

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 3/2009

Марко И. Миљковић

**Анализа процеса *EDM* обраде са примером
пројектовања електроде**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Недић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да размотри проблематику електроерозионе обраде са пуном електродом, изврши анализу постојећих машина и опреме за EDM обраду и изврши моделирање електроде за израду дела алата за бризгање пластичних маса.

Препоручена литература:

- [1] Лазих М., Неконвенционални поступци обраде, Научна књига, Београд, 1990.
- [2] Миликић Д., Неконвенционални поступци обраде, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2002.
- [3] Недић Б. и Лазих М., Производне технологије – обрада метала резањем, скрипта, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2007.

Крагујевац, јун 2012. год.

ментор:

Резиме рада:

У оквиру рада, извршено је прикупљање, систематизација и анализа података везаних за електроерозиону обраду. Описан је развој овог поступка обраде и детаљно објашњен принцип, односно суштина електроерозионе обраде, приказане су основне операције, са посебним освртом на просецање, бушење и брушење електроерозијом и објашњена инсталација за обраду, са посебним освртом на сваку компоненту. На примеру израде дела конвенционалним и електроерозионим поступком објашњена је предност примене. На крају рада, детаљно је објашњен пример пројектовања електроде за израду дела калупа за бризгање пластичних маса.

Кључне речи: Неконвенционални поступци обраде, електроерозиона обрада, електрода

Summary of work:

In the paper, performed the collection, systematization and analaiza elektroerozionu related data processing. Opian the development of the treatment process and explained in detail the principle and essence elektroeorzione processing, basic operations, with special emphasis on cutting, drilling and grinding electro and explains the installation process, with special emphasis on each component. For example, production of conventional and elektroerozionim explained the procedure has the advantage of application. In the end, is explained in detail an example of designing electrodes for production of injection molds for plastics.

Key words: Unconventional treatment methods, EDM, electrode

Садржај

Увод	6
 1. Развој неконвенционалних поступака обраде	
(електроерозиона обрада)	9
1.1. Неконвенционални поступци обраде.....	9
1.2. Развој електроерозионе обраде	12
 2. Основи процеса електроерозионе обраде	15
2.1. Принципи обраде	16
2.2. Суштина – физика процеса.....	18
2.3. Карактеристике електричних импулса	22
 3. Производне операције електроерозионе обраде	25
3.1. Просецање електроерозијом.....	26
3.2. Сечење електроерозијом.....	28
3.3. Брушење електроерозијом.....	28
3.4. Електроерозионо резање жичаном електродом.....	29
3.4.1. Сечење жицом и конвенционална обрада.....	31
 4. Инсталација – опрема за електроерозиону обраду	34
4.1. Генератор електричних импулса	36
4.2. Алатна машина	39
4.3. Агрегат за пречишћавање и циркулацију диелектрикума.....	51

4.4. Управљачка јединица – системи за праћење и управљање процесом обраде.....	54
4.5 Електроде за електроерозиону обраду	56
4.5.1. Материјал електрода за електроерозиону обраду	56
4.5.2. Поступци израде металних електрода.....	57
4.6. Диелектрикум	58
4.6.1. Вода	59
4.6.2. Угљоводоници.....	59
5. Тачност и квалитет електроерозионе обраде.....	61
5.1. Тачност електроерозионе обраде	61
5.2. Квалитет обрађене површине.....	66
5.3. Избор параметара режима обраде.....	69
6. Пример пројектовања електроде за електроерозиону обраду.....	72
Закључак	83
Литература.....	84

Увод

Неконвенционални поступци обраде су поступци код којих се уклањање вишка материјала, измена облика, димензија и структуре материјала остварује коришћењем електричне, светлосне, магнетне, хемијске, нуклеарне и других видова енергије, које се доводе непосредно у зону обраде. Ови поступци се користе за обраду нових материјала, који имају знатно боље механичке и триболошке карактеристике од до сада коришћених материјала.

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.

Обрада неконвенционалним поступцима захтева већи утрошак електричне енергије по cm^3 скинутог материјала. Са друге стране, могућности постизања тачности и квалитета обрађене површине су веће, и разликују се за различите неконвенционалне поступке.

Електроерозиона обрада, скраћено EDM (Electric Discharge Machining), је савремен поступак обраде чија је примена у пракси веома распрострањена. Због бројних технолошких предности почиње постепено да потискује примену конвенционалних метода обраде резањем, нарочито код израде алата и делова од тешкообрадливих материјала.

Ова врста обраде је почела да се развија од 1943. године када је брачни пар Лазаренко (СССР) поставио основне принципе и израдио прво постројење за EDM – обраду. Усавршавање појединих делова овог постројења текло је упоредо са развојем науке и технике, тако да је данас

достигнут врло висок степен развоја са посебним нагласком на аутоматизацију рада постројења.

Скидање материјала код електроерозионе обраде се остварује путем учесталих електричних пражњења између предмета обраде и алата, који у овом случају играју улогу електрода. Зависно од средине у којој се одвијају ова пражњења, разликују се два вида овог поступка: *електролучна* и *електроискрична* ерозија. У пракси се највише користи електроискрична ерозија.

У овом раду је детаљно, по поглављима, описан поступак електроерозионе обраде. У првом поглављу дата су општа објашњења и поделе неконвенционалних поступака обраде, као и историјски развој електроерозионе обраде.

Другим поглављем је објашњен процес електроерозионе обраде. Дата је основна подела на електролучну и електроискричну ерозију (која се најчешће користи), и објашњења истих. Такође је у овом поглављу детаљно разрађена суштина процеса, односно начин на који се одвија обрада материјала. Крај другог поглавља посвећен је карактеристикама електричних импулса који се користе у процесу електроерозионе обраде.

У наредном, трећем поглављу описане су производне операције које се могу извести електроерозионом обрадом, и дат је један сликовит, упоредни пример обраде истог дела на класичним машинама и на ерозимату.

Опрема, односно инсталација која се користи у овом поступку обраде, описана у четвртном поглављу. У овом поглављу, детаљно су описани: генератор електричних импулса, алатна машина, агрегат за диелектрикум, управљачка јединица, електроде и диелектрикум.

Тачност и квалитет електроерозионе обраде су описани у петом поглављу. Описани су фактори који утичу на квалитет и тачност обраде, а на крају поглавља су описани параметри режима обраде на ерозимату.

У шестом поглављу, разрађен је практични задатак дат у оквиру теме завршног рада. Извршена је анализа четири комерцијална модела упаљача сијалице на аутомобилу, и на основу њих, уз помоћ софтвера CATIA V5 R16,

извршено је моделирање новог модела упаљача. За нови модел упаљача је урађена и електрода, у истом софтверу, и на основу тога део калупне шупљине за бризгање пластике.

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

1

Развој неконвенционалних поступака обраде (електроерозиона обрада)

1.1. Неконвенционални поступци обраде

Наглим развојем низа различитих врста индустрија, као што су авионска, ракетна, космичка, нуклеарна, електронска, рачунарска и сл., јавила се потреба за развојем производње и примене разноврсних нових материјала. Новонастали материјали имају знатно боље механичке и триболошке карактеристике, велику затезну чврстоћу и тврдоћу, велику отпорност на високе и ниске температуре, знатно већу отпорност на хабање, и низ других предности. Неки од поменутих материјала су: високо-отпорне тврде легуре, тврди метали, материјали на бази волфрама, композитни материјали, вештачки дијаманти, итд.

Резање метала механичким путем, односно, деловањем оштрице резног алата (једносечног или вишесечног) на предмет који је потребно обрадити, познато је и коришћено још од каменог доба, када су пронађене прве секире од резаног камена. Већ од самог почетка употребе овог метода, могућност обраде резањем била је базирана на чињеници да алат за резање мора да има боља механичка својства од материјала који је потребно обрадити. Данас се то правило овако дефинише: „При обради метала резањем, материјал алата

мора да има боље механичке особине од материјала предмета обраде, на температури резања која је зависна од режима резања, а допуштена материјалом алата" [3].

Обрада нових материјала класичним (конвенционалним) поступцима обраде (обрада материјала резањем) је отежана, неекономична (због мале брзине резања и дугог времена обраде), а врло често и немогућа. Немогућност обраде нових материјала конвенционалним поступцима обраде захтева њихово усавршавање, развој нових и квалитетнијих резних алата и нових неконвенционалних поступака обраде.

Неконвенционални поступци обраде су поступци код којих се уклањање вишка материјала, измена облика, димензија и структуре материјала остварује коришћењем електричне, светлосне, магнетне, хемијске, нуклеарне и других видова енергије, које се доводе непосредно у зону обраде.

Класификација неконвенционалних поступака обраде може се извршити на више начина: према врсти енергије коју користе, основним механизмима уклањања вишка материјала, врсти радног (преносног) медијума, типу извора енергије и низу других мање или више релевантних карактеристика процеса обраде. Према врсти енергије коју користе разликују се следећи поступци:

- Механички поступци
- Термoeлектрични поступци
- Електрохемијски поступци
- Хемијски поступци

Према основном механизму уклањања вишка материјала:

- Поступци ерозије
- Поступци растапања или испаравања и
- Поступци електрохемијског и хемијског растварања

Према врсти радног (преносног) медијума:

- Честице високе брзине

- Електролит
- Сноп електрона
- Фотонски сноп
- Плазма и др.

Место и значај неконвенционалних поступака обраде у савременој техници и технологији произилази као резултат утицаја много различитих фактора, а пре свих [3]:

- Фактора који су везани за повећање брзине, оптерећења и температуре рада одговорних елемената машина и уређаја, повећање поузданости рада и века трајања, као и номенклатуре материјала са специфичним захтевима у погледу карактеристика,

- 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,

- Фактора 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.

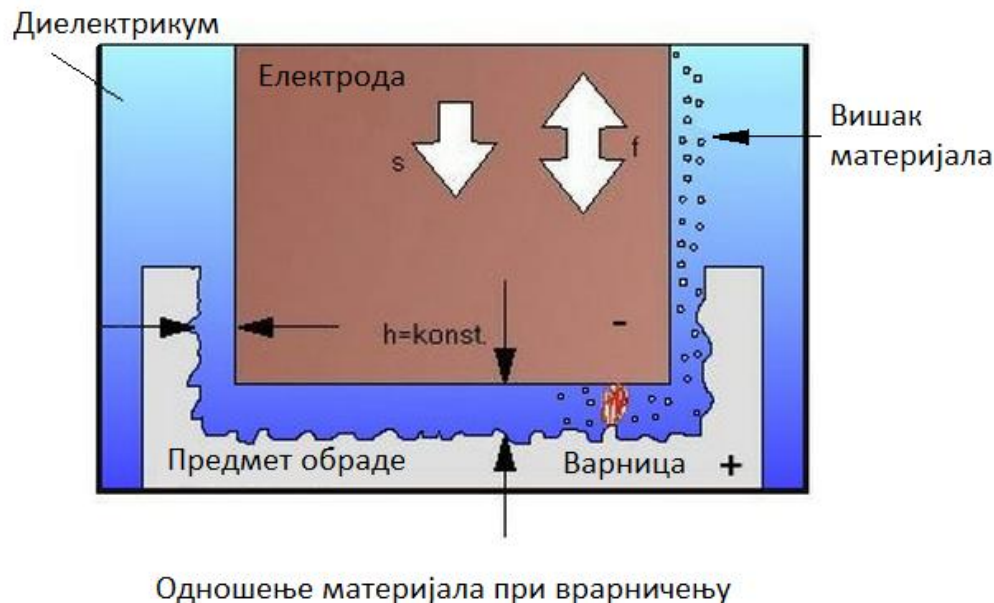
Обрада неконвенционалним поступцима захтева већи утрошак електричне енергије по cm^3 скинутог материјала. Са друге стране, могућности постизања тачности и квалитета обрађене површине су веће, и разликују се за различите неконвенционалне поступке. У табели (1.1) су дате упоредне карактеристике основних неконвенционалних поступака обраде и стругања, мада то поређење треба посматрати условно пошто се стругањем не могу обрађивати материјали који се обрађуу неконвенционалним поступцима обраде.

Метод обраде	Радни процес	Енергија у зони обраде	Толеранција мера mm	Храпавост Ra m	Специфична производност t mm ³ /min	Специфични рад Wh/mm ³
Стругање	Еластично-пластична деформација	Механичка	0,05	6,5-0,4	100000	0,001
Ултразвучна обрада УСМ	Ударно дејство абразива и крто резање	Механичка		1-0,2		
Електроерозиона обрада ЕДМ	Ерозија	Топлотна	0,08-0,02	80-0,3	5-2000	0,02-1,2
Електрохемијска обрада ЕЦМ	Анодни раствор	Хемијска	0,05	0,8-0,4	10000-20000	0,12
Обрада ласером ЛБМ	Светлосна ерозија	Топлотна	0,02	2-0,2	0,01	700

Табела 1.1 Упоредне основне карактеристике појединих метода обраде [6]

1.2 Развој електроерозионе обраде

Године 1770. енглески научник Џ. Пристли је 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, односно појаву електроерозионе обраде (слика 1.1). Истраживања у циљу отклањања негативног дејства ерозионог ефекта на местима електричних контаката, подстакли су совјетске научнике Б.Р. и Н.И. Лазаренка да искористе ерозионо дејство електричног пражњења и развију поступак електроерозионе обраде метала (Electric Discharge Machining - EDM). Године 1943. они су приказали поступак обраде под називом електроварнична ерозија. Усавршавање појединих делова овог постројења текло је упоредо са развојем науке и технике, тако да је данас достигнут врло висок степен развоја, са посебним нагласком на аутоматизацију рада постројења [6].



Слика 1.1 Основни принцип електроерозионе обраде

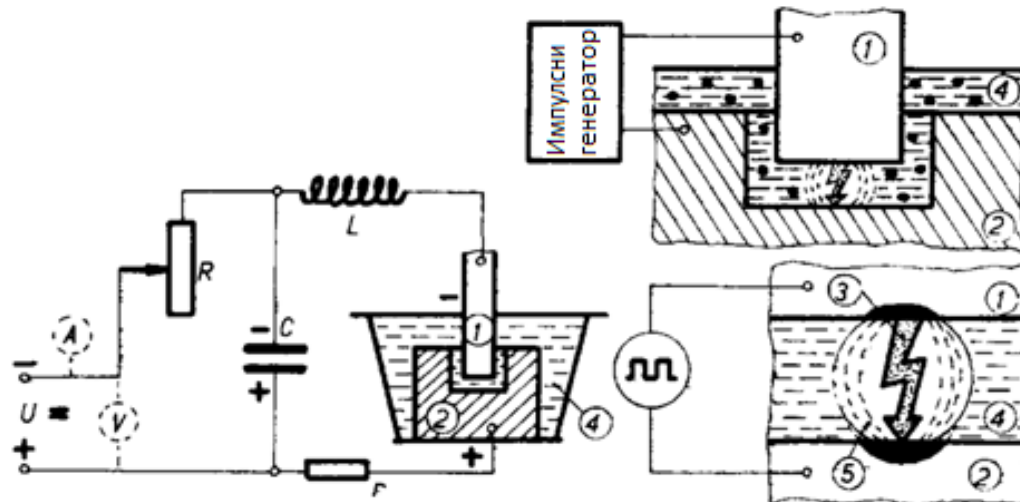
Један од најпопуларнијих савремених метода обраде је управо процес електроерозионе обраде. EDM процес је једна од најраширенијих обрада одношењем материјала. Скидање и одношење материјала заснива се на термичком и механичком дејству импулса електричног пражњења усмереног на предмет обраде који се налази у течној средини (диелектрикуму). Употреба минералних течности - диелектрика на бази уља је главни узрок околишних проблема који су везана за електроерозиону обраду.

Уопштено, EDM омогућује обликовање врло сложених конструкција (слика 1.2) са високом тачношћу обраде, реда неколико микрометара и оствариве површинске храпавости (R_z је $0,4 \mu\text{m}$). Последњих неколико деценија, овај поступак је нашао широку примену у многим индустријским, доменима. Важно је напоменути да неконвенционални поступци обраде нису универзални и да не могу решити све технолошке проблеме резања неког дела. Ипак, све је шира примена неконвенционалних поступака обраде, а са њима и електроерозионе обраде, тамо где су величина и облик радних површина предмета обраде, трајање обраде и механичка својства предмета обраде, ограничавајући код употребе конвенционалних поступака обраде.

2

Основи процеса електроерозионе обраде

Електроерозиона обрада (Electric Discharge Machining - EDM) обухвата поступке обраде метала код којих се уклањање вишка материјала са предмета обраде остварује серијом електричних пражњења. Пражњења су периодичног карактера и настају између алата (катоде 1 - слика 2.1) и предмета обраде (анодe 2). Предмет обраде или анода се налази у диелектрикуму. Да би дошло до пражњења, алат и предмет обраде се морају довести на веома малу удаљеност. При одговарајућој удаљености (0.005-0.5 mm) се успоставља електрични лук или искра (3). Појава електричног лука (искре) доводи до јонизације радне течности (диелектрикума 4), формирања стуба пражњења (јонизујућег стуба 5), топљења и испаравања честица материјала предмета обраде, под дејством електричне струје високе густине, која протиче кроз стуб у врло кратком временском периоду (неколико μs) [2].



Слика 2.1 Основни елементи електроерозионе обраде [2]

Прекидом пражњења, односно прекидом струјног кола пуца јонизујући стуб, а растопљени материјал се избацује и односи из зоне обраде. Хлађење растопљеног материјала и његово одношење се остварује диелектрикумом који циркулише. Наизменично импулсно пражњење обезбеђује разарање материјала, продирање алата и формирање профила који одговара профилу алата.

2.1 Принципи обраде

Скидање материјала код електроерозионног поступка се остварује путем учесталих електричних пражњења између предмета обраде и алата, који у овом случају играју улогу електрода. Зависно од средине у којој се одвијају пражњења, разликују се два вида овог поступка:

- Електролучна ерозија и
- Електроискрична ерозија.

