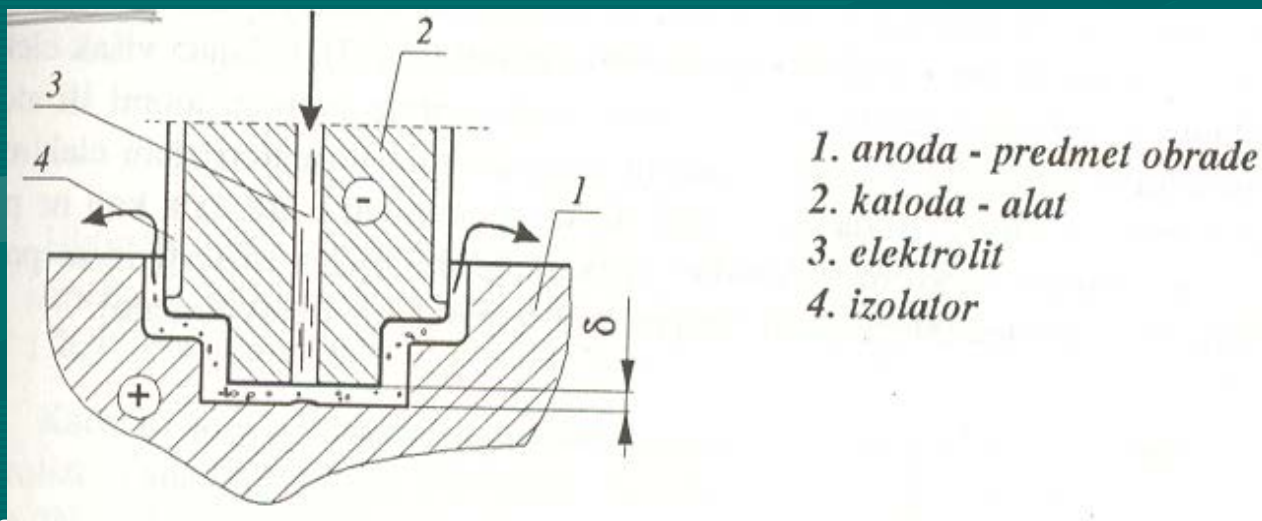


ELEKTROHEMIJSKA OBRADA

The background is a solid teal color. In the lower half, there is a faint, semi-transparent silhouette of two hands shaking, symbolizing agreement or partnership. The text 'ELEKTROHEMIJSKA OBRADA' is centered in the upper half in a white, serif font.

Potreba za obradu materijala sa izvanrednom ~vrsto}om, tvrdo}om i kruto}u, koji se nisu mogli obra|ivati na konvencionalni na~in, kao i zahtev da se fina i precizna obrada na takvim a posebno malim, osetljivim delovima obavi na prili~no hladan na~in, dovela je do savremene prakti~ne primene elektrohemijske obrade – ECM (Electro-Chamical Machining).

Proces elektrohemijske obrade je suprotan procesu galvanskog prekrivanja i zasnovan je na elektroanalizi i Faradejevom zakonu. Ovde je iskori}ena pojava rastvaranja anode pri propu{tanju jednosmerne elektri~ne struje izme|u elektroda potopljenih u rastvor elektrolita. U procesu obrade radni predmet je anoda a alat je katoda.



Slika: [ema procesa elektrohemijske obrade

U toku obrade alat i radni predmet se nalaze na određenom rastojanju (postoji radni zazor). ^itav radni prostor je ispunjen rastvorom elektrolita koji miruje ili protiče, zavisno od re`ima obrade. Pri tome alat se upu{ta u materijal obrade, te obrađene površine u velikoj meri su odraz tj. otisak alata.

Umesto strugotine odstranjeni materijal se javlja u vidu metalnih hidroksida i biva odnešen elektrolitom u posebne uređaje gde se odvaja ili talo`i. Pri ovom procesu alat se ne troši i to je jedna od veoma va`nih karakteristika ove metode. Zbog prirode samog procesa mogu se obrađivati samo elektroprovodni materijali.

I pored toga što su Faradejevi zakoni i pojave elektrolize poznati još odavno, elektrohemijska obrada je novijeg datuma. Godine 1928. ruski nau~nik V. N. Gusev, prvi je uspeo ostvariti obradu materijala ovom metodom, dok serijska proizvodnja mašina datira od pre nekoliko decenija.

PRINCIP OBRADE

Princip elektrohemijuskog odno{enja (skidanja) materijala zasniva se na elektrohemijuskoj reakciji metalnog obratka komada sa jonima radnog medijuma (elektrolita) pod dejstvom elektri~ne struje prema Faradejevom zakonu elektrolize. Kako je poznato, pri hemijskom raspadu molekuli elektrolita nastaju elektri~ni neutralni produkti (hemijuski raspad).

