

UDK 621.9.048.4

Elektroerozijska obdelava (EDM) na naših tleh

FRANC ROETHEL

OZNAČBE

f_e	kHz	dejanska frekvenca impulzov
f_p	kHz	($f_p = 1/t_p$) frekvenca impulzov
I	A	srednji tok razelektritve
i_e	A	tok razelektritve
\bar{i}_e	A	poprečen tok razelektritve
\hat{i}_e	A	maksimalni tok razelektritve
i_s	A	tok kratkega stika
l	mm	dolžina obloka
t_d	s	čas zakasnitve vžiga
t_e	s	čas razelektritve
t_i	s	čas impulza
t_o	s	čas intervala
t_p	s	čas cikla (periode)
U	V	srednja napetost razelektritev
U_a	V	anodni padec napetosti
U_c	V	katodni padec napetosti
U_{col}	V	padec napetosti v kanalu plazme
u_e	V	napetost razelektritve
u_{ea}	V	napetost obločne razelektritve
\bar{u}_e	V	poprečna napetost razelektritve
u_i	V	prosta napetost
u_{ti}	V	signal multivibratorja
u_s	V	napetost kratkega stika
V_E	mm ³ /min	obrada elektrode
V_{Ee}	10 ⁻⁶ mm ³	obrada elektrode na impulz
V_W	mm ³ /min	odjem materiala obdelovanca
V_{We}	10 ⁻⁶ mm ³	odjem materiala na impulz
v_d	cm ³ /s	hitrost dielektrika
W_e	Ws	energija razelektritve
τ	—	($\tau = t_i/t_p$) impulzni faktor
ϑ	%	($\vartheta = V_E/V_W \cdot 100$) relativna obraba

1. Uvod

V zadnjih letih se je pojavila v svetu vrsta novih obdelovalnih postopkov. Nekateri med njimi so si utrli pot tudi že na naša tla. Mednje prištevamo predvsem elektroerozijski postopek obdelave trdih gradiv. Mnogo podjetij v Sloveniji ima že lastne elektroerozijske naprave. Med njimi so: Iskra, Titan-Kamnik, Tovarna kovanega orodja — Zreče, Veriga — Lesce, Tovarna avtoopreme — Ptuj in druge. Razlog za tako množično uvajanje tega postopka v našo industrijo je raznovrstnost možnosti uporabe. K elektroerozijski obdelavi štejemo množico postopkov za obdelavo električno prevodnega trdega materiala. Morda lahko trdimo, da je zahteva po prevodnosti edina resna slaba lastnost tega načina obdelave.

Pojav je odkril leta 1866 Joseph Priestly [1]. Ugotovil je prehajanje materiala elektrod v okolico ob električni praznitvi med njima. Ta pojav je imenoval elektroerozijski efekt. Njegove ugotovitve praktično niso izkoriščali. Pojav so začeli resneje preučevati šele v tridesetih letih, ko so raziskovali obrabljanje električnih kontaktov. Kot obdelovalni postopek ga je začel uporabljati ruski zakonski par Lazarenko. Leta 1943 sta prvič objavila rezultate svojih raziskav [2]. V masovni

industrijski proizvodnji so začeli uporabljati postopek šele pred dobrimi desetimi leti. Trdimo lahko, da so največ raziskav na tem področju v začetni fazi razvoja opravili v ZSSR [3]. Informacije so prišle tudi v našo literaturo [1, 2]. O tem je pisal tudi že Strojniški vestnik [4]. V pričujočem sestavku bomo skušali opisati nekatere osnovne značilnosti postopka in navesti nekaj rezultatov naših raziskav.

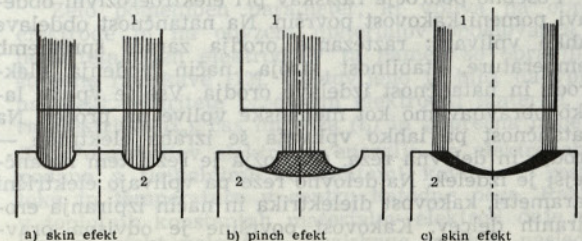
2. Osnovne značilnosti elektroerozijske obdelave

Pri vseh elektroerozijskih postopkih sta obdelovanec in orodje spojena z virom električne energije, delujeta pa kot elektrodi, med katerima teče proces razelektrivanja. Energija v reži med elektrodama se sprošča v obliki toplote, zgoščene v zelo majhni prostornini. Material obdelovanca in deloma tudi orodja se zaradi te toplote zmehta, raztali ali razpade in deloma izpari. Odvzeta prostornina materiala se odstrani mehanično ali elektrodinamično. Na površinah materiala pa ostane erozijski krater. Obdelana površina sestoji iz množice kraterjev, katerih dimenzije ter kemične in fizikalne lastnosti so odvisne od delovnih razmer.

Razelektrjenje med dvema elektrodama lahko povzročamo na več načinov. Najpreprosteje sprožimo proces razelektritve z neposrednim dotikom elektrod. Na tistem mestu se pretvarja energija v glavnem v Jouleovo toploto. Ta način se v praksi ni uveljavil kot obdelovalni postopek. Uporabljamo ga le za vžig obločnih luči in za začetek vzpostavitve električnega obloka pri elektroobločnem varjenju. Pri postopkih odjemanja uporabljamo dandanes iskrni elektroerozijski postopek. Električna energija se prenaša z ene elektrode na drugo z električno iskro skozi dielektrik, ki je med njima. Toploto pridobivamo v kanalu plazme, ki ga povzroči iskra. Iskrni postopek lahko izvajamo na več načinov.

Pri elektroobločnem postopku prestopa električna energija z elektrode na elektrodo z oblokom, impulze pa ustvarjamo mehanično. Dandanes uporabljamo največ iskrni postopek obdelave, kjer vedno električne impulze popolnoma električno. Oba navedena postopka lahko tudi kombiniramo. Pri iskrnem postopku sta elektrodi nameščeni v dielektrični tekočini na medsebojno majhni oddaljenosti. Primerna visoka napetost povzroči električno iskro. Pri razelektritvi odnese električni naboj s površine obdelovanca in deloma tudi orodja določeno količino materiala. Orodje čedalje globlje prodira v obdelovanec in v njem pušča svojo obliko. Elektrode so vedno priključene na vir napetosti, tako da je obdelovanec tista elektroda, ki močneje erodira.

Erozijski krater nastane v treh fazah (sl. 1). V obdobju hitrega porasta in padca toka nastane »skin efekt«. Električno nabiti delci so potisnjeni proti robu



Sl. 1. Nastanek erozijskega kraterja

razelektrivenega kanala. Posledica tega efekta je večja erozija na robu kraterja. V obdobju približno konstantnega toka pa nastane »pinch efekt«. Tok se je zgostil okoli osi razelektritve. Tako je erozija največja v središču kanala razelektritve. S primernim izbiranjem oblike in trajanja impulza dobimo globoke in prostorsko omejene kraterje za grobo vrtnanje in rezanje ali pa plitve površinske z večjo širino, ki jih uporabljamo za fino obdelavo. V zadnjem času so laboratorijske metode raziskav in njihove teoretične obrazložitve dosegle velik obseg [6].

