

(UFIPTE); Austrija, Italija i Jugoslavija (SUDEL); Danska, Finska, Norveška i Švedska (NORDEL). Maksimalno opterećenje mreže UCPTA u paralelnom radu iznosilo je 93 000 MW u prosincu 1968, a mreže SEV u isto doba 37 000 MW (treba napomenuti da samo elektrane zapadne Ukrajine rade paralelno s mrežama zemalja u istočnoj Evropi).

Izvoz i uvoz električne energije predstavlja tek mali dio od ukupne proizvodnje (tabl. 8), iako neke zemlje izvoze više od 20% ukupne proizvodnje (Austrija, Švicarska, Luksemburg), a neke zemlje uvoze količine električne energije koje predstavljaju više od 10% količine proizvedene u vlastitim elektranama (Danska, Mađarska, Luksemburg, Švicarska).

Grupa sistema UCPTA nema centralne dispečerske organizacije koja bi koordinirala eksploataciju nacionalnih sistema, već se koordinacija vrši među pojedinim susjednim zemljama; eksploataciju grupe sistema SEV, naprotiv, koordinira internacionalni dispečerski centar u Pragu. Iako je rad unutar grupa sistema paralelan, za sada je paralelan rad među tim dvjema grupama nemoguć zbog slabih međusobnih veza, koje ne bi mogle izdržati oscilacije opterećenja na spojnim vodovima (v. jedn. 19). Zbog toga se razmjena energije među zemljama obiju grupa sistema vrši u odvojenom pogonu (time što se dio mreže jednog sistema opskrbljuje iz drugog sistema, ili time što se elektrana jednog sistema priključi na drugi sistem).

Budući razvoj elektroenergetskih sistema, pogotovo s obzirom na izgradnju velikih elektrana lociranih na nalazištima ugljena (na površinskim kopovima niskokaloričnih vrsta ugljena) i izgradnju konvencionalnih i nuklearnih termoelektrana na morskoj obali (gdje su osigurane dovoljne količine vode za hlađenje kondenzatora), traži upotrebu sve viših napona za prijenos električne energije. Vjerojatno će se graditi i vodovi za prijenos električne energije izmjeničnom strujom i vodovi za prijenos energije istosmjernom strujom kako unutar energetskeg sistema tako i za povezivanje elektroenergetskih sistema. Tako je npr. u SSSR predviđeno stavljanje u pogon 1970 i 1971 više vodova napona 750 kV izmjenične struje, a u Francuskoj je izgrađen eksperimentalni vod napona 1000 kV. U USA već su započete studije za izgradnju mreže napona 1000 do 1500 kV jer se smatra da će za 10...15 godina takva mreža biti potrebna kako bi se mogli u sistem uključivati agregati snage od 4000 do 5000 MW. U Kanadi je 1968 bilo u pogonu 1000 km vodova napona 735 kV, a u narednim godinama predviđa se izgradnja više od 4000 km vodova istog i višeg napona, koji su potrebni za prijenos energije iz budućih vrlo udaljenih hidroelektrana do centara potrošnje i koji će omogućiti razmjenu električne energije sa USA. Prijenos snage od 1000 MW ekonomičniji je naponom 750 kV nego naponom 380 kV tek ako se radi o udaljenosti većoj od 1000 km, ali za prijenos snage od 2000 MW, napon od 750 kV već je ekonomičniji za udaljenost od 300 km. Pored izgradnje vodova izmjenične struje treba očekivati izgradnju prijenosnih vodova istosmjerne struje zbog prednosti u pogonu (nema utjecaja na povećanje struja kratkog spoja, nema poteškoća zbog regulacije frekvencije i oscilacija snaga u spojnem vodu, vodovi istosmjerne struje predstavljaju barijeru za prijenos utjecaja kvarova, nema poteškoća sa strujom nabijanja). Za prijenos snaga od 1000 MW (napon ± 300 kV) i 2000 MW (napon ± 600 kV) upotreba istosmjerne struje je ekonomičnija ako se radi o udaljenostima većim od 950 km za nadzemne vodove, a već od stotinjak kilometara za kabele. (V. Dalekovodi.)

Osim toga, u budućem razvoju elektroenergetskih sistema vjerojatno treba očekivati korištenje svojstva supravodljivosti (na temperaturi od 4 K) i vodljivosti na niskim temperaturama (20...77 K) pri izgradnji kabela za prijenos vrlo velikih snaga.

LIT.: M. J. Steinberg, T. H. Smith, Economy loading of power plants and electric systems, New York-London 1943. — B. B. Болотов, Теоретические основы выбора экономического режима сложной электроэнергетической системы, Москва-Ленинград 1947. — H. Požar, Ekonomična raspodjela opterećenja u elektroenergetskom sistemu, Zagreb 1953. — И. Маркович, Режимы энергетических систем, Москва 1957. — L. K. Kirchmayer, Economic operation of power systems, New York 1958. — L. K. Kirchmayer, Economic control of interconnected systems, New York 1959. — A. Глазунов, Электрические сети и системы, Москва 1960. — H. Požar, Leistung und Energie in Verbundsystemen, Wien 1963. — S. Despotović, Matematički modeli u analizi elektroenergetskih sistema, Beograd 1965. — Z. Jasicki i in., Praca układów elektroenergetycznych, Warszawa 1966. — B. Weedy, Electric power systems, New York 1967. — N. M. Ivošević, Elektroenergetika, Beograd 1970.

H. Požar

ELEKTROEROZIJSKA OBRADA, skup postupaka za obradu električki vodljivog materijala s pomoću termičkih i mehaničkih efekata koji prate električno izbijanje između dvije električki suprotno nabijene elektrode.

Pojavu lokalnog razaranja elektroda prilikom električnog izbijanja iskrom otkrio je 1766 Joseph Priestley i nazvao je elektroerozijskim efektom. Ozbiljnije se počela proučavati ta pojava tek tridesetih godina ovog stoljeća u vezi s trošenjem električnih kontakata vibracijskih i komutacijskih uređaja. Dok su vršili pokuse u nastojanju da nađu što otpornije materijale za kontakte vibratora, ruskim istraživačima bračnom paru B. R. i N. I. Lazarenko pala je na um misao da elektroerozijski efekt iskoriste kao osnovu novog postupka za obradu metala. Već 1943 objavili su i demonstrirali takav postupak. Nakon toga na razvijanju elektroerozijskih postupaka radeno je također u USA, Vel. Britaniji, Švicarskoj i drugim zemljama, te su po završetku drugog svjetskog rata bili položeni temelji nove elektrotehnoške metode za obradu metala, koja odonda nalazi sve širu primjenu.

Erozija metala električnim lukom opažena je već rano prilikom električnog lučnog zavarivanja. Postupak obrade metala nestacionarnim električnim lukom počeo se razvijati 1936, dakle prije elektroerozijskih postupaka u užem smislu riječi. U novije vrijeme razvili su se različiti kombinirani postupci koji se koriste istodobno dvjema načinima dovođenja električne energije do mjesta gdje se skida materijal s izratka (elektrokontaktni postupci) i/ili pored elektrotopline iskorištavaju za skidanje materijala također anodno otapanje (anodno-mehanički postupci).

Elektroerozija svrstava se među postupke obrade nemehaničkim skidanjem materijala s izratka, koji su se u novije vrijeme pridružili klasičnim postupcima obrade mehaničkim skidanjem materijala s izratka (obrade skidanjem strugotine) i mehaničke obrade bez skidanja strugotine (v. Alati, TE 1, str. 72).

Postupci obrade nemehaničkim skidanjem materijala mogu se podijeliti na kemijske postupke (nagrijanje, jetkanje), elektrokemijske postupke (eliziranje, v. Elektrokemijska obrada), termičke postupke (obrada plamenom i mlazom plazme, v. Plazma) i elektrotermičke postupke (elektroerozija i obrada fokusiranim mlazom elektrona velike energije).

Elektroerozija danas se u strojogradnji primjenjuje najviše za rješavanje zadataka koji se mehaničkom obradom mogu riješiti samo uz velik utrošak vremena i materijalnih sredstava ili se takvom obradom ne mogu riješiti nikako: za proizvodnju izradaka od vrlo tvrdog i žilavog metalnog materijala i izradaka sa šupljinama zamršena oblika, provrta i uvrta sa zavintuom osi i/ili vrlo malog promjera, uskih procjepa, i sl.

Opće osnove i podjela elektroerozijskih postupaka.

Pri svim elektroerozijskim postupcima izradak je spojen s izvorom električne energije kao jedna od elektroda, na koju se s alata, spojenog kao druga elektroda, prenosi električna energija na takav način da se ta energija direktno pretvara u toplinu koncentriranu u malom volumenu. Obradeni se materijal tom toplinom omekša i rastali, a dijelom i ispari, pa se onda mehaničkim i/ili elektrodinamičkim silama uklanja, ostavljajući u materijalu erozijski krater. Da bi se na taj način izradak obrađivao s malom tolerancijom dimenzija (*dimenzijska obrada*) područje erozije mora ostati ograničeno na malu površinu; radi toga u svim elektroerozijskim postupcima djelovanje je električne energije vremenski ograničeno, tj. električna energija djeluje kratkotrajnim impulsima. Da bi proizvodnost procesa zadovoljavala, tj. da bi se u jedinici vremena s izratka skinula dovoljna količina materijala, električni impulsi treba da slijede jedan iza drugog dovoljno velikom frekvencijom.

Prema tome na koji se način električna energija dovodi s elektrode-alata na elektrodu-izradak, elektroerozijski se postupci dijele na *kontaktne*, pri kojima se električna energija prenosi s jedne na drugu elektrodu njihovim diodom i pretvara uglavnom u Jouleovu toplinu; *izbojne*, pri kojima se električna energija prenosi s jedne elektrode na drugu električnim izbijanjem kroz dielektrik među njima, a toplina se prenosi na izradak uglavnom isijavanjem sa usijane plazme u kanalu izbijanja, i *kombinirane*, u kojima se električna energija dovodi s jedne elektrode drugoj na više načina i/ili je skidanje materijala elektroerozijom kombinirano s kojim drugim načinom skidanja materijala. Slijed impulsa struje velike jakosti dobiva se u elektroerozijskim postupcima bilo čisto električnim načinom, bilo čisto mehaničkim načinom, bilo kombiniranim elektro-mehaničkim načinom.

