

**Факултет инжењерских наука Универзитета у
Крагујевцу**

Мирослав М. Мирковић
EDM ОБРАДА И КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ
дипломски рад

Крагујевац, 2018.

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Дипломске академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Неконвенционални поступци обраде

Број индекса: 254/87

Мирослав М. Мирковић
EDM ОБРАДА И КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ
Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Недић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
Катедра за: ПРОИЗВОДНИО МАШИНСТВО
Предмет: Неконвенционални поступци обраде

ДИПЛОМСКИ РАД

Са темом:

EDM ОБРАДА И КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ

У оквиру дипломског рада кандидат треба да систематизује податке везане за електроерозиону (EDM) обраду. Потребно је описати суштину процеса EDM обраде, машине, алате, операције обраде са пуном електродом. У посебном поглављу кандидат треба да систематизује податке у утицајним параметрима на квалитет обраде. Дипломски рад треба да садржи следеће целине:

1. Увод,
2. Анализа EDM обраде,
3. Квалитет EDM обраде,
4. Закључак и
5. Литература.

Крагујевац, август, 2018. год.

ПРЕДМЕТНИ НАСТАВНИК
Проф. др Богдан Недић

Резиме:

У оквиру рада је описан процес електроерозионе обраде, извршена је систематизација и анализа података везаних за електроерозиону обраду. Описан је развој овог поступка обраде, објашњен принцип, односно суштина електроерозионе обраде, описана инсталација за електроерозиону обраду са освртом на основне компоненте, затим су описане операције и примена електроерозионе обраде пуном електродом. У другом делу рада су систематизовани подаци у утицајним параметрима на квалитет електроерозионе обраде. Утицај појединих параметара електроерозионе обраде на производност, тачност и квалитет обраде и избор параметара режима обраде. На крају рада је дат опис машине за електроерозиону обраду Hurco 425E.

Кључне речи: Неконвенционални поступци обраде, квалитет електроерозионе обраде, диелектрикум.

Abstract:

In the paper describes the process of Electro Discharge Machining, is carried systematization and analysis of data related to the electroerosion processing. It is described the development of this processing method, explained principle, the essence or the electroerosion processing described electroerosion processing installation with special attention to the basic components described are operations and application processing sinker EDM. In the second part of the systematized data in the influential parameters on the quality of electroerosion treatment. The influence of certain parameters Electro Discharge Machining treatment on productivity, accuracy and quality is the processing and selection of the parameters of the machining parameters. At the end of the paper gives a description of machines for processing Electro Discharge Machining Hurco 425E.

Key words: Unconventional methods of processing, quality Electro Discharge Machining treatment, dielectrics.

САДРЖАЈ

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	1
2. АНАЛИЗА ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНЕ ОБРАДЕ	6
2.1 ОСНОВЕ ПРОЦЕСА ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНЕ ОБРАДЕ	6
2.2 ПРИНЦИПИ EDM ОБРАДЕ.....	7
2.3 СУШТИНА ПРОЦЕСА ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНЕ ОБРАДЕ	9
2.4 ИНСТАЛАЦИЈЕ ЗА EDM ОБРАДУ ПУНИМ ЕЛЕКТРОДАМА.....	13
2.4.1 Алатна машина.....	13
2.4.2 Генератор електричних импулса	17
2.4.3 Агрегат за пречишћавање и циркулацију диелектрикума.....	19
2.4.4 Управљачка јединица – системи за праћење и управљање процесом обраде	21
2.5 ЕЛЕКТРОДЕ ЗА ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНУ ОБРАДУ	23
2.5.1 Материјал електрода за електроерозиону обраду.....	23
2.6 ДИЕЛЕКТРИКУМ.....	23
2.7 ПРОИЗВОДНЕ ОПЕРАЦИЈЕ EDM ОБРАДЕ.....	24
2.7.1 Просецање електроерозијом	27
2.7.2 Сечење електроерозијом.....	27
3. КВАЛИТЕТ EDM ОБРАДЕ	30
3.1 УТИЦАЈ ПОЈЕДИНИХ ПАРАМЕТАРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА КВАЛИТЕТ.....	30
3.1.1 Параметри процеса EDM обраде.....	30
3.2 ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЕЛЕКТРИЧНОГ ИМПУЛСА	30
3.3 ОСТАЛИ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНЕ ОБРАДЕ.....	32
3.4 ПРОИЗВОДНОСТ КАО ТЕХНО-ЕКОНОМСКИ ПОКАЗАТЕЉ EDM ОБРАДЕ	33
3.4.1 Утицај материјала предмета обраде на производност.....	33
3.4.2 Утицај параметара електричног импулса на производност.....	35

3.4.3 Утицај диелектрикума на производност	39
3.4.4 Утицај испирања радног простора на производност	41
3.4.5 Утицај алата и материјала алата на производност	42
3.4.6 Поступци повећања производности EDM обраде	44
3.5 ТАЧНОСТ ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНЕ ОБРАДЕ	45
3.6 КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ.....	50
3.7 ИЗБОР ПАРАМЕТАРА РЕЖИМА ОБРАДЕ	58
3.8 ПРИМЕР МАШИНЕ ЗА EDM ОБРАДУ ПУНОМ ЕЛЕКТРОДОМ	60
4. ЗАКЉУЧАК.....	64
5. ЛИТЕРАТУРА.....	67

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Убрзани развој различитих врста техника (авионска, ракетна, нуклеарна, електронска, рачунарска итд.) од 1930. године а нарочито за време и после другог светског рата је условио развој, производњу и примену различитих врста материјала са бољим механичким и триболошким карактеристикама од претоних. Нови материјали су имали већу затезну тврдоћу и чврстоћу, велику отпорност на високим и ниским температурама, већу отпорност на хабање (високо-отпорне легуре, тврди метали, материјали на бази волфрама, композитни материјали, вештачки дијаманти...) итд.

Обрада и резање нових материјала класичним поступцима обраде је отежано, а неким случајевима је немогуће и неекономично (због мале брзине резања, дугог времена обраде и великог хабања алата). При обради метала резањем, материјал алата мора да има боље механичке особине од материјала предмета обраде, на температури резања. То је подстакло развој квалитетнијих алата конвенционалних поступака обраде као и низа нових поступака обраде (неконвенционални поступци обраде, слика 1.1), код којих се уклањање вишка материјала, измена облика, димензија и структуре материјала остварује коришћењем електричне, светлосне, магнетне, хемијске и других видова енергије, која се доводи у зону обраде.

Неконвенционални поступци обраде се могу поделити: према врсти енергије коју користе, основним механизмима уклањања вишка материјала, врсти радног (преносног) медијума (слика 1.2), типу извора енергије и низу других мање или више релевантних карактеристика процеса обраде (табела 1.1).

Место и значај неконвенционалних поступака обраде у савременој техници и технологији произилази као резултат утицаја низа фактора, а пре свих:

- Фактора који су везани за повећање брзине, оптерећења и температуре рада одговорних елемената машина и уређаја, повећање поузданости рада и века трајања,
- Фактора везаних за знатно ширу примену обраде деформисањем, тачног и прецизног ливења, а посебно веће примене пластичних маса и производа израђених од пластичних маса првенствено поступцима пресовања (израда ковачких пресерских и других алата),
- Фактори који су везани за потребу израде отвора, канала и профилисаних прореза веома малих димензија, посебно на релативно неприступачним местима.

Појава неконвенционалних поступака обраде обезбеђује знатно шире могућности конструктивног обликовања елемената машина и механизма, како са гледишта избора материјала, тако и конструкције елемената и машина у целини.

Истраживања вештачких пражњења је повезана са развојем извора електричне енергије. Прве варнице и импулсни лукови су произведени (лајденском боцом) кондезатором произведеним у Немачкој и Холандији 1745. године. Касније повезивањем неколико Лајденских боца паралелно, створена батерија. Joseph Priestley енглески научник године 1770. први уочио појаву ерозионог разарања метала при дејству електричне струје. На месту раздвајања електричног кола долази до појаве електричне варнице (искре) или електричног лука. И варница и лук изазивају разарање

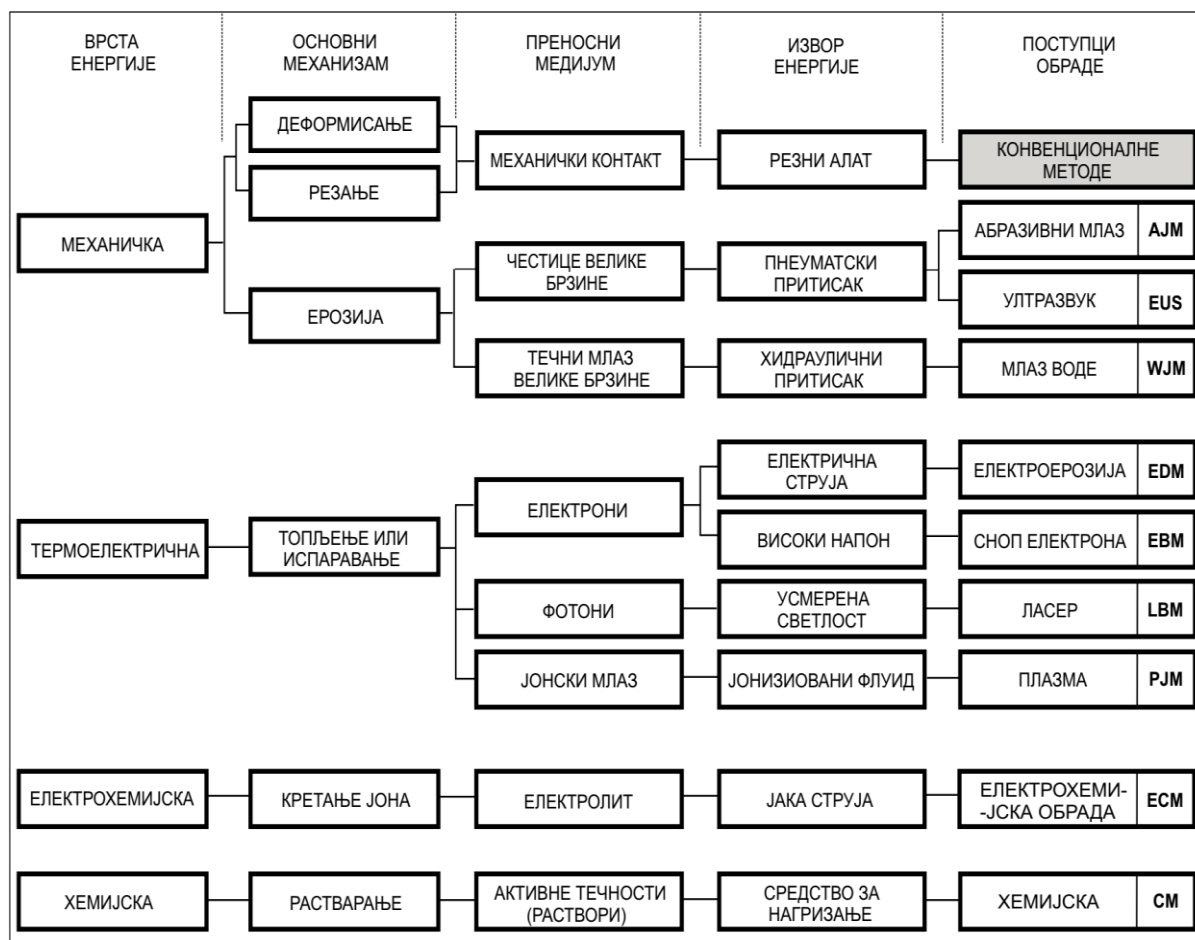
метала у зони прекида електричног кола, настанак ерозионог кратера на површини електрода. Priestley је истраживао и утицај материјала електрода и карактеристика струја пражњења на величину кратера (импулсна и осцилујућа пражњења) (слика 1.3).



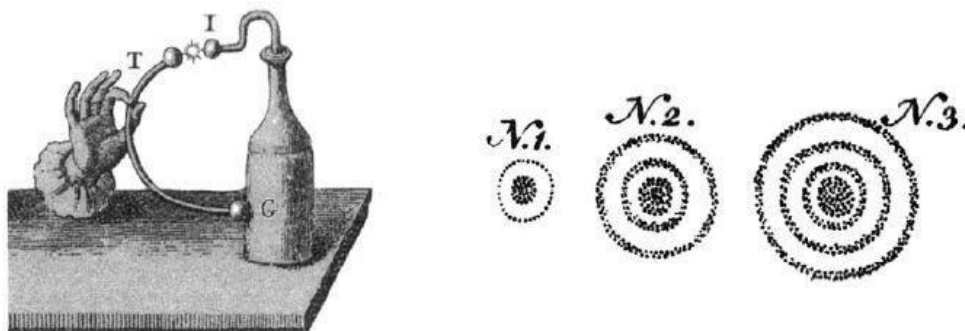
Слика 1.1 Подела неконвенционалних поступака обраде [1]

Табела 1.1 Основне карактеристике појединих метода обраде [13]

Метод обраде	Радни процес	Енергија у зони обраде	Толеранција мере mm	Храпавост μm	Специфична производност mm^3/min	Специфични рад Wh/mm^3
Стругање	Еластично-пластична деформација	Механичка	0,05	6,5 - 0,4	100000	0,001
Ултразвучна обрада EUS	Ударно дејство абразива и крто резање	Механичка		1 - 0,2		
Електроерозиона обрада EDM	Ерозија	Топлотна	0,08 – 0,02	80 – 0,3	5 - 2000	0,02 – 1,2
Електрохемијска обрада ECM	Анодни раствор	Топлотна	0,05	0,8 – 0,4	10000 - 20000	0,12
Обрада ласером LBM	Светлосна ерозија	Топлотна	0,02	2 – 0,2	0,01	700

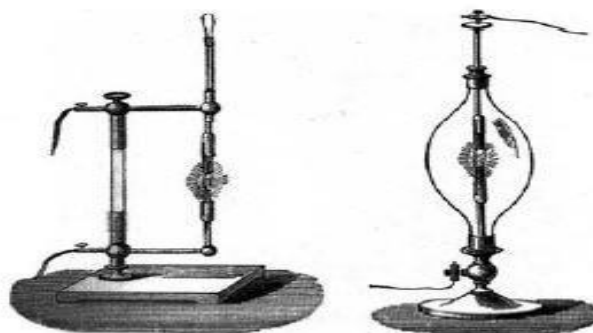


Слика 1.2 Класификација неконвенционалних поступака према основним карактеристикама [1]



Слика 1.3 Priestley-јев експеримент [6]

Alessandro Volta 1799. године проналази батерију са више ћелија, којом је било могуће створити континуирано пражњење. Василиј Петров 1802 године ствара први континуирани електрични лук, у раду који је дуго био занемарен и непознат. Тако да се дуго сматрало да је Humphry Davy први произвео континуирани електрични лук. 1808. године Humphry Davy користећи батерију високе волтаже и две хоризонтално постављене графитне електроде које је поставио на одређено растојање ствара и стабилно електрично пражњење. Швајцарски научник Auguste-Arthur de la Rive 1820. године успева да створи пражњење у вакуму, Из стаклене посуде извлачи ваздух затим у њу убацује две електроде (слика 1.4) и тако ствара светиљку на бази електричног пражњења.



Слика 1.4 Светиљка на принципу електричног пражњења [6]

Auguste de Meritens 1881. у Француској користи топлоту створену електричним луком за спајање оловних плоча, проналази принцип заваривања електричним луком.

Историја EDM обраде почиње 1943. године проналаском овог принципа од стране совјетских научника Бориса и Наталије Лазаренко. Током истраживања хабања волфрамових електричних контаката у циљу отклањања негативног дејства ерозионог ефекта на местима електричних контаката, при одржавању мотора аутомобила, у току другог светског рата. Они су експериментисали са постављањем електрода у нафту, где су добили стабилније искре електричног пражњења него у ваздуху. И тако су дошли на идеју да искористе контролисано искрење као метод ерозије за еродирање тврдих метала на бази волфрама. Тако су развили поступак електроерозионе обраде метала (Electric Discharge Machining - EDM) за обраду тврдих метала у војној индустрији. Године 1943. они су приказали поступак обраде под називом електроварнична ерозија (Лазаренко круг).

У педесетим годинама Швајцарска индустрија проиводи прве EDM машине, касније и Јапан, и остају лидери у тој области до данас.

У 1960-им развој полупроводничке индустрије подстиче значајна побољшања на EDM машинама. Маchine су постале поузданије, а произведене површине контролисаног квалитета, док су машине за резање жицом и даље биле на самом почетку. Са увођењем нумеричке контроле позиције крајем 1960-их и почетком 1970-их, кретање електрода постало је много прецизније. Ово велико побољшање померило је напредак у раду машина за резање жице. Компјутерски нумерички контролисани системи (CNC) додатно су побољшали перформансе EDM-а средином 1970-их. Током наредних деценија, главни су напори у дизајну генератора, аутоматизацији процеса, серво-контроли и роботизици (слика 1.5).

Апликације у микро-машинству постале су интересантне током 1980-их. Такође је током тог периода светско тржиште EDM-а почео да се убрзано повећава. Нове методе за контролу ЕДМ процеса настале су током деведесетих година.

У овом дипломском раду описана је суштина електроерозионог процеса обраде, машине, алати, операције као и систематизација података у утицајним параметрима на квалитет електроерозионе обраде пуном електродом.

У првом поглављу дата су уводна разматрања са општим објашњењима и поделом неконвенционалних поступака обраде, као и историјски развој електроерозионе обраде.



Слика 1.5 Развој машина за електроерозиону обраду

Другим поглављем је објашњен процес електроерозионе обраде. Дата је основна подела на електролучну и електроискричну ерозију (која се најчешће користи), и објашњења процеса. Такође је у овом поглављу детаљно разрађена суштина процеса, односно начин на који се одвија обрада материјала. Дат је приказ EDM инсталације, алатне машине и њихове структуре као и начина функционисања. Описани су: генератор електричних импулса, алатна машина, агрегат за диелектрикум, управљачка јединица, електроде и диелектрикум. На крају поглавља су наведене производне операције и примена EDM обраде.

У трећем поглављу анализа квалитета процеса електроерозионе обраде (производност обраде, тачност и квалитет обрађене површине), наведени су фактори процеса обраде, карактеристике електричних импулса који се користе у процесу електроерозионе обраде, фактори утицајни на квалитет, и грешке при обради. Описани су фактори који утичу на квалитет и тачност обраде, а на крају поглавља избор параметара режима обраде на ерозимату и приказ машине за електроерозиону обраду HURCO 425E.

На крају, дат је закључак и списак коришћене литературе за израду рада.

2. АНАЛИЗА ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНЕ ОБРАДЕ

2.1 ОСНОВЕ ПРОЦЕСА ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНЕ ОБРАДЕ

Уклањање материјала се заснива на ефекту ерозије коју изазивају електричне варнице које се појављују између две електроде. Неколико теорија је покушало да се објасни комплексни феномен "ерозионе искре":

1. Електро-механичка теорија
2. Термо-механичка теорија
3. Термо-електрична теорија

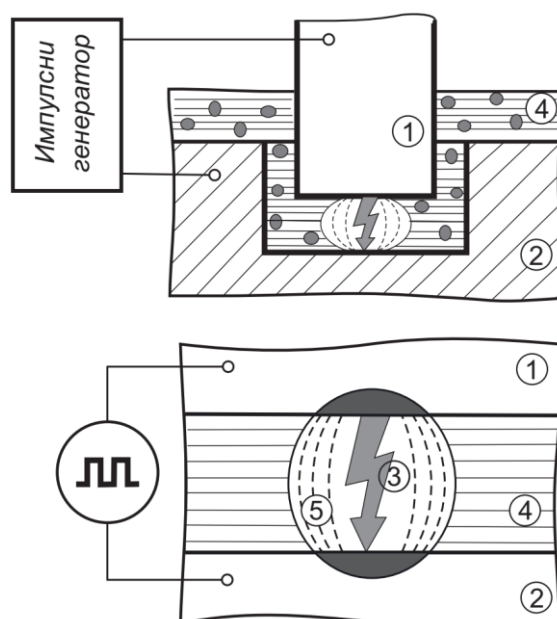
Електро-механичка теорија указује на то да се абразија честица материјала одвија као резултат концентрисаног електричног поља. Електрично поље раздваја честице материјала радног комада јер превазилази силе кохезије у решетки материјала. Ова теорија занемарује било какве термичке ефекте. Експериментални докази немају подршку за ову теорију.

Термо-механичка теорија указује на то да се уклањање материјала при EDM обради приписује таложењу материјала узрокованих "пламенским млазницама". Ти такозвани пламени млазови настају као резултат различитих електричних ефеката пражњења. Међутим, ни ова теорија се не слаже са експерименталним подацима и не даје разумно објашњење ефекта ерозије искре.

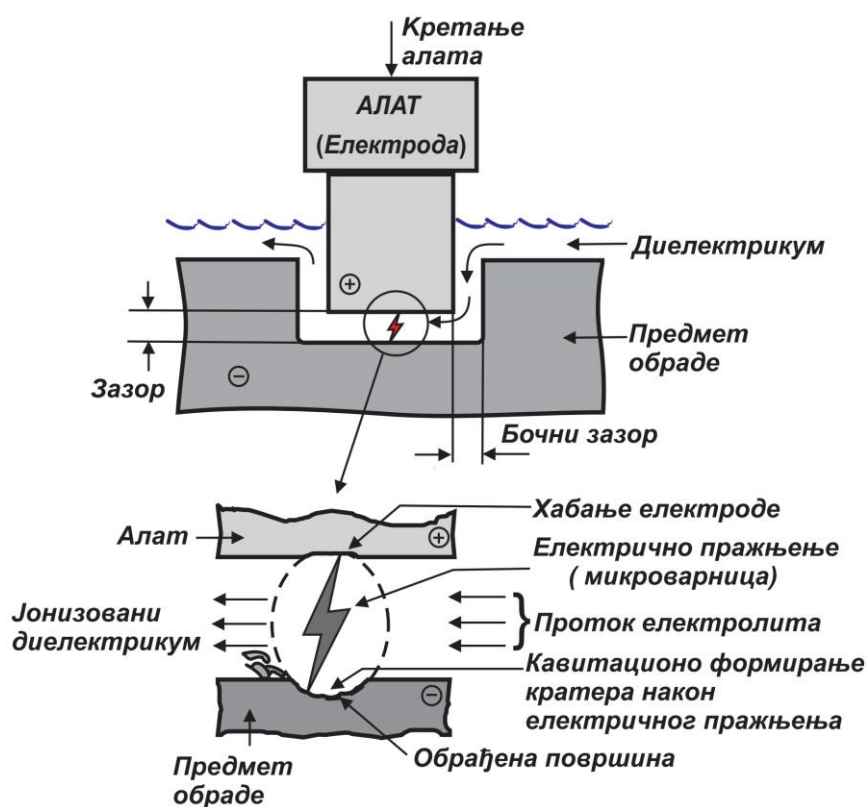
Термо-електрична теорија, која се најбоље подудара са експерименталним доказима, сугерише да уклањање метала при EDM обради одвија се као резултат стварања екстремно високе температуре генерисане високим интензитетом струје пражњења. Иако је добро подржана, ова теорија се не може сматрати дефинитивном и потпуном због тешкоћа у тумачењу.

Поступци електроерозионе обраде (Electric Discharge Machining - EDM) су поступци обраде код којих се уклањање вишка материјала остварује серијом електричних пражњења периодичног карактера, насталих између алата (катоде) и предмета обраде (аноде). Обрадак и алат налазе у кади са диелектрикумом (слика 2.1 и 2.2), тако да диелектрикум испуњава зазор између алата (1) и предмета обраде (2) који су повезани на извор једносмерне струје. Доводе се у радни положај на растојање (0,005-0,5)mm. То доводи до јонизације радне течности (4), формирања стуба пражњења (јонизујућег стуба 5), појаве искре (3), топљења и испаравања честица материјала предмета обраде (настаје експлозивно избацивање материјала из површине предмета обраде), под дејством електричне струје велике густине, која протиче кроз стуб у кратком времену од неколико μs .

Прекидом пражњења, односно прекидом струјног кола пуца јонизујући стуб, а растопљени материјал се хлади и односи из зоне обраде диелектрикумом који циркулише. Овим се у подручју канала за пражњење настаје мало удубљење—кратер. Наизменично импулсно пражњење обезбеђује разарање материјала, продирање алата и формирање профила који одговара профилу алата.



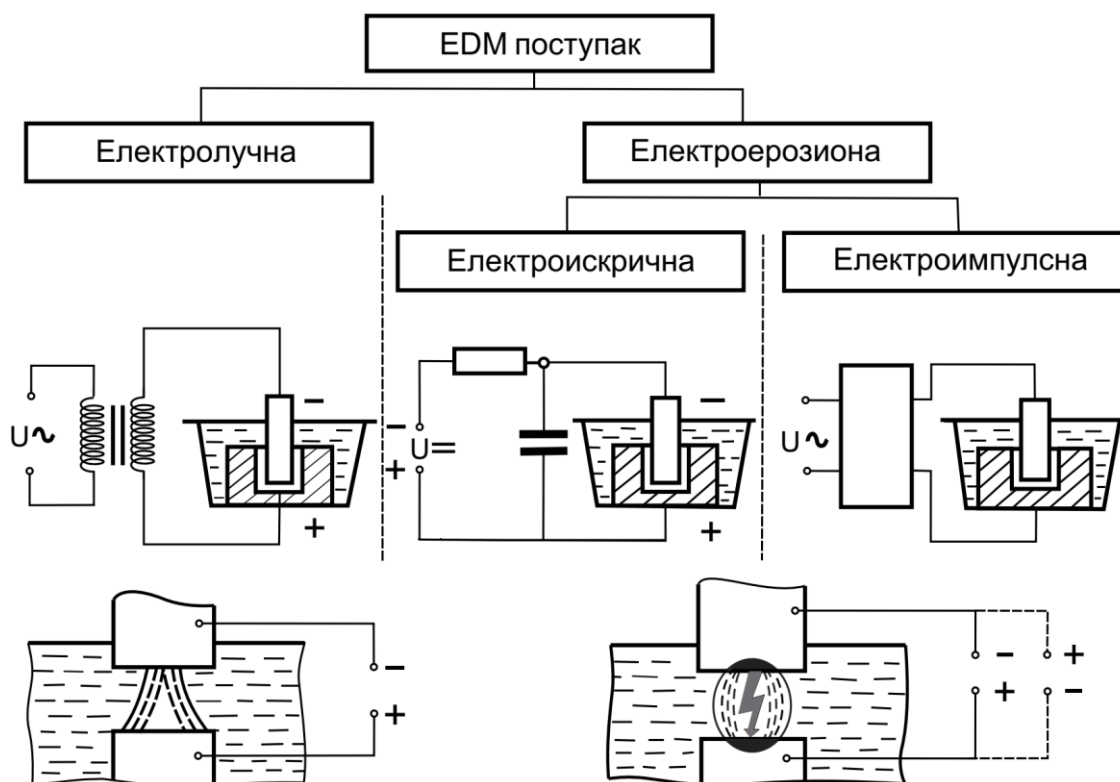
Слика 2.1 Шема процеса електроерозионе обраде [3]



Слика 2.2 Принципи обраде електроерозионим поступком [3]

2.2 ПРИНЦИПИ EDM ОБРАДЕ

Према начину и принципима као и средини у којој се одвија пражњење, начину формирања електричног пражњења и времену трајања импулса разликују се и поступци електроерозионе обраде (Слика 2.3).



Слика 2.3 Поступци електроерозионе обраде [1]

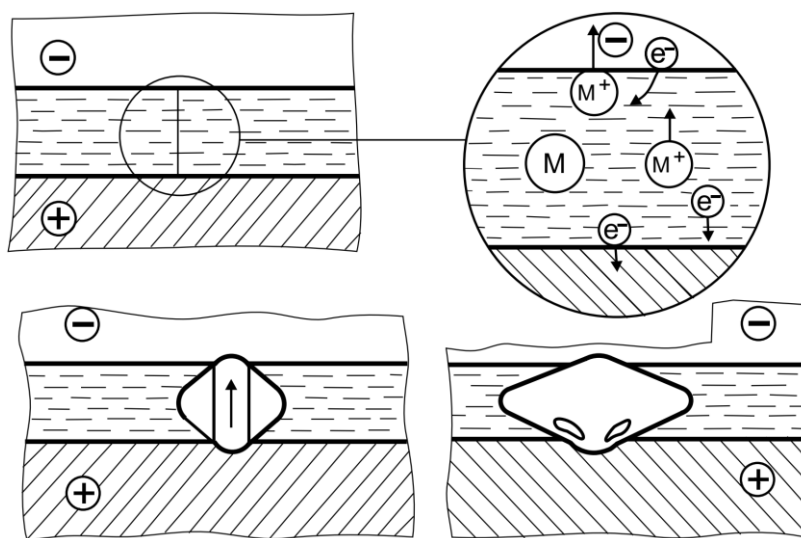
Електролучну ерозију карактерише то, да се процес скидања материјала са предмета обраде остварује периодичним стационарним електричним пражњењима у атмосфери. Пражњење се остварује помоћу електричног лука. Успостављање електричног лука се остварује механичким додиривањем електроде-алата са предметом обраде и њеним наглим одмицањем. Успостављање али и гашење електричног лука (одакле и потиче назив електролучна ерозија) се остварује механичким осциловањем алата врло високом брзином која се креће од 30 до 80 m/s, док је напон извора испод 20 V и има константан ниво. Процес ерозије се остварује тако што се растопљени метал, настао као последица деловања електричног лука, нагло охлади водом која циркулише кроз электроду, чиме долази до његовог одношења са површине предмета обраде деловањем динамичких сила. Овај вид ерозије, у пракси се ретко користи, јер се у процесу обраде формира јонизујући стуб проширен према аноди, чиме се смањује тачност обраде, тако да овај поступак нема већи значај за индустријску праксу. Зато се електроерозионим поступцима сматрају поступци електроискричне и електроимпулсне обраде.