Elektroerozijsko obdelavo uporabljamo za izdelavo orodij in sestavnih delov za konstrukcije, kjer potrebujemo trde materiale, ki bi jih z drugimi običajnimi postopki težko ali sploh ne mogli izdelati. Najbolj pogosto uporabljamo elektroerozijsko obdelavo pri izdelavi:

- kovaških utopov,
- form za plastične mase,
- žigov,
- matric za štancanje,
- vlečnih čeljusti,
- na strojih za vlečenje in izstiskavanje.

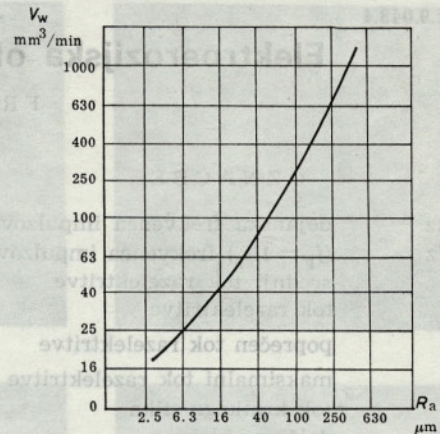
Poleg tega je proces ugoden za obnavljanje ali korekcijo obstoječih orodij, ker jih po obdelavi ni treba ponovno popuščati in kaliti; za popravljanje majhnih napak v legi in smeri pri izdelavi večjih izvrtin, kjer bi bila nevarnost, da orodje zaide v prejšnjo izvrtino, in za odstranjevanje zalomljenih svetrov in vijakov.

V primerjavi z običajnimi postopki obdelave ima elektroerozija številne prednosti:

- a) trdnost in trdota materiala obdelovanca nista odločilni veličini pri obdelavi,
- b) izdelamo lahko zapletene geometrijske oblike, ki bi jih z običajnimi postopki ne mogli,
- c) relativno lahko vrtamo ukrivljene izvrtine,
- d) obdelovanec lahko toplotno obdelamo že pred končnim oblikovanjem na mero.

Orodje med obdelavo ni v fizičnem stiku z obdelovancem in tako ne povzroča notranjih napetosti zaradi plastičnih in elastičnih mehanskih deformacij. Seveda se pa pri tem ne moremo izogniti napetosti, ki se pojavljajo zaradi toplotnih vplivov in ohlajanja. Vendar ima elektroerozijska obdelava tudi svoje slabosti v primerjavi z običajnimi postopki. Navedli smo že, da lahko obdelujemo le električno prevodne materiale. Tudi globoke in ozke izvrtine se težko izdelajo dovolj natančno. Morda največja ovira pri razširjanju te vrste tehnologije pa je reševanje tehnoloških problemov, kjer potrebujemo veliko izkušenj in še več razvojnega in raziskovalnega dela. V primerjavi z običajnimi postopki, bi skoraj lahko rekli, da zahteva elektroerozija nov pristop k načrtovanju tehnološkega postopka glede na značilnosti zahtevanih oblik. Na tej osnovi je tudi težko snovati banke podatkov, ki bi veljale univerzalno za vse oblike in pri katerih bi upoštevali samo lastnosti materiala in druge kinematične, pozicijske in električne značilnosti obdelave, ne pa tudi oblike obdelovancev, ki so lahko v določenih primerih odločilne.

Posebno področje raziskav pri elektroerozijski obdelavi pomeni kakovost površin. Na natančnost obdelave lahko vplivajo: raztezanje orodja zaradi sprememb temperature, stabilnost stroja, način vodenja elektrode in natančnost izdelave orodja. Vse te vplive lahko obravnavamo kot mehanske vplive na proces. Na natančnost pa lahko vplivata še izraba elektrode — orodja in delovna reža. Čim ožja je reža, tem natančnejši je izdelek. Na delovno režo pa vplivajo električni parametri, kakovost dielektrika in način izpiranja erodiranih delcev. Kakovost površine je odvisna pravzaprav od vseh vplivov in razmer pri delu, predvsem pa od vrste električnih impulzov in od odjema. Zato



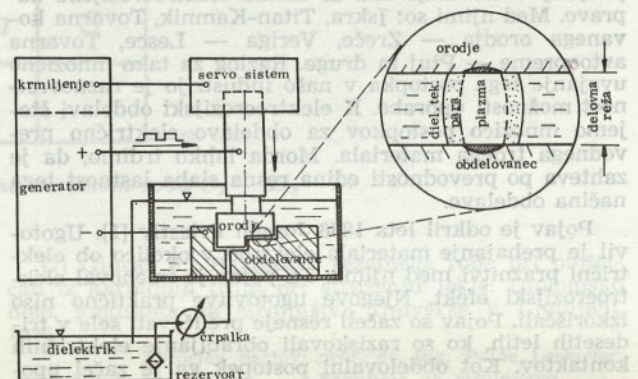
Sl. 2. Odvisnost hrapavosti površine od odvzema

tudi delamo v dveh delovnih fazah kakor pri brušenju. Z grobo obdelavo odvezemo veliko prostornino materiala obdelovanca; v končni fazi pa s finim odjemom zgladimo površino. Razumljivo je, da dosežemo bolj gladko površino s počasnim in preciznim odvzemom (sl. 2). Zaradi visokih delovnih temperatur na mestu električne praznitve in naglega hlajenja z dielektrikom se pojavljajo na površini obdelovanca spremembe. Spremenita se struktura in sestav površinskega sloja. Struktura se spremeni zaradi hitrega segrevanja in ohlajanja, sestava pa zaradi prehoda materiala elektrod.

3. Teoretične fizikalne osnove in izkušnje

Zaradi preprostosti lahko na kratko označimo elektroerozijski proces odvzemanja s kratico, ki jo uporabljajo v anglo-ameriških deželah EDM (*Electro Discharge Machining*). Udomačila se je že po vsem svetu. Po podatkih in teoriji o električnih, termičnih, hidrodinamičnih, aerodinamičnih in termodinamičnih procesih lahko opišemo tudi proces EDM. Za analizo procesa vzamemo enkratni impulz iskre in ugotavljamo potek in odvzem materiala [7, 8].