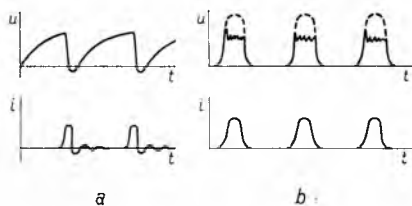
Čisto kontaktni postupak (s mehaničkim stvaranjem impulsa) nije se uveo u praksu. Izbojni se postupci mogu dalje dijeliti u postupke u kojima se elektricitet prenosi lukom i postupke u kojima se prenosi iskrom. Elektroerozijski postupak s prenosom elektriciteta lukom i stvaranjem impulsa mehaničkim načinom naziva se *elektrolučnim postupkom*; postupak s prenosom elektriciteta električnom iskrom uz čisto električno stvaranje impulsa naziva se *elektroerozija iskrom* (u užem smislu riječi), postupak uz

prenos energije električnim izbojem (iskrom ili lukom) i stvaranje impulsa elektro-mehaničkim načinom naziva se (*elektro-*) *impulsnim postupkom*. Naziv *anodno-mehanički postupak*, kad se odnosi na kombinirani postupak fine obrade, daje se ponekad elektro-kemijsko-mehaničkom brušenju (brušenju eliziranjem, v. članak *Elektrokemijska obrada*); elektroerozijski postupak tog imena kombinirani je postupak u kojem se toplinsko djelovanje na izradak postiže lučnim izbijanjem među elektrodama, a mehaničko skidanje materijala i stvaranje impulsa postiže se upotrebom pogodnog elektrolita među elektrodama. *Elektrokontaktnim postupkom* naziva se kombinirani postupak elektroerozije u kojemu se električna energija prenosi najprije lokalnim kontaktom elektrode-alata s neravnostima površine elektrode-izratka, a po prekidu tog kontakta uslijed taljenja neravnosti, električnim lukom; impulsi se postižu mehanički, gibanjem alata u odnosu prema izratku.

Od navedenih elektroerozijskih postupaka u širem smislu riječi zasad se u znatnijoj mjeri u praksi strojogradnje upotrebljavaju samo izbojni postupci. Samo ti postupci bit će u nastavku ovog članka podrobnije obrađeni.

Izbojni postupci elektroerozijske obrade. Od tih postupaka u tehničkoj praksi prvenstveno se upotrebljavaju elektroerozijski postupci u užem smislu, tj. elektroerozija iskrom i elektroimpulsni postupak, a u manjoj mjeri elektrolučni postupak obrade. Svim je izbojnim postupcima elektroerozije zajedničko da se između dvije elektrode (elektrode-izratka i elektrode-alata) koje su smještene na maloj udaljenosti jedna od druge i potopljene su u tekućini (redovno tekućini velike dielektričnosti, dielektriku) impulsi struje manje ili više visokog napona izaziva slijed električnih izboja. Svaki pojedini izboj odnosi sa površine izratka (a načelno i s površine alata) stanovitu količinu materijala; uslijed toga elektroda-alat sve dublje prodire u izradak i u njemu ostavlja otisak svog oblika. Elektrode su s izvorom struje spojene tako da je izradak ona elektroda koja se više erodira. Ako je to anoda (pozitivna elektroda), polaritet elektrodâ naziva se *normalnim* (jer je to bio polaritet prvih elektroerozijskih strojeva, koji su se kroz dugo vrijeme isključivo ili pretežno upotrebljavali); kad je alat katoda, polaritet se naziva *obrnutim*. Udaljenost među elektrodama, *meduelektrodni (radni) razmak*, pri elektroeroziji iskrom i elektroimpulsnom postupku održava se konstantnim s pomoću ugrađenog regulacijskog sistema; u elektrolučnom postupku meduelektrodni razmak može biti promjenljiv i mijenjanjem meduelektrodnog razmaka se ponekad postiže periodno paljenje i gašenje luka, tj. stvaranje impulsa struje. Pri elektroeroziji iskrom i elektroimpulsnom postupku impulsi se stvaraju posebnim električnim ili električno-mehaničkim sklopovima koji se zovu *generatorima impulsa* (impulsnim generatorima).

Elektroerozija iskrom. Pri tom postupku upotrebljavaju se viši naponi i, redovno, normalni polaritet. Impulsi se napona u meduelektrodnom razmaku stvaraju u zavisnosti od proboja iskrom među elektrodama, stoga su oni kratkotrajni (ispod 10^{-4} s) a razmak vremena među njima je razmjerno velik. Impuls je nesimetrična oblika i bipolarni, tj. polaritet se elektroda u toku izboja jedanput ili više puta mijenja, struja prigušeno titra oko nulte vrijednosti (sl. 1 a). Posljedica je navedenih karakteristika

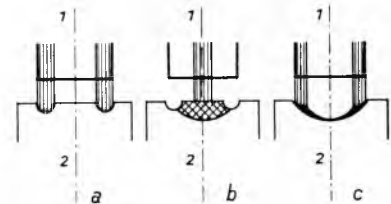


Sl. 1. Naponski i strujni impulsi, a Impuls pri elektroeroziji iskrom, b impuls pri impulsnom postupku (slike nisu u istom mjerilu)

izboja da je tačnost obrade s pomoću elektroerozije iskrom razmjerno velika, brzina skidanja materijala s izratka (produktivnost) razmjerno mala (npr. za izradak od čelika i alat od mjedi do 600 mm^3/min), a trošenje alata veliko (za alat od mjedi i izradak od čelika do 80%, za alat od mjedi i izradak od tvrde legure i do

180%). Uslijed toga se elektroerozija iskrom primjenjuje prvenstveno za načine obrade koji dopuštaju kontinuirano mijenjanje elektrode-alata (npr. upotrebu elektrode u obliku žice koja se odmotava) i za preciznu obradu malih elemenata npr. elektroničkih aparata.

Elektroimpulsni postupak radi s nižim naponima, obrnutim polaritetom i razmjerno dugim (iznad 10^{-4} s) unipolarnim impulsima (bez titranja oko nule) velike frekvencije i dugog trajanja (sl. 1 b). U pogledu prirode izboja jedni autori smatraju da je i u ovom postupku uvijek posrijedi električna iskra, a drugi autori misle da zbog duljeg trajanja impulsa iskra ponekad prelazi u kratkotrajni električni luk. U erozijskom djelovanju izboja mogu se razlikovati tri faze u toku svakog impulsa: u periodama naglog porasta i opadanja struje nastupa tzv. skin-efekt, nosioci elektriciteta potiskuju se prema rubu izbojnog kanala, što ima za posljedicu jaču eroziju po rubu erozijskog kratera;



Sl. 2. Nastajanje erozijskog kratera kombiniranim djelovanjem skin-efekta i pinch-efekta. a i c Skin-efekt, b pinch-efekt, 1 elektroda-alat, 2 izradak

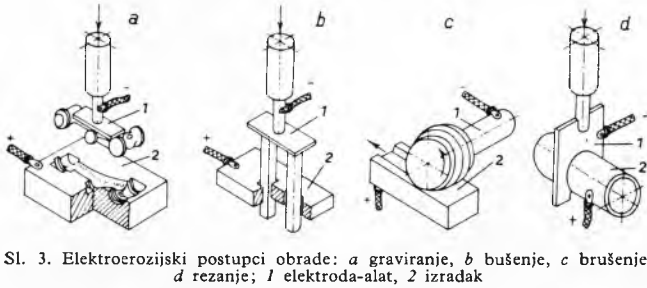
u periodi konstantne struje nastaje tzv. pinch-efekt, struja se koncentriira oko osi izboja, te je erozija najveća u središtu kratera (sl. 2). Pogodnim podešavanjem oblika i trajanja impulsa, koje je moguće uslijed toga što se impuls stvara nezavisno od zbivanja u meduelektrodnom razmaku, mogu se postići ili duboki i prostorno ograničeni krateri korisni npr. pri dimenzijskom bušenju i rezanju, ili plitki krateri veće širine, koji daju manje hrapavu površinu izratka. Iz navedenih karakteristika impulsa i izboja slijedi da je proizvodnost elektroimpulsnog postupka velika (pri obradi čelika do 15 000 mm^3/min), koeficijent iskorištenja energije visok, trošenje elektrode-alata vrlo malo (može pasti i na 0,05%). Glavno je područje primjene elektroimpulsnog postupka izrada fasonskih šupljina, bušenje rupa, režaka i kanala, itd.

Elektrolučni postupak obrade. U tom postupku za stvaranje slijeda kratkotrajnih proboja u obliku električnog luka nisu potrebni generatori impulsa. Impulsi stvaraju se, npr., time što alat oscilira u vertikalnom pravcu gore-dolje tako da na kraju pokreta dolje dodiruje izradak te u početku pokreta gore zapali električni luk, koji se ugasi kad u nastavku kretanja alata na više razmak između elektroda pređe određenu granicu; ili time što se upotrebljava izmjenična struja i alat koji se brzo okreće: u svakoj periodi izmjenične struje upale se i ugase dva lučna izboja sa suprotnim polaritetom; u poluperiodi kad je polaritet obrnut, katodna je mrlja (usijaneta) na izratku i vrši eroziju, u poluperiodu normalnog polariteta katodna je mrlja na alatu, ali se uslijed brzog okretanja alata ohladi prije nego uspije alat znatnije oštetiti. Ima i postupaka pri kojima se luk između mirujućih elektroda periodno prekida intenzivnim mlazom tekućine. Zbog razmjerno dugog trajanja izboja ($10^{-4} \dots 10^{-2}$ s) i razmjerno velike površine katodne mrlje, elektrolučnim postupkom po pravilu je teško postići dimenzijsku obradu. Osim toga, pri tom postupku nastaju velika termička naprezanja na katodi i uslijed toga promjena strukture obrađene površine u dubinu ponekad do 10 i više milimetara. Stoga je primjena elektrolučnog postupka ograničena na područja gdje se ne zahtijeva velika tačnost obrade i nepromijenjena struktura, npr. za grubo bušenje, uklanjanje slomljenih svrdala, zatika i sl. iz uvrta i provrta.

Konstrukcija elektroerozijskih strojeva. U osnovi razlikuju se četiri vrste obrade elektroerozijskim postupcima: graviranje, bušenje, brušenje i rezanje (sl. 3). Erozijskim graviranjem izrađuju se razni ukovnji, kalupi za prešanje i injekcijsko ili tlačno lijevanje i žigovi ili matrice za otiskivanje, hladnu obradu i sinte-rovanje. Bušenjem elektroerozijom izrađuju se istovremeno provrti

jednakog ili različitog oblika presjeka kakvi su potrebni za rezni alat i štance. Zbog sličnosti geometrije kretanja alata pri mehaničkom brušenju i pri elektroerozijskim operacijama s alatom ili izratkom koji rotira, takve se operacije nazivaju elektroerozijskim brušenjem; primjenjuju se u izradi reznih alata, žigova, rotativnih alata, itd. Elektroerozijsko rezanje s pomoću elektroda oblika ploče, trake ili žice primjenjuje se za izradu svih vrsti profila.

