



Organizator:
Politechnika Warszawska
Instytut Techniki Wytwarzania

Przewodniczący:
Lucjan Dąbrowski
ld@meil.pw.edu.pl
http://snoe.meil.pw.edu.pl

Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych

SNOE

Artykuły naukowe z 2015 r.

Patronat naukowy: SEKCJA PODSTAW TECHNOLOGII KOMITETU BUDOWY MASZYN POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Badania dokładności geometrycznej otworów drążonych metodą EDM

Investigation on the accuracy of holes machined by EDM process

SŁAWOMIR SPADŁO
DOMINIK DUDEK*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.532

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących dokładności geometrycznej otworów wykonywanych metodą drążenia trepanacyjnego w elementach wykonanych ze stali 145Cr6. Przeprowadzono badania dotyczące wpływu natężenia prądu, czasu impulsu, czasu przerwy oraz kierunku podawania cieczy roboczej na błędy kształtu otworów cylindrycznych wykonywanych na obrabiarce (drążarce elektroerozyjnej) BP-93L. Uzyskane wyniki badań stanowią podstawę do doboru warunków procesu drążenia otworów cylindrycznych w zależności od zakładanej dokładności gotowego wyrobu.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka elektroerozyjna, drążenie trepanacyjne, dokładność geometryczna, struktura geometryczna powierzchni.

The article presents the results of studies on the possibilities of shaping of geometric accuracy and surface quality parts made of steel 145Cr6 by using Electrical Discharge Machining. The experiments were conducted with different impact of current, pulse duration, pulse interval and changing feed direction of dielectric on the shape of the cylindrical holes deviation made on the EDM machine BP-93L. The obtained results contribute to the optimize the EDM process.

KEYWORDS: Electrical Discharge Machining, hole drilling, shape accuracy, geometric structure of the surface.

Współczesny rozwój inżynierii materiałowej stawia przed inżynierami nowe wyzwania dotyczące metod obróbki materiałów trudnoobrabialnych konwencjonalnymi metodami obróbki metali. Dodatkowym czynnikiem powodującym poszukiwanie nowych metod obróbki bądź też ulepszania znanych sposobów wytwarzania są między innymi poprawa

dokładności, zwiększanie efektywności procesów obróbkowych czy względy ekonomiczne. Ważnym czynnikiem determinującym rozwój oraz doskonalenie metod obróbki metali jest pomiar i ocena zarysu kształtu oraz ocena struktury geometrycznej powierzchni elementów maszyn. Występujące błędy są przyczyną powstawania szumów i drgań współpracujących ze sobą części maszyn, które z kolei mogą prowadzić do uszkodzeń często dróg podzespołów maszyn [1]. Mając na uwadze powyższe, niezbędne jest optymalizowanie procesów technologicznych w kierunku uzyskiwania zakładanej dokładności powierzchni oraz parametrów struktury geometrycznej powierzchni.

W obróbce elektroerozyjnej w wyniku wyładowań iskrowych pomiędzy elektrodą roboczą, a przedmiotem obrabianym następuje usuwanie kolejnych warstw obrabianego materiału. Proces przebiega w ośrodku roboczym o własnościach dielektryka. Do podstawowych parametrów procesu obróbki EDM zalicza się: wartość natężenia prądu, czas impulsu oraz czas przerwy – w przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych te parametry stanowiły czynniki zmienne. Z uwagi na złożony mechanizm fizyki procesu usuwania materiału w obróbce elektroerozyjnej modelowanie opis tych zjawisk a zwłaszcza modelowanie wymaga daleko idących uproszczeń, a opracowane modele opisują proces obróbki sposób uproszczony. W literaturze przedmiotu zagadnienia badawcze dotyczą szeroko pojętego stanu warstwy wierzchniej [3, 5, 9], możliwości technologicznych w zakresie drążenia mikrootworów [2, 4].

Autorzy podjęli się badań dotyczących oceny dokładności geometrycznej drążonych otworów [6, 7, 8]. W tym celu opracowali i zrealizowali program badań eksperymentalnych. W każdym z przeprowadzonych eksperymentów dodatkowym czynnikiem był sposób przepłukiwania szczeliny roboczej. W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych zmieniano kierunek przepływu dielektryka w szczeliny roboczej

* dr hab. inż. Sławomir Spadło, prof. PŚk (sspadlo@tu.kielce.pl), mgr inż. Dominik Dudek (dominik_dudek@op.pl)

Metodyka, przedmiot badań, warunki badań

Celem prowadzonych badań doświadczalnych było określenie wpływu wybranych parametrów procesu drążenia elektroerozyjnego takich jak wartość natężenia prądu, czas impulsu oraz czas przerwy na błędy kształtu otworów cylindrycznych oraz na cechy struktury geometrycznej powierzchni. W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych badano, jako czynniki wyjściowe, odchyłki walcowości oraz parametry chropowatości.