Код **електроискричне ерозије** уклањање вишка материјала са површине предмета обраде је резултат серије периодичних нестационарних и квазистационарних пражњења у диелектрикуму. Дејством електричне искре долази до топљења и испаравања материјала, који се при прекиду пражњења нагло хлади. То доводи до испаравања материјала у виду експлозије, избацивања течног материјала и његовог кондензовања у диелектрикуму, уз појаву одговарајућег кратера на аноди. Електроискричну ерозију карактерише веома кратко време трајања импулса (до 1 μ s) и велики однос периода и времена трајања импулса ($1/\tau > 10$). Пражњење обично обухвата површину 0,05-1 mm², на дубини 0,005-0,5 mm. Изводи се електричном струјом која у стубу пражњења достиже густину и до 10000 A/mm, док се делови електрода загревају до температуре 8000-10000°C [1].

Електроимпулсна обрада се разликује од електроискричне перидом и временом трајања импулса ($100-1000 \mu s$, $1/\tau=1-10$). Електрични једнополарни импулси (на пример 400 Hz) се добијају преко независног генератора. У овом случају алат је анода а предмет обраде је катода. Карактерише се већом брзином уклањања материјала, мањом потрошњом ел. енергије, дужим веком трајања алата али и мањом производношћу при завршним обрадама, па се зато најчешће користи за грубу обраду. У пракси се као предходна користи електроимпулсна а завршна електроискрична.

2.3 СУШТИНА ПРОЦЕСА ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНЕ ОБРАДЕ

Електроерозиона обрада се изводи са две електроде које су потопљене у радну течност-диелектрикум високе електричне отпорности.



Слика 2.4 Зона пражњења и гасни мехур при електроерозианој обради [1]

Предмет обраде и алат у почетном радном положају се међусобно не додирују. Између њих је зазор који је испуњен диелектрикумом. Обрада се обавља у затвореној посуди (кади). Предмет обраде и алат су кабловима прикључени на извор једносмерне струје. На једном од тих проводника налази се прекидач. Ако је прекидач затворен, између алата и предмета обраде се јавља електрични напон. У почетку не тече електрична струја, пошто су предмет обраде и алат изоловани диелектрикумом и налазе се на већем растојању. Уколико се, растојање између њих постепено смањује, онда ће при неком малом растојању $0,005-0,5 \text{ mm}$ доћи до пробоја електричне струје кроз диелектрикум и појаве искре (слика 2.4). Ово растојање се назива критично растојање и зависно, је од услова који се остварују приликом процеса обраде.

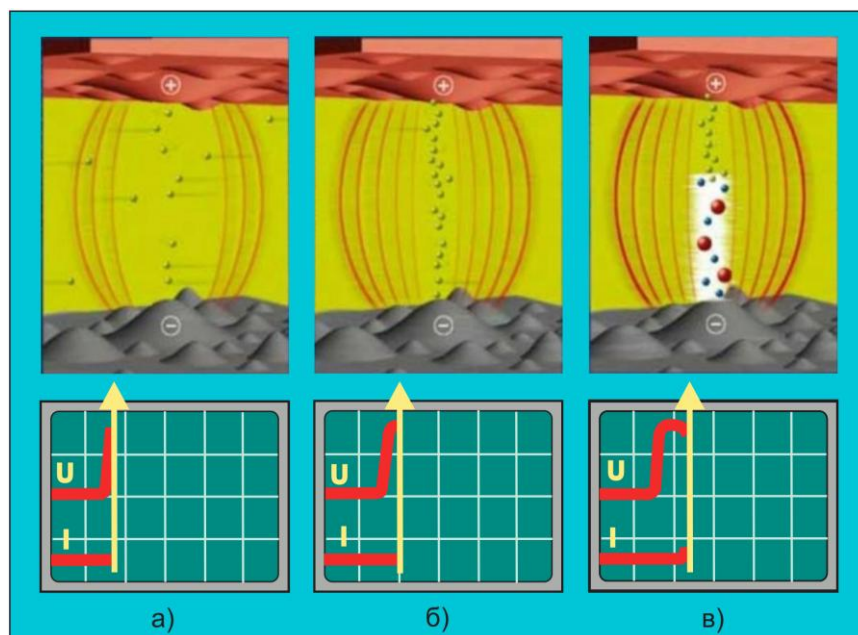
Електрично пражњење се манифестује појавом стуба пражњења, насталог као резултат јонизације мале запремине диелектрикума. При пражњењу се загрева површина електрода до температуре $8000-12000^\circ\text{C}$ што изазива испаравање диелектрикума и стварање гасног мехура, са врло високим притиском. Прекидом тока електричне струје долази до прскања гасног мехура, услед изненадног пада температуре. Тада настају динамичке силе које избацују растопљени метал из кратера који се том приликом формирају. Диелектрикум који циркулише хлади експлозивно расплињени материјал који отврдњава у облика ситних куглица и односи га из зоне

обраде. Серијом узастопних пражњења добија се низ кратера, настаје уклањање вишка материјала са предмета обраде.

У процесу електроерозионе обраде долази до разних појава: електричних (побуђивање пражњења диелектричне средине) и топлотних (топљење и испаравање материјала електрода и испаравање диелектрикума). Нажалост, већина процеса је невидљива. У току импулса долази до промене напона и јачине електричне струје које карактеришу три фазе.

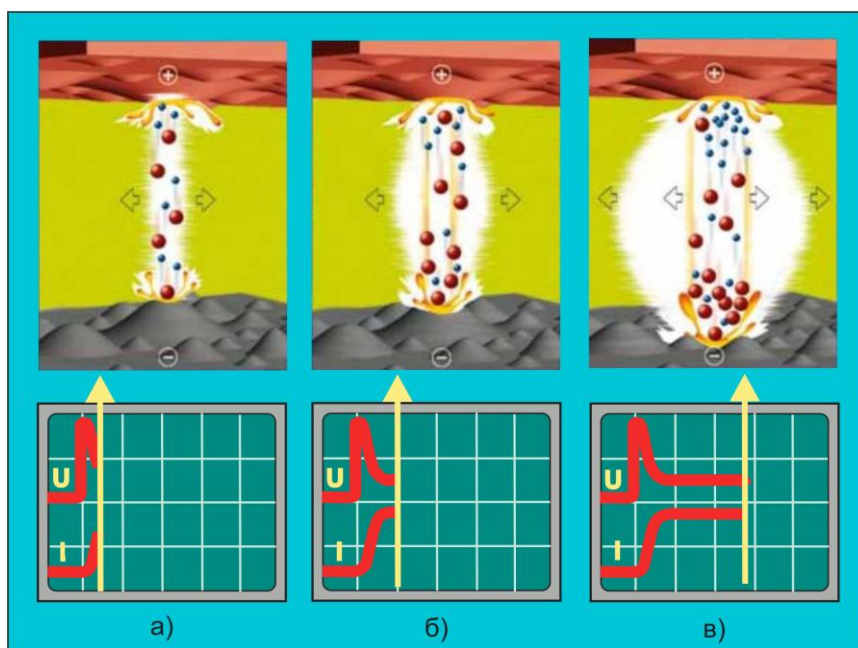
- јонизацију диелектрикума,
- пражњење и
- распадање стуба јонизације

У првој фази *јонизације диелектрикума* при одређеном напону и растојању између алата и обратка, услед нехомогености површина алата и предмета обраде долази до јонизације диелектрикума и појаве одговарјуће емисије електрона са негативне електроде. Електрични напон образује јако магнетно поље у читавом простору између електрода, због магнетне силе и геоморфолошке конфигурације површина долази до нагомилавања електро-проводљивих честица које пливају у диелектрикуму на месту највеће јачине магнетног поља, тј. на месту најмањег локалног растојања предмета обраде и алата (слика 2.5/а). Приликом судара електрона са неутралним честицама диелектрикума долази до цепања молекула диелектрикума, избацивања по једног електрона из молекула и настанак позитивно и негативно наелектрисаних јона, односно јонизације диелектрикума и образује се мост ових честица (слика 2.5/б). Магнетно поље између електрода убрзава електроне који се на свом путу сударају са неутралним честицама диелектрикума, од којих настају нове наелектрисане честице, уз избацивање нових електрона и молекула радне течности. Ослобођени електрони изазивају сударе што узрокује ланчану реакцију са много позитивно и негативно наелектрисаних јона (слика 2.5/в) Овај процес се назива јонизација, односно стварање електро-проводљивог канала између електроде и предмета обраде, на месту где је локални зазор најмањи. Овај процес се шири експлозивном брзином и познат је као ударна јонизација.



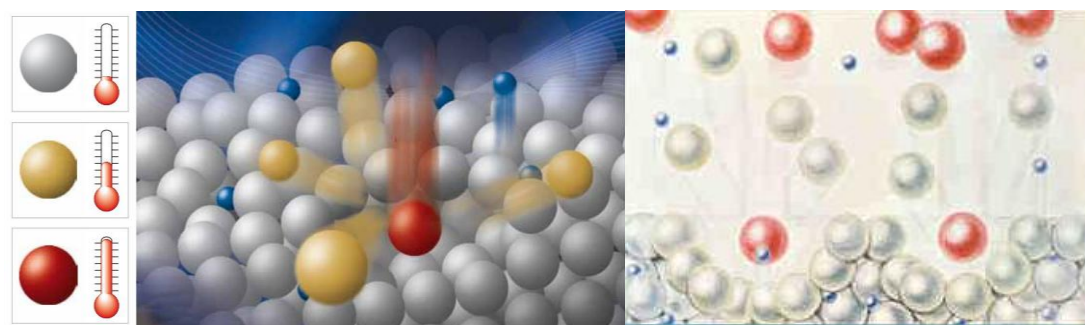
Слика 2.5 Шематски приказ процеса јонизације [9]

Друга фаза – *фаза пражњења* позитивне честице се крећу ка негативној, а негативно наелектрисане честице ка позитивној електроди. Тако настаје проток електричне струје која постепено расте ка максималној вредности (слика 2.6/а). Лавина честица удара површину електрода супротног наелектрисања, долази до пражњења, протицања електричне струје и опадања отпора међупростора уз раст јачине електричне струје, повећање притиска и температуре унутар стуба јонизације и појаве плазме. Зона формирање плазме достиже температуреу од 8000 до 12000°C (слика 2.6/б). При овако високим температурама долази до тренутног топљења и делимичног испаравања и најтеже топивих материјала. Истовремено се образује гасни мехур испареног диелектрикума и материјала који се шири и тако доводи до пораста локалног притиска у диелектрикуму (слика 2.6/в).



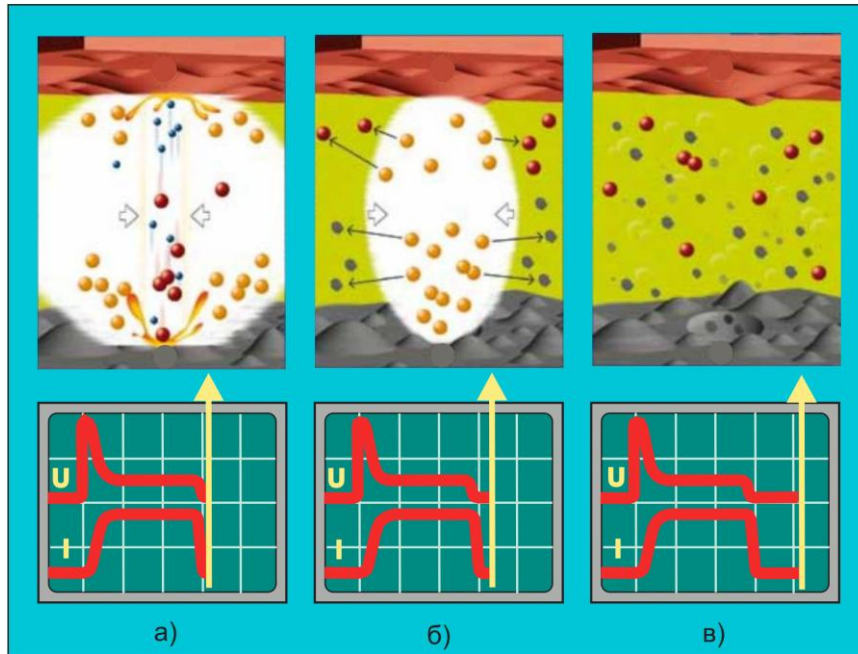
Слика 2.6 Шематски приказ фазе пражњења [9]

Приликом пражњења струја се претвара у топлоту, изнад негативне електроде-предмета обраде се настаје канал пражњења. Позитивно наелектрисане честице (црвене) ударају по површини метала и преносе своју енергију (вибрације) на честице предмета обраде што, изазива одговарајући пораст температуре предмета обраде. Интензивирањем процеса (ударање позитивно наелектрисаних и негативно наелектрисаних честица, по електродама) долази до избацивања честица метала предмета обраде и у мањој мери са алата-електроде (слика 2.7)

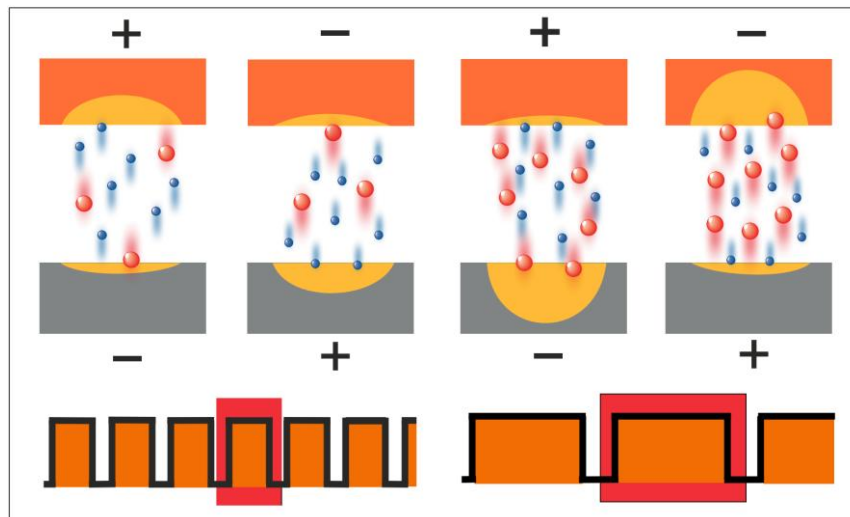


Слика 2.7 Шематски приказ топљења и испаравања материјала предмета обраде [9]

Трећа фаза - *дејонизација* прекидом тока електричне струје долази до пада броја наелектрисаних честица нестанка стуба јонизације (слика 2.8/а), диелектрикум притиска мехур он се смањује затим долази до распадања гасног мехура (слика 2.8/б) и наглог пада притиска. То изазива експозивно расплињавање материјала, његово брзо хлађење у контакту са диелектрикумом, настанак честица материјала као и остатака цепања најчешће угљеника (графит) и гаса (слика 2.8/в) и нестајање наелектрисаних јона. Промена јачине струје и напона има импулсни карактер (електрични импулси).



Слика 2.8 Шематски приказ распадања стуба јонизације и одношења материјала електрода - дејонизација [9]



Слика 2.9 Одређивање поларитета у зависности од времена трајања импулса

Кретање негативно и позитивно наелектрисаних честица (слика 2.9), резултира протоком струје у каналу пражњења. Струјно пражњење ослобађа топлоту, која доводи до топљења метала. При врло кратким временима трајањем импулса у покрету је више негативних у односу на позитивне честице. Што се више честица једног поларитета креће према циљној електроди, на њој се ствара више топлоте и веће је одношење материјала са ње. Такође је важно да као резултат њихове веће величине, позитивно

наелектрисане честице генеришу више топлоте од негативно наелектрисаних честица, при истим брзинама кретања при удару о супротно наелектрисану електроду. Како би се минимизирало уклањање (хабање) материјала на алатној електроди, поларитет треба бирати тако, да се на радном комаду у току времена пражњења ослобађа колико је могуће више топлоте. При кратким импулсима електроду-алат би требало прикључити на негативни пол. Поларитет алата је негативан. При дугим импулсима, електроду-алат би требало повезати са позитивним полом, тако да је његов поларитет позитиван. Трајање импулса код кога се поларитет мења зависи од више фактора, који су углавном повезани са физичким карактеристикама алата и материјала електроде.

2.4 ИНСТАЛАЦИЈЕ ЗА EDM ОБРАДУ ПУНИМ ЕЛЕКТРОДАМА

Машина за обраду пуном електродом обезбеђује израду различитих конфигурација коришћењем одговарајућих електрода сложене конфигурације или електрода једноставног облика, уз сложено кретање електрода. Код машина за електроискричну обраду као извор енергије се користи RC или RLC генератор, док се енергија пражњења формира преко кондензатора. Код електроимпулсне обраде, импулсно пражњење се формира од импусног генератора, док се спречавање појаве кратког споја постиже перидичним осцилаторним кретањем алата и предмета обраде. Инсталације за EDM обраду могу се састојати од различитих агрегата (модула), у зависности од намене инсталације и нивоа аутоматизације. Сви модули могу бити у склопу саме машине или постављени одвојено што је у пракси најчешће. Основни елементи инсталације за EDM обраду су:

- алатна машина,
- генератор електричних импулса,
- систем за циркулацију и пречишћавање диелектрикума,
- систем за контролу и управљање (NC управљачка јединица).

2.4.1 Алатна машина

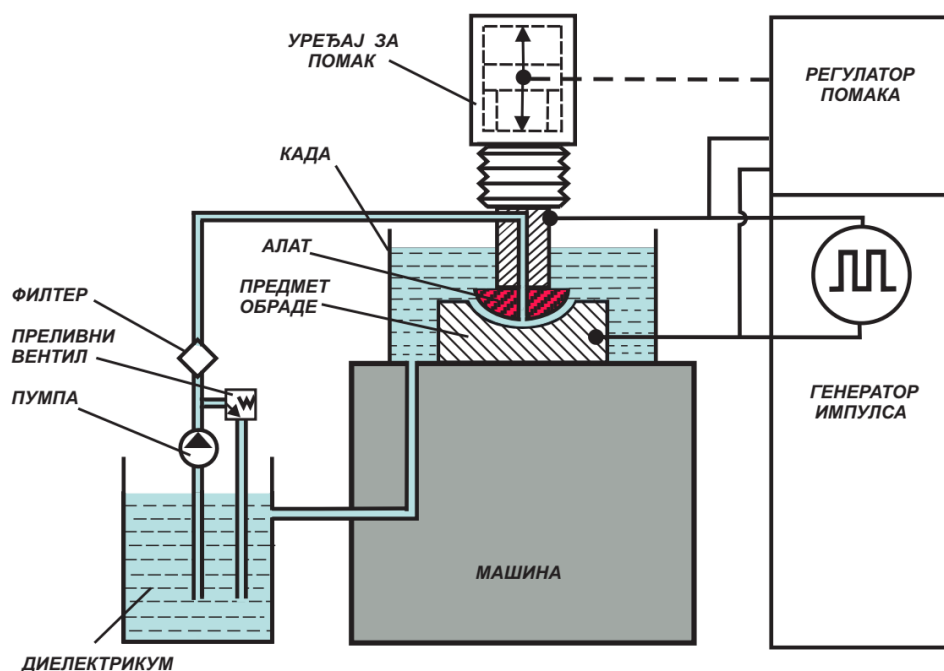
Прве машине које су направљене за електроерозиону обраду су биле израђене по узору на класичне (конвенционалне) машине за обраду резањем. Углавном су се машине за електроерозиону обраду израђивале као вертикалне бушилице и глодалице, тако што је носач алата са преносником за главно кретање замењен носачем електроде-алата са регулатором помераја, док је на место радног стола дошла када са диелектрикумом.

Подела алатних машина:

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

Разлика постоји у начину позиционирања радног стола и електроде-алата, односно у начину управљања генератором електричних импулса и агрегатом за диелектрикум.

Шема постројења за електроерозиону обраду дата је на слици 2.10, а EDM машина за обраду пуном електродом приказана је сликом 2.11.



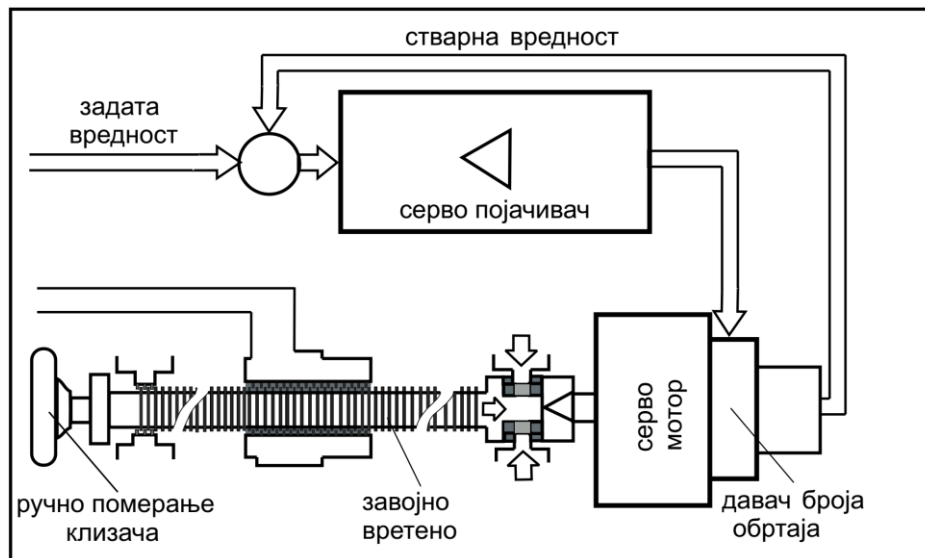
Слика 2.10 Шема постројења за електроерозиону обраду



Слика 2.11 Машина за електроерозиону обраду пуном електродом

Радни сто са укрштеним клизачем се најчешће израђује са призматичним вођицама са ролницама које обезбеђују лаку покретљивост и веома високу тачност померања. Клизач може имати ручни погон, електрични (са или без аутоматског

позиционирања) или нумеричко управљани (НУ). Код савремених EDM машина углавном се примењује нумеричко управљање клизачем (сликом 2.12). Минимално померање клизача, износи $0.5 \mu\text{m}$.

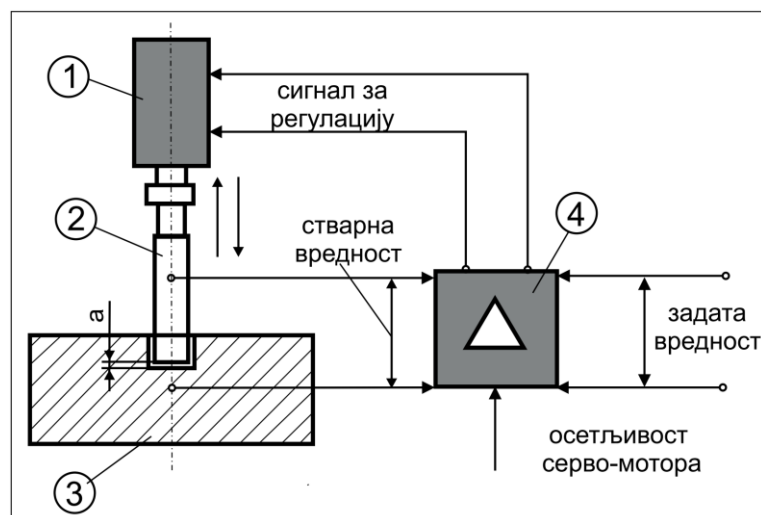


Слика 2.12 Шема функционисања НУ-управљања за померање клизача машине [2]

Регулатор помераја одржава константан радни зазор a (слика 2.13) између алата и предмета обраде. Померање се остварује помоћу *средњег напона пражњења*. Могуће је и комбиновање помоћу *средње струје и напона*.

Регулатори помераја се могу поделити у две групе:

- Слободни и
- Крути регулатори



Слика 2.13 Шема регулације радног зазора између електроде и предмета обраде [2]

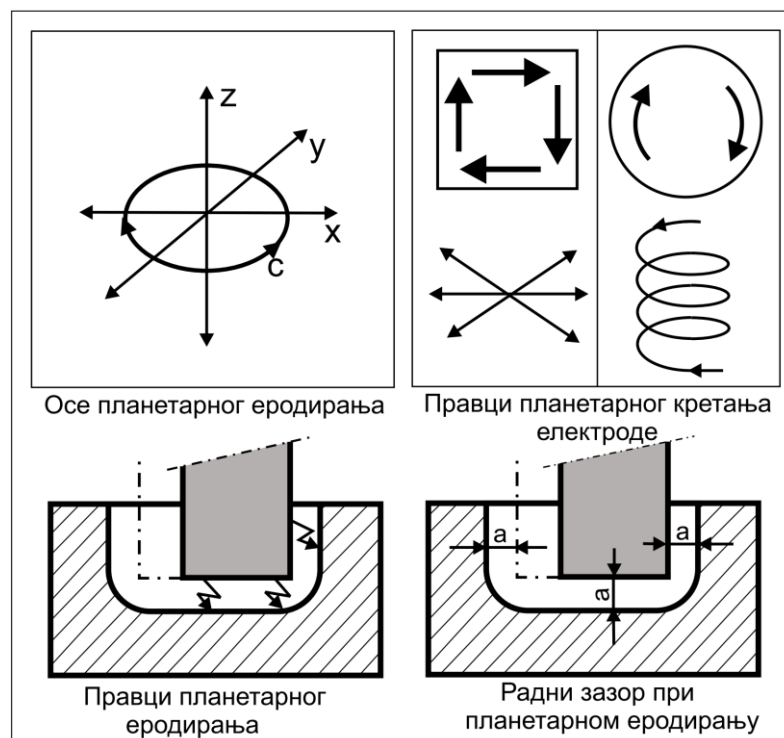
Слободни регулатри помераја (слободно). То значи да се кретање обавља под дејством сопствене тежине електроде-алата, без додатног погона. Исти је принцип кретања и у супротном смеру, односно кретање предмета обраде ка електроди-алату. У групу слободних регулатора спадају: *соленоидни, електро-динамички и регулатор са*

зупчастом летвом. Ова врста регулатора се користи код машина које раде са електродама мање тежине, и у случајевима када се не захтева висока тачност обраде.

Регулатори са крутим системом кретање електроде у оба смера (спуштање и подизање) обавља под принудом. Регулатори са крутим системом су врло осетљиви на промене, па се због те своје особине користе за машине од којих се захтева висока тачност обраде. У ову групу регулатора се убрајају: *регулатори са завојним вretenом, диференцијални и хидраулични регулатори.*

Најчешће се код савремених машина користе регулатори са завојним вretenом као и хидраулични регулатори. Хидраулични регулатори помака су посебно погодни код примене електрода великих маса, због високих притисака на којима раде. Електроде за које се користе хидраулични регулатори помераја могу бити тешке и до неколико стотина килограма.

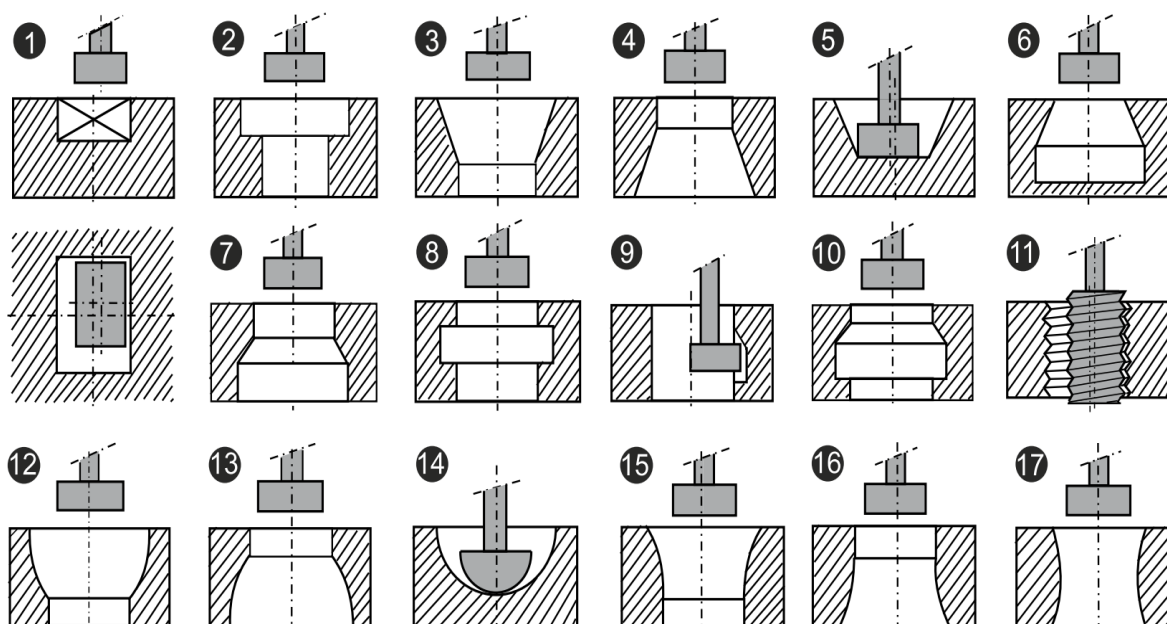
Веома дуго су се производиле само EDM - машине код којих се електроерозиона обрада остварује само вертикално, у једном или у оба смера (правац Z-осе). Заокретањем носача електроде-алата са регулатором помераја око хоризонталне осе може се вршити косо, или хоризонтално еродирање, уз додатак посебног прибора. Последњих година су се појавиле машине за електроерозиону обраду код којих је могуће остварити еродирање у оба смера све три осе правоуглог координатног система (X, Y, Z), као и кружно еродирање око Z – осе (смер C на слици 2.14). Ако се на ове машине дода аутоматско позиционирање радног стола и носача електроде, што се најчешће изводи помоћу HY-управљања, добијају се *EDM - машине са планетарним еродирањем.* Ове машине су у ствари EDM- обрадни центри који имају придодат магацин за електроде са системом за њихову аутоматску измену.



Слика 2.14 Шематски приказ рада машина са планетарним еродирањем [2]

Да би се рационализовало и поједноставило програмирање рада на машинама за планетарно еродирање, за основне геометријске облике су разрађени посебни програми којима се на машини остварују потребна кретања. На једној машини може бити више

оваквих програма, који омогућају да се израде компликовани облици уз помоћ простих електрода. Неки од облика, за које су разрађени програми су приказани сликом 2.15.