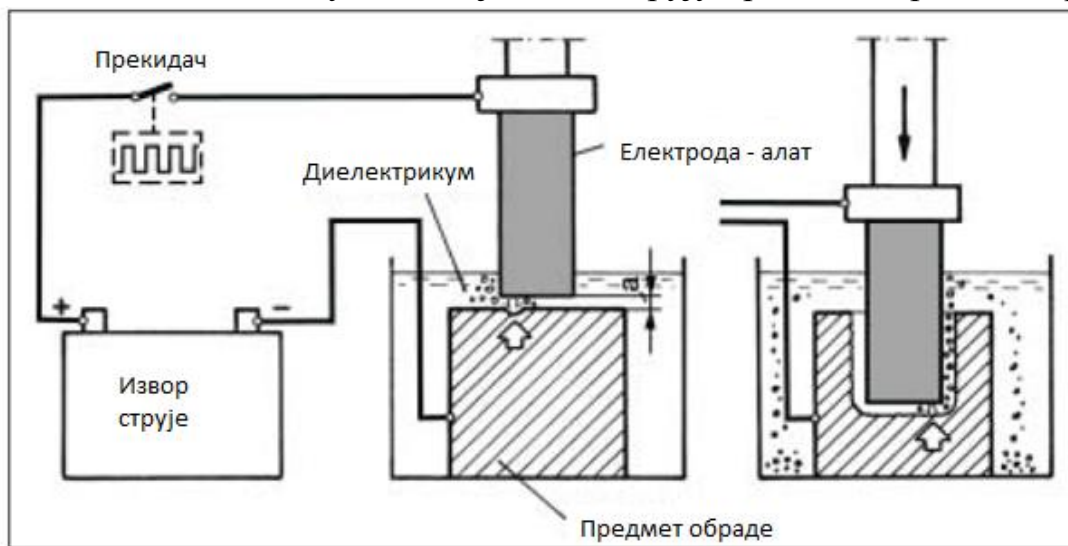
Електролучну ерозију карактерише то, да се процес скидања материјала са предмета обраде остварује периодичним стационарним електричним пражњењима у атмосфери. Пражњење се остварује помоћу електричног лука. Успостављање електричног лука се остварује механичким додиривањем електроде - алата са предметом 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 користи у ограниченом обиму, јер се у процесу обраде формира јонизјући стуб проширен према аноди, чиме се смањује тачност обраде, тако да овај поступак нема већи значај за ширу индустријску праксу, па се због тога и не изучава посебно. Међутим, појмови и параметри електроискричне ерозије, која се знатно више изучава и користи у пракси, могу се у потпуности применити и код електролучне ерозије.

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 mm, 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].

2.2 Суштина - физика процеса

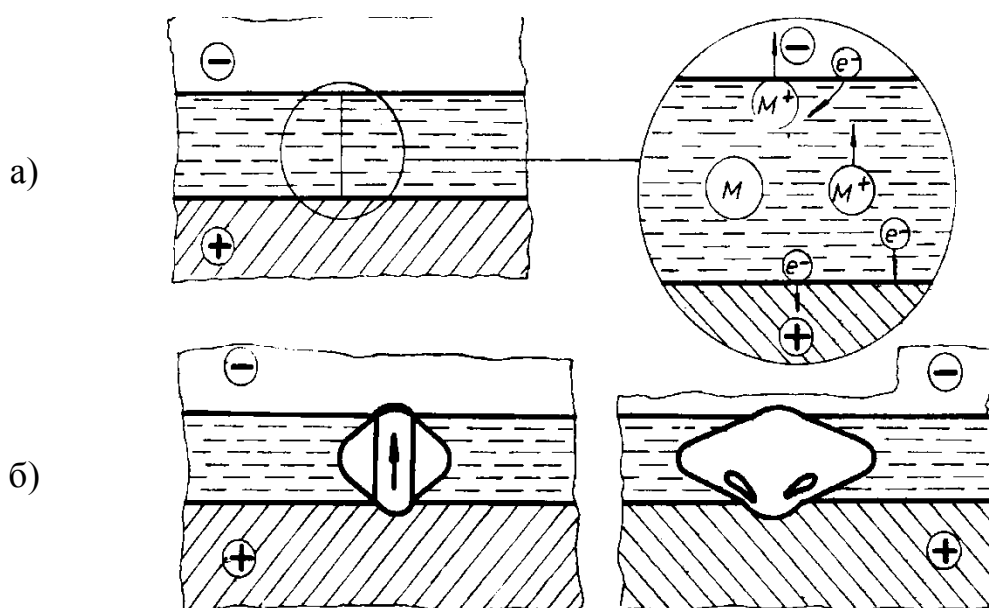
Процес електроерозионе обраде се може најлакше објаснити коришћењем просте шеме приказане на слици 2.2. Предмет обраде и алат (електрода) доводе се у радни положај тако да се међусобно не додирују. Између њих је зазор који је испуњен диелектрикумом (течност са високим електричним отпором). Због тога се ова обрада 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, међутим, растојање између њих постепено смањује, онда ће при неком малом растојању (а) доћи до пробоја електричне струје кроз диелектрикум и појаве искре. Ово растојање се назива критично растојање и креће се у границама 0.005-0.5 mm, зависно од услова који се остварују приликом процеса обраде.



Слика 2.2 Основни принцип електроерозионе обраде [1]

Отпочињањем процеса електричног пражњења (слика 2.3-а) кроз уски канал између предмета обраде и алата у коме долази до претварања електричне енергије у топлотну енергију долази до интензивног загревања површина предмета обраде и алата (до температуре 8000-12000°C, па и више). Такође, долази до испаравања диелектрикума и стварања гасних мехурова (слика 2.3-б), уз врло висок притисак диелектрикума. Када се

помоћу прекидача прекине ток струје, долази до прскања гасних мехурова, услед изненадног пада температуре, а динамичке силе избацују растопљени метал из кратера, који је ту настао. Експлозивно расплињени материјал, услед расхладног дејства диелектрикума, отврдњава у облику ситних куглица и одводи се из зоне обраде помоћу диелектрикума који константно циркулише. На тај начин се формира кратер одговарајуће величине. Поступак се понавља, а увођењем електронског прекидача може се постићи врло велика фреквенција пражњења и настајања кратера поред кратера, односно интензивно одношење материјала са површине предмета обраде [1].



Слика 2.3. Зона пражњења и гасни мехур при електроерозионој обради [2]

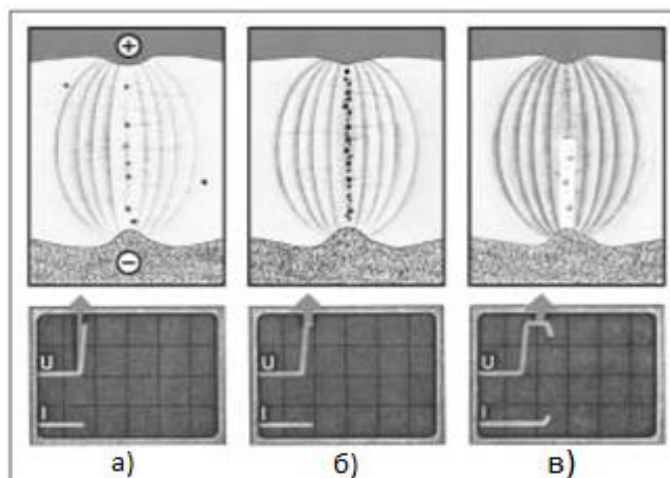
Осим са површине предмета обраде овим поступком се остварује и скидање материјала са електроде (алата), што се карактерише као трошење електроде. Правилним избором и подешавањем радних параметара процеса може се постићи скидање материјала предмета обраде у износу 99.5% и свега око 0.5% трошења материјала на електроди, о чему ће касније бити више речи.

Две основне појаве у процесу електроерозионе обраде су: електрична (побуђивање пражњења течне диелектричне средине) и топлотна (топљење и испаравање материјала предмета обраде, електроде и испаравање диелектрикума). При томе, електрични напон и јачина електричне струје, у

току једног електричног импулса, имају карактеристичну промену са временом (слике 2.4, 2.5 и 2.6), коју карактеришу три фазе [1]:

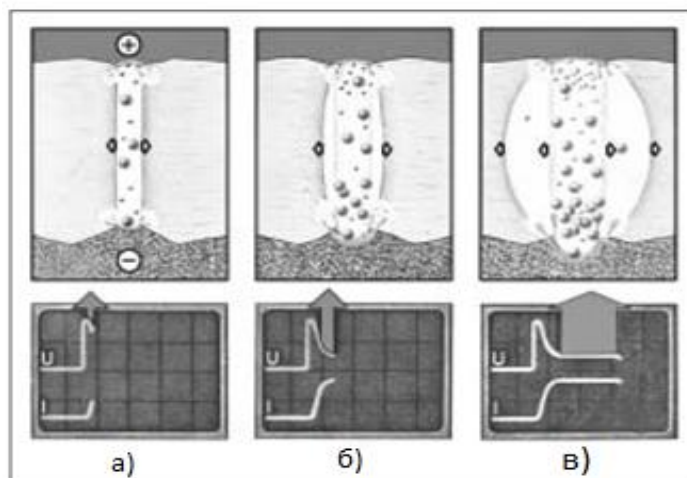
- Јонизација диелектрикума,
- Пражњење и
- Распадање стуба јонизације (дејонизација).

Фаза I – јонизација диелектрикума, слика 2.4. Услед дејства напона извора у простору између електроде (+) и предмета обраде (-) образује се јако електрично поље. Захваљујући привлачном дејству магнетних сила овог поља, као и геометријској конфигурацији површина, долази до нагомилавања електро-проводљивих честица које пливају у диелектрикуму на месту највеће јачине магнетног поља, тј. на најмањем локалном растојању између површине предмета обраде и електроде (слика 2.4-а). Тако се образује својеврстан мост од ових честица, као што је приказано (слика 2.4-б). Након тога долази до покрета електрона, из површине негативно наелектрисане електроде (предмета обраде) преко оствареног моста у правцу позитивно наелектрисане електроде (алата) (слика 2.4-в). Долази до убрзавања електрона који се на свом путу сударају са неутралним честицама диелектрикума, при чему долази до њиховог цепања и стварања нових негативно, али и позитивно наелектрисаних честица. Ослобођени електрони даље изазивају сударе, па на тај начин долази до ланчане реакције у којој се ствара мноштво негативно и позитивно наелектрисаних јона. Овај процес се назива јонизација, односно стварање електро-проводљивог канала између електроде и предмета обраде, на месту где је локални зазор најмањи.



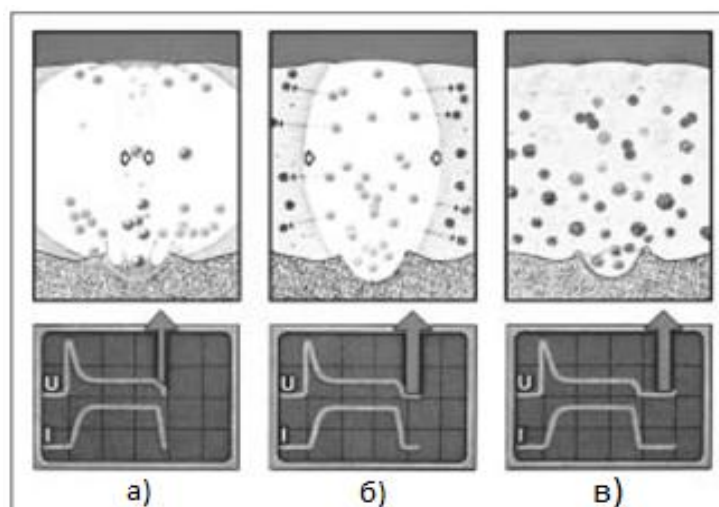
Слика 2.4 Шематски приказ фазе I - јонизација диелектрикума

Фаза II – електрично пражњење, слика 2.5. Мноштво позитивно наелектрисаних честица се креће ка негативној, а негативно наелектрисане честице ка позитивној електроди. Тако се остварује ток електричне струје (слика 2.5-а), која постепено расте према максималној вредности (слика 2.5 - б). При судару лавине убрзаних честица са површинама електрода супротног наелектрисања, долази до претварања електричне енергије у топлотну у уском подручју канала за пражњење. Настаје зона плазме која веома брзо достиже температуру од 8000 до 12000°С. Код овако високе температуре долази до тренутног растапања 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 2.5-б и в).



Слика 2.5 Шематски приказ фазе II - електрично пражњење

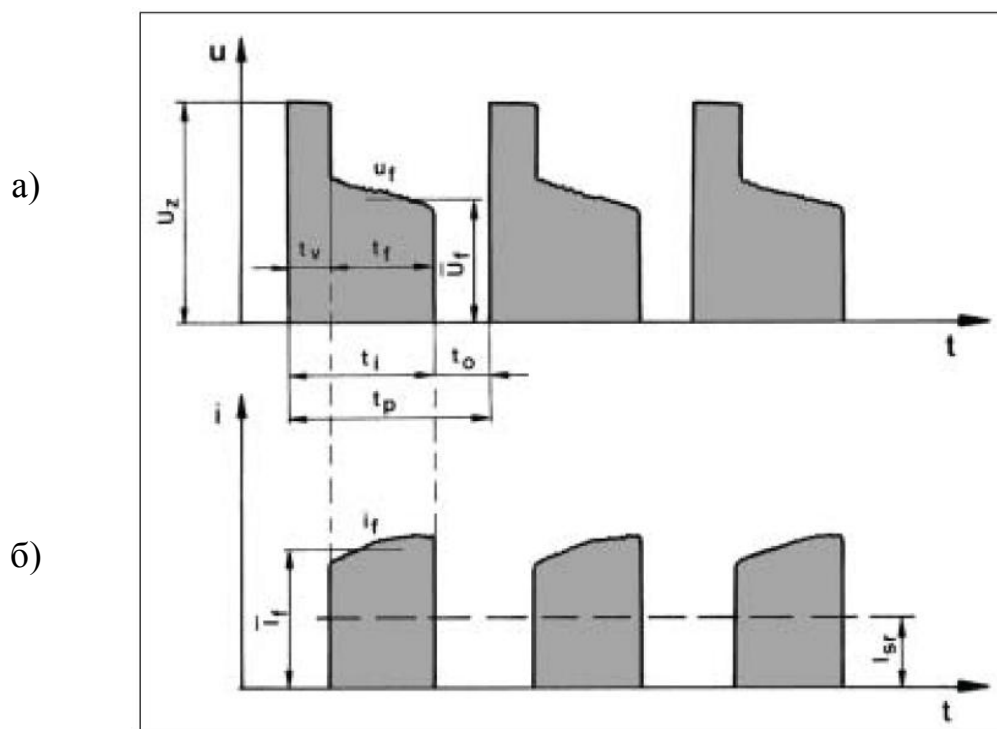
Фаза III – дејонизација диелектрикума, слика 2.6. Прекид тока електричне струје изазива нагли пад броја наелектрисаних честица које су у покрету, пад притиска и нестанак канала за пражњење (слика 2.6-а). Диелектрикум врши повртани притисак на гасни мехур, због чега долази до његовог смањивања (слика 2.6-б), а потом и до потпуног нестанка. Долази до плављења растопљеног материјала диелектрикумом, тако да исти нагло очврсне у облику ситних куглица. Као продукти процеса електроерозије, настају углавном графитне честице и гасни мехурићи (слика 2.6-в). Гашењем канала за пражњење нестају негативно и позитивно наелектрисани јони, тј. остварује се дејонизација радног простора.



Слика 2.6 Шематски приказ фазе III - дејонизација диелектрикума

2.3 Карактеристике електричних импулса

Код електроерозионе обраде се разликују напонски и струјни импулси, који се налазе у међусобно строгој зависности. Графици напонских и струјних импулса су шематски приказани сликом 2.7 [1].



Слика 2.7 Шема електричних импулса при електроерозионој обради (а-напонски импулс ; б-струјни импулс)

Напонски импулси су дефинисани следећим карактеристичним величинама (слика 2.7-а) [1]:

U_z – *напон прелазног хода* (напон између предмета обраде и електроде-алата за време пражњења. Вредност овог напона се креће од 40 до 250 V, то зависи од материјала предмета обраде и електроде који се упарују).

$\bar{U}_f$ – *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 електроде који се упарују).

t_v – *дужина јонизације* (представља време од момента довођења напона на предмет обраде и електроду до почетка пражњења).

t_f – *дужина 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 – *дужина импулса* (време укупног трајања напонског импулса, односно: $t_i = t_v + t_f$)

t_o – *дужина 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 (искре), односно остварила дејонизација и хлађење радног простора).

t_p – *периода импулса* (представља време између предходног и наредног импулса, односно: $t_p = t_i + t_o$)

f – *фреквенција импулса* - $f = 1/t_p = 1/(t_i + t_o)$

τ – *коефицијент деловања импулса или релативна дужина импулса* (однос дужине и периоде импулса, односно: $\tau = t_i / t_p = t_i / (t_i + t_o) = t_i \cdot f$; $\tau\% = [t_i / (t_i + t_o)] \cdot 100\%$. Показује колико се процената периоде импулса користи за константан рад, тј. скидање материјала, а колико отпада на паузе).

Код **струјних импулса** (слика 2.7-б), осим већ дате дужине пражњења t_f , разликују се још:

$\bar{I}_f$ – струја пражњења (представља средњу вредност струје за време једног пражњења)

I_{sr} – средња вредност радне струје (представља средњу аритметичку вредност струје која за време обраде тече кроз радни простор. Ова вредност се непрекидно региструје помоћу амперметра уграђеног на машини).

3

Производне операције електроерозионом обрадом

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 сликом 3.1. Треба рећи да се применом електроерозије остварује економична обрада и код делова са сложеним површинама, као и на материјалима мале тврдоће (неким 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.