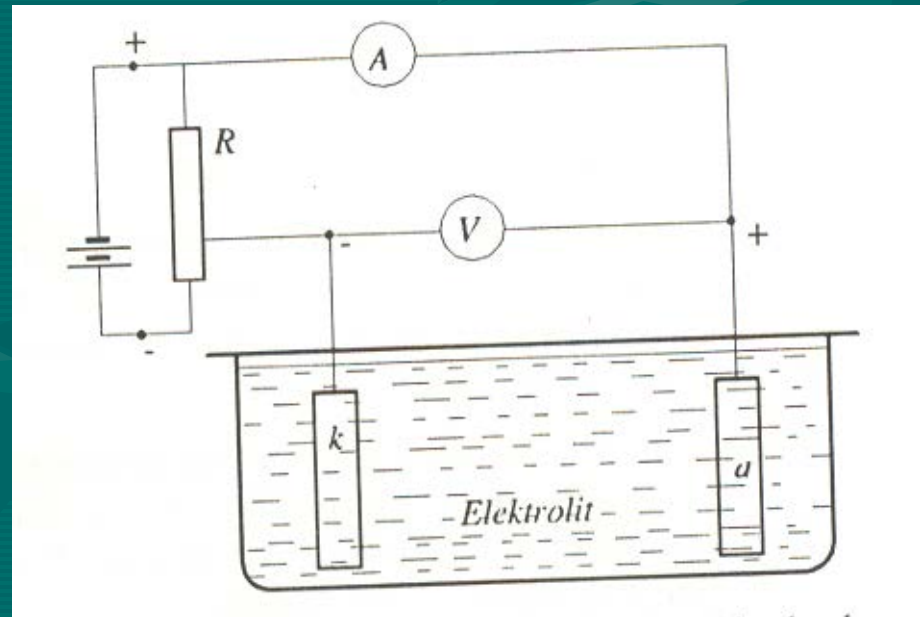
Pri rastvaranju metalnih soli, kiselina i baza u te~nom rastvara~u na pr. vodi, molekuli rastvorene materije disociraju, odnosno raspadaju se na raznoimene jone i to na pozitivno naelektrisane jone katjone i negativno naelektrisane jone tzv. anjone. Joni metala i vodonika uvek su katjoni a molekularni ostatak anjoni.



Potapanjem metalnih plošastih provodnika (elektroda) u elektrolit i priključenjem na izvor jednosmerne struje, dolazi do usmerenog kretanja jona od anode prema katodi, i to: katjona prema katodi k , a anjona prema anodi a . Odajući višak elektrona anodi, odnosno primajući elektrone sa katode, joni postaju neutralni atomi ili atomske grupe koji odmah stupaju u hemijsku reakciju sa rastvorom ili materijalom elektroda. U oba slučaja na površini elektroda može doći do stvaranja novih materijala koji ne postoje u rastvoru, tj. nastupa elektroliza. Anodno rastvaranje, tj. prelaz materijala sa

površine anode u rastvor i katodno taloženje materijala vrši se paralelno (istovremeno).

Slika: Šematski prikaz principa elektrohemijske obrade



Pododnim izborom elektrolita, elektroda i vođenjem procesa može se proces značajnije usmeriti na anodu ili katodu, s obzirom na svrhu procesa. Kretanje jona i elektrohemijaska reakcija uslovljeni su spoljnim električnim naponom. Napon potreban za anodno rastvaranje mora biti jednak naponu između elektroda uvećan za napon potreban za savlađivanje otpora u elektrolitu.

