

DK 621.9.018.5

Elektroerozivna obdelava kovin

FRANC GOLOGRANC

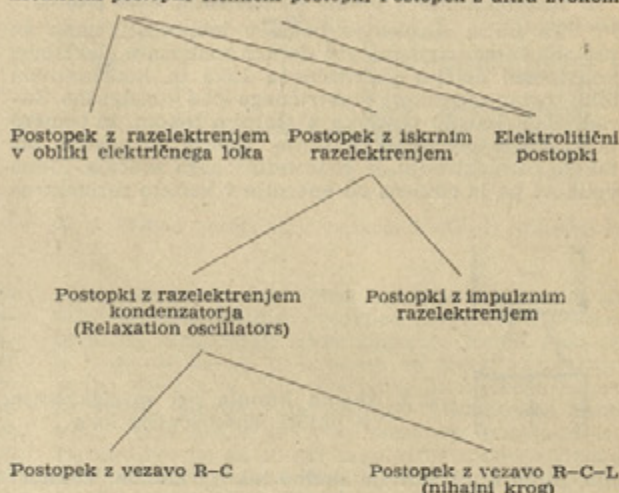
Obdelava zelo trdih in žilavih materialov, zlasti karbidnih trdin, povzroča v praksi velike težave. S pomočjo novega elektroerozivnega načina pa je možno obdelovati tudi najtrše kovine. V naslednjem sestavku so obravnavane fizikalne osnove in tehnološke posebnosti novega postopka, opisano delovanje nekaterih naprav in prikazani primeri obdelave.

Napredek moderne tehnike, ki ga beležimo v zadnjih letih, je v veliki meri zasluga uspešnega razvoja pri izboljšanju tehnoloških lastnosti materialov, zlasti glede toplotne odpornosti, odpornosti proti obrabi in trdote. Nenehni napori in težnje po izboljšanju kvalitete materialov pa nalagajo tehnologom težke naloge in probleme. Mnoga, novo nastala specialna trda in žilava jekla, ki se uporabljajo n. pr. v gradnji plinskih turbin itd., se zelo težko obdelujejo z orodji za odrezovanje, v mnogih primerih pa ta način obdelave sploh ni mogoč. Še težja je mehanska obdelava karbidnih trdin (n. pr. volframovega karbida), ki jih lahko obdelujemo le z diamantnimi brusi in podobnimi orodji. Prav zaradi tega je bila uporabnost karbidnih trdin omejena v glavnem na orodja za odrezovanje in izdelavo permanentnih magnetov, vendar so se tudi tukaj pojavljale velike težave pri obdelavi. Tako n. pr. ni bilo mogoče karbidne trdine niti vrtati.

Kakor je znano, odcepljamo pri običajnih načinih obdelave n. pr. pri struženju, frezanju, skobljanju, brušenju itd. material v obliki odrezkov s pomočjo orodja z rezalnim klinom. Pod vplivom velike mehanske sile vdira orodje v material in pri tem ruši molekularne sile v njem. Energijo, ki je potrebna za potek odrezovanja, dovajamo običajno od elektromotorja preko ustreznih prenosov na kraj delovnega procesa. Potrebna je torej pretvorba električne energije v mehansko. Prizadevanja, da bi električno energijo čim bolj približali mestu delovnega procesa, so povzročila sicer v teku razvoja mnogo konstruktivnih sprememb na obdelovalnih strojih, n. pr. prehod na posamični pogon posameznih kinematičnih delov stroja itd., vendar se tehnologija procesa odrezovanja samega ni prav nič spremenila. Nadaljnje približanje električne energije mestu odrezovanja je mogla prinesiti le bistvena sprememba v načinu obdelave. Tako je kot rezultat že medvojnih poizkusov nastala vrsta novih obdelovalnih postopkov, ki naj bi predvsem olajšala in izpopolnila izdelavo orodij za odrezovanje in plastično preoblikovanje ter omogočila obdelavo nekaterih specialnih materialov. Shema št. 1 prikazuje razčlenitev nekaterih novih tehnoloških postopkov za obdelavo, med katerimi je tako imenovana »elektroerozija« dosegla nedvomno najpomembnejši uspeh. Dandanes poznamo več elektroerozivnih načinov obdelave, ki pa se razlikujejo med seboj v glavnem le po električni vezavi, kajti načelo delovanja je pri vseh podobno. Posamezni postopki so znani z različnimi imeni kakor n. pr.: Agietron, Elbo, Erodomatic, Method X, Sparcatron itd.

Pojav elektroerozije je znan že več ko 100 let. Kot nezahelen uničevalec kontaktov električnih stikalnih naprav povzroča že od nekdaj izdelovalcem in uporabnikom električnih stikal preglavice. Posebno pereče je postalo vprašanje življenjske dobe električnih stikal z razvojem avtomatskega in daljinskega krmiljenja in razumljivo je, da je zaradi tega veljala večina znanstveno-tehničnih prizadevanj boju proti nastanku elektroerozije. Misel, da bi mogli z neposrednim učinkovanjem električnega toka obdelovati kovine, je stara morda dobrih 16 let, vendar so raziskave šele v zadnjih letih privedle do praktičnih in za industrijo uporabnih rezultatov.

Električni postopki Kemični postopki Postopek z ultra zvokom



Sl. 1. Razčlenitev nekaterih novjših postopkov za tehnološko obdelavo

Pri elektroerozivnem načinu obdelave ni delovanja mehaničnih sil. Električni tok ni samo vir energije, temveč postane neposredno delujoča sila za obdelavo kovine. Energija, ki je potrebna pri tem tehnološkem procesu, se torej v nasprotju z ostalimi načini izkorišča neposredno na obdelovancu, brez raznih mehaničnih posrednikov. Delci materiala odstopajo pod vplivom razelektrenja med dvema elektrodama, od katerih je ena orodje in druga obdelovalec. Visoke temperature in tlaki, ki nastajajo pri razelektrenju v zelo majhnem prostoru, povzročajo razpršitev drobnih delcev materiala, pri čemer elektrodi tudi deloma izparita. Običajno poteka proces v dielektrični tekočini, ki podpira koncentracijo energije v prostoru med obema elektrodama, zaradi česar se učinek razelektrenja še poveča.

I. ELEKTROEROZIVNI POSTOPKI IN FIZIKALNE OSNOVE

Raziskovalna dejavnost na področju elektroerozivne obdelave je razvita predvsem v Sovjetski zvezi, kjer sta se zakonca B. R. in N. I. Lazarenko lotila prvih obsežnih raziskav v elektro-fizikalni smeri ter odkrila važne zakonitosti na tem področju. Lazarenko je ugotovil, da so vsi prevodni materiali, neodvisno od njihovih fizikalnih lastnosti, izpostavljeni elektroeroziji, da kaže erozija določeno polariteto, da sta predznak in velikost erozije odvisna od načina razelektrenja in da je količina erodiranega materiala proporcionalna energiji, ki je povzročila erozijo. Te Lazarenkove ugotovitve so bile prve osnove za raziskavo na področju fizikalnega bistva elektroerozije.

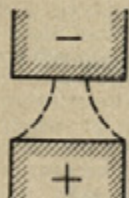
Morda obenem kakor v SZ se je pričel tak razvoj v ZDA in Angliji, v zadnjih 5 letih pa se je zelo razmahnil tudi v nekaterih evropskih državah. V tej zvezi bi omenil raziskovalna dela na TVŠ v Aachenu, kjer opravljajo sistematične temeljne raziskave s poizkusnimi napravami lastne konstrukcije. Čeprav je elektroerozivni način obdelave še v razvojni fazi, ga lahko že zdaj štejemo med standardne metode za obdelavo kovin, predvsem kaljenih jekel in karbidnih trdin.

