

Sławomir SPADŁO¹
Dominik DUDEK¹
Krzysztof ŁAKOMIEC²
Piotr MŁYNARCZYK¹

BADANIA WPLYWU ODDZIAŁYWAŃ ELEKTROD SZCZOTKOWYCH NA KONSTYTUOWANIE STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ OBRABIANEJ POWIERZCHNI

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu oddziaływań mechanicznych elektrod szczotkowych na efekty technologiczne obróbki elektroerozyjno-mechanicznej. Scharakteryzowano oddziaływania fizyczne występujące w procesie wpływające na wydajność obróbki oraz konstituowanie właściwości warstwy wierzchniej. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wpływu energii pojedynczych wyładowań elektrycznych na objętość wyerodowanego metalu oraz charakterystyki mechaniczne elektrody szczotkowej. Wskazano na możliwość zwiększenia wydajności obróbki w wyniku występowania efektu synergii kilku rodzajów oddziaływań fizycznych występujących w procesie.

1. WPROWADZENIE

Obróbka erozyjno-mechaniczna elektrodą szczotkową BEDMM, z uwagi na występowanie równocześnie w procesie kilku rodzajów oddziaływań należy do grupy obróbek hybrydowych [2],[3]. Podczas obróbki występują trzy główne rodzaje oddziaływań elektroerozyjne, elektrochemiczne i mechaniczne. Istota procesu polega na stopniowym usuwaniu nadmiaru materiału z powierzchni obrabianej w wyniku tych oddziaływań [5],[6], w efekcie konstituowana jest warstwa wierzchnia przedmiotu obrabianego [9]. Kształtowana jest struktura geometryczna powierzchni przedmiotu, struktura metalograficzna, mikrotwardość, naprężenia własne i inne właściwości warstwy wierzchniej [1],[4].

Celem pracy jest określenie możliwości intensyfikacji obróbki elektrodą szczotkową poprzez zwiększenie intensywności oddziaływań mechanicznych elementów elektrody szczotkowej. Kolejnym zamierzeniem badawczym jest określenie wpływu oddziaływań

¹ Politechnika Świętokrzyska, Katedra Metaloznawstwa i Technologii Materiałowych

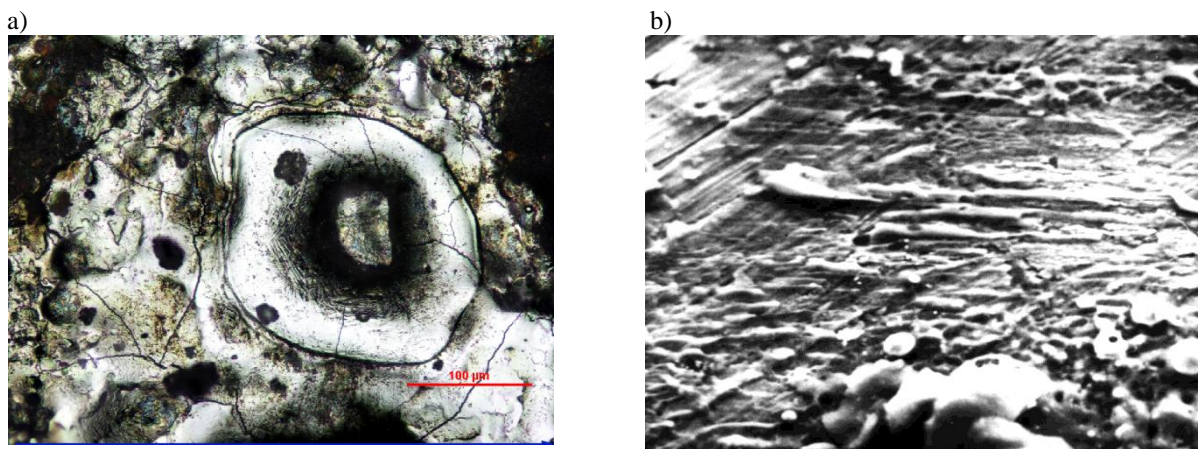
² Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania

mechanicznych elementów elektrod szczotkowych na konstytuowanie struktury geometrycznej powierzchni obrabianych elektroerozyjno-mechanicznie.

2. ANALIZA CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCYCH NA EFEKTY OBRÓBK ELEKTROEROZYJNO-MECHANICZNEJ ELEKTRODĄ SZCZOTKOWĄ

W obróbce erozyjno-mechanicznej głównym czynnikiem wpływającym na tworzenie struktury geometrycznej powierzchni są wyładowania iskrowe [7]. W wyniku pojedynczych wyładowań następuje lokalne topnienie i parowanie materiału, w efekcie powstają nierówności w postaci kraterów. Przykładowy kształt krateru przedstawiono na fotografii SEM (rys. 1a). Mają one charakter zdeterminowany, ich wielkość zależy od energii wyładowania, jednak wskutek losowego rozkładu położenia tych nierówności i wzajemnego ich przekrywania się tworzą strukturę o charakterze losowym [8].

Wzrost nacisków przy małej wartości napięcia może doprowadzić do zerwania warstwy pasywacyjnej z powierzchni. Powoduje to metaliczny styk elektrod i zanik wyładowań, a w efekcie zmianę oddziaływań na elektromechaniczne. W tych warunkach głównym oddziaływaniem kształtującym SGP jest bruzdowanie powierzchni przez poszczególne elementy szczotki [5].



Rys.1. Mikrofotografie SEM: a) efektu pojedynczego wyładowania w postaci krateru, napięcie $U = 10\text{V}$, $d = 0,3\text{mm}$, pow. 200x, b) śladów oddziaływań mechanicznych na roztopiony metal widocznych w postaci redystrybucji ciekłego i uplastycznionego metalu $\Delta = 0,5\text{mm}$, $U = 8\text{V}$, $d = 0,3\text{mm}$, $v_0 = 0,7\text{m/s}$, pow. 75x

Fig. 1. SEM photomicrographs: a) the effect of a single discharge in the form of a crater $U = 10\text{V}$, $d = 0,3\text{mm}$, magnification 200x, b) signs of mechanical interactions on the molten metal seen as a redistribution of the liquid and plasticized metal - b) $\Delta = 0,3\text{mm}$, $U = 8\text{V}$, $d = 0,3\text{mm}$, $v_0 = 0,7\text{m/s}$, magnification 75x

Dla typowych parametrów obróbki, mechaniczne oddziaływania elementów szczotki na roztopiony metal mogą powodować redystrybucję ciekłego metalu po obrabianej powierzchni. Przykład powierzchni z widocznymi efektami oddziaływań mechanicznych elementów szczotki na roztopiony metal przedstawiono na fotografii (rys. 1b). W wyniku

obserwacji fotografii ujawniono na obrabianej powierzchni ślady w postaci rozproszonych produktów erozji i metalu będącego w stanie plastycznym. Analiza wielu tego typu obrazów pozwala postawić hipotezę, że udział oddziaływań mechanicznych, w procesie BEDMM, w usuwaniu metalu i kształtowaniu właściwości warstwy wierzchniej może być znaczący.

Najistotniejszymi czynnikami wpływającymi na wydajność obróbki jest napięcie zasilające obwód roboczy obrabiarki, związana z nim energia wyładowań i towarzyszące jej procesy cieplne. W celu określenia wpływu energii wyładowań na efekty procesu erozji przeprowadzono eksperyment jednoczynnikowy, w którym jako parametr wejściowy zmienny przyjęto napięcie zasilające obwód roboczy i związaną z nim energię wyładowania pojedynczego impulsu. Badania przeprowadzono dla wartości napięć z przedziału 7 – 30V. Jako układ zasilający obwód wyładowań zastosowano kondensatory ładowane do odpowiedniego napięcia. Jako materiał do badań wykorzystano próbki wykonane z typowego spoiwa kompozytowego (M15) stosowanego w ściernicach diamentowych, elektroda robocza (ER) wykonana była z drutu wolframowego o średnicy $d = 0,3\text{mm}$, medium obróbcze stanowiła woda dejonizowana.

Badania przeprowadzono na specjalnie do tego celu zbudowanym stanowisku, umożliwiającym generowanie impulsów wyładowań elektrycznych o charakterze rozwarciowym, typowych dla obróbki elektroerozyjno-mechanicznej. Do pomiarów topografii powierzchni zastosowano profilometr IOS TOPO 01P z oprogramowaniem do analizy 3D.

Przedmiotem badań były rozkłady wartości parametrów profilu SGP 3D w funkcji energii wyładowania pojedynczego impulsu, uzyskane dla pojedynczych wyładowań, tj.:

a) parametry wysokościowe:

SP_p , μm – maksymalne wzniesienie profilu chropowatości 3D,

SP_v , μm – maksymalne wgłębienie profilu chropowatości 3D,

SP_z , μm – wysokość profilu chropowatości 3D,

b) rozkład wartości objętości w funkcji energii pojedynczego impulsu czasz kraterów oraz wypływek:

V_+ , mm^3 – objętość wzniesienia profilu (wypływkę na obrzeżu krateru) powyżej płaszczyzny odniesienia dla profilogramu 3D,

V_- , mm^3 – objętość wgłębienia profilu (krateru) poniżej płaszczyzny odniesienia dla profilogramu 3D,

c) topografia kraterów:

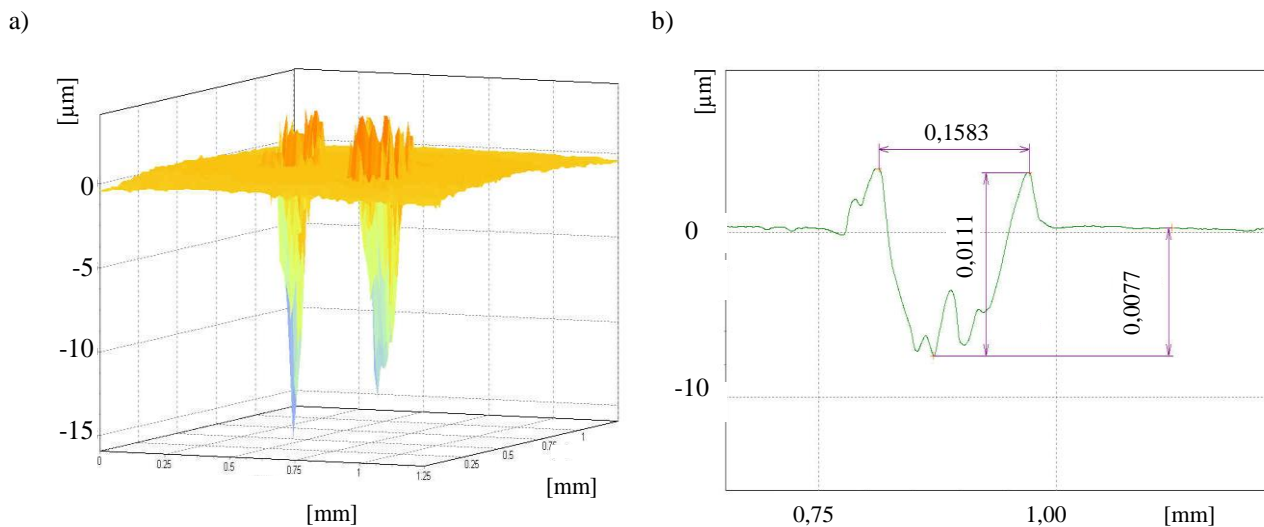
S , mm^2 – powierzchnia profilu 3D (czaszy krateru).

Na podstawie pięciu pomiarów profilogramów 3D określono objętość wyerodowanego materiału V_E .

Badania objętości wyerodowanego materiału, wykonane na podstawie analizy profilogramów 3D, zweryfikowano badając średnią objętość wyerodowanego materiału V_{Em} określoną na podstawie pomiarów ubytku masy próbki poddanej działaniu pakietu 100 impulsów o zadanych energiach.

Wyniki badań parametrów struktury geometrycznej powierzchni, odnoszące się do kształtu krateru uzyskanego w wyniku pojedynczego wyładowania, zilustrowano w postaci 3D (rys. 2a) i 2D (rys. 2b). Analiza kształtu wielu kraterów wskazuje, że objętość krateru

powstałego w materiale jest w przybliżeniu równa objętości wypływką wokół krateru. Z uwagi na uzyskiwany, w wyniku obróbki elektrodą szczotkową ubytek masy próbki, można wnioskować, że poza wyładowaniami elektrycznymi, oddziaływania mechaniczne są ważnym czynnikiem w procesie obróbki. Mają one udział w generowaniu wyładowań o charakterze rozwarciowym i oprócz depasywacji powierzchni powodują również usuwanie materiału ciekłego i uplastycznionego. Analiza kształtu i rozmiarów kraterów uzyskanych dla tych samych wartości energii wyładowania potwierdza, że jego efekty mają charakter losowy.



Rys. 2. Analiza kształtu kraterów: a) mapa wysokościowa 3D profilu dwóch kraterów. b) przykładowy profilogram krateru 2D wykonany

w jego osi. Parametry procesu średnica drutu $ER d = 0,3\text{mm}$, napięcie $U = 7\text{V}$, energia wyładowania $E_{imp} = 15,4\text{mJ}$
 Fig. 2. Shape analysis of craters: a) 3D map elevation profile of two craters, b) sample profilogram 2D crater made in its axis. Process parameters wire diameter $ER d = 0,3\text{mm}$, voltage $U = 7\text{V}$, discharge energy $E_{imp} = 15,4\text{mJ}$

Na podstawie eksperymentu planowanego [5] wyznaczono wpływ warunków obróbki na parametry charakteryzujące SGP:

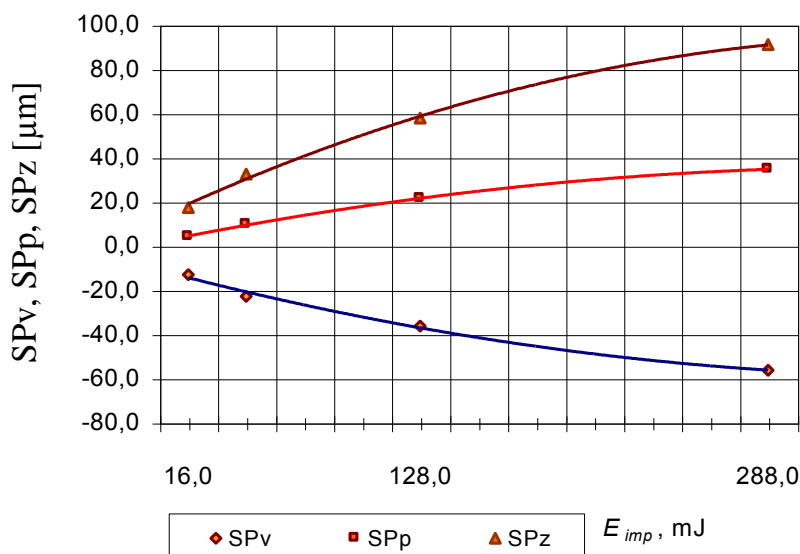
- parametry wysokościowe profilu
 - średnie arytmetyczne odchylenie profilu Ra , μm ,
 - całkowita wysokość profilu chropowatości Rt , μm [11] ($Rmax$, μm [10]),
 - największa wysokość profilu chropowatości Rz , μm [11] (Rm , μm [10]),
 - wysokość najwyższego wzniesienia profilu Rp , μm [11] (Rp , μm [10]),
 - głębokość najniższego wgłębienia profilu Rv , μm [11] (Rv , μm [10]),
- parametry wzdłużne profilu
 - średni odstęp lokalnych wzniesień chropowatości RS , μm [11] (S , μm [10]),
- parametry opisujące kształt nierówności profilu
 - średnie kwadratowe pochylenie profilu D_q , $^\circ$,
- parametry falistości
 - średnie arytmetyczne odchylenie profilu falistości W_a , μm ,

- maksymalna wysokość profilu falistości W_t , μm ,
- średni odstęp profilu falistości W_{sm} , mm.

Analiza kształtu wielu kraterów wskazuje, że objętość materiału wypłytki wokół krateru jest mniejsza niż objętość zagłębienia w powierzchni, określana jako objętość poniżej płaszczyzny średniej. Ze względu na uzyskiwane wysokie wydajności, w wyniku obróbki elektrodą szczotkową, można wnioskować, że poza wyładowaniami elektrycznymi oddziaływania mechaniczne elektrody na materiał stanowią istotny czynnik w procesie usuwania materiału w obróbce elektroerozyjno-mechanicznej. Oddziaływania mechaniczne elementów elektrody szczotkowej powodują, oprócz depasywacji powierzchni i udziału w generowaniu wyładowań o charakterze rozwarciowym, również usuwanie ciekłego i uplastycznionego metalu, głównie z obrzeża krateru.

Wyniki badań eksperymentalnych wymiarów pojedynczych kraterów poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem standardowych procedur, aproksymując je wielomianami drugiego stopnia.

Rozkład wartości średnich parametrów wysokościowych SP_v , SP_p , SP_z profilu 3D w funkcji energii pojedynczych impulsów wyładowań przedstawiono na rysunku 3. Z analizy przebiegów zmienności opisywanych parametrów wynika, że wraz ze wzrostem wartości napięcia w obwodzie roboczym i wraz ze wzrostem energii wyładowań wzrastają wysokości wzniesień (wypływek na obrzeżu krateru) i głębokości wgłębień profilu.

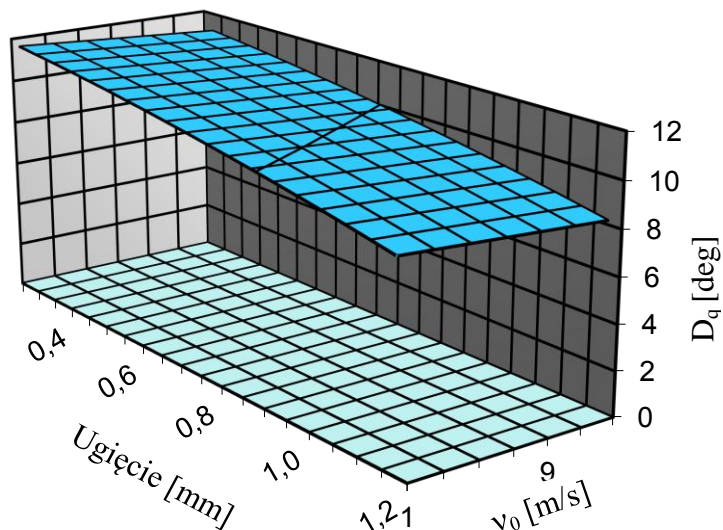


Rys. 3. Rozkład wartości średnich parametrów wysokościowych SP_v , SP_p , SP_z profilu 3D w funkcji energii pojedynczego impulsu

Fig. 3. The distribution of mean values of elevation parameters SP_v , SP_p , SP_z 3D profile as a function of pulse energy

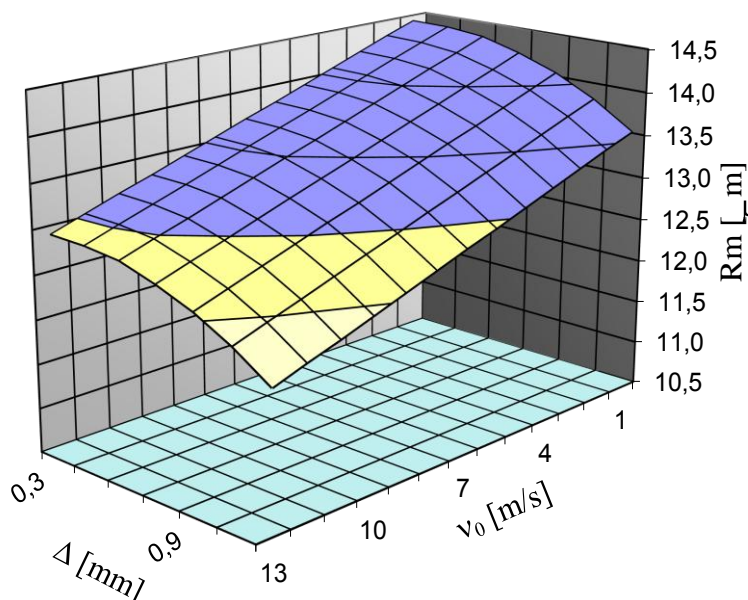
W wyniku oddziaływań mechanicznych elektrody szczotkowej na wierzchołki mikronierówności następuje zmniejszenie wysokości chropowatości, zwiększenie promieni ich zaokrągleń oraz zmniejszenie pochylenia profilu. Wykres przedstawiony na rysunku 4 przedstawia zależność parametru D_q od wartości ugięcia (Δ) pojedynczego drutu (elementu

sprężystego - ES) elektrody oraz jej prędkości obwodowej v_0 . Wraz ze wzrostem ugięcia następuje spadek wartości opisywanego parametru. Wzrost prędkości obwodowej ER powoduje zwiększenie oddziaływań dynamicznych ES na powierzchnię obrabianą i spadek wartości pochylenia profilu.



Rys. 4. Wpływ ugięcia elementu ER i prędkości obwodowej ER na średnie kwadratowe pochylenie profilu D_q , $U = 8V$, $v_f = 12\text{mm/min}$, $d = 0,3\text{mm}$

Fig. 4. The effect of the deflection element of hot electrode and the peripheral speed of electrode on the parameter D_q , $U = 8V$, $v_f = 12\text{mm/min}$, $d = 0,3\text{mm}$



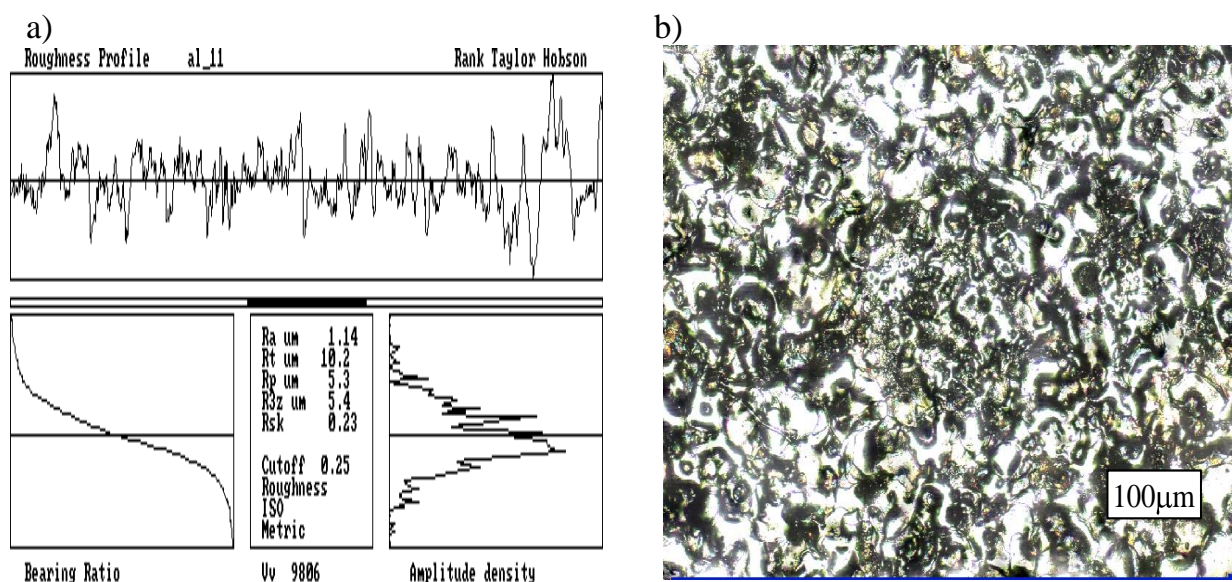
Rys. 5. Wpływ ugięcia elementu ER i prędkości obwodowej ER na największą wysokość profilu chropowatości - R_m , $U = 8V$, prędkość posuwu $v_f = 12\text{mm/min}$, $d = 0,3\text{mm}$

Fig. 5. The effect of the deflection element of hot electrode and the peripheral speed of electrode on the parameter R_m , $U = 8V$, feed rate $v_f = 12\text{mm/min}$, $d = 0,3\text{mm}$

Na rysunku 5 przedstawiono zależność parametru R_m – największa wysokość profilu chropowatości [10] od wartości ugięcia (Δ) i prędkości obwodowej elektrody roboczej. Wraz ze wzrostem oddziaływań mechanicznych spowodowanych wzrostem ugięcia i zwiększeniem prędkości obwodowej ER następuje zmniejszenie wartości R_m .

Wyniki badań zilustrowano przykładowym profilogramem powierzchni obrabianej w procesie obróbki erozyjno-mechanicznej elektrodą szczotkową. Jego analiza wskazuje, że usuwanie materiału zachodzi głównie na wierzchołkach mikronierówności. Końcowy efekt obróbki - powierzchnię po obróbce tzw. miękkimi parametrami ($U = 8V$) przedstawia rys. 6a, jego ocena wskazuje, że jest on niesymetryczny. Wysokość najwyższego wzniesienia profilu chropowatości R_p [10] jest około trzykrotnie mniejsza niż głębokość najniższego wgłębienia profilu chropowatości R_v [10]. Można wyróżnić strukturę podstawową wynikającą z oddziaływań iskrowych. Jej pozostałością są wgłębienia w postaci czasz kulistych. Struktura wtórna uwidaczniająca się na wierzchołkach nierówności, jest efektem oddziaływań mechanicznych na roztopiony lub doprowadzony do stanu plastycznego materiał. Chropowatość ma korzystny rozkład profilu charakteryzujący się płaskimi wierzchołkami.

Przedstawiona na rys. 6.b fotografia powierzchni pozwala na zaobserwowanie kraterów nakładających się na siebie; świadczy to o dużym udziale erozji elektroiskrowej w procesie. Brak na powierzchni obrabianej, typowych dla pojedynczych wyładowań i charakterystycznych dla EDM, kraterów w postaci czasz kulistych oraz obserwowane na niej efekty redystrybucji produktów erozji świadczą o istnieniu oddziaływań mechanicznych w procesie.



Rys. 6. Topografia powierzchni: a) przykładowy profilogram powierzchni b) mikrofotografia SEM powierzchni po obróbce BEDMM; napięcie obróbki $U = 12V$, pow. x 300

Fig. 6. Surface topography: a) sample of the surface profilogram, b) microphotographs SEM of the surface after treatment BEDMM; processing voltage $U = 12V$, mag. x 300

3. PODSUMOWANIE

1. W procesie obróbki elektroerozyjno-mechanicznej elektrodą szczotkową głównym czynnikiem powodującym kształtowanie SGP są wyładowania iskrowe.
2. W wyniku wzajemnych interakcji pomiędzy procesami elektroerozji i oddziaływaniami mechanicznymi obserwowany jest efekty synergetyczne objawiający się wzrostem wydajności procesu.
3. Wraz ze wzrostem nacisków ES elektrody roboczej spowodowanych zwiększeniem ich ugięcia następuje spadek wartości parametrów R_m , D_q . Zależność ta wskazuje, że w obróbce BEDMM oddziaływania mechaniczne elektrody roboczej koncentrują się głównie na wierzchołkach mikronierówności.
4. Ze względu na uzyskiwane wysokie wydajności, w wyniku obróbki elektrodą szczotkową, można wnioskować, że poza wyładowaniami elektrycznymi oddziaływania mechaniczne elektrody na materiał stanowią istotny czynnik w procesie usuwania materiału w obróbce elektroerozyjno-mechanicznej w wyniku usuwanie ciekłego i uplastycznionego metalu, głównie z obrzeża krateru.

Artykuł współfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki oraz ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego projektu „INWENCJA – Potencjał młodych naukowców oraz transfer wiedzy i innowacji wsparciem dla kluczowych dziedzin świętokrzyskiej gospodarki” oraz Naukowe Stypendia Doktoranckie szansą na rozwój województwa świętokrzyskiego.

LITERATURA

- [1] DAVYDOV A.D., KOZAK J., 1991, *Physico-Chemical Principles of Electrochemical Discharge Machining*, Surface Engineering and Applied Electrochemistry, USA, 3.
- [2] RUSZAJ A., 1999, *Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi*, IOS Kraków.
- [3] NOWICKI B., PIERZYNOWSKI R., SPADŁO S., 2001, *The superficial layer of parts machined by brush electro discharge mechanical machining (BEDMM)*, Proc. of II. Int. Conf. on Advances in Production Engineering, Part II. Warsaw, 229-236.
- [4] SPADŁO S., 2001, *Experimental investigations of the brush electro-discharge mechanical machining process – BEDMM*, Advances in Manufacturing Science and Technology. Quarterly Polish Academy of Science, 25/3, 117-135.
- [5] SPADŁO S., 2003, *Analysis of constrained filament deformation of a brush electrode*, Proc. of The 3rd International Conference on Machining and Measurement of Sculptured Surfaces, Kraków, 339-348.
- [6] SPADŁO S., 2004, *The analysis of brushing tool characteristics*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Quarterly Polish Academy of Sciences, Committee of Civil and Mechanical Engineering, IV/4, 27-40.
- [7] SPADŁO S., 2006, *Teoretyczno-eksperymentalne aspekty obróbki elektroerozyjno-mechanicznej*, Monografie, Studia, Rozprawy, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 195.
- [8] SPADŁO S., 2002, *Comparative studies of brush electrodischarge machining with electrodes of alloy steel and tungsten*, Advanced Manufacturing Systems and Technology, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Courses and Lectures - No.437, Springer–Verlag Wien New York, 515-524, ISBN 3-211-83689-6.
- [9] Norma PN-87 M-04256.
- [10] Norma PN-EN ISO 4287/1999.

INVESTIGATIONS OF INFLUENCE MECHANICAL INTERACTIONS OF BRUSH ELECTRODES
ON THE FORMATION OF THE SURFACE LAYER PROPERTIES

The article presents the results of the influence of mechanical effects of electrodes brush technology elektroerosion-mechanical processing. Characterized the impact of mechanical conditions in the process of influencing the efficiency of processing and properties of the surface layer constitution. The results of experimental studies of single impact energy of electric discharges on the volume of eroded metal and mechanical characteristics of the brush electrode. Pointed the potential for increased efficiency and productivity as a result of the occurrence of several types of synergies physical interactions occurring in the process.