

Lucjan DĄBROWSKI<sup>1</sup>  
Dorota ONISZCZUK<sup>1</sup>  
Józef ZAWORA<sup>1</sup>  
Michał MARCZAK<sup>1</sup>

## **WPLYW PARAMETRÓW HYDROMECHANICZNYCH W PROCESIE WYCINANIA ELEKTROEROZYJNEGO NA EFEKTY OBRÓBK**

Wycinanie elektroerozyjne - WEDM jest odmianą obróbki ubytkowej, umożliwiającą kształtowanie skomplikowanych części, trudnych lub niemożliwych do wykonania innymi metodami, np. obróbką skrawaniem. W zależności od zakładanej chropowatości powierzchni i dokładności wykonania proces WEDM przebiega w kilku przejściach, począwszy od obróbki zgrubnej po wykończenie i wygładzanie. W artykule przedstawiono wpływ parametrów hydromechanicznych, tj. ciśnienia podawania dielektryka, naciągu oraz szybkości przewijania drutu na efekty obróbki.

### **1. WPROWADZENIE**

Wycinanie elektroerozyjne (WEDM) jest rodzajem obróbki ubytkowej, stosowanej do wytwarzania elementów o złożonej geometrii. Proces WEDM polega na usunięciu materiału z przedmiotu obrabianego w wyniku topnienia i odparowania, wywołanego wyładowaniami elektrycznymi zachodzącymi pomiędzy elektrodami. Kształt przedmiotu formowany jest za pomocą elektrody drutowej o średnicy od 0,02 do 0,5mm, najczęściej wykonanej z mosiądzu, poruszającej się po zaprogramowanej trajektorii. Obróbce elektroerozyjnej podlegają materiały, których elektryczna przewodność właściwa jest większa od 0,01S/cm. Podczas wycinania nie występuje zużywanie się elektrody roboczej - drut przewijany jest ze szpuli na szpulę z prędkością rzędu kilku m/min. Do szczeliny międzyelektrodowej zarówno z dyszy górnej jak i dolnej podawany jest pod pewnym ciśnieniem dielektryk. Przepływająca ciecz izoluje oraz chłodzi elektrody, zapewnia odpowiednie warunki umożliwiające wyładowania elektryczne, jak również usuwa produkty erozji ze strefy obróbki [1].

Chropowatość powierzchni oraz dokładność wymiarowo – kształtowa są to jedne z najważniejszych użytkowych cech charakteryzujących obróbkę WEDM. Odchyłki kształtu w wycinaniu elektroerozyjnym wynikają przede wszystkim z drgań drutu wywołanych

---

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania

wyładowaniami elektrycznymi, przepływającym dielektrykiem (pulsacje wynikające z nierównomiernego sposobu podawania cieczy do szczeliny) oraz wysokości ciętego materiału [2],[5].

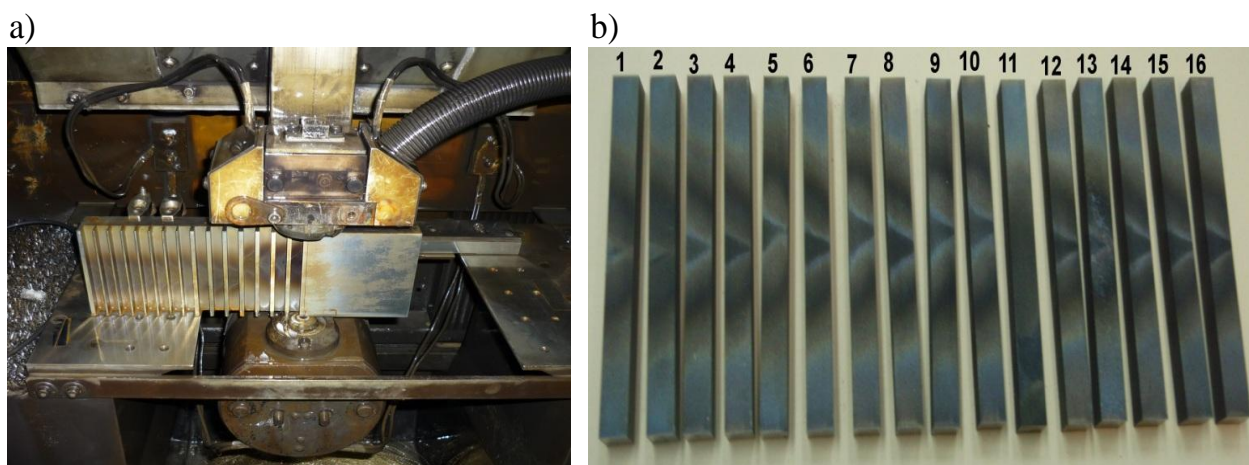
Wybór optymalnych parametrów obróbki w celu uzyskania większej wydajności i dokładności wycinania jest trudnym zadaniem ze względu na obecność dużej liczby zmiennych procesowych i skomplikowanych stochastycznych mechanizmów procesu [1],[5].

