и други елементи које технолог селекује, уносе се у одговарајући формулар који се назива технолошки поступак електроерозионе обраде за конкретан део. Његови подаци користе се како при изради електрода, тако и при подешавању генератора струјних и напонских импулса и машине пре почетка обраде.

3.2. Постојења за електроерозиону обраду

Постојења за ЕДМ обраду састоје се од генератора електричних импулса, машине, агрегата за диелектрикум и управљачке јединице. Појединачне компоненте ових постројења биће изложене у следећим пасусима.

Изглед једног постројења са пуном електродом.



Слика 14. Изглед постројења са пуном електродом[2]

1. уређај за помак електроде,
2. када за диелектрикум,
3. разводни блок за диелектрикум,
4. координатни радни сто,
5. прикључни блок за напон електроде,
6. управљачка јединица,
7. генератор електричних импулса,
8. агрегат за диелектрикум.

3.3. Генератор електричних импулса

Генератор електричних импулса је најважнији део постројења за ЕДМ обраду. Његов задатак је да производи електричне импулсе одређених карактеристика. У току развоја електроерозионе обраде направљен је велики број различитих типова генератора електричних импулса, који функционишу на различитим принципима.

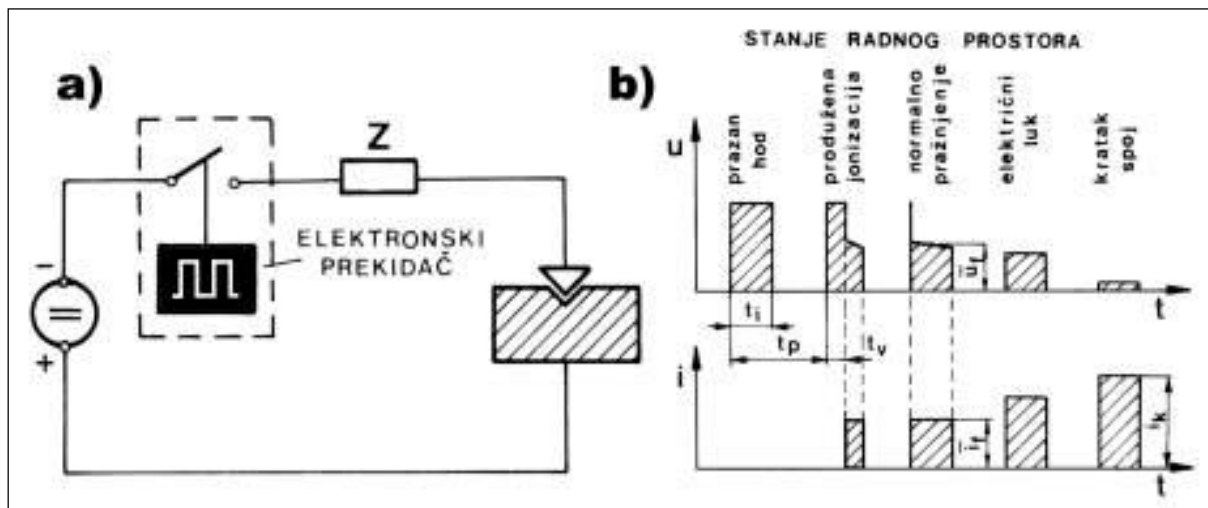
Модерни принципи подразумевају типове генератора:

- релаксациони (осцилаторни),
- машински (ротациони) и
- импулсни (полупроводнички).

Поред поделе према принципу рада, генератори се деле и према намени, снази, фреквенцији итд.

Према фреквенцији електричних импулса, генератори могу бити:

- нискофреквентни (до 300 Hz),
- средњофреквентни (300÷1000 Hz),
- високофреквентни (1000÷200000 Hz) и
- универзални са широким дијапазоном фреквенција и различитим снагама, од неколико делова kW до преко 150 kW.



Слика 15. Принципијелна шема (а) и шема тока напона и струје (б) код полупроводничких импулсних генератора[4]

Код релаксационих генератора, процес генерисања струјних импулса зависи највише од састава и услова у радном простору. Машински и полупроводнички генератори спадају у групу генератора са независним импулсима. Они генеришу импулсе константних карактеристика, који су инваријантни или само делимично инваријантни, у односу на радни простор.

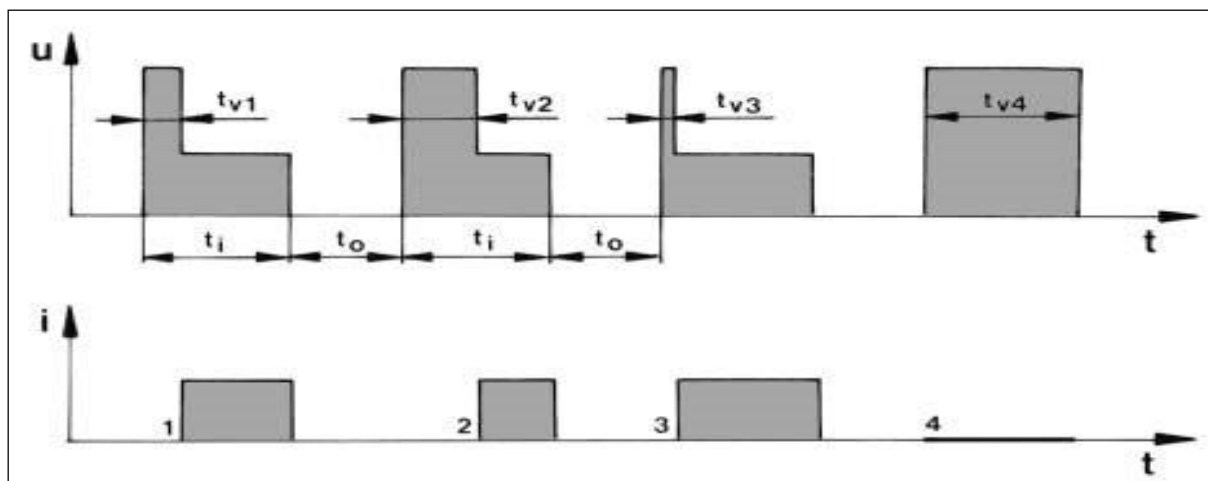
Карактеристике електричних импулса предодређене су конструкцијом самог генератора, као што су: напон, струја, дужина импулса, дужина паузе и коефицијент деловања.

Данас за ЕДМ обраду углавном се примењује полупроводнички импулсни генератор који је успешно заменио цевне генераторе који су се користили у прошлости. Основна карактеристика је то да могу да произведу електричне импулсе, чија се дужина, амплитуда и фреквенција могу мењати у широким опсезима.

Импулсни генератори се састоје од извора једносмерне струје из кога креће директно напајање електроде и обратка, посредством електронског прекидача. Прекидач омогућује периодично довођење напона између електроде и обратка ради остваривања процеса електричног пражњења. Пошто се ови параметри у процесу стално мењају, то утиче на време јонизације, односно на напон пражњења, тако да се оно од импулса до импулса може знатно разликовати.

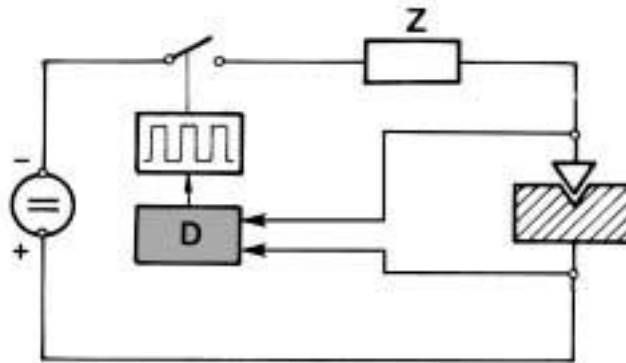
Разликујемо два типа импулсних генератора:

- стандардни генератори електричних импулса и
- генератори са контролисаним пражњењем.