Слика 2.15 Основни облици површина које се еродирају на машинама са планетарним кретањем применом посебних програма [2]

2.4.2 Генератор електричних импулса

Генератор електричних импулса је најважнији део постројења за електроерозиону обраду. Данас се најчешће користе следећи типови генератора [2]:

- Релаксациони (осцилаторни),
- Машински (ротациони) и
- Импулсни (полупроводнички)

Генератори се могу поделити на основу више фактора: према намени, снази, фреквенцији итд.

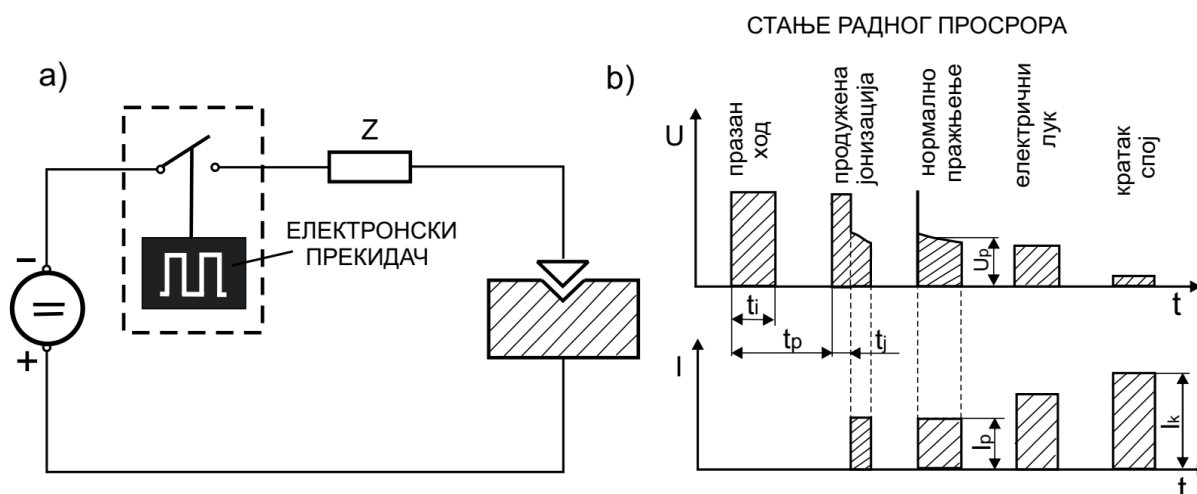
Са друге стране, машински и полупроводнички генератори спадају у групу генератора са независним дејством. Ови типови генератора генеришу импурсе константног карактера, који не зависе, или делимично зависе, од састава радног простора. Карактеристике електричних импулса, *напон*, *струја*, *дужина импулса*, *дужина паузе* и *коэффициент деловања*, су одређене конструкцијом самог генератора.

Приликом изградње савремених постројења за електроерозиону обраду, најчешће се примењују полупроводнички импулсни генератори. Ова врста генератора је успешно заменила цевне генераторе који су се претходно користили за ову намену. Главна карактеристика полупроводничких импулсних генератора је што могу да произведу електричне импурсе чија се *дужина*, *амплитуда* и *фреквенција* могу мењати у веома широким границама.

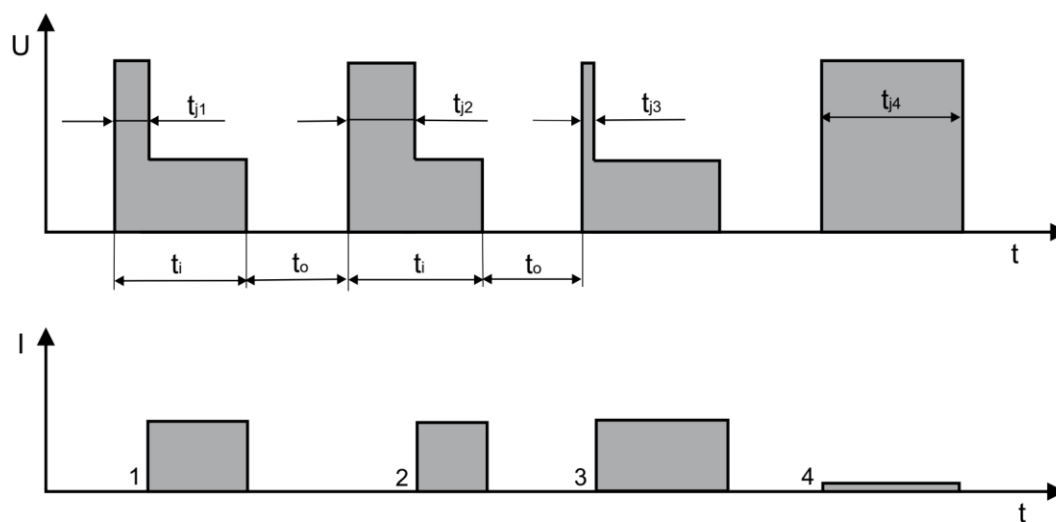
Импулсни генератори се састоје од извора једносмерне струје из кога се директно напајају електрода-алат и предмет обраде, уз помоћ електронског прекидача (слика

2.16/а). Електронски прекидач омогућује периодично довођење напона у простор између електроде-алата и предмета обраде, ради остваривања процеса електричног пражњења. За овај процес се претпоставља да се физичка својства радног простора између електроде-алата и предмета обраде морају одржавати у одређеним границама. Појава, да се ови параметри у процесу обраде стално мењају, утиче на време јонизације t_j , тако да се оно може знатно разликовати од импулса до импулса (слика 2.16/б). С обзиром на ову чињеницу, разликују се два типа импулсних генератора:

- Стандардни генератори електричних импулса и
- Генератори са контролисаним пражњењем.



Слика 2.16 а) Принципска шема, б) шема тока напона и струје, код полупроводничких импулсних генератора [2]

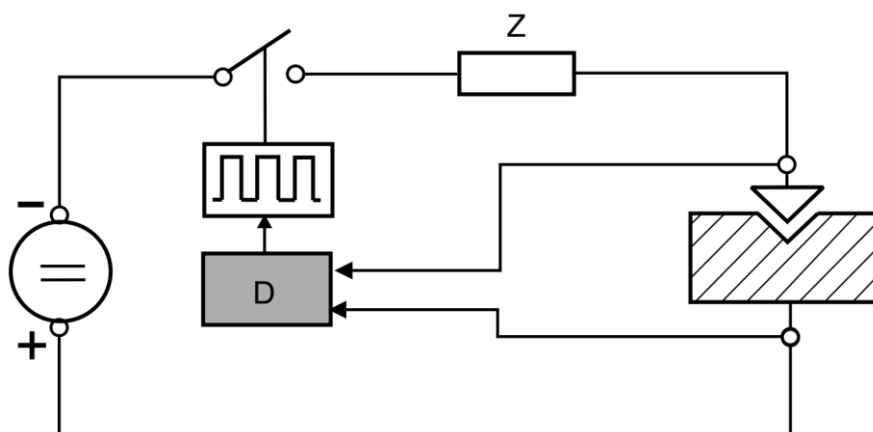


Слика 2.17 Промена дужине ефективног пражњења код стандардних генератора електричних импулса [2]

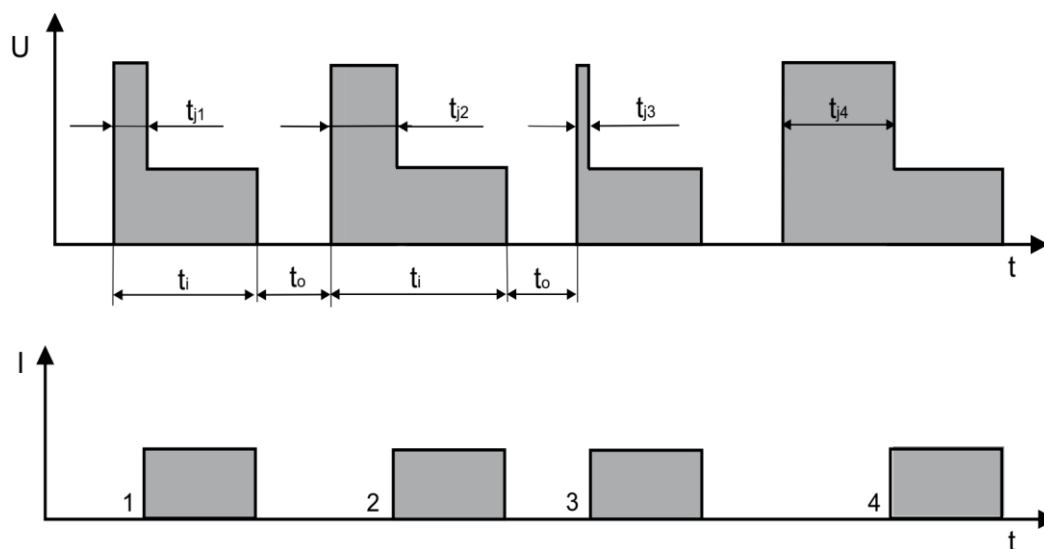
Управљање електронским прекидачем, код *стандардних генератора електричних импулса*, изводи се константним ритмом, независно од тренутних услова у радном простору, тј. не узима се у обзир променљивост времена јонизације. Због тога постоји константна промена дужине ефективног пражњења, које су у неким случајевима може смањити и на нулу (слика 2.17). Скидање материјала предмета обраде, односно учинак

постројења у случају да се дужина ефективног пражњења смањује на нулу, драстично пада. Тако настају варијације у квалитету обрађене површине и квалитету радног зазора, тада енергија пражњења није константна

Код генератора са контролисаним пражњењем постоји зависно управљање електронским прекидачем уз помоћ детектора D , који омогућује регистровање почетка сваког пражњења (слика 2.18). Обзиром на то, управљање електронским прекидачем се одвија на тај начин што се узима у обзир променљивост времена јонизације t_j (слика 2.19). На тај начин се остварује контрола сваког пражњења, а енергија пражњења се одржава максимално и константно. Тако се, за одређени квалитет обрађене површине постиже максимално могуће скидање материјала са предмета обраде, при потпуно уједначеној величини радног зазора и храпавости површине.



Слика 2.18 Принциуска шема генератора са контролисаним пражњењем [2]



Слика 2.19 Шема тока напона и струје код импулсних генератора са контролисаним пражњењем [2]

2.4.3 Агрегат за пречишћавање и циркулацију диелектрикума

Агрегат за пречишћавање и циркулацију диелектрикума има веома важну функцију од које у великој мери зависи степен искоришћења капацитета једне EDM -

машине. Најважнији захтеви који се постављају пред ову компоненту су:

- обезбеђење довољне количине диелектрикума,
- пречишћавање запрљаног диелектрикума,
- обезбеђење циркулације пречишћеног диелектрикума у циљу брзог пуњења радне каде, испирања радног простора под притиском, усисавањем, или на неки други начин,
- хлађење диелектрикума и
- одстрањивање нанетог талога из филтерског уређаја.

Зависно од инсталиране снаге EDM - машине, у пракси се користе углавном две врсте ових агрегата:

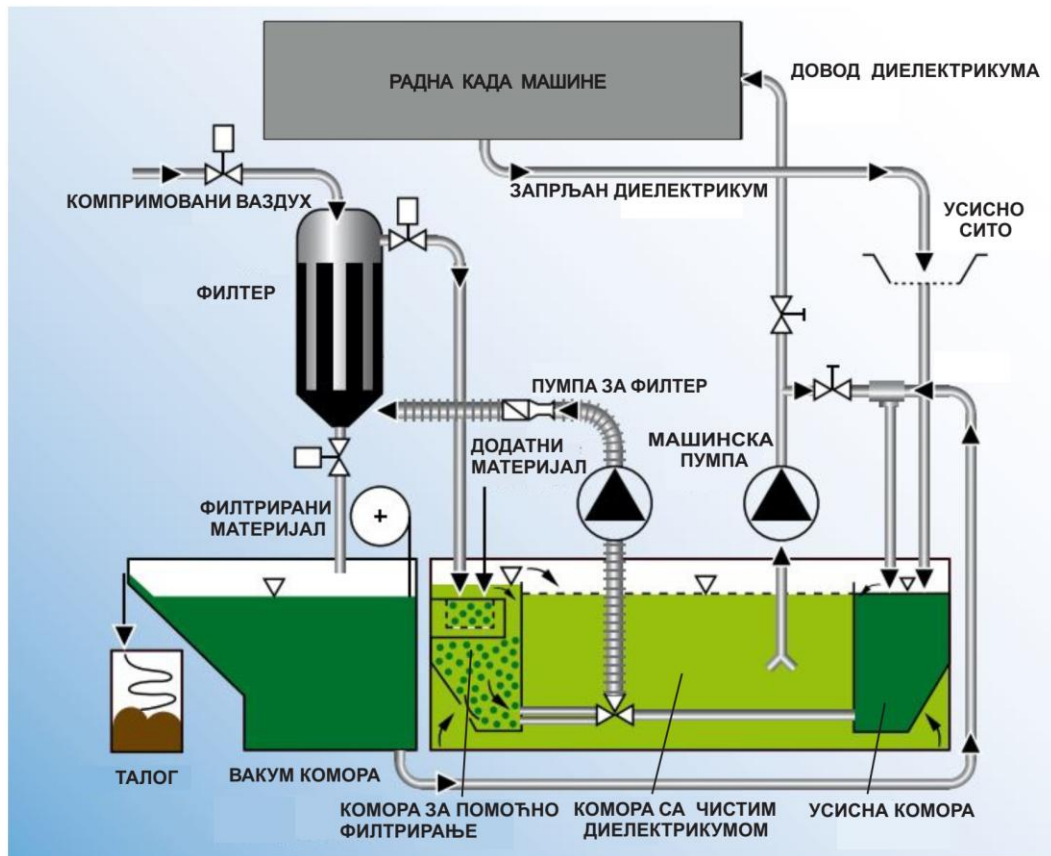
- Агрегати са *изменљивим филтерским улошцима - патронима*, који се користе код машина мањег капацитета (до 500 mm³/min, односно са генератором од 50 A) и
- Агрегати са *муљним филтером*, који се користе код машина већег капацитета од предходно наведеног.

Агрегати са изменљивим филтерским улошцима су знатно једноставнија, што значи и јефтинија постројења. Запрљани диелектрикум се доводи из радне каде у резервоар агрегата одакле се пумпом преводи преко филтера са улошцима-патронима и пречишћен поново враћа у радну каду. Један уложак може да траје приближно две недеље, после чега се исти замењује новим.

Функционалана шема агрегата са муљним филтером са основним елементима, који га сачињавају, дата је сликом 2.20. У усисну комору се доводи запрљани диелектрикум из радне каде и разводног блока. Одавде се пумпом преводи преко филтера, са посебним филтерским ћелијама, и као чист доводи у комору за чист диелектрикум. Затим се пумпом поново пребацује у радну каду и разводни блок, одакле се, применом неког од начина, користи за испирање радног простора.

Овде се користи посебан кружни ток за филтрирање запрљаног диелектрикума. Да би се веома ситни продукти електроерозије, који настају током обраде, лакше издвојили при филтрирању диелектрикума, код ове врсте агрегата се користи додатни материјал (песак, риксид, целулоза...). Овај материјал је крупнији од продуката електроерозије и има способност да уз себе веже ситне честице и тако их задржи на филтерским ћелијама. На тај начин се остварује филтрирање нечистоћа, реда величине до 1 μm . Додатни материјал 1 kg шљунка или 0,5 kg риксида су потребни за 1 m² обрађене површине. На основу тога се врши дозирање додатног материјала.

Када притисак због запрљаности филтера порасте до одређене вредности, обавља се чишћење филтерских ћелија од нанетих нечистоћа и додатног материјала, што се обавља уз помоћ ваздуха под притиском. Тако се муљ са заосталим диелектрикумом отварањем вентила бива избачен из филтера у вакум комору, да се оцеди, а затим избацује напоље у колица. У избаченом талогу остаје 20-30% диелектрикума, што зависи од врсте диелектрикума који се користи. Век трајања диелектрикума је дуг јер додати материјали чисте диелектрикум од механичких нечистоћа, али и у извесној мери од киселих продуката насталих током процеса електроерозије. Тако оцеђени диелектрикум враћа се уз помоћ вакум пумпе, ради даљег коришћења. Након испирања систем се рестартује. Површина филтера би требало да буде довољно велика, тако да сва прљавштина која се акумулира у једној смени може да се апсорбује.



Слика 2.20 Шема агрегата за пречишћавање и циркулацију диелектрикума са муљним филтером [10]

2.4.4 Управљачка јединица – системи за праћење и управљање процесом обраде

Да би се избегли поремећаји у процесу обраде, као што су кратки спојеви и електрични лук, а самим тим и оштећење на алату и предмету обраде, код савремених постројења за EDM - обраду, примењују се *системи за адаптивно регулисање* параметара на машини. Постоје три различита система за праћење и регулисање процеса који се базирају на:

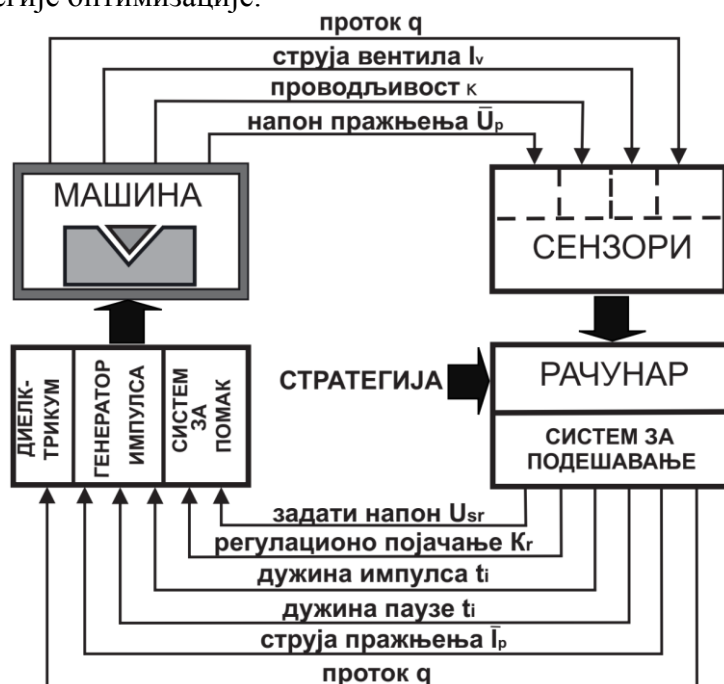
- регулисању дужине паузе,
- модулацији тока импулса и
- регулисању подешене вредности напона.

Регулисање дужине паузе остварује се на основу дужине јонизације код појединих импулса. Предуга или прекратка јонизација радног зазора, представља поуздан сигнал да је дошло до поремећаја у одвијању процеса, па се због тога прибегава продужавању или скраћивању паузе између импулса.

Модулација тока импулса, односно други систем праћења процеса, остварује се тако што се константно прати и анализира последња серија електричних импулса. У случају појаве опасности, која би могла да доведе до неких аномалија у процесу обраде, врши се искључивање наредних импулса. Дужине искључивања наредних импулса се регулише сходно захтевима процеса.

Регулација подешене вредности напона, трећи систем праћења процеса, прати број празних импулса, тзв. LIV (нем. Leerlaufimpulsverhaltis), односно број правих импулса на укупан број импулса, тако што се поставља најнижи и највиши ниво вредности за LIV. Кад вредност LIV-а достигне најнижи ниво, онда је то знак да је радни зазор мањи од потребног и да врло лако могу настати поремећаји у даљем просецу обраде. Због тога се подешена вредност напона између електрода и предмета обраде повећава, чиме се повећава и радни зазор, па се тако поново успоставља жељено стање процеса. Кад вредност LIV-а достигне највиши ниво, односно број празних импулса достигне ниво који није могуће толерисати, подешена вредност напона се смањује и такав процес се непрекидно понавља. Код овог система регулације постоји и додатно подизање и спуштање електроде, ако у претходном регулисању задатог напона нису отклоњени поремећаји у процесу. Покретање електроде ствара хидрауличне таласе, који интензивирају испирање радног простора, тако да се нагомилани продукти обраде лакше одстрањују из радног зазора, јер су они најчешћи узрочник поремећаја у процесу обраде.

Стални развој система граничне регулације је довео до развоја система за оптимизацију. Код овог система регулише се више параметара на машини зависно од тока одвијања процеса обраде. У оквиру стратегије оптимизације дате су међузависности параметра који се регулишу. На слици 2.21 је приказан један такав модел, који користи високу флексибилност процесног рачунара при подешавању и тестирању стратегије оптимизације.



Слика 2.21 Шема модела за оптималну регулацију код EDM - машина са пуном електродом [2]

Код овог модела сензори прате тренутно стање одвијања процеса обраде, и информације које при томе прикупе прослеђују процесном рачунару, који их обрађује према задатој стратегији, која узима у обзир различите функције циља, као што су минимално време обраде, минимално хабање електроде и др. У случају да дође до поремећаја процеса, систем за подешавање регулише одређене параметре агрегата за диелектрикум, генератора електричних импулса, и система за померај (приказано сликом 2.20).

Предност ове врсте модела се огледа у томе што се сигурно избегавају поремећаји процеса, а процес се одржава на оптималном нивоу, захваљујућу константном праћењу рада на машини. Они омогућују добијање апсолутно константног радног зазора, као и чеоног и бочног квалитета обрађене површине. Такође се постиже и максимална производност, као и минимално трошење електроде.

2.5 ЕЛЕКТРОДЕ ЗА ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНУ ОБРАДУ

Електроде нису главни део постројења или инсталације за електроерозиону обраду, али су јако битне и без њих се овај процес не би могао одвијати. Електрода је главни алат за израду различитих делова. Постоји више типова електрода, тако да имамо електроде које у потпуности имају исти облик и димензије као и радни комад који је потребно добити, или пак са друге стране, електроде у облику танких жица, које услед низа поновљених покрета обрађују радни комад. Електроде су потрошни материјал.

2.5.1 Материјал електрода за електроерозиону обраду

Електроде за електроерозиону обраду могуће је израђивати од свих материјала који проводе електричну струју. Материјали који имају највишу тачку топљења и најмањи електрични отпор у принципу су најпогоднији за израду електрода, које се користе при електроерозионој обради. Материјали за израду електрода се могу поделити у две групе:

Метални материјали - електролитски бакар, легура телура хрома или олова са бакром, бронза, легуре волфрама и бакра, легуре волфрама и сребра, алуминијумска легура (силумин), месинг, чист волфрам (углавном у облику жице), челик, и др.

Неметални материјали – графит се најчешће користи при обради челика свих врста, док је за обраду тврдог метала непогодан.

У неким случајевима је могућа комбинација металних и неметалних материјала (графит-бакар).

2.6 ДИЕЛЕКТРИКУМ

Диелектрикум је течност која не проводи електричну струју и у којој се одвијају електрична пражњења. Налази се између електрода и има улогу изолатора, док се не постигне напон избијања, хлади одвојене честице предмета обраде и остале предмете процеса и одстрањује их из зазора међу електродама, па се због тога мора стално филтрирати. Диелектрикум треба да има мањи вискозитет и мора бити хемијски и топлотно постојан. Као диелектрици се користе вода и угљоводоници (петролеј, парафин, и др.).

Диелектрикум мора испунити више захтева, од којих су најважнији:

- да оствари оптималну електричну отпорност између алата и предмета обраде, која је потребна да се изврши електрично пражњење,

- да испира продукте електроерозије из зоне резања, хлади и дејонизира, како би се створили услови за континуално одвијање процеса константном ширином реза,
- да побољша клизна својства на вођицама, жице и контактима за довод електричне струје, као и да хлади координатну главу за померање горње вођице, и др.

Вода као диелектрикум се употребљава дејонизована вода, код израде отвора малих димензија и код машина које раде са електродама од жице. Она се добија од обичне воде, применом јонског измењивача, којим се из воде одстрањују растворени минерали и на тај начин се остварује њена електро непроводљивост.

Угљоводоници - минерална уља представљају најчешће употребљаване диелектричне течности. Најбољи резултати се постижу са уљима која у себи имају одатака. Веома је важан вискозитет уља, па је тако уље ниског вискозитета неопходно за операције фине обраде, јер код ових операције су веома слабе ефективне стазе варничења и течност већег вискозитета тешко протиче између електроде и зида отвора, у предмету обраде. Приликом грубе обраде, постиже се већа производност гушћим уљем. Такође је битно познавати тачку паљења диелектрикума, течност са нижом тачком кључања лакше испарава и настала испарења ометају процес обраде.

Петролеј има низак вискозитет, па се због тога највише користи за операције фине завршне обраде. Често се употребљава за еродирање тврдых метала, који се могу обрађивати кратким електричним пражњењем. За употребу је најпогоднији безмирисни петролеј.

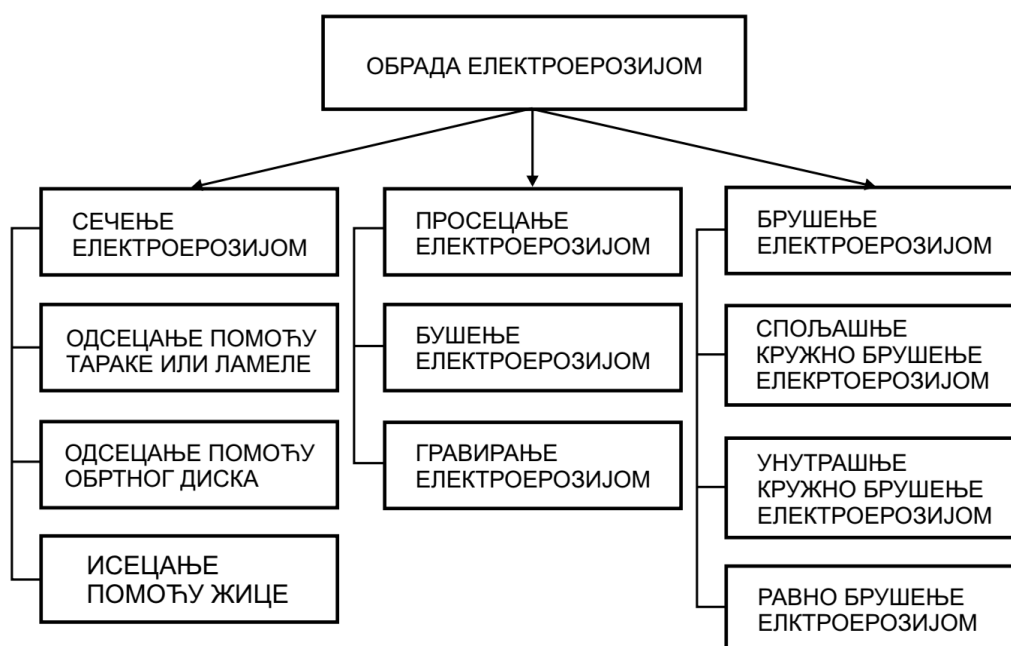
Без обзира који се диелектрикум користи, главни критеријум по коме се врши његов избор је рад односно процес који се обавља на конкретној машини.

Савремени диелектрици су провидне течности готово без мириса. Они не мењају боју током електроерозионог поступка. Велике су чистоће без токсичних или алергијских реакција у контакту са људском кожом или очима.

2.7 ПРОИЗВОДНЕ ОПЕРАЦИЈЕ EDM ОБРАДЕ

Електроерозионом обрадом се могу обрађивати веома различити материјали, који се из неког разлога не могу обрађивати класичним, односно конвенционалним поступцима обраде. Могу се обрађивати сви електро проводљиви материјали без обзира на то каква механичка својства поседују. Иако је могуће обрађивати све електро проводљиве материјале, електроерозиона обрада није исплатива у свим случајевима. Примена електроерозионе обраде је економична само код обраде челика велике тврдоће и чврстоће, као и тврдых метала, који се класичним поступцима обраде не могу или се врло тешко могу обрадити. Због ове особине могућа је обрада различитих матрица и других видова алата од тврдых метала, као што су волфрам и стелит. Такође се овим методом обрађују тешкообрадиви метали који су заступљени у авионској и ракетној индустрији. Основне производне операције, које је могуће извести помоћу електроерозионе обраде, приказане су дијаграмом на слици 2.22. Треба рећи да се применом електроерозије остварује економична обрада и код делова са сложеним површинама, као и на материјалима мале тврдоће (меким материјалима). Меке материјале је економично обрађивати овим поступком јер се остварује једноставно продирање електроде алата у предмет обраде, само потапањем без икаквог додатног

релативног кретања између алата и предмета обраде.



Слика 2.22 Производне операције електроерозионе обраде

Због природе процеса, EDM обрадом се могу обрађивати само електропроводљиви материјали. EDM обрадом се могу обављати разне операције. Могу се обрађивати површине које се могу обрађивати и конвенционалним поступцима обраде (унутрашње и спољашње равне површине, цилиндричне профилне површине), као и површине које се не могу обрађивати неконвенционалним поступцима (слепи отвори сложене форме, отвори са криволиниском осом и др.)

Сложене површине се могу добити једноставним продирањем алата–електроде у предмет обраде без додатног релетивног кретања.