## 2. METODYKA BADAŃ

### 2.1. WARUNKI BADAŃ

Przeprowadzone badania doświadczalne miały na celu określenie wpływu parametrów hydromechanicznych takich jak: ciśnienie podawania dielektryka, naciąg oraz prędkość przewijania drutu na chropowatość powierzchni określoną parametrem  $Ra$  oraz dokładność obróbki WEDM.

Badania przeprowadzono na wycinarce elektroerozyjnej ROBOFIL 190 firmy Charmilles Technologies. Materiałem obrabianym była kostka prostopadłościenna wykonana ze stali narzędziowej wysokostopowej NC10 obrobionej cieplnie do twardości 62HRC. Próbkę wykonano w jednym zamocowaniu bloku materiału (eliminacja błędów wynikających z zamocowania przedmiotu) (rys. 1a). Wycięto 16 profili (rys. 1b) o wymiarach 10 x 10 x 100mm. Elektroda roboczą był drut mosiężny o średnicy 0,25mm (AC Brass 400 – 450N/mm<sup>2</sup> i wydłużeniu 25%). Dielektryk (woda demineralizowana i dejonizowana) podawany był do szczeliny międzyelektrodowej z dyszy górnej i dolnej. Zmiana ciśnienia cieczy w pompie odbywała się poprzez ręczne sterowanie zaworem redukcyjnym. Na głowicach zamontowano dysze stożkowe w celu lepszego kierowania przepływu do szczeliny międzyelektrodowej.



Rys. 1. Materiał obrabiany a) zamocowany na wycinarce elektroerozyjnej Robofil 190, b) wycięte profile  
Fig. 1. Workpiece a) fixed on a Robofil 190 machine, b) machined patterns

## 2.2. PLANOWANY EKSPERYMENT

Badania przeprowadzono na podstawie planowanego eksperymentu Hartley'a rotatabilnego, pięciopoziomowego, trójparametrowego. Plan ten charakteryzuje się założeniem osiągnięcia stałej dokładności modelu określonej poprzez wariancję wzdłuż odległości od punktu centralnego planu. Wybór takiego eksperymentu umożliwił zbadanie w użytkowym zakresie zmienności (przy pięciu poziomach wartości) wpływu poszczególnych parametrów wejściowych na efekty obróbki [3].

Zakresy użytkowe wartości parametrów doświadczeń w planowanym eksperymencie dobrano na podstawie przeprowadzonej analizy tablic technologicznych dla: przyjętego rodzaju materiału o wysokości cięcia 100 mm, obróbki zgrubnej i pojedynczego przejścia. Zgodnie z wymaganiami planu eksperymentu poszczególnym punktom planu przyporządkowano określone zestawy poziomów wartości parametrów wejściowych, które były stałe w zakresie wycinania poszczególnych profili. Dobór parametrów uzupełniono badaniami wstępnymi, które uwzględniały stabilność obróbki oraz brak zerwań drutu.