Слика 16. Промена дужине ефективног пражњења код стандардних генератора електричних импулса[2]

Управљање електронским прекидачем изводи се константним ритмом, независно од услова у радном простору, код стандардних генератора електричних импулса, то јест, не узимајући у обзир променљивост времена јонизације. Због тога постоји стална промена дужине ефективног пражњења, које се чак може свести на нулу. Скидање материјала обратка, у тим условима, драстично пада. Обзиром да енергија пражњења није константна, настају варијације квалитета обрађене површине и радног зазора. Код генератора са контролисаним пражњењем постоји зависно управљање електронским прекидачем помоћу детектора који региструје почетак сваког пражњења.



Слика 17. Шема генератора са контролисаним пражњењем[3]

Управљање електронским прекидачем се одвија на начин да се узима у обзир променљивост времена јонизације. Тако се контролише свако пражњење, а његова ефективна енергија се одржава максималном и константном. Постиге максимално скидање материјала обратка, при потпуно уједначеној храпавости површине и величини радног зазора, за дати квалитет обрађене површине.

Импулсни генератори се граде са транзисторима, за струје до 10 А и фреквенције од неколико стотина kHz и са тиристорима за струје до 500 А и фреквенције од неколико kHz.

3.4. Израда калупа за ковање и пресовање

Израда калупа за ковање и пресовање је једна од најраспрострањенијих примена електроерозионе обраде. Она може да обезбеди економичну израду, како врло малих калупа за ковање металног новца тако и врло великих као што су калупи за пресовање аутомобилских каросерија.

Минимално одступање хоризонталне мере код калупа који је потребан на ковачким пресама креће се од 0,15-0,2 mm, а вертикалне мере до 0,1 mm, док је код калупа за ковачке чекиће много веће. При електроерозионој обради најсложенијих гравура, ово су толеранције које представљају нормалне радне тачности.

При изради калупа поступком електроерозије постигнута је знатно већа производност у поређењу са истом обрадом на копирној глодалици. Додатак за фину обраду који се обично скида ручно, сада је мањи него при копирном глодању, и тако су браварски радови смањени и за неколико пута.



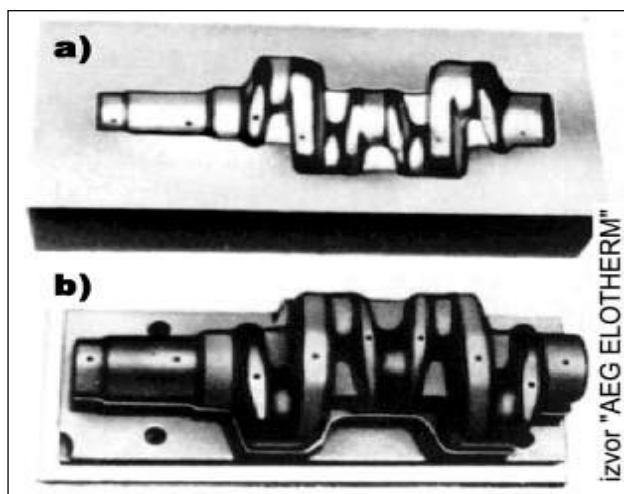
Слика 18. Алат за ковање металног новца[5]

Избегнута је деформација калупа, која се не може уклонити накнадном обрадом (брушењем или полирањем), а она се најчешће јавља при овој врсти термичке обраде. Електроерозиона обрада калупа обично се изводи после термичке обраде каљења.

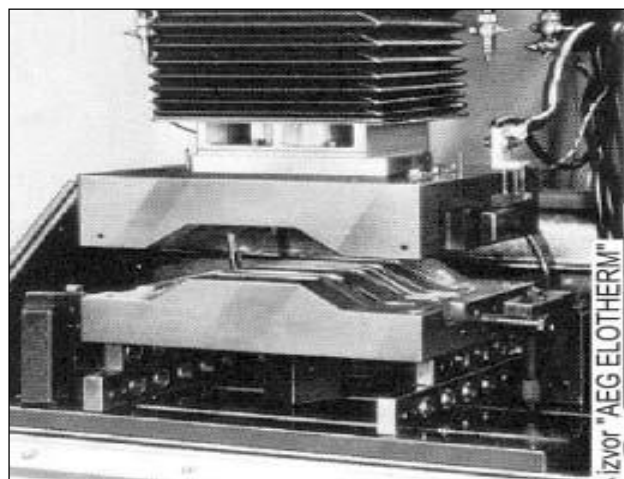
Највећа уштеда је постигнута код поправке истрошених или оштећених калупа, обзиром да је беспотребно извршити отпуштање материјала и поновно каљење, а то би морало код примене конвенционалних поступака обраде да се примени.

Електроерозиона обрада се успешно користи за туширање радних површина алата, за пресовање лима, клизних вођица код машина алатки, и тако се остварују знатно бољи услови за подмазивање метала.

Тако се скуп и дуготрајан поступак ручног туширања заменио у економски оправданим границама.



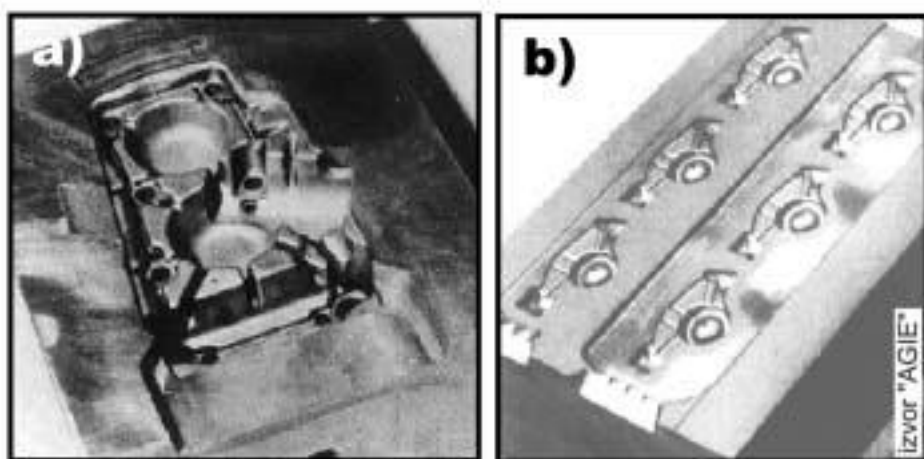
Слика 19. Калуп за ковање радилице[6]



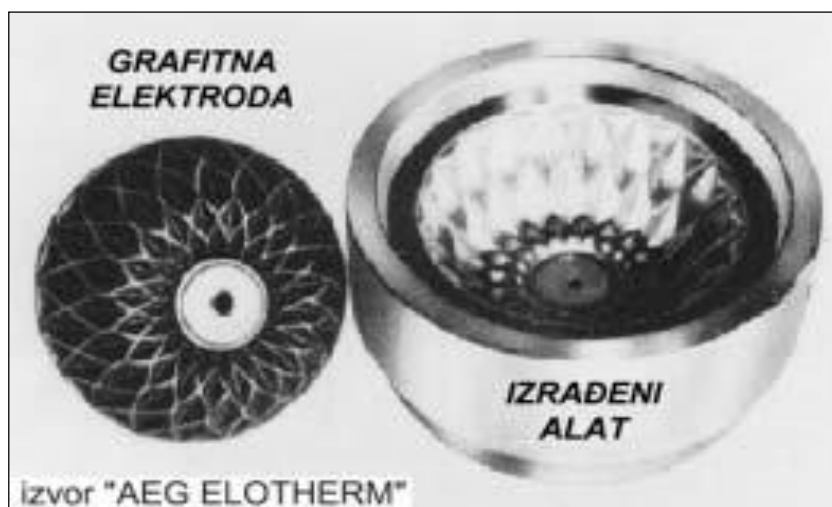
Слика 20. Поступак туширана алата[6]

3.5. Израда калупа за ливење под притиском

Израда калупа за ливење обојених метала (кокила) и пластичних маса под притиском је у константној експанзији. Код ових калупа се постављају строжији захтеви у погледу тачности и хrapавости обрађене површине, за разлику од ковачких калупа. Дозвољено одступање се мери у границама $0,03 \div 0,05$ mm. Применом електроерозије се резање поједностављује уз смањење времена израде и до неколико пута, за разлику од конвенционалне обраде резањем, која је дуготрајна, сложена и скупа.