Pri elektroerozijskem procesu preskakujejo iskre v zelo kratkih intervalih 0,1 do 2000 μs . V reži med obema elektrodama je dielektrik, ki ločuje orodje od obdelovanca (sl. 3). Pri prehodu iskre so elektroni pospeševani v električnem polju od katode proti anodi. Največji pospešek se pojavi na mestu največje jakosti električnega polja, to je tam, kjer je razdalja med elektrodama najmanjša. Na površini elektrod nastane toplotni vir. Sproščena energija je dovolj velika, da močno segreje del površine na mestu močno koncentri-



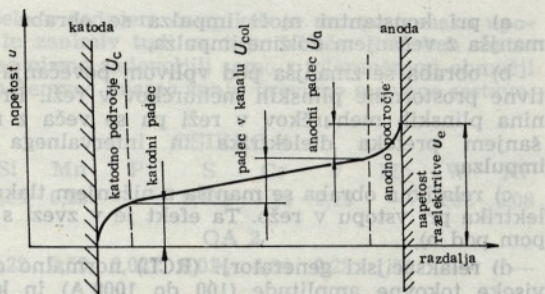
Sl. 3. Elektroerozijski sistem

rane električne energije ter povzroča taljenje in uparjanje drobnih kovinskih delcev. Dovedena energija v obliki impulza povzroča v začetnem času 0,01 do 0,1 μ s povišanje temperature do vrelišča kovine [7]. Energija se prenaša s parami kovine na nasproti ležečo elektrodo. Njena velikost je odvisna od razmerja hitrosti uparjenih delcev in zvočne hitrosti ter od gostote in temperature pare. Proti koncu impulza se pojavi na površini elektrokrode krater, ki je napolnjen z raztaljeno in pregreto kovino. To stanje dobimo na površini elektrode med impulzom (t_i) 10^{-5} do 10^{-3} s. Z zelo hitrimi snemalnimi filmskimi kamerami (do 62 000 slik v sekundi) in na osnovi teoretičnih preračunov so ugotovili, da izpari iz kraterja od 15 do 40 % materiala v primeru, ko odzvem (V_w) doseže svoj maksimum [7, 8]. V ekstremnih primerih lahko upari do 80 % prostornine kraterja, in sicer pri velikih specifičnih tokovih in izredno kratkih impulzih [7]. Razmerje med odvzgom in vloženo toplotno energijo je v tem primeru manjše kakor prej. Vzrok za to je, da je uparjalna toplota veliko večja od talilne toplote. Pri določenih časih impulza je celotna odvzeta prostornina večja od prostornine, odvzete z uparjanjem. Tudi pri kratkih impulzih se ne pojavlja odvzem samo kot posledica uparjanja, temveč so tu še drugi vzroki za odvzem. V okolici kanala plazme se med procesom razvije plinski mehur. Pri porastu toka se plin v prostoru širi, kar pospešuje energija pare iz površine raztaljene kovine. Plinski mehurčki se še hitreje širijo, če tok v kanalu plazme preseže svojo maksimalno vrednost. Dobljeni višek energije še pospešuje rast mehurčka. Pri zmanjšani intenzivnosti uparjanja tlak hitro pade, celo pod atmosferski tlak. Uparjalna temperatura in uparjalni tlak se nižata precej hitreje od temperature na površini kraterja. Padec tlaka povzroča zavretje pregrete kovine v kraterju, nastanek par in izmetavanje drobnih kapljic tekoče kovine. Izmetavanje kovine iz kraterja se v praksi dosega pri časih (t_a), ko se pojavlja maksimalni odvzem pri konstantni W_0 [7].

Tekoča kovina se izloča s površine elektrode zaradi termodinamičnih efektov. Pri zlitinah in kovinah z običajno trdnostjo in plastičnostjo dosežemo to, če jih obdelujemo z električnimi impulzi, ki so daljši od 10^{-6} s. Pri materialih z nizkim tališčem pride lahko do odvzema kovine v trdni obliki pri kratkih impulzih ($t_i < 10^{-6}$ s). V tem primeru pride do odvzema kovine in pojava površinskih napetosti ter krhkosti površine. Pri heterogenih materialih pride do teh pojavov hkrati.

Med procesom se na površini elektrode pojavljajo toplotni viri z močjo 10^7 do 10^8 kW/m², pri hitrosti naraščanja temperature 10^9 do 10^{10} °C/s [9]. V nekaj mikrosekundah se stali in upari majhna količina materiala elektrode pri temperaturah od 1000 do 10 000 °C.

Električni preboj v dielektriku med elektrodama prek delovne reže se pojavlja nekaj pozneje kakor napetost — to je čas zakasnitve vžiga (t_d). Po preboju iskre se napetost v reži hitro zniža na tako imenovano obločno ali gorilno napetost (15 do 25 V) (sl. 4) [10, 11]. Pri dovolj nizki napetosti v reži, ki je napolnjena s plinom, se pojavlja emisija elektronov na elektrodi in pride do ionizacije oziroma do proboja iskre. Z zelo veliko hitrostjo se razvije oblok-kanal plazme (10^{10} do 10^{11} m/s) [11]. Med zakasnitvijo vžiga se pojavlja predpreboj šibkega elektronskega toka, ki potuje od katode proti anodi [9]. S spremembo velikosti reže se podobno spreminja tudi predprebojna energija, kar vpliva na zakasnitev vžiga. Zakasnitev vžiga ni linearna funkcija velikosti reže. Vendar jo imamo za zelo primeren senzor krmilnega servosistema za velikost reže. Na zmanjšanje zakasnitve vžiga deluje tudi nečistost dielektrika. Pri veliki reži se trdni produkti erozije tako razvrščajo, da dopuščajo porast predprebojnega toka. Dobimo nove razelektritvene poti in

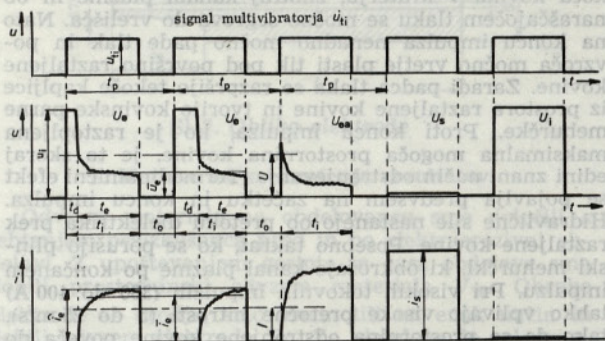


Sl. 4. Razmere v reži

manjši specifični upor [9]. Takoj po končanem impulzu nastane torej močna lokalna koncentracija trdnih delcev, ki jo odnese lokalni pretok dielektrika. Od lege te skupine in od velikosti reže je odvisno, kje bo preskočila nova iskra [11]. Ker je lokalna hitrost pretoka dielektrika odvisna tudi od gibanja elektrode, je zakasnitev vžiga prav tako funkcija hitrosti premikanja elektrod.

Najboljši senzori za servosisteme uporabljajo za regulacijo zakasnitve vžiga, energijo razelektritve (W_0), čas intervala (t_0) in hitrost dielektrika (v_0). Glede na navedeno pa mora upoštevati servosistem tudi gibanje elektrod, ki vplivajo na hitrost pretoka dielektrika.