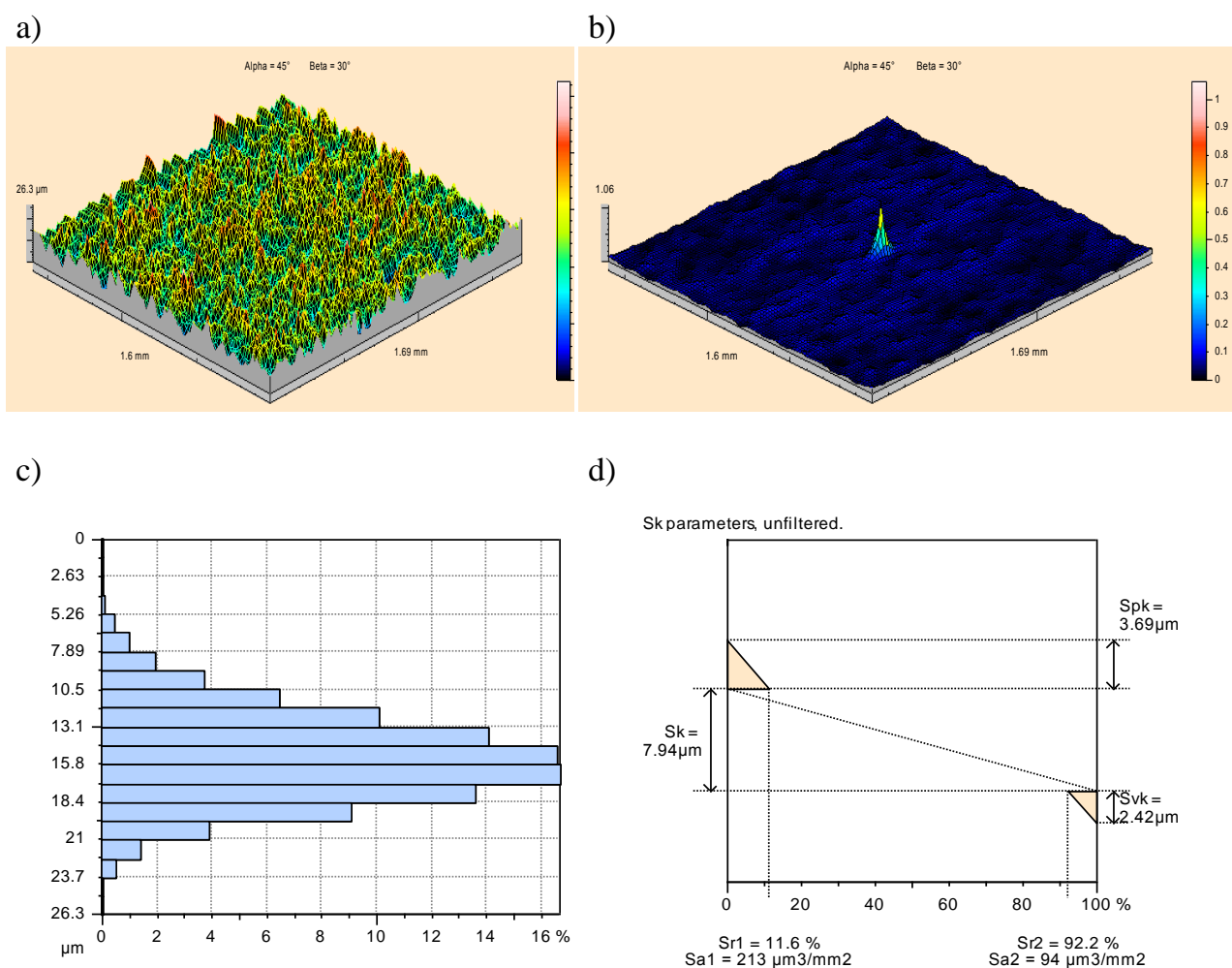
Tabela 1. Parametry zawarte w eksperymencie planowanym  
Table 1. Parameters include in the plan of an experiment

