



Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: **Машинско инжењерство**

Ниво студија: **Основне академске студије**

Модул: **Индустријски инжењеринг**

Предмет: **Производне технологије**

Број индекса: **34/2016**

Душан Г. Стевановић

**АНАЛИЗА ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНЕ ОБРАДЕ (*EDM*) СА
ЖИЦОМ И МАШИНЕ ЗА *EDM* ОБРАДУ**

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Богдан Недић, редовни проф. - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру завршног рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о електроерозионој обради са посебним акцентом на обраду на ерозиматима са жицом. У посебном делу рада извршити прикупљање и систематизацију података о машинама за *EDM* обраду са жицом.

Завршни рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Основи и суштина електроерозионе обраде (*EDM*),
3. Обрада на ерозиматима са жицом,
4. Машине за *EDM* обраду са жицом,
5. Закључци,
6. Литература.

У Крагујевцу, октобар 2020. год.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни проф.

РЕЗИМЕ

Електроерозивна обрада (EDM) представља један од неконвенционалних поступака обраде који постаје све заступљенији у последње време. Овим начином обраде је могуће обрађивати тешко обрадиве материјале као и израда компликованих облика. У овом раду, поред суштине и принципа рада електроерозивне обраде на ерозиматима са жицом, је описана једна машина за електроерозивну обраду жицом и дате су неке њене карактеристичне могућности. Такође су дати и разни примери ових машина са њиховим основним карактеристикама.

Кључне речи: Електроерозивна обрада (EDM), обрада, машина

ABSTRACT

Electro Discharge Machining (EDM) is one of the non-conventional treatment processes that has become increasingly common in recent times. With this method of processing, it is possible to process difficult-to-process materials as well as the production of complicated shapes.

in this paper, in addition to the essence and principle of operation of EDM on wire erosives, one machine for wire EDM is described and some of its characteristic possibilities are given. Various examples of these machines with their basic characteristics are also given.

Key words: Electro Discharge Machining (EDM), Processing, Machine

Садржај

1. Увод	5
2. Електроерозивна обрада	7
2.1 Физикалне основе процеса	8
2.2 Производне операције	11
2.3 Карактеристике електричног импулса	12
2.4 Производност електроерозивне обраде	14
2.4.1 Утицај материјала обрада	14
2.4.2 Утицај параметара електричног импулса	16
2.4.3 Врсте диелектрикума и утицај на производност	18
2.4.4 Утицај испирања радног простора на производно.....	20
2.5 Примена електроерозивне обраде	22
3. Обрада на ерозиматима са жицом	23
3.1 Карактеристике материјала предмета обраде за електроерозивну обраду са жичаном електродом	27
3.2 Материјал и квалитет жице	27
3.3 Ерозимат са жицом Fanuc Tape Cut W2	28
3.4 Аутоматски систем довођења жице	29
3.5 Аутоматско довођење жице (AWF)	31
3.6 Аутоматско обнављање жице (AWR)	35
3.7 Функција поновног покушаја	36
3.8 Резање конуса	38
4. Машине за електроерозивну обраду жицом	39
5. Закључак	48
6. Литература	49

1. УВОД

Неконвенционални поступци обраде су поступци код којих се уклањање вишка материјала, измена димензија, облика и структуре материјала остварује коришћењем електричне, хемијске, светлосне, магнетне, нуклеарне и других врста енергије. Коришћењем неконвенционалних поступака обраде можемо извести велики број производних операција које је немогуће или врло тешко извести конвенционалним поступцима обраде (обрада матла резањем или деформисањем).

Ови поступци обраде су почели да се развијају са технолошким развојем који је довео до развоја производње и примене широке номенклатуре нових материјала. Ти материјали су знатно бољих механичких особина, велике затезне чврстоће и тврдоће, високе температурне отпорности, знатно веће отпорности на хабање и сл. Обрада ових материјала је врло тешка и због тога се паралелно са овим развијају и усавршавају нови поступци обраде веће продуктивности и економичности. Неконвенционални поступци обраде се не користе само за обраду тешко обрадивих материјала, већ и при обради делова веома сложеног геометријског облика, од лако обрадивих материјала, због знатно једноставније технологије алата.

Неконвенционални поступци обраде су:

- EDM – електроерозиона обрада
- EUS – ултразвучна обрада
- EBM – обрада електронским снопом
- ECM – електрохемијска обрада
- PJM – обрада плазмом
- CM – хемијска обрада
- LBM – обрада ласером
- WJM – обрада воденим млазом
- AJM – обрада абразивним млазом
- Остали поступци: обрада у електромагнетном пољу, електрохидрауличне обраде, обраде експлозијом, електромеханичке обраде, комбиновани поступци обраде

Неконвенционални поступци обраде су веома интересанти и имају широку примену и тенденцију израженог раста. У овом раду је објашњен део неконвенционалне обраде а то је електроерозивна (EDM) обрада жичаном електродом.

На ерозиматима са жицом се могу добити веома компликовани, прецизни и фини облици, прорези, дубоки микроотвори и тд. много лакше него применом конвенционалних поступака обраде. Могу се обрађивати веома тврди и крти материјали уз високу тачност и квалитет обраде под условом да су електро проводни. Будући да не долази до контакта између жице и обратка приликом резања не долази ни до пластичних деформација обратка. Такође, приликом обраде не долази до повећања температуре обратка што значи да нема потребе за накнадном термичком обрадом. EDM технологија елиминише до чак осам производних корака конвенционалне обраде, укључујући припрему, стезање, дораду, процесе попут: глодања, брушења, бушења, стругања...

Рад садржи следеће целине:

1. Основи и суштина електроерозионе обраде где су дате основе и физика процеса електроерозионе обраде као и производне операције и различити утицаји на ову обраду,
2. Обрада на ерозиматима са жицом где су описане неке карактеристике ерозимата са жицом кроз пример ерозимата Fanuc tape cut W2,
3. Машине за електроерозиону обраду где су класификовани и наведени неки карактеристични примери ерозимата са жицом.

На крају рада дат је закључак и преглед коришћене литературе

2. ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНА ОБРАДА

Електроерозиона обрада, скраћено *EDM (Electro Discharge Machining)* је савремени поступак обраде чија је примена у пракси веома распрострањена. Постоје бројне технолошке предности због којих овај поступак полако потискује конвенционалне поступке обраде резањем, нарочито код израде алата и делова од тешко обрадивих материјала. Електроерозиона обрада обухвата поступке обраде метала код којих се уклањање вишка материјала остварује серијом електричних пражњења периодичног карактера, насталих између алата и предмета обраде. При веома малом растојању алата и обратка успоставља се електрични лук или искра. Појава лука или искре доводи до јонизације радне течности (диелектрикума), формирања стуба пражњења, топљења и испаравања честица материјала који обрађујемо под дејством електричне струје која протиче кроз стуб у врло кратком временском интервалу. Прекидом пражњења пуца јонизујући стуб, избацује се и односи из зоне обраде растопљени материјал. За хлађење истопљеног материјала и његово одношење задужен је диелектрикум који циркулише.

Према начину и принципу разарања, процесима који се одигравају између алата и обрадка, начину формирања електричног пражњења и времена трајања импулса разликујемо поступке електроерозионе обраде, и то су:

- Електролучна ерозија и
- Електроискрична ерозија.

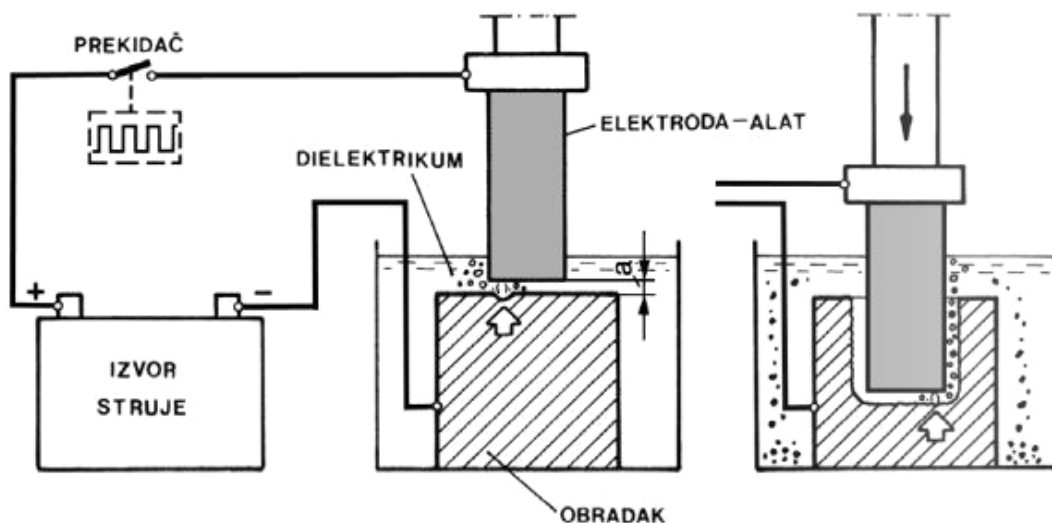
Електролучна ерозија се карактерише тиме што се скидање материјала остварује периодичним стационарним пражњењима. Пражњења се остварују преко електричног лука који се формира додиривањем алата (електрода или жица) и предмета обраде и њеним наглим одмицањем. Успостављање електричног лука, одакле потиче овакав назив, се остварује механичким осциловањем алата врло великом брзином која се креће до 30 до 80 m/s, док је напон извора испод 20 V и има константан ниво. Приликом успостављања и гашења електричног лука долази до периодичног разарања материјала и његовог одношења из зоне обраде. Довођењем воде кроз электроду, растопљени материјал се нагло хлади и одваја од осталог материјала под дејством динамичких сила насталих при наглom хлађењу материјала. У процесу електролучне обраде формира се јонизујући стуб проширен према аноди, чиме се значајно смањује прецизност обраде. Из тих и низа других разлога електролучна ерозија се користи у ремонтним радионицама и нема велики значај у индустрији.

Електроискрична ерозија уклањање вишка материјал врши серијом периодичних нестационарних и квази статичких пражњења у диелектрикуму. Пражњења су у виду електричних искри, остварују се при напону који је променљив (импулсни карактер), уз помоћ којих долази до топљења и испаравања материјала који се при прекиду пражњења нагло хлади. Нагло хлађење доводи до испаравања материјала у виду експлозије, избацивања течног материјала и његовог кондензовања у диелектрикуму.

Електроискричну ерозију карактерише веома кратко трајање импулса (од $1\text{ }\mu\text{s}$) и релативно велики однос периода и времена трајања импулса ($1/\tau > 10$). Електроискрична ерозија се најчешће користи у пракси, па када се говори о електроерозионој обради углавном се мисли на овај вид ерозије.

2.1 Физикалне основе процеса

Процес електроерозионе обраде се може објаснити коришћењем шеме приказане на слици 2.1. Алат (електрода) и обрадак се доводе у радни положај тако да се међусобно не додирују. Између њих се налази диелектрикум. Обрадак и алат су проводницима повезани на извор једносмерне струје. На једном од тих проводника се налази прекидач. Када је прекидач затворен долази до појаве напона између алата и предмета браде. У почетку не тече електрична струја пошто су и алат и обрадак изоловани диелектрикумом. Уколико се растојање између њих постепено смањује у једном тренутку, при малом растојању a , доћи ће до пробоја електричне струје кроз диелектрикум и појаве искре. Ово растојање се назива критичним и износи од $0,005$ до $0,5\text{ mm}$.



Слика 2.1: Основни принцип електроерозионе обраде

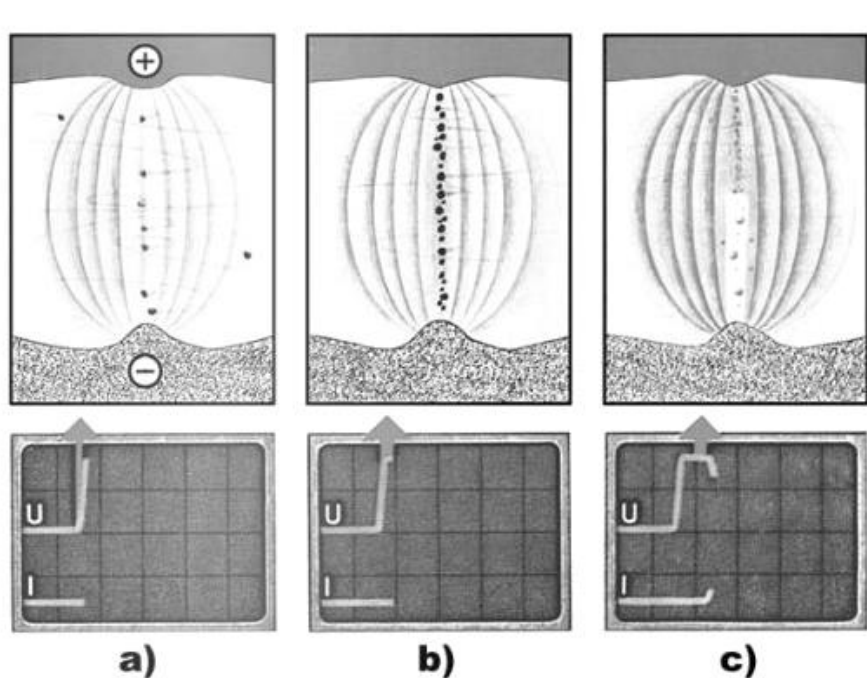
Тако почиње процес електричног пражњења кроз уски канал између алата и обрадка. У алатау долази до претварања електричне енергије у топлотну и до интензивног загревања површине обрадка и алата. Када се прекине ток струје нестаје веома брзо канал за пражњење. Долази до наглог хлађења метала и до његовог експлозивног избацивања из површине обрадка и алата. Овим се постиже једно мало удубљење звано кратер. Поступак се понавља и после великог броја узастопних пражњења долази до стварања кратера поред кратера, односно интензивног одношења материјала са површине обрадка. Осим са обрадка долази и до скидања материјала и са електроде. То се може умањити правилним избором електроде и подешавањем

параметара може се постићи да скидање материјала обратка износи 99,5% а трошење електроде 0,5%.

