

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Wpływ strategii wycinania elektroerozyjnego na dokładność zamka łopatki wirnika

JAN BUREK, JAROSŁAW BUK, MARCIN PŁODZIEN, PAWEŁ TUREK
POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA TECHNIK WYTWARZANIA I AUTOMATYZACJI

Słowa kluczowe: WEDM, wycinanie elektroerozyjne, zamek łopatki lotniczej

STRESZCZENIE:

W artykule przedstawiono dobór strategii i parametrów obróbki w procesie wycinania elektroerozyjnego WEDM (*Wire Electrical Discharge Machining*) zamka łopatki silnika lotniczego wykonanego z żarowytrzymałego stopu Inconel 718. Obróbkę zaprogramowano z wykorzystaniem modułu WEDM oprogramowania Siemens NX10 i wykonano na wycinarce elektroerozyjnej Mitsubishi FA 10S. Następnie przeprowadzono pomiary chropowatości powierzchni oraz zweryfikowano dokładność kształtu wyciętych zamków łopatki w oparciu o profil wygenerowany z oprogramowania NX10. Otrzymane wyniki badań wstępnych, pozwoliły osiągnąć część założonych wymagań, co potwierdza słuszność podjęcia tematu i kontynuacji badań nad zastosowaniem wycinania elektroerozyjnego WEDM do obróbki elementów silnika lotniczego.

Wire edm cutting strategy impact on the accuracy of blade fir tree root

Keywords: WEDM, wire electrical discharge machining, blade fir tree root

ABSTRACT:

The article presents the selection of machining strategy and parameters in wire electrical discharge machining (WEDM) of blade fir tree root made of Inconel 718. Machining was programmed using WEDM module of Siemens NX10 software and conducted on WEDM machine Mitsubishi FA 10S. Furthermore, the measurements of surface roughness and comparison of shape accuracy with the profile generated from the NX10 software were performed. The results of preliminary research allowed to achieve some of the established requirements, which confirms the importance of undertaken subject and to continue research into the use of WEDM in manufacturing aircraft engine components.

1. WSTĘP

Obróbka elektroerozyjna EDM (Electrical Discharge Machining) jest rodzajem obróbki ubytkowej polegającej na usuwaniu materiału w wyniku kontrolowanego mikrowyładowania elektrycznego, powstającego w przestrzeni międzyelektrodowej wypełnionej ciekłym dielektrykiem, między elektrodą roboczą a przedmiotem obrabianym. Wycinanie elektroerozyjne WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) jest rodzajem obróbki, w której zastosowano elektrodę roboczą w postaci drutu, najczęściej mosiężnego, o średnicy od 0,02 mm do 0,5 mm. Wśród najważniejszych zalet obróbki elektroerozyjnej należy wymienić możliwość obróbki materiałów niezależnie od ich twardości o przewodności większej niż 0,01 S/cm [1-4]. Rozwój obrabiarek CNC oraz technologii wycinania elektroerozyjnego stwarza możliwość zastosowania jej m.in. w przemyśle lotniczym do kształtowania materiałów trudnoobrabialnych [2, 5, 6].

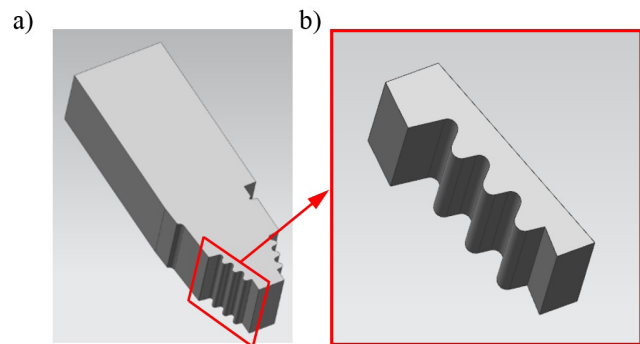
W dotychczasowej praktyce przemysłowej zamki łopatek są najczęściej wykonywane metodą kształtowego szlifowania głębokiego. Wymaga to jednak specjalnych szlifierek o dużej mocy, a także stosowania ściernic o odpowiedniej charakterystyce. Jest to zatem proces bardzo kosztowny i wymagający specjalnych technologii obróbki [7-9]. Stąd też ciągle poszukuje się innych metod wykonywania zamków łopatek [6, 10].

W niniejszej pracy zaproponowano metodę wycinania elektroerozyjnego WEDM zamka łopatek silnika lotniczego. Przedstawiono wyniki badań mających na celu potwierdzenie słuszności podjęcia tematu zastosowania procesu WEDM w obróbce trudnoobrabialnych materiałów dla przemysłu lotniczego. Przedstawiono wpływ strategii wycinania elektroerozyjnego zamka łopatek wirnika silnika lotniczego, wykonanego ze stopu Inconel 718, na chropowatość powierzchni i dokładność kształtu.

2. PRZYGOTOWANIE MODELU I PRZEPROWADZENIE OBRÓBK

Większość łopatek ma długość od 60 do 250 mm. Ich cechą charakterystyczną jest zamek wielotrapezowy (jodełkowy). Wymiary liniowe zamka takiej łopatek wykonywane są z dokładnością większą niż $\pm 0,01$ mm, a powierzchnie zamka z chropowatością $Ra = 1,25 \mu\text{m}$ [11]. Model zam-

ka łopatek zaprojektowano w programie NX10. Przyjęto, że do badań chropowatości powierzchni oraz dokładności kształtu wystarczające jest wykonanie i zbadanie jednej strony zamka (Rys. 1).



Rysunek 1 Model zamka łopatek (a) oraz wybrany fragment (profil) wykorzystany w badaniach (b)

Do zaprogramowania obróbki wykorzystano moduł WEDM systemu NX10. Standardowe wycinarki przemysłowe wyposażone są w gotowe technologie cięcia, na które składają się zestawy nastaw maszynowych [4]. Warunki obróbki przedstawiono w Tabeli 1.

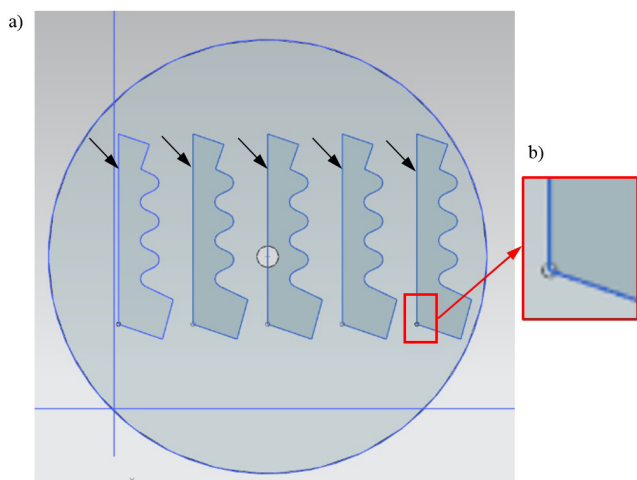
Tabela 1 Warunki realizacji badań: U_c – średnia wartość napięcia wyładowania, I_c – wartość pikowego prądu podczas wyładowania, t_{off} – czas przerwy, V_d – prędkość przewijania drutu, F_n – siła naciągu drutu, Q_v – wydatek objętościowy dielektryka, f – posuw [11]

Strategia obróbki (próbka)	Wymiary offsetów [μm]				
	zgr.	+ 1 wyk.	+ 2 wyk.	+ 3 wyk.	+ 4 wyk.
1	162	-	-	-	-
2	182	129	-	-	-
3	221	168	132	-	-
4	232	179	143	130	-
5	235	182	146	133	130
Parametry zadane	Przejście				
	zgr.	+ 1 wyk.	+ 2 wyk.	+ 3 wyk.	+ 4 wyk.
U_c [V]	43	57	51	115	75
I_c [nastawa]	10	4	12	3	3
t_{off} [nastawa]	1	1	1	3	3
V_d [nastawa]	12	12	12	12	12
F_n [daN]	1,45	1,9	1,9	2,1	2,1
Q_v [l/min]	≥ 10	$1,4 \pm 0,5$	$1,4 \pm 0,5$	$1,4 \pm 0,5$	$1,4 \pm 0,5$
f [mm/min]	2,5	4,8	3,3	4,8	4,3

Plan badań obejmował pięć strategii obróbki przy zmiennych naddatkach, posuwie oraz maszynowych nastawach warunków obróbki (zwiększanie nastawy powodowało zwiększanie wartości parametru).

Wszystkie strategie zawierały zgrubną obróbkę w pierwszym przejściu. Druga oraz każda kolejna strategia uzupełniana była o jedno dodatkowe przejście wykończeniowe (dokładność bazowania drutu wynosiła 1 μm). Wartości offsetów oraz nastaw parametrów maszynowych zawartych w Tabeli 1 dobrano z tablic technologicznych przygotowanych przez producenta obrabiarki dla stali (ze względu na brak wytycznych dla obróbki stopu Inconel 718 w wielu przejściach) o grubości 30 mm oraz mosiężnej elektrody drutowej o średnicy 0,25 mm [11]. Technologia cięcia podawana przez producenta daje niemal pewność wykonania elementu o wysokiej dokładności i gładkości powierzchni, jednak najczęściej jest to dobór niekorzystny pod względem ekonomicznym [4].

Widok półfabrykatu oraz rozmieszczenie próbek pokazano na Rysunku 2. Do badań użyto półfabrykatu o średnicy 100 mm i długości 30 mm, wykonanego ze stopu Inconel 718. Otwór o średnicy 5 mm umieszczonych centralnie służył do bazowania obrabiarki, pozostałe 5 otworów (Rys. 2b) o średnicy 1 mm umieszczone w każdym dolnym lewym rogu konturu próbki służyły jako punkt startowy obróbki. Otwory te wykonano na przebijarce elektroerozyjnej Accutex AH. Powierzchnie zaznaczone strzałkami (Rys. 2a) wykonano zgrubnie, gdyż nie były uwzględniane podczas pomiarów. Pozostałe elementy konturu wykonane zostały zgodnie ze strategiami zawartymi w Tabeli 1. Przygotowane operacje w modu-



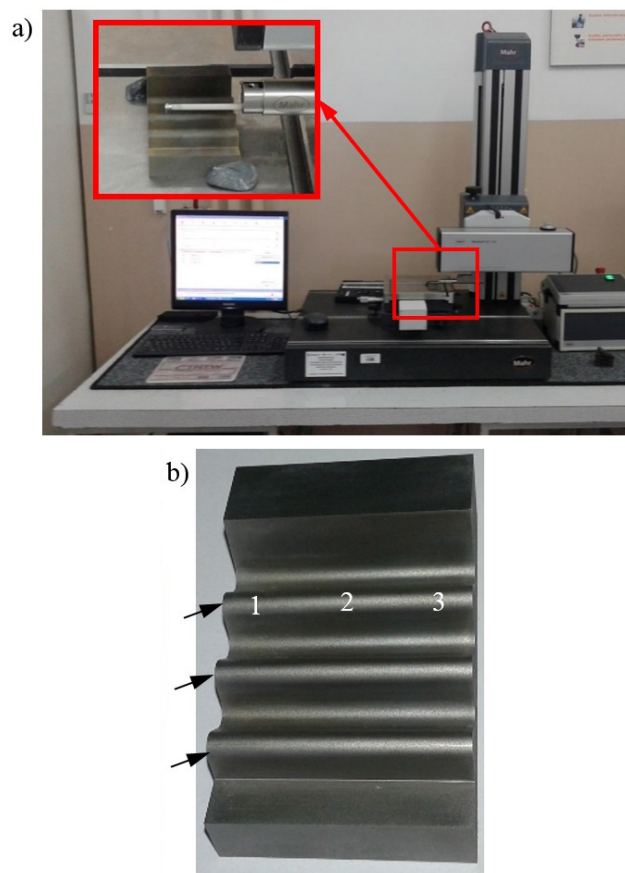
Rysunek 2 Widok rozmieszczenia wycinanych profili (a) oraz widok fragmentu profilu z lokalizacją przykładowego punktu startowego (b)

le WEDM systemu NX10 posłużyły do wygenerowania programu obróbkowego.

Obróbkę przeprowadzono na wycinarce elektroerozyjnej Mitsubishi FA 10S. Proces odbywał się w całkowitym zanurzeniu w ciekłym dielektryku, który stanowiła woda demineralizowana.

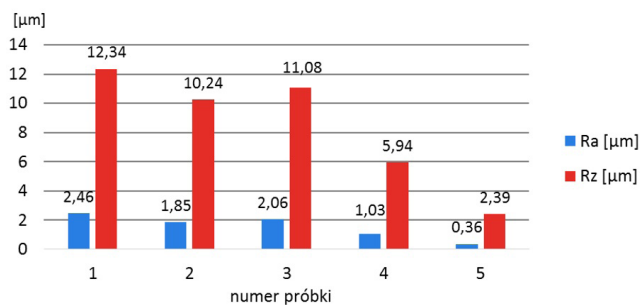
3. POMIARY CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI I DOKŁADNOŚCI WYMIAROWO-KSZTAŁTOWEJ

Do pomiaru chropowatości powierzchni wyciętych próbek wykorzystano profilografometr Mahr XR 20 wyposażony w głowicę MFW-250:1 (Rys. 3).



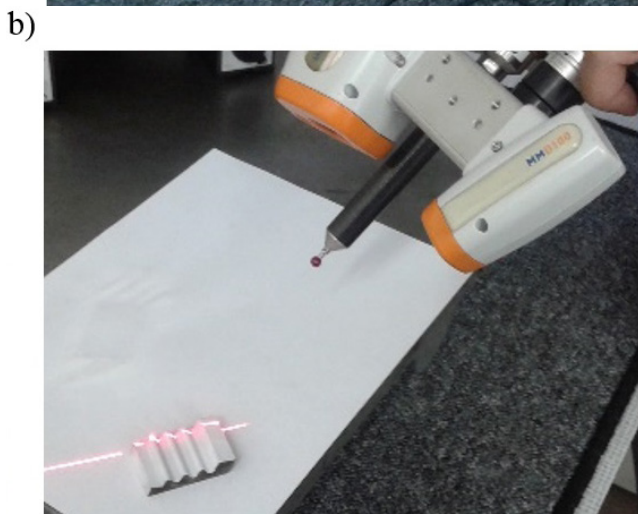
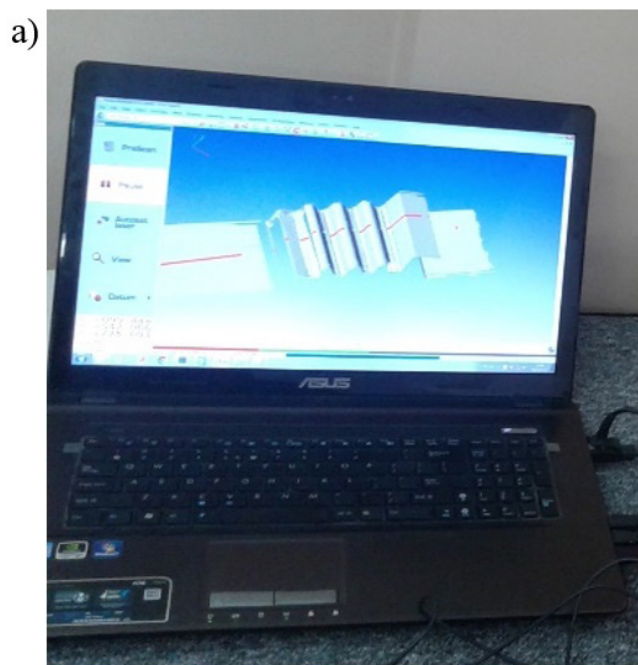
Rysunek 3 Widok ogólny profilografometru Mahr XR 20 (a) oraz przykładowej próbki (b) z zaznaczonymi promieniami zewnętrznymi oraz obszarami pomiaru – „1”, „2”, „3”

Pomiaru dokonywano trzykrotnie na każdym promieniu zewnętrznym profilu (Rys. 3b). Pierwszy pomiar wykonywano 3 mm od lewej krawędzi próbki (Rys. 3b „1”), drugi w centralnej części (Rys. 3b „2”), a trzeci 3 mm od prawej krawędzi (Rys. 3b „3”). Pomiaru dokonywano z prędkością przesuwu głowicy 0,5 mm/s. Długość odcinka elementarnego wynosiła 0,25 mm. Wyniki pomiarów chropowatości powierzchni przedstawiono na Rysunku 4.



Rysunek 4 Chropowatość powierzchni Ra i Rz badanych próbek

Pomiar dokładności kształtu badanego profilu zamka przeprowadzono wykorzystując skaner laserowy. Proces digitalizacji geometrii badanego profilu zamka został przeprowadzony przy użyciu skanera laserowego MMDx100 zamontowanego na ramieniu pomiarowym METRIS MCA II (Rys. 5).



Rysunek 5 Widok procesu skanowania laserowego: a) digitalizacja skanowanego obiektu, b) głowica skanera laserowego MMDx100 podczas pomiaru

Pomiar wykonywano przez projekcję promieni lasera, których odbicie jest rejestrowane przez sensor umieszczony w znanym położeniu i odległości od źródła lasera. Wynikowy kąt odbicia umożliwia trójwymiarowy pomiar powierzchni przedmiotu, w efekcie czego uzyskiwany jest model, którego powierzchnie reprezentowane są przez chmurę punktów [12].

Ze względu na strome powierzchnie proces skanowania modelu przebiegał trzyetapowo. Powstawanie refleksów podczas pomiarów zdecydowało o pokryciu próbki warstwą kredy.

Porównanie odwzorowania powierzchni modelu zaprojektowanego w systemie NX10 z modelem zeskanowanym przedstawiono w Tabeli 2. Funkcja porównania polega na wybraniu i nałożeniu na siebie punktów charakterystycznych na powierzchniach porównywanych elementów. W przypadku badanej powierzchni zastosowano algorytm Best Fit dokonujący porównania z dokładnością do 1 μm . Proces ten odbywa się przez minimalizację kwadratów odległości pomiędzy obiektem nominalnym i zmierzonym.

Dodatkowo określono powtarzalność metody pomiarowej, która wynosiła $\pm 0,01$ mm. Różnica całkowitej liczby punktów pomiarowych dla każdej próbki wynikała z ręcznego przesuwu głowicy skanującej.

4. WNIOSKI

Analiza wyników pomiaru chropowatości nie wykazała występowania jednoznacznej tendencji jej rozkładu na badanych próbkach. Chropowatość powierzchni ma charakter losowy. Średnia wartość parametru Ra dla pierwszych trzech próbek, które wykonano w przejściu zgrubnym, jednym wykończeniowym oraz dwóch przejściach wykończeniowych, mieściła się w przedziale od 2,46 μm do 1,85 μm , zaś wartość parametru Rz od 12,34 μm do 10,24 μm . Rozrzut wartości odchyłek kształtu wokół wartości średniej wyniósł kolejno 47 μm , 48 μm oraz 68 μm . Znaczną poprawę uzyskano dla czwartej próbki (trzy przejścia wykończeniowe): $Ra = 1,03$ μm i $Rz = 5,94$ μm . Ostatecznie najlepsze efekty pozwoliła uzyskać strategia przyjęta dla piątej próbki (cztery przejścia wykończeniowe), odpowiednio: $Ra = 0,36$ μm oraz $Rz = 2,39$ μm . Poprawa gładkości powierzchni dla dwóch ostatnich próbek wynikała przede wszystkim ze zmiany czasu przerwy t_{off} . Zwiększenie przerwy między impulsami istotnie wpłynęło

Tabela 2 Wyniki pomiaru odchyłek kształtu badanych profili

	Numer próbki									
	1		2		3		4		5	
	Całkowita liczba punktów pomiarowych									
	38262		120268		40689		61682		44763	
	Odchylenie standardowe od profilu nominalnego									
	0,047		0,048		0,068		0,052		0,052	
	Średnia odchyłka kształtu [mm]									
	-0,004		-0,005		0,004		-0,001		0,004	
	Minimalne i maksymalne odchyłki [mm]									
	-0,22	0,203	-0,204	0,194	-0,179	0,149	-0,22	0,202	-0,169	0,196
	Liczba punktów, ilość procentowa punktów									
	[mm]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]
<0,2 ÷ powyżej)	1	0,003	0	0	0	0	1	0,002	0	0
<0,171 ÷ 0,2)	7	0,018	30	0,025	0	0	21	0,034	3	0,007
<0,143 ÷ 0,171)	41	0,107	183	0,152	4	0,01	107	0,173	13	0,029
<0,114 ÷ 0,143)	94	0,249	643	0,535	419	1,03	574	0,931	95	0,212
<0,086 ÷ 0,114)	228	0,596	2262	1,88	4389	10,787	2028	3,288	767	1,713
<0,057 ÷ 0,086)	2626	6,863	8066	6,707	8250	20,276	5745	9,314	6013	13,433
<0,029 ÷ 0,057)	8721	22,793	19483	16,2	5250	12,903	10984	17,807	12081	26,989
<0,000 ÷ 0,029)	6938	18,133	22052	18,336	2725	6,697	10070	16,326	6612	14,771
<-0,029 ÷ 0,000)	6575	17,184	26473	22,012	2699	6,633	11812	19,15	4378	9,78
<-0,057 ÷ -0,029)	8117	21,214	26959	22,416	6112	15,021	11292	18,307	7543	16,851
<-0,086 ÷ -0,057)	3504	9,158	10100	8,398	7556	18,57	6445	10,449	5958	13,31
<-0,114 ÷ -0,086)	1099	2,872	2721	2,262	2682	6,591	2017	3,27	1009	2,254
<-0,143 ÷ -0,114)	266	0,695	844	0,702	486	1,194	467	0,757	255	0,57
<-0,171 ÷ -0,143)	35	0,091	356	0,3	80	0,197	106	0,172	36	0,08
<-0,2 ÷ -0,171)	6	0,016	90	0,075	4	0,01	12	0,019	0	0
<poniżej ÷ -0,2)	4	0,01	6	0,005	0	0	1	0,002	0	0

na wartość parametrów chropowatości Ra i Rz. Na polepszenie gładkości powierzchni miała również wpływ zmiana wartości piku prądowego podczas wyładowania I_c . Rozrzut wartości odchyłek kształtu wokół wartości średniej dla dwóch ostatnich próbek wyniósł 52 μm .

Wyniki pomiaru odchyłek kształtu pozwalają stwierdzić, że strategia wielokrotnego przejścia nie ma znaczącego wpływu na dokładność wymiarowo-kształtową badanych profili. Większość

punktów pomiarowych dla wszystkich próbek mieściła się w polu tolerancji $<-0,114 \text{ mm} \div 0,114 \text{ mm}$), a średnia odchyłka wynosiła od $-0,004 \text{ mm}$ do $+0,005 \text{ mm}$. Znaczne wartości odchylenia standardowego od profilu nominalnego powodują przekroczenie założonej tolerancji $\pm 0,01 \text{ mm}$. Można zauważyć powtarzające się w każdej próbce odchyłki w okolicy promieni wewnętrznych rzędu 0,1 mm. Na znaczne odchyłki kształtu mogło mieć wpływ zastosowanie zestawu

nastaw parametrów maszynowych przeznaczonych dla stali, jak również niepewność pomiaru zastosowanej metody pomiarowej oraz zastosowanie warstwy antyrefleksyjnej. W kolejnych badaniach należy zastosować system pomiarowy o mniejszej niepewności pomiaru.

Obróbka stopu Inconel 718 w wielu przejściach wykończeniowych pozwoliła otrzymać znaczącą poprawę chropowatości powierzchni. Chropowatość powierzchni dla próbki czwartej i piątej spełnia wymagania narzucone przez przemysł lotniczy.

Dalsze badania powinny zostać ukierunkowane na poprawę dokładności kształtu oraz optymalizację parametrów procesu WEDM dla tego stopu polegającą na doborze parametrów, które umożliwią

redukcję liczby przejść wykończeniowych przy jednoczesnym zachowaniu wymagań przemysłu lotniczego. Optymalizacja parametrów jest trudna ze względu na obecność wielu zmiennych procesowych. Realizacja tego zadania wymaga m.in. zastosowania stanowiska badawczego umożliwiającego pomiar i rejestrację szybkozmiennych sygnałów elektrycznych.

Aby określić, czy przedstawiona metoda obróbki zamków łopatek może znaleźć zastosowanie w przemyśle lotniczym, należy przeprowadzić dalsze badania dotyczące mikrostruktury warstwy wierzchniej pod kątem występowania mikropełnię charakterystycznych dla obróbki elektroerozyjnej oraz naprężeń własnych w warstwie wierzchniej.

LITERATURA

- [1] Dąbrowski L., Oniszczyk D., Zawora J., Marczak M., Wpływ parametrów hydromechanicznych w procesie wycinania elektroerozyjnego na efekty obróbki, *Inżynieria Maszyn*, R. 16, z. 3, 2011.
- [2] Oniszczyk-Świercz D., Świercz R., Dąbrowski L., Marczak M., Konstytuowanie warstwy wierzchniej Inconelu 718 po wycinianiu elektroerozyjnym, *Mechanik*, 71-74, 04/2015.
- [3] Oniszczyk D., Określenie wpływu zjawisk fizycznych na cechy geometryczne przedmiotu po obróbce elektroerozyjnej WEDM, *Rozprawa doktorska*, Warszawa, 2013.
- [4] Rozenek M., Dąbrowski L., Aspekty ekonomiczne i dokładnościowe wycinania elektroerozyjnego, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, Vol. 31, nr 2, 2001.
- [5] Antar M. T., Soo S. L., Aspinwall D. K., Jones D., Perez R., Productivity and workpiece surface integrity when WEDM aerospace alloys using coated wires, *Procedia Engineering*, 19, 3-8, 2011.
- [6] 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, 430, 2014.
- [7] Płodzień M., Żyłka Ł., Babiarz R., Baran B., Projekt i analiza MES dysz kształtowych chłodziwa do szlifowania zamka łopatki silnika lotniczego, *Mechanik*, 8-9, 270-276, 2014.
- [8] Żyłka Ł., Babiarz R., Płodzień M., Stasiło R., Górecki Ł., Wpływ ciśnienia i kąta podawania strugi chłodziwa na proces szlifowania CFG stopu Inconel 718, *Mechanik*, 8-9, 382-386, 2014.
- [9] Grigoriev S. N., Starkov V. K., Gorin N. A., Krajni P., Kopač J., Creep-Feed Grinding: An Overview of Kinematics, Parameters and Effects on Process Efficiency, *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 60, 4, 213-220, 2014.
- [10] Godzimirski J., Nowe technologie lotniczych silników turbinowych, *Prace Instytutu Lotnictwa*, nr 3 (213), 22-36, 2011.
- [11] Mitsubishi Electric Corporation, Wire-Cut EDM Systems, FA-S Advance Series machining characteristics data book, BQN-W-70538C, version 3.0, 127, 2010.
- [12] Karbowski K., Podstawy rekonstrukcji elementów maszyn i innych obiektów w procesach wytwarzania, Kraków, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2008.