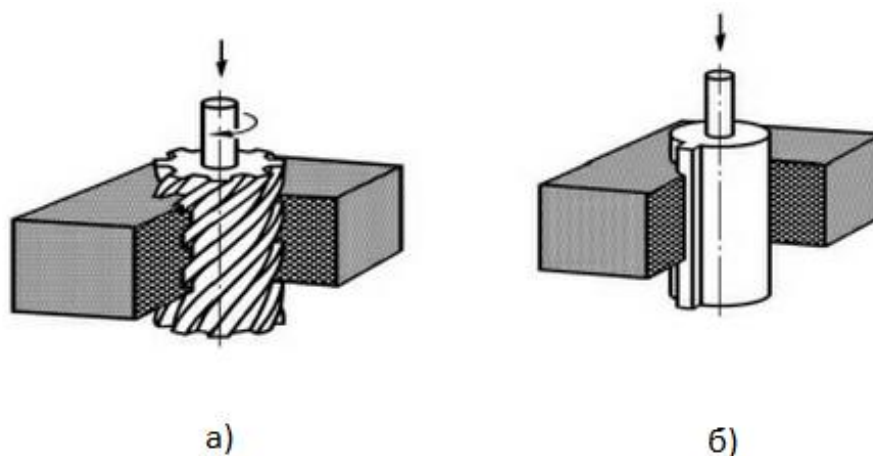


Слика 3.1 Подела производних операција електроерозине обраде [10]

3.1 Просецање електроерозијом

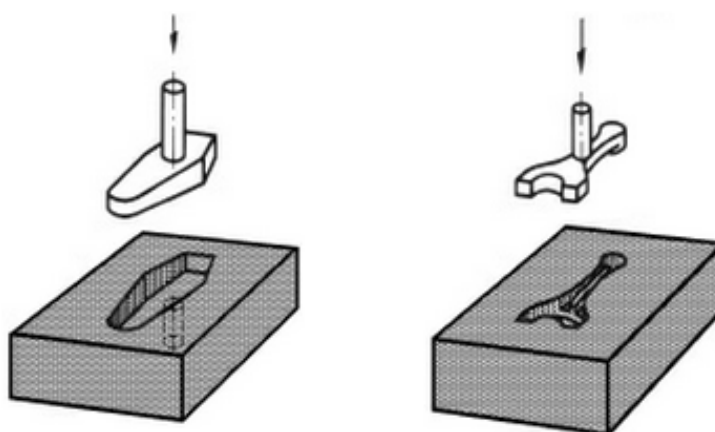
Просецање електроерозијом обухвата све врсте операција електроерозијом, код којих се средња релативна брзина између електроде - алата и предмета обраде поклапа са брзином продирања електроде у предмет обраде. Операције које се могу изводити на овај начин су бушење и дубљење отвора, односно гравирање.

Бушењем помоћу електроерозије (слика 3.2) 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 3.2 Бушење електроерозијом а) ротирајуће кретање електроде алата ; б) вертикално кретање електроде-алата

Дубљење отвора као и гравирање (слика 3.3) 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.

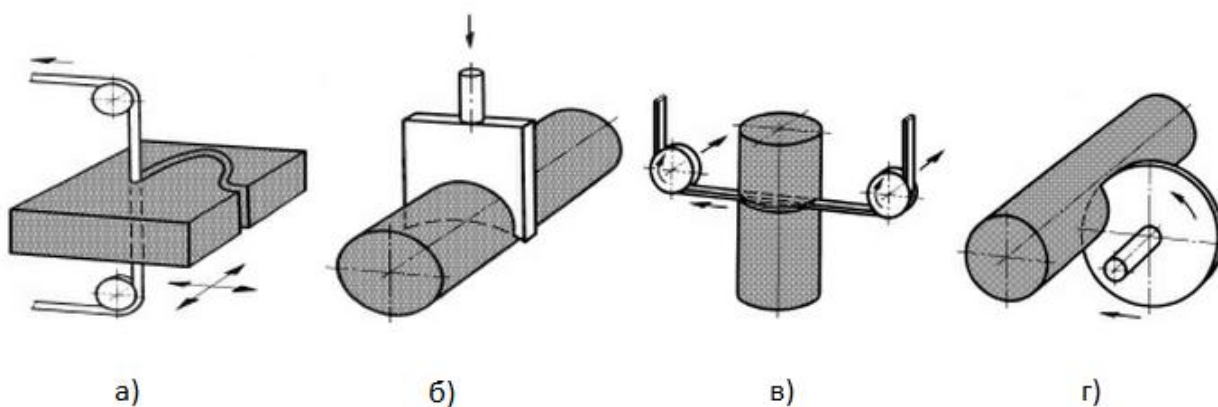


Слика 3.3 Израда удубљења различитих облика [10]

3.2 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 3.4):

- Резање помоћу жице (слика 3.4 - а),
- Одсецање помоћу плоче (слика 3.4 - б),
- Одсецање помоћу траке (слика 3.4 - в) и
- Одсецање помоћу обртног диска (слика 3.4 - г)

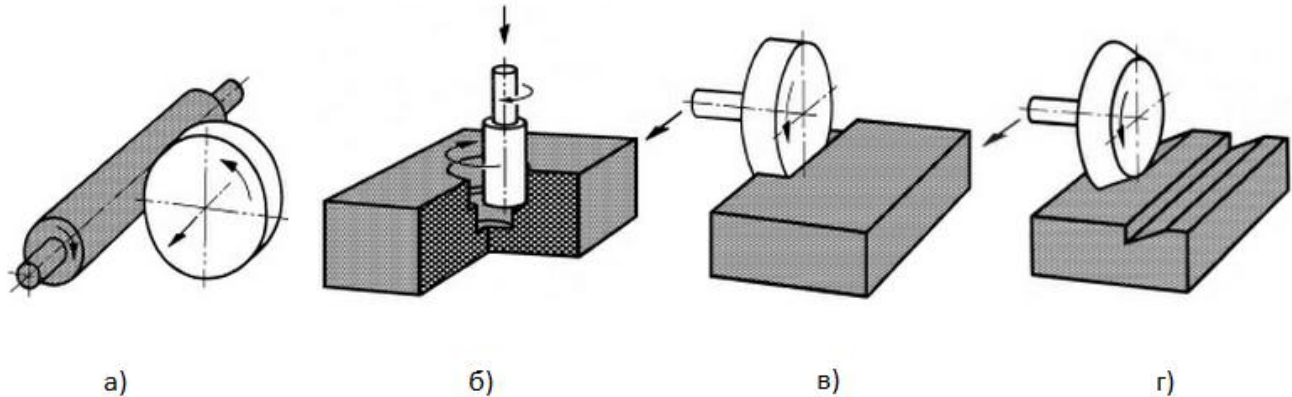


Слика 3.4 Сечење електроерозијом [10]

3.3 Брушење електроерозијом

Брушење електроерозијом обухвата све поступке обраде који се изводе помоћу електроде - алата која се окреће 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 - 30V). При томе се разликује неколико врста брушења која се изводе електроерозијом (слика 3.5):

- Спољашње кружно брушење (слика 3.5 - а),
- Унутрашње кружно брушење (слика 3.5 - б),
- Равно брушење (слика 3.5 - в) и
- Профилно брушење (слика 3.5 - г)

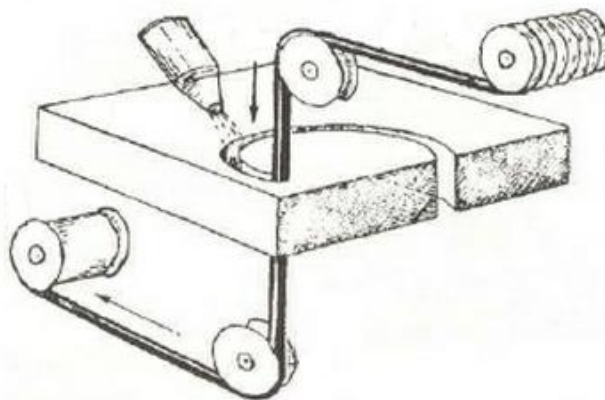


Слика 3.5 Брушење елктроерозијом [10]

Ова врста обраде се користи за тачну обраду цилиндричних и конусних површина, као и за брушење алата итд.

3.4 Електроерозионо резање жичаном електродом

Главни алат који се користи у овом процесу обраде је танка жичана електрода. Она се креће у правцу своје осе, док предмет обраде изводи сложено кретање по путањи која је унапред дефинисана (X, Y – осе). На тај начин се омогућује електроерозионо исецање (резање) врло компликованих делова и сложених површина (слика 3.6). Такве површине се јављају при изради алата и других делова, различите конфигурације, који морају бити јако прецизно израђени. Испирање, дела предмета обраде који је обрађен као и жичане електроде, се врши помоћу два коаксијална млаза у чијој се средини налази жичана електрода. Брзина кретања електроде зависи од њеног пречника, материјала од ког је израђена, материјала и облика предмета обраде, и других различитих фактора.



Слика 3.6 Електроерозионо одсецање сложених облика ромоћу жичане електроде [10]

Да би отпочео процес одсецања неког облика, овим поступком обраде, потребно је прво избушити рупу на предмету обраде или, ако је могуће извести, почети од руба предмета обраде. На подручју где се жица налази, односно где се врши обрада, свако пражњење ствара кратер у предмету обраде. Узастопним понављањем пражњења, и померањем жичане електроде и предмета обраде, добија се се траг сечења, односно касније и облик комада који се жели добити. У току обраде могуће је закретање жице под неким углом, што омогућава израду делова са конусом или са различитим профилима на врху и дну комада. Током електроерозионе обраде жичаном електродом нема механичког контакта жичане електроде и предмета обраде.

Пречник жичане електроде се одређује на основу ширине реза, која је једнака суми пречника жице и двоструке вредности међуелектродног зазора, и лимитиран је електричним величинама (струјом и отпором). Тежи се да пречник жице буде што мањи. Обично се пречници крећу између 0.2 и 0.3 mm, при чему се најчешће користи жичана електрода пречника 0.25 mm. Код малих дебљина предмета обраде и врло малих унутрашњих радијуса углова, користи се жичана електрода пречника 0.1-0.2 mm. За извођење најфинијих резова са врло малим унутрашњим радијусима углова, при изради профилних дизни и слично, где се постиже минимални радијус од 0.02 mm, користи се врло танка жичана електрода пречника 0.03-0.1 mm. Овако танка жичана

електрода се израђује од молибдена, волфрама или челика. Стандардне електроде, израђене од бакра и месинга, не задовољавају увек услове који су потребни за постизање доброг квалитета обраде, па се побољшање њихових својстава врши пресвучењем врло танким слојем специјалних легура. Овако пресвучене жичане електроде могу да пренесу много већу енергију пражњења, што даље има за последицу остваривања знатно веће прозводности приликом обраде. Бакарне електроде су мање у употреби јер имају неповољна механичка својства. У широј примени, користе се месингане електроде, којима се успешно може обрадити широк спектар различитих материјала предмета обраде, као што су на пример тврди метал, бакар, челик, алуминијум, графит, и др.



Слика 3.7 Делови добијени електроерозиним резањем жичаном електродом

3.4.1 Сечење жицом и конвенционална обрада

Обрада на ерозимату за сечење жицом је једноставнија и даје високи квалитете обрађене површине предмета обраде. Следећим примером, приказана је обрада на ерозимату која се врши из четири операције (слика 3.8), док је за обраду истог дела конвенционалним методама потребно 12 операција (слика 3.9) [3].

1



Програмирање профила – 15'

2



Бушење за обраду прореза и
профила – 5'

3



Обрада унутрашњег и спољашњег
профила – 1 h 45'

4



Обрада прореза – 10'

Укупно време обраде – 135'

Слика 3.8 *Обрада дела на ерозимату за сечење жицом*

1



Глодање две равне површине,
груба и фина обрада – 12'

2



Груба обрада спољашњег профила – 15'

3



Завршна обрада спољашњег профила – 10'

4



Бушење отвора $\varnothing 70$ – 3'



Груба обрада пречника 72 mm – 5'



Бушење отвора $\varnothing 8$ и обрада прореа – 14'



Глодање на $\varnothing 73,4$ (полузавршна обрада) отвора $\varnothing 74$ – 5'



Глодање отвора $\varnothing 74$ (завршна обрада) – 5'



Прорезивање 5 жлебова – 20 '



Глодање прореа 3 mm – 15'



Завршна обрада за добијање дебљине од 25 mm – 3'



Обарање ивица комплетног комплетног дела – 4'

Укупно време обраде – 111'

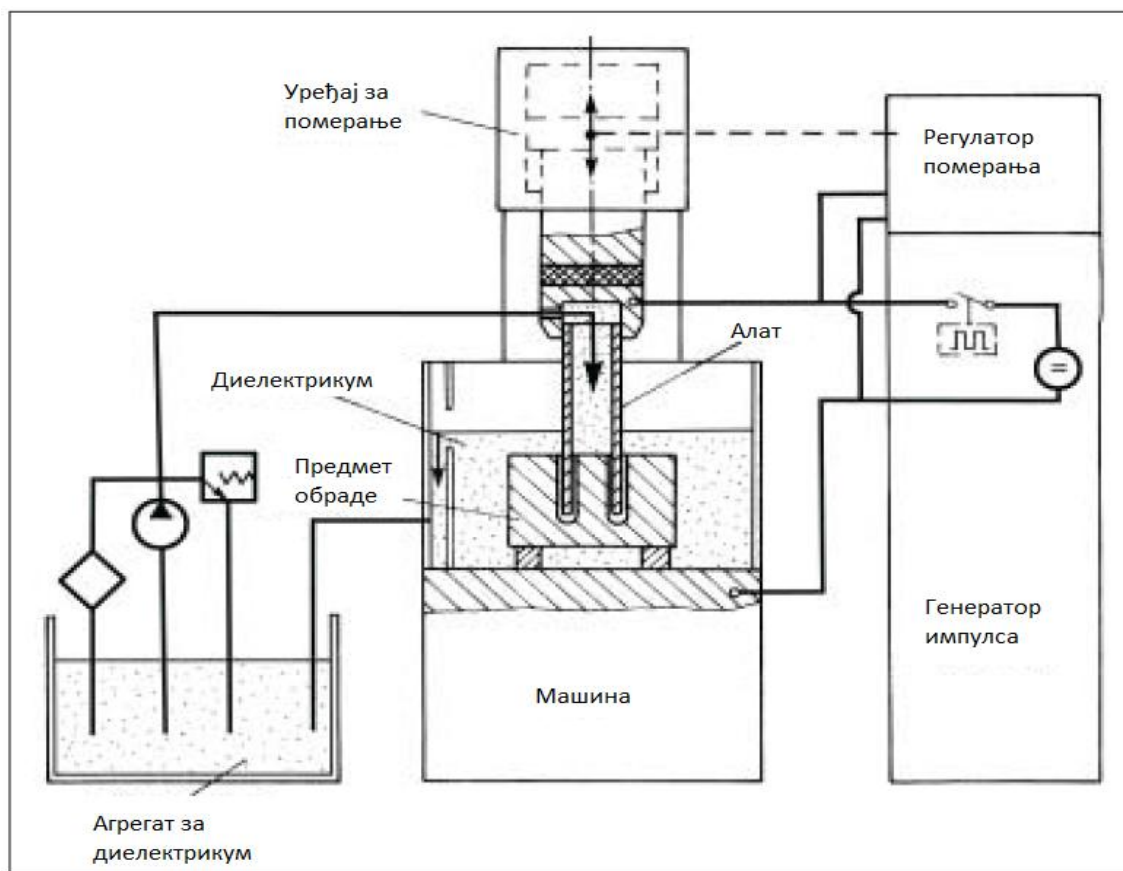
Слика 3.9 *Обрада дела конвенционалним поступцима обраде*

Ефективна времена свих обрада на конвенционалним машинама су мања од времена израде дела на ерозимату, али су зато припремно-завршна времена много већа, па се долази до закључка да је овај део лакше и брже изградити на ерозимату него на конвенционалним машинама. Опслуживање ерозимата је много лакше, јер је цео поступак аутоматизован.

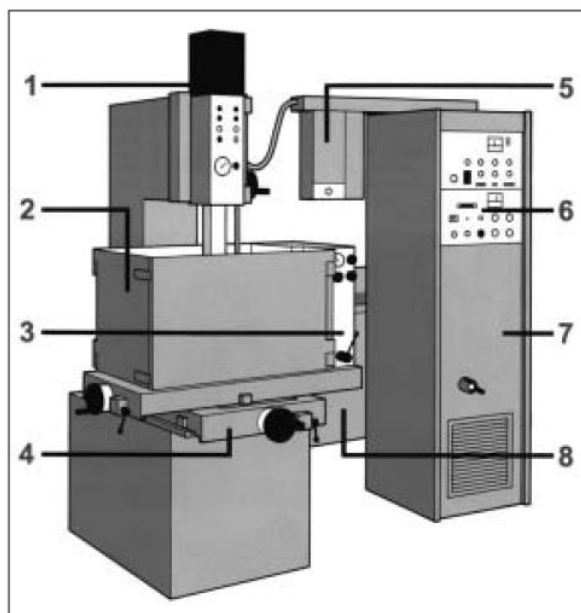
4

Инсталација – опрема за електроерозиону обраду

Инсталација, односно опрема за електроерозиону обраду се састоји из четири основне компоненте: генератор електричних импулса, алатна машина, агрегат за пречишћавање и циркулацију диелектрикума и управљачка јединица. Поред ове четири основне компоненте, у инсталацију, односно опрему за електроерозиону обраду се морају убројати и електроде и диелектрикум, јер се без њих овај поступак не би могао одвијати. Свака компонента појединачно биће детаљније објашњена у наставку овог поглавља. На слици 4.1 приказана је општа шема инсталације за електроерозиону обраду, заједно са основним компонентама, а на слици 4.2 је приказан општи изглед једног постројења са пуном електродом.



Слика 4.1 Шема инсталације за електроерозивну обраду са основним компонентама [1]



Слика 4.2 Општи изглед постројења са пуном електродом

1. Уређај за померање електроде
2. Када за диелектрикум
3. Разводни блок за дијалектрикум
4. Координатни радни сто
5. Прикључни блок за напон електроде
6. Управљачка јединица
7. Генератор електричних импулса
8. Агрегат за диелектрикум

4.1 Генератор електричних импулса

Генератор електричних импулса је најважнији део (компонента) постројења за електроерозиону обраду. Главни задатак генератора електричних импулса јесте да производи електричне импулсе одређених карактеристика (детаљно описано у поглављу 2.3).