<b>Zakresy parametrów wejściowych:</b>	
– prędkość przewijania drutu $V_d$	<b>6 – 14m/min</b>
– ciśnienie dielektryka $p$	<b>0,6 – 1,2MPa</b>
– siła naciągu drutu $F_n$	<b>0,6 – 1,4daN</b>
<b>Parametry wejściowe ustalone:</b>	
– napięcie $U$	<b>80V</b>
– czas trwania impulsu $t$	<b>1<math>\mu</math>s</b>
<b>Parametry wyjściowe:</b>	
– parametry chropowatości powierzchni	
– dokładność wymiarowo – kształtowa	

## 2.3. WYNIKI BADAŃ

Przykładowo, dla określonej próbki dokonano analizy wybranych parametrów struktury geometrycznej powierzchni (SGP) po wycinaniu elektroerozyjnym. Struktura geometryczna powierzchni po WEDM ma charakter losowy o dużej gęstości powierzchniowej miejscowych wzniesień ( $Sds = 1758\text{pks/mm}^2$ ) (rys. 2a). Losowość struktury wynika z szybko zanikającej symetrycznej względem centralnej osi funkcji autokorelacji ( $Sal = 0,0508\text{mm}$ ) (rys. 2b). Rozkład rzędnych (rys. 2c) oraz rozkład miejscowych wzniesień (rys. 2e) są rozkładami normalnymi z zauważalną dodatnią skośnością  $Ssk = 0,344$  (zaostrzone wierzchołki wzniesień). Świadczy o tym między innymi wartość współczynnika skupienia  $Sku = 3,21$ . Różnica pomiędzy parametrami  $St$  (26,3 $\mu\text{m}$ ) i  $Sz$  (25,4 $\mu\text{m}$ ) jest niewielka, udział przypadkowych wierzchołków i wgłębień jest pomijalnie mały (stabilność wyładowań iskrowych). Średnie arytmetyczne odchylenie

profilu chropowatości  $Sa$  wynosi  $2,48\mu\text{m}$ , a średnie kwadratowe odchylenie profilu chropowatości powierzchni  $Sq = 3,13\mu\text{m}$  [4].



Rys. 2. Obraz stereometryczny powierzchni po WEDM: a) widok-powierzchni 3D, b) funkcja autokorelacji w układzie 3D, c) rozkład rzędnych, d) krzywa nośności (krzywa Abbotta-Firestone'a AFC)

Fig. 2. Stereometric image of the surface after WEDM a) 3D view of the surface, b) autocorrelation function 3D, c) the distribution of the ordinates, d) curve of Abbotta-Firestone'a AFC

Krzywa nośności szczegółowo opisuje przekroje nierówności powierzchni (rys. 2d). Powierzchnia nośna na poziomie płaszczyzny średniej wynosi około 47,5%. Mała wartość parametru  $Spk$  świadczy o wysokiej odporności powierzchni na ścieranie. Wysokość chropowatości rdzenia ( $Sk$ ) jest miarą efektywnej głębokości nierówności, a parametr  $Svk$  (zredukowana głębokość wgłębień) opisuje zdolność utrzymania płynu przez powierzchnie ślizgowe. Procentowy udział nośny wierzchołków opisany jest przez parametr  $Sr1$  natomiast wgłębień przez  $Sr2$  [4].

Pomiar chropowatości wyciętych próbek wykonano przy użyciu profilometru skanującego FORMTALYSURF Series 2 firmy Taylor – Hobson. Chropowatość powierzchni mierzono dla różnych wysokości próbki (10, 50, 90mm). Każdy pomiar

wykonywany był na odcinku pomiarowym długości 4mm, w którego skład wchodzi 5 odcinków elementarnych o długości 0,8mm.

Na podstawie otrzymanych wyników badań w programie Statistica utworzono statystyczne modele matematyczne, opisujące wpływ czynników wejściowych (tabela 1) na wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni. Wyniki aproksymowano wielomianową funkcją regresji. Uzyskano wysokie wartości współczynników korelacji wielokrotnej  $R$ , określających jakość dopasowania funkcji (na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ ). Istotność poszczególnych współczynników korelacji wielokrotnej sprawdzano testem F-Snedecora (jeżeli  $F/F_{kr} \geq 1$  – współczynnik  $R$  jest istotny). Brano również pod uwagę istotność wpływu poszczególnych współczynników równania regresji, którą weryfikowano testem t-Studenta (na poziomie istotności  $\alpha = 0,1$ ).

