

UDK 621.9.048

Nekaj značilnosti površin orodja in obdelovanca pri EDM procesu*

FRANC ROETHEL — LADISLAV KOSEC — VITO GARBAJS

Označbe

f_t kHz	frekvenca efektivnih razelektritev
f_p kHz	impulzna frekvenca
i_t A	poprečni tok razelektritve
I_t A	poprečni delovni tok
p_e bar	tlak dielektrika pri vstopu v rezo
s_{901} μ m	nastavljena reza med elektrodama
s_{902} μ m	čelna reza po obdelavi (razelektritvi)
t_t μ s	čas razelektritve
t_i μ s	čas impulza
t_p μ s	čas periode
$\bar{u}_t$ V	poprečna napetost razelektritve
U_t V	poprečna delovna napetost
U_0 V	prosta napetost
v mm/min	podajalna hitrost elektrode
V_w mm ³ /s	odvzem materiala
V_E mm ³ /s	obrada elektrode
ε %	stopnja onesnaženosti
λ_e —	$\lambda_e = f_e/f_p$ relativna frekvenca
τ —	$\tau = t_i/t_p$ impulzni faktor
Φ —	$\Phi = \sum t_e / \sum t_i$ poprečni relativni čas razelektritev
q cm ³ /s	pretok dielektrika

1. Uvod

O prvih korakih pri raziskavah obdelovalnosti pri nas smo pred kratkim že poročali [1]. Hkrati z raziskavami obdelovalnosti smo začeli tudi z raziskavami lastnosti površin [2]. Vseh rezultatov seveda ni mogoče objavljati, so pa na voljo v ustrezni literaturi [3, 4]. S svojim delom želimo v sodelovanju z industrijo raziskati domače materiale, njihovo obdelovalnost in lastnosti površin. V praksi se je namreč pokazalo, da je treba preveriti in izpopolniti tehnološke parametre obdelave in lastnosti tudi za tiste materiale, za katere so bili poznani okvirni podatki iz literature. Tako se je že večkrat zgodilo, da so bile lastnosti orodja iz domačega materiala, ki je bilo obdelano elektroerozijsko, nekaj drugačne kakor pri tujem materialu, čeprav je bilo domače orodje izdelano po enakih navodilih kakor tuje.

Pri tem delu pa se srečujemo z nekaterimi pojavi, ki tudi v tujini še niso bili raziskovani, niti objavljeni rezultati meritev. Zato smo se morali tega dela lotiti tudi sami. Nekateri naši danes obravnavani rezultati so bili na kratko objavljeni tudi v tuji literaturi [5]. Namen današnjega sestavka pa je, da to naše delo obširneje predstavi domači strokovni javnosti.

2. Kratek pregled dosedanjih raziskav

Izboljšanje praktičnega postopka obdelave lahko dosežemo samo z uspešnim opazovanjem in opisom elektroerozijskega procesa na teoretični podlagi. Seznaniti se moramo predvsem s fizikalnimi, kemičnimi in metalurškimi pojavi, ki jih srečujemo na mestu odvzema med orodjem in obdelovancem. Na kolikost in kakovost obdelave vplivajo porazdelitev energije, ki smo jo vložili v proces, način regulacije in specifična vrsta procesa, ki je odvisna od konstrukcije in funkcionalnosti naprave EDM [1]. Lastnosti površine so v tesni odvisnosti od pojavov v procesu. Kakovost površine dandanes ne označuje več samo topografija, temveč tudi fizikalno-kemične spremembe, ki se pojavljajo na površini obdelovanca in orodja ter tik pod njo. Topografija elektroerozijsko obdelane površine je najbolj odvisna od oblike kraterjev, ki nastanejo pod vplivom procesa v delovni reži na obeh površinah, to je na površini orodja in obdelovanca. Obstočnost orodja, ki je bilo izdelano z elektroerozijskim postopkom, lahko že predvidimo z dobrim poznavanjem topografije in sprememb fizikalno-kemičnih lastnosti površin v primerjavi z osnovnim neobdelanim materialom.

Proces elektroerozivne obdelave je glede na mnogoštevilne parametre zelo zapleten in naključne narave. Med vhodnimi in izhodnimi procesnimi parametri nimamo natančno postavljenih matematičnih zvez, ker se pojavljajo v procesu le začasna kratkotrajna in navidezna stacionarna stanja. Večina raziskovalcev je do danes postavila matematične modele procesa, ki so bili osnovani na diskretni enojni razelektritvi. Tu jim je uspelo kar dobro teoretično popisati fizikalne pojave in jih tudi potrditi s preizkusi [6 do 9].

Zanesljivo zvezo med vhodnimi procesnimi parametri in kakovostjo površine je sorazmerno težko postaviti, ker dosedANJI matematični modeli ne morejo zajeti vseh vplivov v celoti. Obstoječi modeli skušajo na osnovi razelektritvene energije in nestacionarnega temperaturnega polja na površini elektrod ugotoviti velikost sprememb. Ugotavljajo le spremembe, ki najbolj kritično vplivajo na lastnosti z elektroerozijo obdelanih površin, kakor so npr. mikro razpoke in preostale napetosti. Do sedaj je najuspešnejše le preizkusno ugotavljanje in statistično vrednotenje povezav med vhodnimi procesnimi parametri in lastnostmi obdelane površine. Vsaj učinke procesa je mogoče razmeroma zadovoljivo ugotavljati in to tudi skušamo.

Površine erodiranih elektrod, predvsem še v kraterjih, so iz materiala, ki se po kemični sestavi in lastnostih znatno razlikuje od osnovnega. V procesu si zaporedoma sledijo razelektritve, ki erodirajo

* Članek je bil deloma objavljen v glasilu *Annals of the CIRP-Vol. 25/1/1976*.

elektrode in jih obenem spreminjajo. Površino elektrod sestavljajo po EDM procesu zlitine osnovnega materiala z materialom protielektrode in sestavinami razpadlega dielektrika [6]. Material obdelovanca lahko prehaja v površino elektrode — orodja in vpliva na njegovo obrabo, ki je lahko celo negativna [9].

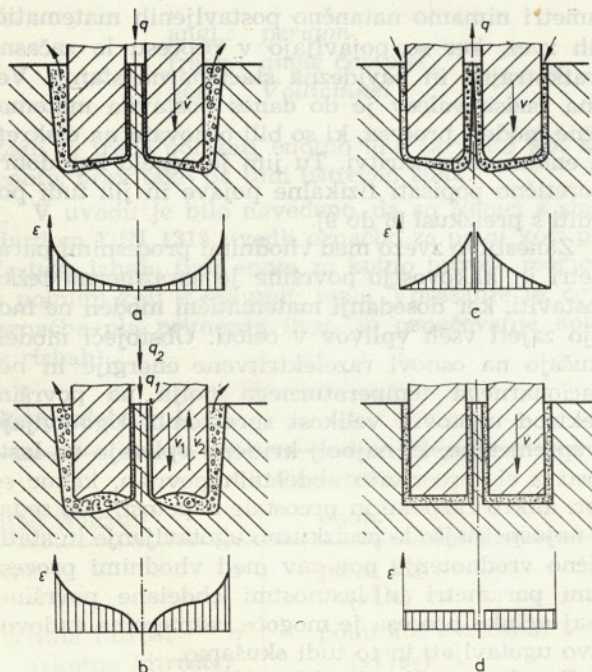
Lokalne spremembe v delovni reži, neenakomernost obrabe elektrode — orodja in nehomogenost materialov povzročajo odstopanja od želene oblike obdelovanca. Pri zahtevnejših obdelovancih z ostrimi prehodi je potrebno večje število elektrod, da dobimo zeleno obliko. Na oblikovno natančnost močno vplivajo tudi pretočna hitrost, smer dielektrika in način izpiranja. Znano je, da se električna prebojna trdnost zmanjšuje z onesnaževanjem dielektrika [15, 20]. Reža na vstopu čistega dielektrika je zato bolj ozka in se proti izstopu širi. V smeri izstopne reže se onesnaženost dielektrika veča. Dielektrik se polni z električno prevodnimi delci, ki so ostanki delcev elektrod razpadlega dielektrika in še ne popolnoma deioniziranih atomov. Ta pojav vpliva na nepravilnost oblike obdelovanca in neenakomerno obrabo elektrode — orodja. Teoretično bi dosegli enakomerno obrabo elektrode pri konstantni onesnaženosti, kar bi bilo mogoče samo pri mirovanju dielektrične tekočine. Praktično to ni mogoče, ker EDM proces ne poteka brez dotoka svežega dielektrika. Tehnika izpiranja zelo vpliva na popačenje oblike obdelovanca [17]. Smer pretoka dielektrika, tlačno in odsesovalno izpiranje, pretočna hitrost ter zvezno in periodično izpiranje različno

