

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Неконвенционални поступци обраде

Број индекса: 337/2018

Душан Д. Ризнић

Анализа примене електрохемијске обраде

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Недић - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



**Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука**



Мастер студије: **Машинско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Производно машинство**

Име и презиме: **Душан Ризнић**

Број индекса: **337/2018**

ПРИЈАВА МАСТЕР РАДА

Тема рада: **Анализа примене електрохемијске обраде**

Задатак: У оквиру мастер рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о електрохемијској обради. Потребно је описати суштину процеса обраде и опрему - машине за обраду. Извршити анализу примене ове обраде у различитим гранама индустрије. У посебном делу рада урадити пример уређаја за електрохемијско означавање производа.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Основи и суштина електрохемијске обраде,
3. Опрема и машине за електрохемијску обраду,
4. Анализа могућности примене,
5. Пример уређаја за електрохемијско означавање,
6. Закључци,
7. Литература.

Ментор:

др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 12.03.2020.

Резиме

У овом мастер раду се разматра процес електрохемијске обраде. На почетку су дата уводна разматрања о неконвенционалним поступцима обраде. Детаљно се описује суштина електрохемијске обраде. Врши се прикупљање и систематизација података о самом процесу обраде, као и података о савременој опреми и машинама које учествују у електрохемијској обради. Такође, у раду је извршена анализа могућности примене процеса обраде у различитим гранама индустрије. Наводе се практични примери примене и описују се делови израђени помоћу овог процеса обраде. На крају рада је извршен детаљан опис уређаја и опреме за електрохемијско означавање, као и дат пример уређаја за електрохемијско означавање производа.

Кључне речи: *електрохемијска обрада, машине, опрема, примена*

Summary

In this master thesis, the process of electrochemical machining is considered. At the beginning, introductory considerations of non-traditional machining procedures are given. The essence of electrochemical machining is described in detail. Data on the electrochemical machining process itself are collected and systematized, as well as data on modern equipment and machines involved in the processes of electrochemical machining. Also, this master thesis analyzes the the possibilities of application of the processes of electrochemical machining in a variety of industries. Practical examples of application are given, and parts made using this machining process are described. At the end of the master thesis, a detailed description of devices and equipment for electrochemical labeling was performed, as well as example of the device for electrochemical labeling (marking, etching) of products was given.

Key words: *electrochemical machining, machines, equipment, application*

Садржај

1. Уводна разматрања.....	1
1.1. Суштина, карактеристике и производне операције неконвенционалних поступака обраде.....	2
1.2. Карактеристике неконвенционалних поступака обраде	3
1.3. Класификација неконвенционалних поступака обраде	4
2. Основи и суштина електрохемијске обраде	9
2.1. Анализа процеса обраде	9
2.1.1. Принцип процеса обраде.....	11
2.1.2. Механизам одношења материјала	12
2.1.2.1. Ефекти температуре, притиска и гасних мехурова.....	15
2.1.2.2. Ефекти корозије, брзине уклањања материјала и лутајућих струја.....	17
2.1.3. Карактеристике анодног растварања	17
2.1.4. Радна течност (електролит).....	19
2.1.5. Обликовање површина при електрохемијској обради	21
2.1.6. Алат (катода)	23
2.1.7. Параметри режима обраде	27
2.1.7.1. Непрекидни и прекидни режими обраде	29
2.1.8. Производност, тачност и квалитет обраде	31
2.1.8.1. Производност.....	31
2.1.8.2. Тачност обраде	35
2.1.8.3. Квалитет обраде.....	38
2.1.9. Предности и недостаци електрохемијске обраде и њен утицај на животну околину	42
2.2. Технолошки поступци и производне операције	43
2.2.1. Површинска електрохемијска обрада	45
2.2.1.1. Електрохемијско декапирање	45
2.2.1.2. Електрохемијско полирање	46
2.2.1.3. Електрохемијско обарање оштрих ивица у електролитским купатилима	47
2.2.1.4. Електрохемијско одметализирање.....	47
2.2.2. Димензионална електрохемијска обрада	48
2.2.2.1. Електрохемијско бушење (дубљење)	52
2.2.2.2. Електрохемијско профилисање	54
2.2.2.3. Профилно брушење.....	55
2.2.2.4. Урезивање и сечење	56

2.2.2.5. Електрохемијско стругање	57
2.2.2.6. Скидање љуспица и обарање оштрих ивица	57
2.2.2.7. Електрохемијско обележавање (гравирање).....	60
2.2.2.8. Електрохемијске микрообrade.....	61
2.2.2.8.1. Електрохемијска микрообrade са шаблоном (маском).....	62
2.2.2.8.2. Електрохемијска микрообrade без шаблона (маске)	63
2.2.2.9. Електрохемијска обrade дубоких отвора.....	69
2.2.2.10. Електрохемијско сечење жицом	71
3. Опрема и машине за електрохемијску обrade.....	72
3.1. Машина алатка	73
3.1.1. Врсте машина за електрохемијску обrade	76
3.1.1.1. Главни делови машина за електрохемијску обrade.....	78
3.1.1.1.1. База (постоље) и носећа структура	78
3.1.1.1.2. Радна комора	79
3.1.1.1.3. Држач алата, клизачи и вођице	79
3.2. Извор напајања	81
3.3. Систем циркулације и регенерације електролита	83
3.4. Систем за управљање и контролу	87
3.5. Експлоатационе карактеристике инсталације.....	91
3.6. Примери машина и опреме за електрохемијску обrade	91
4. Анализа могућности примене електрохемијске обrade.....	99
5. Пример уређаја за електрохемијско означавање.....	103
5.1. Преглед уређаја и опреме за електрохемијско означавање	104
5.1.1. Извор напајања.....	106
5.1.2. Шаблони (матрице).....	107
5.1.3. Електролити и неутрализатори.....	110
5.1.4. Алат	112
5.2. Поступак електрохемијског означавања	114
5.3. Експериментална испитивања поступка електрохемијског означавања производа.....	118
5.3.1. Уређај, опрема и узорци	118
5.3.2. Извођење експеримента	120
5.3.3. Резултати експеримента	122
6. Закључци и будући развој електрохемијске обrade	131
7. Литература	133

1. Уводна разматрања

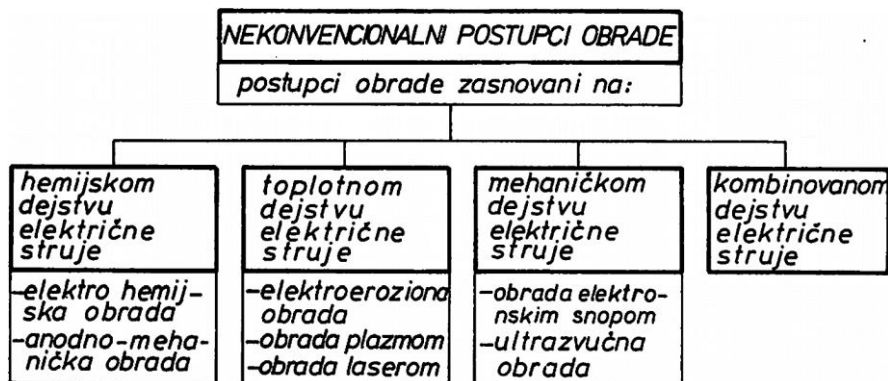
Развој многих грана индустрије, као и све више растуће потребе за квалитетнијим производима, довело је до непрестаног развоја нових квалитетнијих, компактнијих и функционалнијих конструкција разних машина, уређаја, опреме, механизма и других производа металопрерађивачке индустрије. Овакав развој јесте резултат непрекидног развоја нових и квалитетнијих материјала, као и нових ефективнијих и економичнијих поступака обликовања и даље обраде производа. Неконвенционални поступци обраде (НПО) омогућавају извођење различитих низа производних операција, које је веома тешко или скоро немогуће реализовати конвенционалним поступцима обраде материјала (обраде метала резањем и деформисањем). Велики техничко-технолошки напредак, као и нагли развој различитих техника и технологија (као нпр. авионска, ракетна, свемирска, нуклеарна, електронска, компјутерска и сл.) довео је до непрестаног развоја производње и примене нових савремених материјала. Ти материјали поседују знатно боље механичке и триболошке карактеристике, велике затезне чврстоће и тврдоће, високе отпорности на ниским и високим температурама, затим поседују знатно веће отпорности на хабање и сл. (високо-отпорне тврде легуре, тврди метали, материјали на бази волфрама, вештачки дијаманти, композитни материјали итд.) [1].

Током последњих неколико деценија створила се потреба за коришћењем нових материјала који поседују специфичне особине. Неконвенционални поступци обраде се користе за врло специфичне обраде, нпр. при изради веома различитих врста алата, због чега се неке врсте НПО највише и користе у алатницама, али и у редовним производним линијама за производњу делова од тешко обрадљивих материјала, као и код обраде доста сложених површина или при микро обради материјала који се добро обрађују резањем. Тако су створени нивои различитих и нових легура који су нашли примену при изради одређених врста алата. Осим њиховог самосталног коришћења, поједини НПО се могу међусобно комбиновати, али такође се могу комбиновати и са неким конвенционалним поступцима обраде резањем (КПОР), а све у циљу остваривања веће производности, тачности и квалитета обрађене површине најразличитијих производа [2].

Обрада различитих типова делова и полупроизвода од оваквих нових материјала конвенционалним поступцима обраде јесте веома тешка, па чак у неким ситуацијама и немогућа. Економична обрада различитим поступцима резањем разних материјала се остварује различитим брзинама резања, које су унапред тако одређене да представљају економске брзине резања. Повећањем механичких својстава примењених материјала предмета обраде опада економска брзина резања. Данас је веома тешко наћи материјал резног алата који би имао довољну тврдоћу и чврстоћу са којом би могао да реже предмет обраде са релативно високим економским брзинама резања при обради делова од тврдых, жилавих и топлоотпорних легура. Са друге стране, обрада малим брзинама резања траје врло дуго и у целини није економична. Код неконвенционалних поступака обраде (НПО) скидање материјала предмета обраде се остварује са сасвим другим принципима у односу на конвенционалне поступке обраде резањем (КПОР). Примена НПО је данас све већа због својих особина да могу обрађивати тешкообрадљиве материјале, али и делове сложених геометријских облика од иначе доброобрадљивих материјала, због знатно једноставније технологије и кинематике алата за обраду [2].

Неконвенционални поступци обраде (НПО) јесу поступци обраде код којих се уклањање вишка материјала, измена облика, димензија и структуре материјала остварује коришћењем електричне, хемијске, светлосне, магнетне, нуклеарне и других видова енергије доведене непосредно у процес - зону обраде. Поступци прераде метала, по облику енергије доведене у процес (зону обраде), се могу поделити на: механичке,

електричне, топлотне, хемијске и сл. Основни поступци обраде су механички поступци. Коришћење неконвенционалних поступака обраде заснованих на употреби електричне енергије, која доводи до различитих топлотних, хемијских и механичких процеса у зони обраде (сл. 1.1), довео је до искоришћења топлотних процеса за добијање полуфабриката и термичку обраду, док хемијски процеси имају ограничену примену у процесу израде алата и машинских елемената [1].



Слика 1.1. Неконвенционални поступци обраде према врсти дејства електричне енергије доведене у процес [1]

Класификација неконвенционалних поступака обраде (НПО) могућа је према: врсти енергије и радног (преносног медијума), основним механизмима уклањања вишка материјала, типу извора енергије и слично [3].

1.1. Суштина, карактеристике и производне операције неконвенционалних поступака обраде

Већина неконвенционалних поступака обраде (НПО) је знатно касније развијена и уведена у производну праксу у односу на КПОР који имају веома дуг период развоја и примене. У данашње време су многи НПО достигли веома висок степен развоја, који чак у одређеним процесима обраде ни мало не засотају у односу са најразвијенијим КПОР, а у неким случајевима их чак и доста превазилазе. Због тога се може рећи да НПО у неким подручјима примене све више потискују КПОР због тога што су економичнији или зато што дају много боље резултате обраде (нпр. тачност израде и квалитет површине) [2].

Овакав тренд развоја и увођења неконвенционалних поступака обраде (НПО) у различитим гранама индустрије, последица је пре свега следећих захтева [2]:

- Пораст конструкцијских захтева машинских делова ка повећању удела тешко обрадљивих материјала који се користе за њихову израду.
- Повећани захтеви ка сложености облика алата за различите намене: алати за обраду обликовањем (пластично деформисање и ливење под притиском), алати за прераду стакла, пластичних маса, гуме и сл. материјала.
- Повећани захтеви ка сложености резних алата од брзорезног челика и тврдог метала (нпр. профилни ножеви, профилна глодала, провлакачи и др.).
- Повећани захтеви за комплексношћу израде алата за обраду обликовањем, проузроковане потпуно новим конструктивним схватањем производа.
- Повећани захтеви при изради минијатурних делова (микро делова) повећане тачности.

- Повећани захтеви у погледу продуктивности и стварања претпоставке за увођење аутоматизације и аутоматизованих производних система у претходно наведеним специфичним областима производње.
- Претпоставке за интеграцију ових различитих производних метода у целости са компјутерским нумеричким управљањем машина и системима CAD/CAM/CAE и CIM.

У даљем тексту рада дате су карактеристике НПО, као и њихова класификација.

1.2. Карактеристике неконвенционалних поступака обраде

Основне карактеристике неконвенционалних поступака обраде су условљене врстом енергије, механизмом разарања метала, врстом преносног медијума и извором енергије [1]. Неконвенционални поступци обраде у савременој техници и технологији представљају резултат утицаја низа мање или више релевантних фактора [1]:

1. Фактора везаних за повећање брзине, оптерећења и температуре рада одговорних машинских елемената и уређаја, повећање поузданости рада и века трајања, као и номенклатуре материјала са специфичним захтевима у погледу карактеристика, где се испуњење ових захтева остварује широком применом високо-отпорних, нерђајућих, антикорозионих и других високо-легираних челика и метала, затим полупроводних материјала (германијум, силицијум и сл.), композитних и других материјала чија је обрада механичким поступцима веома често немогућа.
2. Факторима везаним за знатно ширу примену обраде пластичним деформисањем, тачног и прецизног ливења, а посебно веће примене пластичних маса и производа израђених од пластичних маса првенствено поступцима пресовања. Све то доводи до пораста захтева у погледу квалитета и тачности израде ковачких, ливачких, пресерских и других алата врло сложене конфигурације и геометрије, који се тешко могу израдити поступцима конвенционалне механичке обраде.
3. Факторима везаним за потребу израде отвора, канала, као и разних профилисаних прореза веома малих димензија, посебно на релативно неприступачним местима.

Неконвенционални поступци обраде (НПО) различитих материјала поседују низ заједничких карактеристика, као што су [1, 2]:

1. Практична независност брзине обраде, тачности, квалитета обрађене површине, производности и економичности прераде метала од механичких карактеристика предмета обраде (тврдоће, жилавости, јачине на кидање и сл.), изузимајући поступке ултразвучне обраде, код којих се обрадљивост материјала повећава са порастом тврдоће и кртости, а опада са порастом жилавости материјала. Међутим ово не значи да је обрадљивост свих материјала овим поступцима обраде иста. Разлике у обрадљивости постоје, али су оне условљене физичким и хемијским особинама материјала предмета обраде, као што су топлотна и електрична проводљивост, склоност ка растварању у појединим срединама и тсл., а не механичким својствима.
2. Могућност израде доста различитих конфигурација директно по целој површини предмета обраде, уз једноставно померање алата. Тиме је обезбеђена израда најразличитијих производа сложене конфигурације и геометрије, али и обрада на местима на којим класични резни алат веома тешко допире, при једноставној конструкцији машине и једноставној кинематици кретања.

3. Нема потребе за алатима веће тврдоће од тврдоће материјала предмета обраде, јер је код скоро свих неконвенционалних поступака обраде притисак алата или раван нули или врло мали, изузимајући неке од поступака ултразвучне обраде. Код неких НПО алат чак и не постоји, а код великог броја поступака је неопходно остварити одређени зазор између алата и предмета обраде да би се процес уклањања скинутог материјала могао несметано одвијати.
4. Велико смањење потрошње материјала у односу на потрошњу при механичкој обради. То је посебно значајно при обради скупочених материјала (германијум, угљеник, рубин, кварц, дијамант и други монокристални материјали). Могуће је НПО применити нпр. при сечењу и остварити врло танке резове, тако да је отпад материјала врло мали, чиме се у великој мери повећава економичност обраде.
5. Висока тачност обраде свих материјала, нарочито у случајевима када је обрада класичним поступцима обраде отежана или немогућа.
6. Могућност делимичне обраде предмета великих димензија без коришћења машина већих димензија. Неки неконвенционални поступци обраде поседују и мобилну опрему која се без икаквих потешкоћа може поставити на предмете великих димензија, потом извршити потребна обрада, а затим уклонити.
7. Велике могућности потпуне аутоматизације и механизације процеса обраде, уз остварење вишенаменског опслуживања.
8. Висока производност и рентабилност, што је посебно важно при изради предмета сложене конфигурације и геометрије од скупочених материјала.
9. Знатно побољшање услова рада са становишта здравствене угрожености радника који опслужују машину, јер је радник у процесу обраде са кратко време у контакту са машином због високе аутоматизације процеса. Према томе, процес обраде се може контролисати са безбедног места, а код неких обрада чак и то није потребно.

Појава неконвенционалних поступака обраде обезбеђује знатно више могућности конструктивног обликовања елемената машина и механизма, како са гледишта избора материјала, тако и конструкције машинских елемената и машина у целини (облика и димензија). Поред великог броја предности неконвенционалних поступака обраде, они поседују и одређене недостатке. Основни недостатак неких НПО јесте релативно мала производност у односу на КПОР, али и висок утрошак енергије по јединици обрађене запремине. Производност и утрошак енергије по јединици скинуте запремине материјала су пре свега последица физичких принципа на којима се заснивају поједини НПО. Али и поред тога, неконвенционални поступци обраде стварају уштеде у раду и трошковима производње, поготово када се ради о веома тешко обрадљивим материјалима, деловима малих димензија и сложених геометрија, који понекад достижу и стотине процената. Највећу препреку за коришћење неконвенционалних поступака обраде чини висока цена машина и опреме, односно комплетних постројења за обраду [1, 2].

1.3. Класификација неконвенционалних поступака обраде

У зависности од тога који је тип енергије примењен за обраду, неконвенционални поступци обраде се могу поделити на више начина. Неконвенционални поступци обраде се међусобно битно разликују како по врсти енергије које користе у процесу обраде, тако и по начину скидања материјала са предмета обраде. Веома велики број различитих неконвенционалних поступака обраде (НПО) се може разврстати и по врсти енергије коју користе, врсти радног (преносног) медијума, основним механизмима уклањања вишка

материјала, типу извора енергије и низу мање или више релевантних карактеристика процеса обраде. Неконвенционални поступци обраде се, у савременим производним условима, међусобно разликују и по степену практичне применљивости. Тако су неки неконвенционални поступци обраде (НПО) достигли веома висок ниво развоја и степен практичне примене (нпр. електроерозиона и електрохемијска обрада), док се други веома мало или незнатно примењују у индустријској пракси [1, 2].

Према разним литературним изворима, неконвенционални поступци обраде се могу поделити применом различитих критеријумима. Тако се према врсти енергије коју неконвенционални поступци обраде (НПО) користе разликују [2]:

- Механички поступци,
- Термоелектрични поступци,
- Електрохемијски поступци и
- Хемијски поступци.

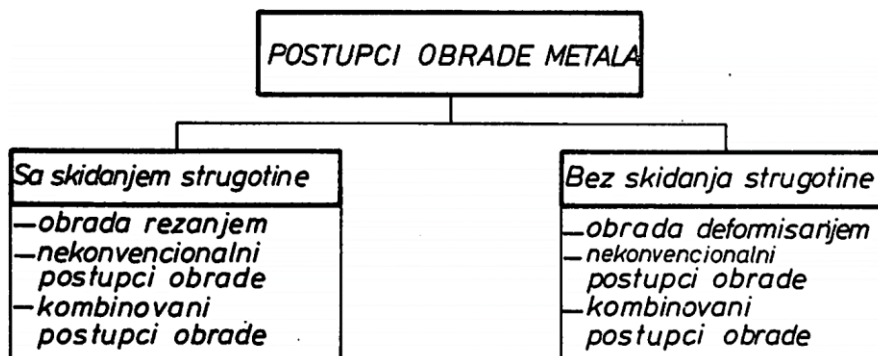
Према основном механизму којим се остварује скидање материјала предмета обраде, разликују се [2]:

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

Према врсти медијума којима се преноси, енергија потребна за скидање материјала, разликују се поступци који користе [2]:

- Честице високе брзине,
- Електролит,
- Сноп електрона,
- Фотонски сноп,
- Плазму и др.

Непрекидан развој и усавањавање постојећих поступака обраде је условио појаву низа различитих поступака разврстаних у две основне групе: поступци механичке обраде (обрада метала резањем и деформисањем) и неконвенционални поступци обраде (основни и комбиновани), са и без скидања вишка материјала (струготине) [1]. Слика 1.2 приказује поступке обраде са или без скидања струготине:



Слика 1.2. Поступци обраде са или без скидања струготине [1]

Механички поступци се могу поделити у две групе: поступци којима се материјал обрада одстрањује резањем и поступци код којих се то остварује ерозијом. У прву групу спадају сви конвенционални поступци обраде резањем (КПОР) алатима са дефинисаном геометријом сечива (стругање, бушење, глодање, рендисање, провлачење и др.), као и алатима са недефинисаном геометријом сечива (брушење, хоновање, леповање и др.) [2].

У другу групу спадају неконвенционални поступци обраде и то [2]:

- Обрада абразивним млазом - AJM (*Abrasiv Jet Machining*),
- Обрада ултразвуком - USM (*Ultrasonic Machining*),
- Обрада млазом воде - WJM (*Water Jet Machining*).

Термoeлектрични поступци данас представљају најзначајнију групу НПО. Скидање материјала предмета обраде код ових поступака у основи се врши локалним растапањем, испаравањем и сагоревањем материјала концентрацијом топлотне енергије на врло малој запремини материјала [2]. У ову групу спадају [2]:

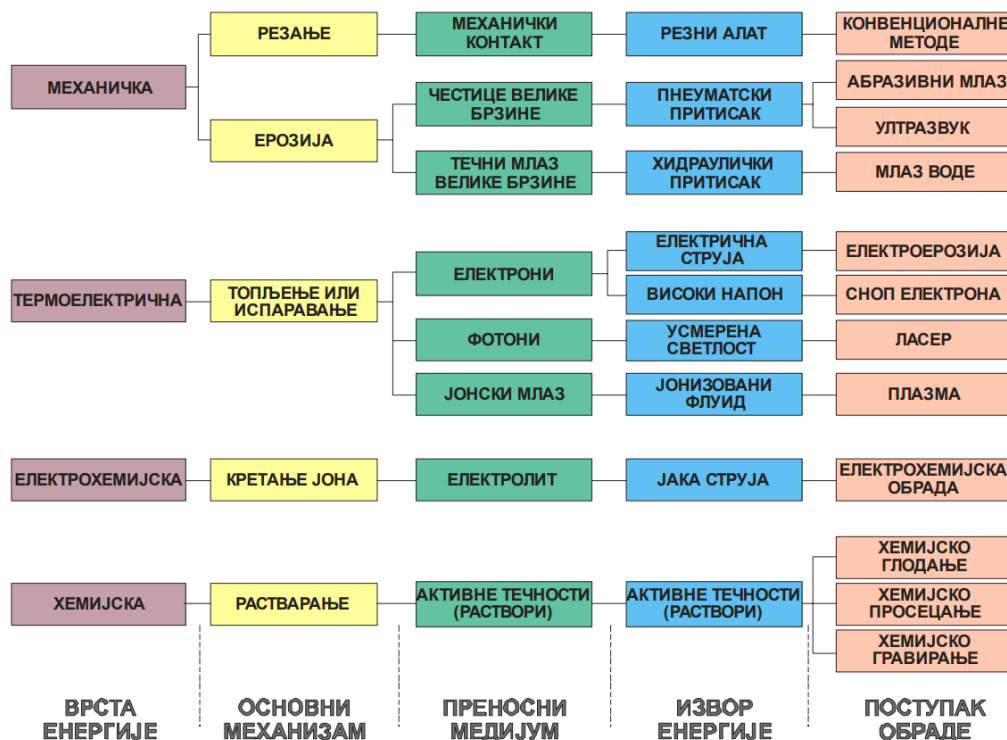
- Електроерозивна обрада - EDM (*Electric Discharge Machining*),
- Обрада снопом електрона - EBM (*Electron Beam Machining*),
- Обрада јонским снопом - IBM (*Ion Beam Machining*),
- Обрада ласером - LBM (*Laser Beam Machining*),
- Обрада плазмом - PAM (*Plasma Arc Machining*).

Електрохемијски и хемијски поступци, а нарочито електрохемијски, имају данас веома широку примену [2]. Иако постоје различите варијанте ових поступака (слика 1.3), у ову групу углавном спадају [2]:

- Електрохемијска обрада - ECM (*Electrochemical Machining*) и
- Хемијска обрада - CM (*Chemical Machining*).

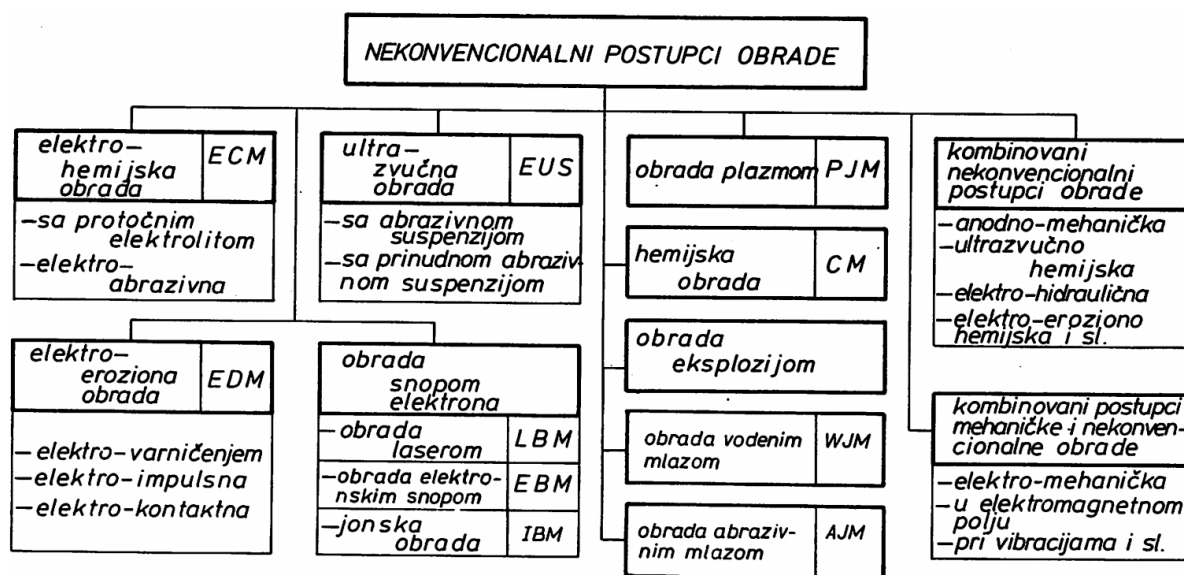
У циљу повећања ефикасности ове групе поступака, често се користе и други видови енергије или се пак исте комбинују са другим поступцима обраде [2]. Тако су од низа могућих комбинација са другим поступцима обраде познати следећи поступци [2]:

- Електрохемијско брушење - ECG (*Electrochemical Grinding*),
- Електрохемијско хоновање - ECH (*Electrochemical Honing*),
- Електрохемијско-електроерозивна обрада - ECDM (*Electrochemical-Discharge Machining*) и др.



Слика 1.3. Шематски приказ класификације свих поступака обраде скидањем материјала [4]

Према аутору М. Лазићу [1] једна од могућих класификација неконвенционалних поступака обраде је приказана на слици 1.4:



Слика 1.4. Једна од могућих класификација неконвенционалних поступака обраде [1]

Са развојем савремених материјала упоредо се јавила и потреба за развојем нових поступака обраде, јер конвенционални поступци обраде нису давали задовољавајуће резултате при обради ових материјала. Под НПО материјала подразумевају се поступци који се одвијају при великој концентрацији енергије настале хемијским, физичким, термичким или ерозионим процесима. Са развојем савремених материјала упоредо се јавила и потреба за развојем нових поступака обраде, јер конвенционални поступци обраде нису давали задовољавајуће резултате при обради ових типова материјала. Од свих неконвенционалних поступака обраде најширу примену имају електроерозиона обрада, електрохемијска обрада, као и обраде плазмом и ласером [4, 5].

Неконвенционални поступци обраде се развијају паралелно са развитком нових материјала, унапређују се и усавршавају, али и уводе нови прогресивни поступци обраде у специфичним условима које материјали који се обрађују захтевају [6]. Тако је настао низ нових неконвенционалних поступака обраде као што су: вибрациона обрада, обрада у електромагнетном пољу, микро и нано обрада, RP (*Rapid Production*) технологије, MIM (*Metal Injection Molding*) технологије, анодномеханичке обраде, електрохидрауличне обраде, обраде експлозијом, електромеханичке обраде, хидроформинг (*Hydroforming*), комбиновани поступци обраде и тел.

Мастер рад садржи резиме, шест поглавља и преглед коришћених литературних извора. У уводном делу рада је дат развој и напредак технике и технологије материјала, али и истовремено дат и преглед напретка неконвенционалних поступака обраде истих. Описане су карактеристике, производне операције неконвенционалних поступака обраде као и њихова класификација. Друго поглавље описује основе и суштину електрохемијске обраде у којој је дата анализа процеса обраде, као и технолошки поступци и производне операције електрохемијске обраде. У овом поглављу је описан принцип процеса обраде, затим механизам одношења материјала, карактеристике анодног растварања, описана је радна течност која се користи при електрохемијској обради, анализирано је обликовање површина, потом описани су алати, параметри режима обраде, производност, тачност и квалитет саме обраде, као и предности и недостаци електрохемијске обраде и њен утицај на животну средину. Такође, описане су и операције електрохемијске обраде, као што су површинска и димензионална електрохемијска обрада и електрохемијске микрообrade.

Треће поглавље описује опрему и машине које се користе у поступцима електрохемијске обраде. У овом поглављу описане су машине алатке, потом извори напајања, систем за циркулацију и регенерацију радне течности (електролита), као и систем за управљање и контролу процеса обраде који се користе у различитим постројењима за електрохемијску обраду. Такође, дате су експлоатационе карактеристике постројења, односно машина и додатне опреме. Ово поглавље садржи још и примере постројења из разних индустрија, односно машина и додатне опреме за електрохемијску обраду. Четврто поглавље даје анализу могућности примене електрохемијске обраде у разним индустријским гранама и индустријској пракси. Пето поглавље се бави експерименталним истраживањем процеса електрохемијског означавања, као и описа примера уређаја и додатне опреме за један овакав поступак електрохемијске обраде. Циљ поглавља јесте давање прегледа уређаја и опреме за електрохемијско означавање који су присутни на тржишту и у индустрији, као и да опише сам поступак електрохемијског означавања (обележавања). Након детаљне анализе коришћене релевантне литературе за овај рад, дат је темељит опис и анализа постојећих поступака електрохемијске обраде, технолошких поступака и производних операција, опис инсталације, односно машина и опреме за електрохемијску обраду, као и анализа могућности њене примене. Кроз експеримент су описани како различити коришћени параметри и њихове промене утичу на квалитет, дубину нагризања, јасноћу и чистоћу ознака добијеним електрохемијским означавањем. У шестом поглављу дата су закључна разматрања где су се извели одговарајући закључци који су проистекли из рада, али су такође изложени ставови и мишљења аутора о правцима даљег будућег истраживања и развоја поступака електрохемијске обраде. Такође, закључак даје осврт на најбитнија запажања добијених резултата експерименталних испитивања, као и предлоге аутора за будуће унапређење експерименталних испитивања електрохемијског поступка означавања. На крају је дат списак литературних извора који су коришћени при самој изradi овог мастер рада.

2. Основи и суштина електрохемијске обраде

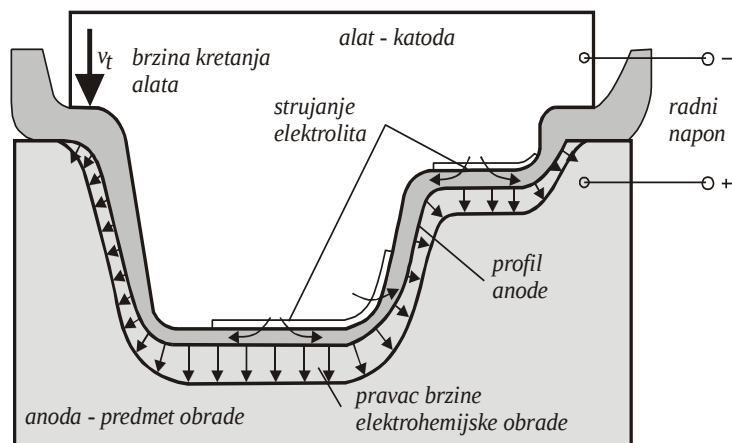
Електрохемијска обрада (*Electrochemical Machining - ECM*) представља савремен поступак обраде чија је примена у индустријској пракси веома распрострањена и широко заступљена, али такође и доста економски оправдана, а која пружа велике и разнолике могућности примене. Због својих бројних техничко-технолошких предности она почиње постепено да потискује примену конвенционалних (механичких) поступака обраде резањем. Електрохемијска обрада поседује потребне техно-економске карактеристике којима се обезбеђује ефективна метода обраде различитих материјала велике јачине и отпорности на топлоту у врло комплексне облике [2, 7].

Електрохемијска обрада се врши без физичког додира између алата и предмета обраде чиме се достиже стање материјала предмета обраде без пукотина, као и без термичких и структурних напона. Електрохемијска обрада је настала из потребе за обрадом материјала велике чврстоће, тврдоће и крутости, са или без минималне промене микроструктуре обрађене површине, а који се нису могли обрадити конвенционалним методима механичке обраде. Такође, настала је и на основу захтева да се фина и прецизна обрада, посебно малих и осетљивих предмета обраде, обави са приближно хладним поступком. Повећани захтеви за новим и материјалима побољшаних карактеристика, као што су нпр. легуре на бази никла, кобалта, молибдена, волфрама, титана и др., као и новим деловима специфичне конструкције, али и све строжијим захтевима у погледу производности, тачности обраде и квалитета обрађене површине, довеле су до тога да се неке индустријске гране, као што су на пример: авионска и аутомобилска индустрија, индустрија турбина, војна индустрија и др., више не могу ни замислити без примене одређених поступака електрохемијске обраде [2, 7, 8].

2.1. Анализа процеса обраде

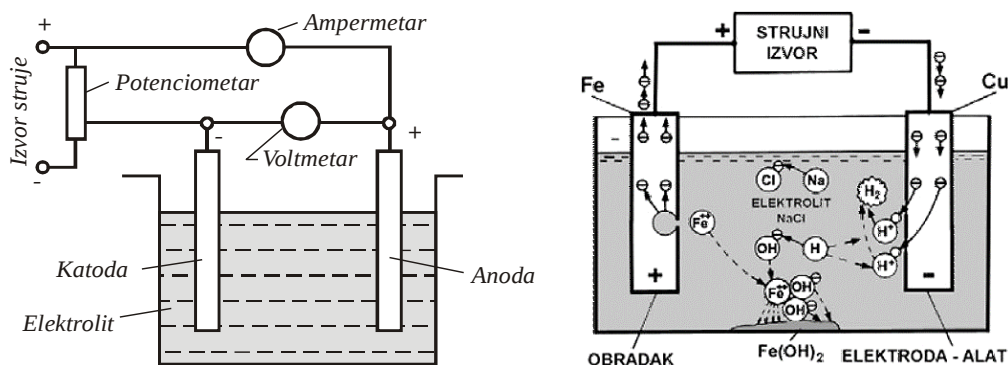
Електрохемијска обрада је базирана на Фарадејевом закону, односно на законима електролизе који врши уклањање метала уместо његовог депоновања (супротан процес наношењу превлака). То значи да електрохемијски процес обраде представља супротан процес галванском прекривању, где је заснован на електролизи и Фарадејевом закону. У складу са Фарадејевим законом, маса материјала предмета обраде која се раствара при електрохемијској реакцији пропорционална је јачини електричне струје која протиче између електрода (предмета који се обрађује и алата) и времену њеног протицања [1, 2].

Електрохемијска обрада (*ECM*) је заснована на електрохемијској реакцији између материјала предмета обраде и јона који настају у електролиту под дејством електричне струје. Транфер електрона између електрода ствара електрично коло. Хемијски процеси који настају при проласку једносмерне струје кроз електрично коло, које чине електроде потопљене у електролит, омогућавају електрохемијску обраду. Проласком једносмерне струје на предмету обраде долази до анодног растварања материјала и његовог преласка у електролит. Интензивним кретањем електролита се растопљени метал одстрањује из зоне обраде, а предмет обраде поприма облик катодe, односно алата. Ово значи да се за електрохемијску обраду користи процес контролисаног анодног растварања материјала и његовог преласка у електролит. Електрохемијска обрада представља перспективни метод обраде и израде различитог броја машинских елемената, а посебно елемената од тешко обрадљивих материјала. Метод електрохемијске обраде обезбеђује високу тачност (до 0,02 mm), квалитет (N4 - N6), као и производност (и до 3000 mm³/min) [1, 2, 7, 9, 10]. Слика 2.1 приказује шему електрохемијског процеса обраде:



Слика 2.1. Шема електрохемијског процеса обраде [7]

Процес електрохемијске обраде се у основи заснива на појави електролизе. Појава електролизе омогућава контролисано скидање материјала путем анодног растварања у електролитској ћелији у којој је предмет обраде анода (+), а алат катода (-). Анодно растварање предмета обраде се остварује под дејством електричне струје која протиче кроз електролит када су полови (који чине предмет обраде и алат) повезани са извором једносмерне струје. Коришћена једносмерна електрична струја поседује високу густину (од неколико десетина до неколико стотина A/cm^2), као и мали напон (10-30 V). Анодно растварање површинских слојева предмета обраде доводи до измене конфигурације зазора (величине 0,05 - 1 mm) између електрода, затим прерасподеле густине електричне струје и измене хидродинамичких и других параметара процеса обраде. Под дејством електродинамичких сила, спољашњи електрони атома метала улазе у електрично коло чиме у металу настају позитивно наелектрисани јони. На тај начин долази до рушења везе разграђених атома са масом материјала, па тако створени позитивно наелектрисани јони (анјони) прелазе у електролит и ступају у везу са јонима електролита образујући једињења која се потом растварају у електролиту или се формира површинска кора. Интензивним кретањем електролита обезбеђује се константно одношење продуката анодног растварања из зоне обраде и копирање профила катоде на површини аноде, потом стабилност и висока производност поступка обраде, одвођење топлоте, као и одговарајућа вредност осталих показатеља процеса [1, 2, 11]. Слика 2.2 даје шематски приказ електрохемијског поступка обраде и хемијске реакције које се одигравају у неком електролитичком елементу (електролиту, односно радној течности):



Слика 2.2. Шематски приказ електрохемијског поступка обраде и хемијске реакције које се одигравају у електролиту [2, 7]

Перформансе поступка електрохемијске обраде зависе од анодног понашања материјала предмета обраде у датом електролитичком елементу (електролиту). Велики број параметара процеса током обраде чини овај поступак обраде врло компликованим

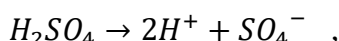
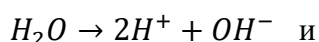
за контролу, као и за добијање жељене тачности предмета обраде. Улога електричне енергије, хемијских реакција и динамике флуида имају доста велики утицај на цео процес електрохемијске обраде. Хемијске реакције су назване анодне реакције или катодне реакције зависно од тога да ли ће наступити на аноди или катоди. Велика разлика између електролита и металног проводника се огледа у томе да се електрична струја преноси електронима из метала, док се код електролита преноси јонима. Јони су атоми који су изгубили или добили електроне и тиме постали позитивно или негативно наелектрисани. Позитивно наелектрисани јони се крећу према катоди, док се негативно наелектрисани јони крећу ка аноди. Пошто електролит мора бити неутралан, мора постојати одређени баланс између тоталног броја позитивних и негативних јона. На крају реакције, материјал који је изгубљен са једне од електрода је једнак количини материјала која је друга електрода добила [12, 13].

Зависно од параметара режима процеса обраде разликују се два основна поступка електрохемијске обраде: обрада при константним (постепеним или споро изменљивим) параметрима обраде и променљивим (периодичним или импулсним) параметрима обраде (брзина кретања алата, напон, притисак електролита итд.) [1, 7].

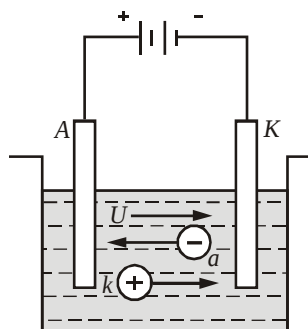
Веома велики број конструктивних материјала се може веома добро обрађивати електрохемијским поступцима обраде и то на машинама са константним или постепено изменљивим параметрима режима обраде. Међутим, у неким случајевима, као што је на пример обрада нерђајућих челика, као и тешко обрадљивих материјала, погодније је користити поступке обраде са изменљивим параметрима режима обраде, а најчешће при импулсној промени напона. Трајање импулса се може кретати у границама од 0,01-0,4 s. Импулсни режим рада електрохемијских поступака обраде омогућава смањење брзине протицања електролита, поједностављење конструктивног решења машине и система за циркулацију електролита, побољшање квалитета обраде (смањење храпавости) и тсл., посебно при обради угљеничних челика са мартензитном структуром [1, 7].

2.1.1. Принцип процеса обраде

Одношење материјала са предмета обраде засновано је на електрохемијским реакцијама између предмета обраде и јона електролита под дејством електричне струје, односно одвија се према Фарадејевом закону електролизе. При електролизи струја тече између електрода услед кретања јона у електролиту. Под дејством електричне струје, у току електрохемијске обраде, при растварању металних соли, киселина и база у течном раствору (нпр. води), молекули растворене материје дисоцирају, односно распадају се на јоне метала и водоника који су увек катјони (позитивни) и негативно наелектрисани молекуларни остатак или метали - анјони [1, 7]. На пример, дисоцијација у воденом раствору сумпорне киселине се изводи на следећи начин [1, 7]:



Потапањем металних проводника (електрода) у електролит (радну течност) и затим њиховим прикључивањем на извор једносмерне струје долази до усмереног кретања јона од аноде према катоди (приказано на слици 2.3) и то катјона према катоди и анјона према аноди. Примајући електроне са катоде јони постају неутрални атоми или атомске групе које одмах ступају у хемијску реакцију са раствором или материјалом електрода. У оба случаја може доћи до стварања нових материјала на површинама електрода које не постоје у електролиту, где тада наступа електролиза [7].

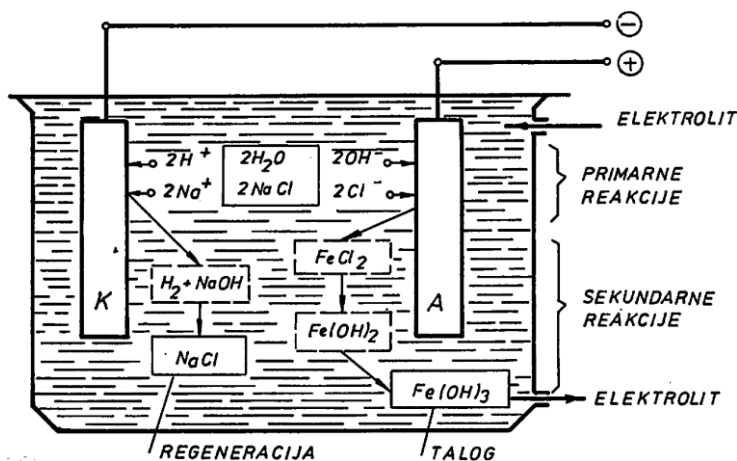
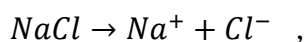
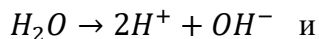


Слика 2.3. Смер кретања јона при електролизи (а - анјони, к - катјони) [7]

Анодно растварање, односно прелаз материјала са површине аноде у раствор и таложење материјала на катоди се врши истовремено. Подесним избором електролита, електрода и вођења процеса, односно параметара режима обраде може се контролисати и усмеравати процес ка аноди или катоди, све зависно од врсте производне операције електрохемијске обраде [1, 7].

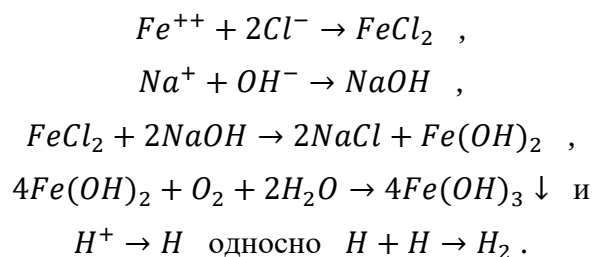
2.1.2. Механизам одношења материјала

Одношење материјала предмета обраде електрохемијским поступком засновано је на анодном растварању метала у радној течности, односно поједностављено, на аноди долази до стварања једињења између анјона из раствора и јона метала након чега одлазе у раствор као неутрална једињења која се потом у виду талог одстрањују [7]. Анодно растварање метала у воденом раствору натријум хлорида (NaCl) у који су уроњене електроде од гвожђа започиње електролитичком дисоцијацијом молекула на јоне [7]:



Слика 2.4. Дисоцијација молекула електролита на јоне и ток примарних и секундарних реакција при електрохемијској обради [1]

Дејство јона на материјал предмета обраде изазива низ реакција које доводе до анодног растварања материјала, формирања талог, регенерације електролита и стварања велике количине водоника. Као што се види из претходно датих хемијских реакција, на алату (катоди) се не дешавају скоро никакве промене, па она теоретски може бесконачно дуго трајати, као и то да се со NaCl троши, односно служи само за образовање прелазних једињења [1, 2]. Тако при електрохемијској обради нпр. угљеничног челика у воденом раствору натријум-хлорида долази до следећих реакција [1]:

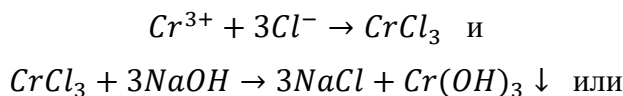


Резултат наведених реакција јесте појава [1]:

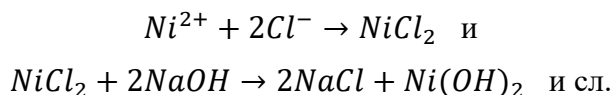
- анодног растварања (формирања гвожђе-хлорида FeCl_2),
- талога (стабилни гвожђе-хидроксид Fe(OH)_3),
- регенерације електролита (натријум-хлорида NaCl) и
- вишка водоника (H_2).

Талог који је настао пада у електролит, чиме га прља и затим се уклања заједно са електролитом, где се издваја у систему за циркулацију и пречишћавање електролита, где се тиме тако прочишћен електролит поновном циркулацијом враћа у радни простор у коме се извршава процес електрохемијске обраде. Одстрањивање развијене количине водоника се остварује заједно са радном течностју, односно електролитом (у затвореном систему обраде, кади или кућишту), или применом посебних мера заштите, односно кроз развој и примену одговарајућих издувних система (за отворени систем обраде) [1].

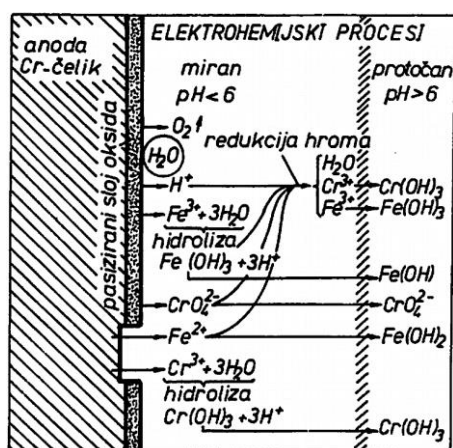
Сличне реакције се јављају и при обради других материјала, као што је обрада челика легираног хромом (слика 2.5) [1]:



челика легираног ником [1]:



при електрохемијској обради у воденом раствору натријумхлорида [1].



Слика 2.5. Хемијске и електрохемијске реакције на површини при електрохемијској обради челика легираног хромом [1]

Продукти образовани приликом електрохемијске обраде представљају масу која садржи 60-80 % воде, 8-10 % основног једињења раствора и 12-20 % оксида или хидрата у виду нерастворљивих талога који падају на дно и потом бивају одношени помоћу радне течности - електролита [1].

Разни литературни извори закључују да је електрохемијски поступак обраде резултат комплексних интеракција различитих физичких и хемијских феномена, као што је електродинамика, пренос масе и топлоте, затим механике флуида и електрохемије, где се сви ти феномени јављају паралелно и зависни су једни од других. Електрохемијска обрада јесте процес у коме је предмет обраде анода, а претходно обликовани алат, који одређује финални изглед предмета обраде, катода. Анодно растварање материјала је главни разлог дешавања електрохемијског поступка обраде. Основни механизам процеса обраде јесте уклањање материјала предмета обраде у радној течности (електролиту), где се материјал одводи, односно уклања са предмета обраде атом по атом тако што се прекида негативно наелектрисање које везује површинске атоме са суседним атомима. Јонизовани атоми се потом одвајају од предмета обраде електричним пољем, где је брзина уклањања јонизованих атома од аноде управљана преко Фарадејевог закона о електролизи, који је описан у ранијем поглављу [9, 14, 15, 16].

При електрохемијском поступку обраде, катода и анода су постављени у кади, где се налазе на одређеном растојању у коме електролит протиче. Кроз електролит се потом пропушта електрична струја малог напона (од 8 до 40 V) између радног зазора електрода (величине 0,005 - 1 mm), високе густине (5-800 A/cm²) и јачине од 100 до 10.000 A која је потребна за извршење процеса обраде. Електрохемијска обрада се дешава на ниској температури и то углавном на температури од 19°C до 45°C, чиме се избегава термичко напрезање предмета обраде и алата. Једносмерна или пулсна струја потом реагује са предметом обраде и алатом, где се алат приближава обратку одржавајући одређени радни зазор где притом долази до усмереног кретања јона од аноде према катоде. Радни зазор између катоде и аноде је углавном константан, али и брзина уклањања материјала, да би се изједначило локално анодно растварање предмета обраде са кретањем алата, где се брзина уклањања материјала може кретати од 0,1 mm/min па све до 10 mm/min. Почетни радни зазор се повећава када се метални јони одвоје од аноде, што повећава електрични отпор у радном зазору. Да би се остварио константан радни зазор потребно је униформно померати катоду према аноди при истој брзини којом се врши анодно растварање предмета обраде. Уколико су електроде у радној течности постављене веома близу растварање металних јона ће бити брже и боље контролисано. Што је мањи радни зазор биће веће уклањање материјала са аноде [8, 10, 12, 17, 18, 19].

Радна течност (електролит) се креће великом брзином (5-60 m/s) кроз радни зазор између катоде и аноде да би процес обраде учинио стабилнијим, појачао пренос масе кроз субстрат (основни материјал предмета обраде одмах испод обрађиване површине) и да отклони нерастворљиви талог (продукте растварања, нпр. хидроксида метала), топлоту и гасовите мехуре створене у радном зазору. Висока густина електричне струје, али и акумулација продуката реакције катоде и аноде, као што је речено, доводе до стварања хидроксида метала и гасних мехура у радном зазору између електрода које потом постају баријере даљој обради, односно отежавају даљи процес обраде радног предмета. Због процеса електролизе на катоде и аноде, хидроксилни јони који су настали се комбинују са металним јонима и постају метални хидроксида, који потом постају изолатори процеса. Они смањују специфичну кондуктивност (проводност) електролита. Током обраде се може десити да електролит почне да кључа и испарава због веома брзог загревања електричном струјом унутар радног зазора. Таква појава је врло непожељна при обради зато што може довести до прераног отказа процеса електрохемијске обраде. То се спречава циркулацијом електролита и тиме његовим хлађењем [12, 20, 21, 22, 23].

Утицај на процес механизма одношења материјала при електрохемијској обради зависи од ефекта температуре, притиска, гасних мехура, корозије, анодног растварања, брзине одношења материјала, ефекта „залуталих струја“ и електролита [24].