Слика 21. Примери кокила за ливење под притиском[6]



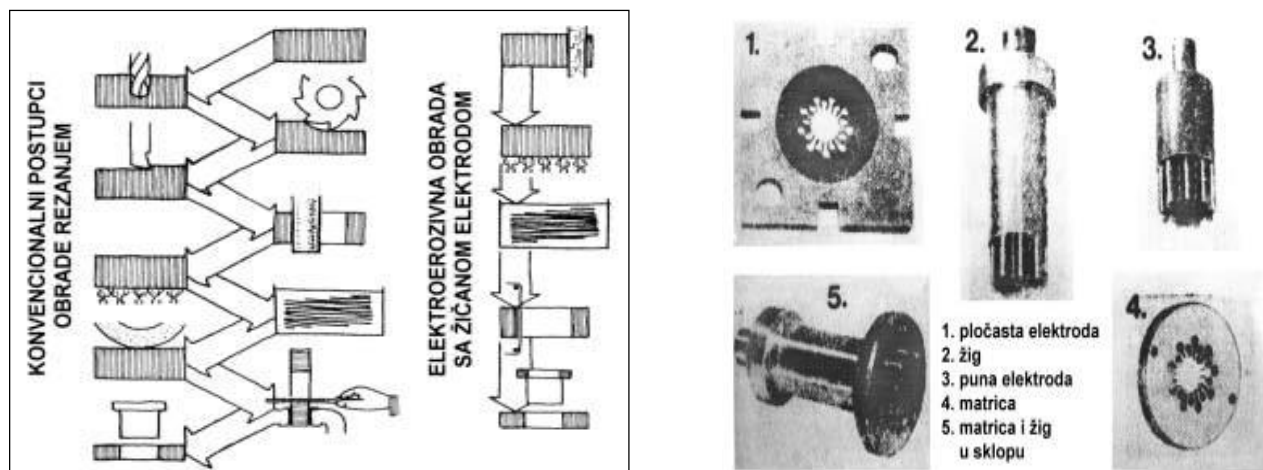
Слика 22. Калуп за пресовање посуде од кристала[4]

3.5. Израда алата за просецање и пробијање

Израда алата за просецање и пробијање сложеног геометријског облика отвора је веома тежак и дуготрајан посао. Потешкоће су у тачном слагању профила матрице и жига, а од тога у највећој мери зависи квалитет израђених делова и дуготрајност алата.

Креће се од сировине у нормализованом стању, да би се применом појединих поступака обраде (стругања, глодања, бушења, рендисања) урадила претходна обрада, код примене конвенционалних поступака обраде. Након тога се извршава термичка обрада каљења, а тек онда завршна обрада брушењем, а на послетку следи нужна мануелна обрада у циљу дотеривања.

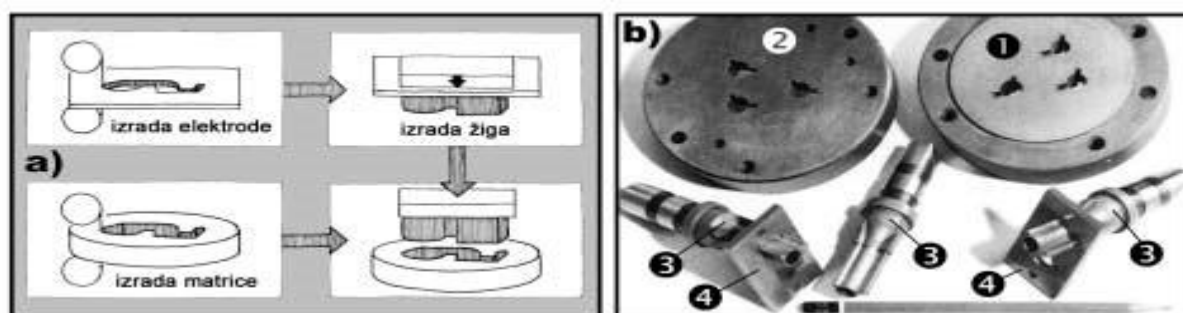
Код примене електроерозионе обраде са жичаном електродом, крећемо од сировине која се на почетку термички кале на специјалу тврдоћу, а онда се веома тачно израђује комплетан без икаквог накнадног ручног дотеривања и напасивања, што је најбитније а користи се посебан програм за ЦНЦ управљање. Тиме се врши транслирање радног стола са обратком. Код примене конвенционалних поступака обраде резањем се то врши на крају, а код електроерозионе обраде на почетку обраде. Зато електроерозија овде има потпуну доминантност, зато што се на тај начин избегавају појаве деформитета или пукотина на крхким местима матрице као што су матрице са више отвора.



Слика 23. Упоредни преглед израде алата за просецање и пробијање конвенционалним поступцима обраде и применом ЕДМ обраде[4]

Применом ЕДМ обраде за израду алата за просецање и пробијање могуће извести на следећа три начина:

- на машинама за ЕДМ упуштање са пуном електродом,
- на машинама за ЕДМ сечење помоћу жицане електроде и
- комбиновано на обе ове машине.



Слика 24. Израда алата за просецање а) шема поступка обраде; б) практичан пример[4]

Код ЕДМ машина са пуном електродом прво се изврши израда плочасте електроде у облику матрице од бакра или графита. Затим се применом машине са пуном електродом, обрнутим копирањем, врши израда жице и електроде, а они се касније користе за израђивање матрице.

3.6. Израда делова са уским прорезима

Израда уских прореза велике дубине глодањем је веома тешка, а углавном је и немогућа. На стандардним машинама се могу израђивати и криволинијски прорези ширине 0,4-0,8 mm, дубине до 20 mm, а ширине 2,5-10 mm и до дубине од 80-100 mm, поступком електроерозионе обраде. ЕДМ машинама са уређајем за планетно еродирање

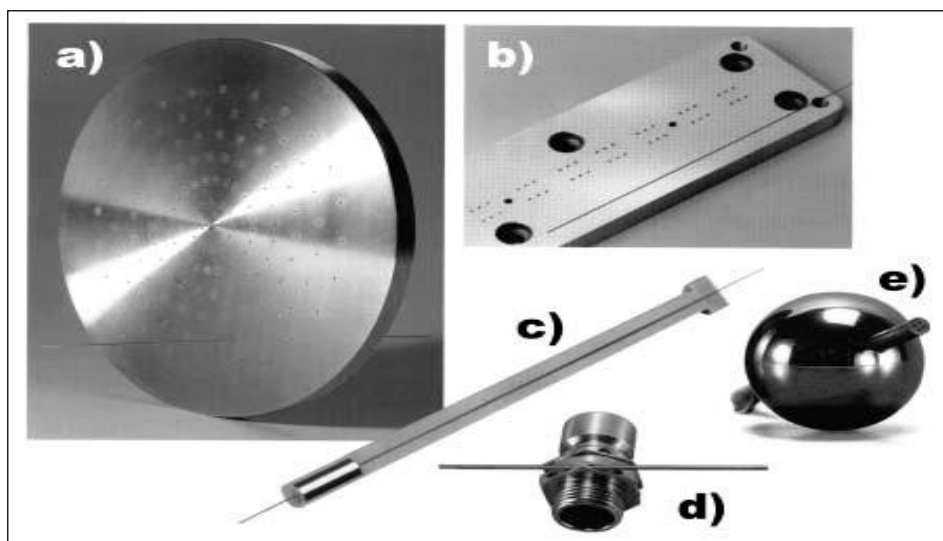
могу се израђивати врло сложени облици матрица применом електроде кружног облика, веома економично. Данас је то најтачнији и најјефтинији поступак.



