

	<b>Organizatorzy:</b> Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny	<b>XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA          OBRÓBKİ ŚCIERNEJ</b> Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

## Strumieniowo-ścierne wygładzanie powierzchni po elektroerozyjnym przecinaniu elektrodą drutową

**Abrasive blast surface finish after  
the wire electrical discharge machining (WEDM)**

**LUCJAN DĄBROWSKI**  
**MIECZYŚLAW MARCINIAK**  
**DOROTA ONISZCZUK-ŚWIERCZ \***

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.347

Przedstawiono możliwości strumieniowo ścierniej obróbki wykończeniowej elementów wytwarzanych wycinaniem elektroerozyjnym (WEDM). Wykorzystano system pneumatyczny do formowania strumienia z mikrokulkami ceramicznymi, którego skuteczność obróbkową testowano przy usuwaniu warstwy tlenków z powierzchni po WEDM. Dokonano oceny wpływu parametrów obróbki na chropowatość i dokładność kształtową tych powierzchni.

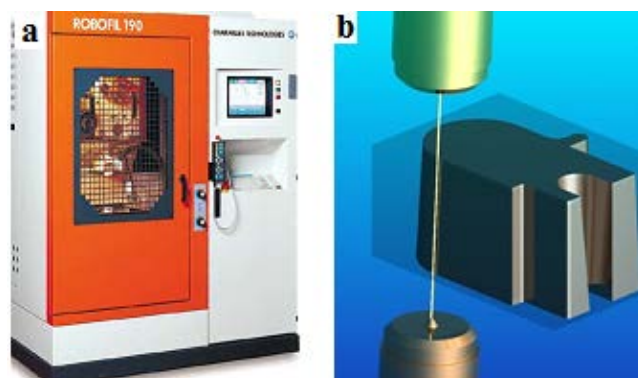
**SŁOWA KLUCZOWE:** wygładzanie powierzchni, obróbka strumieniowo ścierna, WEDM

*The potential of abrasive blast machining for finishing the parts after the wire electrical discharge machining (WEDM) was presented. The pneumatic system was used for forming a stream of glass micro-balls. Its effectiveness was tested when removing the oxide layer from the WEDM surface. The influence of the process parameters on surface roughness and dimensional accuracy was discussed.*

**KEYWORDS:** layer, abrasive blast, WEDM, wire electrical discharge machining

Walory użytkowe obróbki elektroerozyjnej wgłębnej elektrodą kształtową EDM (Electrical Discharge Machining) oraz przecinaniem (wycinaniem) elektrodą drutową WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) są wykorzystywane wspólnie w szerokim zakresie technik wytwarzania. Obróbce elektroerozyjnej podlegają wszystkie materiały przewodzące prąd elektryczny niezależnie od ich właściwości fizykochemicznych i mechanicznych, postaci oraz stanu wyjściowego. Jest to cenna zaleta tej metody, pozwalająca na stosunko-

wo łatwe kształtowanie części maszyn wytwarzanych z materiałów dotychczas uważanych za nieskrawalne bądź trudnoskrawalne takie jak węgliki spiekane, stopy żaroodporne i żarowytrzymałe, stale hartowane i kompozyty przewodzące. Efektywność wydajnościowa różnicuje EDM i WEDM: kształtowanie przedmiotu EDM polega na destrukcji znacznej objętości materiału nadwymiarowego, a kształtowanie WEDM jest technologią typu trepanacyjnego o wysokiej dokładności wymiarowo-kształtowej zarówno w układzie 2D jak i 3D. W badaniach zastosowano pięcioosiową wycinarkę elektroerozyjną Robofil 190, (rys. 1a), której przykładowe możliwości technologiczne ilustruje rysunek 1b.