Очигледно је да при електроерозионој обради долази до различитих појава које се могу поделити у три фазе, с тим што се развој сваке фазе прати у три стања.

Прва фаза представља процес јонизације диелектрикума, односно стварање канала за пражњење. Друга фаза представља процес електричног пражњења, док се у трећој фази одвија процес дејонизације диелектрикума.

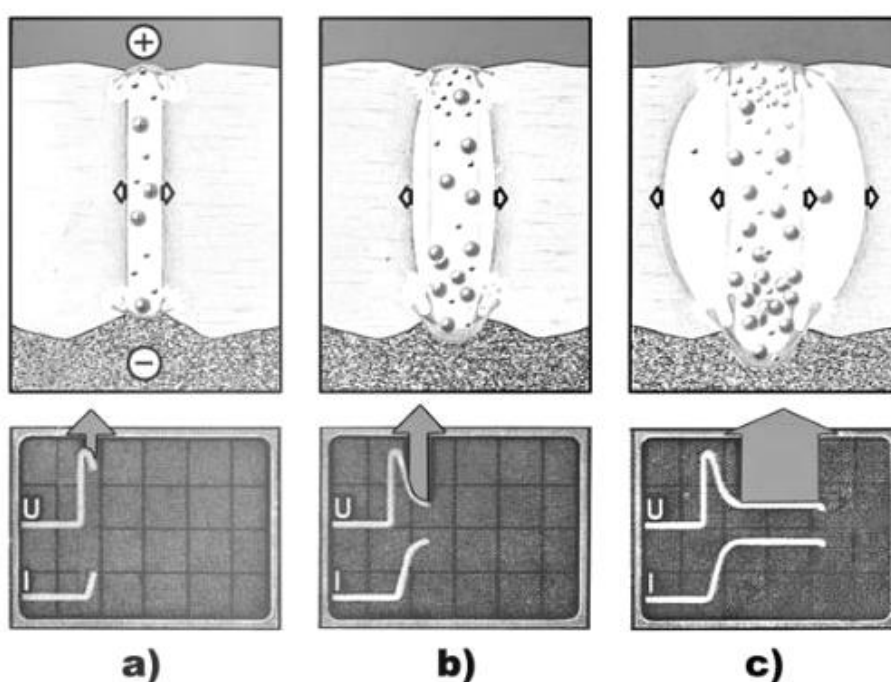
Прва фаза – јонизација диелектрикума (слика 2.2). Под дејством напона између електроде (позитивно наелектрисане) и обратка (негативно наелектрисан) формира се јако електрично поље. Захваљујући привлачном дејству као и геометријској конфигурацији површина, долази до нагомилавања електро проводљивих честица (графитне честице настале током претходних пражњења) у диелектрикуму на месту највеће јачине магнетног поља, на најмањем локаном растојању између алата и обратка (стање *a*). Тако се образује мостић од ових честица што је приказано на стању *b*. Затим долази до покретања електрона из површине негативно наелектрисаног обратка ка позитивно наелектрисаној електроди преко овог формираног мостића (стање *c*).



Слика 2.2: Шематски приказ фазе 1 – јонизација диелектрикума

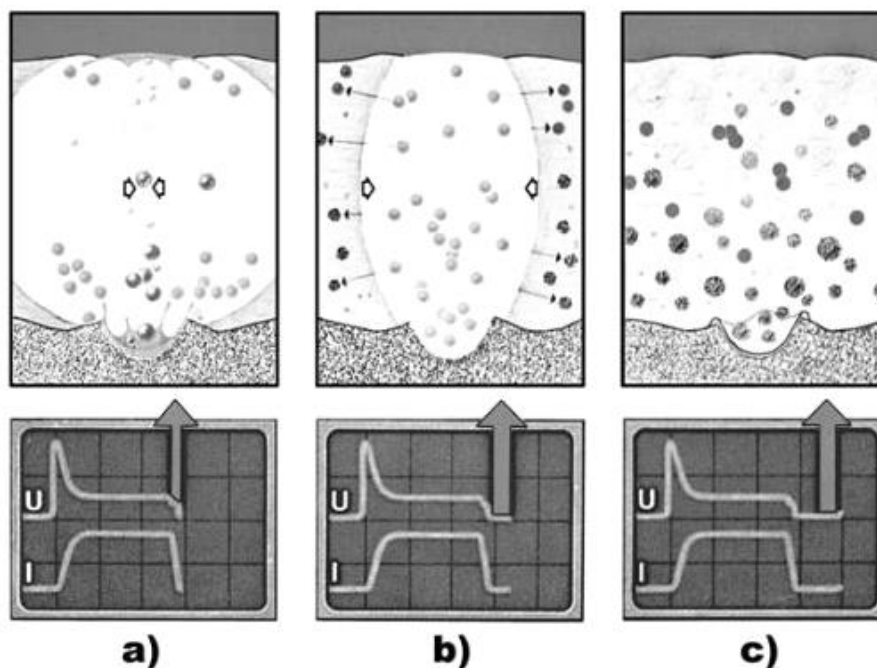
Електрони се на свом путу сударају са неутралним честицама диелектрикума, при чему долази до њиховог цепања на негативно и позитивно наелектрисане честице. Ослобођени електрони изазивају даље сударе и тако долази до ланчане реакције која доводи до формирања великог броја позитивних и негативних честица (јона). Овај процес се зове јонизација односно стварање електро проводљивог канала на месту где је локални зазор најмањи.

Друга фаза – електрично пражњење (слика 2.3). У овој фази мноштво позитивних јона се креће ка негативној, а негативних ка позитивној електроди и при томе се остварује ток електричне струје (стање *a*), која постепено расте (стање *b*) до максималне вредности. При судару великог броја наелектрисаних честица са електродом супротног наелектрисиња, долази до претварања електричне у топлотну енергију у подручју канала за пражњење. Ту се формира зона плазме која веома брзо достиже температуру од 8000 до 12000°C. Због овако високе температуре долази до тренутног топљења и делимичног испаравања најтеже топљивих материјала. Истовремено се образује гасни мехур испареног диелектрикума и материјала који се шири и тако долази до повећања локалног притиска у диелектрикуму (стање *b* и *c*).



Слика 2.3: Шематски приказ фазе 2 – електрично пражњење

Трећа фаза – дејонизација диелектрикума (слика 2.4). Прекид тока електричне струје изазива пад броја наелектрисаних честица које се крећу, пад притиска и нестанак канала за пражњење (стање *a*). Диелектрикум врши повратни притисак на гасни мехур што доводи до његовог смањивања (стање *b*), а потом и до потпуног нестанка. Овај процес се назива имплозијом, што је супротно од експлозије али је подједнако динамично. Затим долази до плављења истопљеног материјала диелектрикумом и до његовог хлађења у облику куглица. Као продукт процеса електроерозије настају углавном графитне честице и гасни мехурићи (стање *c*). Гашењем канала за пражњење долази до дејонизације радног простора пошто нестају негативно и позитивно наелектрисани јони.



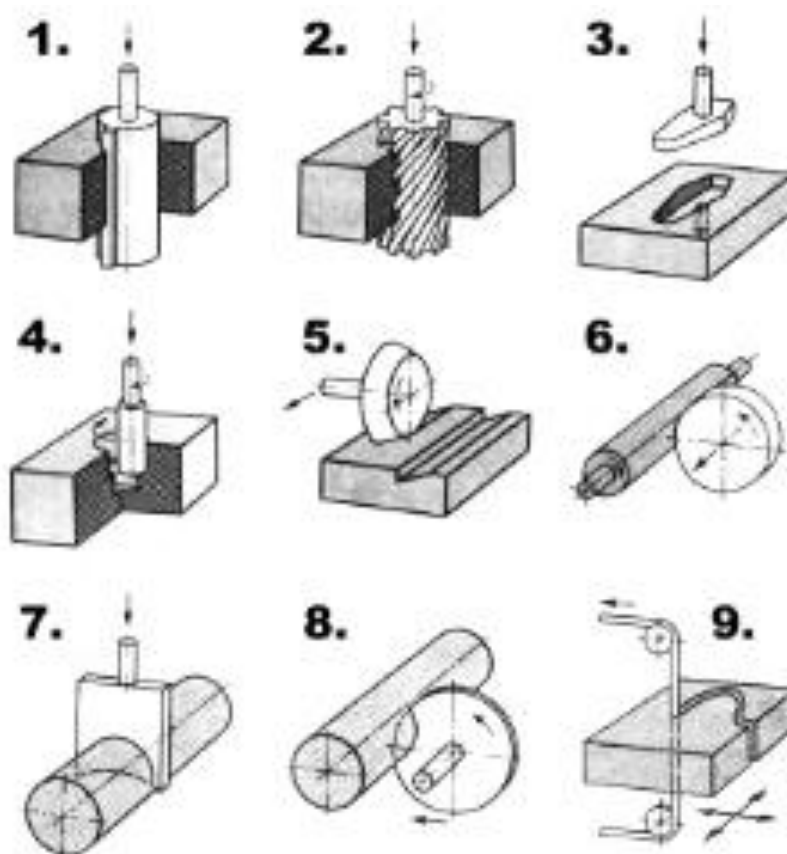
Слика 2.4: Шематски приказ фазе 3 – дејонизација диелектрикума

2.2 Производне операције

Електроерозијом се могу обрађивати сви електро проводљиви материјали без обзира на њихова механичка својства. Међутим, електроерозиона обрада се користи у случајевима када је механичка обрада материјала немогућа или крајње отежана, за обраду тврдых материјала (термички обрађених материјала, челика отпорних на високе температуре, корозију и сл.), израду отвора малог пречника (0,1-1 mm), као и отвора и елемената сложеног облика и конфигурације. На слици 2.5 приказане су основне операције које се могу остварити поступком електроерозије. У многим случајевима електроерозиона обрада је једина метода за обраду неких полуфабриката од молибдена, волфрама уз високу тачност и квалитет обраде. Овај поступак је погодан и за одсецање, расецање и усецање производа од скупocenих материјала (германијум и сл.), када је ширина реза релативно мала и износи 0,25-0,30 mm уз висок квалитет обрађене површине.

Овом врстом обраде је могуће извести низ производних операција користећи профилисане алате у виду пуне електроде или жичане електроде. Жељени облик се добија копирањем облика алата или узајамним кретањем обратка и непрофилисаног алата односно жичане електроде.

Развојем машина за обраду са жичаном електродом створени су услови за повећање ефикасности извођења низа производних операција. Обрада жичаном електродом обезбеђује и израду сложених контура високог степена тачности по унапред задатом програму.



Слика 2.5: Основне операције електроерозионе обраде

1. бушење; 2. израда завојних жлебова; 3. израда просторних гравура; 4. проширивање;
5. глодање; 6. брушење; 7, 8 и 9. сечење материјала

2.3 Карактеристике електричног импулса

Промена напона и јачине електричне струје дефинише основне карактеристике импулса, и они су међусобно строго зависни а чији графички приказ дат на слици 2.6.

Напонски импулси су дефинисани следећим карактеристичним величинама:

U_z – напон пролазног хода – напон између обратка и електроде алата пре почетка пражњења. Његова вредност се креће од 40 до 250 V, зависно од спарених материјала обраде и електроде.

$\bar{U}_f$ – напон пражњења – средња вредност напона између обратка и електроде за време пражњења. Овај напон варира између 15 и 25 V, зависно од материјала обратка и електроде.

T_v – време јонизације – време од момента довођења напона на обрадак и электроду до почетка пражњења.

T_f – време пражњења – време протока струје кроз радни простор при датом подешавању генератора. Код импулсних генератора ова вредност је апсолутно константа.

T_i – трајање импулса – време укупног трајања напонског импулса, односно: $t_i = t_v + t_f$

t_o – време паузе – време у коме је генератор између два радна импулса. Ове паузе су потребне да би се по завршетку електричног импулса обезбедило сигурно „гашење“ електричне искре, односно остварила дејонизација и хлађење радног простора.

T_p – период импулса – време између почетка претходног 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 релативно трајање импулса – однос дужине и периоде импулса, односно:

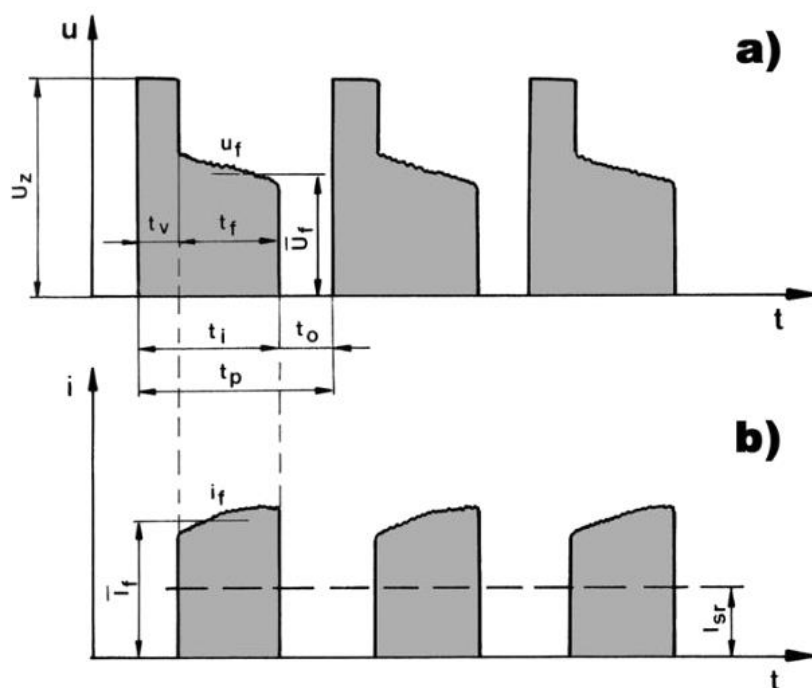
$$\tau = t_i / t_p = t_i / (t_i + t_o) = t_i \cdot f; \tau\% = [t_i / (t_i + t_o)] \cdot 100\%$$

показује колико се процената периоде импулса користи за користан рад, тј. скидање материјала, а колико припада паузама.