Badania zostały przeprowadzone na obrabiarkie BP-93 L. Obrabiarka ta jest typową drążarką wgłębną, w której istnieje możliwość zmiany nastawa trzech podstawowych parametrów procesu drążenia, tj. czasu impulsu, czasu przerwy, natężenia prądu drążenia oraz dwóch dodatkowych, jakimi są próg pracy oraz próg zwarcia. W eksperymencie wykorzystano elektrody robocze o średnicy 11,5 mm wykonane z miedzi M1E (wybór tej wartości średnicy otworu uwarunkowany był możliwościami dokonania pomiarów dokładności geometrycznej wykonywanych otworów na dostępnych urządzeniach pomiarowych do badania zarysu walcowości powierzchni wewnętrznych). Powierzchnia elektrod była szlifowana na całej ich długości. Próbkę wykonano ze stali 145Cr6 w postaci walca o średnicy 24,9 mm i wysokości 25 mm. Przed obróbką próbkę poddano obróbce cieplnej, tj. hartowaniu oraz odpuszczaniu w warunkach standardowych dla przedmiotowego gatunku stali. W efekcie uzyskano elementy o twardości 62 HRC.

Podczas eksperymentu wykonywano w obrabianych elementach otwory elektrodą miedzianą wg planu eksperymentu planowanego. Parametry chropowatości zmierzono za pomocą modułowego systemu do pomiaru i analizy topografii powierzchni TOPO L120, natomiast odchyłki walcowości mierzono na urządzeniu Talyrond 365.

■ Eksperyment planowny

Badania przeprowadzono zgodnie z planem eksperymentu planowanego Boxa Behnkena – planu trójpoziomowego, trzyczynnikowego. Plan ten zakłada wzajemne badanie trzech czynników wejściowych dla 3 różnych wartości parametrów wyjściowych. W eksperymencie zmieniane były wartości natężenia prądu I_w , czasu impulsu t_i , czasu przerwy t_0 .

Tab. 1. Zestawienie wartości kodowych z odpowiadającymi im wartościami parametrów rzeczywistych obróbki

Numer eksperymentu	Wartości kodowe			Wartości rzeczywiste		
	t_i , μs	t_0 , μs	I_w , A	t_i , μs	t_0 , μs	I_w , A
14	0	0	0	210	20	25
8	1	0	1	310	20	35
1	-1	-1	0	110	10	25
2	1	-1	0	310	10	25
15	0	0	0	210	20	25
6	1	0	-1	310	20	15
3	-1	1	0	110	30	25
12	0	1	1	210	30	35
11	0	-1	1	210	10	35
9	0	-1	-1	210	10	15
13	0	0	0	210	20	25
7	-1	0	1	110	20	35
10	0	1	-1	210	30	15
4	1	1	0	310	30	25
5	-1	0	-1	110	20	15

Dla opisywanych parametrów został wygenerowany, w programie Statistica 10, plan badań, zgodnie z którym przeprowadzono eksperyment. Wygenerowany plan badań wraz z wartościami kodowymi oraz odpowiadającymi im wartościami rzeczywistymi zestawiono w tabeli 1.

Zakresy zmienności parametrów wejściowych w badaniach dobrano na podstawie analizy literatury oraz badań własnych (wstępnych).

Wyniki badań i ich analiza

Do analizy uzyskanych wyników eksperymentu wykorzystano program Statistica 10. Wykorzystując dostępne w nim narzędzia dokonano standardowej obróbki wyników pomiarów. W wyniku w/w operacji uzyskano równania regresji (zastosowano optymalne dopasowanie z wykorzystaniem funkcji kwadratowej z wzajemnymi interakcjami parametrów wejściowych). Z uwagi na pomiar wielu parametrów wyjściowych w celu ograniczenia liczby zarówno równań regresji jak i otrzymywanych na ich podstawie wykresów wprowadzono współczynnik wypełnienia impulsu k_w (1).

