

Lucjan DĄBROWSKI¹
Rafał ŚWIERCZ¹

STRUKTURA METALOGRAFICZNA POWIERZCHNI PO OBRÓBCE ELEKTROEROZYJNEJ

W referacie przedstawiono wyniki badań wpływu parametrów wejściowych obróbki elektroerozyjnej EDM: amplitudy prądu I, czasu impulsu t_{on} , czasu przerwy t_{off} , przy ustalonych pozostałych parametrach obróbki na strukturę metalograficzną i fizyczną warstwy wierzchniej. Badania wykonano według trójpoziomowego planowanego eksperymentu Boxa Behnkena.

1. WPROWADZENIE

Obróbka elektroerozyjna (EDM) polega na usunięciu materiału z przedmiotu obrabianego wskutek wyładowań elektrycznych zachodzących pomiędzy materiałem obrabianym a elektrodą roboczą, które zanurzone są w cieczy dielektrycznej. Metoda ta wykorzystywana jest do obróbki przedmiotów o złożonych kształtach wykonanych z materiałów trudnoobrabialnych, których przewodność elektryczna jest większa od 0,01 S/cm. Fizyka zjawisk usuwania materiału ma złożony charakter [1]. Przepływający w szczelinie międzyelektrodowej prąd powoduje topnienie i parowanie materiału obrabianego i elektrody roboczej, w wyniku czego powstają wgłębienia zwane kraterami. Materiał wyrzucony z karterów zastyga w dielektryku tworząc produkty obróbki. Część materiału, która nie została usunięta z krateru ponownie zastyga na powierzchni.

Stan warstwy wierzchniej (WW) po obróbce elektroerozyjnej wynika przede wszystkim z procesów cieplnych i przemian fazowych. W ich efekcie następuje:

- topnienie i odparowanie na powierzchni materiału,
- tworzenie kraterów,
- nowa struktura metalograficzna,
- zmiana stanu naprężeń w warstwie wierzchniej. Generowane są naprężenia rozciągające, które mogą powodować mikropęknięcia [2],[7].

Uzyskana nowa struktura metalograficzna charakteryzuje się występowaniem trzech specyficznych podwarstw: przetopionej, strefy wpływu ciepła i strefy odpuszczona. Stref tych nie spotyka się w przypadku tradycyjnych obróbek ubytkowych.

¹ Instytut Technik Wytwarzania, Politechnika Warszawska

2. METODYKA BADAŃ

Przeprowadzono badania doświadczalne w celu sprawdzenia wpływu parametrów obróbki: natężenia prądu I , czasu impulsu t_{on} i czasu przerwy t_{off} (przy stałych pozostałych warunkach) na strukturę metalograficzną warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej. Badania realizowane były wg. eksperymentu planowanego [8] trójpoziomowego trzyczynnikowego Boxa Behnkena (tabela 1) na obrabiarce elektroerozyjnej Charmilles Form 2LC ZCN. Obrobiono próbki o wymiarach 12 x 12 x 3mm z hartowanej do 52HRC stali WNL (1.2713), elektrodą miedzianą (M1E) w dielektryku (nafcie). W trakcie procesu EDM monitorowano i rejestrowano rzeczywiste przebiegi natężenia prądu i napięcia elektrycznego.

Tabela 1. Parametry obróbki realizowane w planowanym eksperymencie
Table 1. The machining parameters implemented in the planned experiment

Parametry wejściowe:	
■ amplituda natężenia prądu I w impulsie w przedziale:	3 – 14,3A,
■ czas impulsu t_{on} w przedziale:	13 - 400 μ s,
■ czas przerwy między impulsami t_{off} w przedziale:	9 - 150 μ s.
Parametry wejściowe ustalone:	
■ napięcie wyładowania	$U_c = 25V$.
Parametry wyjściowe:	
■ grubości poszczególnych struktur metalograficznych	

Przygotowane próbki zainkludowano w żywicy i poddano szlifowaniu, a następnie polerowaniu. Dokonano trawienia chemicznego nitaliem 5% w celu ujawnienia mikrostruktury materiału. Badania struktury metalograficznej powierzchni realizowano przy użyciu mikroskopu optycznego NIKON Eclipse LV 150, sprzężonego z komputerowym analizatorem obrazu NIS-Elements BR 3.0.