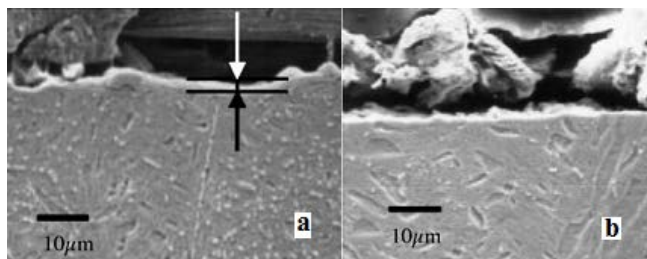


Rys. 1. Wycinarka elektroerozyjna Robofil 190 (a) i widok obrabianego elementu (b)

Wszystkie te przypadki wycinania WEDM zadanych kształtów mogą być realizowane w zakresie obróbki zgrubnej, półwykończeniowej i wykończeniowej. W każdym przypadku uzyskuje się specyficzną warstwę wierzchnią, ze zmienioną strukturą materiału, która powstaje w wyniku erozji elektrycznej zarówno w układzie polaryzacji prostej

\* dr hab. inż. Lucjan Dąbrowski (ld@meil.pw.edu.pl),  
 dr hab. inż. Mieczysław Marciniak (mima@meil.pw.edu.pl),  
 dr inż. Dorota Oniszczyk-Świercz (doo@meil.pw.edu.pl).

(rys. 2a) i odwrotnej (rys. 2b) [1] w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury sięgającej 14 000 K [2].



Rys. 2. Struktura metalograficzna powierzchni po WEDM, przy polaryzacji prostej (a) oraz odwrotnej (b) [1]

W usuwaniu warstwy tlenków z powierzchni po WEDM, w warunkach dynamicznego kontaktu ścierniwa z tą powierzchnią, biorą udział trzy procesy zilustrowane na rysunku 3 [3]:

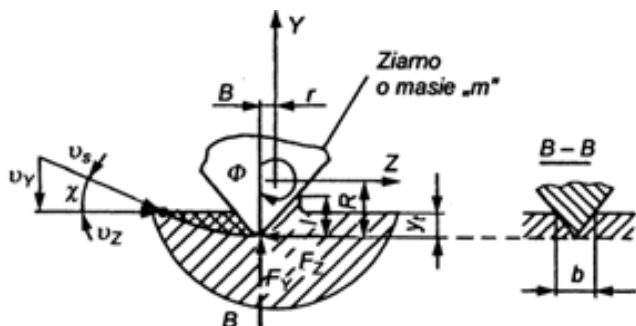
- realizacja procesu mikroskrawania przez aktywne naroże ziarna [4],
- bruzdujący kontakt ziarna z powierzchnią obrabianą,
- zderzenie sprężyste ziarna z wierzchołkami chropowatości przy ruchu stycznym względem obrabianej powierzchni.

Wymienione przypadki rozważane są po przyjęciu odpowiednich warunków brzegowych przy rozwiązywaniu równania ruchu ziarna względem powierzchni obrabianej:

$$m\ddot{y} + K_s \psi W_y b y = 0 \quad (1)$$

gdzie:  $K_s$  – opór właściwy skrawania,

$$W_y = F_y / F_z, \quad \psi = l / y_i \quad (\text{rys. 3})$$



Rys. 3. Ogólny model dynamicznego kontaktu ziarna z obrabianą powierzchnią [3]

Po wprowadzeniu nowej zmiennej:

$$\beta^2 = K_s \psi W_y b / m$$

równanie 1 przyjmie postać:

$$\ddot{y} + \beta^2 y = 0 \quad (2)$$

Korzystając z postaci rozwiązania uproszczonego:

$$y = e^{at} \quad (3)$$

mamy:  $\dot{y} = a e^{at}$  i  $\ddot{y} = a^2 e^{at}$

a po podstawieniu do (2):

$$a^2 e^{at} + \beta^2 e^{at} = 0$$

czyli:  $a^2 + \beta^2 = 0 \quad (4)$

Oznaczając pierwiastki tego równania w zapisie zespolonym przez:  $a_1 = \beta i$ ,  $a_2 = -\beta i$  i wykorzystując wzory Eulera, otrzyma się rozwiązanie pełne w postaci:

$$y = C_1 \cos \beta t + C_2 \sin \beta t$$

oraz z rys. 3 mamy:  $\dot{y} = v_c \sin \alpha$  i odpowiednio:

$$\dot{y} = -C_1 \sin \beta t \beta + C_2 \cos \beta t \beta \quad (5)$$

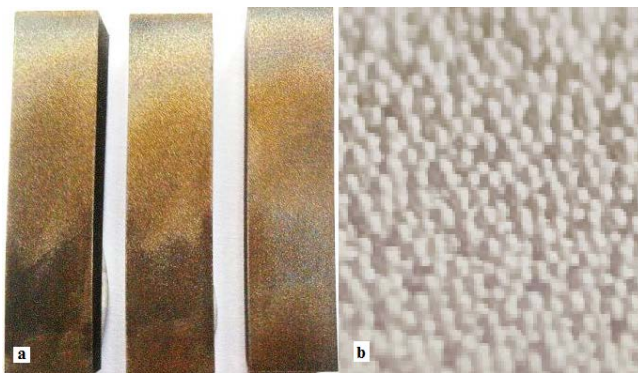
Dla warunków początkowych:  $t = 0$  oraz brzegowych  $z = y = 0$ , mamy stałe:  $C_1 = 0$ ,  $C_2 = (v_c \sin \alpha) / \beta$ , a współzrędną  $y$  opisuje równanie:

$$y = (\sin \beta v_c \sin \alpha) / \beta \quad (6)$$

W analizie tej wykorzystano tylko tę współzrędną dla oceny warunków usuwania tlenków, gdyż przy  $\alpha = 0$  zagłębienie ziarna przemieszczającego się stycznie względem obrabianej powierzchni  $y = 0$ . Warunek ten nie ogranicza rejestrowanego doświadczalnie procesu usuwania materiału w rzeczywistym czasie  $t \neq 0$ , gdyż ziarno zderzając się z wierzchołkami chropowatości wykonuje ruch obrotowy charakteryzowany kątem  $\Phi$  na rysunku 3 inicjując skutecznie pożądaną proces trybologiczny [5, 6], przy różnych kątach padania  $\alpha \neq 0$ .

#### Warunki badań

Mechaniczne usuwanie obróbką strumieniową warstwy tlenków w postaci charakterystycznego brązowego nalotu (rys. 4a) realizowane jest przez jej kruszenie i ścieranie zastosowanymi twardymi mikrokulkami ceramicznymi (rys. 4b). Dynamiczny kontakt mikrokulek z warstwą wierzchnią poprawia jednocześnie jej właściwości użytkowe wskutek utwardzenia oraz wprowadzenia korzystnego stanu ściskających naprężeń własnych powstających w wyniku odkształceń plastyczno-sprężystych metalu.



Rys. 4. Wygląd powierzchni po WEDM (a) i przykład stosowanych mikrokulek ceramicznych [7] (b)

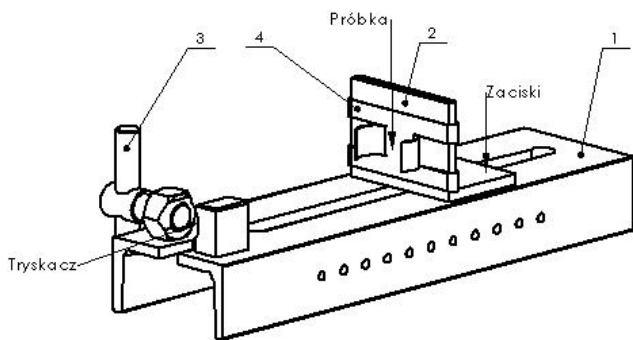
W strumieniowo-ściernym procesie mechanicznego usuwania tlenków z powierzchni powstałej po WEDM, zastosowano obrabiarkę wyposażoną w tryskacz zasilany sprężonym powietrzem o ciśnieniu 0,6 MPa i w zespół podciśnieniowego zasysania przez strumień powietrza mikrokulek ceramicznych. Na rysunku 5 widoczne jest wnętrze komory roboczej obrabiarki z umieszczonym przyrządem do mocowania tryskacza i obrabianych próbek.

Konstrukcja przyrządu z rysunku 6, umożliwia prowadzenie testowych badań obróbkowych dla nastawianych parametrów technologicznych, to jest odległości próbki od dyszy

tryskacza i kąta padania strumienia na powierzchnię obrabianą.



