



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

## Systemy sterowania adaptacyjnego w nowoczesnych obrabiarkach WEDM

Adaptive control systems in modern machines WEDM

RAFAŁ ŚWIERCZ  
DOROTA ONISZCZUK-ŚWIERCZ\*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.539

Przemysłowe zastosowanie wycinania elektroerozyjnego w kształtowaniu elementów części maszyn wymaga uzyskania zakładanych dokładności wymiarowo kształtowych i chropowatości powierzchni. Systemy sterowania adaptacyjnego nowoczesnych wycinarek elektroerozyjnych umożliwiają zmianę strategii obróbkowych w celu zapewnienia pożądanych efektów obróbki. W artykule przedstawiono analizę wpływu wybranych strategii obróbkowych, na jakość wytwarzanych elementów.

**SŁOWA KLUCZOWE:** WEDM, systemy sterowania, dokładność wycinania,

*Using wire electrical discharge machining in the development of machine components requires the achievement of the precision dimensional shapes and surface roughness. Adaptive control systems of modern wire EDM machines allows to change machining strategies in order to provide the desired effects processing. The article presents an analysis of the impact of selected machining strategies on the quality of manufactured parts.*

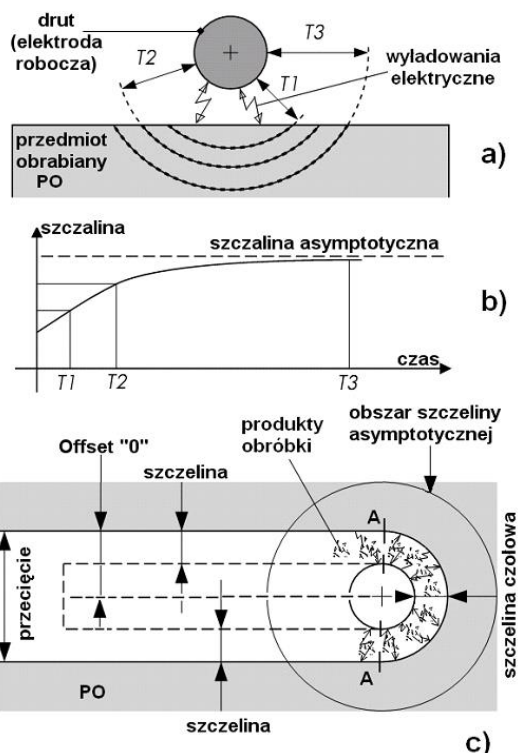
**KEYWORDS:** WEDM, precision manufacturing, adaptive control, shape deviations

W obróbce elektroerozyjnej do kształtowania materiałów wykorzystywane są kontrolowane wyładowania elektryczne w cieczy dielektrycznej. Proces ten jest bardzo złożony i trudny do opisanego pod względem fizycznym, a co za tym idzie i matematycznym. Ogólny model fizyczny wyładowania elektrycznego można przedstawić następująco. Po przyto-

żeniu napięcia do elektrod powstaje niejednorodne i zmienne w czasie pole elektryczne o natężeniu rzędu 105 – 106 V/cm. Niejednorodność pola elektrycznego wywołana jest nierównościami powierzchni elektrod np. chropowatością powierzchni, nierównomiernością właściwości dielektryka oraz obecnością produktów obróbki w dielektryku. W miejscach gdzie natężenie pola elektrycznego jest największe, następuje koncentracja cząsteczek zanieczyszczeń dielektryka, głównie produktów erozji z poprzednich wyładowań, co obniża lokalną wytrzymałość elektryczną medium. Przy dostatecznym natężeniu pola elektrycznego i pewnym napięciu  $U_g$ , zwanym granicznym, następuje przebicie prowadzące do powstawania kanału plazmowego. Wydzielające się ciepło powoduje lokalne topienie lub/i parowanie materiału elektrod, który częściowo zostaje wyrzucony do dielektryka, a częściowo krzepnie w kraterze powstałym w wyniku tego wyładowania. Proces powtarza się w najbardziej dogodnym miejscu, w trakcie impulsów prądowych i napięciowych podawanych z generatora obrabiarki [3, 5, 7].