vplivajo na tok erodiranih delcev. Posledica so konične, sferične ali drugače spremenjene obdelave površine (sl. 1). Neenakomernost površine se pojavlja tudi zaradi mešanja čistega in onesnaženega dielektrika, kar povzroča gibanje plinskih mehurčkov [17]. Na povečano porabo ostrih prehodov elektrod znatno vplivajo povečana lokalna erozija, slabši odvod toplote ter elektrohidravlični učinki. Pri fini EDM obdelavi je reža ozka in energija razelektritev majhna. V tem primeru je odsesovalno izpiranje primernejše, ker imajo erodirani delci krajšo pot skozi delovno režo [18]. Sklenemo lahko, da se lastnosti površin krajevno močno spreminjajo na obdelovancu in orodju glede na razmere v delovni reži. Lokalne koncentracije erodiranih delcev, razvrščenih v električnem polju, gostota plinskih mehurčkov, sposobnost in način izpiranja, onesnaževanje dielektrika, geometrija obdelovanca in kakovost servoregulacijskega sistema vplivajo še lokalno na odzvem materiala, na neenakomerno obrabo in na lastnosti površine elektrod. Na vse navedeno vplivajo še nastavljeni električni EDM parametri ter trenutne razmere. V odvisnosti od razmer v delovni reži se poleg dejanskih razelektritev, ki se pojavljajo po določeni zakasnitvi vžiga, lahko pojavljajo stacionarne razelektritve, kratki stiki in prosti impulzi, ker se pogoji procesa spreminjajo časovno in krajevno. Stacionarne razelektritve in kratki stiki vplivajo v preozki in onesnaženi reži negativno na odvzemno storilnost, na obrabo orodja in kakovost površine je slaba. Prosti impulzi v preširoki reži nimajo poleg povečevanja obdelovalnega časa nobenih vplivov [11]. Številni avtorji [6 do 10, 12 do 14] omenjajo navzočnost znatne količine materiala protielektrode v površini, ki je obdelana z EDM procesom. Pridobljene izkušnje na področju obločnega varjenja in pri raziskavah obloka pri odpiranju in zapiranju relejnih kontaktov, lahko uporabljamo pri analizi prehoda materiala med elektrodama [14, 16].

V svoji raziskavi smo skušali ugotoviti mehanizem izmenjave materiala elektrod in spremembe v coni toplotnega vpliva ter preučiti lokalne pojave pri ekstremnih pogojih EDM procesa. Z elektronsko mikroanalizo lahko opazujemo spremembe kemične sestave, ki jih povzročata predvsem visoka temperatura na površini in izmenjava snovi med elektrodama. Kemična sestava in lastnosti raztaljene in ponovno strjene plasti se lahko močno spreminjajo v odvisnosti od delovnih razmer v reži.

3. Preizkuševalne razmere pri naših raziskavah

Preizkuse smo opravili na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani na elektroerozivnem stroju AGIE-TRON AB. Multivibrator impulznega generatorja smo za monorazelektritve nadomestili z virom diskretnih pravokotnih impulzov. Anoda je bila izdelana iz hladno vlečene in rekristalizirane palice iz elektroliznega bakra s premerom 0,8 mm. Anodo

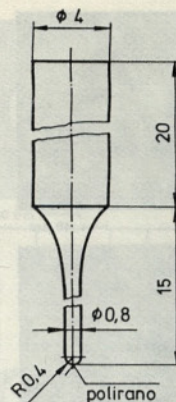


Sl. 1. Vrsta izpiranja v reži

a — kontinuirano tlačno izpiranje, b — periodično izpiranje, c — kontinuirano odsesovalno izpiranje, d — ni pretoka (teoretično); ε — stopnja onesnaženosti

smo na mestu razelektritve mehansko polirali. Katoda iz jekla Č.5742 (Utop extra 2) je bila mehansko polirana plošča. Prosta napetost med elektrodama je bila 100 V, razelektritveni tok 25 in 50 A ter čas impulza 87 do 540 μ s. Režo s_{901} smo nastavili z merilno urico glede na želeni način razelektritve. Ničelno točko smo določili s pomožno napetostjo, ki je ob dotiku elektrod sprožila zvočni signal, in z merjenjem kontaktne upornosti. Natančnost nastavitve reže je znašala 1 μ m. Podobno smo izmerili nastalo režo s_{902} po razelekritvi. Napetostno tokovno časovne karakteristike enojnih razelektritev smo opazovali z osciloskopom Textronix 549 Storage. Pri delu smo uporabljali dielektrik Schell Sol TD.

Multi razelektritve smo sprožali z generatorjem pravokotnih impulzov AGIEPULS 45 K. Teste smo opravljali po programu, ki je bil izdelan za koooperativno delo inštitutov v okviru organizacije CIRP pri komiteju STC »E«. Pri pričujoči raziskavi smo opazovali le ekstremne pogoje. Z elektromehaničnim servo sistemom smo vzdrževali enkrat manjšo in drugič večjo delovno razdaljo med elektrodama. Merilni stavek smo prilagodili zahtevam programa CIRP (sl. 2).



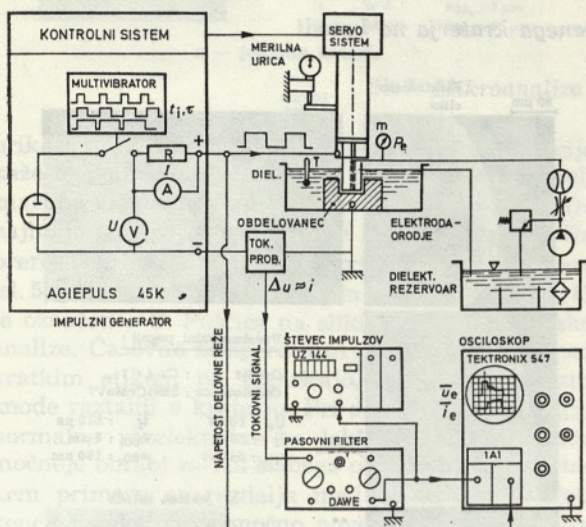
Sl. 3. Oblika elektrod za monoimpulzni preizkus

se večja z daljšanjem časa impulza (t_i) in večanjem poprečnega toka razelektritve (i_i). Pri določenem času impulza, toku razelektritve in materialih elektrod je lahko nanos materiala na anodi večji kakor na katodi [8].