$$k_w = \frac{t_i}{t_i + t_0} \quad (1)$$

gdzie: t_i – czas impulsu, t_0 – czas przerwy

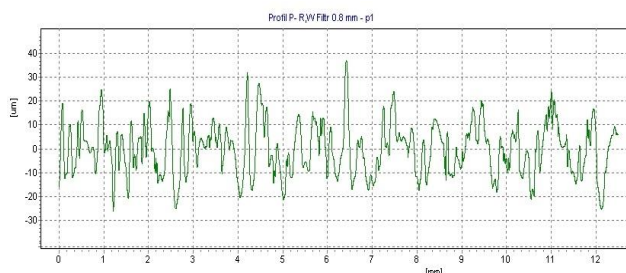
■ Ocena parametrów SGP

W badaniach dokonano pomiarów wielu parametrów SGP, w niniejszym artykule przedstawiono ocenę parametru chropowatości – R_a . Przykładowy profilogram zarejestrowany dla wariantu z włączaniem cieczy roboczej w obszar obróbki przedstawiono na rysunku 1.

W celu uzyskania równań regresji wykonano standardową procedurę obróbki wyników pomiarów. Wykorzystując równania regresji przedstawiające zależność parametru R_a w funkcji zadawanej wartości prądu wyładowań I_w i współczynnika wypełnienia k_w . Badania wykonano dla wariantu z odsysaniem cieczy roboczej (CR) z obszaru obróbki oraz dla włączania CR do obszaru obróbki. Równania regresji, dla obu tych przypadków przedstawiono, odpowiednio, w postaci (2), (3),

$$Ra(k_w, I_w) = -54,5856 + 122,5054 \cdot k_w + 0,1774 \cdot I_w - 74,1085 \cdot k_w \cdot k_w + 0,8297 \cdot k_w \cdot I_w - 0,0142 \cdot I_w \cdot I_w \quad (2)$$

$$Ra(k_w, I_w) = -66,6491 + 149,8333 \cdot k_w + 0,3468 \cdot I_w - 85,4553 \cdot k_w \cdot k_w + 0,4095 \cdot k_w \cdot I_w - 0,0112 \cdot I_w \cdot I_w \quad (3)$$

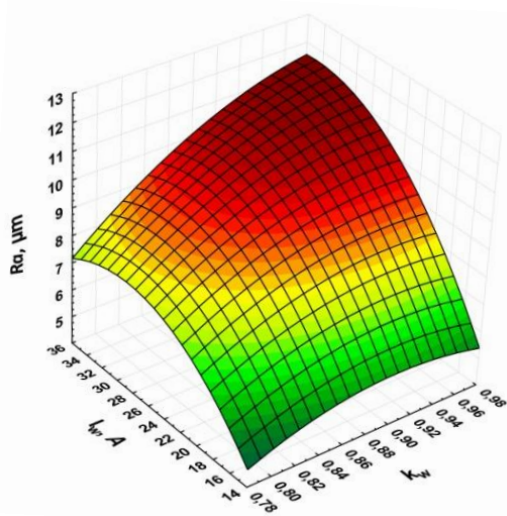


Rys. 1. Profilogram zarejestrowany urządzeniem TOPO 120 dla wariantu z włączaniem CR; $I_w = 25$ A; $t_i = 210$ μs ; $t_0 = 20$ μs ; odcinek elementarny 2,5 mm; odcinek pomiarowy 12,5 mm. $R_a = 8,707$

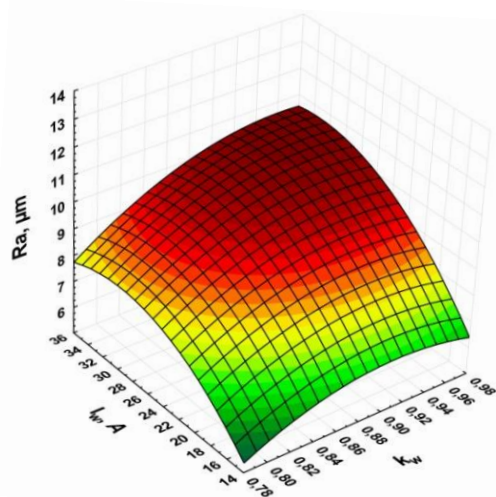
Wykonano opracowanie graficzne wyników badań w postaci wykresów powierzchniowych obrazujących zależność parametru R_a w funkcji w/w parametrów. Wykresy te przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

Analiza przebiegu zmienności parametru R_a wskazuje, że największy wpływ na jego wartość ma natężenie prądu. W obu analizowanych przypadkach, niezależnie od sposobu przepłukiwania szczeliny roboczej, następuje wzrost chropowatości wraz ze wzrostem tego parametru.

