



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

## Wycinanie elektroerozyjne – wpływ zjawisk fizycznych na geometrię obrabianych przedmiotów

Wire Electrical Discharge Machining - influence of physical phenomena on the geometry of manufacturing parts

DOROTA ONISZCZUK-ŚWIERCZ  
RAFAŁ ŚWIERCZ\*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.538

Adaptacja obróbki wycinania elektroerozyjnego w kształtowaniu części maszyn i urządzeń wiąże się nieodzownie z zarówno uzyskiwanymi cechami geometrycznymi przedmiotów po obróbce, jak również z racjonalnymi kosztami ich wykonania. Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych była analiza fizyki procesu usuwania materiału i wpływu podstawowych zmiennych definiujących proces obróbki na dokładność geometryczną wycinanych części.

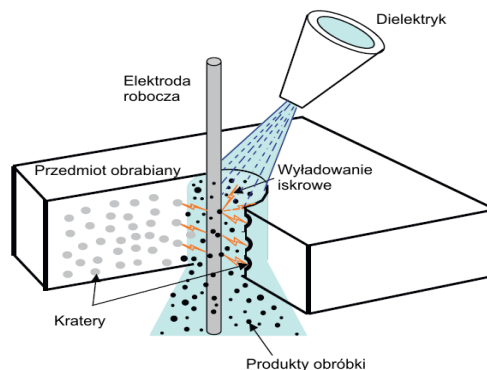
**SŁOWA KLUCZOWE:** WEDM, dokładność wycinania,

*Adaptation of wire electrical discharge machining in the manufacturing parts is connected with the geometric characteristics of the parts and rational costs of their implementation. The aim of this study was to analyze the material removal process and the impact on the basic variables of WEDM on the geometrical accuracy of cut parts.*

**KEYWORDS:** precision manufacturing, shape deviations

W procesie wycinania elektroerozyjnego (WEDM) (rys. 1) materiał usuwany jest z przedmiotu obrabianego w wyniku erozji elektrycznej (wyładowania elektryczne) zachodzącej pomiędzy elektrodą roboczą a materiałem obrabianym. Elektrody izolowane są od siebie przepływającym dielektrykiem, który podawany jest do szczeliny pod pewnym ciśnieniem zarówno z dyszy górnej jak i dolnej. Przepływ cieczy zapewnia odpowiednie warunki wyładowania elektrycznego, jak również odpowiada za odprowadzanie produktów obróbki ze szczeliny międzyelektrodowej. Istotny wpływ na niedokładność wykonania przedmiotu mają pulsacje dielektryka związane z nierównomiernym ciśnieniem jego podawania. W wyniku różnicy ciśnień drut ulega odkształceniu oraz

wprowadzony może być w ruch drgający [8, 11].



Rys. 1. Schemat procesu wycinania elektroerozyjnego WEDM

Adaptacja obróbki wycinania elektroerozyjnego w kształtowaniu części maszyn i urządzeń wiąże się nieodzownie z zarówno uzyskiwanymi cechami geometrycznymi przedmiotów po obróbce, jak również z racjonalnymi kosztami ich wykonania. Stan warstwy wierzchniej wytwarzanych przedmiotów uwarunkowany jest wpływem szeregu zjawisk fizycznych zachodzących podczas obróbki. Naddatek obróbkowy usuwany jest głównie w wyniku topnienia i sublimacji materiału. W wyniku lokalnego oddziaływania pola temperatury kształtowana jest specyficzna dla tego rodzaju obróbki struktura geometryczna powierzchni, która stanowi najbardziej zewnętrzną część warstwy wierzchniej. Jej budowa istotnie wpływa na własności tribologiczne przedmiotów.

Efekty obróbki (tj. stan warstwy wierzchniej, wydajność procesu i dokładność kształtu) uzależnione są od szeregu zjawisk fizycznych wywołanych zarówno parametrami elektrycznymi wyładowania jak i warunkami obróbki.