Na osnovi posamičnih razelektritev smo ugotavljali, kakšen je vpliv najmanjše časovno in tehnološko definirane enote erozivnega procesa na obe elektrodi. Zanimalo nas je tudi, kakšne so spremembe v odvisnosti od trajanja impulza ter drugih operativnih karakteristik. Elektrodi za ta preizkus sta bili primerno oblikovani (sl. 3). Merili nismo absolutnega prenosa mase temveč le kakovostne in količinske spremembe v termično vplivanih conah obeh elektrod, ki sta bili mehansko polirani.

Pri preizkusu monoimpulzne (posamične) razelektritve pri definiranih in merjenih pogojih je nastal na površini obdelovanca krater (sl. 4). Njegove linearne dimenzije na površini preizkušanca so znašale približno 100 μ m. Rezultati mikroanalize so podani v obliki ploskovnih analiz na izbranih mestih na površini elektrod. Analiza je bila opravljena za krater, nastal pri normalni učinkoviti razelekritvi (sl. 4a), in krater, kjer se je razelekritev končala s kratkim stikom (sl. 4b).

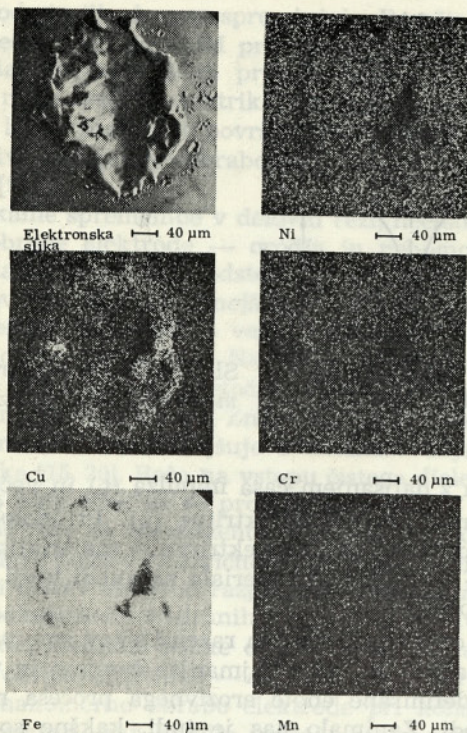
Razlika v pogostosti belih točk med posameznimi mesti so posledica različnih koncentracij analizirane elementa na površini kraterja. Nekatera temna mesta so tudi posledica zasenčenja zaradi mikroreliefa kraterja ter majhnega vpadnega kota žarkov x v spektrometru. Prehod materiala med elektrodama je največji na vrhovih kraterja, kjer je razdalja elektrod najmanjša. Povišanje roba kraterja lahko povzroči pojav kratkega stika (sl. 4b) in kot posledica se pojavi mikro zvar med elektrodama. Na sliki je mikrozvar viden pri črki A (sl. 4b). Na mestu, ki je označeno z B, je erodirani material iz anode (sl. 4b). Velika koncentracija bakra na mestih A in B kaže, da so na površini prilepljeni tudi delci elektrode, ki se je zaradi kratkega stika lokalno porušila. Časovne in temperaturne razmere niso bile ugodne, da bi se ti delci elektrode raztalili in raztopili v kraterju. Vendar je kljub temu prišlo do



Sl. 2. Merilni sistem za merjenje EDM parametrov

4. Raziskave monorazelektritev EDM procesa

Z metodo radioaktivnih izotopov so že izmerili prenos materiala pri posamičnih razelektritvah med bakrenima elektrodama pri različnih parametrih impulza [8]. Raziskave so pokazale, da pri vsaki razelektritvi sprejme katoda del anodnega, anoda pa del katodnega materiala. Del anodnega materiala, ki ga sprejme katoda, znaša 10 do 20 % celotnega odvzema na anodi, medtem ko znaša del katodnega materiala na anodi od 7 do 14 % odvzetega materiala na katodi. Odlaganje materiala na katodi in anodi



Preskuševalni pogoji :

Orodje : Cu (+)
Obdelovanec : 56NiCrMoV7
Dielektrik : Schellsol TD

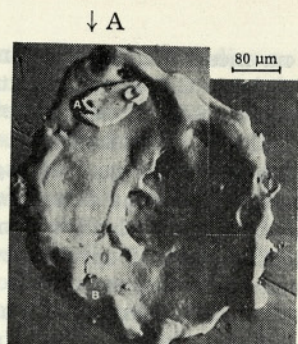
U_0 : 100 V
 t_f : 87 µs

a) normalna
razelektritev

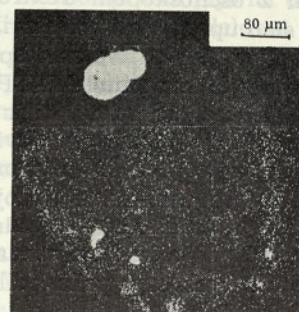
$\bar{I}_f$: 25 A
 t_f : 85 µs
 s_{90_1} : 5 µm

b) kratek
stik

$\bar{I}_f$: 50 A
 t_f : 75 µs
 s_{90_1} : 6 µm

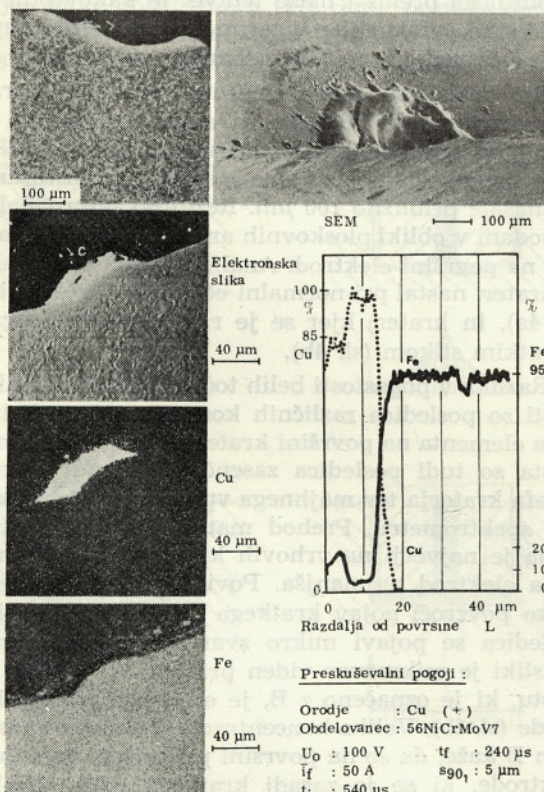


Elektronska slika



Cu

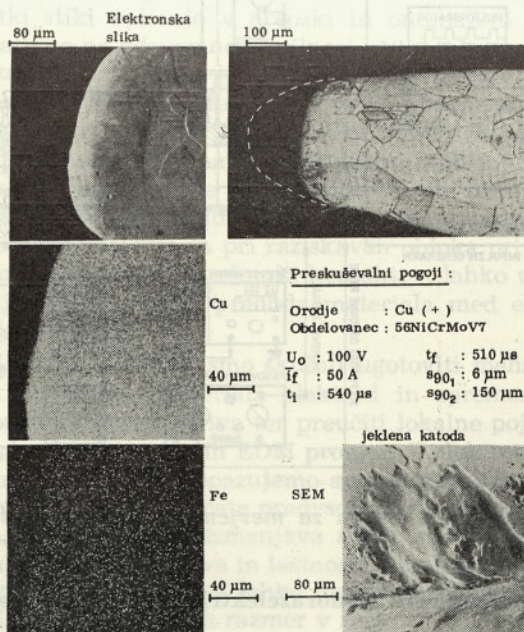
Sl. 4. Mikroanaliza razelektritvenega kraterja na katodi