Током година развоја електроерозионе обраде направљен је велики број различитих типова генератора електричних импулса, и сви они раде на различитим принципима. Данас се најчешће користе следећи типови генератора [1]:

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

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

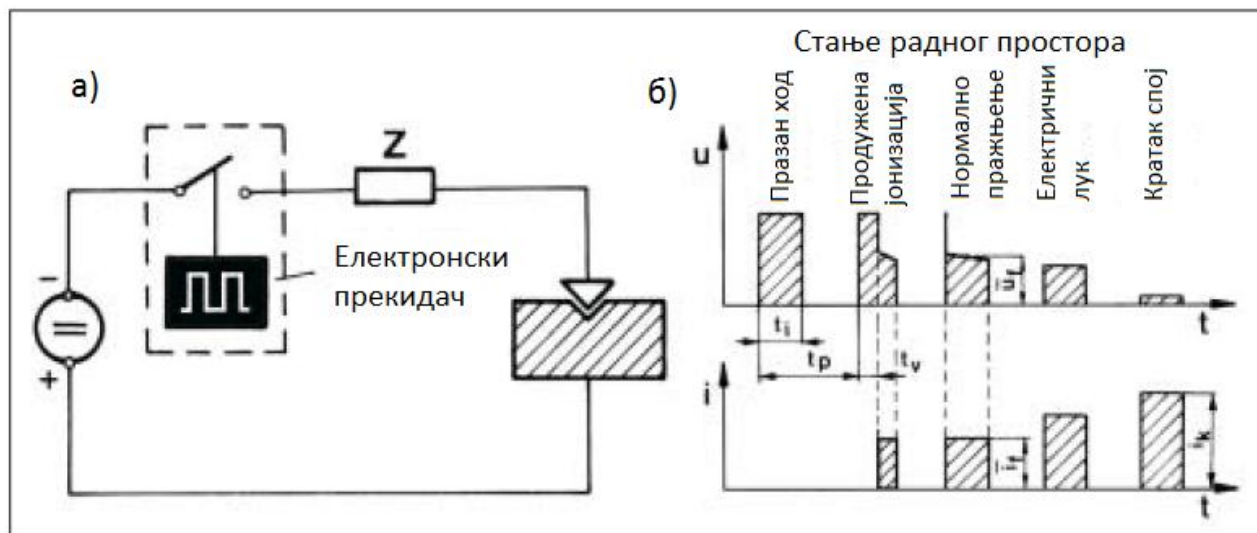
Процес генерисања струјних импулса код релаксационих генератора електричних импулса потпуно зависи од састава и услова у радном простору. Са друге стране, машински и полупроводнички генератори спадају у групу генератора са независним дејством. Ови типови генератора генеришу импулсе константног карактера, који не зависе, или делимично зависе, од састава радног простора. Карактеристике електричних импулса, *напон, струја, дужина импулса, дужина паузе и коефицијент 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 импулсе 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 4.3 - а). Електронски прекидач омогућује

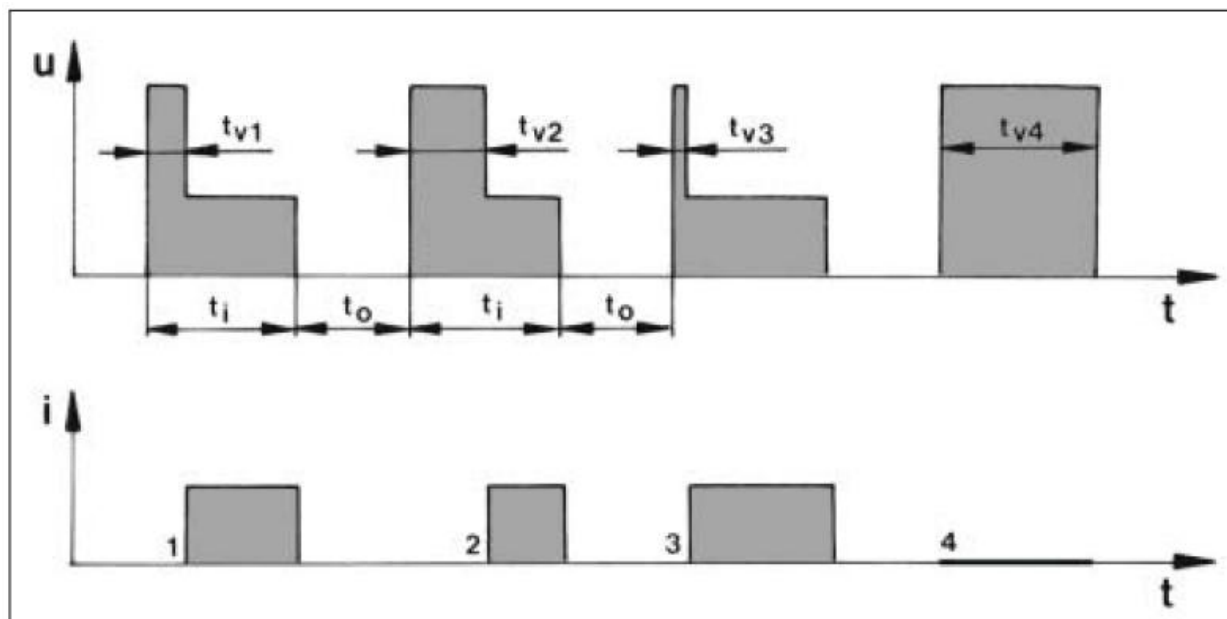
периодично довођење напона у простор између електроде - алата и предмета обраде, ради остваривања процеса електричног пражњења. За овај процес се претпоставља да се физичка својства радног простора између електроде - алата и предмета обраде морају одржавати у одређеним границама. Појава, да се ови параметри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

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



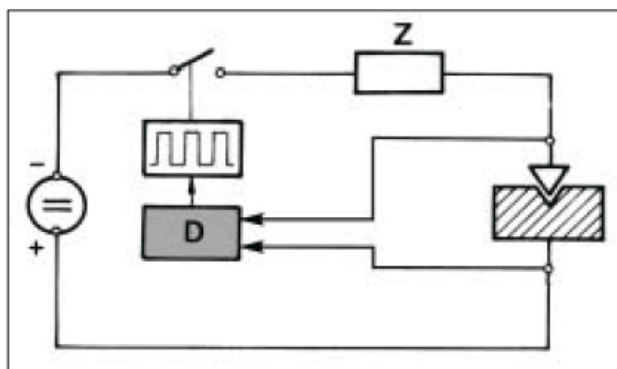
Слика 4.3 а) принципска шема, б) шема тока напона и струје, код полупроводничких импулсних генератора [1]

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 4.4 - 4). 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, с обзиром да тада енергија пражњења није константна.

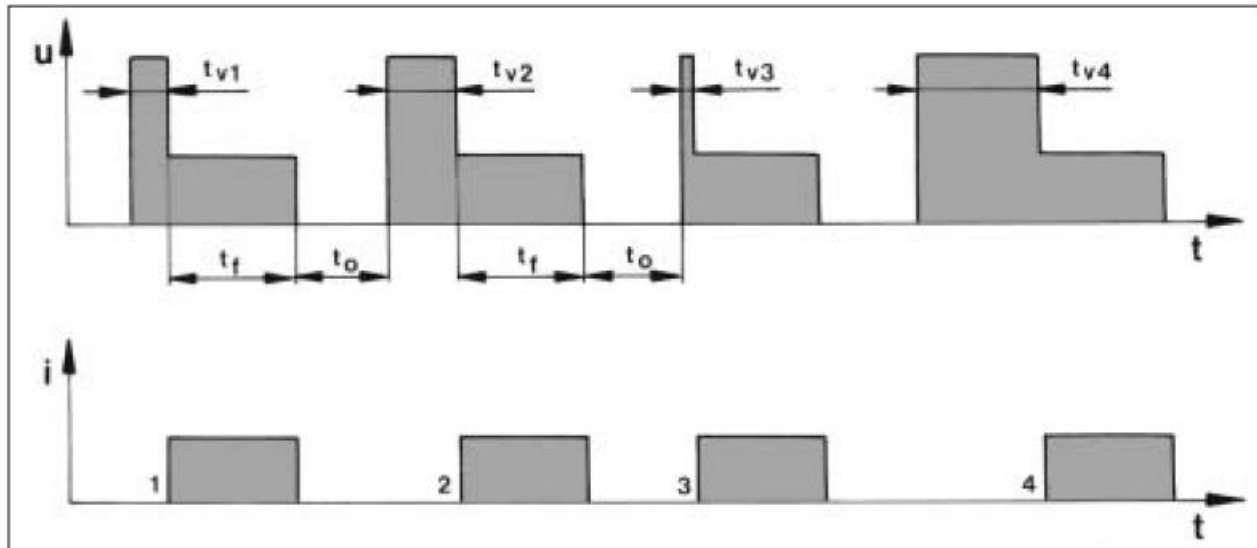


Слика 4.4 Промена дужине ефективног пражњења код стандарних генератора електричних импулса

Код **генератора са контролисаним пражњењем** постоји зависно управљање електронским прекидачем уз помоћ детектора D , који омогућује регистровање почетка сваког пражњења (слика 4.5). Обзиром на то, управљање електронским прекидачем се одвија на тај начин што се узима у обзир променљивост времена јонизације t_v (слика 4.6). 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 4.5 Принципска шема генератора са контролисаним пражњењем



Слика 4.6 Шема тока напона и струје код импулсних генератора са контролисаним пражњењем

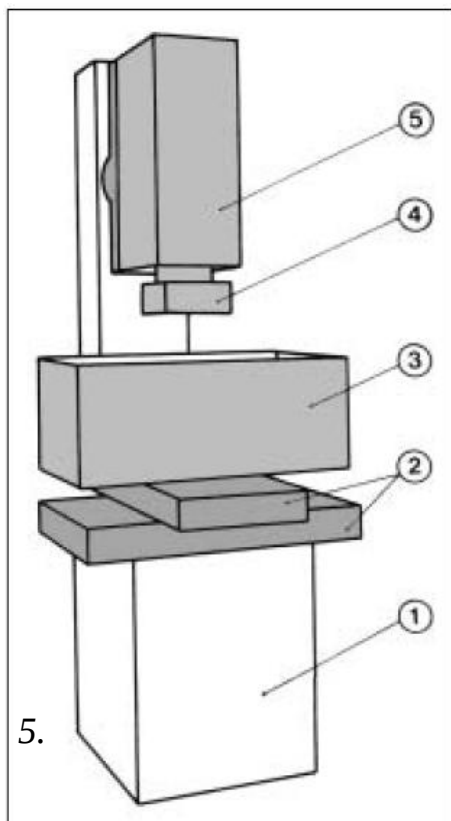
4.2 Алатна машина

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.

Досадашњим развојем машина за електроерозиону обраду, искристалисала су се четири типа машина која су нашла ширу примену у пракси, то су:

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

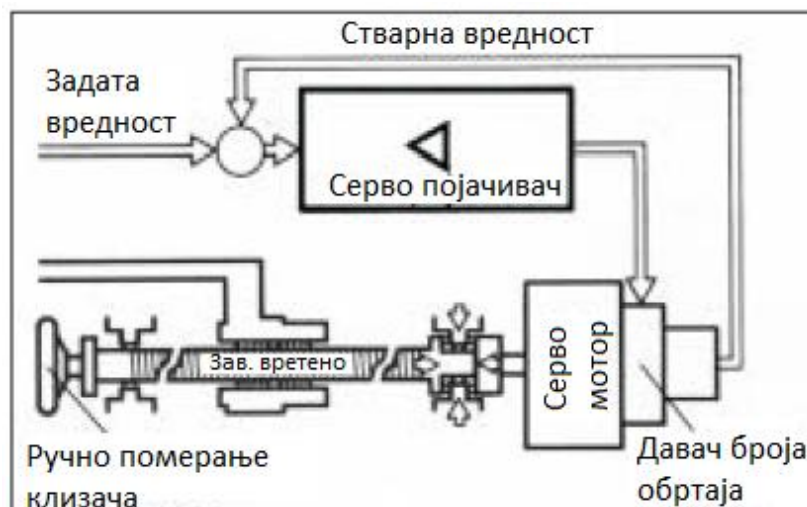
Елементи код прва три типа машина су углавном исти. Разлика постоји у начину позиционирања радног стола и електроде - алата, односно у начину управљања генератором електричних импулса и агрегатом за диелектрикум. Карактеристични елементи ових машина су приказани сликом 4.7.



Слика 4.7 Карактеристични елементи EDM - машина за бушење – упуштање гравура

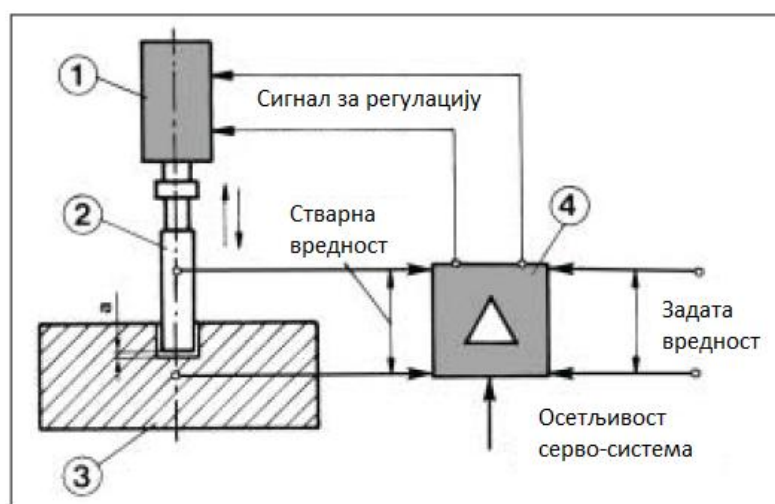
1. Постоље (стоне машине су без постоља)
2. Радни сто са укрштеним клизачем
3. Када у коју је смештен предмет обраде потопљен у иелектрикум
4. и 5. Носач електроде са регулатором помераја

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). За померање клизача код савремених EDM - машина углавном се примењује нумеричко управљање клизачем, чије је функционисање приказано сликом 4.8. Минимално померање клизача, овакве врсте система, износи $0.5 \mu\text{m}$, што омогућује постизање високе тачности приликом позиционирање електроде у односу на предмет обраде.



Слика 4.8 Шема функционисања НУ-управљања за померање клизача машине

Један од најважнијих елемената машина за електроерозиону обраду је **регулатор помераја**. Захтеве које он мора да испуни су висока тачност подешавања, висока осетљивост на сметње и кратке спојеве, као и велика крутост због деловања тежине електроде и притиска диелектрикума. Регулатором помераја се врши померање електроде - алата ради одржавања константног радног зазора a (слика 4.9) између ње и предмета обраде. Померање се остварује помоћу *средњег напона пражњења*. Могуће је и комбиновање помоћу *средње струје и напона*.



Слика 4.9 Шема регулације радног зазора између електроде и предмета обраде

Аналогним упоређивањем стварне, односно измерене, и задате вредности регулишуће величине (напона или струје), остварује се најчешће процес регулације. Затим се разлика ове две вредности повећава да би се добио адекватан сигнал за регулацију. Сигнал активира одговарајући механизам регулатора (слика 4.9), којим се електрода - алат спушта или подиже у односу на предмет обраде. Регулатори помераја се могу поделити у две групе:

- Слободни и
- Крути регулатори

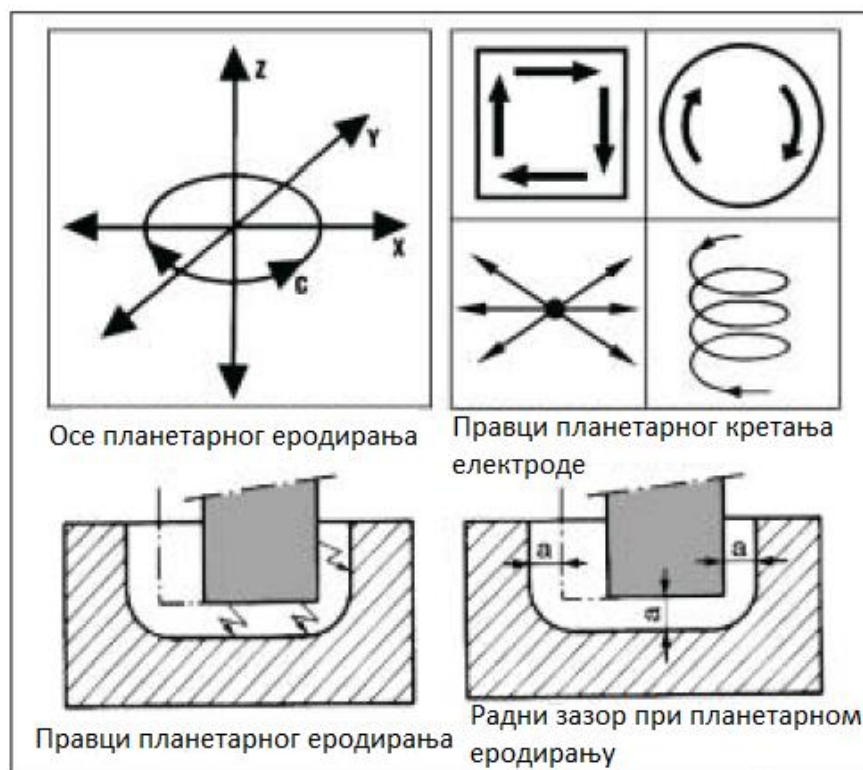
Главна карактеристика **слободних регулатора помераја** је та да се кретање целог система према предмету обраде остварује слободно. То значи да се кретање обавља под дејством сопствене тежине електроде - алата, без додатног погона. Исти је принцип кретања и у супротном смеру, односно кретање предмета обраде ка електроди - алату. У групу слободних регулатора спадају: *соленоиди, 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.

Основна разлика, а уједно и главна карактеристика, **регулатора са крутим системом** у односу на претходно описане регулаторе је да се 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 вретеном, диференцијални и хидраулични регулатори*.

Најчешће се код савремених машина користе регулатори са завојним вретеном као и хидраулични регулатори. Хидраулични регулатрои померају 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.