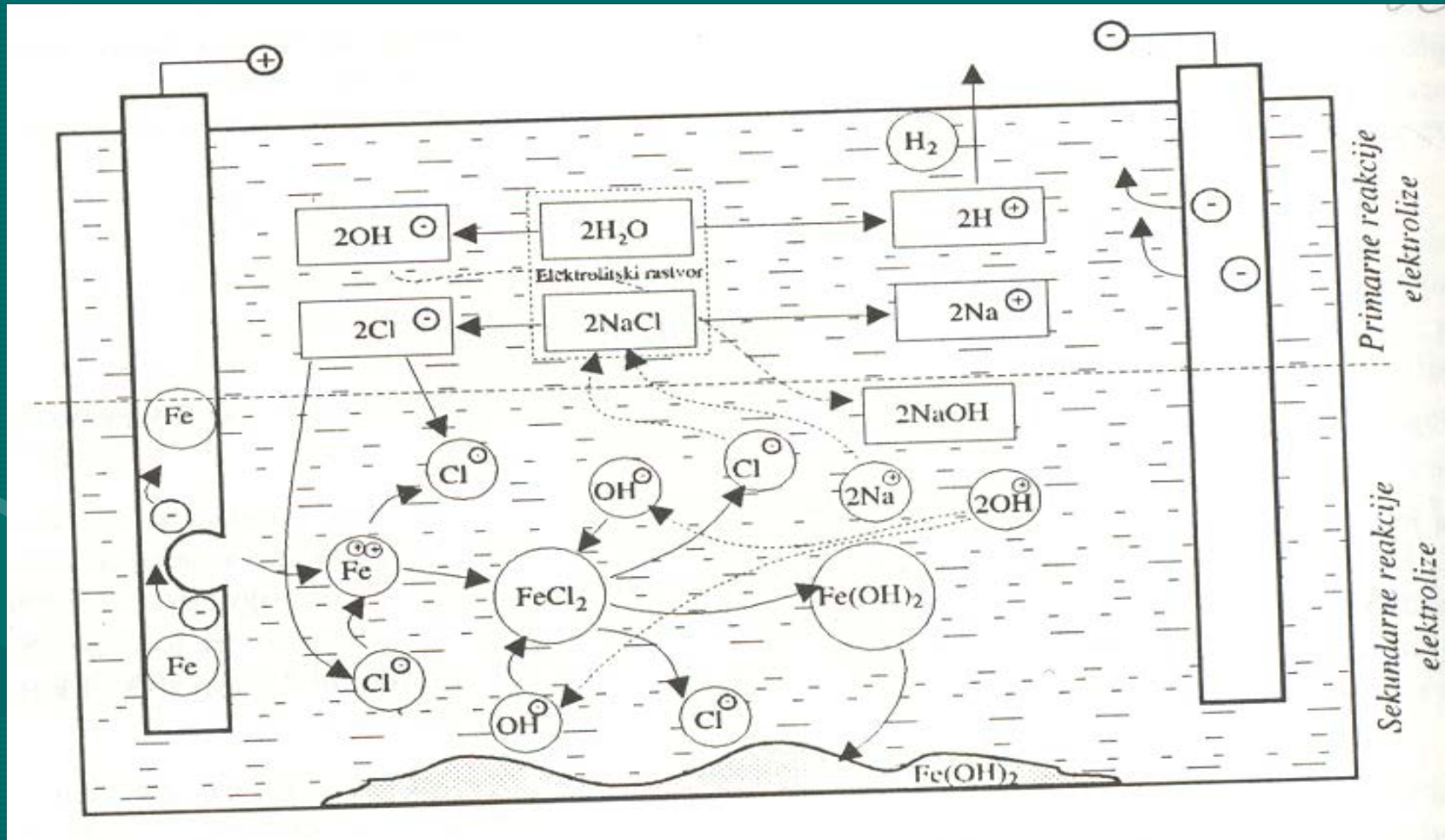
MEHANIZAM ODNOŠENJA MATERIJALA

Kod elektrohemijske obrade mehanizam odnošenja materijala je zasnovan na pojavi anodnog rastvaranja metala u anodnom elektrolitu. Na anodi se ostvaruje sjedinjavanje anjona iz rastvora sa jonima metala i njihova difuzija u rastvoru. Ako je elektrolit pravilno odabran, onda je jedinjenje anjona i jona metala dobro rastvorivo, čime se omogućuje njihovo razdvajanje u rastvoru uz istovremeno spajanje jona metala sa hidroksilnim jonima. Na taj način nastaje praktično nerastvorivo jedinjenje – metalni hidroksid ($M_n(OH)_n$), koje se u vidu taloga odstranjuje iz rastvora.

Anodno rastvaranje – izlučivanje metala može se opisati na primeru elektrolize rastvora natrijum hlorida (NaCl) u koji su uronjene elektrode od gvožđa. U vodenom rastvoru natrijum hlorida dolazi do elektrolitičke disocijacije, razlaganje neutralnih molekula na jone:



Uključivanje elektroda od gvožđa u kolo jednosmerne struje, uzrokuje električno polje između elektroda i usmereno kretanje jona prema elektrodama, i to: prema anodi – 2OH^- i 2Cl^- i prema katodi 2H^+ i 2Na^+ , što predstavlja primarnu reakciju elektrolize.



Slika: Anodno izdvajanje gvožđa u talog elektrolita u obliku Fe(OH)_2

Kada se joni na elektrodama naelektrišu, nastupa sekundarna hemijska reakcija elektrolize. Tada se prvo vrši izdvajanje gvožđa sa anode stvaranjem FeCl_2 a na katodi se stvara 2NaOH i izdvaja vodonik H_2 , nakon toga dolazi do stvaranja jedinjenja 2NaCl i praktično nerastvorljivog taloga u elektrolitu $\text{Fe}(\text{OH})_2$, po formuli:



Nastali talog $\text{Fe}(\text{OH})_2$ se odstranjuje cirkulacijom elektrolita.

