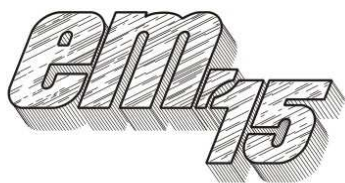


## XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji  
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW  
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7  
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,  
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

## Topografia powierzchni po obróbce EDM stali HTCS 150

### Surface texture of HTCS 150 steel after EDM

RAFAŁ ŚWIERCZ<sup>1</sup>  
DOROTA ONISZCZUK – ŚWIERCZ<sup>2</sup>  
MICHAŁ MARCZAK<sup>3</sup>

W artykule przedstawiono wpływ głównych parametrów warunkujących proces usuwania materiału w warunkach obróbki elektroerozyjnej tj. natężenia prądu wyładowania  $I$ , oraz czasu impulsu  $t_{on}$  na wybrane składowe warstwy wierzchniej stali HTCS 150. W pracy zastosowano analizę regresji wielorakiej do wyznaczenia statystycznych modeli matematycznych opisujących wpływ przyjętych zmiennych niezależnych na wybrane parametry warstwy wierzchniej.

**SŁOWA KLUCZOWE:** EDM, warstwa wierzchnia, HTCS 150.

*This paper present experimental studies of influence the main parameters of EDM process such as: discharge current  $I$  and the pulse time  $t_{on}$  on the selected parameters of surface texture HTCS 150 steel. Studies were conducted by design of experiment. Results of experiment were developed by multiple regression analysis.*

**KEYWORDS:** EDM, surface texture, roughness, HTCS 150.

#### Wstęp

Nowe materiały narzędziowe wymagają zaawansowanych sposobów ich kształtowania. Konwencjonalne metody obróbki coraz częściej wypierane są przez obróbkę elektroerozyjną, elektrochemiczną czy też laserową. Implementacja nowoczesnych rozwiązań wiąże się z pełną kontrolą procesu obróbkowego pozwalającym na określenie wpływu warunków i parametrów obróbki zarówno na wydajność usuwania materiału jak i końcowy stan warstwy wierzchniej. Obróbka elektroerozyjna drążeniem wgłębnym jest jednym z podstawowych sposobów kształtowania materiałów trudnoobrabialnych. Materiał usuwany jest w wyniku oddziaływania procesów fizycznych wywołanych wyładowaniami

elektrycznymi pomiędzy dwoma elektrodami zanurzonymi w płynnym dielektryku. Gwałtowne procesy termiczne powodują topienie i odparowanie materiału tworząc na powierzchni materiału krater. Powstaje specyficzny stan struktury geometrycznej powierzchni, której stereometria ukształtowana jest poprzez nałożenie się śladów pojedynczych wyładowań elektrycznych. Kształt i głębokość poszczególnych kraterów zależą w głównej mierze od charakteru impulsów elektrycznych (zastosowanych parametrów obróbki), tj. natężenia prądu, czasu impulsu, czasu przerwy, napięcia wyładowania. Wzrost natężenia prądu powoduje wzrost ilości erodowanego materiału w trakcie pojedynczego wyładowania. Czas impulsu decyduje o ilości energii cieplnej dostarczonej do materiału obrabianego i również istotnie wpływa na ilość erodowanego materiału [1, 2, 4, 8, 12].

Badania prowadzone przez Kiyaka [3] wykazują, iż przy krótkich czasach impulsu rzędu 2 - 100  $\mu$ s i stałym czasie przerwy (2  $\mu$ s) wzrost natężenia prądu nie wpływa znacząco na zmianę parametru chropowatości  $Ra$ . Według autorów większy wpływ na wartość parametru chropowatości  $Ra$  ma czas impulsu. Guu [2] w swoich publikacjach potwierdza, iż również dla mniejszych wartości natężenia prądu, decydującym czynnikiem wpływającym na chropowatość ( $Ra$ ) jest czas impulsu. Pradhan [9] stwierdza natomiast, iż nie ma ścisłej i linowej korelacji pomiędzy wartością natężenia prądu i czasu impulsu a chropowatością powierzchni ( $Ra$ ). W swoich badaniach zauważa, iż w pewnych obszarach zmienności czynniki te mogą mieć raz mniejszy a raz większy wpływ na chropowatość powierzchni. Gostimirovic [1] w swojej pracy zwraca uwagę na wysoką korelację parametru chropowatości  $Ra$  do energii wyładowania. Wraz ze wzrostem energii wyładowania, większa jej część dostarczana jest do materiału obrabianego powodując proporcjonalnie większą erozję materiału, która generuje chropowatość. Thomadi [11] natomiast wskazuje, że spośród parametrów opisujących charakter impulsów elektrycznych,