Parametr chropowatości powierzchni  $Ra$  opisany jest równaniem:

$$Ra = 5,75 - 2,95 \cdot p - 0,45 \cdot V_d + 0,24 \cdot F_n + 0,44 \cdot p^2 + 0,012 \cdot V_d^2 + 0,21 \cdot p \cdot F_n$$

a)

$P = 0,8 \text{ MPa} = \text{const.}$

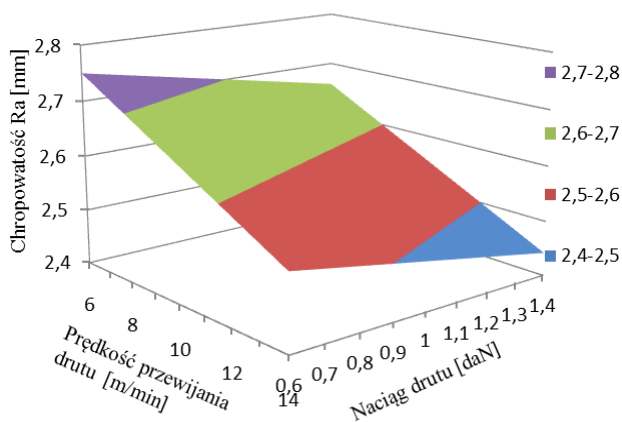
$R = 0,91$

dla

$\alpha = 0,1$

$F/F_{kr} = 1,03816$

$t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 > t_{kr}$



b)

$F_n = 1 \text{ daN} = \text{const.}$

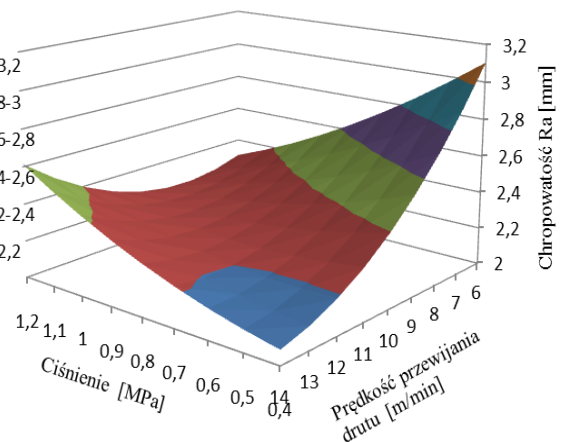
$R = 0,91$

dla

$\alpha = 0,1$

$F/F_{kr} = 1,03816$

$t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 > t_{kr}$



Rys. 3. Zależności chropowatości powierzchni  $Ra$  od parametrów hydromechanicznych WEDM, a) przy stałym ciśnieniu podawania dielektryka, b) przy stałej sile naciągu drutu

Fig. 3. The dependence of surface roughness  $Ra$  on the parameters WEDM, a) at constant pressure, b) at the constant tension wire

Teoretyczna wartość parametru chropowatości powierzchni (odczytanej z tablic technologicznych) po wycinaniu elektroerozyjnym wynosi około  $2,8\mu\text{m}$  dla obróbki zgrubnej dla materiału o wysokości 100mm. Natomiast parametr chropowatość uzyskany w wyniku badań doświadczalnych waha się od  $2 \div 3,2\mu\text{m}$ .

Przy stałym ciśnieniu podawania dielektryka najmniejszą wartość chropowatości ( $2,4\mu\text{m}$ ) uzyskano dla maksymalnych parametrów: prędkości przewijania  $V_d$  oraz naciągu

drutu. Wraz ze wzrostem parametru  $V_d$  wartość parametru chropowatości powierzchni  $Ra$  maleje – pracując przy zwiększonej prędkości przewijania drutu nie uwzględnia się zużycia elektrody roboczej.