PASIVIZACIJA ANODNE POVRŠINE

Proizvodnost procesa, odnosno brzina anodnog rastvaranja zavisi od količine elektriciteta koja prolazi između elektroda u jedinici vremena. Povećanjem samo gustine struje nije moguće ubrzati proces anodnog rastvaranja. Anodno rastvaranje praćeno je prisustvom specifične pojave – pasivizacija anodne površine koja se ispoljava u formiranju tankog anodnog sloja (filma). Ovaj sloj u zavisnosti od elektroda sadrži okside, hidrokside i nerastopive soli koji pri elektrolizi izoluju udubljena i hrapavosti na anodnoj površini obratka i usporavaju proces elektrolize, naroćito naglo kod obrada koje traju du'e. Suština formiranja anodnog sloja objašnjava se na sledeći naćin:

Ako brzina stvaranja anodnih produkata prevazilazi brzinu njihovog uklanjanja sa površine anode, to se blizu anode ili na njenoj površini talo'e slabo topiva jedinjenja koja sprećavaju uzajamno dejstvo elektroda sa elektrolitom. Intenzivnost obrazovanja pasivnog sloja na anodi zavisi od gustine struje i veća je pri većoj gustini struje, što mo'e dovesti i do prekida procesa elektrolize.

Kod postupka sa anodnim rastvaranjem skinuti sloj sa anode se po mogućnosti talo'i u elektrolitu. Pri tome se istovremeno vrši regeneracija kade bez difuzije i talo'jenje na katodi alatu. Ovu naslagu na katodi treba oćistiti ili promeniti polove na elektrodama (obratni proces).

BRZINA ODNOŠENJA MATERIJALA

Kod procesa dubljenja rastojanje između elektroda (zazor) je malo, pa se ravnomerni zazor (površine elektroda paralelne i jednake) u elektrolitu može predstaviti samo površinom A (mm^2) (radna površina alata), tada je otpor elektrolita

$$R = \frac{\delta}{\chi_{el} A}$$

gde je:

δ – zazor između elektroda,

A – radna površina,

χ_{el} – specifična provodljivost elektrolita.

ZAZOR IZMEĐU ELEKTRODA

Veličina zazora pri elektrohemijskoj obradi u protočnom elektrolitu pri uslovima paralelnosti i jednakosti anodne i katodne površine je:

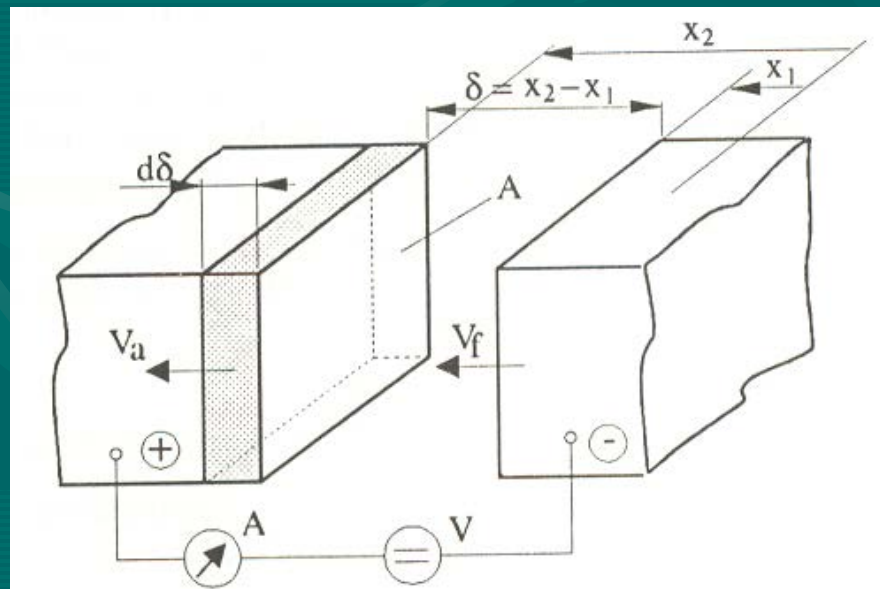
$$\delta = \frac{K_m (U - U_{pol}) \chi_{el}}{V_a}$$

Pri čemu je:

U_{pol} – polarizovani napon,

U – napon generatora.

Slika: Zazor između elektroda



Veličina zazora δ je neposredno zavisna od postavljenog napona generatora U , koji deluje u radnom zazoru, gustine struje i kao i od polarizujućeg napona U_{pol} .

Ako se veličina zazora meri u zavisnosti od napona koji je uspostavljen na elektrodama, pri konstantnim uslovima rada dobija se prava koja ne prolazi kroz koordinatni početak, već se e apscisu za iznos polarizacionog napona U_{pol} .

Do skidanja materijala doći će samo ako je napon između elektroda veći od polarizacionog napona U_{pol} . Za konstantno pomeranje mora biti i konstantna brzina skidanja (odnošenja). Ako je χ_{el} ili $(U-U_{pol})$ promenljivo, tada se menja i zazor δ .