<sup>1</sup>dr inż. Rafał Świercz (rsw@meil.pw.edu.pl)

<sup>2</sup>dr inż. Dorota Oniszczyk - Świercz (doo@meil.pw.edu.pl)

<sup>3</sup>mgr inż. Michał Marczak (mim@meil.pw.edu.pl)

głównym czynnikiem wpływającym na chropowatość powierzchni ( $Ra$ ), jest napięcie wyładowania i czas przerwy między impulsami. Natężenie wyładowania i czas impulsu wg. autora nie odgrywają znaczącej roli w kształtowaniu wartości parametru chropowatości  $Ra$ .

Wprowadzenie nowych sposobów pomiarów SGP z wykorzystaniem między innymi profilometrów skaningowych umożliwia ocenę jej właściwości z wykorzystaniem parametrów (3D) stereometrii. Większość parametrów 2D ma swoje odpowiedniki w opisie 3D. Dobór odpowiednich parametrów charakteryzujących badaną powierzchnię powinien uwzględniać zakładane własności powierzchni. Do oceny SGP powinny być stosowane, zatem parametry, którymi możliwe jest sterowanie w poszczególnych procesach produkcji i które są niezależne względem siebie [5, 6].

### Cel badań

Prowadzone badania doświadczalne mają na celu analizę stanu warstwy wierzchniej nowych materiałów wykorzystywanych w produkcji form wtryskowych (stal narzędziowa HTCS). Materiał ten w porównaniu do dotychczasowo stosowanych charakteryzuje się wysokim przewodnictwem cieplnym (do 60 W/m K) i wysoką wytrzymałością, co istotnie wpływa na trwałość form wtryskowych. Ze względu na wysokie przewodnictwo cieplne stali narzędziowej HTCS spodziewane są istotne różnice w stanie warstwy wierzchniej obrabianego elektroerozyjnie przedmiotu w stosunku do dotychczas stosowanych stali narzędziowych do pracy na gorąco.

### Przedmiot badań

Obróbce elektroerozyjnej poddano próbki ze stali HTCS 150. Zdecydowano się na użycie tego materiału ze względu na szerokie zastosowanie na formy wtryskowe, formy odlewnicze, matryce kuźnicze do pracy na gorąco, które w głównej mierze wytwarzane są przy użyciu EDM. Stal ta charakteryzuje się wysoką przewodnością cieplną 66 W/mK oraz wysoką wytrzymałością na dynamiczną zmianę obciążenia.

### Metodyka badawcza

Procesy wywarzania charakteryzują się oddziaływaniem wielu zmiennych wejściowych na końcowe właściwości przedmiotów. W badania doświadczalnych budowane są uproszczone modele opisujące badany obiekt. Jedną z głównych metod badawczych pozwalających na określeniu związku i siły oddziaływania poszczególnych czynników wejściowych na określone czynniki wyjściowe jest regresja wieloraka.

Przeprowadzono badania doświadczalne określające wpływ parametrów energetycznych wyładowania na skutki jakościowe obróbki (stan warstwy wierzchniej). Badania doświadczalne prowadzone były na obrabiarkie elektroerozyjnej firmy Charmilles Form 2LC ZNC. Poddano obróbce EDM szlifowane próbki o wymiarach 12 x 12 mm stali HTCS 150, elektrodą grafitową POCO EDM3.

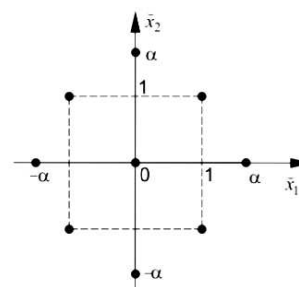
Badania doświadczalne przeprowadzono według planu ortogonalnego dwupoziomowo gwiazdowego. Schemat planu przedstawiono na rys. 21. Poszczególne zakresy zmienności wartości zmiennych niezależnych dobrano na podstawie analizy tablic technologicznych dla polaryzacji prostej, pary elektrod grafit i stal. Następnie przeprowadzono badania wstępne weryfikujące stabilność wyładowań oraz możliwości ustawienia na poszczególnych poziomach zmienności badanych zmiennych niezależnych.