Kakor je že omenjeno, je elektroerozija posledica razelektrenja med dvema elektrodama z zelo majhnim

razstojem. Taka razelektrenja lahko nastajajo v obliki prekinjenih električnih lokov ali pa v obliki ponavljajočih se preskokov električne iskre. Način razelektrenja je odvisen od električne vezave erozivne naprave.

1. Razelektrenje v obliki električnega loka (oblok)

Ta način razelektrenja je v tehnologiji znan že pri obločnem varjenju. Pri danem materialu elektrode, konstantni dolžini električnega loka in konstantnem toku, ostane napetost električnega loka konstantna. Zaradi tega imamo opravka s stalnim lokom, ki pomeni tkzv. stacionarno razelektrenje. Erozijska, ki nastaja pri takem razelektrenju, je čisto termičnega značaja, njena velikost pa je odvisna od energije v kanalu razelektrenja.

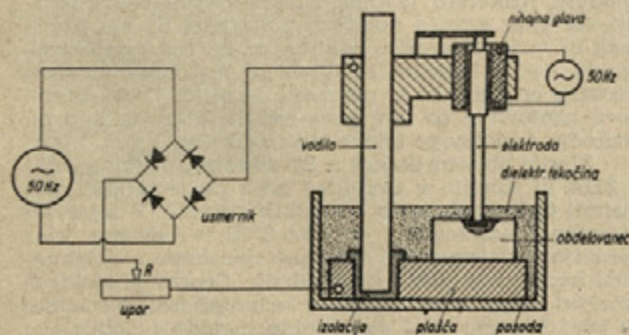


Sl. 2. Shema kanala pri razelektrenju v obliki električnega loka

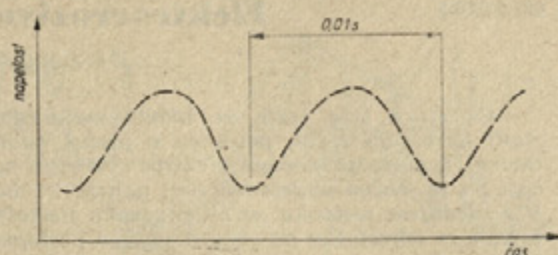
nja. Slika 2 predstavlja shemo takega kanala. Velikost anodnega in katodnega žarišča je različna, tako da je gostota toka na katodi mnogo večja kakor na anodi. Po podatkih nekaterih avtorjev znaša gostota toka na katodi 500 A/cm² in tudi več. Po Meeku (1) bi pri toku z jakostjo 250 A povzročila ta gostota temperatura okrog 4000 °C, kar je ugotovljeno tudi eksperimentalno.

Pri napravah, ki delujejo po tem načelu, je elektroda (orodje) nameščena v posebni nihajni glavi, ki povzroča hitro in neprekinjeno nihanje elektrode v vertikalni smeri, tako da se ta s frekvenco nihajne glave izmenično dotika obdelovanca ter pri odmaknitvi povzroča nastanek električnega loka.

Slika 3 predstavlja shemo in osnovno vezavo metode z razelektrenjem v obliki električnega loka. Predmet leži na osnovni plošči, in sicer na dnu posode, ki je napolnjena z dielektrično tekočino (petrolejem, oljem). Na vertikalnem vodilu drsi prečka, ki nosi nihajno glavo z elektrodo. Zgornja elektroda je orodje, spodnja pa predmet, ki ga obdelujemo. Obe elektrodi priključimo na omrežje, in sicer z enim polom preko usmernika, z drugim preko upora, ki je vključen v tokovni krog. Časovni potek napetosti med elektrodo in obdelovancem pred nastankom električnega loka prikazuje slika 4. Iz oscilograma na sliki 5 pa je razviden potek napetosti med obratovanjem, in sicer pri tkzv. normalnem vžigu električnega loka, pri katerem se dotakne elektroda obdelovanca v trenutku, ko je napetost dosegla maksimum. Tako vžiganje daje pri obdelavi najboljše rezultate.

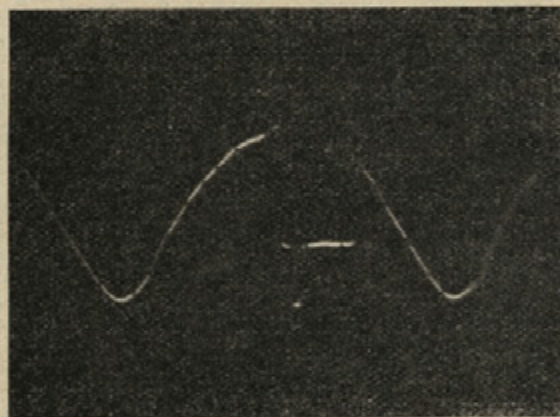


Sl. 3. Shema postopka z razelektrenjem v obliki električnega loka



Sl. 4. Časovni potek napetosti pred nastankom električnega loka

Z vidika elektroerozivne obdelave kovin uporaba stacionarnega ločnega razelektrenja ni tako zanimiva, ker se oblika in relief elektrode zelo pomanjkljivo kaže na obdelovancu. Robovi lukenj se n. pr. stalijo in se termične spremembe v materialu, ki ga obdelujemo, razširjajo v precejšnje globine (1...10 mm). Naprave, ki delujejo po tem načelu, imajo sicer razmeroma dober učinek, natančnost obdelave pa je zelo pomanjkljiva. Uporabljajo se v glavnem za odstranjevanje zalomljenih svedrov.



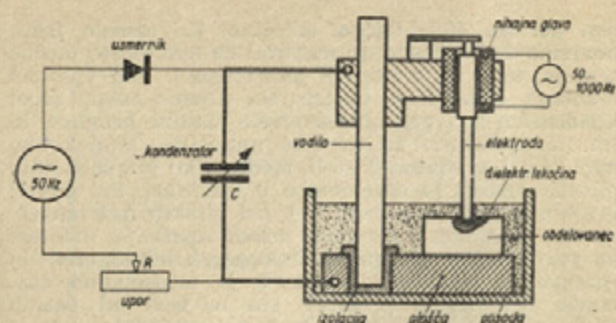
Sl. 5. Časovni potek napetosti med elektrodo in obdelovancem pri normalnem vžiganju električnega loka

2. Razelektrenje v obliki preskoka električne iskre

Za kontinuirno proizvodnjo električnih isker uporabljajo zdaj različne metode. Najbolj razširjena med njimi je metoda zaporednega naelektrenja kondenzatorja, pri katerem se energija, ki se je počasi zbirala, v trenutku izprazni preko tkzv. delovnega tokovnega kroga. Osnovno vezavo te metode je uporabljal že Lazarenko pri svojih začetnih poizkusih. Druga, modernejša metoda proizvaja električne iskre s pomočjo napetostnih impulzov posebnega visokofrekvenčnega generatorja.

Pri prvi metodi sta v rabi dva postopka, ki se razlikujeta predvsem po načinu naelektrenja kondenzatorja. Električna vezava kapacitivnosti in induktivnosti z ohmskim uporom v napajalnem krogu vpliva na način naelektrenja kondenzatorja, ki je lahko aperioidično ali oscilatorno. Metoda z aperioidičnim naelektrenjem kondenzatorja je znana kot postopek R-C (nem. Kippkreisverfahren), ona z oscilatornim naelektrenjem kot postopek R-C-L (nem. Schwingkreisverfahren).

a) Slika 6 prikazuje načelno skico erozivne naprave postopka R-C. Konstrukcija celotne naprave se ne razlikuje od prej opisane naprave, ki deluje po načelu razelektrenja v obliki električnega loka, razlika je le v električni vezavi.

