

Analiza Pareto ANOVA cech geometrycznych wyrobów kształtowanych w ZSW w cyklu adaptacyjnym EDM

Halina Nieciąg, Rafał Kudelski, Krzysztof Zagórski

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Streszczenie: Czynniki oddziałujące na proces kształtowania EDM materiałów trudno obrabialnych powodują wzrost niedokładności wymiarowo-kształtowej, chropowatości powierzchni wyrobów, a także przyspieszone zużycie narzędzia. W artykule przedstawiono analizę zależności odchyłek wykonawczych powierzchni, które powstają w cyklicznym procesie kształtowania EDM, i odchyłek narzędzia od wybranych czynników. W analizie zastosowano metodę Pareto ANOVA. Geometrię oceniano na podstawie odchyłek wymiaru i odchyłek geometrycznych elektrody oraz kształtowanej nią powierzchni wyrobu. Pomiary wykonano na współrzędnościowej maszynie pomiarowej w trybie kontroli po każdym cyklu obróbki pojedynczego elementu. Obróbkę zrealizowano w Zintegrowanym Systemie Wytwarzania (ZSW), pracującym w Centrum Obsługi Badań Naukowych i Dydaktyki WIMIR AGH. Przeanalizowano także wskaźniki WRR i MRR, charakteryzujące efektywność procesu i przydatność narzędzia.

Słowa kluczowe: technika współrzędnościowa, Zintegrowane Systemy Wytwarzania, inspekcja elektrod

1. Wstęp

Technologia EDM jest powszechnie wybieranym rodzajem obróbki materiałów trudno obrabialnych takich, jak stale wysokiej twardości, twarde stopy metali, diament, węgliki, twarde materiały przewodzące prąd elektryczny, kompozyty czy ceramika [1]. Kształtowanie części maszyn metodą klasycznego wgłębnego drażenia elektroerozyjnego następuje w wyniku odwzorowania kształtu elektrody w przedmiocie obrabianym.

W przemyśle maszynowym jakość wyrobów jest uwarunkowana zgodnością z wymaganiami ujętymi w specyfikacji [2]. Dokładność obróbki elektroerozyjnej ocenia się tak, jak w przypadkach innych metod wytwarzania, na podstawie odchyłek rzeczywistych cech geometrycznych obrabianych powierzchni od postaci nominalnej wyrobu, opisanej wymiarami, warunkami geometrycznymi (tolerancjami kształtu, położenia, bicia itp.) oraz parametrami mikrogeometrii powierzchni (chropowatości, falistości).

Zjawiska towarzyszące obróbce elektroerozyjnej powodują nie tylko erozję przedmiotu, lecz także ubytek materiału narzędzia

oraz deformację jego postaci geometrycznej. Miarą zdolności elektrody do wytworzenia wyrobu w określonej klasie dokładności jest utrzymanie w określonych specyfikacją przedziałach wartości odchyłek wykonawczych. W artykule nie analizowano mikronierówności, jako aspektu jakości powierzchni po obróbce, który dość wyczerpująco został rozpoznany i omówiony w wielu pracach [3].

Wielkość odchyłek wykonawczych kształtowanych elementów zależy od wielkości i postaci zużycia elektrody roboczej, a na to wpływa wiele czynników. Najważniejsze z nich to parametry procesu technologicznego (napięcie i natężenie prądu elektrycznego, czas wyładowania), właściwości materiału elektrody i przedmiotu, właściwości dielektryka, szerokość szczeliny roboczej [4].

Monitorowanie, jako etap pozyskiwania w trakcie trwania procesu informacji o stanie narzędzia, realizowane jest obecnie na wiele sposobów [5]. Stosownym pod względem wydajności rozwiązaniem jest wyposażanie systemów obróbki w zautomatyzowane systemy nadzorowania. Rolę takich systemów może przejąć współrzędnościowa maszyna pomiarowa, która wraz z zautomatyzowanym systemem załadunkowym i oprogramowaniem dokonuje cyklicznej inspekcji narzędzi roboczych i pozwala wykorzystać jej rezultaty do korekty parametrów procesu. Zautomatyzowana maszyna obróbcza i wymienione elementy, zintegrowane sieciowo, komunikują się między sobą na podstawie protokołów sieciowych.