\* dr inż. Dorota Oniszczyk - Świercz (do@meil.pw.edu.pl),  
dr inż. Rafał Świercz (rsw@meil.pw.edu.pl),

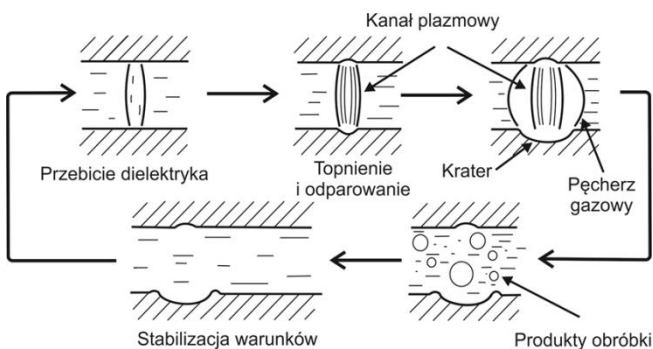
Dokładność wymiarowo – kształtowa jest jedną z najważniejszych użytkowych cech charakteryzujących proces wycinania elektroerozyjnego (WEDM). Przewidywanie korzystnych warunków obróbki dla wymaganego stanu wykończenia powierzchni i dokładności wymiarowej przedmiotu odgrywa bardzo ważną rolę w planowaniu procesu obróbki.

### Cel badań

Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych była analiza fizyki procesu usuwania materiału i wpływu podstawowych zmiennych definiujących proces obróbki na dokładność geometryczną wycinanych części.

### Fizyka usuwania materiału – oddziaływanie na dokładność geometryczną wycinanych części

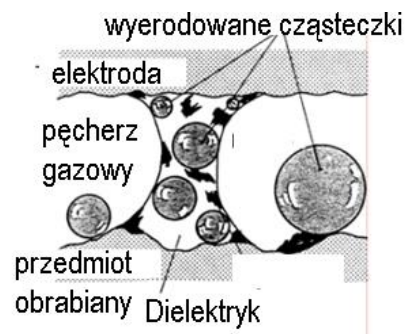
Fizyka zjawiska usuwania materiału w procesie elektroerozji ma złożony charakter. Na skutek przyłożenia napięcia do elektrod następuje jonizacja dielektryka w szczelinie międzyelektrodowej. Natężenie pola elektrycznego jest odwrotnie proporcjonalne do odległości pomiędzy elektrodą roboczą a materiałem obrabianym. Tam, gdzie odległość pomiędzy elektrodami jest najmniejsza następuje obniżenie wytrzymałości elektrycznej ośrodka, czego efektem jest przebiecie elektryczne. Uproszczony model usuwania materiału przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat procesu usuwania materiału w wyniku wyładowania elektrycznego [10]

Po przyłożeniu do elektrod pewnego napięcia zwanego granicznym (i dostatecznego natężenia prądu) następuje przebiecie elektryczne i emisja elektronów z katody. Wyładowanie powoduje powstanie wąskiego, zjonizowanego kanału plazmowego (wypełnionego parami dielektryka i metalu), przez który przepływa prąd. Elektrony „bombardują” powierzchnię przedmiotu obrabianego a jony powierzchnię elektrody roboczej. Elektrony są cząstkami lżejszymi oraz mniejszymi w stosunku do jonów a tym samym szybciej przyspieszają i osiągają większe prędkości w polu elektrycznym. W rezultacie elektrony przenoszą więcej energii do anody niż dodatnio naładowane jony do katody. W kanale zjonizowanym ruch elektronów jest dominujący i nie zmienia się w zależności od długości czasu impulsu. Następuje lokalny wzrost temperatury (rzędu 8 000 – 12 000 °C), czego skutkiem jest topnienie i odparowanie materiału [4, 5, 7]. Wokół kanału plazmowego tworzy się pęcherz gazowy (wypełniony jonami i parami roztopionego materiału obrabianego i elektrod) o powiększającej się średnicy w czasie. W wyniku oddziaływania gwałtownych lokalnych procesów cieplnych następuje dysocjacja dielektryka i wydzielenia pęcherzy gazowych. Po zakończeniu cyklu wyładowania następuje implozyjne zamknięcie kanału plazmowego wraz z otaczającym go pęcherzem gazowym i wyrzucenie produktów obróbki (zastygłych cząsteczek wyerodowanego materiału) do szczeliny międzyelektrodowej. Następuje proces stabilizacji, w którym produktu obrób-

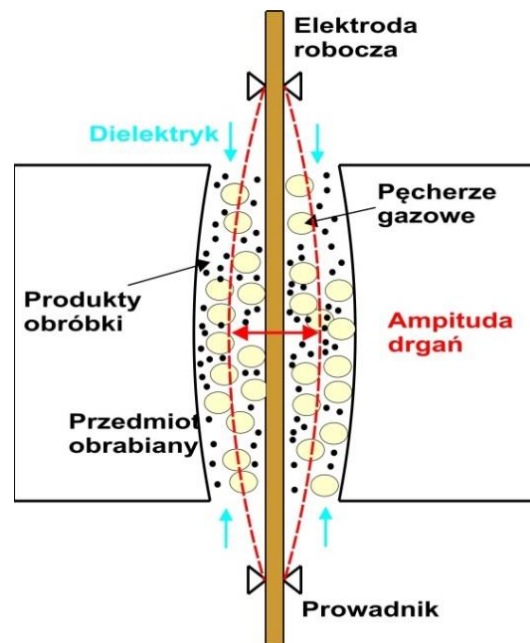
ki i pęcherze gazowe odprowadzane są wraz z przepływającym dielektrykiem ze szczeliny międzyelektrodowej [9, 10].



Rys. 3. Produkty obróbki powstałe w wyniku erozji elektrycznej w szczelinie międzyelektrodowej [10]

Przedstawiona powyżej fizyka usuwania materiału (rys. 3) wpływa istotnie na dokładność geometryczną wycinanych elementów. Ciśnienie powstałe w wyniku implozyjnego usuwania materiału i dielektryka oddziałuje na elektrodę roboczą w przeciwnym kierunku w stosunku do wyładowań elektrycznych powodując jej ugięcie [1 – 3, 6].

W trakcie wycinania elektroerozyjnego pomiędzy przedmiotem obrabianym a powierzchnią elektrody dochodzi do tysięcy jednoczesnych wyładowań elektrycznych na całej wysokości wycinanego elementu. Powodując tym samym wypełnienie szczeliny produktami erozji elektrycznej (zastygłe mikrocząsteczki wyerodowanego materiału, pęcherze gazowe). Produkty te usuwane są ze szczeliny wraz z przepływającym dielektrykiem. Lokalna ich koncentracja powoduje zmianę właściwości ośrodka. Wyerodowany materiał i powstałe w wyniku dysocjacji wody cząsteczki gazowe zwiększają liczbę wyładowań elektrycznych (obniżenie oporności dielektryka), czego skutkiem jest większe rozbiecie szczeliny oraz wklęsłość powierzchni. Nierównomierny rozkład wyładowań elektrycznych na elektrodzie roboczej powoduje jej drgania o pewnej amplitudzie przyczyniające się do zwiększenia błędów kształtu (rys. 4). Amplituda drgań „odwzorowana” jest w przedmiocie obrabianym.



Rys. 4. Rozkład produktów w szczelinie międzyelektrodowej

Parametry procesu obróbki takie jak napięcie wyładowania, natężenie prądu, czas impulsu, czas przerwy, naciąg drutu, prędkość przewijania elektrody, ciśnienie podawanej dielektryka wpływają bezpośrednio na skutki jakościowe obróbki w tym generowanie błędów kształtu. Dotychczasowe badania własne autorów wykazują możliwość ograniczenia uzyskiwanych odchyłek kształtu odpowiednio sterując wartościami wyżej wymienionych parametrów obróbki. Badania te wykazują również, podobnie jak zalecenia producentów obrabiarek konieczność podziału procesu obróbkowego na kilka etapów: cięcia zgrubnego, wykańczającego i wygładzającego. Dobór odpowiednich naddatków oraz parametrów obróbki dla cięcia wykańczającego pozwala na istotne ograniczenie powstałych po cięciu zgrubnym odchyłek płaskości.

