

# Dokładność geometryczna obróbki powierzchni łopatki turbiny frezem toroidalnym

## Geometrical accuracy machining the turbine blade of the toroidal cutter

JAN BUREK  
MICHAŁ GDULA \*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.10.356

Przedstawiono algorytm doboru kąta prowadzenia frezu toroidalnego w procesie symultanicznego 5-osiowego frezowania powierzchni łopatek turbin z uwzględnieniem zmiennego promienia krzywizny profilu łopatki. Algorytm ten umożliwia zwiększenie dokładności geometrycznej powierzchni łopatek turbin poprzez adaptację wartości kąta prowadzenia frezu do aktualnie obrabianego promienia krzywizny profilu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** obróbka 5-osiowa, powierzchnia złożona, łopatka turbiny, dokładność geometryczna

*The article presents algorithm for selecting the lead angle in the process of simultaneous 5-axis milling sculptured surfaces turbine blades, taking into account a variable radius of curvature in the feed direction of the toroidal cutter. The algorithm allows to increase the geometric accuracy turbine blades by matching the value of the parameter lead angle to the currently radius of curvature machined profile.*

**KEYWORDS:** 5-axis machining, sculptured surface, turbine blade, geometrical accuracy

Rozwój obecnych systemów CAD/CAM stwarza ogromne możliwości tak modelowania, jak i programowania procesu symultanicznego 5-osiowego frezowania, – dotyczy to zwłaszcza łopatek wirnika turbiny. Elementy tego typu muszą spełniać wysokie wymagania dokładności wymiarowo-kształtowej oraz jakości warstwy wierzchniej, co w znaczący sposób przekłada się na podniesienie sprawności całej maszyny wirnikowej.

Z uwagi na skomplikowany kształt profili łopatek, który charakteryzuje ciągła zmiana krzywizny, tak aby zachować prawidłowe własności aerodynamiczne, opracowanie technologii ich obróbki jest procesem skomplikowanym [1, 3].

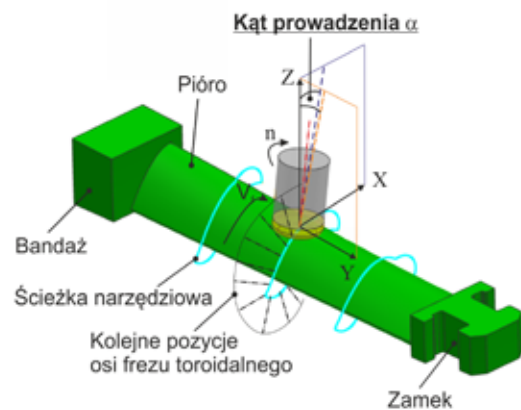
### Symultaniczne 5-osiowe frezowanie łopatek turbin

W dotychczasowej praktyce przemysłowej podstawową strategią obróbki łopatek turbin jest symultaniczne 5-osiowe frezowanie czołowe ze stałym kątem  $\alpha$  pochylenia osi narzędzia w kierunku posuwu (rys. 1) [3]. Dotyczy to zwłaszcza procesu obróbki z zastosowaniem frezów toroidalnych [1÷4]. Pochylenie osi frezu toroidalnego definiowane jest na etapie programowania obróbki w systemie CAM w stosunku do wektora normalnego obrabianej powierzchni.

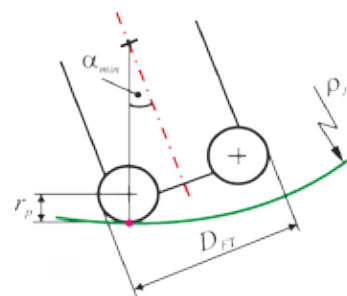
Znając średnicę frezu toroidalnego  $D_{FT}$ , promień płytki skrawającej  $r_p$  oraz najmniejszy wklęsły promień krzywizny  $\rho_1$  w kierunku posuwu, wartość minimalnego

kąta prowadzenia  $\alpha_{min}$  (rys. 2), przy którym nie wystąpi podcięcie, można obliczyć ze wzoru (1).

$$\alpha_{min} = \arcsin \left( \frac{\frac{D_{FT}}{2} - r_p}{\rho_1 - r_p} \right) \quad (1)$$



Rys. 1. Symultaniczne 5-osiowe frezowanie czołowe łopatek turbin



Rys. 2. Parametry geometryczne frezu toroidalnego i obrabianego profilu powierzchni

Obecnie stosowana 5-osiowa strategia obróbki ze stałym kątem prowadzenia  $\alpha$  nie uwzględnia zmian promienia krzywizny  $\rho_1$  powierzchni, co w konsekwencji prowadzi do podcięć powierzchni obrabianej i powstawania błędów kształtu [1, 2, 3].

Stąd też w niniejszej pracy zaproponowano algorytm doboru kąta prowadzenia  $\alpha$  freza dla obróbki powierzchni łopatek turbin, z uwzględnieniem zmian promienia krzywizny  $\rho_1$  obrabianego profilu oraz dopuszczalnej odchyłki błędu kształtu [4].

### Algorytm doboru kąta prowadzenia $\alpha$ frezu toroidalnego

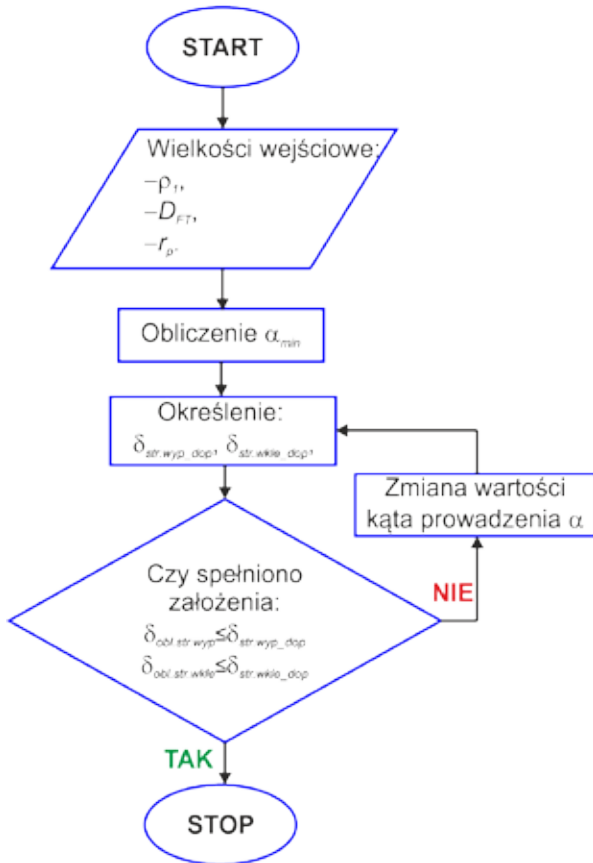
Algorytm został opracowany na podstawie zależności (2) oraz (3), które otrzymano na podstawie badań własnych

\* Dr hab. inż. Jan Burek, prof. PRz (jburek@prz.edu.pl), mgr inż. Michał Gdula (gdulam@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Techniki Wytwarzania i Automatykacji

[4] i ma na celu dopasowanie wartości kąta  $\alpha$  do promienia krzywizny  $\rho_1$  aktualnie obrabianego profilu strony wklęsłej oraz wypukłej pióra łopatki (rys. 3):

$$\delta_{obl.str.wyp.} = 3,5 \cdot 10^{-3} - 5,9 \cdot 10^{-5} \alpha - 4,3 \cdot 10^{-5} \rho_1 + 0,2 \cdot 10^{-5} \rho_1^2 \quad (2)$$

$$\delta_{obl.str.wkl.} = 0,02 + 4,2 \cdot 10^{-3} \alpha - 8 \cdot 10^{-4} \rho_1 - 8 \cdot 10^{-6} \alpha^2 + 1 \cdot 10^{-6} \rho_1^2 \quad (3)$$



Rys. 3. Algorytm doboru kąta prowadzenia  $\alpha$  frezu toroidalnego

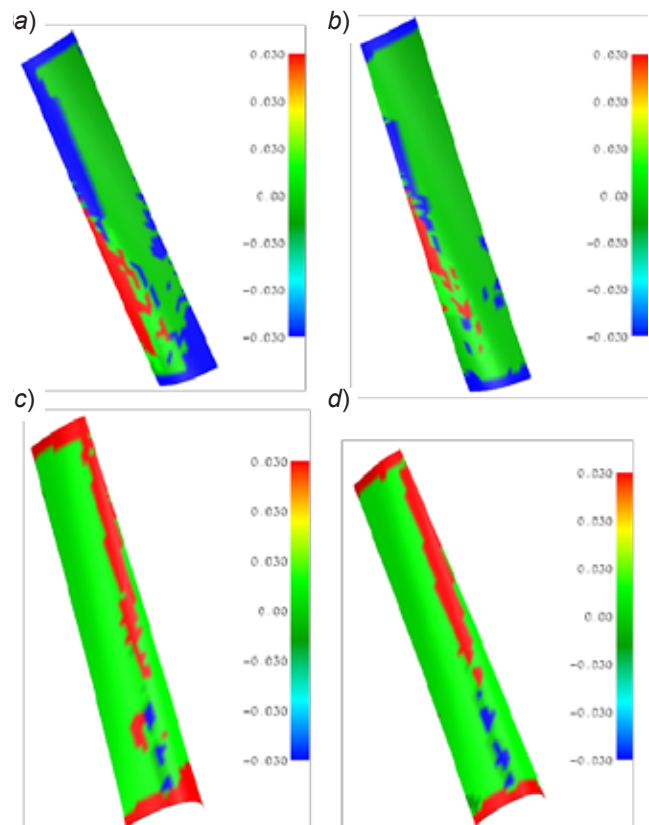
### Weryfikacja algorytmu w środowisku symulacyjnym systemu CAM

Weryfikację algorytmu przeprowadzono w środowisku symulacyjnym systemu CAM NX9 obróbki powierzchni złożonych pióra łopatki turbiny o zmiennym przekroju profilu wzdłuż wysokości pióra oraz o kącie skręcenia wynoszącym  $\gamma = 35^\circ$ .

W celu przeprowadzenia komputerowej weryfikacji poprawności działania opracowanego algorytmu przyjęto model testowy jak na rys. 1. Do symulacji wykorzystano frez toroidalny o średnicy  $D = 16$  mm.

Pierwszym etapem analizy było opracowanie toru ruchu narzędzia dla symultanicznego 5-osiowego frezowania czołowego pióra łopatki z zastosowaniem strategii *Relative to Drive* z stałą wartością kąta  $\alpha$  oraz strategią *Interpolate Angle to Drive*, umożliwiającą definicję adaptacji kąta  $\alpha$  w zależności od zmiany krzywizny obrabianego profilu. Zakres zmienności kąta prowadzenia wyznaczono, stosując opracowany algorytm. Kolejnym krokiem było przeprowadzenie symulacji samej obróbki i porównanie modelu nominalnego z modelami uzyskanymi w symulacji obróbki. Następnie wygenerowano mapy odchyłek kształtu badanego elementu z określoną wartością dopuszczalną  $\delta_{str.wyp.dop} = \pm 0,03$  mm oraz  $\delta_{str.wkl.dop} = \pm 0,03$  mm.

Mapy odchyłek modeli uzyskanych podczas symulacji obróbki od modelu nominalnego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Wyniki weryfikacji: a) strona wklęsła po obróbce ze stałym kątem  $\alpha$ , b) strona wklęsła po obróbce z dopasowanym kątem  $\alpha$ , c) strona wypukła po obróbce ze stałym kątem  $\alpha$ , d) strona wypukła po obróbce z dopasowanym kątem  $\alpha$

W obróbce strony wklęsłej pióra łopatki po obróbce ze stałym kątem  $\alpha$  poza pasmem tolerancji znalazło się 25% obszaru powierzchni, natomiast po obróbce z dopasowanym kątem  $\alpha$  poza pasmem tolerancji znalazło się tylko 14% obszaru powierzchni (poprawa o 11%). Z kolei w obróbce strony wypukłej po obróbce ze stałym kątem  $\alpha$  poza pasmem tolerancji znalazło się 37% obszaru powierzchni, natomiast po obróbce z dopasowanym kątem  $\alpha$  – tylko 29% (poprawa o 8%).

### Wnioski

Weryfikacja opracowanego algorytmu doboru kąta prowadzenia  $\alpha$  z uwzględnieniem zmian promienia krzywizny  $\rho_1$  obrabianego profilu w symultanicznym 5-osiowym frezowaniu czołowym powierzchni złożonych frezem toroidalnym pokazała, że można znacząco zwiększyć dokładność geometryczną powierzchni łopatek turbin. Weryfikacja opracowanego algorytmu w rzeczywistym procesie obróbki, z uwzględnieniem sił skrawania i oceny jakości uzyskanej powierzchni po obróbce, jest obecnie w trakcie realizacji.

### LITERATURA

- Burek J., Żyłka Ł., Gdula M., Płodzień M. „Wpływ orientacji osi freza toroidalnego na składowe siły skrawania w pięcioosiowym obróbce łopatki turbiny”. *Mechanik CD*, nr 8÷9 (2015): s. 764÷774.
- Cao L. X., Gong H., Liu J. „The offset approach of machining free form surface Part 2: Toroidal cutter in 5-axis NC machine tools”. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 184 (2007): pp. 6÷11.
- Gilles P., Monies F., Walter R. „Optimum orientation of a torus milling cutter: Method to balance the transversal cutting force”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 47 (2007): pp. 2263÷2272.
- Gdula M. „Proces symultanicznego pięcioosiowego frezowania powierzchni złożonych frezem toroidalnym”. *Praca doktorska w realizacji*.