TEMPERATURA ZAGREVANJA U ZAZORU

Pri razmatranju toplotnih procesa koji se dešavaju pri elektrohemijskoj obradi mora da se poje od definisanja toplotnih kriterijuma. Ti kriterijumi mora da zadovolje geometrijsku, hidrodinami~ku i termi~ku sli~nost modela. U procesu elektrohemijske obrade elektrolit se zagreva usled toplotnog efekta hemijske reakcije i usled mehani~kih uticaja. Ako se ne preduzimaju potrebne mere, zagrevanje mo`e da dostigne takav stepen, {to mo`e da izazove naru{avanje ili prekid procesa. Uticaj mehani~kih faktora na zagrevanje elektrolita mo`e biti slede}e:

- mehani~ko zagrevanje elektrolita prouzrokovano radom pumpe za elektrolit,
- mehani~ko zagrevanje elektrolita pri proticanju kroz zazor izme|u elektrode,
- pove}anje temperature elektrolita usled hemijske reakcije.

METODE OBRAD

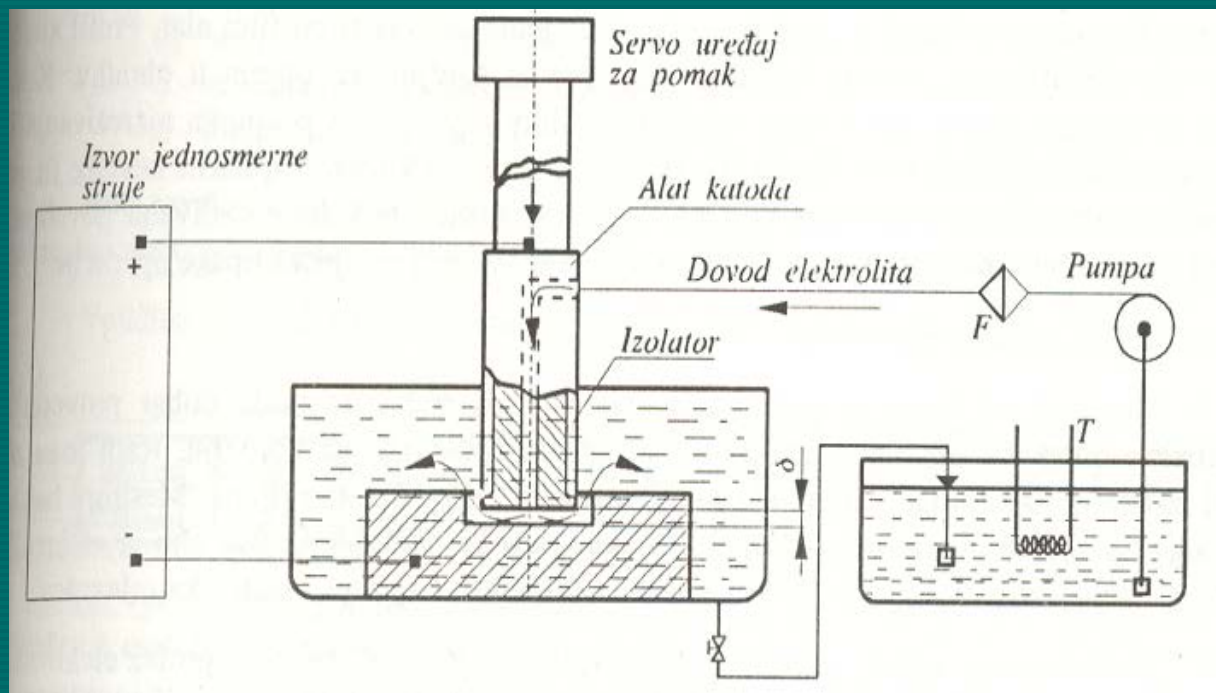
U zavisnosti od samog mehanizma odno{enja materijala i na~ina odvojenja iz zone obrade produkata reakcije, razlikuju se slede}e metode obrade:

- anodnohidrauli~na – elektrohemijsko hidrauli~na,
- anodnomehani~ka - elektrohemijsko mehani~ka,
- obrada u nepokretnom elektrolitu.

ANODNOHIDRAULI^NA OBRADA

Ova metoda je bazirana na anodnom rastvaranju povr{ine predmeta obrade pomo}u struje iz jednosmernog izvora koja ostvaruje elektri~no kolo preko proto~nog elektrolita pod pritiskom.

Katoda – alat i anoda – obradak, nalaze se potopljeni u elektolitu koji pod pritiskom dolazi u zazor, odakle otklanja pasiviziraju}i sloj i udaljuje produkte obrade sa povr{ine anode. Obe elektrode su priklju~ene na generator jednosmerne struje koji daje struju velike ja~ine a niskog napona.



Slika: Mašina za anodnohidrauličnu obradu

Jakina struje, naročito na početku obrade zavisi od zazora na pojedinim mestima katode i anode. Tako se postepeno oblikuje površina obratka formom alata i na njoj se dobija negativan odraz alata. Anodnohidraulična obrada se primenjuje za izradu delova složenog oblika, otvora, kanala i rebova, za profilno bušenje, kao i za izradu mikrootvora.