Warunki badań:

- polaryzacja prosta,
- dielektryk: nafta,
- napięcie wyładowania  $U = 25$  V,
- głębokość drążenia: 0,2 mm,
- zmienne niezależne monitorowane i rejestrowane w trakcie procesu: amplituda natężenia prądu  $I$  w impulsie w zakresie: 3 – 24 A, czas impulsu  $t_{on}$  w zakresie: 50 – 250  $\mu$ s, czas przerwy między impulsami  $t_{off}$ , przyjęto, jako współczynnik wypełnienia impulsu  $\sigma = 0,7$ ,

$$\sigma = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = 0,7 \quad (1)$$

gdzie:  $t_{on}$  – czas impulsu,  $t_{off}$  – czas przerwy między kolejnymi impulsami.



Rys. 1. Schemat planu

### Topografia powierzchni

Zewnętrzna część warstwy wierzchniej określona jest poprzez topografię powierzchni, której budowę określają jej poszczególne parametry: chropowatość, falistość, i błędy kształtu w skali makro. Pomiarów topografii powierzchni dokonano przy użyciu wysokiej klasy profilometru skanującego firmy Taylor Hobson FORM TALYSURF Series 2. Dla każdej z próbek dokonano pomiaru powierzchni o wymiarach 1 x 4 mm. Przyjęto krok dyskretyzacji w osi X i Y równy 10  $\mu$ m. Ze względu na większą ilość informacji, którą dostarcza pomiar topografii powierzchni, w pracy zdecydowano się na charakterystykę mierzonych powierzchni przy użyciu następujących parametrów 3D:

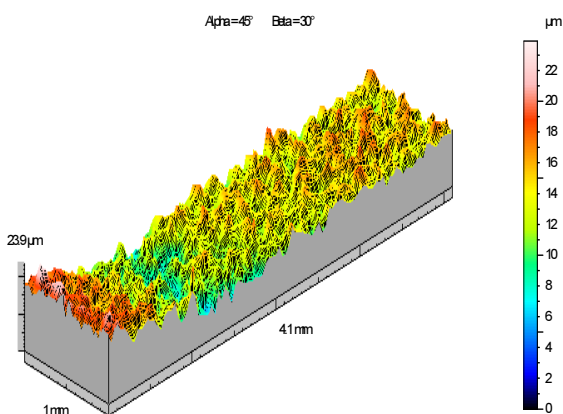
- średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni  $Sa$ , parametr podstawowy opisujący amplitudę chropowatości,
- średnie kwadratowe pochylenie chropowatości powierzchni  $Sdq$ , parametr hybrydowy opisujący kształt nierówności,
- średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołów nierówności powierzchni  $Ssc$ , parametr hybrydowy opisujący kształt nierówności.

Wyniki pomiarów analizowanych parametrów przedstawiono w tabeli 1.

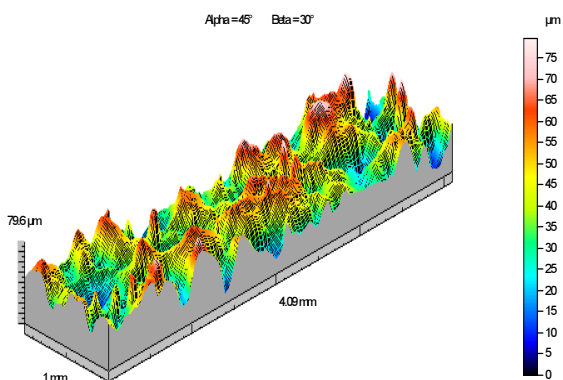
Tabela 1. Zestawienie wartości analizowanych parametrów SGP

Lp.	Parametry kodowane		Parametry obróbki		Parametry SGP		
	I [A]	$t_{on}$ [ $\mu$ s]	I [A]	$t_{on}$ [ $\mu$ s]	Sa [ $\mu$ m]	Sdq	Ssc [ $1/\mu$ m]
1.	-1	-1	80	6	4,6	0,316	0,113
2.	-1	1	80	21	7,53	0,301	0,112
3.	1	-1	221	6	2,65	0,155	0,0713
4.	1	1	221	21	11,4	0,368	0,151
5.	-1,41	0	50	14	7,01	0,382	0,138
6.	1,41	0	250	14	10,4	0,37	0,139
7.	0	-1,41	150	3	2,11	0,131	0,0701
8.	0	1,41	150	24	11,8	0,324	0,125
9.	0	0	150	14	9,76	0,38	0,153
10.	0	0	150	14	9,33	0,387	0,139