Поступци обраде се деле на две групе:

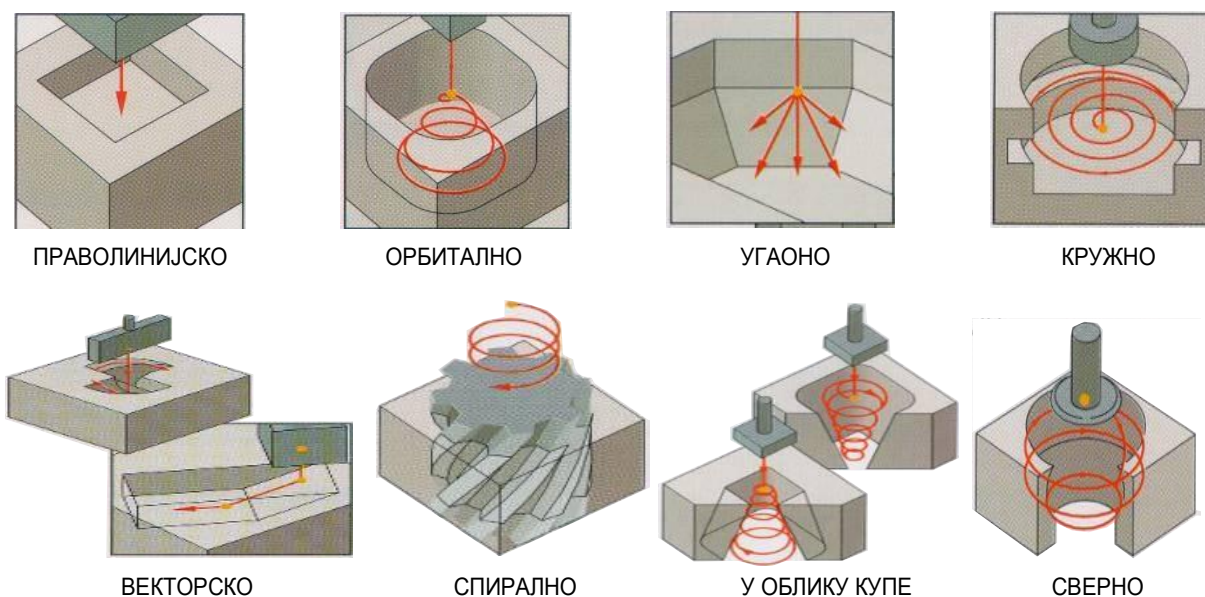
- Обрада цилиндричних отвора и
- Обрада тродимензионих удубљења.

Под цилиндричним отворима подразумевају се пролазни и непролазни отвори који се могу изградити помоћу електрода било ког облика, али константног пресека. Да би се скратило време обраде, препоручује се да се користе више операција обраде (грубу, предходну и фину обраду) чак и ако то захтева електроде различитих димензија.

Под тродимензионим отворима подразумевају се полазна или слепа удубљења која се могу обрадити са једном или са више електрода али не са константним попречним пресеком.

EDM се може реализовати низ производних операција, коришћењем профилисаног или не профилисаног алата у виду пуне или жичане електроде. При обради профлисаним алатом обликовање површине остарује се копирањем облика алата.

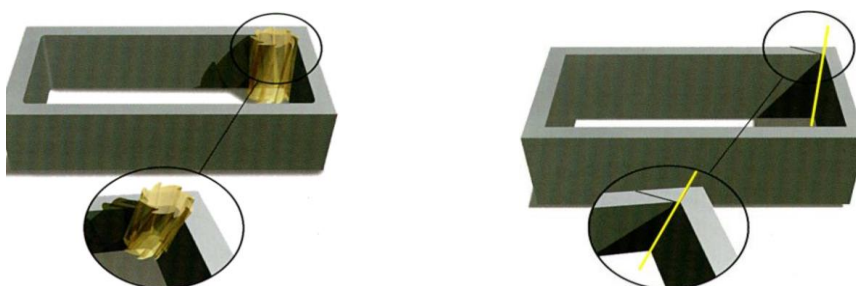
Кретање алата-електроде може бити праволинијско са регулисаним помаком и сложено кретање алата-електроде и при тродимензионој електроерозији (слика 2.23).



Слика 2.23 Врсте кретања алата при EDM [4]

EDM обрада се користи :

- у случајевима када је механичка обрада немогућа или отежана,
- при обради тврђих материјала (челика отпорних на високе температуре, корозију и др.)
- при изради отвора малих пречника (0,1-1 mm) и
- за отворе и производе сложеног облика конфигурација.



Слика 2.24 Израда жљеба на EDM машини [4]

У многим случајевима EDM обрада је једини могући метод обраде као код полуфабриката од молибдена, волфрама и тантала, уз високу тачност (1-2 μm) и квалитет обраде N3-N6 (поступак са пуном електродом). Посебно је погодна и економски оправдана при одсецању, расецању и усецању производа израђених од скупљених материјала (геманијум и др.) при ширинама реза (формираног електродама од молибдена, месинга или челика дебљине око 0,15 mm) релативно мала и износи 0,25-0,30 mm уз висок квалитет обрађене површине.

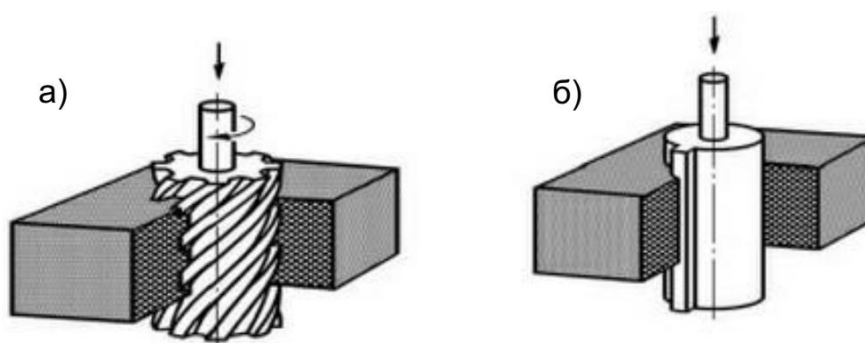
EDM обрадом се могу обављати низ других операција, што зависи од уређаја и помагала којима располаже машина. Њима се остварују допунска кретања алата-електроде у односу на радни комад. Код електроерозионног поступка нема оптерећења предмета обраде јер алат и предмет обраде нису у директном контакту. Одсуство механичког напрезања елиминира проблем загревања алата и то гарантује апсолутну тачност димензија без обзира на број обрађених делова. Конвенционална обрада веома тврђих метала укључује ризик од лома алата, док се материјали легура, каљеног челика, титанијума могу обрађивати само на EDM машинама.

Глодање отвора и жљебова четвртастог облика ограничена је радијусом глодала код конвенционалне обраде, док се код EDM обраде тај пролем не јавља (слика 2.24).

2.7.1 Просецање електроерозијом

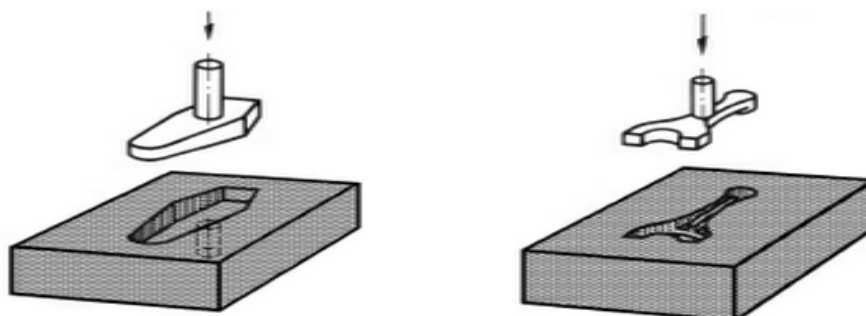
Просецање електроерозијом обухвата све врсте операција, код којих се средња релативна брзина између електроде-алата и предмета обраде поклапа са брзином продирања електроде у предмет обраде. Операције које се могу изводити на овај начин су бушење и дубљење отвора, односно гравирање.

Бушењем помоћу електроерозије (слика 2.25) се могу израђивати отвори константног попречног пресека. Електрода, односно алат има облик који у потпуности одговара облику отвора (или удубљења) који је потребно израдити.



Слика 2.25 Бушење електро-ерозијом а) сложено спирално кретање алата-електроде; б) вертикално праволинијско кретање алат-електроде [2]

Дубљење отвора као и гравирање (слика 2.26) представља процес у којем се врши копирање геометријског облика и димензија електроде-алата на предмету обраде. Електрода-алат се креће вертикално и приближава се предмету обраде, након успостављања довољно малог зазора долази до почетка обраде. Након обраде, предмет обраде на себи има отвор или гравуру потпуно исту као електрода-алат. Овај поступак се користи за израду различитих врста калупа, жигова или матрица за хладну обраду, ковање, ливење и синтеровање.

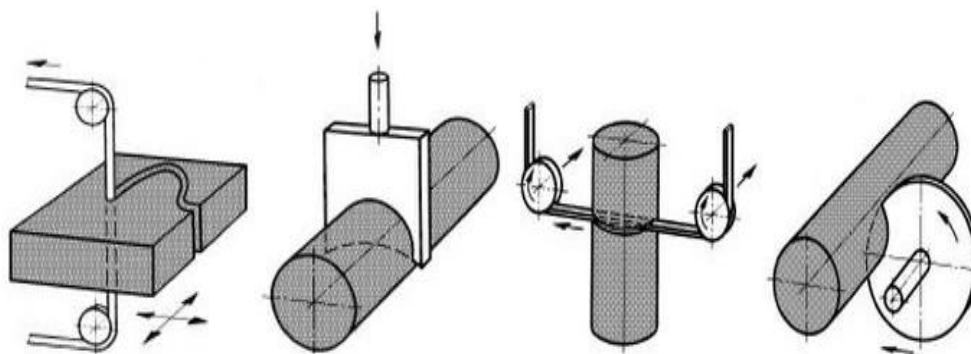


Слика 2.26 Израда просторних гравура [2]

2.7.2 Сечење електроерозијом

Електроерозионо сечење обухвата све врсте сечења материјала предмета обраде у којима се користе операције као што су одсецање, расецање и исецање. Тако се може

разликовати више различитих поступака електроерозионог сечења материјала предмета обраде (слика 2.27):

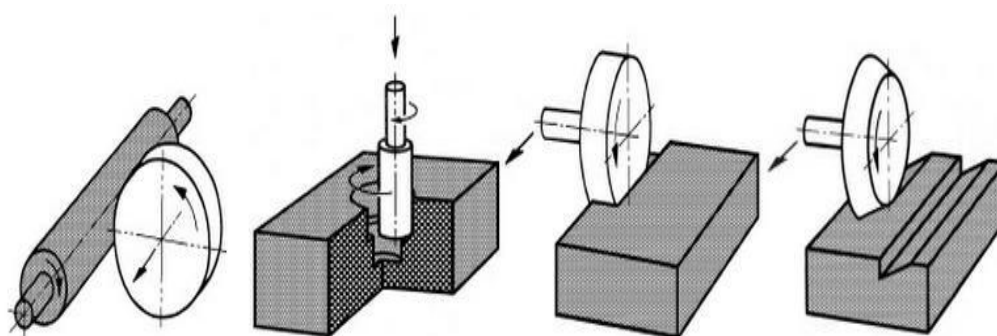


Слика 2.27 Сечење електроерозијом [2]

2.7.3 Брушење електроерозијом

Брушење електроерозијом обухвата све поступке обраде који се изводе помоћу електроде-алата која се okreће око сопствене осе. Поред главног кретања, које је обртно, електрода-алат има и допунска (помоћна) кретања у виду праволинијских померања, вертикално и хоризонтално. Обрада се изводи релативним обртањем електроде-алата у облику диска или жице, уз релативно помоћно померање предмета обраде. Извор струје, која се користи за ову обраду, је обично истосмерни напон (25-30 V). При томе се разликује неколико врста брушења која се изводе електроерозијом (слика 2.28)

Брушење електроерозијом се користи за тачну обраду цилиндричних и конусних површина, за брушење алата и др.



Слика 2.28 Брушење електроерозијом [2]

2.8 ПРИМЕНА ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНЕ ОБРАДЕ

Електроерозивна 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,
- танкозидих делова и др.

Израда калупа за ковање и пресовање представља једну од најчешћих примена електроерозионе обраде. Осим тога и додатак за фину обраду који се обично скида ручно, је знатно мањи него при копирном глодању, Минимално одступање хоризонталне мере код калупа који се користе 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 и знатно веће. Времена за израду ковачких калупа копирним глодањем и електроерозионом обрадом дата су табелом 2.1.

Табела 2.1 Упоредни преглед времена израде ковачких калупа копирним глодањем и EDM обрадом [2]

КОВАЧКИ КАЛУПИ ЗА:	ВРЕМЕ ИЗРАДЕ (сати)	
	Копирним глодањем	EDM обрадом
Клипњача мотора СУС	7	2,5
Крстак карданских осовина	6	1,5
Виљушке карданских осовина	8	3
Турбинске лопатице	9	3,5

Израда калупа за ливење под притиском за разлику од ковачких калупа, код ових се постављају строжији захтеви у погледу тачности и храпавости обрађене површине. Класа квалитета обрађене површине иде до N4, а дозвољено одступање мера у границама 0,03–0,05 mm.

Израда алата за просецање и пробијање сложенијег геометријског облика отвора, представља веома тежак и дуготрајан посао. Потешкоће се састоје у тачном слагању профила матрице и жига, од чега у великој мери зависи квалитет израђених делова и трајност самог алата.

Израда делова са уским прорезима поступком електроерозивне обраде могу се на стандардним машинама израђивати прави 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.

Израда делова са малим и дубоким отворима ($D = 0,3–1,5$ mm и дубине преко $100 \cdot D$).

Израда делова сложеног облика. Серијска израда делова сложеног облика од тешкообрадљивих материјала. Време израде оваких турбинских кола је за око 10 пута мање у поређењу са копирним глодањем. При обради се постиже тачност обраде од ± 5 μm и квалитет обрађене површине VDI-22 (одговара $Ra = 1,2$ μm). Планетним еродирањем са толеранцијом израде пречника $\pm 0,003$ mm

Обрада танкозидих делова са одступањем у оквиру 0,007 mm, а храпавост обрађене површине $Rz = 4$ μm . Овакав резултат засад није могуће остварити ни једном другом обрадом.

3. КВАЛИТЕТ ЕДМ ОБРАДЕ

3.1 УТИЦАЈ ПОЈЕДИНИХ ПАРАМЕТАРА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ НА КВАЛИТЕТ

Појам квалитета је веома сложен и представља скуп више параметара. Као и код других поступака обраде и овде су најважније технолошке карактеристике: *производност*, *тачност израде* и *квалитет обрађене површине*.

Важност ових карактеристика је различита и зависи од услова обраде и намене обрађених делова. Тако је *производност* процеса најважнија технолошка карактеристика са економског аспекта. *Тачност израде* и *квалитет обрађене површине* су важне карактеристике са аспекта функције обрађеног дела, односно његове намене. Неке од технолошких карактеристика су противуречне једна другој. Тако нпр. повећањем производности добија се лошији квалитет обрађене површине и мања тачност. Због тога је избор оптималних технолошких карактеристика, за сваки конкретан случај обраде, једно од најважнијих питања.

3.1.1 Параметри процеса EDM обраде

Параметри електроерозионе обраде се могу сврстати у две групе:

- електричне и
- механичке.

Електрични параметри су одређени карактеристикама електричног импулса, а механички кинематском шемом обраде, режимом помоћног кретања, брзином обртања електроде и сл.

На ефекте обраде утичу:

- циркулација диелектрикума (притисак и проток).
- карактеристике материјала предмета обраде (температура топљења, испаравања, топлотна и електрична проводљивост, хемијски састав предмета обраде).
- Карактеристике диелектрикума: електропроводљивост, вискозност, температура паљења и брзина дејонизације,
- карактеристике материјала алата: топлотна проводљивост, поларитети и
- брзина дејонизације радног простора: интензитет испирања радног простора.

Утицај свих ових параметара је комплексан.

3.2 ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЕЛЕКТРИЧНОГ ИМПУЛСА

Промена напона и јачине електричне струје (слика 3.1) у току времена одређује карактеристике импулса и величине утицајне на процес јонизације, пражњења и дејонизације при електроерозионој обради. Карактеристичне величине импулса су:

U_j , V - *напон јонизације* - напон између предмета обраде и електроде-алата за време јонизације диелектрикума. Вредност овог напона се креће од 40 до 250 V, то зависи од материјала предмета обраде и алата,

U_p , V - *напон пражњења* - то је средња вредност напона између предмета обраде и електроде-алата за време пражњења. Вредност овог напона варира између 15 и 25 V, то зависи од материјала предмета обраде и алата,

U_{sr} , V - *средња вредност напона* за време обраде,

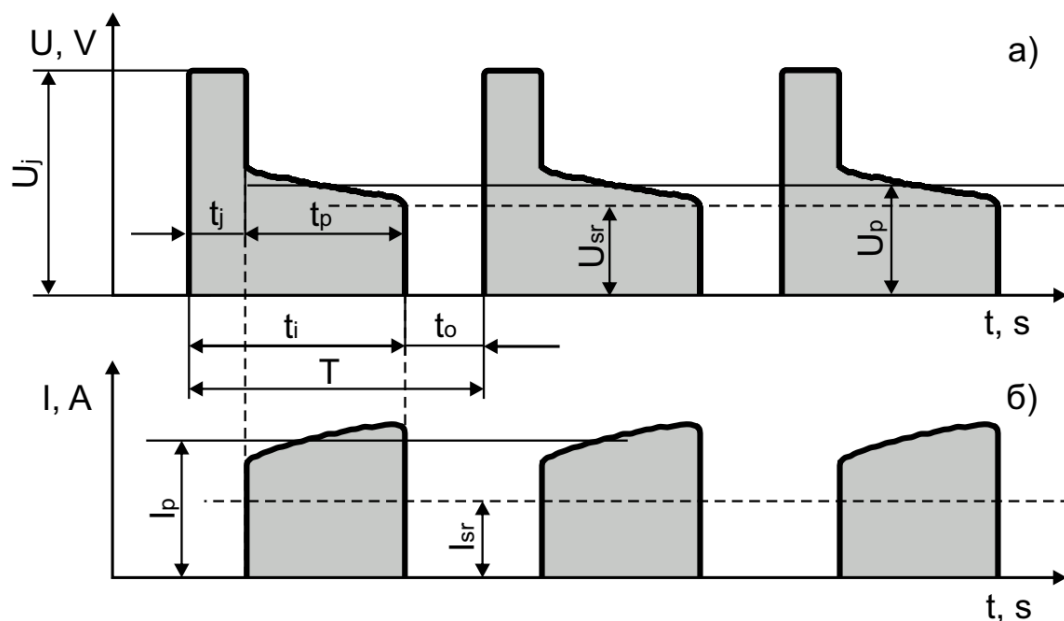
t_j , s - *време јонизације* представља време од момента довођења напона на предмет обраде и электроду до почетка пражњења.

Напонски импулси су дефинисани следећим карактеристичним величинама:

t_p , s - *време трајања пражњења* - представља време протока струје кроз радни простор при датом подешавању генератора. Код импулсних генератора, о којима ће касније бити говора, ова вредност је апсолутно константна,

t_i , s - *време трајања импулса* - време укупног трајања напонског импулса, односно:

$$t_i = t_j + t_p,$$



Слика 3.1 Шематски приказ облика електричних импулса при EDM

t_o , s - *време трајања паузе* - време у коме је генератор између два радна импулса искључен. Овакве паузе су неопходне да би се по завршетку електричног импулса обезбедило сигурно „гашење“ електричне варнице, односно остварила дејонизација и хлађење радног простора,

T , s - *периода импулса* (представља време између предходног и наредног импулса, односно: $T = t_i + t_o$),

$$f, \text{ Hz} - \text{фреквенција импулса} - f = 1/T = 1/(t_i + t_o) [\%],$$

τ , % - *коэффициент деловања импулса или релативна дужина импулса* - однос дужине и периоде импулса, односно: $\tau = t_i / T = t_i / (t_i + t_o) = t_i f$; $\tau\% = [t_i / (t_i + t_o)]$

100%. Показује колико се процената периоде импулса користи за константан рад, тј. скидање материјала, а колико отпада на паузе. Често се користи импулсни однос $q=1/\tau$ који се креће у границама 5-10 и до 5 код електро-импулсне обраде.

Код *струјних импулса*, осим већ дате дужине пражњења, разликују се још:

I_p , A - *струја пражњења* (представља средњу вредност струје за време једног пражњења),

I_{sr} , A - *средња вредност радне јачине струје* - представља средњу аритметичку вредност струје која за време обраде тече кроз радни простор. Ова вредност се непрекидно региструје помоћу амперметра уграђеног на машини, вредност која је подешена на машини - средња енергија импулса,

Средња енергија импулса $W_i = U_p I_p t_p$, W/s која се у току једног пражњења претвара у топлоту, Пошто је t_j мало па је $W_i = U_p I_p t_i$,

Ефективна снага пражњења која се претвара у топлоту

$$P = W_i f = U_p I_p \tau, W,$$

Напон пражњења - $U_p = k E$,

k – степен наелектрисања кондензатора и

E, V – напон извора струјног кола.

Фреквенција пражњења – $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$, Hz,

Минимална вредност електричног отпора - $R_e = 60/\sqrt{C}$, Ω ,

представља вредност при којој не долази до обраде.

Енергија наелектрисања кондензатора - $Q = 0,5 U_p^2 C$, J и

Енергија која се користи на користан рад - $W = C U_p \eta$, J,

η – коефицијент искоришћења електричне енергије.

3.3 ОСТАЛИ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНЕ ОБРАДЕ

Остали значајни параметри при EDM обради су: брзина кретања и обртања електрода у процесу обраде њеним оптималним избором као и осталих параметара може се постићи одговарајући квалитет и тачност.

Табела 3.1 Параметри режима обраде за челик [1]

ВРСТА ОБРАДЕ	СНАГА ИЗВОРА НАПАЈАЊА P, kW	ВРЕМЕ ТРАЈАЊА ИМПУЛСА t_i , μ S	ФРЕКВЕНЦИЈА ИМПУЛСА f, Hz)	ПРОИЗВОДНОСТ ОБРАДЕ Q, mm ³ /min
ГРУБА	3 - 30	100 - 10000	50 - 3000	1000 -30000
ФИНА	0,3 - 5	20 - 500	1000 - 10000	20 - 30
ПОЛИРАЊЕ	ДО 1	ДО 20	ИЗНАД 3000	ДО 30

3.4 ПРОИЗВОДНОСТ КАО ТЕХНО-ЕКОНОМСКИ ПОКАЗАТЕЉ EDM ОБРАДЕ

Производност електроерозионе обраде је одређена количином скинутог материјала (g, mm^3) односно количином скинутог материјала у јединици времена (специфична производност). Специфична производност је одређена релацијом:

$$Q = Q_1 f = K_p (W_i - W_j) = K_p W_i f, \text{ mm}^3/\text{min} \quad (2.1)$$

или

$$Q = K_p P_e = K_p U_p I_p \tau, \text{ mm}^3/\text{min} \quad (2.2)$$

Q_1 – запремина материјала која се уклони за време трајања једног импулса.

$K_p, \text{ mm}^3/\text{Ws}$ – коефицијент пропорционалности, који зависи од врсте материјала електрода и осталих параметара којима се дефинишу услови обраде и

W_j, W_s – енергија јонизације, енергија која се троши на стварање јонизујућег стуба.

Производност зависи од низа фактора, најзначајнији су:

- врста материјала предмета обраде,
- параметара електричног импулса,
- материјала алата и његових димензија, површине (код жичаних електрода пречник жице),
- од врсте и основних карактеристика диелектрикума,
- интензитета и поступака испирања радног простора,
- брзине подешавања радног зазора и
- др.

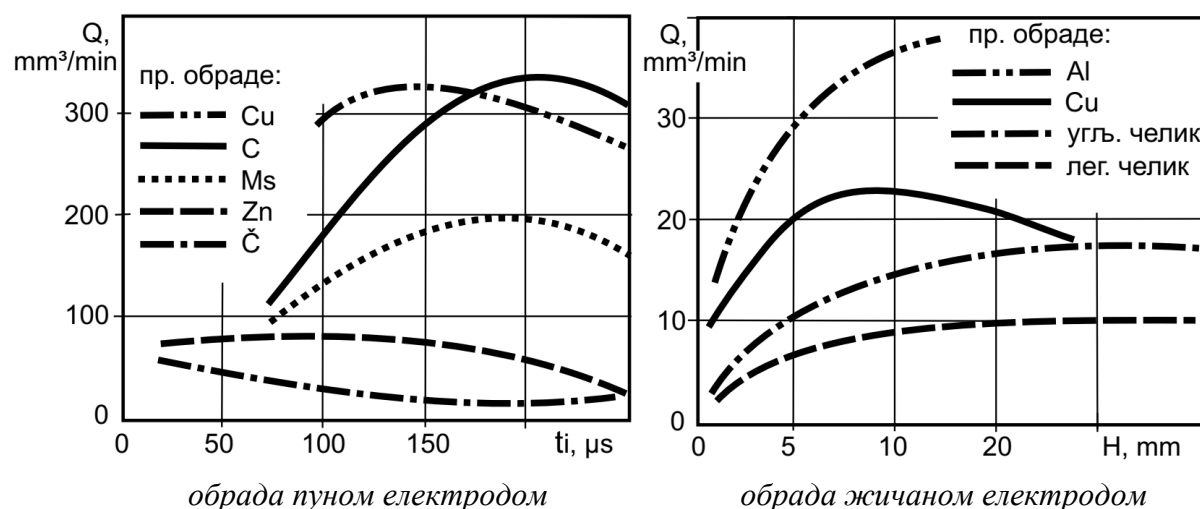
У поређењу са конвенционалним поступцима обраде (на пример сечење) електроерозиони поступци омогућују значајно повећање производности и смањење потрошње материјала.

3.4.1 Утицај материјала предмета обраде на производност

Електрерозионом обрадом се могу обрађивати само материјали који проводе електричну струју, а то су метали и њихове легуре, укључујући карбидну керамику. Обрадивост зависи од хемијског састава, док тврдоћа и друга механичка својства практично немају никаквог утицаја (слика 3.2). На пример челици се могу једнако ефикасно обрађивати пре и после каљења. Што је веома значајно јер се при каљењу неког сложеног алата, које се врши после механичке обраде, могу појавити такве деформације које умањују његову тачност и обично се не могу отклонити при брушењу као последњој операцији. Обрадивост појединих материјала се најчешће утврђује експерименталним путем. Обрадивост и производност су директно пропорционалне величине, уколико неки материјал има бољу обрадивост онда је и његова производност већа, при истим условима обраде (слика 3.2). Код обраде жичаном електродом обрадивост и производност зависе од дебљине материјала.

Сви материјали се не обрађују подједнако ефикасно, Па сваки од њих има своју

карактеристичну *обрадивост електроерозијом*. Као показатељи обрадивости могу се узети различити критеријуми као што су производност, квалитет обрађене површине, трошење алата-электрода, специфични утрошак енергије по јединици скинутог материјала и др.



Слика 3.2 Утицај материјала предмета обраде на производност [1]

Најчешће се производност оцењује на основу количине скинутог материјала у јединици времена. Обрадивост неког материјала, за одређене услове обраде, обрнуто пропорционална *кофицијенту Palatkina*, који гласи:

$$Kp = c \rho \lambda T_{top}^2 \quad (2.3)$$

где су:

- c , J/kgK – специфична топлота,
- ρ , kg/m – специфична густина,
- λ , W/mK – коефицијент топлотне проводљивости и
- T_{top} , K – температура топљења.

Табела 3.2 Релативна обрадивост електрерозијом [2]

МАТЕРИЈАЛ ПРЕДМЕТА ОБРАДЕ	РЕЛАТИВНА ОБРАДИВОСТ
Č0445	1,00
Конструктивни и алатни нисколегирани угљенични челици (челици за цементацију, челици са високом прокаљивошћу)	1,00 - 1,10
Сиви лив (SL 15 - SL 32)	0,60 - 1,00
Ватросталне легуре на бази Ni	1,40 - 1,60
Нерђајући челици	1,20 - 1,30
Алуминијум	1,50 - 1,70
Al-легуре	1,30 - 1,35
Магнетне легуре са високим садржајем: Ni, Cr и Al	1,30 - 1,60
ТМ - групе „P”	0,09 - 0,10
ТМ - групе „K”	0,14 - 0,30

Коефицијенти c , ρ , λ и T_{top} зависе од хемијског састава материјала, док тврдоћа и друге карактеристике материјала немају никакав утицај на електроерозиону обраду.

Коефицијент Palatkina показује који ће се од два материјала, при истим условима загревања брже загрејати до тачке топљења. Материјалу који има већи Кр треба више времена да се загреје до тачке топљења, па му је обрадивост електроерозијом лошија. Ако обрадивост конструктивног угљеничног челика С0445 узмемо као еталон (табела 3.2), онда експериментално можемо одредити релативну обрадивост других метала и њихових легура.

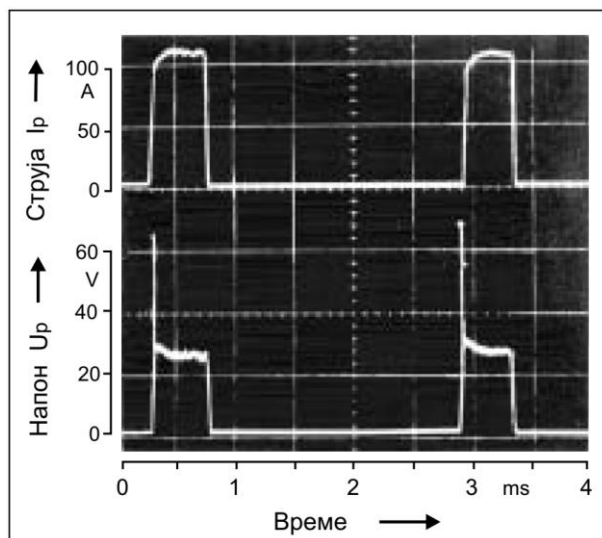
3.4.2 Утицај параметара електричног импулса на производност

Средња вредност енергије импулса која се за време једног пражњења претвара у топлоту може се изразити следећом једначином:

$$W_i = U_p I_p t_p, W_s \quad (2.4)$$

Код статичких генератора импулса време јонизације t_j је практично врло мало и може се као такво занемарити (слика 3.3). С обзиром да $t_{ep} = t_i - t_j$, $t_j \approx 0$, то је $t_p \cong t_i$. Заменом у једначину (2.4) се добија:

$$W_i = U_p I_p t_i \quad (2.5)$$



Слика 3.3 Осцилографски снимак струјног и напнског импулса код статичког генератора [2]

Ефективна снага пражњења представља средњу аритметичку вредност снаге која се у радном простору претвара у топлоту.

$$P_e = W_i f = U_p I_p t_i f = U_p I_p \tau \quad (2.7)$$

Производност електроерозионе обраде је пропорционална ефективној снази пражњења:

$$Q = q P_e = q U_p I_p f t_i = q U_p I_p t_i / t_i + t_o \quad (2.8)$$

q , $mm^3/Wmin$ — специфична производност која зависи од врсте материјала електроде и предмета обраде, као и других услова обраде, вредности ових кефицијента се добијају експериментално.