Prednosti anodnohidraulične obrade:

- obrada teško obradivih materijala, mehaničke osobine obratka ne utiču na brzinu rastvaranja,
- izrada komplikovanih geometrijskih oblika,
- ne postoji neposredan (mehanički) kontakt alata i predmeta obrade (moguće je obrada tankih – ne krutih delova),
- nema habanja alata ni zagrevanje obratka,
- bezuman rad i bezopasnost od napona,
- veća proizvodnost nego kod drugih obrada odnošenjem materijala.

Nedostatci anodnohidraulične obrade:

- korozija obratka usled prisustva vode u rastvoru,
- relativno niska tačnost obrade,
- poteškoće u otklanjanju taloga anodnog rastvaranja,
- teškoća upravljanja procesom pri obradi složenih formi i velike tačnosti,
- neophodnost obezbeđenja intenzivne cirkulacije elektrolita u procesu obrade.

ALATI ZA OBRADU

Alati za anodnohidrauli~nu obradu su oblika profila cevi, plo~e, kapilara kao mlaznica za mlaz elektrolita. Kod operacije dubljenja se koristi profilni alat. Profil alata odgovara negativnom odrazu budu}eg alata oblika {upljine ili otvora u obratku. Kod alata za otvore i urezivanje, koriste se alati u obliku cevi, a kod postupaka razrezivanja i bru{enja alati u obliku plo~a. Kod mikroobrade se kao alat koriste kapilarne cev~ice ili se diznom formira mlaz elektrolita, koji kao alat, ostvaruje oblik na obra|ivanu povr{inu.

MATERIJAL ALATA

Materijal od koga se prave elektrode – alati treba da bude dobar provodnik električne energije, toplote a takođe mora da bude postojan na koroziju. Zbog toga se alati izrađuju od mesinga, bakra, aluminijuma, nerđajućeg čelika i titana. Mesing i bakar su pogodni kod manje gustine struje. Alat od titana se najčešće koristi ako je elektrolit H_2SO_4 . Kod mlaza ovog elektrolita koriste se staklene kapilare i plastične mlaznice.

Na alatima od bakra i mesinga mlaznice moraju biti tako postavljene da omogućavaju kratak put elektrolita i da na svakom mestu površine koja se obrađuje osiguraju siguran protok. Alati sa centralnim otvorom za elektrolit, koriste se za izradu raznih cilindričnih otvora. Ove katode spolja imaju izolaciju koja sprečava nekontrolisano bočno skidanje metala, čime se postiže tačna obrada cilindričnog otvora. Kao izolacija koristi se stakril, epoksidna smola i drugi izolacioni materijali kao što su organsko staklo, ebonit i viniplast. Izolacioni materijal se nanosi mazanjem, uronjavanjem ili livenjem. Izolacioni materijal treba da zadovolji sledeće kriterijume:

- da bude postojan prema elektrolitima,
- da ima dovoljnu mehaničku čvrstoću,
- dobro vezivanje sa osnovnim materijalom alata,
- otpornost prema temperaturama do $100^{\circ}C$,
- lako nanošenje.

ELEKTROLITI ZA ELEKTROHEMIJSKU OBRADU

Rastvori materijala sa jonskom građom u vodi, nazivaju se elektroliti. Kao rastvor u vodi najčešće se koriste neorganske soli, kiseline i baze. Elektrolit ima višestruku ulogu u procesu elektrohemijske obrade i njegove glavne funkcije su:

- predstavlja sredinu u kojoj joni provode struju i u kojoj se odvijaju hemijski procesi,
- da sa materijalom predmeta obrade stvara dobro rastvoriva jedinjenja kako bi se omogućila obrada,
- prolazom pod pritiskom kroz međuelektrodni zazor, elektrolit obezbeđuje udaljavanje skintih čestica anodnog rastvaranja kao i stvorenih gasova i skida pasivizirani sloj,
- odvodi toplotu nastalu tokom obrade – hladi alat i obradak.

TEHNOLOŠKI PARAMETRI OBRADÉ

Osnovni tehnološki parametri anodnohidraulične obrade su:

1. Produktivnost obrade i kvalitet obrađene površine,
2. Tačnost obrade.

1. PROIZVODNOST OBRADJE

Pod proizvodnošću obrade podrazumeva se stvarno skinuta količina materijala sa obrađivane površine predmeta obrade (anode) u jedinici vremena. Količina materijala koja se skida u realnim uslovima uvek je manja nego što je teoretski definisana po prvom Faradejevom zakonu. Razlog tome je prisustvo različitih drugih procesa.

2. TA^NOST OBRADe

Pod pojmom ta~nost obrade podrazumeva se stepen poklapanja izra|enog dela sa zadatim vrednostima. Elektrohemijska obrada koja se karakteri{e ne tro{enjem alata i visokim kvalitetom obra|ene povr{ine, navodi na zaklju~ak da je ona idealna za zavr{ne operacije. Poznati na~ini elektrohemijske obrade ne obezbe|uju u potpunosti zahteve za ta~no{tu , a to do neke ograni~ava oblast njene primene. Uzroci gre{ke pri obradi mogu biti dvojaki:

- op{ti,
- posebni.