### Przedmiot badań

Wycinaniu elektroerozyjnemu poddano próbki ze stali narzędziowej wysokostopowej 1.2379 (NC 11 LV).

### Urządzenia technologiczne i aparatura badawcza

Badania doświadczalne procesu wycinania elektroerozyjnego przeprowadzono na wycinarce Mitsubishi MV 2400S. Jest najnowsza obrabiarka Mitsubishi wyposażona w zaawansowany system adaptacyjnej kontroli wyładowań elektrycznych.

Analiza dokładności wymiarowo kształtowej wyciętych elementów prowadzona była na współrzędnościowej maszynie pomiarowej CNC Zeiss-Vista. Maszyna charakteryzuje się niepewnością pomiarową równą  $2,4 \mu\text{m} + L/300$ . Współrzędnościowa maszyna pomiarowa Vista wyposażona była w głowicę elektrostykową firmy Renishaw. W oprogramowaniu Calypso, wyznaczono ścieżki pomiarowe (raster 300 punktów). Każdy cykl pomiarów na współrzędnościowej maszynie poprzedzony był kalibracją końcówki głowicy pomiarowej.

### Badania doświadczalne - metodyka badawcza

Badania doświadczalne realizowane były według eksperymentu planowanego trzypoziomowego trzyczynnikowego (plan statyczny, zdeterminowany). Na podstawie badań wstępnych stwierdzono, iż badania prowadzone będą przy wyłącznej technologii sterowania adaptacyjnego. Wyłączenie sterowania adaptacyjnego umożliwia płynną zmianę parametrów energetycznych obróbki, co w przypadku badań realizowanych zgodnie z metodyką eksperymentów planowanych jest niezmiernie ważne, gdyż pozwala na określenie wpływu badanych zmiennych niezależnych (parametrów obróbki) na oczekiwane skutki jakościowe procesu (błędy kształtu, chropowatość powierzchni).

Zakresy użytkowe przyjętych parametrów wejściowych realizowanych w planowanym eksperymencie dobierano na podstawie przeprowadzonej analizy tablic technologicznych dla: przyjętego rodzaju materiału o wysokości cięcia 200 mm, 250 mm, 300 mm, obróbki zgrubnej wraz z przejściami wykańczającymi. 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.

Przyjęto następujące badane zmienne niezależne (parametry obróbki i warunki obróbki):

- wysokość materiału ciętego  $H$ ,

- średnia wartość napięcia w szczelinie międzyelektrodowej  $VG$  - powoduje zmianę prędkości cięcia, ustala odległość pomiędzy elektrodą roboczą a przedmiotem obrabianym, przy której następuje wyładowanie elektryczne,
- czas przerwy między impulsami  $SB$  (zmiana czasu przerwy - powoduje zmianę prędkości cięcia).

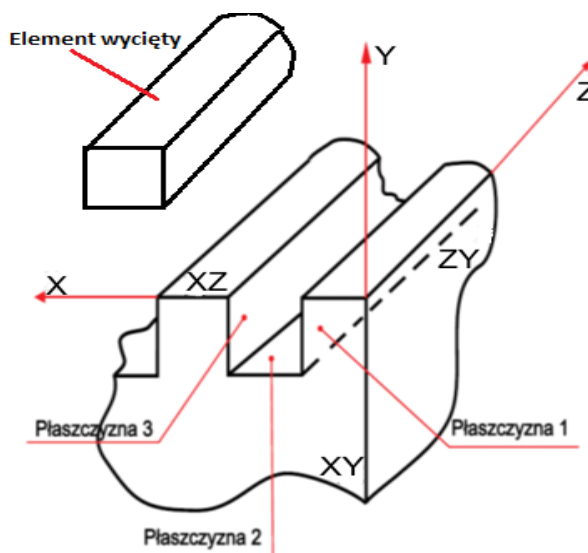
Parametry wyjściowe:

- wartość odchyłki płaskości.