На производност електроерозионе обраде утичу:

- U_p - напон пражњења,
- I_p - струја пражњења,
- t_i - дужина елементарног импулса и
- t_o - дужина паузе између два узастопна пражњења.

У савремена постројења за електроерозиону обраду најчешће се уграђују генератори са транзисторским и тристорским управљањем. Они имају могућност независног подешавања напона празног хода U_j , струје пражњења I_p , дужине импулса t_i и дужине паузе t_o . Анализа утицаја ових параметара електричног импулса које производе ове врста генератора на производност и трошење електроде.

Напон пражњења U_p директно утиче на производност (једначина 2.8). Његова вредност практично зависи само од врсте материјала предмета обраде и електроде-алата и на њу се у датом случају не може утицати. Његова вредност варира између 15 и 25 V, зависно од напред наведеног утицаја и може се одредити једино експерименталним путем.

Зависност производности Q и релативног трошења електроде v од струје и дужине импулса, (слика 3.4/а) и у складу је са једначином (2.8). Повећањем струје, при константној дужини импулса, повећава се производност, али и трошење електроде. При константној струји, повећање дужине импулса до одређене вредности изазива пораст производности, а смањење трошења електроде. Даљим повећањем дужине импулса настаје пад производности, уз даље смањење трошења електроде. Дужина импулса којој за дату струју одговара максимална производност, представља *оптималну вредност*. Ова вредност се са повећањем струје импулса помера у правцу импулса веће дужине.

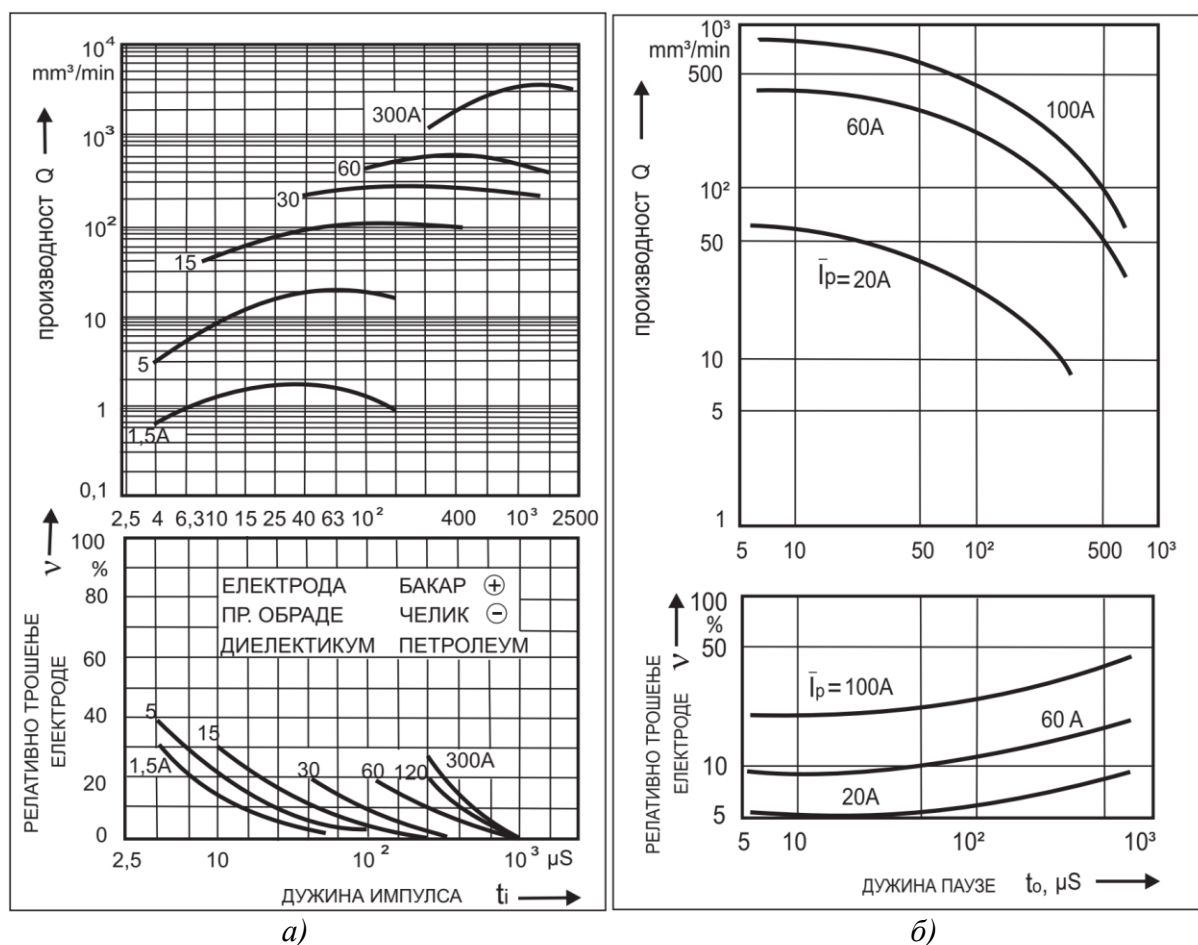
Из предходног можемо закључити да није могуће остварити максималну производност уз минимално трошење електроде.

Утицај дужине паузе t_o на производност и релативно трошење електроде приказује слика 3.4/б. Као што се са овог дијаграма види, за постизање веће производности, са мањим трошењем електроде, требало би да дужина паузе буде што мања. Међутим, искуство показује да скраћење паузе има границу, која зависи од струје и она се не сме прекорачити. У противном долази до стварања електричног лука који изазива знатно оштећење предмета обраде и алата-електроде.

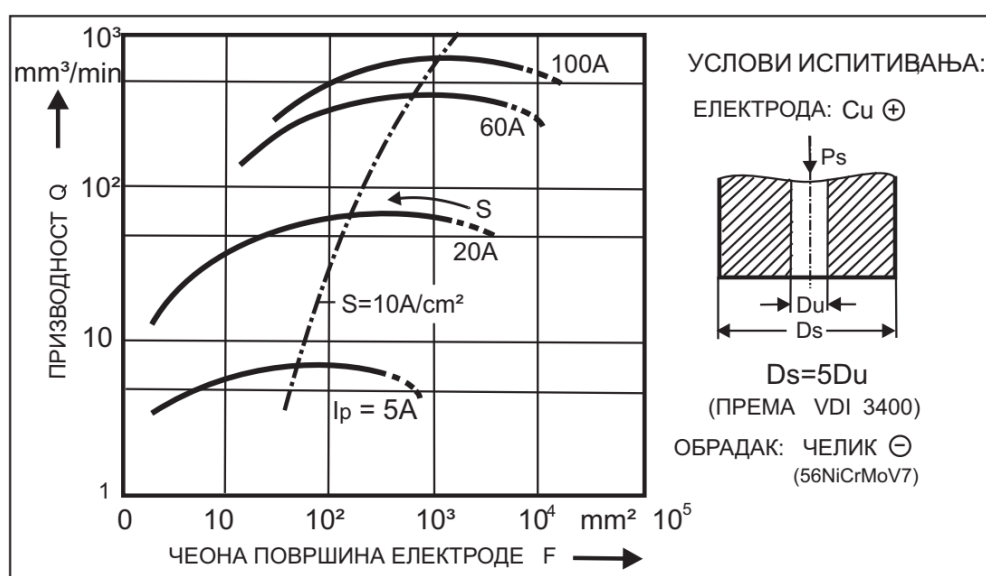
Повећање производности повећањем дужине импулса има своје границе, како је то претходно објашњено (слика 3.4/а). Даља могућност повећања производности је повећање јачине струје импулса. Међутим, и то је ограничено величином *теоретичке површине електроде*, која је дата у сваком конкретном случају обраде, односно, јачином струје по јединици површине – *густина струје* D . Онда се према дијаграму (слика 3.5), може уочити да после достизања густине струје од око 10 A/cm² долази до пада производности.

Ово се може објаснити тиме што се повећањем густине струје изнад 10 A/cm² остварује такав пораст количине скинутог материјала по јединици површине да се исти више не може довољно ефикасно одстранити циркулацијом помоћу диелектрикума. То доводи до поремећаја у радном простору у коме се више не може осигурати дејонизација канала за пражњење. Осим тога, при раду са великим густинама струје постоји опасност настајања дефеката у површинском слоју због великог термичког

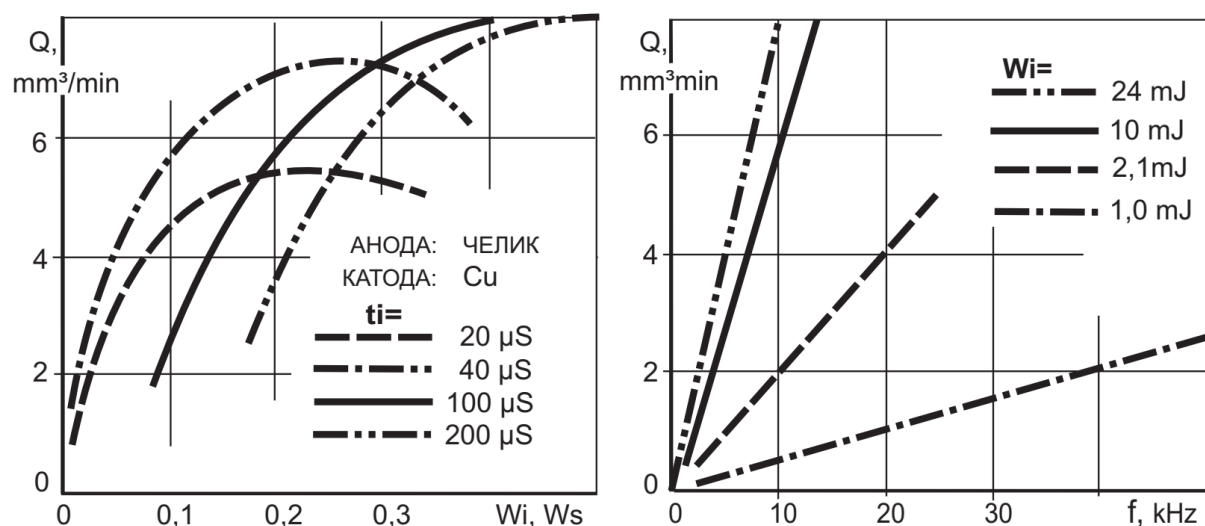
оптерећења. На основу напред изнетог у пракси се обично узима да оптимална густина струје при грубој обради износи око $2,5 \text{ A/cm}^2$, док се максимална могућа креће у границама од 5 до 10 A/cm^2 .



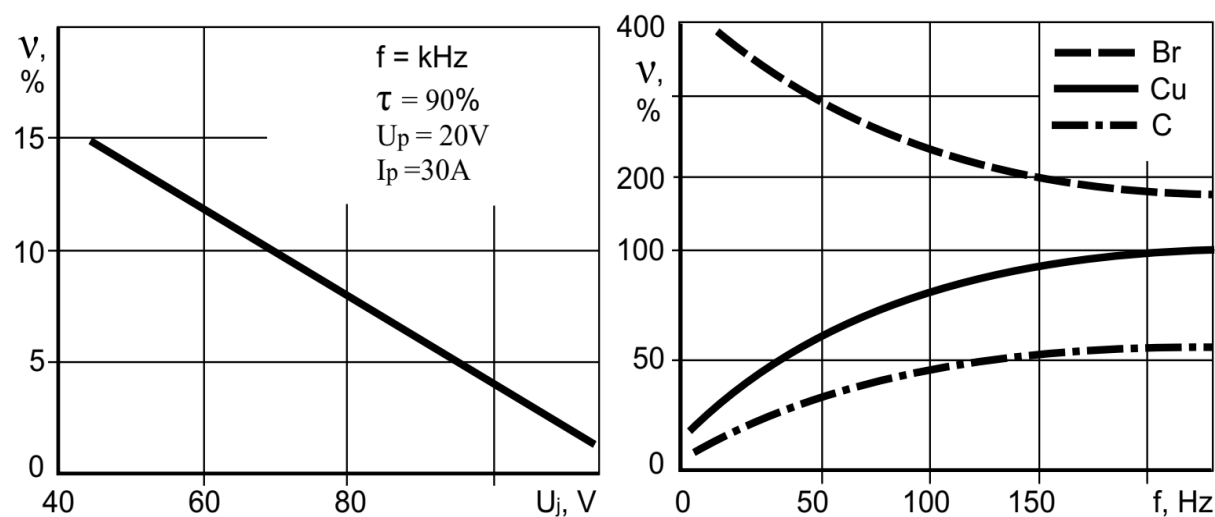
Слика 3.4 Производност и релативно трошење електроде у зависности од а) дужине импулса, б) дужине паузе при различитим јачинама струја пражњења [2]



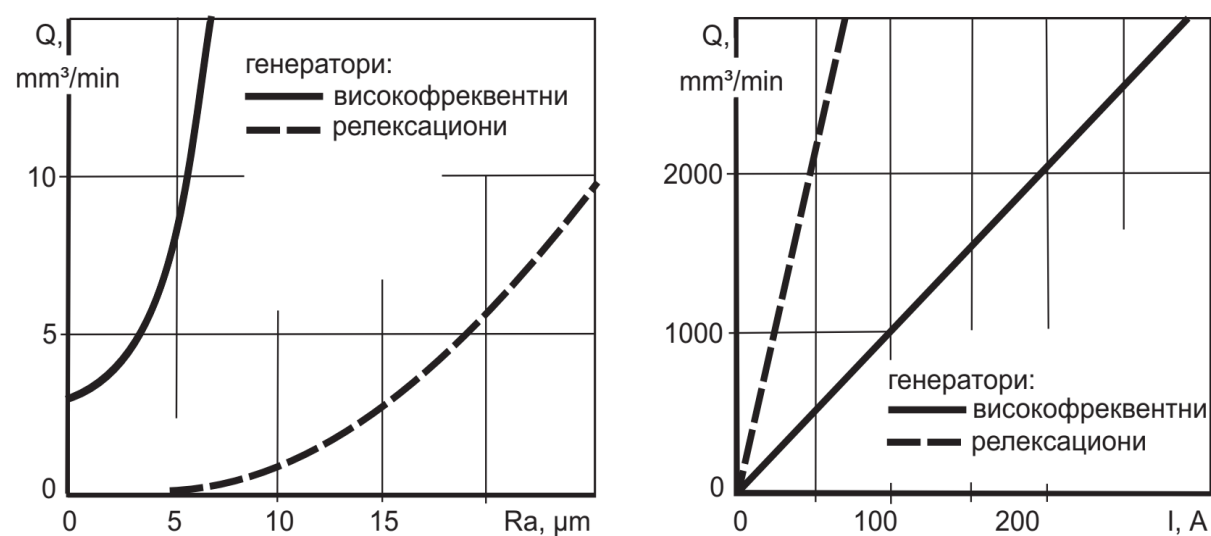
Слика 3.5 Зависност производности од величине чеоне површине електроде при различитим јачинама струје пражњења [1]



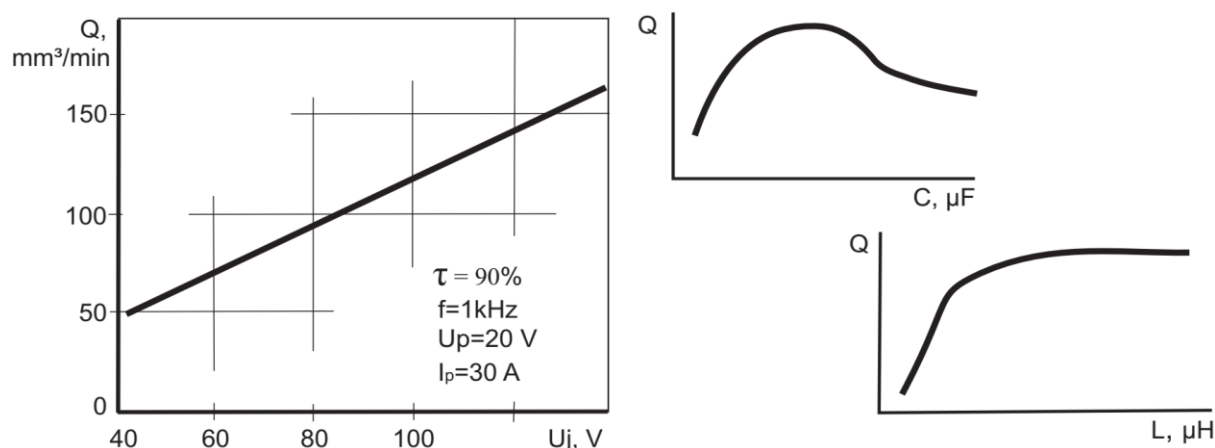
Слика 3.6 Утицај енергије и фреквенције импулса на производност [1]



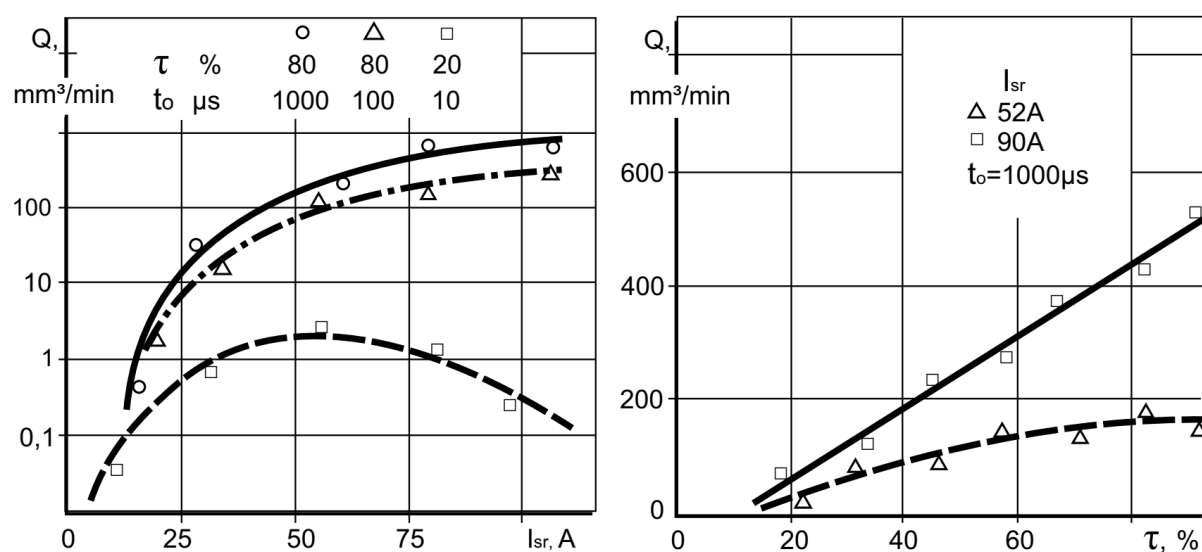
Слика 3.7 Утицај напона јонизације и фреквенције електричне струје пражњења на запреминско хабање алата [1]



Слика 3.8 Утицај врсте и карактеристика генератора импулсна на производност обраде [1]



Слика 3.9 Утицај напона пражњења и карактеристика генератора импулса на производност [1]



Слика 3.10 Утицај коефицијента деловања импулса и средње јачине електричне струје на производност [1]

Производност зависи од енергије импулса и фреквенције (слика 3.6), времена трајања импулса (слика 3.4/а), времена дејонизације (слика 3.4/б), јачине и напона електричне струје (слика 3.8 и 3.9), коефицијента деловања импулса и средње вредности јачине струје (слика 3.10) и карактеристика генератора импулса (слика 3.9) и других параметара

Утицај параметара електричног импулса зависи и од вредности чеоне површине алата.

3.4.3 Утицај диелектрикума на производност

Највније карактеристике диелектрикума су:

- вискозитет,
- температура паљења,
- специфична отпорност и
- брзина дејонизације.

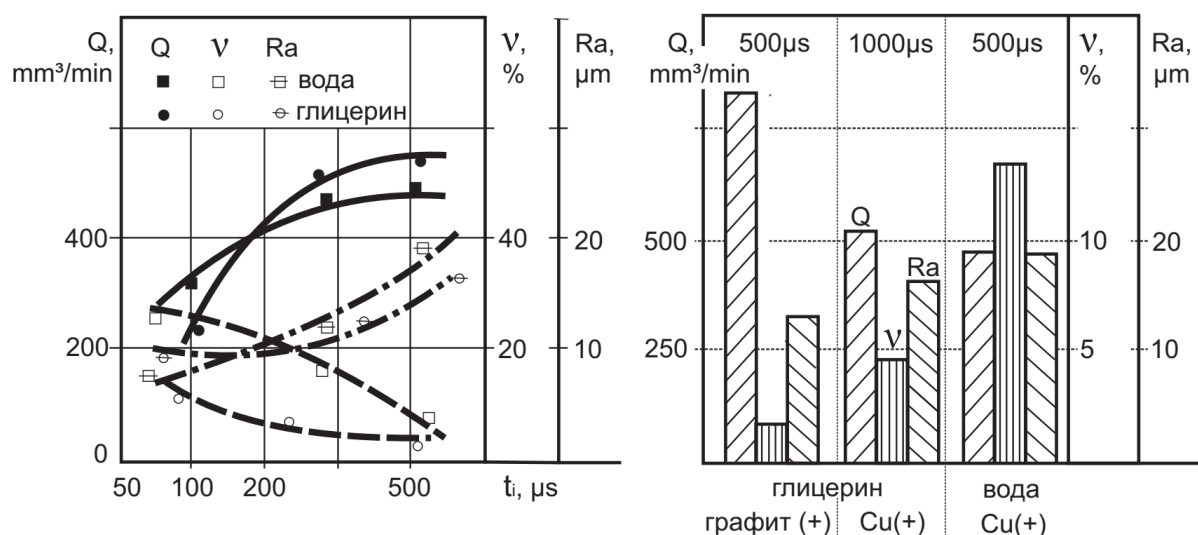
Диелектрикум већег вискозитета се користи код грубе обраде, а мањег код фине. То је у вези са радним зазором између предмета обраде и електроде који је код фине обраде врло мали и диелектрикум већег вискозитета би тешко циркулисао, па би тиме испирање радног простора било отежано што би се одразило и на производност при обради.

Температура паљења диелектрикума је такође важна карактеристика. Течности са нижом температуром паљења склоне су лакшем испаравању, па тако створени гасови ометају процес обраде и умањују производност.

За већу електричну отпорност диелектрикума потребно је дуже време премошћавања радног зазора, а мања може довести до појаве електричног лука. Из тих разлога тражи се оптимална вредност електричне отпорности и тако постиже повећање производности.

Брзина дејонизације течности утиче на смањење времена трајања паузе између два узастопна импулса и повећање производности обраде, када брзина дејонизације расте.

Утицај врсте и концентрације диелектрикума на производност при електроерозионе обраде дат је на сликама 3.11 и 3.12.



Слика 3.11 Утицај врсте диелектрикума на производност [1]

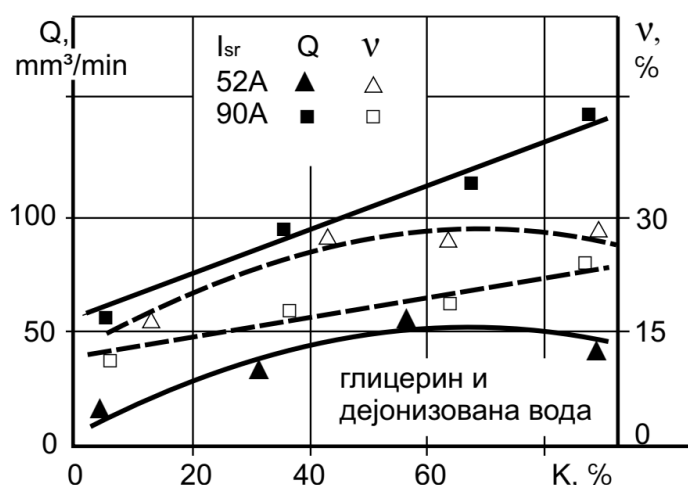
Код ерозионе обраде као диелектрикум се углавном користе:

- минерална уља,
- петролеј и
- дејонизована вода.

Минерална уља се најчешће користе као диелектрикуми. Скоро свака већа рафинерија у свету производи више квалитета ових уља. Уља великог вискозитета се примењују код грубе обраде, с обзиром да су радни зазори између обратка и електроде такви да омогућују добру циркулацију. Овим уљима се постиже већа производност.

Петролеум са својим врло малим вискозитетом је веома погодан за фину и врло фину обраду. Нарочито је погодан за обраду тврдог метала која се обавља кратким импулсима. Из еколошких разлога препоручује се употреба петролеума без мириса.

Дејонизована вода се као диелектрикум користи код обраде микро отвора, као и на машинама за сечење помоћу жице.



Слика 3.12 Утицај концентрације диелектрикума на производност [1]

Пошто се честа измена диелектрикума на једној машини не практикује, онда се диелектрикум бира према врсти обраде која се на дотичној машини најчешће изводи.

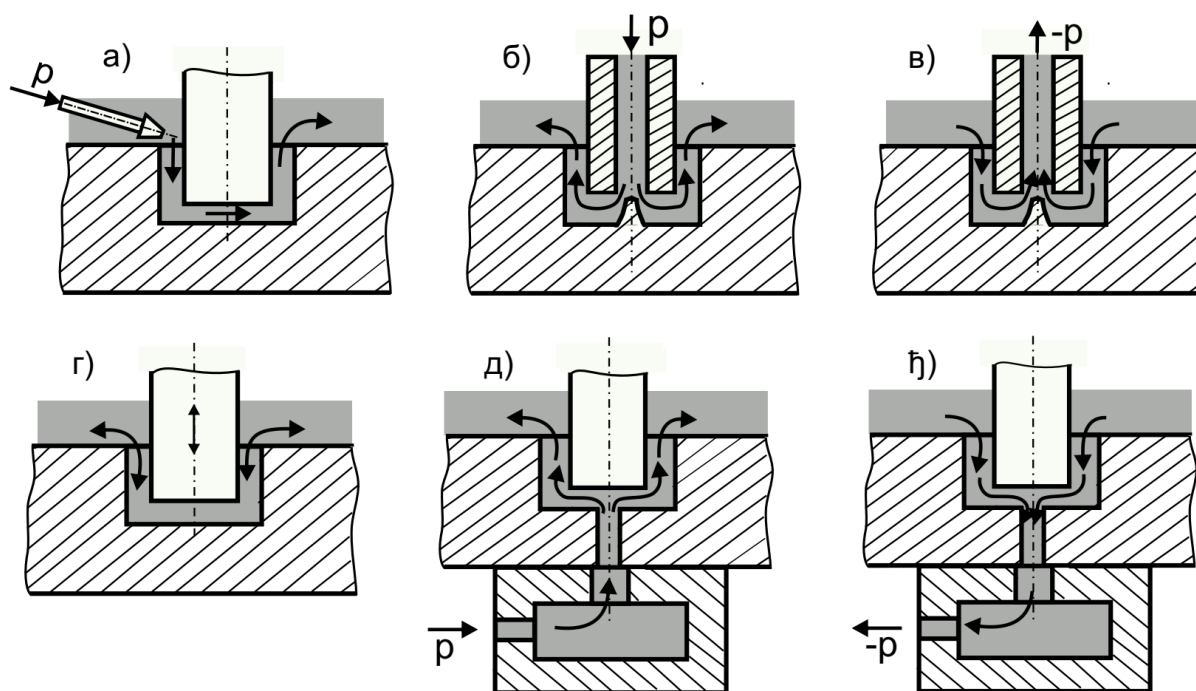
3.4.4 Утицај испирања радног простора на производност

Испирање радног простора се остварује циркулацијом диелектрикума кроз радни простор између електроде и обрадка и оно има велики значај за електроерозивну обраду.

Електрична отпорност чистог диелектрикума је већа него запрљаног, тако да је у том случају потребно више времена да се радни зазор „премости” и произведу прва пражњења. Продукти ерозије који настају првим пражњењима смањују отпор диелектрикума, што олакшава даља пражњења. Тиме се побољшавају радни услови. Уколико је садржај продуката ерозије на појединим местима радног простора превелик, онда то доводи до неправилних пражњења или појаве електричног лука. Ове појаве делују веома штетно на электроду и обрадак јер оштећује њихове радне површине. Према томе, испирање радног простора не сме да буде ни превише интензивно ни превише слабо. Интензитет испирања радног простора може се контролисати перманентним мерењем електропроводљивости диелектрикума, чиме су опремљене све савремене машине.

Испирање радног простора се може остварити *природним* или *принудним* путем. Природно испирање се остварује циркулацијом диелектрикума која настаје под дејством хидрауличних и акустичких таласа који се јављају при електричним пражњењима, као и због температурне разлике диелектрикума у радном простору и у кади. Природно испирање најчешће није довољно ефикасно, па се због тога морају примењивати различити начини принудног испирања радног простора од којих су најважнији приказани на слици 3.13.

Принудно испирање радног простора попречном циркулацијом диелектрикума, слика 3.12/а, је најједноставније, али се може применити само код малих дубина еродирања. На слици 3.12/б,в приказана су два начина циркулације диелектрикума кроз электроду и то: *под притиском* (б), који може имати стални или периодични–импулсни карактер и *усисавањем* (в). Исто то се може остварити и кроз обрадак, слика 3.12/д, ђ, с тим што се у датом случају бира економичније решење. Уздужним осциловањем, обртањем или периодичним одмицањем и примицањем електроде, настаје принудно таласање диелектрикума што доводи до испирања радног простора, слика 3.12/г.



Слика 3.13 Начини принудног испирања радног простора, а) попречном циркулацијом, б) кроз электроду под притиском, в) кроз электроду усисавањем, г) уздужним осциловањем електроде. д) кроз предмет обраде под притиском, е) кроз предмет обраде усисавањем [2]

Податке у вези принудног испирања радног простора, као што су притисак диелектрикума, амплитуда осциловања и др, дају произвођачи машина.