Op{ti uzroci su isti kao i za sve obradne metode:

- neta~na izrada ma{ine, instrumenata i ure|aja,
- nekrutost ma{ine, instrumenata i ure|aja,
- nekrutost sistema: ma{ina – alat – predmet obrade,
- temperatura deformacije delova,
- neta~nost pri~v{avanja alata, radnog dela i sl.

Posebni uzroci su oni koji zavise od samog procesa obrade:

- radni zazor,
- vrsta elektrolita,
- radni napon,
- gustina struje,
- brzina strujanja elektrolita,
- promena temperature,
- elektroprovodnost elektrolita i dr.

Greške pri elektrohemijskoj obradi uglavnom proističu iz nestabilnosti radnog alata. Na kolebanje zazora prvenstveno utiče promena uslova procesa od kojih su najvažniji: napon, elektroprovodljivost, stepen korisnog dejstva struje, napon na elektrodama, elektrohemijski ekvivalent materijala i dr.

KVALITET OBRAĐENE POVRŠINE

Kvalitet obrađene površine određuje se hrapavošću, kao i strukturno, fizičko – hemijskim promenama usled obrade. Na kvalitet obrađene površine utiču sledeći faktori:

- fizičko mehanička svojstva prvobitne površine predmeta obrade,
- sastav, svojstva i koncentracija elektrolita,
- brzina i temperatura elektrolita u zazoru,
- sastav i koncentracija produkata obrade,
- gustina struje,
- dodatak za obradu i dr.

Hrapavost nakon elektrohemijske obrade, karakteriše se ravnomernom raspodelom izbočina i mikroudubljenja u svim pravcima. Neravnine na površinama su sferičnog oblika, čime se smanjuje koncentracija napona (povećava se otpornost na habanje, vrstoća na zamor i sl.)

GLAVNO VREME OBRADÉ

Glavno ili mašinsko vreme obrade (t_g (min)) pri elektrohemijskoj obradi je:

$$t_g = \frac{L}{V_a}$$

Gde je:

L – dubina {upljine pri obradi u (mm)

V_a – brzina anodnog odno{enja materijala, tj. Brzina pomeranja alata (mm/min)

VRSTE POSTUPAKA I TIPSKE OPERACIJE ANODNOHIDRAULIČNE OBRADNE

Anodnohidraulična obrada se primenjuje u sledećim postupcima:

- elektrohemijsko dubljenje,
- elektrohemijsko profilisanje,
- profilno brušenje,
- urezivanje i razrezivanje,
- obrada rotacionih delova,
- elektrohemijska mikro-obrada,
- skidanje ljuspica,
- obaranje ivica,
- elektrohemijsko graviranje,
- elektrohemijsko poliranje,
- elektrohemijsko kalibrisanje složenih površina.

ANODNOMEHANI^KA OBRADA

Anodnomehani~ka obrada ili elektrohemijsko mehani~ka obrada, bazira se na istovremenom odno{enju materijala iz zone obrade anodnim rastvaranjem i mehani~kim skidanjem pomo}u abraziva. Abraziv u spojenom ili slobodnom stanju skida sa obra|ivane povr{ine obratka tanki pasiviziraju}i anodni sloj. Ukupni skinuti materijal udaljuje se izvan zone obrade tokom elektrolita.