Konstrukcija stroja za elektroeroziju ovisi u pojedinostima, dakako, o tome koja se od upravo navedenih operacija na njemu izvodi i koji se od elektroerozijskih postupaka za to upotrebljava.



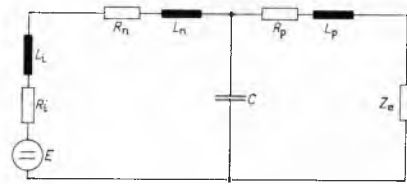
Sl. 3. Elektroerozijski postupci obrade: a graviranje, b bušenje, c brušenje, d rezanje; 1 elektroda-alat, 2 izradak

Međutim, pored velikih razlika u konstrukcijskim rješenjima, svim su elektroerozijskim strojevima zajednička tri glavna funkcijska sistema: električni, mehanički i dielektrični, i jedan pomoćni sistem, regulacijski.

Električni sistem elektroerozijskog stroja. Najvažniji je dio električnog sistema svakog stroja za elektroerozijsku obradu (u najužem smislu riječi) generator impulsa. Električni sklop gotovo svih generatora impulsa strojeva za elektroeroziju iskrom i elektroimpulsnim postupak (izuzeti su strojni i ventilni generatori impulsa o kojima će kasnije biti još govora) može se u najopćenitijem obliku prikazati blok-shemom na sl. 4. Iz izvora istosmjernog napona 1 nabija se kroz sklop za ograničavanje struje 2 sklop za prikupljanje električne energije 3. Kad se u ovom nakupi dovoljna električna energija, on se izbija s pomoću sklopne naprave 4 kao impuls električne struje kroz dielektrik među elektrodama 5 elektroerozijskog stroja. Sklopna naprava sprečava prelaz energije u međuelektrodni prostor za vrijeme skupljanja električne energije a propušta struju za vrijeme izbijanja; sklop za ograničavanje struje osigurava prolaz za vrijeme skupljanja električnosti, a treba da šta više ograniči direktan prelaz energije iz izvora u međuelektrodni prostor za vrijeme izbijanja. U generatoru impulsa za postupak elektroerozije iskrom nema posebne sklopne naprave, nego njezinu ulogu preuzima međuelektrodni razmak 5, kako je to malo dalje prikazano. Frekvencija i energija impulsa zavise uslijed toga od razmaka među elektrodama; generatori impulsa za elektroeroziju iskrom nazivaju se stoga i *zavisnima*. U generatorima za impulsni postupak, frekvencija i energija impulsa zavise od rada sklopne naprave, koja može biti mehanička ili elektronička, a ne zavisi neposredno od međuelektrodnog razmaka; ti se generatori stoga nazivaju *nezavisnima*. Posebna grupa nezavisnih generatora impulsa nije prikazana shemom na sl. 4, nego za stvaranje impulsa pogodne frekvencije i trajanja služe specijalni električni strojevi (strojni generatori impulsa) ili elektronski oscilatori (ventilni generatori impulsa).

Zavisni generatori impulsa. Slika 5 prikazuje nadomjesnu shemu zavisnog generatora impulsa (upor. sa sl. 4). E je elektromotorna sila istosmjernog izvora za napajanje, R_1 i L_1 njegov unutarnji otpor i induktivitet, R_n i L_n omski otpor i induktivitet u strujnom krugu za nabijanje, C kapacitet kondenzatora koji je ovdje sklop za skupljanje električnosti, R_p i L_p omski otpor i induktivitet vodova između kondenzatora i elektroda, Z_e prividni otpor između elektroda. Kondenzator se nabija kroz sklop za ograničavanje struje u sklopu na nabijanje, a izbija se impulsno

u obliku iskre kad napon između ploča kondenzatora, odn. između elektroda, dosegne vrijednost probojnog napona U_p dielektrika u međuelektrodnom prostoru. Rad takvog generatora



Sl. 5. Nadomjesna shema zavisnog generatora impulsa

zavisi od prisutnosti i međusobnom odnosu otpora R , induktiviteta L i kapaciteta C u krugovima nabijanja i izbijanja. Prema njihovom sklopu načelno se razlikuju *relaksacijski zavisni generatori impulsa* s relaksacijskim strujnim krugom izbijanja i *vibracijski zavisni generatori impulsa* s titrajnim strujnim krugom izbijanja. Relaksacijski generatori impulsa mogu biti na osnovi RC ili na osnovi CC , vibracijski su generatori impulsa na osnovi LC . Na osnovi RC su relaksacijski generatori impulsa RC , RCR , RCL i RLC , na osnovi CC su generatori impulsa CC dvopoluperiodni i jednopoluperiodni. Od tih generatora impulsa u praksi su primjenu našli naročito generatori impulsa RC , RCL , RLC , LC i dvopoluperiodni CC .

Oznake RC , CC , LC , RCR , RCL znače da se u sklopu dotičnog generatora nalazi kombinacija otpora i kapaciteta, dva kapaciteta, induktivitet i kapacitet itd., kako će se malo dalje vidjeti.

Zavisni relaksacijski generator impulsa tipa RC ima kao sklop za ograničavanje struje u krugu nabijanja samo otpornik omskog otpora R_n , a u krugu izbijanja nema ni otpora ni induktiviteta u obliku posebnog sklopa, nego su R_p i L_p samo omski i induktivni otpor spojnih vodova između kondenzatora i elektroda. Primjenu tog generatora za elektroerozijsku obradu predložio je i demonstrirao Lazarenko 1943; on se zadržao danas u mnogim elektroerozijskim strojevima zahvaljujući svojoj jednostavnosti. Ciklus sastavljen od nabijanja kondenzatora i izbijanja iskrom kad napon između elektroda naraste do vrijednosti probojnog napona U_p ponavlja se frekvencijom koja zavisi od vremenske konstante RC , od napona izvora E i probojnog napona U_p . Ta se zavisnost može s dovoljnom tačnošću prikazati formulom

$$f = \frac{1}{2,3 RC \log \frac{E}{E - U_p}}$$

Probojni napon U_p zavisi od veličine radnog razmaka, a mora biti veći od napona gorenja električnog luka i manji od EMS izvora E (E se kreće u granicama od 100 do 300 V). Što je probojni napon U_p veći to je veća energija nabijenog kondenzatora i veći erozijski učinak, ali je frekvencija impulsa manja i obrnuto. To ujedno znači da je spomenuta zavisnost frekvencije ovih generatora od radnog razmaka posljedica njene zavisnosti od probojnog napona.

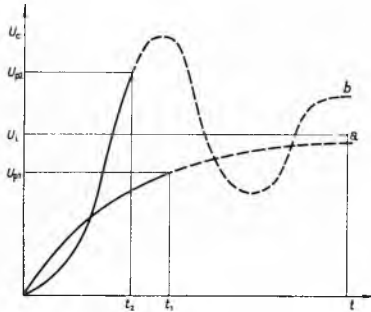
Vrijeme izbijanja je ~ 100 i više puta manje od vremena nabijanja, pa se kod proračuna frekvencije može zanemariti.

Jedna od glavnih mana generatora tipa RC jest vrlo mala korisnost η (zbog prisutnosti omskog otpora), koja je u najpovoljnijem režimu rada ispod 50%. Zbog vrlo lošeg η generatori impulsa tipa RC nisu pogodni za velike snage, jer tada zbog velikih gubitaka nastupa problem odvođenja topline. Granica do koje se još upotrebljavaju ovi generatori jest 7 kW.

Zavisni generator impulsa tipa RCL varijanta je generatora RC koja nastaje uključivanjem induktiviteta L_p u strujni krug izbijanja. Time se postiže znatno smanjenje trošenja elektrode-alata (pri obradi čelika, ali ne i pri obradi tvrdih legura) uz neznatno smanjenje produktivnosti. Pri radu s ovim generatorima upotrebljava se obično obrnuto polaritet napona, tj. elektroda-alat spaja se na plus-pol kao anoda.

Zavisni generator impulsa tipa RLC relaksacijski je generator impulsa koji u strujnom krugu nabijanja ima i induktivitet i (mali) omski otpor. Time nabijanje postaje oscilatorno, prema krivulji

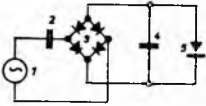
b u sl. 6. Iz te se slike vidi da je u odnosu prema generatoru RC (krivulja a) skraćeno vrijeme nabijanja, što povećava produktivnost jer omogućava veću frekvenciju; napon između ploča kondenzatora raste i preko vrijednosti napona izvora energije, pa ovaj može biti niži nego u generatoru RC ; zbog redovito vrlo malog omskog otpora, mali su i gubici, pa je koeficijent η ovakvog generatora znatno veći od koeficijenta η generatora RC . Mali omski



Sl. 6. Krivulje nabijanja generatora RC (a) i RLC (b)

otpor, međutim, vrlo je nepovoljan za ograničenje struje kratkog spoja, koja može uništiti ispravljač, a pri razdvajanju elektroda može nastati električni luk koji može uništiti elektrode. Sve to postavlja posebne zahtjeve u pogledu automatske regulacije posmaka elektrode-alata i eventualno dodatnih sklopova za sprečavanje pojave električnog luka.

Zavisni relaksacijski generator impulsa tipa CC u novije je vrijeme našao znatnu primjenu za elektroerozijske strojeve srednje i velike snage. Prema shemi na sl. 7, taj generator ima kao element za ograničavanje struje još jedan kondenzator 2 (kapaciteta nekoliko puta većeg od kapaciteta kondenzatora 4) u sklopu za proizvodnju istosmjernog napona, između izvora izmjeničnog napona 1 i ispravljača 3. Zbog toga se u toku jedne periode (dviju poluperioda) izmjeničnog napona izvora mije-

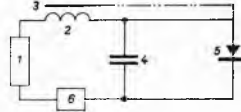


Sl. 7. Zavisni relaksacijski generator impulsa CC

njavu naponi na oba kondenzatora kako to prikazuje sl. 8, na kojoj su prikazani i impulsi struje kroz međuelektrodni razmak. Kondenzator 2, regulirajući brzinu nabijanja, nagomilava energiju u trenucima kad je momentalna vrijednost napona velika i predaje ju kad je ta vrijednost mala, pa su stoga frekvencija i trajanje impulsa veliki. Zbog toga što nema gubitaka energije u sklopu za ograničavanje struje, koeficijent iskorištenja energije je velik, te se s pomoću tog generatora impulsa mogu konstruirati elektroerozijski strojevi velike snage, kojima se s izratka od tvrde legure može skinuti i do 1 g/min.