Dla małych wartości natężenia prądu wpływ współczynnika wypełnienia na chropowatość powierzchni obrabianej jest niewielki. Dla dużych wartości natężenia prądu, wraz ze wzrostem współczynnika wypełnienia chropowatość powierzchni, dla obu analizowanych przypadków, wzrasta.



Rys. 2. Wykres zależności średniej arytmetycznej rzędnych profilu R_a w funkcji zadawanej wartości prądu wyładowań I_w i współczynnika wypełnienia k_w , dla wariantu z odsysaniem CR z obszaru obróbki



Rys. 3. Wykres zależności średniej arytmetycznej rzędnych profilu R_a w funkcji zadawanej wartości prądu wyładowań I_w i współczynnika wypełnienia k_w , dla wariantu z włączaniem CR w obszar obróbki

Dodatkowo do analizy poszczególnych parametrów SGP wykorzystywano współczynniki korelacji poszczególnych wielkości wyjściowych w odniesieniu od wielkości wejściowych. W tabeli 2 zestawiono współczynniki korelacji dla parametru R_a .

Tab. 2. Współczynniki korelacji poszczególnych wielkości wyjściowych w odniesieniu do wielkości wejściowych

Parametry wejściowe	R_a (wariant z odsysaniem CR z obszaru obróbki)	R_a (wariant z włączaniem CR do obszaru obróbki)
t_i (L)	0,46	0,49
t_i (Q)	0,05	-0,21
t_o (L)	0,14	0,18
t_o (Q)	-0,02	0,08
I_w (L)	0,72	0,66
I_w (Q)	0,30	0,30

W tabeli 2 zestawiono współczynniki korelacji częściowych poszczególnych parametrów wejściowych obróbki, dla dwóch wariantów podawania CR, na wartość parametru R_a . Ocena dla efektów liniowych (oznaczone literą L po nazwie wielkości wejściowej) może być interpretowana, jako różnica średniej wartości wielkości wyjściowej przy niskich i wysokich ustawieniach odpowiedniej wielkości wejściowej. Ocena dla efektu kwadratowego, nieliniowego (oznaczona literą Q po nazwie wielkości wejściowej) może być interpretowana, jako różnica pomiędzy średnimi wartościami wielkości wyjściowej przy średniej wartości odpowiedniej wielkości wejściowej oraz kombinacji typu wysoka i niska. Wartości współczynników korelacji należy interpretować w następujący sposób. Im wartość współczynnika korelacji, bliższa wartości 1, tym dana wielkość wyjściowa jest bardziej zależna od wielkości wejściowej. Wartość ujemna współczynnika korelacji wskazuje, że wraz ze wzrostem tego parametru wejściowego parametr wyjściowy maleje – korelacja odwrotna (ujemna) [7].

Analizując otrzymane wykresy dla zmierzonych parametrów R_a oraz otrzymane współczynniki korelacji możemy zauważyć, że głównym czynnikiem determinującym wzrost wartości parametru chropowatości R_a jest wartość natężenia prądu wyładowania – parametr R_a rośnie wraz ze wzrostem wartości natężenia prądu. Czas przerwy ma niewielki wpływ na zmianę wartości parametru R_a , a w przypadku czasu impulsu możemy dla wartości niskich i wysokich tego parametru umiarkowaną korelację dodatnią.

■ Ocena zarysu walcowości

W badaniach dokonano oceny zarysu walcowości na podstawie pomiaru, między innymi, następujących parametrów odnoszących się w/w zagadnienia [**Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.**]:

- $CYLP$, μm – wartość największej dodatniej lokalnej odchyłki walcowości mierzonej względem walca odniesienia wyznaczonego metodą najmniejszych kwadratów;
- $CYLV$, μm – wartość bezwzględnej największej ujemnej lokalnej odchyłki walcowości mierzonej względem walca odniesienia wyznaczonego metodą najmniejszych kwadratów. Parametr ten w praktyce został oznaczony ΔC ;

W praktyce do oceny zarysu walcowości w/w parametry są niewystarczające, dlatego wprowadzono dodatkowy element pozwalający dokładnie analizować zarys walcowości, tj.

