

Dokładność obróbki w procesie wycinania elektroerozyjnego elektrodami o różnych średnicach

The accuracy of machining during electro-discharge cutting process using different-diameter electrodes

JAN BUREK
ROBERT BABIARZ
JAROSŁAW BUK
MARCIN PŁODZIEN
PAWEŁ SUŁKOWICZ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.11.162>

English version available on: www.mechanik.media.pl

Przedstawiono badania dokładności obróbki elektroerozyjnej WEDM (*wire electrical discharge machining*). Wykorzystano elektrody o różnych średnicach, którymi wycinano profil zamka łopaty silnika lotniczego wykonanego z żarowytrzymałego stopu Inconel 718.

SŁOWA KLUCZOWE: WEDM, odchyłka kształtu, chropowatość powierzchni, wydajność obróbki

The WEDM (wire electrical discharge machining) accuracy tests were performed. Electrodes of different diameters were used to cut the blade lock profile of an aircraft engine made from the heat-resistant alloy Inconel 718.

KEYWORDS: WEDM, profile deviation, surface roughness, machining efficiency

W procesie WEDM wydajność, dokładność wymiarowo-kształtowa i chropowatość obrabianych powierzchni zależą głównie od parametrów obróbkowych oraz średnicy elektrody mającej postać drutu [1]. Pomimo trudności z optymalizacją tej metody obróbki, a także możliwości występowania mikropęknięć jest ona nadal rozwijana i udoskonalana.

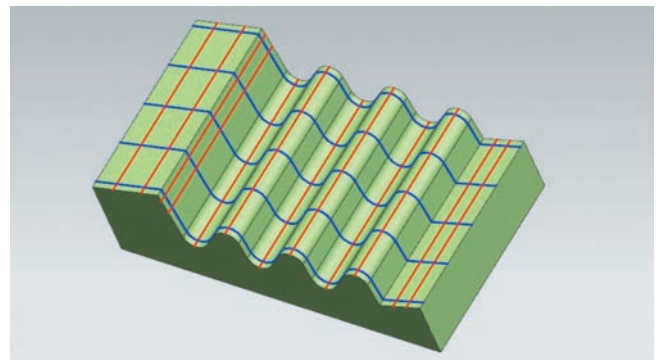
Podstawową zaletą, która decyduje o rozwoju WEDM, jest możliwość obróbki materiałów trudnoskrawalnych, co jest szczególnie przydatne w branży lotniczej [2]. W branży tej stosuje się bowiem materiały o wysokiej wytrzymałości i żaroodporności, takie jak trudno skrawalny stop na bazie niklu – Inconel 718. Zwykle obróbka wiórowa lub ścierna tego stopu wymaga usunięcia znacznej objętości materiału i wiąże się m.in. z przyspieszonym zużyciem narzędzi. Dlatego poszukuje się alternatywnych metod obróbki [3÷7], jedną z nich jest właśnie WEDM.

Celem badań było porównanie dokładności wycinania elektroerozyjnego profilu zamka łopaty o złożonym kształcie, wykonanego ze stopu Inconel 718, elektrodami drutowymi o różnej średnicy. W tym celu przeprowadzono próby wycinania zgrubnego oraz wykończeniowego profilu zamka łopaty elektrodami drutowymi o dwóch wybranych średnicach. Następnie przeprowadzono pomiary odchyłek kształtu i chropowatości powierzchni.

Warunki badań

Narzędziem była elektroda z drutu mosiężnego. Z grupy powszechnie używanych elektrod wybrano elektrody o średnicach $\varnothing 0,15$ mm oraz $\varnothing 0,25$ mm.

Próbki miały formę jednej strony profilu zamka jodełkowego (rys. 1). Szerokość zamka wynosiła 30 mm.



Rys. 1. Przedmiot obrabiany z oznaczoną siatką pomiarową

Dla elektrody drutowej o średnicy $\varnothing 0,15$ mm wykonano 6 próbek, a dla elektrody drutowej o średnicy $\varnothing 0,25$ mm wykonano 5 próbek (zgodnie z technologią obróbki stali [8]) ze zmienną liczbą przejść wykończeniowych (tabl. I).

TABLICA I. Parametry obróbki

Nr próbki	1		2		3	
Średnica drutu, mm	0,15	0,25	0,15	0,25	0,15	0,25
U_{c} , V	46	43	55	57	62	51
I_{c} , A	105	170	84	179	82	180
t_{off} , μ s	14	24	20	14	37	18
F_n , N	9	15	10,5	19	10,5	19
f , mm/min	1,1	2,5	4	4,8	3	3,3
Q_v , l/min	~ 9,4	≥ 10	~ 1,4		~ 1,4	
Nr próbki	4		5		6	
Średnica drutu, mm	0,15	0,25	0,15	0,25	0,15	0,25
U_{c} , V	69	115	65	75	66	–
I_{c} , A	15	120	38	115	19	–
t_{off} , μ s	6	3	4	2,8	1,2	–
F_n , N	10,5	21	10,5	21	10,5	–
f , mm/min	4	4,8	2	4,3	3,6	–
Q_v , l/min	~ 1,4		~ 1,4		~ 1,4	

Legenda: U_c – średnia wartość napięcia wyładowania, I_c – wartość pikowego prądu podczas wyładowania, t_{off} – czas przerwy, F_n – siła naciągu drutu, f – posuw, Q_v – wydatek objętościowy dielektryka

* Dr hab. inż. Jan Burek prof. PRz (jburek@prz.edu.pl), dr inż. Robert Babiarz (robertb@prz.edu.pl), mgr inż. Jarosław Buk (jbuk@prz.edu.pl), dr inż. Marcin Płodzień (plodziem@prz.edu.pl), mgr inż. Paweł Sułkowicz (sulkowicz@prz.edu.pl) – Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji Politechniki Rzeszowskiej

Pierwszą próbkę wykonano zgrubnie w jednym przejściu. Obróbkę kolejnych próbek rozszerzano o dodatkowe przejście wykończeniowe. W tabl. I przedstawiono parametry ostatniego przejścia elektrody dla każdej próbki. Ze względu na brak wytycznych dla obróbki WEDM stopu Inconel 718 wykorzystano zestawy parametrów stosowane w obróbce stali [8].

Obróbkę przeprowadzono na wycinarce elektroerozyjnej Mitsubishi FA10S. W skład stanowiska do rejestracji przebiegów prądowych i napięciowych wchodziły: sonda prądowa Hioki CT6843, sonda napięciowa Rigol RP1300H oraz oscyloskop Rigol DS1074Z. Proces wycinania wykonywano z wyłączonym sterowaniem Adaptive Control oraz sterowaniem zapobiegającym zerwaniu drutu PM, w zanurzeniu w dielektryku, który stanowiła woda demineralizowana. Błąd pozycjonowania obrabiarki wynosił 1 μm .

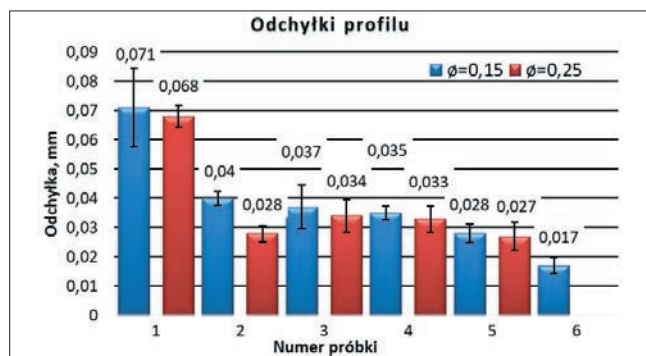
Wyniki pomiarów

Przebiegi napięciowo-prądowe charakteryzowały się licznymi wyładowaniami łukowymi i przeciwzwarciowymi. Wynikało to m.in. ze znacznej ilości produktów obróbki, które obniżają oporność dielektryka i destabilizują warunki obróbki w szczelinie roboczej [9]. Jest to charakterystyczne zjawisko podczas wycinania elektroerozyjnego stopu Inconel 718. Dodatkowo wpływ na przebiegi miały konieczność wyłączenia sterowania adaptacyjnego, wynikająca z obróbki elektrodą o średnicy mniejszej niż 2 mm, oraz krótkie czasy przerwy t_{off} , które mogły powodować niecałkowitą dejonizację kanału plazmowego, co prowadziło do ponownego wyładowania w tym samym miejscu.

Pomiary odchyłek profilu zamka łopatki wykonano na konturowym Mahr XC20. Na rys. 1 przedstawiono siatkę pomiarową. Kolorem niebieskim oznaczono profil zamka. Pomiary wykonano 5-krotnie, w równych odległościach na całej szerokości zamka. Druga ścieżka pomiarowa była związana z kierunkiem przewijania elektrody roboczej i oznaczono ją na czerwono. Na kierunku przewijania drutu prowadzono pomiar na powierzchniach prostych, promieniach zewnętrznych i wewnętrznych. Zmierzone profile porównywano z profilem nominalnym otrzymanym z modelu CAD. Ze względu na kształt zamka użyto dwóch końcówek pomiarowych:

- PCV 350 \times 58 mm 6033/1 do pomiaru odchyłek profilu,
- PCV 175-M/8 mm 5660/11 do pomiaru odchyłek na kierunku przewijania drutu.

Odchyłki kształtu badanych profili przedstawiono na rys. 2.

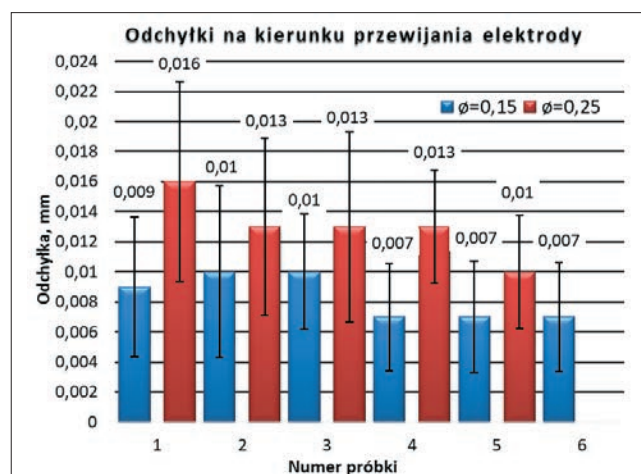


Rys. 2. Odchyłki kształtu profilu zamka łopatki

Różnice odchyłek w poszczególnych przejściach między elektrodami o różnych średnicach były nieznaczne. Dodatkowe przejścia wykończeniowe pozwoliły obniżyć wartość odchyłek nawet ponad 2-krotnie w porównaniu

z obróbką zgrubną. Ostatnie przejście obróbkowe w przypadku elektrody o średnicy $\varnothing 0,15$ mm pozwoliło zmniejszyć odchyłkę o ok. 37% w porównaniu z ostatnim przejściem dla elektrody o $\varnothing 0,25$ mm.

Odchyłki mierzone na kierunku przewijania drutu (prostopadle do posuwu) przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Odchyłki kształtu na kierunku przewijania elektrody drutowej

Zastosowanie drutu $\varnothing 0,15$ mm pozwoliło obniżyć wartość odchyłki nawet o 50% w stosunku do elektrody o $\varnothing 0,25$ mm. Wszystkie pomiary cechowało duże odchylenie standardowe, co jest związane m.in. z drganiem elektrody oraz charakterystycznym błędem kształtu występującym przy obróbce zaokrągłych i przyjmującym formę siodłowości.

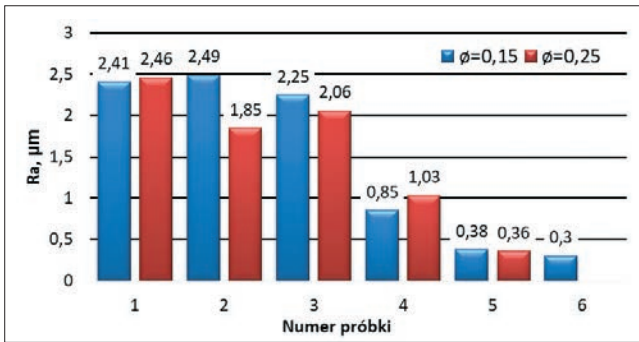
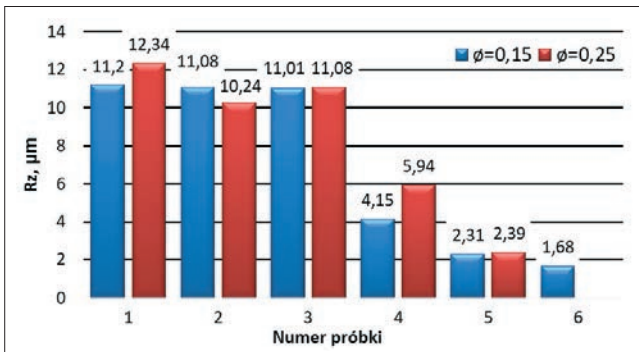
W tabl. II przedstawiono odchyłki kształtu dla charakterystycznych elementów zamka łopatki.

TABLICA II. Odchyłki kształtu na kierunku przewijania elektrody drutowej

Nr próbki	1		2		3	
Średnica drutu, mm	0,15	0,25	0,15	0,25	0,15	0,25
Powierzchnie proste, mm	0,008	0,012	0,007	0,012	0,005	0,006
Promienie zew., mm	0,004	0,008	0,005	0,008	0,01	0,014
Promienie wew., mm	0,014	0,027	0,016	0,019	0,013	0,019
Nr próbki	4		5		6	
Średnica drutu, mm	0,15	0,25	0,15	0,25	0,15	0,25
Powierzchnie proste, mm	0,002	0,0085	0,004	0,0071	0,002	–
Promienie zew., mm	0,007	0,0154	0,004	0,0096	0,009	–
Promienie wew., mm	0,011	0,0144	0,011	0,0145	0,009	–

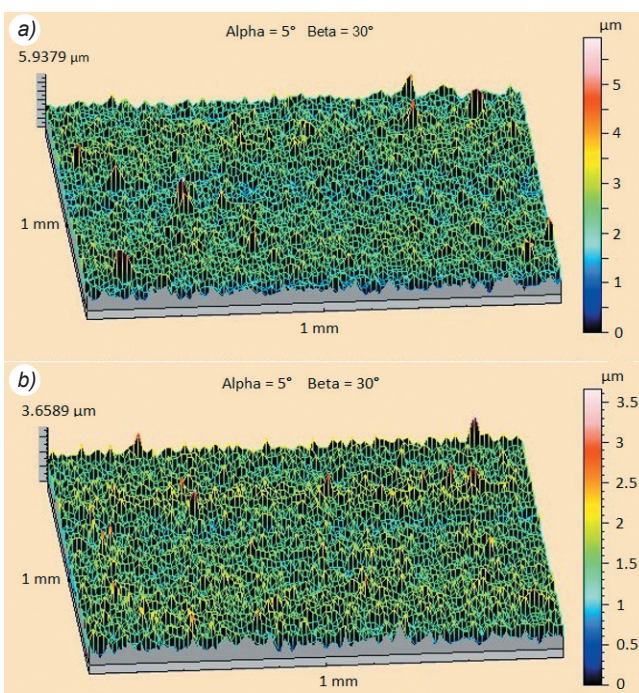
Promienie wewnętrzne cechowały się największymi odchyłkami, a powierzchnie proste – najmniejszymi. Elektroda o mniejszej średnicy pozwoliła uzyskać mniejsze odchyłki dla każdej powierzchni.

Pomiar chropowatości powierzchni wykonano na profilometrze 3D TalyScan. Wykonano go 3-krotnie na każdym promieniu zewnętrznym i wewnętrznym profilu oraz na powierzchniach prostych. Pierwszy pomiar przeprowadzono w osi symetrii próbki, a pozostałe 2 pomiary – 3 mm od krawędzi zewnętrznych. Wyniki pomiarów parametrów chropowatości powierzchni R_a i R_z przedstawiono na rys. 4 i 5.

Rys. 4. Parametr R_a chropowatości powierzchni badanych próbekRys. 5. Parametr R_z chropowatości powierzchni badanych próbek

Wartości parametru chropowatości powierzchni R_a i R_z dla obu średnic elektrody roboczej w poszczególnych przejściach były porównywalne. Najniższe wartości chropowatości uzyskano dla ostatniego przejścia obróbkowego elektrodą o średnicy 0,15 mm. Wartość chropowatości R_z była o 30% mniejsza w porównaniu z chropowatością powierzchni uzyskaną w 5. przejściu obróbkowym elektrodą o średnicy 0,25 mm.

Na rys. 6 przedstawiono strukturę geometryczną powierzchni uzyskanej w ostatnim przejściu obróbkowym elektrodami drutowymi o obu średnicach.

Rys. 6. Obraz stereometryczny powierzchni: a) po obróbce elektrodą $\phi 0,25$ mm, b) po obróbce elektrodą $\phi 0,15$ mm

Współczynnik asymetrii dla powierzchni po obróbce elektrodą o $\phi 0,15$ mm wynosił $S_{sk} = 0,38298$, natomiast elektrodą o $\phi 0,25$ mm wynosił $S_{sk} = 0,59217$. Im niższa wartość parametru S_{sk} , tym bardziej spłaszczona jest powierzchnia, a wierzchołki wzniesień są zaokrąglone [10]. Dodatnia wartość wskazuje na zaostrome wierzchołki nierówności, co z punktu widzenia współpracy powierzchni elementów jest niekorzystne.