3. WYNIKI BADAŃ

Obróbka elektroerozyjna charakteryzuje się oddziaływaniem gwałtownych lokalnych procesów termicznych, w wyniku których w warstwie wierzchniej powstają przemiany fazowe [4],[6]. Na podstawie badań mikroskopowych stwierdzono występowanie trzech charakterystycznych podwarstw (rys. 1):

- zewnętrznej przetopionej (zwanej potocznie warstwą białą o obniżonej twardości w stosunku do materiału rdzenia),
- strefy wpływów cieplnych (HAZ - Heat Affected Zone), jest ona widoczna w postaci jasnej struktury położonej bezpośrednio pod warstwą przetopioną, warstwa

- ta posiada elementy struktury ukierunkowane wzdłuż kierunku odprowadzania ciepła, prostopadle do obrabianej powierzchni,
- odpuszczonej występującej w postaci ciemnej smugi.



Rys. 1. Mikrostruktura powierzchni po obróbce elektroerozyjnej
Fig. 1. The microstructure of the surface after EDM

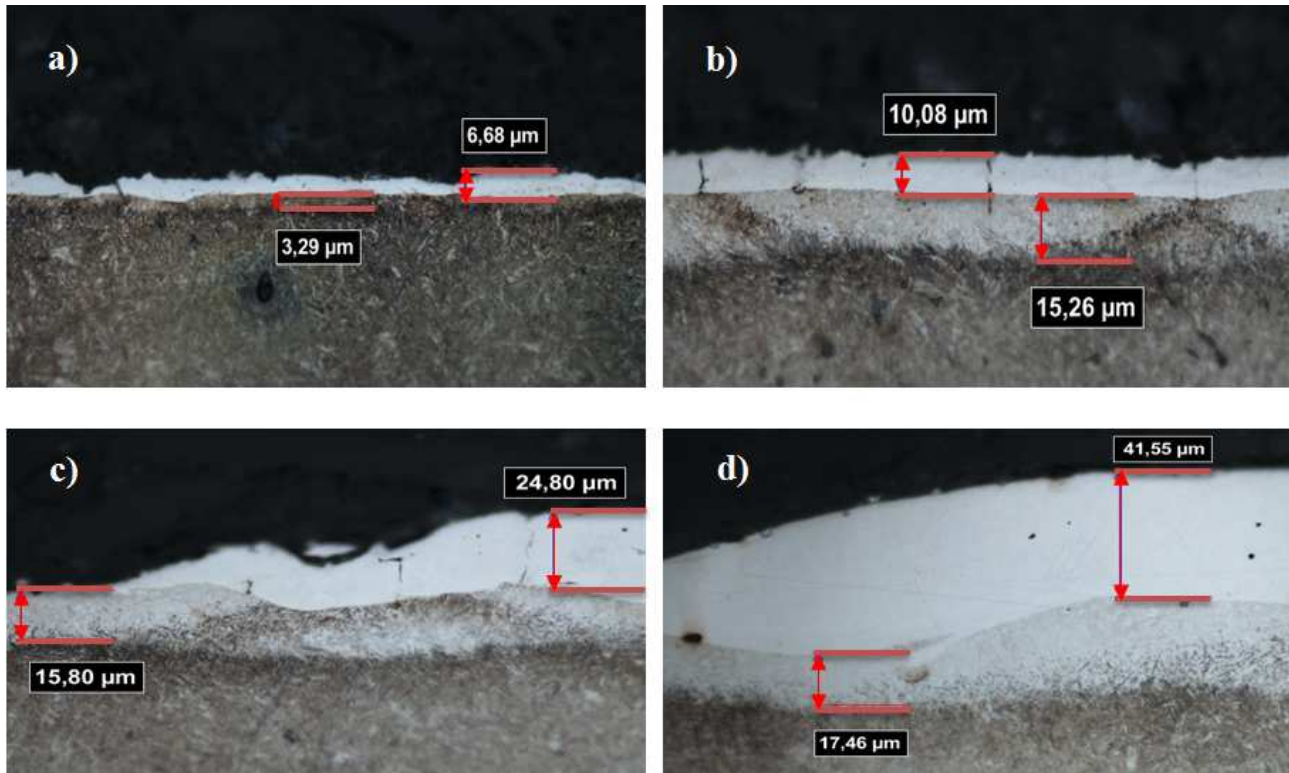
Warstwa biała powstaje wskutek roztopienia i gwałtownego krzepnięcia cienkiej warstwy metalu na powierzchni krateru. O wysokiej szybkości chłodzenia świadczy uchwycona (rys. 1) część materiału (po lewej), która roztopiona i „wyrzucona” w procesie erozji z krateru wyładowania nie rozłożyła się równomiernie na powierzchni materiału. Warstwa przetopiona nie podlega trawieniu klasycznymi odczynnikami (trawiona jest na kolor biały), stąd pochodzi jej nazwa.