Opisana struktura jest podstawą Zrobotyzowanego Systemu Transportu Międzystanowiskowego Elastycznego Systemu Wytwarzania, pracującego w Centrum Obsługi Badań Naukowych i Dydaktyki IMIR AGH. W skład systemu wchodzi następujące urządzenia: elektrodźwarka (ROBOFORM 350 Sp),

Autor korespondujący:

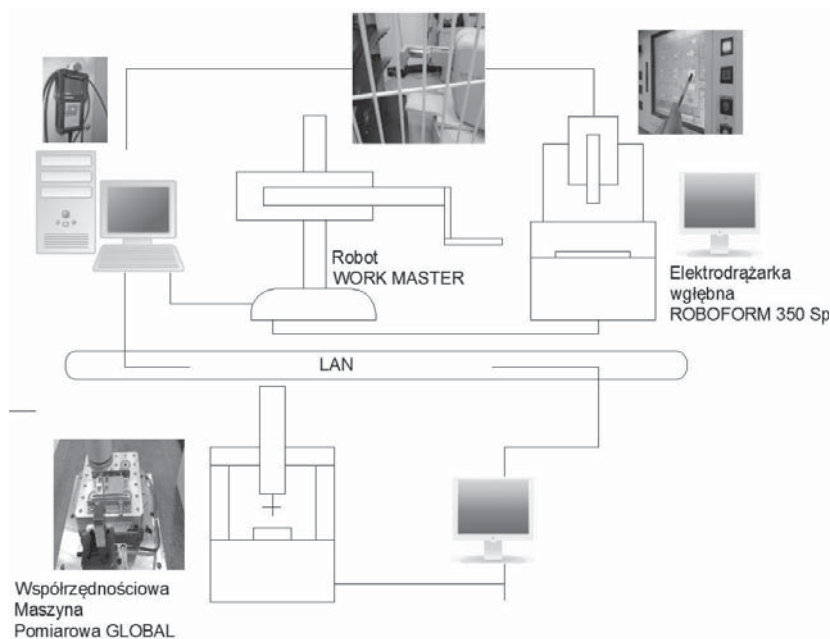
Halina Nieciąg, hnieciag@agh.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 25.09.2017 r., przyjęty do druku 27.10.2017 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Schemat systemu
Fig. 1. System diagram

system mocowania paletowego firmy 3R narzędzia i materiału (robot Work Master) oraz współrzędnościowa maszyna pomiarowa (Global Silver Performance) (rys. 1). Ważną cechą systemu, oprócz monitorowania stanu narzędzia i sterowania procesem, jest obsługa palet z obrabianymi wyrobami, składowanymi w wieloregalowym magazynie. Wytwarzanie elementów powtarzalnych (nie tylko partii wyrobów) jest bardziej wydajne dzięki możliwości ustalania ich na jednej palecie, obsługiwanej przez robota, dzięki czemu minimalizuje się czasy pomocnicze.

Celem przeprowadzonych badań rozpoznawczych [6] było przyjęcie sposobu prognozowania stanu wyrobu po kształtowaniu EDM, na podstawie wyników inspekcji geometrii narzędzia, podczas wykonywania powtarzalnych elementów powierzchni, tzw. kieszeni. Obróbka realizowana w ZSW na elektrodrążarce firmy Aggie Charmilles przebiegała w jednym przejściu bez korekcji wymiarowej, z włączoną funkcją sterowania adaptacyjnego. W tej strategii obróbki stosowane są gotowe procedury, oparte na doświadczeniach firmy [7], uruchamiane z poziomu komputera panelowego. Jest to w praktyce produkcyjnej najczęściej stosowany, bo niewymagający i niezbyt czasochłonny tryb pracy. W celu predykcji zaburzeń odwzorowania wymiarowo-kształtowego elektrody skonfigurowano sieć neuronową i przeprowadzono proces jej uczenia przy wykorzystaniu danych eksperymentalnych.

Artykuł jest wynikiem dalszych badań dokładności geometrycznej obróbki EDM i przedstawia analizę zależności odchylek wykonawczych i odchylek elektrody roboczej od wybranych czynników w cyklicznym procesie kształtowania wgłębień. Tradycyjnie okres trwałości narzędzia oceniany jest na podstawie osiągania maksymalnych (dopuszczalnych) wartości określonych wskaźników zużycia elektrody. O przydatności narzędzia świadczy zdolność wytwarzania za jego pomocą wyrobów w założonej klasie dokładności, dlatego kryterium prawidłowego odwzorowania geometrii powinno przede wszystkim decydować o dopuszczeniu go do dalszej pracy. Na podstawie cyklicznych pomiarów elektrody powinna zostać wypracowana diagnoza o stanie narzędzia.

W analizie zastosowano metodę Pareto ANOVA. Metoda ta jest uproszczonym wariantem analizy wariancji, niewymagającej spełnienia wielu założeń, stawianych w metodzie klasycznej. Geometrię oceniano na podstawie odchylek wymiaru i odchylek

lek geometrycznych narzędzia i detalu. Przeanalizowane zostały również wskaźniki MRR i WRR w celu oceny efektywności procesu i zużycia narzędzia.