Слика 25. Матрица за истиксивање[7]

3.7. Израда делова са малим и дубоким отворима

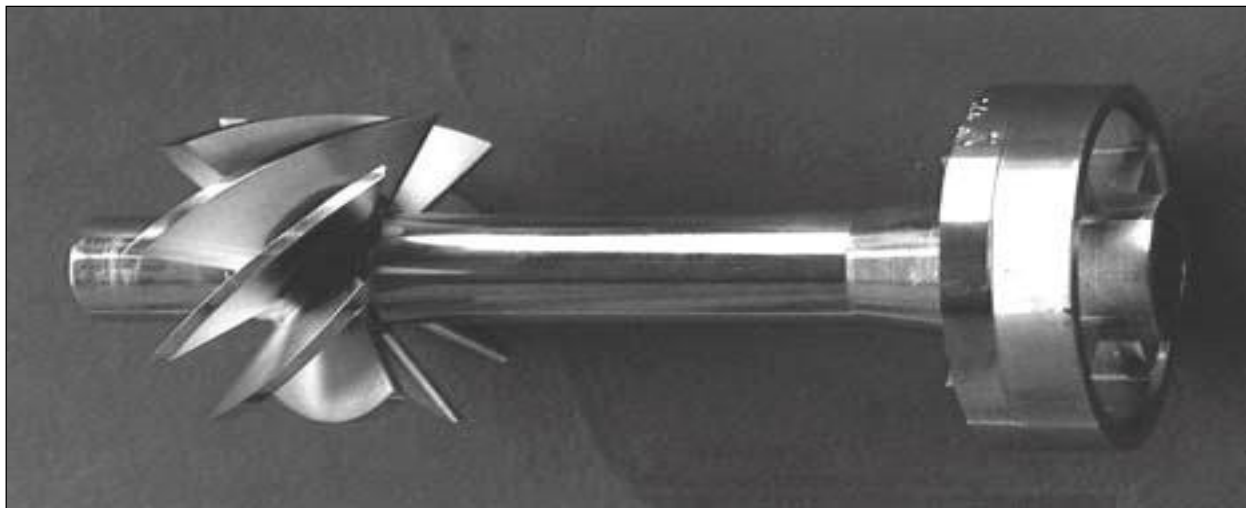
Израда делова са малим и дубоким отворима представља посебан технолошки процес бушења малих и дубоких отвора ($D=0,3-1,5 \text{ mm}$ и дубине преко $100 \cdot D$), које се често јавља при спровођењу истраживачких задатака код неких специфичних делова и алата.



Слика 26. Примери бушења малих и дубоких отвора помоћу електроерозије
а) отвори за хлађење у нерђајућем челику; б) отвори у кокили за ливење; с) отвор
е) отвори избушени на тешко приступачним местима[6]

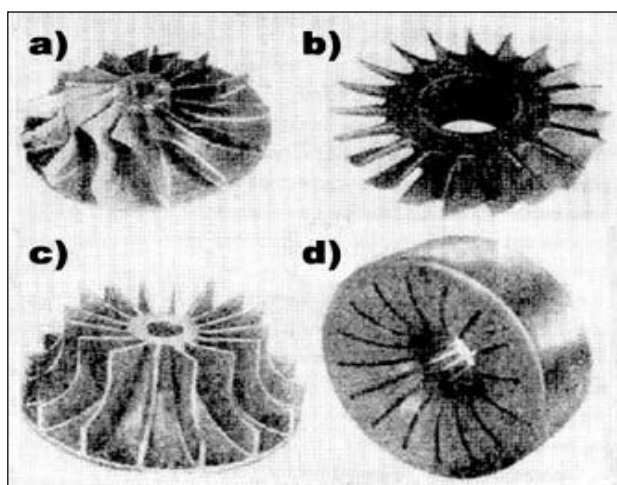
3.8. Израда делова сложеног облика

Масовна израда делова сложеног облика ефикасно се остварује поступком електроерозије код тешко обрадљивих материјала, који су нашли примену у свим подручјима машиноградње. Време израде оваквих турбинских кола је за око 10 пута мање у поређењу са копирним глодањем.

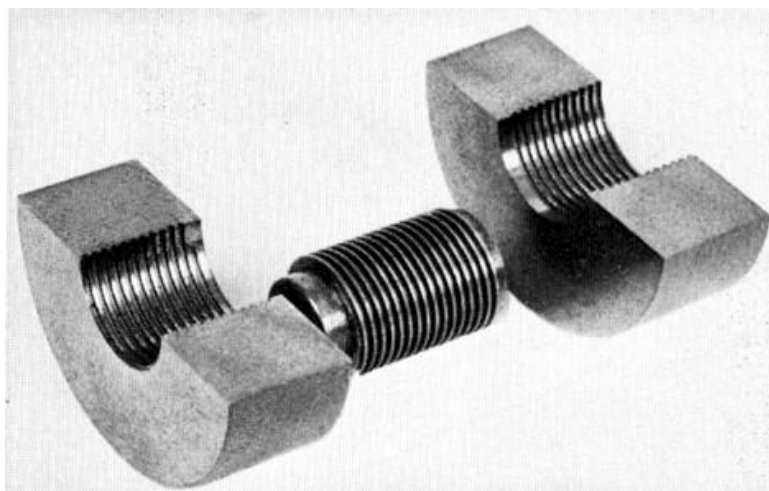


Слика 27. Пример дела сложеног геометријског облика израђеног поступком електроерозије[4]

Серијска израда резних алата сложеног геометријског облика се ефикасно остварује поступком електроерозије узимајући у обзир да се ради о тешко обрадљивим материјалима.



Слика 28. Примери турбинских кола израђених ЕДМ поступком а) и б) са закривљеним лопатицама; ц) са равним лопатицама; д) изглед електроде[4]



Слика 29. Контролник за навој[4]

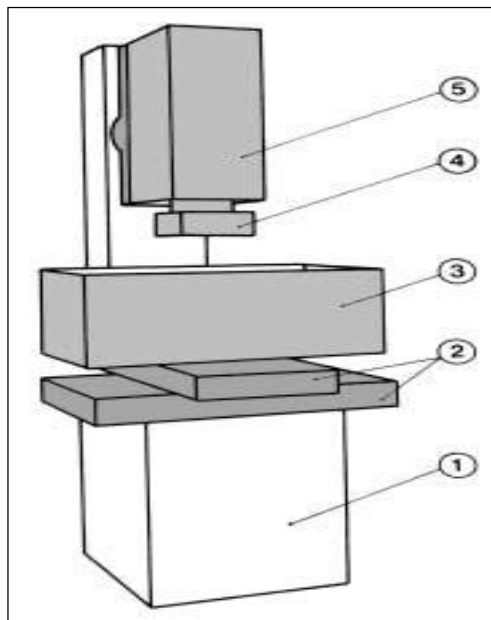
Електроерозија се користи и за израду контролника. Контролник је израђен брушеном електродом у виду навоја применом планетног еродирања са толеранцијом израде пречника $\pm 0,003 \text{ mm}$.

4. Машине за електроерозиону обраду

4.1. Машине

Примитивне машине за ЕДМ обраду биле су израђене наравно по узору на конвенционалне машине за обраду резањем тако што је носач алата са преносником за главно кретање замењен носачем електроде са регулатором помака, углавном вертикалне бушилице и глодалице, док је на радни сто постављена када са диелектрикумом. Данас су развијена углавном четири типа машина за ЕДМ обраду у пракси, а то су:

- Стандардне ЕДМ машине за бушење, односно упуштање гравура,
- ЕДМ машине са планетним кретањем,
- ЕДМ обрадни центри и
- ЕДМ машине за сечење помоћу жичане електроде.