Poniżej przedstawiono przykładowe obrazy topografii powierzchni po obróbce wraz z kształtującymi je przebiegami natężenia prądu i napięcia elektrycznego (rys. 2). a)



b)



Rys. 2. Obraz stereometryczny powierzchni po obróbce elektroerozyjnej dla parametrów obróbki: a)  $U = 25$  V,  $I = 3,2$  A,  $t_{on} = 150$   $\mu$ s, b)  $U = 25$  V,  $I = 24$  A,  $t_{on} = 150$   $\mu$ s

Struktura geometryczna powierzchni po obróbce elektroerozyjnej jest tworzona w wyniku nakładania się śladów pojedynczych wyładowań elektrycznych i ma charakter lo-

sowy. W zależności od wartości natężenia prądu i czasu impulsu (przy ustalonych pozostałych parametrach i warunkach obróbki) występują znaczne różnice w jej budowie. Rozkład rzędnych oraz rozkład miejscowych wzniesień dla mierzonych próbek jest rozkładem normalnym, co prowadzi do niekorzystnych własności nośnych powierzchni.

Średnie kwadratowe pochylenie chropowatości powierzchni  $Sdq$ , zmienia się od 0,013 do 0,387. Dla zbliżonych wartości  $Sa$ , wartość parametru  $Sdq$  może osiągać dosyć istotne różnice w wartościach. Wynika to z faktu, iż parametr ten uzależniony jest zarówno od amplitudy chropowatości jak i odległości między nimi. Średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołów nierówności powierzchni  $Ssc$  zmienia się w przedziale od 0,07 do 0,151. Wartość  $Sdq$  i  $Ssc$  mają istotny wpływ na min. zużycie ściernie powierzchni, możliwość nanoszenia powłok, czy też jej refleksyjność. Im wyższe pochylenie i mniejszy promień zaokrąglenia tym wierzchołki nierówności mają bardziej zaokrąglony charakter, co prowadzi do zwiększenia współczynnika tarcia, jednocześnie zwiększając własności adhezyjne powierzchni.

W pracy wyznaczono statystyczne modele matematyczne procesu obróbki na podstawie zależności statystycznych (analiza regresji) uwzględniających wpływ przyjętych zmiennych wejściowych na wybrane parametry warstwy wierzchniej. Wyznaczono równania regresji opisane funkcją wielomianu stopnia drugiego (tabela 6.3) w programie STATISTICA. Dla każdego równania określono współczynnik korelacji  $R$ , odzwierciedlający zmienność badanej cechy. Istotność otrzymanego współczynnika korelacji (jego adekwatność na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ ) sprawdzano testem Fishera – Snedecora (dla  $F/F_{kr} > 1$  współczynnik  $R$  jest istotny). Guilford [10] określił przedziały zmienności współczynnika korelacji wielorakiej  $R$  i jego znaczenie przy określeniu zgodności funkcji regresji z danymi empirycznymi uzyskanymi w badaniach doświadczalnych (tabela 2).

Tabela 2. Ocena współczynnika korelacji  $R$  [10]

Współczynnik korelacji $R$	Korelacja	Zależność
poniżej 0,20	słaba	prawie nic nie znacząca
0,20 – 0,40	niska	wyraźna lecz mała
0,40 – 0,70	umiarkowana	istotna
0,70 – 0,90	wysoka	znaczna
0,90 – 1,00	bardzo wysoka	bardzo pewna

Dokonano również weryfikacji istotności współczynników równania regresji za pomocą testu t-Studenta. Na jego podstawie wnioskuje się o istotności bądź nieistotności wpływu konkretnego czynnika równania regresji (na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  spełnia warunek:  $t_1, t_n, t_{n+1} > t_{kr}$ ). Wybrane zależności regresyjne przedstawiono w tabeli 3.