3.4.5 Утицај алата и материјала алата на производност

Као материјал за израду електроде–алата за електроерозивну обраду, најчешће се користе: *чист бакар* и *његове легуре*, *чист графит* и *његове легуре*, *алуминијумске легуре* (силумин), *чист волфрам* и *његове легуре*, *челик* и др.

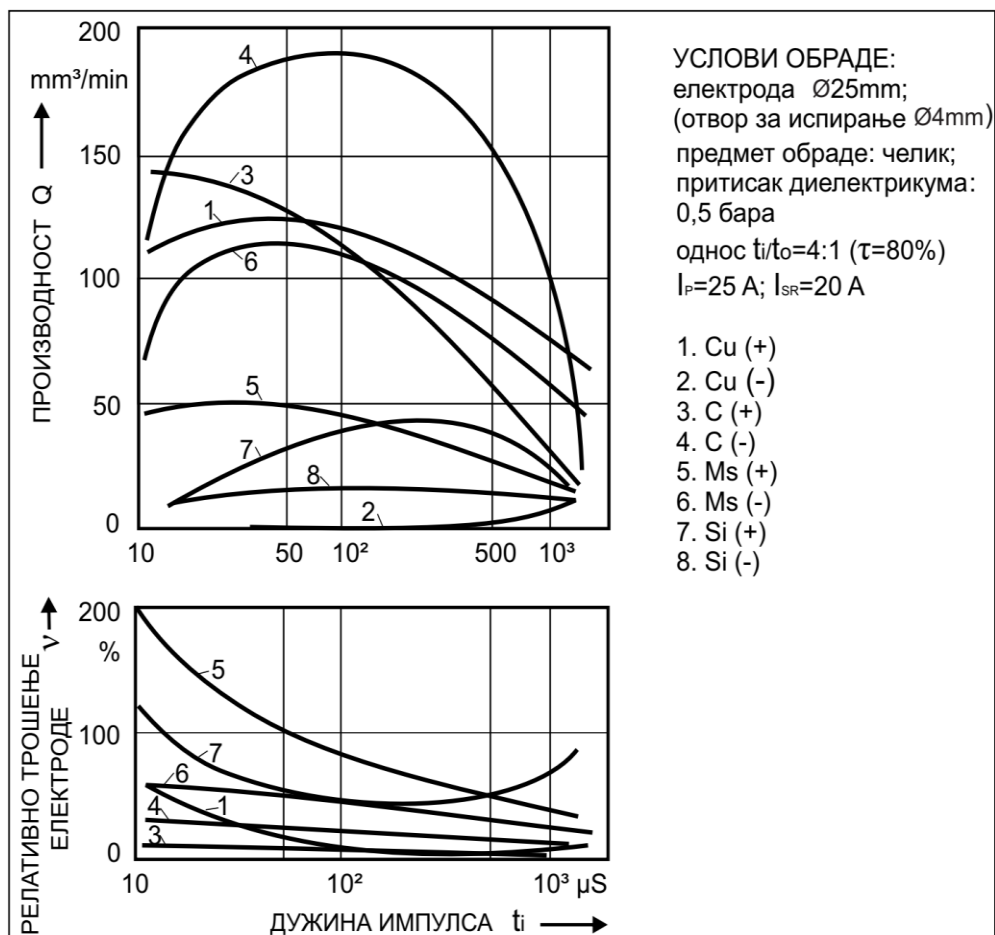
Од материјала електроде, раније је истакнуто, зависи *напон пражњења* U_p , а тиме и енергија импулса, односно производност. За њега су такође везана *топлотна својства* и *брзина дејонизације радног простора*. Тако сваком материјалу електроде одговара одређени ниво ефективне снаге која може практично да се реализује при датом напону генератора. Уколико је топлотна проводљивост материјала електроде већа, утолико је већа и ова снага, односно већа је и производност (слика 3.14).

Са дијаграма се може закључити да су графит и бакар најпогоднији за израду електрода јер дају највећу производност, уз најмање трошење електроде-алата.

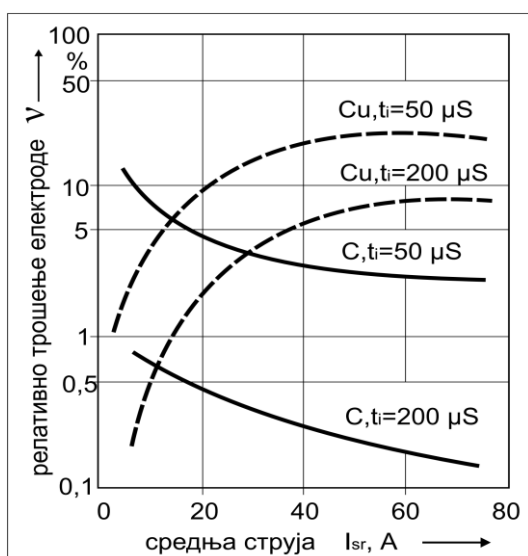
Ерозија са струјом мање јачине даје ниску стопу уклањања, док обрнуто јача струја даје висок степен уклањања. Међутим, хабање на алатној електроди, израженом као проценат запремине, такође се повећава ако су челични делови еродирани бакарним електродама. Графитне електроде се понашају другачије. Трошење се смањује на одређени ниво, а затим остаје мање или више константно.

Најчешће при електроерозији се користе бакарне и графитне електроде слика 3.15. Релативно трошење електроде у зависности од средње радне струје, код бакарне

електроде расте са повећањем јачине струје, код графитне се оно смањује. Код обе електроде долази до знатног смањења трошења електрода повећањем дужине импулса. При дужини импулса од $200 \mu\text{s}$ и средње јачине струје веће од 10A трошење графитне електроде пада испод $0,5\%$, што утиче на тачност обраде. Графитним електродама, добијају се оштре ивице, а са једном електродом се може изградити више делова.

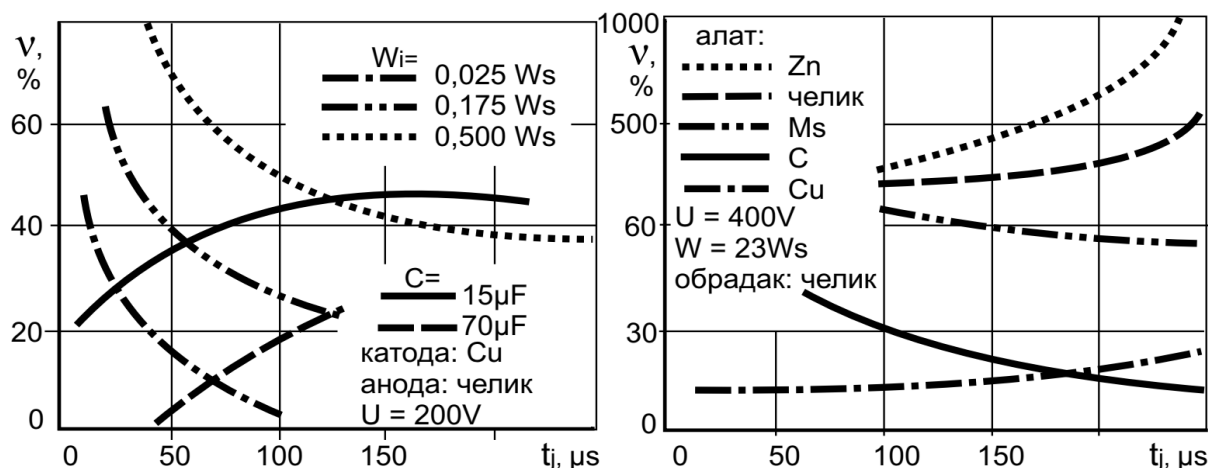


Слика 3.14 Зависност производности и релативног трошења електрода од дужине импулса за различите материјале електроде [2]

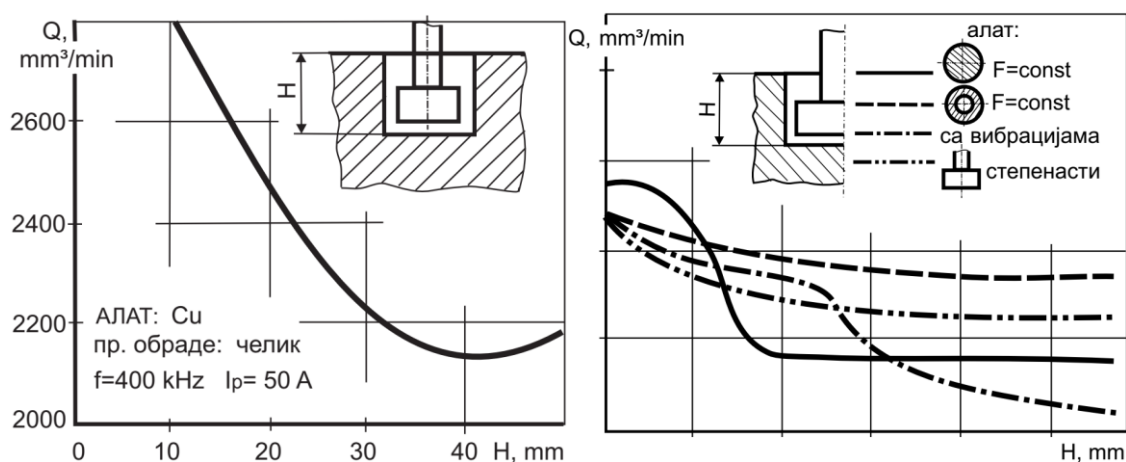


Слика 3.15 Релативно трошење електрода од бакра и графита у зависности од средње радне струје за различите дужине импулса [2]

У неким случајевима је могућа комбинација металних и неметалних материјала (графит-бакар). Ерозиона обрада са кратким импулсима значи повећање хабања електрода. Насупрот томе, хабање је мање када су импулси дуги. У пракси, код грубе обраде челика са бакарним и графитним електродама бира се дужина импулса између максималног уклањања и минималног хабања. На производност и релативно хабање алата утичу време трајања импулса, енергија пражњења, врста алатног материјала (слика 3.16), а поред тога и облик радне површине и дубина обраде (слика 3.17).



Слика 3.16 Утицај времена трајања импулса, енергије пражњења и врсте алатног материјала на запреминско хабање алата [1]



Слика 3.17 Утицај дубине обраде и облика радне површине на производност електроерозионе обраде [1]

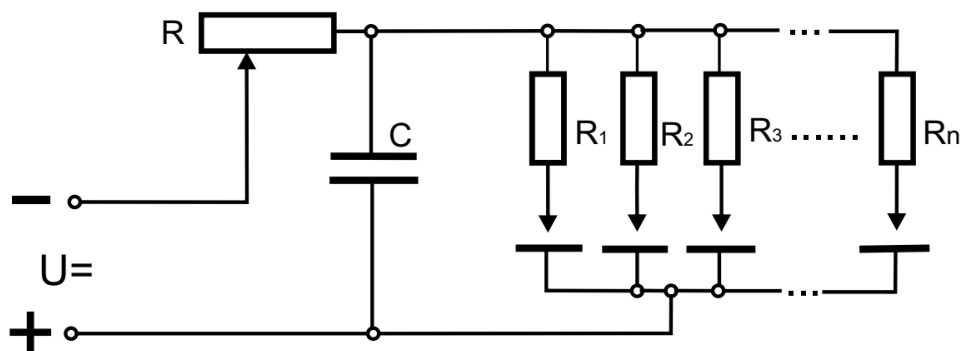
3.4.6 Поступци повећања производности EDM обраде

Повећање производности поред предходно набројаних фактора се може постићи, коришћењем поступака вишепозиционе обраде (слика 3.18), који су једноставнији и економичнији од вишепозиционе обраде код конвенционалне обраде, производност се битно повећава износи:

$$Q_v = K_j n Q_1, \text{ mm}^3/\text{min},$$

K_j - коефицијент неравномерности процеса,

n - број позиција обраде.



Слика 3.18 Шематски приказ вишепозиционе обраде [1]

Електроимпулсна обрада омогућује повећање производности, јер је брзина обраде 5-8 пута већа. Поред повећања брзине резања за овај поступак је потребно 3-5 пута мање енергије и хабање алата је мање за 5-20 пута. Међутим тачност и квалитет обраде су знатно нижи него при електроискричним поступцима обраде.

Табела 3.3 Упоредни преглед ефеката обраде неких конвенционалних и неконвенционалних поступака обраде [2]

Врста обраде	Производност mm ³ /min	Утрошак енергије J/mm ³	Снага машине kW	Храпавост обрађене површине Ra, μm
Стругање и глодање	до 100000	1 - 10	5 - 50	1,6 – 12,5
Бушење	5000 - 100000	5 - 200	5 - 150	0,2 – 3,2
Електроерозија	5000	100 - 1000	10	3,2 - 12,5
Обрада плазмом	100000	500 - 1000	50 - 150	6,3 - 12,5
Обрада снопом електрона	10	1500	100	0,8 – 6,3
Обрада ласером	5	до 30000	5 - 15	0,8 – 6,3
Електрохемијска обрада	15000 - 25000	10 - 100	200	0,4 – 6,3
Обрада ултразвуком	10000	1000 - 3000	1 - 5	0,3 - 0,8
Обрада воденим млазом	до 30000	200 - 400	10 – 70	0,4 – 12,5

3.5 ТАЧНОСТ ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНЕ ОБРАДЕ

Тачност електроерозионе обраде зависи од више фактора, а углавном од следећих: фактора везаних за саму машину, тачност израде електроде, топлотне дилатације електроде при обради, промене радног зазора, трошење електроде и др.

Фактори везани за машину су последица несавршености органа машине и одражавају се на тачност електроерозије исто као и код других врста обраде. Маchine утичу на тачност обраде путем грешака позиционирања електроде у односу на предмет обраде, недовољне крутости машине, грешака у вођењу електроде, недовољне осетљивости уређаја за померај и др. Ове грешке код савремених EDM - машина свODE се на врло малу меру, која представља једну од њених константних карактеристика.

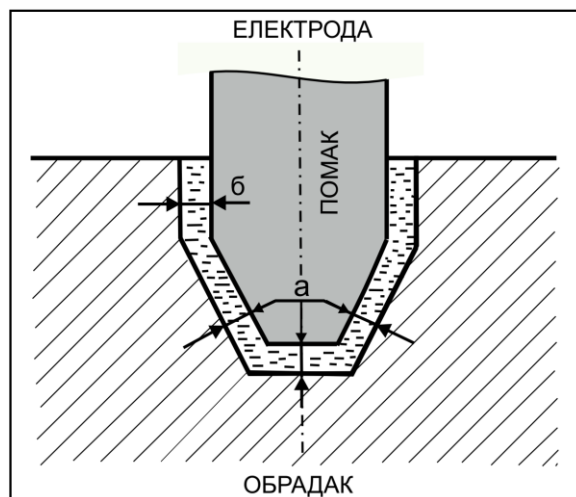
Тачност израде електроде се директно одражава на тачност обраде. Било која грешка везана за мере или облик електроде директно се пресликава на предмет обраде. Због тога се приликом поступка израде електроде строго мора водити рачуна о избегавању појаве грешака у тој фази. Практична искуства показују да се електроде морају израђивати са двоструко већом тачношћу у односу на ону која треба да се добија поступком електроерозије, да би се у случају хабања електроде неутралисале могуће грешке.

Грешке могу настати и због разлике у ширењу материјала предмета обраде и електроде (услед различитог коефицијента ширења, нпр. челика и бабра), могу имати утицаја најчешће при грубој обради или код обраде великих површина, када температура диелектрикума може да изнесе око 40°C . Ово питање се решава коришћењем уређаја за хлађење у систему за циркулацију и пречишћавање диелектрикума. Тако је могуће температуру диелектрикума аутоматски одржавати на нивоу који изазива незнатно ширење електроде и предмета обраде, па ова грешка губи на значају.

Радни зазор је простор који раздваја электроду и предмет обраде приликом електроерозионе обраде. Постоје две врсте радног зазора (слика 3.19):

Чеони зазор (а) – представља нормално растојање између површина предмета обраде и електроде, које стоје под одређеним углом у односу на правац помоћног кретања и преко њега се остварује електрично пражњење,

Бочни зазор (б) – представља нормално растојање између површина предмета обраде и електроде, које су паралелне са правцем помоћног кретања и преко њега се не остварује електрично пражњење. То значи да величина бочног зазора већа од величине чеоног зазора.

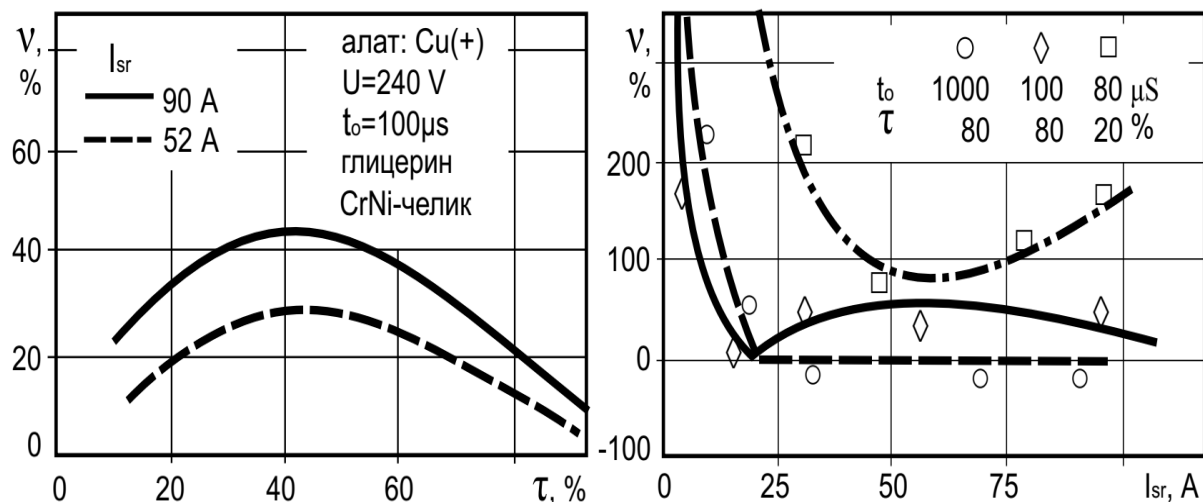


Слика 3.19 Зазори при електроерозионој обради [2]

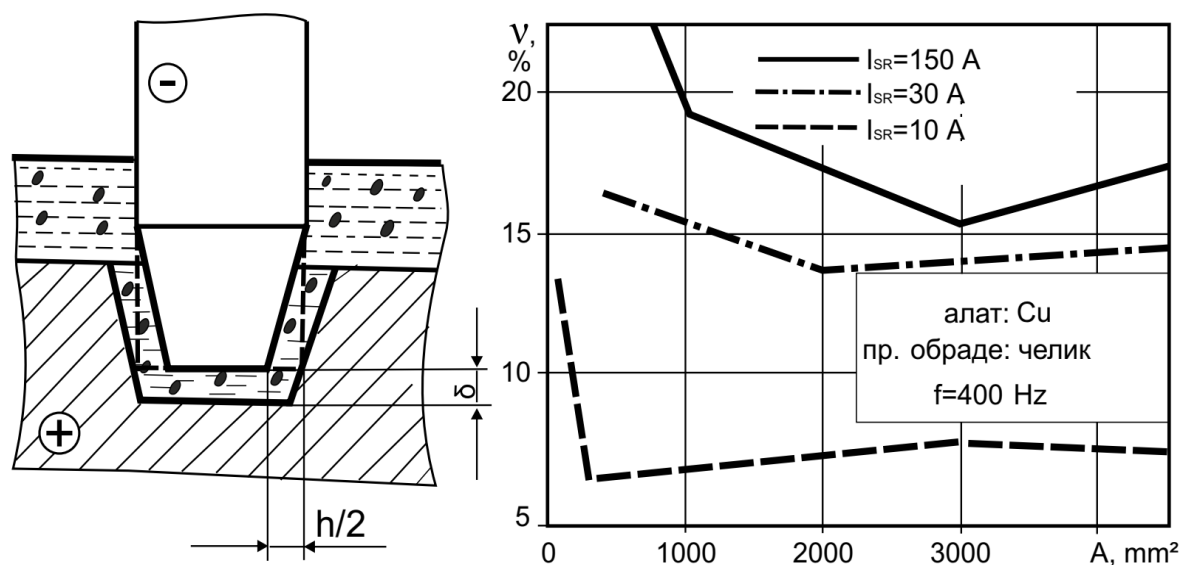
Радни зазори се, за дате услове обраде, одређују на основу параметара електричног импулса. Податке о томе дају произвођачи машина за електроерозиону обраду. У процесу обраде се остварује аутоматско регулисање величине чеоног зазора уз помоћ уређаја за померај електроде, док бочни зазор остаје скоро непромењен током процеса обраде. Чак и код мале дубине сечења мора се направити разлика између чеоног и бочног зазора. Чеони зазор је одређен контролним системом, док бочни зазор зависи од трајања и висине импулса пражњења, комбинације материјала, напона без оптерећења и друге унапред одређених вредности.

Овако дефинисани радни зазори практично не утичу на тачност обраде, обзиром да се разрађују при конструкцији електроде. На тачност обраде утичу само њихове промене у току обраде, које су последица пре свега варијација струје импулса. Ове грешке је веома тешко предвидети, а правилним избором, подешавањем и контролом параметара електричног импулса могу се свести на вредност која је занемарљива.

Велики утицај на тачност електроерозионе обраде има *трошење електроде*. Оно највише зависи од електричних параметара који се подешавају генератором импулса, од материјала и од услова који се остварују приликом процеса обраде (слике 3.20 и 3.21). Грешке које се јављају због трошења електроде су грешке коничног отвора и смањење дубине еродирања.

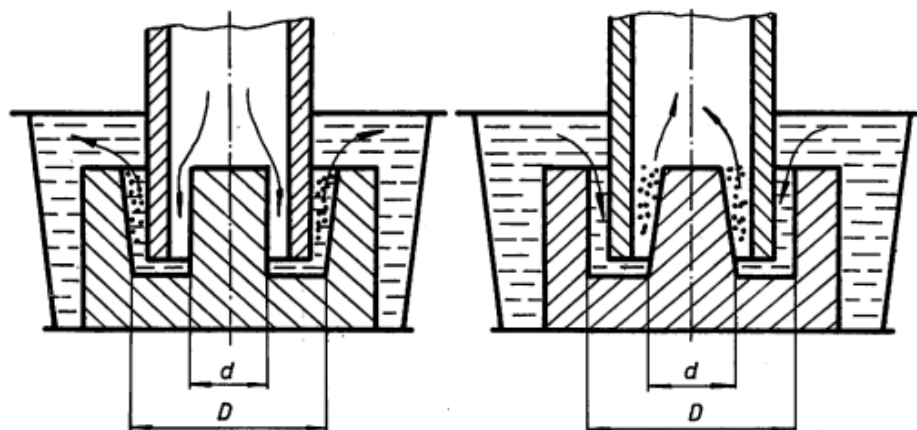


Слика 3.20 Утицај коефицијента деловања импулса и средње јачине електричне струје на хабање алата [1]



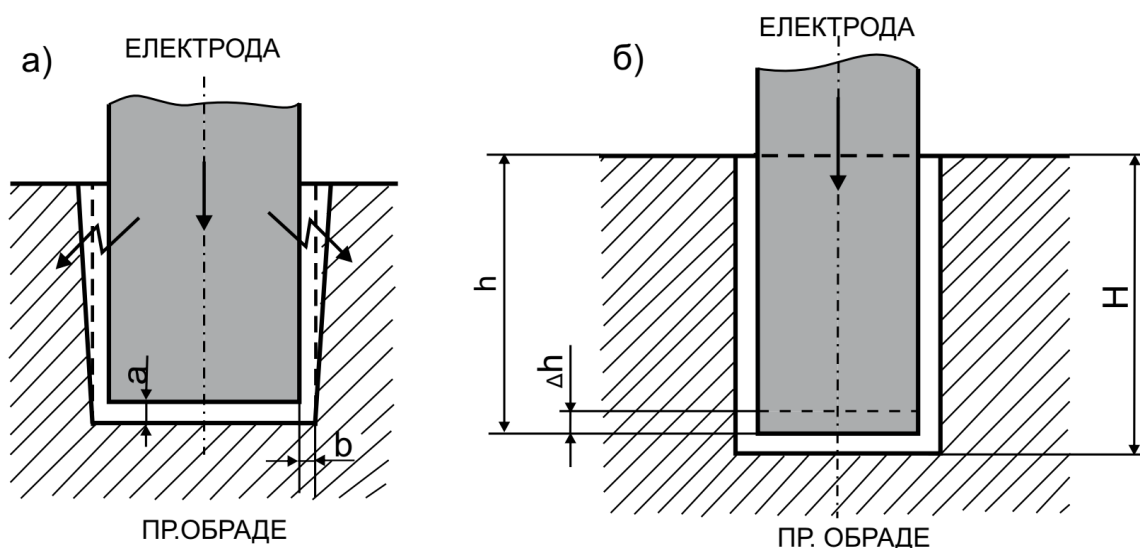
Слика 3.21 Грешка услед хабања алата и утицај средње јачине струје и површине алата на релативно запреминско хабање [1]

Грешке коничног отвора (слика 3.23/а) - настају због бочног трошења електроде до кога долази услед непожељног бочног пражњења преко продуката електроерозије. Ова грешка се може смањити применом принудне циркулације диелектрикума усисавањем кроз электроду или предмет обраде (слика 3.22).



Слика 3.22 Утицај начијна довођења диелктрикума на тачност израде отвора [1]

Смањење дубине еродирања (слика 3.23/б) – настаје због чеоног трошења електроде Δh . Ова грешка се може у простијим случајевима обраде узети у обзир приликом конструкције електроде. Много чешће се избором свих параметара обраде утиче да ова грешка буде што је могуће мања и да се као таква занемари.



Слика 3.23 Грешке због трошења електроде при елктроерозионој обради [2]

Чеono трошење електроде се не распоређује равномерно по читавој површини електроде, већ се највеће трошење остварује на оштрим ивицама и у близини отвора за испирање. На равним ивицама електроде се врло мало троше. Због тога, трошење електроде се не изражава линеарно већ у виду релативног запреминског трошења v .

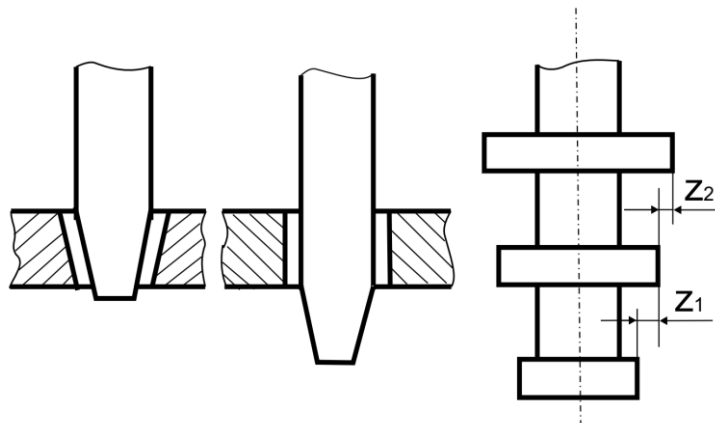
$$v = (Vel/Vob) 100\% \quad (3.0)$$

Vel – запремина потрошеног материјала електроде,

Vob – запремина скинутог материјала предмета обраде

Услед неравномерног хабања алата на оштрим ивицама и у близини отвора за испирање јављају се грешке мера и облика обратка. Трошење електроде-алата се може смањити, правилним избором параметара процеса као и разним конструктивним решењима алата (слика 3.24).

Код скупих електрода сложеног геометријског облика, за обраду гравура, као што су ковачки калупи, ливачке кокиле и др., бирају се такви параметри обраде који дају минимална трошења електроде. Углавном се за обраду оваквих површина примењује неколико електрода, а релативно мало трошење електроде при обради се не узима у обзир при пројектовању и изради електроде.



Слика 3.24 Конструктивна решења алата за повећање тачности обраде [1]

Најчешће се обрада изводи са две (груба + фина) или три (груба + средња + фина) електроде. Највећи део материјала се скида електродом за грубу обраду и то са параметрима електричног импулса, којима се остварује врло мало трошење електроде (испод 1%). За фину обраду, односно средњу и фину, оставља се онолико материјала колико је потребно да се уклоне неравнине и дефекти у површинском слоју, који су настали приликом грубе обраде. Трошње електроде при финој обради не утиче много на тачност обраде, иако оно може бити знатно веће него при грубој обради, због веома мале количине материјала која се скида.

Узимајући у обзир све предходно објашњене грешке које могу утицати на тачност електроерозионе обраде, долази се до збирног одступања. Оно зависи од мера које се остварују при обради. Табелом 3.4 дат је преглед уобичајних тачности за најважније материјале предмета обраде и електроде.

Табела 3.4 Уобичајене тачности при електроерозионој обради [2]

Материјал предмета обраде	Материјал електроде	Збирно одступање хоризонталне мере за обрађивану меру у (mm)					
		25	50	100	200	400	800
Челик	Алуминијум	0.04	0.05	0.06	0.1	0.2	0.4
Ватро-отпорне легуре	Бакар	0,04	0,04	0,045	0,06	0,1	0,16
	Графит	0,04	0,05	0,05	0,1	0,16	0,32
Тврди метал	Бакар	0,04	0,05	0,05	0,1	—	—
	Графит	0,04	0,04	0,045	0,06	—	—

Пошто технологија електроерозионе обраде веома брзо напредује, може се рећи да су одступања из таблице знатно смањена. Развојем система планетарног еродирања, омогућено је практично постизање толеранција израде при завршној обради, које износе мање од 0.01 mm, што задовољава и најстрожије захтеве примене EDM - обраде.

3.6 КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ

Квалитет обрађене површине, као и других врста обраде, подразумева не само храпавост, већ и стање површинског слоја материјала предмета обраде (структура и састав, заостала напрезања, експлоатацијске особине као што су заморна чврстоћа отпорност на хабање и корозију).