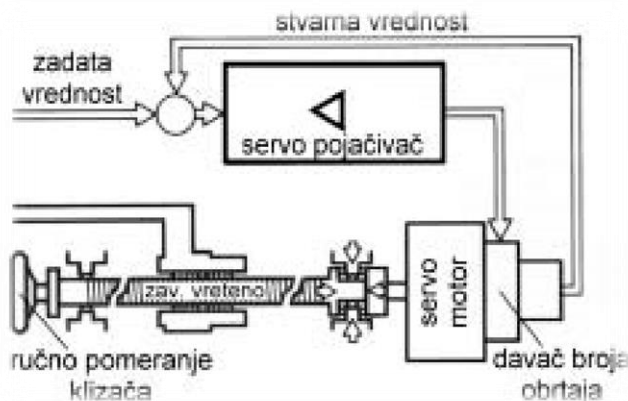
Слика 30. Карактеристични елементи ЕДМ машина[2]

Прва три типа машина се састоје углавном од истих елемената, а разлика им је само по начину позиционирања стола и електроде, заправо варира управљање генератором електричних импулса и агрегатом за диелектрикум.

Карактеристични елементи тих машина су следећи :

- постоље (стоне машине су без постоља) (1),
- радни сто са укрштеним клизачем (2),
- када у коју је смештен обрадак потопљен у диелектрикум (3) и
- држач електроде са регулатором помака (4, 5).

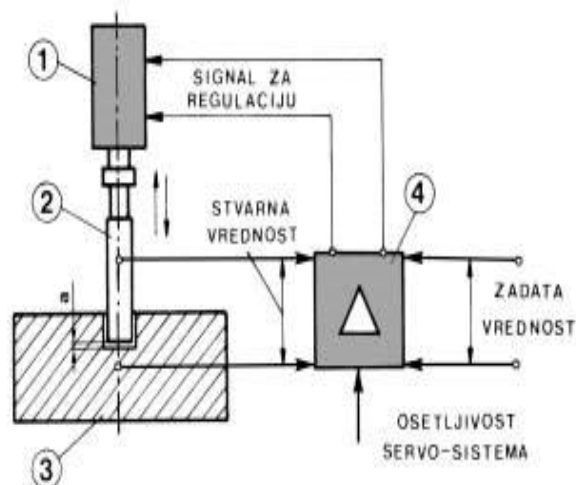
Погон клизача може да буде ручни, електрични (са или без аутоматског позиционирања) или нумеричко управљани (НУ). За померање клизача код савремених ЕДМ машина се примењује НУ управљање, чије функционисање је приказано на слици.



Слика 31. Шема функционисања NU-управљања[6]

Минимално померање клизача код једног оваквог система износи око $0,5 \mu\text{m}$, тако да је могуће постићи високу тачност позиционирања електроде у односу на обрадак. Од регулатора се захтева висока тачност подешавања, добра калибрисаност, велика осетљивост на сметње, шуме и кратке спојеве, велика крутост због деловања тежине електроде и изузетно оптерећујућег притиска диелектрикума.

Процес регулације се остварује аналогно упоређивањем стварне (измерене) и задате вредности регулишуће величине (напона односно струје). Увећава се разлика те две вредности, након тога појачава се да би се добио сигнал за регулацију који активира одговарајући механизам регулатора, на тај начин електрода се подиже или спушта у односу на претпостављени обрадак.



Слика 32. Шема регулације радног зазора између обратка и електроде[6]

Регулатори помака се деле на две групе:

- Слободни и
- Крути регулатори.

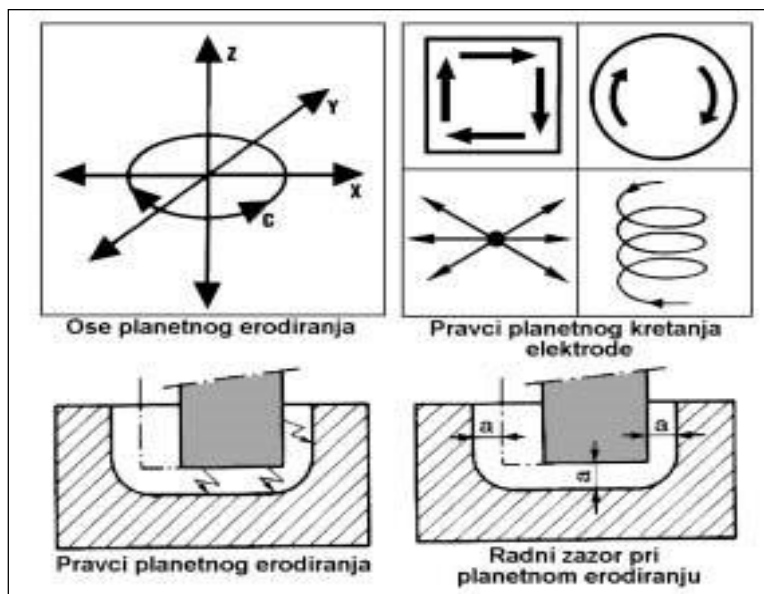
Слободни регулатори помака се препознају по томе што се кретање система према обратку остварује слободно, под дејством сопствене тежине електроде. Овде спадају: соленоидни, електро динамички и регулатор са зупчастом летвом.

Регулатори са крутим системом препознатљиви су по томе што је кретање електроде у оба смера (спуштање и подизање) у потпуности принудно. Веома су осетљиви и брзо реагују на промене, зато се користе тамо где је потребна висока тачност обраде. У ову групу спадају: регулатори са завојним вretenом, диференцијални и хидраулични регулатори.

Код модерних машина се најчешће примењују регулатори са завојним вretenом и хидраулични регулатори. Хидраулични регулатори помака су адекватни код примене електрода велике масе, која би могла износити и по неколико стотина килограма.

У почетку су се производеле само ЕДМ машине код којих се еродирање остварује само вертикално у једном, евентуално у оба смера (смер z-осе). Данас су се појавиле ЕДМ машине код којих се еродирање реализује у све три осе правоуглог координатног система (X,Y,Z).

Убачено је и аутоматско позиционирање радног стола и носача електроде у правцу ове четири осе и добиле се ЕДМ машине са планетним еродирањем, односно ЕДМ обрадни центри који имају уграђен магацин за електроде са системом за аутоматску измену. Код машина код којих се еродирање остварује само у правцу осе морају користити најмање две електроде (за грубу и фину обраду). Код машина са планетним кретањем то је могуће остварити само са једном електродом. Тако ће се уштедети трошкови израде електрода. У циљу рационализације програмирања рада на машинама за планетно еродирање, за основне геометријске облике површина разрађени су посебни пакети програма који утичу на кретање машине.



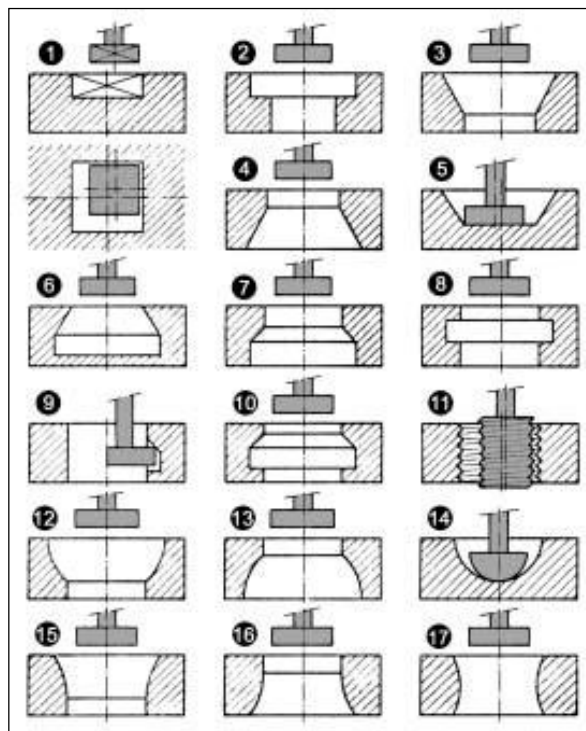
Слика 33. Шематски приказ рада машина са планетним еродирањем[6]

ЕДМ машине за сечење помоћу жичане електроде појавиле су се 1969. године и од тада су постале незаменљиве код израде делова сложенијих облика. На овим машинама се могу остварити цилиндрични резови, кад се доња и горња вођица жице поклапају са z осом. Овако се могу остварити отворени или затворени конуси са углом $\alpha = \pm 5^\circ$, па и већи. Ово је пресудно код израде алата за пробијање и просецање, јер су њима потребни овакви нагиби због умањења трења између жига и матрице.