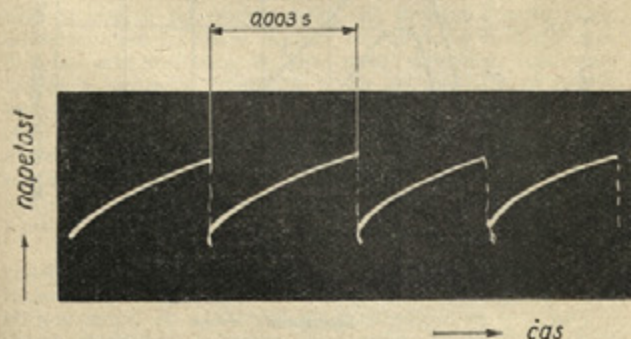


Sl. 6. Shema postopka z vezavo R—C

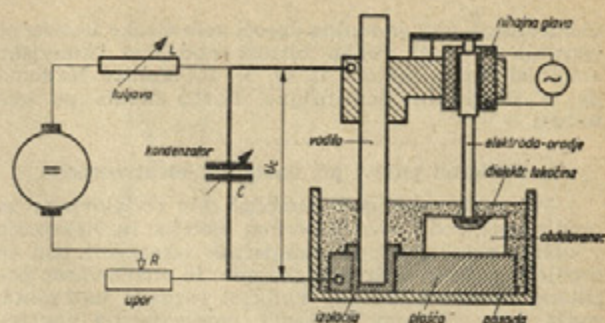
Istosmerno napetost, ki je potrebna med obema elektrodama, dobimo preko usmernika iz omrežja. Paralelno je vključen kondenzator s spremenljivo kapacitivnostjo. Po vklopu se kondenzator naelektri, dokler ni dosežena kritična probna napetost med elektrodo in obdelovancem, ki je odvisna od razstojja obeh elektrod. Razelektrenje se prične s probojem prostora med obema elektrodama, t. j. trenutno spremembo dielektrika, ki izpolnjuje ta prostor, v prevodnik. Proboj v splošnem ne traja dlje kakor $(1 \dots 1,5) \cdot 10^{-7}$ s. Ko je bil izvršen proboj vmesnega prostora, pade napetost na minimum in ker je upornost prebitnega vmesnega prostora zelo majhna, nastane v tokovnem krogu, v katerem teče razelektrenje, močan tok. Če je moč izvora energije omejena, je razelektrenje preko tega kanala po kratkem močnem tokovnem sunku prekinjeno, tako da ne preide v stacionarni električni tok. Napetost nato ponovno naraste do potenciala, pri katerem se pojavi razelektrenje, in pojav se ponovi. Nastanek in trajanje razelektrenja sta odvisna od razmer v prostoru med elektrodama. Časovni potek napetosti je razviden iz oscilograma na sliki 7. Čas med dvema zaporednima razelektrenjima je odvisen od napetosti na elektrodah in kapacitivnosti kondenzatorja. Giblje se med $0,03 \dots 0,001$ s., kar ustreza frekvenci okrog $0,3 \dots 1$ kHz. Ta čas je treba še razdeliti v čas, ki je potreben za naelektrenje kondenzatorja, in čas razelektrenja, ki znaša le zelo majhen del časa za naelektrenje.

b) Pri postopku z vezavo R-C-L (metoda TVS Aachen), ki je shematično prikazan na sliki 8, je dodatno vključena v tokovni krog še induktivnost, tako da nastane električni nihajni krog. S spreminjanjem kapacitivnosti in induktivnosti je možno krmiliti frekvenco nihajnega kroga in s tem frekvenco iskrenja (razelektrenj) v območju do 50 kHz.

Slika 9 prikazuje oscilogram časovnega poteka napetosti, iz katerega je razvidno, da povzroči dotik elektrod dušenje nihanje, ki po odmiku elektrode zopet pojema in se nato zopet pojavlja. Iz posnetka je raz-



Sl. 7. Časovni potek napetosti pri iskrnem razelektrenju v tokovnem krogu z vezavo R—C



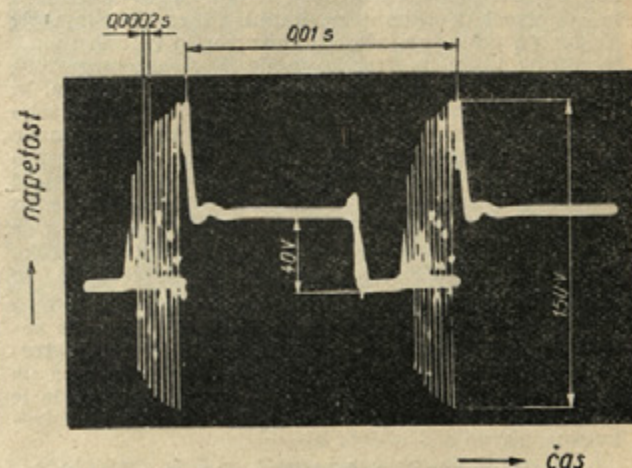
Sl. 8. Shema postopka z vezavo R—C—L (nihajni krog)

vidno, da znaša frekvenca iskrenja 5 kHz, da pa so kljub izredno kratkim časovnim presledkom posamezni preskoki električnih isker eksaktno ločeni med seboj, t. j. da se kanal, v katerem se izvrši razelektrenje, vedno delonizira. Karakteristika naraščanja napetosti je mnogo strmejša in energija posameznih razelektrenj večja kakor pri prej opisanem postopku (sl. 6). Razumljivo je, da so pri tako visokih frekvencah preskoki električne iskre časovno mnogo krajši, posledica pa je, da je območje ogretja površine obdelovanca znatno manjše, kar je za obdelavo bistvene važnosti.

Napetost izvora električne energije je lahko tudi izmenična, pri čemer potekajo razelektrenja v odvisnosti od polaritete polperiode, izmenično od orodja k obdelovancu in obratno. Z izrabo obeh polperiod se dajo doseči zelo visoke frekvence iskrenja. Naprave Agietron, ki uporabljajo to načelo, delajo s frekvencami do 200 kHz.

Pri obeh metodah razelektrenja z iskrenjem je mehanično nihanje elektrode lahko odveč, če deluje regulacija podajanja elektrode dovolj natančno in brez vztrajnosti. Vsekakor pa se je izkazalo nihanje elektrode pri izdelavi natančnih izvrtin kot zelo koristno.

c) Pri metodi z impulznim iskrenjem proizvaja visokofrekvenčni generator kratke impulze, katerih napetost in frekvenco je možno spreminjati. Napetostna karakteristika teh impulzov je zelo strma, kar ima za posledico zelo nagel nastop razelektrenja, ki pa s prekinitvijo impulza zopet preneha. Tokovni krog razelektrenja mora imeti čimmanjšo induktivnost, ki sicer zavira hitro naraščanje toka in s tem zmanjšuje možnost hitre zgraditve kanala, ki je važen za razelektrenje. Karakteristično za to metodo je, da sta pojav in trajanje razelektrenja precej neodvisna od fizikalnih razmer v prostoru med obema elektrodama. Z uporabo

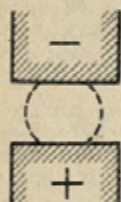


Sl. 9. Časovni potek napetosti pri iskrnem razelektrenju v tokovnem krogu z vezavo R—C—L (nihajni krog)

elektronskih cevi je možno doseči zelo visoke frekvence iskrenja in tudi veliko hitrost obdelave. Ameriška »Method X« in metoda C. N. R. C. (Centre National de la Recherche Scientifique, Pariz) delata po tem načelu.

3. Fizikalni pojavi pri nastanku elektroerozije

Pri vseh omenjenih metodah sta obdelovanec in orodje elektrodi, med katerima poteka razelektrenje v obliki preskakovanja električnih isker. Pri tem je orodje negativna elektroda (katoda) in obdelovanec pozitivna elektroda (anoda). Velikost razdalje med njima znaša 0,01...0,1 mm. Nastanek razelektrenja povzročajo elektroni, ki se zaradi velike jakosti električnega polja v prostoru med obema elektrodama odtrgajo od katode in z veliko hitrostjo gibljejo proti anodi. Proboj vmesnega prostora nastane najprej med dvema najbližjima točkama anode in katode, ker je tam koncentracija električnega polja največja. Zaradi erozije, ki jo povzroči iskra, se razdalja med orodjem in obdelovancem na tem mestu poveča in naslednja iskra preskoči med dvema drugima najbližnjima točkama elektrode in obdelovanca. Posebna regulacijska naprava posreduje ustrezajoče primikanje elektrode, tako da lahko poteka proces kontinuirno. Ker se nosilci električnih nabojev gibljejo v smeri električnega polja, nastane med elektrodama prevodni kanal z zelo majhnim premerom, v katerem se izvrši razelektrenje. Elektroni, ki udarijo na koncu kanala z veliko hitrostjo na površino anode, povzročijo zelo močno ogretje in izparitev materiala. Temperature, ki nastajajo v električni iskri, so mnogo višje kakor pri električnem loku. Razen tega izpari iskra material na pozitivni elektrodi v zelo kratkem času in strogo lokalizirano, praktično v eni sami točki.



Sl. 10. Shema kanala pri iskrnem (impulznem) razelektrenju

Povrh visokih temperatur pa je za impulzno razelektrenje značilen tudi nastanek zelo velikih tlakov, ki delujejo na udarno mesto iskrnega impulza. V momentu proboja se vsa energija, ki je zbrana na elektrodah, sprosti preko omenjenega kanala na površini anode in povzroči z gibanjem impulz toka. Nastajajoče magnetno polje še ojačuje koncentracijo velikih tlakov in njihov vpliv na erozijo anode. Visoke temperature v električni iskri so posledica velike gostote toka, ki vlada v zelo ozkem kanalu razelektrenja. Gostota toka na katodnem in anodnem žarišču je praktično enaka in oblika kanala drugačna kakor pri razelektrenju v obliki električnega loka (sl. 10). Meek (1) je izračunal gostoto 29 000 A/cm² pri toku 250 A. Temperature, ki nastajajo pri tej gostoti, so seveda izredno visoke, se pa po podatkih raznih avtorjev precej razlikujejo. Tako navaja RUDORFF (2) 12 000 °C in HINNÜBER (3) celo 50 000 °C.

Ker je gostota toka v iskri funkcija časa, se zaradi hitrega povečanja prereza iskre med razelektrenjem gostota toka znatno zmanjša. Posledica tega pa je tudi padec temperature v iskri. Iz tega izhaja, da je za elektroerozivno obdelavo potrebna čimvišja frekvenca iskrenja.

Toplotna energija električne iskre se pri preskoku med elektrodo in obdelovancem pretvarja na različne načine. Zaradi prevodnosti in izžarevanja preide maj-

hen del na dielektrično tekočino. Ko zadene iskra površino obdelovanca, se material na tem mestu močno segreje, tako da v zgornji plasti izpari. Pod vplivom tekočega dielektrika ta izparela kovina takoj zopet kondenzira in tvori mikroskopsko majhne kroglice, ki jih lahko imamo za odrezke materiala. V nekoliko nižji plasti se material stali, medtem ko je v še globlji plasteh opaziti le spremembe v strukturi. Pri dovolj kratkih iskrnih impulzih, t. j. pri visokih frekvencah, erodira material v glavnem zaradi izparjenja, medtem ko prevladujeta pri nizkih frekvencah talilni efekt in sprememba strukture. Nastanek in medsebojno razmerje teh delnih pretvorb sta odvisna od raznih faktorjev. Predvsem imajo lastnosti materiala obdelovanca velik vpliv na razmerje med temi conami ozir. na način erozije. Po kvaliteti površine in obliki razpršenih delcev materiala lahko tudi sklepamo na potek erozije. Pri nizkih frekvencah se pri določenih materialih pojavljajo močni talilni efekti, ki pri višji frekvenci izginjajo. Z zvišanjem frekvence razelektrenja pa se izboljšuje tudi površina obdelane ploskve. Zaradi izredne kratkotrajnosti iskrnih impulzov je celotno ogretje elektrod pri erozivnih postopkih z iskrnim razelektrenjem neznatno in običajno ne presega 30 do 40 °C. Natančnost obdelave je največja, če poteka razelektrenje v dielektrični tekočini. Pri tem je erozivni učinek odvisen od termičnih in tehnoloških konstant materiala elektrod kakor tudi od karakteristike električne vezave. Erozivni učinek in kvaliteta površine sta odvisna tako od frekvence iskrenja kakor tudi od energije posameznih iskrnih impulzov.

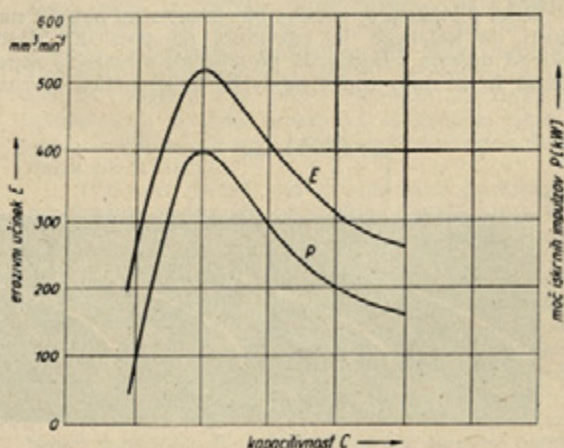
4. Vplivne veličine in tehnološke značilnosti

Električne veličine, kakor n. pr. trajanje, amplituda in potek tokovnega impulza pri razelektrenju, jakost električnega polja med elektrodama in druge, imajo precejšen vpliv na rezultate pri obdelavi. Zelo važen faktor je tudi stalna izmenjava dielektrika, ki preprečuje nastanek prezgodnjega vžiga in nastanek električnega loka.

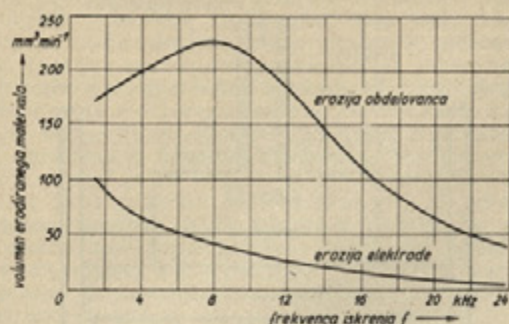
Da bi lahko ocenili uporabnost elektroerozivne naprave, je treba predvsem vedeti, kakšne rezultate lahko pričakujemo pri obdelavi, in sicer glede na

- erodivni učinek,
- hitrost obdelave,
- natannost obdelave (tolerance) in
- kvaliteto površin.

Že prve raziskave na tem področju so pokazale določene zakonitosti pri nastanku elektroerozije. Predvsem so zanimale raziskave odvisnosti erozivnega učinka od električnih parametrov in zveze med frekvenco



Sl. 11. Zveza med erodivnim učinkom in močjo iskrnih impulzov



Sl. 12. Razmerje med erozijo obdelovanca in orodja. (Karakteristika elektroerozivne naprave 13,5 kW, TVS Aachen.) Elektroda: baker $\varnothing$ 20 mm, material obdelovanca: kaljeno jeklo C 60

iskrenja, napetostjo in tokom ter stalnimi pojavi na elektrodi in obdelovancu pri elektroerozivnem procesu obdelave. Studij elementarnega poteka iskrnega impulza je pokazal, da je erozivna moč posamezne iskre funkcija energije tokovnega sunka. Le del te energije, ki je pred preskokom električne iskre naploščena v kondenzatorju, se izkoristi za erozijo materiala. Celotno energijo, ki je na razpolago za erozijo materiala, lahko jemljemo kot vsoto energij posameznih iskrnih impulzov.

Tedaj je moč iskrnih impulzov

$$P = f \cdot C \cdot \frac{U^2}{2} \cdot x$$

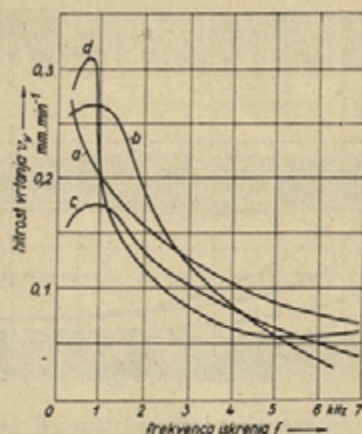
Pri tem pomenijo: f — frekvenco iskenja, C — kapacitivnost kondenzatorja, U — probojno napetost, x — faktor, ki upošteva izgube.

Iz tega izvira, da je delovna moč erozije proporcionalna energiji, ki smo jo dovedli iskrišču. Da je navedena moč sorazmerna količini erodiranega materiala, je dokazano eksperimentalno (4). Diagram na sliki 11 predstavlja po zgornji enačbi dobljene vrednosti za moč iskrnih impulzov in merjen erozivni učinek 13,5 kW elektroerozivne naprave laboratorija za obdelovalne stroje TVS v Aachenu. Potek krivulj kaže absolutno proporcionalnost v območju preizkusa.

Posamezni členi gornje enačbe so medsebojno odvisni in jih je možno spreminjati. Frekvenca iskenja je odvisna od kapacitivnosti C , probojne napetosti U , ohmske in induktivne upornosti tokovnega kroga, v katerem teče razelektrenje, ter izvedbe napajalnega tokovnega kroga.

Poizkusi so nadalje pokazali določeno odvisnost erozije obdelovanca, obrabe elektrode in hrapavosti erodirane površine od frekvence iskenja. Na sliki 12 je prikazana karakteristika 13,5 kW erozivne naprave v Aachenu. Diagram prikazuje razmerje med erozivnim učinkom na obdelovancu in orodju v odvisnosti od frekvence iskenja. Kakor je razvidno iz diagrama, doseže erozivni učinek pri neki določeni frekvenci iskenja največjo vrednost, ki se pri manjših in večjih frekvencah močno zmanjša. Ta tendenca obstaja v bistvu pri vseh preizkušanih kombinacijah materialov obdelovanca in orodja. Potek krivulje, zlasti maksimalna vrednost erozije, sta seveda odvisna od konstrukcije erozivne naprave in njene moči. Tudi lastnosti materialov imajo znaten vpliv.

Krivulja obrabe elektrode ima drugačno karakteristiko in pada asimptotično z naraščajočo frekvenco. Razmerje med količinama erodiranega materiala na obdelovancu in elektrodi je najugodnejše v območju višjih frekvenc. Obraba elektrode, ki je prav tako kakor obdelovanec izpostavljena eroziji, je važna tehnološka pomanjkljivost tega načina obdelave. Zlasti

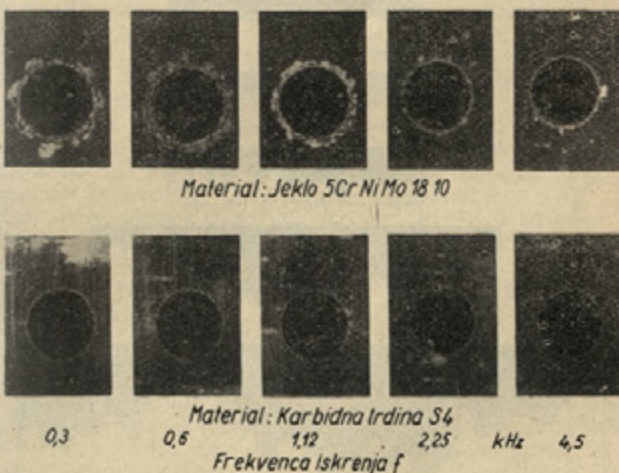


Sl. 13. Odvisnost hitrosti obdelave od frekvence iskenja. Elektroda: med $\varnothing$ 1 mm, napetost 40 V, tok 0,2 A. Material obdelovanca: a) 12 CrNi 18 8, b) 5 CrNiMo 18 10, c) karbidna trdina S4, d) PMC + Ti (močno legirano CrNiMo-jeklo z dodatkom titana in vanadija)

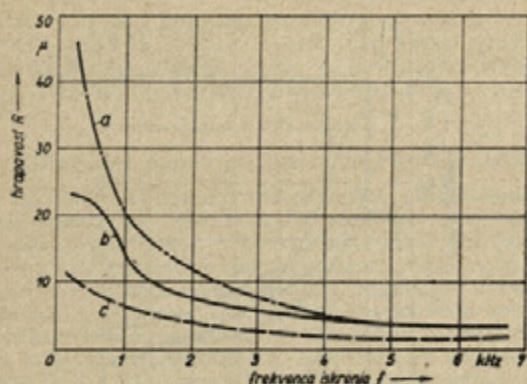
pri natančni obdelavi je erozija elektrode zelo nezaželena in jo je treba reducirati na minimum. Na robovih in ostrinah elektrode, kjer so silnice električnega polja, ki vlada med obdelovancem in elektrodo, najbolj zgoščene, orodje hitro izgublja prvotno obliko. Posebno škodljivo je tkzv. vzvratno vžiganje (sprememba polaritete pri razelektrenju), pri katerem teče proboj električne iskre v obratni smeri (od obdelovanca k orodju), kar ima za posledico precej večjo obrabo elektrode. Z ustreznimi ukrepi in v določenih delovnih pogojih je možno preprečiti ta pojav in zmanjšati obrabo elektrode. Zaželeno je seveda, doseči najmanjšo obrabo orodja pri hkratnem maksimalnem učinku erozije na obdelovancu.

Slika 13 kaže odvisnost hitrosti obdelave od frekvence iskenja za različne materiale, in sicer pri elektroerozivnem vrtenju. Iz poteka krivulje je razvidno, da velja za vsak material neka karakteristična optimalna frekvenca iskenja oziroma da pada hitrost vrtenja pri višjih frekvencah.

Lastnosti materialov pa nimajo vpliva samo na erozivni učinek, t. j. količino erodiranega materiala,



Sl. 14. Izstopni robovi izvrtin, doseženi pri različnih frekvencah obdelave. Elektroda: med $\varnothing$ 1 mm, napetost 40 V, tok 0,2 A. Material obdelovanca: jeklo 5 CrNiMo 18 10 (zgornja vrsta), karbidna trdina S4 (spodnja vrsta)

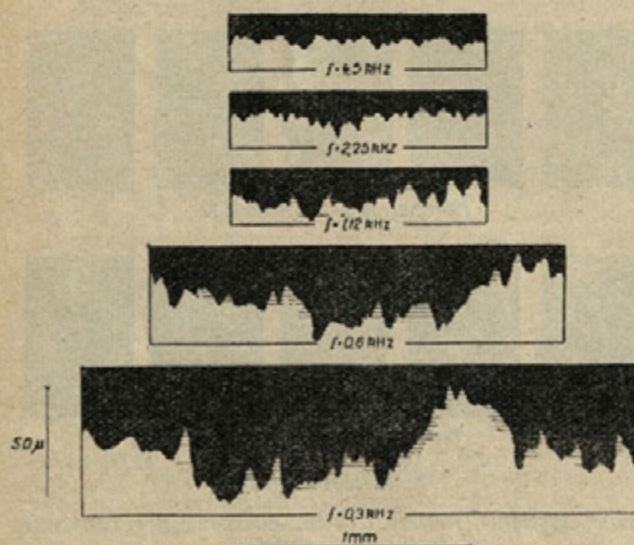


Sl. 15. Odvisnost hrapavosti površine od frekvence iskenja

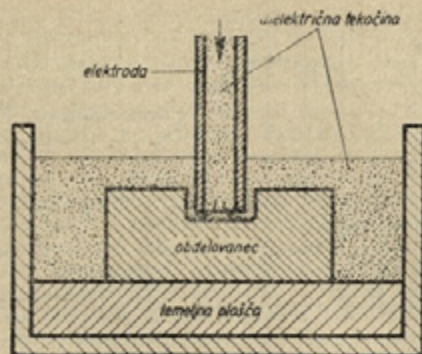
Elektroda: med $\varnothing$ 1 mm, napetost 40 V, tok 0,2 A
Material obdelovanca: a) 12 CrNi 18 8, b) 5 CrNiMo 18 10, c) karbidna trdina S 4

temveč tudi na način erozije. Slika 14 prikazuje izstopne robove lukenj, ki so bile izvrtane v dveh različnih materialih pri različnih frekvencah iskenja. Pri jeklu 5 CrNiMo 18 10 je viden n. pr. pri frekvenci 0,3 kHz močan pojav taljenja, ki pri višji frekvenci pojema oziroma izgine. Pri tem ima veliko vlogo talilna temperatura materiala za obdelavo.

Podobno kakor erozivni učinek lahko prikažemo tudi kvaliteto obdelane površine kot funkcijo frekvence iskenja; slika 15. Kakor je že omenjeno, je hrapavost površine odvisna od velikosti žrel, ki jih povzročajo iskre v površini materiala. Hrapavost površine se zmanjšuje z višjo frekvenco. Če hočemo doseči zelo gladko površino, je treba torej uporabljati čimvišje frekvence. Upoštevati pa je treba pri tem, da se obenem zmanjša erozivni učinek, t. j. količina erodiranega materiala na obdelovancu, kakor je razvidno iz zgornje krivulje na sliki 12. Tudi lastnosti materiala, ki ga obdelujemo, so velikega pomena. V splošnem dajejo materiali z visokim tališčem in slabšo prevodnostjo (n. pr. karbidne trdine) boljšo površino. Leitz-Forsterjev diagram na sliki 16 podaja konkreten primer hrapavosti elektroerozivno obdelane površine pri različnih frekvencah.



Sl. 16. Leitz-Forsterjev diagram erozivno obdelane površine. Material obdelovanca: jeklo 12 CrNi 18 8



Sl. 17. Načelo izplakovanja skozi elektrodo

Razelektrenje pri elektroerozivnem procesu obdelave vpliva tudi na strukturo materiala, ki ga obdelujemo. Sprememba strukture na površini obdelovanca je pri obdelavi običajno nezaželen pojav, zlasti tam, kjer se trdota površine zmanjša zaradi pojavov popuščanja. Pri pravilni izbiri delovnih pogojev pa se da doseči ponovno povečanje trdote površine, če je hladilni učinek dielektrične tekočine zadosten. V zvezi s tem bi pristavil, da je v razvoju tudi nov postopek za delno kaljenje površin s pomočjo iskrnih razelektrenj.

Velik vpliv na zvezo med posameznimi veličinami gre tudi izplakovanju, t. j. dovajanju sveže dielektrične tekočine na kraj procesa erozije. Nečista dielektrična tekočina zaradi nastanka ionizacije ovira pravičen potek razelektrenj in zmanjšuje erozivni učinek. Preko plinskih mehurčkov in delcev izparelega materiala nastajajo nepravilna razelektrenja, ki znatno zmanjšujejo izkoristek.

Pri obdelavi z višjo frekvenco grozi tudi nevarnost, da pri večjih globinah vrtnanja in majhnih premerih elektrode ne more več prodreti zadostna količina dielektrične tekočine do mesta erozije. Posledica tega je, da posamezni preskoki električne iskre niso več eksaktno ločeni med seboj, t. j., da ni več pravilne deionizacije vmesnega prostora, kar povzroča lahko celo nastanek električnega loka. V tem primeru se na mestu, kjer je nastal električni lok, takoj poslabša površina in zmanjša natančnost obdelave. Po tem vidiku ima veliko prednost votla elektroda, pri kateri je možno dielektrično tekočino dovajati pod tlakom na kraj erozivnega procesa. Tako je v prostoru med obema elektrodama, t. j. med orodjem in obdelovancem vedno dovolj dielektrične tekočine, ki odnaša s seboj tudi delce izparelega materiala. Hkrati se seveda hladi tudi elektroda. Slika 17 prikazuje načelo izplakovanja skozi elektrodo.

Vpliv izplakovanja na kvaliteto obdelane površine podaja slika 18, ki prikazuje Leitz-Forsterjev posnetek površine za dva različna materiala, ki sta bila obdelana z enako frekvenco, zdaj z izplakovanjem in zdaj brez njega. Lahko je spoznati znatno zmanjšanje hrapavosti pri obdelavi z izplakovanjem skozi elektrodo. Iz tega izhaja, da je z izplakovanjem možno doseči znatno boljše površine. Pri zelo natančni obdelavi je priporočljivo izplakovanje v obratni smeri, tako da se dielektrična tekočina odvaja skozi votlo elektrodo in pri tem vleče s seboj delce materiala, katerih prisotnost v prostoru med obema elektrodama zmanjšuje natančnost obdelave.

5. Regulacija razstoj elektrod in avtomatično pristavljanje

Za kontinuirno in enakomerno obdelavo z elektroerozijo je potrebna avtomatična in eksaktna regulacija razdalje med obema elektrodama, t. j. med obdelovancem in orodjem. Velikost pristavljanja elektrode je odvisna od hitrosti obdelave, ki pa je tudi v tesni zvezi

s količino dovedene energije, obliko in velikostjo elektrode, obrabo elektrode in drugim. Ker mora med elektrodo in obdelovancem vedno obstajati določena razdalja, čeprav zelo majhna, mora hitrost pristavljanja elektrode biti neposredno odvisna od parametrov, ki določajo potek erozivnega procesa. Za regulacijo tega gibanja je več možnosti. Kot krmilni organ služi lahko srednja obratovalna napetost ali delovni tok pri raz-elektrenju. Sprememba ene ali druge vrednosti služi kot signal za krmiljenje servomehanizma, ki potem avtomatično upravlja pristavljanje elektrode. Po tej poti je možno doseči zelo precizno regulacijo razdalje med obdelovancem in elektrodo. Servomehanizem lahko deluje elektromehanično, elektrohidravlično ali pa elektropnevmatično.

II. PRAKTIČNA UPORABNOST ELEKTRO-EROZIVNE OBDELAVE

Nekatere posebne lastnosti, kakor n. pr. možnost za krmiljenje poteka obdelave s spreminjanjem električnih parametrov (R, C, L), dalje možnost za obdelavo kovinskih materialov poljubne trdote in talilne temperature ter možnost za prenašanje obrisov elektrode-rodja z zadostno natančnostjo na obdelovanec, dajejo tej metodi obdelave izredne tehnološke sposobnosti.

Metoda elektroerozivne obdelave omogoča predvsem

1. ekonomično in hitro obdelavo kaljenih in močno legiranih jekel, karbidnih trdin vseh vrst ter nekaterih posebno trdih in žilavih kovinskih materialov, ki se sicer le težko obdelujejo,

2. avtomatizacijo in mehanizacijo težkih ročnih delovnih operacij pri izdelavi orodij (utopov, form za stiskanje, štanc itd.) iz kvalitetnih materialov,

3. odstranitev vplivov termične obdelave za končno obliko predmeta,

4. močno zmanjšanje mehaničnih obremenitev pri odrezovanju in vpenjanju pri izdelavi preciznih konstrukcijskih elementov,

5. velik prihranek na dragih materialih in znatno zmanjšanje stroškov za orodja v primerjavi z metodami mehanične obdelave,

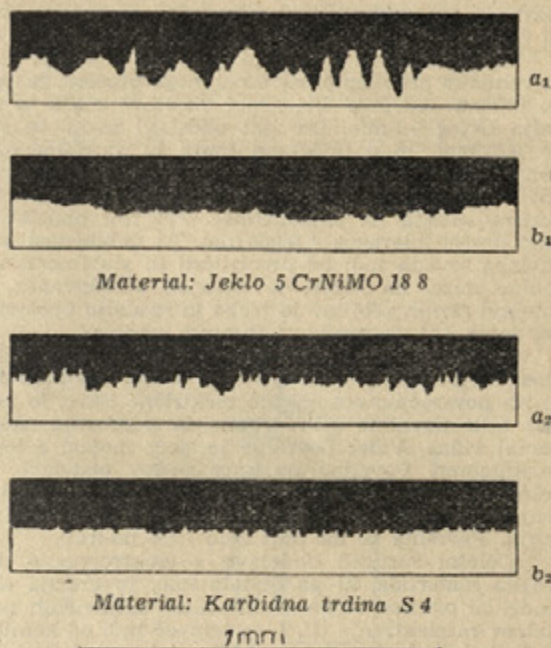
6. uporabo najkvalitetnejših materialov pri izdelavi zapletenih delov za stroje, aparate, instrumente itd.,

7. uvajanje nekaterih delovnih operacij, ki so bile do sedaj izvedljive le ob uporabi posebnih in zelo zamudnih obdelovalnih metod.

V primerjavi z nekaterimi dosedanjimi načini obdelave so prednosti elektroerozivne metode pri mnogih operacijah znatne, ker je ta metoda nov tehnološki proces, ki daje nove možnosti za konstruktivno oblikovanje najrazličnejših delov.

Kljub številnim prednostim pa obstajajo pri elektroerozivni obdelavi še tehnične in tehnološke težave, ki omejujejo območje uporabnosti te metode. Upoštevati je treba predvsem dve pomanjkljivosti, t. j. majhen erozivni učinek ter znatno obrabo elektrode — orodja. Podobno kakor pri ostalih konvencionalnih načinih obdelave izražamo erozivni učinek s količino erodiranega materiala v časovni enoti, in sicer mm^3/min . Po podatkih raznih tovarn znaša erozivni učinek standardnih tipov pri večjih napravah z močjo do 15 kW okrog 500...800 mm^3/min pri obdelavi jekla ter okrog 80...100 mm^3/min pri obdelavi karbidnih trdin. V primerjavi z rezultati pri metodah obdelave z odrezovanjem kaže ta minimalni učinek jasno, da je elektroerozivni način obdelave ekonomičen samo pri obdelavi zelo trdih materialov in določenih delovnih operacijah.

Druge važna tehnološka pomanjkljivost je že omenjena obraba orodja, ki je prav tako kakor obdelovanec izpostavljen eroziji. Erozijske elektrode-rodja lahko izrazimo v mm^3/min , običajno pa se označuje v odstotkih erodiranega volumena obdelovanca. Medtem ko so starejše naprave delale z močno obrabo elektrode (100 % in več!), je uspelo zdaj v določenih delovnih pogojih reducirati obrabo elektrode pri nekaterih napravah na 15 do 10 %. Vsi ti podatki pa ne dajejo



Sl. 18. Vpliv izplakovanja elektrode na kvaliteto površine obdelovanca. a_1, a_2 — brez izplakovanja; b_1, b_2 — z izplakovanjem

Material obdelovanca: jeklo 5CrNiMo 18 8 (zgoraj — a_1, b_1), karbidna trdina S 4 (spodaj — a_2, b_2)
Razmerje povečave (globina: dolžina) = 10 : 1

pravilne slike o sposobnosti in ekonomičnosti erozivnih naprav, če obenem ne upoštevamo tudi ostalih vplivnih veličin, pri čemer ima zlasti kvaliteta površine veliko vlogo. Diagrami na sl. 12, 13, 15 in 16, ki prikazujejo medsebojne odvisnosti med erozivnim učinkom, obrabo elektrode, frekvenco iskenja in kvaliteto površine, so le del rezultatov pri preizkušanju določenih erozivnih naprav. V splošnem dajejo posamezni postopki zelo različne rezultate, pa tudi naprave, ki delajo po enakem postopku, nimajo vedno enakih karakteristik.

Iz teh ugotovitev izhaja, da je primerjava posameznih tipov erozivnih naprav in podatkov o erozivnem učinku ter kvaliteti površine možna le ob hkratnem upoštevanju pogojev, v katerih so ti rezultati doseženi. Tako je n. pr. pri obdelavi kaljenega jekla možno doseči mnogo večje erozivne vrednosti kakor pri obdelavi karbidnih trdin. Hkrati pa se daje v enakih pogojih pri obdelavi karbidnih trdin doseči boljše površine kakor pri kaljenem jeklu.

Važen faktor pri presoji praktične uporabnosti elektroerozivne obdelave sta med drugim merska in oblikovna natančnost, ki ju lahko dosežemo. Pri tem pomeni ravno obraba elektrode problem, ki mu je treba pripisati veliko pozornost. Ostri robovi in zareze na orodju so izpostavljeni večji obrabi kakor pa n. pr. ravne ploskve. Tudi oblika obdelovanca in velikost obdelovalne ploskve sta važna činitelja. Natančnost obdelave je možno znatno izboljšati z večkratnim menjanjem elektrode, kar seveda neogibno privaja do povečanja časa za obdelavo.

Kakor pri ostalih obdelovalnih postopkih lahko tudi pri elektroerozivnem načinu ločimo stopnjo obdelave n. pr. v grobo, srednjo in fino. Z ustreznimi izbiri oziroma spreminjanjem električnih parametrov lahko dosežemo poljubno stopnjo obdelave. Pri grobi obdelavi, kjer je volumen erodiranega materiala velik, dobivamo slabe površine in velike tolerance. Pri fini obdelavi, kjer so potrebne kvalitetna površina in majhne tolerance, se je treba zadovoljevati z razmeroma

majhnim erozivnim učinkom in ustrezno večjim časom za obdelavo.

Razdalja med elektrodo in obdelovancem, ki je potrebna za pravilen potek erozivnega procesa, se ravna po načinu obdelave. Pri grobi obdelavi znaša ta razdalja okrog 0,1 mm, pri fini obdelavi manj, in sicer do 0,01 mm. Med obdelavo mora ta razdalja ostati konstantna za celoten profil elektrode, ker je od nje odvisna natančnost obdelave, t. j. natančnost prenosa obrisov orodja na obdelovanec. Pri fini obdelavi se dajo doseči tolerance $\pm 0,005$ mm. Ta natančnost pa je odvisna seveda tudi od preciznosti in stabilnosti vpenjalne mize, na kateri je pritrjen obdelovanec. Pri izdelavi raznih profilov je treba to razdaljo upoštevati, ker mora biti elektroda za to mero manjša.