Rys. 5. Wnętrze komory roboczej obrabiarki strumieniowo-ścierniej



Rys. 6. Konstrukcja przyrządu do badań testowych: 1- korpus, 2 - stolik przesuwno-obrotowy do mocowania próbek z zaciskami ustalającymi jego umiejscowienie i kątowe położenie, 3 - śruba mocująca tryskacz, 4 - szczęki zaciskowe

Jeśli zadanie techniczne skoncentrowane jest głównie na oczyszczaniu powierzchni z warstwy tlenków, to istotnymi warunkami technicznymi jest zmniejszenie chropowatości z jednoczesnym zachowaniem dokładności kształtowej uzyskanej po WEDM. Kryteria te są podstawą wyboru zmiennych parametrów obróbki: długości strumienia  $l$  [mm], kąta padania strumienia  $\alpha$  na powierzchnię obrabianą i czasu natrysku  $t$  [s]. Czas jest odpowiednikiem parametru określanego jako stopień pokrycia powierzchni świadczący o równomierności obróbkowego oddziaływania strumienia. W przeprowadzonych badaniach zadanie to realizowano przy stałej granulacji mikrokulek ceramicznych  $d = 0,18$  mm i stałym ciśnieniu powietrza  $p = 0,6$  MPa.

### Wyniki badań

Warunki eksperymentu planowanego dla badanych 3 zmiennych niezależnych, podporządkowanych trzem poziomom wielkości kodowych, zestawiono w tabeli 1. Plan eksperymentu planowanego oraz wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

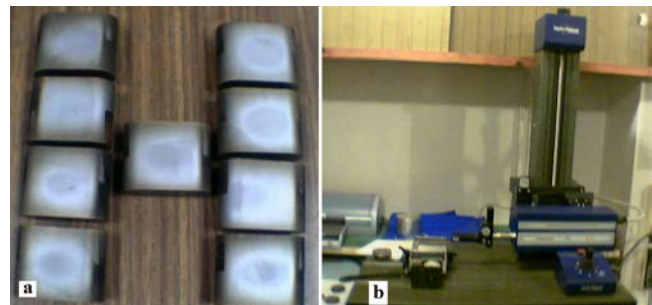
Na rysunku 7a są widoczne obrobione powierzchnie próbek z 12-sto punktowego eksperymentu planowanego, którego wyniki zawiera tabela 2. Do pomiarów chropowatości i błędów płaskości powierzchni zastosowano stacjonarny profilometr o wydłużonym przesuwie igły pomiarowej (rys. 7b).

Tabela 1. Wartości zmiennych niezależnych na poszczególnych poziomach

Poziomy zmiennych niezależnych	Zmienne niezależne		
	Długość strumienia $l$ [mm]	Kąt natrysku $\alpha$ [°]	Czas natrysku $t$ [s]
" - 1 "	50	25	3
" 0 "	60	35	6
" + 1 "	70	45	9

Tabela 2. Plan oraz wyniki badań eksperymentu wygładzania strumieniowego

Nr próby	Punkty przestrzeni doświadczeń			Chropowatość $Ra$ [ $\mu$ m]	Błąd płaskości $\Delta h$ [ $\mu$ m]
	$l$ [mm]	$\alpha$ [°]	$t$ [s]		
1.	" - 1 "	" + 1 "	" + 1 "	1,151	65,535
2.	" + 1 "	" + 1 "	" + 1 "	0,925	36,093
3.	" + 1 "	" - 1 "	" + 1 "	0,867	37,807
4.	" - 1 "	" - 1 "	" + 1 "	1,001	53,037
5.	" 0 "	" 0 "	" 0 "	1,034	32,454
6.	" 0 "	" 0 "	" 0 "	1,039	23,027
7.	" 0 "	" 0 "	" 0 "	1,002	24,076
8.	" 0 "	" 0 "	" 0 "	0,971	24,073
9.	" - 1 "	" - 1 "	" - 1 "	0,980	20,927
10.	" + 1 "	" - 1 "	" - 1 "	0,826	14,901
11.	" - 1 "	" + 1 "	" - 1 "	1,136	30,748
12.	" + 1 "	" + 1 "	" - 1 "	1,133	33,272