Исецање контуре на ЕДМ машинама са жицом може бити:

- а) цилиндрично и
- б) конично

Код ЕДМ сечења са жицом постоји врло мали број параметара обраде који су променљиви и они се свode на врсту материјала обратка и његову дебљину. Подаци о томе налазе се меморисани у управљачкој јединици на самој машини при чему се аутоматски врши њихов избор и регулисање у процесу обраде. Тако код ових машина отпада потреба за израдом посебног технолошког поступка за дати случај обраде, јер је све већ аутоматизовано, слично се врши само програмирање кретања обратка у правцу X, Y, U, V и Z осе. Тачност ове обраде више не зависи од технолога, већ је последица тачности рада машине и програма.



Слика 34. Основни облици који се добијају еродирањем на машинама са планетним кретањем[6]

Програмира се на рачунару уз одговарајући софтвер који обично развија сваки произвођач опреме. За састављање програма потребан је само цртеж. Грешке се отклањају уз графичку контролу сваког програмског корака на монитору. Састављени програм се преноси на меморијску јединицу, да би се у датом тренутку учитао у управљачку јединицу на машини. Оператор на машини има могућност да изврши одређене корекције у програму: закрене контуре за одређени угао, преслика је у огледалу, смањи или повећа, изврши равномерно проширивање или сужавање програмиране контуре за одређену вредност, зада угао при коничном еродирању пре коришћења меморисаног програма. Машине за електроерозиону обраду се по својој намени граде као универзалне и специјалне.

Специјалне машине су намењене за серијску производњу истих или сличних делова. Обично су снабдеване посебним уређајима који омогућују ефикасно обављање дате операције, а углавном имају и аутоматски циклус обраде.

У циљу постизања што веће продуктивности и тачности електроерозионе обраде, иде се ка већој аутоматизацији управљања овим машинама. То се данас најефикасније постиже применом ЦНЦ управљања којим се, на основу релативно простог програмирања, остварује аутоматско:

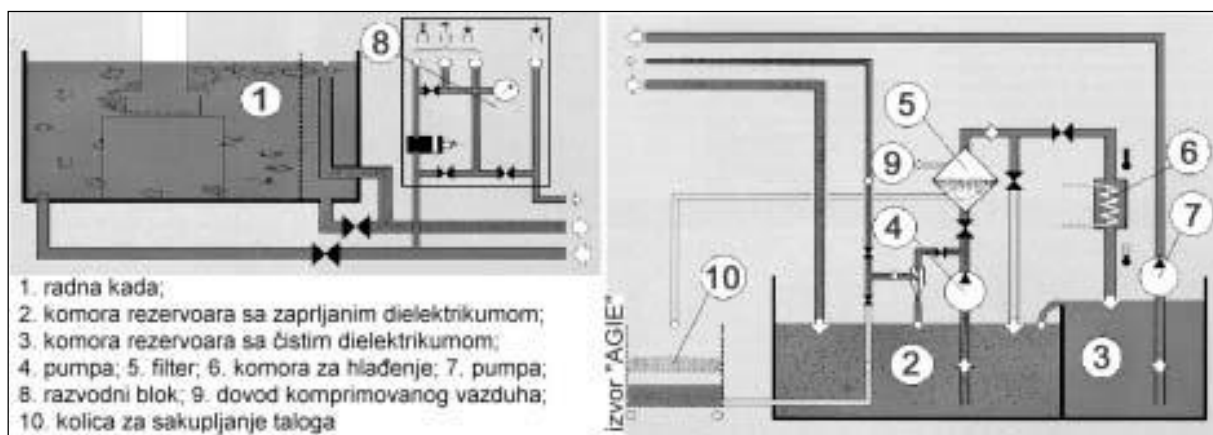
- позиционирање радног стола (правац X,Y осе),
- позиционирање стуба (правац Z осе),
- планетно кретање електроде (правац све четири осе),
- испирање радног простора,
- измена електроде и
- подешавање параметара електричних импулса којим се остварује оптимизација процеса, односно максимална производност, а минимално трошење електроде.

На тај начин се добија потпуно аутоматско електроерозионо постројење које ради без надзора свих 24 часа, за време празника или у дане викенда, што је изузетно економски исплативо.

4.2. Агрегат за пречишћавање и циркулацију диелектрикума

Агрегат за пречишћавање и циркулацију диелектрикума је временом постао кључна ствар у целокупном поступку. Најважнији захтеви који се постављају пред ово постројење су:

- Обезбеђење довољне количине диелектрикума,
- Пречишћавање задржаног диелектрикума,
- Обезбеђење циркулације пречишћеног диелектрикума у циљу брзог пуњења радне каде, испирање радног простора под притиском, усисавањем, или на неки други начин,
- Хлађење диелектрикума и
- Одстрањивање нанетог талога из филтерског уређаја.



Слика 35. Шема агрегата за пречишћавање и циркулацију диелектрикума са муљним филтером[6]

Најчешће се користе две врсте ових агрегата зависно од инсталисане снаге ЕДМ машине, и то:

- Агрегати са изменљивим филтерским улошцима, односно патронама који се користе код машина мањег капацитета (до 500 mm³/min, односно са генератором од 50 А) и агрегати са тзв. муљним филтером, који се користе код машина већег капацитета.
- Агрегати са изменљивим филтерским улошцима су знатно једноставнија, па и јефтинија постројења. Задржани диелектрикум се из радне каде доводи у

резервоар агрегата, одакле се пумпом преводи преко филтера па се пречишћен поново враћа у каду. Филтери се праве од специјалног папира који је испресавијан на цик-цак и тако се постиже површина филтрирања од око 18m^2 по улошку. Време трајања једног таквог улошка је око две недеље, после се исти замењује новим.

Агрегат са муљним филтером има резервоар са две коморе различитих запремина. У већу комору се доводи запрљани диелектрикум из радне каде. Одавде се пумпом преводи преко филтера, са посебним филтерским ћелијама и коморе за хлађење и као чист доводи у мању комору. Потом се пумпом поново пребацује у каду и разводни блок, одакле се, применом једног од три могућа начина, користи за испирање радног простора. Користи посебан кружни ток за филтрирање запрљаног диелектрикума. Код ове врсте агрегата се користи иновативни материјал, тзв. киселгур, који је крупнији од продуката електроерозије и може да уз себе веже ситне честице и да их задржи на филтерским ћелијама и тако се веома ситни продукти електроерозије при филтрирању лакше издвајају из диелектрикума. На тај начин се остварује филтрирање нечистоћа реда величине $1\text{-}10\mu\text{m}$. Додатни материјал се дозира у временским интервалима од 8-10 часова, а претходно се врши чишћење филтерских ћелија од нанетих нечистоћа и додатног материјала помоћу ваздуха под притиском од $5\div 6$ бара, који се доводи водом. При овом се муљ са заосталим диелектрикумом преноси посебним водом до колица оставља да се оцеди, а напослетку избацује напоље. Оцеђени диелектрикум се вакуум пумпом враћа у резервоар да би касније могао опет да се користи.