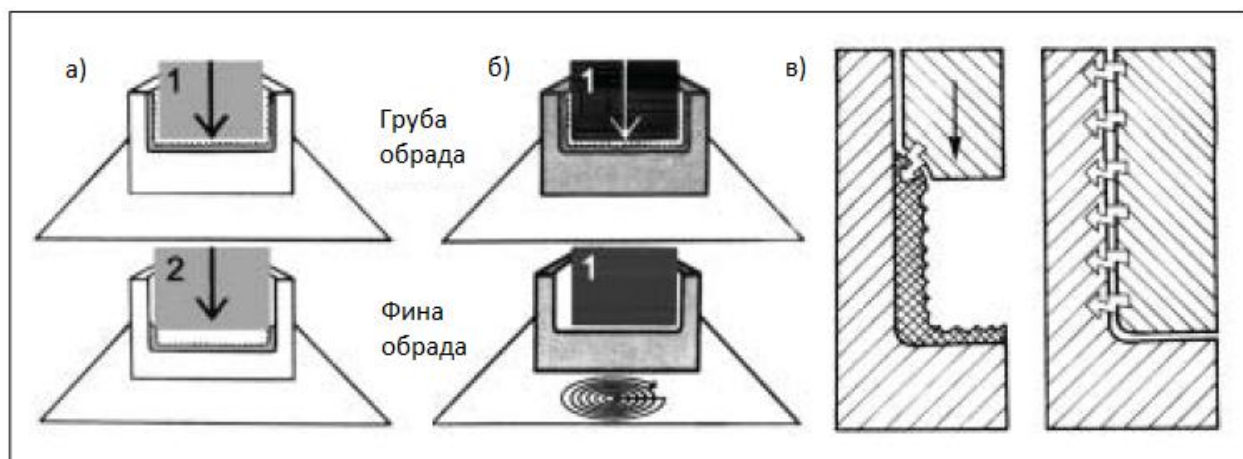
Веома дуго су се производиле само EDM - машине код којих се електроерозиона обрада остварује само вертикално, у једном или у оба смера

(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 4.10). Ако се на ове машине дода аутоматско позиционирање радног стола и носача електроде у правцу ове четири осе, што се најчешће изводи помоћу НУ-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.



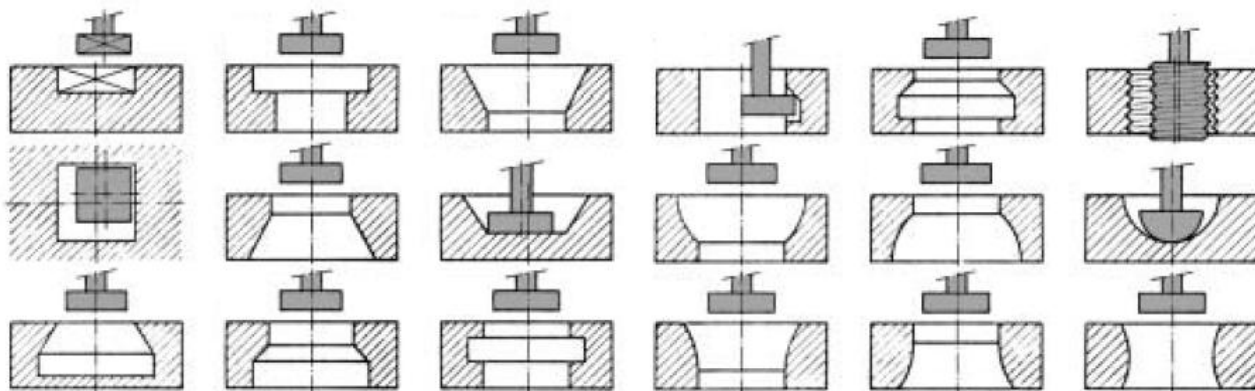
Слика 4.10 Шематски приказ рада машина са планетарним еродирањем [1]

За израду гравура (слика 4.11) на машинама код којих се еродирање остварује само у правцу Z – осе морају се користити најмање две електроде (једна за грубу и једна за фину обраду, слика 4.11 - а). Код машина са планетарним кретањем овај поступак је могуће остварити са само једном електродом (слика 4.11 - б), која је узгред знатно простијег облика него електрода која се користи на класичним машинама. Тако се остварују знатне уштеде у трошковима везаним за израду електроде, као и боље искоришћење електроде због много повољнијег распореда њеног трошења. Код овакве обраде, не троши се само чеона страна електроде, већ долази до хабања свих површина електроде и то по равним површинама, а не по оштрим ивицама (слика 4.11-в).

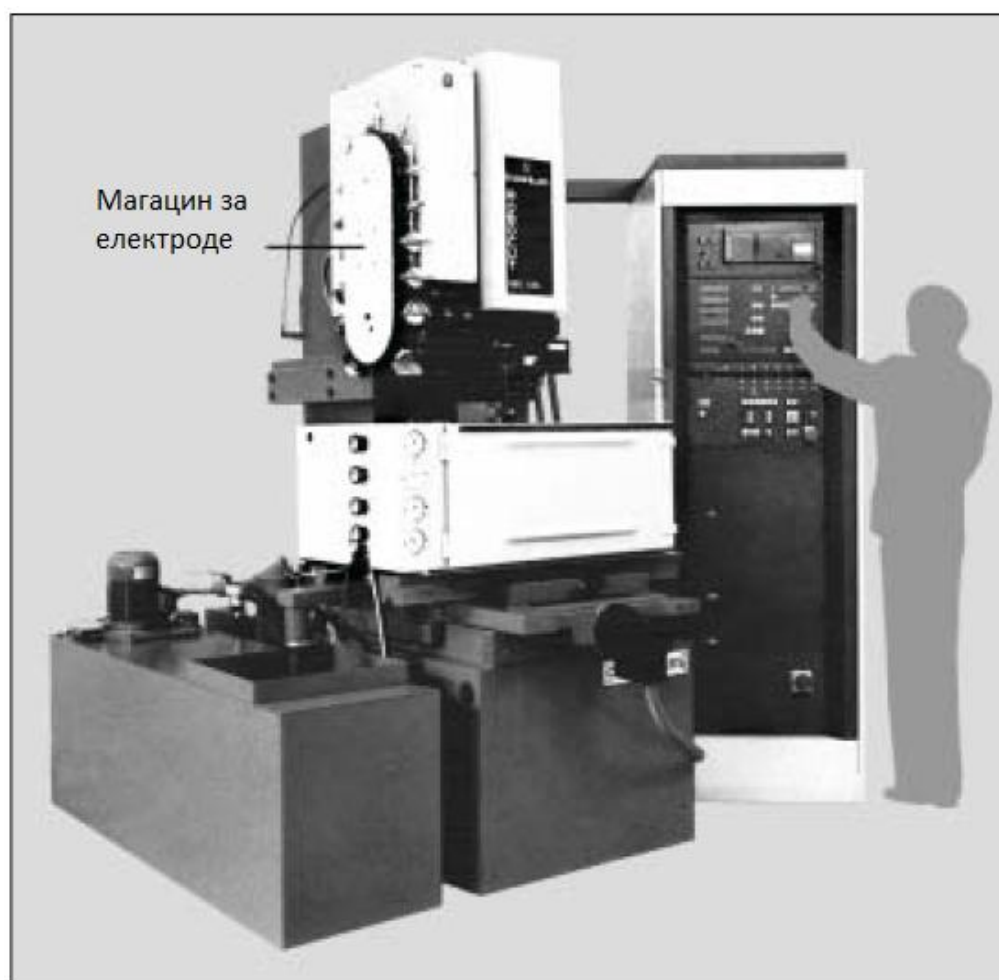


Слика 4.11 *Поређење класичног и планетарног еродирања [1]*

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 омогућују да се израде компликовани облици уз помоћ простих електрода. Неки од облика, за које су разрађени програми су приказани сликом 4.12, а изглед EDM - обрадног центра, којим се врши планетарно еродирање, је приказан сликом 4.13.



Слика 4.12 Основни облици површина које се еродирају на машинама са планетарним кретањем применом посебних програма



Слика 4.13 EDM - обрадни центар са магацином за електроде и системом за њихову аутоматску измену; ROBOCUT CNC фирме CHARMILLES, Швајцарска

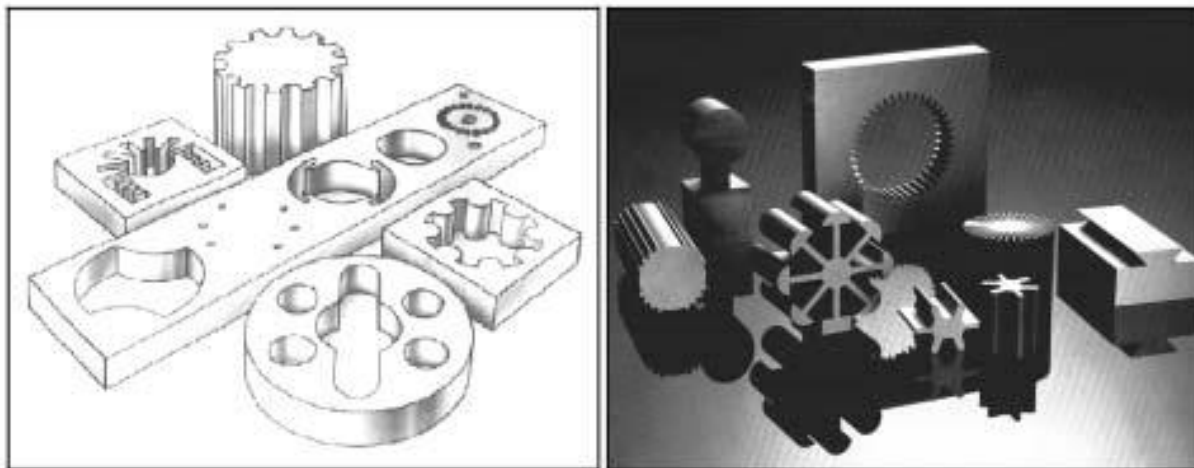
Данас су највише у употреби савремене CNC - машине за обраду електроерозијом. Један таква машина, са својим карактеристикама, дата је на слици 4.14.



Model			VMC-1370
Travel	X-axis Travel	mm	1300
	Y-axis Travel	mm	700
	Z-axis Travel	mm	650
Distance from spinde to table surface		mm	150-180
Distance from spinde center to colum		mm	785
Table size		mm	1400*710
Max.table load		kg	1000
T-slot size		mm	5-18
Spinde taper			BT50/190
Spinde max-speed		rpm	8000
Spinde motor power		kw	15
Axis motor power		kw	3.5*3.5*3.5
X/Y/Z rapid travese rate		m/min	15/15/12
Cutting speed		mm/min	1-10000
Screw specifications			5010
Positioning accuracy		mm	0.005
Repeatability		mm	±0.003
pressure		kg/cm2	≥6
Overall dimensions(L×W×H)		mm	3800*2750*3100
Weight		kg	11000
Power		kw	28/32

Слика 4.14 CNC - машина за електроерозиону обраду (VMC-1370) са карактеристикама

1969. године појавиле су се **EDM - машине за сечење помоћу жичане електроде**. Од тада су ове машине постале незамењиве код израде делова и алата сложеног облика из плочастог материјала. Карактеристични облици делова израђених овом врстом обраде су приказани сликом 4.15.



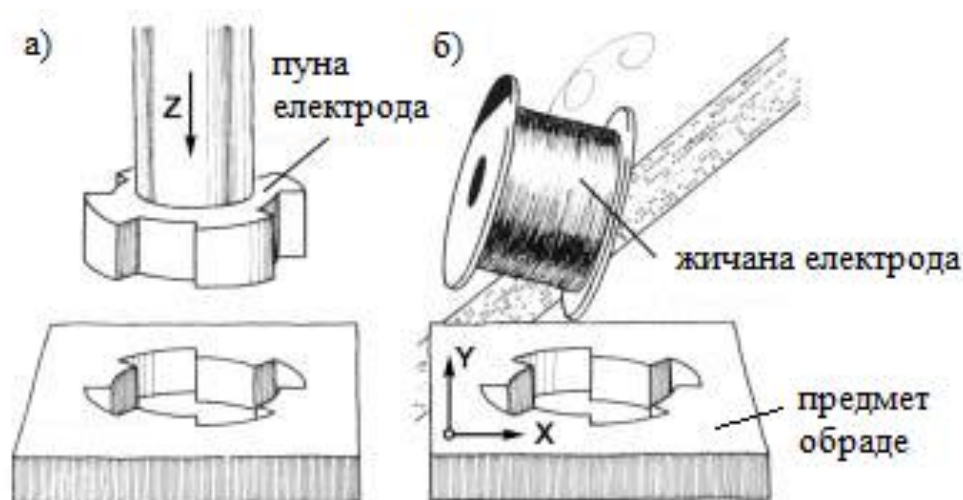
Слика 4.15 Карактеристични облици делова обрађених на EDM - машинама са жичаном електродом

Постоји велика разлика у поступку израде делова EDM - машинама са пуном електродом и са жичаном електродом. Ова разлика се може најбоље приказати и објаснити помоћу слике 4.16.

Код првог типа машине (слика 4.16-а) електрода у потпуности одговара облику контуре дела који се жели добити. Обрада се врши једноставним спуштањем такве електроде у материјал предмета обраде. Електрода је сложеног облика, док је њено кретање врло једноставно и остварује се само у вертикалном правцу Z-осе.

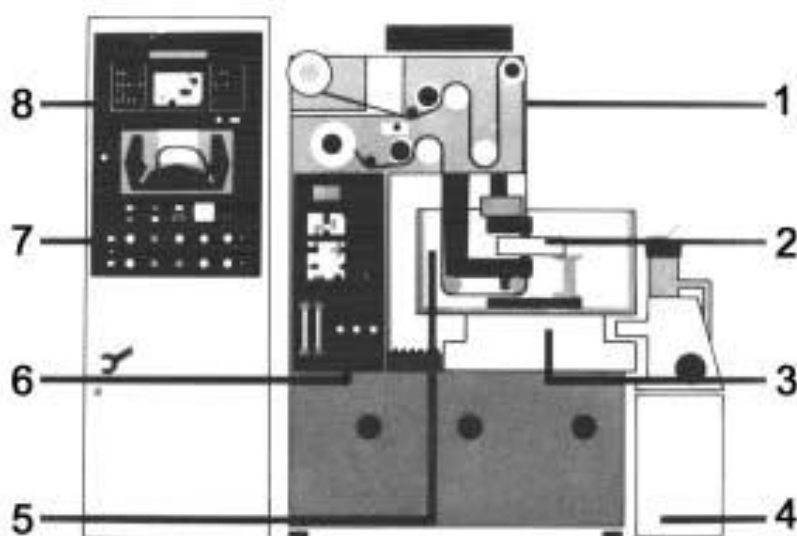
Код другог типа машине (слика 4.16-б) електрода има облик танке жице, која се непрекидно покреће у правцу своје осе, док предмет обраде изводи сложено кретање према унапред програмираној путањи (X,Y-осе). Најчешћи пречник жичане електроде је од 0.1 - 0.3mm. Пошто се у овом случају не користи сложена електрода, самим тим се смањују трошкови

обrade, на овој машини се остварује врло економична обрада делова (раније приказани сликом 4.15).



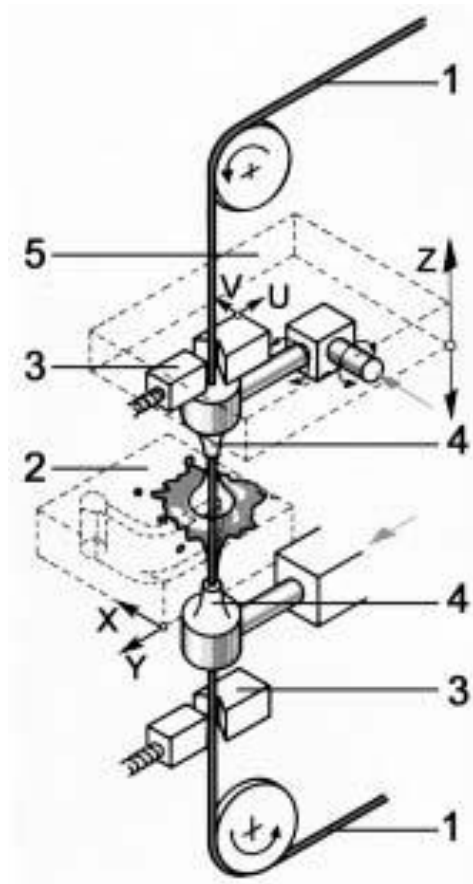
Слика 4.16 Шема рада два основна типа EDM -машина, а) са пуном електродом; б) са жичаном електродом

Основни елементи машина које се користе за EDM - обраду жичаном електродом су: погон жице (1), предмет обраде (2), координатни сто (3), агрегат за диелектрикум (4), када (5), управљачка јединица (6), генератор импулса (7), нумеричко CNC-управљање, (слика 4.17).



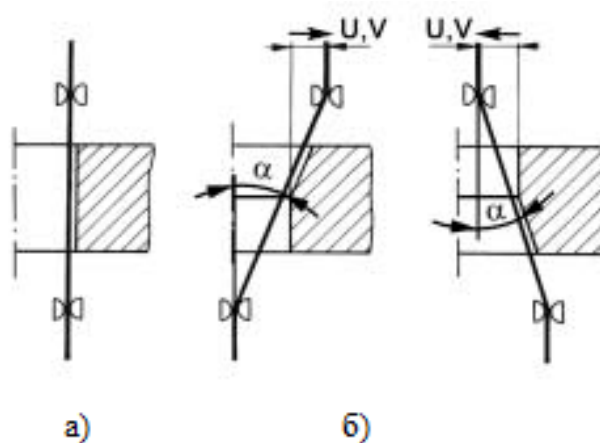
Слика 4.17 Основни елементи EDM -машина за сечење помоћу жичане електроде

Принципска шема електроерозионог сечења жицом је приказана сликом 4.18. Класичну электроду у овом случају замењује покретна жица (1), која по Z – оси има тачно вођење са два носача вођица (3), које носи вертикални носач са укрштеним $U - V$ и Z клизачем (5). Предмет обраде (2), обично није потопљен у диелектрикум, као код раније описиваних машина (али је могуће да се спроведе и код ове врсте обраде), већ се само жица налази у струји диелектрикума који се доводи кроз две симетрично постављене вођице (4). Предмет обраде и електрода су прикључени на одговарајући генератор електричних импулса, па се тако, при одређеном растојању између њих, остварује процес електричног пражњења. Померање предмета обраде у правцу X , Y - осе се врши помоћу укрштеног клизача, за шта се најчешће користе системи нумеричког CNC-управљања, које се одвија помоћу рачунара [1].



Слика 4.18 *Принципска шема електроерозионог сечења помоћу жице [1]*

На EDM - машинама за обраду помоћу жице, могу се остварити различите врсте резова. Тако се могу остварити цилиндрични резови, када се доња и горња вођица жице поклапају са Z - осом (слика 4.19 - а). Такође се могу израдити конични резови, тако што се горња и доња вођица изводе из вертикалног положаја у правцу U, V - осе за одређену вредност (слика 4.19 - б). На овај начин могу се остварити отворени или затворени конуси са углом $\alpha = \pm 5^\circ$ и знатно више. Ово је изузетно важно код израде алата за пробијање и просецање, који захтевају овакве нагибе због смањења трења између просекача/пробијача и матрице.