Osim takvih generatora impulsa tipa CC u kojima se iskorištavaju obje poluperiode izmjeničnog napona izvora (dvpoluperiodnih), predloženi su i generatori tipa CC u kojima se iskorištava samo jedna poluperioda izmjeničnog napona (jednopoluperiodni), ali zbog manje proizvodnosti takvih generatora, oni su se manje uveli.

Zavisni vibracijski generator impulsa tipa LC u sklopu za ograničavanje struje nema otpornika, a proces nabijanja-izbijanja stabilizira se s pomoću elektromagnetskog vibratora, čiji se namot 2 (sl. 9) iskorištava kao induktivitet u krugu nabijanja. S pomoću takvog sklopa elektroda se automatski periodno diže i spušta



Sl. 9. Zavisni vibracijski generator impulsa LC . 1 Izvor istosmjernog napona, 2 namot elektromagnetskog vibratora, 3 kotva elektromagnetskog vibratora, 4 kondenzator, 5 elektroda-alat i izradak, 6 zaštitni prekidač

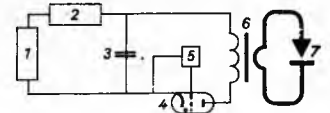
i tako upravlja izbojima. Nakon uključivanja sklopa, struja kojom se nabija kondenzator postepeno raste te privuče kotvu 3 elektromagnetskog vibratora i time malo podigne elektrodu, tj. poveća međuelektrodni razmak. Nakon nekog vremena struja koja nabija kondenzator, a prema tome i struja kroz namot vibratora, postaje manja; time se smanjuje i sila koja privlači kotvu, međuelektrodni razmak se smanjuje. Uslijed ener-

gije nagomilane u magnetskom polju namota 2 struja teče dalje i puni kondenzator te podiže njegov napon na vrijednost dvostruko veću od vrijednosti napona izvora; čim se elektrode jedna drugoj dovoljno približe, nastaje izboj. Onda se radni ciklus ponavlja frekvencijom koja je uglavnom određena veličinama L i C . Takvi generatori LC imaju visoku korisnost η (90...95%) i veliku proizvodnost. Upotrebljavaju se za grubo bušenje velikih otvora u čeliku i za uklanjanje slomljenih alata, zatika itd. iz uvrta i provrta. Ako pri takvim poslovima nastane slučajno kratki spoj, nastao bi električni luk koji bi automatska regulacija prekinula tek pošto je alat izvučen iz uvrta, a dotle luk može pokvariti izradak. Zato se obično u sklop umeće brzodjelujući zaštitni prekidač koji, kad nastane kratki spoj, na kratko vrijeme isključuje napajanje impulsnog generatora strujom.

Nezavisni generatori impulsa mogu se podijeliti u one koji rade s visokim naponom i impulsnim transformatorom i one koji rade s niskim naponom i direktnom vezom s radnim međuelektrodnim razmakom.

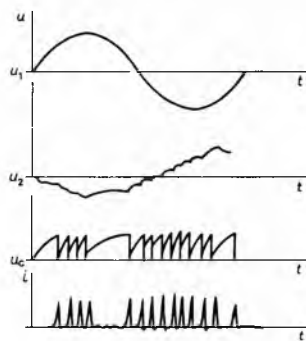
Nezavisni generatori impulsa s visokim naponom. U ovim generatorima frekvencija i trajanje impulsa reguliraju se posebnim elektronskim i/ili elektronsko-ionskim sklopovima. Da bi se dobila potrebna snaga, ti sklopovi moraju raditi s visokim anodnim naponima, a da bi se dobio potrebni niski napon na elektrodam, mora se upotrijebiti tzv. impulsni transformator. Na principu elektronskih sklopki rade tiratronske generatori impulsa, koji se od generatora te grupe najviše upotrebljavaju. Sl. 10 pokazuje

Sl. 10. Tiratronske generator impulsa RC . 1 Izvor istosmjernog napona, 2 otpornik, 3 visokonaponski kondenzator, 4 tiratron, 5 sklop za paljenje tiratrona, 6 impulsni transformator, 7 elektroda-alat i izradak



shemu tiratronske generatora impulsa tipa RC . Visokonaponski kondenzator 3 puni se iz izvora 1 kroz otpor 2 do određenog napona, obično 12...18 kV. Kad napon na kondenzatoru postigne određenu vrijednost, stupa u djelovanje sklop 5 koji izaziva paljenje tiratrona 4 i izbijanje kondenzatora kroz primarnu stranu impulsnog transformatora 6. Na sekundaru impulsnog transformatora inducira se za vrijeme izbijanja napon od 150...200 V, koji je dovoljan da između elektroda 7 dođe do električnog proboja. I od ovog tipa generatora postoje, osim varijante RC , također varijante RLC i LC , tj. u krugu nabijanja može uz (mali) omski otpor biti spojen induktivitet, ili sam induktivitet bez omskog otpora. Prednosti su tih varijanata u odnosu prema varijanti RC — iz razloga navedenih kod relaksacijskih generatora impulsa — da imaju viši koeficijent iskorištenja i da mogu raditi s manjim istosmjernim naponom ispravljača. Budući da je stabilnost rada tiratrona kao komutatora kudikamo veća od stabilnosti međuelektrodnog razmaka, a vjerojatnost da se tiratron neće ugasi poslije slučajnog kratkog spoja vrlo je mala, tiratronske generatori impulsa predstavljaju, u stvari, dalje poboljšanje istoimenih zavisnih generatora i mogu se upotrebljavati za iste svrhe, ukoliko njihova relativna složenost i skupoća to ne sprečavaju.

Dalje varijante tiratronske generatora impulsa imaju i u krugu nabijanja uz induktivitet elektronsku cijev (ventil) kao sklop za ograničavanje struje ili još jedan tiratron sa sklopom za paljenje (cijevno-tiratronske generatori impulsa), ili su napajani visokofrek-



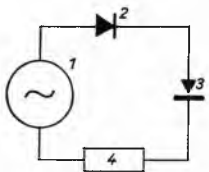
Sl. 8. Struja i naponi na kondenzatorima generatora impulsa CC . u_1 Napon mreže, u_2 pad napona na kondenzatoru koji ograničava struju, u_c napon na radnom kondenzatoru, i strujni impulsi koji teku među elektrodama

ventnim strojnim pretvaračem i imaju visokonaponski kenotron u krugu nabijanja (*strojno-tiratronski generatori impulsa*). Ti generatori impulsa imaju veliku proizvodnost pri obradi tvrdih legura.

Nezavisni generatori impulsa niskog napona daju (po pravilu unipolarne) impulse duljeg trajanja. Generatori takvih impulsa imaju vrlo veliku proizvodnost (po jedinici snage) i mogu svesti na neznatnu mjeru trošenje alata; mogu se primijeniti za grubu obradu materijala (npr. alatnog čelika) kojemu se struktura ne mijenja termičkim djelovanjem produženog izboja. Impulsi produženog trajanja mogu se dobiti bilo s pomoću posebnih električnih strojeva (strojni ili rotacijski nezavisni impulsi generatori) bilo neposredno iz mrežne struje obične frekvencije ili struje iz generatora povišene frekvencije (kao što su generatori za električno zavarivanje) s pomoću različitih ventila (ventilski ili statički nezavisni impulsi generatori).

Rotacijski (strojni) nezavisni impulsi generatori rade sa stalnom impulsnom frekvencijom u području 400...2000 impulsa na sekundu i sa stalnim trajanjem impulsa od 0,1 do 2 ms. Mogu biti komutacijski i indukcijski. *Komutacijski strojni nezavisni generator impulsa* predstavlja istosmjerni električni generator s velikim brojem polova i kolektorom sa dva sistema lamela kojima je broj jednak broju polova. Na svaki sistem lamela položene su četkice jednog od polariteta te s njih izlaze unipolarni približno pravokutni impulsi napona. Oblik impulsa određen je oblikom polnih nastavaka, a njihova frekvencija zavisi od broja polova; amplituda impulsa može se mijenjati promjenom uzbuđe. Od struje kratkog spoja zaštićuju se ti generatori automatskim prekidanjem uzbuđe ili otporom u strujnom krugu. *Indukcijski strojni nezavisni generator impulsa* beskollektorski je električni stroj koji proizvodi izmjenični napon. Elektromagnetski sistem mu je takav da je oblik krivulje napona nesimetričan, tj. amplituda struje jednog polariteta znatno je veća od amplitude struje drugog polariteta, tako da samo pri jednom polaritetu nastaju periodni proboji na elektrodama elektroerozijskog stroja.

Statički (ventilski) nezavisni impulsi generatori napajaju se iz mreže, uz upotrebu transformatora za sniženje napona, ili

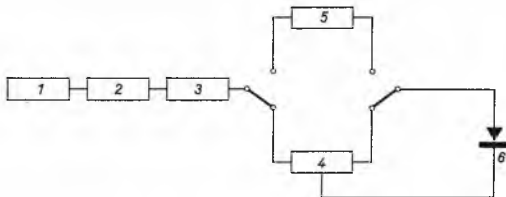


Sl. 11. Nadomjesna shema statičkog (ventilskog) impulsnog generatora. 1 Izvor izmjenične struje, 2 ventil za propuštanje struje u jednom smjeru, 3 elektrode, 4 otpor za ograničenje struje

iz bilo kakvog generatora prikladne snage i frekvencije. Načelna shema takvog generatora prikazana je na sl. 11. Iz izvora 1 izmjenične struje mrežne ili povišene frekvencije nastaje u pozitivnim poluperiodama napona, kad ventil 2 propušta struju, proboj dielektrika među elektrodama 3 elektroerozijskog stroja, te kroz međuelektrodni razmak poteže impuls struje kojemu je trajanje kraće od poluperiode promjenljivog napona izvora. Radi ograničenja amplitude struje, u strujni se krug uklapa obično otpor za ograničenje struje 4, koji zajedno s unutarnjim otporom izvora određuje amplitudu struje, tj.

režim obrade. Veličina otpora bira se prema karakteristikama izvora, primijenjenom ventilu i traženom režimu obrade.