4.3. Системи за праћење и управљање процесом обраде

Да би се избегли кратки спојеви и електрични лук и остали поремећаји у процесу обраде, а самим тим и оштећења на алату и обратку, код савремених постројења за ЕДМ обраду примењују се системи за адаптивно регулисање параметара на машини. Егзистирају три различита система за праћење и регулисање процеса који базирају на:

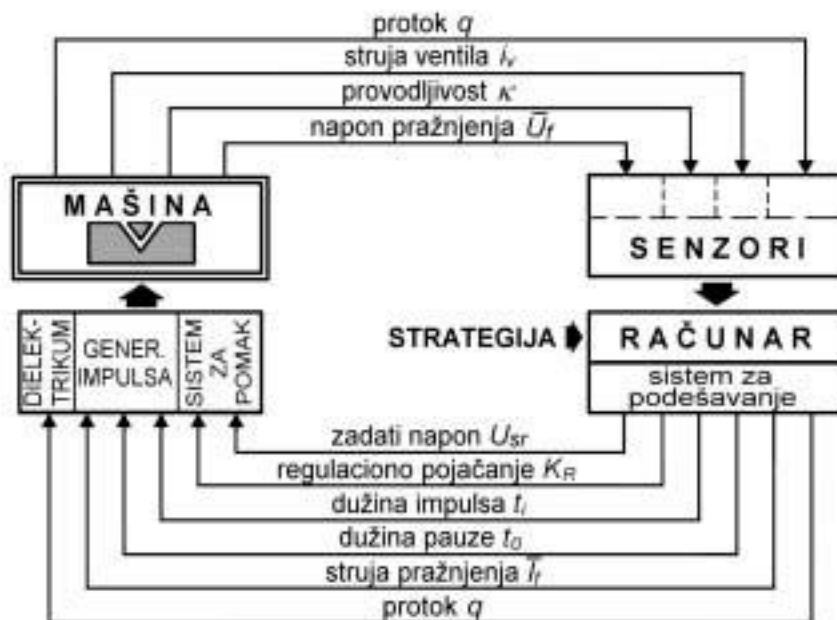
- регулисању дужине паузе,
- модулацији тока импулса и
- регулисању подешене вредности напона.

Прекратка или предуга јонизација радног зазора представља поуздан сигнал да су наступили поремећаји у одвијању текућег процеса, па се сходно томе продужавају или скраћују паузе између импулса. Регулисање дужине паузе остварује се на основу дужине јонизације код појединих импулса. Степен промене је могуће претходно одабрати.

Други систем праћења процеса, модулација тока праћења, остварује се тако што се стално прати и анализира последња серија електричних импулса. У случају да се појави опасност која би могла да угрози процес обраде, врши се искључивање наредних импулса.

Код трећег система се регулише вредност напона, тако што се прати број празних импулса, односно број празних импулса у односу на укупан број импулса. Кад вредност достигне најнижи ниво, то је сигнал да је радни зазор премали и да врло лако могу настати поремећаји у процесу обраде. Зато се подешена вредност напона између електроде и обратка повећава, на тај начин се повећава и радни зазор и тако се поново успоставља повољно стање процеса. Кад вредност достигне највиши ниво, подешена вредност напона се смањује и тај процес се непрекидно понавља. Ако се претходним

регулисањем задатог напона не могу отклонити поремећаји у процесу, код овог система регулације постоји и додатно подизање и спуштање електроде. Ово покретање електроде ствара хидрауличне таласе који интензивирају испирање радног простора, па се нагомилани продукти обраде лакше одстрањују из радног зазора, а они најчешће и доводе до поремећаја у производњи.



Слика 36. Шема модела за оптималну регулацију код ЕДМ машина са пуном електродом[4]

Даљи развој система граничне регулације довео је до развоја система за оптимизацију преко кога се регулише више параметара на машини, зависно од тока одвијања процеса обраде међузависности параметара се регулишу и задати су у оквиру стратегије оптимизације. Сензори прате актуелно стање одвијања процеса обраде и информације о томе се прослеђују процесном рачунару а он их обрађује сагласно са задатом стратегијом. Она узима у обзир различите циљне функције: минимално време обраде, минимално хабање електроде и остали. Систем за подешавање регулише одређене параметре агрегата за диелектрикум, генератора електричних импулса и система за помак, у случају поремећаја процеса.

Многе фирме су развиле овакве системе и већ их уграђују у своја постројења. Они омогућују добијање апсолутно константног радног зазора, максималну производност и минимално трошење електроде. Предност овог модела је у томе што ће се поремећаји процеса сигурно избећи а процес се одржава на оптималном нивоу захваљујући сталном праћењу рада машине.

5. Савремене ЦНЦ машине

5.1. Историјски осврт

Данас, машинска индустрија је незамислива без савремених ЦНЦ (*Computer Numerical Control*) машина. ЦНЦ машине имају скоро исте делове као и претходне, ручно контролисане машине. Битна разлика је додаток контролне (ЦНЦ) јединице и серво мотора на све осовине машине.

ЦНЦ машине су се развиле од НЦ машина (нумерички управљаних машина) где се информације нису чувале као целокупни програми у контроли машине, већ делимично учитавале са бушених трака. Време развоја ЦНЦ технологије почиње око средине 1970-их. То је омогућавало рационализацију у масовној и појединачној производњи, кроз значајно брже и врло прецизније кретање оса и алата.

ЦНЦ рачуна координате где која осовина треба да буде и контролише серво моторе који померају алат или обрађивани део. Генерално, већина произвођача ЦНЦ машина купују контролне јединице које стављају у своје машине. Једни од најпознатијих и најраспрострањенијих контролних јединица у свету су: Fanuc из Јапана, Siemens и Heidenhein из Немачке... Најпознатији произвођачи ЦНЦ машина су, опет, компаније из Немачке и Јапана.

У индустријској пракси примењују се следећи начини програмирања: ручно програмирање, полуаутоматско програмирање (погонско), аутоматизовано (компјутерско аутоматизовано) програмирање.

Скуп свих неопходних информација прикупљаних у једну датотеку, на основу којих машина извршава обраду дела назива се НЦ програм, ЦНЦ програм или потпрограм. Програм је детаљан скуп инструкција, команди (корак по корак) које се односе на дефинисање позиције резног алата у односу на радни сто машине на коме је фиксиран предмет обраде.

Одувек су идеја и креативност биле почетак сваког бизниса. Проблеми увек, како сви кажу, настају са реализацијом идеје. Са ЦНЦ технологијом дефинитивно ћете много лакше доћи од идеје до производа, али и ту постоји неколико корака. Од визије идеја мора доћи до графичког решења, дизајна производа. Када се дизајнерско решење конвертује у формат који је потребан, као што су CAD, CAM, онда се конвертује у машински језик или G-код који смо помињали, а он чини текстуални фајл који се састоји од скупа наредби за управљање машином. “Превод” или конвертовање графичког дизајна у језик машине је начин да се усмере њени покрети како би се добио производ по утврђеној спецификацији.

Идеја аутоматизације производње развијена је од стране индустријске револуције, мада је тада власницима производних погона људски рад био много исплативији него улагање у развој машина. По мишљењу многих стручњака, није само то био проблем већ да би се остварила идеја о оваквим машинама био је потребан и одређени технолошки ниво.

У данашње време машинска индустрија је скоро незамислива без савремених ЦНЦ машина. Област њихове примене је веома широка. Могу се користити за обраду дрвета, метала, пластике, камена, стакла, гравирање, израду алата, моделирање.

5.1.1.Разлика између НЦ и ЦНЦ машине

Већина НЦ машина користила је кодирану, бушену, папирну траку као преносиоца информација односно програма. Помоћу тих трака НЦ машине су биле способне да понове производњу једног дела онолико пута колико је било потребно.

НЦ машине су намењене за подизање мале производње на виши ниво. Њихове карактеристике су израђене кроз аутоматско управљање геометријским и технолошким информацијама, краће време обраде, висок ниво димензионалне и површинске тачности као и висок ниво економичности и флексибилности. Развој технологије нумеричког управљања је била најважнија технолошка активност током педесетих година деветнаестог века.

Основне разлике између ЦНЦ и НЦ машина су:

Погон машине - НЦ машине раде тако да један мотор чини погон и за главно вретено и остала померања радног стола, док ЦНЦ машине имају један (главни) мотор за погон главног вретена, а померање по осама остварују посебни истосмерни мотори. Код НЦ машина се руковање изводи ручно или машински преко ручица за управљање, док ЦНЦ машине имају управљачку јединицу (тастатура и екран) и раде аутоматски преко програма који је задат у компјутеру.

5.2. Програмирање

Нумеричко управљање је операција над алатном машином која произлази из низа кодираних инструкција које се састоје од бројева, слова абетеде и симбола као и јединица за контролу машина.