Przy stałym naciągu drutu decydującym czynnikiem wpływającym na chropowatość powierzchni jest również parametr  $V_d$ . Wraz ze wzrostem prędkości przewijania parametr  $Ra$  maleje. Ciśnienie podawania dielektryka nie wpływa znacząco na chropowatość  $Ra$ .

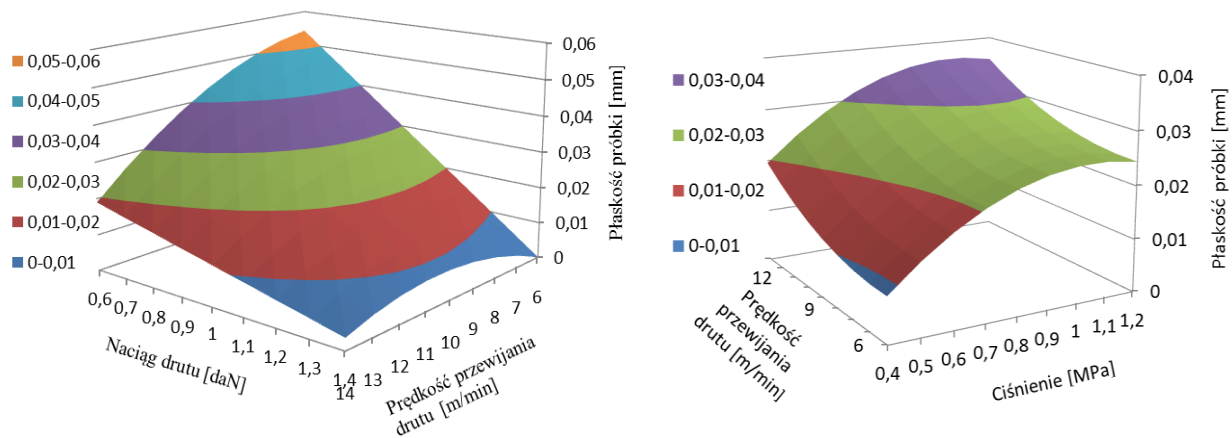
Za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej Vista firmy Carl Zeiss dokonano pomiaru płaskości próbek. W oprogramowaniu Calypso wyznaczono strategię pomiarową każdej z wyciętych ścian prostopadłościanu (profilu). Pomiaru dokonano za pomocą rastra, określono tor ruchu głowicy pomiarowej i liczbę punktów pomiarowych (150).

Odchyłka płaskości  $W_z$  opisana jest wielomianową funkcją regresji:

$$W_z = 0,024 + 0,09 \cdot p + 0,17 \cdot p^2 - 0,0004 \cdot V_d^2 + 0,006 \cdot V_d \cdot F_n - 0,107 \cdot p \cdot F_n$$

a)  
 $p = 0,8 \text{ MPa} = \text{const.}$   
 $R = 0,853$   
 dla  
 $\alpha = 0,1$   
 $F/F_{kr} = 2,739$   
 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 > t_{kr}$

b)  
 $F_n = 1 \text{ daN} = \text{const.}$   
 $R = 0,853$   
 dla  
 $\alpha = 0,1$   
 $F/F_{kr} = 2,739$   
 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 > t_{kr}$



Rys. 4. Zależności płaskości powierzchni od parametrów hydromechanicznych WEDM, przy stałym ciśnieniu podawania dielektryka, b) przy stałej sile naciągu drutu

Fig. 4. The dependence of flatness surface on the parameters WEDM, a) at constant pressure, b) at the constant tension wire

Do głównych parametrów wpływających na odchyłki kształtu po obróbce WEDM należy naciąg drutu  $F_n$  oraz ciśnienie podawania dielektryka  $p$ . Przy stałym ciśnieniu cieczy podawanej do szczeliny międzyelektrodowej parametr  $F_n$  ma decydujący wpływ na płaskość powierzchni (rys. 4a). Wraz ze wzrostem siły naciągu drutu, odchyłka płaskości maleje. Wzrost siły naciągu “usztynwia” elektrodę roboczą, przez co ograniczony jest jej ruch drgający.