Preskuševalni pogoji :

Orodje : Cu (+)
Obdelovanec : 56NiCrMoV7
 U_0 : 100 V t_f : 240 µs
 $\bar{I}_f$: 50 A s_{90_1} : 5 µm
 t_l : 540 µs

Sl. 5. Mikroanaliza kraterja na katodi po kratkem stiku (prerez)



Preskuševalni pogoji :

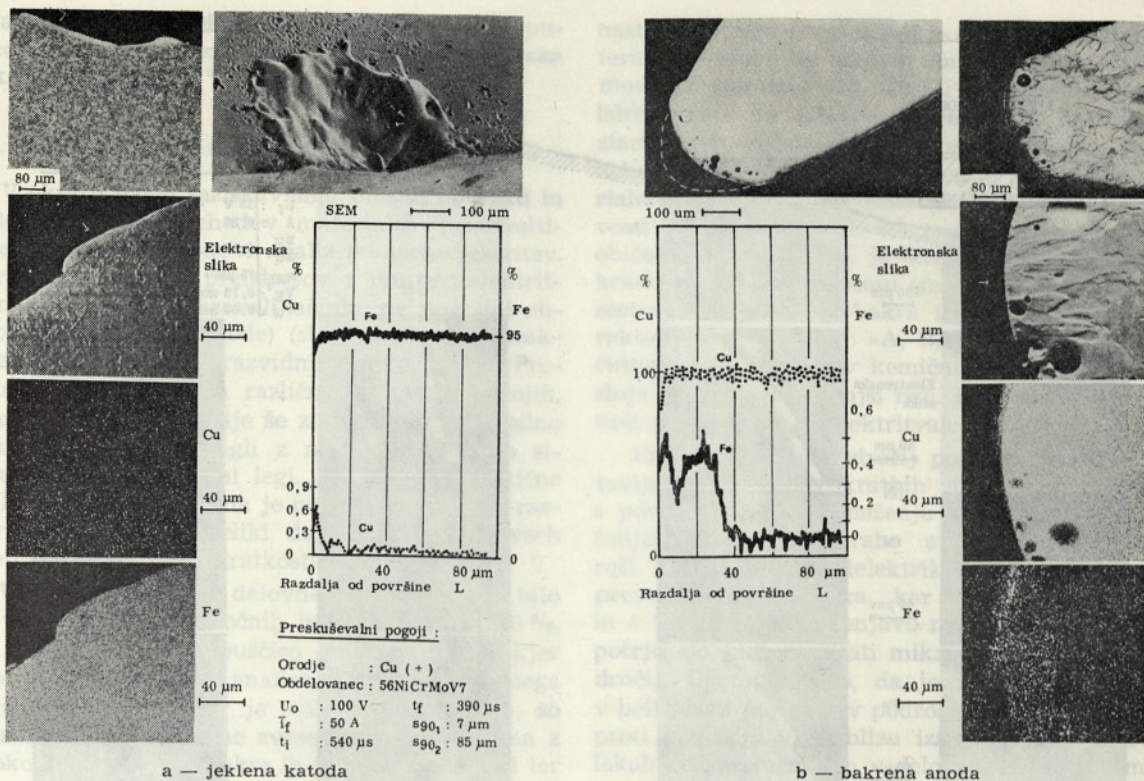
Orodje : Cu (+)
Obdelovanec : 56NiCrMoV7
 U_0 : 100 V t_f : 510 µs
 $\bar{I}_f$: 50 A s_{90_1} : 6 µm
 t_l : 540 µs s_{90_2} : 150 µm

jeklena katoda

SEM

Sl. 6. Mikroanaliza bakrene anode (prerez)

delnega medsebojnega legiranja ostankov elektrode ter ostankov raztaljenega materiala obdelovanca v kraterju (sl. 5). Analizirali smo tudi porazdelitev preostalih legirnih elementov pri normalni razelektritvi (sl. 4a). Porazdelitev kroma, mangana in silicija je podobna porazdelitvi železa. Zaradi tega tudi v poznejši dokumentaciji niso posebej merjeni in

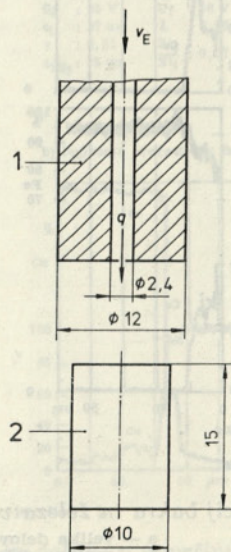


Sl. 7. Mikroanaliza po enojni razelektritvi

prikazani še drugi elementi. Večina dokumentacije kaže le porazdelitev železa in bakra, ki sta najbolj značilna elementa obeh elektrod, s katerima se dajo najboljše ponazoriti spremembe kemične sestave. Na prerezu kraterja s porazdelitvijo bakra in železa (sl. 5) je viden opazen depozit anodnega materiala, ki je označen s C. Puščica na sliki kaže smer linijske analize. Časovno temperaturni in drugi pogoji med kratkim stikom ne dopuščajo, da bi se depoziti anode raztalili v kraterju. Pri dovolj veliki energiji normalne razelektritve se lahko tanka elektroda močneje obrabi zaradi slabega odvoda toplote. V takem primeru se razdalja med elektrodama proti koncu razelektritve močno poveča (sl. 6). Posledica tega je tudi manjši katodni krater, kjer ni opazne prisotnosti katodnega materiala.

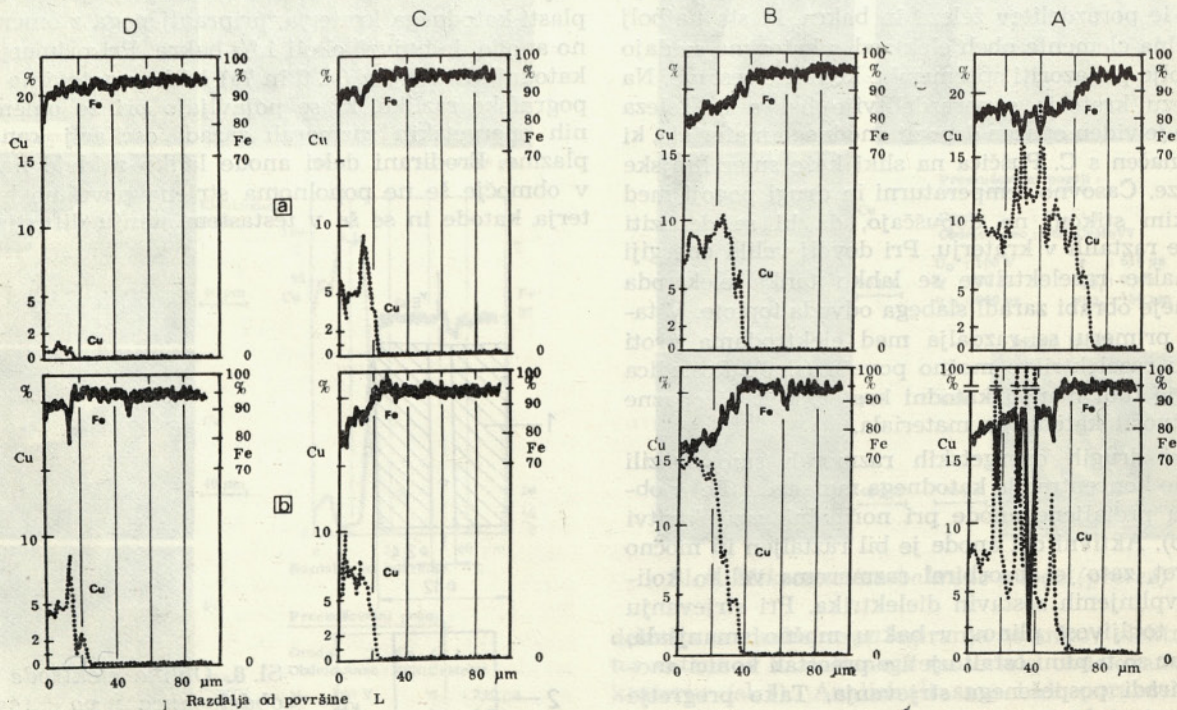
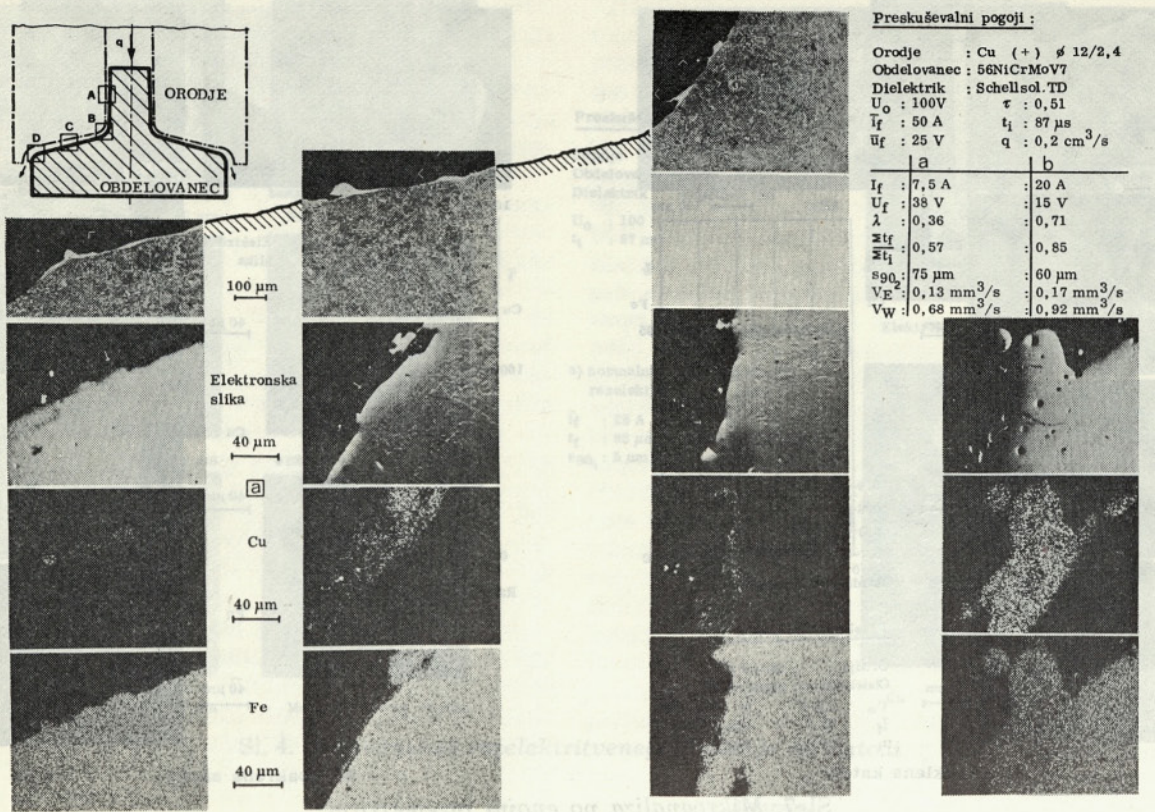
Pri drugih energetskih razmerah smo opazili znatno koncentracijo katodnega materiala (Fe) v območju pretaljene anode pri normalni razelektritvi (sl. 7b). Aktivni del anode je bil raztaljen in močno pregret, zato je absorbiral razmeroma veliko količino vpljenih sestavin dielektrika. Pri strjevanju se je topljivost plinov v bakru močno zmanjšala, vendar so ti plini ostali ujeti v preostali konici anode zaradi pospešenega strjevanja. Tako pregretje anode je posledica velike gostote energije, ki se sprošča med elektrodama. Porazdelitev železa v bakreni aktivni konici je neenakomerna, kar je posledica nestacionarnosti razelektritve, prekratkega ob-

stoja taline in neravnotežnega strjevanja. V beli plasti katodnega kraterja, pripravljenega z omenjeno anodo, je največ okoli 1 % bakra. Pri primerjavi katodnih kraterjev (sl. 6 in 7a) lahko ugotovimo topografske razlike, ki se pojavljajo pri že omenjenih energetskih razmerah zaradi oscilacij kanala plazme. Erodirani delci anode lahko zaidejo nazaj v območje še ne popolnoma strjene površine kraterja katode in se še v testastem stanju difuzijsko



Sl. 8. Oblika elektrode in obdelovanca po testu CIRC

1 — elektroda: Cu, 2 — obdelovanec: C.5742 (56 NiCrMoV7), V_E — podajalna hitrost, q — pretok dielektrika



Sl. 9. Sprememba koncentracij bakra in železa v površini jeklene katode pri normalnem EDM procesu

a — velika delovna reža med procesom
 b — majhna delovna reža med procesom

zavarijo. V drugi vrsti na prvi sliki (sl. 7) je s puščico označeno mesto, kjer je opravljena linijska mikroanaliza.

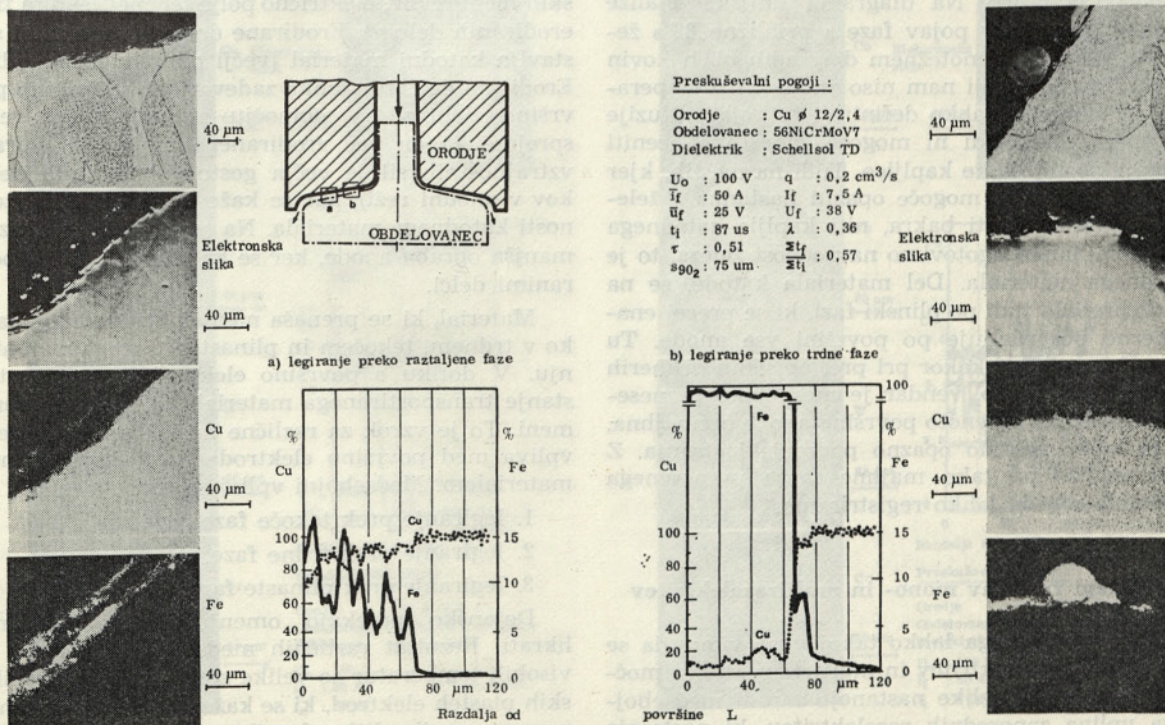
5. Raziskave multirazelektritev v EDM procesu

V okviru naših raziskav smo skušali povezati in razložiti pojave prehodov materialov pri multirazelektritvah na osnovi analiz monorazelektritvev. Opravili smo vrsto preizkusov z multirazelektritvami in pri tem opazovali učinke na površini obdelovanca (jeklene katode) (sl. 8); na širih karakterističnih mestih so razvidni s slike (sl. 9). Preizkušali smo pri dveh različnih delovnih pogojih, tako da je proces erozije še zadovoljivo in stabilno potekal. To smo dosegli z nastavitvijo servo sistema v dve ekstremni legi. Na osnovi statistične analize smo ugotovili, da je pri danih delovnih razmerah (sl. 9a) pri veliki delovni reži 2 0/0 vseh impulzov obločnih tli kratkostičnih.

V primeru majhne delovne reže (sl. 9b) je bilo od vseh impulzov obločnih in kratkostičnih 15 %. Na slikah (sl. 9) so s puščico označena mesta, kjer smo opravili linijsko analizo. V območju čistega dielektrika (»A«), kjer je reža majhna (sl. 9a), so opazni ostanki mostične zveze med elektrodama z visoko koncentracijo bakra in plinskimi mehurji ter mikro razpokami. Ta pojav je posledica kratkega stika, ki se pojavlja pri majhni reži v področju čistega dielektrika, ker je otežkočen vžig iskre zaradi slabše prevodnosti dielektrika [10, 17, 18]. V

nastali kovinski premostitvi je pretežno anodni material. Pri nadaljnji tokovni obremenitvi se kovinski mostički porušijo [12, 10]. Po pretrganju zveze lahko pride do obločne razelektritve. Medtem ko stacionaren oblok obrablja anodo, ostaja katoda nekaj časa zaščiten z nanesenim anodnim materialom (področje »A« slika 9a in b). Od občutljivosti varovala proti kratkemu stiku, ki ga imajo običajni EDM sistemi, je odvisna pogostost pojava kratkega stika. V procesu smo opazovali predvsem sestavne spremembe bakra in železa za štiri karakteristična območja: »A, B, C in D«. Mnogo občutnejše spremembe v kemični sestavi prizadetega sloja opazimo pri manjši reži. Podobno smo opazili tudi pri enojnih razelektritvah.

Pri opazovanju področij pod »A« do »D« ugotavljamo, da pojav kratkih stikov pojema hkrati s povečevanjem onesnaženja dielektrika in manjšanjem krajevnne obrabe anode. Proti izstopni reži onesnaženost dielektrika narašča, večja se prevodnost dielektrika, kar povzroča širšo režo in s tem manjšo izmenjavo materiala elektrod. To potrjujejo tudi rezultati mikroanalize izbranih področij. Ugotovili smo, da je koncentracija bakra v beli plasti največja v področju »A« ter se manjša proti področju »D«, blizu izstopne reže. Ustrezno lokalnim spremembam v delovni reži se spreminja tudi »bela« plast, ki je najširša v območju manjše reže in čistega dielektrika. Nastale bele plasti so enofazne, razen v primerih, ko se v njih nahajajo še kapljice anodnega materiala (sl.9b). Bela plast



Sl. 10. Spremembe v koncentraciji bakra in železa v površini bakrene anode

so prenasičene trdne raztopine, saj je glede na podatke o ravnotežnih topljivostih bakra v železu jasno, da tudi navzočnost drugih elementov v jeklu npr. Ni, Mn, Cr itd. ne more nikakor povečati topljivosti Cu pri navadni temperaturi. Znano pa je, da lahko železo topi pri visokih temperaturah celo blizu 10 % bakra. To je vrednost, ki ustreza večini izmerjenih koncentracij bakra v »beli plasti« (sl. 9a in b). Iz tega sklepamo, da je struktura bele plasti zaostali austenit. Velika koncentracija legirnih elementov (Cu) ter velike ohlajevalne hitrosti so vzrok za pojav zaostalega austenita. Pri majhni reži se navedeni pojavi še stopnjujejo (sl. 9b). Vključene kapljice in večja lokalna nepravilnost razelektritve povzroča še večje lokalne koncentracije bakra na območju »A« (sl. 9b).

Spremembe v kemični in fazni sestavi površin anod se kažejo na več načinov (sl. 10 a in b). Na površini anod pride na mnogih ločenih mestih do nastanka zlitine iz sestavin obeh elektrod prek staljene faze (sl. 10a) v enakih razmerah kakor pri preizkušancih na sliki 9a. Te zlitine so nehomogene, prenasičene trdne raztopine železa v bakru. Podobno kakor na jeklenem preizkušancu smo opazili v teh zlitinah neraztaljene kapljice pretežno iz katodnega materiala. Drug primer legiranja anode z materialom katode poteka prek trdne faze (sl. 10b). V absolutnem merilu obseg tega načina prenosa snovi zelo zaostaja od neposrednega legiranja prek staljenih faz. Primer takega prenosa snovi prikazuje sl. 10b. Temperatura na površini anode je bila tako visoka, da je prišlo do medsebojne difuzije med anodo in kapljico. Na diagramu linijske analize (sl. 10b) je zanimiv pojav faze s približno 8 % železa, ki pa je v ravnotežnem diagramu obeh kovin ni [18]. Robni pogoji nam niso znani, niti temperatura, iz katere bi lahko definirali ta pojav difuzije v trdnem, zato tudi ni mogoče zanesljivo oceniti trajanja obstoja take kapljice. Tudi na mestih, kjer z mikroskopom ni mogoče opaziti nastanka z železom legiranih plasti bakra, niti kapljic katodnega materiala, lahko ugotovimo navzočnost železa, to je katodnega materiala. Del materiala katode, se na anodo prenaša tudi po plinski fazi, ki se precej enakovredno porazdeljuje po površini vse anode. Tu železo — podobno kakor pri prej opisanih primerih — reagira z anodo, vendar je masa tako prenesenega materiala na enoto površine anode premajhna, da bi lahko nastalo opazno področje legiranja. Z mikroanalizo pa tako majhne mase prenesenega materiala seveda lahko registriramo.

6. Sklepi raziskav mono- in multirazelektritvev

Iz že navedenega lahko takoj ugotovimo, da se učinki monorazelektritvev in multirazelektritvev močno razlikujejo. Razlike nastanejo zaradi medsebojnega vpliva zaporednih razelektritvev, ki nastajajo pri normalnem EDM procesu. Časovno poznejša raz-

elektritev vpliva na učinek, ki ga je povzročila poprejšnja razelektritev. Razmere v delovni reži se torej s časom in po kraju spreminjajo. Zato je nemogoče posplošiti rezultate monorazelektritvev na industrijski EDM proces. Po naših meritvah lahko sklenemo, da se je prenašal kovinski material med elektrodama na tri različne načine:

1. Prek mostične zveze, ki je nastala pri majhni upornosti kratkega stika v tekočem ali plinastem stanju ob eksploziji mostička. Po eksploziji mostička se navadno pojavi oblok, po katerem potuje material anode h katodi in narobe. Nastali depozit na katodi je pretežno iz anodnega materiala. Raziskave so tudi pokazale, da se legirana mesta (anode) z večjo količino bakra na obdelovancu ujemajo z mesti večje obrabe orodja (katode).

2. Po kanalu plazme. Med tako razelektritvijo prihaja do izmenjave materiala elektrod v ioniziranem stanju. Gostota pretoka ioniziranih kovinskih atomov je odvisna od fizikalnih razmer v kanalu plazme in okolice ter energije oziroma dolžine kanala. Največji transport se pojavlja v primeru, ko razelektritev dobijo karakteristike stacionarnega obloka (obločno varjenje). Obloki se pogosto pojavljajo v območju še nedeioniziranih kovinskih atomov, plinskih mehurčkov razpadlega dielektrika in še nestrjenih mest elektrod.

3. Z iztekom erodiranih delcev, na katere delujejo vztrajnostne sile (gibanje toka dielektrika, centrifugalna sila, ki se pojavlja pri hitri spremembi smeri dielektrika, vpliv nastalih implozij in gibanje plinskih mehurčkov, električno polje ter medsebojni trki erodiranih delcev). Erodirane delce v večji meri sestavlja katodni material (večji odvzem na katodi!). Erodirani delčki se lahko zadevajo ob raztaljeno površino elektrod. V območju prehoda čelne reže, sprejme anoda več erodiranega materiala (zaradi vztrajnostnih sil je večja gostota erodiranih delčkov v anodni reži), kar se kaže v znatnejši navzočnosti katodnega materiala. Na teh mestih je opazna manjša obraba anode, ker se katoda zaščiti z erodiranimi delci.

Material, ki se prenaša med elektrodama, je lahko v trdnem, tekočem in plinastem agregatnem stanju. V dotiku s površino elektrode se agregatno stanje transportiranega materiala lahko hitro spremeni. To je vzrok za različne načine medsebojnega vpliva med površino elektrode in transportiranim materialom. Medsebojni vplivi so torej:

1. legiranje prek tekoče faze,
2. legiranje prek trdne faze,
3. legiranje prek plinaste faze.

Dejansko potekajo omenjene faze legiranja hkrati. Rezultat različnih medsebojnih vplivov in visokih temperatur so velike spremembe v površinskih plasteh elektrod, ki se kažejo v obliki nastanka povsem novih zlitin, faznih transformacij in različnih defektov.

7. Sklepi raziskav in procesi v industriji

Sklepe naših raziskav smo skušali uporabiti pri ugotavljanju pojavov, ki se pojavljajo v procesu pri industrijski uporabi. V ta namen smo izbrali dvoje orodnih jekel (tabela 1) in jih obdelovali pri danih razmerah z domačim dielektrikom (tabela 2)

Obseg sprememb na površini in v njej ni odvisen samo od elektroerozijskih parametrov ter razmer pri delu, marveč tudi od kombinacije vrste materialov orodja in obdelovanca.

Izbrali smo tudi drugo obliko orodja in obdelovanca, ki je v praksi primernejša in je osnovna

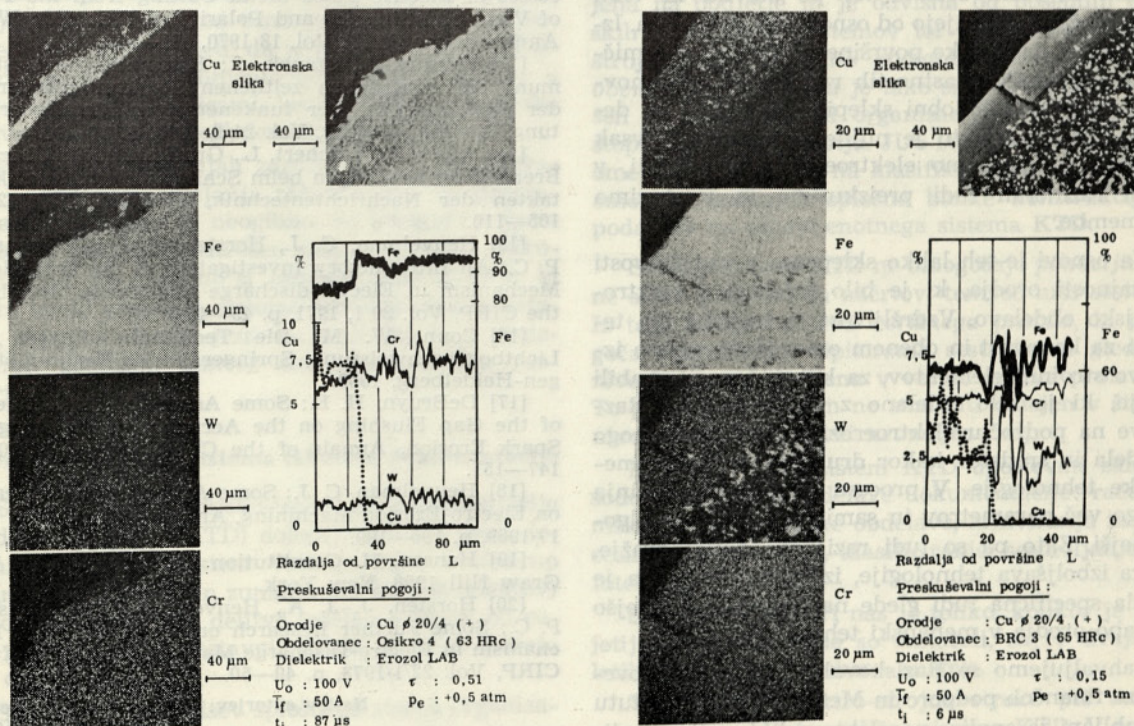
oblika tehnologije izdelovalcev EDM strojev (sl. 5). Ugotovitve najlepše ilustriramo s primeri mikroanaliz tipičnih orodnih jekel. V površinski plasti erodiranega orodnega jekla (sl. 11a) je opazna močno legirana bela plast z do 10 % bakra, cona ponovnega kaljenja in cona popuščanja. Bela plast na površini jekla (sl. 11b) je enofazna. V njej so lahko vsi elementi enakomerno porazdeljeni razen bakra in ostankov neraztopljenih karbidov iz jekla. Na kemično in fazno sestavo bele plasti vplivajo najbolj jeklo in uporabljene elektrode. Enofazno belo plast lahko pričakujemo na jeklih, ki imajo homogeno strukturo (npr. Č. 9682 — BRC 3 ima homogeno

Tabela 1

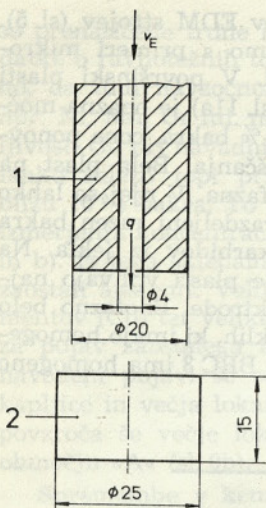
Jeklo	Legirni elementi v %									
	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	W	Mo	V	Co
Č.6444 (OSIKRO 4)	0,60	0,64	0,29	0,013	1,10	0,08	2,02	—	0,15	—
Č.9682 (BRC 3)	0,76	—	—	—	4,0	—	18,0	0,70	1,5	9,5

Tabela 2

Dielektrik	El. prebojna trdnost kV/mm (20 °C)	Gostota g/cm ³ (15 °C)	Vnetišče °C	Viskoznost °E (20 °C)	Jodno števílo g
EROZOL LAB	12	0,87	140...150	1,6...2,0	1



Sl. 11. Kemične in fazne spremembe v površini orodnih jekel



Sl. 12. Oblike orodja in obdelovanca za industrijske raziskave

1 — elektroda: Cu, 2 — obdelovanec, v_E — podajanje, q — pretok dielektrika

martenzitno strukturo), ali v primeru, če so delci heterogenih faz zelo drobni. Tak primer najdemo na sliki 11a, kjer je velikostni red zrna pri mehko žarjenem jeklu Č. 5742 (UTOP Ex 2) okrog $1\ \mu\text{m}$. Pri jeklih, ki imajo grobe karbide z visokim tališčem, lahko v beli plasti ostane še del karbidov neraztaljenih (sl. 11b). Količina in velikost ostalih karbidnih zrn v beli plasti je odvisna od kemične sestave karbidov v jeklu in od velikosti ter količine karbidov.

Površine z EDM procesom obdelanih jekel se po kemični in fazni sestavi ter po številu in vrsti okvar močno razlikujejo od osnovnega materiala. Iz tega izhaja, da se take površine po fizikalno kemičnih in tehnoloških lastnostih razlikujejo od osnovnega materiala. Podobni sklepi veljajo tudi za delovne elektrode. Zato je nujno potrebno, da vsak material, ki ga bomo elektroerozijsko obdelali, v danih razmerah tudi preizkusimo in ugotovimo spremembe.

Na osnovi le-teh lahko sklepamo o vzdržljivosti in trajnosti orodja, ki je bilo izdelano z elektroerozijsko obdelavo. Vzdržljivost in trajnost sta temelja za kakovost in obenem omogočata ceneno izdelavo strojnih elementov, za katere smo uporabili orodje, ki je bilo izdelano z elektroerozijo. Raziskave na področju elektroerozije zahtevajo mnogo več dela in sredstev kakor druge na področju mehanske tehnologije. V procesu se lahko spreminja mnogo več parametrov in sami preizkusi so dolgotrajnejši. Zato pa so tudi raziskave nekaj dražje. Vsaka izboljšava tehnologije, izdelave orodja pa je seveda specifična tudi glede na obliko in poznejšo uporabo orodja v mehanski tehnologiji.

Zahvaljujemo se Raziskovalni skupnosti Slovenije za finančno podporo in Metalurškemu inštitutu v Ljubljani za analize na elektronskem mikroanalizatorju.

LITERATURA

- [1] Roethel, F.: Elektroerozijska obdelava (EDM) na naših tleh. Strojniški vestnik 1976, št. 11—12, str. 325 do 332.
- [2] Roethel F.: Lastnosti površin pri EDM procesu. Strojniški vestnik 1977, št. 5—6, str. 125—132.
- [3] Avtorski kolektiv: Identifikacija kovinskih materialov na osnovi teorije impulznih procesov in raziskave integritete površin v odvisnosti od tehnoloških postopkov I. del; LAKOS, poročilo za SBK, Ljubljana 1975.
- [4] Avtorski kolektiv: Identifikacija kovinskih materialov na osnovi teorije impulznih procesov in raziskave integritete površin v odvisnosti od tehnoloških postopkov — II. del; LAKOS, Poročilo za SBK, Ljubljana 1976.
- [5] Roethel, F., Kosec, L., Garbajs, V.: Contribution to the Micro-Analysis of the Spark Eroded Surfaces. Annals of the CIRP, Vol. 25/1/1976, str. 135—140.
- [6] Lloyd, H. K., Warren, R. H.: Metallurgy of spark-machined surfaces; Journal of the Iron and Steel Institute, March 1965, p. 238—247.
- [7] Crookall, I. R.; Heuvelman, C. J.: Electro-Discharge Machining— the State of the Art; Annals of the CIRP, Vol. 20/2, 1971, p. 113—120.
- [8] König, W., Wertheim, R. Z., Winograd, Y.: Das Abtragverhalten bei der funkenerosiven Bearbeitung mit Einzelentladungen; Fertigung 74/6, s. 207—210.
- [9] König, W., Wertheim R., Zvirin, Y., Toren, M.: Material Removal and Energy Distribution in Electrical Discharge Machining, Annals of the CIRP, Vol. 24/1, 1975, p. 95/100.
- [10] Baileys, F., Frei, C., Manzin, E.: Elektrodenkurzschlüsse in der Elektroerosion, Fertigung 5/73, s. 147—151.
- [11] Snoeys, R., Cornelissen, H.: Corelation between Electro-Discharge Machining Data and Machining Settings, Annals of the CIRP, Vol. 24/1/1975 p. 83—88.
- [12] Meshcheriakov, G. N.: Electro-Physical Processes in Electric Pulse Metal Cutting from the Point of View of Efficiency and Polarity of Elektrode Wear, Annals of the CIRP, Vol. 18 1970, 491—499.
- [13] Zimany, J., Stanek, J.: Fotometrische Bestimmung der räumlichen zeitlichen Strukturveränderung der Entladung bei der funkenerosiven Metallbearbeitung, Annals of CIRP, Vol. 24/1, 1975, S. 89—94.
- [14] Abele, R., Borchert, L., Graffmann, E.: Über die Brenndauer von Bögen beim Schliessen von Relaiskontakten der Nachrichtentechnik, Frequenz 26/1972, S. 105—110.
- [15] Heuvelman, C. J., Horsten, J. J. A.: Veenstra, P. C.: An Introductory Investigation of the Breakdown Mechanism in Electro-discharge Machining, Annals of the CIRP, Vol. 20/1, 1971, p. 43—44.
- [16] Conn, W. M.: Die Technische Physik der Lichtbogenschweissung, Springer Verlag/Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1959.
- [17] DeBruyn, H. E.: Some Aspect of the Influence of the Gap Flushing on the Accuracy in Finishing by Spark Erosion, Annals of the CIRP, Vol. 18, 1970, p. 147—151.
- [18] Heuvelman. C. J.: Some Aspect of the Research on Electro-Erosion Machining, Annals of the CIRP, Vol. 17/1969, p. 195—199.
- [19] Hansen, M.: Constitution of Binary Alloys, McGraw Hill 1958, New York.
- [20] Horsten, J. J. A., Henvelman, C. J., Venstva, P. C.: Some Further Research on the Breakdown Mechanism in Electro-Discharge Machining, Annals of the CIRP, Vol. 22/1/1973, p. 49—50.

Naslov avtorjev: prof. dr. Franc Roethel, doc. dr. Ladislav Kosec, dipl. ing. Vito Garbajs, vsi Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani