

# Pomiar odchyłki profilu zamka łopatki wirnika na konturografie

## Measurements of the blade's fir tree slots profile deviation on conturograph

JAN BUREK  
JAROSŁAW BUK  
MARCIN PŁODZIEN  
PAWEŁ TUREK  
MARCIN SAŁATA \*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.470

W artykule przedstawiono metodę stykową pomiaru odchyłek profilu zamka łopatki wirnika, po wyciananiu elektroerozyjnym WEDM (Wire Electrical Discharge Machining), wykonaną na konturografie Mahr XC20.

**SŁOWA KLUCZOWE:** WEDM, odchyłka profilu, zamek łopatki, konturograf

*The article presents contact method for measurements of the blade's fir tree slots shape accuracy, after WEDM cutting process, performed at the conturograph Mahr XC20.*

**KEYWORDS:** WEDM, profile deviation, fir tree slot, conturograph

Najbardziej narażonymi na obciążenia częściami lotniczych silników turbinowych są łopatki wirnikowe. Dodatkowo pracują w wysokich temperaturach oraz wystawione są na agresywne działanie spalin. Łopatki turbin różnią się rozmiarami i kształtem. Długość najczęściej stosowanych łopatek turbin waha się w przedziale 60–250 mm. Charakterystycznym elementem takich łopatek jest zamek wielotrapezowy (jodełkowy) przenoszący obciążenia równomiernie na tarczę turbiny. Zamki łopatek wykonywane są z tolerancją większą niż  $\pm 0,01$  mm [1, 2].

Na przestrzeni ostatnich lat obserwuje się wzrost zastosowań nowych materiałów na elementy pracujące w wysokich temperaturach przy znacznych obciążeniach. Często na takie elementy stosowane są stopy na osnowie niklu, do których zalicza się Inconel 718 [3, 4].

Materiał ten cechuje się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi i żaroodpornymi, ale także utrudnioną skrawalnością. Z tego względu poszukiwane są metody efektywnego kształtowania tych materiałów. Do metod mogących zastąpić obróbkę skrawaniem tego stopu należy wycinanie elektroerozyjne WEDM [3–5].

Jednym z najistotniejszych elementów procesu wytwarzania jest ocena zgodności geometrycznej wyrobu z dokumentacją techniczną. Właściwy dobór metody pomiarowej zapewnia najwyższą efektywność wytwarzania dzięki możliwości wprowadzania korekty procesu technologicznego. Na odchyłki kształtu elementów wycinanych elektroerozyjnie wpływa szereg parametrów, m.in.: siły naciągu elektrody roboczej, przepływ dielektryka, wysokość przedmiotu obrabianego czy siły działające na elektrodę

drutową w trakcie procesu WEDM, a także ilość przejść wykończeniowych [6].

### Warunki badań

Przedmiotem badań był profil zamka łopatki wirnika wykonany z stopu Inconel 718. Szerokość zamka (wysokość materiału obrabianego) wynosiła 30 mm. Do badań wykonano próbki w formie jednej strony profilu zamka jodełkowego. Wykonano pięć próbek przy zmiennej ilości przejść wykończeniowych. Pierwszą próbkę wykonano zgrubnie w jednym przejściu. Każda kolejna próbka uwzględniła strategię obróbki poprzedniej rozszerzoną o dodatkowe jedno przejście wykończeniowe. W wycinarkach elektroerozyjnych parametry obróbki podaje się w formie nastaw. W tabl. I przedstawiono parametry i nastawy ostatniego przejścia elektrody roboczej dla każdej próbki:  $U_s$  – 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. Ze względu na brak dostępnych wytycznych dla obróbki WEDM stopu Inconel 718 wykorzystano zestaw parametrów podany przez producenta dla stali [7].

**TABLICA I. Parametry obróbki**

Parametry zadane	Próbka				
	1	2	3	4	5
$U_s$ , V	43	57	51	115	75
$I_c$ , nastawa	10	4	12	3	3
$t_{off}$ , nastawa	1	1	1	3	3
$F_n$ , daN	1,45	1,9	1,9	2,1	2,1
$f$ , mm/min	2,5	4,8	3,3	4,8	4,3
$Q_v$ , l/min	$\geq 10$	~1,4	~1,4	~1,4	~1,4

Elektrodą roboczą był drut mosiężny o średnicy  $\varnothing = 0,25$  mm. Proces wykonywano w zanurzeniu w dielektryku, który stanowiła woda demineralizowana. Błąd pozycjonowania obrabiarki wynosił 1  $\mu\text{m}$ .

### Wykonanie pomiarów

Do pomiarów odchyłek profilu zamka łopatki wykorzystano konturograf Mahr XC20. Pomiary wykonywano wzdłuż profilu oraz na kierunku przewijania drutu. Kształt zamka łopatki wymagał użycia dwóch końcówek pomiarowych. Do pomiaru odchyłek profilu użyto końcówki PCV 350  $\times$  58 mm 6033/1, a do pomiaru odchyłek na kierunku przewijania drutu końcówki PCV 175-M/8 mm 5660/11.

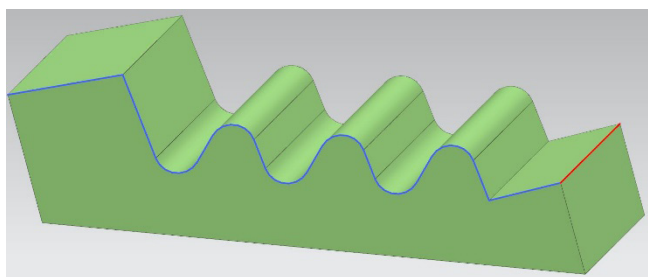
\* Dr hab. inż. Jan Burek, prof. PRZ (jburek@prz.edu.pl), mgr inż. Jarosław Buk (jbuk@prz.edu.pl), mgr inż. Marcin Płodzień (plodzien@prz.edu.pl), mgr inż. Paweł Turek (pturek@prz.edu.pl), mgr inż. Marcin Sałata (msalata@prz.edu.pl) – Katedra Techniki Wytwarzania i Automatykacji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska

Pomiaru odchyłek profilu dokonywano czterokrotnie w równych odległościach na całej szerokości zamka. Na rys. 1 kolorem niebieskim oznaczono profil zamka.

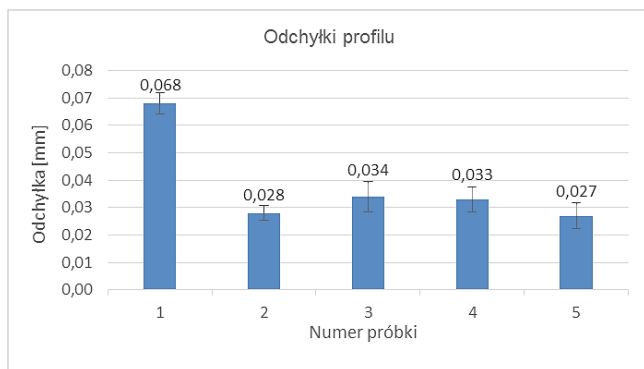
Na kierunku przewijania drutu dokonywano pomiaru na powierzchniach prostych, promieniach zewnętrznych i wewnętrznych profilu. Na rys. 1 oznaczono kierunek pomiaru (przewijania elektrody roboczej) kolorem czerwonym. Zmierzone profile porównywano z profilem nominalnym.

Odchyłki kształtu dla pięciu badanych profili przedstawiono na rys. 2. Pierwsza próbka, wykonana jedynie w przejściu zgrubnym, charakteryzuje się znacznymi odchyłkami, nawet dwukrotnie większymi, niż pozostałe 4 próbki, które wykonano w przejściach wykończeniowych. Rozkład odchyłek na powierzchni próbek nie wykazywał ukierunkowanej tendencji.

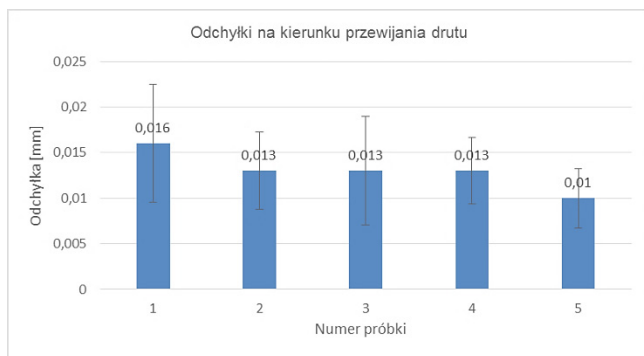
Odchyłki mierzone na kierunku przewijania drutu przedstawiono na rys. 3. W przypadku próbek wykonanych w przejściach wykończeniowych również zauważono niższe odchyłki. Różnica jest mniejsza i wynosi około 18% dla drugiej, trzeciej i czwartej próbki oraz około 37% dla próbki piątej. Zarówno na promieniach zewnętrznych, jak i na powierzchniach prostych zauważono rozkład odchyłek przyjmujący formę siodłowości.



Rys. 1. Widok przedmiotu obrabianego z oznaczonym profilem (niebieski) oraz kierunkiem przewijania drutu (czerwony)



Rys. 2. Odchyłki kształtu profilu



Rys. 3. Odchyłki kształtu na kierunku przewijania elektrody roboczej

W tabl. II przedstawiono odchyłki dla charakterystycznych elementów zamka łopatk. Najmniejsze odchyłki zmie-

rzo na powierzchniach prostych, a największe – niekiedy dwukrotnie – na promieniach wewnętrznych.

TABLICA II. Odchyłki kształtu na kierunku przewijania elektrody roboczej, w mm

Numer próbki	1	2	3	4	5
Powierzchnie proste	0,008	0,008	0,006	0,008	0,007
Promienie zewnętrzne	0,012	0,012	0,014	0,015	0,010
Promienie wewnętrzne	0,027	0,019	0,019	0,014	0,015

## Podsumowanie

Próbka pierwsza po obróbce zgrubnej cechowała się największymi odchyłkami kształtu. Wynika to z dużej ilości produktów obróbki powstających podczas wycinania stopu Inconel 718 oraz ich koncentracji w połowie wysokości przedmiotu obrabianego, co prowadzi do większej ilości wyładowań w tym obszarze. Aby minimalizować wpływ tego zjawiska, stosowany jest duży wydatek objętościowy dielektryka podawanego z przewodników, co może prowadzić do drgań elektrody roboczej. Zastosowanie obróbki z dodatkowymi przejściami wykończeniowymi pozwoliło obniżyć odchyłkę kształtu profilu o 60%. Na zmniejszenie wartości odchyłek miało wpływ obniżenie wartości piku prądowego  $I_c$  w czasie wyładowania oraz bardziej efektywne odprowadzanie produktów obróbki przy przejściach wykończeniowych, wynikające z mniejszych offsetów, zwiększonej szczeliny roboczej i mniejszego wydatku objętościowego dielektryka.

Opisane zjawiska prowadzą do powstawania charakterystycznego dla obróbki WEDM rozkładu odchyłek na kierunku przewijania elektrody roboczej, przyjmującego formę siodłowości. W przypadku promieni wewnętrznych zamka odnotowano największe odchyłki kształtu. Prawdopodobnym powodem powstawania tego zjawiska jest ugięcie (opóźnienie) elektrody roboczej podczas obróbki. W przypadku powierzchni prostych wpływ ugięcia jest minimalny. W przypadku promieni występuje ciągła zmiana kierunku ruchu elektrody roboczej, powodując zmniejszenie promienia toru ruchu elektrody roboczej do wartości minimalnej w połowie wysokości przedmiotu obrabianego, gdzie ugięcie jest największe.

Zastosowanie obróbki wykończeniowej pozwoliło znacznie zmniejszyć wartość odchyłek profilu zamka, jednak wymagania przemysłu lotniczego dotyczące dokładności wykonania nie zostały spełnione. Dalsze badania powinny mieć na celu zminimalizowanie ugięcia elektrody i jego wpływu na powstawanie zjawiska siodłowości.

## LITERATURA

- Godzimirski J. „Nowe technologie lotniczych silników turbinowych”. *Prace Instytutu Lotnictwa*. Nr 3 (213) (2011): s. 22–36.
- 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*. Vol. 14 (2014): pp. 430–435.
- Płodzień M., Żyłka Ł., Babiarsz R., Baran B. „Projekt i analiza MES dysz kształtowych chłodziwa do szlifowania zamka łopatk silnika lotniczego”. *Mechanik*. Nr 8–9 (2014): s. 270–276.
- Żyłka Ł., Babiarsz R., Płodzień M., Stasiło R., Górecki Ł. „Wpływ ciśnienia i kąta podawania strugi chłodziwa na proces szlifowania CFG stopu Inconel 718”. *Mechanik*. Nr 8–9 (2014): s. 382–386.
- Oniszczuk Świercz D., Świercz R., Dąbrowski L., Marczak M. „Konstruowanie warstwy wierzchniej Inconelu 718 po wycinaniu elektroerozyjnym”. *Mechanik*. Nr 4 (2015): s. 71–74.
- Oniszczuk D. „Określenie wpływu zjawisk fizycznych na cechy geometryczne przedmiotu po obróbce elektroerozyjnej WEDM”. Warszawa, 2013.
- Mitsubishi Electric Corporation, “Wire-Cut EDM Systems, FA-S Advance Series machining characteristics data book, BQN-W-70538C”, version 3.0, 2010, pp. 127.