Kierunek rozprzestrzeniania się struktur, prostopadły do materiału rdzenia, jest wynikiem szybkiego chłodzenia tych stref (około 100K/s) [3]. Pod warstwą białą znajdują się strefy wpływów ciepła, o podwyższonej twardości w stosunku do materiału rdzenia. Zbudowana jest z martenzytu listkowego i austenitu szczątkowego. Otrzymana struktura powstaje w wyniku dyfuzji węgla z pirolizy nafty i gwałtownego odprowadzania ciepła. Pod warwą HAZ znajduje się strefa odpuszczona. Warstwa odpuszczona powstaje w skutek oddziaływania energii cieplnej wyładowania elektrycznego (ogrzania tej strefy materiału), a następnie chłodzenia przez odprowadzanie ciepła do materiału rodzimego.

Występowanie poszczególnych warstw zaobserwowano dla wszystkich próbek. Grubość tych warstw zależy od zastosowanych parametrów obróbki. W oparciu o analizę fotografii struktur metalograficznych można stwierdzić, że:

- wzrost energii wyładowania powoduje wzrost grubości warstwy białej i strefy wpływu ciepła (rys. 2),
- warstwa przetopiona charakteryzuje się dużą zmiennością grubości (od 6 μ m do 42 μ m, rys. 2c, d) dla zastosowanych: średnich i najwyższych wartości amplitudy natężenia prądu I i czasu impulsu t_{on} . Wynika to ze zwiększonej ilości erodowanego materiału, wzrostu głębokości kraterów wyładowań, w których nierównomiernie, ponownie zakrzepł roztopiony materiał.

- przy najmniejszych wartościach amplitudy prądu i czasu impulsu, odpowiadającym parametrom obróbki wykańczającej, zaobserwowano równomierną grubość warstwy białej (od $6\mu\text{m}$ do $10\mu\text{m}$, rys. 2a, b),
- w warstwie białej występują defekty struktury w postaci mikropęknięć (rys. 2b, c).



Rys. 2. Struktura metalograficzna powierzchni po EDM odpowiadająca zarejestrowanym parametrom obróbki:

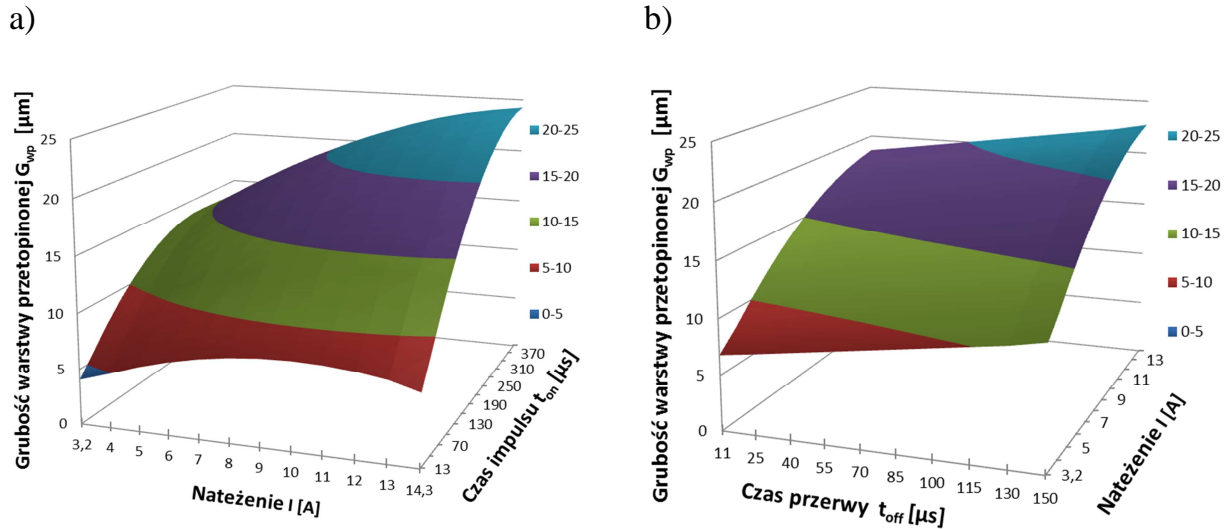
a) $U = 25\text{V}$, $I = 3,2\text{A}$, $t_{\text{on}} = 13\mu\text{s}$, $t_{\text{off}} = 11\mu\text{s}$, b) $U = 25\text{V}$, $I = 3,2\text{A}$, $t_{\text{on}} = 206\mu\text{s}$, $t_{\text{off}} = 100\mu\text{s}$, c) $U = 25\text{V}$, $I = 8,63\text{A}$, $t_{\text{on}} = 200\mu\text{s}$, $t_{\text{off}} = 11\mu\text{s}$, d) $U = 25\text{V}$, $I = 14,3\text{A}$, $t_{\text{on}} = 400\mu\text{s}$, $t_{\text{off}} = 150\mu\text{s}$

Fig. 2. Metallographic structure of surface layer after EDM for registered processing parameters: a) $U = 25\text{V}$, $I = 3,2\text{A}$, $t_{\text{on}} = 13\mu\text{s}$, $t_{\text{off}} = 11\mu\text{s}$, b) $U = 25\text{V}$, $I = 3,2\text{A}$, $t_{\text{on}} = 206\mu\text{s}$, $t_{\text{off}} = 100\mu\text{s}$, c) $U = 25\text{V}$, $I = 8,63\text{A}$, $t_{\text{on}} = 200\mu\text{s}$, $t_{\text{off}} = 11\mu\text{s}$, d) $U = 25\text{V}$, $I = 14,3\text{A}$, $t_{\text{on}} = 400\mu\text{s}$, $t_{\text{off}} = 150\mu\text{s}$

Podstawową cechą struktury metalograficznej wpływającą na własności eksploatacyjne przedmiotów po obróbce elektroerozyjnej jest grubość warstwy przetopionej G_{wp} . Dokonano pomiaru grubości warstwy białej w 5 przekrojach dla każdej z próbek na długości 10 mm. Uśrednione wyniki G_{wp} wykorzystano do wyznaczenia równania regresji. Dla badanego zakresu parametrów (tabela 1) wyznaczono zależność regresyjną wpływu wybranych czynników wejściowych na grubość warstwy przetopionej w programie STATISTICA. Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ uzyskano wysoki stopień korelacji wielorakiej $R = 0,894$. Adekwatność współczynnika badana była testem F-Snedecora ($F/F_{\text{kr}} > 1$), natomiast istotność poszczególnych współczynników równania regresji weryfikowana była testem t-studenta [7]. Grubość warstwy przetopionej opisana jest równaniem (1), a jego graficzna interpretacja przedstawiona jest na rysunku 3.

$$G_{wp} = -1,12 + 1,6 I + 0,05 t_{on} - 0,08 I^2 - 0,00001 t_{on}^2 - 0,002 I t_{on} + 0,00008 t_{on} t_{off} \quad (1)$$

$$R=0,894 \text{ dla } \alpha=0,05; F/F_k = 13,37; \text{ dla } \alpha=0,1 t_{1,2,3,4,5,6} > t_{kr}$$



Rys. 3. Zależność grubości warstwy przetopionej od: a) czasu impulsu t_{on} , natężenia prądu I przy stałym czasie przerwy $t_{off} = 80\mu s$, b) czasu przerwy t_{off} , natężenia prądu I przy stałym czasie impulsu $t_{on} = 206\mu s$,
 Fig. 3. The dependence white layer thickness of the: a) pulse time t_{on} and current I at constant time interval $t_{off} = 80\mu s$, b) time interval t_{off} and current I at constant pulse time $t_{on} = 206\mu s$

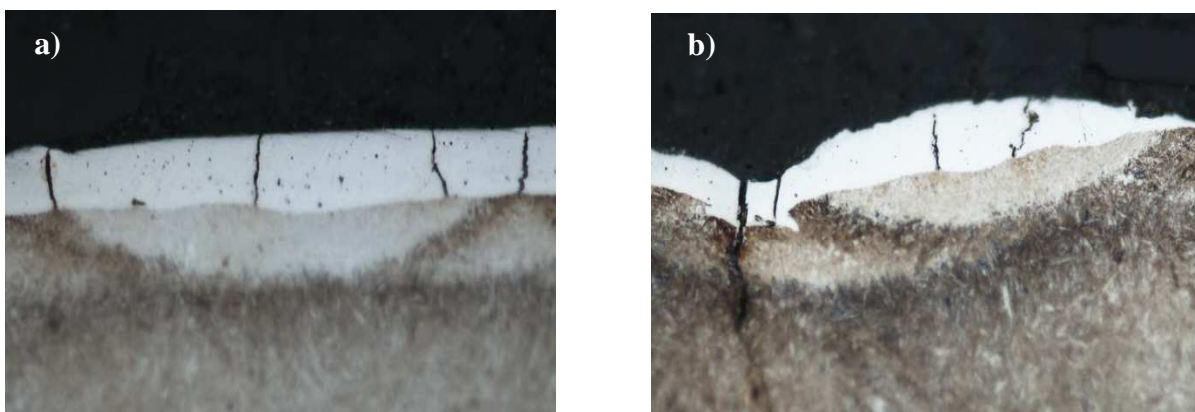
Grubość warstwy białej zależy w głównej mierze od ilości energii cieplnej dostarczonej do materiału obrabianego. Wzrost amplitudy natężenia prądu przy najmniejszym czasie impulsu nie powoduje istotnej zmiany wartości G_{wp} (rys. 3a). Wynika to z niewielkich ilości erodowanego materiału. Natomiast wzrost czasu impulsu i natężenia prądu powoduje zwiększenie ilości topionego i odparowanego materiału, w konsekwencji również większa ilość nieusuniętego materiału zastyga na powierzchni rdzenia. Czas przerwy między impulsami nie wpływa znacząco na zmianę grubości warstwy białej (rys. 3b).

3.1. DEFEKTY WARSTWY WIERZCHNIEJ PO OBRÓBCE EDM

W wyniku oddziaływań procesów termicznych zachodzących podczas obróbki EDM, w WW powstają mikropęknięcia. Przyczyną ich powstawania są naprężenia cieplne, wytworzone na skutek oddziaływań efektów termicznych wyładowania elektrycznego. Roztopiony materiał jest „wyrzucany” z kanału plazmowego, przy czym pozostaje cienka warstwa roztopionego metalu na powierzchni rdzenia materiału o znacznie niższej temperaturze. W wyniku chłodzenia i krzepnięcia roztopionej warstwy powstaje skurcz, któremu przeciwdziała materiał rdzenia, a w konsekwencji generowane są naprężenia rozciągające WW. Przekroczenie dopuszczalnej wytrzymałości na rozciąganie materiału jest

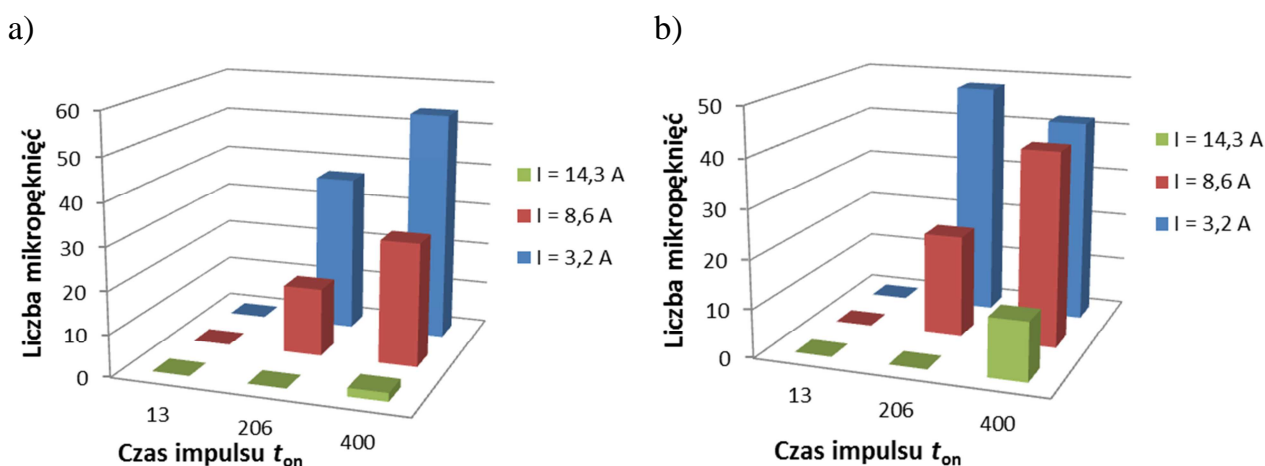
zatem podstawą tworzenia mikropęknięć [4],[5]. Mikropęknięcia są efektem niepożądanym, powodującym zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej oraz odporności na korozję.

Na podstawie analizy obrazów struktury metalograficznej powierzchni po EDM, stwierdzono, że mikropęknięcia pojawiają się na powierzchni krateru powstałego w wyniku wyładowania elektrycznego i skierowane są zazwyczaj prostopadle do powierzchni materiału (rys. 4). Mikropęknięcia w większości przypadków propagują do końca warstwy białej (rys. 4a). W nielicznych przypadkach zaobserwowano pęknięcie propagujące w głąb do rdzenia materiału (rys. 4b). Świadczyć to może o istniejących wadach w strukturze obrabianego przedmiotu.



Rys. 4. Mikropęknięcia: a) w warstwie białej, b) propagujące do materiału rdzenia
Fig. 4. Micro-cracks: a) in the white layer, b) spreading to the core material

Dokonano pomiaru liczby mikropęknięć zaobserwowanych na zglądach metalograficznych na odcinku o długości 10mm. Na rysunku 5a, 5b przedstawiono zależności liczby mikropęknięć od zastosowanych parametrów obróbki.



Rys. 5. Zależność liczby mikropęknięć w warstwie białej od: czasu impulsu t_{on} , natężenia prądu I przy stałym czasie przerwy a) $t_{off} = 80\mu s$, b) $t_{off} = 150\mu s$

Fig. 5. Relationship between the number of microcracks in the white layer by the pulse time t_{on} , current I at constant time interval $t_{off} = 80\mu s$, b) $t_{off} = 150\mu s$

Analiza wyników badań wykazała że:

- mikropęknięcia występują głównie w warstwie przetopionej, z nielicznymi przypadkami głębszej propagacji do warstwy HAZ,
- w warstwie wierzchniej po obróbce nie zaobserwowano mikropęknięć dla niskich wartości czasu impulsu ($t_{on} = 13\mu s$), niezależnie od amplitudy natężenia prądu,
- przy największej wartości natężenia prądu $I = 14,3A$, mikropęknięcia zaobserwowano tylko dla czasu impulsu $t_{on} = 400\mu s$,
- największa liczba zaobserwowanych mikropęknięć występuje dla najmniejszego natężenia prądu $I = 3,2A$ i najdłuższego czasu impulsu $t_{on} = 400\mu s$ (rys. 5a),
- wraz ze wzrostem czasu przerwy między impulsami t_{off} przy stałym natężeniu prądu I i czasie impulsu t_{on} , wzrasta liczba zaobserwowanych mikropęknięć (rys. 5b).

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały, że stan warstwy wierzchniej, w tym struktury metalograficznej i fizycznej (mikropęknięcia), uzależniony jest od zastosowanych parametrów obróbki. Głównym czynnikiem wpływającym na grubość warstwy przetopionej i strefy wpływu ciepła, jest czas trwania impulsu i natężenie prądu. Wzrost ilości erodowanego materiału powoduje również wzrost grubości nieusunętej z krateru wyładowania cienkiej warstwy metalu, która krzepnąc tworzy warstwę białą.

Defekty mikrostruktury (mikropęknięcia) wydają się być silnie powiązane z uzyskaną grubością warstwy przetopionej. W przypadku zastosowania parametrów odpowiadających obróbce wykańczającej uzyskano najmniejszą grubość warstwy przetopionej, ale również zaobserwowano największą liczbę mikropęknięć. Może to wynikać z koncentracji naprężeń rozciągających tuż pod warstwą białą, które prowadzą do jej pęknięcia. Wraz ze wzrostem grubości warstwy białej liczba zaobserwowanych mikropęknięć spada. Należy przeprowadzić dalsze badania uzyskanej warstwy wierzchniej, obejmujące m.in. pomiar naprężeń wewnętrznych, odporność na zużycie ścierne, które pozwolą na dokładne jej scharakteryzowanie.

LITERATURA

- [1] DĄBROWSKI L., ŚWIERCZ R., 2012, *Badania mikrostruktury warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej*, Świat Obrabiarek.
- [2] RUSZAJ A., GRZEŚ W., 2012, *Manufacturing of sculptured surface using EDM and ECM processes*, Machining of Complex Sculptured Surfaces, Springer – Verlag, London.
- [3] CUSANELLI G., HASSLER-WYSER A., BOBARD F., 2004, *Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM machining*, 14th ISEM Edynburg.
- [4] Lee H.T., Tai T.Y., 2003, *Relationship between EDM parameters and surface crackformation*, Journal of Materials Processing Technology, 142.
- [5] KURTH J. P., VAN HUMBEECK J., STEVENS L., 1995, *Micro structural investigation and metallographic analysis of the white layer of a surface machined by electrodischarge machining*, ISEM XI, Losanna.

- [6] GOSTIMIROVIC M., KOVAC P., 2011, *Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM*, Journal of Mechanical Science and Technology, 26, Springer, London.
- [7] BOUJELBENE M., BAYRAKTAR E., 2009, *Influence of machining parameters on the surface integrity in electrical discharge machining*, Materials Science and Engineering, World Academy of Materials and Manufacturing Engineering.
- [8] KORZYŃSKI M., 2006, *Metodyka eksperymentu, planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa.

METALLOGRAPHIC STRUCTURE OF THE SURFACE AFTER EDM

The paper presents the influence of the amplitude of I , pulse time t_{on} , the time break t_{off} , with the remaining processing parameters on the metallographic surface structure after EDM. Research was carried out by an planned experiment three-level Box Behnken. Research has shown that the surface layer in the metallographic structure are depends on the used processing parameters. The main factor influencing the thickness of the melted layer is the duration of the pulse. Microstructural defects (cracks) seem to be strongly linked with the resulting thickness of the melted layer.