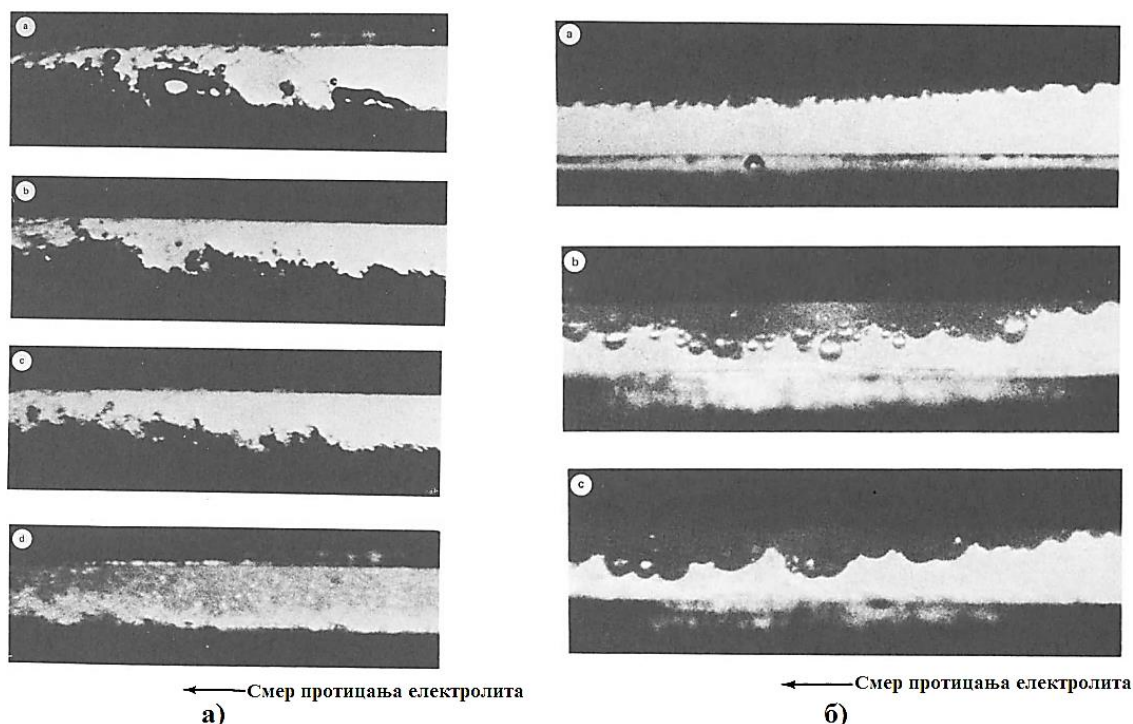
2.1.2.1. Ефекти температуре, притиска и гасних мехурова

Због употребе електричне струје током процеса електрохемијске обраде, долази до загревања електрода и радне течности услед Џуловог ефекта ($R \cdot I^2$). Услед повишене температуре долази до испаравања електролита, што је веома штетно по сам процес обраде. Такође, услед акумулације продуката обраде и корозије у радном зазору може доћи до повећања отпора између електрода, чиме ће анодно растварање престати. Да би се ово избегло, електролит се пумпа у радни зазор под одређеним притиском, где се тиме постиже хлађење електрода, тј. радног простора, али и хлађење саме радне течности. Начин на који се температура мења дуж радног зазора је доста битна, зато што је кондуктивност (проводност) електролита функција температуре. Уколико се десе велике варијације у проводности током обраде у радном зазору, десиће се неједнако уклањање материјала са предмета обраде. Разна експериментална испитивања су потврдила да раст температуре у радном зазору у току времена обраде, зависно од густине електричне струје и брзине протицања електролита, варира у вредностима од 1-7,5 °C, што одговара промени проводности електролита и до 15% [24].

Приликом ових експеримената, највиша измерена температура у целој дужини радног зазора је износила и до 45 °C. Температура радног зазора се може редуковати повећањем брзине протока електролита или повећањем проводности електролита (обично повећањем његове концентрације). Да би се избегло неравномерно уклањање метала на местима са повишеном температуром, у радном зазору и околном електролиту би температура требала бити испод 5 °C. У случајевима да је температура изнад ове вредности као резултат десиће се, при истој густини електричне струје, веће уклањање материјала на излазном крају радног зазора него на улазном делу, што ће довести до нежељене промене дужине радног зазора, познатог као „ефекат клина“. Повећањем брзине протицања електролита ефекат клина се тек незнатно појављује [24].

Различита температура електролита дуж радног зазора електрода доводи до повећања притиска. Гасни мехури се односе у област високог притиска електролитом. Повећањем притиска ти гасни мехури могу нестати, што даље води до пада притиска у радном зазору и ка формирању кавитације. Присуство кавитације у радном зазору може довести до прекида процеса обраде, зато што гасни мехурови формирају непроводну област која спречава обраду у радном зазору. Кавитација условљава лошију обраду, па се као резултат добија лошија обрађена површина предмета обраде [12, 25, 26].

Иако температура у радном зазору између аноде и катоде и околном електролиту може бити смањена повећањем брзине протицања радне течности, може се десити да хидраулични притисак који је потребан за достизање те брзине протицања електролита произведе такав притисак, дуж радног зазора, да настаје кавитација и хидродинамички отпор. Када локални притисак опадне испод вредности притиска који настаје приликом испаравања електролита услед високе температуре, долази до појаве гасних мехурова у електролиту. Кавитација која се тада јавља узрокује промене у проводности електролита и неједнакој густини електричне струје у радном зазору, где се тада смањује тачност електрохемијске обраде, а самим тим и повећава храпавост обрађене површине предмета обраде. Потребно је наћи оптималне режиме рада процеса обраде који укључују како одговарајуће вредности брзине протицања електролита тако и густине електричне струје. Као што је претходно појашњено, сметње у протоку електролита резултују у стварању хидроксида на катоде и аноде, где се на катоде тада ствара двофазни регион састављен од гасних мехура, који се назива „слој мехура“ [24, 27, 28]. Слика 2.6 приказује један од експеримента на којем је приказан ефекат брзине протицања електролита на стварање гасних мехурова, као и ефекат густине електричне струје на стварање гасних мехурова.



Слика 2.6. *Ефекат брзине протицања електролита на стварање гасних мехурова (а) и ефекат густине електричне струје на стварање гасних мехурова (б) [24]*

Према литературном извору [24], на слици 2.6а се види ефекат брзине протицања електролита на стварање гасних мехурова на бакарној електроди у електролиту калијум хлорида (KCl) при густини електричне струје од 100 A/cm^2 при брзини протицања електролита од: 400 cm/s (а), 600 cm/s (б), 1000 cm/s (с) и 2500 cm/s (д). На слици 2.6б се може видети ефекат густине електричне струје на стварање гасних мехурова на бакарној електроди у електролиту калијум хлорида (KCl) при брзини протицања електролита од 100 cm/s и густини електричне струје од: 5 A/cm^2 (а), 20 A/cm^2 (б) и 50 A/cm^2 (с) [24].

Када брзина протицања електролита достигне вредност од 400 cm/s (слика 2.6а) средња вредност дебљине слоја мехура се повећава на улазу у радни зазор па све до изласка из њега, али постоје варијације у дебљини при проласку од једне до друге тачке радног зазора. Појединачни мехури могу имати просечни пречник од $35 \mu\text{m}$. Са порастом брзине протицања електролита (више од 800 cm/s) пречник мехура пада испод $20 \mu\text{m}$. Са повећањем брзине протицања електролита на 2500 cm/s слој мехура је смањен на величину која дозвољава хомогену обраду материјала [24].

Ефекат густине електричне струје на слој мехура при константној брзини протицања електролита од 100 cm/s се види на слици 2.6б. Порастом густине електричне струје средња вредност дебљине слоја мехура се повећава, али се такође повећава и просечна дебљина самих мехурова (повећање од $50 \mu\text{m}$ на 5 A/cm^2 густине електричне струје на $99 \mu\text{m}$ на 50 A/cm^2). Да би се смањио ефекат слоја мехура на већим густинама електричне струје потребно је повећати брзину протицања електролита [24].

Формирање гасних мехурова може довести до настанка тзв. „гасног прекривача“ преко електрода који доводи до генерисања електричних варничења између електрода. Варничења су врло непожељне појаве током процеса електрохемијске обраде, јер могу довести до оштећења алата (катоде) услед хабања, што доводи до грешке у обради аноде. На настанак варничења доста утиче и брзина протицања електролита. Уколико је брзина протицања електролита довољно велика, варничење може бити спречено одношењем гасних мехурова из радног зазора, односно са електрода [12].

2.1.2.2. Ефекти корозије, брзине уклањања материјала и лутајућих струја

Уколико се продукти корозије налазе у радном зазору, онда ће процес уклањања материјала електрохемијском обрадом бити заустављен. Због тога је од велике важности да брзина протока електролита буде довољна да спере продукте корозије из радног зазора електрода. Такође се може десити да се електролит контаминира чврстим честицама пре и током процеса обраде. Ове честице могу бити различитих облика и величина. Најчешћи метод за спречавање продирања и уклањања насталих корозивних продуката је примена филтера који се морају редовно чистити од талога како би били што ефикаснији [24].

Електрохемијска реакција електрода у процесу обраде (оксидација на аноди или редукција на катоди) се дешава због пада у напону или разлици потенцијала у радном зазору. Свака електрода поседује своју специфичну границу потенцијала испод које се реакције не дешавају. Електромоторна сила електрода је повезана са потенцијалима оксидације и редукције, где зависе од температуре, притиска и радне течности. Процеси на електродама представљају хетерогене реакције које се дешавају у електролиту. Брзина реакција зависи од трансфера маса на електродама. Трансфер маса представља кретање материјала са једне локације на другу у електролиту. Он се дешава тако што се материјал одваја од површине услед електричног поља, где потом следи анодно растварање тог материјала услед утицаја градијента хемијског потенцијала и конвекција (проводност) услед хидродинамичког транспорта. Пошто пад напона дуж радног зазора електрода укључује и пад температуре, мора се пронаћи оптимална вредност напона током обраде које ће бити довољне да одрже електрохемијски процес обраде стабилним [12, 24, 25].

Приликом продирања у аноду покретним алатом, материјал аноде би требало бити уклоњен на местима које се налазе наспрам алата, јер су бочне стране алата прекривене електрично изолационим слојем (изолацијом). Уклањање материјала са других места на предмету обраде је непожељно и мења првобитно планирану геометрију финалног производа. Све што више времена катода врши обраду у истој области, више материјала ће бити уклоњено из те области, али ће се такође и уклонити материјал са нежељених делова на предмету обраде, тако што електролит врши обраду ван зоне обраде, што представља ефекат „лутајућих струја“. Овај ефекат се спречава контролом напона и густине електричне струје током процеса електрохемијске обраде, као и заштитом (изолацијом) делова предмета предмета који се не жели уклонити [24].

2.1.3. Карактеристике анодног растварања

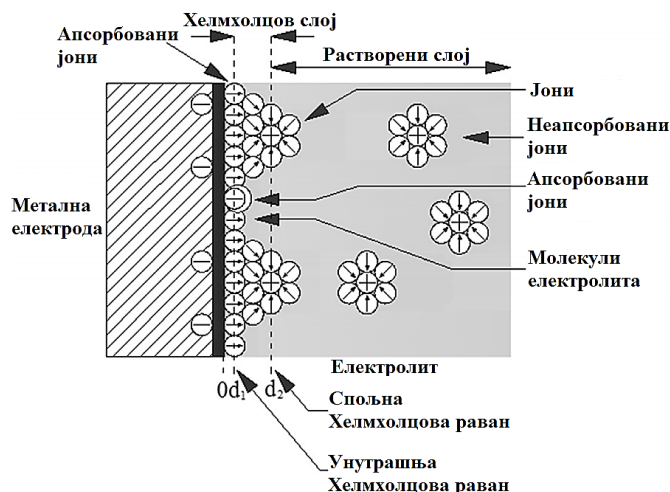
Брзина анодног растварања и запремина уклоњеног материјала су у директној зависности од јачине електричне струје која пролази кроз електроде у јединици времена. Међутим, повећањем само густине електричне струје није могуће убрзати процес локалног анодног растварања изнад одређене вредности. То је из разлога што при анодном растварању долази до појаве пасивизације анодне површине која се испољава у формирању танког анодног слоја. Овај слој, у зависности од електрода, садржи оксиде, хидроксиде и нераствориве соли који при електролизи испуњавају удубљења и храпавости на анодној површини чиме се може знатно успорити процес електролизе. До пасивизације анодне електроде долази у случају када је брзина уклањања мања од брзине стварања анодних продуката са површине аноде. У том случају се на аноди таложе тешко растворљива једињења која спречавају даље дејство електрода са радном течномшћу - електролитом. Интензитет образовања пасивизирајућег слоја на аноди зависи од густине електричне струје и већа је при већој густини струје, што може довести чак и до прекида процеса електролизе [7].

Током анодног растварања, зависно од материјала предмета обраде и коришћеног електролита, долази до формирања оксидног филма на површини аноде. Као што је претходно појашњено, стварање филма је везана за јачину и густину електричне струје. Брзо се формира оксидни филм на површини предмета обраде који делује као баријера између површине аноде и електролита. Оксидни филм је мале јонске проводности што редукује анодно растварање. Стабилност пасивног оксидног филма и његово растварање доста зависи и од начина на који је пасивизирајући филм формиран. Велика турбуленција изазвана циркулацијом електролита може умањити ефекте пасивизације [12].

За отклањање пасивизирајућег слоја са аноде се могу користити различити начини, као што су: интензивно чишћење површине аноде јаким млазом електролита (млаз односи скинуте честице са аноде), интензивно обнављање електролита, увођење у електролит активирајућег јона (на пример Cl^- , B^- при обради гвожђа и никла) и примена ултразвучних или механичких вибрација на електроди. Код анодномеханичке обраде пасивизирани слој се отклања механичким путем помоћу електролита са абразивним честицама, а који се може применити и код електрохидрауличне обраде. На тај начин се може не само смањити лош утицај пасивизираниог слоја, него се омогућава и повећање густине електричне струје, као и производност електрохемијског поступка обраде [7].

Анодно растварање материјала предмета обраде зависи од параметара обраде, где брзина протицања електролита побољшава анодно растварање и тиме доприноси мањој храпавости обрађене површине радног предмета. Материјал предмета обраде је на површини прекривен слојем анодног филма. Процес анодног растварања материјала предмета обраде зависи од дистрибуције локалних протицања електролита по површини материјала. Свако локално протицање електролита које није униформно са осталим протицањима доводи до веће храпавости обрађене површине предмета обраде [8].

Током анодног растварања може настати електрични дупли слој у радном зазору (слика 2.7). Између електрода и електролита метали прелазе у електролит као јони, али не могу прећи енергетску баријеру све док примењени напон у процесу обраде не буде већи од активационог потенцијала метала. Дупли електрични слој онемогућава кретање јона између предмета обраде и алата. Дебљина дуплог слоја зависи од концентрације јона у електролиту и потенцијал овог слоја је у рангу од $10 - 40 \text{ mF/cm}^2$ [12].



Слика 2.7. Шема дуплог слоја на електроди [12]

Електрични дупли слој је направљен од неколико слојева који су приказани на слици 2.7. Унутрашњи слој, који је најближи електроди, састоји се од електролита и других јона, познатијих под именом апсорбовани јони. Унутрашњи слој се зове још и Хелмхолцов слој, где се он потом дели на унутрашњу Хелмхолцову раван и спољашњу

Хелмхолцову раван. Унутрашња Хелмхолцова раван се налази на растојању d_1 површине металне електроде. Јони у електролиту могу прићи електроди само на раздаљини d_2 , односно до спољне Хелмхолцове равни. Интеракција јона са металном електродом се дешава посредством електростатичких сила и не зависи од хемијских особина јона. Ови јони се називају још и неапсорбовани јони и налазе се у области под називом „растворени слој“, чија дебљина зависи од концентрације јона у електролиту. Сама структура дуплог слоја може утицати на процес анодног растварања. Трансфер јона ће престати када енергија која је потребна пробијање дуплог слоја буде мања од енергије самог дуплог слоја. Већа брзина протока електролита спречава настајање дуплог слоја [12, 23].

Код електрохемијске обраде скинути (растворени) слој се по могућности таложи у електролиту. При томе долази и до незнатног таложења на алату. Између аноде и катодe током електрохемијских реакција у неутралном електролиту, електролиза воде ослобађа гасове водоника на катоди и повећава локалну алкалност (промену рН вредности) због формирања хидроксилних јона. У тада насталом киселом електролиту се ослобађање водоника дешава на алату и метални јони се могу депоновати (таложити) на катоди. Ову наслaгу на катоди је потребно привремено очистити или уклонити променом положаја на електродама (обрнутим процесом) [7, 12].

Различите хемијске реакције могу настати на електродама током електрохемијске обраде. На катоди ће прво настати хемијска реакција која има најмањи оксидациони потенцијал, док ће на аноди прво настати хемијска реакција која има највећи оксидациони потенцијал. Фактори који утичу на оксидациони потенцијал и одређују тип реакције која ће се одвијати зависе од: материјала предмета обраде, типа електролита, густине електричне струје, температуре електролита итд. Хемијске реакције које могу настати на аноди су развијање оксидационих или халогених гасова и анодно растварање, док на катоди могу настати две могуће хемијске реакције: настанак гасних мехура (хидроксида) и неутрализација позитивно наелектрисаних металних јона [12].

2.1.4. Радна течност (електролит)

Електролит је један од најзначајнијих елемената процеса електрохемијске обраде и од његовог избора у доста великој мери зависи тачност, производност и економичност процеса електрохемијске обраде [1, 2]. Основни задаци електролита јесу [1, 2]:

- да омогући проток електричне струје између предмета обраде и електроде,
- уклањање продуката пасивизирајућег слоја, односно продукте растварања и створених гасова,
- одвођење топлоте развијене током обраде (хлађење алата и предмета обраде),
- стварање неопходних предуслова за одвијање електрохемијских и других процеса у току обраде итд.

Да би реализовао претходно наведене задатке, електролит мора да поседује [1, 2]:

- високу специфичну електропроводљивост,
- одговарајућу рН вредност,
- висока антикорозиона својства,
- малу вискозност,
- висок степен погодности за руковање (припремање и експлоатацију у току процеса обраде),
- висок ниво заштитних својстава (безопасност рада),
- високу економичност примене итд.

Из претходно наведених својстава радне течности за електрохемијске поступке обраде, следи да електролити не смеју бити: токсични, односно штетни по здравље људи у производњи и околину, корозиони, склони стварању пасивизирајућег слоја на аноди, нестабилни у процесу обраде, превише скупи и тсл. [2].

Ма колико да је неки електролит добар електропроводник, ипак је он слабији проводник од метала, па се зато при протоку електричне струје кроз електролит, због омског отпора, ослобађа знатна количина топлоте, као што је претходно описано. Зато добар електролит треба да се одликује добром топлотном проводношћу, великом специфичном топлотом и високом тачком кључања. Такође, електролит треба да се одликује и малом вискозношћу, јер уколико је електролит мање вискозан то је потребно остварити мањи притисак за његову нормалну циркулацију кроз радни зазор [2].

Избор врсте и основних параметара режима и радних услова електролита (проток, притисак, брзина струјања, концентрација и температура) може бити изведен само на основу комплексне анализе утицаја електролита на основне карактеристике и техно-економске показатеље електрохемијске обраде. Избор електролита зависи од материјала обрада, као и жељене тачности и квалитета обрађене површине. Електролит треба да је тако укомпован да, са материјалом предмета обраде, образује једињења која се лако могу растварати у води и једноставно одстранити системом циркулације електролита. Тежња за постизањем максималних ефеката електрохемијске обраде довела је до развоја низа различитих типова електролита намењених за обраду различитих материјала [1, 2].

У индустријској пракси се најчешће користе две врсте електролита, а то су [2]:

1. натријум хлорид (кухињска со) и
2. натријум нитрат (шалитра).

Натријум хлорид (NaCl) је карактеристичан по великој храпавости обрађене површине и мањој тачности приликом обраде. Користи се 10-25%-тни водени раствор натријум хлорида. Добре особине овог електролита јесу то што не пасивизира обрађену површину, има дуготрајну радну способност, односно велики век трајања, једноставна регенерација и припрема, омогућава остваривање велике производности при обради и има врло приступачну цену. Ове особине су омогућиле његову широку примену. Слична својства има и калијум хлорид (KCl) који се може паралелно користити [1, 2].

Натријум нитрат (NaNO_3) (шалитра) даје високу производност, малу површинску храпавост и високу тачност обраде. Његов највећи недостатак јесте то што пасивизира обрађену површину при малој густини струје, као и нешто већа цена. Веома сличне карактеристике поседује и натријум хлорат (NaClO_3) који се користи при обради алатних челика, а може се користити и као замена за натријум нитрат [2].

Осим претходно описана два електролита, у индустријској пракси се користи још и натријум сулфат (NaSO_4) који остварује малу храпавост обрађене површине и високу тачност обраде. Примењује се код најфинијих обрада, а посебно је погодан за обраду нерђајућег челика. Велика предност овог електролита јесте то што не делује корозивно на предмет обраде. Велика производност, тачност и квалитет обрађене површине се може постићи и комбиновањем више различитих електролита. Највећа електропроводљивост се постиже комбиновањем електролита од NaCl , NaNO_3 и NaSO_4 [2].

Композиција електролита у погледу врсте, састава и концентрације може бити веома различита, зависно од основних карактеристика материјала предмета обраде и параметара режима обраде [1]. Да би се побољшала одређена својства електролита или ублажила постојећа негативна, електролитима се додају различите материје (адитиви), од којих су најважнији [1, 2]:

- борна киселина (до 3 kg/m^3) са циљем стабилизације рН вредности електролита,
- различите површински активне материје које спречавају кавитацију и снижавају хидродинамички отпор при струјању електролита,
- инхибитори корозије (хромати, фосфати и тсл.) који служе за смањивање или спречавање корозије машине, алата (електроде) и предмета обраде и
- низ других адитива за повећање стабилности електролита, побољшање особина електролита, дужи век њиховог трајања и др.

Пошто примена натријум хлорида (NaCl) при електрохемијској обради изазива корозију, што је нежељена појава у процесу електрохемијске обраде, овом електролиту се додају разне врсте адитива, између којих су најважнији инхибитори корозије (разна хемијска једињења и амини), чиме се умањује негативни процеси корозије и смањење продуката корозије и добија квалитетнија обрађена површина предмета обраде. Такође се користе и органски адитиви у електролиту да би се снизила његова вискозност, чиме се повећава ефикасност циркулације електролита [24].

Једна од значајних карактеристика радне течности јесте стабилност и постојаност особина електролита у току обраде. При томе, са временом, долази до пораста неких карактеристика (рН вредности, температуре и специфичне електропроводљивости) и пада вредности кинематске вискозности електролита. Са падом вредности кинематске вискозности долази и до мањих хидродинамичких отпора при струјању електролита кроз радни зазор. Тиме се, зависно од врсте производне операције електрохемијске обраде, мењају и техно-економски показатељи процеса обраде [1].

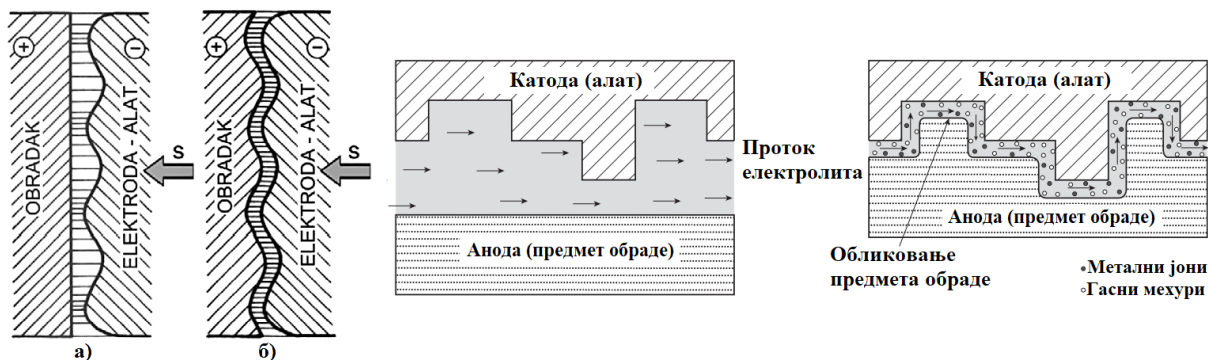
Врста, хемијски састав, концентрација и остали параметри електролита се мењају у веома широким границама, зависно од врсте материјала предмета обраде и алата, врсте електрохемијске обраде и тсл. Проток електролита у значајној мери утиче на густину електричне струје (при $U = \text{const}$), а тиме и на остале показатеље процеса обраде. Утицај притиска и температуре електролита је такође веома значајан и зависи од услова обраде. Променом температуре електролита, зависно од врсте материјала предмета обраде, долази до других техно-економских показатеља процеса електрохемијске обраде [1].

Брзина струјања електролита се креће од 10 m/s и више, где се одржавање брзине електролита константном сматра једним од најнеопходнијим условом за добијање површина високог квалитета. Променљивост брзине доводи до појаве рисева и других дефеката на обрађеној површини радног предмета. Порастом брзине струјања радне течности (електролита) расте и интензитет растварања материјала. То се објашњава чињеницом да се продукти анодног растварања знатно брже одводе из зоне обраде, чиме се смањује електрични отпор електролита и повећава густина електричне струје. Ефекат повећања техно-економских показатеља је евидентан само до одређене вредности брзине струјања електролита, када долази до пасивизирања процеса [1, 2].

2.1.5. Обликовање површина при електрохемијској обради

Најважнији параметар при електрохемијској обради је густина електричне струје, која може достићи и до 800 A/cm^2 , што је приближно и до 1000 пута више него код било ког другог поступка обраде код кога се јавља овај параметар. При протицању електричне струје кроз електролитску ћелију при електрохемијској обради, расподела струјница по површини предмета обраде зависи од облика алата (слика 2.8). Највећа густина струјница се остварује на местима где је растојање између електрода најмање (слика 2.8а), па је и ту интензитет скидања материјала највећи. Како се у процесу обраде алат (катада) креће према предмету који се обрађује, густина електричне струје се постепено изједначава по

целој површини према облику алата (слика 2.8б). Величина радног зазора између алата (катоде) и предмета који се обрађује представља веома битну карактеристику поступка електрохемијске обраде [2].



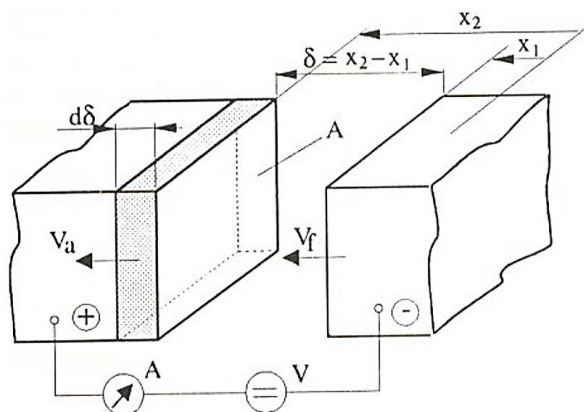
Слика 2.8. Обликовање сложених површина при електрохемијској обради: а) почетак обраде, б) крај обраде [2, 12]

При процесу електрохемијске обраде се одстрањени материјал јавља у виду металних хидроксида и њега електролит односи у посебне уређаје, у склопу инсталације за електрохемијску обраду, где се одваја од течности центрифугирањем или таложењем. При електрохемијском процесу обраде се алат не троши и то представља једну од најбитнијих карактеристика овог поступка обраде. Због природе самог процеса обраде могу се обрађивати само електропроводљиви материјали [2].

Величина радног зазора при електрохемијској обради у проточном електролиту при условима паралелности и једнакости анодне и катодне површине јесте [33]:

$$\delta = \frac{K_m(U - U_{pol})X_{el}}{V_a}$$

При чему је: U_{pol} - поларизовани напон и U - напон генератора [33].



Слика 2.9. Зазор између електрода [33]

При електрохемијској обради, величина радног зазора δ је непосредно зависна од постављеног напона генератора U , који делује у радном зазору, затим густине електричне струје, као и од поларизујућег напона U_{pol} . Уколико се величина радног зазора мери у зависности од напона који је успостављен на аноди и катоди, при константним условима рада добија се права која не пролази кроз координатни почетак, већ сече апсцису за износ поларизационог напона U_{pol} . До скидања материјала долазиће само ако је напон између аноде и катоде већи од поларизационог напона U_{pol} . За константно померање мора бити и константна брзина скидања (одношења) материјала предмета обраде. Ако је X_{el} и/или $(U - U_{pol})$ променљиво, тада се мења и величина радног зазора δ [33].

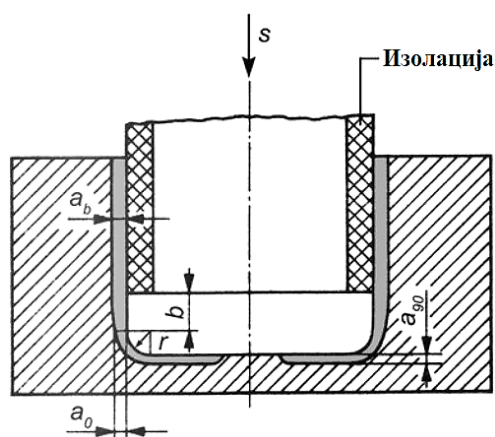
Приликом обликовања површина у разним поступцима електрохемијске обраде дешавају се разни топлотни процеси. При самом разматрању топлотних процеса који се дешавају при електрохемијској обради (који су делом описану у поглављу 2.1.2.1) мора се поћи од дефинисања одређених топлотних критеријума. Ти критеријуми морају да задовоље геометријску, хидродинамичку и термичку сличност модела. При поступцима електрохемијске обраде електролит се загрева услед топлотног ефекта хемијске реакције и услед механичких утицаја. Ако се не предузимају потребне мере, тај процес загревања може достићи такав степен који може изазвати нарушавање или прекид процеса обраде. Утицај механичких фактора на загревање електролита може бити следеће [33]:

- механичко загревање електролита проузроковано радом система за циркулацију, пречишћавање и регенерацију електролита, односно пумпе за електролит,
- механичко загревање електролита при протицању кроз радни зазор између катоде и аноде и
- повећање температуре електролита услед разних хемијских реакција и анодног растварања материјала предмета обраде.

Наредно поглавље описује основне елементе алата (катоде) и материјале који се употребљавају за израду истих.

2.1.6. Алат (катода)

Алати (катоде) за електрохемијску обраду се могу правити у неколико облика, као што су: профилни, цевasti, капиларни и остали слични облици. Облик и димензије алата су условљени врстом производне операције и конфигурацијом радне површине, односно геометријским обликом обрађене површине предмета обраде. За операције упуштања и бушења, код којих је попречни пресек електроде (алата) константан, могу се користити стандардни облици шипки или цеви уз незнатну дораду и постављање изолационог слоја. Међутим, за највећи број операција електрода (алат) има променљиви попречни пресек и за сваки поступак и операцију електрохемијске обраде се морају посебно конструисати. Конструкција таквих електрода представља једну од најсложенијих и најскупљих фаза у припреми технолошког процеса ове обраде [2].



Слика 2.10. Основни елементи електрода за обраду контура са константним попречним пресеком [2]

На слици 2.10 је приказана израда удубљења са константним попречним пресеком електроде са карактеристичним зазорима. Конструкција алата који има променљиви попречни пресек се врши на бази експерименталних података. Прво се изради електрода у облику негативне гравуре (негатив) предмета обраде, умањена за предвиђену вредност

чеоног зазора. Затим се електроди доводи електролит. Тако припремљеном електродом се врше обраде на основу чијих резултата се касније врши корекција облика и димензија електроде са којом ће се вршити стварна обрада и остварити захтевана тачност [2, 7].

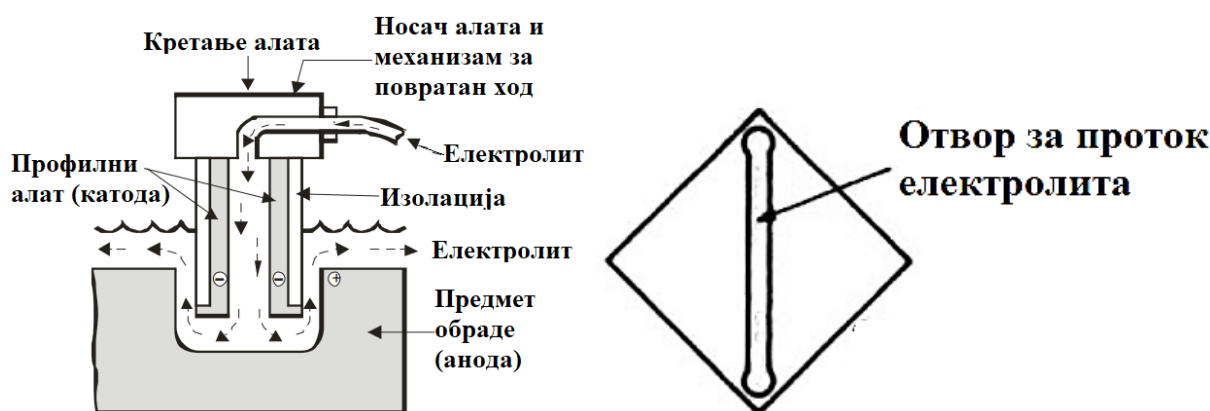
Зависно од димензија алата и других карактеристика процеса електрохемијске обраде, између електрода се јавља мања или већа вредност чеоног и бочног зазора. Са слике 2.10 се може видети проширени бочни зазор a_b између површине предмета обраде и електроде, које су паралелне са правцем помака s , где је бочни зазор веома важан при бушењу и изради гравура на већим дубинама. Тако је вредност чеоног зазора директно сразмерна запреминском електрохемијском еквиваленту материјала предмета обраде, напону и специфичној електропроводљивости електролита, а обрнуто сразмерна брзини растварања материјала предмета обраде, односно самој брзини помоћног кретања алата. Вредност зазора се мења у току процеса обраде. Из тих разлога систем помоћног кретања се пројектује тако да се у сваком моменту обезбеди оптимална вредност радног зазора. Повећањем дубине обраде повећава се и вредност чеоног и бочног зазора, уз појаву бочног повећања релевантне димензије (нпр. бочног ширења отвора). Изолацијом алата (сл. 2.10) спречава се бочно ширење електролита и његово деловање на неподвижним местима на предмету обраде, односно ефекат лутајућих струја, чиме се обезбеђује већа тачност, продуктивност и производност процеса електрохемијске обраде [1, 2].

Утицај мноштва фактора на процес електрохемијске обраде отежава дефинисање оптималних вредности зазора, а тиме и одговарајућег облика и димензија алата. На већим дубинама обраде са смањењем вредности зазора, посебно испод 0,1 mm, долази до наглог повећања хидродинамичког отпора при струјању електролита, а тиме даље и до наглог повећања притиска електролита. Даље смањење вредности зазора (испод 0,03 mm) може изазвати прекид струјања електролита. Нагла промена правца струјања или димензија канала (цеви, односно зазора) на уласку електролита у зону обраде, као и на излазу из зоне обраде, може изазвати низ нежељених појава, као што су кавитационо разарање, нетачност обраде, повећање храпавости обрађене површине итд. [1].

Зависно од величине зазора мењају се и параметри режима електрохемијске обраде. Порастом вредности радног зазора долази до пада специфичне производности и вредности потребне јачине електричне струје, уз истовремени пораст брзине помоћног кретања алата. Вредност радног зазора игра веома значајну улогу у остваривању процеса електрохемијске обраде. Исувише мали зазор доводи до читавог низа појава, које се негативно одражавају на процес обраде, па чак и до појаве кратког споја, уз нагло загревање електролита, његово испаравање, стварање велике количине гасова и тсл., појава које изазивају смањење производности и квалитета обраде у електрохемијском процесу обраде, што је и детаљно појашњено у претходним поглављима [1].

Током процеса електрохемијске обраде мора се обратити посебна пажња и на корекцију облика алата у циљу добијања што тачнијег облика предмета који се обрађује. Вредности равнотежног зазора се одређују према различитим условима обраде (притисак и температура, као и специфична електропроводљивост електролита), где је потребно вршити повећање величине корекције алата. У циљу рационалне корекције контуре алата треба пратити проширења чеоног и бочног зазора. Електрохемијска обрада дефинише подручја у коме није потребно, или је потребно повећање радног зазора и према томе кориговање облика алата. Потреба за корекцијом алата се може умањити или потпуно избећи убацивањем гаса под притиском заједно са електролитом. При убацивању смеше гас+електролит, због експанзије гаса, према крају зазора се смањује електропроводљивост у радном зазору, а самим тим и интензитет растварања метала, што даље доводи до смањења проширења зазора [2].

Утицај брзине помоћног кретања алата, односно електрода на техно-економске показатеље процеса обраде (посебно на брзину растварања материјала и производност) је веома евидентан. Брзина кретања алата дефинише и карактер и интензитет струјања електролита кроз радни зазор. Са повећањем брзине побољшавају се услови струјања, уз смањење електричног отпора електролита и повећање брзине растварања материјала. Међутим, повећање брзине обртаја алата (катоде) доводи и до повећања центрифугалне силе, уклањања танког слоја електролита са површине алата и појаве супротних, односно непожељних ефеката. То изазива смањење вредности показатеља процеса и указује на то да је, у конкретним условима, неопходно експериментално одређивање оптималних вредности релевантних параметара обраде. Помоћно кретање се остварује по унапред формираном циклусу (закону) и регулише у зависности од интензитета уклањања вишка материјала. Тиме се обезбеђује стално одржавање оптималне вредности радног зазора, затим искључује могућност спајања електрода, значајно повећава интензитет растварања материјала и производност и низ других позитивних ефеката. Остваривање ових услова обраде се постиже широком применом различитих система аутоматског управљања [1].



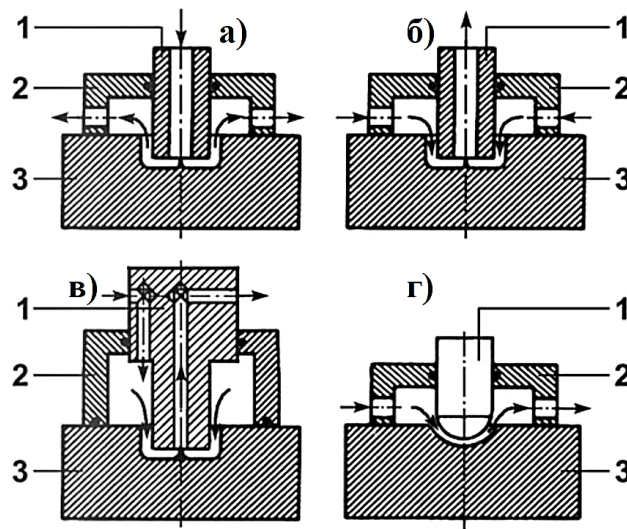
Слика 2.11. Алат за електрохемијску обраду са погледом са доње стране [3, 21]

Слика 2.11 приказује алат за обраду електрохемијским поступком обраде, на коме се види проток електролита, затим изглед његовог профила, изолација и његово кретање. Материјал који се користи приликом израде алата за електрохемијску обраду треба да задовољи основне захтеве процеса обраде. То значи да материјал мора поседовати добру проводљивост електричне струје и топлоте, као и високу отпорност на корозију. Зато се као материјали за израду алата користе: бакар, месинг, бронза, нерђајући челик, графит, никл, олово, алуминијум, титан, као и низ других материјала различитих карактеристика и намена. Уколико се захтева велика отпорност материјала, тада бакар и месинг имају највећу примену. Титан се примењује у случају да се ради са радном течносту која анодизира (нпр. код примене сумпорне киселине H_2SO_4). У случају кратког споја, бакар и месинг се мање оштећују него нерђајући челик због боље топлотне проводљивости. Нерђајући челик (са високом садржајем хрома) је веома отпоран на корозију и може се користити у доста различитих радних течности. Висок садржај хрома је карактеристичан по томе што формира веома танки стабилни филм који је отпоран на корозију [2, 16].

На алатима морају бити израђени отвори за пролаз електролита (слика 2.11), који треба да су тако постављени да омогућавају најкраћи пут електролита и да на сваком месту површине која се обрађује омогућавају сигуран проток. Алати са централним отвором за електролит се користе за бушење отвора. Они су споља изоловани, тако да се спречава неконтролисано бочно скидање метала и ефекат лутајућих струја и постиже веома тачна обрада датог отвора. Као изолација на алатима се могу користити стиракрил, епоксидна смола и други изолациони материјали, као што су: органско стакло, ебонит и винпласт. Изолациони материјал се може наносити мазањем, прскањем, урањањем или

ливењем. Чауре изолационог материјала се могу навлачити на цев која на челу има венац на који се изолација наслања, како је електролит не би својим протоком скинуо. Да би се применио на алатима, изолациони материјал мора задовољити следеће критеријуме: да буде постојан према електролитима, да има довољну механичку чврстоћу, да поседује добро везивање са основним материјалом алата, затим отпорност према температурама до 100 °C, као и то да се могу лако наносити [2].

Електролитички процес електрохемијске обраде се може несметано одвијати само ако се настали продукти обраде и развијена топлота на сваком месту радног зазора могу довољно брзо одвести. Због тога се при конструкцији електроде (алата) пази на то да је путања тока радне течности (електролита) у радном зазору што краћа и да се избегава испаравање електролита које настаје због губитка проводљивости [2].



Слика 2.12. Могућности довођења и струјања електролита кроз радни зазор: 1) електрода, 2) маска и 3) предмет обраде [2]

Довођење и струјање електролита у радни зазор, као и његово одвођење са продуктима обраде се може извести на различите начине и то: довод кроз електроду, а одвод кроз радни зазор (слика 2.12а), довод кроз радни зазор, а одвод кроз електроду (слика 2.12б), довод и одвод кроз електроду (слика 2.12в), као и довод и одвод кроз радни зазор, тзв. попречно струјање (слика 2.12г), као и слободним натапањем електролитом, што зависи од врсте и параметара електрохемијске обраде, али доста и других захтева које треба остварити у процесу обраде [2].

Да би се обезбедио исти притисак у целом радном зазору, у склопу прибора се примењује специјално обликована маска помоћу које се на крајевима зазора формира комора под притиском која спречава наглу експанзију електролита (слика 2.12). Осим тога маска се користи и за усмеравање електролита код његовог спољашњег струјања [2].

Електроде се израђују поступцима конвенционалних (механичких) метода обраде (обрада резањем), пластичном деформацијом и ливењем, с тим што се сложеније форме морају ручно дотеривати браварским радовима. Израђена електрода је веома вредна, а с обзиром да се при употреби не троши, теоретски може трајати вечно. Због тога је електрохемијска обрада једна од ретких поступака код којих се алат не обнавља, или се обнавља можда једном. У пракси с времена на време долази до кратког споја између електрода и предмета обраде и варницења (нечист електролит, већи метални укључци у предмету обраде, електричне сметње и тсл.) при чему се тада електрода мало механички оштећује. Уобичајно је да се после 200 до 300 употреба електрода која се користи за неки поступак електрохемијске обраде поправи (обнови) или замени новом електродом [2].

2.1.7. Параметри режима обраде

Постоји доста параметара режима процеса електрохемијске обраде. Основни параметри режима електрохемијске обраде дефинисани су: густином електричне струје (чија константност представља основну претпоставку за правилно одвијање процеса обраде), напоном (који може бити константан или променљив - импулсни са временом трајања импулса од 0,01-0,4 s), затим јачином електричне струје, радним зазором између електрода, притиском, брзином кретања алата, протоком и температуром електролита, као и брзином помоћног кретања електрода [1].

Основни параметри струјног кола режима процеса електрохемијске обраде су [1]:

- густина електричне струје:

$$D = \frac{I}{A} = \frac{U k_e}{\delta} , \quad (A/mm^2)$$

- електрични отпор електролита:

$$R_e = \frac{\delta}{k_e A} , \quad (\Omega)$$

- јачина електричне струје:

$$I = \frac{U}{R_e} = \frac{U k_e A}{\delta} , \quad (A)$$

Где су у изразима [1]:

- U (V) - напон на крајевима електрода,
- k_e (1/Ωmm) - специфична електропроводљивост електролита,
- δ (mm) - радни зазор између електрода и
- A (mm²) - површина радног предмета која учествује у процесу обраде.

Брзина одношења материјала (растварања, промене димензија предмета обраде или кретања алата) јесте [1]:

$$V = K_m D = K_m \frac{U k_e}{\delta} , \quad (mm/min)$$

и пропорционална је специфичној запреминској производности K_m и густини електричне струје, а зависи од вредности напона, радног зазора између електрода, јачине електричне струје и површине радног предмета која учествује у процесу обраде [1].

Посебно је актуелан и утицај запреминске производности, која се посматра и као параметар електрохемијске обрадљивости [1]:

$$K_m = K_e \frac{60000}{\rho} , \quad (mm^3/Amin)$$

где је: K_e (g/Ah) - електрохемијски еквивалент материјала и ρ (g/cm³) - густина материјала предмета обраде [1].

Како вредност специфичне запреминске производности не зависи од механичких карактеристика материјала (тврдоћа, жилавост, отпорност на високе температуре и тсл.), очигледно је и да ни обрадљивост материјала при електрохемијској обради не зависи од механичких особина материјала као што је то случај код конвенционалних (механичких) поступака обраде резањем [1].

Утицај густине електричне струје на брзину растварања материјала је разнолик. До одређених вредности густине електричне струје постоји линеарна зависност брзине растварања материјала и густине електричне струје (зависно од услова обраде оваква зависност постоји за брзине до 0,2 mm/min и густине електричне струје до 10 A/cm², тј. брзине до 0,9 mm/min и густине електричне струје до 50 A/cm²). Значајније повећање интензитета уклањања материјала може се постићи при густини електричне струје од 200-250 A/cm². Међутим, повећање густине електричне струје доводи до интензивирања секундарних процеса обраде и успоравања процеса анодног растварања материјала. Већа густина електричне струје изазива значајнију појаву различитих соли и једињења, која се не растварају у електролиту. Створена једињења проузрокују већи електрични отпор проласку електричне струје кроз електролит и пасивизирање материјала при обради [1].

Најповољнија вредност брзине растварања материјала предмета обраде се може одредити и преко параметара циркулације електролита [1]:

$$V = K_m \sqrt{\frac{\theta k_e c_e \rho_e \omega}{L}} , (mm/min)$$

где се поред познатих параметара налазе још и [1]:

- θ (K) - температура електролита,
- ρ_e (g/cm³) - специфична густина електролита,
- c_e (J/°C kg) - специфични топлотни капацитет електролита,
- ω (m/s) - брзина струјања електролита и
- L (mm) - ширина радног зазора.

Параметри струјања радне течности (електролита) су [1]:

- проток електролита:

$$Q = L \delta \rho_e \omega , (m^3/s)$$

- брзина струјања електролита:

$$\omega = \alpha_D \sqrt{\frac{2 g \Delta p}{\gamma_e}} = 1 \div 30 m/s$$

- температура електролита:

$$\theta = \frac{U I}{Q c_e} = \frac{V^2 L}{K_m^2 k_e c_e \rho_e \omega} , (K) < \theta_k(K)$$

у изразима су, поред већ претходно познатих величина, и [1]:

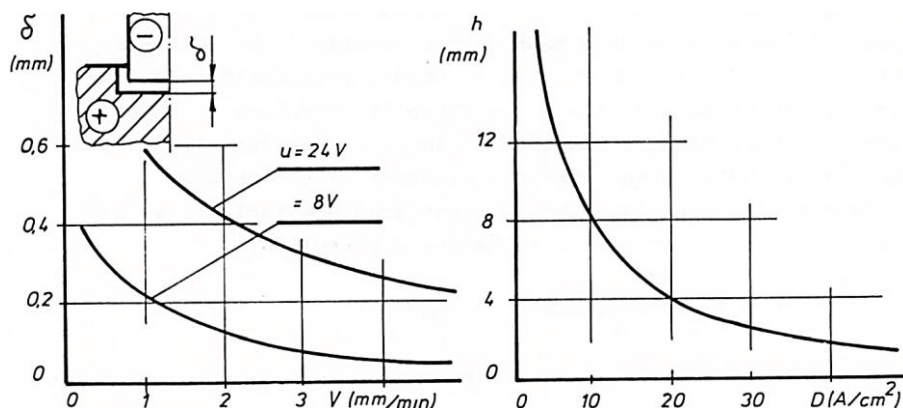
- $\alpha_D = 0,4 - 0,8$ - бездимензионални проточни коефицијент,
- g (m/s²) - убрзање земљине теже,
- $\Delta p = p - p_{iz} = 5 - 300$ N/cm² - разлика притисака електролита на улазу и излазу из радног зазора и
- γ_e (N/cm³) - специфична тежина електролита.

На основу приказаних релација могуће је формирати и зависност величине чеоног зазора и параметара обраде (слика 2.13) облика [1]:

$$\delta = K_m \frac{U k_e}{V} , (mm)$$

и кориговати тј. формирати одговарајући израз за јачину електричне струје [1]:

$$I = D A = V \frac{A}{K_m} , \quad (A)$$



Слика 2.13. Величина зазора и дубине растварања: утицај брзине растварања и напона на вредност зазора при обради у 25%-тном раствору NaCl (лево) и утицај густине електричне струје на дубину растварања (десно) [1]

Главном време израде зависи од величине додатака за обраду Z (mm) и брзине промене димензија предмета обраде, односно [1]:

$$t_q = \frac{Z}{V} , \quad (min)$$

У даљем тексту рада биће описани непрекидни и прекидни, односно импулсни режими електрохемијске обраде, као и утицај тих режима на брзину, тачност и квалитет поступка обраде.

2.1.7.1. Непрекидни и прекидни режими обраде

Процеси електрохемијског поступка обраде за дату радну течност (електролит), тип и конструктивне карактеристике електрода (алата и предмета обраде) јесте одређен брзином помоћног кретања, као и електричним и хидродинамичким параметрима. Свака величина којом је описан режим обраде може бити константна, случајно променљива (услед нестабилности процеса обраде) и периодично променљива [1].

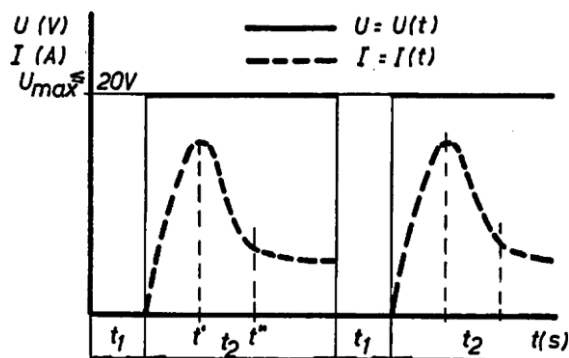
То значи да се разликују два вида режима процеса електрохемијске обраде [1]:

1. непрекидни режим обраде (са константним или постепено-споро променљивим параметрима режима обраде) и
2. прекидни режим обраде (са периодичним (импулсним) променама параметара режима обраде, као нпр. брзине помоћног кретања, притиска и брзине струјања електролита, напона или јачине електричне струје и тсл.).

Непрекидним режимом електрохемијске обраде анодно растварање и уклањање материјала са предмета обраде је континуално. Овим режимом обраде се добија велика концентрација продуката обраде, која може делимично бити испрана електролитом, нарочито уколико је радни зазор мали. Повећана контаминација, тј. загађеност продуктима обраде може довести до настанка талоба на површини алата, чиме се постиже неједнако анодно растварање материјала предмета обраде. Даље, промене у композицији и саставу електролита доводе до повећања његове температуре, чиме се погоршава тачност обраде, као и квалитет обрађене површине радног предмета. Повећање тачности обраде, посебно

производних операција израде сложених конфигурација-копирања производа може се постићи смањењем радног зазора између електрода (нарочито бочног зазора). Међутим, у тим случајевима долази до смањења брзине растварања материјала, брзине протицања електролита, уклањања продуката обраде, брзине одвођења топлоте, електричног отпора електролита и тсл. Сва та смањења (посебно електричног отпора) не смеју довести до ситуације у коме се повећава снага извора напајања, јер би повећање снаге могло довести до низа нежељених појава, као што су: појава искре (варничења), тј. електричног лука, кључања електролита, пасивизирања, значајног издвајања водоника и других гасова итд. У оваквим условима је могућа обрада при ниским напонима електричне струје, али са знатно мањом производношћу [1, 23].

Повећање производности, квалитета обрађене површине и тачности обраде (при минималним вредностима зазора) постиже се прекидним импулсним режимом рада (слика 2.14). Импулсни режим рада карактерише краткотрајна импулсна промена напона и јачине електричне струје. Вредност напона, у току трајања импулса (0,01 - 0,04 s) је константна, док се јачина струје мења. Након достизања максималне вредности јачине електричне струје, иста нагло пада све до момента t'' . Пад настаје као резултат стварања велике количине водоника и гасних мехурова. У временском моменту t'' долази до стабилизације вредности јачине електричне струје на одговарајућем нивоу [1].



Слика 2.14. Промена електричних параметара режима електрохемијске обраде [1]

Трајање импулса, као и интервали између импулса морају бити одређени према густини електричне струје тако да радни зазор између електрода буде у потпуности очишћен током процеса обраде. Тиме се долази до закључка да ефикасност процеса електрохемијске обраде доста зависи од густине електричне струје. Са непрекидним режимом обраде ефикасност се смањује када је густина електричне струје редукована. Код импулног режима рада ефикасност је у још већој зависности од густине електричне струје, па уколико се густина електричне струје смањује, ефикасност електрохемијске обраде је још мања него код непрекидног режима обраде. Стрмовит пад ефикасности са смањењем густине електричне струје побољшава тачност обраде, јер се смањује брзина кретања електрода. Ово побољшање зависи од трајања импулса и интервала између њих. Након једног импулса следи интервал између импулса где нема електричне струје, што дозвољава уклањање продуката обраде и топлоте из радног зазора струјањем радне течности (електролита) [23].

Мењањем параметара импулсне струје (нпр. трајање импулса, интервали између импулса и сл.) може се контролисати квалитет добијене површине, као и тачност обраде. Правилним избором тих параметара приликом процеса електрохемијске обраде могу се смањити варијације у проводности електролита и достићи висок трансфер маса, чак и при мањим брзинама протока електролита. Краће време трајања импулса доводи до веће тачности обраде, а самим тим и бољег квалитета обрађене површине, као и то да анодно растварање постаје више локализовано [23].

2.1.8. Производност, тачност и квалитет обраде

Најважнији основни показатељ процеса електрохемијске обраде јесте брзина анодног растварања материјала. Поред брзине анодног растварања материјала, остали основни техно-економски показатељи и параметри процеса електрохемијске обраде јесу: производност, тачност обраде и квалитет обрађене површине. Сви ови показатељи директно зависе од параметара режима обраде, основних карактеристика процеса, као и примењене инсталације, тј. постројења и додатне опреме за поступке електрохемијске обраде [1, 2].

2.1.8.1. Производност

Производност представља количину раствореног материјала у току процеса електрохемијске обраде и њена вредност износи [1]:

$$M = K_e I t = M_s t \quad (\text{g}) - \text{у масеним, односно}$$

$$V = K_m I t = V_s t \quad (\text{mm}^3) - \text{запреминским јединицама.}$$

У изразима су: M_s (g/min) и V_s (mm³/min) - специфичне производности, као и t (min) - време проласка електричне струје кроз електролит (време трајања процеса електрохемијске обраде) [1].

Теоретска вредност електрохемијске обраде може се израчунати и преко општег Фарадејевог закона. У пракси је најчешће у примени специфична производност или запремински електрохемијски еквивалент (за $I = 1$ А и $t = 1$ min), која се изражава у cm³/Amin или mm³/Amin, а чија вредност јесте [2]:

$$q_t = \frac{Q_l}{\rho} = 6,22 \cdot 10^{-4} \frac{A_r}{n \cdot \rho} \quad (\text{cm}^3/\text{Amin}) \quad \text{или} \quad q_t = 0,622 \frac{A_r}{n \cdot \rho} \quad (\text{mm}^3/\text{Amin})$$

где је: ρ (g/cm³) - специфична маса или густина метала [2].

Према овој једначини се види да метали чија се механичка својства драстично разликују од горње вредности, као што су нпр: Al, Cu, Cr-Ni, челик, Fe, Co, Ni, Nb и Si, имају приближно исту електрохемијску обрадљивост, односно $q_t = 1,82 \div 2,24$ mm³/Amin, што значи да се не могу обрађивати конвенционалним поступцима обраде резањем [2].

Пошто се електрохемијском обрадом обично обрађују легуре, а не чисти метали, то се теоријски специфична производност у том случају одређује по следећем изразу [2]:

$$q_{tl} = \frac{1}{\rho_i} \sum_{i=1}^n \frac{p_i (A_r)_i}{100 n_i \cdot F}$$

где је: ρ_i (g/cm³) - специфична маса, тј. густина легуре, p_i - процентуални удео појединих компонената у легури, $(A_r)_i$ - релативна атомска маса појединих компоненти и n_i - валентност појединих компоненти [2].

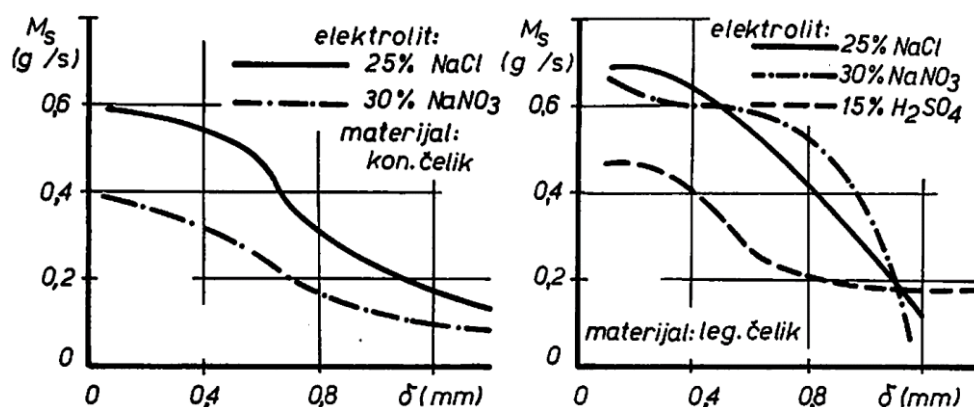
Производност електрохемијске обраде се може изразити и преко брзине кретања електроде, тзв. брзине линијског растварања, која је [2]:

$$s = q_t \cdot J \quad (\text{mm/min}) \quad \text{ако је } q_t \quad (\text{mm}^3/\text{Amin}), \text{ а } J \quad (\text{A/mm}^2)$$

У пракси се веома често јављају одређена неслагања између теоријске и стварне производности, где се дешава да стварна производност буде мања или већа од теоријске производности [2]. Због тога се уводи степен искоришћења процеса, односно [2]:

$$\eta_p = \frac{q_s}{q_t}$$

где је онда $q_s = q_t \cdot \eta_p$ - стварна специфична производност при електрохемијској обради (слика 2.15) [2].



Слика 2.15. Специфична производност при електрохемијској обради [1]

Према аутору М. Лазићу [1], количина раствореног материјала директно зависи од степена искоришћења електричне енергије, што значи да је стварна производност:

$$M_{st} = M \eta = K_e I t \eta \quad (\text{g}), \text{ односно}$$

$$V_{st} = V \eta = K_m I t \eta \quad (\text{mm}^3).$$

Специфична производност електрохемијске обраде у масеним, тј. запреминским јединицама [1]:

$$M_s = \frac{M}{t} = K_e I \quad (\text{g/min})$$

$$V_s = \frac{V}{t} = K_m I \quad (\text{mm}^3)$$

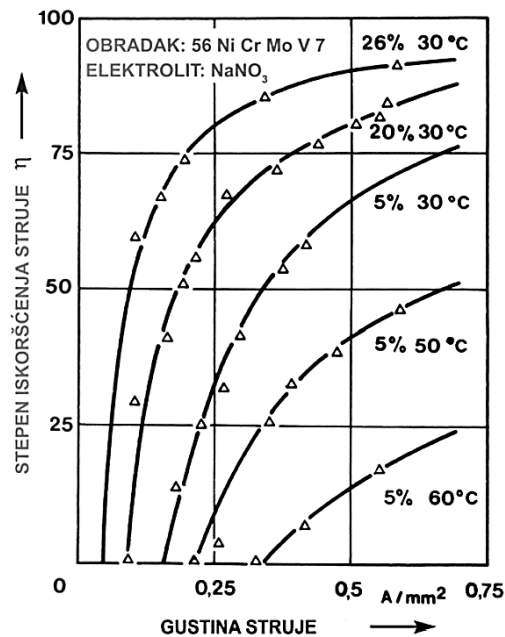
директно је пропорционална електрохемијском еквиваленту и јачини електричне струје (слика 2.15) [1].

Стварна специфична производност електрохемијског поступка обраде зависи од великог низа фактора, при чему су најважнији следећи: степен искоришћења електричне струје, стварна валентност метала, хемијско деловање електролита, густина електричне струје, брзина струјања електролита, структура материјала предмета обраде, радни зазор између електрода, температура и концентрација електролита и др. [2].

Степен искоришћења електричне енергије (струје) се дефинише као однос густине електричне струје која се троши за остваривање основних реакција процеса D_o (A/cm^2) и укупне густине електричне струје која пролази кроз електролит D (A/cm^2), односно [1]:

$$\eta = \frac{D_o}{D} 100 \quad (\%)$$

Степен корисног дејства електричне струје не може никад бити 100% (већ 85 до 90%), с обзиром да се део струје троши за електролизу воде и загревање електролита, а код неких електролита и за стварање металног оксида на аноди, што доводи до повећања отпорности између електрода, а тиме и до већег губитка електричне струје. На дијаграму са слике 2.16 дат је степен корисног дејства електричне струје η у зависности од густине електричне струје за различите концентрације и температуре електролита [2].



Слика 2.16. Степен корисног дејства електричне струје у зависности од густине електричне струје за различите концентрације и температуре електролита [2]

Уклањање вишка материјала при обради може бити резултат и електрохемијских и механичких процеса, тако да степен искоришћења енергије може имати различите вредности. Његова вредност зависи од материјала електрода, састава и концентрације електролита, густине електричне струје и других фактора, односно количине енергије која се троши на некористан рад (оксидација електрода, стварање водоника и сл.) [1].

Стварна валентност метала, где се врши обрада више валентних метала, обично није унапред позната или предвидљива, па самим тим стварна производност тих метала и њихових легура може доста да варира. Хемијско деловање електролита може код неких метала да утиче на повећање производности. Електрохемијском обрадом настаје чиста обрађена површина, која може лако бити нападнута од стране електролита. Количина материјала скинута хемијским путем зависи од материјала и електролита [2].

Брзина струјања електролита утиче на производност тако што се повећањем ове брзине до одређене вредности постиже брже испирање радног простора што утиче и на повећање производности. Ово се објашњава тиме што задржани електролит металним хидроксидом и издвојеним водоником има већу отпорност, па се интензивнијим одвођењем истог и заменом за свеж електролит смањује губитак електричне струје. Поред брзине струјања електролита, структура метала предмета обраде такође утиче на производност поступка електрохемијске обраде тако што се код ситнозрнасте структуре метала остварује већа производност, с обзиром да се најинтензивније растварање метала врши на границама кристалних зрна. На тај начин се зрна брзо ослобађају везе са материјалом и испадају пре него што се у потпуности растворе [2].

Радни зазор између предмета обраде и електроде (слика 2.8) утиче на густину електричне струје. Уколико је радни зазор мањи, већа је густина електричне струје, а тиме и интензитет растварања метала, тј. већа је брзина помоћног кретања електроде. Величина радног зазора се може изразити преко најутицајнијих параметара процеса обраде, тј. напона у електролиту, густине електричне струје и електропроводљивости [2]. Према аутору Д. Миликићу [2], струја која тече кроз електролит је према Омовом закону:

$$I = \frac{U - \Delta U}{R_e} ; R_e = \frac{a}{k \cdot P} ; k = \frac{1}{r_e} \rightarrow I = \frac{(U - \Delta U) \cdot k \cdot P}{a}$$

где је:

- $U - \Delta U$ (V) - напон у електролиту,
- R_e (Ω) - отпор електролита,
- a (cm) - радни зазор између предмета обраде и електроде (алата),
- k ($1/\Omega\text{cm} = \text{S/cm}$) - специфична проводљивост електролита,
- P (cm^2) - површина електроде и
- r_e (Ωcm) - специфични отпор електролита.

Ако се претходна једначина подели са површином електроде P добија се израз за густину електричне струје која тече кроз електролит J (A/cm^2), која представља веома важан параметар при електрохемијској обради [2]:

$$\frac{I}{P} = J = (U - \Delta U) \frac{k}{a}$$

Из претходне једначине се добија тражени израз за радни зазор између предмета обраде и електроде [2]:

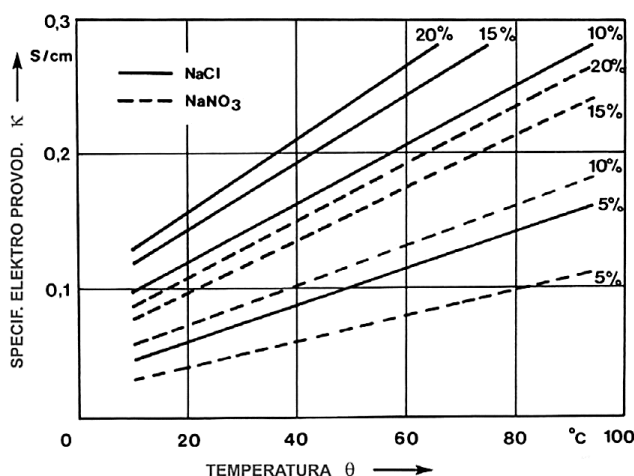
$$a = (U - \Delta U) \frac{k}{J}$$

Ако се из ове једначине изрази густина струје J , добиће се веза између брзине линијског растварања и радног зазора, односно [2]:

$$s = q_t \cdot J = (U - \Delta U) \frac{k \cdot q_t}{a}$$

Као што се види из претходних једначина, један од најважнијих фактора за повећање производности електрохемијске обраде је смањење радног зазора a . Међутим, најмања вредност радног зазора је ограничена низом фактора, као што су: појава кратког споја или електричног лука између електрода, отежана циркулација електролита кроз радни простор и др. Минималне вредности зазора који се постижу у пракси износе $0,05 \div 0,5 \text{ mm}$, зависно од напона, врсте електролита и густине електричне струје [2].

Температура и концентрација електролита утичу на производност обраде кроз промене специфичне отпорности електролита r_e , тј. специфичне електропроводљивости $k = 1/r_e$. На слици 2.17 је дата промена специфичне производности електролита k у зависности од температуре за различите електролите и њихове концентрације. Са дијаграма се види да је ова веза линеарна [2].



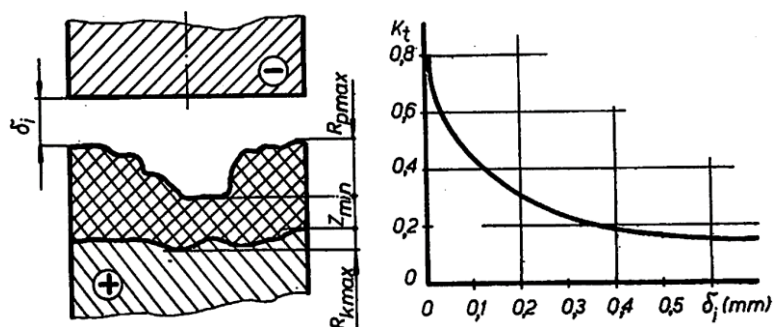
Слика 2.17. Зависности електропроводљивости k од температуре θ за различите електролите и њихове концентрације [2]

2.1.8.2. Тачност обраде

Електрохемијска обрада која се карактерише одсуством трошења алата и високим квалитетом обрађене површине, може довести до закључка да је она поступак обраде за завршне операције, што и није баш у потпуности тачно. Висока тачност електрохемијске обраде, значајна посебно у условима завршне обраде, обезбеђена је високим квалитетом обрађене површине и незнатним хабањем алата, а зависи од грешака обраде [1, 2].

Тачност електрохемијске обраде представља комплексан технолошки параметар који зависи од неколико фактора [2]:

- Фактори који су везани за машину на којој се обрада изводи у које спадају: тачност машине, тачност позиционирања предмета обраде и алата, крутост алата, као и крутост обрадног система машина-алат-предмет обраде. Сви ови утицаји су дефинисани избором машине и додатне опреме и на њих се врло мало може утицати приликом саме обраде.
- Фактори тачности облика и димензија који се могу постићи само при пажљивом пројектовању и изради електроде и
- Фактори везани за несавршеност електрохемијског процеса обраде, односно они фактори и параметри који утичу на промену пројектованог радног зазора између предмета обраде и електроде.



Слика 2.18. Коефицијент изједначавања при електрохемијској обради [1]

Узроци грешака могу бити општи и посебни, тј. спољашњи и унутрашњи. Општи узроци грешака су исти као и за све поступке обраде, а могу бити: грешке приликом израде машина, алата и стезних прибора, еластичне и топлотне деформације елемената технолошког система и тсл. Посебни узроци грешака су они који зависе од самог процеса обраде: величине зазора и његовом равномерношћу (храпавошћу полуфабриката), затим карактеристикама електролита (врста, концентрација, температура и сл.), режимом рада (непрекидни или импулсни), радни напон и тсл., посебно стабилношћу услова рада и параметара обраде [7].

Основна карактеристика тачности обраде је коефицијент изједначавања (сл. 2.18), чија је вредност одређена изразом облика [7]:

$$K_t = \frac{R_{pmax} - R_{kmax}}{z_{min} + R_{pmax}}$$

У изразима су R_{pmax} и R_{kmax} (μm) - максимална висина неравнина полуфабриката и готовог производа и z_{min} (μm) - минимална вредност додатка за обраду [1].

Повећањем вредности и коефицијента изједначавања површина повећава се и тачност обраде, посебно у условима када су вредности додатака за обраду релативно мале (табела 1). Кратка анализа података које су дате у табели 1, указује да се вредност

коэффициента (а и тиме и тачност обраде) повећава коришћењем електричне струје веће густине и применом одговарајућег састава и концентрације електролита у току процеса електрохемијске обраде [1].

Табела 1. Коэффициент изједначавања при електрохемијској обради челика (брзина струјања електролита 10 m/s, а температура 295 K) [1]:

Састав електролита	Концентрација електролита (g/m ³)	Густина електричне струје D (A/mm ²)		
		0,05	0,1	0,2
NaCl	150	0,32	0,32	0,32
NaNO ₃	100	0,19	0,23	0,41
NaNO ₃	500	0,35	0,46	0,69
NaNO ₃ + NaNO ₂	50	0,60	0,84	0,74

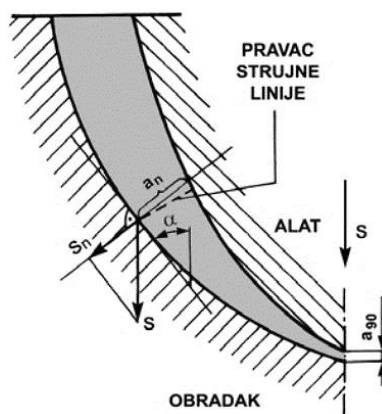
Конструкција улазног и излазног дела отвора, као и одвод електролита треба да обезбеде равномерно кретање електролита, без појаве турбуленције и представља један од значајнијих и утицајнијих фактора на тачност процеса обраде [1].

Највећи утицај на тачност електрохемијске обраде има промена радног зазора између предмета обраде и електроде. Ако су сви фактори у процесу обраде константни, онда за одржавање константног зазора у правцу помака треба да је брзина помоћног кретања електрода једнака брзини линијског растварања материјала. Радни зазор који се при томе остварује назива се равнотежни или чеони зазор и представља растојање између површине предмета обраде и електроде које стоје управно на правац брзине помоћног кретања и означава се са a_{90} [2]. Његова вредност се може одредити из једначине [2]:

$$a_{90} = (U - \Delta U) \frac{k \cdot q_t}{s} = \frac{C}{s}$$

где је C - константа за дате услове процеса електрохемијске обраде [2].

При обради косих или закривљених површина у односу на правац кретања (слика 2.19) долази до промене радног зазора, што за последицу има корекцију облика катоде (алата) [2].



Слика 2.19. Промена зазора a_n нормално на површину предмета обраде [2]

Продирање алата у предмет обраде се остварује тако што се свака тачка контуре предмета обраде креће брзином помоћног кретања s у правцу помака (слика 2.19). Ова брзина се може разложити у правцу нормале на контури предмета обраде при чему се добија компонента s_n . Зазор a_n , мерен у истом правцу, одговара приближно дужини струјне линије која иде у правцу нормале на обе површине (испрекидана линија) [2].

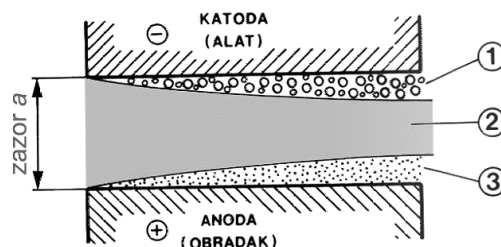
Користећи претходно изведени израз за величину зазора a_{90} , а на основу плана брзина са слике 2.19, добија се да је [2]:

$$a_n = \frac{C}{s_n} = \frac{C}{s \cdot \sin \alpha} = \frac{a_{90}}{\sin \alpha}$$

где угао α представља угао нагиба контуре предмета обраде у некој тачки [2].

Осим претходно изнете промене радног зазора, која произилази из природе самог процеса обраде и која се отклања корекцијом алата, присутне су још и варијације пројектованог радног зазора изазване нестабилношћу параметара електрохемијске обраде. С обзиром да се напон извора U може одржавати веома стабилним током процеса обраде (варијације су $\pm 1\%$), произилази да највећи утицај на промену радног зазора имају пад напона у електролиту ΔU , електропроводљивост k и густина електричне струје на које утичу промене које се одигравају у електролиту. То су пре свега температура и концентрација радне течности (електролита), као и његова задржаност продуктима обраде (талог хидроксида метала и гаса водоника) [2].

На сл. 2.20 је приказана типична шема структуре радне течности у радном зазору између електрода (анодe и катодe). С обзиром да слој водоника (1) и слој талoга (3) имају нижу електропроводљивост од чистог електролита (2), отпорност зазора се повећава у правцу тока електролита, што потом утиче на промену радног зазора. У стварности је ова промена доста сложеније природе и ствара знатне потешкоће при одређивању облика радног дела алата. Слој чистог електролита (2) може такође да буде различитог степена задржаности, па је зато измена електролита у радном простору веома важна и то не само са аспекта производности, већ и са аспекта тачности процеса обраде [2].



Слика 2.20. Шема структуре електролита у радном зазору између електрода: 1) слој засићен мехурићима водоника, 2) слој чистог електролита и 3) слој талoга продукта обраде [2]

Тачност електрохемијске обраде се стално повећава, где несавршеност одвијања процеса електрохемијске обраде у електролитичкој ћелији (унутрашњи параметри) учествује у укупној грешци обраде са 60-80 %, док остатак отпада на грешку машине и регулисања спољашњих параметара обраде, као што су: напон и струја извора напајања, брзина помоћног кретања, притисак, проток и својства електролита и др. [2].

Могуће је код серијске производње добије тачност електрохемијске обраде у границама од $\pm 0,01$ mm. То је могуће постићи само правилним управљањем спољашњим и унутрашњим параметрима процеса обраде. Управљање унутрашњим процесима, који зависе од процеса у простору између електрода, у највећем броју случајева је врло тешко. Применом импулсног напона се могу остварити веће тачности процеса обраде, нарочито приликом обраде сложених просторних површина, као и обраде великих површина [2]. Постоји више варијанти обраде импулсним режимом рада, од којих су најважније [2]:

- обрада кратким струјним импулсима при непрекидном помаку алата,
- обрада вибрирајућим алатом у импулсној струји и
- обрада у пулсирајућем току који сједињује промену брзине струјања електролита и импулса струје.

Импулси су обично правоугаони са временом трајања 0,01-0,04 s, с тим што се бољи резултати постижу при краћим временима импулса [2].

Грешке при електрохемијској обради у суштини проистичу из нестабилног радног зазора. На колебање радног зазора првенствено утиче промена услова процеса обраде: електрична проводљивост, затим степен искоришћења електричне струје, напон на електродама, електрохемијски еквивалент материјала и тсл. Нестабилност густине електричне струје, брзина струјања електролита и поларизациони напони такође имају знатан утицај на тачност процеса обраде. За оцену утицаја ових фактора користе се емпиријске вредности. Нестабилност напона има велики утицај на тачност обраде, где се сва колебања напона морају мерити због великог утицаја на тачност обраде [7].

Проблем тачности електрохемијске обраде се може решити: усавршавањем постојећих начина процеса обраде, као и откривањем и разрадом нових шема обраде. Усавршавање постојећих шема се огледа у стабилизацији параметара процеса, применом нових врста радних течности, увођењем гаса у зону обраде, смањењем радног зазора и корекцијом алата. Уобичајне тачности које се постижу електрохемијском обрадом се крећу у границама од 0,2-0,5 mm. При томе радијуси ивица износе око 0,05 mm, а конусност отвора 5 μ m на 1 mm. Увођењем гаса (ваздуха или инертног гаса) у зону обраде се могу достићи тачности обраде $\pm 0,05$ -0,1 mm [2, 7].

2.1.8.3. Квалитет обраде

Квалитет обрађене површине се карактерише особинама површинског слоја, као и храпавошћу обрађене површине, а зависи од структуре материјала предмета обраде, електричних и хидродинамичких параметара режима обраде, али и низа других мање или више релевантних фактора (врсте материјала предмета обраде, величине зазора, брзине кретања алата и сл.). Квалитет обрађене површине може да варира од врло високог N5 па све до врло ниског N9 [1, 2, 7].

Квалитет обрађене површине предмета обраде зависи од неколико следећих утицајних параметара [2]:

1. Својства материјала предмета обраде:

- нехомогеност материјала предмета обраде и присуство разних укључака погоршава храпавост површине,
- различита електрохемијска растворљивост појединих компонената у легури такође погоршава храпавост обрађене површине и
- крупноћа зрна у структури материјала предмета обраде, која је последица различитих термичких стања, битно утиче на храпавост површине, тако да се код финијих зрна добија мања храпавост површине и обрнуто.

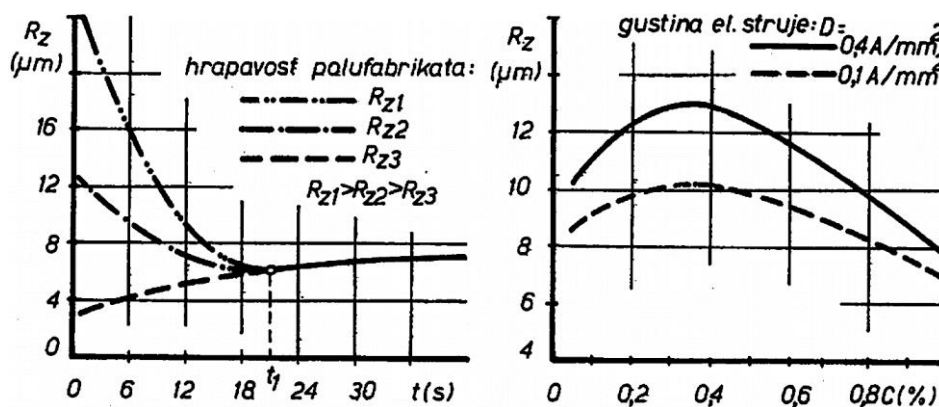
2. Врста и карактеристике примењеног електролита:

- NaCl - даје лош квалитет обрађене површине;
- NaNO₃, NaClO₃, и NaSO₄ - дају релативно добар квалитет обрађене површине,
- већа концентрација електролита побољшава квалитет обрађене површине.

3. Режим обраде, а пре свега густина електричне струје чијим повећањем се смањује храпавост обрађене површине.

Сама природа процеса електрохемијске обраде при уклањању вишка материјала као и непостојање механичких оптерећења алата, условљавају и основне карактеристике квалитета обраде (равномерна храпавост обрађене површине и значајно повећање чврстоће и отпорности на хабање површинских слојева предмета обраде). Равномеран распоред микроудубљења и микроузвишења, у свим правцима, обезбеђује повећање динамичке отпорности елемената, а измена микрорељефа обрађене површине није резултат кинематике процеса обраде, као код конвенционалних поступака обраде, већ измене особина електролита дуж радног зазора [1, 7].

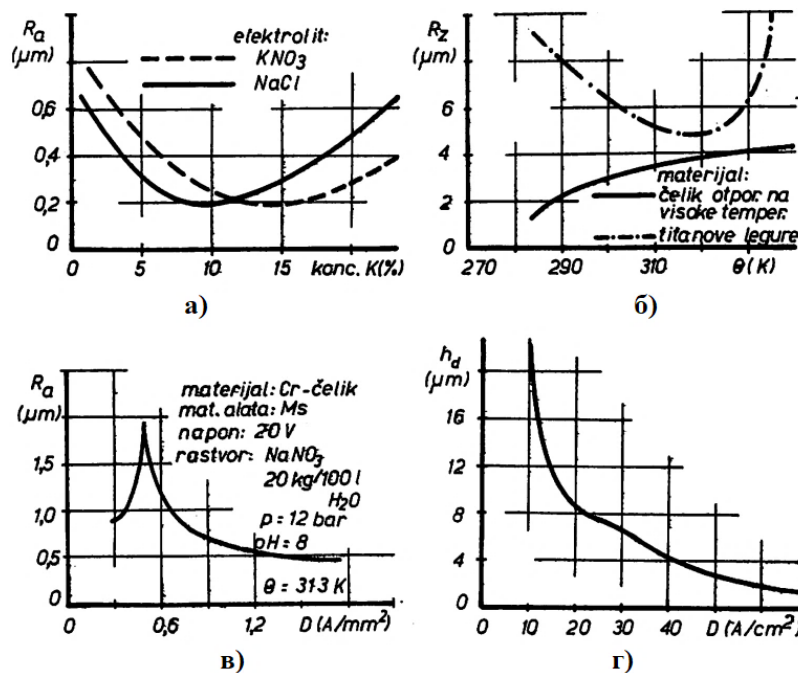
Храпавост обрађене површине има разнолик утицај све до момента достизања одговарајућег нивоа храпавости (до времена t_1) (слика 2.21). Од тог времена долази до стабилизације вредности параметара храпавости и иста не зависи од дубине слоја који се уклања. Након елиминисања првобитне храпавости, храпавост обрађене површине у највећој мери зависи од врсте, састава и структуре материјала предмета обраде и осталих параметара процеса. Појава неких хемијских елемената у материјалу предмета обраде, као на пример угљеника, хрома, кобалта, молибдена, титана и тсл., може довести до измене храпавости обрађене површине [1, 7].



Слика 2.21. Утицај храпавости полуфабриката, времена и садржаја угљеника на храпавост обрађене површине: утицај храпавости полуфабриката и времена (лево) и утицај садржаја угљеника (десно) [1]

При електрохемијској обради неког нехомогеног материјала малом густином електричне струје, интензивније се раствара она компонента која поседује већи потенцијал јонизације. Уколико се нпр. интензивније раствара основна компонента у легури метала, онда се она може потпуно растворити остављајући нерастворене друге компоненте у облику неравнина. У случају да нека од компонената легуре има већи потенцијал од основне масе, тада се растварају само те компоненте све док се зазор не смањи на вредност при којој почиње растварање и основне масе. Различита својства на границама кристалних зрна материјала могу исто тако да проузрокују неравномерност брзине електрохемијског растварања, а самим тим и већу храпавост обрађене површине предмета обраде. Структура метала и оријентације кристалних зрна у односу на ток електролита могу да изазову различите брзине растварања, што такође има знатан утицај на храпавост обрађене површине. Повећањем густине електричне струје добија се знатно мања храпавост обрађене површине [2].

Врста материјала предмета обраде, као и његова структура такође имају разнолик утицај на квалитет обрађене површине. При истим условима обраде, нпр. ситнозрнастој структури одговара бољи квалитет и обрнуто. На квалитет обрађене површине значајан утицај има и низ других параметара као што су врста, састав и температура електролита, брзина струјања и притисак електролита, јачина и густина електричне струје (слика 2.22), потом режим обраде (непрекидни или прекидни - импулсни) итд. [1, 7].



Слика 2.22. Утицај врсте, састава (а) и температуре (б) електролита на вредност средње висине неравнина обрађене површине; Утицај густине електричне струје на средњу аритметичку вредност (в); Утицај густине електричне струје на дубину дефектног слоја (г) [1]

На квалитет обрађене површине има утицај и радни зазор између електрода и предмета обраде. Мањи радни зазор значи и мањи напон између електрода, а то доводи до бољег квалитета обраде. Да би повећали квалитет обрађене површине неопходно је повећати брзину рада, а са тиме и радну струју смањујући при томе радни зазор. Ово је међутим могуће вршити само до извесне границе, јер исувише мали зазор доводи до читавог низа појава које се негативно одражавају на процес обраде [7].

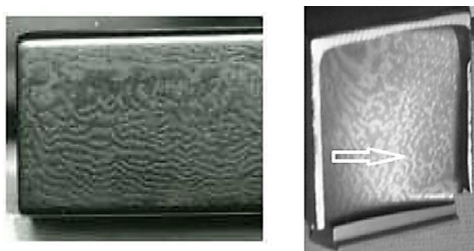
Када је реч о површинском слоју треба нагласити да при процесу електрохемијске обраде не долази до појаве микропукотина, заосталих напрезања и других дефеката карактеристичних за конвенционалне поступке обраде резањем. Зависно од параметара режима обраде долази до појаве питинга (*pitting*) (површинског замора), међукристалне и унутаркристалне корозије и незнатног смањења механичких карактеристика (до 20%) површинских слојева. Погоршање карактеристика по дубини (слика 2.22г) површинских слојева своди се на минимум адекватним избором услова обраде, а посебно врсте, композиције и концентрације електролита, затим хлађењем електролита до температуре од 275-280 K и применом импулсног режима рада. Нарочито значајан утицај има врста струјања електролита унутар зазора. При ламинарном струјању формира се квалитетнији површински слој него при турбулентном струјању, када је вредност Рејнолдсовог броја $Re > 6 \cdot 10^3$. Дубина дефектног слоја (слика 2.22г) предмета обраде је одређена саставом и температуром електролита, јачином и густином електричне струје, али и низом мање или више релевантних параметара [1].

Квалитет обрађене површине обратка је могуће побољшати повећањем густине електричне струје, снижењем температуре електролита до 275-280 K, па и ниже, избором одговарајуће врсте и концентрације електролита, пројектовањем оптималних услова обраде и другим мерама које могу довести до смањења издвајања водоника и побољшања услова електрохемијске обраде. Једна од карактеристика електрохемијске обраде јесте појава интензивног растварања границе кристалних зрна, што проистиче из разлике потенцијала између границе зрна и електролита. То доводи до неједнаког растварања површине зрна и границе зрна, односно долази до стварања микропукотина [1, 7].

Електрохемијска обрада је одређена уклањањем атома са аноде, где је површина ње врло често прекривена оксидним филмом. Формирањем тог оксидног филма на површини метала се може пореметити процес обраде и добити нижи квалитет обраде. Уклањање ових оксидних филмова може оштетити површину аноде, тако што се њеним уклањем растварају и границе кристалних зрна, али се може десити да дође и до питинга површине аноде. Питинг се при електрохемијској обради дешава настанком гасова у радном зазору, где гасни мехурићи разбијају оксидни филм изазивајући локални питинг. Различите храпавости површина приликом обраде настају услед различите структуре кристалних зрна и њихове оријентације, валова и граница кристалних зрна. Коришћењем непасивизирајућих електрода и електролита, затим смањење концентрације електролита, као и повећање температуре доводе до боље обрађене површине, док при коришћењу пасивизирајућих електрода и електролита, повишење температуре доводи до формирања оксидног слоја који потом доводи до смањења квалитета обрађене површине [11, 20, 22]

Пошто се код електрохемијске обраде облик алата „копира“ на предмет обраде, било који дефект и оштећење на површини алата (катоде) може довести до лоше обраде и добијања храпаве површине аноде. Да би се добио висок квалитет обрађене површине потребно је остварити униформну брзину протока електролита у радном зазору, као и коришћење крутих стезних прибора, који ће држати на одговарајућем растојању аноду током целог поступка обраде. Ради побољшања квалитета површине радних предмета електрохемијска обрада се може користити након других поступака обраде, као нпр. за уклањање дефектног слоја насталог електроерозионом обрадом. Анодно растварање метала умногоме зависи од локалног протицања електролита, па тамо где не постоји континуираност у протоку електролита долази до лошијег квалитета обраде, односно до повећања храпавости обрађене површине радног предмета [8, 24, 29].

Ефекат хидродинамичког протока електролита на топографију површине предмета обраде је приметан. У процесу обраде, а посебно у радном зазору се дешавају веома комплексни стохастички процеси, што може да доведе до лошије површинске обраде. Пример таласастих дефеката насталих на површини предмета обраде након електрохемијске обраде је приказан на слици 2.23, где је узрок хидродинамички проток електролита на граничним слојевима аноде и електрохемијске нестабилности [8].



Слика 2.23. Пример хидродинамичких дефеката при електрохемијској обради, где стрелица указује на правац протока електролита [8]

Раније је појашњено да ламинарно струјање електролита доноси најбољи квалитет обрађене површине, док је турбулентно струјање непожељно. Приликом турбулентног струјања доводи до различитих локалних струјања електролита, а тиме и до различите брзине одношења материјала са предмета обраде. Већина турбулентног струјања електролита доводи до стварања дуплог електричног слоја, где јони путују само до Хелмхолцовог слоја (слика 2.7) при чему долази до слабије обраде површине аноде. Комплетан циклус турбулентног струјања електролита (кретање електролита и чишћење површине електрода електролитом) се назива „феномен заплускавања“. Током трајања овог феномена делићи електролита који се налазе уз површину стварају вртложне струје (сл. 2.24 лево). Ове вртложне струје отежавају трансфер маса при процесу обраде [8].



Слика 2.24. Илустрација настанка вртложних струја током турбулентног струјања електролита (лево) и дијаграм густине електричне струје током турбулентног струјања електролита и изглед обрађене површине предмета обраде услед вртложних струја (десно) [8]

Густина електричне струје расте на местима удара вртложних струја електролита и доводи до повећања брзине локалног анодног растварања (слика 2.24 десно). Својства примењеног електролита такође утичу на храпавост површине. Најчешће употребљавани раствор NaCl у принципу даје лошији квалитет површине, а који се може побољшати повећањем његове концентрације. Применом одговарајућих параметара процеса могуће је добити бољи квалитет обраде овим електролитом. У неким случајевима електрохемијске обраде могу се јавити разни дефекти у површинском слоју, као што су: међукристална корозија, водонична крстост, образовање оксидних слојева, питинг и др. Ови дефекти се избегавају избором оптималних режима при обради или се накнадно уклањају додатним операцијама, применом других поступака обраде. У одређеним случајевима се после електрохемијске обраде примењују поступци ојачавања површина путем пластичног деформисања, осим код делова који раде у условима високих температура [2, 8].

2.1.9. Предности и недостаци електрохемијске обраде и њен утицај на животну околину

Процес електрохемијске обраде и реализација низа производних операција, мање или веће сложености у погледу облика и димензија предмета обраде, одликује се низом предности уз евидентне недостатке који даље ограничавају ширу примену процеса електрохемијске обраде у производним условима [1].

Основне предности процеса електрохемијског поступка обраде су: једноставност конструкције и ниска цена алата, мало трошење алата и његов дуг век трајања (хабање алата скоро практично и не постоји), висок квалитет обрађене површине, уз одговарајућу тачност израде, висок квалитет површинског слоја без изражених дефеката (потпуно хладан поступак обраде), јефтин електролит, висока производност (и до $50.000 \text{ mm}^3/\text{min}$) итд. Међутим, низ недостатака као што су: потреба одржавања константне вредности радног зазора и других параметара процеса, велики утрошак електричне енергије (где се за 1 kg уклоњеног материјала утроши и до 1000 Ah), неопходност уклањања водоника из радне средине (при растварању 1 kg материјала створи се око $0,5 \text{ m}^3$ и више водоника), споро уклањање материјала у односу на друге обраде итд. ограничавају ширу примену електрохемијске обраде у индустријској пракси [1, 11].

Електрохемијска својства у процесу обраде, тј, прскање електролита и његово испаравање, могу изазвати проблеме очију и коже код радника који рукују машином. Такође, токсична испаравања могу оштетити плућа и довести до опасних дисајних проблема. Највећу опасност по животну околину представља искоришћени електролит и талог који се ствара током и након процеса електрохемијске обраде [11].

2.2. Технолошки поступци и производне операције

Електрохемијска обрада се користи за израду делова сложених конфигурација и мале крутости, обраду неприступачних површина и високо квалитетних материјала који су склони образовању пукотина (силицијум, германијум, берилијум и тсл.), као и за реализацију низа других производних операција [1]. У зависности од начина на који се изводи обрада, у основи се разликују следеће две врсте електрохемијске обраде [2]:

1. Електрохемијска обрада са посебно обликованом катодом која има задатак да предмету обраде обезбеди високу тачност и квалитет обрађене површине. Ова врста обраде се још назива и димензионална електрохемијска обрада и када се уопште говори о поступку електрохемијске обраде, онда се обично и мисли на ову врсту обраде. Постоје два вида ове обраде:
 - електрохемијска обрада покретном електродом и
 - електрохемијска обрада непокретном електродом.

Први вид обраде се користи за израду разних врста алата и калупа и делова сложеног геометријског облика, као и за бушење дубоких отвора (тзв. *STEM* поступак обраде), док се други вид обраде користи за фино калибрисање отвора, обарање оштрих ивица, контурну обраду (нпр. жлебова за подмазивање), гравирање, означавање и др. [2].

2. Електрохемијска обрада без посебно обликоване електроде, при чему се та обрада изводи у купатилу (кади) у коме је предмет обраде само уроњен у електролит. То је површинска електрохемијска обрада којом се врши полирање, обарање оштрих ивица, одметализирање и др. С обзиром на одсуство електроде на коју отпада већи део трошкова, ова врста електрохемијске обраде је врло економична и може се користити и при обради мањег броја комада, што није случај са претходном врстом електрохемијске обраде која је економична само у серијској производњи.

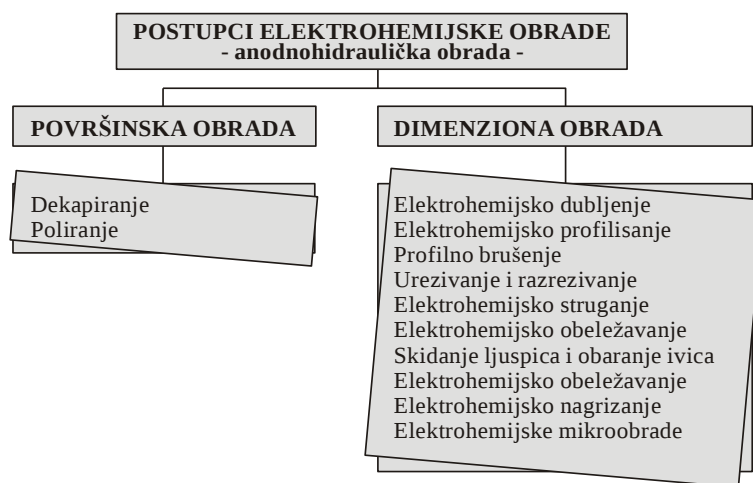
Електрохемијским поступком обраде се могу обрађивати сви електропроводљиви материјали, али је његова примена, због високе цене алата, економичнија само за обраду врло тврдых или жилавих материјала и њихових легура које се конвенционалним поступцима обраде тешко могу обрађивати, као и за обраду сложених површина [2].

Електрохемијском обрадом се практично могу изводити многе операције којима се обликују најразличитије површине, слично као и при конвенционалним обрадама стругања, бушења, глодања (нарочито профилног), рендисања, брушења провлачења, израде навоја, израде зупчаника и др. При свим тим операцијама је веома битно да облик алата и кретања при обради буду међусобно усклађени како би се добио жељени облик, квалитет и тачност обрађене површине предмета обраде [2].

У зависности од самог механизма одношења материјала, као и начина одвођења продуката из зоне обраде, разликују се следећи поступци електрохемијске обраде [7]:

- аноднохидраулична - електрохемијско хидраулична обрада и
- анодномеханичка - електрохемијско механичка обрада.

Аноднохидраулична обрада представља један вид електрохемијске обраде где се одношење материјала врши искључиво анодним растварањем површине предмета обраде помоћу електричне струје из једносмерног извора које остварује електрично коло преко радне течности (електролита). Аноднохидраулична обрада се примењује како за површинску обраду тако и за димензиону обраду (сл. 2.25). Ова обрада се може изводити са проточним електролитом под притиском, као и у непокретном електролиту [7].



Слика 2.25. Поступци аноднохидрауличних обрада [7]

Поред електрохемијског декапирања и полирања, у површинску електрохемијску обраду спадају још и електрохемијско обарање оштрих ивица и одметализирање [2].

Код аноднохидрауличне електрохемијске обраде се алат и предмет обраде налазе потопљени у електролиту који под притиском долази у радни зазор одакле уклања, тј. скида пасивизирајући слој и односи продукте обраде са површине аноде. И алат и анода су прикључени на генератор једносмерне струје који даје електричну струју доста велике јачине и густине, а ниског напона. Јачина електричне струје, нарочито на почетку обраде, зависи од величине радног зазора на појединим местима алата и предмета обраде. Тако се постепено обликује површина аноде обликом алата и на њој се добија негативан одраз истог. Аноднохидраулична обрада се примењује за израду делова врло сложеног облика, отвора, канала и жлебова за профилно бушење, као и за израду микроотвора [33].

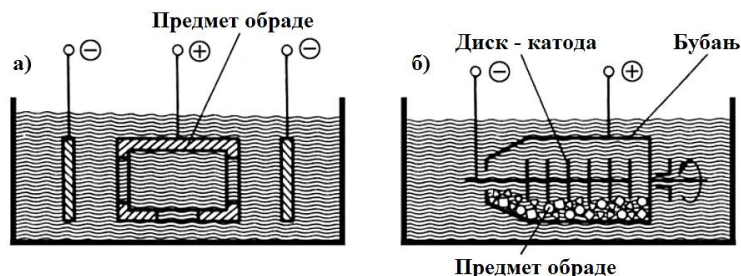
Предности аноднохидрауличне обраде јесу: обрада тешко обрадивих материјала, где механичке особине предмета обраде не утичу на брзину растварања материјала, израда компликованих геометријских облика, затим не постоји непосредан (механички) контакт алата и предмета обраде (могућа је обрада танких и не крутих делова), нема хабања алата ни загревање предмета обраде, као и већа производност него код других поступака обраде одношењем материјала. Недостаци аноднохидрауличне обраде јесу: настанак корозије на предмету обраде услед присуства воде у раствору електролита, релативно ниска тачност обраде, затим постоје потешкоће у отклањању талога анодног растварања и у управљању процесом обраде сложених форми уз достизање неопходне тачности, као и постојање неопходности за обезбеђивањем интензивне циркулације електролита у процесу обраде [33].

Анодномеханичка обрада или електрохемијско механичка обрада се базира на истовременом одношењу материјала из зоне обраде анодним растварањем и механичким скидањем помоћу одређених абразивних средстава. Абразив у спојеном или слободном стању скида са обрађиване површине предмета обраде танки пасивизирајући анодни слој где се укупни скинути материјал изводи изван зоне обраде протоком радног медијума, односно електролита. С обзиром на начин механичког скидања пасивизирајућег анодног слоја у којима се абразивно средство при обради налази, анодномеханичка обрада може да се изводи путем следећих поступака: покретним абразиво носећим алатом, абразиво носећим електролитом велике брзине и електро-неутралним алатом [33].

Анодномеханички вид електрохемијске обраде се користи за бушење, затим за резање, глачање, полирање каљеног челика, тврдих легура и осталих сличних материјала, као и за оштрење алата за резање и тсл. [33].

2.2.1. Површинска електрохемијска обрада

Површинска електрохемијска обрада или електрохемијска обрада у купатилу је поступак за скидање површинског слоја применом спољашњег извора електричне струје (слика 2.26). Густине електричне струје су у поређењу са просторном (димензионалном) електрохемијском обрадом знатно ниже ($0,01 \div 3 \text{ A/cm}^2$). Ова обрада се одвија у купатилу (кади) са електролитом без просторно (димензионално) обликоване електроде [2].

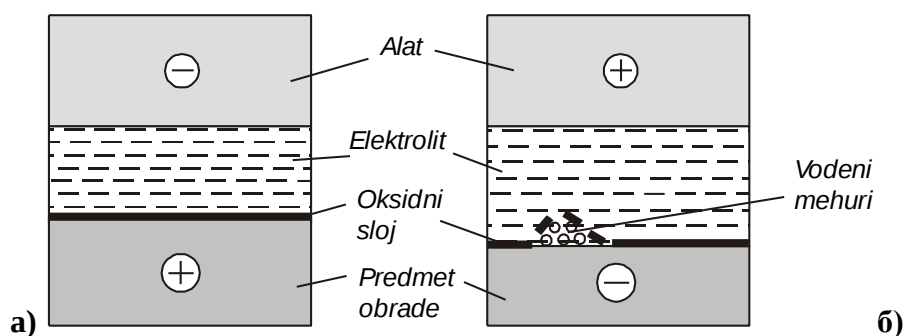


Слика 2.26. Поступци површинске електрохемијске обраде [2]

У поређењу са галванском техником, овде се врши скидање материјала, а не наношење. Обрада се врши на свим површинама предмета обраде на којима електролит може несметано да делује. Слика 2.26 приказује неколико варијанти површинске обраде које се међусобно разликују по врсти електролита и начину извођења процеса обраде [2].

2.2.1.1. Електрохемијско декапирање

Електрохемијско декапирање јесте вид површинске електрохемијске обраде који се користи за уклањање оксидних слојева који су формирани при претходним термичким и хемијским обрадама на различитим деловима или полупроизводима. У зависности од дебљине оксидних слојева или његовог хемијског састава користе се анодна или катодна метода електрохемијског декапирања (слика 2.27) [7].



Слика 2.27. Шема анодног (а) и катодног (б) декапирања [7]

Анодно декапирање се користи за уклањање танких оксидних превлака при чему је предмет обраде анода (сл. 2.27а). За одстрањивање релативно већих дебљина слојева оксидних превлака (0,3-0,5 mm) користи се катодно декапирање (слика 2.27б). Приликом електролизе на местима где се прекида оксидни слој (пукотина) формирају се водени мехури који одвајају оксидни слој од чисте површине метала [7].

Најбољи ефекти и највећа ефикасност процеса декапирања се постижу приликом промене полова. У овом случају се у првом периоду врши уклањање оксидних слојева помоћу водених мехура, док се у другом периоду анодним растварањем уклањају остаци оксидних слојева и добија се чиста метална површина. Декапирање представља почетну фазу у технологији заштите металних површина наношењем боја или превлака [7].

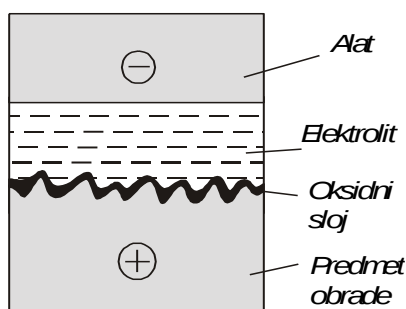
2.2.1.2. Електрохемијско полирање

Многе нечистоће из разних процеса производње се не налазе само на спољашњој површини предмета обраде, него и у танком површинском слоју материјала. Задирање алата, уља, средстава за хлађење и подмазивање, масноће, као и остатака од средстава за брушење и полирање се уносе при механичкој обради у површину, а потом прекривају слојем метала тако да постају отпорни према свим процесима површинског чишћења. Тај слој ствара многе сметње при даљем току обраде. Због тога тај слој мора уклонити, али тако да се у површину предмета обраде не унесу нове стране честице или да се површина предмета обраде поново оштети, као на пример задирањем у границе кристалних зрна. Тако нешто је могуће постићи једино применом поступка електрохемијског полирања које технички и економски у потпуности задовољава све потребне захтеве. Њиме се електрохемијским путем скида танак површински слој материјала предмета обраде, без механичког или термичког напрезања [2].

Електрохемијско полирање се користи за уклањање неравнина на предмету обраде који су настали претходним поступцима обраде. Предмет обраде је анода, док су катодe равне или обликоване плоче. Равномерност обраде се постиже лаганим кретањем (или окретањем) предмета обраде или кретањем електролита. Одговарајућим избором електролита, густине електричне струје и температуре процеса може се остварити веома висок квалитет полираних делова (слика 2.28) [7].

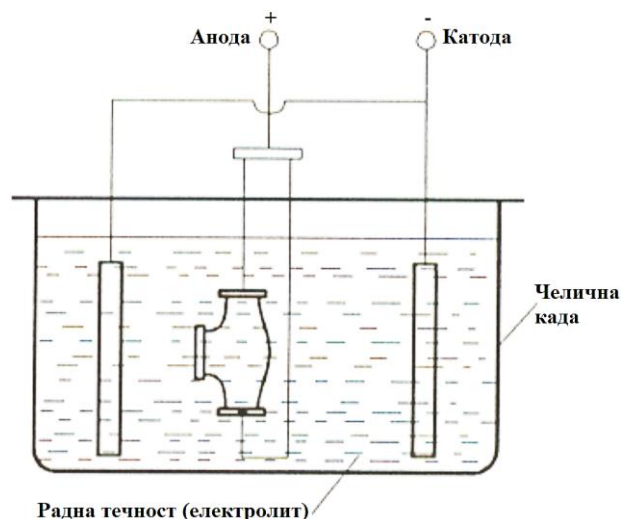
Механизам процеса електрохемијског полирања се заснива на формирању танког вискозног слоја на површини предмета обраде, при чему се тада проузрокује селективно одношење материјала са највиших места профила неравнина површине. У конкавним деловима површине (удубљењима) слој је дебљи, чиме спречава пролаз струје и успорава процес одношења материјала. На конвексним деловима површине (испупченим) слој је тањи, остварује се добар пролаз струје услед тањег анодног слоја и врши се интензивније одношење материјала. Тиме је добијена равномерније полирана површина обратка [7].

Алати могу бити равни или обликовани. Равномерност обраде се може постићи лаганим окретањем предмета обраде, или померањем електролита ваздушном струјом. Да би се добио захтевани квалитет завршне обраде, потребно је врло пажљиво изабрати електролит, густину електричне струје, као и температуру самог процеса обраде [33].



Слика 2.28. Шема електрохемијског полирања [7]

При електрохемијском полирању дефекти већих димензија, као што су на пример огреботине, пукотине, валовитост дела итд., се не могу одстранити јер је слој који се уклања овим процесом обраде веома мали. Осим полирања металних површина, овим поступком се истовремено постиже и најфиније обарање оштрих ивица на комаду. Фино полирање и уклањање оштрих ивица врши се на свим површинама, па и оним које су за друге поступке обраде неприступачне. Приликом обраде се не врши никакво механичко оптерећење комада, где се такође искључује и топлотно оштећење предмета обраде, с обзиром да се процес обраде изводи на собној температури [2, 7].



Слика 2.29. Шема процеса електрохемијског полирања [33]

На слици 2.29 је приказана шема процеса електрохемијског полирања у челичној кади. У пракси се висока површинска чистоћа захтева само код делова за специфичне и неконвенционалне намене, као што су нуклеарна постројења, као и код погонских група за ваздушне (авиони, хеликоптери) и свемирске летелице (спејс шатли). Даље подручје примене електрохемијског полирања јесте побољшавање квалитета површинске обраде, али и смањење храпавости у циљу смањивања процеса трења код зупчаника, вратила и других клизних елемената [2].

2.2.1.3. Електрохемијско обарање оштрих ивица у електролитским купатилима

Поступак електрохемијског обарања оштрих ивица у инсталацији постројења са електролитским купатилом (најчешће у комбинацији са електрохемијским полирањем) се користи за одстрањивање малих количина материјала са ивица предмета обраде. Сви отвори се за време процеса обарања ивица истовремено и глачају, чиме постају мање осетљиви на дејство корозије [2].

При овој врсти обраде се постижу знатно краћа времена обраде у поређењу са механичким обарањем ивица, што је даље и у директној вези и са смањењем трошкова примене овог поступка обраде. Такође, могуће је истовремено извршити и фино обарање бројних оштрих ивица, које би се иначе другим поступцима обраде резањем веома тешко могли извести [2].

2.2.1.4. Електрохемијско одметализирање

Поступак електрохемијског одметализирања се примењује пре свега у галванској техници за одстрањивање металних слојева на погрешно галванизованим деловима. Са великим успехом се овај вид поступка електрохемијске обраде примењује и за добијање племенитих метала из електронског отпада, поломљених комада и шкарта [2].

Принцип рада овог поступка обраде се заснива на електрохемијском скидању металних слојева са електропроводљивих основних материјала, нпр. одхромирање. Као радни медијум, односно електролит се првенствено користи сумпорна киселина и водени раствор NaNO_3 [2].