Proces wycinania rozpoczyna się od momentu, kiedy elektroda robocza zbliży się na odległość zapewniającą osiągnięcie natężenia pola elektrycznego większego od granicznego, od tego momentu rozpoczyna się formowanie szczeliny czołowej (rys 1a). W miarę upływu czasu szczelina czołowa powiększa się (rys. 1a i 1b), proces ten trwa do momentu, kiedy elektroda zagłębi się w materiał na głębokość równą połowie grubości drutu (głębokość wycięcia równa jest połowie średnicy drutu plus wartość szczeliny czołowej). Od tej chwili rozpoczyna się proces formowania szczeliny bocznej. Wymiary szczeliny zależą od takich czynników jak: energia impulsu elektrycznego (napięcie i natężenie prądu, czas wyładowania), przewodność cieplna i elektryczna materiału, przewodność elektryczna dielektryka, prędkość wycinania (posuw), naciąg i szybkość przewijania drutu, ciśnienie dielektryka.

\* dr inż. Rafał Świercz ([rsw@meil.pw.edu.pl](mailto:rsw@meil.pw.edu.pl)),  
dr inż. Dorota Oniszczyk-Świercz ([do@meil.pw.edu.pl](mailto:do@meil.pw.edu.pl)),  
Politechnika Warszawska



Rys. 1. Schemat formowania szczeliny międzyelektrodowej [8]

Na rysunku 1c zaznaczono obszar szczeliny asymptotycznej, czyli maksymalnej szczeliny, jaka może powstać przy maksymalnych dopuszczalnych parametrach obróbki.

Parametry technologiczne procesu WEDM muszą być tak dobrane by spełniały następujące kryteria: maksimum wydajności, maksimum dokładności, wymagania chropowatościowe.

Przemysłowe zastosowanie wycinania elektroerozyjnego w kształtowaniu elementów części maszyn wymaga uzyskania zakładanych dokładności wymiarowo kształtowych i odpowiedniej chropowatości powierzchni. Spełnienie drugiego warunku (zakładanej chropowatości powierzchni) wymaga zastosowania określonej energii wyładowań elektrycznych, co prowadzi do zastosowania dodatkowych przejść obróbkowych (przy obniżonej energii odpowiednio dla przejść wykańczających i wygładzających). Dokładność wymiarowo kształtowa przedmiotów obrabianych zależy natomiast od szeregu czynników. Jedną z przyczyn powstawania błędów kształtu są drgania drutu, które zależą przede wszystkim od [1, 2, 4, 6, 9, 10]:

- drgań wywołanych wyładowaniami elektrycznymi w szczelinie,
- wysokości ciętego przedmiotu,
- hydrodynamiki przepływu dielektryka,
- nierównomierności ciśnienia podawanego dielektryka (strugi) w szczelinie, która może być spowodowana: różnicą ciśnień - doprowadzanie dielektryka z głowicy dolnej i górnej, występowaniem produktów obróbki w szczelinie, położeniem wycinanego kształtu – wycinanie na brzegu przedmiotu powoduje „ucieczkę” dielektryka na boki.

Drugą istotną przyczyną powstawania błędów kształtu po obróbce WEDM jest występowanie produktów wyerodowanego materiału w szczelinie międzyelektrodowej, które ułatwiają wyładowania elektryczne obniżając oporność ośrodka. „Położenie” maksymalnej koncentracji produktów obróbki (a tym samym położenie maksymalnego błędu po obróbce) uwarunkowane jest różnicą ciśnień w dyszy górnej i dolnej (dysze doprowadzające dielektryk do szczeliny międzyelektrodowej). Dla przewidywania położenia maksymal-

nej wartości koncentracji produktów jak i wartości maksymalnego błędu konieczna jest znajomość warunków hydrodynamicznych panujących w szczelinie międzyelektrodowej. Należy zaznaczyć, że dielektryk stanowi nie tylko medium biorące udział w wyładowaniu elektrycznym, ale pełni również funkcję chłodzącą rejon obróbki (odpowiednio dobrany przepływ zapobiega upaleniu elektrody).

### Cel badań

Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych było opracowanie kryteriów doboru strategii obróbkowych w zależności od pożądanego wartości odchyłek kształtu przy wycinaniu elektroerozyjnym wysokich elementów (150 – 200 mm).