Слика 4.19 Исецање контуре на EDM - машинама са жицом, а) цилиндрично; б) конично

Код EDM - сечења жицом, постоји врло мали број параметара обраде који су променљиви. Ови параметри се углавном свODE на врсту материјала предмета обраде и његову дебљину. Због тога технолошки параметри имају устале вредности и врло мало варирају. Подаци о томе се налазе меморисани у управљачкој јединици на самој машини, при чему се њихов избор и регулисање у процесу обраде обавља аутоматски. Тако да се код ових машина не јавља потреба за израдом посебног технолошког поступка за одређени случај обраде, већ се само врши програмирање кретања предмета обраде у правцу X, Y, U, V, Z - осе. Тако се долази до закључка да тачност ове обраде не зависи од технолога и послужеоца на машини, већ од тачности рада машине и програма.

Програмирање EDM - машина за сечење жицом се обавља уз помоћ PC - рачунара, који има одговарајући софтвер. Софтвер се развија за сваког произвођача посебно. За састављање програма потребан је само цртеж контуре са нормалним или координатно датим мерама (слика 4.20). Само програмирање се одвија у дијалогу између рачунара и програмера, који уопште не мора да познаје програмски језик, већ може бити само обучен за тај посао.



Слика 4.20 Програмирање рада на EDM - машинама са жичаном електродом

Машине за електроерозиону обраду се по својој намени израђују као универзалне и специјалне. Специјалне машине су намењене за серијску производњу истих или сличних делова. Обично су снабдеване посебним уређајима који омогућују ефикасно обављање задате функције, а многе од њих имају и аутоматски циклус обраде.

4.3 Агрегат за пречишћавање и циркулацију диелектрикума

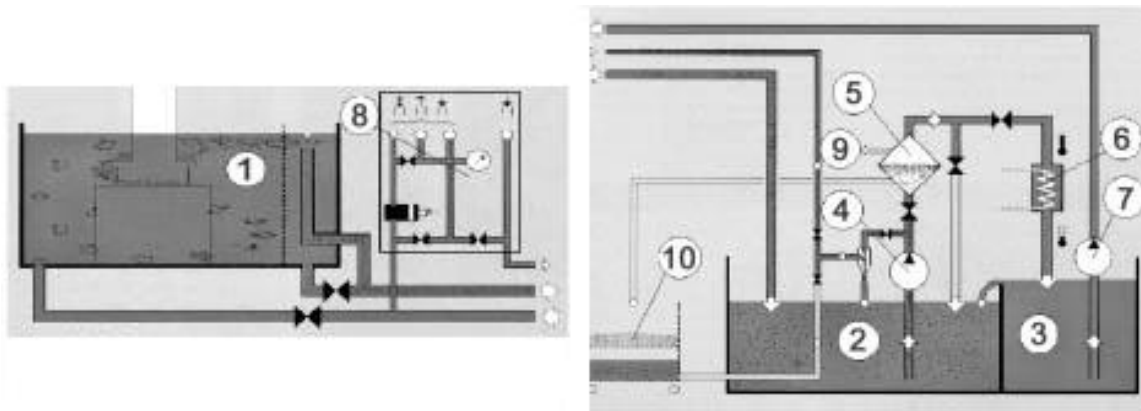
Агрегат за пречишћавање и циркулацију диелектрикума има веома важну функцију од које у великој мери зависи степен искоришћења капацитета једне EDM - машине. Најважнији захтеви који се постављају пред ову компоненту су:

- 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 $500 \text{ mm}^3/\text{min}$, 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. Филтерски улошци - патрони, се праве од специјалног папира који је испресавијан методом цик - цак, тако да се остварује површина филтрирања од око $18 \text{ m}^2/\text{улошку}$. Један уложак може да траје приближно две недеље, после чега се исти замењује новим.



Слика 4.21 Шема агрегата за пречишћавање и циркулацију диелектрикума са муљним филтером

Функционална шема агрегата са муљним филтером са основним елементима, који га сачињавају, дата је сликом 4.21. Агрегат са муљним филтером, за разлику од предходног има резервоар са две коморе, различите запремине. У већу комору (2) се доводи запрљани диелектрикум из радне каде (1) и разводног блока (8). Одавде се пумпом (4) преводи преко филтера (5), са посебним филтерским ћелијама, и коморе за хлађење (6) и као чист доводи у мању комору (3). Затим се пумпом (7) поново пребацује у радну каду и разводни блок, одакле се, применом једног од три могућа начина, користи за испирање радног простора. Према томе, 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, киселгур (нем. Kieselgur). 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 1-10 μm . Додатни материјал се дозира у одређеним временским интервалима, од 8-10 часова, с тим што се предходно обавља чишћење филтерских ћелија од нанете нечистоће и додатног материјала, што се обавља уз помоћ ваздуха под притиском, од 5 - 6 бара, који се доводи водом (9). Тако се муљ са заосталим диелектрикумом транспортује посебним водом до колица (10), оставља да се оцеди, и касније избацује напоље. Тако оцеђени диелектрикум враћа се у резервоар (2) уз помоћ вакуум пумпе, ради даљег коришћења.

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 [1]:

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

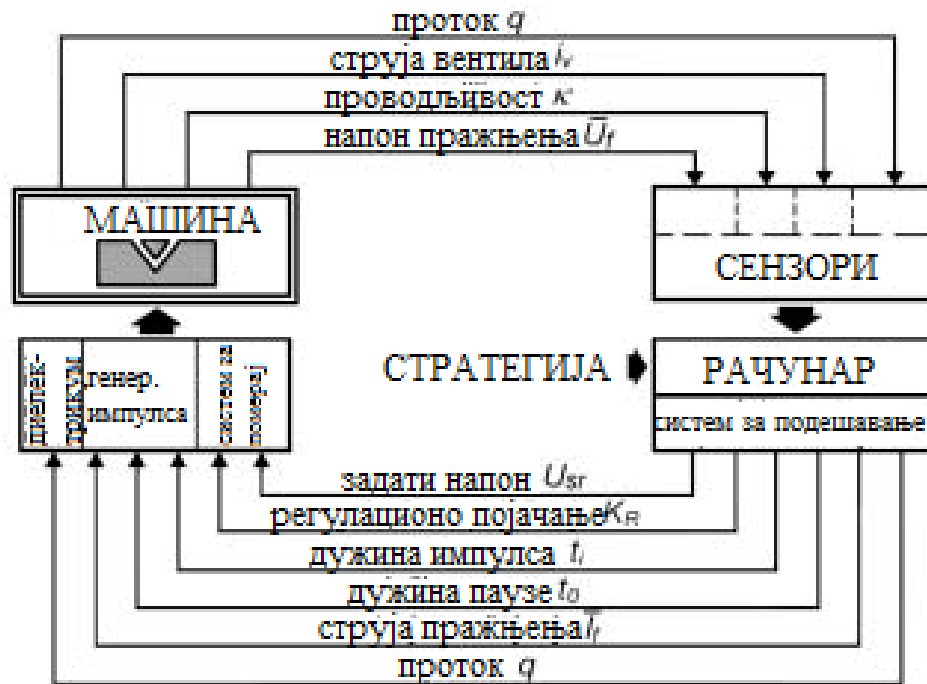
Регулисање дужине паузе остварује се на основу дужине јонизације код појединих импулса. Предуга или прекратка јонизација радног зазора, представља поуздан сигнал да је дошло до поремећаја у одвијању процеса, па се због тога прибегава продужавању или скраћивању паузе између импулса. Финоћа којом се регулишу дужине пауза (степен промене), може се предходно одабрати.

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 4.22 је приказан један такав модел, који користи високу флексибилност процесног рачунара при подешавању и тестирању стратегије оптимизације.



Слика 4.22 Шема модела за оптималну регулацију код EDM - машина са пуном електродом

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 4.22).

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. Многе фирме су развиле овакве системе и већ их уграђују у своја постројења. 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.

4.5 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 и постоји стална потреба за њиховом поновном израдом.

4.5.1 Материјал електрода за електроерозиону обраду

Практично, могуће је употребљавати све материјале 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 електроерозианој обради. Материјали за израду електрода се могу поделити у две групе:

- **метални материјали** - електролитски бакар, телурна или хромна 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

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

4.5.2 Поступци израде металних електрода

- Израда електрода деформисањем

Деформисање ковањем – материјал је могуће обрађивати у топлом и у хладном стању. Ако је обраду у топлом стању, метал се загрева на 880 °C. Између сваке операције је потребно извршити нормализацију. Последњи ударац у ковању мора да се изведе у хладном стању због компезације скупљања материјала.

Деформисање утискивањем – изводи се искључиво у хладном стању. За ову обраду се користе хидрауличне или коленасте пресе. Овај метод обезбеђује већу прецизност од предходно наведеног метода и примењује се за израду електрода са финим контурама (израда медаља).

- Израда електрода поступцима обраде резањем

Електролитски бакар се може лако обрађивати стругањем и глодањем. Да би се избегло стварање наслага на резном алату, може се вршити хлађење помоћу средстава за подмазивање, које може бити 50% биљног уља и 50% петролеја.

- Израде електроде истискивањем или хлађењем

Ова метода израде се углавном користи за израду електрода у великим серијама са константним профилем. Цевасте електроде округлог или неког другог попречног пресека, израђује се на пресама за истискивање.

- Израда електрода поступком убризгавања

Овај поступак је уведен пре неколико година за израду тродимензионалних електрода. Бакарна жица се у истопљеном стању убризгава у метални калуп помоћу специјалног пиштоља. Електроде које се производе на овај начин су веома порозне. Из тог разлога, оне се не могу нагризати, јер киселина продире у поре, па би се при томе електрода разорила. Осим тога је трошење електрода је веома велико. Због свих мана овог поступка, електроде које су њиме добијене се више не употребљавају.

- Израда електрода поступком галванопластике

Примењује се за израду тродимензионалних електрода са финим детаљима, код новчића, код великих фазонских електрода, које су неопходне у аутомобилској индустрији, а које служе као замена за поступак туширања при завршној обради алата за пресовање, и за велике калупе за пресовање пластичних маса.

- Израда електрода нагризањем

Израда се врши уз помоћ киселина. Постиже се јефтинија израда електрода. Метод се огледа у томе што се електрода у току одређеног временског периода потапа у раствор киселине, док се лепљивом траком или слојем синтетичке смоле, прекрива део електроде који се жели нагристи. Што је раствор за нагризање концентрованији, брже ће доћи до смањења мере електроде, то се углавном односи на ивице код којих се смањење мере врши у повећаном обиму.

- Израда електрода класичним поступцима обраде

То су поступци стругања и брушења.

4.6 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 ($>30\text{kV/cm}$), 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.).

4.6.1 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 електронепроводљивост. Диелектрикум мора испунити више захтева, од којих су најважнији:

- да оствари оптималну електричну отпорност између жице 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.

4.6.2 Угљоводоници

- Уље

Минерална уља представљају најчешће употребљаване диелектричне течности. Најбољи резултати се постижу са уљима која у себи имају додатака. Веома је важан вискозитет уља, па је тако уље високог вискозитета неопходно за операције fine обраде, јер код ових операција су веома слабе ефективне стазе варничења и течност мањег 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

Петролеј има низак вискозитет, па се због тога највише користи за операције fine завршне обраде. Често се употребљава за еродирање тврдих метала, који се могу обрађивати кратким електричним пражњењем. За употребу је најпогоднији ароматизовани, односно 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.

5

Тачност и квалитет електроерозионе обраде

5.1 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 [1].*

Фактори везани за машину су последица несавршености органа машине и одражавају се на тачност електроерозије исто као и код других врста обраде. Машине 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 своде се на врло малу меру, која представља једну од њених константних карактеристика.

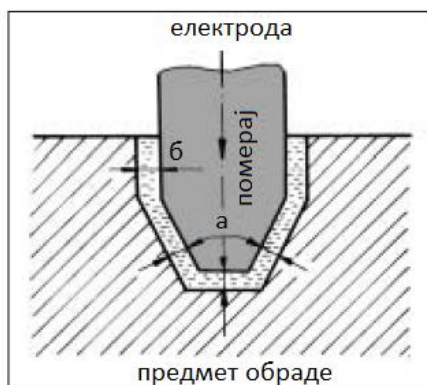
Тачност израде електроде се директно одражава на тачност обраде. Било која грешка везана за мере или облик електроде директно се пресликава на предмет обраде. Због тога се приликом поступка израде електроде строго

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 бакра), 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 5.1):

- *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 и
- *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.



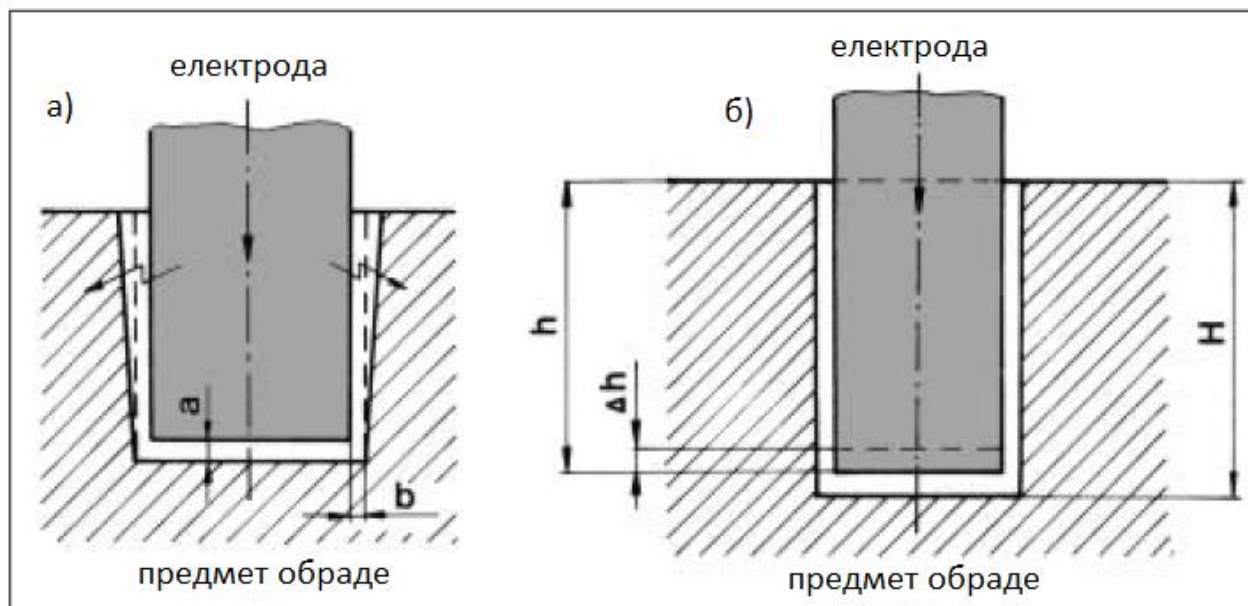
Слика 5.1 Радни зазори при електроерозионој обради

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.

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. Грешке које се јављају због трошења електроде су следеће:

- *Грешке коничног отвора* (слика 5.2-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,
- *Смањење дубине еродирања* (слика 5.2-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 5.2 Грешке услед трошења електроде при електроерозиционој обради

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 (обликац 5.1).

$$v = \frac{(V_{EL})}{(V_{OB})} 100\% \quad (5.1)$$

V_{EL} – запремина потрошеног материјала електроде,

V_{OB} – запремина скинутог материјала предмета обраде

Код скупих електрода сложеног геометријског облика, за обраду гравура, као што су ковачки калуи, ливачке кокиле и др., бирају се такви параметри обраде који дају минимална трошења електроде. Углавном се за обраду оваквих површина примјеује неколико електрода, а релативно мало

трошење електроде при обради се не узима у обзир при пројектовању и изради електроде.

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. Трошење 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 5.1 дат је преглед уобичајних тачности за најважније материјале предмета обраде и електроде.

Материјал предмета обраде	Материјал електроде	Збирно одступање хоризонталне мере за обрађивану меру y (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	—	—

Табела 5.1 Уобичајене тачности при електроерозионој обради [1]

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.

5.2 Квалитет обрађене површине

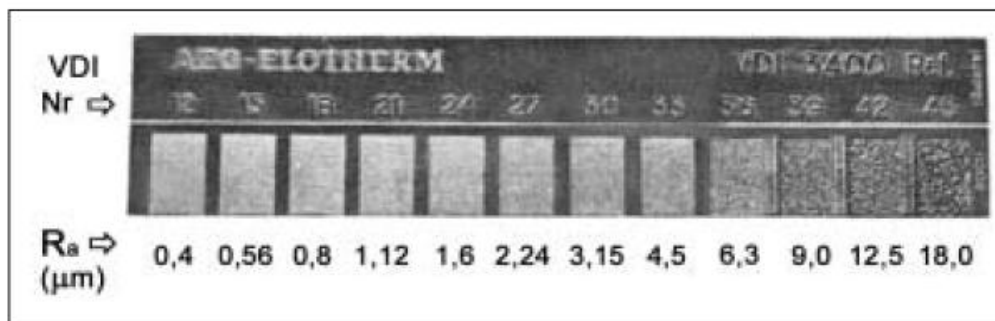
Квалитет обрађене површине, као и других врста обраде, подразумева не само храпавост, већ и стање површинског слоја материјала предмета обраде.

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 тзв. пукне, које су заостале приликом избацивања растопљеног материјала из кратера, и оне знатно повећавају храпавост обрађене површине.

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.