Przy stałym naciągu drutu analiza statystyczna otrzymanego równania regresji wykazuje nieznaczny wpływ ciśnienia podawania dielektryka na wartości odchyłek płaskości. Wraz ze wzrostem ciśnienia podawania cieczy obserwuje się nieznaczny wzrost wartości odchyłek kształtu (rys. 4b).

### 3. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych w założonym zakresie stwierdzono, że głównym czynnikiem wpływającym na chropowatość powierzchni jest prędkość przewijania drutu  $V_d$ . Przy małych wartościach prędkości  $V_d$  wzrost parametru chropowatości  $R_a$  wynika z faktu, iż proces wycinania odbywa się za pomocą elektrody roboczej częściowo zużytej. To oznacza, że fragmenty elektrody roboczej biorące już udział w kształtowaniu powierzchni, przez dłuższy czas biorą udział w dalszej części pracy elektrody. Kratery powstałe na elektrodzie w wyniku wcześniejszych wyładowań elektrycznych przyczyniają się więc w większym stopniu do wzrostu  $R_a$  na powierzchni materiału obrabianego.

Podczas obróbki WEDM na elektrodę roboczą działają zmienne w czasie, losowe siły, które determinują powstawanie odchyłek kształtu. Siły występujące podczas procesu wycinania elektroerozyjnego wynikają przede wszystkim ze źródeł drgań spowodowanych nierównomiernością przewodzenia elektrody roboczej, jak również pulsacji dielektryka związanej z nierównomiernym ciśnieniem podczas podawania jego do szczeliny międzyelektrodowej. Przeprowadzone badania wskazują, iż siła naciągu drutu ma największy wpływ na generowanie parametrów chropowatości powierzchni i odchyłek kształtu w zakresie badanych wpływów wielkości hydromechanicznych powstałych podczas procesu WEDM. Oczywiście jest, że źródłem sił działających na elektrodę roboczą są wyładowania elektryczne, wydzielające się gazy i czynniki z tym związane, ale nie były one przedmiotem rozważań w tej pracy.

Uzyskane rezultaty badań wskazują na możliwość optymalnego doboru warunków hydromechanicznych w zakresie kształtowania parametrów chropowatości powierzchni jak również możliwie najmniejszych odchyłek kształtu. Wskazują również na celowość prowadzenia dalszych badań w tym zakresie.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009 - 2012 jako projekt badawczy.*

### LITERATURA

- [1] DĄBROWSKI L., YU J., KOZAK J., ROZENEK M., 2005, *Theoretical Analysis of Electric Field Distribution in EDM with Powder Mixed Dielectric*, Proceed. of the 4<sup>th</sup> International Conference on Global Research and Education „Inter – Academia 2005”, 1, Wuppertal, Germany.
- [2] GRZESIK W., RUSZAJ A., KRUSZYŃSKI B., 2010, *Surface Integrity of Machined Surfaces*, Surface Integrity in Machining, Springer – Verlag, London.

- [3] KORZYŃSKI M., 2006, *Metodyka eksperymentu*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa.
- [4] OCZOŚ K. E., LIUBIMOV V., 2003, *Struktura geometryczna powierzchni*. Oficyna Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- [5] ROZENEK M, DĄBROWSKI L., ZAWORA J., 2009, *Badania procesu wycinania elektroerozyjnego z wtryskowym systemem podawania dielektryka*, Inżynieria Maszyn, 12/1, 113-120.

THE EFFECT OF THE HYDROMECHANICAL PARAMETERS IN WIRE ELECTRICAL DISCHARGE  
MACHINING ON THE EFFECTS OF THE PROCESSING

Wire electrical discharge machining (WEDM) is variation of the machining which characterized by high accuracy, possibility of reaching small roughness and allows to machine hard materials. Depending on the assumed surface roughness and accuracy of performance, WEDM process takes place in several passages, from roughing to finishing and polishing. The paper presents the influence of the hydro-mechanical parameters: pressure of the dielectric, tension wire and speed of rewinding wire for roughness and flatness material after WEDM process.