2.2.2. Димензионална електрохемијска обрада

Димензионална електрохемијска обрада представља алтернативну методу поступцима механичке обраде резањем и има за циљ да предмет обраде добије захтевани облик, димензије и тачност. У поређењу са површинском електрохемијском обрадом, при димензионалној обради густина електричне струје је знатно већа и може достићи вредности и до 800 A/cm^2 [7].

Величина радног зазора између алата и обрађиваног дела умногоме зависи како од брзине кретања алата тако и од интензитета растварања материјала предмета обраде. Са друге стране, на облик обрађиване површине утиче и величина радног зазора, тако да систем за управљање и контролу радног зазора представља веома битну карактеристику инсталације и додатне опреме која се користи за извођење поступака димензионалне електрохемијске обраде [7].

Важна карактеристика овог процеса обраде је што се алат не троши (под условом да у реакцији са електролитом не долази до корозије). За разлику од других поступака обраде, однети материјал из зоне обраде није у виду метала (материјала предмета обраде) већ у облику металних хидроксида [7].

Данас димензионална електрохемијска обрада заузима веома значајно место међу свим неконвенционалним поступцима обраде. Ови поступци обраде се примењују у различитим подручјима машиноградње, где посебну примену налази у производњи делова реактивних мотора за операције копирног глодања, израде профилних отвора, провлачење, ожлебљења, заобљавања ивица итд. Електрохемијским поступком обраде се могу обрађивати сви електропроводни материјали, али најзначајнија примена је за обраду веома тврдих и жилавих материјала који се другим поступцима обраде, било класичним (конвенционалним), било неконвенционалним не могу обрадити [7].

Димензионална електрохемијска обрада се може класификовати у зависности од карактера кретања електрода, и то на [1, 7]:

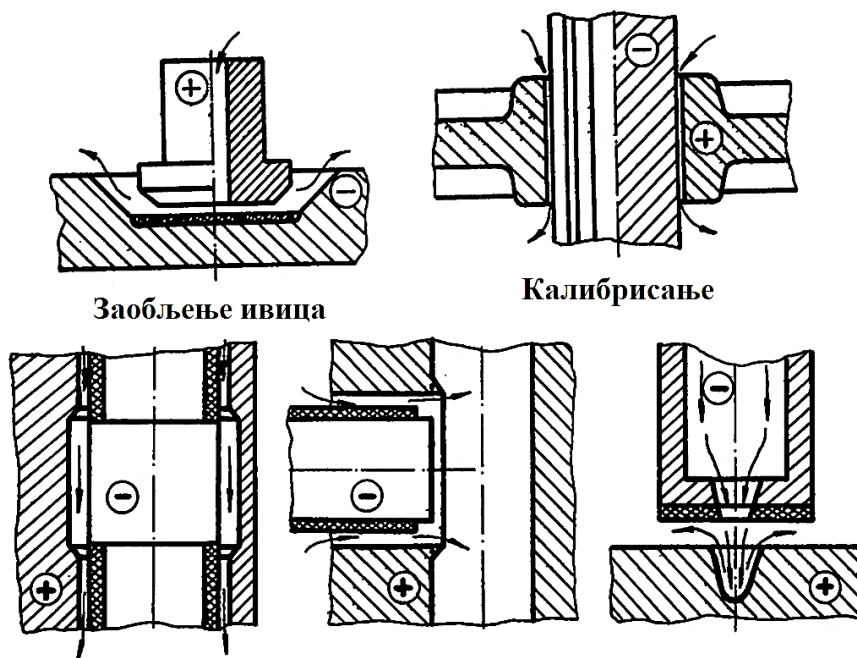
- електрохемијску обраду са непокретним електродама,
- електрохемијску обраду са постепено покретним електродама,
- електрохемијску обраду са обртном катодом,
- електрохемијску обраду са обртном анодним и
- електрохемијску обраду са сложеним кретањем електрода.

У наставку текста биће описана свака подела димензионалне електрохемијске обраде и дати примери производних операција.

Електрохемијска обрада непокретним електродама

Електрохемијска обрада непокретним електродама се користи за реализацију различитих производних операција (слика 2.30) као што су: калибрисање спољашњих и унутрашњих отвора и површина, потом обарање и заобљавање оштрих ивица, гравирање, односно означавање, затим формирање отвора и канала за подмазивање мање или више сложених конфигурација (код брегастих и коленастих вратила, елемената хидрауличних и пнеуматских система и тсл.), израда и обрада комплексних конфигурација са већим бројем ивица (зупчаници, ожлебљена вратила, сепаратори лежишта итд.), операције израде канала сложених конфигурација на унутрашњим цилиндричним површинама (клипњачама, капсулама), контурну обраду (нпр. жлебова за подмазивање или за смештај заптивача), гравирање итд. [2, 7].

Најтачнија обрада се постиже при уклањању релативно малих додатака за обраду (0,05-0,2 mm), када је измена конфигурације, као и величине зазора незнатна. Основне предности овог поступка електрохемијске обраде јесу већа једноставност кинематике и конструкције производне опреме. Недостаци овог електрохемијског поступка обраде јесу мала ефективност (нарочито при обради полуфабриката мање тачности, као што су одливци и отковци), релативно ниска тачност поступка обраде (тачност је условљена изменом конфигурације и величине зазора) и тсл. [1].



Слика 2.30. Неке од производних операција електрохемијске обраде са непокретним електродама [1]

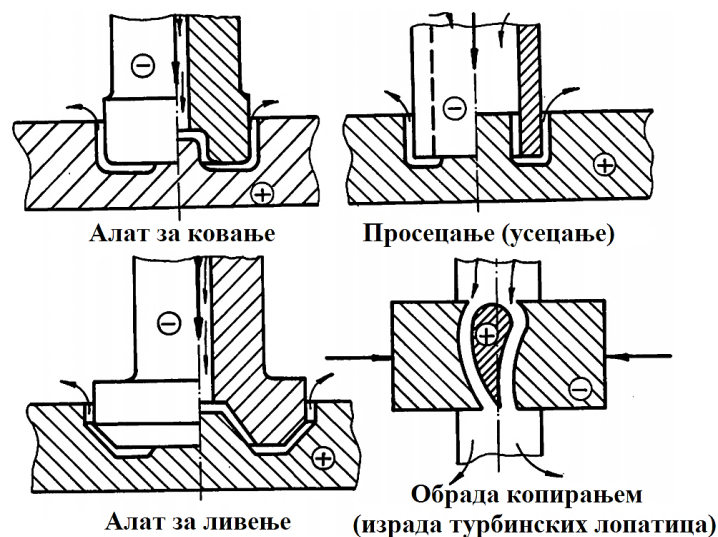
Димензионална електрохемијска обрада са непокретним електродама примењује се, пре свега, у серијској и великосеријској производњи за обарање оштрих ивица код делова погонских уређаја, мотора, као и код хидрауличних и пнеуматских машина, јер се при таквој производњи постиже највећа економичност процеса [2].

Електрохемијска обрада са постепеним померањем електрода

При постепеном померању једне од електрода (најчешће катодe) могуће је у пракси реализовати: просецање и усецање, затим бушење отвора различитих профила, израду површина сложених конфигурација, односно копирање (гравуре калупа и алата за ковање, ливење, пробијање, просецање, компресорске и турбинске лопатице, завојне жлебове и тсл.), потом оштрење алата, калибрисање итд. [1].

Применом електрохемијске обраде са постепеним померањем електрода постиже се повећање производности (чак 4-6 пута), као и смањење обима накнадних браварских радова (за 2 до 3 пута у односу на класичне конвенционалне механичке поступке обраде резањем, као што је нпр. обрада копирним глодањем) [1].

У новије време се посебно усавршавају електрохемијски поступци израде отвора малих пречника ($d = 0,05-10 \text{ mm}$ и односа дубине и пречника $l/d \leq 200$), који су познатији под називом *STEM*, *ECF*, *EJ* или *ESD* поступци електрохемијске обраде [1]. Слика 2.31 приказује неке од производних операција димензионалне електрохемијске обраде са постепеним померањем електрода:

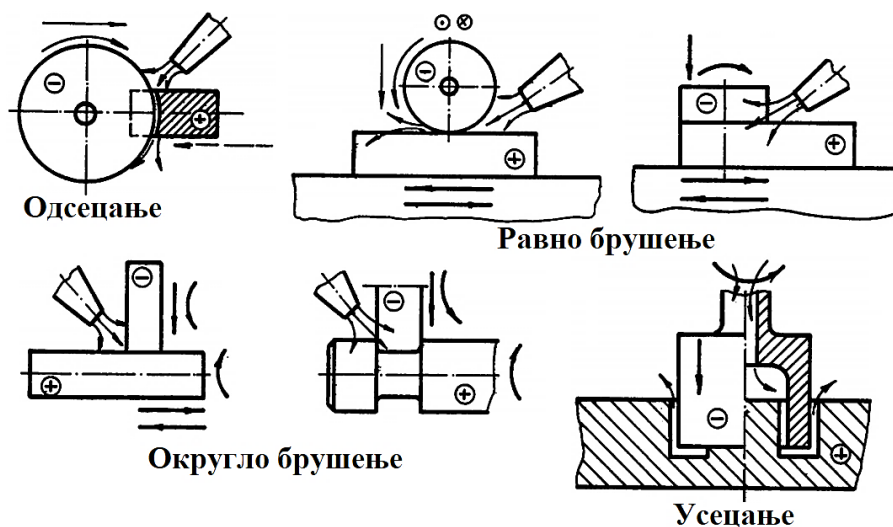


Слика 2.31. Неке од производних операција електрохемијске обраде са постепеним померањем електрода [1]

Овај поступак електрохемијске обраде се највише примењује у пракси и то за израду: делова реактивних и ракетних мотора (нуклеарна, авионска и војна индустрија), турбинских кола (израда равних или закривљених лопатица и других делова сложеног геометријског облика од топлоотпорних материјала), затим специјалних пумпи и других делова инсталација високог притиска (сложени облици од високоотпорних материјала), разних врста калупа за ковање, пресовање и ливење (за израду већег броја истих алата од високолегираних челика и алатних челика ниже тачности обраде, нпр. за израду делова аутомобила - клипача, радилица, каросерија), као и других специјалних делова (израда уских жлебова, дубоких отвора, сложених површина, танкозидних површина итд.) [2].

Електрохемијска обрада при обртној катоди

Електрохемијска обрада са обртном катодом се користи за равно и профилисано глодање, брушење, израду навоја, одсецање и сл. (сл. 2.32). При интензивној циркулацији електролита у веома малом радном зазору (до 0,01 mm), као и великим брзинама обртања катодe (и до 50 m/s и више), постиже се висока тачност и ефективност процеса обраде (уклањање велике количине материјала) [1].

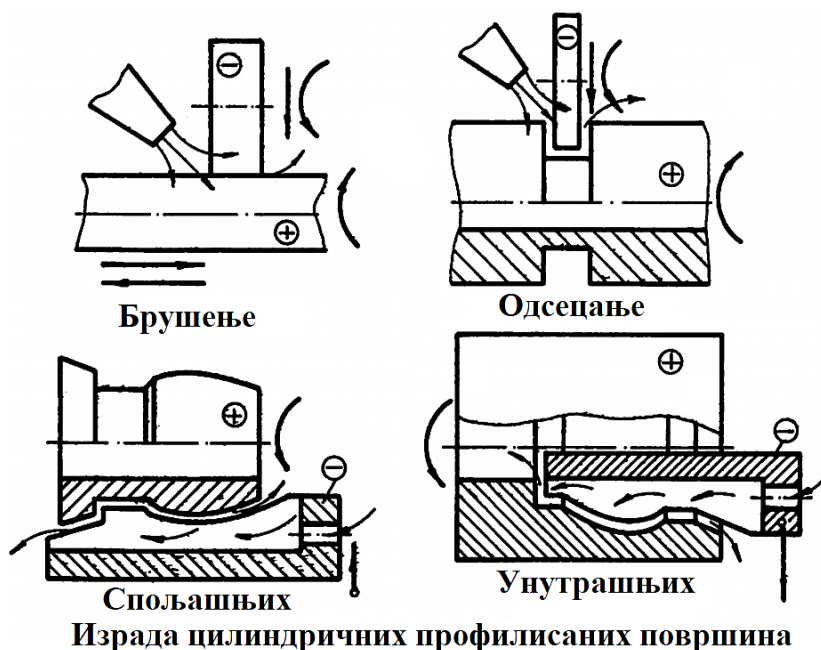


Слика 2.32. Неке производних операција електрохемијске обраде при обртној катоди [1]

Поступци електрохемијске обраде са обртном електродом се доста брзо развијају где су данас настале разне нове модификације и измене овог процеса, кроз коришћење основних кинематских шема карактеристичних за конвенционалне (механичке) поступке обраде метала резањем. Најрационалнија примена овог поступка електрохемијске обраде јесте код обраде тешко обрадљивих материјала, као и при високим захтевима у погледу квалитета обрађене површине и тачности обраде, а посебно код елемената мале чврстоће и стабилности [1].

Електрохемијска обрада при обртној аноди

Применом различитих поступака електрохемијске обраде при обртној аноди (слика 2.33) омогућава се упрошћавање конструкције алата - катодe, затим могућност израде предмета великих димензија на машинама мањих димензија и снага извора напајања (посебно у авионској, свемирској и ракетној техници), као и обрада површина сложених конфигурација и тсл. [1].

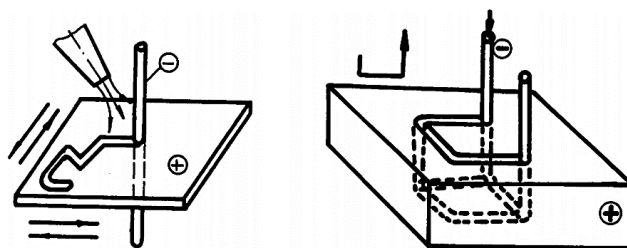


Слика 2.33. Производне операције електрохемијске обраде са обртном анодом [1]

Развојем индустријске производње и многих поступака електрохемијске обраде са обртном анодом обезбеђује се велика универзалност процеса електрохемијске обраде, затим повећање продуктивности и економичности израде и обраде различитих елемената машина, механизма и уређаја, као и повећање ефективности и ефикасности појединих конвенционалних поступака обраде резањем (обраде струграњем, брушењем, сечењем, полирањем и тсл.) и значајније повећање њихове области примене [1].

Електрохемијска обрада са сложеним кретањем електрода

Електрохемијска обрада са сложеним кретањем електрода се изводи коришћењем жице или перфориране цеви, где се примењује за реализацију производних операција као што су: израда гравура, зупчаника, матрица за извлачење, разних шаблона итд. [1]. Слика 2.34 приказује основне принципе димензионалне електрохемијске обраде са сложеним кретањем електрода:



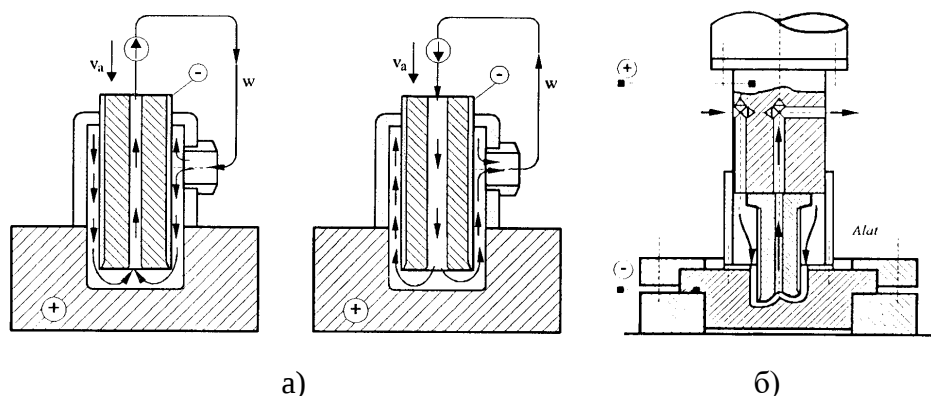
Слика 2.34. Основни принципи електрохемијске обраде са сложеним кретањем електрода [1]

Сам поступак обраде омогућава формирање сложених конфигурација површина предмета обраде коришћењем алата мале чврстоће, при минималном губитку материјала и минималном утрошку енергије. Применом танке жице (пречника од 0,3 до 0,5 mm) или перфориране цеви постиже се врло мала ширина резног слоја и локално - анодно растварање материјала предмета обраде [1].

2.2.2.1. Електрохемијско бушење (дубљење)

Израда рупа и отвора сложеног облика захтеване тачности се може доста успешно реализовати применом електрохемијске обраде. У литератури се често овај поступак обраде може наћи и под именом електрохемијско дубљење (*Electro Cavity Sinking*). Ова обрада се најчешће изводи електродом цевастог облика са протоком електролита кроз централни отвор (слика 2.35) [7].

Поступак електрохемијског бушења (дубљења) се врши тако што се алат - катода поставља веома близу предмета обраде, тако радни зазор при обради износи 0,05-0,2 mm и кроз њега се врши интензиван проток електролита. Материјал алата је најчешће месинг, нерђајући челик или бакарне цеви прекривене споља изолацијом. У зависности од жељеног облика, величине и дубине отвора врши се обликовање катоде која се у току обраде помера константном брзином од 0,5-10 mm/min. Густина електричне струје је при томе 0,5-5 A/mm², а јачина електричне струје се креће и до 10.000 A. Обрада се врши при напону од 5-20 V. Пошто се у току самог процеса обраде електролит загрева уз повећање садржаја продуката обраде, потребно је интензивно кретање, односно циркулисање електролита у радном зазору између алата и предмета обраде. Због тога је у току обраде потребно доводити електролит под притиском 50 до 150 N/cm² [7].



Слика 2.35. Производне операције бушења - дубљења [7]

Електрохемијским бушењем - дубљењем (слика 2.35) се могу добити и отвори сложених конфигурација, као и истовремена израда већег броја отвора. Облик отвора је одређен обликом алата - катоде (слика 2.35б). Дубљењем се могу добити отвори већих дубина ($L/d > 10$) у тешко обрадљивим материјалима [7].

Гравуре код алата за пресовање, ковање и за пластичне масе се могу обрађивати дубљењем са тачношћу обраде од 0,1 - 0,2 mm (слика 2.35б). Гравуре се обрађују после термичке обраде и формирања базних површина на које се предмет обраде наслања. Ако се пре електрохемијске обраде формира грубо обрађена површина другим поступцима обраде (нпр. копирно глодање) оставља се одговарајући додатак који износи [7]:

$$\Delta = \delta \cdot \ln \left(\frac{h}{h_k} \right)^n$$

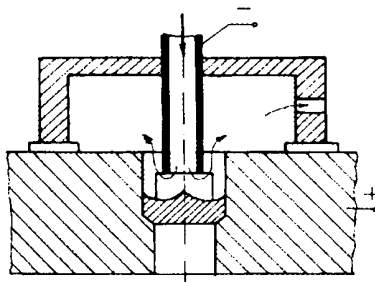
где је:

- δ - чеони зазор ($\delta = 0,2 - 0,3$ mm за $\Delta = 3 - 4$ mm и $h = 15 - 50$ mm),
- h - максимална дубина гравуре,
- h_k - дозвољена нетачност облика на крају обраде и
- n - експонент у изразу ($n = 0,7 - 0,85$).

Механизам самог поступка процеса обраде се састоји од тога да се обрада дешава у радном зазору формираном између спољашње површине алата и аноде, где се после настанка почетног отвора алат помера унутар отвора у аноди. Димензије између зидова радног предмета и централне осе катодe је већа него пречник катодe. Густина електричне струје у тој области је мања од остатка радног простора у коме се дешава обрада. Пошто током обраде димензије отвора постају веће, померање алата унутар отвора се повећава. Уклањање метала одређено је густином електричне струје као и анодним растварањем, у складу са Фарадејевим законом електролизе [20, 22].

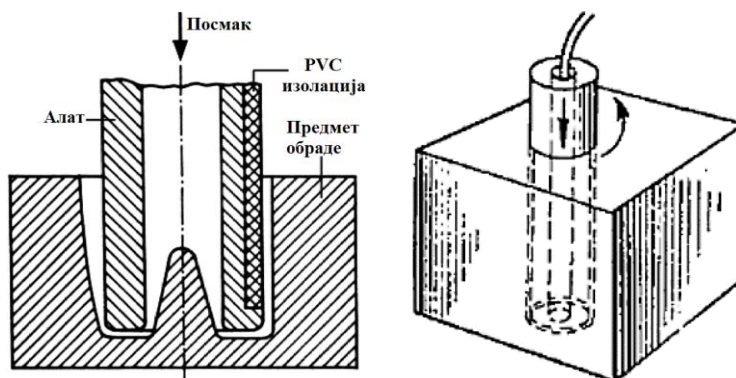
За већу тачност и бољи квалитет обраде препоручује се употреба веће брзине померања катодe, чиме се постиже још већа брзина уклањања материјала, као и већа производност. Као што је претходно наведено, потребно је доводити електролит под притиском чиме се настали гасови и талог одводе из радног зазора и постиже несметан процес обраде. Повећање притиска у радном зазору повећава проводност електролита, чиме се побољшава процес анодног растварања због повећаног протока електролита и смањују се димензије насталих водоничних гасних мехура, што је описано у претходним поглављима. Електролит под притиском исто спречава настанак дефеката на површини радног предмета - аноде, што је приказано на слици 2.23. Главни недостатак овог система обраде је пораст цене коштања алата - катодe, али и повећање хидрауличних сила. Коришћењем алата који се ротирају постиже се хомогеност у протоку електролита. Такође, ефикасност енергије (електричне струје) која је мања од 100% може довести до формирања пасивизирајућег слоја који смањује процес анодног растварања [11, 30].

Током неког процеса обраде се може десити ломљење алата. Вађење поломљеног алата (сл. 2.36) се успешно може вршити електрохемијским дубљењем, с тим што треба изабрати такав електролит да се врши само анодно растварање поломљеног дела алата. Обично се зона обраде локализује помоћу посебне коморе из које се одводи електролит са честицама скинутог материјала [7].



Слика 2.36. Вађење поломљеног алата [7]

Уколико се обрада отвора врши цилиндричном (округлом) електродом, онда се због бочног растварања материјала неће добити цилиндричан отвор већ параболичан (лева страна слике 2.37). Да би се то спречило, спољашња површина електроде се изољује па електрода врши обраду само чеоном површином, чиме се омогућава да отвор буде заиста цилиндричног облика (десна страна на слици 2.37) [2].

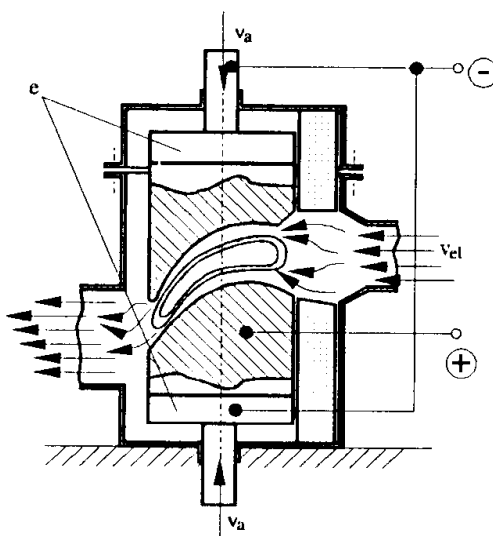


Слика 2.37. Грешка код електрохемијског бушења [2, 28]

Електрохемијским бушењем (дубљењем) се могу бушити отвори разних пречника и дубина, од врло малих пречника отвора као што је 0,05 mm, па све до великих пречника отвора као што је 75 mm. За отворе пречника од 0,5 - 1 mm дубине избушених рупа могу бити и до 110 mm. Облик избушених отвора овим поступком обраде не мора бити само округао, већ може бити и разних других облика који су одређени обликом алата - катодe. Најчешћа примена овог поступка обраде је код производње отвора за хлађење у гасним турбинама за моторе авиона и ракета [20, 22].

2.2.2.2. Електрохемијско профилисање

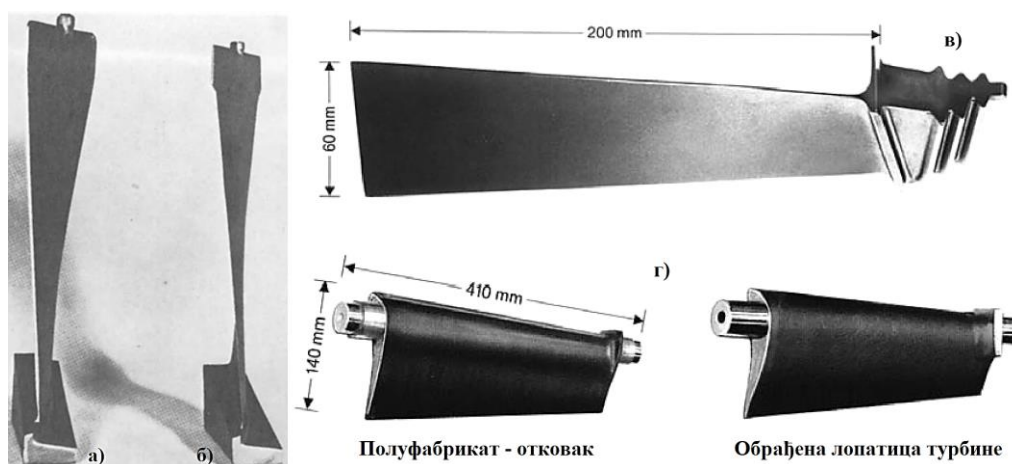
Основна примена електрохемијског профилисања је код спољашње обраде тела сложеног облика. Овај поступак обраде се изводи интензивним млазом електролита под високим притиском. Поступак је сличан поступку електрохемијског дубљења и нарочито је погодан за обраду делова аеродинамичког облика, као нпр. за обострано обликовање лопатица гасне турбине (слика 2.38). На овај начин се може остварити чак и 2 до 3 пута већа производност него при конвенционалним поступцима обраде резањем [7].



Слика 2.38. Обработка профила лопатице турбине [7]

Обрада покретним електродама профила лопатица турбине се врши само у једној операцији, при чему је брзина одношења материјала 0,4 - 0,6 mm/min, тачност $\pm 0,1$ mm, храпавост обрађене површине осме класе, а време обраде од 10 до 20 минута. При обради поступком електрохемијског профилисања одржава се константан притисак у радној комори од 0,5 до 0,6 МПа, чиме се обезбеђује константан радни зазор између електрода. Електрохемијска обрада непокретним електродама се може вршити и у циљу дораде претходно отпресованих или профилисаних лопатица турбине или неких других делова. Такође, овај поступак електрохемијске обраде се може вршити у циљу калибрисања претходно урађене сложене површине [7].

Алат је дизајниран тако да одговара жељеној контури финалног производа. Обе стране лопатице могу бити обрађиване истовремено заједничким померањем две катодe око претходно фиксиране аноде. Материјал катодe који се уобичајно користе јесте бакар, мада се могу користити катодe направљене од бронзе, легуре бакра и волфрама, титана, нерђајућег челика и месинга. Да би се добио задовољавајући квалитет и тачност обраде мора се обратити посебна пажња на дизајн катодe и чврсто фиксирање аноде да би се добило униформни проток електролита кроз радни зазор [43].

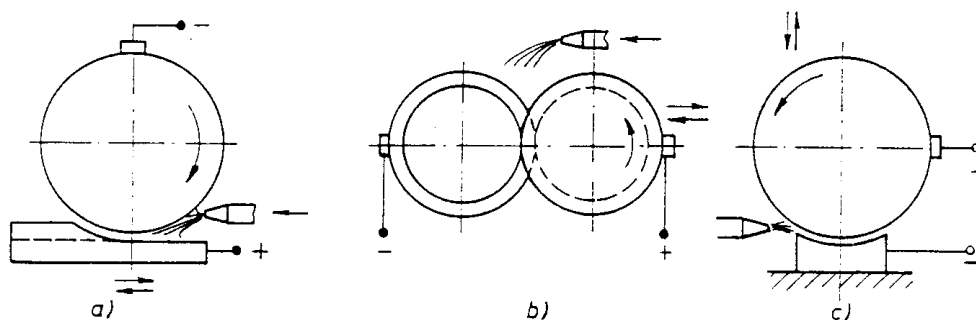


Слика 2.39. Обработка профиля лопатице турбине: а) лопатица након ковања и б) након процеса електрохемијског профилисања; в) турбинска лопатица за реактивне моторе и г) лопатице водених турбина [2, 24]

Материјали који су најчешће у употреби за лопатице турбина (легуре на бази Ni, Co и Ti) су отпорни на високе температуре, као и антикорозиони тешко обрадљиви челици који се тешко се могу обрађивати конвенционалним поступцима обраде резањем. На слици 2.39 су приказана турбинска кола (лопатице) разних величина који су обрађени електрохемијским профилисањем. У неким случајевима су облик и димензије лопатица такви да се не могу израђивати заједно са телом, па се морају појединачно израђивати. Примери таквих лопатица су дати на слици 2.39в и 2.39г, за чију израду се користе две електроде које омогућавају истовремену обраду обе стране лопатице [2].

2.2.2.3. Профилно брушење

Електрохемијским профилним брушењем (сл. 2.40) се могу брусити веома тешко обрадиви материјали као што су тврди метали, нерђајући и каљени челици, ватроотпорне легуре, магнезијумове легуре итд. Поступак се може изводити обртном или непокретном електродом. Електролит се доводи кроз млазницу, бива захваћен електродом која ротира и унет у зону обраде. Обимна брзина у овом случају је 10 до 20 m/s па и више. Дубина скидања материјала у једном пролазу може бити до 1 mm [7].

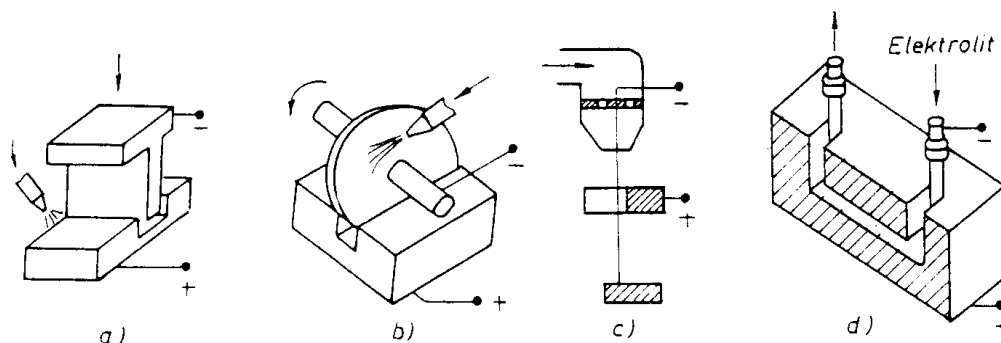


Слика 2.40. Операције профилног брушења [7]

Различитим операцијама профилног брушења се може постићи шеста до седме класе храпавости обрађене површине при обради разних нерђајућих и ватроотпорних легура, где тачност обраде износи $\pm 0,1-0,01 \text{ mm}$. При специфичној густини електричне струје од $150-200 \text{ A/cm}^2$ постоји могућност постизања производности овог вида поступка обраде од $400-500 \text{ mm}^3/\text{min}$ [7].

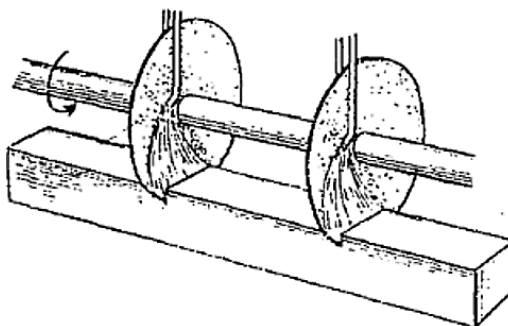
2.2.2.4. Урезивање и сечење

Разни тешко обрадиви материјали се могу успешно обрађивати електрохемијским поступком обраде разним призматичним и котурастим плочастим алатима (слика 2.41). Код овог поступка обраде режими су исти као код дубљења, док се електролит доводи са стране кроз млазницу [7].



Слика 2.41. Операције урезивања и сечења [7]

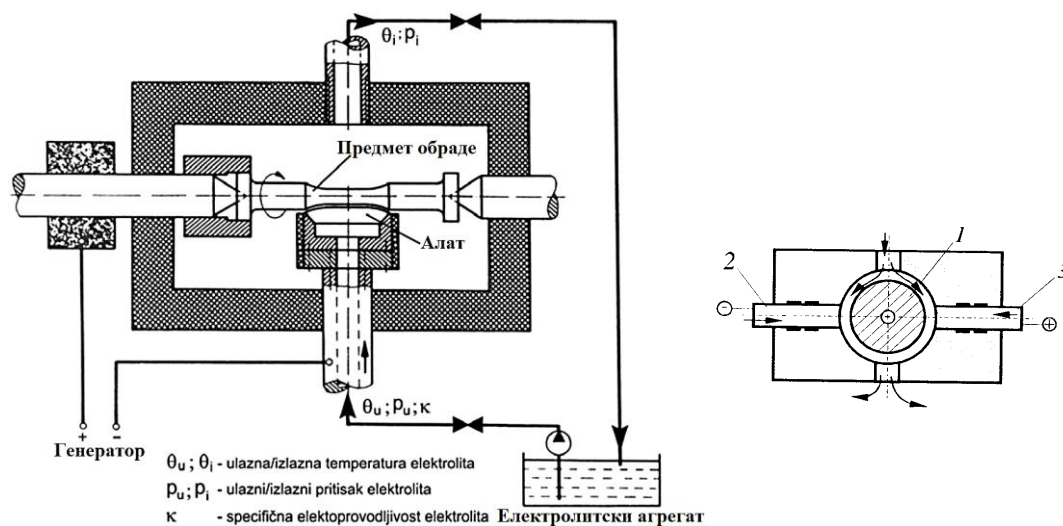
За урезивање сложених профила у предмет обраде може се користити непокретна електрода у облику жице, при чему се дефинише кретање дела у зависности од облика потребног профила. Сечење са обртним алатом се врши при брзини од чак 30 m/s , док се електролит доводи кроз млазницу. При овим поступцима обраде бочне стране алата су изоловане, тако да само чеона страна алата врши обраду (слика 2.42) [7].



Слика 2.42. Операција сечења [28]

2.2.2.5. Електрохемијско стругање

Електрохемијско стругање се изводи најчешће при ротацији електроде - аноде, тј. предмета обраде. Овај поступак обраде се може изводити са једним или више алата. На слици 2.43 је приказана обрада цилиндричног предмета обраде са две катодe. Електроде се крећу радијално ка предмету обраде кроз носаче који су од изолационог материјала. Овим поступком обраде се добија веома квалитетна обрађена површина радног предмета без видљивих трагова обраде. Посупак обраде је врло погодан за обраду веома танких цилиндричних (цевастих) делова [2, 7].

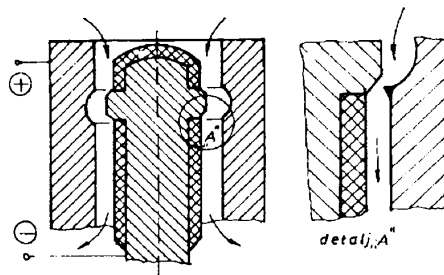


Слика 2.43. Шема операције електрохемијског стругања са једним и два алата [2, 7]

На сл. 2.43 је прикана принципијелна шема операције електрохемијског стругања са два алата заједно са основним параметрима обраде. Обрада се може вршити и само са једним алатам. Обрађена површина је без површинских напона, који су карактеристични за конвенционалне поступке стругања, а применом одговарајућих параметара обраде добијају се врло глатке површине предмета обраде без трагова стругања [2].

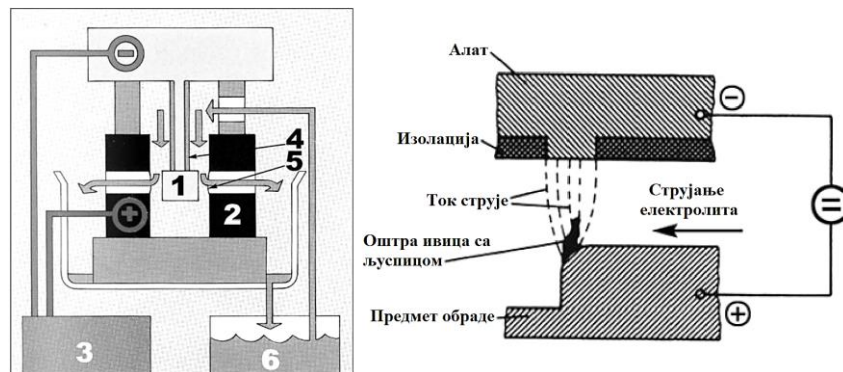
2.2.2.6. Скидање љуспица и обарање оштрих ивица

Овај поступак електрохемијске обраде се посебно користи за обраду веома малих додатака за обраду на неприступачним местима. То је посебно значајно у авио и ракетној техници, као нпр. за обраду канала за довод горива где је потребна веома велика чистоћа канала. Обрада материјала се врши на принципу локалног анодног растварања метала у току електролита при радном зазору од 0,5 mm и густини електричне струје од 5 A/cm² (слика 2.44). Код површина алата које не учествују у процесу обраде врши се изолација да не би дошло до кратког споја и нежељеног варничења [7].



Слика 2.44. Поступак обарања ивица [7]

При обради поступком обарања ивица нема помоћног кретања електроде. Алат се само поставља у радни положај тако да радни зазор између предмета обраде и алата буде у границама од 0,5 - 1 mm и то пре укључивања агрегата за електролит и радног напона генератора. Погодном изолацијом електроде ток електричне струје, самим тим и скидање материјала се усмерава према оштрим ивицама, које још могу бити увећане и љуспицама материјала заосталог из претходне обраде, као нпр. код бушења, просецања и др. [2].



Слика 2.45. Принципијелна шема обарања оштрих ивица и скидања љуспица применом електрохемијске обраде са извученим детаљом: 1) алат, 2) предмет обраде, 3) генератор, 4) изолација електроде, 5) оштре ивице које треба одстранити, 6) електролит [2]

Параметри процеса обраде обраде су: радни напон 10-35 V, густина електричне струје 0,25-1 A/mm², водени раствор соли као електролит, као и радни зазор 0,5-1 mm. Алат (1) (катода) и предмет обраде (2) (анода) су прикључени на извор једносмерне струје (3). Применом изолације електроде (4), дејство електричне струје се уско усмерава према оштрим ивицама (5) на предмету обраде. Захваљујући заједничком деловању електролита и једносмерне струје, материјал предмета обраде се раствара само на тим местима. Растворени материјал предмета обраде, као хидроксид метала, одлази са електролитом који интензивно струји кроз радни простор машине [2].

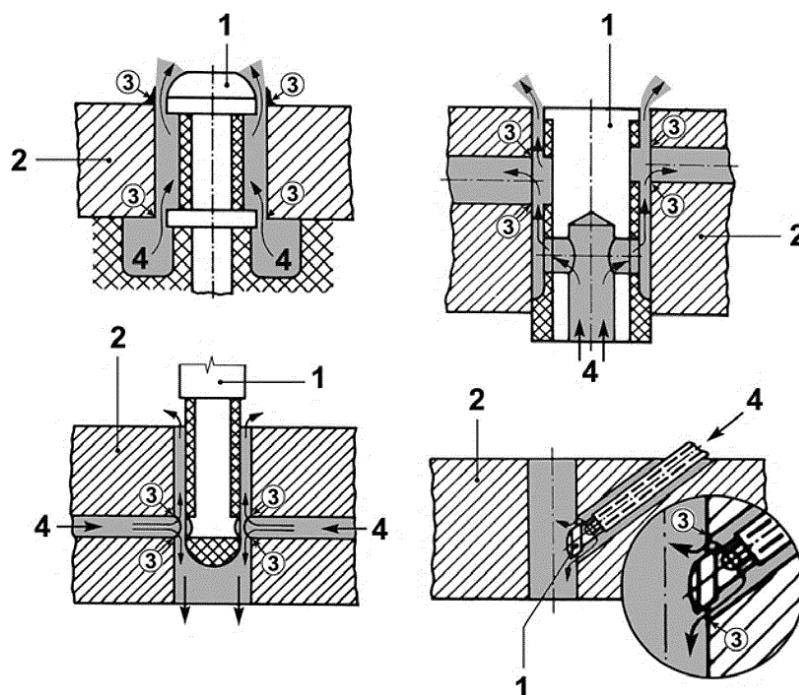
Раван алат (катода) је постављен супротно у односу на предмет обраде на коме се налазе оштре ивице и неправилности на површини. Густина електричне струје на врху ивица је већа него на осталом делу предмета обраде, чиме се постиже лако уклањање оштрих ивица и постиже глатка површина предмета обраде. Алат при овој обради је фиксиран. Скидање оштрих ивица је веома брз и ефикасан поступак обраде, што се може закључити и на основу времена обраде које се креће између 5 и 40 секунди [2, 20].

Примена овг вида електрохемијске обраде је технолошки и економски оправдана само уколико су у производњи присутни [2]:

- високи трошкови механичког скидања оштрих ивица,
- велики број комада на којима се врши обарање оштрих ивица,
- проблематично скидање оштрих ивица на изласку избушених отвора,
- присуство оштрих ивица на тешко приступачним местима на предмету обраде,
- потреба за додатно заобљавање при обарању оштрих ивица и др.

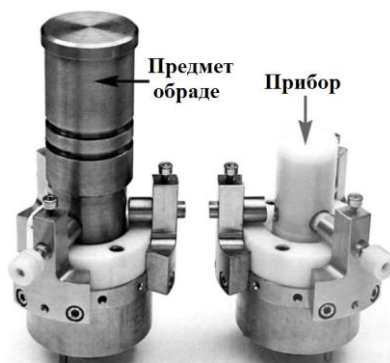
Конвенционални поступци обарања оштрих ивица на тешко доступним местима стварају доста потешкоћа, јер се врло тешко могу аутоматизовати, што је веома важно, нарочито код великосеријске и масовне производње [2]. У том случају, обарање оштрих ивица применом електрохемијске обраде нуди велике предности које се огледају у [2]:

- обарању оштрих ивица на сложеним контурама и тешко приступачним местима (слика 2.46) применом одговарајућег облика електроде и
- могућности да се процес обраде потпуно аутоматизује.



Слика 2.46. Карактеристични примери примене електрохемијске обраде за обарање оштрих ивица и скидање љуспица на тешко приступачним местима: 1) катода - алат, 2) предмет обраде - анода, 3) оштра ивица која се обара са или без љуспица, 4) довод електролита [2]

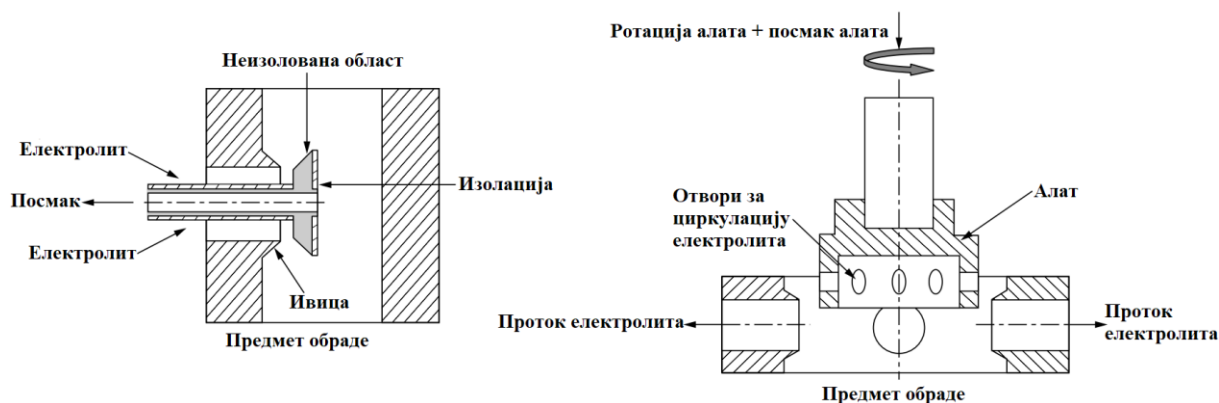
Услед доста високе цене машине, али и сложеног и врло скупог стезног прибора за предмет обраде, као и саму електроду, примена овог поступка електрохемијске обраде је оправдана само у великосеријској и масовној производњи. На слици 2.47 је дат пример једног таквог стезног прибора за прихватање предмета обраде и електроде при поступку електрохемијског обарања ивица [2].



Слика 2.47. Изглед једног изведеног стезног прибора за обарање оштрих ивица са предметом обраде [2]

Пре саме примене овог поступка електрохемијске обраде потребно је извршити пажљиву припрему предмета обраде интензивним чишћењем и скидањем разних наслага и нечистоћа. Ово је веома важно због тога што залепљена струготина може да доведе до појаве кратког споја, тј. варничења, док насlage оксида и масноће могу да, с обзиром на њихова изолациона својства, доведу до повећања електричног отпора. Као резултат тога је појава неравномерног скидања материјала са предмета обраде и појава шкарта [2].

Фарадејев закон електролизе диктира колико ће материјала бити уклоњено овим поступком обраде. Брзина поступка обраде се може кретати чак и до 400-500 mm/min. Овај вид обраде може поред непокретног алата имати и покретни ротациони алат чиме се повећава брзина обраде и производност целокупног поступка [11].

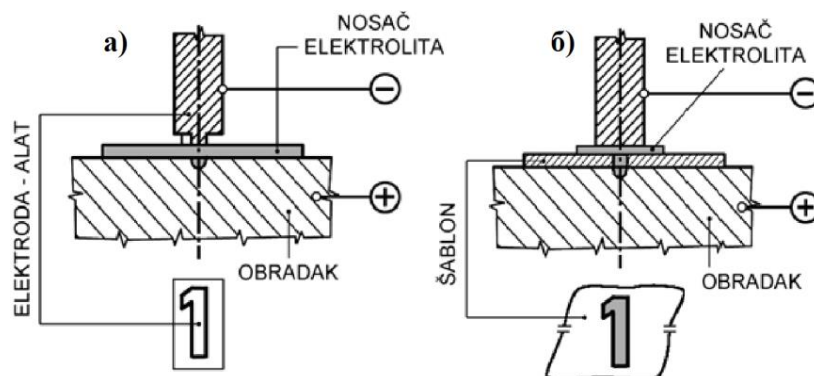


Слика 2.48. Електрохемијско обарање ивица коришћењем покретног и ротационог алата [11]

Обртањем алата (сл. 2.48) постиже се турбулентно кретање електролита. Процес покретном електродом траје од 30 до 45 секунди након чега се одстрањује оштра ивица са предмета обраде. Када се алат постави изнад ивице висине 0,5 mm, у зависности од параметара процеса, она се може уклонити до радијуса од 0,05-0,2 mm, где се добија заобљенија површина са малом храпавошћу, тј. висином неравнина од 2-4 μm . Када се обори жељена ивица, електролит се спроводи и одржава под притиском од 0,3-0,5 МПа коришћењем алата. Алат мора бити адекватно изолован како би обезбедио неопходни проток електролита у близини оштре ивице која се обара. Алат мора поседовати сличну контуру као и предмет обраде и имати радни зазор од 0,1-0,3 mm. Препорука је да се користи напон од највише 50 V за процес обраде, мада се могу користити и напајања јачине и од 500 A за обарање ивица код кованих делова великих димензија [11].

2.2.2.7. Електрохемијско обележавање (гравирање)

Електрохемијско обележавање је засновано на анодном растварању метала. На аноду - предмет обраде се поставља шаблон жељеног облика. Катода - алат је обложена са платном или филцом који је натопљен електролитом. Постављањем катоде на шаблон и остваривањем одговарајућег притиска при пропуштању једносмерне струје ствара се зона местимичне обраде према облику шаблона (слика 2.49) [7].



Слика 2.49. Електрохемијско гравирање: а) уз помоћ обликоване катоде - алата, б) уз помоћ шаблона - маске [2]

Електрохемијско гравирање је, у поређењу са другим методама електрохемијске обраде, технолошки врло проста и економична обрада која се може изводити на неколико начина. За плитке гравуре од неколико десетина mm користе се посебно обликоване катоде (слика 2.49а) или помоћу шаблона маске (слика 2.49б), на којима су израђени сви симболи који се желе пренети на површину материјала предмета обраде [2].

У оба претходно наведена поступка електрохемијског обележавања (гравирања) електрода мирује, док је радна течност натоплена у танку филцану тканину или меки филтер папир. Електрода благо потискује предмет обраде преко носача електролита или шаблона, стварајући тако радни зазор са предметом обраде који зависи од дебљине тих међуелемената и обично се креће у границама од 0,1-3 mm. Протоком електричне струје настаје зона обраде где се у веома кратком временском интервалу, од свега неколико секунди, на предмету обраде репродукују симболи са електроде или шаблона - маске [2].

Добијени отисак након електрохемијског обележавања је дубине свега неколико милиметара и веома је лако уочљив због разлике у боји од околине материјала предмета обраде. Мала количина електролита је сасвим довољна за један овакав поступак обраде, с обзиром на мале дубине и веома кратко време обраде. Површине материјала на којима се врши овакво обележавање (гравирање) морају бити веома чисте, док њихова храпавост треба да је $Ra < 12,5 \mu m$ (одговара класи квалитета N10). При обради се користи густина електричне струје од 8-60 A/cm² и напон извора напајања од 6-18 V. При обележавању, на пример, титанијума и његових легура препоручује се коришћење наизменичне струје и радног напона од 12-20 V, чиме се обезбеђује добијање квалитетнијих ознака (гравура). Да би се избегло настајање корозије, предмет обраде се одмах након завршеног поступка обележавања (гравирања) мора очистити од заостале радне течности и осушити [2].

Поступак електрохемијског обележавања (гравирања) је нарочито веома погодан за делове малих дебљина (као нпр. фолије) на којима се другим поступцима обележавања то не може ни остварити због њихових димензија и типа материјала. У случају када је потребно електрохемијским обележавањем остварити веће и дубље гравуре на предмету обраде примењује се поступак са електронепроводљивом маском (шаблоном), али се код овог поступка уместо носача електролита користи радна течност, односно електролит који циркулише кроз радни зазор, слично као и код контурне обраде. Електрохемијско обележавање је погодно за делове који су израђени од тврдих, кртих и тешкообрадивих материјала, као и за обележавање на закривљеним површинама. Процес обраде је у потпуности хладан и не изазива структурне и хемијске промене у материјалу предмета обраде. Због тога нема никакав утицај на проводљива својства материјала, као што је то случај код примене ласера, електроерозије и других термичких поступака гравирања [2].

2.2.2.8. Електрохемијске микрообrade

Под микрообрадом се подразумева израда цилиндричних отвора са површином од 25 μm^2 до 2 mm² и дубином отвора од 2d до 20d. Поступцима електрохемијске микрообrade је могућа обрада тешкообрадивих материјала, исто као електроерозионом обрадом, при чему се постиже мања тачност обраде. Међутим, радна брзина је велика уз постизање толеранције обраде од $\pm 0,2 mm$ [7].

Контролисано уклањање метала анодним растварањем се може извести успешно у микро домену обраде због развоја напредних високофреквентних извора енергије, као и прецизног померања микро алата и предмета обраде приликом поступака површинске и димензионалне обраде. Дводимензионална 2D (површинска) и тродимензионална 3D (димензионална) обрада различитих облика, димензија и квалитета има своју практичну примену у електрохемијској микрообradi (*Electro Chemical Micro Machining*). У случају 2D микрообrade, контрола радног зазора током *ECMM* обраде је мање важнија у односу на 3D микрообradу, где се контрола радног зазора мора пажљиво и прецизно одређивати. Електрохемијска микрообrada зависи од комплексних захтева, а у које спадају: велика прецизност због веома малих димензија катоде и аноде, параметри процеса обраде, као и достизање захтеване производности, тачности и квалитета обрађене површине [12, 23].

Електрохемијска микрообрада (ЕСММ) може бити класификована у две групе, у зависности степени локализованог ефекта механизма уклањања материјала. У првој групи је уклањање материјала ограничено постављеним фоторезистивним шаблоном, тј. маском на површини предмета обраде, чиме се обрада врши само на дозвољеним делу предмета обраде. Ова обрада је позната као електрохемијска микрообрада са маском. У другој групи уклањање материјала није лимитирано фоторезистивном маском, али је контролисано високо локализованим механизмом уклањања материјала. Овај тип ЕСММ обраде је познат као електрохемијска микрообрада без маске [12].

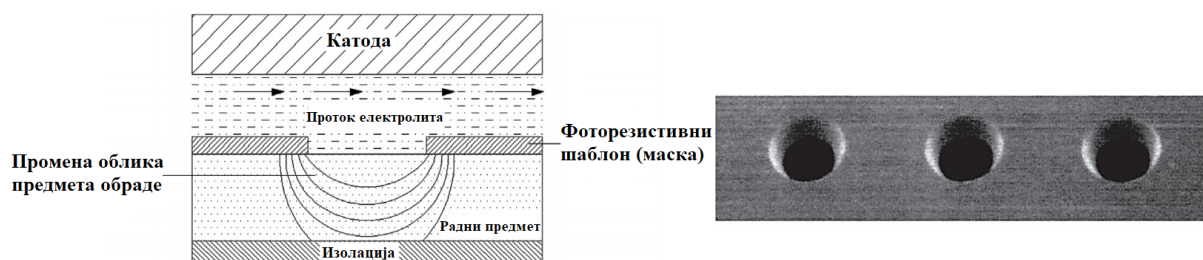
2.2.2.8.1. Електрохемијска микрообрада са шаблоном (маском)

Фоторезистивни шаблон (маска) је постављен на предмет обраде (аноду) и током поступка електрохемијске микрообrade се анодним растварањем уклања материјал предмета обраде који је допуштен, односно није заштићен шаблоном (маском). То значи да се анодно растварање дешава само на површини предмета обраде који се не налази у додиру са фоторезистивним шаблоном. Електрохемијска микрообрада са шаблоном се даље може поделити на два типа: уклањање материјала са једне стране предмета обраде и истовремено уклањање материјала са обе стране предмета обраде [12, 23].