Badanie wpływu czynników wejściowych na trzech równoległych poziomach zmienności pozwoli na wyznaczenie równań regresji o wysokim stopniu korelacji i małym rozrzucie wartości.

Zgodnie z metodyką prowadzenia badań doświadczalnych opartych na teorii eksperymentów planowanych wycięto próbki prostokątne ze stali NC 11 LV (obrobionej cieplnie do twardości 62 HRC) o wymiarach: 10 x 12 x 200 mm, 10 x 12 x 250 mm, 10 x 12 x 300 mm.

Do obróbki zastosowano elektrodę roboczą w postaci drutu mosiężnego o średnicy 0,25 mm. Obróbka odbywała się w zanurzeniu, dodatkowo dielektryk podawany był do szczeliny międzyelektrodowej zarówno z dyszy górnej i dolnej. Trajektoria ruchu narzędzia przebiegała w następującym kierunku: płaszczyzna 1: oś (-) Y, płaszczyzna 2: oś (+) X, płaszczyzna 3: oś (+) Y (rys. 5).



Rys. 5. Schemat wycinania próbek: oznaczenie poszczególnych wycinanych płaszczyzn

Ze względu na wdrożeniowy charakter prowadzonych badań doświadczalnych ważne jest, aby zaproponowane parametry i warunki obróbki możliwe były do ustawienia na badanej obrabiarce. W przeprowadzonych badaniach doświadczalnych zdecydowano na podział obróbki uwzględniający zarówno przejścia zgrubne jak i wykańczające.

W ramach planowanego eksperymentu przeprowadzono obróbkę dla następujących wartości parametrów:

- średnia wartość napięcia wyładowania w szczelinie międzyelektrodowej  $VG$  zmieniana w przedziale dla 1 i 2 przejścia wykańczającego: 42 - 48 V,
- czasu przerwy między impulsami (stabilizator  $SB$ ) w przedziale 1 i 2 przejścia wykańczającego: 9 - 11  $\mu\text{s}$ ,
- wysokość materiału ciętego w przedziale od: 200 - 300 mm.



Poszczególne wartości zmiennych niezależnych zawartych w planowanym eksperymencie przedstawiono w tabeli 1. Na rysunku 6 przedstawiono wycięte profile dla poszczególnych prób.

Tabela 1. Wartości zmiennych niezależnych zawartych w planowanym eksperymencie

Nr próby	Plan eksperymentu					
	VG		SB		H	
	VG	SB	VG	SB	VG	SB
1.	-1	42	-1	9	-1	200
2.	0	45	1	11	-1	200
3.	1	48	0	10	-1	200
4.	-1	42	1	11	0	250
5.	0	45	0	10	0	250
6.	1	48	-1	9	0	250
7.	-1	42	0	10	1	300
8.	0	45	-1	9	1	300
9.	1	48	1	11	1	300



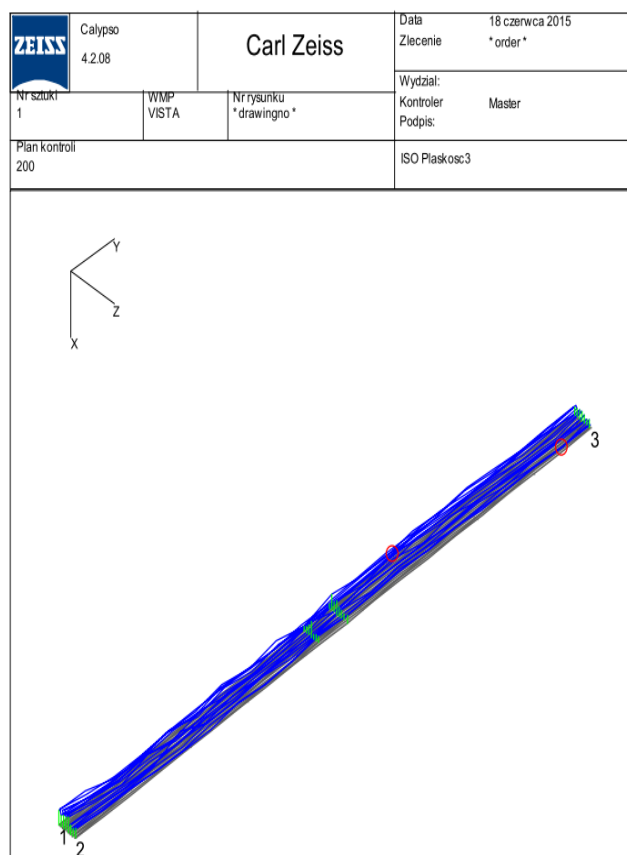
Rys. 6. Wycięte profile o różnej wysokości