- $CYLTt$, μm – stożkowość walca, największa lokalna stożkowość walca;

Dla wszystkich w/w parametrów zarysu walcowości, na podstawie wyników pomiaru, zostały wygenerowane równania regresji, które dla wariantu z odsysaniem CR opisują

odpowiednio zależności (5, 6, 7), natomiast dla wariantu z włączaniem CR w obszar obróbki (8, 9, 10).

$$CYLp = -1357,4065 + 2855,526 \cdot k_w + 7,8343 \cdot I_w - 1532,0812 \cdot k_w \cdot k_w - 2,3786 \cdot k_w \cdot I_w - 0,1068 \cdot I_w \cdot I_w \quad (5)$$

$$CYLv = -749,9365 + 1656,1523 \cdot k_w + 1,3334 \cdot I_w - 935,3826 \cdot k_w \cdot k_w + 2,6319 \cdot k_w \cdot I_w - 0,0557 \cdot I_w \cdot I_w \quad (6)$$

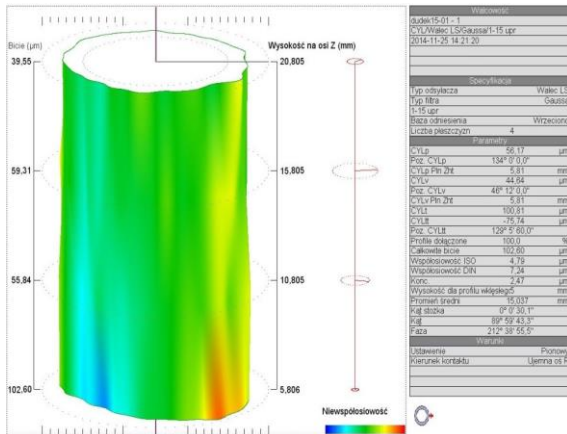
$$CYLtt = 4171,1716 - 8990,6354 \cdot k_w - 9,7441 \cdot I_w + 4535,5863 \cdot k_w \cdot k_w + 32,1978 \cdot k_w \cdot I_w - 0,3551 \cdot I_w \cdot I_w \quad (7)$$

$$CYLp = 581,5168 - 1176,0225 \cdot k_w - 3,7492 \cdot I_w + 622,7218 \cdot k_w \cdot k_w + 5,3395 \cdot k_w \cdot I_w - 0,002 \cdot I_w \cdot I_w \quad (8)$$

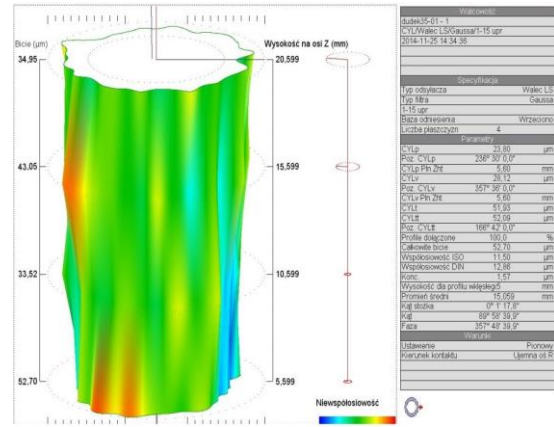
$$CYLv = 175,006 - 344,1554 \cdot k_w - 2,8924 \cdot I_w + 147,4156 \cdot k_w \cdot k_w + 6,8568 \cdot k_w \cdot I_w - 0,061 \cdot I_w \cdot I_w \quad (9)$$

$$CYLtt = 289,8886 - 534,8566 \cdot k_w - 23,0631 \cdot I_w + 95,7022 \cdot k_w \cdot k_w + 36,4934 \cdot k_w \cdot I_w - 0,187 \cdot I_w \cdot I_w \quad (10)$$

Na rysunku (4) przedstawiono przykładowe wygenerowane okno zawierające zobrazony pomiar parametrów oceny zarysu walcowości wykonany na urządzeniu Talyrond 365 ($I_w = 25$ A; $t_i = 210$ μ s; $t_o = 20$ μ s) w wariantcie z włączaniem CR do obszaru obróbki.