### Przedmiot badań

Wycinaniu elektroerozyjnego poddano próbki ze stali narzędziowej wysokostopowej 1.2379 (NC 11 LV). Ze stali tej wykonywane są przeciągacze, frezy, rozwiertaki, płyty wykrojników, narzędzia tnące, szczęki do walcowania gwintu na zimno, matryce i stemple do wyciskania, rozwiertaki, obcinaki, rolki do walcowania na zimno.

### Urządzenia technologiczne i aparatura badawcza

Badania wpływu warunków obróbki WEDM na cechy struktury geometrycznej powierzchni i właściwości użytkowych obrabianych przedmiotów dokonano za pomocą urządzeń technologicznych i aparatury pomiarowej znajdujących się w Zakładzie Obróbek Wykańczających i Erozyjnych Instytutu Technik Wytwarzania Politechniki Warszawskiej.

Badania bezpośrednie procesu cięcia prowadzono na wycinarce elektroerozyjnej Mitsubishi MV 2400S (rys. 2). Badanie prowadzone były w firmie GST Investment. Mitsubishi MV 2400S to najnowsza obrabiarka wyposażona w zaawansowany system adaptacyjnej kontroli wyładowań elektrycznych.

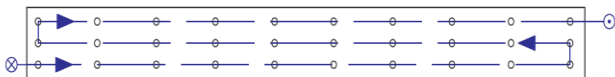


Rys. 2. Widok maszyny Mitsubishi MV 2400S

Do pomiaru odchyłek kształtu wyciętych profili wykorzystano współrzędnościową maszynę pomiarową CNC Zeiss-Vista. Niepewność pomiarowa maszyny wynosi  $2,4 \mu\text{m} + L/300$ . Współrzędnościowa maszyna pomiarowa Vista wyposażona była w głowicę elektrostrykową firmy Renishaw. Standardowym programem obsługującym maszynę

pomiarową Vista jest oprogramowanie Calypso, które wykorzystując techniki CAM, automatycznie generuje strategię oraz ścieżki pomiarowe. W oprogramowaniu Calypso wyznaczono strategię pomiarową dla każdej ze ścian wyciętej próbki. Pomiar dokonywany był za pomocą rastra (rys. 3) gdzie każda z płaszczyzn mierzona była za pomocą 300 punktów pomiarowych.

Każdy pomiar na współrzędnościowej maszynie poprzeczony był kalibracją końcówki głowicy pomiarowej.



Rys. 3. Pomiar za pomocą strategii pomiarowej – raster

Pomiaru struktury geometrycznej powierzchni (SGP) próbek po wycinaniu elektroerozyjnym dokonano przy użyciu wysokiej klasy (pierwszej) profilometru skanującego FORM TALYSURF Series 2 firmy Taylor Hobson GB. Profilometr wykorzystywany jest do zaawansowanych badań struktury geometrycznej powierzchni: profili, mikrostereometrii oraz pomiarów konturu przedmiotów. Urządzenie charakteryzuje się rozdzielczością skanowania 6  $\mu\text{m}$ .

### Metodyka badawcza

Podstawowym zagadnieniem analizy wpływu poszczególnych parametrów obróbki wycinania elektroerozyjnego na skutki jakościowe jest określenie możliwych do ustawienia zakresów zmienności badanych parametrów przy jednoczesnym zachowaniu stabilności obróbki.

Przeprowadzona analiza tablic technologicznych dostarczonych przez producenta obrabiarki wykazuje, iż poszczególne wartości parametrów obróbki w większości przypadków podawane są w formie kodowanej bez podania rzeczywistych ich wartości. Parametry obróbki zgodnie z zaleceniami producenta obrabiarki należy dobierać odpowiednio w zależności od:

- rodzaju materiału ciętego,
- wysokości materiału,
- rodzaju obróbki (zgrubna, wykończeniowa, wygładzająca),
- pożądanej końcowej chropowatości powierzchni warunkującej liczbę zastosowanych przejść obróbkowych.