Поступак електрохемијске микрообrade са шаблоном (маском) укључује веома пажљиво планирање и имплементацију корака који укључују: дизајн и креирање изгледа шаблона, детаљну припрему површине предмета обраде, затим бирање фоторезистивног материјала ради подешавања његових карактеристика током и након процеса обраде, потом бирање брзине протока електролита, густине електричне струје, врсте електролита и тсл. Проток електролита током поступка електрохемијске микрообrade са шаблоном одређује трансфер маса и топлоте конвекцијом, што убрзава процес анодног растварања. Предности ове обраде су веће брзине обраде, употреба мање корозивних електролита и мањи штетни утицај по животну околину, али такође и могућност обраде великог броја материјала, укључујући и антикорозивне легуре. Недостатак ове обраде јесте мали број операција које се могу обавити овим поступком електрохемисјке обраде [12, 23].

Уклањање метала са једне стране предмета обраде

На слици 2.50 је приказан поступак електрохемијске микрообrade са шаблоном и уклањањем материјала са једне стране предмета обраде. Почетна дистрибуција густине електричне струје није униформна и на крајевима маске (шаблона) је дистрибуција струје максимална, што доводи до почетног уклањања материјала предмета обраде баш на тим местима. На крајевима шаблона тада настају почетна удубљена који се потом даље шире и на остале делове празнине, односно материјала који није прекривен шаблоном [12].

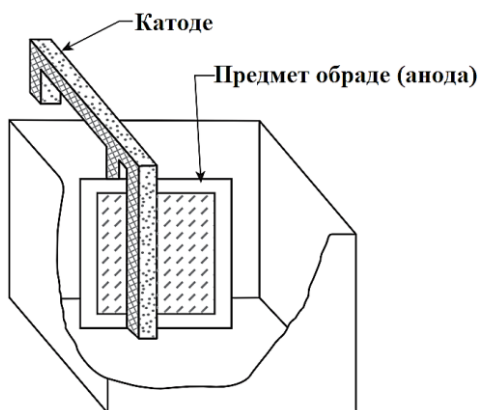


Слика 2.50. Електрохемијска микрообрада са шаблоном и уклањањем метала са једне стране предмета обраде и добијени део након обраде [12]

Како током овог процеса обраде анодно растварање материјала предмета обраде напредује, тада се максимална вредност густине електричне струје помера ка центру аноде који није прекривен фоторезистивном маском, пошто материјал предмета обраде који је прекривен маском почиње да привлачи струју ка себи. Предмет обраде се помера константном брзином изнад алата са више дизни, тј. млазница. Радни зазор између катоде и аноде је потребно одржавати константним и то између 0,05-0,25 mm. Електролит се из млазнице креће великом брзином и притом уклања материјал предмета обраде који није прекривен маском помоћу анодног растварања. Ово значи да је активна област током процеса електрохемијске микрообраде дефинисана контактом електролита и аноде [12].

Истовремено уклањање материјала са обе стране предмета обраде

Пример процеса електрохемијске микрообраде истовременим уклањањем метала са обе стране предмета обраде је дат на слици 2.51. Предмет обраде (анода) се најчешће поставља у вертикални положај у радном простору машине. Алат се састоји од две катоде постављене преко аноде. Високо локализовано анодно растварање метала на местима који нису заштићена маском са обе стране предмета обраде је постигнуто постављањем аноде између две катоде. Електролит протиче кроз склоп алата и пролази између катоде и предмета обраде (аноде). Радни зазор приликом овог поступка обраде је веома мали чиме се добија униформно локализовано уклањање метала услед стабилног протока електролита и стабилне густине електричне струје, а тиме се елиминише и ефекат лутајућих струја, што је и описано у претходним поглављима [12].



Слика 2.51. Шематски приказ електрохемијске микрообраде са шаблоном са истовременим уклањањем метала са обе стране предмета обраде [12]

Катодe се морају кретати константном брзином напред и уназад приликом обраде. Проток електролита, радни зазор између катода и аноде, као и померање катода се може мењати захтевима производног процеса, али и према карактеристикама шаблона (маске) и његових димензија [12].

2.2.2.8.2. Електрохемијска микрообрада без шаблона (маске)

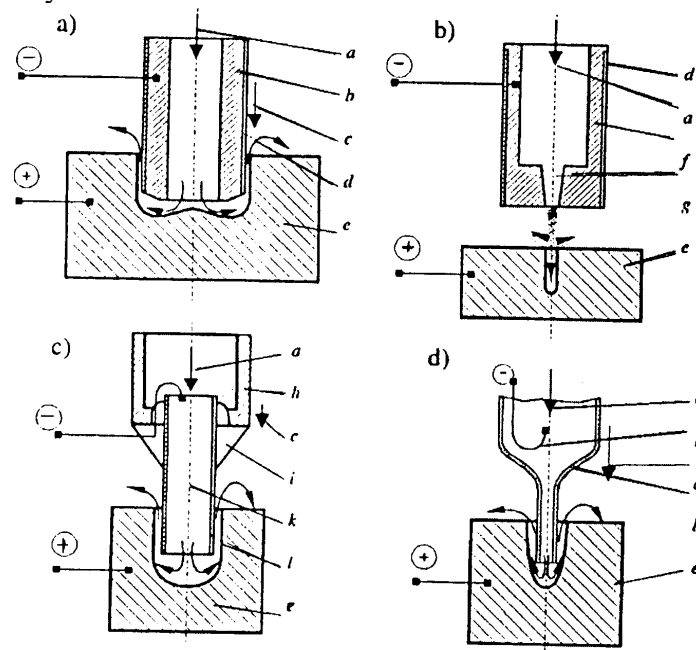
Овај поступак електрохемијске микрообраде не захтева примену фоторезистивне маске на површини предмета обраде, већ се обрада радног предмета контролише преко локализованог растварања материјала. Високо локализовано уклањање метала анодним растварањем са површине предмета обраде може довести до креирања захтеваних облика како површинском тако и димензионалном обрадом. Анодно растварање материјала је контролисано густином електричне струје, а зависи од разних параметара процеса обраде

као и образаца анодног растварања материјала. Радни зазор између површине предмета обраде и алата је потребно одржавати на ниским вредностима да би се елиминисао, или минимизирао негативан ефекат лутајућих струја. Пасивизирајући електролит се може користити за ову обраду због његове особине формирања транспасивизирајућег танког оксидног филма и кисеоника у зони лутајућих струја, чиме се спречава или доста умањује деловање анодног растварања на деловима материјала који се не жели обрадити [12, 23].

Ефикасност електричне струје је веома важна приликом овог поступка обраде где она зависи од радног зазора, па је уклањање материјала приликом високе ефикасности струје боље и више локализовано у зони где се површина материјала предмета обраде налази директно наспрам алата. Тиме се добија тачнија обрада и бољи квалитет обрађене површине предмета обраде. Уколико је ефикасност електричне струје мања онда се зона локализоване обраде проширује на делове радног предмета који није предвиђен за обраду и добија храпавија површина обрађеног дела. Да би се достигло потребно високо локализовано анодно растварање метала потребно је користити прецизно кретање алата и предмета обраде. Циркулација новог електролита у радном зазору и његов подесан избор су такође битни за обај процес обраде, да би се достигла тражена тачност, квалитет и производност. За ефикасну обраду и локализацију уклањања метала, овај поступак обраде тражи извор енергије са већим фреквенцијама импулса. Недостатак овог процеса обраде јесте у стварању веће количине талога, гасних мехурова и повећане температуре процеса у радном зазору, али и то да је поступак електрохемијске микрообраде без шаблона (маске) спор процес, што значи да има спору производност [12, 23].

Електрохемијска микрообрада без коришћења шаблона је подесна за димензиону обраду делова. Електрохемијским поступцима обраде се могу реализовати одређена подручја микрообрада (слика 2.52) [7, 12]. Ти поступци микрообрада јесу [7]:

- a) Електрохемијско бушење,
- b) *STEM* поступак (*Shaped Tube Electrolytic Machining*),
- c) *Electrostream* поступак и
- d) *Electrojet* поступак.



Слика 2.52. Електрохемијске микрообраде [7]

Даљи текст рада ће описати претходно наведене електрохемијске микрообраде.

Електрохемијско бушење

Код електрохемијског бушења водени раствор неутралне соли (NaCl , NaNO_3 или нитрита) се убацује под притиском у зону обраде, кроз шупљу электроду - катоду (слика 2.52а). Под дејством једносмерне струје предмет обраде се анодно раствара. Катода је од бакра, нерђајућег челика или титанове цевчице са изолацијом по обиму, тако да само крај електроде учествује у обради. Минимални пречник цевчице је око 1,5 mm и поступак се примењује код израде великих отвора. Напон једносмерне струје је 6-24 V, у зависности од материјала предмета обраде, као и састава електролита [7].

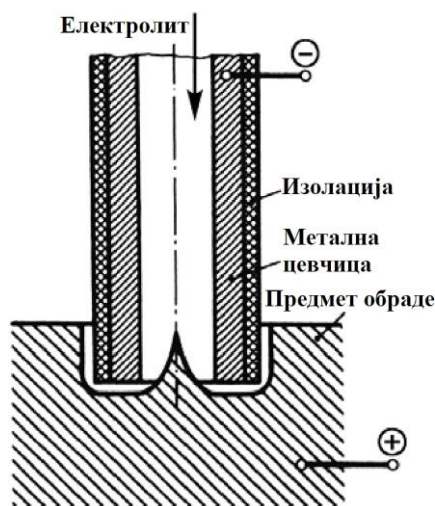
Код поступка електрохемијског бушења, брзина одношења материјала предмета обраде зависи од брзине кретања алата, а која износи око 2,5 mm/min. Са минималним пречником отвора од 1,5 до 2 mm може се постићи дубина отвора од чак 120 до 130 mm, а максимално до 300 mm. Минимални пречник отвора је одређен изградом цевчице, затим могућности довољног протока електролита и ефикасношћу одношења продуката обраде, односно одношења материјала предмета обраде. Повећање количине продуката обраде доводи до зачепљена веома уског радног зазора, што даље погоршава ток електролита, затим доводи до појаве вибрација током обраде и прекида процеса обраде. Да би се превазишли проблеми који се могу јавити код протока електролита са продуктима обраде користи се кисели електролитски раствор у коме се хидроксиди не таложе, него остају у раствору. Тачност овог процеса обраде износи до $\pm 0,02$ mm. Овај поступак је погодан за израду дубоких отвора и канала. Микроотвори су високог квалитета и високе тачности обраде. Овај поступак електрохемијске микрообраде има ниже трошкове производње, док су перформансе и производност овог поступка одређене загревањем електролита. Потребна је веома прецизна контрола процеса микробушења, где на процес обраде утиче још и густина електричне струје, као и брзина протока електролита [7, 12].

STEM поступак

STEM (Shaped Tube Electrolytic Machining) обрада се користи за електрохемијско бушење отвора код којих се однос дубина и пречника креће од 200-300 (при минималном пречнику отвора 0,5 до 100 mm). Алат чини цевчица од чистог титана или нерђајућег челика са спољашњом изолацијом. Код овог поступка обраде се као електролит користи супморна киселина H_2SO_4 (10%-тне концентрације са вредношћу $\text{pH} = 1,3$) разблажена са водом (до 20 kg/100 l H_2O), чиме продукти обраде остају у електролиту и не изазивају сметње при циркулацији електролита као муљ. То значи да продукти анодног растварања јесу соли које се у електролиту не растварају, чиме се спречава зачепљење радног зазора. Међутим, проблем представља отежана филтрација електролита [2, 7].

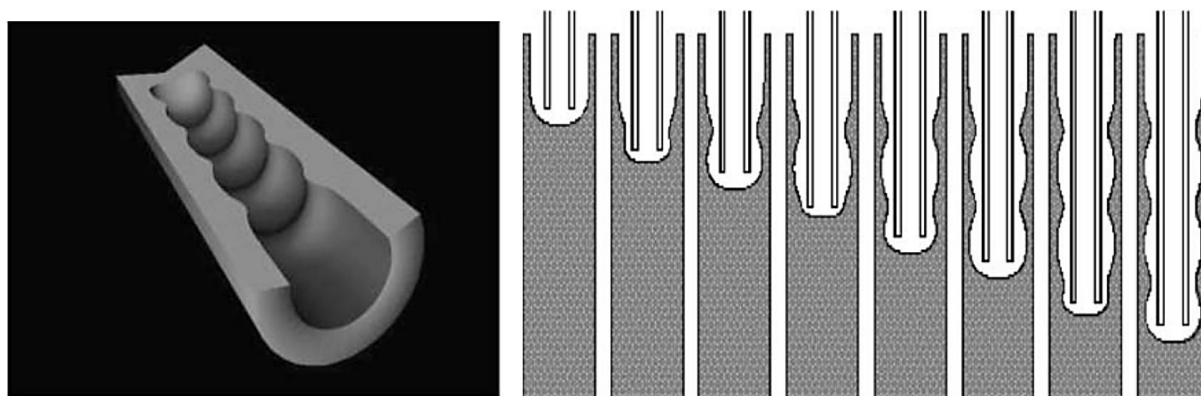
Електролит под притиском се убризгава у радни простор кроз катоду, чиме се омогућава израда отвора веома малих димензија, око 0,5 mm и дубина до 300 mm. Напон је између 10 и 100 V. Концентрација метала у електролиту се мора стално контролисати, како би се издвајање металних јона на катоди могло одржати у одређеним границама. Издвајање металних јона на алату - катоди не може се никад у потпуности одстранити. Како то негативно утиче на тачност отвора и квалитет обрађене површине, али и да би се спречило таложење метала на електроди, потребно је сваких 10-20 s обраде искључити напон 0,4 секунде и извршити краткотрајну промену поларитета да би се на тај начин раствориле металне наслаге. Температура електролита се мора одржавати константном до максимално 38 °C. Повећање температуре изазива варирање проводљивости и радног зазора и оштећење електрода и уређаја. Овај поступак се користи код израде узудних канала за хлађење у високолегираним материјалима за лопатице гасних турбина [2, 7].

Код овог поступка обраде је довођење електролита доста проблематично. Оно може изазвати осциловање релативно лабилне електроде што ствара вибрације које даље доводе до повећања храпавости обрађене површине делова, неправилног облика пресека отвора или чак и до појаве кратког споја између предмета обраде и електроде. Слика 2.53 приказује принцип рада *STEM* поступка са основним параметрима процеса обраде који се најчешће примењују у индустријској пракси: електролит H_2SO_4 , температура 20 °C, притисак 4 bar-а, помак алата до 3,5 mm/min, као и напон од 10-100 V [2].



Слика 2.53. Принципи бушења отвора *STEM* поступком електрохемијске обраде [2]

Разни литературни извори наводе да *STEM* поступак уопштено представља једну од варијација електрохемијске обраде која користи киселе електролите. Овом обрадом се могу бушити мале рупе пречника од 0,76 до 1,62 mm и односом пречника и дубине које се креће 180:1 код електропроводних материјала. Јачина електричне струје која се користи за овај поступак обраде може достићи и 600 А. Код *STEM* поступка обраде нема утицаја топлоте на површини предмета обраде чиме се не стварају микропукотине [11]. Слика 2.54 приказује бушење радијалних отвора канала за хлађење код турбина:



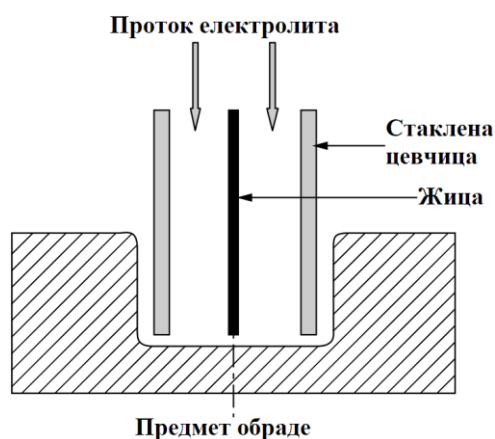
Слика 2.54. Бушење радијалних канала за хлађење код турбина *STEM* поступком обраде [11]

Предности *STEM* поступка обраде јесу: однос пречника и дубине може бити чак и до 300, потом велики број отвора (до 200) може бити бушено у једној операцији чиме се повећава производност ове обраде, затим непаралелни отвори могу бити обрађивани, закривљени и контурни отвори могу бити бушени итд. Недостаци овог поступка обраде јесу: процес се може применити само код некорозивних материјала, *STEM* процес обраде је доста спор уколико се буше само појединачне рупе, мора се пазити приликом руковања киселином (електролитом), као и то да се генерише врло опасни отпад, односно продукти који су опасни по животну средину и здравље радника итд. [11].

Electrosteam поступак

Код овог поступка обраде користи се ток електролита кроз стаклене капиларне цевчице. Електролит је сумпорна киселина H_2SO_4 која се под притиском убризгава у радни зазор. Напон који користи за овај поступак обраде се може кретати од 300-600 V. Минимални остварени пречник је 0,125 mm, а дубина отвора од 12-15 mm (при пречнику 0,25 mm). Пошто су капиларне цевчице кратког века мора се располагати са резервним. Тачност која се може остварити овим поступком обраде је $\pm 0,04$ mm, али су добијени отвори конусни 2 до 5°. Код овог поступка обраде изражени су захтеви за константном температуром, протоком и концентрацијом електролита [7].

Electrostream Capillary (капиларни) поступак обраде јесте специјална техника електрохемијске микрообраде која се користи за обраду отвора малих димензија које су превише дубоке за електроерозиону обраду, а превише мале за обраду *STEM* поступком. Алат је направљен од капиларне цевчице (0,025-0,5 mm пречника). Стаклена капиларна цевчица садржи унутар ње жицу од платине (катода) (слика 2.55). Пречник жице је врло мали тако да се може сместити унутар капиларне цевчице и тако да не утиче на проток електролита до зоне обраде. Отвор обрађен овим поступком је реда величине $< 500 \mu m$, што је доста мање од пречника који се могу добити електрохемијским бушењем. Пут електролита до зоне обраде је мањи у односу на *Electro Jet* поступак обраде, што смањује електрични отпор радног зазора и дозвољава коришћење напона од 100 до 200 V [11, 12].

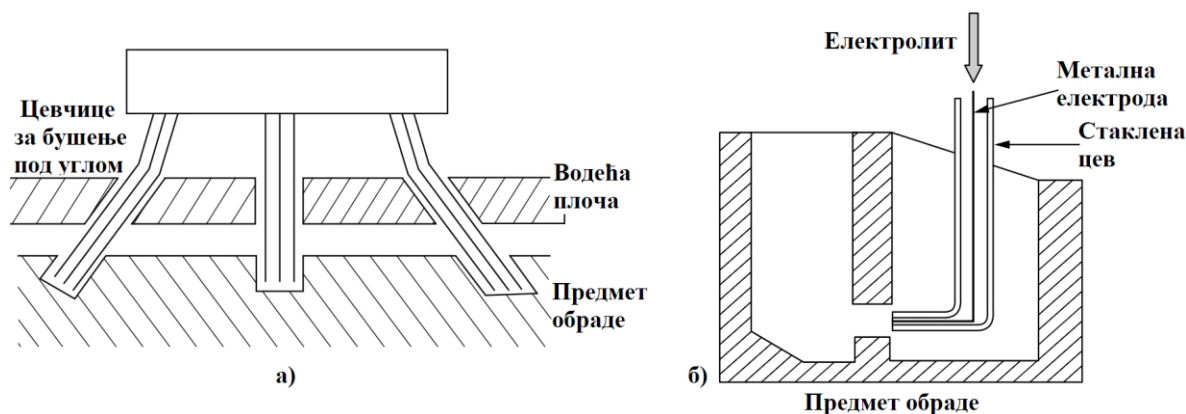


Слика 2.55. Принципијелна шема *Electrostream* поступка обраде [11]

Electrostream Drilling (бушење) је доста сличан поступак *Electrostream Capillary* (капиларном) поступку обраде који такође користи стаклену капиларну цевчицу за усмеравање млаза електролита. Користи се такође жица од платине као катода. Жица је постављена 2-4 mm од врха капиларне цевчице. Код *Electrostream* бушења се користи доста већи напон, него код капиларне обраде, а чија вредност може износити и до 600 V. Овакав велики напон је потребан да би се остварио довољан праток електричне струје у зони обраде због већег и тањег пута пратока електролита. Отвори који се буше овим поступком обраде су мањих димензија него код капиларног поступка обраде [12].

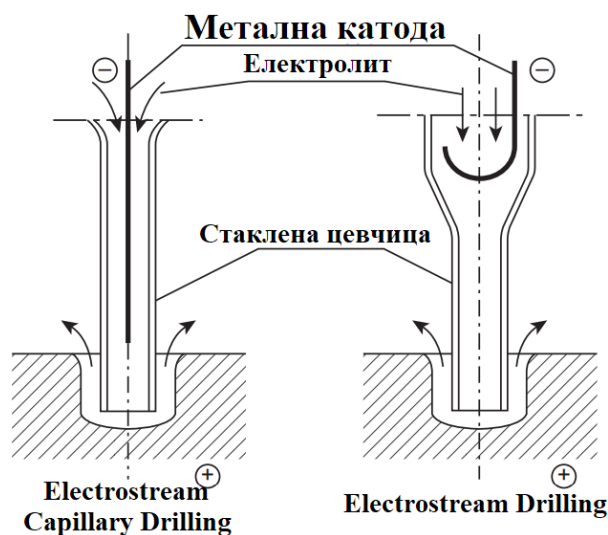
Код *Electrostream Drilling* поступка тип електролита који ће се користити за обраду умногоме зависи од материјала предмета обраде. Температура електролита се обично креће око 40 °C за сумпорну киселину и око 20 °C за остале електролите. Препоручени притисак којим се убризгава електролит приликом обраде је између 275 и 400 kPa. Температура електролита, затим његов притисак и концентрација, као и брзина пратока се веома морају пажљиво контролисати, ради добијања што бољег квалитета обрађене површине и тачније обраде. Напон у радном зазору се креће око 70-150 V, што је скоро 10 пута више него поједини стандарни поступци електрохемијске обраде. Ова обрада се

може користити и за обраду отвора канала за хлађење турбина које су под углом од 45° и пречника мањих од 0,8 mm (слика 2.56). Помак алата код овог поступка обраде се креће у вредностима од 0,75 до 2,5 mm/min. Брзина кретања алата приликом обраде зависи од материјала предмета обраде, као и од броја отвора које треба избушити истовремено. Слично електрохемијској макрообradi, већа брзина уклањања материјала делова се поистовећује са већом брзином кретања алата, као и већим пречником алата. Тolerанције се крећу у оквиру $\pm 10\%$ од пречника избушеног отвора [11, 12].



Слика 2.56. Шема *Electrostream Drilling* поступка обраде: а) бушење отвора под углом и б) бушење отвора на тешкодоступним позицијама [11]

Предност *Electrostream Capillary* (капиларне) електрохемијске микрообrade јесте то да може да обрађује отворе који нису равни, односно отвора који имају неки контурни облик, као нпр. код лопатица турбина, са односом пречника и дубине отвора 40 до 80. Велики број микроотвора може бити истовремено ефикасно избушено овом обрадом са већим бројем капиларних цеви [12]. Слика 2.57 приказује разлику између *Electrostream Capillary Drilling* и *Electrostream Drilling*:



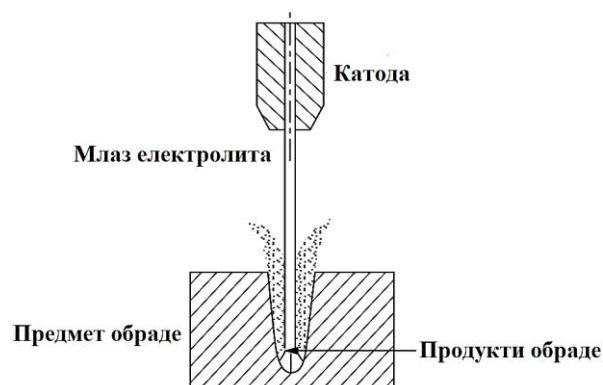
Слика 2.57. Различити типови поступка *Electrostream* микрообrade [33]

Предности *Electrostream Drilling* поступка електрохемијске микрообrade јесу: велики однос димензија пречника и дубине отвора који могу да се обрађују, као и то да велики број отвора може бити избушено истовремено итд. Недостаци ове микрообrade су то да се могу обрађивати само материјали који су отпорни на корозију због коришћења корозивних електролита приликом обраде, затим то да се генеришу токсични продукти обраде који могу бити веома опасни по здравље радника и околине, потом процес обраде је веома спор уколико се буши само један отвор итд. [11].

Electrojet поступак

Electrojet поступак обраде (слика 2.58) се изводи млазом сумпорне киселине која као електролит излази из једне млазнице на предмет обраде. Између млазнице и предмета обраде је напон од 300 до 500 V. Најмањи пречник отвора који се може обрађивати овим поступком јесте 0,05 mm, док остварена дубина при пречнику отвора 0,25 mm може бити 5 до 6 mm. Употребом млазнице са више отвора може се овим поступком истовремено обрађивати више отвора [7].

Код ове обраде, млаз електролита под притиском излази из алата да би се достигло потребно анодно растварање предмета обраде. Електролит високе проводности се користи за остваривање високе густине електричне струје. Обрада се врши уз помоћ ефекта под називом „хидраулични скок“, где се електролит избацује веома великом брзином и када удари у површину предмета обраде он тада формира танак слој филма електролита, што резултира локалним анодним растварањем. Танак филм потом нестаје због трења све док не наступи нов хидраулични скок и дебљина електролита опет расте. Процес обраде не захтева улаз алата, као што је случај код *Electrostream Drilling* поступка обраде. Обрада захтева коришћење алата који нису лако ломљиви. Млаз сумпорне киселине изазива растварање материјала предмета обраде, где потом тај електролит излази из радног простора у виду спреја (прскања). Овај поступак обраде се највише користи за бушење отвора у односу димензија пречника и дубине до 1:2, што је доста мање у односу на *Electrostream Capillary* и *Drilling* поступака обраде (1:100) [11, 12, 31].



Слика 2.58. *Electrojet* поступак микрообраде [11]

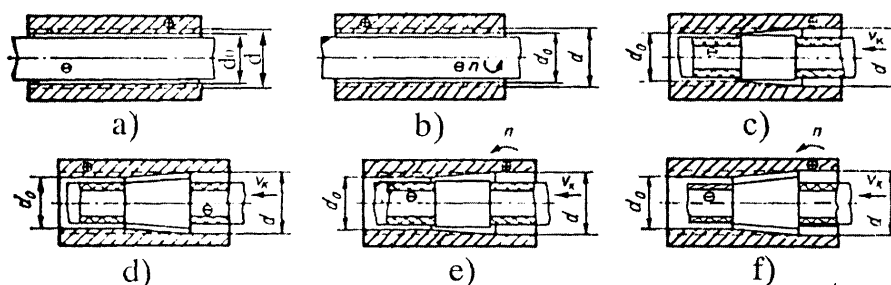
За неке специјалне услове обраде се може користити напон и од 400 до 800 V. Димензије отвора су ограничене најмањим отвором који се може избушити на дизни (млазници) катодe, као и притиском који пумпа електролит у форми млаза. Препоручује се примена притиска електролита од $7 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Поред обраде отвора малих пречника ($< 1 \text{ mm}$), ова обрада се може користити за прављење микро жлебова и прореза [11, 12].

2.2.2.9. Електрохемијска обрада дубоких отвора

Основна подела електрохемијске обраде дубоких отвора се може извршити према врсти кретања која остварују предмет обраде, алат - катода и електролит [7]. На основу набројаног, разликују се следећи поступци електрохемијске обраде дубоких отвора [7]:

- предмет обраде и алат мирују, не врше релативно кретање, у правцу обраде креће се само електролит (слика 2.59а),
- предмет обраде мирује, алат цилиндричног облика врши ротацију, а електролит се креће у правцу обраде (слика 2.59б),

- предмет обраде мирује, цилиндрични алат и електролит се крећу у правцу обраде, где је брзина електролита већа од брзине алата $v_{\text{електролита}} > v_{\text{катоде}}$ (слика 2.59ц),
- предмет обраде мирује, конусни алат и електролит се крећу у правцу обраде, при чему је брзина електролита знатно већа од брзине алата $v_{\text{електролита}} \gg v_{\text{катоде}}$ (2.59д),
- цилиндрична катода се помера праволинијски дуж осе предмета обраде који врши ротацију, док се електролит креће у правцу обраде великом брзином $v_{\text{електролита}} \gg v_{\text{катоде}}$ (слика 2.59е) и
- конусна катода се помера праволинијски дуж осе предмета обраде који врши ротацију, док се електролит креће у правцу обраде великом брзином $v_{\text{електролита}} \gg v_{\text{катоде}}$ (слика 2.59ф).



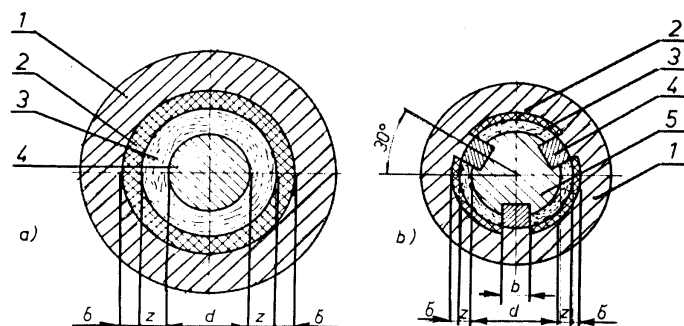
Слика 2.59. Шеме поступака обраде великих отвора [7]

Који ће од ових поступака обраде бити примењен приликом обраде, зависи од могућности одржавања стабилности технолошких параметара у строго прописаним границама и геометријских карактеристика, како површине која се обрађује тако и од облика контуре и димензија предмета обраде [7]. У највећем броју случајева се користи поступак приказан на слици 2.59а, из више разлога [7]:

- могућности лакшег остваривања високих захтева за стабилност свих параметара везаних за електролит, алат, предмет обраде и електричну струју,
- лаког, једноставног и тачног позиционирања алата у предмет обраде,
- могућности обраде отвора великих дубина сложеног попречног пресека,
- могућности остваривања потребне чврстоће и стабилности алата при протицању електролита и одсуства попречних померања и
- стабилне - константне брзине струјања електролита дуж осе предмета обраде и релативно стабилне електропроводљивости електролита дуж целе површине која се обрађује.

Електрохемијска обрада приказана на слици 2.59б се примењује у случају када није обезбеђена стабилна брзина протицања електролита. У том случају се на радну површину катоде постављају изолатори. Код осталих поступака обраде постоји проблем обезбеђења довољне тачности обраде целом дужином предмета обраде. То се остварује одржавањем константне јачине струје дуж осе обраде, изузев у зонама на почетку и крају обраде, где се променом напона регулише потребна густина електричне струје [7].

Најефикаснији начин за остваривање потребних технолошких карактеристика електрохемијске обраде дубоких отвора је примена система активне контроле одржавања константних вредности радног зазора независно од пречника отвора предмета обраде и физичко-хемијских параметара процеса, а такође и применом импулсних промена јачине електричне струје. Геометрија обраде отвора одређена је врстом производне операције (слика 2.60), као што су проширивање, израда правих жлебова, израда завојних жлебова, канала за подмазивање итд. [7].

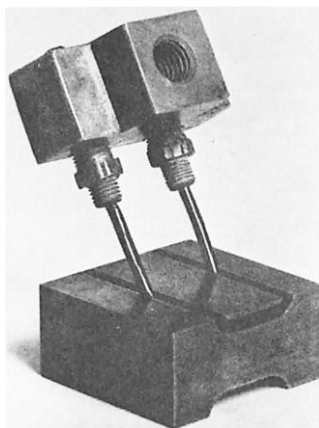


Слика 2.60. Геометрија обраде отвора: а) обрада цилиндричног отвора и б) обрада отвора са жлебовима [7]

Уређај који се користи за израду ожлебљених цеви електрохемијским поступком обраде мора да обезбеђује херметичност протока електролита. Алат који се користи за ову обраду је у облику цилиндричног вретена са постављеном изолацијом која треба да обезбеди израду жлебова на месту где нема изолације, тј. добијање ожлебљене цеви. У зависности од времена обраде, параметара електролита (брзина и састав) и параметара процеса (напон, јачина струја итд.) могу се добити жлебови различитих дубина [7].

2.2.2.10. Електрохемијско сечење жицом

Електрохемијско сечење жицом (слика 2.61) спада у поступке електрохемијске обраде са сложеним кретањем електрода. Као што је претходно речено, електрохемијска обрада са сложеним кретањем електрода се изводи коришћењем жице или перфориране цеви, где се примењује за реализацију производних операција као што су: израда гравура, зупчаника, матрица за извлачење, разних шаблона итд. [1, 24].



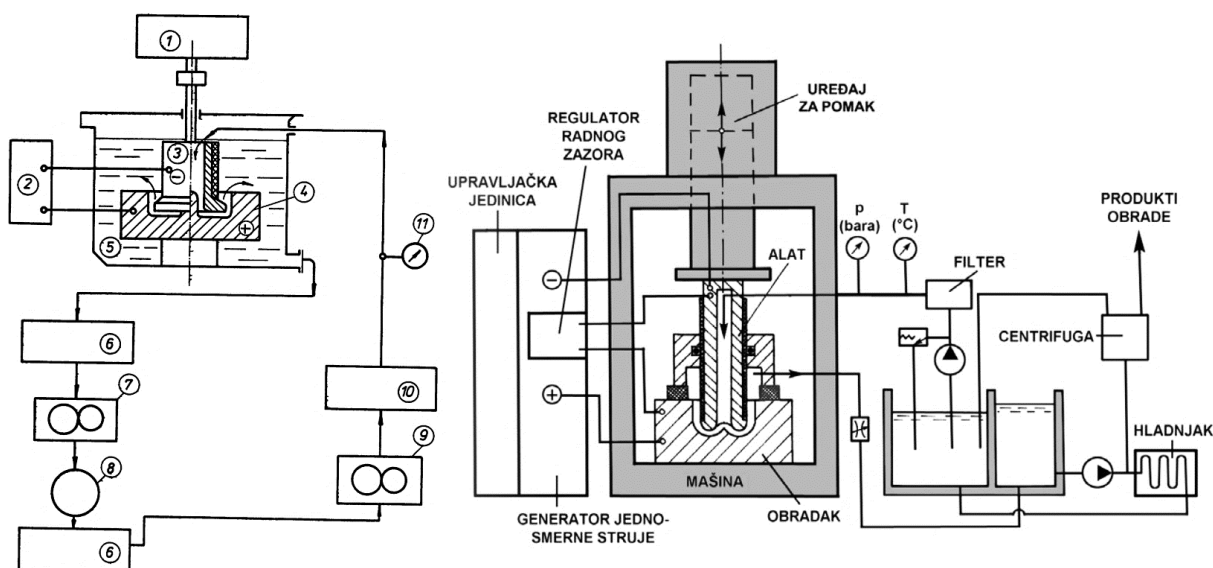
Слика 2.61. Пример поступка електрохемијског сечења жицом [24]

За уклањање великог дела метала без коришћења великог протока електролита и велике количине електричне енергије, користи се електрохемијско сечење жицом. Слика 2.61 приказује пример једне операције електрохемијског сечења жицом. Приликом ове обраде електролит се прска у радну зону или се креће кроз танку шупљу металну цев. Електролит излази из цеви кроз мале отворе на делу катоде која врши сечење. Применом жице малих пречника од 0,3 до 0,5 mm или перфориране цеви постиже се веома мала ширина реза и локално анодно растварање материјала предмета обраде. Овом обрадом се може постићи висока тачност обраде од чак 0,15μm. Обрада се може користити и код предмета обраде малих димензија. Боља обрадивост се постиже код равних површина предмета обраде, него код цилиндричних [1, 24, 29].

3. Опрема и машине за електрохемијску обраду

Последњих неколико деценија је произведен велики број различитих постројења за електрохемијску обраду, како по капацитету тако и по намени, од универзалних па све до специјалних. Последњих десетина година, поред макро обраде у великом развоју су и машине за микрообработку, односно инсталације за електрохемијску микрообработку [2, 32]. Инсталација за електрохемијску обраду (слика 3.1) се, у основи, састоји од [1]:

- машине алатке,
- извора напајања,
- система циркулације електролита и
- система контроле и управљања процесом електрохемијске обраде материјала.



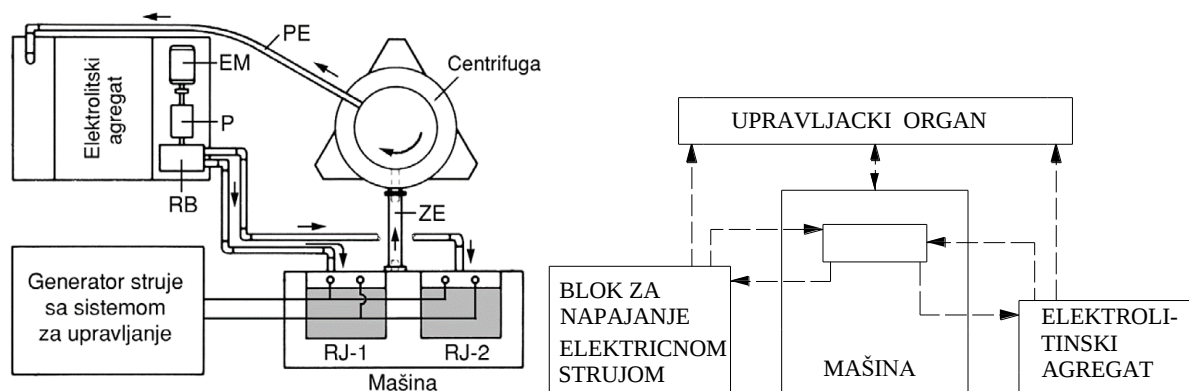
Слика 3.1. Функционални шематски приказ инсталације за електрохемијску обраду:

1) преносник помоћног кретања, 2) извор једносмерне струје, 3) катода - алат са изолацијом, 4) анода - предмет обраде, 5) радна течност - електролит, 6) резервоар, 7) пумпа, 8) филтер, 9) пумпа високог притиска, 10) мерач параметра електролита, 11) манометар [1, 2]

Све инсталације, односно постројења и опрема за електрохемијску макрообработку и микрообработку се у основи састоје из пет основних јединица које су међусобно строго функционално повезане [2]. На слици 3.2 је приказан пример шеме која илуструје могући распоред и међусобну повезаност тих пет основних јединица и то [2]:

1. Машина алатка са једном или више радних јединица које су опремљене уређајима за помоћно кретање електроде,
2. Генератор једносмерне струје са регулатором,
3. Електролитски агрегат са елементима за довод радне течности (електролита) у радни простор машине,
4. Уређај за пречишћавање електролита (таложник, центрифуга или филтер преса) и
5. Управљачка јединица која је најчешће интегрисана са генератором електричне струје.

На слици 3.2 је такође дата и упрошћена блок шема једне типичне инсталације, односно постројења и опреме за електрохемијску обраду.



Слика 3.2. Блок шема инсталације за ЕСМ обраду (десно) и повезаност основних јединица постројења за електрохемијску обраду (лево): EM - електромотор, P - пумпа, RB - разводни блок, ZE - запрљани електролит, PE - пречишћен електролит, RJ - радна јединица [2, 7]

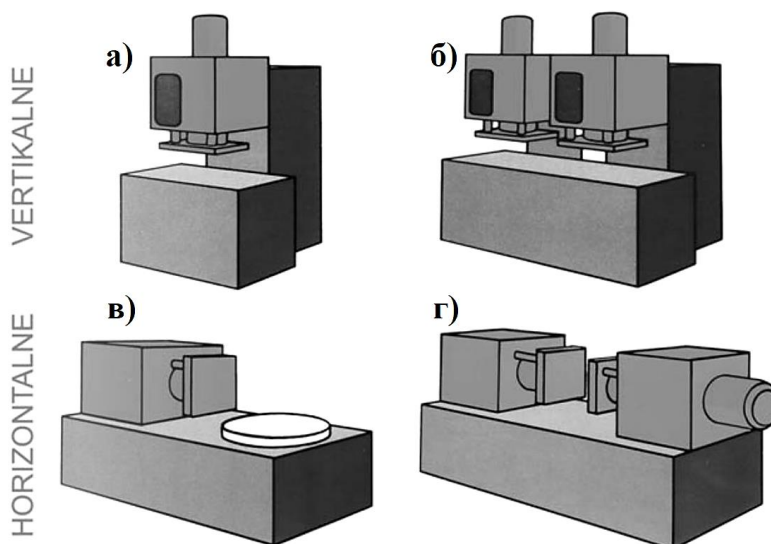
Поред претходно наведених елемената инсталације за електрохемијску обраду, постројења поседују још и пумпу за циркулацију електролита, филтере и размењиваче топлоте, резервоар за електролит, потом серво систем за помак електрода, исправљач, цеви и црева за развођење и пренос електролита, електричне каблове, контролни панел (јединицу) и њене компоненте, заштиту од преоптерећа, вентилатор за гасове и кућиште машине које мора поседовати одређену крутост због процеса обраде под високим хидрауличним притиском. Да би се избегло замршење цеви и црева за електролит са електричним кабловима, исти могу бити уграђени у кућиште машине алатке. Посебна пажња се мора водити приликом дизајнирања целе инсталације и постројења да би се постигао безбедно радно окружење за оператера машине, тако што се уграђују разни заштитни механизми. Због корозионог дејства електролита, пожељно је да неки агрегати (извор за напајање електричном струјом, органи за управљање и др.) буду изоловани од хидрауличних агрегата. Под дејством влаге и паре електролита може доћи до оштећења електричних и електронских инсталација, а тиме и до отказа целог постројења [7, 24, 29].

Сви елементи постројења и инсталација у целини су пројектовани тако да се обезбеди одговарајући ниво параметра процеса обраде и других захтева значајних за функционисање постројења, као што су: производност, тачност обраде, поузданост, степен аутоматизације, сигурност и заштита при раду, економска ефикасност итд. [1, 2].

3.1. Машина алатка

Машина (механички део инсталације) обезбеђује повезивање свих елемената инсталације постројења за електрохемијску обраду у једну целину. Основни задатак машине јесте да уз помоћ специјалног прибора складно сједини предмет обраде (аноду), електроду-алат (катоду) и систем за циркулацију електролита. Код машина са покретном електродом машина треба да обезбеди електроди потребну брзину помоћног кретања и аутоматску регулацију радног зазора. Осим тога, машина мора да поседује потребну тачност, крутост и стабилност система при раду, али и низ других параметара значајних за правилно функционисање машине, али и целе инсталације [1, 2].

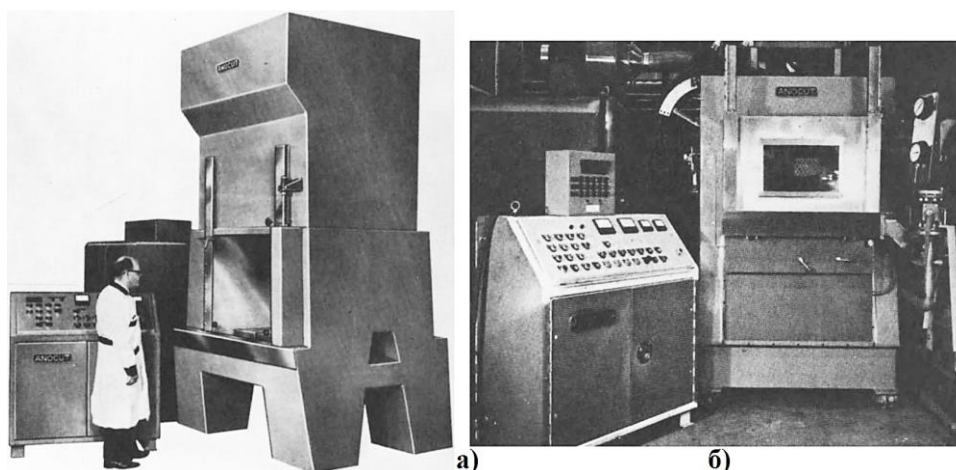
Звисно од намене и услова рада, машине за електрохемијску обраду могу бити конзолног или безконзолног типа (слика 3.3), различитих димензија, експлоатацијских карактеристика, нивоа аутоматизације, заштите, намене итд. Зависно од намене, машине се деле на: универзалне, специјалне и специјализоване, а према степену аутоматизације се деле на: класичне, са елементима аутоматизације, полуаутоматске и аутоматске [1].



Слика 3.3. Најчешћи начини извођења машина за електрохемијску обраду: а) са једним носачем електроде, б) са два носача електроде, в) са обртним радним столом и д) за истовремену обраду дела са две електроде [2]

Зависно од намене, машине за електрохемијску обраду се праве са вертикалним или хоризонталним положајем носача електроде. Вертикалне машине служе за обраду ситнијих комада и праве се са једним носачем електроде за мање серије (сл. 3.3а) и са два носача за велике серије (сл. 3.3б). Хоризонталне машине су намењене обради крупнијих комада, при чему машина, која је приказана на слици 3.3в служи за обраду ротационо симетричних делова, нпр. турбинских кола, а машина на сл. 3.3г за истовремену обраду са две стране, нпр. код појединачне израде турбинских лопатица [2].

Претходно описане вертикалне машине алатке спадају у отворени или стубни тип машина, односно тзв. „С - извођење“, и праве се за силе помоћног кретања $(25-50) \cdot 10^3 \text{ N}$. Машина је отворена са три стране, где се овим извођењем добија на радном простору. Прецизност делова добијених овом машином је лимитирана због смањене крутости. Крутост може бити повећана коришћењем шипки као подлога, између постоља и горњег дела машине, чиме се повећава тачност обраде [2, 24].



Слика 3.4. Примери „А - стубног типа“ машина за електрохемијску обраду [24]

Поред „С - извођења“ отвореног типа, вертикалне машине алатке могу поседовати и „А - стубни тип“ (сл. 3.4), где се овај тип машина користи за прецизне обраде са малим толеранцијама и где је потребна већа брзина протока електролита (велики хидростатички притисак). Иако је систем контроле и управљања смештен изнад радног простора (слика

3.4a), што смањује шансу за оштећењем услед цурења електролита и добијања чистијег система, сам приступ радном простору и руковање масивним и сложено обликованим предметима обраде је тежи него код отвореног „С -извођења“ машине. Могуће је систем контроле и управљања поставити (уградити) и испод радног простора (сл. 3.4б), чиме се постиже смањење димензија машине, али и смањење у погледу димензија делова који се могу обрађивати, док код крутости долази без смањења, или пак минималног смањења. Уколико се деси цурење електролита код овог типа машине (слика 3.4б) може се десити корозија неких агрегата и тиме до отказа у раду машине [24].

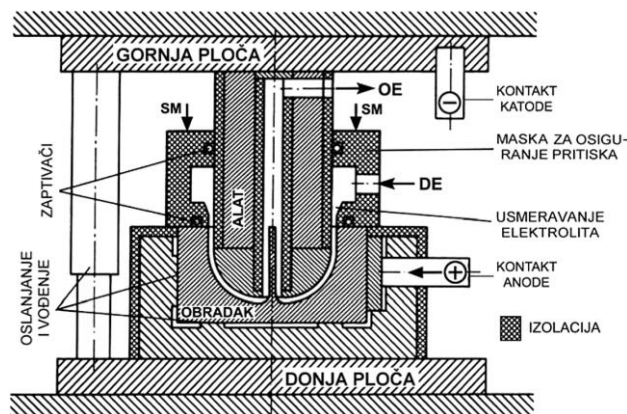
Највећи приступ радном простору је достигнут применом хоризоналних машина (слика 3.3в и 3.3г). На овим машина се могу монтирати веома тешки алати и прибори. Могу се обрађивати радни предмети великих димензија, тежина, као и компликованијих облика. Упркос свим својим предностима, хоризонталне машине нису подесне за високу тачност обраде [24].

За обраду великих радних предмета користе се машине затвореног, тзв. порталног типа, које могу да приме силе помоћног кретања од чак $(100-200) \cdot 10^3 \text{ N}$. Основу машине чини крута заварена конструкција у коју је као посебан елемент уметнута затворена радна комора од нерђајућег челика са провидним материјалом (у облику малог прозора) за посматрање процеса обраде. У комору је уграђена гранитна плоча на коју се притежу предмети обраде или стезни прибор у коме је предмет обраде постављен, као и систем за евакуацију насталог водоника током процеса електрохемијске обраде [2, 12].

Један од најважнијих елемената машине јесте уређај за помак (слика 3.1). Због великих сила које делују на електроду - алат, а које су проузроковане дејством високог притиска електролита, механизам уређаја за помак мора да ради сигурно и тачно под дејством силе од $25 \cdot 10^3 \text{ N}$ до $200 \cdot 10^3 \text{ N}$. У таквим условима, уређај за помак омогућава рад са брзинама помоћног кретања од $0,1 \div 40 \text{ mm/min}$ и грешком обраде од $\pm 1 \%$. Тачност померања електроде - алата се обично креће у границама $\pm 0,010 \div 0,002 \text{ mm}$ [2].

Други веома важан елемент машине алатке, који може имати одлучујући утицај и бити веома утицајан фактор на резултате електрохемијске обраде и производе трошкове, јесте прибор који мора да испуни читав низ функција (сл. 3.5). Осим уобичајних функција прибора, као што је ослањање предмета обраде, као и позиционирање предмета обраде и алата и стезање, у овом случају прибор преузима и задатке који су специфични за неки поступак обраде. Ту пре свега спада остваривање доброг контакта са електродама, које овде чини предмет обраде и алат. При избору контакта на предмету обраде мора се водити рачуна да то буде чиста површина, како би прелазни отпор између контакта и предмета обраде био што мањи. Нечисте контактне површине могу да проузрокују велике прелазне отпоре, што изазива високи пад напона на месту контакта. Тиме радни напон између алата и предмета обраде, који је потребан за остваривање жељеног резултат и подешен је на управљачком пулту, неће остварити потребне ефекте обраде. Осим тога, високи контактни отпори између алата и предмета обраде изазивају загревање и пораст температуре у електроди и у прибору, које потом изазивају ширење елемената прибора којим се мења фиксирани положај предмета обраде у стезном прибору и појаву грешака обраде на предмету који се обрађује [2].

Прибор за електрохемијску обраду преузима задатак да спроведе електролитски раствор кроз радни зазор, односно да радни медијум доведе до предмета обраде. Делови прибора који немају исти поларитет као катода и који за време обраде долазе у контакт са електролитом посебно су изложени корозији, па се израђују од материјала отпорних на корозију, као на пример бакар, месинг, графит, нерђајући челици и титан. Пластични материјали појачани стакленим влакнима се користе као изолациони материјали [2].



Слика 3.5. Прибор за електрохемијску обраду са основним елементима: DE - довод електролита, OE - одвод електролита, SM - стежање маске [2]

Прибор мора испунити строге захтеве у погледу тачности, хемијске постојаности, као и електроизолације [2]. Прибор мора да испуни следеће основне задатке [2]:

- прихвати предмет обраде, позиционира га и стегне,
- обезбеди (+) пол на предмету обраде - аноди,
- обезбеди (-) пол на алату - катоди,
- позиционира алат у односу на предмет обраде,
- обезбеди ефикасан довод електролита у радни простор и
- омогући лако одвођење електролита са раствореним материјалом.

Прибор се у основи састоји из два дела, горње и доње основне плоче, где се преко њих прибор и причвршћује на машину алатку. Горњи део прибора је покретан и може се подизати (отвара се прибор) ради вађења обрађеног радног комада и спуштати (затвара се прибор) након постављања новог комада за обраду. Основна (доња) плоча служи за прихватање одређених елемената прибора и има отворе који омогућавају притезање доњег дела прибора на одговарајући елемент машине алатке. Елемент за прихватање предмета обраде служи за тачно центрирање и оријентацију положаја комада при обради. Горњи део прибора (горња плоча) поседује заптиваче за заштиту од прскања електролита и има елементе за центрирање и притезање предмета обраде и електроде - алата. Алат је обликован просторно према контури која ће се обрађивати на предмету обраде. Машине алатке могу поседовати и неколико стезних прибора. Стезни прибор коришћен у овим машинама се састоји од кућишта за катоду и аноду и садржи посебно израђене урезе и жлебове за униформни проток електролита кроз њега [2, 24].

Због корозионог дејства електролита, избору материјала за поједине елементе машине треба посветити посебну пажњу. Иако се тежи да циркулација електролита буде строго контролисана, ипак се не може избећи њихово расипање по неким елементима машине. Такви елементи се морају израђивати од нерђајућих челика или пресвлагати слојем изолационог материјала, односно пластифицирати [2, 7].

3.1.1. Врсте машина за електрохемијску обраду

Покушај да се направи једнозначна класификација постројења, односно машина и опреме за електрохемијску обраду је доста проблематична, јер често и при инсталацији за исту намену електронски агрегат може имати веома различита конструктивна решења. Због тога се у индустријској пракси налази велики број различитих инсталација и опреме за различите поступке електрохемијске обраде које се међусобно разликују по свом конструкторском решењу [7].

Зависно од намене и услова рада, машине за електрохемијску обраду могу бити конзолног или постелног типа, различитих димензија, експлоатационих карактеристика, нивоа аутоматизације и заштите, намене итд. [2]. Отуда се и машине за електрохемијску обраду могу сврстати према различитим критеријумима [7]:

- према степену универзалности,
- према нивоу аутоматизације,
- према технолошкој намени,
- према кретању електроде,
- према габаритним димензија и др.

Подела врста машина по *степену универзалности* се може извршити на [7]:

- универзалне,
- специјализоване и
- специјалне.

Универзалне машине имају могућност извођења широког спектра технолошких операција, као и обраду различитих предмета. Степен универзалности машина се креће у широким границама. *Специјализоване машине* су намењене за обраду површина истог типа одређених делова, који се међусобно разликују само по својим мерама. *Специјалне машине* су намењене за извршавање специјалних операција на одређеном делу [7].