Lastnosti isker so v glavnem podane z gostoto toka [10], vendar se energija v reži porazdeli s karakteristično krivuljo potenciala obloka (sl. 5) [7, 8, 10]. Energijsko vzeto, lahko razdelimo prostor med elektrodama na tri dele: na katodni predel, na predel kanala plazme in na anodni predel. Ob elektrodah imamo sorazmerno velik padec napetosti in tu se večji del električne energije transformira v toploto na površini elektrod [9]. Na energijo, ki se sprošča v kanalu plazme, vpliva vrsta plina v kanalu, vrsta anodnega materiala, obločni tok (i), tlak plina v mehurčkih in dolžina obloka (e) [8, 10]. Zaradi relativno velikega padca napetosti ob elektrodah se večina energije preoblikuje v toploto ravno na površinah elektrode.



- normalna (efektivna) razelektritve
- obločno (nezelena) razelektritve
- kratek stik
- prosti impulz

Sl. 5. Karakteristike in tipi impulzov

Zelo pomemben parameter, ki vpliva na obrabo elektrode in na odvzem materialov obdelovanca, je polariteta obeh elektrod. V ta namen so opravili že številne raziskave [12]. Ugotovljeno je bilo, da vpliva na efekt polaritete predvsem elektrodni material, tok razelektritve (i_0), čas impulza (t_i) in poprečna napetost (U). Porazdelitev električne energije na elektrodah je podana s fizikalnimi konstantami kovine, z gostoto toka in temperaturo v centru katodne pege. Razlika v toplotnih konstantah materialov elektrod daje razlago za efekt polaritete. Raziskave so dale naslednje ugotovitve:

a) pri konstantni moči impulza se obraba anode manjša z večanjem dolžine impulza,

b) obraba se zmanjša pod vplivom povečanja relativne prostornine plinskih mehurčkov v reži. Prostornina plinskih mehurčkov v reži pa se veča z manjšanjem pretoka dielektrika in intervalnega časa impulza,

c) relativna obraba se manjša z nižanjem tlaka dielektrika pri vstopu v režo. Ta efekt je v zvezi s sklopom pod b),

d) relaksacijski generatorji (RCL) normalno dajejo visoke tokovne amplitude (100 do 1000 A) in kratke impulze (0,1 do 50 μ s), medtem ko impulzni generatorji dajejo manjše tokovne amplitude (1 do 100 A) in daljše impulze (1 do 2000 μ s). Obraba anode se zmanjšuje, kjer je gostota toka manjša. Zato so pri relaksacijskih generatorjih obdelovanci običajno pozitivni in pri impulznih generatorjih negativni [8, 10, 11]. Delovanje generatorjev za elektroerozivno obdelavo je bilo v naši literaturi že popisano [4, 13].

Velik del električne energije procesa se spreminja v toploto. Toplota se prevaja in širi po različnih poteh. Sevanje iz ene elektrode v drugo poteka med dvema vzporednima ploščama različnih temperatur, ki so odvisne od velikosti premera toplotnega vira in ju ločuje čelna reža velikosti premera vroče pege [11]. Del toplote se porabi za uparjanje raztaljene kovine. Prevod toplote in konvekcijo s plini v kanalu lahko zanemarimo [11]. Poglavitni način prenosa toplote pa je prevod toplote v elektrodi. V določenih razmerah se lahko pojavlja zaradi uparjanja maksimalna absorpcija do 5 % vsega toplotnega toka, toda le pri železnih elektrodah. Pri bakrenih elektrodah se vpliv uparjanja lahko popolnoma zanemari, običajno je zanemarljivo tudi sevanje. Toplotne razmere v procesu so bile že precej raziskane [10, 11, 12].

Odvzem materiala je odvisen od sil, ki delujejo na tekočo kovino. Največji vpliv ima termodinamični efekt. Med impulzom pride do uparjanja kovine in do pojava intenzivnega vretja v coni pregrete kovine. Tekoča kovina v kraterju, znotraj kanala plazme in ob naraščajočem tlaku se močno segreva do vrelišča. Nato na koncu impulza nenadno močno pade tlak in povzroča močno vretje plasti tik pod površino raztaljene kovine. Zaradi padca tlaka se razpršijo tekoče kapljice iz prostora raztaljene kovine in tvorijo kovinske parne mehurčke. Proti koncu impulza, ko je raztopljena maksimalna mogoča prostornina kovine, je to skoraj edini znani način odstranjevanja. Termodinamični efekt se pojavlja predvsem na začetku in koncu impulza. Hidravlične sile nastanejo ob pretoku dielektrika prek raztaljene kovine. Posebno takrat, ko se porušijo plinski mehurčki, ki obkrožajo kanal plazme po končanem impulzu. Pri visokih tokovnih impulzih (300 do 400 A) lahko vplivajo visoke pretočne hitrosti (5 do 25 m/s), tako da se prostornina odstranjene kovine poveča do 200 %. Pri manjših tokovih (20 do 30 A) se z večanjem hitrosti pretoka dielektrika ne doseže pomembnih izboljšav odvzema [10]. Elektrostatične sile so zanemarljivo majhne, elektromagnetne pa so dovolj velike pri zelo majhnih polmerih toplotnega vira. Praktično se pojavi tak premer samo v prvi mikrosekundi impulza, nato pa zelo hitro narašča. Zaradi elektromagnetnih sil na začetku impulza se izvrže neka kovina.

Izkoristek odvzema kovine definiramo kot razmerje med materialom, ki smo ga odvzeli na impulz, in raztaljeno prostornino. Praktično doseže to razmerje vrednost 5 do 10 % pri materialih kakor sta baker in jeklo, če sta obe elektrodi iz istega materiala.

Proces elektroerozije je močno odvisen od dielektrika — dielektrične tekočine. Tekočina povečuje gostoto energijskega toka, odnašanje erodiranih delcev ter hladi obdelovanec in orodje. Kot dielektrik se dan-

danes uporabljajo različne tekočine, kakor so: petrolej, aromatska, alifatska in silikonska olja ter posebne mešanice. Redkejši tekoči mediji se uporabljajo za fino obdelavo; gostejši pa so primernejši za večji odvzem. Pri delu v dveh fazah bi bilo za proces ugodnejše, če bi imeli za fino obdelavo drug dielektrik kakor za grobo obdelavo.