2. Plan Taguchi'ego

Eksperyment zaplanowano według ortogonalnej macierzy Taguchi'ego. Macierz planu doświadczeń pozwala na wyznaczenie wartości czynnika analizowanego dla różnych poziomów zmienności czynników wejściowych. W metodzie Taguchi'ego zakłada się, że dla zmiennych wyjściowych procesu istnieją wartości optymalne. Odchylenie od tych wartości powoduje powstanie tzw. „straty”, którą można modelować funkcją paraboliczną. Algorytm metody opiera się na wyznaczeniu współczynników S/N (signal/noise – stosunek sygnału do szumu),

które charakteryzują zmienność badanego czynnika wyjściowego spowodowaną zakłóceniami procesu. Różnice współczynnika S/N na poszczególnych poziomach zmienności danego czynnika umożliwiają m.in. określenie odporności na działanie zakłócenia [8, 9].

Stosowane są cztery różne sposoby wyznaczenia współczynników S/N . Jeśli funkcja straty ma zostać zminimalizowana, czyli wartość docelowa funkcji jest równa zero („smaller is better”), to współczynnik oblicza się według wzoru (1).

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{ij}^2 \right), \quad (1)$$

gdzie: y_{ij} – wartość (zmierzona) i -tej zmiennej dla poziomu j , n – liczba pomiarów.

Jeśli celowe jest zwiększenie tej funkcji, np. w przypadku usuwania materiału podczas obróbki ubytkowej („larger is better”), to współczynniki wyznacza się według wzoru (2).

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \right). \quad (2)$$

Dalsze postępowanie, zgodnie ze schematem Pareto ANOVA, pozwala wyodrębnić czynniki wejściowe wpływające w sposób znaczący na wybrane wskaźniki procesu. Po obliczeniu wartości S/N czynnika wynikowego (zmiennej wyjściowej) dla każdego czynnika wejściowego wyznaczane są różnice między tymi wartościami. Stosowane są dwa sposoby scharakteryzowania zróżnicowania tych wartości. Przy stosowaniu analizy Pareto ANOVA bardziej odpowiedni wydaje się wskaźnik oznaczany przez SS – suma kwadratów odchyleń względem wartości średniej ($\overline{S/N}$) i -tego czynnika dla poziomu j , ze względu na analogię do miar stosowanych przy wewnątrzgrupowym szacowaniu wariancji w klasycznej metodzie ANOVA, tzn.:

$$SS_i = \sum_{j=1}^3 \left[(S/N)_{ij} - \overline{(S/N)} \right]^2,$$

gdzie: $\overline{(S/N)} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N (S/N)_{il}$, $N = 9$ – liczba eksperymentów.

Zazwyczaj analizowanie różnych zmiennych procesu według tej metody ma na celu wyznaczenie wartości optymalnych, dla których zakłócenia procesu są najmniejsze [10, 11]. W prezentowanej pracy analiza planu czynnikowego wykorzystana została do oceny stopnia oddziaływania rozważanych zmiennych wejściowych na wybrane cechy geometryczne powierzchni, czyli zmierzenia siły ich wpływu na zmiany geometrii. W podobny sposób badane były cechy geometryczne narzędzia w celu rozpoznania perspektywy prognozowania na tej podstawie jakości powierzchni elementów wykonywanych powtarzalnie.

3. Scenariusz eksperymentu

W pierwszym etapie badań wytypowano parametry operacyjne procesu (czynniki zmiennych niezależnych). Na podstawie cytowanych wcześniej prac, a także w oparciu o wstępne doświadczenia [6], dokonano wyboru dwóch parametrów – czynników sterowalnych, które w największym stopniu mogą wpływać na jakość powierzchni. Czynnikiem oznaczony „Ra” oznacza zakładaną gładkość powierzchni. Parametr ten zadawany jest przed rozpoczęciem obróbki, wskutek czego w cyklu pracy adaptacyjnej zmiennej tej przyporządkowane zostają wartości spośród stopniowanych nastaw generatora elektrodrażarki. Czynnikiem drugi „L_K” to liczba elementów wykonywanych jedną elektrodą, bez zmiany nastaw generatora. Wprowadzono trzy poziomy wartości czynników. Czynniki procesu i przyporządkowane im poziomy wartości przedstawiono w tabeli 1 i tabeli 2.