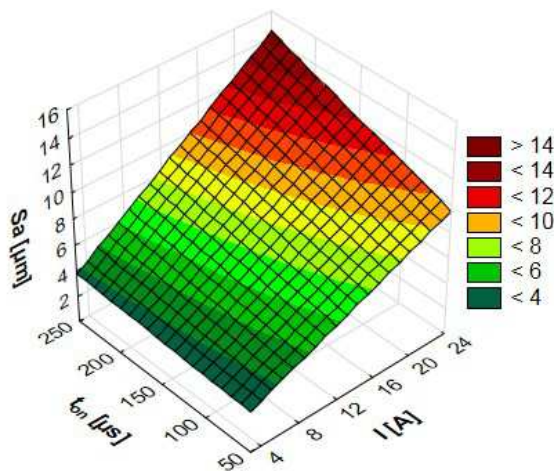
Tabela 3. Równania regresji opisujące parametry SGP

Równanie regresji	$R$	$F/F_{kr}$
$Sa = 2,22 + 0,25 I + 0,001 I t_{on}$	0,88	4,76
$Sdq = 0,32 - 0,0007 I + 0,00005 I t_{on}$	0,64	1,11
$Ssc = 0,11 - 0,0002 I + 0,00002 I t_{on}$	0,65	1,55

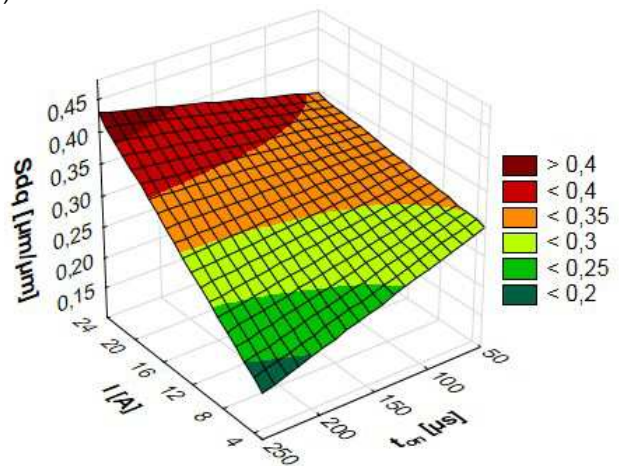
Uzyskane równanie regresji opisujące parametr wysokościowy chropowości  $S_a$  charakteryzuje się wysokim stopniem korelacji  $R$ , a stosunek  $F/F_{kr}$  jest znacząco większy od jedności. Równania opisujące parametry hybrydowe nierówności charakteryzują się natomiast umiarkowaną korelacją jednocześnie wykazując istotną zależność. Pozwalają zatem na wnioskowanie na temat charakteru zachodzących zmian, w zależności od wartości parametrów wejściowych procesu. Graficzna prezentacja uzyskanych zależności przedstawiona jest na rysunku 3.

Parametry wysokościowe chropowości (np.  $S_a$  – rys. 3a) w głównej mierze uzależnione są od wartości natężenia prądu wyładowania. Wzrostowi natężenia prądu i czasu impulsu odpowiada wzrost ilości erodowanego materiału w pojedynczym impulsie prowadząc do generowania chropowości o większej wysokości. Przy niewielkich wartościach natężenia prądu (rzędu 3 A) zwiększanie czasu wyładowania (a tym samym energii) nie powoduje znaczącego wzrostu parametru  $S_a$ . Może mieć to związek z ilością energii cieplnej wytworzonej i dostarczonej do materiału obrabianego w procesie wyładowania, która powoduje topnienie i odparowanie materiału, zależnej od wartości natężenia prądu. Kształt nierówności opisany średnią arytmetyczną krzywizną wierzchołów nierówności powierzchni  $S_{sc}$  i średnim kwadratowym pochyleniem chropowości powierzchni  $S_{dq}$ , uzależniony jest zarówno od natężenia prądu jak i czasu impulsu. Dla najwyższych wartości energii wyładowania tworzone są kratery zarówno o największej głębokości, ale również wierzchołki nierówności mają największy promień. Może to być spowodowane ponownym krzepnięciem roztopionych mikro strug materiału, które w procesie erozji nie zostały usunięte i ponownie zakrzepły na powierzchni nierówności. Zgodnie z hipotezami rozprzestrzeniania się strumienia ciepła w trakcie wyładowania elektrycznego przyjmowany jest gaussowski rozkład gęstości mocy. Dla krótkich czasów impulsów i najmniejszych wartości natężenia prądu struktura geometryczna powierzchni charakteryzuje się dużym zagęszczeniem wierzchołków nierówności. Wzrost natężenia prądu i czasu impulsu powoduje zwiększenie średnicy i mocy kanału wyładowania, co prowadzi do generowania chropowości o znacznie większej wysokości, odległości między poszczególnymi wierzchołkami i większym pochyleniu chropowości.

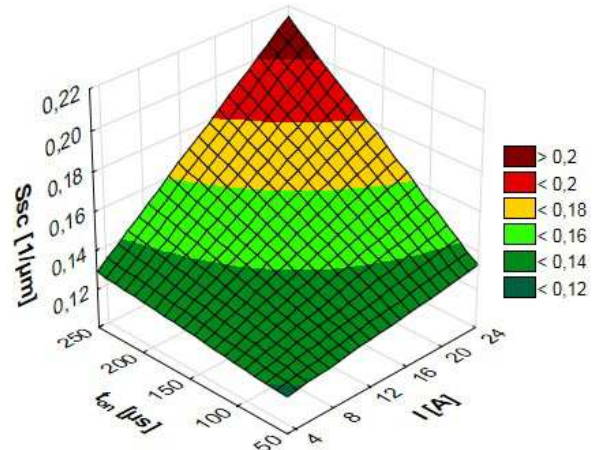
a)



b)



c)



Rys. 3. Zależność parametrów chropowości powierczni: a)  $S_a$ , b)  $S_{dq}$ , c)  $S_{sc}$ , od czasu impulsu  $t_{on}$  i natężenia prądu  $I$

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania doświadczalne wykazują, iż w przypadku obróbki stali HTCS dla analizowanych zmiennych niezależnych większy wpływ zarówno na parametry wysokościowe jak i hybrydowe chropowości powierzchni ma natężenie prądu wyładowania. Ze względu na wysokie przewodnictwo cieplne materiału zwiększenie czasu impulsu przy stałym natężeniu nie powoduje znaczącego wzrostu ilości usuwanego materiału. Strumień ciepła rozprzestrzenia się w głąb materiału ograniczając ilość energii cieplnej przetworzonej bezpośrednio na procesy topnienia i odparowania metalu.

Opracowane równania regresji mogą być podstawą doboru paramterów obróbki dla uzyskiwania oczekiwanych wartości parametrów chropowości. Należy zwrócić uwagę, iż ze względu na fizykę usuwania materiału, sterowanie procesem obróbki umożliwiające otrzymanie wartości skrajnych dla analizowanych parametrów chropowości powierzchni jest trudne np. uzyskanie najmniejszej wartości parametru  $S_a$  oraz największego promienia zaokrąglenia wierzchołków nierówności  $S_{sc}$ .

## Literatura

- Gostimirovic M., Kovac P., Sekulic M., Skoric B.: Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM, Journal of Mechanical Science and Technology, 26, 1, 173 – 179, 2012.
- Guo Y. H., Ti – Kuang Hou M.: Effect of machining parameters on surface textures in EDM of Fe – Mn – Al alloy, Materials Science and Engineering, 466, 1 – 2, 61 – 67, 2007.

3. Kiyak M., Caker O.: Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 191, 1 – 3, 141 – 144, 2007.
4. Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P., Schumacher B. M.: Advancing EDM through fundamental insight into process, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 54, 2, 64 – 87, 2005.
5. Nowicki B.: Zaawansowane metody opisów i pomiarów struktury geometrycznej powierzchni, *Mechanik*, R. 80, 1, 36 – 41, 2007.
6. Oczos E. K., Liubimov V.: Rozważania nad istotnością parametrów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D, *Mechanik*, R. 81, nr 3, 129 – 137, 2008.
7. Perez R., Boccadoro M., Cusanelli G., Flukiger R., Mestral F., Rojas H., Brans K., Lauwers B.: *Advanced Strategies for Improving the Surface Integrity in Electroerosion Machining*, ISEM, 2010.
8. Podolak-Lejtas A., B. Nowicki, A.Dmowska, A new method of investigating crater and flash made by individual discharge using scanning profilometers, *WEAR*, 121-126, 2010.
9. Pradhan M. K., Biswas C. K.: Modeling and Analysis of process parameters on Surface Roughness in EDM of AISI D2 tool Steel by RSM Approach, *International Journal of Mathematical*, 3, 1, 2009.
10. Polański Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*. PWN, Warszawa, 1984.
11. Tomadi S. H., Hassan M. A., Hamedon Z., Daud R., Khalid A. G.: Analysis of the Influence of EDM Parameters on Surface Quality, Material Removal Rate and Electrode Wear of Tungsten Carbide, *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 2, 2009.
12. Świercz R. Kształowanie stereometrii powierzchni w obróbce elektroerozyjnej EDM, *Mechanik*, 960-963, 2013.