Те инструкције пишу се логичким редоследом у унапред договореном стандардизованом облику. Скуп свих инструкција потребних да би се превела одређена обрада, назива се ЦНЦ програм.

Ручно програмирање подразумева исписивање програма од стране технолога ручно, тј. пише се свака реченица, део програма, према дефинисаној технологији. Аутоматизовано програмирање (помоћу рачунара) подразумева аутоматизовано програмирање одређених секвенци програма, аутоматизовано применом специјализованих софтвера на компјутеру. Технолог програмер дефинише параметре као што су димензије, путање алата, избор алата, режима обраде итд. Специјализовани софтвери који се користе за програмирање су: CATIA, MASTERCAM, SOLIDCAM и други.

Помоћу неког одговарајућег ЦНЦ програма, модел који желимо да израдимо се преводи у машински језик разумљив машини. Тај језик или Г-код уствари генерише координате сваке тачке преко које нож алата треба да пређе.

5.3. Имплементација

Обуке по многим произвођачима нису компликоване, а и сами произвођачи или њихови дистрибутери уз купљену машину обезбеђују обуку за руковање. Али као и у свакој производњи, постоје једноставне и комплексне машине, па од тога зависи и руковање њима. За комплексније машине се ангажују стручњаци који држе часове обуке на раду са одређеном машином у производњи и упознају запослене са свим функцијама софтвера.

5. 4. Представници

1. ЦНЦ машина са жицом:

Agie Charmilles cut 300 mS [8]



Карактеристике ове машине:

Кретање оса:

- X:550
- Y:350
- Z:400

Димензије машине: 2600x2640x2340 mm

Тежина: 3300 kg

Jiangsu Chuangwei CNC Machine Tool- DK7732C [11]



Димензије машине: 1600x1320x1840 mm

Тип машине: ЕДМ са жицом

Максимална дебљина равног реза: 280-300 mm

Прецизност машине: 0,012 mm

Бука коју машина производи: ≤ 70 db

Jiangsu Chuangwei CNC Machine Tool- DK7763ZT [12]



Димензије машине: 2520x2180x2265 mm
Тип машине: ЕДМ са жицом
Димензије радног стола: 1300x800 mm
Дебљина комада: 350 mm
Максимална тежина радног комада: 2000 kg
Прецизност: ≤ 0.012 mm
Резервоар за воду: 90 l
Тежина машине: 3800 kg

Изглед контролне табле, намењене за управљање ЕДМ машине са жицом.



Слика 37. Контролна табла

- Пречник обраде отвора $\varnothing 0,3$ - $\varnothing 3$ mm. Однос дубине и пречника отвора: 300:1.
- Брзина обраде: 20-60 mm/min.
- Може директно да продре са нагиба или било које површине облика.
- Осовине X и Y опремљене су дигиталним системом приказа са резолуцијом 0,005 mm.
- Машина има прозор за посматрање пумпе за воду како би било лакше посматрати и подешавати притисак пумпе.
- Машина се такође може користити за померање бургија и славина које су у радном комаду разбијене без оштећења оригиналне рупе или нити.

Предности ових машина су:

- Машина може да еродира метал да би се добила перфорација високим температуром генерисаним електродама и металним електричним пражњењем.
- Подизање вретена прихвата степ мотор како би се постигла стабилна обрада ситним електродама.
- И подизање вретена и секдонално подизање прихватају линеарне вођице, које могу боље осигурати тачност обраде.
- Може да обрађује нерђајући челик, очврсли челик, тврду легуру, бакар, алуминијум и други проводљиви материјал.

Поред машина за електроерозиону обраду са жицом, користе се и машине са електродом.

ЦНЦ машина са електродом:

- Троосна Agie Charmilles FORM 30 [9]



Карактеристике ове машине:

Радни простор: 800x600 mm,

Кретање оса:

- X:600
- Y:400
- Z:400

Димензије машине: 1000x700x400 mm.

Тежина: 3000 kg

Диелектрик: 700 l

-Петоосна Agie Agietron Advance 4 [10]



Карактеристике ове машине:

Кретање оса:

- X:700
- Y:500
- Z:400

Димензије машине: 1100x750x370 mm

Тежина: 2000 kg

Agie 30 је опремљена једним од најсавременијих генератора на свету за настајање ЕДМ-а.

Интегрисани су генератори интелигенције за побољшање квалитета и уштеде трошкова. ЕДМ процес се континуирано оптимизује са сваким импулсом, драстично смањујући електроду.

Контрола процеса траје делић секунде и ствара изузетно хомогену површинску обраду.

Генератор велике снаге има максимални излаз од 80 А.

Ормар је опремљен затвореним кругом хлађења воде и ваздуха који контролише расхладна јединица унутар система. Да обезбеди најдужи век и поузданост електронике, они се налазе у кућишту отпорном на прашину у коме је температура надгледана и стабилована.

6.Закључци

Примена електроерозионе обраде је данас широко заступљена и економски оправдан поступак за извођење различитих операција, не само при обради тешкообрадљивих материјала, већ и при обради делова и површина сложеног геометријског облика од иначе добро обрадљивих материјала. Због тога, поступак електроерозионе обраде пружа велике могућности примене у машиноградњи и данас се најчешће користи при изради: калупа за ковање и пресовање (израда и поправка истрошених или оштећених), кокила за ливење под притиском, алата за пробијање и просецање, делова са уским прорезима, делова са малим и дубоким отворима, делова са сложеним површинама. Данас је у индустријама немогуће замислити производњу одређених делова без примене електроерозионих обрада, било да је то еродирање жицом или бакарном електродом. Компликовани браварски поступци израде алата за пробијање и просецање, као и отвора са оштрим ивицама и сложеним контурама, замењени су најпре поступцима обраде провлачењем, а затим електроерозионом обрадом. Скупи алати за провлачење који се наменски праве за неки облик, поскупљују процес израде, док код електроерозионе обраде то није случај.

7. Литература

- [1] GF Machining Solution, https://www.gfms.com/country_US/en/about-gf-machining-solutions/profile/history-/1954-1957.html, приступљено 13.09.2019.
- [2] Електроерозиона обрада EDM, https://dlscrib.com/download/edm-elektroerozivna-obrada_5900b338dc0d60ed50959e99_doc, приступљено 14.09.2019.
- [3] Јасмина Скерлић, EDM обрада и ковачки алати, дипломски рад, Машински факултет у Крагујевцу
- [4] Драгоје Миликић, Неконвенционални поступци обраде, Факултет техничких наука у Новом Саду, 2002. година,
- [5] Wikipedia, интернет адреса: <https://sh.wikipedia.org/wiki/Kovanica>, приступљено 14.09.2019.
- [6] Миодраг Лазић, Неконвенционални поступци обраде, Машински факултет у Крагујевцу, 1992. година,
- [7] Wikipedia, интернет адреса: <https://sr.wikipedia.org/wiki/Ekstruzija>, приступљено 22.09.2019.
- [8] Agie Charmilles, интернет адреса: <https://www.exapro.com/agie-charmilles-cut-300ms-wire-cutting-edm-machine-p70831002/>, приступљено 07.10.2019.
- [9] Agie Charmilles, интернет адреса: http://techma.de/index.php?article_id=44&clang=1&senkerodieren=9, приступљено 07.10.2019.
- [10] Agie Agietron, интернет адреса: <http://www.mke.co.at/en/company/list-of-machines//produkt/54/cavity-sinking-edm-machine-agie-agietron-advance-4.html>, приступљено 07.10.2019.
- [11] Jiangsu Chuangwei CNC Machine Tool- DK7732C, интернет адреса: <https://www.bmedm.com/high-performance1/736.html>
- [12] Jiangsu Chuangwei CNC Machine Tool- DK7763ZT, интернет адреса: <https://topscnc.en.made-in-china.com/product/yseQEFWjEGcY/China-CNC-Medium-Speed-Wire-Cut-EDM-Machine.html>