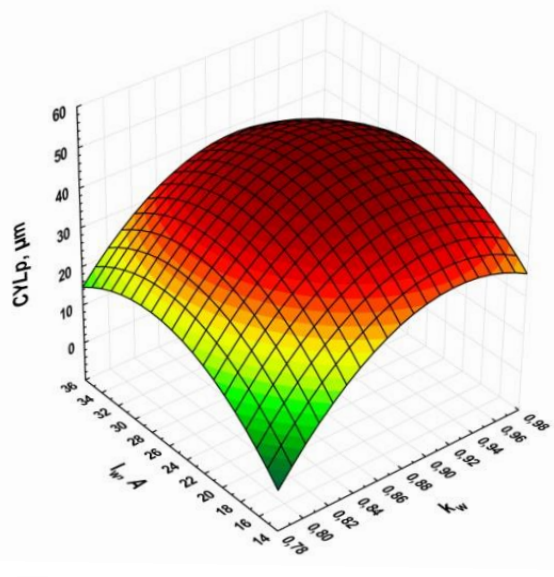


Rys. 4 Przykładowe wygenerowane okno zawierające zobrazony pomiar parametrów oceny zarysu walcowości wykonany na urządzeniu Talyrond 365 ($I_w = 25$ A; $t_i = 210$ μ s; $t_o = 20$ μ s) w wariantcie z włączaniem CR do obszaru obróbki

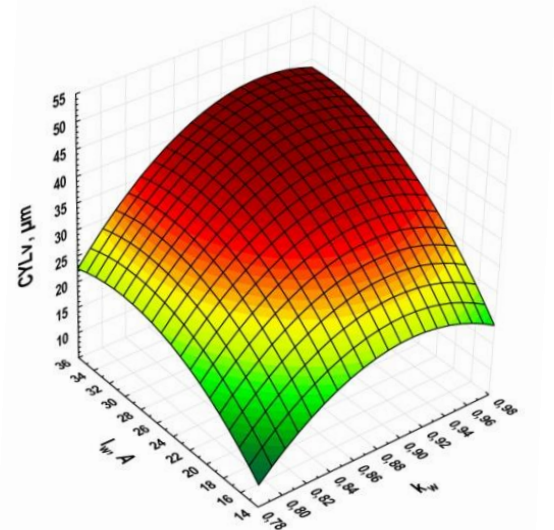


Rys. 5 Przykładowe wygenerowane okno zawierające zobrazony pomiar parametrów oceny zarysu walcowości wykonany na urządzeniu Talyrond 365 ($I_w = 25$ A; $t_i = 210$ μ s; $t_o = 20$ μ s) w wariantcie z włączaniem CR w obszar obróbki

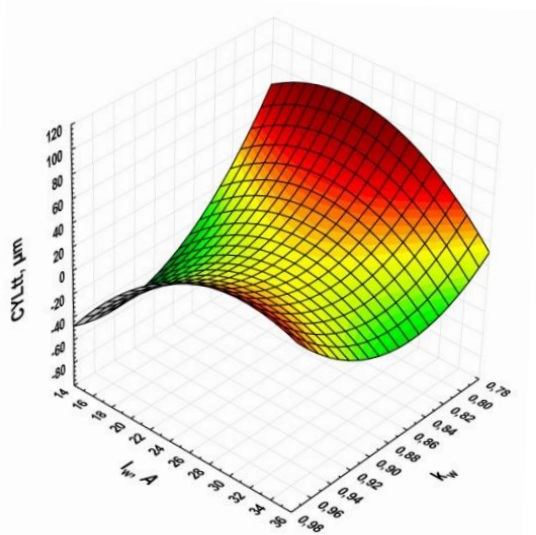
Wykorzystując równania regresji opracowano graficzne wyniki badań w postaci wykresów powierzchniowych obrazujących zależność parametru wyjściowego w funkcji współczynnika wypełnienia oraz natężenia prądu. Wykresy te przedstawiono na rysunkach (6 a, b, c) oraz (7 a, b, c).



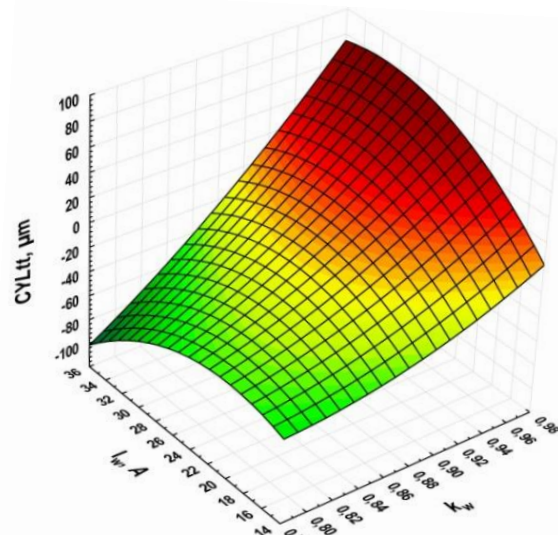
a)