Обрађена површина, добијена поступком електроерозионе обраде битно се разликује од оне која се добија класичним (конвенционалним) поступцима обраде и резања. Површина која се добија класичним поступцима обраде резањем има трагове који потичу од резног алата, док је површина добијена поступком електроерозије састављена од мноштва ситних кратера одређеног пречника и дубине. На рубовима ових кратера формирају се такозване пукне, које су заостале приликом избацивања растопљеног материјала из кратера, и оне знатно повећавају храпавост обрађене површине. Површине формиране електроерозионим и конвенционалним поступцима обраде се значајно разликују по експлоатационим особинама површинских слојева. Експлоатацијске особине површинских слојева добијених електроерозионим поступцима обраде су знатно боље од експлоатацијских особина површинских слојева формираних конвенционалним поступцима обраде.

Разликује се *храпавост на чеоним површинама* (површине које стоје под углом у односу на правац помераја) и *храпавост на бочним површинама* (површине које су паралелне са правцем помераја). На чеоним површинама храпавост је углавном већа за око 20 - 40% у односу на храпавост на бочним површинама. Због тога се приликом израде просторних гравура врши одређено смањивање дужине импулса, непосредно пре достизања коначне дубине (0,04-0,05 mm), да би се остварило изједначавање храпавости чеоних и бочних површина.

Оцена класе храпавости обрађене површине према JUS и ISO стандардима за храпавост површине је превише груба. Због тога су уведене посебне VDI норме којима се десет класа храпавости према ISO (JUS) тј. од N3 до N12, дели на 51 класу (0-50). Веза између VDI класа за храпавост и вредности средње аритметичке храпавости Ra (μm) може се приближно изразити једначином: $VDI\text{-класа } Nr = 20 \log (10Ra)$.

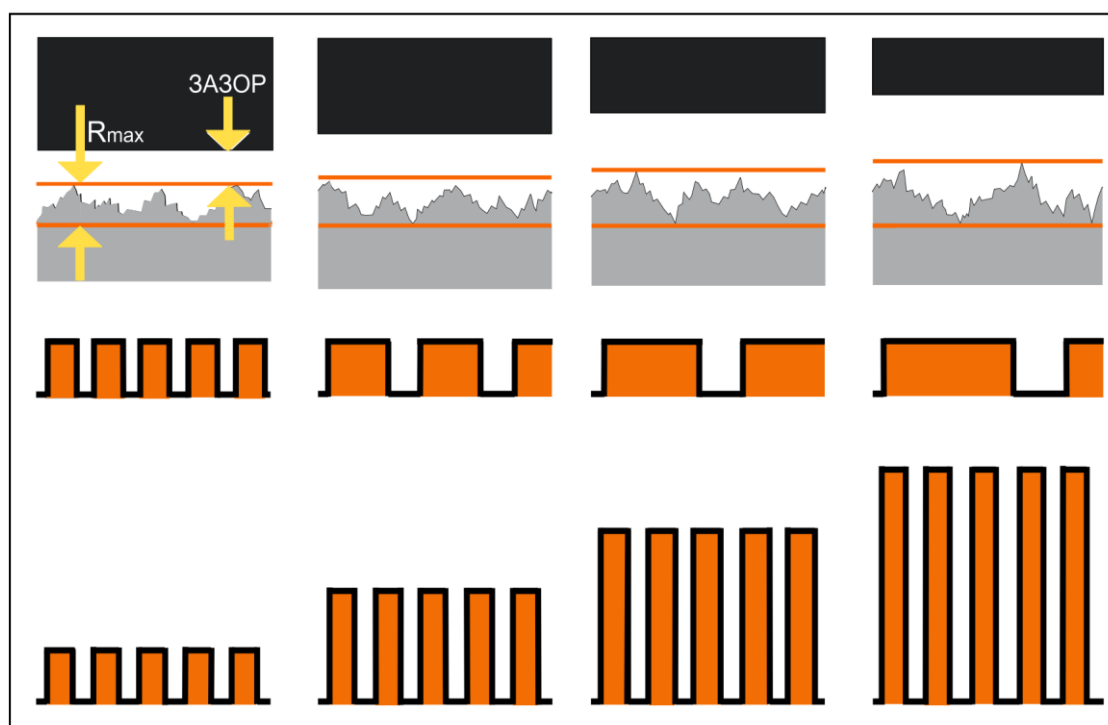
На бази једне овакве поделе одабрано је 12 VDI класа, које одговарају дијапазону од најфиније до најгрубље обраде, за које су направљени еталони, којима се врши упоредно одређивање храпавости обрађене површине (слика 3.25). Ове еталоне користе технолози приликом прописивања класе храпавости површине, односно радници на машинама за контролу при обради.

Квалитет обрађене површине при електроерозионој обради углавном зависи од: параметара електричног импулса, врсте диелектрикума, материјала електроде, топлотно-физичких својстава материјала предмета обраде и др.

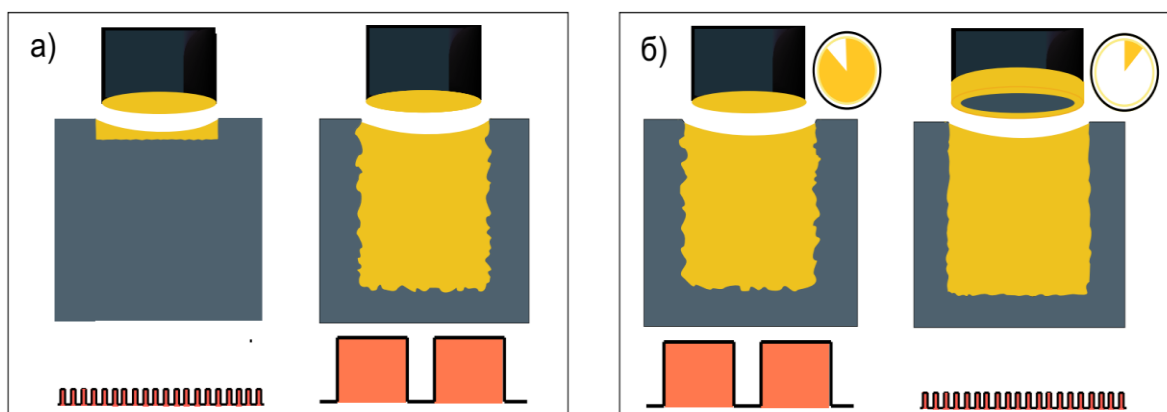
Од параметара електричног импулса (слике 3.28, 3.29 и 3.30), *енергија импулса* има највећи утицај на храпавост обрађене површине. Како је напон пражњења U_p приближно константан за одређену врсту упарених материјала предмета обраде и електроде, то се на храпавост површине практично може утицати променом јачине струје I_p и дужине импулса t_i . Узимајући у обзир ове утицаје направљен је дијаграм који је приказан сликом 3.28.



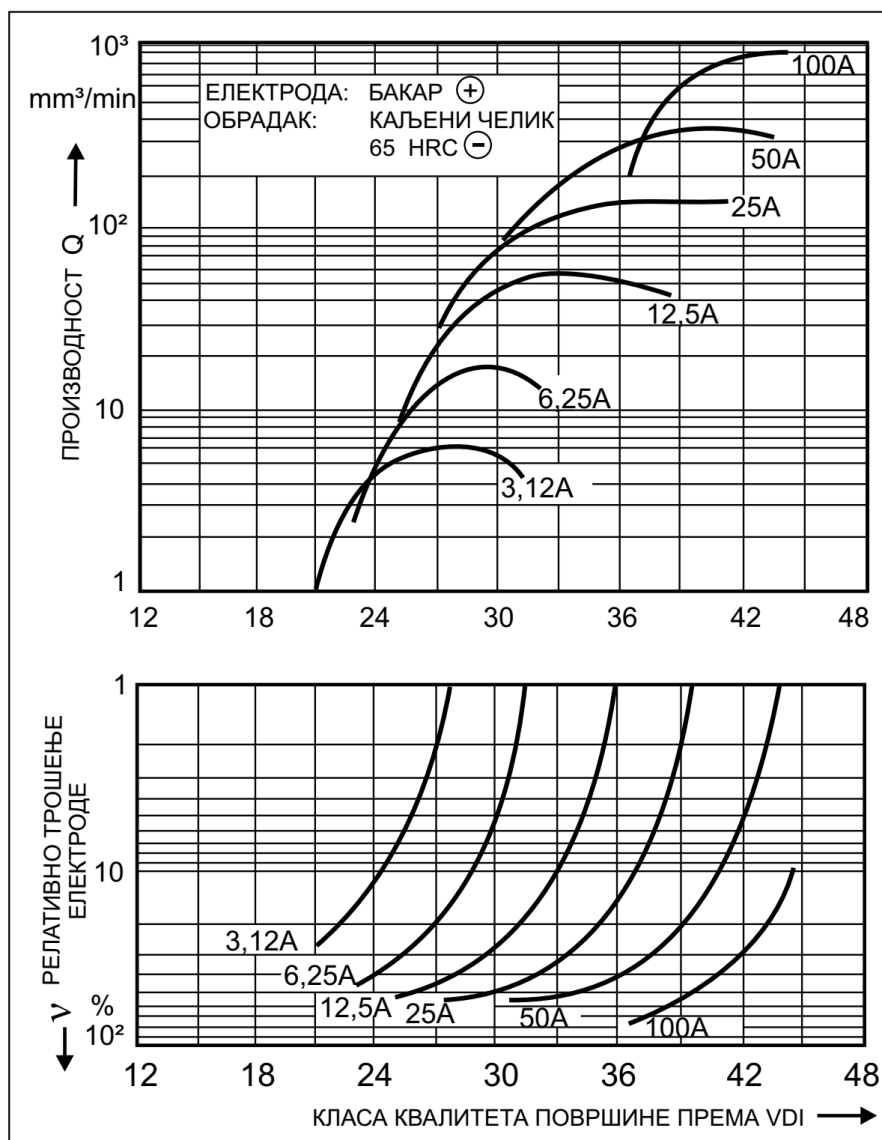
Слика 3.25 Еталон за визуелну оцјену храпавости обрађене површине



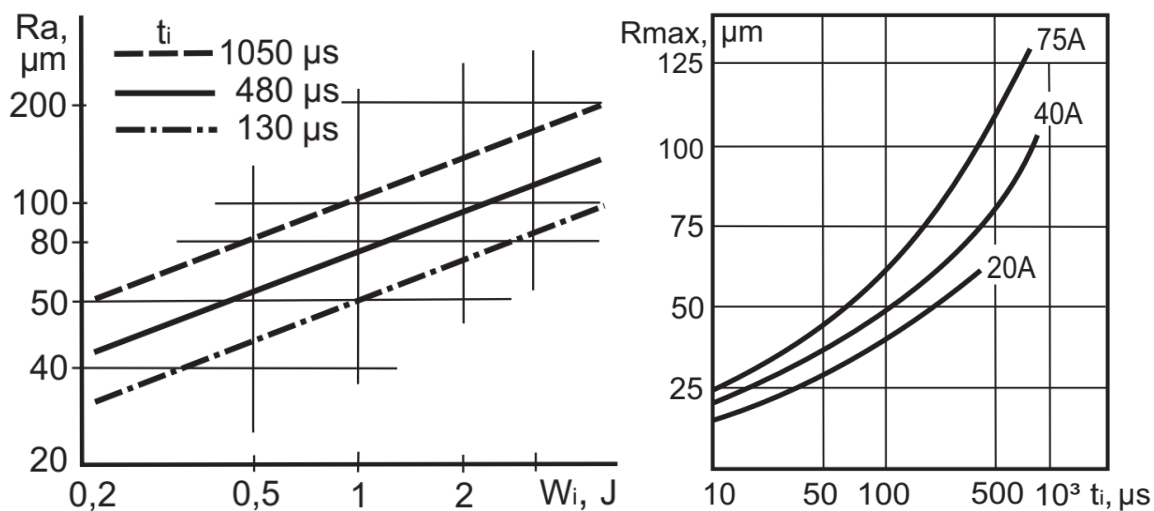
Слика 3.26 Параметри храпавости и зазор између електрода у зависности од енергије импулса пражњења при електроерозионој обради [9]



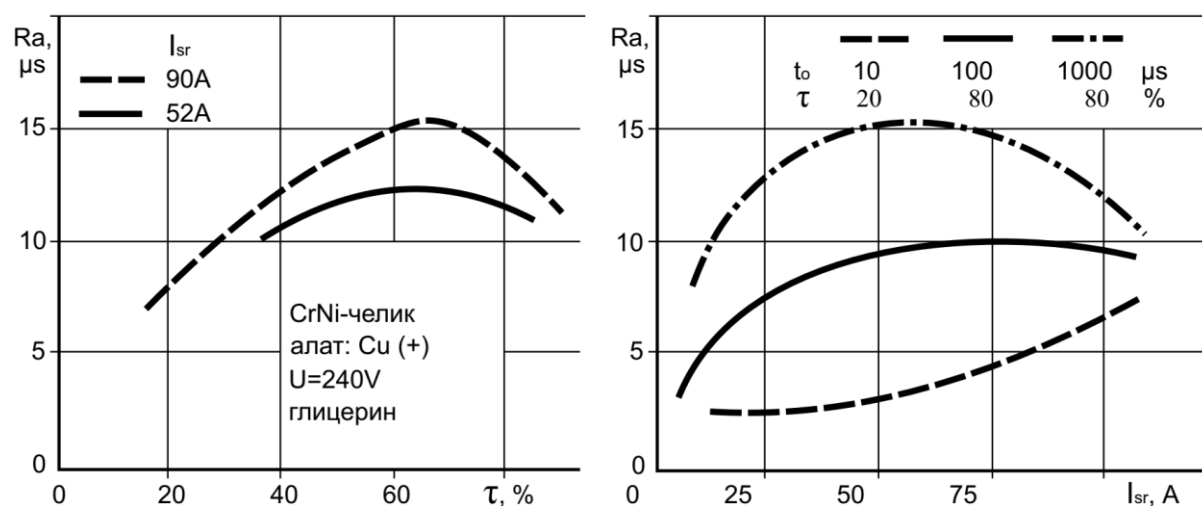
Слика 3.27 Квалитет површине и производност у зависности од енергије импулса и дужине времена обраде при електроерозионој обради [9]



Слика 3.28 Зависност производности и релативног трошења електроде од класе храпавости површине при различитим средњим радним струјама [2]



Слика 3.29 Утицај параметара електричног импулса на вредности параметара храпавости обрађене површине [1]



Слика 3.30 Утицај коефицијента деловања импулса и средње вредности јачине струје на вредност параметара храпавости [1]

Иако се при обради електричним импулсима, чија је енергија врло мала (мала јачина струје и мала дужина импулса), могу добити површине класе храпавости N3 до N4, то се ипак не практикује због веома ниске производности и веома великог трошења електроде-алата. Ако је потребно да се оствари бољи квалитет обрађене површине од оног који се економично добија поступком електроерозије, онда се то постиже накнадном механичком обрадом (полирање или леповање). Неке фирме су направиле посебне врсте генератора само за фину обраду (суперфиниш и полирање), којима се економично може постићи квалитет који одговара оном који се добија механичким полирањем. Овим поступком се значајно повећава завршна тачност облика ситних детаља на гравури који се не може остварити ручним полирањем (ковање металног новца медаља итд.), који имају много ситних детаља.

Површинска храпавост и зазор зависе од енергије пражњења, која је пропорционална површини тренутног импулса (слика 3.26). Енергија импулса је представљена површином наранџасте боје. Са слике видимо да је храпавост мања при обради са мањом енергијом импулса пражњења. За постизање одређеног квалитета обрађене површине, мора се ускладити енергија пражњења, која се мора постићи одговарајућим подешавањем струје пражњења (висине импулса) и времена пражњења (ширине) импулса. Компромис између максималне ерозије и минималног хабања алата бирамо из опсега могућих.

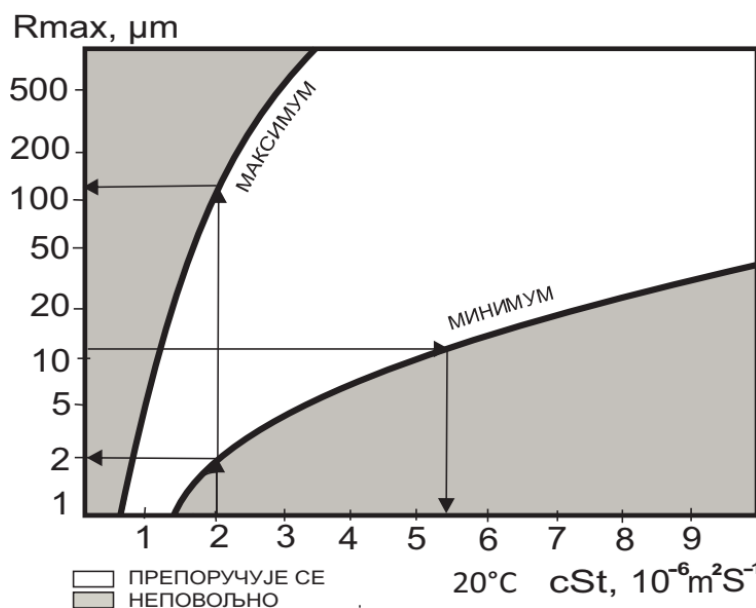
Обраду предмета обраде са мањом енергијом импулса карактерише мања производност и мања храпавост површине, међутим, за исту дужину времена обраде са већом енергијом импулса долази до повећања производности, али и веће храпавости обрађене површине (слика 3.27/а). Да бисмо постигли исту производност применом предходних параметара обраде, време обраде са импулсом мање енергије се знатно продужава, у односу на обраду са већом енергијом импулса (слика 3.27/б).

Груба површина се обрађује већом енергијом импулса, а фина површина с смањеном енергијом импулса, при чему се храпавост површине смањује, а хабање електроде је нешто повећано.

Врста диелектрикума, преко свог вискозитета утиче на квалитет површине при електроерозиционој обради. Тако да се диелектрикум мањег вискозитета (петролеј, дејонизована вода) користе код обраде ситнијих делова и финије обраде, а

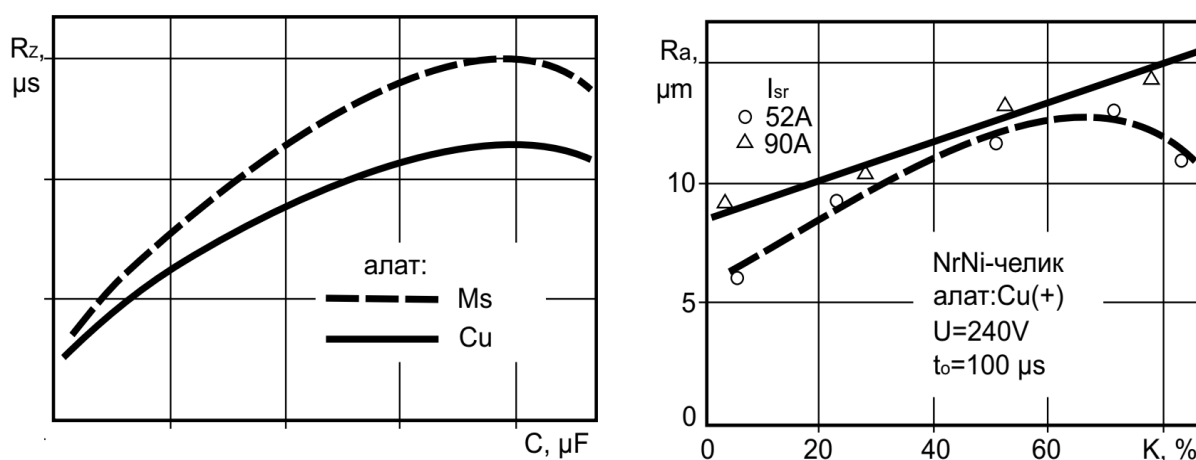
диелектрикум већег вискозитета (минералана уља) код обраде крупнијих делова и грубе обраде. Утицај врсте диелектрикума на квалитет обрађене површине се одређује експериментално.

Диелектрикуми од 2 до 3,5 cSt на 20°C (центистокс - 0,01 стокс) погодни су за фину обраду, 4 до 6. 5 cSt на 20°C је погодан за грубе операције обраде. Тако се за мање време паузе импуса пражњења може користити диелектрикум са мањим вискозитетом, што доводи до финије завршне обраде. Када се користе вискознији диелектрикуми, мора се повећати време паузе импулса пражњења како би се избегле потешкоће с испирањем. То доводи до веће храпавости у обрађеном радном предмету (слика 3.31).



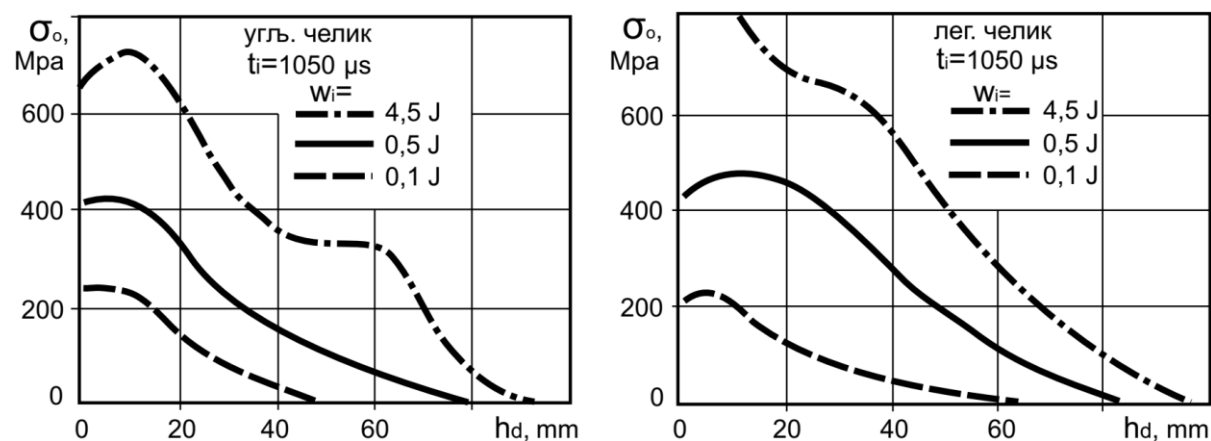
Слика 3.31 Утицај вискозитета диелектрикума на храпавост обрађене површине [9]

Материјал електроде утиче на квалитет електроерозионе обраде (слика 3.32) преко финоће зрна (нпр. код графита), хомогености и порозности (нпр. силимина). Материјал електроде са финијом структуром и већом хомогеношћу, тј. без укључака, као и малом порозношћу, у принципу, дају мање храпавости обрађене површине и обрнуто. И овај утицај на квалитет обрађене површине се утврђује експерименталним путем.



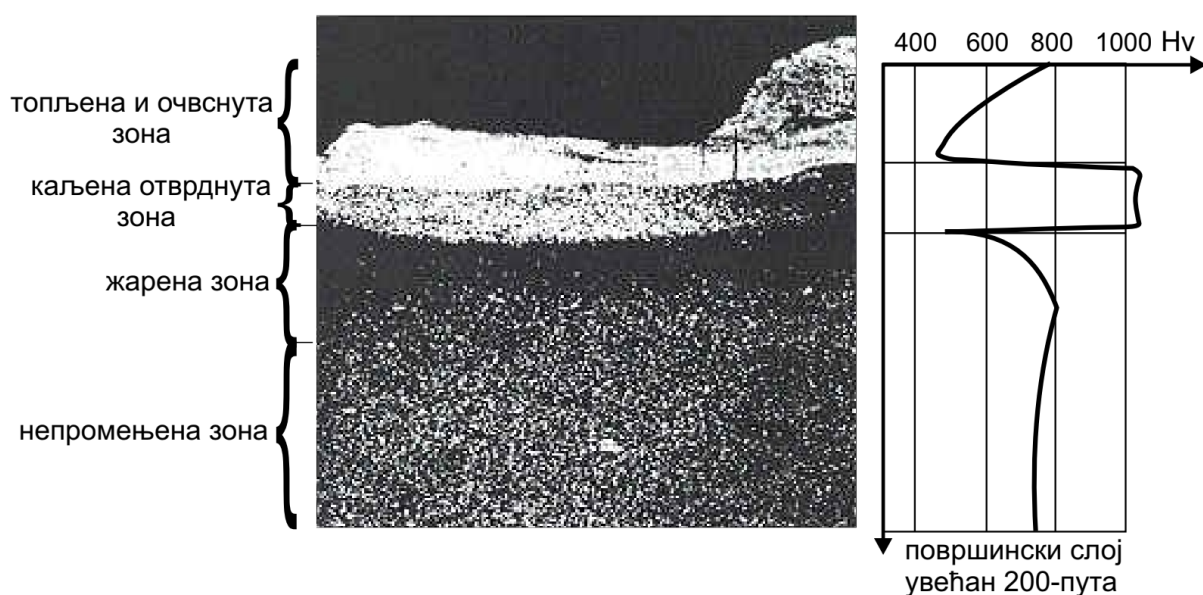
Слика 3.32 Утицај материјала алата, карактеристике извора напајања и концентрације диелектрикума на вредности параметара храпавости површина [1]

Током ерозионе обраде остварују се температуре од 8000 до 12000°C, при тако високим температурама долази до појаве заосталих напрезања (слика 3.23) и других појава, које изазивају микроструктурне промене у површинском слоју материјала предмета обраде. Оне у највећој мери зависе од топлотно-физичких својстава материјала, па се због тога код неких материјала одражава у вишој, а код других мањој мери. Промене представљају дефекте у површинском слоју, који могу значајно да умање функцију дела. То је нарочито важно код делова са посебном наменом на пр. у авио индустрији и др., Зато се предузимају мере да се ови дефекти сведу на најмању могућу меру.



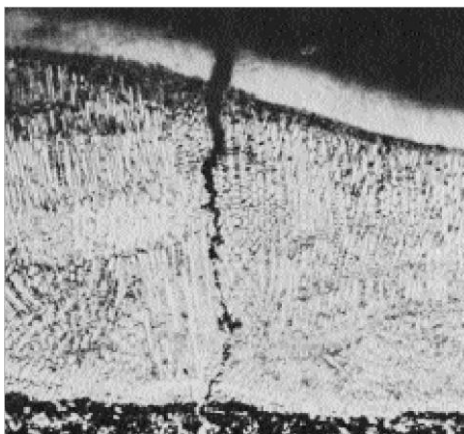
Слика 3.33 Зостала напрезања у површинском слоју при EDM обради [1]

На рубу површине обрађене електроерозијом могу се уочити различита структура тврдоће, различита стања напона и различит садржај угљеника у челику обратка. На приказу пресека обрађене површине која је добијена електроерозијом обрадом (слика 3.34), настају различите структурне промене, које су типичне за ову врсту обраде. Истопљена зона која настаје при електроерозијоној обради се хлади и очврсћује врло брзо деловањем диелектрикума, што је праћено настанком кристала, који остају усмерени вертикално навише у очврснутој металној површини.



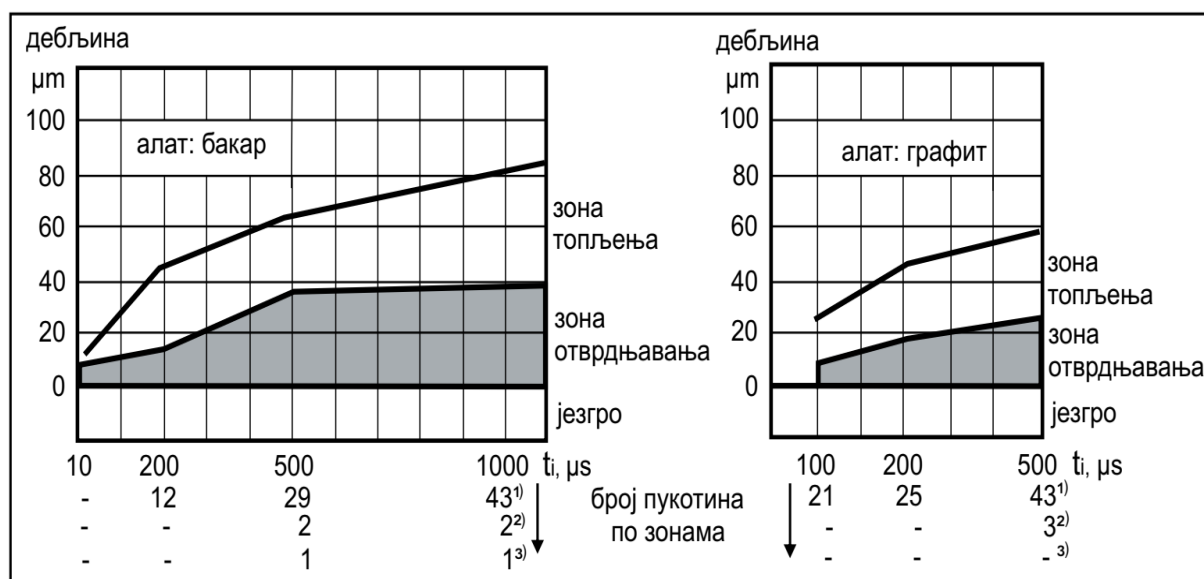
Слика 3.34 Пресек обратка који је настао електроерозијом са структурним променама материјала, (тврдоћа повећана до 57 HRC) [11]

Том приликом у овом слоју настају пукотине, које се пружају унутра дуж линије кристала (слика 3.35). Растопљени слој је обично око 15-30 μm дебљине при грубој обради. У каљеној зони где је температура већа од потребне за формирање аустенита (изнад критичне тачке), формира се тврд и крт мартензит. У жареној зони температура није толико висока (да превазилази критичну тачку) да отврдне челик. Испод је непромењено језгро.