### Wynik 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. W tabeli 2 przedstawiono wyniki z przeprowadzonych pomiarów wraz z zastosowanymi parametrami podczas obróbki. Przykładowy raport z przeprowadzonych pomiarów przedstawiono na rysunku 7.

Tabela. 2. Wyniki badań doświadczalnych

Lp.	Parametry i warunki obróbki						Średnia wartość odchyłki płaskości	
	H [mm]	cięcie zębne		1 cięcie wykańczające		2 cięcie wykańczające		
		VG [V]	SB [μs]	VG [V]	SB [μs]	VG [V]		SB [μs]
1	200	42	9	42	9	42	9	0,023
2	200	42	9	45	11	45	11	0,007
3	200	42	9	48	10	48	10	0,013
4	250	42	9	42	11	42	11	0,012
5	250	42	9	45	10	45	10	0,011
6	250	42	9	48	9	48	9	0,014
7	300	42	9	42	10	42	10	0,019
8	300	42	9	45	9	45	9	0,019
9	300	42	9	48	11	48	11	0,016



Rys. 7. Wygenerowany raport z przeprowadzonych pomiarów na WMP – pomiar próbki wysokość 200 mm, odchyłka płaskości 8 μm

Na podstawie otrzymanych wyników badań w programie STATISTICA utworzono statystyczny model matematyczny, opisujący wpływ czynników wejściowych na wartość odchyłki płaskości. Po przeprowadzeniu analizy otrzymanych modeli stwierdzono, iż najlepsze dopasowanie równania regresji do wyników otrzymanych w badaniach doświadczalnych uzyskano dla funkcji wielomianowej.

$$Y_n = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_1^2 + a_5 x_2^2 + a_6 x_3^2 + a_7 x_1 x_2 + a_8 x_1 x_3 + a_9 x_2 x_3$$

gdzie:

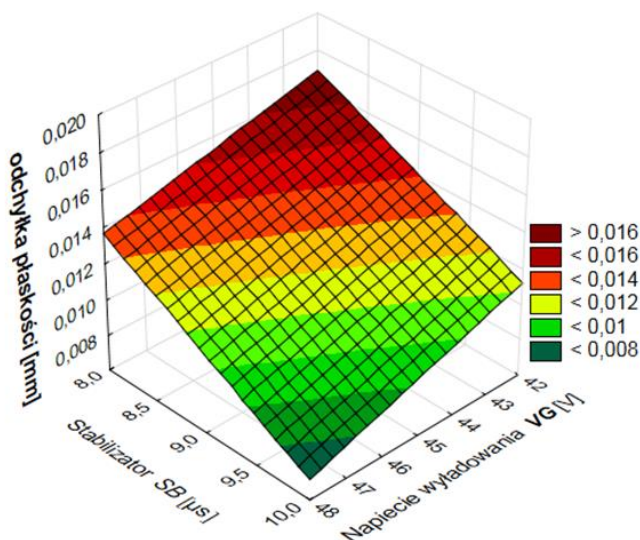
- $Y_n$  – wielkość wyjściowa procesu dla modelu wielomianowego,
- $a_0$  – wartość stała w równaniu regresji,
- $x_1, x_2, \dots$  – zmienne wejściowe,
- $a_1, \dots, a_9$  – współczynniki regresji.

Obliczenia współczynnika korelacji wielorakiej  $R$  jak również wartości testowej współczynnika Fishera – Snedecora, (dla określonych liczby stopni swobody) oraz wartości testowe i krytyczne testu  $t$  – Studenta dla przyjętego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  wyznaczone zostały w programie STATISTICA. Wartość krytyczną testu Fishera – Snedecora  $F_{kr}$  odczytano z tablic statystycznych.

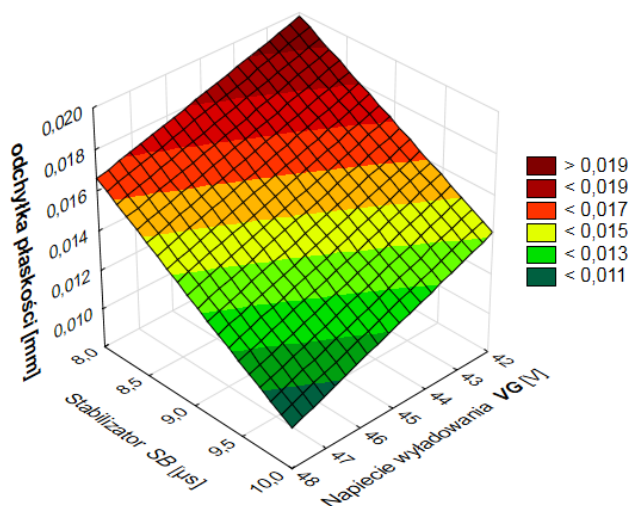
W tabeli 3 przedstawiono wyznaczoną funkcję regresji dla średniej odchyłki płaskości wycinanych próbek. Uzyskane równanie charakteryzuje się wysokim stopniem korelacji  $R$ , a stosunek  $F/F_{kr}$  jest znacząco większy od jedności. Graficzna prezentacja uzyskanej zależności przedstawiona jest na rysunkach 8 - 10.

Tabela 3. Równanie regresji dla średniej wartości odchyłki płaskości

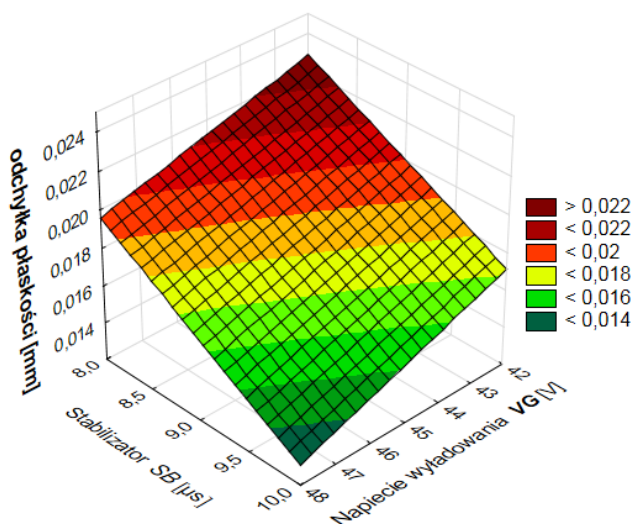
Równanie regresji	$R$	$F/F_{kr}$
$W = 0,143 - 0,000068 \cdot VG \cdot SB + 0,00000177 \cdot H^2 - 0,000854 \cdot H$	0,87	5,2



Rys. 8. Zależność odchyłki płaskości po WEDM od średniej wartości napięcia wyładowania VG i wartości czasu przerwy między kolejnymi impulsami SB dla wysokości cięcia 200 mm



Rys. 9. Zależność odchyłki płaskości po WEDM od średniej wartości napięcia wyładowania VG i wartości czasu przerwy między kolejnymi impulsami SB dla wysokości cięcia 250 mm



Rys. 10. Zależność odchyłki płaskości po WEDM od średniej wartości napięcia wyładowania VG i wartości czasu przerwy między kolejnymi impulsami SB dla wysokości cięcia 300 mm

### Analiza wyników

Odchyłka płaskości powierzchni po wycianiu elektroerozyjnym uzależniona jest w głównej mierze od średniej wartości napięcia wyładowania VG i wartości czasu przerwy między kolejnymi impulsami (przy ustalonych pozostałych parametrach i warunkach obróbki). Obserwacje wygenerowanych raportów z pomiarów odchyłki płaskości na WMP wykazują, iż maksymalna wartość odchyłki dla analizowanych przypadków znajduje się w środkowej części powierzchni wycinanych próbek.

Analiza powyższych wykresów wykazuje, iż istnieje liniowa zależność pomiędzy uzyskaną odchyłką płaskości (dla analizowanej wysokości cięcia) a parametrami: średnią wartością napięcia wyładowania VG i wartością czasu przerwy między kolejnymi impulsami SB. Zwiększenie czasu przerwy SB dla pierwszego i drugiego przejścia wykańczającego w połączeniu ze zwiększeniem wartości napięcia VG, przy której następuje inicjacja wyładowań powoduje istotne zmniejszenie odchyłek kształtu powstałych podczas

cięcia zgrubnego. Wzrost czasu przerwy powoduje obniżenie linowej prędkości posuwu elektrody roboczej. Wzrost napięcia wyładowania VG powoduje powstanie inicjacji wyładowań w większej odległości elektrody od przedmiotu. Dla zaobserwowanych błędów kształtu (w pierwszym etapie) wyładowania elektryczne powstaną dla najmniejszej wartości szczeliny międzyelektrodowej (pomiędzy maksymalną wartością odchyłki kształtu pozostałej po cięciu zgrubnym a powierzchnią elektrody) powodując tym samym zwiększenie ilości erodowanego materiału w tym miejscu.

Dla analizowanego przypadku najkorzystniejszymi parametrami obróbki jest

- średnia wartość napięcia wyładowania  $VG = 48 \text{ V}$ ,
- wartość stabilizatora czasu przerwy między kolejnymi impulsami  $SB = 10 \mu\text{s}$ .

Przy zwiększonej wartości napięcia w połączeniu ze zwiększonym czasem przerwy możliwe jest, zatem zminimalizowanie błędów kształtu.

### Podsumowanie

Przeprowadzona analiza fizyki usuwania materiału wskazała potencjalne źródła błędów kształtu generowanych podczas wycinania elektroerozyjnego.

Przeprowadzone badania doświadczalne wskazują, iż poprzez odpowiedni dobór warunków obróbki możliwe jest w istotny sposób ograniczenie odchyłki kształtu wycinanych elementów.

### Literatura

- [1] Banerjee S., Prasad B. V. S. S.: Numerical evaluation of transient thermal loads on a WEDM wire electrode under spatially random multiple discharge conditions with and without clustering of sparks, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 48, Issues 5 – 8, pp.: 571 – 580, 2010.
- [2] Banerjee S., Prasad B.V.S.S.S., Mishra P.K.: A simple model to estimate the thermal loads on an EDM wire electrode, *Journal of Materials Processing Technology Volume 39, Issues 3 – 4*, pp. 305 – 317, 1993.
- [3] Hada K., Kunieda M.: Analysis of wire impedance in wire-EDM considering electromagnetic fields generated around wire electrode, *Procedia CIRP 6*, pp.: 245 – 250, ISEM 2013.
- [4] Han F., Jiang J., Yu D.: Influence of discharge current on machined surfaces by thermo-analysis in finish cut of WEDM, *International Journal of Machine Tools and Manufacture Vol. 47, Issue 7 – 8*, pp.: 1187 – 1196, 2007.
- [5] Hascalyk A., Čalydas U.: Experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148, pp.: 362 – 367, 2004.
- [6] Herrero A., Uriarte L., Azcarate S., Sanchez J. A.: Error analysis of thin wire EDM corner machining, pp.: 122 – 126, ISEM, 2007.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Izquierdo B., Sanchez, J. A., Plaza S., Pombo I., Ortega N.: A numerical model of the EDM process considering the effect of multiple discharges, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, pp.: 220 – 229, 2009.
- [10] 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.
- [11] Liang J. F., Tsai C. F., Lin M. H., Liao Y. S.: Measurement of wire deflection in wire - cut EDM machining, pp.: 223 – 226, ISEM 2010.