4. Na odvzem materiala obdelovanca vplivni parametri

Na odvzem vpliva hkrati veliko parametrov. Skoraj vsi so med seboj tudi povezani [15]. Eden od najpomembnejših je oblika razelektritve (sl. 5). Med obdelavo se pojavijo med elektrodama štiri različne oblike razelektritev. To so dejanska razelektritev, oblok, kratek stik in odprt tokokrog. Navadno jih opišemo v odvisnosti od stanja v reži. Tako dobimo napetost in tok v reži v odvisnosti od časa. Odprt tokokrog se pojavlja, kadar je razdalja med obema elektrodama prevelika. V tem primeru ne dobimo odvzema niti na anodi niti na katodi. Pri kratkem stiku, ki nastane ob dotiku orodja in obdelovanca, se zelo malo energije uporablja v procesu in dobimo majhen odvzem. Med obema skrajnostma, to je med odprtim tokokrogom in kratkim stikom, je realni proces odvzema. V procesu težko določimo mejo med oblikom in dejansko razelektritvijo. Do obloka pride, če se kanal plazme v poprežnji razelektritvi ne deionizira popolnoma. V načelu bo proces pri naslednji razelektritvi potekal enako. Zaradi tega v tem primeru ni potreben dodaten čas, da bi se oblikovala nova tokovna pot. Dejanska razelektritev se lahko pojavi po nekem zakasnjem času vžiga, ki je potreben, da dobimo tok delovnega impulza. Še vedno je odprto vprašanje, kolik in kakšen je prispevek dejanske razelektritve ali obloka na odvzem materiala. Domnevamo, da samo iskra realno prispeva k odvzemu materiala v želeni obliki. Temu problemu so posvečene zadnje raziskave [15]. Za ločevanje dejanskih razelektritev od obloka je bil pri Philipsu v Holandiji razvit poseben eksperimentalni merilni sistem.

Poglavitna obdelovalna parametra, ki nas predvsem zanimata, sta (V_W) odvzem materiala obdelovanca [mm^3/min] in (V_E) odvzem materiala elektrode obrabe orodja [mm^3/min]. Oba odvzema sta odvisna od razmerja $\sum t_e : \sum t_p$, to je celotni čas vseh razelektritev proti skupnemu času vseh ciklov.

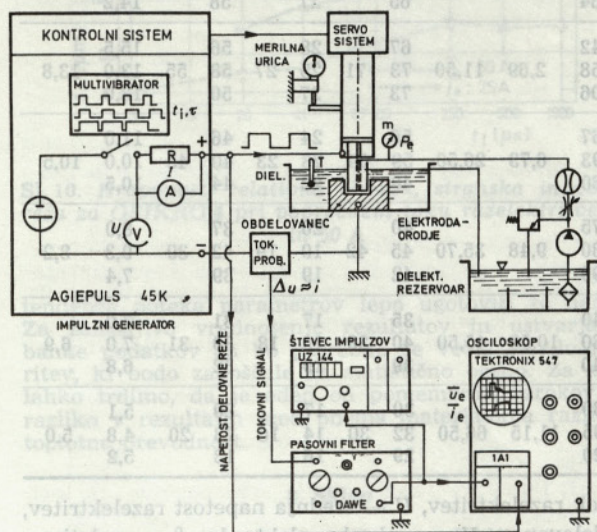
$$V_W \text{ in } V_E = f \left(\frac{\sum t_e}{\sum t_p} \bar{u}_e, \bar{i}_i, \bar{i}_e, \tau \right)$$

Iz enačbe vidimo, da je odvzem obeh elektrod odvisen še od srednje poprečne napetosti razelektritve, časa impulza in srednjega toka razelektritve (\bar{i}_e) ter drugih parametrov, ki jih po svetu v vseh raziskavah še niso mogli zajeti. Raziskovali so že predvsem odvzem v odvisnosti od poprečne napetosti razelektritve ter časa impulza (t_i) pri konstantnem poprečnem toku razelektritve (\bar{i}_e), odvisnost odvzema od poprečnega toka razelektritve (\bar{i}_e) in poprečne napetosti (\bar{u}_e) pri različnih časih impulza itd. Raziskave so pokazale dobro povezavo med vsoto trajanja razelektritev v sekundi ($\sum t_e / \sum t_p$) in odvzemu materiala. Pri raziskavah domačih materialov smo se omejili predvsem na ugotavljanje odvzema obdelovanca in obrabe elektrode v odvisnosti od časa impulza (t_i) pri predpisanem impulznem faktorju (τ), polariteti, dielektriku, njegovem pretoku in času erozije pri določenem poprečnem toku razelektritve (\bar{i}_e).

Domače raziskave usmerjamo predvsem v dve smeri. V prvi smeri opazujemo obdelovalnost naših materialov z domačimi orodji in domačimi dielektriki. V nadaljevanju bodo opisani nekateri rezultati pri ugotavljanju odvzema obdelovanca in elektrode. Poleg tega dela pa se bo treba posvetiti tudi še kakovosti obdelanih površin in orodij.

5. Merilni sistem

Meritve opravljamo na univerzalnem frezalnem stroju Prvomajska (tip ALG — 100 B), ki je prirejen za elektroerozivno obdelavo. Delovna miza za vpenjanje je v dielektrični tekočini. Na pogonskem delu za orodje je nameščena naprava za podajanje elektrode in vibrator (podajalni mehanizem tip AGIETRON 600 AB) (sl. 6). Kroženje dielektrika zagotavlja črpalka, ki črpa dielektrik iz rezervoarja (100 litrov) skozi rotameter za merjenje pretočne količine na delovno mesto, kjer teče proces. Dielektrik je speljan skozi elektrodo. Režo bi lahko izpirali tudi s strani. Vir enosmerne napetosti je usmernik ter impulzni frekvenčni generator AGIEPULS 45 K. Na generatorju lahko nastavljamo frekvence od 0,5 do 100 kHz ter poprečni tok razelektritve 5 do 75 A. Širina impulza (τ) je lahko od 10 do 90 %. Naštete parametre smo nastavili pred elektroerozivno obdelavo, medtem ko smo med obdelavo spreminjali velikost reže ter podajanje elektrode z avtomatskim vklapljanjem vibratorja za primer pojava kratkih stikov. Na samem generatorju lahko še merimo srednjo napetost (U) in srednji tok razelektritve (I) ter čas erozije. Čas cikla (t_c) in čas impulza (t_i) v prostem teku impulznega generatorja, poprečno napetost razelektritve (\bar{u}_e), poprečni tok razelektritve (\bar{i}_e) ter čas zakasnitve vžiga (t_d) smo spremljali na osciloskopu Tektronix tip 547. Tokovne impulze smo šteli s števcem Grunding UZ 144, signale pa filtrirali prek filtra Dawe Instruments.



Sl. 6. Merilni sistem

6. Razmere pri preizkušanju

Preizkuse smo opravljali na materialih Č.6444 (OSIKRO 4) in OA 2 (ki še nima označbe JUS). To je močno legirano Cr-Mo-V orodno jeklo. Uporabljamo ga predvsem za matrice s kompliciranimi oblikami, za razne trne, orodje za valjanje itd. Pri nas ga vpelju-

jemo šele v zadnjem času, ker je mnogostransko uporaben in zanimiv tudi za tuja tržišča. Pri obeh materialih se nismo zadovoljili samo s tolerančnimi območji sestave, temveč imamo zanj precizno merjeno sestavo:

OSIKRO 4

C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Mo	W	Ni
0,60	0,64	0,29	—	0,013	1,10	0,15	—	2,02	0,08

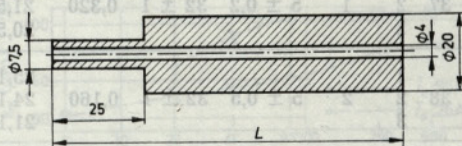
OA 2

0,97	0,22	0,53	0,027	0,014	4,84	0,28	1,02	—	—
------	------	------	-------	-------	------	------	------	---	---