Kljub temu, da je površina erozivno obdelane ploskve praktično sestavljena iz samih majhnih žrel, ki jih povzročajo posamezne električne iskre, je znanost take površine zelo drobna in s prostim očesom komaj vidna. Videz površine je sicer moten, a lep in enakomeren. Površina ne kaže sledov obdelave, kakršne poznamo n. pr. pri struženju, frezanju ali brušenju, kar ugodno vpliva na njene lastnosti pri mazanju. Površina se da tudi zelo lepo polirati.

Celotni rezultat obdelave z elektroerozijo, t. j. erozija materiala, ki ga obdelujemo, in erozija elektrode, ni odvisen samo od značilnih električnih parametrov razelektrenja (U , I , t), temveč tudi od kemičnih in fizikalnih lastnosti ter oblike elektrod, kakor tudi od vrste in kemične sestave dielektrika. Vpliv različnih kombinacij materialov obdelovanca in elektrode je bil prikazan že na primeru sl. 12. Izbira materiala za

elektrodo se ravna po materialu obdelovanca, po velikosti in obliki elektrode in deloma tudi po značaju obdelave, t. j. groba ali fina.

V največ primerih se kot material za elektrodo uporablja med ali elektrolitski baker, kolikor ni kakšnih posebnih okoliščin, ki bi terjale drug material (sivo litino, volfram, srebro). Problem pravilne izbire materiala za elektrodo obeta še znatne izboljšave in napredek glede natančnosti ter zmanjšanja stroškov in časa obdelave. Prvi pogoj, da je obraba elektrode čimmanjša, pa je, da mora biti njena izdelava enostavna in dosegljiva s pomočjo rabljenih načinov obdelave in ne sme biti predraga.

Precejšnje vloge pri procesu erozije imajo tudi lastnosti dielektrika. Le-ta mora imeti veliko kemijsko obstojnost in slabo prevodnost, veliko probno trdnost, visoko plamenišče in primerno viskoznost. Dielektrična tekočina mora pospeševati delonizacijo iskrišča po električnem probu, ne sme biti izpostavljena tvorbi škodljivih plinov, ki zavirajo pravilen potek erozije in ne sme povzročati nastanka oksidacije in korozije na površini obdelovanca. Največ so v uporabi petrolej, transformatorsko olje ter mešanice olja in petroleja. Povrh navedenih lastnosti, ki jih je treba upoštevati pri izbiri in uporabi dielektrične tekočine, je važno tudi čiščenje dielektrika, ki je onesnažen predvsem zaradi disperzije kovinskih delcev in kemičnega razkroja. Taka nečista dielektrična tekočina lahko povzroča motnje in prekinitev pri obratovanju.

(Konec prihodnjic)

Avtor: ing. Franc Golobranec, Oddelek za strojništvo Univerze v Ljubljani

DK 621.71:389.6

Metoda tipizacije v konstruktorsko-projektantski dejavnosti

MARKO KOS

Ne mislim pisati o osnovah, potrebi in ustroju standardizacije kot občeiznanem in priznanem faktorju, ki v najrazličnejših industrijskih vejah standardizira in enači osnovne elemente, s katerim konstrukter gradi. Njena vloga je zdaj že priznana in uzakonjena v državnem merilu. Uporabljamo jo vsi pri vsakdanjem delu, ne da bi se globlje spuščali v sestavo in osnove njenih vrst. Načela, po katerih je sestavljen tolikšen aparat, kolikoršne je na primer ogromni sklop nemških standardov DIN, posegajo v vse veje gospodarstva. Povrh državnih standardov so znani tudi standardi, veljavni v ožjih območjih, v posameznem podjetju. Ti standardi so izdelani bodisi za posamezne elemente (n. pr. specialni vijak, ki se mnogo uporablja v podjetju, a še ni zajet v državnem standardu) ali pa obsegajo posamezne izdelke v celoti. Ker jih enačijo v okviru podjetja na nekaj tipov, govorimo tedaj o tipizaciji, ki ima v podjetju samem vrednost standarda, ki ga brez posebnega dovoljenja ne sme nihče kršiti. Potreba po tipizaciji se ne pojavlja pri eni sami velikosti izdelka, marveč samo tam, kjer je glede na parametre stroja potreben večji obseg, večje število velikosti tega stroja. Ker računamo s porabo stroja brez omejitve, to je v raznih velikostih, ne da bi mogli natanko določiti dejanske potrebe, sta možni samo dve poti.

Prva je pot, po kateri stroj sproti prilagajamo določeni velikosti parametra, pri čemer pa ni mogoče pričakovati, da bi bil stroj vselej enak po videzu in bi imel enaka razmerja dimenzij, kajti vsakokrat ga ne bo gradil isti človek, drug pa ga bo oblikoval po svoji presoji in okusu, pa čeprav z enakimi elementi. Prostorske dimenzije se za doseg istega smotra lahko oblikujejo različno: zobnik bo prenašal enako moč, če bo širši, a manjši ali ožji z večjim premerom ali pa manjši z boljšim materialom.

Druga pot, ki je tudi na izbiro, pa je, da izdelamo vrsto teh strojev po določenem zaporedju, pri čemer

so si vsi stroji podobni, to je v enakem sorazmerju. Če delamo pri tem po določenem teoretičnem postopku, ne da bi vsakega posebej konstruirali, smo v primeri s prvim načinom ogromno prihranili na konstruktorskih urah, se pravi, da smo delo racionalizirali. A ne samo to! Projektant bo pri svojem delu brez zamude časa vgradil potrebno velikost stroja, kalkuliral bo lahko že vnaprej izdelal ceno in pripravil za prodajo kataloge, normski biro pa normaliziral postopke, kolikor ne bo stroj pri nekem trajnem in nepretrganem odjemu lahko izdelan kar na zalogo. Pri tem pa je treba poudariti bistveno: če se je konstrukter pri določanju vrste ravnal po nekem zakonu, tedaj bo ta zakon negibno prihajal do izraza v isti osnovni zakonitosti pri cenah, normah po času, količinah materiala itd. V naslednjem nekaj primerov!

Tipizacijo bi lahko opredelili nekako takole: tipizacija je notranja težnja v podjetjih, da bi zajeli izdelovanje s tipskimi modeli v standardnih vrstah v urejen in smiselni sistem. Tipizacija je bistvena veja standardizacije, ki lahko sčasoma preraste ozke okvire podjetja in privede do splošne standardizacije za določen predmet. Bistvo tipizacije je določanje, kateri »tipi« industrijskih izdelkov naj veljajo za standard in naj se izdelujejo. Seveda to še ne pomeni omejitve vrst in velikosti industrijskih izdelkov — a hkrati niti ni mogoče zanikati, da to ni zaželena gospodarska posledica tipizacije. S standardom spodbujeno zmanjšanje tipov lahko med izdelovalci ene stroke privaja do povezane izdelave, ugodne posledice pa so pocenjen nakup, pocenostavljena skladiščna zaloga, enakovredna gradiva in enakomerna kakovost dobave.

Splošno stanje tipizacije na evropskem tržišču je nezadovoljivo, kakor je nedvomno razvidno iz zadnjih letnih poročil ECE (Economic Commission for Europe) pri Združenih narodih v Ženevi. Evropa trpi v tem oziru od škodljivih posledic močnih ekonomskih na-