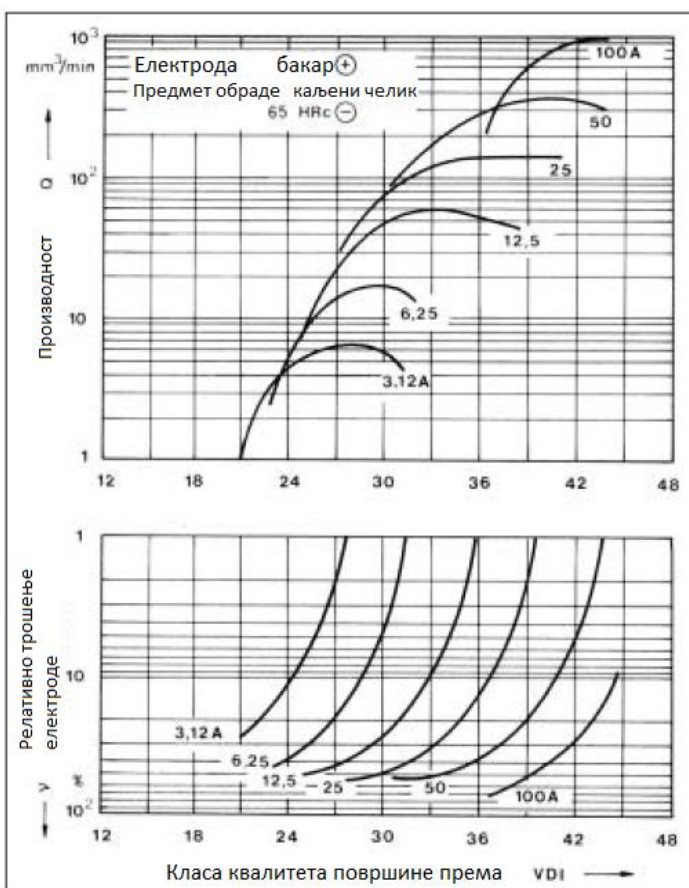
Оцена класе храпавости обрађене површине према JUS и ISO стандардима за храпавост површине је превише груба. Због тога су уведене посебне VDI норме којима се десет класа храпавости према ISO (JUS) нормално, тј. од N3 до N12, дели на 51 класу (0-50). Веза између VDI класа за храпавост и вредности средње 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 5.3). Ове еталоне користе технолози приликом прописивања класе храпавости површине, односно радници на машинама за контролу при обради.



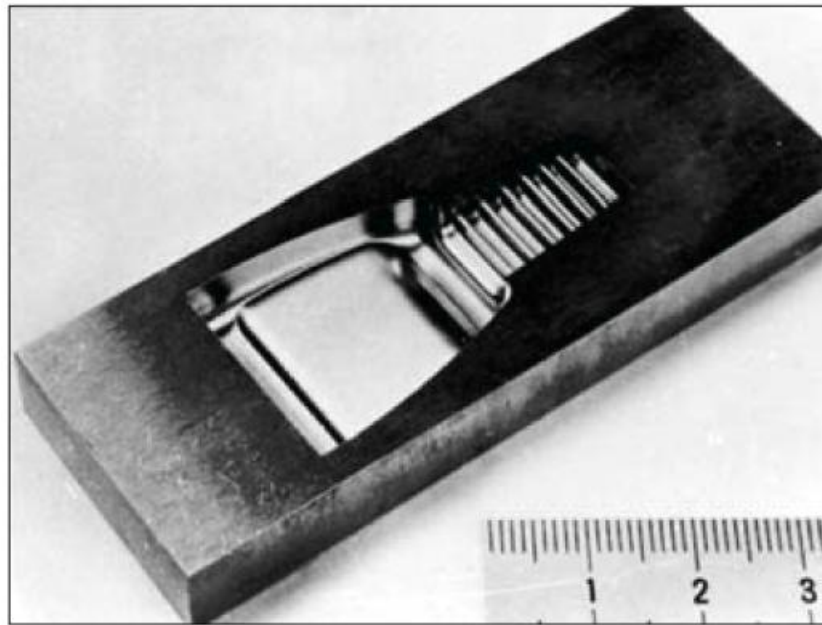
Слика 5.3 Еталон за визуелну оцену храпавости обрађене површине

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



Слика 5.4 Зависност производности и релативног трошења електроде од класе храпавости површине при различитим средњим радним струјама [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. 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 (пример на слици 5.5). Овим поступком се знатно побољшава завршна тачност облика ситних детаља на гравури, који се никако не могу остварити ручним полирањем. Нарочито је изражено код калупа за ковање металног новца, медаља и сл., који имају мноштво ситних детаља, које је јако важно прецизно изградити.



Слика 5.5 *Калуп за бризгање пластике израђен EDM - поступком финог полирања*

На квалитет површине при електроерозионој обради утиче *врста диелектрикума*, преко свог вискозитета. 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.

Материјал електроде утиче на квалитет електроерозионе обраде преко *финоће зрна* (код графита), *хомогености* и *порозности* (силумин). 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.

Да би се избегли дефекти материјала у површинском слоју предмета обраде, потребно је предузети следеће мере:

- Између појединих захвата у процесу обраде (груба, средња, фина) треба предвидети довољан додатак за обраду, како би се у следећим захватима обраде могао одстранити дефектан слој материјала који настаје у предходним захватима.
- После обраде електроерозијом могу се по потреби предвидети и додатне операције обраде абразивним млазом, брушењем или полирањем, којима се уклања дефектни слој материјала предмета обраде.

5.3 Избор параметара режима обраде

Режими 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 струје и

трајање импулса. Режији 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 за конкретну операцију, путем пробе и подешавања, настоји да оствари што већу производност, краће време обраде и захтевану тачност и храпавост. Примери избора параметара режима обраде, у зависности од врсте и дебљине материјала предмета обраде, приказани су табелама 5.2 и 5.3 [1].

материјал	дебљина материјала mm	пречник жице ϕ , mm
алатни челик	40	0,15

позиција прекидача за затезање жице	позиција прекидача за брзину жице	дејонизација mA	притисак течности bar	
			доњи	горњи
5	6	12	4-6	4-6

редни број	подешавање напона V	подешавање електричног импулса IP	положај прекидача A	положај прекидача B	радни напон V	брзина резања mm/ min	храпавост површине R _z , μ m	тачност обраде μ m
1	4	9	2	4	40-42	1,87- 1,72	16-17	95-100
2	4	8	2	4	40-42	1,52- 1,40	16-17	94-99
3	4	7	2	4	40-42	1,19- 1,08	15-16	92-97
4	4	6	2	4	40-42	0,92- 0,80	14-15	91-96
5	4	5	2	4	40-42	0,78- 0,71	12-13	90-95
6	4	4	2	4	40-42	0,62- 0,51	11-12	89-94

Табела 5.2 Параметри режима обраде за алатни челик на машини за електроерозиону обраду помоћу жице

материјал	дебљина материјала m	пречник жице φ, mm
тврди метал	40	0,15

позиција прекидача за затезање жице	позиција прекидача за брзину жице	дејонизација mA	притисак течности bar	
			доњи	горњи
5	6	1,5	4-6	4-6

редни број	подешавање напона V	подешавање електричног импулса IP	положај прекидача A	положај прекидача B	радни напон V	брзина резања mm/min	храпавост површине R_z, μm	тачност обrade μm
1	3	8	2	4	50-52	0,74-0,65	9-10	107-112
2	3	7	2	4	50-52	0,62-0,56	8-9	104-109
3	3	6	2	4	48-50	0,49-0,43	7-8	101-106
4	3	5	2	4	48-50	0,38-0,35	7-8	98-103
5	3	4	2	4	48-50	0,28-0,24	6-7	96-101

Табела 5.3 Параметри режима обраде за тврди метал на машини за електроерозиону обраду помоћу жице

6

Пример пројектовања електроде за електроерозиону обраду

На основу четири комерцијална модела утикача сијалице на аутомобилу, који се могу наћи у слободној продаји, извршена је анализа истих и пројектовање новог модела утикача. У оквиру пројектовања извршено је само моделирање електроде за део алата за брызгање пластике. Делови који су разматрани израђени су од пластике, методом брызгања у калупима. Због њиховог сложеног геометријског облика, израда калупа се мора вршити електроерозионом обрадом, јер није могуће класичним, односно конвенцијалним поступцима. Утикачи се убацују у упаљач аутомобила и служе за прикључење сијалице. Четири модела који су послужили као полазна основа за пројектовање новог модела су:

- Модел 1 (слика 6.1):



Слика 6.1 Модел утикача 1, у склопљеном (лево) и расклопљеном (десно) стању

Овај модел има релативно једноставну геометрију и добру ергономију, јер има јасно обрађен део за хватање руком. Састоји се из два дела, горњег и доњег, и стезног прстена који их повезује. Контакт са упаљачем на аутомобилу се остварује преко металног пипка са горње стране и непокретног пипка на врху дела. Мана овог дела је контакт. Контакт није стабилан, тј. приликом мањег померања долази до прекида.

- Модел 2 (слика 6.2):



Слика 6.2 Модел утикача 2, у склопљеном (лево) и расклопљеном (десно) стању

Код овог модела, главни проблем је компликована геометрија и већи број делова, што отежава и поскупљује његову израду. Иначе, он остварује бољи контакт од модела број 1, јер на врху поседује опругу, која омућућава да пипак буде у сталном контакту са упаљачем аутомобила.

- Модел 3 (слика 6.3):



Слика 6.3 Модел утикача 3, у склопљеном (лево) и расклопљеном (десно) стању

Модел број 3 има врло једноставну геометрију, и добар контакт. Главни делови су тело са спољашњим навојем на који се навија капица са металним деловима преко којих се остварује контакт. Контакт се остварује као код предходног модела. Код овог модела, мали проблем је ергономија, јер нема јасно обрађеног места за хватање, па тако може настати проблем приликом вађења из упаљача. Још једна мана овог модела је пресечен навој на телу утикача, што често резултира ломом навоја приликом склапања и расклапања.

- Модел 4 (слика 6.4):

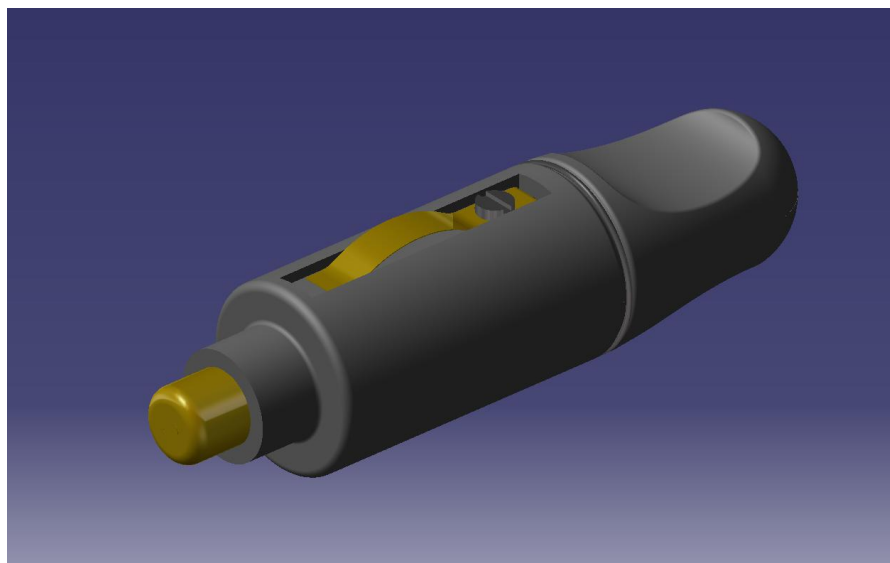


Слика 6.3 Модел утикача 4, у склопљеном (лево) и расклопљеном (десно) стању

Овај модел је нешто другачији од предходних. Служи као пуњач за телефон. Из тог разлога има проширен део где је смештена електроника која омогућава да се изврши пуњење телефона. Контакт који овај део остварује са упаљачем је константан, али не и дугог века. Пошто се контакат остварује преко опруге, која је израђена од другачијег материјала у односу на пипак, може врло брзо доћи до прегоривања делова, односно прекида контакта.

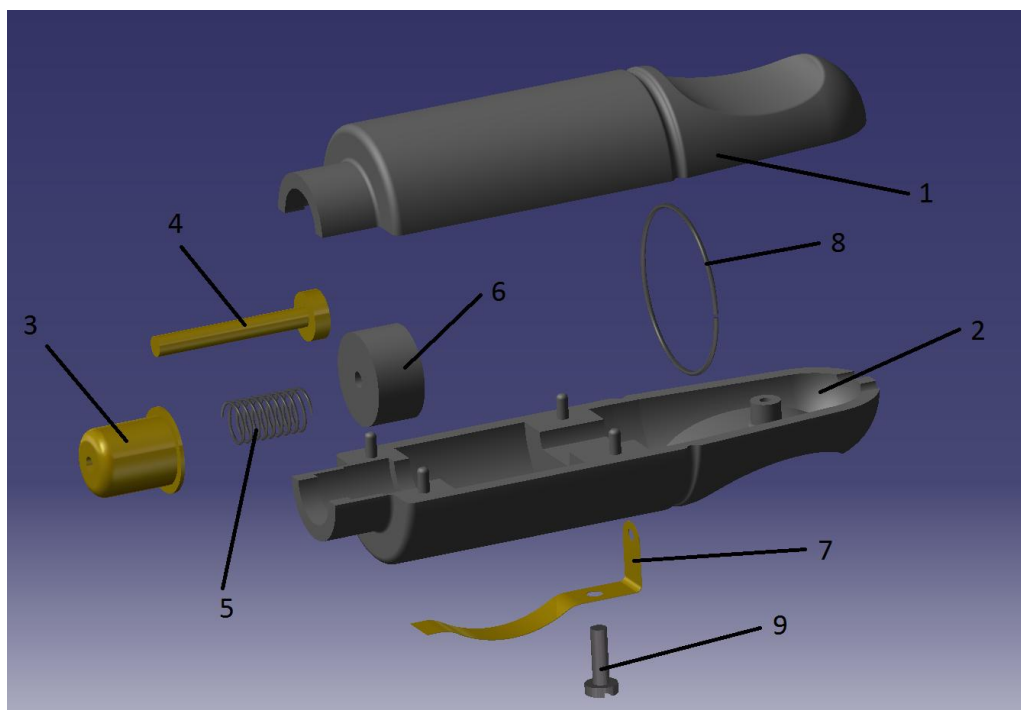
На основу анализе сва четири модела, као полазну основу за пројектовање новог дела, узет је модел број 1.

Сликом 6.5, приказан је нови модел утикача за упаљач аутомобила. У основи, ово је модификовани модел утикача 1.



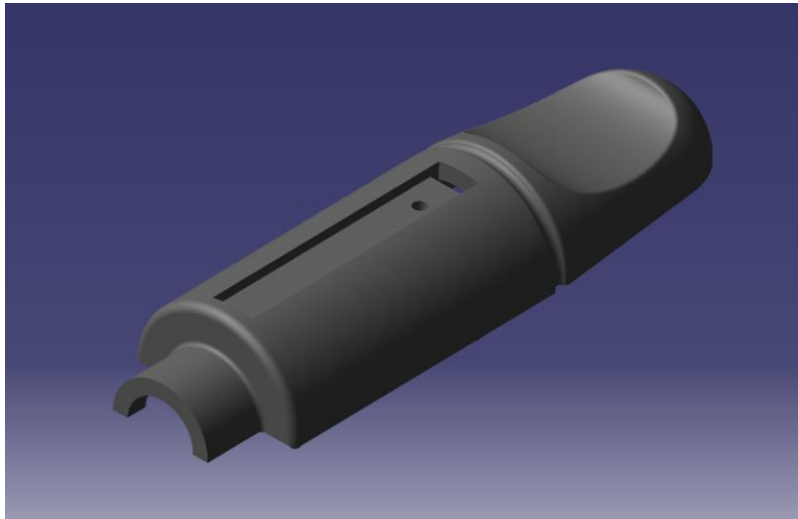
Слика 6.5 Нови модел утикача сијалице на аутомобилу

Нови модел утикача се састоји од следећих делова: горњи део (1), доњи део (2), метални пипак којим се остварује контакт са упаљачем (3), игла преко које се контакт са пипка преноси на жицу (4), опруга која омогућује стални контакт пипка са упаљачем (5), држач игле (6), метални пипак на који се везује друга жица (7), стезни прстен (8) и завртањ (9) (слика 6.6).



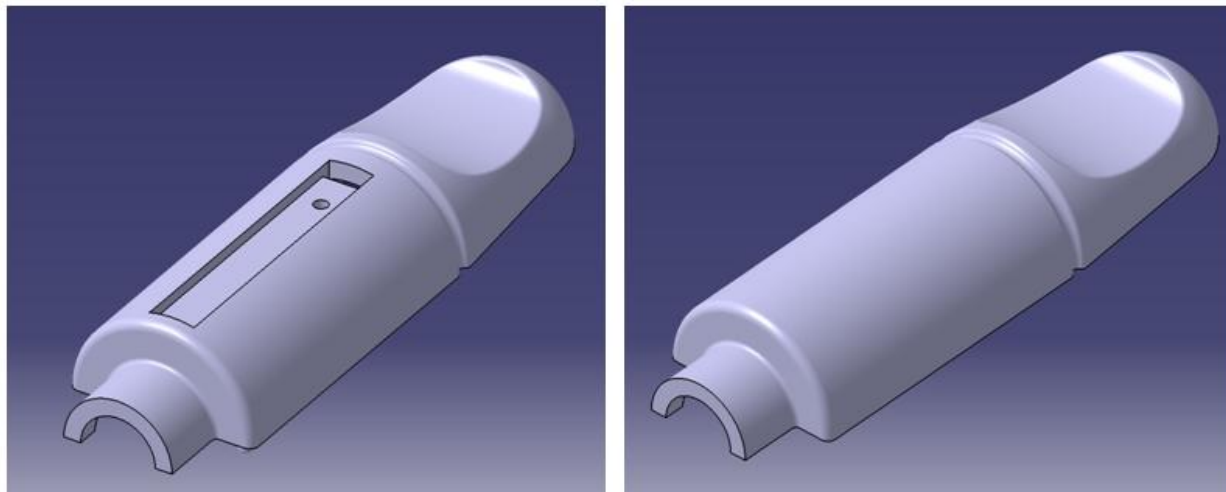
Слика 6.6 Делови новог модела утикача

Анализом геометрије, дошло се до закључка да се класичним поступцима обраде не могу обрадити горњи и доњи део новог модела утикача. Пројектовање електроде, којом ће се изградити калуп за бризгање пластике, је извршено за спољашњу површину доњег дела новог модела утикача (број 2 на слици 6.6), јер је за нијансу сложенији од спољашње површине горњег дела (број 1 на слици 6.6). Спољашња површина доњег дела је приказана сликом 6.7.