Oba materiala sta bila kaljena. Preizkušance smo izdelali v obliki kvadrov z izmerami $250 \times 25 \times 15$ mm. Za elektroerozijsko obdelavo je pomembna tudi toplotna prevodnost materialov. Zato smo dobili podatke za:

	temperatura [K]	topl. prevodnost [W/m K]
OA 2	273	225
	323	243
	373	257
OSIKRO 4	303	349

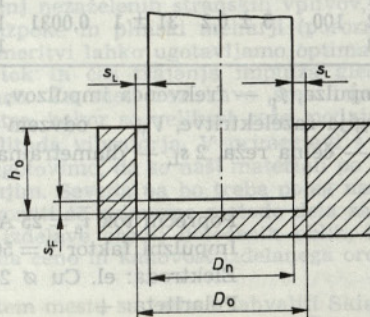
Elektrode (orodja) so iz elektrolitičnega bakra s čistotjo 99,9 %. Oblika elektrode je razvidna na sliki (sl. 7). Za raziskave smo za zdaj izbrali samo impulzni faktor τ 50 %. To pomeni, da znaša čas impulza polovico časa cikla. Pri različnih frekvencah se je to razmerje nekoliko spreminjalo, in sicer od 50 do 53,4 %. Čas meritve je bil v vseh primerih 15 min za en preizkus. Pretok dielektrika je bil v_d 0,6 [m³/s]. Pretok dielektrika smo morali stalno nadzorovati, ker se vedno nekoliko spreminja zaradi spreminjanja delovne reže med obdelavcem in elektrodo. Tlak dielektrika smo merili z manometrom. Čas trajanja procesa smo določili s stoparico in ga primerjali z vgrajeno uro na generatorju. Hkrati smo spremljali tudi primik elektrode proti obdelavancu.



Sl. 7. Oblika elektrode

7. Meritve in vrednotenje rezultatov

Odvzem materiala na obdelovancu smo določili s tehtanjem preizkušanca pred in po elektroerozivni obdelavi. Z upoštevanjem gostote in časa obdelave smo dobili prostorninski odvzem materiala V_W . Obrabo elektrode — orodja, smo vrednotili na enak način in dobili odvzem elektrode V_E . Za obdelavo je zelo značilna vrednost relativna obraba elektrode, ki pove,



Sl. 8. Meritev globine odvzema

kakšno je razmerje obrabe elektrode glede na odvzeti material obdelovanca in jo dobimo po enačbi (relativne obrabe).

$$\varphi = V_E/V_W \cdot 100 [\%]$$

Za račun učinkovitosti procesa nas zanima globina odvzema pri danih parametrih obdelave. Zato smo se odločili, da bomo tudi to izmerili (sl. 8). Dejansko globino odvzema smo izračunali. Dolžinsko obrabo elektrode smo dobili z merjenjem dolžine elektrode pred in po obdelavi (Δl).

$$h_o = h + s_F - \Delta l$$

kjer so:

h_o — dejanska globina odvzema

h — primik elektrode

s_F — čelna reža

$2s_L$ — stranska reža

Δl — obraba elektrode

Velikost stranske reže $2s_L$ smo dobili

$$2s_L = D_o - D_n$$

Vse meritve smo zapisovali tabelarično (sl. 9) in jih nato vnašali v diagrame. Na sliki 10 so prikazane odvisnosti odvzema ter relativne obrabe stranske in čelne

reže za material OSIKRO 4 pri toku (i_e) 25 in 50 A. Enako smo raziskali tudi material OA 2 (sl. 11). Razliko med lastnostmi obeh materialov dobimo iz primerjalnih diagramov (sl. 12 in 13).

Pri opazovanju hrapavosti v odvisnosti od časa impulza smo ugotovili za oba materiala, da se hrapavost veča proporcionalno s časom impulza. Odvzem materiala je močno odvisen od jakosti toka (i_e). Odvzem je večji pri manjših časih impulza. Relativna obraba elektrode se manjša v odvisnosti od časa impulza in ustrezno odvzemu materiala obdelovanca se manjša tudi pri manjših tokovih. Razumljivo je, da večji tokovi močnejše učinkujejo na posamezne parametre. Medtem ko stranske reže pri obeh materialih rastejo z dolžino časa impulza ter jakostjo toka, se čelne reže pri daljših časih impulza obdržijo na približno konstantni vrednosti. Pri primerjavi obeh materialov (OSIKRO 4 in OA 2) med seboj lahko ugotovimo, da so razlike pri hrapavosti pri enakih razmerah obdelave zelo majhne. Odvzem materiala pa je pri manjših tokovih večji za material OA 2, medtem ko je relativna obraba elektrode večja pri obrabi materiala OSIKRO v primerjavi z OA 2. Obe reži sta pri OSIKRO 4 večji za različne velikosti tokov. Vzroke za take pojave bo treba še podrobno raziskati. Iz samih diagramov je vidno, da se da

t_i s	Stevilka preiz- kusa po- no- vitev	f_p kHz	I A	U V	W_e Ws	V_W mm ³ /min	V_E mm ³ /min	φ %	s_F μ m	$2s_L$ 0,01 mm	R_{max} μ m	R_a μ m							
1060	1	0,5	$5 \pm 0,5$	33 ± 1	0,666	18,3	0,54	3,05	66	46	60	14,3							
	2					21,4	0,55						65	68	70	18,0			
	3					16,5	0,63						74	44	63	14,2			
530	1	1	$5 \pm 0,2$	32 ± 1	0,320	20,0	1,19	6,50	71	33	55	14,5							
	2					21,5	1,49						65	68	30	53	16,0		
	3					20,5	1,34						65	27	58	14,2			
250	1	2	$5 \pm 0,5$	32 ± 1	0,160	25,1	2,42	11,50	67	28	56	15,5							
	2					24,1	2,58						73	71	25	27	58	55	13,0
	3					21,1	3,06						73	27	50	13,0			
87	1	6	$5 \pm 0,2$	33 ± 1	0,0547	24,6	5,67	26,50	56	24	46	11,0							
	2					25,1	6,93						59	54	23	23	40	43	10,0
	3					24,4	7,60						48	22	44	10,5			
41	1	12	$5 \pm 0,2$	32 ± 1	0,0263	24,8	8,75	35,70	40	20	37	8,0							
	2					27,4	9,48						45	42	19	19	42	39	9,3
	3					27,4	8,90						42	19	39	7,4			
21	1	25	$5 \pm 0,2$	31 ± 1	0,0124	27,8	9,40	45,50	35	17	31	7,0							
	2					22,6	10,80						40	38	19	18	30	31	7,0
	3					23,9	11,40						39	19	32	6,8			
5	1	100	$5 \pm 0,2$	31 ± 1	0,0031	15,5	10,30	66,50	30	17	20	5,1							
	2					16,0	10,95						32	30	14	16	23	20	4,8
	3					18,1	12,20						29	16	18	5,2			

t_i — čas impulza, f_p — frekvenca impulzov, I — srednji tok razelektritve, U — srednja napetost razelektritve, W_e — energija razelektritve, V_W — odvzem materiala obdelovanca, V_E — obraba elektrode, φ — relativna obraba, s_F — čelna reža, $2s_L$ — diametralna stranska reža, R_{max} — največja višina neravnosti, R_a — srednji odstop profila