Znatno elastičnije sklopove, tj. široke mogućnosti nezavisne promjene parametara impulsa i time prilagodavanja vrlo različitim radnim zadacima, dobivaju se primjenom elektroničkih sklopova



Sl. 12. Blok-shema impulsnog generatora. 1 Multivibrator, 2 regulacija odnosa impuls - pauza, 3 pojačalo snage, 4 niskofrekventni izlazni stupanj, 5 visokofrekventni izlazni stupanj, 6 elektroda-alat i izradak

za upravljanje umjesto običnog ventila. U novije vrijeme primjenjuju se upravljane poluvodičke (silicijumske) diode, koje omogućavaju rad i na visokim frekvencijama i time postizanje vi-

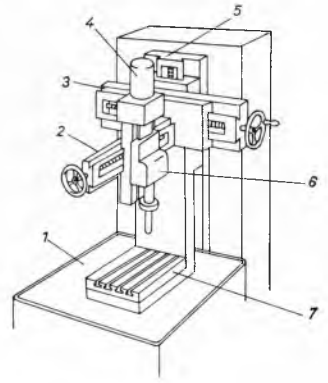
sokog stupnja finoće obrade. Tako dotjeranim ventilskim nezavisnim generatorima impulsa otvaraju se široke mogućnosti primjene u tehnici elektroerozijske obrade.

Na sl. 12 prikazana je blok-shema ventilskog nezavisnog generatora impulsa. Multivibrator 1 proizvodi impulse pravokutnog oblika, kojima se frekvencija može mijenjati u području 0,4...200 kHz. Oni se uvode u sklop 2 kojim se može regulirati omjer između trajanja impulsa i pauze među impulsima u području od 1 : 9 do 9 : 1. Dobiveni impulsi pojačavaju se pobudnim pojačalom 3, koje pobuđuje izlazni stupanj 4 ili 5. Niskofrekventni izlazni stupanj 4 obično radi u području frekvencije od 0,4 do 12 kHz, a služi za grubu i srednje-finu obradu; za finu obradu služi visokofrekventni izlazni stupanj 5 kojim se može postići frekvencija impulsa blizu 200 kHz.

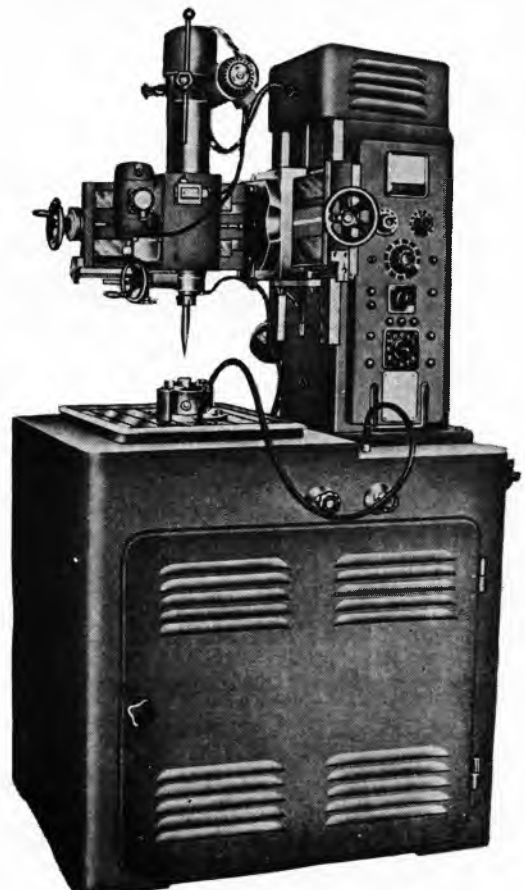
Poblje o generatorima impulsa v. *Impulsna tehnika*.

Mehanički sistem elektroerozijskog stroja. Postoje konstrukcije ovih strojeva za različite vrste obrade i konstrukcije za samo jednu vrstu, pa se razlikuju univerzalni i specijalni strojevi za obradu elektroerozijom. Najčešće se elektroerozijski strojevi za graviranje i bušenje, zbog sličnosti konstrukcije, ubrajaju u jednu zajedničku skupinu, a strojevi za brušenje i rezanje u posebne skupine.

Elektroerozijski stroj za graviranje i bušenje prikazan je na sl. 13 u izvedbi s posudom za dielektrik 1 smještenom nepomično na postolju. Radni stol i suporti s vodilicama za pomicanje radne glave u tri smje-



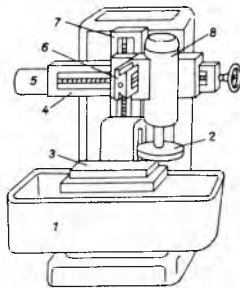
Sl. 13. Elektroerozijski stroj za graviranje i bušenje. 1 Posuda za dielektrik, 2 i 3 uređaj za koordinatno pomicanje alata, 4 servomotor, 5 vertikalni stup po kojem se cijeli uređaj spušta u dielektrik, 6 radna glava, 7 stol za učvršćenje izratka



Sl. 14. Elektroerozijski stroj za graviranje i bušenje

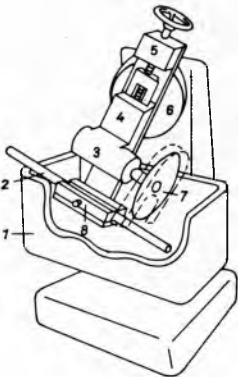
ra pravokutnog koordinatnog sistema pričvršćeni su na traverzi 2 koja se radi zaronjavanja radnog stola s izratkom u dielektrik može pomicati u vertikalnom smjeru. U nekim je izvedbama posuda za dielektrik smještena u postolju (u kojemu je obično smješten i glavni rezervoar za dielektrik, s pumpom i filtrom) i radi zaronjavanja radnog stola s izratkom ona se podiže, tj. u vertikalnom je smjeru pomična (sl. 14). Ima izvedaba u kojima su nepomični i posuda s dielektrikom i radni stol u njoj; u tom slučaju radna se tekućina pušta u posudu tek pošto su izradak i elektroda-alat namješteni. U nekim izvedbama vodilice i vretena za pomicanje u horizontalnim smjerovima smješteni su ispod radnog stola; njima se pomiče radni stol s posudom dielektrika i izratkom, a u vertikalnom smjeru može se pomicati radna glava s elektrodom. Automatski posmak elektrode vrši se servomotorom koji preko mehaničkog prenosa diže ili spušta elektrodu-alat. Električni sistem stroja može biti smješten u njegovu stupu ili se izvodi kao posebna jedinica.

Elektroerozijski strojevi za brušenje izvode se s jednom okretnom elektrodom-alatom, koja može imati oblik ploče ili valjka; prema tom obliku razlikuju se i izvedbe strojeva. Kad elektroda-alat ima oblik ploče, moguća je obrada ili njenim obodom ili njenom čeonom plohom. Elektroerozijski stroj za brušenje obodom brusne ploče prikazan je na slici 15. Brzina okretanja brusne ploče 2 podesiva je u granicama od 60 do 300/min; promjer joj je ~ 300...400 mm pri manjim, a ~ 120...150 mm pri većim brzinama; materijal ploče obično je bakar, a u novijim izvedbama ponekad je grafit; ploča može biti na obodu ravna ili profilirana. Izradak se pričvršćuje na stol 3, a potapa se u dielektriku podizanjem bazena 1 po vertikalnom stupu 7. Ploču okreću elektromotor 8 u glavi stroja. Radnu glavu s alatom 2 pomiče pri radu stalno amo-tamo u uzdužnom smjeru servomotor 5 po vodilici na suprtu 4. U poprečnom smjeru može se radna glava pomicati ručno po vodilici 6.



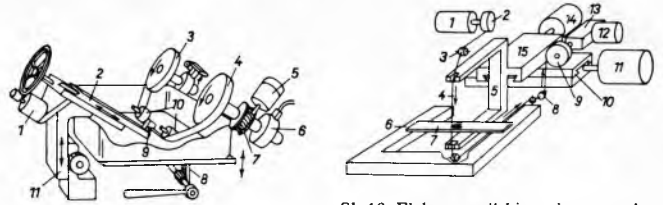
Sl. 15. Elektroerozijski stroj za brušenje. 1 Bazen za dielektrik, 2 brusna ploča, 3 stol za učvršćenje izratka, 4 i 6 uređaj za koordinatno pomicanje alata, 5 servomotor, 7 vertikalni stup za podizanje bazena, 8 elektromotor

Elektroerozijski strojevi za rezanje. Ovi strojevi namijenjeni su rezanju manjih dijelova, urezivanju vrlo uskih rezova i koordinatnom rezanju. Zbog toga elektroda-alat može biti ploča, traka ili žica. Na slici 16 prikazana je konstrukcija elektroerozijskog stroja za rezanje pločom kao alatom. Rezna ploča okreće se elektromotorom u vreteništu 3. Posmak rezne ploče prema izratku može se vršiti ručno i servomotorom s regulatorom 5. Stroj za elektroerozijsko rezanje trakom prikazan je na slici 17. Tanka limena traka, najčešće od bakra, polako se premotava s bubnja 3 na bubanj 4. Bubanj 4 okreće se s pomoću elektromotora 5 preko reduktora 7, a dva valjčića 10 služe za to da se traka spusti ispod razine dielektrika. Struja se dovodi traci preko kliznog prstena i kliznog kontakta 6. Izradak 9 učvršćen je na radnom stolu 2 i zajedno s njime automatski vrši posmak s pomoću servomotora 1. Izradak se namješta vertikalno prema traci ručno pomicanjem nosača radnog stola 11. Bazen s dielektrikom također se podiže i spušta ručno s pomoću nazubljene letve 8. Stroj za elektroerozijsko rezanje žicom prikazan je na sl. 18. I ovdje se žica 4, slično kao u prethodnom primjeru traka, polako premotava (brzinom od 2...10 mm/sek) s bubnja 2 na bubanj 9 s pomoću elektromotora 12 preko reduktora 13. Elektromotor 1 koči bubanj 2 stvarajući moment sa smjerom suprotnim smjeru okretanja bubnja; time

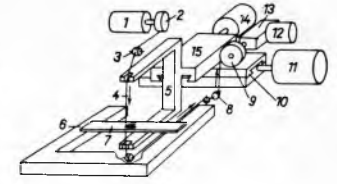


Sl. 16. Elektroerozijski stroj za rezanje pločom. 1 Bazen za dielektrik, 2 izradak, 3 elektromotor, 4 uređaj za spuštanje, 5 automatski regulator, 6 kružni uređaj za uranjanje elektrode i izratka u dielektrik, 7 rezna ploča, 8 stol za učvršćenje izratka

se postiže potrebna zategnutost žice. Viljuška 5 je vodilica žice; ona se može koordinatno pokretati s pomoću suporta 10 i 15. Ovi suporti pomiču se pomoću dva servomotora 11 i 14, koji djeluju naizmjenice ili zajedno, već prema programu rezanja. Izradak 7 učvršćen je na stolu 6 koji je takvog oblika da omogućava potreban hod viljuške 5. Valjčići 3 i 8 služe za usmjeravanje žice s jednog valjka na drugi.



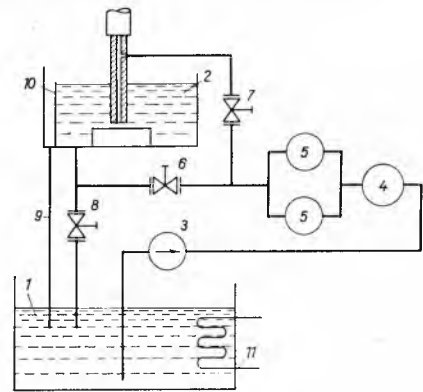
Sl. 17. Elektroerozijski stroj za rezanje trakom. 1 Servomotor za posmak radnog stola, 2 radni stol, 3 i 4 bubnjevi za premotavanje trake, 5 elektromotor, 6 klizni kontakti za dovod struje, 7 reduktor, 8 nazubljena letva za pomicanje bazena s dielektrikom, 9 izradak, 10 valjci za vodenje trake, 11 nosač radnog stola



Sl. 18. Elektroerozijski stroj za rezanje žicom. 1 Elektromotor za premotavanje žice, 2 bubanj za žicu, 3 valjčić za vodenje žice, 4 viljuška za elektroerozijsko rezanje, 5 viljuška-vodilica žice, 6 radni stol, 7 izradak, 8 valjčić za vodenje žice, 9 bubanj za žicu, 10 i 15 suport za koordinatno pomicanje viljuške, 11 servomotor, 12 elektromotor i 13 reduktor za premotavanje žice, 14 servomotor

Sistem čišćenja dielektrika. Već prva ispitivanja elektroerozijskog učinka pokazala su da je erozija znatno intenzivnija i da međuelektrodni razmak može biti manji ako se električni izboj zbiva u tekućini, koja u opisanim postupcima elektroerozije mora biti dielektrik. Dielektrik je između elektroda izložen krajnjim električnim i toplinskim naprezanjima; zbog toga mora imati posebna svojstva. Na prvom mjestu on se u radnom razmaku mora ponašati kao izolator sve dok se između elektroda ne dostigne probojni napon, koji mora biti veći od 30 kV/cm. Tačka paljenja mu ne smije biti ispod 50 °C. Mora biti kemijski i termički postojan. Ne smije djelovati korozivno na elektrode. Viskozitet mu mora biti što manji. Općenito se može reći da ove zahtjeve ispunjavaju ugljikovodična ulja (npr. white spirit, petrolej, transformatorska ulja i sl.)

Za tačnost obrade jedan od bitnih uvjeta je čistoća dielektrika. Zato se čvrste čestice nastale pri elektroeroziji izdvajaju iz dielektrične tekućine taloženjem u glavnom rezervoaru i filtracijom. Centrifugiranje rjeđe se primjenjuje jer je skuplje i obično omogućava samo mali protok dielektrika.



Sl. 19. Uređaj za filtriranje dielektrika. 1 Glavni rezervoar, 2 radna kada, 3 pumpa, 4 grubi filter, 5 fini filter, 6 ventil za punjenje radne kade, 7 ventil za prisilno ispiranje radnog prostora, 8 ventil za ispuštanje dielektrika, 9 prelivni odvod preko stijenke 10, 11 hlađenje dielektrika

Obično se filtriranje izvodi prema shemi na slici 19. Iz glavnog rezervoara 1 pumpa 3 siše dielektrik i tiska ga najprije na grubi filter 4, a zatim preko finog filtra 5 u radni bazen 2. U toku rada glavni tok dielektrika ide preko ventila 6, a kad razina dosegne visinu stijenke 10, prelijeva se i vraća se u glavni rezervoar. Za prisilno ispiranje radnog razmaka kroz elektrodu služi ventil 7. U sistemu za čišćenje dielektrik se i hladi na potrebnu temperaturu hladnjakom 11.

Danas poznati filterski sistemi mogu davati u radni rezervoar 10·100 l/min dielektrika. Što je veća protočna količina dielektrika to je kvalitetnija obrada, ali je veća i cijena uređaja, tako da se često traži optimizacija (najekonomičniji odnos cijene i protočne količine). Za finu obradu potrebna je obično filtracija filterskim papirom, ev. u više stepena, ali su pri tome protočne količine dielektrika redovito manje.

Regulacijski sistemi strojeva za obradu elektroerozijom uglavnom služe za to da posmak elektrode automatski reguliraju tako da međuelektrodni razmak ostaje konstantan unatoč tome što brzina erodiranja nije konstantna. Postoji niz sistema za regulaciju; od njih su danas najrašireniji elektro-mehanički i hidraulički. Od elektromehaničkih sistema regulacije najviše se upotrebljavaju tip sa servomotorom i tip s diferencijalnim pogonom.

Servomotor *elektromehaničkog uređaja regulacije sa servomotorom* preko reduktora podiže ili spušta zubnu letvu s elektrodom. Na stezaljkama servomotora vlada razlika između napona U_g u radnom razmaku i nekog referentnog napona U_r koji se može po volji odabrati na potenciometru. Ako se radni razmak povećava, povećava se i napon U_g i time razlika $U_g - U_r$ (napon pogreške); to povećava brzinu okretanja servomotora i time brzinu posmaka elektrode. Obrnuto, ako se radni razmak smanjuje, smanjuju se napon U_g , brzina servomotora i brzina posmaka. Ako nastane kratki spoj, $U_g - U_r$ postane negativno, servomotor se reverzira i on odmiče elektrodu-alat od izratka dok se ne ugasi nastali luk. Izborom referentnog napona U_r na potenciometru namješta se tražena vrijednost međuelektrodnog razmaka. Da bi se osjetljivost regulacijskog uređaja učinila prikladno velikom, napon pogreške obično se pojačava pogodnim servopojačalima.

Elektromehanički sistem regulacije s diferencijalnim pogonom također je dosta raširen. Dva elektromotora djeluju na navojno vreteno preko mehaničkog diferencijala. Kada su brzine okretaja obaju motora jednake, navojno vreteno miruje, a kad se te brzine razlikuju, vreteno se okreće i podiže ili spušta radnu glavu koja nosi elektrodu. Brzina posmaka i ovdje se automatski podešava prema veličini radnog razmaka, odnosno veličini napona na elektrodoma. Obično se jedan elektromotor okreće konstantnom brzinom, a drugim upravlja napon pogreške preko jednog pojačala.

Hidraulički sistem regulacije primjenjuje se u preciznim elektroerozijskim strojevima gdje treba raditi s manjim radnim razmacima, npr. u modernim strojevima koji imaju tranzistorske generatore impulsa.

Elektroda-alat spojena je s klipom koji se u cilindru pomiče naviše ili naniže djelovanjem tlaka hidraulične tekućine tiskane pumpom u cilindar ispod ili iznad klipa. Na zavojnicu elektromagnetskog ventila koji upravlja strujanjem hidraulične tekućine iz prostora iznad klipa u prostor ispod klipa, ili obratno, djeluje napon pogreške zavisen od međuelektrodnog razmaka; ako se međuelektrodni razmak povećava, ventil hidrauličnu tekućinu upravlja nad klip i elektroda-alat se spušta brže, ako se međuelektrodni razmak smanjuje, hidraulična se tekućina pumpa iz prostora iznad klipa u prostor ispod klipa, kretanje naniže se usporava, ili se mijenja smjer kretanja, tako da se alat udaljuje od izratka.

Performanse elektroerozijskih strojeva ocjenjuju se prema njihovoj proizvodnosti, istrošenju elektrode-alata, tačnosti odsliskavanja (tačnosti dimenzija obradenog izratka), kvalitetu obradene površine i promjeni njezinog sastava i strukture.

Proizvodnost obrade elektroerozijom, tj. količina materijala erodirana s izratka u jedinici vremena (brzina erodiranja), obično se izražava volumenski u m^3/min , a ponekad i težinski, u g/min . Proporcionalna je energiji pojedinog impulsa i broju impulsa u jedinici vremena:

$$E = K A_1 f_1$$

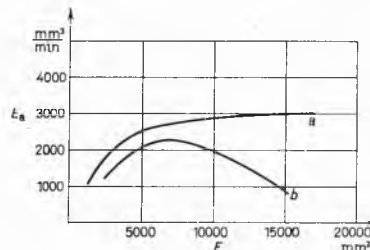
Tu je E proizvodnost, A_1 energija impulsa, f_1 frekvencija impulsa, a K koeficijent proporcionalnosti koji zavisi od toplinskih i drugih fizikalnih svojstava materijala izratka, a omjeru između trajanja impulsa i duljine periode, i upotrijebljenim jedinicama. Energija impulsa data je općenito jednadžbom

$$A_1 = \int_0^{t_1} u_p(t) i_p(t) dt,$$

gdje je $u_p(t)$ trenutna vrijednost napona, $i_p(t)$ trenutna vrijednost struje, t_1 trajanje impulsa. Za idealni pravokutni impuls, s obzirom na to da su napon i struja konstantni, vrijedi jednostavnija jednadžba: $A_1 = U_1 I_1 t_1$, gdje su U_1 i I_1 konstantni napon i struja impulsa.

Energija impulsa može se, prema tome, mijenjati promjenom njegova trajanja, napona ili/i struje. Pri promjenljivoj struji odlučni su amplituda struje i trajanje impulsa. Pokazalo se da proizvodnost raste brže ako se energija povećava povećanjem amplitude struje nego ako se to učini produženjem impulsa.

Brzina erodiranja zavisna je i od veličine površine koja se obrađuje. Priroda te zavisnosti različita je prema vrsti generatora impulsa ugrađenog u stroj. Ako se radi sa zavisnim generatorima, najveća brzina erodiranja postiže se na određenoj (optimalnoj) radnoj površini. U radu s generatorima impulsa koji daju pravokutne impulse, brzina erodiranja najprije brzo raste s veličinom radne površine, a kasnije se asimptotski približava nekoj graničnoj vrijednosti. Pri bušenju elektroerozijom brzina erodiranja opada s dubinom uvrtu zbog sve težeg uklanjanja erodiranih čestica i sve težeg dovođenja svježeg dielektrika u radni prostor. To smanjenje proizvodnosti može se znatno ublažiti prisilnim ispiranjem radnog prostora, npr. na način prikazan na sl. 19, kroz elektrodu koja u tom slučaju mora biti šuplja. Dielektrik kojim se vrši prisilno ispiranje mora biti dobro filtriran i bez zračnih mjehurića, koji bi mogli biti uzročnici nestabilnog rada. Sličan učinak može se postići i vibriranjem elektrode-alata.



Sl. 20. Ovisnost produktivnosti o veličini čelne površine elektrode za impulsni generator (a) i za zavisni generator (b)

Općenito proizvodnost obrade elektroerozijom ne zavisi od tvrdoće, čvrstoće i žilavosti materijala koji se erodira. Međutim, ona znatno zavisi od kemijske prirode materijala. Ta je zavisnost prikazana tablicom 1, u kojoj je naveden broj impulsa potreban za erodiranje jednog kubnog centimetra nekih materijala.

Tablica 1
RELATIVNA PROIZVODNOST ELEKTROEROZIJSKE OBRADNE
RAZLIČITIH MATERIJALA

Materijal izratka	Broj impulsa	Materijal izratka	Broj impulsa
Kositar	8 064	Bakar	52 500
Bizmut	8 316	Nikal	63 210
Olovo	8 484	Alatni čelik	71 190
Kadmijum	8 736	Željezo	102 270
Aluminijum	9 240	Molibden	125 580
Cink	9 786	Grafit	191 520
Mesing	41 580		

Ti brojevi dobiveni su uz posve jednake uvjete erodiranja. Kada se parametri impulsa izmijene, izmijeni se i broj impulsa potrebnih za taj elektroerozijski učinak, ali poredak naveden u tablici u većini slučajeva ostaje nepromijenjen.

Trošenje elektrode-alata. Za trošenje elektrode-alata vrijedi načelno ista jednadžba proporcionalnosti s energijom impulsa i njihovom frekvencijom kao i za elektrodu-izradak, samo je koeficijent proporcionalnosti K za trošenje alata manji od istog koeficijenta za eroziju izratka jer se izradak i spaja kao ona elektroda koja se više erodira. Trošenje alata, pored toga što je tehnički važno, značajan je činilac ekonomičnosti operacije. Izražava se pokazateljem koji se naziva *relativnim istrošenjem alata*. To je omjer između volumenski izraženih erozija alata i izratka u istom ciklusu obrade: $m = E_a/E_r$. Izražava se i u postocima ($m \cdot 100\%$).

Brojna su ispitivanja pokazala da postoji korelacija između relativnog istrošenja elektrode-alata i toplinske vodljivosti materijala upotrijebljenog za izradu te elektrode, kako je to prikazano u tabl. 2.

Tablica 2
RELATIVNO ISTROŠENJE ALATA ZA ELEKTROEROZIJSKU OBRADU

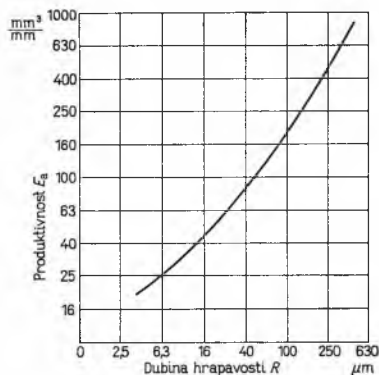
Materijal elektrode-alata	Relativno istrošenje %	Toplinska vodljivost cal/cm s °C	Materijal elektrode-alata	Relativno istrošenje %	Toplinska vodljivost cal/cm s °C
Srebro	37	1,096	Cink	85	0,27
Bakar	50	0,92	Kadmijum	85	0,22
Aluminijum	65	0,50	Olovo	85...90	0,08
Volfram	75	0,38	Bizmut	85...90	0,02

U prvim je elektroerozijskim strojevima relativno trošenje alata bilo veliko (obično veće od 50%); danas se primjenom zavisnih generatora impulsa i bakrenih elektrode-alata može smanjiti i na svega ~10%, a primjenom strojnih i ventilskih impulsnih generatora može se svesti i na dio postotka. Kao i produktivnost elektroerozije, tako i trošenje alata zavisi od amplitude, trajanja i oblika impulsa. Sa stanovišta trošenja alata povoljniji je rad s dužim impulsima nego s kratkim. Materijali koji se najčešće upotrebljavaju za izradu alata za elektroerozijsku obradu mogu se u pogledu primjenljivosti (sa stanovišta trošenja alata, produktivnosti i lakoće oblikovanja) poredati u ovaj niz: sinterovana legura bakra i volframa > grafit > elektrolitski bakar > dezoksidirani bakar > mjed (sa 40% Zn) > tombak (sa 5% Zn) > bronza > sivi liv > čelik > volfram > tvrdi metal.

Uvjeti rada pod kojima se postiže minimalno trošenje elektrode-alata ne podudaraju se s uvjetima rada pod kojima se ostvaruje maksimalna proizvodnost. Parametri impulsa kojima se vrši elektroerozija biraju se stoga tako da odnos između trošenja elektrode i proizvodnosti bude ekonomski optimalan.

Tačnost odlikavanja. Na tačnost odlikavanja, tj. tačnost dimenzija izratka obrađenog elektroerozijom, utječu mehanički činioci kao što su stezanje alata, stabilnost stroja i način vođenja elektrode, ali u najvećoj mjeri veličina istrošenja elektrode-alata i radni razmak. Uz svaki stroj moraju postojati tablice s podacima o tome koliko dimenzije alata moraju biti manje od traženih dimenzija izratka u pojedinim stupnjevima obrade. Ti podaci razlikuju se već prema vrsti materijala elektrode-alata i obično vrijede samo za dielektrik propisan od proizvođača.

Tačnost obrade to je veća što je manji razmak među elektrodama. Na taj razmak bitno utječe kvalitet dielektrika i način kako se uklanjaju produkti erozije iz radnog prostora.



Sl. 21. Ovisnost kvaliteta obrađene površine o proizvodnosti

Kvalitet obrađene površine zavisi prvenstveno od vrste električnih impulsa i izboja koji se njima postiže. O tome je nešto rečeno u poglavlju o izbojnim postupcima elektroerozijske obrade i pri opisu generatora impulsa. Obrada elektroerozijom obično se vrši u više faza. Grubom se obradom brzo skida velik volumen materijala, a onda se srednje finom i, po potrebi, finom obradom dotjera kvalitet površine.

Između kvaliteta površine obrađene elektroerozijom i proizvodnosti operacije postoji određen odnos prikazan dijagramom u sl. 20. Odatle je lako zaključiti da je obrada elektroerozijom to sporija (manja proizvodnost) što je ona finija i obrnuto. Zbog toga se proces vodi tako da se finijom obradom erodira materijala samo toliko koliko je potrebno za uklanjanje kratera od prethodne obrade.

Promjena strukture. Vrlo visoke temperature koje se javljaju na mjestu električnog izboja i naglo hlađenje dielektrikom nakon impulsa u obradi elektroerozijom imaju za posljedicu promjene u površinskim slojevima na tim mjestima. Metalografska, kemijska i spektralna ispitivanja pokazala su da se na erodiranoj površini mijenjaju struktura i sastav materijala. Pojavljuje se nova faza, što mijenja prvobitna mehanička svojstva površine.



Sl. 22. Metalografski snimak dijela provrta. a Bijeli, tvrdi površinski sloj, b prelazni sloj, c osnovni nepromijenjeni sloj

Metalografski snimak presjeka površine (sl. 22) pokazuje jasno tri različita sloja. Najgornji je tzv. bijeli sloj sa promijenjenim sastavom; on je obično veoma tvrd i na njega ne djeluju sredstva za najedanje. Pod njim je sloj sa promijenjenom strukturom, obično također tvrd, a ispod njega je osnovna nepromijenjena struktura. Iznimno, pri obradi nekih materijala pod određenim okolnostima, bijeli sloj i sloj promijenjene strukture mogu biti i mekši od osnovnog materijala. Pri finoj su obradi promjene strukture neznatne; stoga ta obrada služi ne samo da se izgled neravnosti zaostale od prethodne obrade već i za uklanjanje slojeva promijenjenog sastava i strukture.

U nekim slučajevima promjena svojstava površine uslijed izmijenjenog sastava i strukture poželjna je, pa se postupci slični elektroerozijskim upotrebljavaju za termičku obradu nekih metalnih materijala.

Primjena elektroerozije. Primjena obrade elektroerozijom može se podijeliti uglavnom na dvije glavne skupine: izradu alata i proizvodnju sastavnih dijelova. Najvažnije je područje primjene obrade elektroerozijom proizvodnja kovačkih ukovanja, kalupa za plastične mase i lijevanje, te raznih žigova i matrica. Obrada elektroerozijom idealna je za izradu matrica za provlačenje jer omogućava izvedbu u jednoj operaciji.



Sl. 23. Primjeri bušenja (graviranja) elektroerozijom

Obrada elektroerozijom uspješno se primjenjuje za obnavljanje ili korekciju postojećih matrica i alata, jer se nakon toga ne moraju podvrgavati napuštanju i ponovnom kaljenju, a time se izbjegava riziko naprezanja i deformacije materijala. Kovački ukovnji vrlo se uspješno obnavljaju i ekonomično se vraćaju u prvotni oblik ako se prije upotrebe iskoriste kao kalupi za lijevanje elektroda, a kad se istroše, obnavljaju elektroerozijom uz pomoć tih elektroda.

Kako se u obradi elektroerozijom elektroda i izradak ne diraju, proces je idealan za korigiranje malih grešaka u položaju i smjeru već izbušenih provrta i uvrta a da pri tome alat ne »pobjegne« u prvobitni provrt ili uvert, čemu je sklon u radu s konvencionalnim bušilicama. Iz istog razloga elektroerozija može se ekonomično primijeniti za odstranjivanje slomljenih svrdala ili zatika bez toplinske obrade.

Prednosti obrade elektroerozijom u usporedbi s konvencionalnim metodama mnogobrojne su. Tako tvrdoća i žilavost metala nije u obradi erozijom ni od kakvog značenja; elektroerozijom mogu se vrlo tačno izvesti i složeni geometrijski oblici, čak i u metalima koji se inače ne mogu obradivati konvencionalnim postupcima; elektroerozija omogućava relativno lako bušenje zakrivljenih rupa i vrlo uskih procjepa; kako se elektroerozijom mogu obradivati i najtvrdi metali, toplinska obrada (npr. kaljenje) može se izvesti prije obrade elektroerozijom i time izbjeći da se termičkom obradom deformira gotov izradak; kako u obradi erozijom alat nije u dodiru s izratkom, ovaj za to vrijeme nije izložen ni mehaničkim naprezanjima, pa to omogućava obradu i vrlo krutih dijelova bez opasnosti od loma.

Obrada elektroerozijom ima i nedostataka u usporedbi s konvencionalnim postupcima. Tako se elektroerozijom mogu obradivati samo električki vodljiviji materijali, duboki uvrta i provrta malog promjera teško se mogu izvesti s dovoljnom tačnošću, a za uspješno rješavanje tehnoloških problema pri tome je potrebno određeno iskustvo.

LIT.: B. P. Лазаренко, Н. И. Лазаренко, Электроскопная обработка металлов, Москва-Ленинград 1950. — В. Н. Гусев, Анодно-механическая обработка металлов, Москва-Ленинград 1952. — Б. Т. Гуткин, Автоматизация электроскопных и анодно-механических станков, Москва-Ленинград 1952. — Б. И. Кан, И. Г. Космачев, Анодно-механическая чистовая обработка металлов, Москва-Ленинград 1952. — Ж. Шудова, Elektroerosive Metallverarbeitung, Berlin 1953. — А. Л. Ливиниц, Электроэрозионная обработка металлов, Москва 1957. — В. С. Лев, Пути повышения производительности электроскопной обработки материалов, Ленинград 1958. — Ж. С. Спрэйг, Der gesteuerte elektroerosive Metallabtrag, Stuttgart 1958. — Н. Опиз у. Mitarb., Elektroerosive Bearbeitung (11. Forschungsber. des Lab. f. Werkzeugmaschinen u. Betriebslehre, Aachen), Essen 1958; Funkenerosive Bearbeitung von Werkzeugstoffen (19. Forschungsber. d. Lab. f. Werkzeugmaschinen u. Betriebslehre, Aachen), Essen 1961. — Е. М. Левинсон, Электроэрозионная обработка металлов, Ленинград 1961. — И. Г. Космачев, Обработка металлов анодно-механическим способом, Москва-Ленинград 1961. — Академия наук СССР, Проблемы электрической обработки материалов, Москва 1962. — Л. Я. Пошлов, Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов, Москва-Ленинград 1963. — Е. М. Левинсон, В. С. Лев, Электроэрозионное оборудование, Москва 1965. — VDE-Richtlinie 3400: Elektroerosive Bearbeitung, Düsseldorf 1965. — VDI-Lehrhandbuch: Elektrisch abtragende Bearbeitungsverfahren, Düsseldorf 1965. — В. Г. Гуткин, Электроимпульсная обработка металлов, Москва 1970. — И. П. Григорчук, Электроконтактная обработка металлов, Москва 1970. — Е. М. Левинсон, В. С. Лев, Электроэрозионная обработка металлов, Москва 1970. — Н. Ф. Олофинский, Генераторы импульсов, Москва 1970.

Z. Kos

ELEKTROKEMIJA, grana fizikalne kemije koja se bavi proučavanjem stanja i procesa u kojima istovremeno nastupaju međusobno uvjetovane kemijske i električne pojave.

Budući da je materija sastavljena od električki nabijenih čestica, prema upravo navedenoj širokoj definiciji cijela bi se kemija, u biti, mogla smatrati elektrokemijom. Prema najužoj, strogoj definiciji, elektrokemija bi obuhvaćala samo proučavanje procesa koji se zbivaju pri prolazu električne struje na granici između elektronskih vodiča elektriciteta (vodiča prvog reda, uglavnom metala) i ionskih vodiča (vodiča drugog reda, otopina ili talina elektrolita), tj. proučavanje kemijskih reakcija u kojima kao reaktanti ili produkti reakcije sudjeluju i ioni i elektroni. Međutim, činjenica je da elektrokemičari donedavno nisu teorijski prvenstveno izučavali te procese (reakcije), nego su se najviše bavili (i postizali velike uspjehe) ispitivanjem i tumačenjem svojstava ionskih vodiča (osobito otopina elektrolita) i pojava na granici između vodiča jedne i druge vrste kad struja kroz nju ne prolazi, tj. kad vlada ravnoteža. Iz tog historijskog razloga uobičajilo se pojmom elektrokemije stvarno obuhvatiti, pored ispitivanja reakcija na granici među vodičima objiju vrsta, također dio fizikalne kemije ionskih otopina (koji se odnosi na prenos elektriciteta kroz te otopine) i ispitivanje ravnotežnog stanja na granici vodiča. Staviše, onaj dio sadržaja pojma koji prema najužoj definiciji uopće ne spada u elektrokemiju, u tako šire razgraničenoj, konvencionalnoj elektrokemiji zauzimao je kroz dugo vrijeme najveći prostor u njezinu centru. Preporod koji je doživjela elektrokemija u pedesetim godinama ovog stoljeća time što je ispitivanje mehanizma elektrokemijskih reakcija na granici vodiča prvog i drugog reda došlo u centar pažnje elektrokemičara, i brz razvoj tog dijela fizikalne kemije, opravdavaju nazor da će u nedalekoj budućnosti pojam elektrokemije biti općenito svveden na opseg manji od konvencionalnoga.

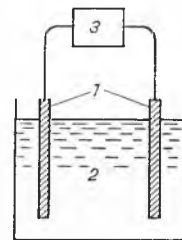
Elektrokemijski sistem. Elektrokemijski se procesi zbivaju u okviru *elektrokemijskog sistema*, koji je shematski prikazan na sl. 1.

U tekući vodič drugog reda (otopinu ili talinu elektrolita) zaronjena su dva vodiča prvog reda (metalni štapovi, ploče ili sl.), takozvane *elektrode*, koje su izvan tekućine vodljivo spojene vanjskim strujnim krugom. Pri prolazu struje kroz sistem, s

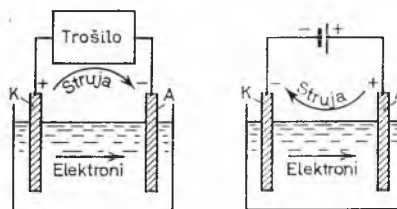
jedne elektrode, koja se zove *katoda*, elektroni prelaze u otopinu ili talinu elektrolita (elektrokemičari često kažu kratko: »u elektrolitu«); na drugu elektrodu, *anodu*, elektroni prelaze iz elektrolita. (Sa gledišta elektrolita katoda je, dakle, izvor, a anoda ponor elektrona.) Elektroni koji na katodi prelaze u elektrolit učestvuju kao reaktanti u katodnoj elektrokemijskoj reakciji spajajući se s neutralnim atomima ili molekulama u električki nabijene čestice, ione, odnosno, povećavajući negativni ili smanjujući pozitivni naboj prisutnih iona. [Takve se reakcije u kemiji nazivaju redukcijama, posrijedi je dakle katodna (elektrokemijska) redukcija.] Elektroni koji na anodu prelaze iz elektrolita produkti su reakcije kojom se ioni izbijaju dajući neutralne atome ili molekule, odnosno, kojom se smanjuje negativni ili povećava pozitivni naboj iona.

[Budući da se takve reakcije nazivaju oksidacijama, riječ je o anodnoj (elektrokemijskoj) oksidaciji.] S katode na anodu kroz elektrolit prenose se elektroni u obliku naboja iona (to je bit ionske vodljivosti elektrolita), s anode na katodu vraćaju se elektroni kroz vanjski krug struje uslijed elektronske vodljivosti metalnih vodiča.

Budući da je broj elektrona koji učestvuje u elektrokemijskim reakcijama na anodi i na katodi nužno jednak, sumarna reakcija koja se zbiva u elektrokemijskom sistemu, tj. zbroj anodne i katodne reakcije, jednaka je jednoj kemijskoj reakciji koja se odvija bez posredovanja električne struje. I obrnuto: kemijska reakcija provedena u elektrokemijskom sistemu odvija se kao zbroj dviju dionih reakcija koje se odvijaju na odvojenim mjestima, elektrodama tog sistema. Pri tome reakcije koje se odvijaju spontano (kojima je reakcijski rad $\Delta G < 0$, v. *Termodinamika*) daju električnu energiju koja se u vanjskom krugu struje troši, a reakcije koje se odvijaju samo ako se sistemu dovodi energija ($\Delta G > 0$) u elektrokemijskom sistemu se provode tako da mu se dovodi energija iz izvora istosmjerne struje u vanjskom strujnom krugu. Elektrokemijski sistem kojim se proizvodi energija zove se *galvanski članak*, galvanski element, elektrokemijski strujni generator (v. *Baterija, električna*); elektrokemijski sistem u kojemu se provodi neka kemijska reakcija s pomoću električne energije zove se *elektrolitska ćelija*, elektrolizer ili *elektrokemijski reaktor*. Pravokutnik u vanjskom krugu na shemi sl. 1 prikazuje, dakle, neko trošilo električne energije ako je prikazani elektrokemijski sistem galvanski članak, a izvor istosmjerne struje ako je taj sistem elektrolitska ćelija.



Sl. 1. Elektrokemijski sistem. 1 Elektrode, 2 elektrolit, 3 izvor ili trošilo struje



Sl. 2. Galvanski članak i elektrokemijski reaktor. K katoda, A anoda

Iz sl. 2 razabire se da je u galvanskom članku anoda za trošilo izvor elektrona, dakle negativni pol članka (katoda je, prema tome, pozitivni pol), a u elektrolitskoj ćeliji katoda je spojena s negativnim polom izvora struje (anoda, prema tome, s pozitivnim polom). Iz toga se vidi da su nazivi katoda i anoda određeni prirodom reakcije na elektrodi (redukcija ili oksidacija), a ne njezinim polaritetom.

Nazive anoda i katoda — kao i nazive elektroliza, elektrolit (grč. λύω *lyo* razdvajam, λύσις *lysis* razdvajanje), elektroda (grč. ὁδός *hodos*, put, prilaz) i ion (grč. τὸ ἰόν *ion*, ono što hoda, putuje) uveo je u nauku M. Faraday. Budući da je prema konvenciji smjer struje jednak smjeru u kojemu se prenosi pozitivni elektricitet (dakle suprotn smjeru prenosa elektrona), anoda je prilaz struje koji se nalazi uzvodno (grč. ἀνά *ana* uz), a katoda prilaz nizvodno (grč. κατὰ *kata* niz); ioni koji putuju u struju prema anodi zovu se *anioni*, ioni koji putuju niz struju prema katodi, *kationi*. Otopina elektrolita uz anodu (anodni elektrolit) naziva se skraćeno *anolit*, a otopina uz katodu (katodni elektrolit) *katolit*.