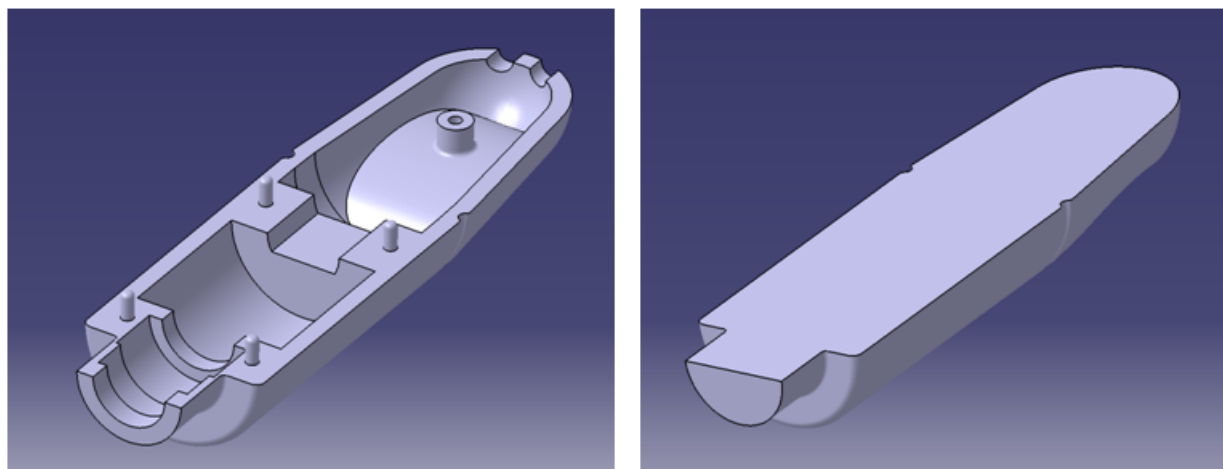
Слика 6.7 Приказ спољашње површине за коју се израђује калуп за изливање

На основу приказане површине, извршено је моделирање електроде. Прво што је урађено је скидање жлебова и отвора за завртањ. Разлог томе, је поједностављење електроде, иначе облик жлеба и отвора се може изградити додавањем уметка у део калупа, што ће касније бити објашњено. Облик модела, добијен након уклањања жлебова и отвора, приказан је сликом 6.8.



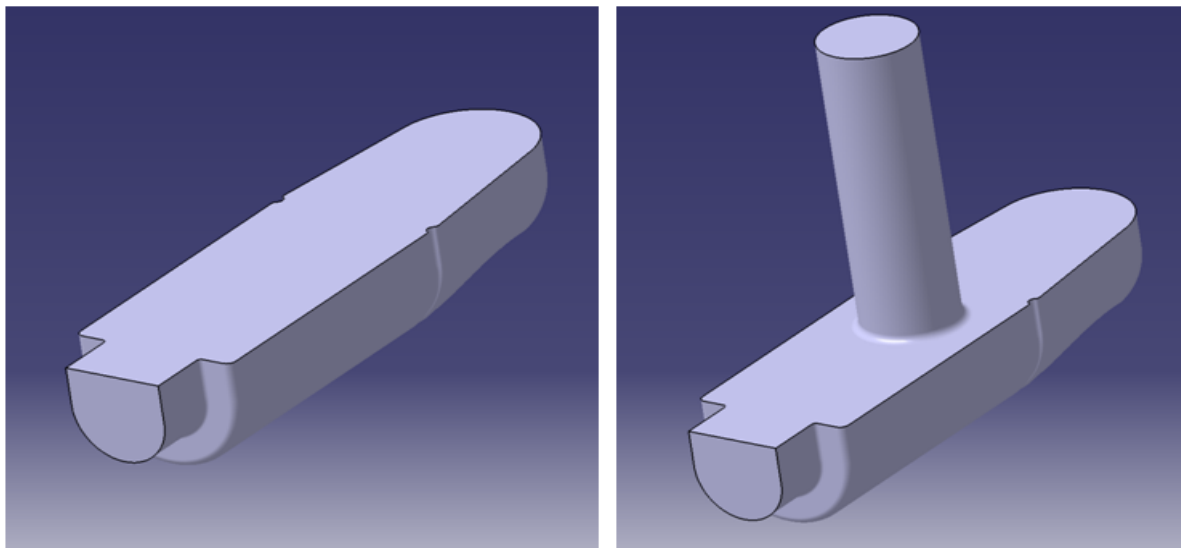
Слика 6.8 Уклањање жлебова и отвора са модела утикача

Након што је дефинисана спољашња контура електроде, одрађено је преправљање унутрашњег дела. За унутрашњи део, није предвиђено задатком да се ради алат, односно електрода, тако да се тај део занемарује, односно затвара на моделу. Затворени део сада постаје доњи део електроде. Овај поступак је приказан сликом 6.9.



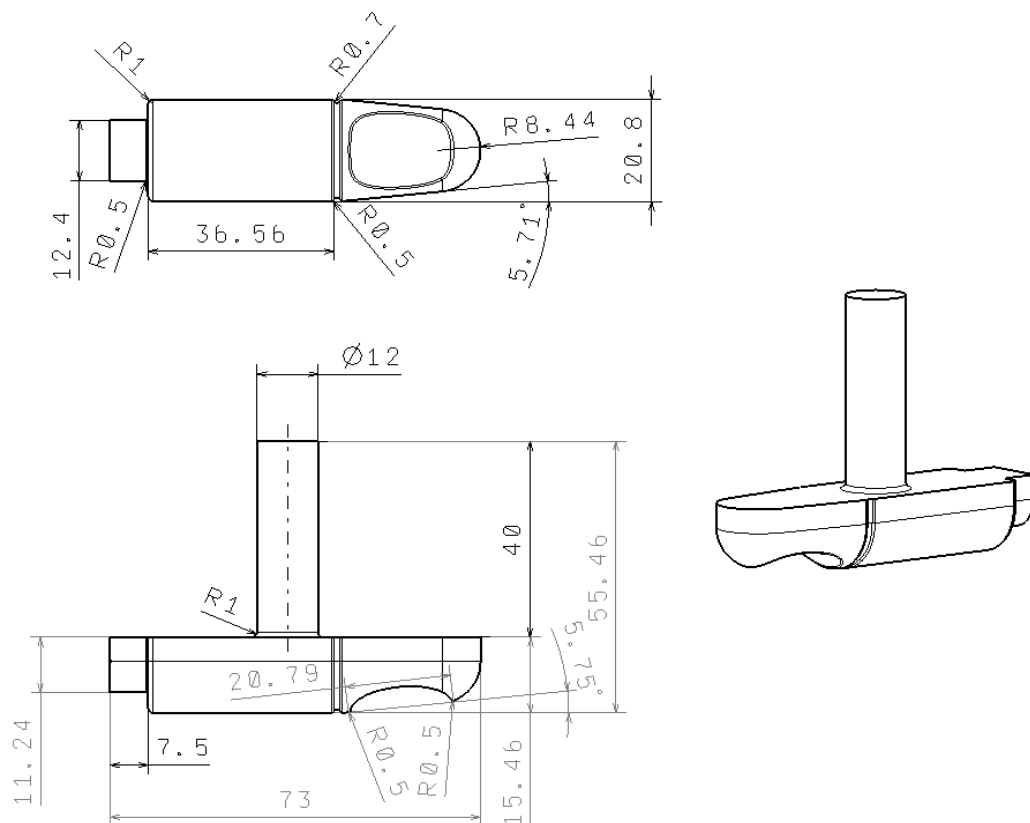
Слика 6.9 Затварање доњег дела електроде

Како се електрода услед рада троши, извршено је повећање дебљине доњег дела, да би се у случају оштећења, накнадном обрадом електрода могла довести у радно стање. Затим је на моделу додат држач, који служи да се електрода причврсти у стезну главу елрозимата (слика 6.10).



Слика 6.10 Повећање дебљине доњег дела електроде и додавање држача

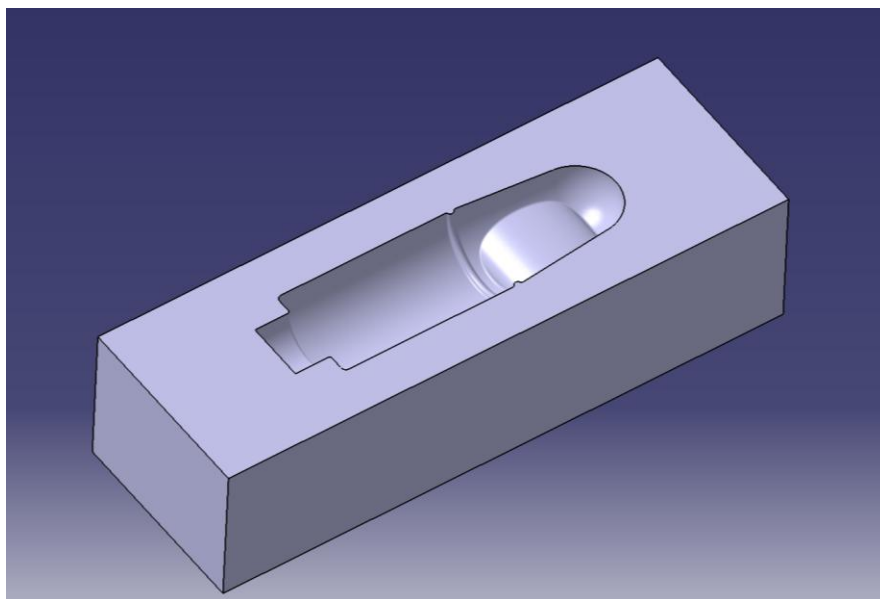
Након моделирања, цртеж електроде (са основним димензијама) за израду дела калупа за бризгање пластике, приказан је сликом 6.11.



Слика 6.11 Цртеж електроде са основним димензијама

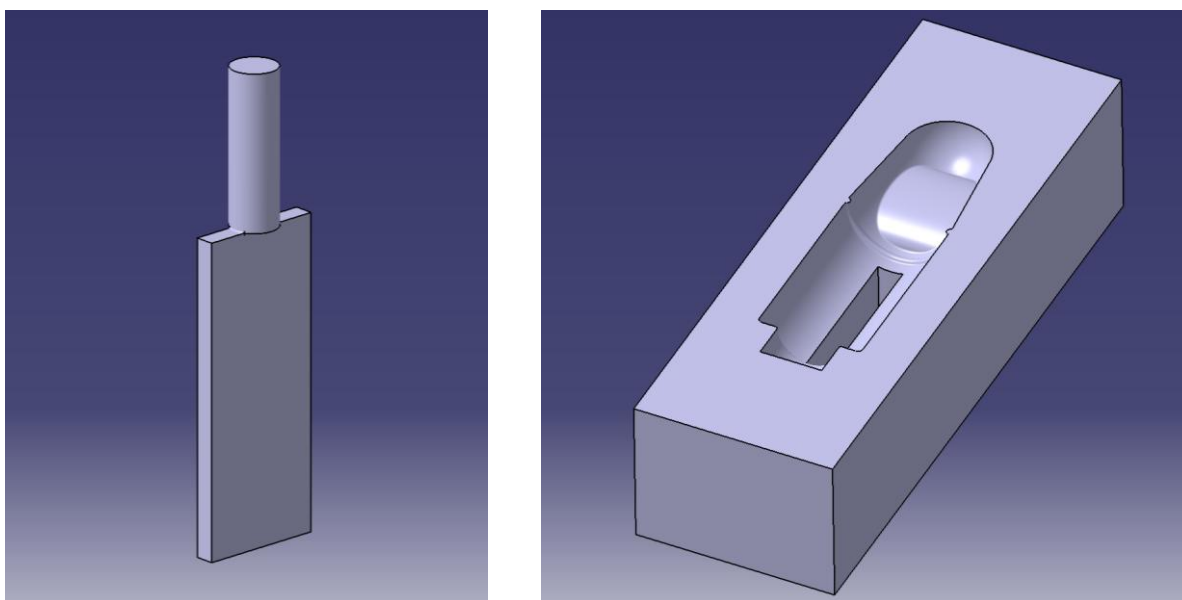
Израда пројектоване електроде вршиће се на CNC глодалици.

Након електроерозионе обраде, уз коришћење приказане електроде (слика 6.8), добија се део калупне шупљине за бризгање пластике (слика 6.9). Изабрани материјал за делове новог модела утикача је поликарбонат (LEXAN 160). Ова врста поликарбоната се користи за једноставније путеве течења и производе са равномернијом дебљином зидова. Скупљање ове врсте материјала приликом поступка бризгања је од 0.5% до 0.7%. Овај податак је узет у обзир приликом пројектовања електроде, што има директну последицу и на мере калупне шупљине.



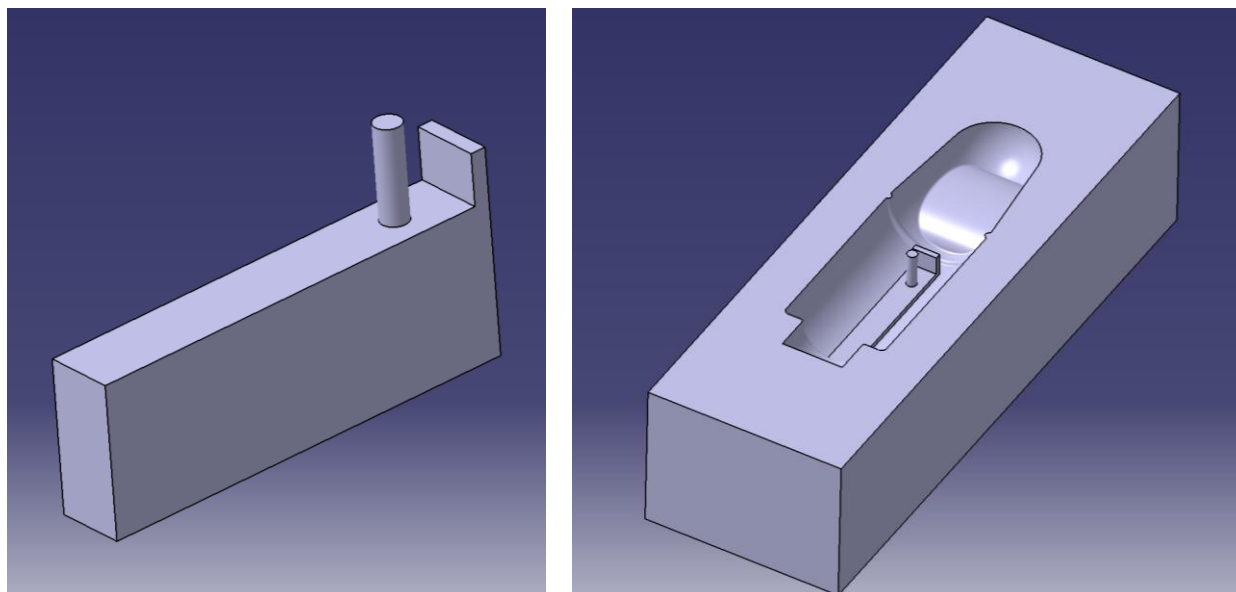
Слика 6.9 *Део калупне шупљине за бризгање пластике, у којој ће се израдити нови модел утикача*

Да би се добио жлеб на горњој страни дела утикача, у део калупне шупљине се мора поставити уметак. Жлеб, у који ће уметак бити смештен, се такође израђује електроерозионом обрадом. За тај поступак се користи друга, једноставнија електрода (слика 6.12 – лево), која прави жлеб на калупу (слика 6.12 – десно). Ова, као и предходно пројектована електрода, израдиће се на CNC глодалици.



Слика 6.12 *Електрода (лево) и жлеб на калупу услед еродирања приказаном електродом (десно)*

У настали жлеб, убацује се уметак, који је профилисан на основу димензија жлеба на утикачу. Уметак се упресује у калуп. Уметак и склоп, који има функцију дела калупа за брызгање пластике, приказани су сликом 6.13.



Слика 6.13 *Уметак и склоп дела калупа за брызгање пластике*

Процес израде, дела калупне шупљине, као и жлеба за уметак, се остварује тако што се електрода спушта вертикално, у правцу Z – осе, ка предмету обраде и услед учесталих електричних пражњења, долази до појаве да предмет обраде поприми геометрију и димензије електроде којом се врши обрада. Израда дела калупне шупљине ће се вршити на савременим CNC – машинама за електроерозиону обраду.

У оквиру теме рада, није дефинисана израда комплетног калупа за бризгање пластике, већ је главни задатак био пројектовање електроде.

Закључак

На основу детаљног описа процеса електроерозионе обраде у овом раду, може се доћи до неколико закључака. Неконвенционални поступци обраде се све више развијају и усавршавају, па тако полако почињу да преузимају примат у односу на неке класичне, односно конвенционалне поступке. Заједно са њима, све већи напредак остварује електроерозиона обрада. Најчешће се овај поступак обраде изводи као електроискрична ерозија. Електроерозијом се могу израдити јако компликовани делови просецањем, бушењем и брушењем. Разликују се електроерозија пуном електродом и уз помоћ жице. Основна инсталација за процес електроерозије је: генератор електричних импулса, алатна машина, агрегат за диелектрикум и управљачка јединица. Електроерозиона обрада се користи у малосеријској производњи. Остварује се висока тачност обраде и квалитет површине. Развојем технике, дошло се до тога да је данас цео поступак обраде електроерозијом, аутоматизован и изводи се на CNC – машинама, што додатно повећава могућности израде широког спектра различитих производа. Такође се тај начин повећала и продуктивност производње. На примеру утикача сијалице на аутомобилу, приказана је могућност EDM – обраде делова утикача са компликованом геометријом, који се иначе не могу израдити класичним, односно конвенционалним поступцима.

Литература

- [1] Миликић Д., Неконвенционални поступци обраде, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2002.
- [2] Лазих М., Неконвенционални поступци обраде, Научна књига, Београд, 1990.
- [3] Миленковић Ј., Дипломски рад – Технологија одржавања ерозимата за сечење жицом, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2002.
- [4] Недић Б. и Лазих М., Производне технологије – обрада метала резањем, скрипта, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2007.
- [5] <http://bs.scribd.com/doc/89651853/EDM-Elektroerozivna-obrada>, 07.07.2012.
- [6] <http://www.scribd.com/doc/79321771/EDM>, 07.07.2012.
- [7] http://www2.sts.si/arhiv/tehnoprojekt3/Elektroerozija/fizikalni_princip_elektroerozije.htm, 07.07.2012.
- [8] <http://sr.scribd.com/doc/79321771/EDM>, 07.07.2012.
- [9] <http://www2.sts.si/arhiv/tehnoprojekt3/Elektroerozija/uvod.htm>, 07.07.2012.
- [10] <http://sr.scribd.com/doc/79444436/Nekonvencijonalni-Program>, 07.07.2012.