Подела врста машина по *нивоу аутоматизације* се може извршити на [7]:

- машине са ручним управљањем,
- машине са елементима аутоматизације,
- полуаутоматске машине и
- аутоматске машине.

Код *машина са ручним управљањем* све помоћне операције врши оператер који управља машином. Код *машина са елементима аутоматизације* поједине операције се изводе аутоматски, али је и даље потребно одређено учешће оператера при управљању. Овакав степен аутоматизације машине се одликује доста високом универзалношћу. Код *полуаутоматских машина* све је аутоматски, осим постављања и скидања предмета који се обрађује. Ове машине могу бити и нумерички управљане (NC), где се овим машинама могу постићи доста висока производност и тачност обраде, при чему је задржан изванредан ниво универзалности. *Машины аутомати*, односно *аутоматске машине* се одликују аутоматизацијом у целом циклусу обраде радних делова. У оквиру саме машине постоје и магацини са полуфабрикатима и магацини са обрађеним деловима [7].

Подела врста машина за електрохемијску обраду по технолошкој намени се може извршити на [7]:

- машине за копирно глодање и дубљење,
- машине за израду турбинских лопатица,
- машине за израду ротационих предмета (машины за обраду стругањем),
- машине за израду дубоких отвора,
- машине за скидање венца и оштрих ивица,
- машине за калибрисање и др.

Машины за израду лопатица се у зависности од дужине „крилаца“ деле на мале, средње и велике. Мале и средње машине се углавном граде за двоструку обраду крилаца, док веће за обраду само са једне стране. *Машины за копирно глодање и дубљење* могу бити вертикалне и хоризонталне. Код ових машина електрода врши само праволинијско

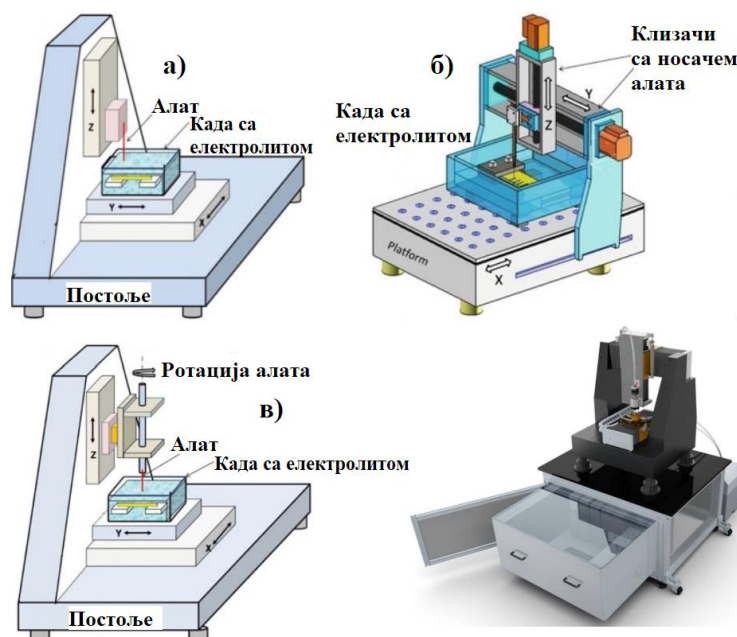
кретање. *Електрохемијски стругови* се примењују за израду ротационих делова. Ове машине имају радно вретено на које се поставља предмет обраде, а алат (катода) врши транслаторно кретање. *Машине за калибрисање* спадају у групу специјалних машина које се користе за израду жлебова дуж дубоких отвора. Могу бити изведене као вертикалне и хоризонталне, а њихова конструкција се мења у складу са карактером операција [7].

3.1.1.1. Главни делови машина за електрохемијску обраду

Машине за електрохемијску обраду се састоје од: базе, односно постоља, носеће структуре, радне коморе, држача алата, клизача и вођица. Велики број делова машине је сличан са деловима који се јављају код механичких и електроерозионих машина [7].

3.1.1.1.1. База (постоље) и носећа структура

Машине за електрохемијску обраду, као и машине за остале поступке обраде морају поседовати одговарајуће постоље, односно базу (слика 3.6), Машина, као и цело постројење за електрохемијску обраду, садржи разне елементе и додатну опрему, као на пример пумпу за циркулацију електролита, вођице са корачним мотором за померање алата и контролисање помака, затим радну комору, носач алата, као и остале електричне компоненте. Сва та опрема машине, као и цела њена носећа структура морају да стоје на бази (постољу). Додатна опрема може, али и не мора бити део носеће структуре машине. Пумпа приликом рада ствара вибрације, које се потом преносе на цели систем и носећу структуру. То може да доведе по вибрација у алату и предмету обраде, што даље доводи до нетачне обраде и стварања шкарта. Вођица и клизач на којој је алат монтиран мора да буде такође крута, чиме се спречавају нежељене вибрације. Промена притиска у радном зазору такође изазива вибрације, што такође утиче на тачност обраде. Главни задатак постоља машине јесте да вибрације како саме машине, вибрације остатка инсталације, као и вибрације створене из окружења упија и неутралише [7, 32].

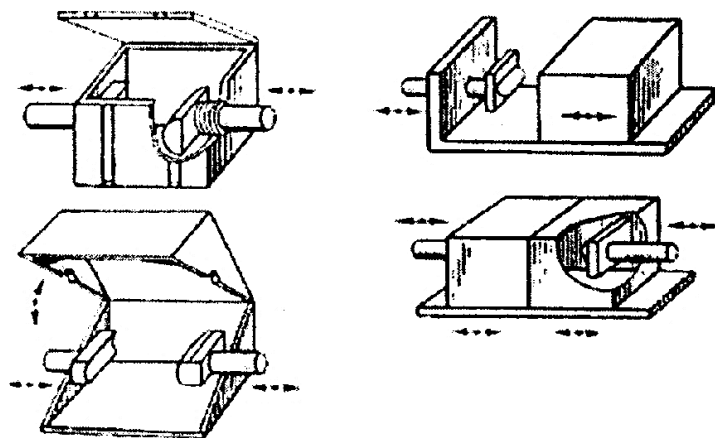


Слика 3.6. Упрошћени изгледи различитих типова постоља и носеће структуре машина за електрохемијску микрообработку: а) стубни тип носеће конструкције са непокретним и покретним алатом (а и в) и мосни тип носеће конструкције (б), заједно са приказом 3D CAD модела мосног типа са постољем и носећом структуром [16, 23]

При поступцима електрохемијске обраде између алата и предмета обраде могу се јавити изразито велике силе, што условљава већу крутост машине. У овом простору делују електромагнетне силе и хидростатичке силе. Електромагнетне силе су у поређењу са хидростатичким силама релативно мале, па се могу занемарити. Хидростатичке силе зависе од хидрауличног притиска у радном зазору, као и активне површине алата [7].

3.1.1.1.2. Радна комора

Радна комора или простор за обраду (сл. 3.7) представља један од основних делова машине за електрохемијску обраду и служи за заштиту радника, околине и елемената инсталације од агресивног дејства електролита. У неким случајевима, поред заштитне улоге, радна комора може да има и носећу функцију и да обезбеди потребан положај алата у односу на предмет обраде. У комори се поставља предмет обраде и врши процес анодног растварања. Унутар радне коморе се налази када у коме је смештен електролит, предмет обраде, алат и прибор за стезање предмета обраде. Материјал који се користи за изградњу радних комора мора бити електронепроводљив, некорозиван, мале тежине и на једном свом делу провидан, односно направљен од довољно транспарентног материјала (стакло и пластичне масе) да би се могао посматрати процес обраде [7, 12, 23].

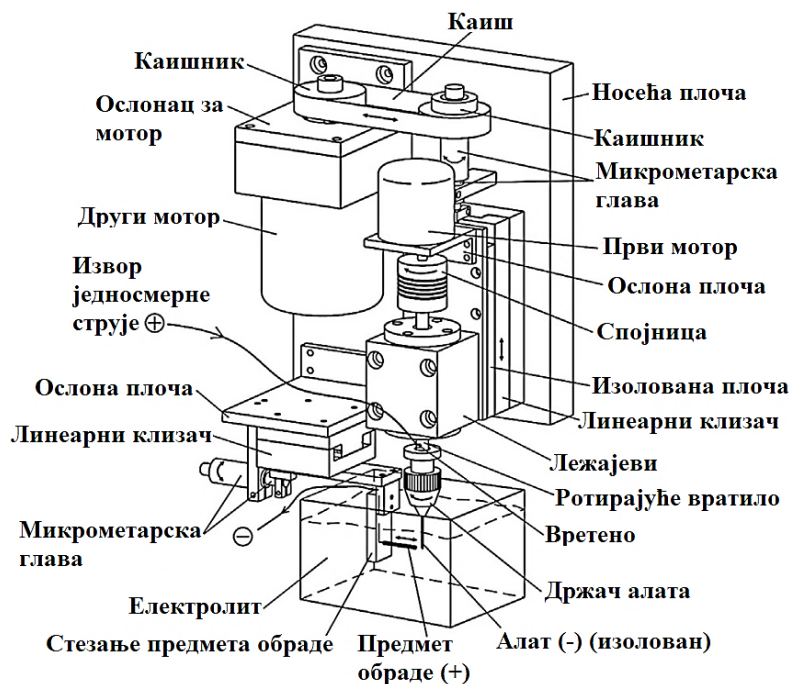


Слика 3.7. Конструктивна решења радних комора код машина за електрохемијску обраду [7]

Радне коморе могу бити покретне или непокретне. Оне се израђују од нерђајућег челика, пластичних маса или других конструктивних материјала. По величини, радне коморе се могу поделити на: мале радне коморе (600×350×300 mm), средње радне коморе (800×600×500 mm), као и велике радне коморе (1000×1000×1000 mm) [7].

3.1.1.1.3. Држач алата, клизачи и вођице

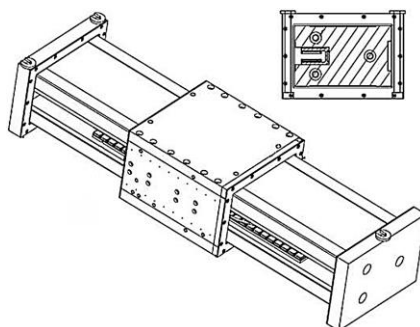
Држач алата служи за придржавање алата током процеса електрохемијске обраде. Држач алата мора поседовати велику крутост и не сме дозволити вибрације алата током обраде. Главни критеријуми који се разматрају приликом дизајнирања држача алата јесу: компактност, отпорност на корозију, могућност монтирања великог броја електрода, као и поједностављање протока електролита, тј. пројектовање најкраћег пута електролита. Уколико алат није симетричан у односу на држач, могу се јавити моменти, што изазива нетачност обраде. Зато носач алата треба да има довољну крутост у попречном правцу. Вретено се састоји од корачног мотора и ротирајућег дела који је везан за электроду, односно алат. Вретено ротира электроду током обраде да би смањила негативно дејство несиметричности алата и држача [7, 16, 32].



Слика 3.8. Држач алата са осталим деловима машине за електрохемијску обраду [12]

Контрола и померање делова машине, као и држача алата и радног комада при електрохемијској обради се врши помоћу корачних мотора (први и други) или преко сервомотора (слика 3.8). Померања током сваког дела процеса електрохемијске обраде су синхронизована између свих делова машине. Различите или исте брзине помака могу бити задате било ком мотору у току процеса обраде. За обраду комплексних профила и димензионалних структура на предмету обраде препоручено је коришћење нумеричког (CNC) управљања [23].

Слика 3.9 приказује клизач за кретање алата по X-оси, са његовим попречним пресеком. Према литературном извору наводи се да је за постизање прецизног и тачног померања алата приликом електрохемијске обраде најбоље користити аеростатичне лежајеве. Ови лежајеви омогућавају кретање алата по вођици и клизачу готово без трења, са високим брзинама помака, чиме се постиже висока производност, тачнија обрада и лакше одржавање. Најчешће се у машини за електрохемијску обраду уграђују клизачи и вођице за X, Y и Z-осу са директним погоном мотора (корачног или серво мотора) [16].



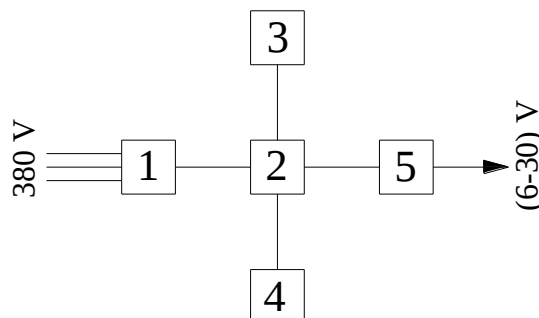
Слика 3.9. Клизач и вођица за X-осу алата и његов попречни пресек [16]

Код неких машина се у држач алата уграђује вибрациони систем чија је основна улога да побољша перформансе обраде тако што олакшава пролазак новог електролита кроз радни зазор. Вибрације алата праве таласе притиска који спирају продукте обраде из радног зазора. Вибрациони систем се састоји од пијезоелектричног претварача који изазива транслаторно кретање држача у једној оси и система за појачавање напона [23].

3.2. Извор напајања

За напајање инсталације, односно формирање електричне струје довољно високог нивоа густине користе се одговарајући агрегати или генератори. Генератор електричне струје треба да обезбеди једносмерну струју напона 2-30 V, као и висок ниво јачине електричне струје (10.000 A, а у неким случајевима и до 40.000 A). При овоме је излазни напон стабилизован са грешком $\pm 1\%$. То углавном захтева и посебне мере заштите од дејства електричне струје (као нпр. висок степен изолације и заштите елемената система, проводника и кућишта - каде у којој се реализује процес електрохемијске обраде) [2, 7].

Блок за напајање инсталације електричном струјом се састоји из трансформатора (1), исправљача (2), регулатора формата и поларности напона (3), уређајима за заштиту од појаве кратког споја (4) и уређаја за стабилизацију напона и електричне струје (5) [7]. Слика 3.10 приказује шему блока за напајање машине електричном струјом:



Слика 3.10. Шема блока за напајање машине електричном струјом [7]

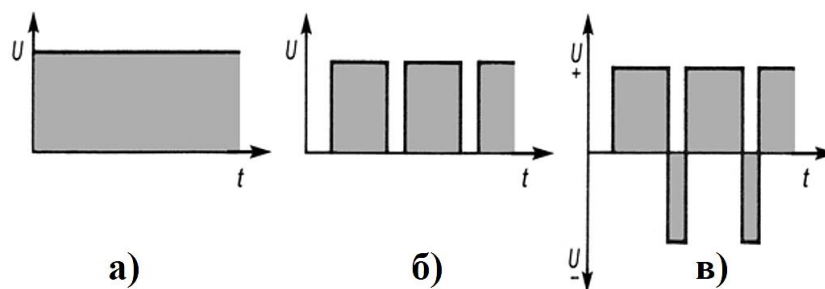
Трансформатор има задатак да смањи напон мреже на радни напон. Исправљач електричне струје претвара наизменичну струју у једносмерну струју која се потом даље користи у електрохемијској обради. Уређај за заштиту од кратког споја прекида довођење електричне струје на електроде одмах чим наступи кратак спој, односно појава електричног лука и варничења [7].

Потребна јачина електричне струје зависи од густине електричне струје, као и од величине површине обраде и одређује се следећом формулом [7]:

$$\frac{I_e}{\eta_e} = D \cdot A$$

где је: I_e - јачина струје која је потребна за анодно растварање и η_e - коефицијент оптерећења блока за напајање електричном струјом при дуготрајном паду.

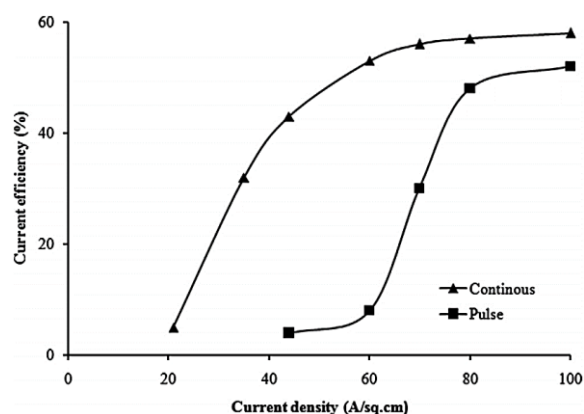
У зависности од облика напона које производе, генератори једносмерне струје могу бити: *статички*, *униполарни импулсни* и *биполарни импулсни* генератори. На слици 3.11 је приказан ток напона са временом код ова три типа генератора [2].



Слика 3.11. Могући облици излазног напона генератора: а) константан напон, б) униполарни импулси и в) биполарни импулси [2]

Примена импулсних генератора је показала врло добре резултате на побољшању тачности обраде, што је раније појашњено. Биполарни импулсни генератори омогућавају електрохемијску обраду тврдых метала. При електрохемијској обради на тврдом металу може се формирати танки оксидни слој (филм) (волфрамоксид) који због своје високе отпорности може довести до потпуног прекида тока електричне струје, а самим тим и до прекида у скидању материјала. Применом биполарног генератора, предмет обраде од тврдог метала се кратко претвара у катоду, чиме се уклања настали оксидни филм. Лоша страна примене овог поступка јесте значајније трошење електроде - алата [2].

Код импулсних генератора, периодично кретање и мењање електролита у радном зазору омогућава примену већих густина електричне струје током обраде, чиме долази до значајног повећања тачности обраде и квалитета обрађене површине. Током дејства импулса долази до локализованог анодног растварања, битног за процес обраде. Између два импулса, тј. у интервалу између два импулса електролит спира продукте обраде чиме се повећава ефикасност процеса обраде. Импулсни генератори се успешно примењују код машина за електрохемијско стругање где се постиже веома висок квалитет обрађене површине. Импулсна електрична струја поседује разне параметре као што су нпр.: ток напона, вредност напона (највећа и средња), јачина електричне струје (највећа и средња), фреквенција итд. Слика 3.12 приказује дијаграм ефикасности електричне струје у односу на густину електричне струје за непрекидни (константни) и импулсни напон у интервалу од 10 μ s и са трајањем импулса од 1 μ s. За константни напон ефикасност струје опада са смањем густине електричне струје, док је код импулсног напона пад густине електричне струје доста стрмији [12].



Слика 3.12. Дијаграм ефикасности струје у односу на густину електричне струје [12]

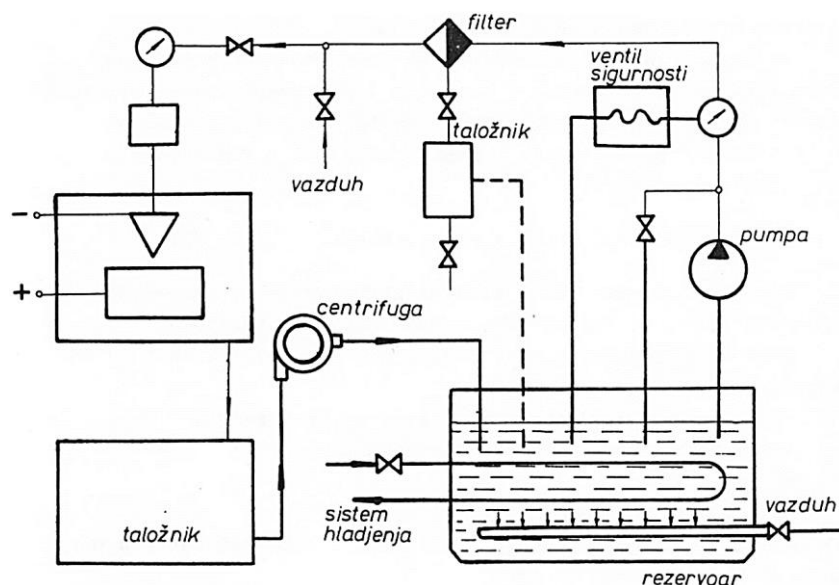
Напредак у пољу електротехнике и електронике у последњих две деценије донео је нове типове полупроводничких елемената (транзистора), као што су нпр.: метално оксидни полупроводнички транзистори (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - MOSFET*), изоловани биполарни транзистори (*Insulated Gate Bipolar Transistor - IGBT*), галијум нитрид транзистори (*Gallium Nitride Transistor*) итд. Они су омогућили новије дизајне извора напајања са већим фреквенцијама рада и краћим импулсима који се могу кретати и у наносекундама, што може смањити радни зазор и побољшати локализовано анодно растварање метала предмета обраде. Генератор импулсних напона се користи за снабдевање постројења за електрохемијску обраду импулсним напонам у електродама. Трансформатор смањује мрежни напон на радни напон, где се након тога наизменична струја (AC) од 220 V претвара у једносмерну струју (DC) помоћу исправљача. Употреба генератора са *MOSFET* транзисторима је веома корисна када је потребна брза промена импулсног напона. Успешно локализовано анодно растварање метала предмета обраде код макро и микро обраде захтева велику фреквенцију са краћим временом трајања импулса. Већина таквих комерцијално доступних транзистора су дизајнирана да раде са

максималном фреквенцијом од 1 МHz. Транзистори редукују струју у импулсном генератору и тако смањују густину електричне струје током процеса обраде. У случају потребе за већим фреквенцијама приликом процеса обраде, могу се користити импулсни генератори са максималном фреквенцијом и до 20 МHz. Импулсни генератор који се користи код поступака електрохемијске макро и микрообrade мора да испуни захтеве у погледу радног зазора. Због врло малог радног зазора код тих обрада, шанса за настанком кратког споја је доста висока, што је веома непожељно јер може довести до оштећења алата и предмета обраде. То се решава применом уређаја за заштиту од појаве кратког споја и уређаја за стабилизацију напона и електричне струје [12, 16].

Основни захтеви који се постављају код избора и дефинисања извора напајања су: обезбеђивање, заједно са системом за управљање, неопходне тачности и стабилности процеса обраде, затим спречавање могућег оштећења и разарања електрода при њиховом спајању (кратком споју), потом обезбеђивање степенастог или равномерног регулисања и стабилизације излазних величина (напона и јачине електричне струје, а тиме и густине електричне струје) и др. Поред тога извор напајања треба да је што компактнији (мањих димензија), погодан и лак за руковање и довољно економичан приликом експлоатације. Избор генератора се врши на основу максималне површине коју треба да се обради на датој машини, с тим да густина електричне струје буде око 100 A/cm^2 [1, 2].

3.3. Систем циркулације и регенерације електролита

У оквиру саме инсталације за електрохемијску обраду, један од главних делова заузима и систем циркулације и регенерације радне течности (електролита). Систем за циркулацију и регенерацију електролита, односно електролитски агрегат (слика 3.13) обезбеђује довод и одвод електролита, затим регулише његову циркулацију, хлађење, чишћење и филтрирање, као и стварање одговарајућих карактеристика (притисак, брзина струјања, проток и тсл.) и непрекидну контролу и регулисање параметара електролита. Основни елементи система јесу: резервоар за задржавање и чист електролита, цеви и црева, пумпа, затим уређај за пречишћавање електролита (седиментацијом, центрифугирањем, флотацијом или филтрирањем), уређај за хлађење и одржавање константне температуре и концентрације радне течности (електролита), као и контролно-мерни уређаји и системи развода са механизмима-елементима релевантних параметара [1, 2].



Слика 3.13. Шематски приказ система циркулације електролита [1]

У резервоар за припрему електролита се помоћу транспортера сипа електролит који се даље раствара без контроле његове концентрације. За пречишћавање електролита од примеса при растварању се користе различити *филтери*. Основна улога *агрегата за компримовање електролита у међуелектронски зазор* је обезбеђивање оптималне брзине кретања електролита у радном зазору (радној зони). Компримовање електролита се врши у пумпама различитог типа које се бирају у зависности од конкретних и задатих услова процеса електрохемијске обраде [7].

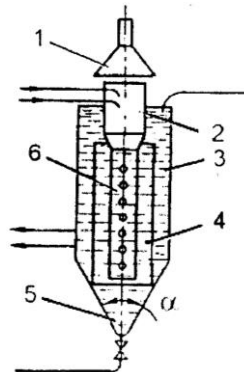
Од резервоара са пречишћеним електролитом се електролит даље у радни простор машине доводи под високим притиском помоћу пумпе. За довод електролита се најчешће користи центрифугална пумпа, мада се веома ретко могу користити и зупчaste, као и мембранске пумпе [1, 2]. Притисак (напор) пумпе зависи од притиска на изласку из зоне обраде (p_{iz}) и нивоа пада притиска у зони обраде (Δp_o) и у цевоводу (Δp_c), што значи [1]:

Један од најважнијих елемената у систему за циркулацију електролита су уређаји, односно *систем за пречишћавање електролита*, који у веома великој мери зависи од капацитета постројења. Електролит након процеса обраде и по изласку из радне коморе садржи оксиде, механичке нечистоће и гасове и мора се прочистити [1, 2].

Пречишћавање електролита се може вршити на више начина [7]:

- таложењем,
- центрифугирањем,
- филтрирањем и
- ротацијом (флотацијом).

Сам процес пречишћавања електролита *таложењем* захтева велике резервоаре за таложење и сам процес је прилично спор, мада се може убрзати додавањем коагулатора. Слика 3.15 приказује вертикални таложник са допунским пречишћивачем [7].



Слика 3.15. Вертикални таложник са допунским пречишћивачем [7]

Електролит се са продуктима обраде који долазе од машине приликом извршења процеса електрохемисјке обраде слива у преткомору (2), при чему му се смањује брзина и започиње поступак таложења. Преко перфориране цеви (6) се електролит премешта у међукомору (4) и на крају у спољашњу прстенасту комору (3), одакле се тако пречишћен враћа натраг ка машини за наставак процеса обраде. Преостали талог полако пада у доњи конусни део таложника (5). Уколико електролит поседује већу количину талог онда се он периодично усмерава на допунско пречишћавање [7].

При таложењу са коагулацијом запремина резервоара је 4-5 пута већа него при филтрирању центрифугирањем, када је радна запремина [1]:

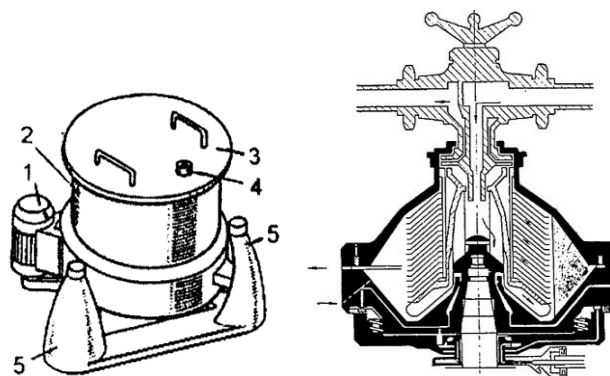
$$V_0 = 60 \frac{\eta K_e I m_2}{M_s q_l m_l}, (m^3)$$

У изразу су, између осталог [1]:

- m_2 - однос времена анодног растварања и комадног времена израде,
- q_l (g/l) - дозвољени ниво садржаја нечистоћа у електролиту и
- m_l - однос времена рада центрифуге и времена трајања циклуса.

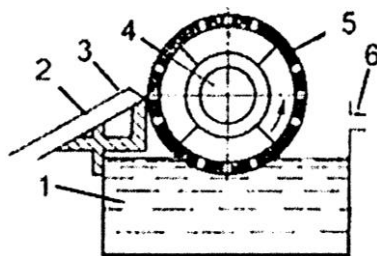
При филтрирању таложењем $q_l = 5-8$ g/l, а век трајања електролита је 30-40 сати. Код филтрирања центрифугирањем $q_l = 8-15$ g/l, век трајања електролита је 150-250 сати. Дозвољени ниво нечистоће, као и век трајања електролита, поред система филтрирања, зависи и од врсте производне операције која ће се извршити [1].

Пречишћавање електролита *центрифугирањем* врши се дејством центрифугалне силе у вртложном бубњу, при чему се специфично теже честице лепе за зидове бубња. Центрифуге се израђују од нерђајућег челика и других антикорозионих материјала, ради спречавања корозије која може настати у току процеса пречишћавања. Пречишћавање електролита овим поступком је релативно веома брзо, па је овај метод нашао нешто већу примену и индустријској пракси. На слици 3.16 је приказан центрифугални пречишћивач електролита са датим позицијама [7].



Слика 3.16. Центрифугални пречишћивач електролита (сепаратор): 1) електромотор, 2) тело пречишћивача, 3) поклопац, 4) улаз електролита и 5) лежиште [7, 28]

Запрљани електролит се може чистити и преко *вакуумског филтера* (слика 3.17). Запрљани електролит са продуктима обраде се преко отвора (6) спушта у бању (1), одакле се даље усисава у бубањ (4) који је везан вакуумском пумпом. При проласку запрљаног електролита кроз сито бубња непожељни продукти обраде се задржавају на сити, при чему се формира слој нечистоће (5). Запрљани електролит се може пречишћавати и филтрирати на температури од 18-35 °C, док бубањ може бити зароњен у бању 33-50 % свог пречника и имати број обртаја од 1-4 min⁻¹ [7, 34].



Слика 3.17. Шематски приказ пречишћавања електролита вакуумским филтером [7]

У зависности од капацитета постројења за електрохемијску обраду, као уређаји за пречишћавање електролита могу се користити таложни резервоари (базени), центрифуге и филтер пресе. За релативно мала постројења примењује се центрифугирање или филтер пресе, док се код великих инсталација користе таложни резервоари (таложници) заједно у комбинацији са центрифугама или филтер пресама. Пре самог упућивања у радни зазор, пречишћени електролит се још једном проводи кроз филтер са улошцима како би се одстраниле и оне најфиније честице продукта обраде [2].

Испуштање електролита са продуктима обраде у канализацију не може бити извршено без претходног одстрањивања отровних материја које се налазе у њој. Садржај Cr, Cu, Ni и Zn у отпадним водама су законски уско ограничене у оквиру садржаја метала. Такође, због растварајућег деловања различитих киселина и база које се користе при електрохемијским поступцима обраде, као и опасности од експлозије хлората, морају се код примене ових раствора заштитити оператери и радна места применом посебних мера сигурности, као што је заштита од прскања, коришћење гумене одеће и рукавица итд. [2].

Иако су електролити који се користе при електрохемијској обради веома токсични и штетни по здравље људи и животне средине, могу се користити разблажене киселине. Ипак опасност по животну средину представља одлагање киселих и базних електролита, као што су нпр. H₂SO₄, HF и NaOH. Да би се електрохемијска обрада направила еколошки прихватљивијом и јефтинијом, у последње време се примењује минерална вода као електролит. Минерална вода је чисто и еколошки прихватљивије решење јер не изазива корозију и веома лака је за одржавање системом циркулације електролита. Примена овог

јефтинијег електролита смањује цену обраде. Али и поред свих својих предности, постоје и недостаци као што је мања електрична проводност, зато што је број јона много мањи у минералној води него у осталим електролитима. У поређењу са дестилованом водом, минерална вода је боља зато што поседује јоне: H_3O^+ , OH^- и Na^+ . Приликом коришћења минералне воде као електролита потребан је доста већи напон приликом обраде него код осталих електролита због тога што је електрични отпор и дебљина електричног дуплог слоја доста већа (слика 2.7). Побољшање тачности обраде се може постићи побољшањем дистрибуције протока електролита у радном зазору. Након обраде електролит пролази кроз базен, односно резервоар (пречишћавање таложењем) или кроз филтер чиме се електролит пречишћава и уклањају му се продукти обраде [12].

Електролит се мења са временом током процеса обраде. Неке од главних промена електролита које се дешавају током обраде и његовог ефекта на процес обраде су [23]:

- губитак водоника што узрокује смањење електричне проводности електролита и повећава његову рН вредност,
- губитак воде испаравањем или преко гасних мехура што повећава концентрацију електролита и негативно утиче на његову електричну проводност и вискозитет,
- формирање талоба који смањује концентрацију електролита и негативно утиче на његову електричну проводност и
- метални јони из аноде могу прећи у електролит и бити депоновани на катоди.

Претходно наведене промене електролита значе да исти поседује ограничени век трајања и коришћења, што значи да се мора стално вршити циркулација, пречишћавање и регенерација електролита. Мора се пажљиво пратити процес пречишћавања и поновне употребе електролита. Приликом одређених процеса електрохемијске обраде, поред талоба и продуката обраде, могу се појавити и доста fine честице и метални јони који се не могу отклонити из електролита филтрацијом, центрифугирањем ни таложењем, што доста ограничава поновну регенерацију и коришћење електролита [12, 23].

Разводна (цевна и цревна) доводно-одводна мрежа система за циркулацију и регенерацију електролита се може израђивати од бакра или неког другог антикорозионог материјала [1, 2]. Довод електролита у зону обраде се може извести на различите начине, као што је претходно описано код поглавља 2.1.6, и то [1]:

- довод поред предмета обраде и одвод кроз радни зазор,
- довод кроз алат и одвод кроз радни зазор,
- довод и одвод кроз алат и
- слободно натапање електролитом,

што опет зависи од врсте производне операције, као и основних захтева и задатих почетних услова у процесу електрохемијске обраде [1].

3.4. Систем за управљање и контролу

Систем контроле и управљања обезбеђује синхронизацију рада делова машине, генератора-извора напајања и система циркулације и регенерације електролита, мерење и контролу свих параметара значајних за правилно функционисање и одвијање процеса електрохемијске обраде, као и управљање у току обраде. Управљачки орган има задатак да синхронизује рад свих делова постројења за електрохемијску обраду и да их повеже у једну функционалну целину. Пошто се електрохемијска обрада користи искључиво за серијску, великосеријску и масовну производњу, то се за управљање процесом рада савремених постројења користи врхунска електроника и аутоматика [1, 2].

Мерењем јачине и напона електричне струје, затим температуре, брзине струјања, рН вредности, алкалног и киселинског броја електролита, брзине помоћног кретања електрода и тсл. и потом њиховим сравњивањем са унапред дефинисаним вредностима параметара обраде, остварује се одговарајуће управљање, односно регулисање процеса електрохемијске обраде. Систем контроле поред синхронизације рада делова машине, регулише и параметре електролита, радни зазор и врши контролу рада у смислу заштите и спречавања појаве кратког споја [1, 7].

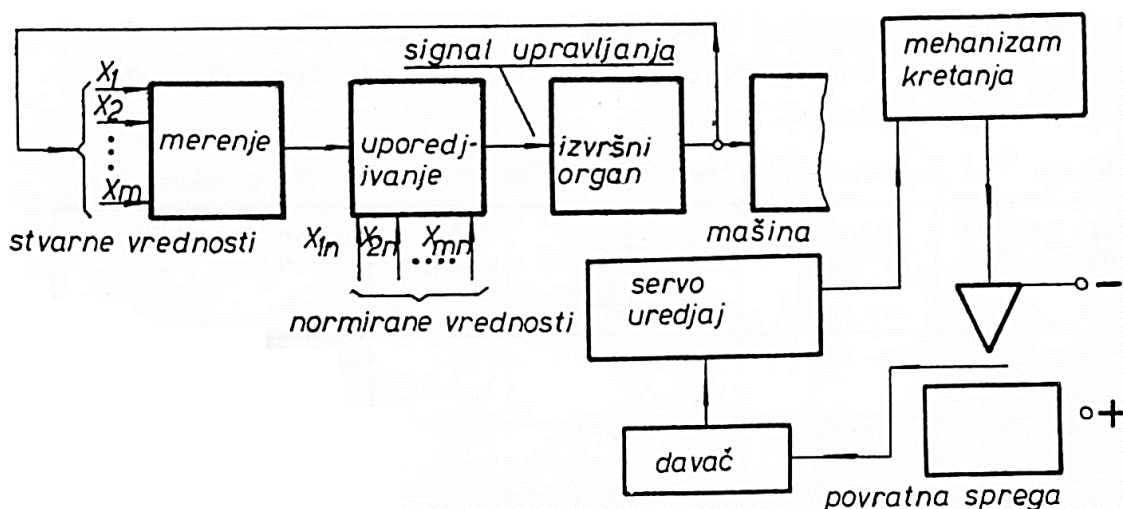
Систем за управљање деловима машине обезбеђује укључивање и искључивање пумпе за улазак електролита у радну комору, генератора извора једносмерне струје, уређаја за вентилацију, као и других механизма којима је машина опремљена. *Систем за регулисање параметара електролита* служи за одржавање параметара електролита у одређеним границама које су неопходне за правилно одвијање процеса обраде [7].

Обично се врши заштита од појаве кратких спојева, као и заштита генератора од превисоких струја и напона. Заштита електрода од кратког споја врши се скраћивањем времена искључења радне струје (износи око 0,7 ms), док се заштита исправљача од превисоких струја обично врши брзо топлјивим осигурачима. Кратке спојеве при обради може да проузрокује: прегревање електролита, појава кристализације у зони обраде, нагомилавање продукта обраде у радном зазору, мала брзина струјања електролита, као и грешке одржавања радног зазора уређаја за помак [2].

Систем за заштиту од кратког споја има два задатка [7]:

1. да заштити машину и опрему од електричне струје са већом јачином од максимално дозвољене и
2. да заштити алат и предмет обраде од топлотног дејства и термичког напрезања, који је резултат електричног пражњења између њих.

Основу процеса управљања чини *систем регулисања величине радног зазора*, који је приказан на слици 3.18, с обзиром да он битно утиче на сам процес обраде. Систем за регулисање радног зазора служи за одржавање константног радног зазора при промени неког другог параметра процеса електрохемијске обраде. Притом се разликују отворени системи управљања (са константном брзином кретања алата), системи са директним мерењем вредности радног зазора у процесу обраде, системи са индиректним мерењем вредности радног зазора и системи регулисања са компензацијом померања алата. Ово значи да систем за одржавање радног зазора може бити континуалног или периодичног дејства [1, 2, 7].



Слика 3.18. Принципијелна шема блок-дијаграма регулисања вредности радног зазора [1]

Мањи радни зазор даје највећу производност и тачност при обради, али то доста отежава одвођење продуката обраде, због чега се тражи компромис. За регулацију радног зазора се користе следећи технолошки параметри: напон или струја између електрода, брзина анодног растварања и величина радног зазора (користи се промена притиска у систему електролита). У систему за регулацију радног зазора се најчешће користе серво или корачни мотори једносмерне струје [7].

Свака промена радног зазора између електроде (алата) и предмета обраде изазива промену омске отпорности зазора, а то значи и промену радне струје или напона. Ако се ова промена, измерена одговарајућим мерним инструментима, узме као сигнал грешке, онда се њеном обрадом у систему за помак врши убрзавање или успоравање помака електроде све док се не успостави задато стање. При обради са великим радним зазорима, за регулацију се користи константна брзина помоћног кретања, која треба да је иста као и брзина анодног растварања. За регулацију радног зазора се може користити и промена притиска електролита која се региструје на доводном воду [2].

Током електрохемијске обраде велики број изабраних параметара током процеса мора остати непромењен, јер они имају директан утицај на тачност обраде и квалитет обрађене површине. Промена напона при обради може довести до нетачне димензионе обраде комада, док храпавост површине зависи од густине електричне струје. Поред ових параметара потребна је пажљива контрола: помака алата, напона у радном зазору, материјала предмета обраде и стања електролита (врста, температура и концентрација, рН вредност и проводност). Систем за управљање процесом обраде треба да спречи превелико загревање и испаравање електролита и варничење између електрода [11].

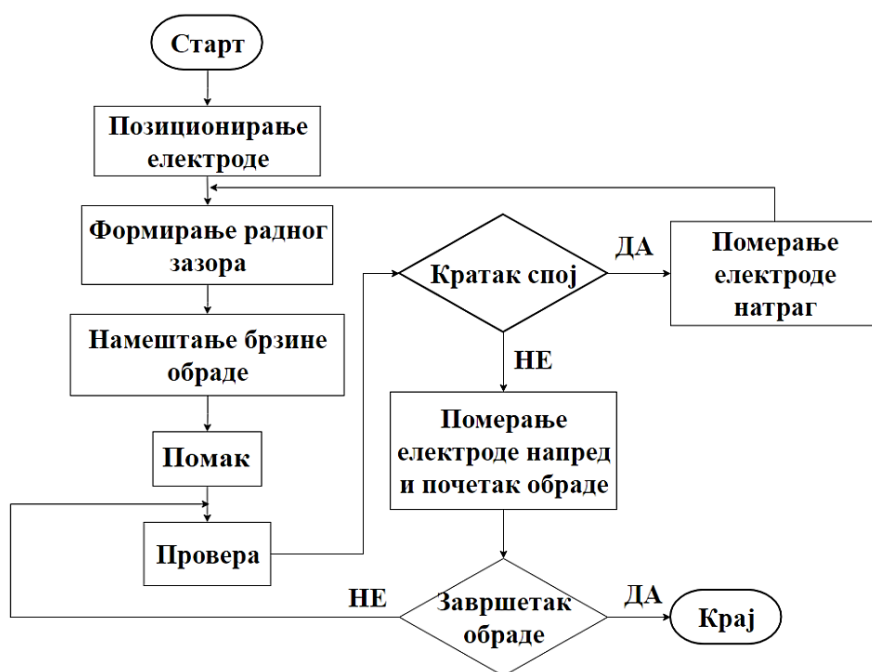
Правилно постављени параметри процеса на систему за управљање постројењем доводи до сузбијања нежељених дешавања током обраде, побољшава квалитет добијеног производа и повећава производност процеса обраде, због следећих разлога [11]:

- Нестационарно понашање при електрохемијској обради настаје услед вариција вредности радног зазора, које настају због формирања гасних мехурова, повишене температуре, пасивизације и тсл. Правилно постављеним параметрима обраде се елиминишу претходно наведена нежељена понашања.
- За велике предмете обраде актуелно време обраде представља велики проценат целог процеса производње електрохемијском обрадом. Било који напредак у перформансама поступка обраде може довести до значајног смањења времена у процесу производње и великог повећања продуктивности, тј. производности.
- Цена коштања додатне опреме, односно система за контролу и управљање је и даље мала у односу на цену коштања целог постројења, укључујући и генератор електричне струје и систем за циркулацију и регенерацију електролита. То значи да уколико постоји начин за унапређење система контроле и управљања машине то треба урадити, јер предности и добици који се тиме остварују доста превазилазе цену новог система.
- Коришћење модерне опреме и система за контролу и управљање постројењем повећава број радних сати који се могу одрађивати без потребе оператера, што повећава ефикасност машине и производност електрохемијске обраде и укључује могућност употребе и интеграције напредних CAD/CAM система.

Параметрима процеса се пре саме обраде одређује путања кретања алата и брзина померања алата и/или предмета обраде. Током процеса обраде се алат креће константном брзином према предмету обраде ради одржавања претходно дефинисаног радног зазора. Уколико је брзина кретања алата мања од брзине уклањања материјала, радни зазор се

између електрода доста повећава што доводи до нетачне обраде радних делова, а уколико је брзина кретања алата већа од брзине уклањања материјала, радни зазор се смањује и после одређеног времена долази до кратког споја и појаве варничења. Систем контроле и управљања мора да одржава минимални радни зазор да би се процес обраде успешно завршио, као и да спречи појаву кратког споја и појаву варничења [11, 12, 23].

Систем контроле и управљања радног зазора је код машина за електрохемијску микрообработку доста специфичнији. Пошто је код микрообработке предмет обраде доста мањи, уклањање талога и продуката обраде постаје доста теже и компликованије. Ово је последица смањења Рејнолдсовог броја због природе електролита да су статични у тако малим радним зазорима и повећања његовог вискозитета због доспећа продуката обраде у сам електролит током обраде. Зато да би се отклонио талог и продукти обраде, микро алат се помера горе-доле у Z-оси (вибрира) уз помоћ пиезоелектричног транзистора и претварача, што је претходно описано у поглављима 3.1.1.1.3 и 3.2. Коришћем оваквог система контроле и управљања у процесу електрохемијске микрообработке постиже се да радни зазор може бити контролисан у вредностима од око 10 μm [12].



Слика 3.19. Дијаграм тока регулисања вредности радног зазора [12]

Слика 3.19 приказује дијаграм тока регулисања вредности радног зазора током електрохемијске обраде. Позиционирање електроде и формирање радног зазора између алата и стегнутог предмета обраде је одређена параметрима и захтевима самог процеса електрохемијске обраде. Одговарајућа брзина процеса обраде је подешена унапред преко нумеричког система машине (CNC). Алат добија одговарајући помак и долази до почетка обраде. Систем за заштиту од појаве кратких спојева периодично проверава и детектује уколико се деси кратак спој и појаве варничења током процеса обраде. Када алат додирне површину предмета обраде или је радни зазор између њих само неколико μm , тако да се продукти обраде не могу спирати него се таложе и праве мост (*bridge gap*) између алата и предмета обраде и додирује их, систем тада детектује кратак спој и систем управљања потом помера електроду врло брзо унатраг да би се спречило оштећење алата и предмета обраде услед појаве кратког споја, тј. варничења. Након тога се поново успоставља одговарајући радни зазор и врши се нова провера пред наставак процеса обраде. Систем контроле и управљања радним зазором потом проверава да ли је дошло до завршетка обраде и уколико јесте, онда следи крај процеса електрохемијске обраде [12].

3.5. Експлоатационе карактеристике инсталације

Основне експлоатацијске карактеристике инсталације за електрохемијску обраду се могу поделити у три групе [1]:

1. карактеристика извора напајања (снага, излазни напон, као и јачина електричне струје),
2. карактеристике машине и опреме (ход и брзина кретања, односно обртања алата, димензије радног стола и радне средине - каде, систем померања алата - ручни или аутоматски и тсл.) и
3. карактеристике система за циркулацију и регенерацију електролита (запремина резервоара, производност и остале карактеристике пумпе, систем пречишћавања и регенерације електролита итд.).

Димензије предмета обраде и алата, затим максимални притисак и брзина кретања електролита, максимална тачност и квалитет обрађене површине, потом производност и економичност прераде, ниво потрошње електричне енергије и тсл. представљају, такође, значајне карактеристике инсталације за електрохемијску обраду [1].

3.6. Примери машина и опреме за електрохемијску обраду

Машине које се користе за поступке електрохемијске обраде, зависно од намене, врсте процеса обраде и услова рада, могу бити различитих димензија, експлоатационих карактеристика, нивоа аутоматизације, контролних система (CNC), заштите при раду, намене, нивоа додатне опреме итд. [1, 2, 7].

Према врсти процеса електрохемијске обраде, машине се могу поделити на [7]:

1. машине за површинску (2D - дводимензионалну) електрохемијску обраду и
2. машине за димензионалну (3D - тродимензионалну) електрохемијску обраду.

Слика 3.20 приказује специјалну машину за електрохемијску (2D) површинску двоструку обраду лопатица гасних турбина, чије су карактеристике дате у табели 2 [35]:



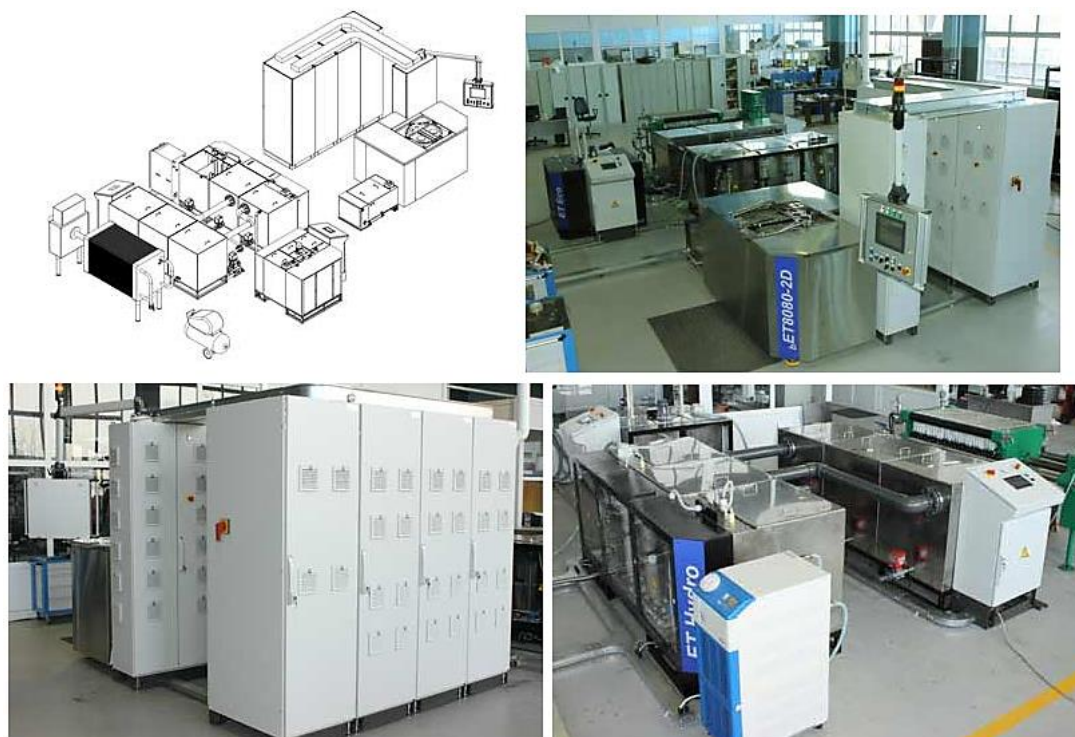
Слика 3.20. *Савремена хоризонтална машина за процес дводимензионалне електрохемијске обраде „Indec: ECM ET8080-2D“ [35]*

Машине за израду лопатица се у зависности од дужине лопатица могу поделити на мале, средње и велике. Мале и средње машине углавном се граде за двоструку обраду лопатица, док веће за обраду лопатица само са једне стране [7].

Табела 2. Карактеристике машине [35]:

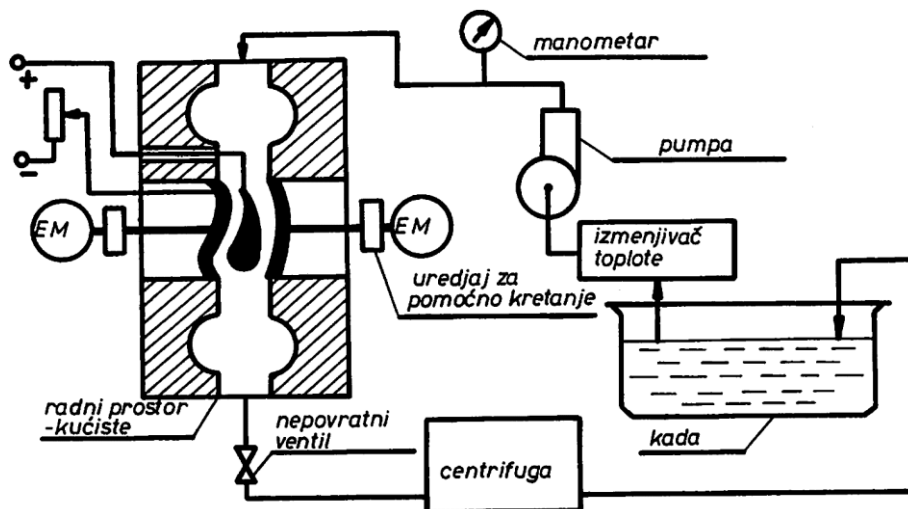
Параметри	Вредност
Димензије радног стола (дужина × ширина) [mm]	650 × 550
Максималне димензије радног предмета (дужина × ширина × висина) [mm]	400 × 350 × 300
Димензије радног зазора између алата и предмета обраде [μm]	5 ÷ 20
Радни ход алата по X, Y осама [mm]	300, 250
Брзина празног хода [mm/min]	350
Брзина кретања алата [mm/min]	0,0001 / 1
Максимална брзина обраде радног комада [mm/min]	0,7
Капацитет система за циркулацију електролита [l]	880
Максимална јачина генератора електричне импулсне струје [A]	8000
Максимални напон генератора електричне струје [V]	43
Максимална тежина предмета обраде [kg]	75
Максимална тежина електроде - алата [kg]	6,8

Претходно приказана машина може остварити димензију радног зазора између алата и предмета обраде од 5-20 μm и према томе високу тачност приликом обраде. Врло мала одступања формиране површине предмета обраде од облика катоде дозвољавају веће упрошћавање дизајнирања електрода. Овом машином је могуће остварити добар квалитет површине, где се вредност храпавости обрађене површине предмета обраде креће у вредности $R_a = 0,1 \div 0,4 \mu\text{m}$ [35]. Слика 3.21 приказује шему целе инсталације ове машине, са електричним ормаром, односно генератором импулсне електричне струје, система за циркулацију електролита, као и саму машину алатку:



Слика 3.21. Шема целе инсталације са електричним ормаром и системом за циркулацију електролита [35]

Машина је нумерички управљана (CNC) и помоћу нумеричког система машине се контролишу режими процеса електрохемијске обраде. Машина користи биполарни импулсни генератор једносмерне електричне струје, где је јачина генератора 8000 А и напон од 43 V. Генератор електричне струје ове инсталације има сопствено аутоматско хлађење [35]. Слика 3.22 приказује електрохемијску обраду турбинских лопатица:



Слика 3.22. Шематски приказ електрохемијске обраде турбинских лопатица (малих, средњих и великих димензија) [1]

Машина поседује и мотор за стварање вибрација код алата приликом обраде. Носећа структура ове машине поседује добру крутост и стабилност амплитуда вибрација ($< 2\mu\text{m}$) које се стварају током рада саме машине и из околине. Систем за циркулацију и регенерацију електролита је самосталан, односно поседује своје напајање и има затворен циклус рада. Систем циркулације електролита има и додатну опрему у виду подсистема за припремање електролита и отклањање Cr^+ јона [35].