Rys. 7. a) Próbkę po obróbce, b) stacjonarny profilometr Form Taly surf firmy Taylor – Hobson

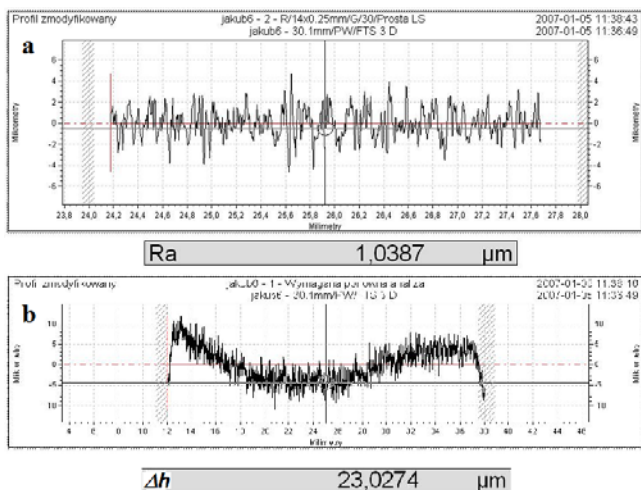
Na rysunkach 8 i 9 zamieszczono przykładowe profiogramy chropowatości powierzchni z reprezentatywnymi parametrami  $Ra$  oraz zarejestrowane błędy płaskości  $\Delta h$  dla poszczególnych prób obróbkowych nr 6 i nr 10, zgodnie z numeracją w planowanym eksperymencie.

Opis zmian tych parametrów technologicznych w funkcji badanych zmiennych niezależnych  $l$ ,  $\alpha$ ,  $t$  charakteryzują następujące równania regresji:

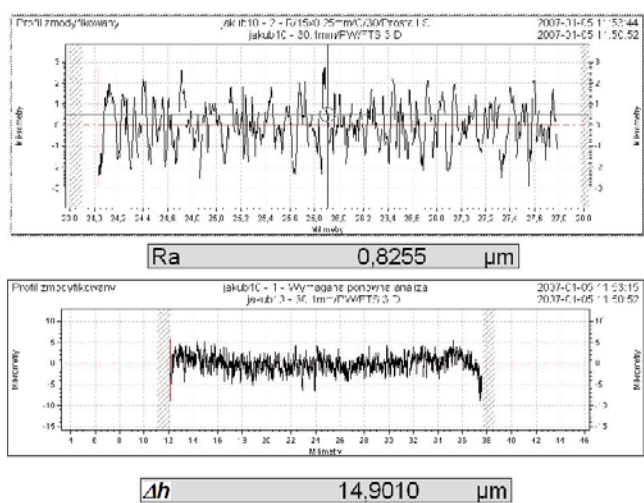
$$Ra = 1,917 l^{0,396} \alpha^{0,286} t^{0,025} [\mu\text{m}]$$

$$\Delta h = 29,306 - 0,612 l + 0,497 \alpha + 3,826 t [\mu\text{m}]$$

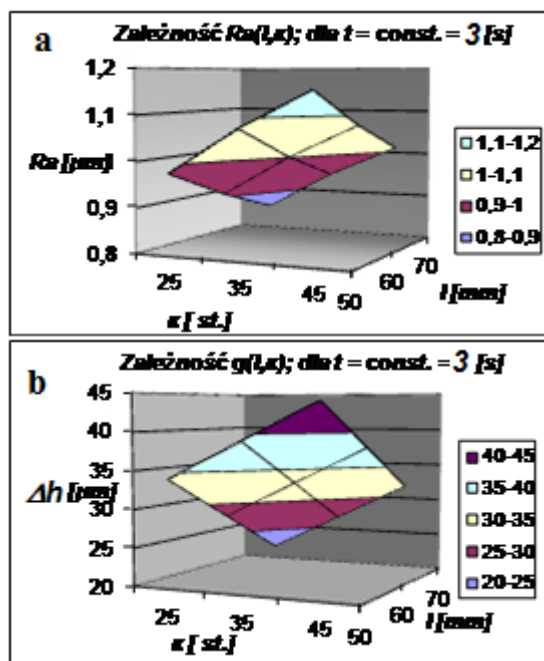




Rys. 8. Profiloqramy: a) chropowości  $R_a$ , b) błąd płaskości  $\Delta h$ ; dla parametrów obróbki  $l = 60$  mm,  $\alpha = 35^\circ$ ,  $t = 6$  s



Rys. 9. Profiloqramy: a) chropowości  $R_a$ , b) błąd płaskości  $\Delta h$ ; dla parametrów obróbki  $l = 70$  mm,  $\alpha = 25^\circ$ ,  $t = 3$  s



Rys. 10. Charakterystyka zmian chropowości  $R_a$  (a), płaskości  $\Delta h$  (b) dla ustalonego czasu natrysku  $t = 3$  s

O wiarygodności tych zależności świadczą wyznaczone współczynniki korelacji wielokrotnej  $R$  oraz pozytywne wyniki testów  $F$  Snedecora:

- dla funkcji  $R_a$  współczynnik  $R = 0,889$ ,  $F/F_{kr} = 10,038$ ,
- dla funkcji  $\Delta h$  współczynnik  $R = 0,835$ ,  $F/F_{kr} = 6,161$ .

Ilustracja graficzna tych równań na rysunku 10a i b dotyczy najkrótszego czasu oddziaływania strumienia mikrokułek szklanych  $t = 3$  s. Jest to związane z bezpośrednim wpływem czasu na objętościowe skutki obróbki będących źródłem błędów płaskości. Obróbka wykończeniowa WEDM gwarantuje uzyskanie odpowiedniej chropowatości powierzchni, a zabieg usuwania warstwy tlenków należy przeprowadzić przy minimalnym ubytku materiału (rys. 10b).

## Podsumowanie

Elektroerozyjna obróbka elektrodą drutową (WEDM) jest efektywnym sposobem technologicznym w produkcji przedmiotów o złożonych kształtach i z materiałów trudnoobrabialnych przewodzących prąd elektryczny. Predyspozycje dokładnościowe WEDM a także skuteczność w uzyskiwaniu niskiej chropowatości w operacjach wykończeniowych muszą być często uzupełniane pomocniczym zabiegiem usuwania warstwy tlenków z powierzchni obrabianych. Jednym z wielu sposobów technologicznych realizujących to zadanie jest mechaniczna obróbka strumieniowa mikrokułkami ceramicznymi. Przeprowadzone badania wykazały dobrą skuteczność tej obróbki przy wykorzystaniu przemysłowej sieci sprężonego powietrza i doborze parametrów technologicznych, takich jak długość strumienia  $l = 70$  mm, kąt natrysku  $\alpha = 25^\circ$  i czas lokalnego oddziaływania strumienia  $t = 3$  s. W warunkach obróbki zmechanizowanej, czas natrysku określa prędkość posuwu i odległość między kolejnymi przejściami w systemie wierśzowania.

## LITERATURA

1. Oniszczyk D.: Określenie wpływu zjawisk fizycznych na cechy geometryczne przedmiotu po obróbce elektroerozyjnej WEDM. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, 2013.
2. Miernikiewicz A., Bratasz Ł., Pellerin S., Pellerin N., Musiał K., Chapelle J.: New interesting results on the electro-discharge machining, High Temperature Material Processes, 3, 193-211, Kraków, 1999.
3. Finnie I.: Erosion of surfaces by solid particles. Wear, nr 3, 1960.
4. Borkowski P. J.: Obróbka powierzchni wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, Centrum Technik Proekologicznych, Koszalin, 2002.
5. Suzuki J., Miyake S., Watanabe J.: Fundamental Properties of Chemical-Mechanical Polishing with Powder Collision. Bull. Japan Soc. of Prec. Eng. Vol. 11, No. 4, 1977.
6. Kałdoński T.: Model erozji ścinającej pojedynczymi ziarnami. Biuletyn WAT, Vol. 53, nr 10, 2004.
7. Matt blasting experts współpracuje z Politechniką Warszawską, Mechanik nr 1/2015, str. 54.