Tabela 1. Zmienne niezależne wytypowane do badania

Table 1. Input variables selected for experiments

Zmienne wejściowe	Jednostki	Oznaczenie – symbol	Poziomy eksperymentu		
			Poziom 1	Poziom 2	Poziom 3
Chropowatość	[μm]	Ra	4	5,6	6.3
Liczba gniazd	[–]	L_K	1	2	4

Tabela 2. Parametry technologiczne procesu – nastawy generatora

Table 2. EDM process parameters – generator settings

Parametry technologiczne	Jednostki	Oznaczenie – symbol ¹	Poziomy czynnika Ra		
			(1)	(2)	(3)
Amplituda natężenia	[A]	P(A)	9	13	13
Amplituda napięcia	[V]	RF	25,5	25,5	25,5
Czas trwania impulsu	[μs]	A	50	100	100
Czas przerwy impulsu	[μs]	B	20	33	33

Tabela 3. Plan wg metody Taguchi'ego

Table 3. Taguchi experiment plan

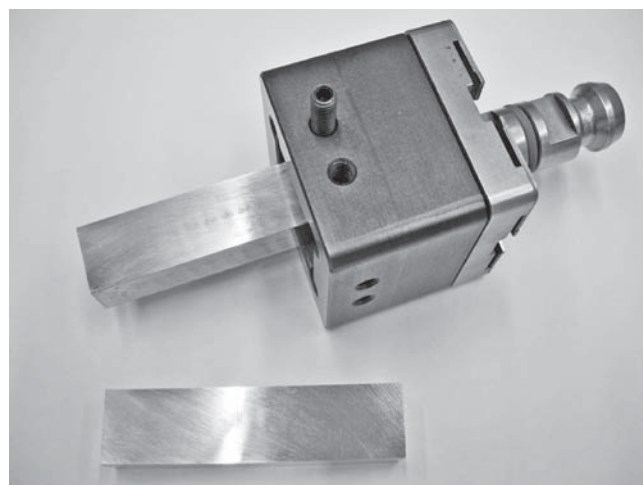
Eksperyment	Ra	L_K
1	0	0
2	0	1
3	0	2
4	1	0
5	1	1
6	1	2
7	2	0
8	2	1
9	2	2

Założono, że będą wykonywane proste wgłębienia o przekroju prostokątnym i wymiarach: 20 mm \times 14 mm, w pełnym materiale (tzw. kieszenie). Drażony kształt odzwierciedla geometrię elektrody. Głębokość drażenia została ustalona dla wszystkich wgłębień jednakowa i miała wynosić 10 mm. Wgłębienia miały być powtarzalnie pozycjonowane na trzech elementach testowych. Położenie wgłębienia w odniesieniu do detalu, jak również kierunek osi wgłębienia, były określane w układzie współrzędnych przedmiotu.

Materiałem obrabianym była stal narzędziowa, zahartowana do 56 HRC. Po przygotowaniu próbek opracowany został proces obróbki elektrodrażenia wgłębego. Do wykonania pełnego cyklu obróbki kolejno trzech kieszeni przeznaczono jedną elektrodę (rys. 2). Elektrody w kształcie prostopadłościanu wykonano z miedzi M1E. Powierzchnie czołowe i boczne były frezowane i dogładzane. Każda elektroda została zmierzona przed rozpoczęciem pracy i po wykonaniu każdego wgłębienia. Wyznaczane były wymiary oraz odchyłki kształtu powierzchni bocznych elektrody.

Po zakończeniu obróbki zmierzone zostały wymiary wgłębień, ich odchyłki kształtu na powierzchni dna i powierzchniach bocznych, oraz dodatkowo chropowatość. Skontrolowano także dokładność pozycjonowania narzędzia względem powierzchni bazowych próbek.

Pomiary wielkości geometrycznych były wykonywane na współrzędnościowej maszynie pomiarowej, wyposażonej w stykową skanującą głowicę pomiarową. Wybrane cechy metrolo-



Rys. 2. Elektroda robocza

Fig. 2. The working electrode

giczne maszyny i jej wyposażenia zamieszczono w tabeli 4. Chropowatość zmierzono przenośnym profilometrem T1000E firmy Hommel Werke.

4. Wyniki

W tabelicy 5 zamieszczono wyniki pomiarów wybranych do analizy cech geometrycznych, tzn. wartości odchyłki płaskości (ER_P) powierzchni czołowej, odchyłki wymiaru długości elektrody roboczej (ER_D) oraz płaskości dna (W_P) i głę-

bokości (W_D) powierzchni kształtowanych, a także wskaźników WRR i MRR. Współczynniki S/N dla zmiennej MRR obliczono według wzoru (2), dla pozostałych zmiennych według wzoru (1). W wartościach współczynników S/N dla czytelności pominięto występujący w wzorze (1) i (2) współczynnik „(-10)”, co nie ma wpływu na wnioskowanie o sile oddziaływania czynników.

Wskaźnik względnego zużycia się elektrod roboczych WRR zdefiniowany jest za pomocą wzoru [12]:

$$WRR = \frac{V_e}{t},$$

gdzie: V_e – objętościowy ubytek elektrody w mm.

Objętościowa wydajność drążenia MRR wyraża się wzorem [12]:

$$MRR = \frac{V_m}{t},$$

gdzie: V_m – objętość wyerodowanego materiału w mm³, t – czas drążenia w minutach.

Objętościowy ubytek elektrody i objętość wyerodowanego materiału była obliczona na podstawie różnicy wymiarów przed i po wykonaniu pojedynczego elementu (kieszeni).

5. Podsumowanie

Tabela 6 zawiera wyniki obliczeń charakteryzujące oddziaływanie czynników Ra i L_K. Oddziaływanie czynników definiuje się jako zmianę reakcji zmiennych wyjściowych przy zmianach poziomu czynnika. Jest to określane jako główny efekt, ponieważ odnosi się do podstawowych badanych czynników [13]. Miarą wielkości efektu jest średnia arytmetyczna współczynników S/N obliczonych dla wybranego poziomu wyodrębnionego czynnika [8]. Jeśli przy zmianach poziomu jednego czynnika zmiany czynnika wynikowego zależą od poziomu innego czynnika wejściowego, to między tymi czynnikami zachodzi interakcja. W ostatniej kolumnie tabeli 6 zamieszczono wykresy przedstawiające efekty główne czynników wejściowych.

Wyniki analizy zestawione w tabeli 7 pokazują oszacowany procentowo wpływ każdego z rozważanych czynników oddzielnie i interakcję obydwu, na analizowane wskaźniki.

Tabela 4. Charakterystyka przyrządów pomiarowych

Table 4. CMM characteristics

Współrzędnościowa Maszyna Pomiarowa Global Silver Performance	
Producent	DEA – HEXAGON METROLOGY SA
Charakterystyka metrologiczna maszyny pomiarowej	
Zakres pomiarowy	500 mm × 700 mm × 500 mm
MPE _E	1,5+L/333 μm
Rozdzielczość	1 μm
Oprogramowanie	PCDMIS – WILCOX INC.
Konfiguracja głowicy	
Producent	TESA TECHNOLOGY
Głowica obrotowa zmotoryzowana	TESASTAR–SM
Producent	LEITZ–HEXAGON METROLOGY SA
Typ sondy skanujące	LSP–X1
Rozdzielczość	0,1 μm

Tabela 5. Wyniki pomiarów elektrody, kieszeni i współczynników S/N wg planu ortogonalnego Taguchi’ego

Table 5. The results of measurements of electrode, pockets and S/N ratios according to Taguchi’s orthogonal plan

Eksp.	ER_P [mm]	S/N (smaller)	ER_D [mm]	S/N (smaller)	WRR [cm ³ /min]	S/N (smaller)	W_P [mm]	S/N (smaller)	W_D [mm]	S/N (smaller)	MRR [cm ³ /min]	S/N (larger)
1	0,020	-3,398	-0,176	-1,509	0,2328	-1,266	0,023	-3,276	-0,146	-1,671	0,197	-1,411
2	0,024	-3,240	-0,333	-0,955	0,2076	-1,367	0,032	-2,989	-0,272	-1,131	0,171	-1,534
3	0,024	-3,240	-0,492	-0,616	0,2134	-1,342	0,035	-2,912	-0,464	-0,667	0,278	-1,111
4	0,039	-2,818	-0,138	-1,720	0,4058	-0,783	0,051	-2,585	-0,062	-2,415	0,183	-1,475
5	0,061	-2,429	-0,260	-1,170	0,3587	-0,891	0,077	-2,227	-0,180	-1,489	0,354	-0,901
6	0,080	-2,194	-0,367	-0,871	0,3255	-0,975	0,100	-2,000	-0,298	-1,052	0,368	-0,868
7	0,039	-2,818	-0,120	-1,841	0,3529	-0,941	0,066	-2,361	-0,043	-2,733	0,127	-1,792
8	0,061	-2,429	-0,253	-1,193	0,3911	-0,815	0,097	-2,026	-0,164	-1,570	0,372	-0,859
9	0,080	-2,194	-0,372	-0,859	0,3498	-0,912	0,090	-2,092	-0,272	-1,130	0,326	-0,974

Tabela 6. Wpływ czynników Ra i L_K, oraz ich współdziałania na parametry ER_P, W_P, ER_D, W_D, WRR, MRR

Table 6. Effect of Ra and L_K factors, and their interaction on parameters ER_P, W_P, ER_D, W_D, WRR, MRR

Czynniki	Ra	L_K	Ra&L_K	Efekt główny czynnika L_K i Ra
Zmienna	ER_P			
Poziom 1	-3,293	-3,011	-3,103	
Poziom 2	-2,480	-2,699	-2,622	
Poziom 3	-2,480	-2,699	-2,622	
Max-Min	0,813	0,312	0,481	
SS	0,441	0,073	0,157	
Ranga	1	3	2	
Zmienna	W_P			
Poziom 1	-3,059	-2,741	-2,824	
Poziom 2	-2,271	-2,414	-2,365	
Poziom 3	-2,160	-2,335	-2,278	
Max-Min	0,899	0,406	0,546	
SS	0,4849	0,0927	0,1723	
Ranga	1	3	2	
Zmienna	ER_D			
Poziom 1	-1,026	-1,690	-1,328	
Poziom 2	-1,254	-1,106	-1,182	
Poziom 3	-1,298	-0,782	-1,384	
Max-Min	0,272	0,575	0,202	
SS	0,043	0,203	0,055	
Ranga	3	1	2	
Zmienna	W_D			
Poziom 1	-1,156	-2,273	-1,723	
Poziom 2	-1,652	-1,396	-1,531	
Poziom 3	-1,811	-0,950	-1,430	
Max-Min	0,655	1,323	0,293	
SS	0,233	0,907	0,094	
Ranga	2	1	3	
Zmienna	WRR			
Poziom 1	-1,3247	-0,9967	-1,1396	
Poziom 2	-0,8829	-1,0241	-0,9661	
Poziom 3	-0,8895	-1,0763	-0,997	
Max-Min	0,4418	0,0796	0,1735	
SS	0,1263	0,0033	0,0171	
Ranga	1	3	2	
Zmienna	MRR			
Poziom 1	-1,352	-1,559	-1,465	
Poziom 2	-1,081	-1,098	-1,879	
Poziom 3	-1,203	-0,984	-1,868	
Max-Min	0,149	0,575	0,403	
SS	0,034	0,1854	0,9329	
Ranga	3	2	1	

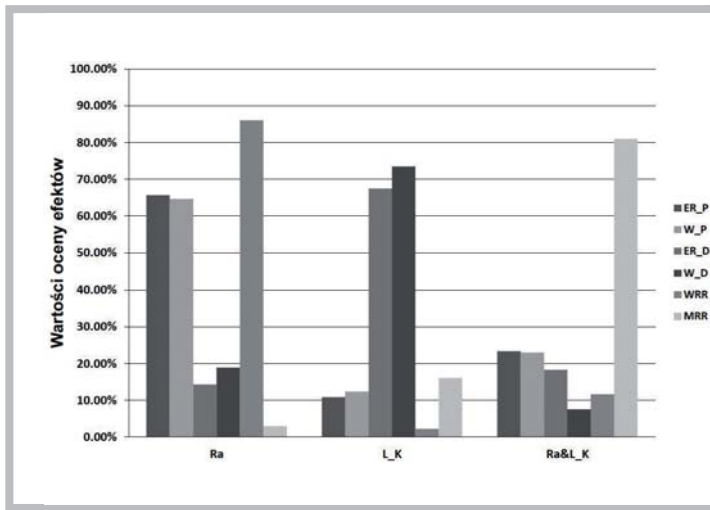


Tabela 7. Wpływ czynników wejściowych na geometrię elektrody
Table 7. An impact of input factors on electrode geometry

Zmienne wyjściowe	Ra	L_K	Ra&L_K
	[%]		
ER_P	65,70	10,88	23,39
W_P	64,66	12,36	22,97
ER_D	18,28	67,48	14,29
W_D	18,91	73,49	7,59
WRR	86,06	2,25	11,65
MRR	2,95	16,08	80,96

Łączny wpływ parametrów procesu (wyszczególnionych w tabeli 1), określonych w planie jako rodzaj „zespołowego” predyktora Ra, jest dominujący w przypadku powstawania odchyłek geometrycznych – w artykule reprezentowanych za pomocą odchyłki płaskości – i wyniósł ok. 65% dla elektrody i dla wyrobu, a także rzutuje w dużym stopniu na nierównomierność zużywania elektrody (86%).

Wielkość odchyłek wymiarowych zależy w większym stopniu niż odchyłki geometryczne od zakresu obróbki (liczba wykonanych elementów), osiągając dla wyrobu wartość 73,49%, podczas gdy udział czynnika Ra nie przekroczył 20%. Łączne oddziaływanie obydwu czynników jest natomiast znaczące w przypadku szybkości usuwania materiału.

Zaobserwowano dużą zgodność wyników analizy odpowiadających sobie cech narzędzia i kształtowanych nim powierzchni.

Wartości współczynników korelacji między zmiennymi (dla $p < 0,05$, p – poziom istotności), obliczone w pakiecie Statistica 13.1 (rys. 3), można uznać za szacunkowe, ponieważ opierają się na nikłych przesłankach z uwagi na małe liczne próby.

Korelacje (Taguchi_3) Oznaczone współczynniki korelacji są istotne z $p < 0,050$ N = 9		
	W_P	W_D
ER_P	0,94820	-0,03472
ER_D	-0,07966	0,98297

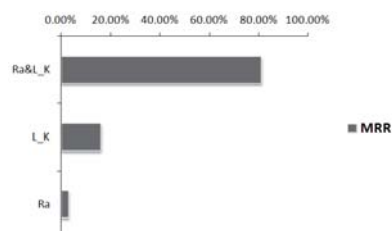
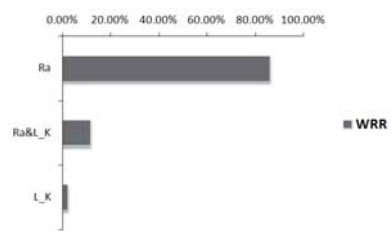
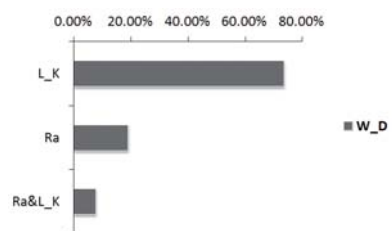
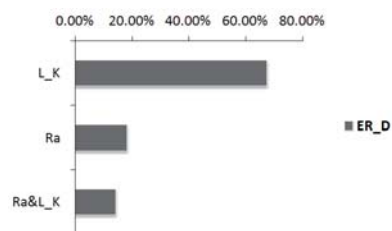
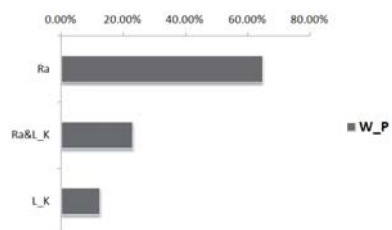
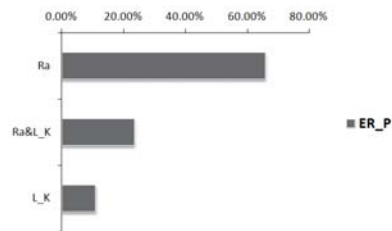
Rys. 3. Współczynniki korelacji między odchyłkami narzędzia i powierzchni

Fig. 3. The correlation coefficients between electrode and surface deviations

6. Wnioski

Decyzja o dopuszczeniu elektrody roboczej do dalszej pracy powinna opierać się na ocenie stanu jej geometrii. Wyniki pomiarów elektrody podczas powtarzalnego kształtowania wyrobów dają obraz jej postępującego zużycia, jednak mimo to może ona nadal dobrze odwzorowywać powierzchnię, jeśli wymagania są niewielkie. Ważną kwestią jest ustalenie, w którym cyklu stan narzędzia będzie wskazywał na konieczność wprowadzenia korekty procesu lub na konieczność regeneracji powierzchni roboczych, ponieważ narzędzie utraciło zdolność wytwarzania elementów w założonej dokładności. Pomocna w diagnostyce może okazać się prezentowana w artykule metoda oraz wnio-

Wykres Pareto



ski z przeprowadzonych już badań. Występowanie zależności między czynnikami wejściowymi a czynnikami wynikowymi jest immanentną cechą procesów, natomiast korzystnym rezultatem badań jest kwantytatywny charakter oceny tej relacji. Dzięki zastosowaniu współczynnika sygnał/szum oraz analizy Pareto Anova otrzymano liczbowe oszacowanie oddziaływania poszczególnych czynników, a także możliwość ich klasyfikacji na podstawie wagi oddziaływania na określony aspekt jakości geometrycznej wyrobu. Informacje te mogą zostać wykorzystane w dalszych pracach ukierunkowanych na stworzeniu odpowiedniej struktury sieci neuronowych lub ich zespołu. Zgromadzone wyniki pomiarów wybranych cech geometrycznych narzędzia i odpowiadających im cech powierzchni kształtowanej tym narzędziem wykazują istotną korelację, co pozwala zakładać możliwość prognozowania jakości powierzchni uzyskanej w gotowych cyklach adaptacyjnych. Umożliwi to wyznaczenie wartości cech geometrycznych wyrobu przy zadanych wartościach czynników, na podstawie cyklicznej inspekcji elektrody.

Bibliografia

- Ruszaj A., Skoczypiec S., *Tendencje rozwojowe wybranych niekonwencjonalnych procesów wytwarzania*, „Mechanik”, R. 88, Nr 4CD, 2015, 1–8.
- PN-EN ISO 1101: 2012, Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out.
- Zagórski K., Kudelski R., Skrzypkowski K., Kapusta M., *Dokładność wymiarowo-kształtowa oraz warstwa wierzchnia elementów wytwarzanych metodą obróbki EDM*, „Logistyka”, Nr 4 CD3, 2015, 9964–9972, ISSN 1231–5478.
- Jemielniak K., *Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawania*, OWPW 2002.
- Mazurkiewicz S., *Czynniki wpływające na jakość wytwarzania technologią elektrodrążenia*, TRANSCOMP – XIV International Conference Computer Systems Aided Science, Industry and Transport, 2013, Nr 6 CD, 2173–2182.
- Nieciąg H., Kudelski R., Zagórski K., *The electrode inspection in integrated manufacturing system*, „Przeгляд Elektrotechniczny”, R. 92, Nr 11, 2016, 1–6, DOI: 10.15199/48.2016.11.01.
- Agie Charmilles Group, Dokumentacja techniczna ROBOFORM 350, 2004.
- Korzyński M., *Metodyka eksperymentu*, WNT, Warszawa 2017.
- Unal R., Dean E., *Taguchi approach to design optimization for quality and cost: an overview*, Conference of the International Society of Parametric Analysts, 1991, 1–9.
- Tomadi S.H., Hassan M.A., Hamedon Z., *Member IAENG*, Daud R., Khalid A.G., *Analysis of the Influence of EDM Parameters on Surface Quality, Material Removal Rate and Electrode Wear of Tungsten Carbide*, International MultiConference of Engineers and Computer Scientists IMECS, 2009, 1808–1803.
- Alagarsamy S.V., Arockia Vincent Sagayaraj S., Raveendran P., *Optimization of drilling process Parameters on Surface Roughness & Material Removal Rate by using Taguchi Method*, „International Journal of Engineering Research and General Science”, Vol. 4, Iss. 2, 2016, 290–298, ISSN 2091–2730,
- Siwczyk M., *Obróbka elektroerozyjna. Podstawy technologiczne*, Kraków 2000.
- Greber T., *Statystyczne Sterowanie Procesami – Doskonalenie Jakości z Pakietem Statistica*, Statsoft, Kraków 2000.

Pareto ANOVA analysis of geometrical features of the products machined during EDM adaptative cycle in the Integrated Manufacturing System

Abstract: Factors influencing the process of EDM shaping of hard-to-machine materials result in increased dimensional inaccuracy, surface roughness, and accelerated tool wear. The article presents an analysis of the dependence of the real deviations of the surfaces of the machined parts that are manufactured in the cyclic process of machining EDM, as well as the deviations of the used tools, from selected factors. The analysis uses the Pareto ANOVA method. Geometry was evaluated on the basis of deviations of the tool and the corresponding deviations of the surface. Measurements were performed in the Integrated Manufacturing System working in the WIMIR AGH Scientific Research Center, on the coordinate measuring machine in inspection mode, after each machining cycle of a single element. The WRR and MRR indicators were also analyzed, characterizing the process efficiency and utility of the tool.

Keywords: coordinate technique, Integrated Manufacturing Systems, electrode inspection

dr inż. Halina Nieciąg

hneciag@agh.edu.pl

Adiunkt w Katedrze Systemów Wytwarzania Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie, wcześniej długoletni pracownik Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie. Studia wyższe ukończyła na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Stopień doktorski uzyskała na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Interesuje się współrzędnościową techniką pomiarową i zagadnieniami oceny wyników pomiarów.



dr inż. Krzysztof Zagórski

zagkrzys@agh.edu.pl

W 2002 r. uzyskał dyplom Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie o specjalności eksploatacja maszyn urządzeń i pojazdów, a w 2010 r. stopień doktora w dyscyplinie budowa maszyn i urządzeń. Obecnie zatrudniony jest na stanowisku adiunkta w Katedrze Systemów Wytwarzania na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Jego główne zainteresowania naukowe to technologia obróbki ubytkowej.



dr inż. Rafał Kudelski

kudelski@agh.edu.pl

Ukończył studia w 2009 r. na Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Obecnie pracuje w Katedrze Systemów Wytwarzania na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie na stanowisku adiunkta. W pracy naukowo-badawczej oraz dydaktycznej zajmuje się programowaniem maszyn CNC, podstawami obróbki skrawaniem oraz niekonwencjonalnymi metodami wytwarzania. W 2017 r. obronił pracę doktorską dotyczącą procesu cięcia wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym.