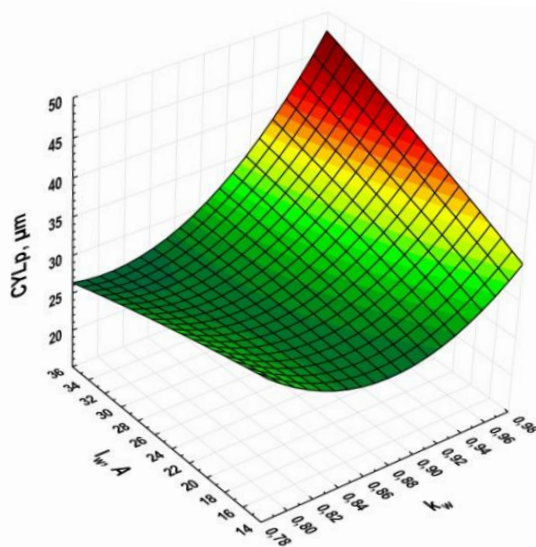
b)



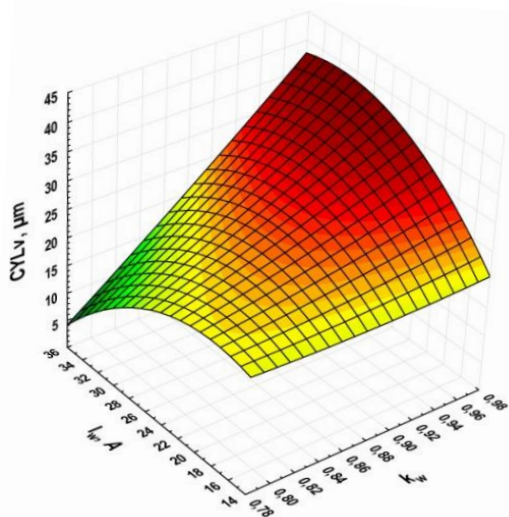
Rys. 6. Wykres zależności parametrów wyjściowych opisujących zarys walcowości a) $CYLp$, b) $CYLv$, c) $CYLtt$, w funkcji zadawanej wartości prądu wyładowań I_w i współczynnika wypełnienia k_w , dla wariantu z odsysaniem CR z obszaru obróbki



Rys. 7. Wykres zależności parametrów wyjściowych opisujących zarys walcowości a) $CYLp$, b) $CYLv$, c) $CYLtt$, w funkcji zadawanej wartości prądu wyładowań I_w i współczynnika wypełnienia k_w , dla wariantu z wtlaczaniem CR w obszar obróbki



a)



b)

Analizując otrzymane wykresy dla zmierzonych parametrów zarysu walcowości oraz otrzymane współczynniki korelacji możemy zauważyć, że głównym czynnikiem determinującym wzrost wartości parametrów zarysu walcowości w przypadku odsysania CR z obszaru obróbki jest natężenie prądu. Wysoki wpływ na wartość w/w parametrów ma również czas impulsu. Zarówno w przypadku natężenia prądu jak i czasu impulsu wraz z ich wzrostem wzrasta wartość analizowanych parametrów. W przypadku wariantu z wtlaczaniem CR w obszar obróbki wzrost analizowanych parametrów powoduje dodatkowo spadek czasu przerwy. Wszystkie te w/w cechy są spowodowane wzrostem energii wyładowania, która wzrasta wraz ze wzrostem czasu impulsu oraz natężenia prądu, a maleje ze wzrostem czasu przerwy.

Dodatkowym elementem wykorzystanym do analizy wyników parametrów zarysu walcowości była wygenerowana macierz współczynników korelacji wielkości wyjściowych w odniesieniu do wielkości wejściowych, którą dla wariantu odsysaniem CR przedstawiono w tabeli 3, a dla wtlaczania CR przedstawiono w tabeli 4.

Tab. 3. Współczynniki korelacji poszczególnych parametrów oceny zarysu walcowości w odniesieniu do wielkości wejściowych – odsysanie CR z obszaru obróbki

Parametry wejściowe	$CYLp$	$CYLv$	$CYLtt$
$t_i (L)$	0,41	0,38	-0,08
$t_i (Q)$	0,49	0,27	-0,25
$t_o (L)$	-0,02	0,02	0,07
$t_o (Q)$	0,30	-0,02	-0,49
$I_w (L)$	0,27	0,76	0,19
$I_w (Q)$	0,50	0,26	0,31

Tab. 4. Współczynniki korelacji poszczególnych parametrów oceny zarysu walcowości w odniesieniu do wielkości wejściowych – włączanie CR w obszar obróbki

Parametry wejściowe	CYLP	CYLV	CYLTt
$t_i (L)$	0,33	0,58	0,79
$t_i (Q)$	-0,45	-0,16	0,01
$t_o (L)$	-0,51	-0,34	-0,04
$t_o (Q)$	0,15	0,21	0,09
$I_w (L)$	0,29	0,23	0,18
$I_w (Q)$	0,05	0,42	0,25

Podsumowanie

Przeprowadzone badania pokazują, że drążenie otworów cylindrycznych elektrodą rurkową zależne jest od wielu czynników m.in. od parametrów prądowych i kierunku podawania cieczy roboczej w obszar obróbki.

Szczegółowa analiza otrzymanych wyników eksperymentu pozwoliła określić wpływ wybranych parametrów procesu technologicznego wykonywani otworów metodą EDM takich jak natężenie prądu, czas impulsu oraz czas przerwy. Wzrost czasu impulsu, wzrost natężenia prądu oraz spadek czasu przerwy powodują wzrost energii wyładowania, co bezpośrednio przekłada się na stan warstwy wierzchniej po obróbce EDM.

Dodatkowym aspektem, było zbadanie wpływu kierunku podawania CR w obszar obróbki, badania pokazują, że ma on istotny wpływ na końcowy efekt obróbki. Wypłukiwanie produktów erozji z obszaru obróbki zwiększa intensywność procesu. Wypłukiwane produkty erozji mogą powodować wyładowani wtórne pomiędzy elektrodą roboczą, a przedmiotem obrabianym – zjawisko to może przyczyniać się do poprawy chropowatości powierzchni obrabianej metodą EDM.

Wyniki z uzyskanych badań potwierdzają ponadto, że poprzez zmianę wartości parametrów prądowych drążenia oraz kierunku przepływu cieczy roboczej, można wpływać w istotny sposób zarówno na efektywność obróbki jak i błędy kształtu otworów cylindrycznych.

LITERATURA

1. Adamczak S., Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
2. DĄBROWSKI L.: EDM – drążenie otworów, warstwa wierzchnia, modelowanie i symulacja komputerowa. Wybrane zagadnienia obróbkę skoncentrowaną wiązką energii, Bydgoszcz 2003, str. 75-77.
3. DĄBROWSKI L., ŚWIERCZ R., ZAWORA J.: Struktura geometryczna powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą grafitową i miedzianą – porównanie. Obróbka elektroerozyjna rozwój i osiągnięcia, Wrocław 2011, str. 32-39.
4. PEROŃCZYK J.: Elektroerozyjne drążenie mikrootworów o różnych kształtach w przekroju poprzecznym – wybrane problemy. Prace naukowe Szkoły Naukowej Obróbki Erozyjnej, Warszawa 2001, str. 41-54.
5. Skoczypiec S., Furyk K., Ruszaj A., Wszyński D.: Badania wpływu parametrów impulsów elektrycznych na strukturę warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej. Monografia Warstwa wierzchnia technologicznie kształtowana, Gorzów Wlkp. – Warszawa 2011, str. 68-75.
6. Spadło S., Dudek D.: Badania błędów zarysu kształtu i struktury geometrycznej powierzchni otworów cylindrycznych drążonych metodą EDM. Warstwa wierzchnia technologicznie kształtowana, Gorzów Wlkp. – Warszawa (2011), str. 98-107.

7. Spadło S., Dudek D., Młynarczyk P.: Analyzing The shape deviation cylindrical holes machined by EDM (electro discharge machining) process. Proceedings of conference 9-th European conference of young research and scientific workers - Transcom, Žilina (2011), pp 175-178.
8. Spadło S., Dudek D.: Investigation of the Shape Accuracy of Cylindrical Holes Machined by EDM Process. Non-Conventional Machining Processes, Journal of Machine Engineering Vol.12, No. 2, Wrocław (2012), pp. 98-104.
9. Spadło S., Dudek D.: Badania charakterystyk użytkowych obrabiarki elektroerozyjnej BP-95d. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej - Terotechnology 2009, Budowa i Eksploatacja Maszyn nr 13/2009, Kielce (2009) str. 374-379.
10. Dokumentacja techniczna programu Statistica 10.