На сл. 3.23 су приказане машине за процесе електрохемијске димензионалне (3D) обраде, где су карактеристике машине дате у табели 3 [35]:



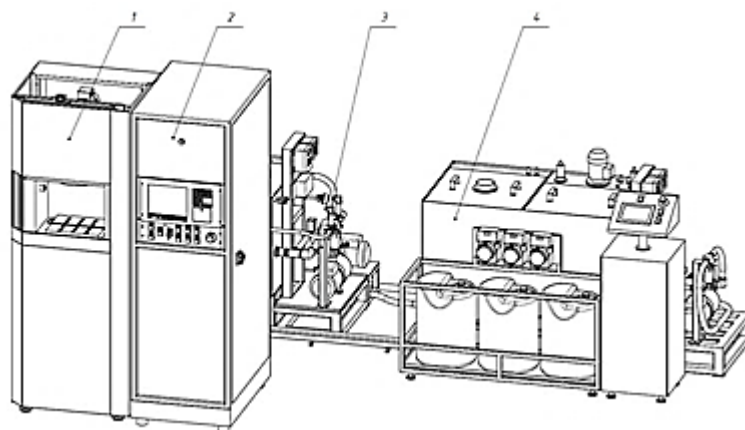
Слика 3.23. Савремене вертикалне машине за процес тродимензионалне електрохемијске обраде „Indec: ECM ET1000“ (лево) и Indec: ECM ET6000-3D (десно) [35]

Приказане машине за процесе електрохемијске тродимензионалне (3D) обраде су намењене за прецизне електрохемијске обраде комада који су направљени од материјала као што су: титан, никл, бакар и легуре од тврдих метала. Ове машине се могу користити још и за обраду магнета и наноструктурних легура итд. [35].

Табела 3. Карактеристике машине ET6000-3D [35]:

Параметри	Вредност
Димензије радног стола (дужина × ширина) [mm]	450 × 400
Максималне димензије радног предмета (дужина × ширина × висина) [mm]	350 × 300 × 250
Димензије радног зазора између алата и предмета обраде [μm]	5 ÷ 80
Радни ход алата по X, Y и Z осама [mm]	200, 150, 250
Брзина празног хода [mm/min]	300
Брзина кретања алата [mm/min]	0,001 / 1
Максимална брзина обраде радног комада [mm/min]	0,5
Капацитет система за циркулацију електролита [l]	740
Максимална јачина генератора електричне импулсне струје [A]	4500
Максимални напон генератора електричне струје [V]	30
Максимална тежина предмета обраде [kg]	50
Максимална тежина електроде - алата [kg]	5

Претходно описане машине су намењене за процесе електрохемијске обраде као што су профилисање, дубљење, нагризање, бушење отвора, прављења пресерских алата и притискивача преса, потом делова за авионску, ракетну, свемирску и аутомобилску индустрију, затим обраду прецизних медицинских инструмената, скупоценог накита итд. Машине могу остварити димензију радног зазора између алата и предмета обраде која се креће од 5-80 μm и према томе високу тачност приликом процеса обраде. Овом машином је исто могуће остварити добар квалитет површине, где се вредност храпавости обрађене површине предмета обраде креће у вредностима од $Ra = 0,2 \mu\text{m}$ [35]. На слици 3.24 је приказана шема целе инсталације ових машина, са датим позицијама:



Слика 3.24. Шема инсталације машина за процесе димензионалне електрохемијске обраде:
 1) машина алатка, 2) ормар са генератором импулсне електричне струје и са контролном таблом са аутоматским системом контроле процеса обраде и контроле радног зазора,
 3) хидраулични систем (за пречишћавање, регенерацију и циркулацију електролита) и
 4) додатна опрема у виду система за еколошко чишћење искоришћеног електролита [35]

Машине су нумерички управљане (CNC) и помоћу нумеричког система машине се контролишу режими процеса електрохемијске обраде, као и контрола радног зазора. Машина користи импулсни генератор једносмерне електричне струје, где је јачина генератора 4500 A и напон од 30 V. Генератор електричне струје ових инсталација такође

имају сопствено аутоматско хлађење. Носећа структура ових машина је доста крута, а такође поседују и додатни мали мотор за стварање вибрација код алата приликом обраде. Ове машине имају три осе које се могу контролисати и које омогућавају истовремену координацију димензионалне обраде код делова који имају доста комплексни облик површина. Најчешћи електролит који се примењује код ових машина јесте NaNO_3 [35].

У зависности од процеса електрохемијске обраде, машине се могу користити ефикасно, како код малих серија производње (нпр. пресерских алата), тако и у серијској производњи (на пример лопатица гасних турбина, прецизне медицинске опреме итд.). Интегрисани систем аутоматске контроле процеса електрохемијске обраде дозвољава да се након постављеног предмета обраде, даљи процес обраде наставља аутоматски, без учешћа оператера машине [35]. Поред великих машина који стоје на земљи, тј. постољу (фундаменту), постоје и мање машине за електрохемијску обраду које могу стајати на столу, где је на слици 3.25 приказана једна таква машина:



Слика 3.25. *Савремена вертикална стона машина за електрохемијску обраду „Indec: ECM ET500“ [35]*

Овако компактне машине се могу користити код завршне обраде делова, као што су обарање ивица, електрохемијско полирање и бушење. Компактне машине имају мању цену коштања и мање оперативне трошкове, али су и мање опремљене, као и доста мањих димензија па се могу поставити у мањим производним халама [35].

Маchine са електрохемијску обраду са једном станицом, односно једним носачем електрода (сл. 3.20, 3.23, 3.25) користе се за обарање ивица код великих предмета обраде. Уколико поседују радни простор великих димензија могу се на машинама монтирати и алати за вишепозициону обраду чиме се повећава производност процеса електрохемијске обраде. Маachine алатке са једним носачем електрода могу бити ручне, полуаутоматске и аутоматске, где се измена алата може вршити ручно, али и аутоматски чиме се још више повећава производност обраде [36].

Маachine алатке за електрохемијску обраду са два носача алата, односно са две радне станице могу истовремено вршити две електрохемијске обраде радних комада, чиме се удвостручује производност. Постављање предмета обраде и његово скидање се може обављати непрестано све док је једна станица слобода, односно не мора се чекати да се заврши једна обрада да би се започела друга обрада, као код машина са једном радном станицом [36]. Слика 3.26 приказује пример једне савремене вертикалне машине за димензионалну (3D) обраду са два носача електрода:



Слика 3.26. *Савремена вертикална машина за електрохемијску димензионалну обраду са два носача електрода [36]*

Постоје још и специјалне машине за процесе електрохемијске обраде. Специјалне машине се могу користити за обарање ивица код великих предмета обраде, као и обраду лопатица турбина, односно за извршавање специјалних операција на једном делу предмета обраде [36]. Слика 3.27 приказује један пример вертикалне специјалне машине са више радних станица за процесе електрохемијске обраде:



Слика 3.27. *Савремена вертикална специјална машина са више радних станица за процесе електрохемијске димензионалне обраде [36]*

Машине алатке за различите поступке електрохемијске обраде са обртним столом омогућавају повећање продуктивности и производности. Постављање и скидање радног предмета се дешава истовремено. Станица за постављање предмета обраде омогућава лако постављање истог и дозвољава врло лаку интеграцију са аутоматским механизмима постављања радног комада помоћу робота, односно манипулатора. Машине алатке са покретним, тј. обртним столом су лаке за одржавање јер поседују велику радну комору. Обртни сто може носити неколико радних станица за извршавање одређених поступака електрохемијске обраде, као што су нпр. операције прања и деконтаминације предмета обраде. Овај тип машине се може користити и за процесе електрохемијске обраде радних комада у случају да је потребно применити неколико некомпатибилних поступака електрохемијских обрада [36]. На слици 3.28 је приказан један пример обртног стола који се монтирају у машине за електрохемијску обраду са примером постројења:



Слика 3.28. *Савремена машина за електрохемијску обраду са обртним столом [35]*

Систем циркулације и регенерације електролита је један од најбитнијих делова инсталације за електрохемисјку обраду. Свака машина мора бити опремељена системом за циркулацију и регенерацију електролита, као и за контролу и регулацију различитих параметара електролита [36]. На слици 3.29 је приказан пример система и агрегата за циркулацију, пречишћавање (филтрацију) и регенерацију електролита:



Слика 3.29. *Систем и агрегат за пречишћавање, циркулацију и регенерацију електролита [36]*

Још једна најважнија јединица, односно систем инсталације за електрохемијску обраду јесте генератор електричне струје. За напајање инсталације, односно формирање електричне струје довољно високог нивоа вредности густине, јачине и напона користе се одговарајући агрегати или генератори. Систем за напајање инсталације електричном енергијом (струјом), тј. генератор електричне струје треба да обезбеди једносмерну струју одређеног напона, као и висок ниво јачине електричне струје [36]. На слици 3.30 је приказан ормар са напајањем, односно извор напајања постројења за електрохемијску обраду:



Слика 3.30. Електрична инсталација постројења за електрохемијску обраду [36]

Могуће је инсталацију за електрохемијску обраду опремити и разном додатном опремом (сл. 3.31). Неки од тих додатних опрема јесу: систем за аутоматизацију, односно манипулатор, систем за деконтаминацију и систем за транспорт предмета обраде. Већина машина за поступак обарања ивица може бити опремљено роботском аутоматизованом јединицом, чиме се значајно повећава производност и продуктивност процеса обраде. Процеси електрохемијске обраде захтевају радне комаде који морају бити чисти, тј. не смеју садржати трагове уља, продуката претходне обраде и тсл. Такође, радни комади се након електрохемијске обраде морају третирати да би се спречила појава корозије. За то служе станице за прање и деконтаминацију радних комада. Машине за електрохемијску обраду, такође, могу имати и интегрисану продукциону линију за транспорт предмета обраде. Она се углавном користи код специјализованих машина за великосеријску и масовну производњу, да би се смањила времена транспорта радних комада за време и након обраде. Тиме је постигнута већа производност [36].



Слика 3.31. Разна додатна опрема која се уграђује у постројења за електрохемијску обраду: робот, односно манипулатор, радна станица за испирање и деконтаминацију предмета обраде и покретна трака за транспорт предмета обраде [36]

4. Анализа могућности примене електрохемијске обраде

Електрохемијским процесима обраде се могу обрађивати сви електропроводљиви материјали, али је њена примена економична углавном у серијској, великосеријској и масовној производњи. Електрохемијска обрада се примењује за обраду веома тврдых и жилавих материјала, као и за израду делова сложеног геометријског облика [2]. Ова обрада се у индустријској пракси примењује за производњу [2]:

- 70% за израду разних калупа и пресерских алата сложеног облика,
- 17% за израду турбинских делова, пре свега лопатица и
- 13% за израду и финалну обраду осталих делова који се неким другим поступцима обраде не могу произвести.

Према датим подацима се види да су електрохемијски поступци обраде данас најзаступљенији при изради разних калупа и пресерских алата, као и делова за турбине. Разлог томе је што се калупи, пресерски алати и турбински делови израђују од тешко обрадивих материјала, а уз то имају и веома сложен геометријски облик, па је примена конвенционалних поступака обраде резањем нерационална, односно доста скупа, као и то да је мања продуктивност и производност тих обрада [2].

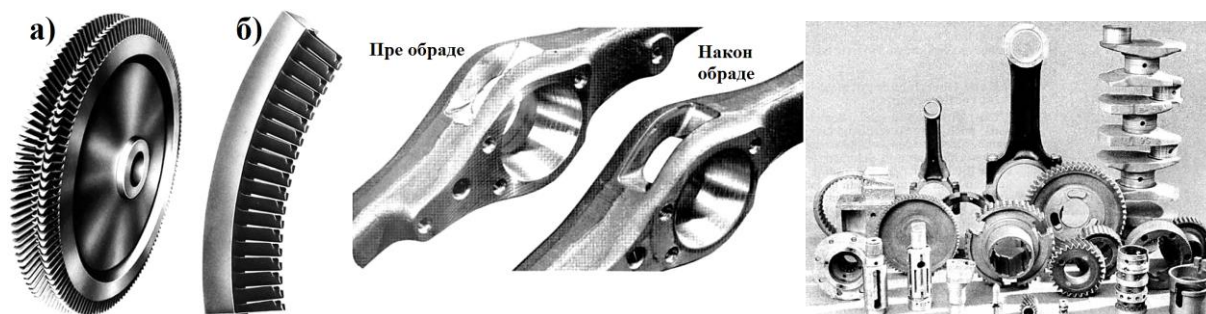
Као што је претходно речено, електрохемијска обрада се користи за израду делова сложене конфигурације и мале крутости, затим за обраду неприступачних површина и висококвалитетних материјала склоних образовању пукотина (силицијум, германијум, берилијум и сл.), као и за реализацију других производних операција. Електрохемијским поступцима обраде се реализују операције бушења отвора различитих профила, израде површина веома сложених конфигурација (гравуре алата за ковање, ливење, пробијање, просецање, пресовање, компресорске и турбинске лопатице) и тсл. [3].

Само неке од области индустријске производње делова код којих се примењују поступци електрохемијске обраде јесу: авио индустрија, индустрија турбина, индустрија прецизне медицинске опреме, аутомобилска индустрија, производња делова за примену у морима и океанима, производња машинских делова и алата и електронска индустрија. Код *авио индустрије* и *индустрије турбина* најчешћа примена електрохемијске обраде јесте код израде делова сложеног геометријског облика као што су лопатице турбина. Овде се користе легуре од тешкообрадљивих метала који се другим поступцима обраде не могу обрадити. Електрохемијском обрадом се добијају делови веома високе тачности и квалитета обрађене површине у само једној операцији. Електрохемијском обрадом се могу бушити и отвори за хлађење пречника 0,5-3 mm са односом пречника и дубине 300:1 коришћењем електрохемијског *STEM* поступка обраде код различитих суперлегура Код серијске производње турбина (сл. 3.22) користе се материјали који су отпорни на високе температуре (легури на бази Ni, Co, Ti), а које се конвенционалним поступцима обраде резањем могу веома слабо обрађивати [2, 22].

Индустрија прецизне медицинске опреме и имплантаната јесте такође једна од области индустрије код које се примењује електрохемијска обрада. Ова обрада се на пример користи за производњу вештачких кукова и делова колена од разних материјала, а нарочито од легуре Ni-Cr-Co, нерђајућег челика и титанијумских легура, зато што се економичније производе од конвенционалних поступака обраде резањем [2, 22].

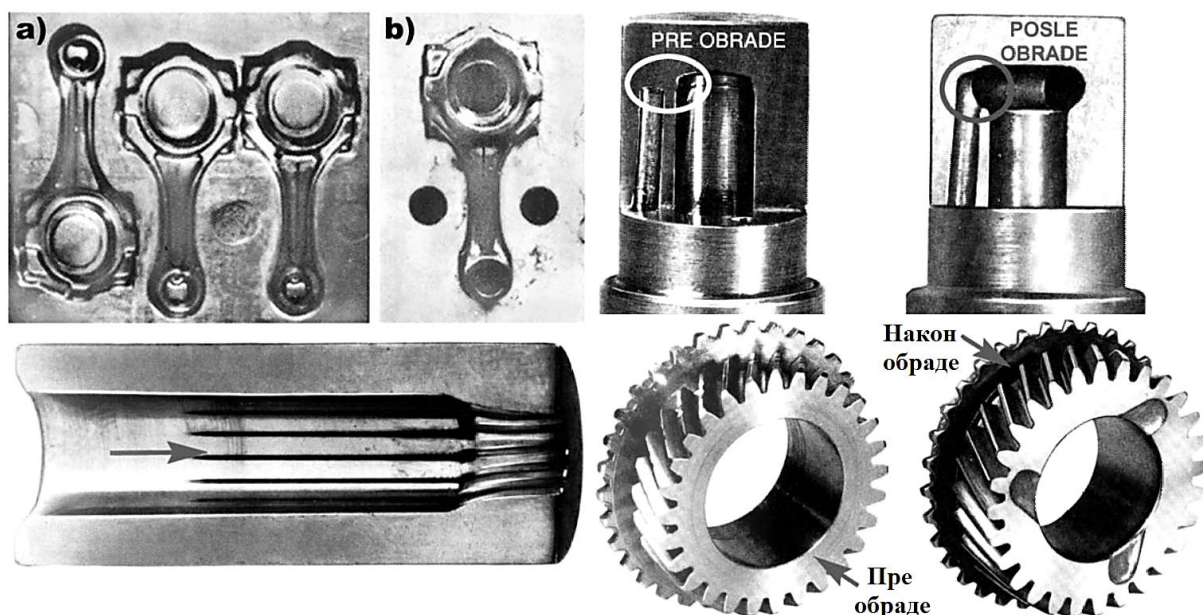
Електрохемијска обрада се код *аутомобилске индустрије* примењује за израду делова мотора са унутрашњим сагоревањем, као и делова каросерије аутомобила. Тиме се добија мала маса аутомобила, затим мања потрошња горива и већа контрола емисије издувних гасова. Применом електрохемијске обраде се могу постићи значајне уштеде

при обради. Неки од делова који се могу обрађивати поступцима електрохемијске обраде јесу: контурна обрада канала за подмазивање, узубљења, обарање оштрих ивица код нпр. карданских вратила, код веома сложених просторних контура итд. (слика 4.1) [2, 22].



Слика 4.1. Разни делови израђени електрохемијском обрадом: Интегрална турбинска кола - а) роторски део за парне турбине и б) статорски сегмент за парне турбине; Пример кардана аутомобила код кога су оборене оштре ивице на веома сложеној просторној контури; Разни делови ауто индустрије израђени електрохемијским поступцима обраде [2]

Код производње машинских делова и алата електрохемијске обраде имају највећу примену (сл. 4.2). Поступци електрохемијске обраде се користе у бројним подручјима машиноградње и производње машинских делова, као што су нпр. израда лучних канала на плочи и израда лучних жлебова и унутрашњих ожлебљења. На тај начин се применом ове обраде постиже знатно економичнија обрада. Осим за претходно наведене примере обраде разних канала, контурна електрохемијска обрада је погодна и за плитке обраде на тешко приступачним, тзв. „слепим местима“. Типичан пример за то јесте повезивање претходно избушеног косог отвора са централним отвором. Електрохемијска обрада је такође погодна и за израду разних врста алата и калупа сложеног облика, који се користе у великосеријској и масовној производњи. То се првенствено односи на аутомобилску индустрију која користи такве врсте алата за ковање у великим количинама. Времена обраде су веома кратка (5-10 min/гравури), уз чињеницу да се са једном електродом може практично изградити неограничен број гравура, чиме се постиже велика производност и економска оправданост примене електрохемијске обраде [2, 22].



Слика 4.2. Разни делови израђени електрохемијском обрадом: Једна половина алата клипаче мотора SVC - а) изглед готовог дела и б) коришћена електрода; Пример чауре са каналима ширине 0,4 mm; Пример контурне обраде на тешко приступачним местима [2]

Електрохемијска обрада се може користити за производњу делова који се користе у морима и океанима. Морска вода, чак и са специфичном проводношћу која износи 1/5 од стандарног електролита при електрохемијској обради је нашла примену код поступака електрохемијског полирања. Делови произведени оваквом обрадом имају доста мањи замор материјала у челичним цевима и конструкцији код удаљених нафтних платформи, и истраживачких центара у морима и океанима, као и делова за подморнице и бродове. Применом поступка електрохемијске обраде сечења жицом се може исецати метал који има облик бродова и чамаца [22].

Код *електронске индустрије* је примена електрохемијских поступака обраде доста широко распрострањена. У неким случајевима се производња електронских делова применом електрохемијске обраде показала успешнијом и ефикаснијом него њихова производња хемијском обрадом (*Chemical Machining - CM*). За њихову обраду се могу користити и електрохемијска микрообрада са шаблоном (маском) и без шаблона (маске). Ове технике обраде се примењују код производње микроелектронских компонената за штампане плоче, главе штампача или електричних алата. Ради се о врло ситним деловима електричних алата (сл. 4.3) код којих су на чеоним површинама израђена озубљења или други сложени профили електрохемисјком обрадом [2, 22].



Слика 4.3. Примери делова за електричне алата израђени електрохемијском обрадом [2]

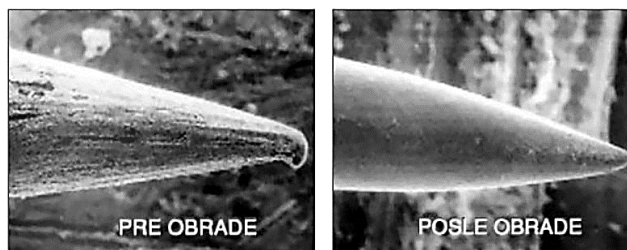
Електрохемијска обрада се може користити за поступке гравирања (означавања) делова. Електрохемијско гравирање је, у поређењу са другим поступцима, технолошки врло проста и економична обрада која се може изводити на неколико начина (помоћу обликованог алата или помоћу шаблона), а могу бити и различитих дубина (плитке и дубоке гравуре) [2]. Пример гравираниг дела је приказан на слици 3.4:



Слика 4.4. Пример чауре на којој је угравиран знак фирме [2]

Електрохемијска микрообрада је током времена доста унапређивана и тиме су омогућене разне индустријске примене и обраде код серијске, великосеријске и масовне производње, као и то да је створена и могућност примене аутоматске производње, са минималним присуством оператера. Разне примене електрохемијских микрообрада покривају обраду и завршну обраду микро и нано делова, као и модификацију површина и структуре предмета обраде, али електрохемијски поступци микрообраде поседују и неколико недостатака који се не јављају код макро електрохемијске обраде [23].

Код врло малих и ситних делова које се користе у веома специфичним гранама индустрије, као што су на пример нуклеарна индустрија, авио индустрија и свемирска индустрија, поступци електрохемијске микрообrade имају врло посебан значај и посебну примену. На слици 4.5 је дат пример полирања врха игле увећаног за 190 пута која се користи за делове термалног штита ракета и свемирских летелица који улазе у атмосферу из свемира. На примеру се могу јасно уочити ефекти процеса електрохемијског полирања када се упореди са стањем игле пре обраде. Потребно је напоменути да је врх саме игле пре електрохемијског полирања био фино брушен [2].



Слика 4.5. *Поређење врха игле пре и након поступка електрохемијског полирања [2]*

Осим полирања металних површина, овим поступком се истовремено постиже и најфиније обарање оштрих ивица на радном комаду. Фино полирање и уклањање оштрих ивица електрохемијским поступцима обраде може се вршити на свим површинама, па и оним које су за друге поступке обраде неприступачне. При електрохемијској обради се не врши никакво механичко оптерећење предмета обраде, тако да не постоји опасност да се делови осетљиви на савијање оштете. Такође, искључује се и термичко оштећење предмета обраде, с обзиром да се овај поступак електрохемијске обраде изводи на собној температури [2].

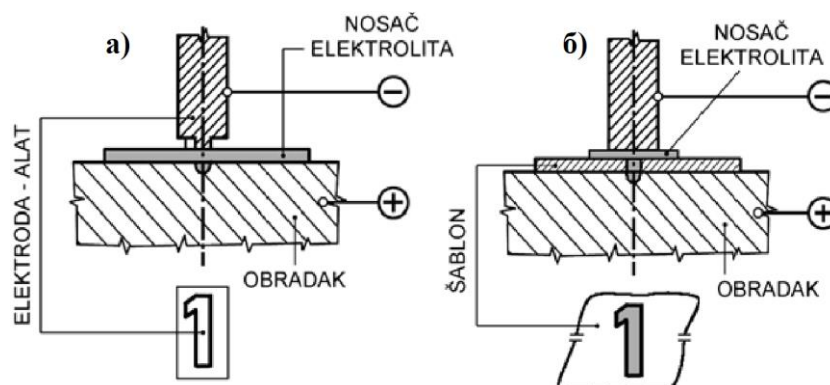
Код брзоходних турбина, причвршћивање лопатица за ротор је проблематично због деловања веома јаких центрифугалних сила. Право решење за то су интегрална кола са лопатицама које се израђују разним поступцима електрохемијске обраде на претходно обрађеним дисковима. На овај начин се штеди на скупкој изради жлебова за лопатице и сложених профила стопала лопатице, као и монтажи појединачно израђених лопатица. У неким случајевима су облик и димензије лопатица такви да се не могу израђивати заједно са телом, па се морају појединачно израђивати [2].

Означавање летелица, као што су авиони и хеликоптери (и њихове компоненте) је обавезно по закону да би се свака летелица регистровала након уласка у одређени ваздушни простор. Ознаке морају бити на видном месту, и у зависности од њиховог позиционирања могу садржати податке као што су серијски бројеви и ознаке делова. Пошто су летелице стално изложене екстремном времену током својих лета (влага, ветар и ниске температуре), неопходно је да те ознаке буду отпорне на разне временске услове и дуготрајне. Зато се примењују поступци електрохемијског означавања [37].

У индустријској пракси се захтева висока површинска чистоћа код радних комада за нуклеарна постројења, као и код погонских група за авионе и свемирске летелице и ракете. Даље подручје примене поступака електрохемијске обраде јесте за побољшавање површинске храпавости у циљу смањивања процеса трења код великог броја машинских елемената, као што су, на пример, зупчаници, вратила и други клизни елементи [2].

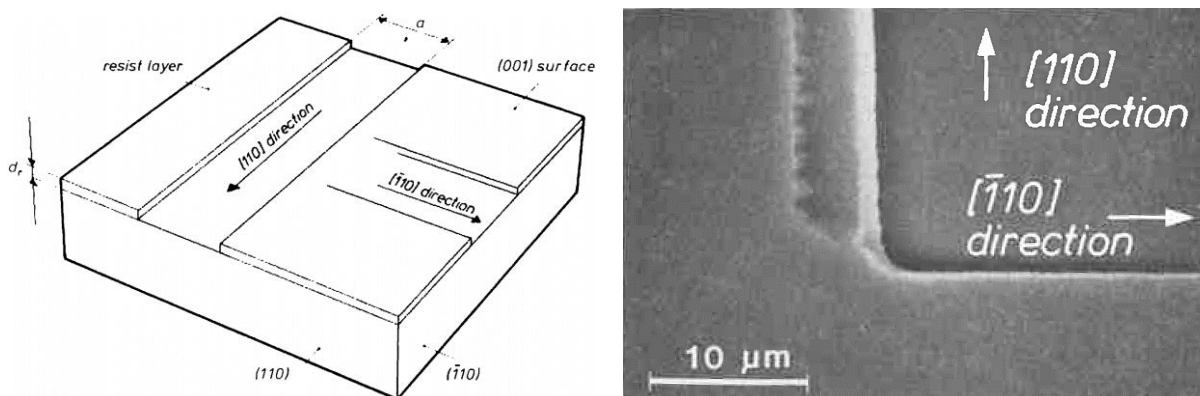
5. Пример уређаја за електрохемијско означавање

Поступак електрохемијског означавања, као један вид електрохемијске обраде, је заснован на анодном растварању материјала предмета обраде. Пре саме обраде врши се припрема радног комада. На њега се поставља шаблон жељеног облика. Алат је обложен платном или филцаном тканином који је натопљен радним медијумом (електролитом). Постављањем алата на шаблон и остваривањем одређеног притиска при пропуштању једносмерне или наизменичне електричне струје (у зависности од врсте, начина и дубине означавања) ствара се зона местичне обраде према облику шаблона (слика 5.1) [7].



Слика 5.1. Електрохемијско означавање (гравирање): а) уз помоћ обликованог алата, б) уз помоћ шаблона - маске [2]

Електрохемијско означавање је, у поређењу са другим методама електрохемијске обраде, технолошки врло проста и економична обрада која се може изводити на неколико начина. За веома плитке гравуре од неколико десетина милиметара користе се посебно обликоване катодe (сл. 5.1а) или помоћу шаблона - маске (сл. 5.1б), на којима су израђени сви симболи који се желе пренети на површину материјала предмета обраде [2].



Слика 5.2. Трагови електрохемијског означавања (гравирања) (под SEM микроскопом) [38]

При протоку електричне струје настаје зона обраде где се у веома кратком временском интервалу, од свега неколико секунди, на предмету обраде репродукују симболи са алата или шаблона. Добијени отисак након електрохемијског означавања је дубине свега неколико милиметара и врло је лако уочљив због разлике у боји од околине материјала. Мала количина електролита је сасвим довољна за овакав поступак обраде, с обзиром на мале дубине и веома кратко време обраде. Површине материјала на којима се врши означавање морају бити чисте, док њихова храпавост треба да је $Ra < 12,5 \mu m$. При обради се користи густина електричне струје од $8-60 A/cm^2$ и напон извора напајања од $6-18 V$. Да би се избегао настанак корозије, предмет обраде се одмах након завршеног поступка означавања мора очистити од заостале радне течности и добро осушити [2].

Поступак електрохемијског означавања (гравирања) је нарочито веома погодан за делове малих дебљина (као нпр. фолије) на којима се другим поступцима обележавања то не може ни остварити због њихових димензија и типа материјала. У случају када је потребно електрохемијским обележавањем остварити веће и дубље гравуре на предмету обраде примењује се поступак са електронепроводљивом шаблоном, али се тада уместо носача електролита користи електролит који циркулише кроз радни зазор, слично као и код контурне обраде. Електрохемијско обележавање је такође доста погодно и за делове који су израђени од тврдих, кртих и тешкообрадивих материјала, као и за обележавање на закривљеним површинама. Процес означавања је у потпуности хладан и не изазива структурне, термичке и хемијске промене у материјалу предмета обраде. Због тога нема никакав утицај на проводљива својства материјала, као што је то случај код примене ласера, електроерозије и других термичких поступака гравирања [2].

5.1. Преглед уређаја и опреме за електрохемијско означавање

Уређаји за електрохемијско означавање (гравирање) обезбеђују повезивање свих елемената и опреме у једну целину. Задатак уређаја јесте да усклади различите параметре поступка електрохемијског означавања са извором напајања, електролитом, анодом и катодом, односно алатом и предметом обраде који се гравира. Ови уређаји се праве тако да обезбеде стабилност система при ради, али и низ осталих параметара који су значајни за правилно функционисање уређаја. Слика 5.3 приказује један уређај за електрохемијско означавање (гравирање) производа са опремом [1, 2, 39].



Слика 5.3. Уређај за електрохемијско означавање (гравирање) производа са опремом [40]

Уређаји за електрохемијско означавање предмета обраде се могу производити у различитим варијантама, где свака може имати различите димензије, начине и дубине означавања. Такође, уређаји се могу разликовати и по томе колики ми је радни простор и тиме колико велике радне комаде могу гравирати, односно разликују се по томе колика је површина на предмету обраде које ове машине могу означити [39].

Уређаји (слика 5.4) се могу још разликовати и по начину рада и аутоматизације, односно машине за електрохемијско означавање могу бити [39]:

- ручне,
- полуаутоматске и
- аутоматске.



Слика 5.4. Уређаји за електрохемијско означавање (са лева на десно): ручна, полуаутоматска и аутоматска [41, 43]

Уређаји у зависности од својих димензија могу бити лако преносиве и спаковане у кофер, или већих димензија и теже преносиве чиме се постављају у мобилну станицу заједно са осталом опремом (слика 5.5) која је потребна за поступке електрохемијског означавања. Уређаји се такође могу разликовати и по максималној тачности и квалитету ознака, економичности, производности, као и нивоу потрошње електричне енергије [39].



Слика 5.5. Мобилна станица за поступак електрохемијског означавања [43]

Уређаји за поступак електрохемијског означавања (гравирања) се исто тако могу разликовати и по дубини гравирања. Па тако разликујемо уређаје за плитко гравирање и дубоко гравирање предмета обраде. Плитка гравура је резултат наношења контрастне површине дубоке од 0,00025 mm до 0,0025 mm. Поступак плитког гравирања траје веома кратак временски период који траје мање од секунде. Гравура је тамније боје чији степен зависи од низа фактора, укључујући и сам материјал предмета обраде. Неки нерђајући челици дају само тамно смеђу гравуру, док се одговарајућим коришћењем електролита може добити и потпуно црна гравура. Дубоке гравуре су резултат коришћења снажнијег уређаја, односно доста снажније јединице напајања једносмерном струјом за уклањање металних јона из материјала предмета који се означава. Када се користи са одговарајућим шаблоном, плочицом за нагризање и електролитом специфичним за ту врсту материјала, основни материјал предмета који се означава се може уклонити без икаквих деформација дела који се гравира. Дубоке гравуре захтевају дужи временски интервал гравирања, који може трајати и до четири секунде [39, 42].

5.1.1. Извор напајања

Извор, односно јединица напајања који се користи за поступак електрохемијског означавања би требао да осигура константу јачину електричне струје од 3-20 А, док се напон извора напајања може кретати у границама од 5-40 V. При поступку гравирања се користи густина електричне струје од 8-60 А/см². На извору напајања је потребно да уградити амперметар и волтметар који у реалном времену показују карактеристику електричне струје при самом поступку означавања. Препоручљиво је да у самој јединици постоји уграђена заштита од кратког споја, а која се решава са осигурачем одговарајуће вредности. У пракси уопште нема потребе за куповином и употребом скупе јединице напајања са дигиталним дисплејом и уграђеним тајмером, чиме се постиже већа уштеда у опреми у односу на остале поступке означавања (гравирања). На слици 5.6 је приказан пример извора напајања са уграђеним амперметром и волтметром [39, 44].



Слика 5.6. Извор (јединица) напајања са уграђеним амперметром и волтметром [45, 46]

Поједине јединице напајања могу поседовати само волтметар. Извори напајања могу бити аналогни (сл. 5.6 лево) и дигитални (слика 5.6 десно). Код дигиталних извора напајања приказ вредности јачине и напона електричне струје се врши преко дисплеја, чиме се може још више смањити његове димензије и тиме добити компактнији дизајн. То значи да се такав извор напајања може користити у малим и доста скученим радним просторима и тиме умногоме олакшати поступак електрохемијског гравирања. Још једна предност дигиталног извора напајања је да може поседовати улазе за интернет кабл и USB преносиву меморију и тиме директно очитавати програм гравирања са параметрима поступка из компјутера или мреже [46].

Димензије јединице напајања зависи од површине која се гравира на материјалу предмета обраде, затим од брзине гравирања, као и од дубине гравуре. Скоро све модерне јединице напајања поседују дугме за укључивање и искључивање (*On/Off switch*), као и дугме за намештање једносмерне или наизменичне струје (*AC/DC switch*). Наизменична струја се користи за добијање тамних и црних гравура и ознака, док се једносмерна струја користи за добијање светлијих ознака (изузетак је алуминијум код којих је то обрнуто). Већина извора напајања поседују реостат (отпорник) за регулисање излазног напона. Јединица напајања ће аутоматски произвести електричну струју потребну за поступак означавања, осим ако та струја не прелази излаз извора напајања, где ће у том случају „прегорети“ осигурач или прекидач. Скоро сва модерна извора напајања садрже промену поларитета за успостављање контакта са алатом и предметом обраде путем комплета каблова [39].

На слици 5.7 је приказан аналогни извор напајања са тастерима за намештање фиксних вредности напона струје. Таква јединица напајања тако не поседује волтметар за очитавање са скалом, већ је напон одређен тастерима на извору напајања. Подешавања напона се тако регулишу тастерима од А до F који се крећу од 5 V, 8 V, 11 V, 14 V, 17 V и 20 V на тастеру F. Струја за чишћење електролита и шаблона је доступна кроз посебан

излаз (обојен жутом бојом). Када је додатна опрема (прибор) повезан на овај излаз, он служи као ефикасни метод за уклањање створених оксида на материјалу и шаблону, чиме ствара услове за побољшање поступка електрохемијског означавања, затим побољшава квалитет гравуре и продужава радни век шаблона. Ова јединица напајања је способна за дубоко гравирање које може бити до 0,0765 mm, при напону од 40 V. Пулсирајућа струја коју генерише овај извор напајања резултира чистијим извлачењем материјала и дубљим квалитетнијим гравурама. Електронска контрола импулса извора и тајмери за циклус показали су се ефикасним за доследну дубину и квалитет од комада до комада и увелико продужавају радни век шаблона. Овај извор напајања поседује шест поставки велике снаге и шест поставки за мале снаге електричне струје потребне за поступак означавања. Овај извор напајања је најприкладнији за ручно обележавање производа тамо где је потребно више снаге и доста велика дубина гравуре до чак 0,3 mm. Ако је неопходна поновити дубина гравирања, препоручује се употреба јединице напајања са тајмерима циклуса и тренутног импулса. Када је потребно израдити дубоке гравуре чија дубина прелази преко 0,75 mm, препоручљиво је да се користи пулсирајућа јединица напајања са тајмером. Пулсирајућа струја користи предност вршног удара снаге на почетку сваког импулса како би смањила укупно време гравирања, као и накупљање топлоте у шаблону (маски), глави (алату) за обележавање и делу који се урезује [42, 46, 47].



Слика 5.7. Извори напајања са фиксним контролама напона [47]

За поступак електрохемијског обележавања нису увек потребне посебне и веома скупе машине и извори напајања да би се добила одређена гравура на радном комаду. За мање прецизне и мање квалитетне ознаке на мање значајним деловима у разним гранама индустрије, као и за аматерско гравирање, могу се користити и обични уређаји за пуњење аутомобилских батерија, односно акумулатора. Такви уређаји су по правилу опремљени амперметром, исправалем, осигурачем и прекидачем електричне струје. За импулсне изворе електричне струје потребан је још и кондензатор [44].

5.1.2. Шаблони (матрице)

Шаблони (матрице) представљају један од кључних делова који су неопходни за поступак електрохемијског означавања. Шаблони имају веома важну улогу у постизању доброг и понављајућег квалитета ознака. Понеки шаблони (маске), односно матрице за утискивање могу бити направљене на обичном матричном штампачу и писаћој машини. Тако се на шаблони могу штампати и правити са практично неограниченом лепезом најразличитијих симбола (слова, бројева, баркодова, карактера, логотипа и тсл.) [37, 43].

Шаблони могу бити једнократни и виšekратни, односно шаблони за једнократну употребу и више употреба. Према томе, шаблони (маске) се даље могу поделити на [43]:

- папирне шаблоне и платнене подлоге (једнократне и виšekратне) и
- фотографске шаблоне (једнократне и виšekратне).

Материјал једнократних папира за термални пренос симбола на шаблоне слични су материјалу шаблона за утискивање, са пропусном филцаном тканином и непропусним ламенарним слојем. Главна разлика је у томе што је дебљина ламенарног слоја само један микрометар. Тај слој се потом термички уклања са шаблона помоћу грејача у штампачу остављајући слику која се жели изгравирати на пропусној тканини. Поступак је углавном поуздан и даје добар квалитет гравура. Ове врсте шаблона се обично користе само једном и након завршеног поступка означавања се одлажу. Могу се јавити незнатна одступања у квалитету штампе на шаблон, или гравуре на материјалу комада која су резултат квалитета штампача и писаће машине или пак преплета пропусне структуре филцане тканине. Постоје посебне врсте тканина и папира од којих се шаблони могу направити тако да их је могуће искористити до пет пута код комбинованих поступака означавања и до десет пута када се користи поступак електрохемијског означавања са електричном струјом променљивог поларитета [43]. На сл. 5.8 су приказани штампач и писаћа машина за штампање шаблона (матрица):



Слика 5.8. Штампач и писаћа машина за штампање шаблона [40, 48]

Штампач шаблона је измењена верзија обичног матричног штампача са додатком грејача. Он је компјутерски управљан. Штампачи могу такође бити веома компактних димензија. Штампач може учитати слова, текст, бројеве, логотипе итд. са скоро било ког софтверског програма, као што су нпр. *Word*, *CorelDraw*, *AutoCAD* и осталих сличних програма. Ови штампачи се могу користити за штампање шаблона како за плитко тако и за дубоко гравирање. Уколико је потребно на брзину иштампати просте симболе, као што су слова, бројеви и специјални карактери, могу се користити и писаће машине које су специјално направљене за израду простијих шаблона. Штампачи поседују могућност штампања симбола и логотипа у високој резолуцији (до 360 dpi) [47, 48].



Слика 5.9. Разне врсте папира за штампање шаблона [46, 48]

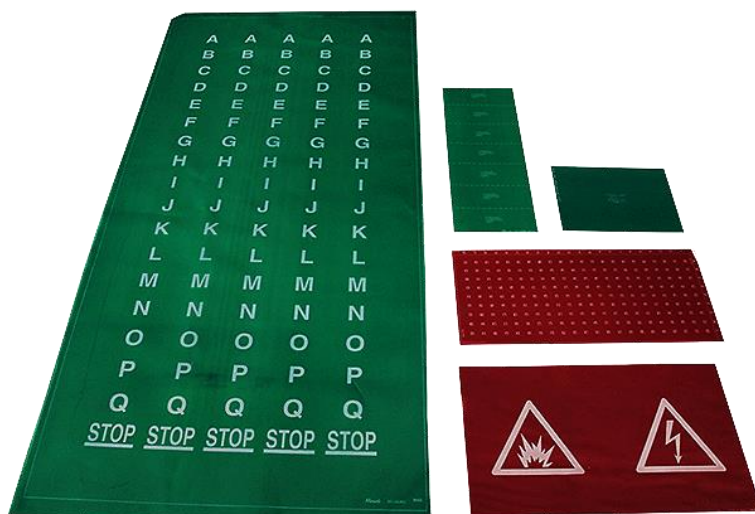
Специјалне врсте вишекратних шаблона се могу користити и преко 4000 пута за означавање радних комада на полуаутоматским и аутоматским машинама. Ови шаблони се употребљавају за означавање логотипа, слова и текстова и/или бројева велике серије истих предмета. Такође, ови шаблони се могу користити и за украсне ознаке. Платнени шаблони и подлоге (слика 5.10) могу доста лакше да пропуштају електролит неопходан за поцес електрохемијског означавања. Ова подлога је обично обмотана око алата или

уметнута у поклопац шаблона. Платнене подлоге које се користе за поступак дубоког гравирања се састоји од одређеног влакнастог материјала који са лакшим притиском гура електролит и шаблон на површину материјала предмета који се означава. Ово омогућава лакши и слободан проток електролита. Неопходно је да платно које се користи за процес дубоког гравирања буде стално засићен електролитом, јер ће то држати шаблон хладним и обезбедити добар проток до дела материјала који се гравира. Такође, само присуство платна у поступку дубоког гравирања ће продужити радни век шаблона [46, 48].



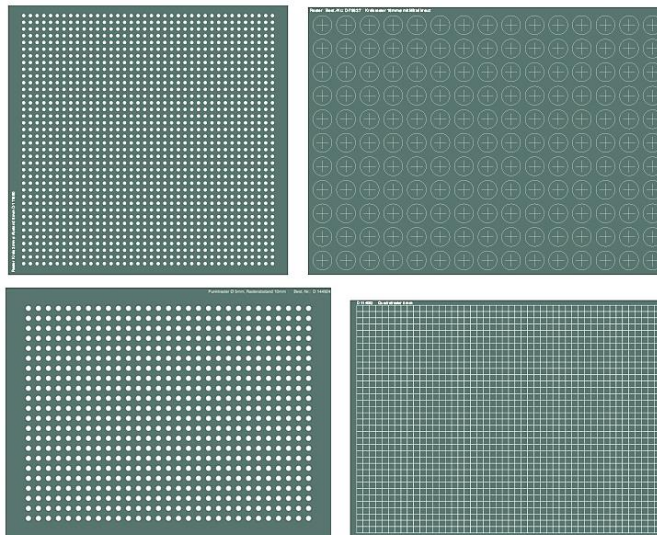
Слика 5.10. Платнене подлоге [46]

Фотографски шаблони, односно тзв. фотосензитивни шаблони су обично доста трајнији од папирних шаблона и могу се користити више пута. Фотографски шаблони започињу као црно-беле слике и логотипи. Коришћењем фотографских шаблона може се направити било која дебљина линије, од веома танких до дебелих, као и било који симболи, карактери, слова, бројеви, логотипи и слике најразличитијих величина. Скоро сваки шаблон може произвески преко хиљаду ознака на материјалу предмета обраде. Фотографски шаблони су матрице које могу дуго трајати и идеалне су за производно означавање сталних података као што су бројеви делова и логотипи. Радни век ових шаблона варира, али се на основу једног отиска може се добити неколико хиљада гравура. Матрица, или основа, фотографског шаблона може бити папир или тканина, тако да је читав низ различитих матрица доступан за различите примене. Зову се још и сталне (трајне) или електроласт матрице. Још једна предност фотографских шаблона је то што их можемо унапред обликовати у поклопце који одговарају било којој величини штампача за означавање [37, 42]. На сл. 5.11 је приказано неколико различитих примера фотографских шаблона:



Слика 5.11. Фотографски шаблони (фотосензитивни шаблони) [46]

Шаблони се такође могу правити у облику мреже уколико је потребно константно означавање на површини материјала предмета обраде у облику неког обрасца. Могуће је направити шаблоне који поседују: тачкасту мрежу, кружну мрежу, квадратасту мрежу, као и кружну+крстасту мрежу. Такође, постоје различите варијанте ових четири мрежа, које могу бити нпр. помешано тачке, квадрати и кругови. Варијације се огледају и у различитим растојањима истих, као и њиховим димензијама и пречницима. Ови шаблони се могу правити у различитим димензијама од малих димензија за мала означавања па све до А3 и А4 формата. На слици 5.12 су приказани примери мрежних шаблона [48].



Слика 5.12. Мрежни шаблони [48]

Наредно поглавље рада описује електролите и неутрализаторе који се користе у поступцима електрохемијског означавања.

5.1.3. Електролити и неутрализатори

Радна течност јесте један од најзначајнијих елемената поступка електрохемијског означавања и од његовог избора у доста великој мери зависи тачност, производност и економичност самог поступка електрохемијског означавања. Избор електролита зависи од материјала предмета који се означава, као и жељене тачности и квалитета гравуре. Електролит треба да је тако укомпован да, са материјалом предмета обраде, образује једињења која се лако могу растварати у води [1, 2].

Постоје два типа радних медијума који се користе за означавање (гравуру) радних комада, а то су: електролит и неутрализатори. Електролит је као радна течност углавном базирана на воденом раствору са неком киселином, базом или соли. Садржи растворљиве супстанце које када се растворе дају позитивне и негативне јоне (анјоне и катјоне). Такве супстанце укључују киселине, базу и соли. Количина електролита у раствору одређује и његову снагу и проводност електричне струје. Ово је важно јер сви метали имају веома различит степен проводљивости електричне струје и захтевају различите електролите. Применом електролита као радног медијума при поступку електрохемијског означавања помаже се протоку нисконапонског електричног наелектрисања из алата на шаблону и уређају за обележавање. Јони у раствору електролита привлаче електрони из алата [37].

Електролит који је потребан за означавање зависи од легуре материјала који ће се изгравирати. За већину материјала постоје електролити опште намене. За специфичне примене, међутим, најбоље је експерименталним методама испитати који је електролит

најпогоднији за означавање, или се бира из каталога произвођача опреме и уређаја за електрохемијско означавање. То значи да је правиан избор електролита веома важан процес у овој обради. Коришћење погрешног електролита може створити траг са врло нестабилним оксидом који се може очистити тек након што се направи гравура. Тиме се добија ознака ниског квалитета и недовољне дубине означавања. Већина електролита узрокује вишак оксида и тако зачепљује шаблоне, дајући поред лошег квалитета гравуре и краatak век трајања самог шаблона. Да би се овакво нешто спречило направљени су самоочишћујући електролити који заустављају зачепљење шаблона тако што контролишу и смањују количину растворених оксида. Такође, електролити имају улогу одвођења топлоте како би помогли да се матрица и алат охладе током процеса гравирања [39, 44].

Већина електролита су заснована на благом раствору натријума и не садрже јаке хемикалије или било шта кисело или корозивно. Различити произвођачи електролита дају процене за степен корозивности својих решења. Они такође приликом производње радних течности морају да испуне захтеве као што су безбедно руковање, максимално умањење опасности за респираторна обољења и умањење опасности у додиру са кожом. При коришћењу електролита постоји могућност да површина предмета у непосредној близини локације гравуре може развити благу оксидацију. Ово директно зависи од процентуалног садржаја натријумових соли у електролита. Овај нежељени ефекат самог процеса се може у потпуности спречити правилном употребом неутрализатора који ће готово тренутно неутрализовати натријум у било којим траговима који могу остати на површини дела након означавања [47]. На слици 5.13 су приказана паковања електролита за поступак електрохемијског означавања, где се могу наћи у амбалажи од 1, 5 и 25 l.



Слика 5.13. Електролити за поступак електрохемијског означавања [37, 48]

Након поступка електрохемијског означавања није пожељно да се гравуре бришу само чистом крпом. Неправилно чишћење гравуре након поступка означавања може довести до другог проблема - корозије. Сам процес електрохемијског означавања оставља са собом одређене нечистоће. Неки нечистоће су видљиве, док друге нису па тако могу да створе илузију да су ознаке чисте након чишћења. Само чишћење неће увек уклонити остатке и нечистоће који су настали приликом гравирања. Овај остатак садржи киселине, базе и соли из раствора коришћеног електролита. Остатак није штетан за особу која врши гравирање, али повећава могућност корозије ако остане на површини материјала. Зато се за уклањање остатака и нечистоћа користе течност за неутрализацију (неутрализатори). Течност за неутрализацију неутралише штетно дејство киселина и соли које су заостале након наношења ознаке на предмет обраде. Неутралишућа течност враћа рН равнотежу на површини материјала, уклањајући тако загађиваче који би могли утицати и на нову гравуру и на околни материјал. Зато је врло битно да се сви трагови електролита исперу, односно уклоне и неутралишу са целе површине материјала дела одмах након завршетка поступка означавања. Такође, важно напоменути да приликом наношења или уклањања електролита, електролит и раствор за неутрализацију не смеју да уђу у отворе, канале или пукотине у делу [37, 43].



Слика 5.14. Течности за неутрализацију (неутрализатори) [37, 39]

Поред спречавања корозије, неутрализатори се користе и за спречавање бојења, односно промене боје околног материјала. Пре чишћења неутрализатором, потребно је добро просушити део који је гравиран. Уколико се користи крпа натопљена течношћу за неутрализацију за брисање делова који нису довољно осушени, на њему ће ускоро бити више електролита него неутрализатора чиме ће се проблем корозије погоршати, уместо да се она елиминише. Стога се препоручује коришћење папирне марамнице за једнократну употребу или сличног производа за свако брисање. Други начин да се нечистоће и остаци уклоне и неутралишу из дела је натапање истог у раствору који је посебно припремљен за смањење и спречавање настанка корозије услед дејства електролита. Овај раствор се може разблажити водом у зависности од потребне чистоће и материјала који је гравиран. Време умакања дела у раствор је око десет минута. Врста течности која ће се користити зависи од начина електрохемијског означавања и врсте материјала [39, 46].

Најчешћи електролит који се примењује за аматерске и просте радове гравирања јесте раствор натријум хлорида са водом. За литар обичне (не дестиловане) топле воде може се ставити три до пет кашика соли и добро промешати. Понекад се и препоручује да се дода осам до десет милилитара концентроване хлороводоничне киселине таквом електролиту. За гравирање рђајућих врста челика, затим бакра, месинга и алуминијума додаје се раствор соли у бакарни сулфат. Овакви електролити су релативно нешкодљиви по здравље људи, а може се чак радити и без рукавица. Електролит поседује ограничени радни век, односно при поступку означавања се засићује металним солима и постепено губи своја својства. Нерастворљиве насlage смеђе и зелене боје се такође акумулирају и загађују електролит, чиме га замућују и отежавају посматрање поступка означавања. Тај електролит потом треба заменили или оставити да се ти остаци слегну (депонују) [44].

5.1.4. Алат

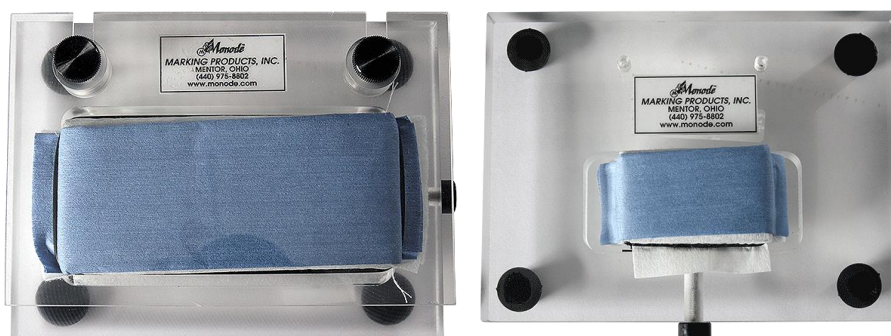
Употребом одговарајућег алата за процес електрохемијског означавања осигурава брже, чистије, квалитетније и економичније гравуре на површини материјала предмета обраде. Постоје посебне врсте алата који се користе за означавање равних површина и цилиндричних површина. На алат је закачен носач електролита који се потом урони у електролит и спушта на шаблон који је постављен на део предмета обраде који ће се гравирати. Алат је обложен платном или филцаном тканином који је натопљен радним електролитом. Постављањем алата на шаблон и остваривањем одређеног притиска при пропуштању једносмерне или наизменичне електричне струје (у зависности од врсте, начина и дубине означавања) ствара се зона местичне обраде према облику шаблона. За веома плитке гравуре од неколико десетина милиметара користе се посебно обликоване катодe или помоћу шаблона, на којима су израђени сви симболи који се желе пренети на површину материјала предмета обраде [2, 7, 39].



Слика 5.15. Алати за електрохемијско означавање [46]

Алати су доступни у веома широком спектру стандардних величина, а такође се могу израђивати под прилагођеним угловима или контурама за приступ тешким местима обележавања. Најважније је да алат буде већи од дизајна који треба гравирати, али мањи од шаблона који се користи. То омогућава означавање једним притиском. Притисак даје оштре и чисте ознаке. Коришћењем недовољног притиска омогућава струји да варира и тиме узрокује нејасне и замућене ознаке [39, 46].

Округли комади се означавају котрљањем алата преко шаблона. За то се користе посебни алати који се прикључују директно на извор напајања, док се матрица поставља на подлогу у резервоару за електролит, где се потом електролит увлачи у тканину кроз померање алата. Овај алат има маркере за означавање тачака на предмету обраде како би се тачно поставила ознака. Код овог алата је неопходно стезање шаблона помоћу посебно направљених стезних прибора који осигурава да ће сваки део гравуре имати исти притисак шаблона и алата. Они се такође примењују и код аутоматских машина за процес електрохемијског означавања. Процес котрљања омогућава гасовима и воденој пари да током поступка означавања изађу из места обраде и тиме произведу константни контраст ознаке. Недостатак ваљања је тај да може правити нејасне ознаке и гравуре, посебно на веома малим деловима. Стога је одговарајући притисак контурног алата неопходан, јер ће недостатак одговарајућег притиска или примена превише напона проузроковати нејасне ознаке [39].