Poprečni tok $\bar{i}_e = 25$ A

Impulzni faktor $\tau = 50$ %

Elektroda: el. Cu \varnothing 20/4

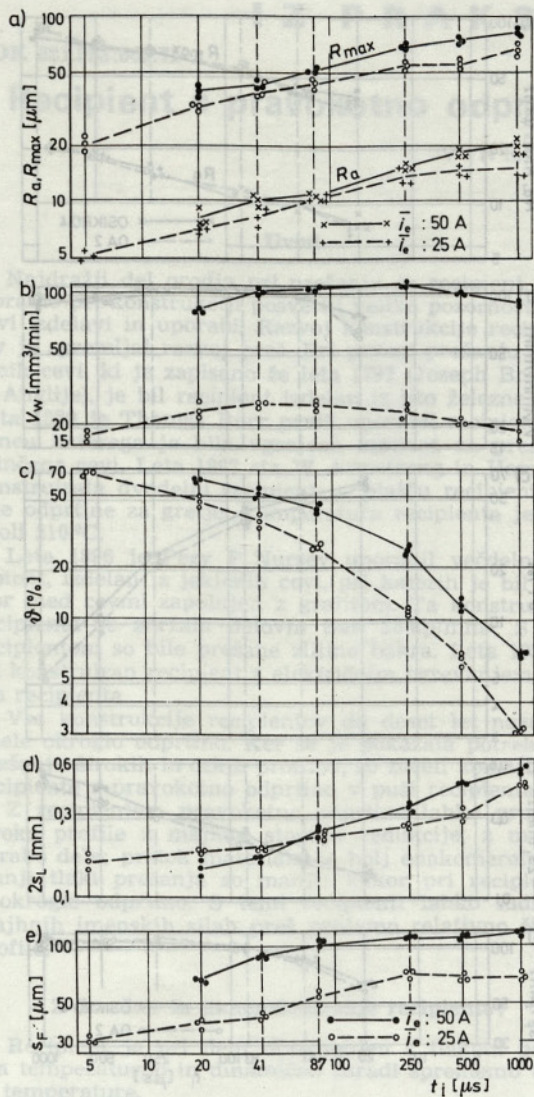
Polariteta: +

Dielektrik: EROZOL-LAB

Pretok dielektrika: $v_d = 0,6$ cm³/s

Čas erozije: $t = 15$ min

Sl. 9. Odvzem za OSIKRO 4 pri $i_e = 25$ A

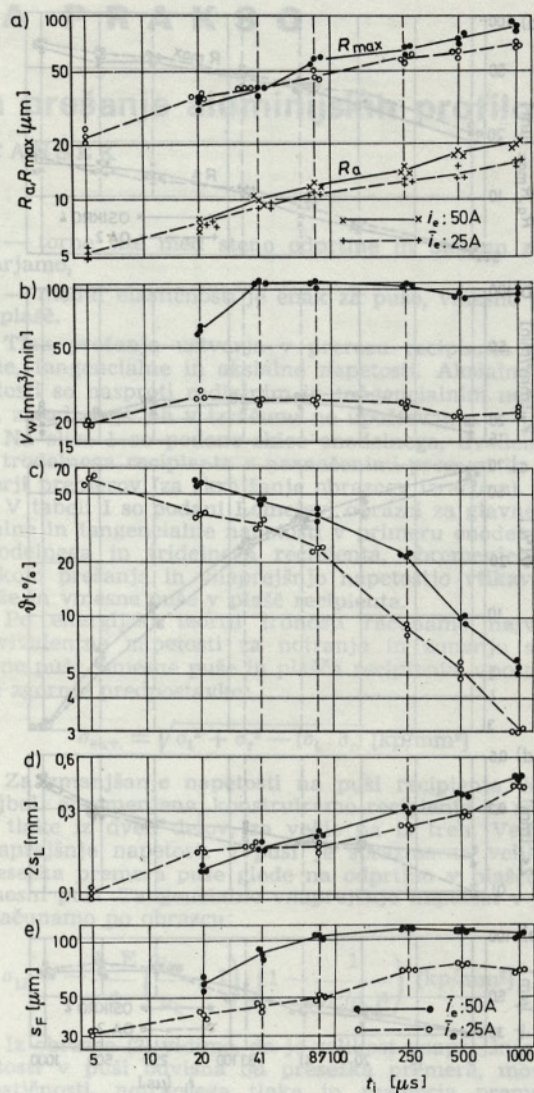


Sl. 10. Hrapavost, relativna obraba, stranska in čelna reza za OSIKRO 4 pri poprečnem toku razelektivitve 25 in 50 A

tendencia poteka parametrov lepo ugotoviti že danes. Za zanesljivo vrednotenje rezultatov in ustvarjanje banke podatkov pa bo potrebno še večje število meritev, ki bodo zadoščale za statistično oceno. Za zdaj lahko trdimo, da je eden od pomembnih vzrokov za razliko v rezultatih med obema materialoma različna toplotna prevodnost.

8. Sklep

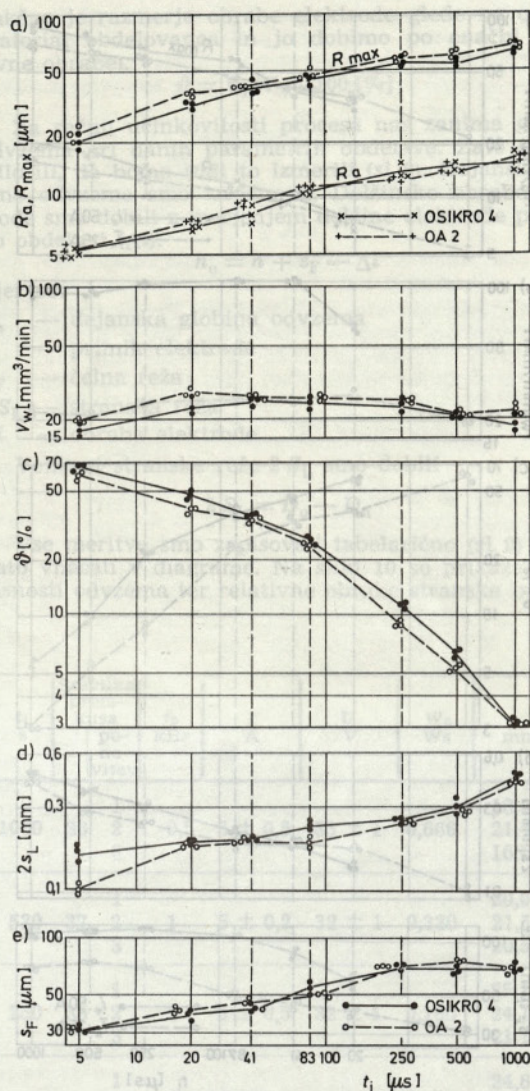
Opisane meritve in teoretična razglabljanja so pokazala, da je v elektroerozivnem procesu veliko število parametrov, ki lahko vplivajo na odvzem materiala in kakovost obdelane površine. Zato so meritve zelo dolgotrajno delo, ki ga ni mogoče izvesti v kratkem času. Verjetno je prav to razlog, da dandanes ni mogoče dobiti potrebnih parametrov za obdelavo materialov niti v razvitejših državah. Očitno je, da je za učinkovitost procesa in gospodarnost izdelave izdelka — orodja zelo pomembno poznati fizikalne lastnosti samega procesa kakor tudi tehnološke podatke, ki jih lahko dobimo