Należy zwrócić również uwagę, iż producent obrabiarki podaje szereg warunków obróbki koniecznych do spełnienia, aby uzyskać jak największą stabilność procesu i jakość wytwarzanych elementów, do których należą:

- odpowiedni stopień dejonizacji dielektryka – warunkujący proces jonizacji kanału wyładowania w trakcie wyładowań elektrycznych, zalecany stopień dejonizacji 15  $\mu\text{S}$ ,
- odpowiednio ustawioną odległość głowic względem obrabianego przedmiotu – zalecana 0,2 mm, ustawieni większej odległości powoduje obniżenie ciśnienia podawania dielektryka prowadząc tym samym do pogorszenia efektywności odprowadzania produktów obróbki ze szczeliny międzyelektrodowej. Przedstawiona zależność w istotny sposób wpływa zarówno na wydajność procesu wycinania jak również dokładność geometryczną wycinanych przedmiotów,
- odpowiedni dobór miejsca wycinania pożądanej geometrii w zamocowanym półfabrykacie – występowanie naprężeń wewnętrznych w materiale może w sposób istotny wpłynąć na deformacje geometryczną wycinanego elementu, w przypadku źle dobranego punktu wejścia narzędzia w materiał oraz brak zachowania odpowiedniej odległości wycinanego kształtu od krawędzi zewnętrznych półfabrykatu (zalecane wycinanie elementów co najmniej 5mm od krawędzi półfabrykatu),

- odpowiednie rozmagnesowanie przedmiotu – występowanie resztkowego pola magnetycznego może powodować lokalną koncentrację produktów obróbki w szczelinie międzyelektrodowej prowadząc do zaburzeń procesu obróbki (lokalnie zwiększona liczba wyładowań elektrycznych - zmniejszenie lokalnej oporności dielektryka),
- odpowiedni dobór elektrody drutowej uzależnionej od wysokości materiału ciętego – producent obrabiarki zaleca stosowanie dla materiałów o wysokości cięcia 200 mm – 300 mm elektrody drutowe o średnicy od 0,25 mm (zakres prowadzonych badań),
- odpowiedni dobór offsetów i naddatków na przejścia wykończeniowe i wygładzające w zależności od pożądanej końcowej chropowatości.

Producent obrabiarki w dostarczonych tablicach technologicznych nie podaje informacji na temat doboru wartości poszczególnych offsetów i liczby przejść w zależności od pożądanej spodziewanej dokładności geometrycznej wycinanych elementów i występowania ewentualnych błędów kształtu szczególnie w odniesieniu do wysokości cięcia materiału, co jest zagadnieniem szczególnie istotnym ze względu na przemysłowe zastosowanie obrabiarki i oczekiwania stawiane przez potencjalnych klientów.

Badania wstępne rozpoznawcze wymagają, zatem analizy zastosowania standardowych zalecanych przez producenta obrabiarki parametrów obróbki i określenia ich wpływu na dokładność geometryczną przedmiotów, stabilność obróbki i chropowatość obrobionych powierzchni.

Podstawowym czynnikiem decydującym o dokładności wymiarowo kształtowej wycinanych elementów są wartości odchyłek kształtu (wklęsłość, wypukłość, zmiana wymiarów w dolnej części elementów – poszerzenie) wynikających z parametrów obróbki dla pierwszego przejścia zgrubnego. Zgodnie z omówionym we wstępie procesem generowania typowych odchyłek kształtu, niezmiernie istotne są informacje na temat ich rzeczywistych wartości po przejściu zgrubnym. Dane te umożliwiają dobór odpowiednich offsetów i parametrów obróbki dla przejść wykończeniowych tak, aby w końcowym etapie uzyskać zakładaną: dokładność wymiarowo kształtową wykonanych elementów i chropowatość powierzchni.

Zgodnie z informacjami podawanymi przez producenta obrabiarki dla przejścia zgrubnego możliwa jest:

- automatyczna optymalizacja parametrów obróbki biorąc pod uwagę jako podstawowe kryterium stabilność obróbki (brak zerwań elektrody) - parametr sterowania adaptacyjnego PM włączony, powodujący zmianę parametrów wyładowań elektrycznych w trakcie cięcia, brak możliwości ręcznej regulacji poszczególnych parametrów obróbki, opisanych w pierwszym zadaniu badawczym,
- praca ze standardowymi nastawami generatora – parametr sterowania adaptacyjnego PM wyłączony, istnieje możliwość zmiany poszczególnych parametrów obróbki opisanych w pierwszym zadaniu badawczym.

### Badania doświadczalne

Obróbce WEDM poddano stal NC 11 LV obrobioną cieplnie do twardości 62 HRC. Wycinano kostki prostokątne o wymiarach: 10 x 10 x 125 mm, 15 x 15 x 150 mm, 15 x 15 x 200 mm.

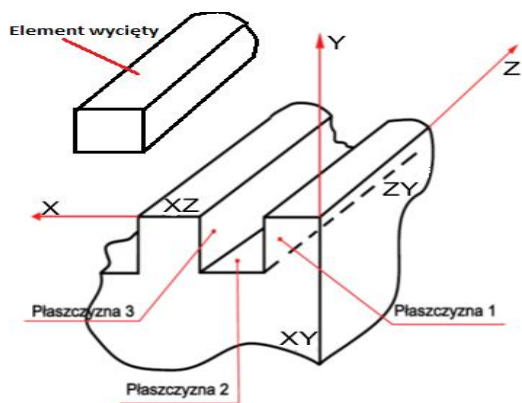
W ramach badań przeprowadzono (tabela 1):

- cięcia z parametrami odpowiadającymi obróbce zgrubnej dla różnych nastaw układu optymalizacji parametrów obróbki (power machining włączony i wyłączony),
- cięcia z parametrami odpowiadającymi obróbce wykańczającej uwzględniające kilka przejść obróbkowych.

Tabela 1. Zestawienie przyjętych założeń badawczych

Wysokość materiału ciętego [mm]	Technologia obróbki - zastosowane nastawy generatora E-Pack		
	PM włączony przejście zgrubne	PM wyłączony przejście zgrubne	Cięcie z przejściami wykończeniowymi
125	E 2331	E 2331	E 2331, E 2332, E 2333, E 2334
150	E 2341	E 2341	E 2341, E 2342, E 2343, E 2344
200	E 2361	E 2361	E 2361, E 2362, E 2363, E 2364

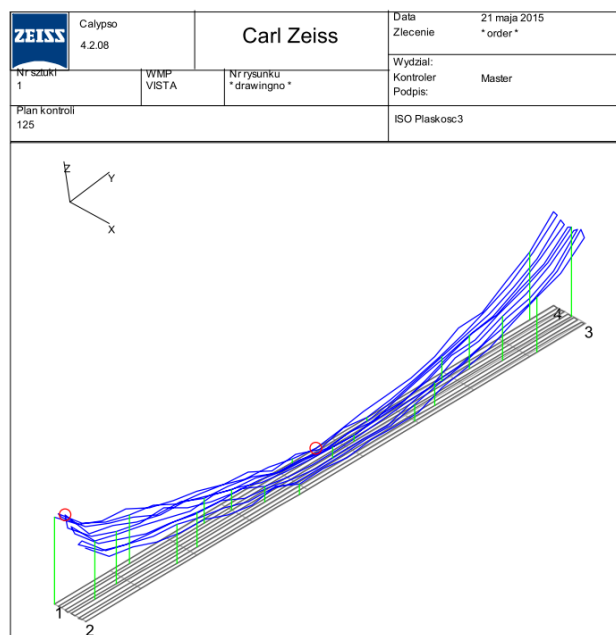
Próbki wykonano w jednym zamocowaniu dla określonej wysokości bloku materiału (rys. 4) (eliminacja błędów wynikających z zamocowania przedmiotu). Elektroda roboczą był drut miedziany o średnicy 0,25 mm ( $900 \text{ N/mm}^2$ ). Obróbka odbywała się w zanurzeniu, dodatkowo dielektryk (woda demineralizowana i dejonizowana) podawany był do szczeliny międzyelektrodowej z dyszy górnej i dolnej (odległość dysz od materiału ustawiano zgodnie z zaleceniami producenta - 0,2 mm).



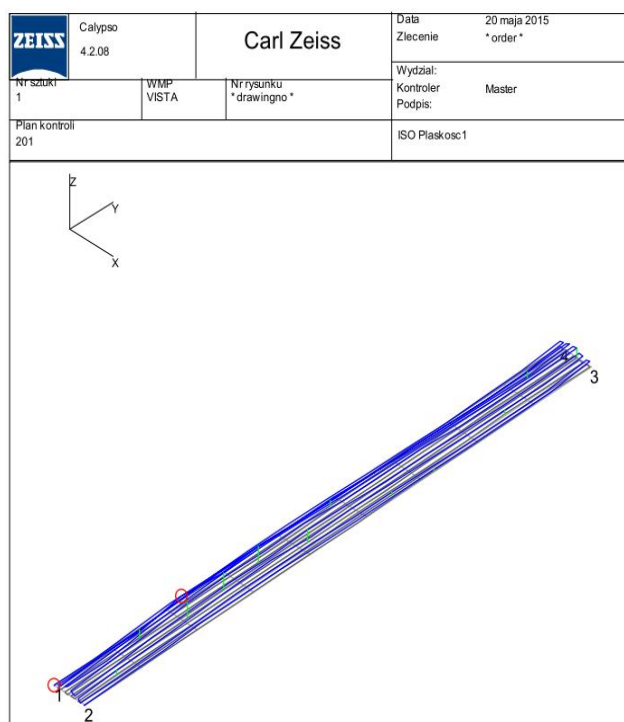
Rys. 4. Schemat wycinania próbek: oznaczenie poszczególnych wycinanych płaszczyzn

### Wyniki badań

Dokonano pomiarów płaskości powierzchni próbek po obróbce WEDM na Współrzędnościowej Maszynie Pomiarowej (WMP) 3D Vista CNC firmy Zeiss. W oprogramowaniu Calypso opracowano strategię pomiarową dla każdej ze ścian wyciętej próbki. Pomiaru dokonano za pomocą strategii pomiarowej raster – rejestrowano 300 punktów pomiarowych na powierzchni mierzonego elementu. Przykładowe raporty z przeprowadzonych pomiarów przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

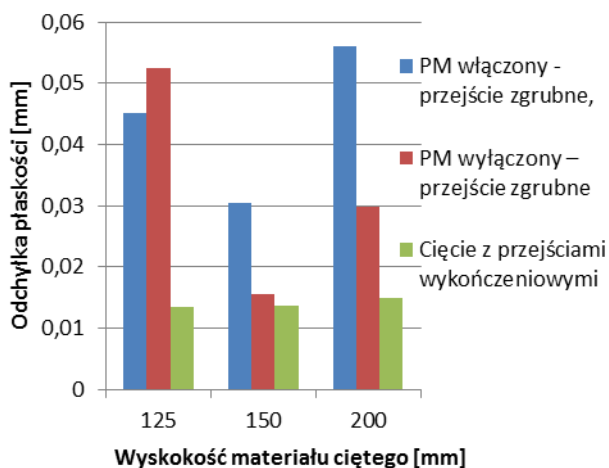


Rys. 5. Wygenerowany raport z przeprowadzonych pomiarów na WMP – pomiar próbki wysokość 200 mm ściana środkowa, PM wyłączony przejście zgrubne, odchyłka płaskości 56  $\mu\text{m}$

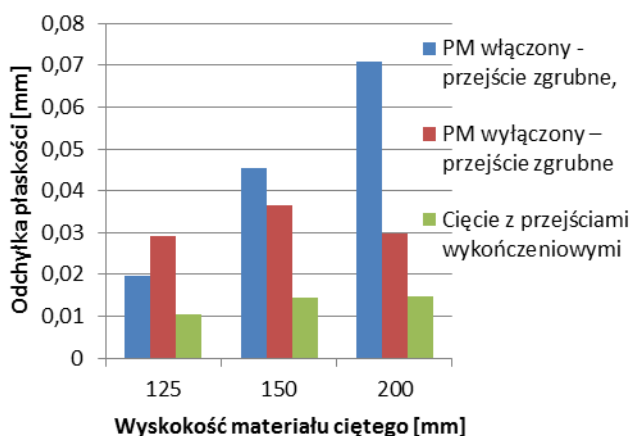


Rys. 6. Wygenerowany raport z przeprowadzonych pomiarów na WMP – pomiar próbki wysokość 200 mm ściana środkowa, PM włączony – 4 przejścia, odchyłka płaskości 9  $\mu\text{m}$

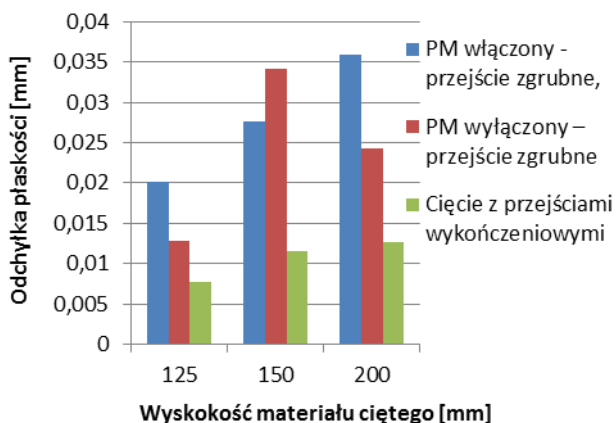
Na podstawie wyników pomiarów odchyłek płaskości sporządzono wykresy (rys. 7, 8, 9) przedstawiające wpływ rodzaju przyjętej technologii cięcia na błędy kształtu.



Rys. 7. Odchyłka płaskości ściana 2 środkowa



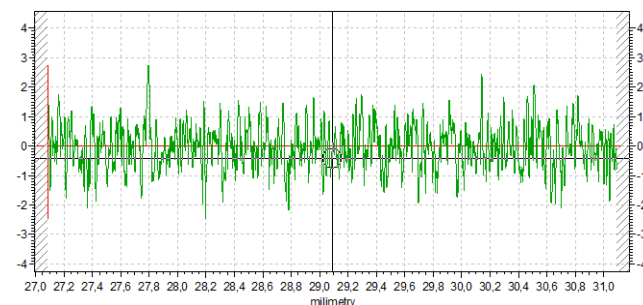
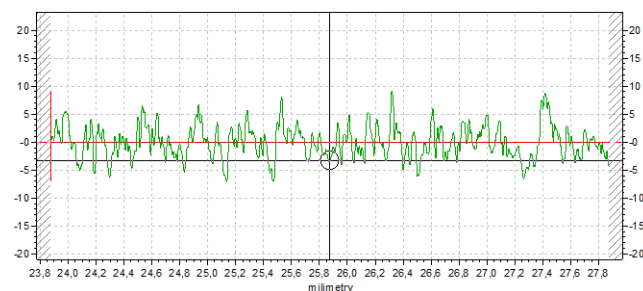
Rys. 8. Odchyłka płaskości ścianka 1 wejściowa



Rys. 9. Odchyłka płaskości ścianka 3 wyjściowa

W zależności od pożądanych cech struktury geometrycznej powierzchni do jej oceny dobierane są odpowiednie parametry. Do dalszej analizy wpływu parametrów energetycznych na strukturę geometryczną powierzchni w ujęciu badań podstawowych użyto parametru opisującego wyso-

kość chropowatości  $R_a$  – średnie odchylenie profilu od linii średniej. Parametry profilu w większości mają swoje odpowiedniki w parametrach 3D mikrostereometrii. Zdecydowano się na użycie parametru 2D ze względu na znacznie szybszy czas pomiaru w stosunku do pomiarów stereometrii powierzchni (pomiar powierzchni o wymiarach 1,6 mm x 3 mm z krokiem dyskretyzacji 10  $\mu\text{m}$  w osi y i x trwa około 40 minut). Pomiaru profilu (rys. 10, 11) dokonano w 5 równoległych przekrojach (odcinek pomiarowy 5 mm) na środkowej powierzchni bocznej badanych próbek (płaszczyzna 2 rysunek 4).

Rys. 10. Przykładowy profilograf mierzonej powierzchni,  $R_a = 0,58 \mu\text{m}$ Rys. 11. Przykładowy profilograf mierzonej powierzchni,  $R_a = 2,29 \mu\text{m}$ 

Przyjęcie środkowej powierzchni, jako obiektu badań miało na celu wyeliminowanie ewentualnych zakłóceń wynikających ze zmiany parametrów energetycznych (obniżenie częstotliwości wyładowań) w momencie wcinania elektrody w przedmiot obrabiany. Z punktu widzenia warunków obróbki jest to miejsce szczególnie niewaligiczne, w którym często dochodzi do zjawiska upalenia drutu. Wynika to z faktu, iż początkowa faza cięcia charakteryzuje się nierównomiernym wpływem drutu przez dielektryk. Powstające zaburzenia pola przepływu mogą prowadzić do nieefektywnego chłodzenia elektrody roboczej, jej drgań, jak również niestabilności ośrodka dielektrycznego, który składa się z wody demineralizowanej i dejonizowanej oraz powietrza. W początkowym etapie wcinania ręcznie zmieniano wartość częstotliwości wyładowań (zwiększano częstotliwość) aż do stabilizacji warunków i uzyskania stałej prędkości cięcia (odczytywanej z monitora obrabiarki).

### Analiza wyników i podsumowanie

Analiza uzyskanych wyników wskazuje, iż w większości przypadków przy włączonym adaptacyjnym sterowaniu generatora obrabiarki (PM włączony) uzyskano większą wartość odchyłki płaskości w stosunku do pracy ze standardowymi nastawami generatora obrabiarki. PM włączony powoduje zwiększenie napięcia w szczelnie (VG - voltage gap, średnio o 10V), przy której następuje wyładowanie elektryczne (zwiększenie grubości szczeliny, przy którym możliwa jest inicjacja wyładowania elektrycznego). Proces cięcia jest stabilny, przy czym drut jest bardziej po-

datny na drgania prowadzące do zaobserwowanych odchyłek płaskości (wklęsłość).

Wyłączenie technologii sterowania adaptacyjnego w większości analizowanych prób spowodowało uzyskanie mniejszych wartości odchyłki płaskości. Zastosowanie dodatkowych przejść wykańczających we wszystkich analizowanych próbach powoduje istotne zmniejszenie odchyłek płaskości.

Analiza otrzymanych danych z pomiarów wykazuje, iż w przypadku zgrubnego cięcia uzyskana jest chropowatość  $Ra$  w zakresie od 2,29 – 2,69  $\mu\text{m}$ , przy czym zastosowanie sterowania adaptacyjnego (PM włączony lub wyłączony) nie powoduje znaczących zmian w uzyskiwanych wartościach chropowatości. Poprzez zastosowanie dodatkowych przejść wykańczających możliwe jest zmniejszenie chropowatości powierzchni  $Ra < 1\mu\text{m}$ .

#### Literatura

- [1] Arunachalam C., Aulia M., Bozkurt B., Eubank P. T.: Wire vibration, bowing, and breakage in wire electrical discharge machining, *Journal of Applied Physics*, Vol. 89, Issue 8, pp.: 4255 – 4262, 2001.
- [2] Herrero A., Uriarte L., Azcarate S., Sanchez J. A.: Error analysis of thin wire EDM corner machining, pp.: 122 – 126, ISEM, 2007.
- [3] Ho K. H., Newman S. T., Rahimifard S., Allen R. D.: State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, Issues 12 – 13, pp.: 1247 – 1259, 2004.
- [4] Islam M. N., Rafai N.H., Subramanian S.S.: An investigation into dimensional accuracy achievable in wire electrical discharge machining, *Proceeding of the World Congress on Engineering*, Vol. 3, London 2010.
- [5] Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P., Schumacher B. M.: Advancing EDM through fundamental insight into the process, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 54, Issue 2, pp.: 64 – 87, 2005.
- [6] Kuruvila N., Ravindra H. V.: Parametric influence and optimization of wire EDM of hot die steel, *Machining Science and Technology*, Vol. 15, Issue 1, pp.:47 – 75, 2011.
- [7] Lauwers B.: Surface Integrity in Hybrid Machining Processes, *CIRP Conference on Surface Integrity (CSI)*, *Procedia Engineering* Vol. 19, pp.: 241 – 251, 2011.
- [8] Rozenek M., Dąbrowski L.: Aspekty ekonomiczne i dokładnościowe wycinania elektroerozyjnego, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, Vol. 31, nr. 2, pp.: 87 – 95, 2011.
- [9] Sanchez J. A., Plaza S., Lopez de Lacalle L. N., Lamikiz A., Computer simulation of wire-EDM taper-cutting, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 19, No. 7, pp.: 727 – 735, 2006.
- [10] Yang R. T., Tzeng Ch. J., Yang Y. K., Hsieh M. H.: Optimization of wire electrical discharge machining process parameters for cutting tungsten, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 60, Issues 1 – 4, pp.: 135 – 147, 2012.