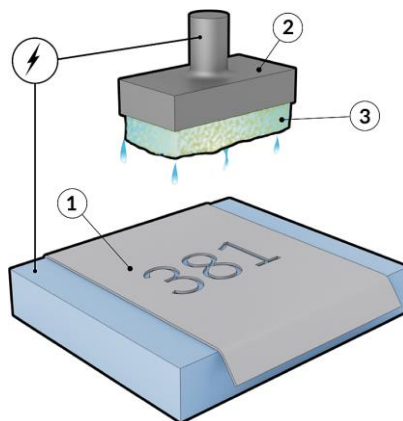


Слика 5.16. Стезање шаблона и радног предмета [46]

Алати за електрохемијско означавање се најчешће израђују од нерђајућег челика. Радни век алата је готово неограничен, зато што се не растварају током рада већ се само запрљају. На њима се таложу металне соли, као и скинути материјал са предмета обраде. Одржавање електрода се врши брисањем посебном крпом. Катодне плоче морају нужно имати отворе кроз који пролази електролит уколико се примењују посебно обликоване катодне плоче. Контакт алата и предмета обраде, као и превелики притисак проузрокују још и прегревање алата и предмета обраде, али и варничење, што скраћује радни век алата и ствара лош квалитет ознаке (гравуре) [44].

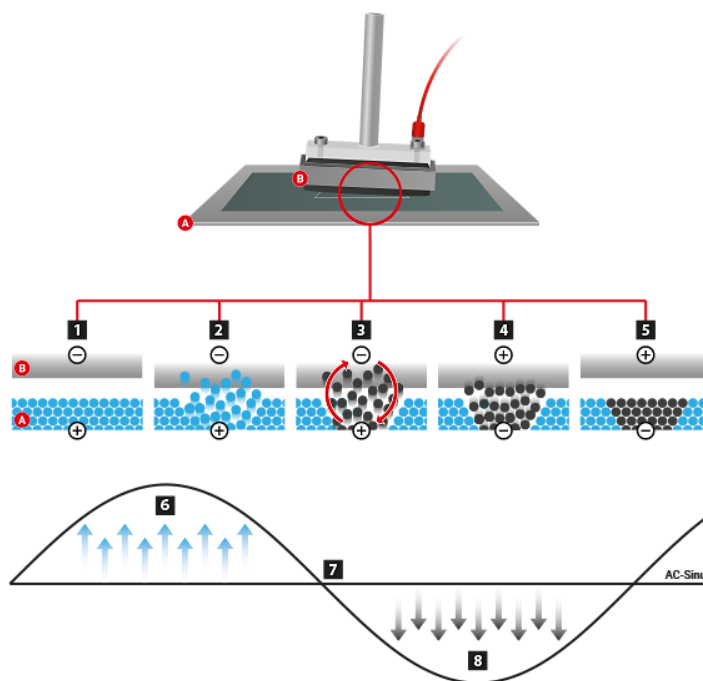
5.2. Поступак електрохемијског означавања

Поступак електрохемијског означавања је једноставан поступак чија ефикасност зависи од правилног коришћења електричне струје, електролита и неутрализатора, као и неопходних алата и шаблона. Реакција електричне струје и електролита са материјалом предмета оставља трајни траг на његовој површини уз помоћ одговарајућих шаблона за означавање. Потребно је напоменути да се овакав поступак означавања односи само на проводљиве металне површине [37].



Слика 5.17. Поступак електрохемијског означавања [49]

На слици 5.17 је приказан поступак електрохемијског означавања. Шаблон (1) са изгледом ознаке гравуре је постављен чврсто на површину предмета обраде, што значи да електролит долази у контакт само са делом површине комада који треба да се означи. Алат (2) проводи електричну струју након чега се платно (3) натопи електролитом. Алат се потом притисне на шаблон и електрична струја потом пролази кроз алат и шаблон у предмет обраде и урезује у његову површину симболе са шаблона нагризањем. Другим речима, електролитска течност се наноси на претходно очишћену металну површину, где се затим помоћу електричне струје и алата (катоде) преко шаблона добија ознака на површини предмета обраде [37, 50].



Слика 5.18. Шема поступка електрохемијског означавања наизменичном струјом [48]

На слици 5.18 је приказана шема поступка електрохемијског означавања предмета обраде наизменичном струјом. Притиском алата са електролитом (В) на шаблон који се налази на површини предмета обраде (А) и дејством наизменичне струје добија се ознака према шаблону. Током тог поступка метални јони мигрирају са аноде (предмета обраде) (А) ка катоди (алату) (В). Електролит потом изазива хемијску реакцију у којој метални јони оксидирају. Потом се услед дејства наизменичне струје мења поларност где предмет обраде постаје катода, а алат анода. Метални јони који су оксидовани се тада враћају ка предмету обраде. Када су оксидовани метални јони враћени у своју првобитну позицију, они очвршћавају у материјалу (А). Тада настаје ознака на површини радног комада [48].



Слика 5.19. Уређај са опремом за електрохемијско означавање [37]

Процес електрохемијског означавања траје мање од једног минута и састоји се од неколико кратких корака, као што [37]:

1. Припрема шаблона:

Као што је претходно описано, постоје два типа шаблона који се могу користити за поступак електрохемијског означавања, а то су виšekратни и једнократни шаблони (шаблони за виšekратну и једнократну употребу). Виšekратни шаблони се у зависности од материјала и начина израде могу користити и до неколико хиљада пута.



Слика 5.20. Шаблон за виšekратну употребу (лево) и једнократну употребу (десно) [37]

Предност шаблона који су за једнократну употребу је то што се за кратко време и на радном месту могу направити помоћу штампача и писаћих машина.

2. Чишћење површине предмета обраде:

Мора се детаљно очистити површина предмета обраде од прашине, масноће и остатака од претходних обрада пре него што се започе са поступком електрохемијског означавања. Површина предмета обраде мора бити глатка и потпуно чиста.

3. Нанети електролит на површину предмета обраде:

Потребно је нанети одговарајући електролит у малим количинама на површину предмета обраде пре постављања и позиционирања шаблона. Електролит се бира у односу на материјал предмета обраде (слика 5.21).



Слика 5.22. Наношење електролита на површину предмета обраде [37]

4. Постављање шаблона:

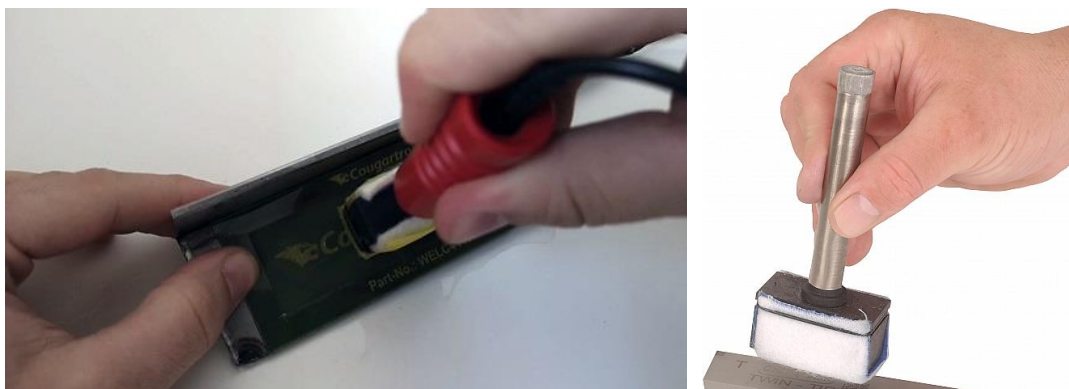
Следећи корак јесте постављање шаблона на тачном месту на површини која ће се гравирати логотип, серијски број, слова, бројеви, QR код и тсл. Шаблон је потребно осигурати стезачем или притиснути да би се спречило његово померање (слика 5.22).



Слика 5.23. Постављање шаблона [37]

5. Укључивање уређаја (извора напајања) и превлачење алата преко шаблона:

Пети корак подразумева укључивање уређаја за електрохемијско означавање, тј. извора напајања и потом лаганим притиском полако превлачење алата преко шаблона да би се образац са пренео на металну површину предмета обраде (слика 5.24).



Слика 5.24. Превлачење алата преко шаблона [37, 43]

6. Уклањање шаблона и наношење неутрализатора:

Након неколико преласка алата, исти се склања, где се затим уклања шаблон и наноси неутрализатор да би постигла неутрална рН вредност површине метала предмета обраде (слика 5.25).



Слика 5.25. Добијена ознака [37]

У зависности од коришћене електричне струје (једносмерне или наизменичне) разликују се и ознаке које се добијају на површини предмета обраде. Коришћењем наизменичне струје добијају се тамне и црне ознаке без структурних промена материјала предмета обраде. Са друге стране, коришћењем једносмерне струје део материјала на површини предмета обраде се уклања помоћу хемијске реакције са електролитом и потом одводи истим [37].

Означавање наизменичном струјом резултује тамном оксидираном ознаком на површини већине метала (укључујући и нерђајући челик). У већини случајева поступак електрохемијског означавања наизменичном струјом утиче само на боју највишег слоја површине, односно место на предмету обраде где је шаблон позициониран, стегнут и нанет притисак алатом. Уколико се поступак примењује правилно, ова врста означавања неће довести до структурних промена у металу и настанка корозије. Створена ознака је оштра, велике резолуције и коначна - може се једино уклонити механички (брушењем). Ознака може избледети само ако површина метала дође у контакт са јаким киселинама и хемикалијама [37].



Слика 5.26. Електрохемијско означавање наизменичном струјом (лево) и једносмерном струјом (десно) [37]

Електрохемијско означавање једносмерном струјом уклања делове горњем слоја метала и резултује и резултира урезаним светло/белим трагом на металној површини. Постоје изузеци, где у случају електрохемијског означавања алуминијума, коришћење оба начина означавања доводи до исте беле ознаке. Пошто поступак укључује уклањање делова горње слоја метала, веома је важно очувати молекуларну стабилност материјала и осигурати да настану што су могуће мање структурне деформације у материјалу [37].

5.3. Експериментална испитивања поступка електрохемијског означавања производа

Експериментална испитивања имала су за циљ утврђивање утицаја различитих параметара у поступку електрохемијског означавања на изглед, квалитет и дубину ознака на узорцима. Испитивани су утицаји јачине напона и промене поларитета електричне струје, као и времена вршења самог процеса електрохемијског означавања на изглед, дубину и квалитет ознаке. Пре самог експерименталног тестирања извршена је темељна припрема узорака за испитивање, као и припрема уређаја, радног медијума, односно електролита, алата и шаблона (матрица). Материјали узорака који су коришћени за потребе експерименталног испитивања јесу лимови од конструкционог челика ST37-2 (Š0363), потом термички обрађен челик у облику ваљка и алуминијум. Експеримент је обављен на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Приликом реализације самог експеримента извршено је бележење различитих коришћених параметара (напон, поларитет и време означавања, тј. време контакта алата, електролита са узорцима) током поступка електрохемијског означавања, где је потом извршена анализа добијених експерименталних резултата узорака. Добијени резултати су представљени нумерички и графички.

5.3.1. Уређај, опрема и узорци

За експериментално испитивање поступка обележавања коришћен је уређај за електрохемијско означавање (обележавање), који је приказан на слици 5.27. Уређај поседује амперметар и волтметар којим се могу мерити јачина и напон електричне струје. На уређају се налази дугме за укључивање и искључивање, прекидач (потенциометар) за подешавање напона и улази за промену поларитета. Промена поларитета се врши заменом каблова који су у контакту са алатом и узорком у улазима на извору напајања уређаја. Поред елементарних улаза и излаза и поред потенциометара, на уређају се налазе две одвојене (засебне) скале помоћу којих се очитава јачина и напон електричне струје. Ове скале помажу лаборанту (особи која врши експеримент) да у било ком тренутку очита вредности јачине и напона електричне струје.



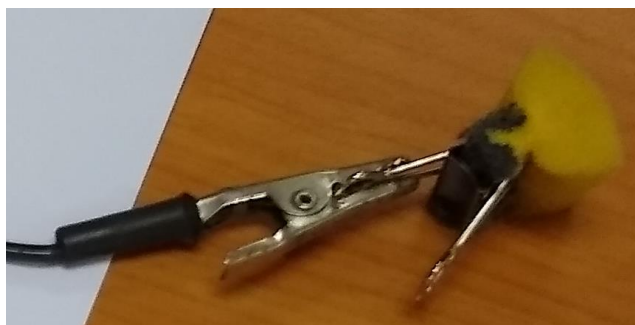
Слика 5.27. Уређај којим су вршена експериментална испитивања електрохемијског означавања

Експериментално испитивање поступка електрохемијског означавања је вршено на узорцима различитих величина, дебљина и облика, а који су приказани на слици 5.28. Материјали узорака јесу лимови од угљеничног конструкционог челика ST37-2 (Š0363), потом термички обрађен челик у облику цилиндра и алуминијумска плоча. Узорцима је током експерименталног испитивања мењан поларитет.



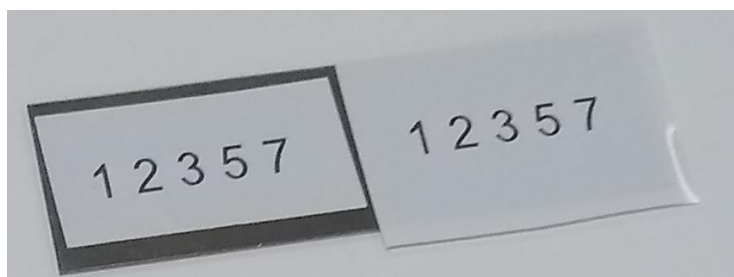
Слика 5.28. Узорци од конструкционог челика и алуминијума

Као радни медијум, односно електролит за извођење експеримента поступка електрохемијског означавања, коришћен је водени раствор соли. Током одређеног броја означавања електролит је мењан, јер је био запрљан честицама метала од узорака. Алат који је коришћен за овај поступак је сунђер (слика 5.29) који је натопљен електролитом и кроз који је пуштана електрична струја одређеног напона. Алату је током испитивања мењан поларитет.



Слика 5.29. Алат за поступак електрохемијског означавања

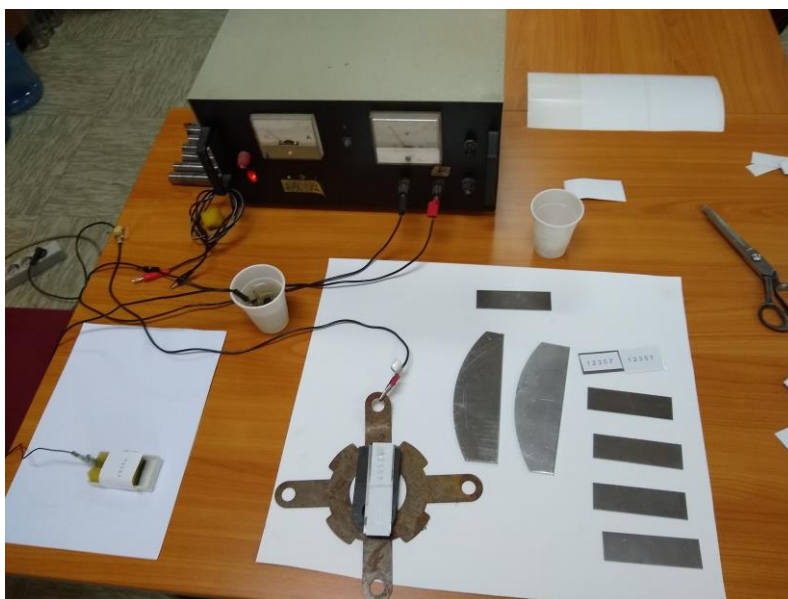
Као шаблон за потребе експерименталног испитивања коришћена је вишекратна папирна матрица на којој су исписани бројеви 1, 2, 3, 5, 7 (слика 5.30).



Слика 5.30. Шаблон (матрица) за означавање

5.3.2. Извођење експеримента

Пре самог експерименталног испитивања извршена је темељна припрема узорак за испитивање, као и припрема уређаја, електролита, алата и шаблона (матрица). Узорци су прво детаљно очишћени (ручно механички) од прашине, прљавштине, масти и уља, као и од остатака од претходних обрада. Тиме су елиминисани њихови могући утицаји на крајњи резултат добијене ознаке. Површина узорак мора бити глатка и у потпуности чиста. Непотпуно и неадекватно очишћена површина узорак може повући за собом низ негативних појава. Лоше очишћена површина која садржи на себи контаминенте, разне нечистоће, остатке и трагове масти и уља директно води ка нижем квалитету добијених ознака. Уколико се од овог вида електрохемијске обраде захтева висок квалитет и ако сама обрада има утицај на друге процесе онда је неопходно детаљно очистити површине. Након тога је извршено постављање алата и електролита и намештање параметара процеса на уређају и каблова на алат, уређај и узорак који се испитује (слика 5.31).



Слика 5.31. Припрема узорак, постављање алата и електролита и намештање каблова и параметара процеса електрохемијског означавања

На претходно очишћен узорак је постављен папирни шаблон са бројевима који се желе обележити, потом се постављају каблови у уређај, на алат и на узорак. Након тога се алат натапа електролитом и прислања на површину узорак (сл. 5.32). Након одређеног временског периода (не дуже од минута) алат се подиже и склања са узорак. Након тога се шаблон скида са узорак и узорак се брише од остатка електролита (слика 5.33).



Слика 5.32. Поступак електрохемијског означавања узорак



Слика 5.33. *Остатак електролита који се брише са шаблона и узорка након поступка електрохемијског означавања*

На слици 5.34 приказан је поступак електрохемијског означавања цилиндричног узорка. У посуди се налази електролит у који се убацује сунђер и натапа се електролитом и кроз који протиче електрична струја. На сунђер који је претходно уроњен у електролит поставља се шаблон (матрица), док се на шаблон под жељеним углом поставља узорак цилиндричног облика. Овом узорку цилиндричног облика се доводи електрична струја супротног поларитета у односу на поларитет струје који се доводи сунђеру. Тако изложен узорак поприма гравуру која се налази на шаблону.



Слика 5.34. *Поступак електрохемијског означавања цилиндричног узорка*

На слици 5.35 приказан је поступак електрохемијског означавања узорка од алуминијума (епрувета). Поступак је сличан као и код лимова од конструкционог челика, само што је овде реч о лимовима од алуминијума. На металну базу, на коју је постављена алуминијумска епрувета, доводи се електрична струја (алуминијум је једини метал код кога се може направити изузетак са поларитетом електричне струје, свеједно је да ли су база или сунђер позитивно или негативно наелектрисани).



Слика 5.35. *Поступак електрохемијског означавања узорка од алуминијума*

У наредном делу текста овог мастер рада презентовани су резултати обављених експерименталних испитивања претходно описаних узорка.

5.3.3. Резултати експеримента

Експериментално испитивање обављено је са различитим вредностима напона и временима означавања, са фиксним и променљивим поларитетом електричне струје како алата тако и испитиваних узорка. Толеранција временског интервала означавања узорка јесте 1 до 2 секунде. Током експеримента се прате промене које се догађају на узорцима у зависности од претходно наведених параметара у процесу електрохемијског означавања. Напони који се користе током ових експерименталних испитивања јесу 6 V, 12 V, 18V и 24 V. За ове вредности напона, у зависности од узорка, коришћене су једносмерна струја, али и наизменична струја, односно електрична струја променљивог поларитета. За потребе експеримента направљене су 24 гравуре на лимовима од угљеничног конструкционог челика. Пошто су дубине гравуре веома мале, а топлота која се ствара током поступка непостојећа, или пак незнатна (осим приликом примене електричне струје већег напона), па самим тим нема термичких и структурних напона, за узорке под редним бројем од 15 до 24 гравираних је друга страна лима, односно гравираних је друга страна узорка под редним бројем од 1 до 12. Код узорка у облику цилиндра рађено је једно тестирање. Код узорка од алуминијума рађена су седам тестирања. Циљ експеримента јесте тестирање утицаја времена, напона, материјала узорка и поларитета на квалитет, дубину и изглед добијене ознаке.

За прву групу узорка (табела 4) коришћена је једносмерна струја, где су узорци постављени на позитивном полу извора (анода). Овој групи узорка мењане су вредности напона, док је време означавања било константно и износило је 10 секунди. На сл. 5.36 приказана је прва група узорка који су испитивани на основу претходно наведених параметара обраде. Испитивање прве групе узорка је показало да су најоптималнији параметри процеса електрохемијског означавања били код узорка под редним бројем 2. Код узорка под редним бројем 1 може се запазити да је дошло до подливања електролита

услед лошег налегања шаблона (матрице) на површину узорка (симбол 1 на гравури који је замућен). На основу визуелне контроле уставновљено је да је лошија гравура настала као последица примене неодговарајућих параметара електрохемијског означавања. Закључује се да је за успешну обраду потребно употребити већи напон и/или дуже време обележавања, за параметре који су употребљени у овом случају. Добијена гравура је лошијег квалитета, односно нејасна је у односу на узорке под редним бројем 2, 3 и 4.

Табела 4. Параметри поступка код прве групе узорка:

Редни број узорка	Коришћени напон	Време означавања	Поларитет узорка	Слика узорка након означавања
1	6 V	10 s	+	
2	12 V	10 s	+	
3	18 V	10 s	+	
4	24 V	10 s	+	

Код узорка под редним бројем 3 примећује се подливање електролита по његовој површини које је изазвано неподесним налегањем матрице на његову површину, као и у првом случају, односно узорку. Визуелном контролом утврђено је да је дубина саме гравуре већа у односу на узорке под редним бројем 1 и 2, што доводи до закључка да је употребљена већа вредност напона од оптималне за ову врсту обраде. За напон од 18 V који је коришћен код узорка бр. 3 потребно је мање време контакта алата од дефинисаног и узорка како би се добила гравура са мањом дужином.



Слика 5.36. Узорци под редним бројем 1, 2, 3 и 4

Код узорка под редним бројем 4 примењен је напон од 24 V, за исто време обраде као и за претходне узорке, што је произвело доста већу дубину нагризања метала, што је директна последица већег напона за исто време обраде. За овај напон је неопходно доста краће време обраде како би се добила иста дубина гравуре као у првом и другом случају. Услед коришћења великог напона дошло је и до стварања топлоте у зони контакта и у непосредној околини, где су били загрејани сам узорак и алат. Стварање топлоте код поступка електрохемијског означавања, који је релативно хладан процес, негативно утиче на дубину, облик и квалитет ознаке. Код узорка број 2 може се запазити да је добијена гравура најбољег квалитета из целе прве групе. Код овог узорка параметри означавања су били напон од 12 V и време контакта алата и узорка од 10 секунди. Из овога се извлачи закључак да су ови параметри најоптималнији за исте услове обраде (једносмерна струја и узорци на позитивном полу извора).

Табела 5. Параметри поступка код друге групе узорка:

Редни број узорка	Коришћени напон	Време означавања	Поларитет узорка	Слика узорка након означавања
5	6 V	10 s	-	
6	12 V	10 s	-	
7	6 V	20 s	-	
8	12V	20 s	-	
9	18 V	20 s	-	
10	24 V	20 s	-	

Испитивање друге групе узорка (табела 5, сл. 5.37) обављено је са једносмерном струјом где су узорци постављени на негативни пол извора (катода). За тестирање ове групе узорка извршена је промена поларитета у односу на прву групу узорка. Узорак под редним бројем 5 је прикључен на напон од 6 V у трајању обраде од 10 секунди. Према добијеној ознаци се закључује да је примењени напон за дефинисано време неадекватан, односно долази се до закључка да је неопходно доста повисити напон да би се добила одговарајућа дубина, квалитет и јаснији изглед гравуре.



Слика 5.37. Узорци под редним бројем 5, 6, 7, 8, 9 и 10

На узорку бр. 5 на неким деловима површине није ни започето нагризање метала. Сличан резултат остварен је и код узорка под редним бројем 6 где је примењена вредност напона од 12 V за исто време обраде (10 секунди). На узорку се примећују јасније гравуре у односу на претходни пример, али је сама вредност напона недовољна за дефинисано време, како би се добиле исте гравуре као код прве групе узорка. Како би се добила јаснија ознака, код седмог узорка извршено је повећање времена контакта алата и узорка. У овом случају коришћена је вредност напона од 6 V, са временом обраде од 20 секунди. При овом испитивању остварена је јаснија гравура у односу на претходне две, као последица дужег времена контакта узорка и алата, али се контуре гравуре не распознају довољно јасно. На одређеним деловима површине чак и не постоје трагови овог вида електрохемијске обраде. Сличан ефекат остварен је и код узорка под редним бројем 8,

где је примењен напон електричне струје од 12 V и исто време обележавања. За узорке под редним бројевима 9 и 10, где је примењени напон 18 V и 24 V респективно, а време контакта исто 20 секунди, запажа се јаснија гравура него код претходних узорака и ове групе. Код узорка 10, услед лошијег налегања матрице на површину узорка, дошло је до подливања електролита код симбола 1 ознаке, што је имало утицај на квалитет и изглед добијене ознаке.

На основу испитивања и добијених ознака на узорцима прве и друге групе, закључује се да је бољи квалитет добијене ознаке остварен када је узорак на позитивном полу извора једносмерне струје (анода), а алат на негативном полу (катода) за исте параметре процеса електрохемијског означавања. Код друге групе узорака коришћена је висока вредност напона, као и дуже време обраде, при чему се остварује доста лошија гравура, односно ознака.

Табела 6. Параметри поступка код треће групе узорака:

Редни број узорка	Коришћени напон	Време означавања	Поларитет узорка	Слика узорка након означавања
11	12 V	10 + 10 s	+ ; -	
12	12 V	10 + 10 s	- ; +	
13	6 V	10 + 10 s	+ ; -	
14	18 V	10 + 10 s	+ ; -	

Код узорака треће групе (табела 6) коришћена је струја променљивог поларитета. Временски интервали обраде који су се користили код ове групе узорака јесу 10 секунди за један поларитет и након тога 10 секунди за други поларитет. Приликом коришћења електричне струје променљивог поларитета, код поступка електрохемијског означавања, уместо беле сјајне ознаке добија се тамнија (црна) ознака. Код узорка под редним бр. 11 је при обради употребљен напон од 12 V, где је у првих 10 секунди обраде узорак био прикључен на позитивни извор напона, а одмах након тога 10 секунди на негативни извор напона. Визуелна контрола нам указује на то да је коришћени напон за дефинисани временски интервал обраде недовољан за остваривање чисте и квалитетне тамне ознаке. За квалитетнију ознаку у овом случају неопходно је повећати време обраде позитивног поларитета. Код узорка под редним бројем 12 примењена је иста вредност напона, као и код претходног узорка, с тим што је у овом случају првих десет секунди узорак био прикључен на негативни пол извора напона, док је других десет секунди узорак био прикључен на позитивни пол извора напајања. У овом случају, пошто је узорак био катода, дошло је до нагризања материјала, али није дошло до потамљења ознаке, јер напон за дефинисана времена није био довољан. За узорак под редним бр. 13 коришћена је вредност напона од 6 V за исто дефинисано време, с тим што је првих десет секунди узорак био прикључен на позитивни пол извора напајања, док је других десет секунди исти био прикључен на негативни пол извора напајања. Код овог узорка се може уочити да је напон довољан за постизање оптималне дубине нагризања материјала, али да је дефинисано време обраде недовољно за постизање жељеног квалитета и изгледа гравуре. Коришћени параметри код узорка бр. 14 јесу напон струје од 18 V и промена поларитета на десет секунди, где је прво узорак био анода, па затим катода. Визуелном контролом се дошло до закључка да је коришћени напон за дефинисано време превише велики, што доводи до велике дубине нагризања метала и стварања нејасне гравуре лошег квалитета.



Слика 5.37. Узорци под редним бројем 11, 12, 13 и 14

На основу испитивања и добијених ознака на узорцима треће групе, закључује се да је за добијање тамне ознаке неопходна примена електричне струје променљивог поларитета, с тим да се прво узорак мора обрађивати одређени временски период прво као анода (+), а затим као катода (-).

Табела 7. Параметри поступка код четврте групе узорака:

Редни број узорка	Коришћени напон	Време означавања	Поларитет узорка	Слика узорка након означавања
15	12 V	15 + 5 s	+ ; -	
16	12 V	5 + 15 s	+ ; -	
17	12 V	15 + 5 s	- ; +	
18	12 V	5 + 15 s	- ; +	

Код четврте групе узорака коришћена је константна вредност напона од 12 V, док су времена поступка електрохемијског означавања мењана. Коришћена је електрична струја променљивог поларитета. Узорци под редним бројем 15 и 16 обрађивани су прво као аноде па затим као катоде различитим временима. Код узорка 15 примећује се добар квалитет ознаке, као и код узорка 16 са малим одступањима због подливања електролита услед недовољног налегања шаблона на површину материјала. Примењени параметри код узорка број 16 довели су до ознаке веома високог квалитета и оптималне дубине. Код узорка бр. 15 примењена је електрична струја променљивог поларитета, где је вршена обрада 20 секунди. Прво је узорак био прикључен на позитивном полу извора напајања првих 15 секунди, а затим 5 секунди на негативном полу извора напајања. У поређењу са њим, узорак бр. 16 је обрађиван такође 20 секунди, али је поступак означавања вршен тако што је узорак првих 5 секунди био анода, а осталих 15 секунди катода. Овим се дошло до закључка да су коришћени параметри код узорка бр. 16 оптимални за добијање квалитетне ознаке на површини материјала. Код узорака под редним бројем 17 и 18 је заједничко то што је коришћен исти напон и укупно време обраде, док се у односу на претходна два описана узорка разликује по томе што су први део обраде узорци били прикључени на негативном полу извора напајања (узорак је катода), па затим други део обраде су узорци били прикључени на позитивном полу извора напајања (анода). То је довело до неуједначеног нагризања материјала узорака, али и до добијања беле сјајне ознаке, као што је описано у претходном поглављу.



Слика 5.38. Узорци под редним бројем 15, 16, 17 и 18

На слици 5.38 су приказани узорци који су претходно описани, док су у табели 8 дати параметри поступка код пете групе узорака.

Табела 8. Параметри поступка код пете групе узорака:

Редни број узорка	Коришћени напон	Време означавања	Поларитет узорка	Слика узорка након означавања
19	24 V	5 + 5 s	+ ; -	
20	24 V	10 s	-	
21	24 V	5 s	+	
22	24 V	20 s	+	

Пета група узорака испитује се једносмерном струјом једног поларитета, при чему се узорак број 19 испитује са променом поларитета. Вредност напона је константна и износи 24 V, а време обраде се мења, како би се дефинисале промене на поршини узорака које су изазване променом неког од параметара процеса. Електрохемијско означавање код узорка број 19 остварено је за период од 10 секунди, при чему је узорак 5 секунди био на позитивном полу извора струје, а других 5 секунди на негативном, тј. исто време електрохемијске обраде површине за оба поларитета. Показало се да је означавање са променом поларитета и вредношћу напона од 24 V јасније од узорка под редним бр. 20, што се може закључити на основу контура код узорка 19 (слика 5.39).



Слика 5.39. Узорци под редним бројем 19, 20, 21 и 22

За исту вредност напона испитује се и узорак 20, у трајању од 10 s, при чему је предмет обраде на негативном полу извора струје (-). За исто време деловања електролита на плочицу остварује се лошији квалитет гравуре, иако је коришћено исто време обраде, али без промене поларитета. На слици у табели 8 може се приметити да се

поступак означавања предмета код узорка 20 показао лошија својства у односу на претходни пример + обриси броја 1 на површини лима се доста тешко уочавају, док су остале форме лошијег квалитета у односу на узорак 19. Означавање плочице на којој су узорци 21 и 22 обавља се за време од 5 и 20 s, респективно. За ово време обраде предмет је на позитивном полу извора у оба случаја, па се разлика у времену обраде узима као фактор који контролише квалитет обрађене површине, јер су сви остали параметри обраде исти. Међутим, код овог испитивања квалитет је лошији у односу на узорке 19 и 20, као последица тога што је предмет обраде на позитивном полу извора једносмерне струје (катода). Узорак број 21, је у односу на узорак бр. 4, при истом напону, а мањем времену обележавања, постигао мању дубину гравуре и мање нагризање, што је близу оптималним параметрима прве групе тестираних узорака.

Услед коришћења великог напона дошло је и до стварања топлоте у зони контакта и у непосредној околини, где су били загрејани сам узорак и алат, осим у првој и трећој обради групе, јер је код узорка 19 извршена промена поларитета, што је довело до хлађења узорка, док је код узорка 21 време обраде било краће. Веће време контакта алата и узорка није довело до значајнијих промена када је у питању квалитет површине, односно јасноћа форми на гравури.

Табела 9. Параметри поступка код шесте групе узорака:

Редни број узорка	Коришћени напон	Време означавања	Поларитет узорка	Слика узорка након означавања
23	12 V	5 + 5 s	+ ; -	
24	12 V	5 + 10 s	+ ; -	

Код испитивања број 23. и 24. вредност напона је 12 V, а највеће време означавања је 15 секунди. Ово испитивање обављено је са променом поларитета једносмерне струје, при чему је узорак у првом интервалу времена имао улогу аноде, а у другом катоде. За први узорак укупно време означавања је 10 s. Првих 5 s предмет обраде је био прикључен на позитиван пол извора струје, а преосталих 5 s на негативан пол струје. У овом случају узети су исти параметри обраде као и код узорка 19, с тим што је употребљена мања вредност напона једносмерне струје. Гравура која се добија на основу ових параметара показује доста лошија својства у односу на узорак 19, што се може навести као директна последица смањеног напона при испитивању. Означавање узорка под редним бројем 24. било је за исте факторе као и код узорка 23, при чему је укупно време обраде веће за 5 s, тј. предмет је био прикључен на позитиван пол извора струје првих пет секунди, након чега се прикључује на негативан пол извора преосталих десет секунди. За разлику од претходно описаног примера, узорак 24. показао је за нијансу боље особине када је у питању јасноћа контуре гравуре, нарочито ако се узме у обзир десна страна гравуре.



Слика 5.40. Узорци под редним бројем 23 и 24

Иако су ова испитивања обављена са променом поларитета струје, узорци 23. и 24. показали су лошије гравуре у односу на узорак 19, за исто време означавања, што се може приписати разлици у вредности напона, тј. мањем напону који је коришћен за ово испитивање. На слици 5.41 је приказан цилиндрични узорак од термички обрађеног челика који је електрохемијски означаван.



Слика 5.41. Цилиндрични узорак од термички обрађеног челика

Код цилиндричног узорка од термички обрађеног челика коришћена је вредност напона од 24 V, док је само време означавања 30 секунди. Коришћен је исти електролит као и код електрохемијског означавања лимова (водени раствор соли). Цилиндрични узорак је означаван једносмерном струјом, где је исти био прикључен на негативан пол извора напајања (узорак је катода, а алат анода). Према визуелној инспекцији се може увидети да је дошло до стварања тамне ознаке, где је постигнута скоро уједначена дубина нагризања материјала гравуре, као и добар квалитет означених симбола гравуре. Међутим, како се код овог поступка означавања применила велика јачина напона дужи временски период, дошло је до великог загревања материјала, алата и електролита, што може негативно утицати на сам процес електрохемијског означавања површина код цилиндричних производа од истог или сличног коришћеног материјала.

Наредна група тестирања параметара поступка електрохемијског означавања је вршена на алуминијуму, односно алуминијумској плочи. Вршена су седам испитивања (слика 5.42) једносмерном струјом, где је код неколико узорак на алуминијумској плочи извршена промена поларитета. Обраде се вршене различитим вредностима напона и временима означавања. У табели 10 је дат преглед коришћених параметара приликом експерименталног испитивања поступка електрохемијског означавања алуминијума:

Табела 10. Параметри поступка испитивања електрохемијског означавања алуминијума:

Редни број узорак	Коришћени напон	Време означавања	Поларитет узорка
1	12 V	20 s	+
2	12 V	10 s	+
3	12 V	5 s	+
4	6 V	10 s	+
5	12 V	10 s	-
6	24 V	10 s	-
7	24 V	5 s	+

Код узорак 1, 2 и 3 поларитет узорка (+), као и сама вредност коришћеног напона су константни, док се време означавања мења. Циљ код ова три узорак је био тестирање како промена времена означавања, при осталим константним параметрима, утиче на квалитет и чистоћу ознаке. Као што се може видети са слике 5.42, сва три испитивања су дала гравуру јасне и чисте ознаке великог квалитета. Разлика код ових ознака је само у њиховој дубини, јер дужим временом означавања се постиже веће нагризање материјала. Код узорка под редним бројем 4 коришћен је напон од 6 V и време обраде од 10 секунди,

док је поларитет узорка остао непромењен у односу на претходне испитиване узорке. Према визуелној контроли узорка се закључује да примењена вредност напона обраде, за дефинисано време и поларитет означавања, није довољна за остваривање оптималне дубине нагризања, па самим тим и јасноће и чистоће ознаке. Код ове гравуре дошло је до подливања електролита услед лошег налегања матрице на површину материјала, што је резултовало смањеној чистоћи гравуре (симбол 7 на гравури). Код узорка под редним бројем 5 примењени напон (12 V) и време означавања (10 секунди) су исти као и код прва три узорка, с тим што је у овом случају извршена промена поларитета (-). На одређеном делу гравуре, услед ниског напона и малог времена означавања, за једносмерну струју негативног поларитета, једва да је и почело нагризање метала (код симбола 1 на гравури). Слични параметри (време означавања и поларитет) су примењени и за узорак број 6, где је једино промењен примењен напон при означавању, чија је вредност износила 24 V. Према визуелној контроли долази се до закључка да је коришћена превелика вредност напона за дефинисано време означавања, што је довело до велике дубине гравуре услед већег нагризања материјала. Поред тога, добијена гравура није јасна, односно чиста и ниског је квалитета, а такође је и сличне боје као и околни материјал. Такође је дошло и до благог загревања узорка, услед коришћења високог напона, али пошто је алуминијум већи проводник топлоте од претходно коришћених материјала, и пошто је величина плоче алуминијума која се означава већа, пренос топлоте је извршен по целој површини плоче, чиме је топлота врло мало утицала на процес електрохемијског означавања. Код узорка број 7, коришћена је вредност напона од 24 V, време означавања је 5 секунди, док је поларитет узорка (+). Према визуелној контроли се може видети да је дошло до веће дубине нагризања материјала услед коришћења великог напона струје за дефинисано време означавања.



Слика 5.42. Узорак од алуминијумске плоче

Приликом експерименталних испитивања поступка електрохемијског означавања алуминијума долази се до закључка да је најповољнији и најефикаснији начин његовог означавања примена једносмерне струје када је предмет обраде повезан на позитивни пол извора напајања, односно када је предмет обраде анода, а коришћени алат катода (када се примењују оптимални параметри вредности напона и времена означавања). Тада се добијају најчистијије и најјасније ознаке гравуре, као и оптимална дубина нагризања материјала.

6. Закључци и будући развој електрохемијске обраде

Развој неконвенционалних поступака обраде материјала је од великог значаја за раст и унапређивање индустрије у целом свету. Неконвенционални поступци обраде су поступци код којих се уклања вишак материјала, измена облика, димензија и структуре материјала остварује коришћењем електричне, хемијске, светлосне, магнетне, нуклеарне и других видова енергије доведене непосредно у зону обраде. То су поступци обраде који обезбеђују обраду најтеже обрадљивих материјала, као и подизање нивоа производности и економичности прераде разних врста материјала. Неконвенционални поступци обраде се такође карактеришу знатно широм применом нових врста материјала, као и развојем рационалних, компактних конструкција машина, алата, разних уређаја и механизма малих димензија итд. И поред великог броја предности неконвенционалних поступака обраде, они имају и одређене недостатке. Основни недостатак неких обрада је релативно мала производност у односу на конвенционалне поступке обраде резањем, али и висок утрошак енергије по јединици запремине. Производност и утрошак енергије по јединици скинуте запремине материјала су пре свега последица физичких принципа на којима се заснивају поједини неконвенционални поступци обраде. Али и поред тога, они могу да стварају велике уштеде у раду и трошковима производње, поготово када се ради о тешко обрадљивим материјалима, деловима малих димензија, као и доста сложених геометрија. Највећу препреку за коришћење неконвенционалних поступака обраде представља висока цена машина, односно комплетних инсталација за обраду.

Електрохемијска обрада представља савремен поступак обраде чија је примена у индустријској пракси веома распрострањена, као и економски оправдана, а која пружа велике могућности примене. Због својих бројних технолошких предности почиње постепено да потискује примену конвенционалних поступака обраде. Електрохемијска обрада поседује одговарајуће и потребне техно-економске карактеристике којима се обезбеђује ефективна обрада материјала велике јачине и велике отпорности на топлоту у комплексне облике. Обрада се врши без физичког додира између алата и предмета обраде чиме се достиже обрада без пукотина, као и термичких и структурних напона. Електрохемијска обрада је настала из потребе за обрадом материјала велике чврстоће, тврдоће и крутости, са или без минималне промене микроструктуре обрађене површине. Такође је настала и на основу захтева да се фина и прецизна обрада, посебно малих и осетљивих предмета обраде, обави са приближно хладним поступком. Повећани захтеви за новим материјалима побољшаних карактеристика, као на пример легуре на бази никла, кобалта, молибдена, волфрама, титанијума и др., као и новим деловима специфичне конструкције, али и све строжијим захтевима у погледу тачности обраде и квалитета обрађене површине, довеле су до тога да се неке индустријске гране, као што су на пример авионска, аутомобилска, индустрија турбина и др., више не могу ни замислити без примене електрохемијских поступака обраде.

Области примене електрохемијске обраде су доста велике, где су нпр. само неки примери примене: израда делова реактивних и ракетних мотора (нуклеарна, авионска и војна индустрија), израда турбинских кола (израда равних или закривљених лопатица и других делова сложеног геометријског облика од ватроотпорних материјала), израда специјалних пумпи и других делова инсталација високог притиска (сложени облици од високоотпорних материјала), затим израда различитих врста калупа и алата за ковање, пресовање и ливење (за израду већег броја истих алата од високолегираних челика ниже тачности обраде, нпр. за израду делова аутомобила - клипњача, радилица, каросерија, карбуратора), као и израда других специјалних делова општег машинства (израда уских жлебова, дубоких отвора, сложених површина, танкозидних површина итд.).

Сваки од узорака су испитивани при различитим вредностима параметара напона и временима означавања, као и при различитим поларитетима узорка. Из приложених фотографија узорака може се закључити да је најекономичнији и најбржи поступак електрохемијског означавања са позитивним поларитетом код челичних лимова, што се може видети из прве групе испитиваних узорака. Коришћење негативног поларитета код предмета обраде доводи до неефикасног поступка електрохемијског означавања, као и до стварања повишене температуре обраде што се даље може негативно одразити на сам поступак обраде и квалитет, дубину нагризања, али и облик гравуре. Слична ситуација је и код алуминијума, где су најбоље карактеристике саме гравуре постигнуте када је предмет обраде био повезан на позитивном полу извора једносмерне струје.

Детаљно познавање технологије електрохемијске обраде, па самим тим и процеса електрохемијског означавања (обележавања) омогућава њену успешну примену у разним производним процесима, односно правилан избор параметара приликом обраде доводи до повећања квалитета обрађиваних материјала. Анализом резултата добијеним овим експерименталним испитивањем поступка електрохемијског означавања може се закључити да скоро сви параметри (напон, поларитет предмета, време означавања и понекад материјал предмета који се означава) утичу на квалитет, дубину нагризања, изглед и боју, али и облик и чистоћу ознаке, односно гравуре.

Експериментална испитивања обрађена у овом мастер раду могу се унапредити коришћењем трибометра за одређивање дубине и параметра храпавости сваке добијене гравуре, што даље може допринети још бољем приказу утицаја примењеног напона, поларитета и времена означавања на предмете обраде који се означавају.

Будући правац развојка различитих поступака електрохемијске обраде ће водити ка повећању производности, односно повећању брзине обраде и побољшавању система управљања радним зазором и контроле процеса целе инсталације за електрохемијску обраду. Правац будућих истраживања и напредовања обраде биће у коришћењу нових материјала при пројектовању алата који се користи при електрохемијској обради, који ће још више оптимизовати проток електролита, анодно растварање предмета обраде, као и олакшано одвођење продуката обраде. Даљи развој нових материјала који се користе за предмет обраде ће још више отежати њихову обраду осталим поступцима обраде, што ће довести до већег развојка електрохемијске обраде у будућности, да би се што ефикасније извршио процес обраде делова. Правци даљих научних истраживања и развоја ове врсте обраде бити у оптимизовању улазних параметара процеса обраде, као и пролазак нових радних течности (електролита) који ће се примењивати у процесу обраде чиме ће се постићи веће анодно растварање предмета обраде, уз максимално смањење могућности стварања пасивизирајућег слоја. Још један правац будућег развоја електролита ће бити и у смањењу његовог штетног дејства на животну околину и здравље човека, чиме ће такви електролити постати еколошки доста прихватљивији. Један од правца истраживања и развоја ће се кретати и у области машина и опреме која се користе у постројењима за електрохемијску обраду. Ту се превасходно мисли на развој нових технологија за циркулацију и регенерацију електролита, развој нових филтера за пречишћавање истих, као и нових уређаја за електролитско пречишћавање. Сумирано, према мишљењу аутора, у будућности ће доћи до нових открића која ће оптимизовати процес електрохемијске обраде, као и до развојка нових материјала које ће се користити за израду алата којим ће се лакше обављати процес обраде, али и материјала који ће омогућити дужи век трајања тог алата, а самим тим и већи број обрада, тачнија обрада, повећани квалитет површине материјала предмета обраде, као и већа производност и продуктивност, што ће даље довести и до још веће уштеде електрохемијске обраде.

7. Литература

- [1] Миодраг Лазић, *Неконвенционални поступци обраде*, Научна књига, Београд, 1990, ISBN 86-23-43059-X
- [2] Драгоје Миликић, *Неконвенционални поступци обраде - приручник за студије и праксу*, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2002, ISBN 978-86-4990-116-2
- [3] Богдан Недић, Миодраг Лазић, *Производне технологије: обрада метала резањем*, Скрипта, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2007.
- [4] Јелена Баралић, Богдан Недић, Мирослав Радовановић, Предраг Јанковић, *Обрадивост материјала резањем абразивним воденим млазом*, Монографија, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2015, ISBN 978-86-6335-013-7
- [5] Јелена Баралић, *Енергија и квалитет обраде абразивним воденим млазом*, Докторска дисертација, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2014.
- [6] Душан Регодић, *Технички системи*, Факултет за информатику и менаџмент, Универзитет Сингидунум, Београд, 2011, ISBN 978-86-7912-337-4
- [7] Богдан Недић, *Поглавље о електрохемијској обради*, Књига у рукопису, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац
- [8] Jerzy Kozak, Maria Zybura-Skrabalak, *Some problems of surface roughness in electrochemical machining (ECM)*, Proceedings of the 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII) (42), pp. 101-106, 2016.
- [9] Vijay K. Jain, *Advanced Machining Processes*, Allied publications Pvt. Limited, New Delhi, 2007, ISBN 81-7764-294-4
- [10] Rasheedat M. Mahamood, Esther T. Akinlabi, *Advanced Noncontact Cutting and Joining Technologies: Micro- and Nano-manufacturing*, Springer International Publishing AG, Cham, 2018, ISBN 978-3-319-75118-4
- [11] Hassan El-Hofy, *Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes*, McGraw-Hill, Inc, New York, 2005, ISBN 978-0-071-45334-9
- [12] Bijoy Bhattacharyya, *Electrochemical Micromachining for Nanofabrication, MEMS and Nanotechnology*, Elsevier Inc., Oxford, 2015, ISBN 978-0-323-32737-4
- [13] Sriharsha Srinivas Sundarram, *Development of Electrochemical Micro Machining*, Master Thesis, Texas A&M University, College Station, 2008.
- [14] Hassan Abdel-Gawad El-Hofy, *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes, 2nd edition*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2014, ISBN 978-1-4665-7703-9
- [15] John R. Walker, Bob Dixon, *Machining fundamentals, 10th edition*, The Goodheart-Willcox Company, Inc., Tinley Park, 2018, ISBN 978-8-1635-63208-8
- [16] Ares Argelia Gomez-Gallegos, *Electrochemical machining: towards 3D simulation and application on SS316*, Doctoral Thesis, University of Edinburgh, Institute of Materials and Processes, School of Engineering, Edinburgh, 2015.
- [17] João Paulo Davim, *Machining: fundamentals and recent advances*, Springer-Verlag London Limited, London, 2008, ISBN 978-1-84800-213-5

- [18] Zhengyang Xu, Yudi Wang, *Electrochemical machining of complex components of aero-engines: Developments, trends, and technological advances*, Chinese Journal of Aeronautics, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.016>
- [19] Mukherjee S. K., Kumar S., Srivastava P. K. *Effect of Over Voltage on Material Removal Rate During Electrochemical Machining*, Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 8, No 1, pp. 23-28, 2005.
- [20] John Stock, Mary Virginia Orna, *Electrochemistry, past and present*, ACS Symposium Series, American Chemical Society, Washington, DC, 1989, ISBN 0-8412-1572-3
- [21] Derek Pletcher, Frank C. Walsh, *Industrial Electrochemistry, 2nd edition*, Springer Netherlands, Amsterdam, 1993, ISBN 978-94-011-2154-5
- [22] Joseph McGeough, *Encyclopedia of Chemical Technology*, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [23] Golam Kibria, Bijoy Bhattacharyya, J. Paulo Davim, *Non-traditional Micromachining Processes: Fundamentals and Applications*, Springer International Publishing AG, Cham, 2017, ISBN 978-3-319-52009-4
- [24] J. O'M. Bockris, Brian E. Conway, Ernest Yeager, Ralph E. White, *Comprehensive Treatise of Electrochemistry, Volume 2: Electrochemical Processing*, Plenum Press, New York, 1981, ISBN 978-1-4684-3785-0
- [25] О. И. Невский, В. М. Бурков, Е. П. Гришина, Е. Л. Гаврилова, А. В. Балмасов, А. В. Носков, М. Г. Донцов, *Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблемы теорий и практики*, Монография, Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, 2006.
- [26] Сергей Ильич Галанин, *Теория и практика анодной электрохимической обработки короткими импульсами тока*, Диссертации, Костромской государственный технологический университет, Кострома, 2001.
- [27] Сергей Иванович Захаркин, *Электрохимическая размерная обработка при сверхмалых межэлектродных зазорах*, Диссертация, Тульский государственный университет, Тула, 2002.
- [28] Donald Arthur Oliver, *Electrochemical Machining*, Elsevier Publishing Company, London, 1968.
- [29] Umasankar Mallick, *Estimation of MRR Using U-shape Electrode in Electrochemical Machining*, Master Thesis, National Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Rourkela, 2010.
- [30] Pankaj Sahu, *Experimental Investigation and Optimization of Parameters in Electrochemical Machining Operation*, Master thesis, National Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Rourkela, 2015.
- [31] Jonathon Mitchell-Smith, Adam T. Clare, *ElectroChemical Jet Machining of Titanium: Overcoming Passivation Layers with Ultrasonic Assistance*, Proceedings of 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII) (42), pp. 379-383, 2016.
- [32] Alexandre Spieser, *Development of an Electrochemical Micromachining (μ ECM) machine*, Doctoral Thesis, College of Engineering, Design and Physical Sciences, Brunel University, London, 2015.
- [33] https://vtsnis.edu.rs/wp-content/plugins/vts-predmeti/uploads/4%20ECM_CELA.pdf

- [34] Brooks P. T., McDonald W. R. *Electrochemical machining sludge: Dewatering Electrochemical Machining Sludge*, Report of investigations 8113, United States Department of the Interior, U.S. Bureau of Mines, 1976.
- [35] Каталог машина компаније *Indec: ECM, LLC*. Интернет адреса: <http://www.indec-ecm.com/en/equipment/> , приступљено 27.08.2020. год.
- [36] *Sermatec*. Интернет адреса: <http://www.sermatec.com/en-224-434-electrochemical-machining-process.html> , приступљено 28.08.2020. год.
- [37] *Cougartron*. Интернет страница: <https://cougartron.com/electrochemical-marking-etching/> , приступљено 28.08.2020. год.
- [38] Peter Notten, Jan van den Meerakker, John Kelly, *Etching of III-V semiconductors, an electrochemical approach*, Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York 1991, ISBN 0-946395-84-5
- [39] *Img Electromark*. Интернет страница: <http://www.img-electromark.com/handbook/>, приступљено 02.09.2020. год.
- [40] *Markiranje*. Интернет адреса: <https://markiranje.com/>, приступљено 02.09.2020. год.
- [41] *Trendmarking*. Интернет страница: <https://www.trendmarking.com.au/metal-etching-systems.html> , приступљено 03.09.2020. год.
- [42] *UMS*. Интернет адреса <https://www.ums.co.uk/electrochemical.asp> , приступљено 03.09.2020. год.
- [43] *Pryormarking*. Интернет адреса: <https://www.pryormarking.com/products/chemical-etching> , приступљено 03.09.2020. год.
- [44] *IMHT*. Интернет адреса: <http://imht.ru/bs/innovatika/travlenie-metalla-elektrolizom-v-domashnih-usloviyah-metod.html> , приступљено 03.09.2020. год.
- [45] *KMT Marking*. Интернет адрес: <http://www.ktmarking.com/products/electrochemical-marking-machine/> , приступљено 04.09.2020. год.
- [46] *Monode*. Интернет страница: <https://www.monode.com/electrochemical-etching.php> , приступљено 04.09.2020. год.
- [47] *Millenium signature marking*: <https://millenniumsinglesignaturesmarkingsystems.com/wp-content/uploads/2013/06/Chemical-Etching-Literature-FINAL.pdf> , приступљено 06.09.2020. год.
- [48] *Etchmark*. Интернет страница: <https://etchmark.co.uk/electrolytic/>, приступљено 09.09.2020. год.
- [49] Интернет адреса: <https://www.manufacturingguide.com/en/electrochemical-etching> , приступљено 12.09.2020. год.