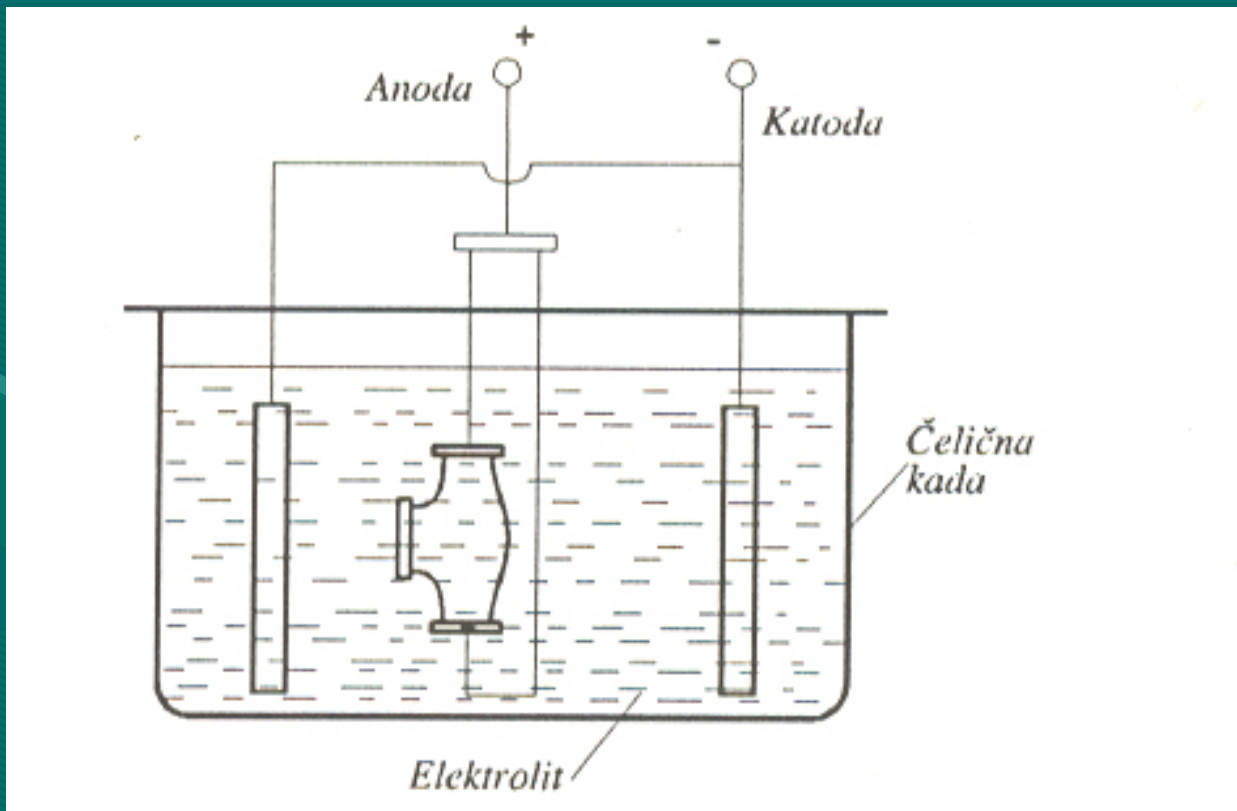
S obzirom na na~in mehani~kog skidanja pasivnog anodnog sloja i uslova u kojima se abraziv pri obradi nalazi, elektrohemijsko mehani~ka obrada mo`e da se izvodi putem slede}ih postupaka:

- pokretnim abrazivo nose}im alatom,
- abrazivo nose}im elektrolitom velike brzine,
- elektro neutralnim alatom.

Elektrohemijsko mehani~ka obrada se koristi za bu{enje, rezanje, gla~anje, poliranje kaljenog ~elika, tvrdih legura i sl. materijala, kao i za o{trenje alata za rezanje i sl.

OBRADA U NEPOKRETNOM ELEKTROLITU

Jedna od obrada ove metode je elektrolitsko poliranje. Ovaj proces je reverzija galvanizacije i vrši se anodnim izlučivanjem materijala sa nepokretnim katodama i elektrolitom.



Slika: Elektrolitsko poliranje

Katode mogu biti ravne ili oblikovane. Ravnomernost obrade se može postići laganim okretanjem anode (predmeta), ili pomeranjem elektrolita vazdušnom strujom. Da bi se dobila kvalitetna završna obrada, treba pažljivo izabrati elektrolit, gustinu struje i temperaturu procesa. Mehanizam procesa, zasniva se na formiranju tankog viskoznog sloja na površini obratka, tzv. anodnog sloja. Sloj pokriva površinu komada i prouzrokuje selektivno odnošenje sa isturenih tačaka površine. U konkavnim delovima površine (doline hrapavosti) sloj je deblji, sprečava prolaz struje i proces odnošenja materijala. Na konveksnim površinama, (bregovi hrapavosti) sloj je tanji, ostvaruje se prolaz struje, usled malog otpora tankog anodnog sloja i vrši odnošenje materijala sa anode. Tako se poliranjem dobija ravnomerna uglaženost površine.

PRIMENA ELEKTROHEMIJSKE OBRADJE

Elektrohemijska obrada kao visokoproizvodan i ekonomičan proces, široko se primenjuje u serijskoj proizvodnji. Primenjuje se ako je profil složen ili određena svojstva materijala otežavaju upotrebu konvencijalnih metoda obrade, odnosno čine je nemogućom. To je jedna od osnovnih metoda pri obradi delova od teškoobradivih metala i legura, provodnika struje.

Najširu primenu u proizvodnoj praksi našli su postupci elektrohemijskog dubljenja, profilisanja i mikroobrade u području anodnomehaničke obrade. Elektrohemijsko dubljenje, široko i ekonomično se koristi za izradu otvora i rupa različitog oblika kao i šupljina složenog oblika kod delova u mašinskoj industriji. Izrada otvora i rupa različitog oblika predstavlja oko 15% proizvodnje u području elektrohemijske obrade. Izrada spoljnih šupljina i različitih oblika elektrohemijskim dubljenjem predstavlja 15% - 17% proizvodnje. Mikro obrada se primenjuje u nizu industrijskih grana.

Kod primene elektrohemijske obrade u serijskoj proizvodnji, isključuje se upotreba skupog, visokokvalifikovanog ručnog rada i znatno se smanjuju troškovi izrade složenih oblika u odnosu na obradu rezanjem, što predstavlja važnu odliku ove obrade.