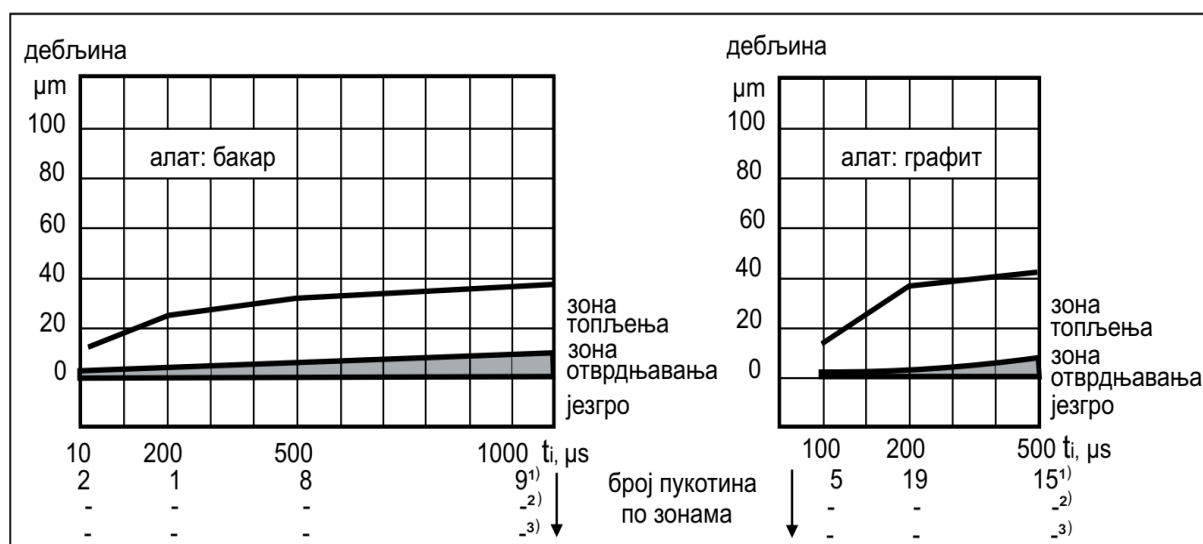


Слика 3.35 Настанак пукотина у површинском слоју обратка при електроерозији [11]

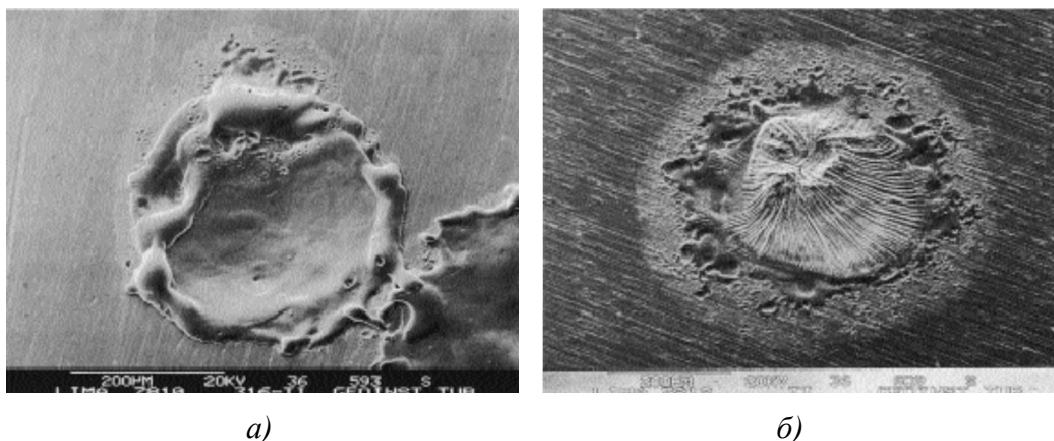
Постоји разлика између тврдых и меких материјала. У омекшаном челику слојеви су тањи и има мање пукотина, ојачан и крт слој готово не постоји (слика 3.37). Током грубе обраде дебљина слојева варира много више него током завршне. При дужем времену пражњења настају дебљи, топљени и ојачани слојеви. Јачина струје има у основи исти ефекат као и дужина периода пражњења. На челицима са високим садржајем угљеника при обради настаје највише пукотина, док на челицима са ниским садржајем угљеника само пар пукотина у растопљеном слоју. Око 20% пукотина се из зоне топљења прошири у ојачану зону, а само неколико до језгра. У језгру ретко има пукотина дужих од 10 μm . Ове пукотине у језгру обично настају код високо легираних алатних челика и високо легираних брзоребрих челика (слика 3.36).



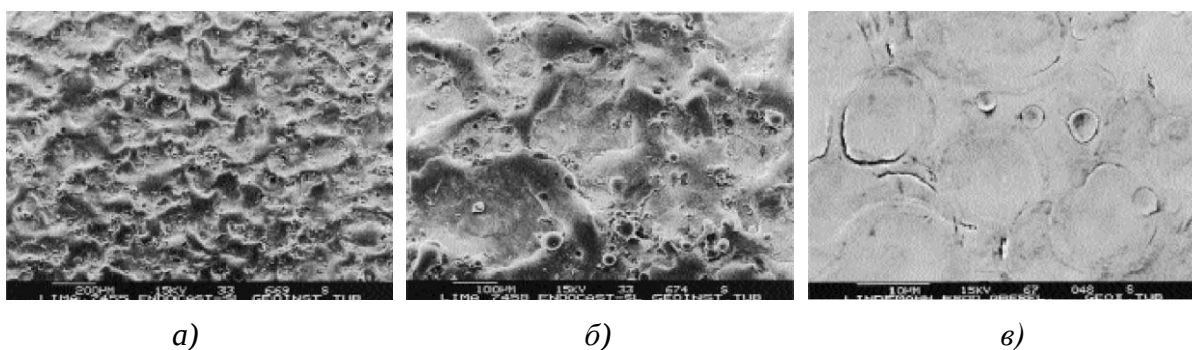
Слика 3.36 Дебљине слојева и количина пукотина у површинском слоју обратка након електроерозије на каљеном узорку (52 HRC) за различите дужине периода пражњења [10]



Слика 3.37 Дебљине слојева и количина пукотина у површинском слоју обратка након електроерозије на жареном узорку за различите дужине периода пражњења [10]



Слика 3.38 Изглед катера са типичним ободом на површини обрадака при електроерозији, фотографије настале електронским микроскопом [11]



Слика 3.39 Површине обрадака настале при електроерозији [11]

Површине добијене електроерозионом обрадом су у виду ситних катера, различитих пречника неравномерно распоређених по обрађеној површини. Типичан изглед насталог катера приликом електроерозије је приказан на слици 3.38/а. На слици 3.38/б је приказан катер на предмету обраде од титанијума настао приликом електроерозије, формиран брзим очвршћавањем загрејаног титанијума.

Карактеристика еродиране површине су бројни кратери који се преклапају (слика 3.39/а). Увећањем фотографије јасно се виде ивице кратера на обратку, као и удубљења у површини метала (слика 3.39/б). Да би кратери били боље видљиви код полираног метала површина је била еродирана појединачно. Машина за електроерозију је укључивана за делић секунде, тако је створена обрађена површина код које се ивице кратера не преклапају (слика 3.39/в).

Укратко може се рећи да структурне грешке изазване грубом обрадом могу бити исправљене током нормалног процеса електроерозије, што укључује грубу и завршну обраду. Одређена количина структурних промена ће, наравно, увек остати, међутим, оне су углавном од малог значаја. У неким случајевима утицај на квалитет површине обратка може бити од изузетног значаја, на пример код резног алата, испитивања су већини случајева показала да није било утицаја на функционисање алата, у неким случајевима алат је постао отпоран на хабање, у другима, међутим, алат се сломио прерано. Што значи да велика тврдоћа отврднутог слоја може побољшати отпорност алата на хабање, а кратери на површини обратка омогућују боље задржавање средства за подмазивање, што повећава век трајања алата.

Пукотине су узроковане стресовима које проистичу из учесталог, брзог загревања а затим хлађења обратка диелектрикумом, као и из разлике у запремини између структурних делова различитих слојева. Да би се избегли дефекти у површинском слоју потребно је предузети одређене мере:

- Правилним избором параметара обраде што укључује и поступке грубе и завршне обраде, површинске грешке грубе обраде се могу у великој мери избећи. Између појединих захвата у процесу обраде (груба, средња, фина) треба предвидети довољан додатак за обраду, како би се у следећим захватима обраде могао odstrанити дефектан слој материјала који настаје у предходним захватима,
- Друга мера је термичка обрада накнадно се обрадак може жарити на 15°C мањом температуром, него раније, што смањује тврдоћу без утицаја на језгро или накнадно поновно каљење и жарење што доводи до готово потпуне обнове структуре обратка (пукотине ипак остају),
- Трећа мера је обрада абразивним млазом, брушењем или полирањем, којом се може постићи уклањање површинске структуре заједно са већином пукотинама. Дубина обраде, требало би да буде око 5-10 μm .

3.7 ИЗБОР ПАРАМЕТАРА РЕЖИМА ОБРАДЕ

На основу утицаја појединих параметара електроерозионе обраде на *производност, тачност и квалитет обраде* може се приступити пројектовању технолошког поступка електроерозионе обраде. Режији обраде зависе од карактеристика и могућности електроерозионе машине на којој се врши обрада. Полазни подаци за избор режима обраде су дебљина предмета обраде, тип машине, материјал електроде, напон, поларитет и начин циркулације диелектрикума који су дати у подацима машине. Полазећи од датих података и захтеване храпавости обрађене површине предмета обраде, бира се оптимална производност обраде при задатом напону струје, и одређује се јачина струје и трајање импулса. У новије време се подаци за избор и оптимизацију параметара електроерозионе обраде дају у виду база података које корисницима омогућују знатно једноставнији и бржи рад. Подаци који се дају су резултат теоријских прорачуна, практичних испитивања или дугогодишњег радног искуства. Они су код

сваког произвођача опреме систематизовани на специфичан начин и по правилу важе за један тип генератора електричних импулса, односно машину, па се као такви не могу користити на машинама других произвођача. На тај начин сваки произвођач штити своја знања и искуство од конкурената.

Пројектовање технолошких поступака електроерозионе обраде врши се на основу задатих величина које треба остварити при обради неког дела, а који се првенствено односе на тачност и квалитет обраде, и оно обухвата одређивање следећих елемената:

- броја електрода (за грубу, средњу и фину обраду),
- материјала појединих електрода,
- параметара електричних импулса,
- димензија електрода,
- производности,
- трошења електрода,
- времена обраде,
- других услова који се остварују при обради, као што су на пример: врста диелектрика, начин испирања радног простора и др.

Режими обраде одређују се из технолошких дијаграма и таблица које даје произвођач машине у виду каталога. Радник који ради за машином, на основу индукционог листа у коме су дата сва потребна упутства (стечена знања и подлоге које дају произвођачи електроерозивне опреме) за конкретну операцију, путем пробе и подешавања, настоји да оствари што већу производност, краће време обраде и захтевану тачност и храпавост. Тако на пример за одређивање параметара електричног импулса из табела и дијаграма, као полазне се 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.

Неопходан број електрода за извођење неке обраде зависи од:

- димензија пролазног отвора или удубљења,
- жељеног квалитета површине,
- захтеване тачности и дубине,
- сложености облика који се обрађује,
- природе материјала који се обрађује,
- минималне вредности радијуса.

Због разноврсности ових услова тешко је утврдити тачно правило за одређивање броја електрода. У већини случајева практично се употребљавају највише две електроде, прва за грубу и први степен завршне обраде, а друга за следеће степене завршне обраде.

У производној пракси, у груби или предходној обради треба постићи степен храпавости који треба само да се изједначи у следећој фази обраде. Искуство је показало да је храпавост следеће фазе око трећине до петине почетне храпавости. Ова процедура даје економско оправдано време еродирања у односу на степен тачности.

3.8 ПРИМЕР МАШИНЕ ЗА EDM ОБРАДУ ПУНОМ ЕЛЕКТРОДОМ

Машина произвођача HURCO модел 425E, која се налази у лабораторији за обраду метала и трибологију Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, је машина специјално развијена за радионице где је радни простор средњих димензија са интегралним импулсним генератором. Основни елементи и изглед машине HURCO модел 425E приказани су на слици 3.40, а технички подаци у табели 3.5



Слика 3.40 Машина за електроерозиону обраду HURCO 425E

Табела 3.5 Основни технички подаци за машину за електроерозону обраду са пуном електродом HURCO 425E

Радни сто	425 x 305	mm
Х оса област кретања	270	mm
Y оса област кретања	130	mm
Z оса серво	152	mm
Величина резервоара	455 x 320 x 240	mm
Генератор	30	A
Снага	6	kW
Максимална тежина алата	60	kg
Максимална тежина обратка	270	kg
Мак. висина обратка без алата	283	mm
Диелектрикум	77	l
Димензије машине	1000 x 820 x 2230	mm
Тежина машине	1450	kg

Радни сто је фиксиран за постоље машине, на столу су урезани „Т” канали који служе за стезање радног комада. Улогу координатног стола преузимају конзола и носач алата који су покретни у правцима x и y осе. У носачу алата се налази серво уређај који регулише задати помак електроде-алата. Конзола и носач алата се могу подешавати ручно. Померање конзоле и носача алата се може очитати на нумеричком дисплеју у дигиталном облику за x и y осу (слика 3.41).



Слика 3.41 Изглед радног стола, конзоле и носача алата HURCO 425E

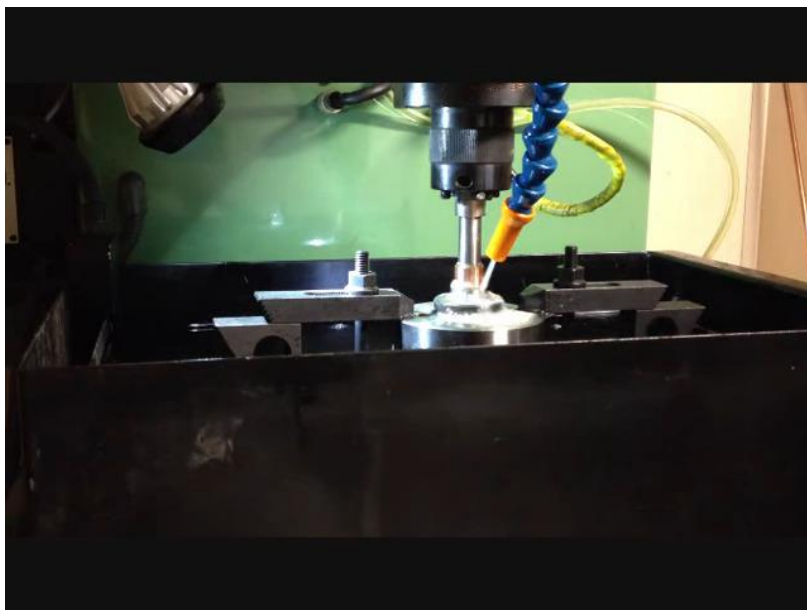


Слика 3.42 Приказ подизања радне каде и потапања радног комада на машини HURCO 425E

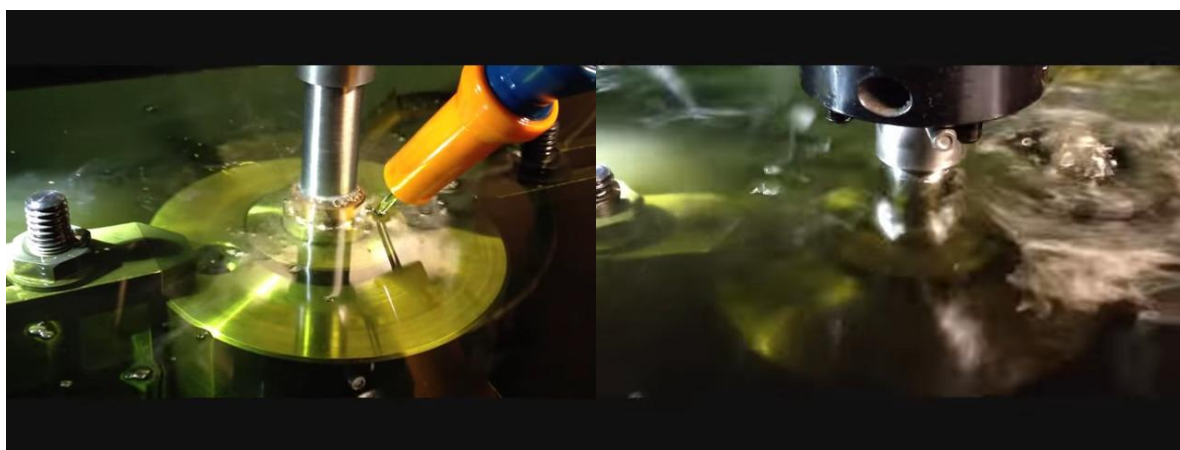
Генератор импулса се налази у електро орману непосредно уз машину.

Радна када се налази у равни радног стола што омогућује комфортно постављање радног дела у радни положај. Стезањем радног комада коришћењем три „Т” канала из радног стола. Потапање радног стола дијелектрикумом се постиже за веома кратко време, тако што се радна када у којој се већ налази диелектрикум подиже на одређену висину, која се може подесити (слика 3.42).

Испирање радног простора млазницом са диелектрикумом под притиском, се покреће ручном командом са управљачке јединице (слике 3.43 и 3.44).

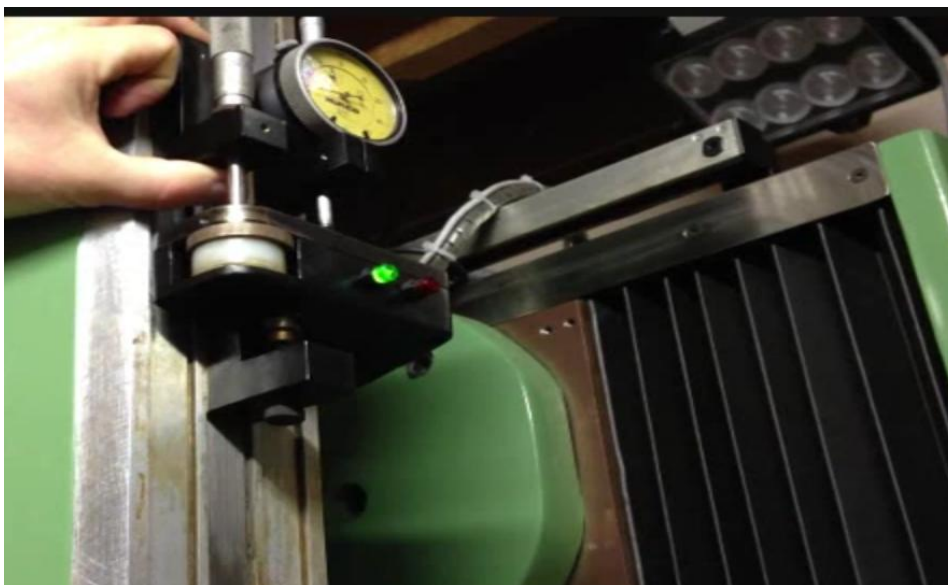


Слика 3.43 Испирање радног простора млазницом диелектрикумом под притиском, покретањем пумпе HURCO 425E



Слика 3.44 Приказ процеса обраде на ерозимату HURCO 425E

Ради бољег испирања радног простора машина има могућност подизања алата у одређеном временском интервалу на размак који је много већи од зазора. Вредности ових параметара се могу подешавати. Што омогућује боље испирање радног простора, и одношење готово свих продуката процеса обраде. Повремено подизање алата-електроде ради бољег испирања радног простора може се прочитати на компаратору који се подешава пре почетка операције обраде (слике 3.45 и 3.46).



Слика 3.45 Подешавање компаратора на машини HURCO 425E



Слика 3.46 Слика упоређивања вредности обраде и вредности подизања алата ради испирања радног простора на машини HURCO 425E

4. ЗАКЉУЧАК

Познавање принципа машинске обраде са свим њеним утицајним факторима представља важан предуслов за постизање квалитета производа, као и основу за даље студије принципа пројектовања технолошких поступака и машина које ће по својој концепцији у потпуности одговарати захтеваном производном оптимуму.

Све изразитија тежња за побољшањем квалитета и повећањем продуктивности представља с једне стране све строжије захтеве у погледу тачности израде. С друге стране, нова конструктивна решења, на машинама поред побољшања, односно усавршавања алата и прецизније анализе режима обраде, представљају средства за задовољење не само захтева који се односе на продуктивност, већ и економичност производње.

Машинска обрада обухвата две основне групе: обраду резањем и обраду деформисањем. Док се при обради резањем потребан облик радног предмета добија скидањем сувишног материјала, при обради деформисањем се међусобним померањем делића материјала (пластичном деформацијом) или одвајањем једног дела материјала од другог (одсецањем, просецањем и сл.) радном предмету даје тражени облик.

Обрада резањем у већини случајева по редоследу операција долази после обраде деформисањем. Обрада деформисањем има велики значај и често представља значајну могућност за припремне операције замењујући тиме одговарајуће операције обраде резањем, али исто тако могу бити и завршне операције високог квалитета. При томе се обрада деформисањем својим, иначе врло продуктивним, методама можда споро али сигурно потискује извесне операције резањем, док понекад и представља и једино могућу методу обраде.

Под неконвенционалним поступцима обраде подразумевају се методе обраде и обликовања материјала које се примењују у случајевима када није рентабилна примена класичних поступака обраде или када обрада класичним методама уопште не може извести.

Неконвенционални поступци обраде се примењују код обраде тешкообрадивих материјала (високолегирани челици и специјалне легуре у ваздухопловству, ракетној и нуклеарној техници), при изради и поправци сложених алата (алати за ковање, ливење под притском ...). И израда јако компликованих делова просецањем, бушењем и брушењем. Код неконвенционалних поступака обраде ефекат одвајања материјала се посиже довођењем одређеног вида енергије директно у зону обраде. На принципу топлотног дејства електричне струје се заснива: електроерозиона обрада, обрада ласером, обрада електронским снопом.

Електроерозиона обрада данас има широку примену у различитим областима производног машинства, и углавном се користи у малосеријској производњи. Уз остваривање високе тачности и високог квалитета обрађене површине. Електроерозијом могу да се изводе технолошке операције које се изводе конвенционалним машинама, а такође и оне које се не могу њима извести.

Прва предност је што се могу обрађивати каљени челици или легуре од тврдог метала, које није могуће обрађивати класичним поступцима обраде. На пример могућа

је обрада матрица или других алата од тврдог материјала, као и обрада специјалних материјала који се користе у авионској индустрији.

Друга предност електроерозионог поступка обраде лежи у тачном давању облика алата који се израђује. Верно осликавање врши се једноставним продирањем електроде-алата у предмет обраде без икаквог додатног кретања између њих.

Основне карактеристике квалитета електроерозионе обраде су: производност обраде, релативно хабање електроде-алата, хрпавост обрађене површине, физичко-хемијске промене у површинском слоју обрађене површине и тачност обраде.

За разлику од обраде резањем где се производност најчешће дефинише бројем израђених комада у јединици времена, код електроерозионе обраде производност се по правилу одређује на основу запремине однетог метала у јединици времена. Може се рећи да на производност код електроерозионе обраде утичу следећи фактори обрадивост материјала, параметара електричног импулса (ефективна снага и облик импулса), брзина подешавања радног зазора, материјал електроде-алата, димензије и облик обрађиване површине, врста диелектрикума и интезитет и начин испирања радног простора идр.

Обрадивост материјала при EDM обради зависи искључиво од хемијског састава материјала обратка. Средња енергија импулса зависи од: напона који зависи од упарених материјала, и параметара који се могу мењати (јачина струје, дужина импулса и дужина паузе). Променом ових параметара можемо добити оптималну вредност производности зависно од релативног трошења електроде-алата, квалитета и тачности површине коју треба да добијемо при обради. Већа производност се добија за веће енергије пражњења. Повећањем јачине струје, при константној дужини импулса, повећава се производност, али и трошење електроде-алата. Већа дужина импулса до одређене вредности, при константној јачини струје, повећава производност и смањује трошење алата. Даљим повећањем јачине струје долази до пада производности уз смањење трошења електроде. За постизање веће производности дужину импулса се помера у правцу веће вредности. Повећање дужине паузе проузрокује смањење производности и повећање трошења алата-електроде. Површина електроде-алата преко густине струје утиче на производност, тако што постизањем густине струје од око 10 A/cm² долази до пада производности, због велике количине скинутог материјала који се не може ефикасно уклонити из зоне обраде. Интезитет испирања радног простора је битан зато што уклањањем продуката пражњења смањујемо могућност неправилних пражњења успостављање електричног лука који штетно делује на алат и обрадак. Од материјала електроде зависи напон пражњења U_p , а тиме и енергија импулса, односно производност. За њега су такође везана топлотна својства и брзина дејонизације радног простора. Тако сваком материјалу електроде одговара одређени ниво ефективне снаге која може практично да се реализује при датом напону генератора. Уколико је, наиме, топлотна проводљивост материјала електроде већа, утолико је већа и ова снага, односно већа је и производност. Трошење електроде алата са повећањем јачине струје зависи од материјала електроде-алата на пример код бакарне електроде се повећава док се код графитне смањује, повећањем дужине импулса трошење бакрне електроде се смањује док је код графитне електроде та промена мања.

Квалитет обрађене површине, као и других врста обраде, подразумева не само хрпавост, већ и стање површинског слоја материјала предмета обраде (структура и састав, заостала напрезања, експлоатацијске особине као што су заморна чврстоћа отпорност на хабање и корозију). Квалитет обрађене површине при електроерозионој обради углавном зависи од: параметара електричног импулса (енергије импулса), врсте

диелектрикума, материјала електроде, топлотно-физичких својстава материјала предмета обраде и др. Утицај ових параметара на квалитет обрађене површине се утврђује експерименталним путем.

Површине добијене електроерозионом обрадом су у виду ситних кратера различитих пречника неравномерно распоређених по обрађеној површини. Храпавост се класификује у 12 VDI класе, које су финије од класа ISO стандарда (класа VDI Nr12 одговара N5, VDI Nr18 одговара N6). Већу храпавост добијамо при обради са већом енергијом импулса, напон пражњења је углавном константан, па се могу мењати јачина струје и дужине импулса. Диелектрикум утиче на храпавост преко свог вискозитета. Тако да се диелектрикум мањег вискозитета користе код обраде ситнијих делова и финије обраде, а диелектрикум већег вискозитета код обраде крупнијих делова и грубе обраде. Утицај врсте диелектрикума на квалитет обрађене површине се одређује експериментално. Материјал електроде утиче на квалитет електроерозионе обраде преко финоће зрна, хомогености и порозности. Материјал електроде са финијом структуром и већом хомогеношћу, као и малом порозношћу, у принципу дају мању храпавост обрађене површине и обрнуто. И овај утицај на квалитет обрађене површине се утврђује експерименталним путем.

Ако се изврши металографска анализа слојева испод еродираних површина, могу да се уоче значајне промене својстава материјала у односу на основни материјал. То је директно последица јаког термичког дејства електричног пражњења, при којем се метал јако брзо доводи до тачке топљења или испаравања па се брзо хлади. Услед тога у површинском слоју настају: зоне топљења, ојачана, жарена и непромењена зона, као и могуће пукотине на дубини од 15-30 μm . Неке од ових појава могу бити корисне при експлоатацији, у супротном се могу умањити накнадном термичком обрадом, правилним технолошким поступком, а пукотине додатном обрадом на дубину 5-10 μm .

На тачност електроерозионе обраде утиче низ фактора који од зависности од услова обраде имају већи или мањи утицај. Тачност електроерозионе обраде зависи углавном од следећих: фактора везаних за саму машину, тачност израде електроде, топлотне дилатације електроде при обради, промене радног зазора, трошење електроде и др.

Одступања настају углавном због геометријских нетачности машина, еластичних деформација система машина-алат-радни комад, нетачности при постављању електроде-алата у односу на радни комад и др. Тачност израде електроде се обезбеђује, тако што се електроде израђују са двоструко већом тачношћу у односу на обрадак. Утицај промене зазора је веома тешко предвидети, а правилним избором, подешавањем и контролом параметара електричног импулса могу се свести на вредност која је занемарљива. Трошење електроде изазива грешке коничног отвора и смањење дубине еродирања. Прва се може умањити, применом принудне циркулације кроз обрадак, а друга конструкцијом електроде, правилном избором параметара обраде (да се минимизира трошење електроде), извођење обраде (груба+фина). Збирна одступања се могу свести при планетарном еродирању на 0,01 mm.

Електроерозиона обрада реализује се данас на универзалним и специјалним електроерозионим машинама.

Савремена постројења опремљена су углавном са CNC системом за аутоматско управљање свим главним и помоћним функцијама главног и помоћног кретања, чиме се добијају обрадни центри за обраду електроерозијом. Што додатно повећава могућности израде широког спектра различитих производа, уз повећање продуктивности производње.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лазић М., Неконвенционални, Научна књига, Београд, 1990.
- [2] Миликић ., Неконвенционални поступци обраде, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2002.
- [3] Недић Б. и Лазић М., Производне технологије – обрада метала резањем, скрипта, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2007.
- [4] [http://www.gfms.com/content/dam/gfac_country_US/PDF/When to EDM_JULY08.pdf](http://www.gfms.com/content/dam/gfac_country_US/PDF/When_to_EDM_JULY08.pdf), 20.08.2018.
- [5] <https://www.fsb.unizg.hr/kas/ODIOO/Nekonvencionalne.pdf>. 20.08.2018.
- [6] <http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/118119/1/1.%20%20cps%20prakash.pdf>. 21.08.2018.
- [7] http://repozitorij.fsb.hr/8272/1/Butkovi%C4%87_2018_diplomski.pdf 21.08.2018.
- [8] http://ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm_document_id=538&dm_det=1, 15.11.2018.
- [9] http://www.edm-products.com/Dielectrics/ifase/ifase_1.htm, 25.11.2018.
- [10] <http://blog.novickedm.com/technology-spark-erosion-dielectrics/>, 27.11.2018.
- [11] https://www.oelheld.com/fileadmin/content/Broschueren/EN/Important_facts_about_spark_erosion_-BR-_EN_.pdf, 28.11.2018.
- [12] <https://www.messmittel.tools/Measuring-Tools---Instruments/15--Roughness-Comparison-Specimens---Digital-Shore-Durometer/EDM-finish-scale-to-VDI-3400/EDM-finish-scale-to-VDI-3400-surface-comparison-pattern.html?language=en>. 29.11.2018.
- [13] <https://www.scribd.com/doc/79321771/EDM>. 05.12.2018.