Współczynnik skupienia przyjął wartości kolejno dla powierzchni po obróbce elektrodą o $\phi 0,15$ mm $S_{ku} = 3,757$ oraz dla $\phi 0,25$ mm $S_{ku} = 5,0657$. Wartość parametru S_{ku} bliska 3 wskazuje na rozkład rzędnych badanych powierzchni bliski rozkładowi normalnemu (równomierne rozłożenie wzniesień i dolin) [10]. Obie próbki charakteryzowały się niskimi wartościami średniego kwadratowego odchylenia wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia, kolejno: $S_q = 0,37676 \mu\text{m}$ dla powierzchni po obróbce elektrodą o $\phi 0,15$ mm oraz $S_q = 0,4894 \mu\text{m}$ dla $\phi 0,25$ mm.

Wnioski

Zastosowanie elektrody drutowej o średnicy $\phi 0,15$ mm pozwoliło uzyskać niższe wartości odchyłek kształtu i chropowatości powierzchni w porównaniu z obróbką elektrodą o średnicy $\phi 0,25$ mm. Istotny wpływ na wartości odchyłek i chropowatości powierzchni miała technologia obróbki elektrodą o $\phi 0,15$ mm, z dodatkowym przejściem wygładzającym, w porównaniu z elektrodą o $\phi 0,25$ mm. Całkowity czas obróbki dla elektrody $\phi 0,15$ mm wyniósł 160 min natomiast w przypadku $\phi 0,25$ mm było to 118,5 min. Analiza wyników pod kątem zastosowania w obróbce zamków dysków silników lotniczych pozwala zauważyć istotną różnicę w przypadku odchyłek na kierunku przewijania elektrody drutowej. Wynika to z niższych wartości prądu podczas wyładowania, niższego napięcia wyładowania i mniejszego posuwu. Dalsze badania powinny być ukierunkowane na zwiększenie wydajności obróbki oraz możliwość zastosowania elektrody drutowej o średnicy mniejszej niż 0,15 mm.

LITERATURA

- Dąbrowski L., Oniszczyk D., Zawora J., Marczał M. „Wpływ parametrów hydromechanicznych w procesie wycinania elektroerozyjnego na efekty obróbki”. *Inżynieria Maszyn*. 16, 3 (2011): s. 104–111.
- Sharma P., Chakradhar D., Narendranath S. “Effect of wire material on productivity and surface integrity of WEDM-processed Inconel 706 for aircraft application”. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 25, 9 (wrzesień 2016): s. 3672–3681.
- Klocke F., Vogtel P., Gierlings S., Lung D., Veselovac D. “Broaching of Inconel 718 with cemented carbide”. *German Academic Society for Production Engineering (WGP)*. 7 (2013): s. 593–600.
- Klocke F., Welling D., Klink A., Perez R. “Quality assessment through in-process monitoring of wire-EDM for fir tree slot production”. *Procedia CRIP*. 24 (2014): s. 97–102.
- Sharma P., Chakradhar D., Narendranath S. “Evaluation of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for urbine disk application”. *Materials and Design*. 88 (2015): s. 558–566.
- Klocke F., Welling D., Klink A., Veselovac D., Nöthe T., Perez R. “Evaluation of advanced wire-EDM capabilities for the manufacture of fir tree slots in Inconel 718”. *Procedia CRIP*. 14 (2014): s. 430–435.
- Oniszczyk-Świercz D., Świercz R., Dąbrowski L., Marczał M. „Konstruowanie warstwy wierzchniej Inconelu 718 po wycianiu elektroerozyjnym”. *Mechanik*. 4 (2015): s. 71–74.
- Mitsubishi Electric Corporation. “Wire-Cut EDM Systems, FA-S Advance Series machining characteristics data book”. BQN-W-70538C, version 3.0, 2010.
- Oniszczyk-Świercz D., Świercz R. „Obróbka elektroerozyjna – badanie impulsów elektrycznych napięcia i natężenia prądu”. *Mechanik*. 2 (2017): s. 112–113.
- Niemczewska-Wójcik M. „Struktura geometryczna powierzchni ukonstruowana w procesie obróbki elektroerozyjnej”. *Tribologia*. 5 (2010): s. 63–74.