Код стујних импулса, осим веће дате дужине пражњења t_f , разликују се још:

$\bar{I}_f$ – струјна пражњења – средња вредност струје за време једног пражњења

I_{sr} – средња вредност радне струје – аритметичка средња вредност струје која за време обраде тече кроз радни простор. То је вредност која се непрекидно региструје помоћу амперметра уграђеног на машини.



Слика 2.6: Напонски и струјни импулси при електроерозиционој обради

2.4 Производност електроерозивне обраде

Производност електроерозионе обраде одређена је количином скинутог материјала у јединици времена (mm^3/min) и углавном зависи од следећих фактора:

- Материјала обратка,
- Параметара електричних импулса,
- Површине електроде-алата (пречника жице код жичаних електрода),
- Врсте диелектрикума,
- Интезитета испирања радног простора,
- Материјала електроде,
- Брзине подешавања радног зазора (код обраде жичаном електродом) и сл.

Очигледно је да производност зависи од низа мање или више променљивих фактора који су поменути или не. У поређењу са конвенционалним поступцима обраде електроерозиони поступци обезбеђују значајно повећање производности и смањење потрошње материјала.

2.4.1 Утицај материјала обратка на производност

Електроерозијом се могу обрађивати материјали који проводе електричну струју, односно метали и њихове легуре, као и карбидну (металну) керамику. Међутим, сви метали и њихове легуре се не обрађују подједнако ефикасно, па сваки од њих има своју карактеристичну обрадивост електроерозијом. За показатеље обрадивости могу се узети различити критеријуми, као нпр: производност, квалитет обрађене површине, трошење електроде-алата, специфични утрошак енергије по јединици запремине скинутог материјала и сл.

Као најчешћи параметар за обрадивост електроерозионом обрадом се узима производност. Обрадивост неког материјала, по овом критеријуму, је обрнуто пропорционална коефицијенту Палакина, који гласи:

$$K_p = c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot T_{\text{top}}^2$$

Где су: c , J/kgK – специфична топлота,

ρ , kg/m^3 – специфична маса – густина,

λ , W/mK – коефицијент топлотне проводљивости,

T_{top} , K – температура топљења.

Овим коефицијентом се показује који ће од два упоређена материјала брже загревати до тачке топљења при једнаким условима загревања. Материјалу код ког је коефицијент K_p мањи треба мање времена за загревање до тачке топљења, самим тим му је обрадивост електроерозијом боља, табела 1.

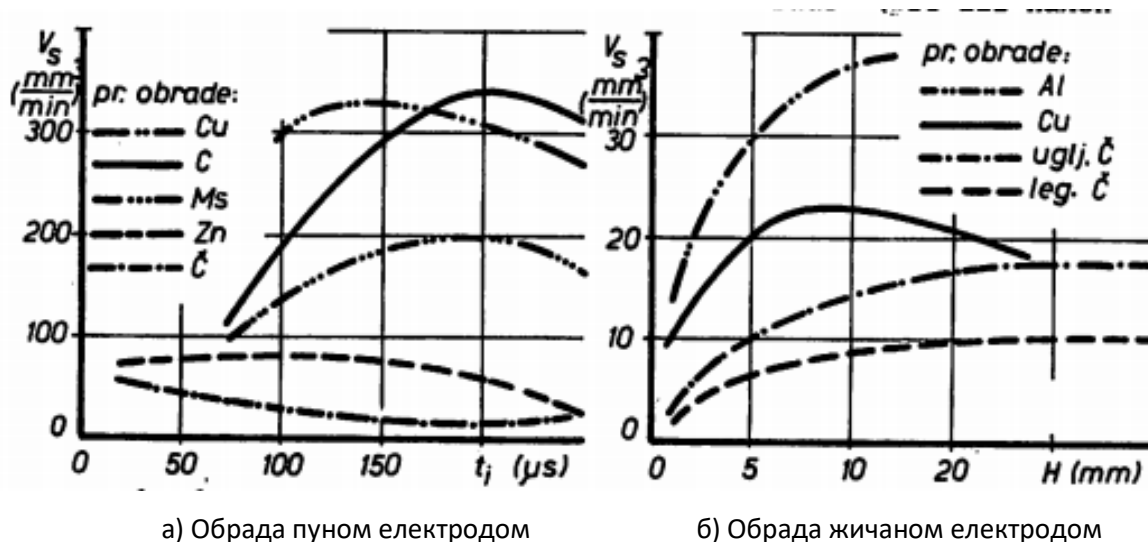
Интересантно је нагласити да на обрадивост неког материјала електроерозијом утиче само хемијски састав, што се може закључити из претходне једначине, јер од њега зависе величине c , λ , ρ и T_{top} , док тврдоћа и друга механичка својства практично немају никакав утицај. Овај закључак је веома важан јер показује да се челици могу једнако ефикасно обрађивати и пре и после каљења. То је значајно из разлога што при каљењу неког сложеног алата после обраде може доћи до одређених деформација које умањују његову тачност а најчешће се не могу отклонити брушењем као последњом операцијом.

Табела 1: Релативна обрадивост електроерозијом

Материјал обратка	Релативна обрадивост
S275	1.00
Конструктивни и алатни нисколегирани и угљенични челици (челици за цементацију, челици са великом прокаљивошћу)	1.00 - 1.10
Сиви лив (SL 15 - SL 32)	0.60 - 1.00
Ватросталне легуре на бази Ni	1.40 - 1.60
Нерђајући челици	1.20 - 1.30
Алуминијум	1.50 - 1.70
Ал-легуре	1.30 - 1.35
Магнетне легуре са великим садржајем Ni, Cr, Al	1.30 - 1.60
Тврди метал - група "P"	0.09 - 0.10
Тврди метал - група "K"	0.14 - 0.30

Обрадивост појединих материјала се утврђује најчешће експерименталним путем. Уколико се обрадивост конструктивног угљеничног челика S275 узме као еталон, онда се експериментално може одредити релативна обрадивост других материјала и њихових легура, како је дато у табели 1. Код електроерозионе обраде на машинама са жичаном електродом и обрадивост и производност зависе од дебљине материјала обратка (слика 2.7, б) .

Из наведеног се може закључити да су обрадивост и производност две пропорционалне величине, што значи уколико неки материјал има бољу обрадивост (већи индекс обрадивости) онда је и његова производност већа при истим условима.



Слика 2.7: Утицај материјала предмета обраде на производност

2.4.2 Утицај параметара електричног импулса

Ефективна снага пражњења представља средњу аритметичку вредност снаге која се у радном простору претвара у топлотну и она се може изразити једначином:

$$P_e = W_i \cdot f = \bar{U}_f \cdot \bar{I}_f \cdot t_i \cdot f = \bar{U}_f \cdot \bar{I}_f \cdot \tau$$

Производност електроерозионе обраде је пропорционална ефективној снази пражњења, односно:

$$Q = q \cdot P_e = q \cdot \bar{U}_f \cdot \bar{I}_f \cdot t_i \cdot f = q \cdot \bar{U}_f \cdot \bar{I}_f \cdot \frac{t_i}{t_i + t_0}$$

Где је q , mm^3/Wmin – специфична производност врсте спарених материјала обратка и електроде.

Као што се види у једначини, на производност електроерозивне обраде утичу:

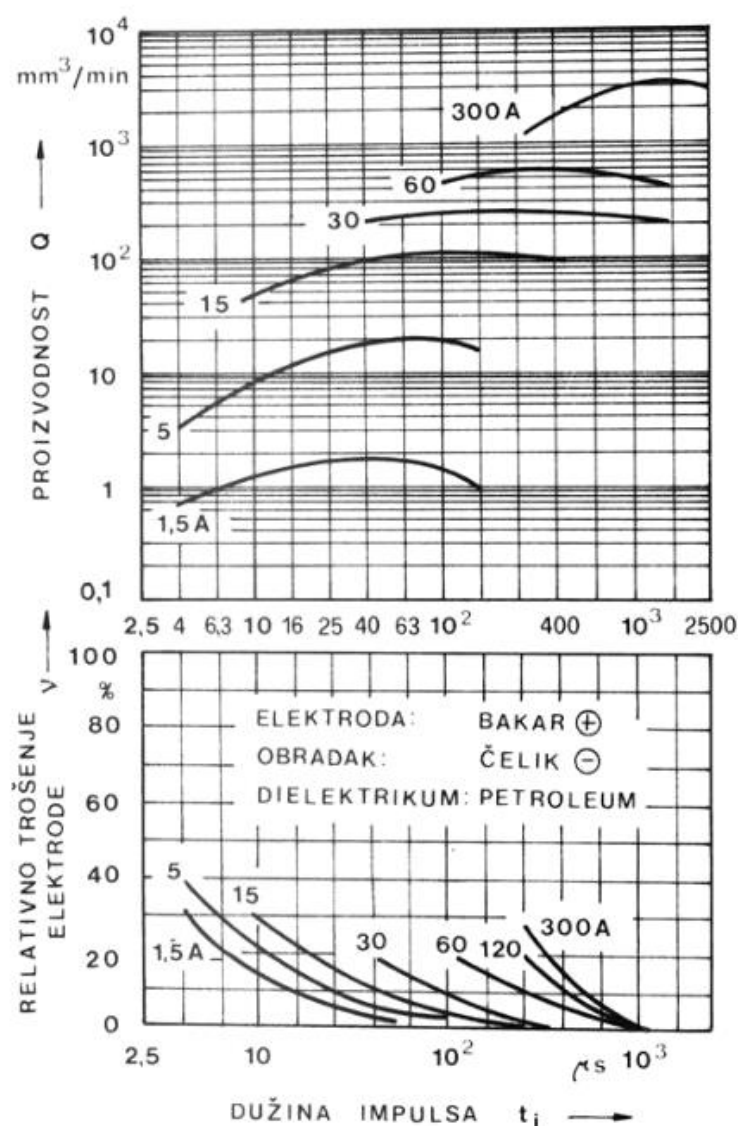
- напон пражњења, $\bar{U}_f$
- струја пражњења, $\bar{I}_f$
- трајање електричног импулса, t_i
- време паузе, t_0

Напон пражњења директно утиче на производност. Међутим, његова вредност зависи само од врсте спарених материјала обратка и електроде и на њу се не може утицати. Његова вредност варира између 15 и 25 V и његова вредност се одређује једино експерименталним путем.

Зависност производности Q и релативног трошења електроде v од струје и дужине импулса приказана је на слици 2.8 и у складу је са горе наведеном једначином. Повећањем струје, при константној дужини импулса, повећава се производност, али и

трошење електроде. При константној струји, повећање дужине импулса до одређене вредности изазива пораст производности а смањује трошење електроде, међутим даљим повећањем дужине импулса настаје пад производности, уз даље смањење трошења електроде. Трајање импулса коме за дату струју одговара максимална производност, представља оптималну вредност. Ова вредност се са повећањем струје импулса помера у правцу импулса веће дужине.

Из овога се може приметити да је немогуће остварити максималну производност уз минимално трошење електроде.



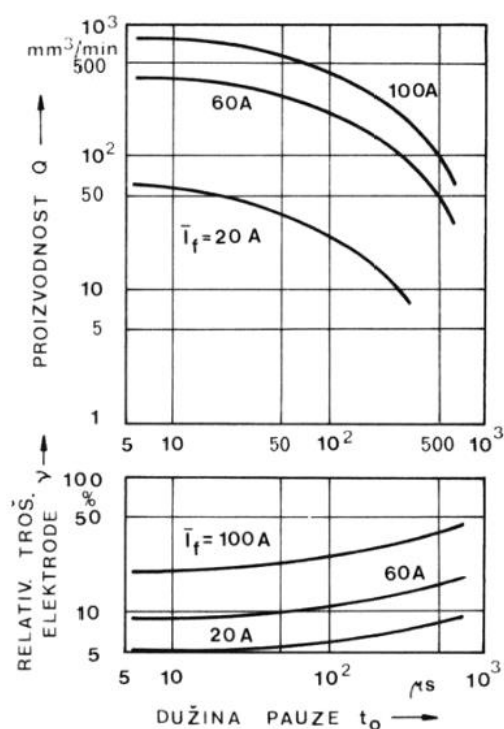
Слика 2.8: Производност и релативно трошење електроде у

Зависности од дужине импулса при различитим струјним пражњењима

Утицај дужине паузе t_0 на производност и релативно трошење електроде приказано је на слици 2.9 и оно је у складу са горе наведеном једначином.

На овом дијаграму можемо видети да за повећање производности а смањење трошења електроде требало би време паузе да буде што мање. Међутим, скраћивање

паузе има своју границу, која зависи од јачине струје. Уколико се та граница прекорачи долази до стварања електричног лука који изазива знатна оштећења и на обратку и на електроди.



Слика 2.9: Зависност производности и релативног трошења електроде од дужине паузе при различитим струјним пражњењима

Повећање производности је могуће и повећањем јачине електричне струје али и то повећање има своју границу. То се објашњава тако да када се јачина струје повећа долази до пораста количине скинутог материјала по јединици површине. Уколико то повећање буде превелико продукти ерозије више неће моћи ефикасно да се одстрани циркулацијом диелектрикума. То доводи до поремећаја у радном простору у коме се више не може осигурати дејонизација стуба за пражњење.

2.4.3 Врсте диелектрикума и њихов утицај на производност

Најважније карактеристике диелектрикума за електроерозиону обраду су:

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

Течности мале вискозности су погодне за фину обраду, док су течности веће вискозности погодне за грубу обраду. То је из разлога што је код fine обраде радни зазор између обратка и електроде мали и течности велике вискозности веома тешко циркулише и омета испирање. Код грубе обраде је могућа примена нешто вискозније течности са којом се постиже већа производност.

Температура паљења диелектрикума је важна карактеристика не само из становишта производности већ и безбедности на раду. Течности са нижом температуром паљења склоне су лакшем испаравању, па тако створени гасови ометају процес обраде и смањују производност. Према томе погодни су диелектрикуми који имају вишу температуру паљења.

Експериментално је утврђено да се код диелектрикума који имају већу специфичну отпорност остварује, под истим условима, већа енергија импулса самим тим и већа производност.

Брзина дејонизације утиче на производност тако што се код диелектрикума који брже дејонизује смањује дужина паузе а то повећава производност.

Данас се код електроерозионе обраде углавном примењују следећи диелектрикуми: минерална уља, петролеј и дејонизована вода и њихове карактеристике и примена су приказане у табели 2.

Табела 2: Радне течности које се користе при електроерозивној обради

Намена	Врсте радне течности	Вискозност на 20°C $\nu[\text{mm}^2/\text{s}]$	Тачка паљења [°C]
Израда отвора мањих димензија и обрада на машинама са жичаном електродом	Дејонизована вода		
Обрада тврдог метала, израда и обрада предмета малих габарита и високог квалитета површина (индустрија сатова)	Петролеј (керозин)	2	78
Израда и обрада предмета великох габарита (пред завршна обрада)	Минерално уље	6 – 12	110 – 160
Израда и обрада предмета великих габарита (груба и пред завршна обрада)	Минерално уље	6 – 20	110 – 200

Минерална уља се најчешће користе као диелектрикуми. Скоро свака већа рафинеија у свету производи више квалитета оваквих уља. Уља високог вискозитета се користе за грубу обраду, с обзиром да су радни зазори довољно велики да се обезбеди циркулација ових уља. Овим уљима се постиже већа производност при обради.

Петролеј (керозин) са својом врло малом вискозности је погодан за фину обраду и врло фину обраду. Нарочито је погодан за обраду тврдог материјала која се обавља кратким импулсима. Из еколошких разлога препоручује се употреба петролеја без мириса.

Дејонизована вода се као диелектрикум користи код обраде микро отвора, као и на машинама за сечење помоћу жице. Добија се из обичне воде тако што се посебним поступцима одстране растворени минерали, па се на тај начин она учини електро непроводљивом.

Честа измена диелектрикума на једној машини се не практикује, па се онда врста диелектрикума бира на основу тога која врста обраде се на датој машини најчешће изводи.

Основи задаци радне течности су:

- Стварање услова за настанак варнице,
- Одвођење продуката обраде,
- Хлађење електрода,
- Стварање одговарајућих услова за појаву стуба пражњења,
- Спречавање таложења нечистоћа и продуката обраде на електроде итд.

Из свега овога се може закључити да се при избору диелектрикума, поред основних захтева процеса обраде, посебна пажња обраћа на основне карактеристике диелектрикума као што су:

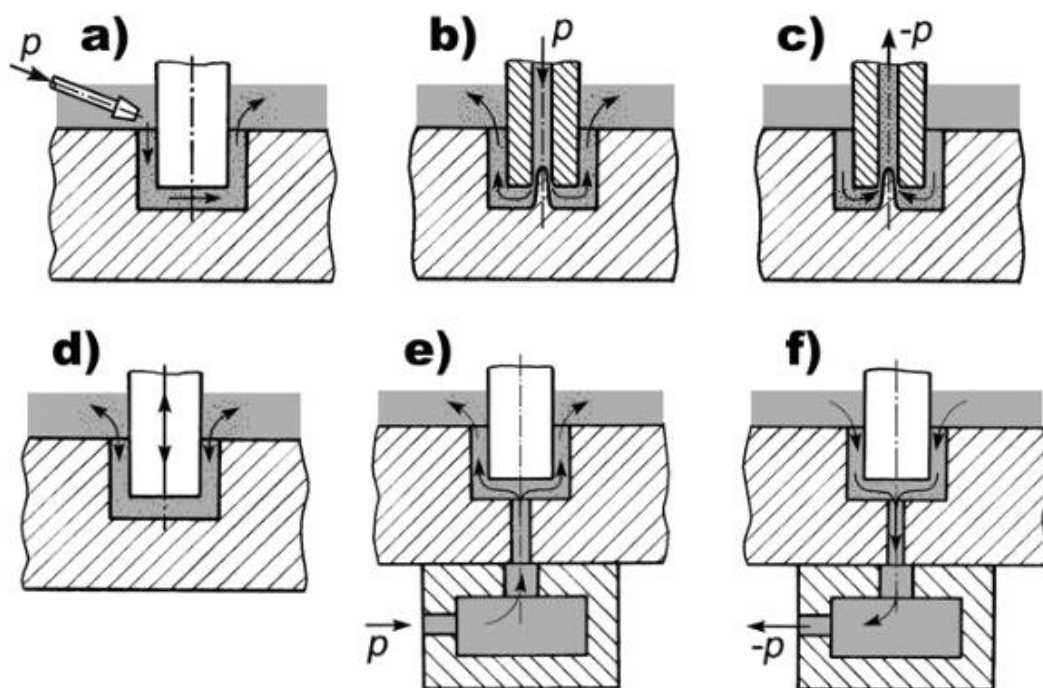
- Мала кинематска вискозност,
- Висока електрична отпорност,
- Адекватна вредност диелектричних особина (брзина јонизације и дејонизације),
- Висока вредност температуре паљења,
- Хемијска неутралност и нетоксичност,
- Висок ниво заштитних особина,
- Низак ниво трошкова експлоатације.

2.4.4 Утицај испирања радног простора на производност

Испирање радног простора или другачије речено циркулација диелектрикума кроз радни простор између алата и обратка је једна од основних фактора који утиче на производност и интензитет хабања алата. Електрична отпорност чистог диелектрикума је већа од електричне отпорности запрљаног. Из тог разлога, када је диелектркум чист потребно је више времена да се радни зазор „премости“ и произведу прва пражњења. Продукти ерозије који настају при првом пражњењу смањују отпор диелектрикума, што олакшава даља пражњења и побољшава услове обраде. Међутим, када садржај продуката ерозије у радном простору постане превелики, то доводи до смањења

отпорности диелектрикума и може доћи до кратког споја и појаве електричног лука. Ова неправилна пражњења смањују производност и делују веома штетно на електроду и обрадак јер оштећују њихове површине. Из овога можемо закључити да испирање радног простора не ме да буде ни превише интензивно ни превише слабо. Интензитет испирања радног простора може се аутоматски контролисати сталним мерењем електро проводљивости диелектрикума, чиме су опремљене све савременије машине. Код машина где то није могуће интензитет испирања се регулише по препоруци произвођача или из личног искуства технолога.

Испирање радног простора се може остварити природним или принудним путем. Природно испирање се остварује циркулацијом диелектрикума која настаје под дејством хидрауличних и акустичних таласа који настају при електричном пражњењу, као и због температурске разлике диелектрикума у радном простору и у остатку каде. Овај вид испирања најчешће није довољан, па се због тога морају применити различити начини принудног испирања радног простора.



Слика 2.10: Најважнији начини принудног испирања радног простора

Типови принудног испирања су приказани на слици 2.10:

- принудни испирање радног простора поперечном циркулацијом диелектрикума (слика a), и овај тип испирања је најједноставнији али се може применити само код малих дубина,
- под притиском кроз електроду или обрадак (слика b, f), овај тип испирања може имати стални или периодични импулсни карактер,
- усисавањем кроз електроду или обрадак (слика c, e)

- уздужним осциловањем, обртањем или периодичним одмицањем и примицањем електроде (слика d), остварује се принудно таласање диелектрикума што доводи до испирања радног простора

2.5 Примена електроерозивне обраде

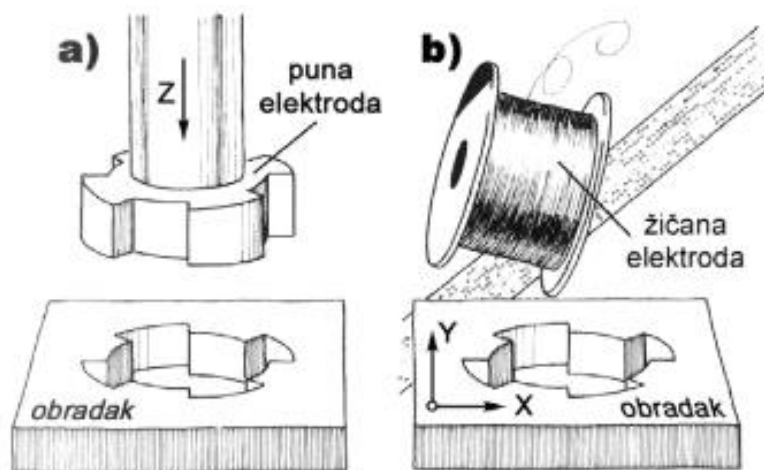
Електроерозивна обрада је данас економски оправдана и широко распрострањена за извођење различитих операција. Не користи се само за обраду тешко обрадивих материјала, већ и за обраду делова и површина сложеног геометријског облика код добро обрадивих материјала. Због тога електроерозиона обрада пружа велике могућности и најчешће се користи при изради:

- калупа за ковање и пресовање,
- калупа за ливење под притиском,
- алата за пробијање и просецање,
- алата за израду делова од пластичних маса,
- делова са уским прорезима,
- делова са малим и дубоким отворима,
- танкозидних делова и сл.

3. ОБРАДА НА ЕРОЗИМАТИМА СА ЖИЦОМ

Машине за електроерозиону обраду уз помоћ жичане електроде појавиле су се 1969. године и од тада су постале незаменљиве код израде алата и делова сложеног облика из плочастих материјала.

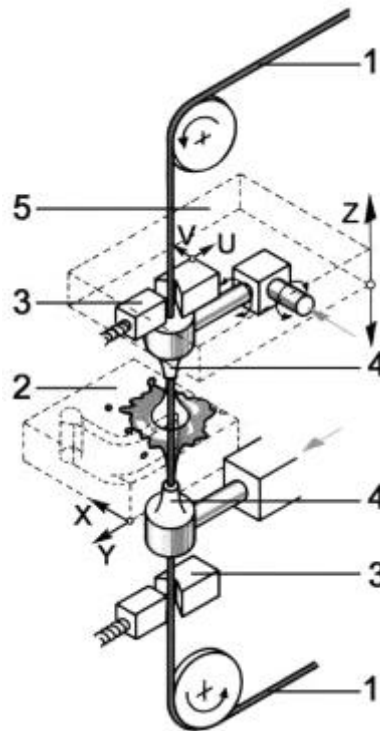
Разлика између машина са пуном и са жичаном електродом се огледа у томе да код машина са пуном електродом жељени облик добија тако што се електрода направи потребног облика и једноставним упуштањем такве електроде у материјал обратка долази до дубљења и пресликавања њеног облика у обратку. Може се закључити да је код машина за *EDM* обраду са пуном електродом, електрода сложеног облика а њено кретање је једноставно и изводи се само у вертикалном правцу, по *Z* – оси (слика 3.1а). Код машина за *EDM* обраду са жичаном електродом, електрода је у облику танке жице која се непрекидно креће у правцу своје осе, а обрадак врши сложено кретање по унапред програмираној путањи у две осе (слика 3.1б).



Слика 3.1: Шема рада два основна типа машина за електроерозиону обраду

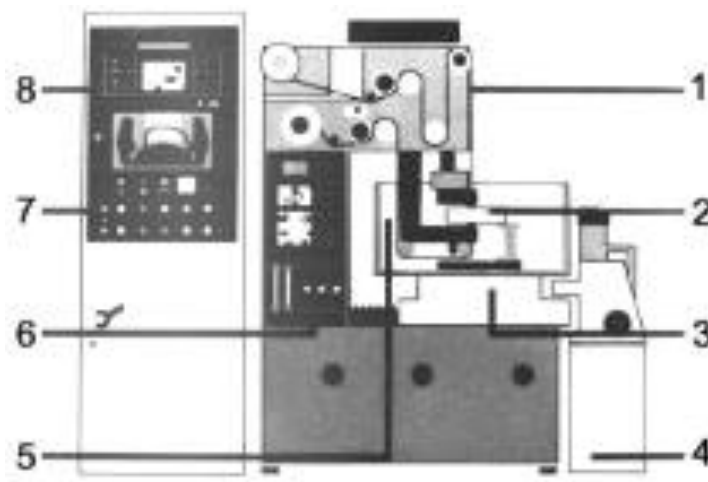
У случају машина са жичаном електродом није потребно израђивати компликоване електроде, тако да се радом на оваквом типу машина остварује врло економична обрада компликованих делова.

Класична пуна електрода је замењена покретном жицом (1), која по *Z* оси има тачно вођење са две вођице (3), слика 3.2. Обрадак (2) на овом примеру није потопљен у диелектрикум као код електроерозионе обраде са пуном електродом већ се само жица налази у струји диелектрикума који се доводи кроз две симетрично постављене млазнице (4). Обрадак и жичана електрода су прикључени на одговарајући генератор електричних импулса, при чему се на њиховом одређеном растојању остварује процес електричног пражњења. Померање обратка у правцу *x* и *y* оса се врши уз помоћ укрштених клизача и система за нумеричко управљање помоћу рачунара, слика 3.3.



Слика 3.2: Шема елетроерозивног сечења помоћу жице

1 – електрода (жица), 2 – радни сто са укрштеним x, y клизачима, 3 – вођице од синтетичког рубина, 4 – млазнице за довод диелектрикума, 5 – вертикални носач вођице са укрштеним U-V и Z клизачем.

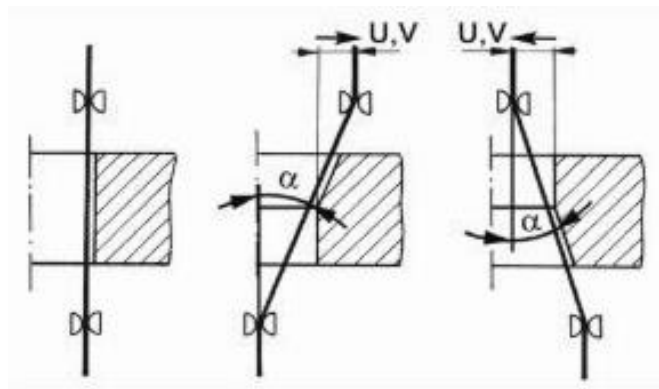


Слика 3.3. Основни елементи машине за електроерозивну обраду са жичаном електродом

1 – погон жице, 2 – обрадак, 3 – координатни сто, 4 – агрегат за диелектрикум, 5 – када, 6 – управљачка јединица, 7 – генератор импулса, 8 – нумеричко CNC управљање.

На овим машинама се могу остварити цилиндрични резови, кад се доња и горња вођица жице поклапају са Z-осом, или конични који се остварују извођењем горње вођице из вертикалног осе у правцу U или V-осе за одређену вредност. На овај начин могу се остварити отворени или затворени конуси са углом $\alpha = \pm 5^\circ$, па и знатно више. Ово је нарочито важно код израде алата за пробијање и просецање, који захтевају овакве нагибе ради смањења трења између жига и матрице.

Померање вертикалног носача вођице са укрштеним клизачем (слика 3.4) по Z– оси остварује се зависно од висине (дебљине) плоче која се обрађује, с обзиром да вођице жице морају увек стајати на одређеном растојању од површине обратка.



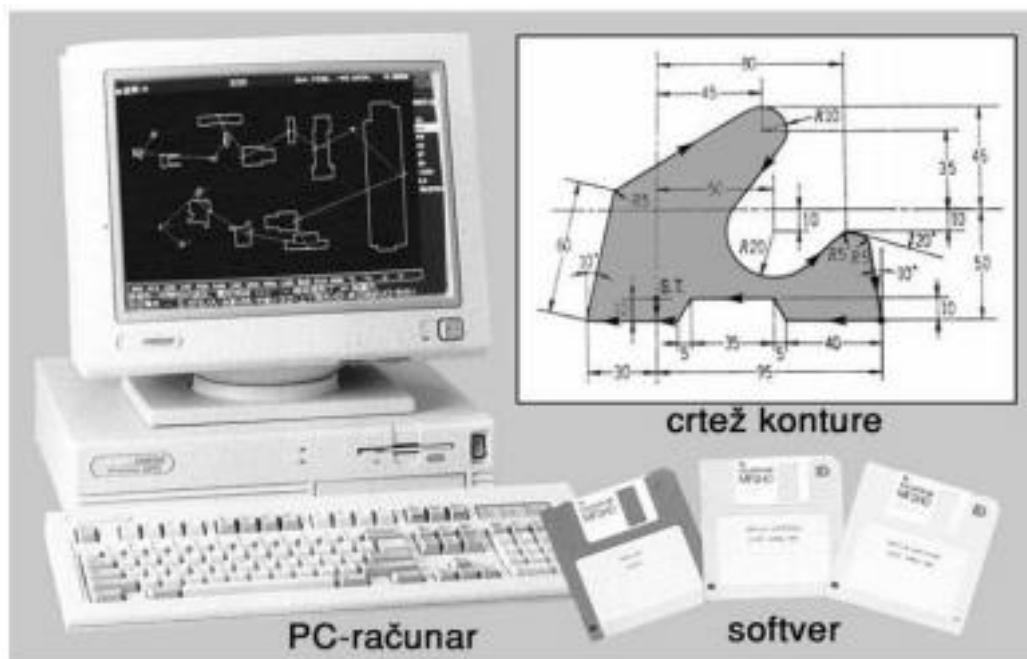
Слика 3.4: Исецање контуре на машинама за електроерозиону обраду са жицом
а) цилиндрично и б) конично

За разлику од других операција електроерозивне обраде, код електроерозивног сечења са жицом постоји врло мали број параметара обраде који су променљиви и углавном се они свode на врсту материјала обратка и његову дебљину. Због тога технолошки параметри имају мање више устаљене вредности које варирају у уским границама. Подаци о томе налазе се меморисани у управљачкој јединици на самој машини при чему се аутоматски врши њихов избор и регулисање у процесу обраде. Тако код ових машина отпада потреба за израдом посебног технолошког поступка за дати случај обраде, већ се врши само програмирање кретања обратка у правцу X, Y, U, V и Z–осе. На тај начин тачност ове обраде не зависи од технолога и послужеоца на машини, већ произилази из тачности рада машине и програма.

Програмирање рада на овим машинама прошло је за последњих тридесетак година више развојних фаза. Данас се за то углавном користе РС – рачунари уз одговарајући софтвер који обично развија сваки произвођач опреме. За израду програма потребан је само цртеж контуре са координатама, слика 3.5. Програм садржи информације о релативном кретању жице у односу на обрадак.

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. У дијалошкој комуникацији са рачунаром програмира се корак по корак. Учињене грешке се одмах уочавају и отклањају, уз истовремену графичку контролу сваког програмског корака на монитору. Састављени програм се некада преносио на магнетну траку или дискету, а данас најчешће на USB – меморију или се помоћу рачунарске мреже, програм уноси у управљачку јединицу на машини. Пре коришћења меморисаног програма, оператор на машини има могућност, опет у дијалогу са рачунаром на самој машини, да изврши одређене корекције у програму: заокрене контуре за одређени угао, преслика је у огледалу, смањи или повећа, изврши равномерно проширивање или сужавање програмиране контуре за одређену вредност, задати угао при коничном еродирању и др.

На тај начин се исти програм, уз ситне корекције, користи више пута, што је нарочито чест случај код израде алата за просецање или електрода (за грубу, средњу или фину обраду).



Слика 3.5: Програмирање рада на машинама за електроерозивну обраду са жичаном електродом

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

У циљу постизања што веће продуктивности и тачности електроерозивне обраде, тежи се што већој аутоматизацији управљања овим машинама. То се данас најефикасније постиже применом CNC–управљања којим се, на основу релативно простог програмирања, остварује аутоматско:

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

Потпуно аутоматизована машина за електроерозиону обраду може да ради без надзора свих 24 часа, за време празника или у дане викенда.

3.1 Карактеристике материјала предмета обраде за електроерозиону обраду жичаном електродом

Електрична проводљивост предмета обраде требало би да буде иста или већа од 0,1 S/cm. Што је боља проводљивост то ће бити мање расипање енергије између плоче носача струје и дела за пражњење. Предмет обраде треба да се блокира, а материјал не сме бити запаљив нити сме да проузрокује бурне хемијске реакције са водом, хидрогеном или кисеоником.

У току електроерозије мале капи воде се разлажу на хидроген (водоник) и кисеоник. Материјали код којих се брзо стварају велики број оксида, могу се разарати само у посебним условима. Тако на пример, изведени типови алуминијума код електроерозије захтевају смањење проводљивости воде.

Материјал мора да буде хомоген. Порозност и нечистоћа онемогућују рад и врло често су узрок неупотребљиве површине после резања. Синтетизовани материјали су веома често неправилно испресеовани. Материјал би требало да буде стабилан са што мањим унутрашњим напонима. Прилоком резања унутрашњи напони се ослобађају и могу довести до деформација обратка. На оваквим машинама треба обрађивати материјале као што су стабилизовани челици, челик за обаду на топло, челик за каљење у сланом купатилу, материјале без операција попуштања. Тамо где ови услови не могу бити задовољени, треба извршити претходно резање или компезацију. И синтетизовани материјали неки пут имају унутрашње напоне због тешких услова пресовања.

3.2 Материјал и квалитет жице

Жица је резни алат код електроерозионе обраде, па су и потребе за квалитетом веома велике:

- промена пречника не сме да буде већа од +1 μm ,
- није дозвољено рисовање,
- нису дозвољени трагови савијања,
- жица треба да буде сјајна, одмашћена и полирана по могућности електричним путем,
- намотаји треба да буду чисти,
- намотаји треба да буду без прекида унутар самог калема и без увртања,
- нису дозвољени заостали напони,
- жица мора бити посебно ускладиштена (не сме бити у условима спољашњег окружења јер брзо долази до различитих оштећења),

- Транспорт и руковање са жицом мора бити строго контролисано јер брзо може доћи до њеног оштећења, чиме постаје неупотребљива.

Обично се користи месингана жица. За обраду графита се користи и бакарна жица. Најчешћи пречници су од 0,2 до 0,3 mm. За мале дебљине и за радијусе за заокругљивање треба користити жицу пречника од 0,1 до 0,2 mm. За прецизну израду користи се челична жица или жица од молибдена пречника од 0,04 и 0,1 mm. Жица се са једног калема одмотава, врши обраду и намотава на други калем. Жица се не може користити поново.

3.3 Ерозимат са жицом Fanuc Tape Cut W2

У претходном делу извршено је упознавање са основном приципима рада и примене ерозимата са жицом. У наредном делу рада на примеру рада на ерозимату са жицом **Fanuc Tape Cut W2** (слика 3.5) детаљно су објашњене операције обраде и битне карактеристике ове машине.



Слика 3.5: Ерозимат са жицом **Fanuc Tape Cut W2**

Ова машина поседује радну површину од 450 x 650 x 300 mm. Обрадак није потопљен у кади у диелектрикум, већ диелектрикум пролази кроз две млазнице и облаже само жицу. Ова машина такође поседује и филтере за пречишћавање диелектрикума кроз које диелектрикум стално пролази и филтрира се. Ова машина, као и сви ерозимати са жицом има независне системе за:

- аутоматско довођење жице,
- аутоматско обнављање жице у случају прекида,
- функцију поновног покушаја и
- резање конуса.

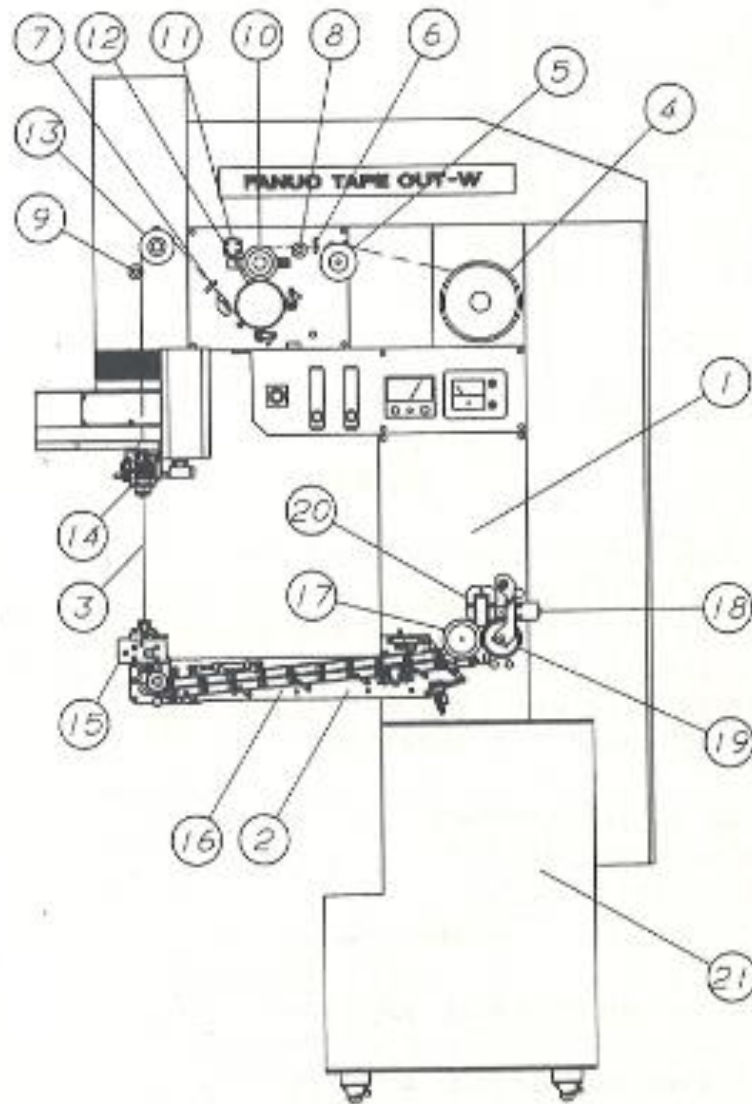
3.4 Аутоматски систем за довођење жице

На слици 3.6 и 3.7 је приказан систем за довод жице. Овде се поред основних делова који чине тај систем може уочити путању жице.

Жица се налази на калему. Она се одмотава са калема и преко система котурова долази до радне зоне, врши обраду и даље преко другог система котурова одлази у spremник истрошене жице или се може намотавати на калем за истрошену жицу.



Слика 3.6: Калем и систем ваљака за довод и затезање жице



Слика 3.7: Шематски приказ путање жице на машини Fanuc tape cut W2

- 1 сталак; 2 рука; 3 жица; 4 калем; 5 ваљак; 6,7 прекидачи за откривање лома жице;
 8,9 јастучић; 10,19 стезни ваљак; 11,18 опружна кутија; 12 кочиони ваљак; 13 ваљак;
 14 горња глава; 15 доња глава; 16 каиш; 17 напојни ваљак; 20 канал за жицу;
 21 кутија за сакупљање жице

Машина **Fanuc tape cut W2** поседује аутоматски систем за довод жице (о овим и другим функцијама можете више прочитати Упутство за употребу (додатак за аутоматски механизам за додавање жице) за Fanuc Tape Cut series (W1, W2, W3, W4). Механизам аутоматског довода жице има две функције:

1. Аутоматско довођење жице до почетног отвора AWF (automatic wire feed function)
2. Функција аутоматског обнављања жице у случају прекида AWR (automatic wire recovery)

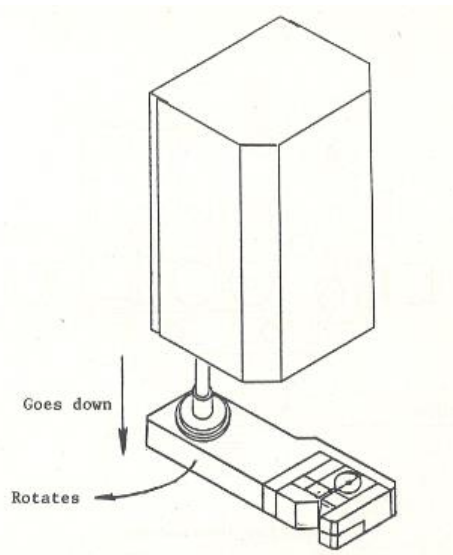
Обе функције су неизоставне за аутоматизацију машине за сечење жицом, а њихово

одржавање или програмирање рада се разликује од рада код конвенционалних поступака обраде.

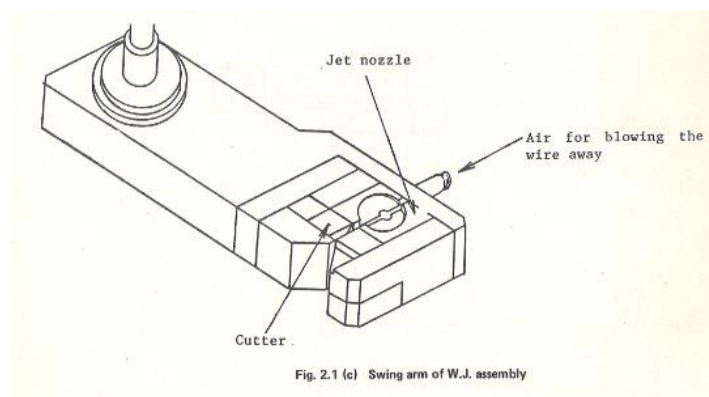
3.5 Аутоматско довођење жице (AWF) до почетног отвора

Аутоматско довођење жице је функција која се аутоматски изводи на већ унапред подешеној путањи. Наиме, када се процес обраде заврши жица је исечена и уклоњена, и након тога она се поново доводи до следећег почетног отвора. Цео овај процес сечења, уклањања и поновног довођења до почетног отвора се назива функција аутоматског довођења жице (AWF).

Овај процес се извршава тако што се ротирајућа рука на којој се налази дизна и секач жице спушта и позиционира испод горње главе (слика 3.8). Дизна и секач се отварају и затварају уз помоћ ваздушног притиска (слика 3.9).



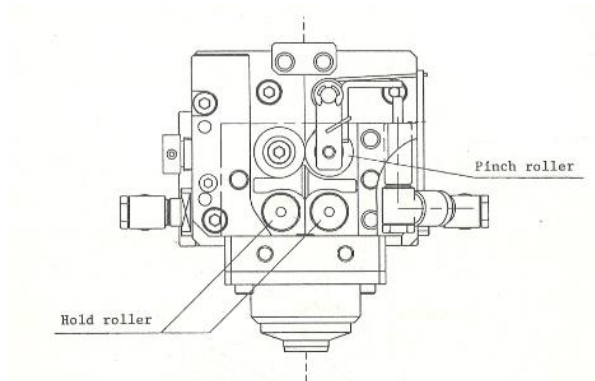
Слика 3.8: Приказ ротирајуће руке



Слика 3.9: Приказ дизне и секача

Након одсецања жице вођице се затварају и хватају жицу а стезни ваљак почиње да се окреће и тако омогућава довод жице (слика 3.10 и 3.11). За довод жице користи се

систем вођења у три тачке. Током рада овај систем је затвара помоћу клипа, а током довођења жице он се отвара.

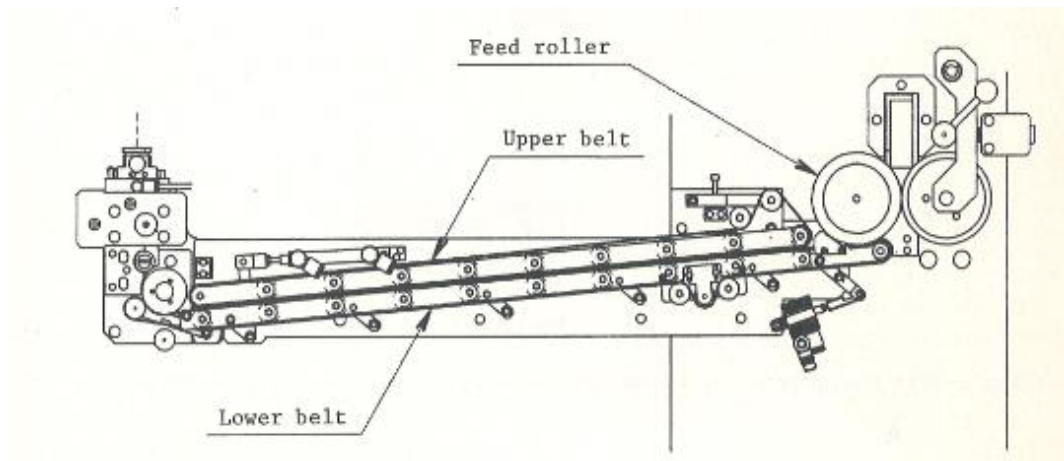


Слика 3.10: Стезни ваљак и ваљак за вођење



Слика 3.11 : Горња глава

Доњи каиш (слика 3.12) се отвара и затвара помоћу ваздушног цилиндра. Када је затворен он је у вези са ваљцима и зупчаницима. Ако је каиш затворен он заједно са ваљцима има улогу у довођењу и спровођењу жице до spremника за искоришћену жицу, а ако је отворен онда ротација каиша стаје. За време аутоматског повезивања жице каиш је затворен и спроводи жицу, а за време обраде каиш је отворен а спровођење жице врше ваљци.



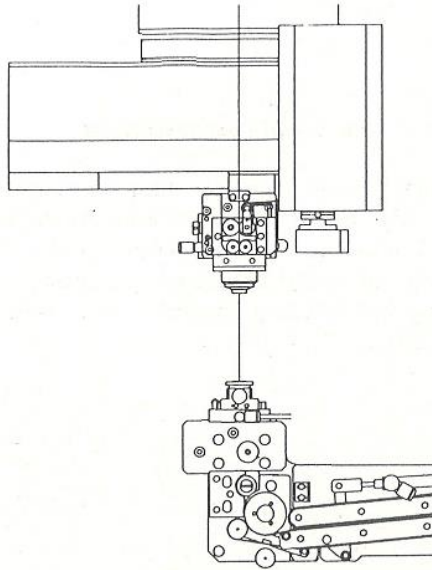
Слика 3.12: Каишни механизам



Слика 3.13 : Доњи каиш и систем котурова који избацују искоришћену жицу у spremник искоришћене жица

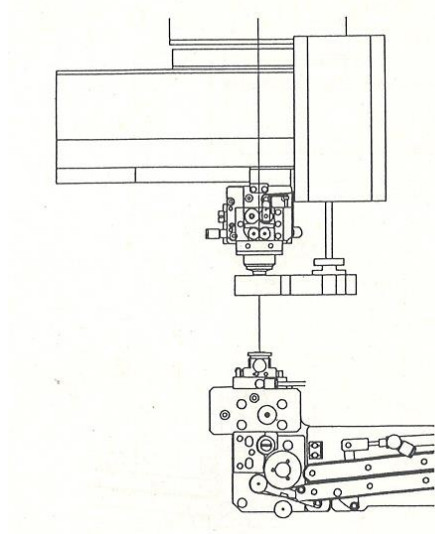
Аутоматски довод жице се активира уз помоћ М кода и то М50 (уклања поломљену жицу) и М60 (доводи нову жицу)

Уколико програм наиђе на код М50 зауставља се довод диелектрикума и рад ваљака за довод жице. Након тога глава се подиже по Z – оси за 60 mm (слика 3.14) и ваљци за довод се затварају како би држали жицу.

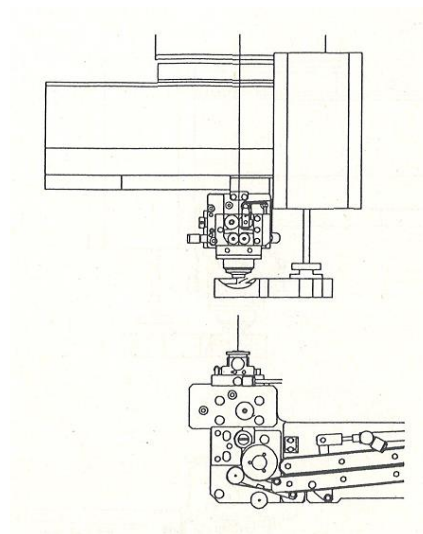


Слика 3.14: Подизање горње главе за 60 mm

Затим се ротирајућа рука са секачем спушта (слика 3.15) и након што секач исече жицу каиш и ваљци почињу да се ротирају како би извршили одовод жице (слика 3.16). Ротирајућа рука се враћа на своју позицију и тиме се команда М50 завршава.

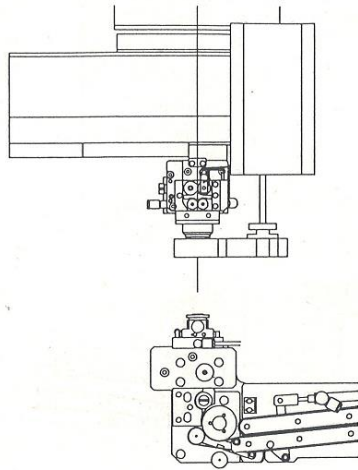


Слика 3.15: Спуштање ротирајуће руке

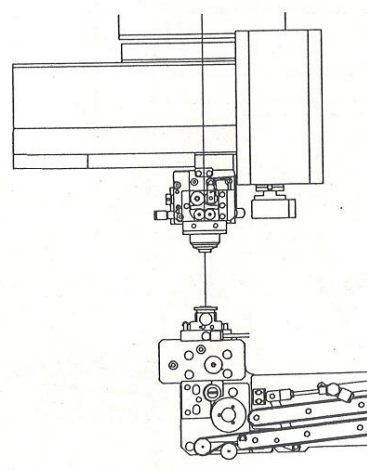


Слика 3.16: Одвођење покидане жице

Команда М60 започиње након што се заврши команда М50. Ротирајућа рука се ротира и када се дизна затвори отвара се систем вођења са три тачке. Када дизна за диелектрикум дође у контакт са горњом главом цео систем се спушта за 30 mm. Затим се укључује пумпа за диелектрикум која гура воду кроз дизну, ротирају се стезни ваљци и спроводе жицу до доње главе (слика 3.17).



Слика 3.17: Спуштање жице до доње главе

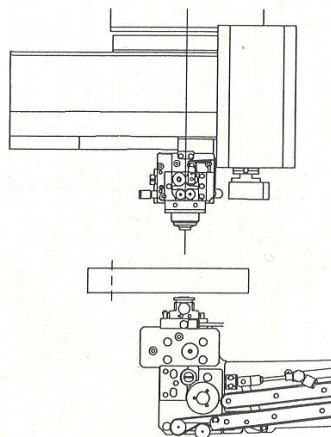


Слика 3.18: Враћање ротирајуће руке

Доња дизна је затворена још командом M50 тако да вода пролази само кроз горњу. Када је жица прошла до доње главе, улази између каишева а пумпа за диелектрикум се зауставља. Жица је ухваћена каишем који је уз помоћ ваљака спроводи до спремнока за жицу. После тога се глава враћа горе за 30 mm по Z – оси и дизна се одваја од горње главе. Дизне се отварају а вођене у три тачке на доњој глави се затвара. Ротирајућа рука се ротира и враћа у почетан положај (слика 3.18) и тиме се завршава команда M60.

3.6 Аутоматско обнављање жице (AWR)

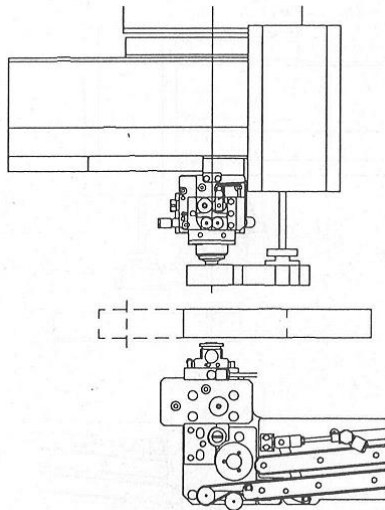
Подешавањем параметара у рачунарској јединици, чак и када се жица прекине током обраде, жица се аутоматски продужава и обрада се наставља. За обнављање прекинуте жице извршавају се следеће радње: Ако се жица прекине током обраде активира се прекидач који открива прекид жице и аутоматски пумпа за диелектрикум стаје и стезни ваљци стежу и држе жицу. Ваљци за довођење жице који се налазе на доњој глави настављају да се okreћу и остатак поломљене жице одводе у спремнока за искоришћену жицу (слика 3.19).



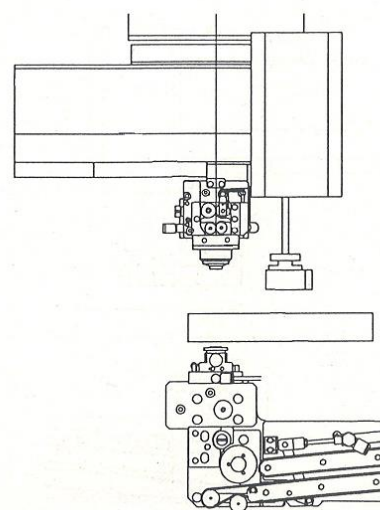
Слика 3.19: Одвођење поломљене жице

Након тога горња глава се подиже за 150 mm, а ваљци се окрећу и доводе жицу на одговарајућу дужину. Ротирајућа рука се спушта и поставља испод горње главе а радни сто се враћа у почетни положај (слика 3.20).

Када се жица пресече онда се она извлачи на одговарајућу дужину и поново сече. Овај поступак се понавља три пута како би се осигурало да је остатак жице „здрав“. Одсечени делови жице се уклањају уз помоћ ваздуха. Ротирајућа рука се враћа у неутрални положај а глава се спушта по Z – оси за 90 mm (слика 3.21). Као и код команде M60 дизна долази у контакт са горњом главом и жица се повезује са доњом главом. По завршетку додавања жице ротирајућа рука се подиже и враћа у првобитан положај. Затим се цео систем враћа у положај који је имао током обраде. Жица се затеже и пумпа за диелектрикум се укључује а машина се враћа у положај где је жица пресечена дуж обрађене путање. Напајање за обраду се укључује и обрада се наставља.



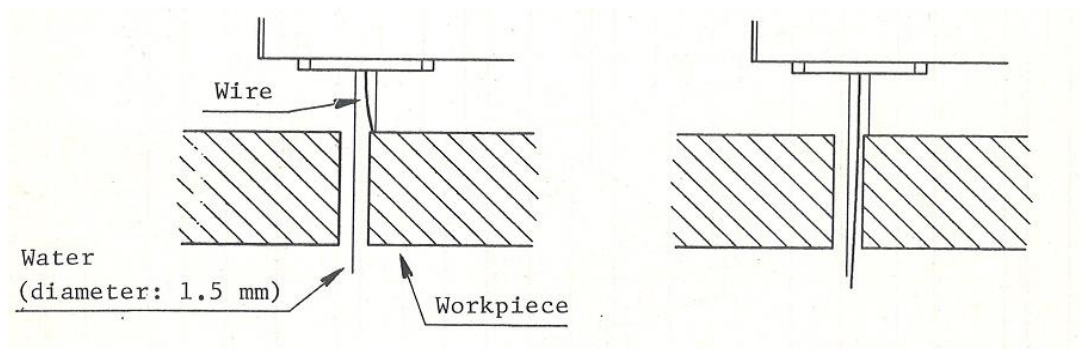
Слика 3.20: Враћање радног стола у почетни положај



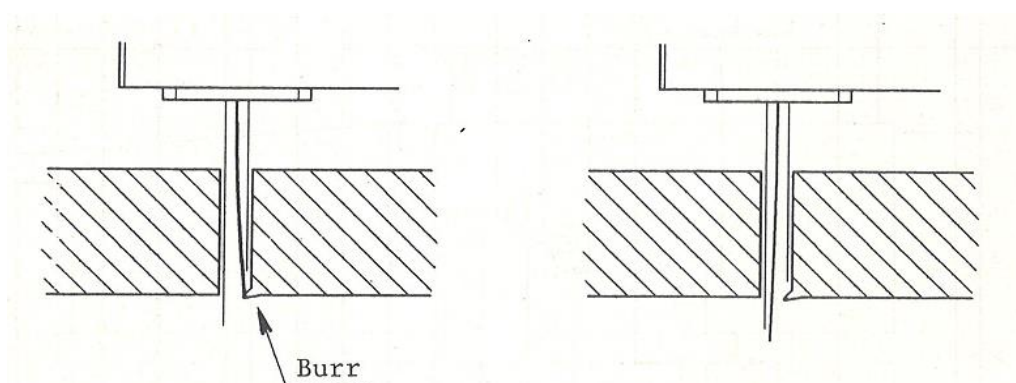
Слика 3.21: Постављање ротирајуће руке у неутрални положај

3.7 Функција поновног покушаја

Када је укључена функција аутоматског додавања или обнављања жице функција поновног покушаја може се користити за провлачење жице кроз почетни отвор. Када се жица провлачи кроз тај почетни отвор уколико је тачност положаја отвора лоша или ако се налази нека препрека у виду пукотине на отвору жица и обрадак ће доћи у контакт, жица ће се савити и проузроковати кратак спој (слика 3.22 а и б).



Неуспешно Успешно
Слика 3.22 а): Провлачење жице кроз почетни отвор који је лоше позициониран

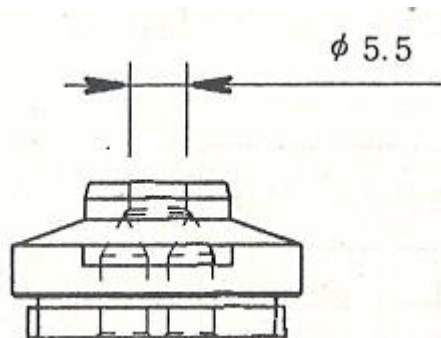


Неуспешно Успешно
Слика 3.22 б): Провлачење жице кроз почетни отвор са препреком у виду пучне

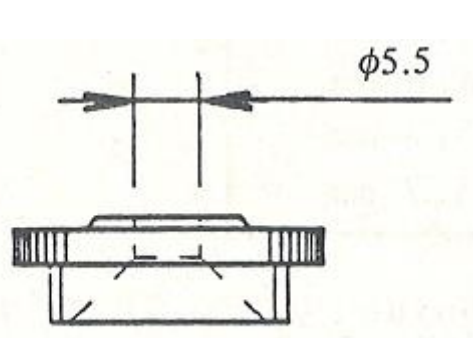
Када се онемогући довод жице, жица се прекида и глава се подиже по Z – оси. Након пресецања савијене жице глава се спушта и поступак се понавља. Жица се води водом која тече кроз дизну и положај жице се у води мења због њеног протока и усмерава жицу да прође кроз отвор. Ова функција може да помогне све док је померање положаја почетне рупе мало и препреке које се налазе у отвору нису превелике, у том случају провлачење жице ће успети.

3.8 Резање конуса

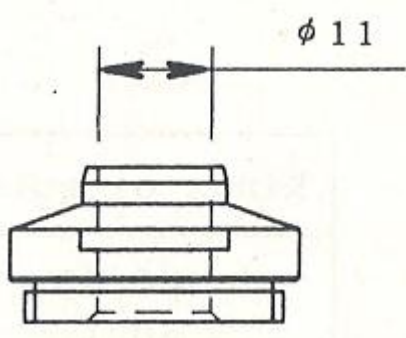
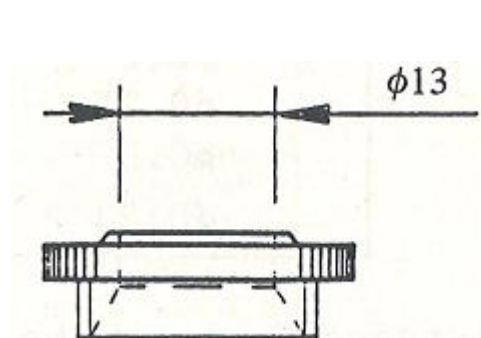
Поступак резања конуса се врши тако што се изведе из вертикалног положаја уз помоћ неvezаног управљања горњих и доњих вођица. Угао који је могуће постићи стандардном млазницом (слика 3.23 а и б) је 10° и под тим углом је могуће сећи челик дебљине до 100 mm. Уколико се жели повећање угла морају се променити млазнице. Променом млазнице могуће је повећати угао сечења на 15° али је дебљина материјала који се може тако сећи 60 mm (слика 3.24 а и б).



Слика 3.23 а): Горња стандардна млазница



Слика 3.23 б): Доња стандардна млазница

Слика 3.24 а): Велика конусна горња
млазницаСлика 3.24 б): Велика конусна доња
млазница

4. МАШИНЕ ЗА ЕЛЕКТРОЕРОЗИОНУ ОБРАДУ ЖИЦОМ

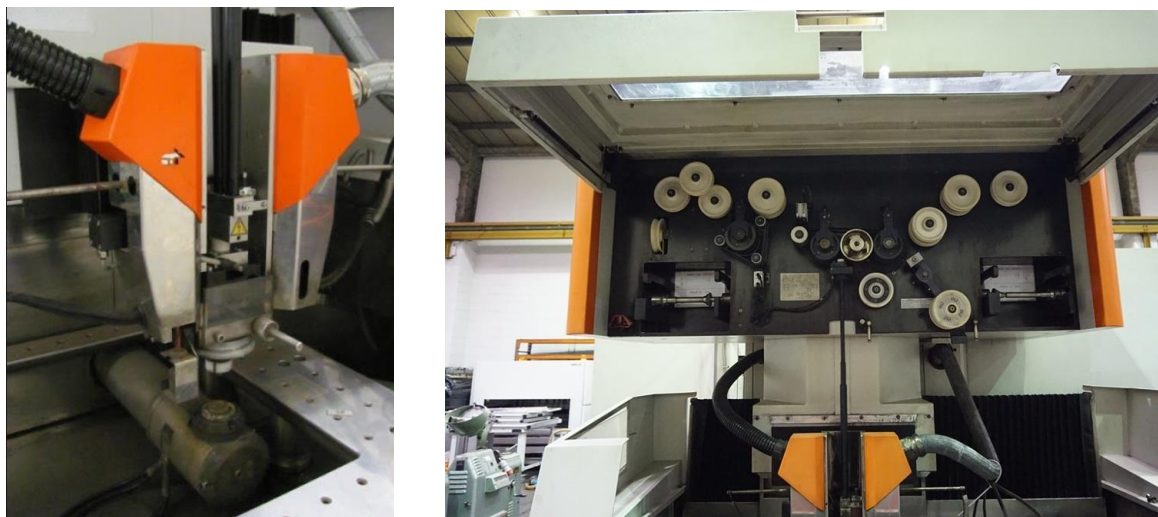
У овом поглављу су наведени неки карактеристични ерозимати са жицом и њихове основне карактеристике. Нове машине за EDM обраду нуде: најновију CNC и серво погонску и управљачку технологију, генераторе са највећом могућом поузданошћу, способност за резање дебелих и конусних делова, обраду више делова одједном, аутоматско провлачење жице за веома кратко време, прецизно затезање жице уз помоћ серво мотора.

Неки од најпознатијих произвођача ерозимата су: AGIE из Швајцарске, Fanuc, Mitsubishi, Brother из Јапана и др.

Agie Charmilles Robofil 6050 TW (слика 4.1 и 4.2) је пример 5-осног ерозимата са жицом код ког је обрадак потопљен у диелектрикум. Ова машина може да обрађује део величине 1260 x 690 x 360 mm и максималне тежине до 800 kg. Може да сече под углом од 30° и са прецизношћу од 0,05 μm . Димензија жице су од 0,05 mm до 0,33 mm. Поседује резервоар за диелектрикум од 240 литара. Радни ход X - 630 mm, Y - 400 mm, Z - 160 mm. Померање жице у правцу оса U и V +/- 48 mm.



Слика 4.1: Agie Charmilles Robofil 6050 TW



Слика 4.2: Горња глава и систем за довођење жице код ерозимата
Agie Charmilles Robofil 6050 TW

Следеће три машине су најновији представници компаније Agie. Њихове системи и карактеристике су сличне са тим да су им димензије другачије.

Први и најмањи представник је **Agie Charmilles Cut 1000** (слика 4.3). Он се од остале две машине разликује по томе што могу одједном да се поставе два котура жице и када се један котур потроши други се аутоматски повезује и сечење се наставља. Величина обрадка који ова машина може да обрађује је 300 x 200 x 80 mm и тежине до 35 kg. Радни ход ове машине је X – 220, Y – 160, Z – 100 mm, а померање жице по U и V оси је: +/- 40 mm. тежина машине је 2700 kg



Слика 4.3: Agie Charmilles Cut 1000 и приказ горње главе са котуровима

Други преставник је **Agie Charmilles Cut 2000 S** (слика 4.4). Димеције радног простора код ове машине су веће него код претходне. Обрадак који ова машина може да обрађује може да има димензије до 750 x 550 x 250 mm и тежину до 200 kg. Радни ход је

X – 350, Y – 250, Z – 250 mm, док је померање жице у правцу оса U и V +/- 70 mm. Количина диелектрикума која пролази кроз систем ове машине је 700 l. Тежина машине је 3600 kg. Механички концепт по ком су урађене све три машине је посвећен великој прецизности. Системи за вођење жице су компатибилни са било којом дебљином жице.



Слика 4.4: Agie Charmilles Cut 2000 S

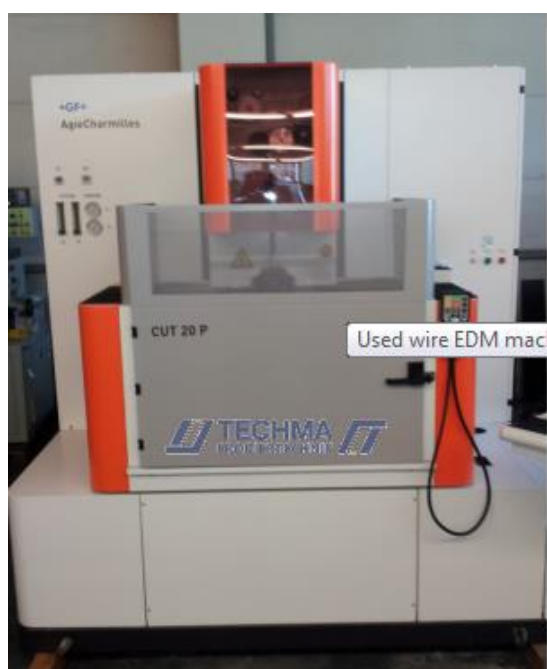
Ове машине такође поседују и аутоматске системе за замену и провлачење жице. Највећи преставник из ове серије машина је **Agie Charmilles Cut 3000 S** (слика 4.5) и може да обрађује комад величине до 1050 x 650 x 250 mm и тежине до 400 kg. Кроз њен систем пролази 1000 l диелектрикума. Радни ход износи X – 500, Y – 350, Z – 250 mm, а померање жице у правцу оса U и V +/- 70 mm. Тежина ове машине је 4500 kg. Ове машине такође поседују и нови модул за директно напајање тако да је брзина сечења повећана за 30%. Такође оно што је карактеристично за ове машине је то да су малих габаритних димензија у односу на величину радног стола, и да су правилног облика тако да могу веома лако да се позиционирају у халама или радионицама. Више о овим машинама можете прочитати на сајту:

https://www.gfms.com/country_CH/en/Products/EDM.html



Слика 4.8: Agie Charmilles Cut 3000 S

Agie Charmilles Cut 20P (слика 4.6) је још један пример машине марке Agie. Величина обрадка 900 x 680 x 250 mm и максималне тежине до 400 kg. Радни ход је X – 350, Y – 250, Z – 250 mm, а по U и V оси је ± 45 mm. Ова машина може да сече под конусом од 25° материјал дебљине до 100 mm. Количина диелектрикума који пролази кроз систем је 600 l.



Слика 4.6: Agie Charmilles Cut 20P

Fanuc tape cut W4 (слика 4.7) је ерозимат код ког обрадак није потопљен у диелектрику већ се преко дизни које се налазе испод и изнад обрадтка испушта диелектрику који облаже само жичану електроду. Радни простор ове машине је 1200 x 800 x 300 mm. Ова машина је старије генерације и њу карактерише: аутоматски систем за довођење и обнављање жице, начин повезивања и провлачења жице за израду малих отвора.



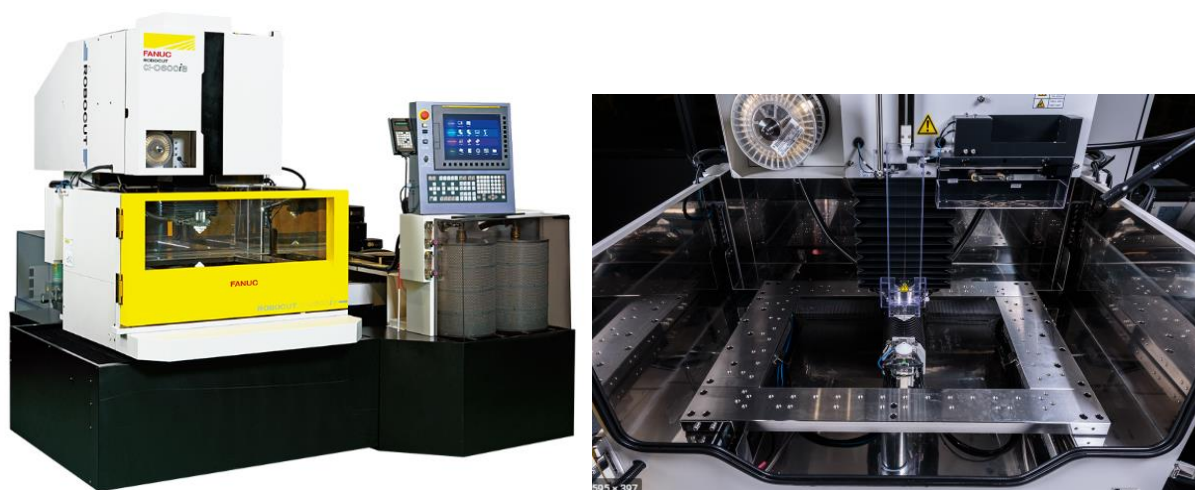
Слика 4.7: Fanuc tape cut W4

Најновије машине марке Fanuc су три модела: Fanuc Robocut C400iB, Fanuc Robocut C600iB, Fanuc Robocut C800iB. Код израде ових машина је стављен акценат на потрошњу енергије. Све компоненте у овим машинама су тако дизајниране да имају најмању могућу потрошњу енергије, а највеће могуће перформансе.

Најмањи преставник је **Fanuc Robocut C400iB** (слика 4.8). Постоји широк спектар опција накнадне обраде и параметара обраде који су већ прединсталирани. Ова машина има могућност да прихвати обрадак димензија 730 x 630 x 250 mm, радни ход стола машине је 400 x 300 mm, може да сече под углом од $\pm 30^\circ$ материјал дебљине 80 mm или под углом од 45° материјал дебљине 40 mm. Кретање по осама U и V је до 120 x 120 mm. Пречник жице је 0.10 до 0.30 mm.

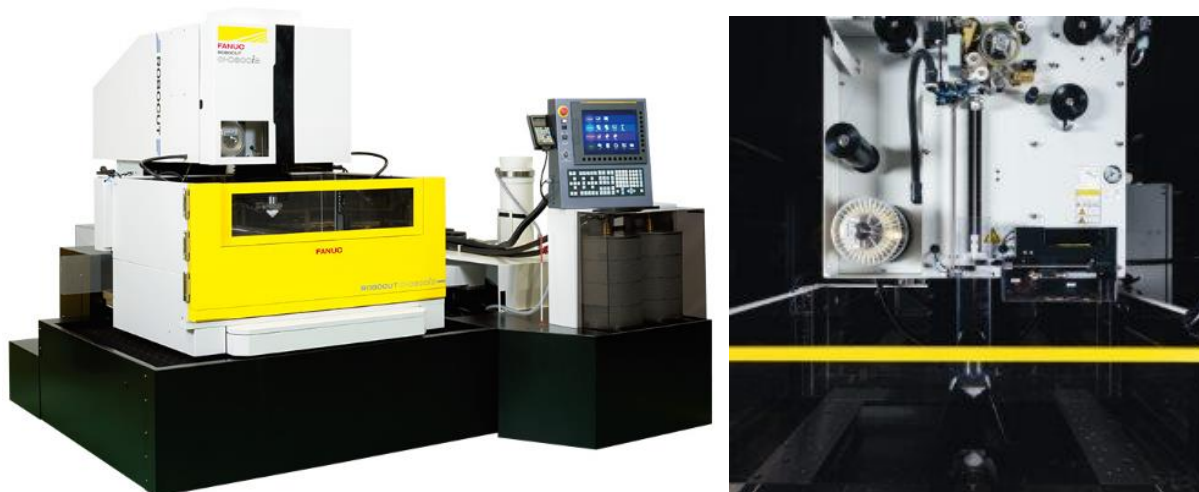


Слика 4.8: Fanuc Robocut C400iB и приказ горње и доње хлаве са обратком



Слика 4.9: Fanuc Robocut C600iB и приказ радног простора

Следећи мало већи модел је **Fanuc Robocut C600iB** (слика 4.9). Овај модел има радни сто нешто већих димензија у односу на претходни модел. Максималне мере обратка су 1050 x 820 x 300 mm и тежине до 1000 kg. Радни ход је X – 600, Y – 400, Z – 310 mm, а по U и V осе је ± 200 mm. Карактеристично за овај модел и модел **Fanuc Robocut C800iB** (слика 4.10) јесте да они могу да секу под углом од 30° материјал дебљине 150 mm или под углом од 45° материјал дебљине 70 mm. Модел Fanuc Robocut C800iB је највећи из ове серије и он може да обрађује комад димензија 1250 x 975 x 300 mm и максималне тежине до 3000 kg. Радни ход овог модела је X – 800, Y – 600, Z – 310 mm, а по U и V осе је ± 200 mm.



Слика 4.10: Fanuc Robocut C800iB и приказ радног простора

Сва три модела користе жичану електроду дебљине од 0,10 до 0,30 mm, а максимална тежина калема износи 30 kg. Такође, све три машине имају веома једноставан софтвер за програмирање и пуштање машине у рад, и унутрашњу меморију за складиштење програма од 4 MB. Више о овим машинама можете прочитаити на сајту: <https://www.fanuc.eu/uk/en>,

Makino UPN-01 је идеалан за микро-машинску обраду и ултра-прецизне примене као што су производња компонената за оптичка влакна, електронске конекторе, медицину, минијатурни зупчаници и микро обликовање. Ова машина може да обрађује комад величибе до 150 x 150 x 40 mm и тежине до 8 kg. Поседује и систем за аутоматску замену обратка што омогућава дужи рад без надзора. Радни ход ове машине је X – 160, Y – 160, Z – 50 mm, а по U и V оси је ± 7 mm. Жичана електрода коју користи ова машина може да има димензије од 0,10 mm па све до 15 μ m сто јој и омогућава да буде веома прецизна. Користи уљни диелектрични систем који пружа већу контролу обрадивог варничног зазора, што побољшава тачност делова, површинску обраду и металуршки квалитет. Машина може постићи површинску обраду са прецизношћу до 0,02 μ m.



Слика 4.3: Makino UPN-01

Mitsubishi MV 1200-R (слика 4.5) је машина јапанске производње. Претставља нову генерацију машина ове фабрике и овај модел је први из серије MV који садржи нова побољшања у конструкцији машина, аутоматском навоју, унутрашњој машинској комуникацији, технологији напајања и оперативним трошковима. Mitsubishi MV 1200-R може да обрађује комад димензија до 810 x 700 x 215 mm и тежине до 500 kg. Радни ход ове машине је X – 400, Y – 300, Z – 220 mm, а по U и V оси је ± 120 mm. Прецизнос машине је 0,05 μm .



Слика 4.5: Mitsubishi MV 1200-R

EDM hole drill XF5000 (слика 4.12) је машина фирме **IPRETECH, Кина**. Неизоставна је у погонима за израду делова помоћу ерозимата са жицом. Ова машина је намењена за бушење почетних отвора кроз које треба да прође жица. Користи се за бушење врло тврдих челика као и окаљених челика. Интересантна је због тога што може веома великом брзином да буши врло тврде челике и самим тим припрема за сечење на ерозиматима са жицом се скраћује и може да служи као веома добар додоатак ерозимату са жицом. Ова машина може да буши материјал брзином од 50 до 70 mm/min.



Слика 4.12: EDM hole drill XF500

У табели 3 су ради поређења наведени горе описани ерозимати са њиховим основним карактеристикама. Можемо приметити да постоје машине које обрађују веома мале комаде али и оне машине које могу да секу и обратке великих димензија и тежина. Пречник жице код машина за EDM обраду је углавном стандардан од 0,10 -0,30 mm, али постоје и машине које користе и знатно тање жичане електроде.

Табела 3: Основни технички подаци за наведене ерозимате са жицом

Модел	Мере обратка (mm)	Тежина обратка (kg)	Кретање X, Y, Z осе (mm)	Кретање U, V осе (mm)	Тежина машине (kg)	Пречник жице (mm)
Agie Charmilles Robofil 6050 TW	1460x770x420	800	630x400x160	±48	5200	0,05-0,33
Fanuc Tape Cut W4	800x1200x300	600	600x1000x310	±30	4200	0,10-0,33
Makino UPN-01	150x150x40	8	160x160x50	±7		0,015-0,10
Agie Charmilles Cut 20P	900x680x250	400	350x250x250	±45	3000	0,15-0,33
Mitsubishi MV1200-R	810x700x215	500	400x300x220	±120	2700	0,10-0,30
Agie Charmilles Cut 1000	300x200x80	35	220x160x100	±40	2700	0,07-0,20
Agie Charmilles Cut 2000s	750x550x250	200	350x250x250	±70	3600	0,10-0,30
Agie Charmilles Cut 3000s	1050x650x250	400	500x350x250	±70	4500	0,10-0,33
Fanuc Robocut C 400iB	730x630x250	500	400x300x255	±200	1800	0,10-0,30
Fanuc Robocut C 600iB	1050x820x300	1000	600x400x310	±200	3000	0,10-0,30
Fanuc Robocut C 800iB	1250x975x300	3000	800x600x310	±200	4200	0,10-0,30

5. ЗАКЉУЧАК

Електроерозиона обрада (EDM) обухвата поступке обраде метала код којих се уклањање вишка материјала остварује уз помоћ серије електричних пражњења насталих између алата (катоде) и обрадтка (аноде). Постоје два типа машина за EDM обраду и то машине са пуном електродом и машине са жичаном електродом

EDM машине са жицом у односу на машине са пуном електродом су у предности због тога што није потребна израда сложених електрода већ се жица креће по унапред одређеној путањи. Међутим, EDM машинама са жицом није могуће израђивати непролазне отворе већ само пролазне.

Електроерозија жичаном електродом подразумева да се уместо пуне електроде користи жица пречника од 0,1 до 0,3 mm. Жица се све време одмотава са котура и пролази поред обратка и пошто су и жица и обрадак повезани на одговарајући генератор електричних импулса када се жица довољно приближи долази до пражњења.

Велику улогу у овом процесу има и диелектрикум. Његови задаци су: да створи услове за настанак варнице (електричног пражњења), стварање одговарајућих услова за стварање стуба пражњења, да испира продукте обраде, спречава таложење продукта, хлади электроду.

У раду су приказани неки аутоматски системи везани за довођење жице, аутоматско обнављање покидане жице и др. и то на примеру машине Fanuc Tare Cut W2. Ови системи су карактеристични за ову машину и веома су корисни пошто смањују време потребно за припрему пре почетка рада и време за додатне интервенције у току рада (поновно провлачење покидане жице).

Када је реч о неконвенционалним поступцима обраде електроерозија је, можда, нашла највећу примену. Са својим предностима, као што су: брза израда, елиминација ручног рада, висока прецизност, могућност израде сложених облика, могућност обраде тешкообрадивих челика, потискује конвенционалне поступке обраде. Као таква EDM обрада је нашла примену у индустрији алата, ремонтним радионицама и бродоградњи.

6. Литература

1. Миодраг Лазић, Неконвекционални поступци обраде, Машински факултет, Крагујевац 1990.
2. Драгоје Миликић, Неконвекционални поступци обраде, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду 2002.
3. Нада Ђусић, Изучавање процеса EDM (електроерозије) обраде са посебним освртом на ерозиматима са жицом и проблеме пословања са диелектрикумом, Машински факултет у крагујевцу 1995.
4. Упустсво за употребу (додатак за аутоматски механизам за додавање жице) за Fanuc Tape Cut series (W1, W2, W3, W4)
5. Сајт: <https://www.fanuc.eu/uk/en>, приступљено 20.11.2020.
6. Сајт: https://www.gfms.com/country_CH/en/Products/EDM.html, приступљено 20.11.2020.
7. Сајт: <https://www.wotol.com/product/charmilles-robofil-6050-tw/2208735>
8. Сајт: <https://www.makino.eu/en-us/machine-technology/machines/wire-edm#> приступљено 29.11.2020.
9. Сајт: <https://www.mitsubishi-edm.de/en/mvr-connect-series-specifications.html>, приступљено 29.11.2020.