Sl. 11. Hrapavost, odvzem, relativna obraba, stranska in čelna reza za OA 2 pri poprečnem toku razelektivitve 25 in 50 A

z lastnimi, dolgotrajnimi meritvami. Hkrati z raziskavo obdelovalnosti bomo morali raziskati še različne vrste dielektrikov, ki jih že dobimo na domačem trgu. Pravilna izbira parametrov za optimalne električne razelektivitve omogoča kakovostno obdelavo. Dobimo lahko tudi manj nezaželenih stranskih vplivov, kakor so npr. mikrorazpoke in plinski mehurji (poroznost površine). Po tej meritvi lahko ugotavljamo optimalen odvzem za podan tok in čas trajanja impulza glede na podano frekvenco. Že med raziskavo smo izbrali optimalne parametre, kakor so velikost reže, podajanje elektrode in amplituda vibratorja. V primerjavi s tujimi avtorji lahko ugotovimo, da so naši materiali po lastnostih zelo blizu tujim. Seveda pa bo treba poleg načrtovanih raziskav razviti še primerne metode dela za tipizacijo postopka izdelave orodij določenih oblik, ki tudi močno vpliva na ceno in kakovost izdelanega orodja z elektroerozijo.

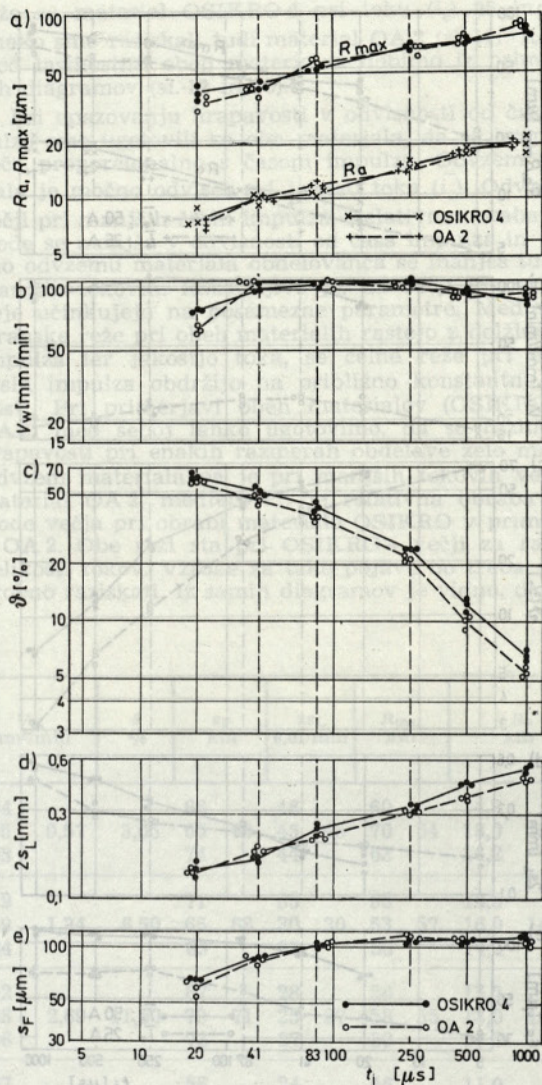
Na tem mestu se želimo zahvaliti Skladu Borisa Kidriča za financiranje raziskav in Železarni Ravne za material z merjenimi lastnostmi.



Sl. 12. Primerjava rezultatov med OSIKRO 4 in OA 2 pri poprečnem toku razelektritve $\bar{i}_e = 25$ A

LITERATURA

- [1] —, Tehnološki postopki, Praktičar, Zagreb, 1972.
- [2] Kviz, Boris: Elektroerozijska obrada, Tehnička enciklopedija, Zagreb, 1973.
- [3] Lazarenko, B., R.: Elektroiskrova obrabotka metallov; Izdatel'stvo akademii nauk SSSR, Moskva, 1960.
- [4] Gologranc, F.: Elektroerozivna obdelava kovin, Strojniški vestnik, 1958, št. 3/4.
- [5] —, VDI Richtlinien, 3400.
- [6] Smith, G. V.: Electrical Methods of Machining: Progress in Spark-erosion, London, 1970.
- [7] Zolotyč, B. N.: Theorie zum Phaenomen der funkenerosiven Bearbeitung; Fertigung, 1971, št. 6, str. 185—192.
- [8] Dijck, van F., Snoeys, R.: A Theoretical and Experimental Study of the Main Parameters Governing the Electro-Discharge Machining Process, GAMI Conference, 1974.
- [9] Heuvelman, C. J., Hoosten, H. J., Veenstra, P. C.: An Introductory Investigation of the Breakdown Mechanism in Electro-Discharge Machining; Annals of the CIRP, Vol. 20, 1971, str. 43—44.



Sl. 13. Primerjava rezultatov med OSIKRO 4 in OA 2 pri poprečnem toku razelektritve $\bar{i}_e = 50$ A

- [10] Snoeys, R., Dijck, van F.: Physico-Mathematical Analysis of the EDM Process, North American Metal Working Research Conference, Hamilton, May 1973.
- [11] Dijck, van F., Snoeys, R., Crookall, J. R., Heuvelman, C. J.: Some Results of Physical Research in EDM, publikacija CIRP.
- [12] Dijck, van F., Dutre, W. L.: Heat Conduction Model for the Calculation of the Volume of Molten Metal in Electric Discharge, osnutek za Journal of Physics.
- [13] Puhar, P.: Tehnologija odrezavanja, II. del, Ljubljana, 1966.
- [14] Thijs, A., Dijck, van F.: Investigation of Polarity Effect in EDM, februar 1973.
- [15] Snoeys, R., Cornelissen, H.: Correlation between Electro-Discharge Machining Data and Machining Settings; Annals of the CIRP, 1975, Vol. 24/1, str. 83—88.

Avtorjev naslov: prof. dr. ing. Franc Roethel,
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani