

Metoda sterowania kątem prowadzenia osi frezu w pięcioosiowej obróbce łopatki turbiny

Method of controlling the lead angle of the toroidal cutter axis in 5-axis machining of the turbine blade

MICHAŁ GDULA
JAN BUREK
MARCIN ŻÓŁKOŚ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.8-9.102>

Prezentowano koncepcję metody sterowania kątem prowadzenia osi frezu toroidalnego w zależności od promienia krzywizny obrabianego profilu powierzchni złożonej. Metodę zweryfikowano na przykładzie obróbki łopatki turbiny. Aby porównać efekty zastosowania tej metody z metodą klasyczną (bez adaptacji kąta prowadzenia), badania przeprowadzono obu metodami.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka pięcioosiowa, powierzchnie złożone, łopatka turbiny

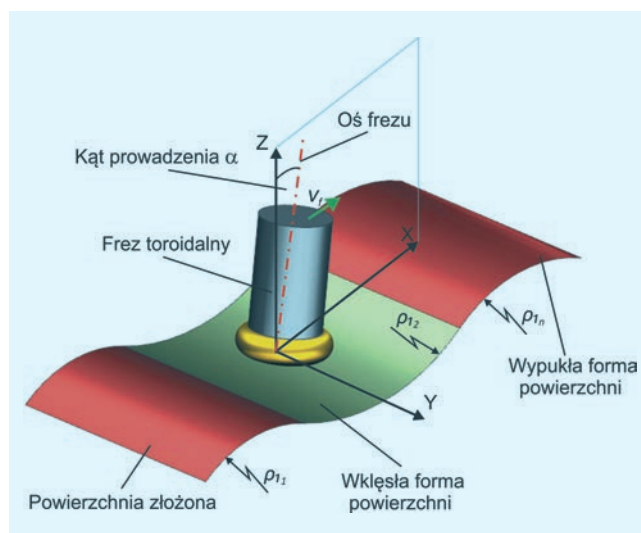
Presented is the own concept control method an lead angle axis of the toroidal cutter, depending on the radius of curvature of the machined sculptured surface profile. The method verified on the example machining of the turbine blade. In order to compare the effects of this method, to the classical method (without adaptation lead angle), tests were performed for both these methods.

KEYWORDS: 5-axis machining, sculptured surfaces, turbine blade

Frezowanie pięcioosiowe z użyciem frezu toroidalnego jest szeroko stosowane w obróbce powierzchni złożonych, takich jak łopatki turbin [1–3]. Ten sposób wieloosiowej obróbki, poprzez połączenie trzech przemieszczeń liniowych oraz dodatkowych dwóch obrotowych, umożliwia realizowanie ruchu narzędzia w przestrzeni w sposób ciągły względem wektora normalnego do obrabianej powierzchni. Proces ten pod względem technologicznym pozwala na [2]:

- uzyskanie wysokiej jakości powierzchni poprzez dobór najlepszych warunków styku między narzędziem a powierzchnią obrabianą,
- skrócenie czasu obróbki dzięki zastosowaniu geometrii narzędzia odpowiedniej do obrabianej powierzchni, a tym samym zwiększeniu szerokości skrawania,
- uzyskanie wzrostu wydajności obróbki oraz większej sztywności narzędzia dzięki zmniejszeniu jego wysięgu.

W praktyce przemysłowej podstawową (klasyczną) strategią obróbki części typu łopatka turbiny jest symultaniczne, pięcioosiowe frezowanie czołowe ze stałym kątem prowadzenia α osi frezu toroidalnego, niezależnie od zmian promienia krzywizny ρ_{1n} (rys. 1) [1]. Jednym z głównych problemów jest właśnie dobranie orientacji osi narzędzia względem aktualnej krzywizny profilu obrabianej powierzchni [3, 4, 6].



Rys. 1. Pięcioosiowe frezowanie czołowe powierzchni złożonych

Wartość kąta prowadzenia α osi frezu toroidalnego jest definiowana na etapie programowania obróbki w systemie CAM, względem wektora normalnego obrabianej powierzchni. Zasadniczą wadą tej strategii jest nieuwzględnienie ciągłych zmian promienia krzywizny ρ , obrabianego profilu powierzchni. Wynikiem tego są ciągłe zmiany przekroju warstwy skrawanej, w następstwie czego dochodzi do ciągłych zmian wartości składowych siły skrawania i kierunku ich działania. Prowadzi to z kolei do zmiennego odkształcenia sprężystego narzędzia oraz przedmiotu obrabianego, powstawania błędów kształtu oraz zwiększania się chropowatości powierzchni [2].

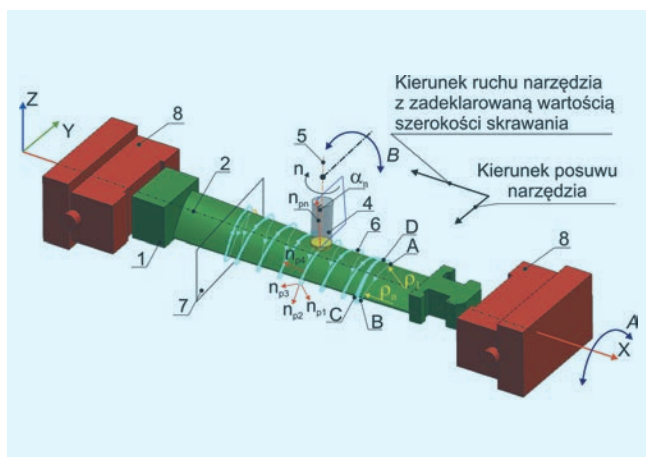
W niniejszej pracy przedstawiono nową koncepcję adaptacyjnej metody (strategii) pięcioosiowego frezowania powierzchni złożonych, która została zastosowana do obróbki łopatek turbin.

Adaptacyjna metoda pięcioosiowej obróbki łopatek turbin

Koncepcję adaptacyjnej metody pięcioosiowej obróbki powierzchni złożonych przedstawiono na rys. 2. Zilustrowano ruchy narzędzia (frezu toroidalnego) i jego położenie względem przedmiotu obrabianego (łopatki turbiny).

Łopatka turbiny (1) jest zamocowana w szczękach podzielnicy (8) realizującej ruch obrotowy sterowanej osi A. Podzielnica usytuowana jest na stole pięcioosiowej frezarki, który realizuje ruch sterowanej osi liniowej Z.

* Dr inż. Michał Gdula (gdulam@prz.edu.pl), dr hab. inż. Jan Burek prof. PRz (jburek@prz.edu.pl), mgr inż. Marcin Żółkoś (markos@prz.edu.pl) – Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza



Rys. 2. Adaptacyjna strategia pięcioosiowej obróbki łopatk

Oś wzdłużna (2) przedmiotu obrabianego położona jest równoległe do sterowanej osi X, natomiast przekroje poprzeczne łopatki leżą w płaszczyznach równoległych (7) do płaszczyzny ZY.

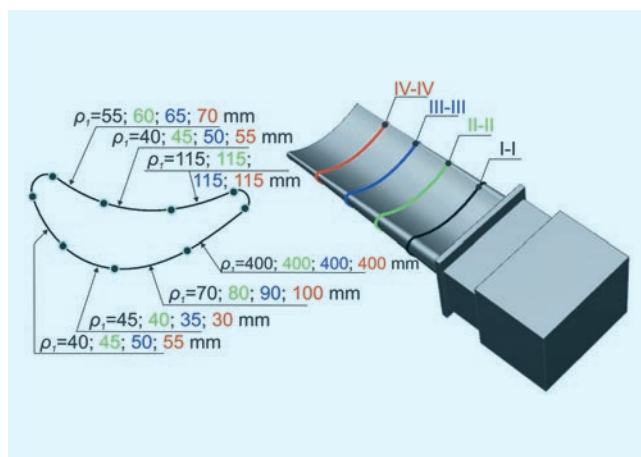
Frez toroidalny (4) jest zamocowany we wrzecionie frezarki pięcioosiowej, które realizuje ruch obrotowy sterowanej osi B. W początkowym położeniu oś obrotu frezu (5) pozostaje równoległa do osi Z, natomiast w ruchu roboczym oś ta jest orientowana w przestrzeni względem wektora normalnego do obrabianej powierzchni krzywoliniowej n_{pn} . Frez toroidalny w ruchu roboczym porusza się po pięcioosiowej trajektorii (6) w stosunku do wektora normalnego n_{pn} obrabianej powierzchni z adaptacją wartości parametru kąta prowadzenia α_n w zależności od zmian promienia krzywizny obrabianego profilu powierzchni ρ_n . Wartość tego kąta jest dobierana z wykorzystaniem procedury, którą opisano w pracach [1, 2].

W czasie obróbki frez toroidalny (4) przemieszcza się względem przedmiotu (1) w ten sposób, że pokonuje ruchem roboczym odcinek pięcioosiowej trajektorii (6) między punktami A i B z adaptacją parametru kąta prowadzenia: α_1 dla promienia ρ_1 , α_n dla promienia ρ_n itd. Następnie z punktu B pokonuje odcinek pięcioosiowej trajektorii (6) ze stałą wartością kąta prowadzenia α_n , przesuując się jednocześnie ruchem roboczym o odcinek równy zadeklarowanej szerokości skrawania do punktu C. Z tego miejsca frez toroidalny (4) porusza się ruchem roboczym do punktu D z adaptacją parametru kąta prowadzenia α_n , a następnie z punktu D pokonuje odcinek pięcioosiowej trajektorii (6) ze stałą wartością kąta α_n , przesuując się jednocześnie ruchem roboczym o odcinek równy zadeklarowanej szerokości skrawania do następnego punktu, od którego cały cykl ruchów frezu (4) powtarza się od początku.

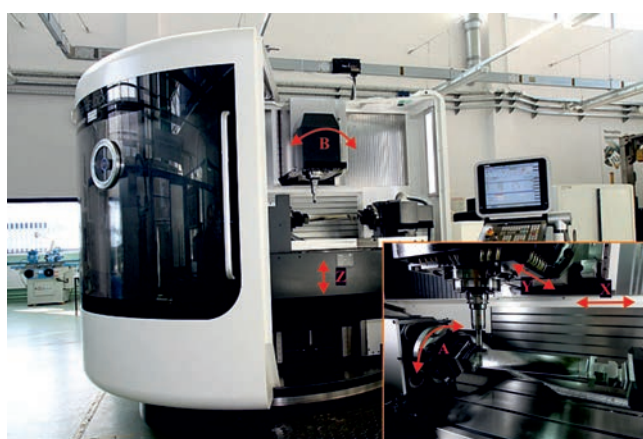
Weryfikacja doświadczalna metody

Aby zweryfikować efekty zaproponowanej metody, przeprowadzono obróbkę łopatki wirnika turbiny strategią klasyczną (bez adaptacji kąta α) oraz strategią adaptacyjną (z adaptacją kąta α). Weryfikacyjny model łopatki wirnika turbiny zamodelowano na podstawie czterech przekrojów profilu pióra (I-I÷IV-IV). Przekroje te utworzono z łuków o różnych promieniach krzywizny ρ_1 (rys. 3).

Obróbkę łopatki przeprowadzono z wykorzystaniem pięcioosiowego centrum frezarskiego 100 DMU MonoBlock (rys. 4).



Rys. 3. Model łopatki turbiny



Rys. 4. Pięcioosiowe centrum frezarskie 100 DMU MonoBlock

Do badań weryfikacyjnych wykorzystano frez toroidalny R300-016B20L-08L Sandvik Coromant oraz okrągłe płytki skrawające R300-0828E-PL z węgla S30T. Łopatkę turbiny wykonano ze stopu Inconel 718. Parametry skrawania ustalono na podstawie zaleceń producenta narzędzia użytego do badań (tabl. I).

TABLICA I. Parametry skrawania według zaleceń producenta frezu toroidalnego

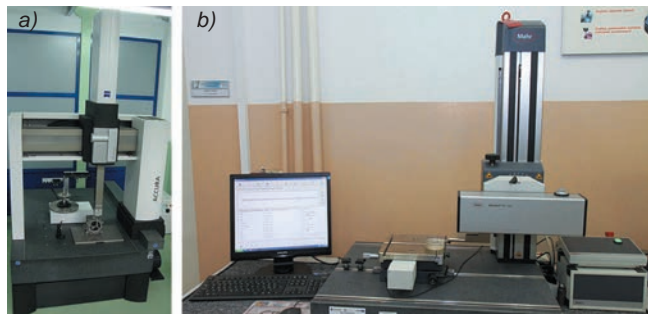
Parametry	Obróbka powierzchni wklęsłej oraz wypukłej łopatki turbiny
Dosuw osiowy a_p	0,25 mm
Dosuw promieniowy a_e	1,5 mm
Posuw na ostrze f_z	0,26 mm/ostrze
Prędkość skrawania v_c	40 m/min

Kryterium oraz ograniczenie doboru kąta prowadzenia α przedstawiono za pomocą zależności, które zestawiono w tabl. II.

TABLICA II. Założone dopuszczalne wartości odchyłki kształtu Δ_k oraz parametru Ra chropowatości powierzchni

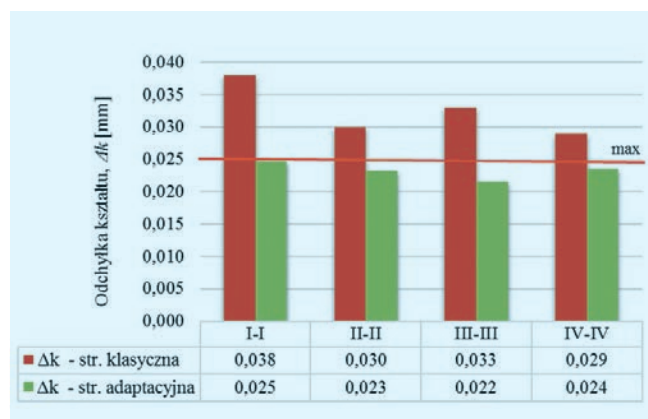
	Strona wklęsła łopatki turbiny	Strona wypukła łopatki turbiny
Kryterium	$\Delta_k \leq 0,025$ mm	$\Delta_k \leq 0,040$ mm
Ograniczenie	$Ra \leq 0,45$ μ m	$Ra \leq 0,55$ μ m

W ramach badań zmierzono odchyłki kształtu Δ_k oraz parametru R_a chropowatości powierzchni w weryfikacyjnych przekrojach profilu łopatki. Pomiary te przeprowadzono z wykorzystaniem współrzędnościowej maszyny pomiarowej Accura II Zeiss (rys. 5a) oraz profilografometru MahrSurf XR 20 (rys. 5b).

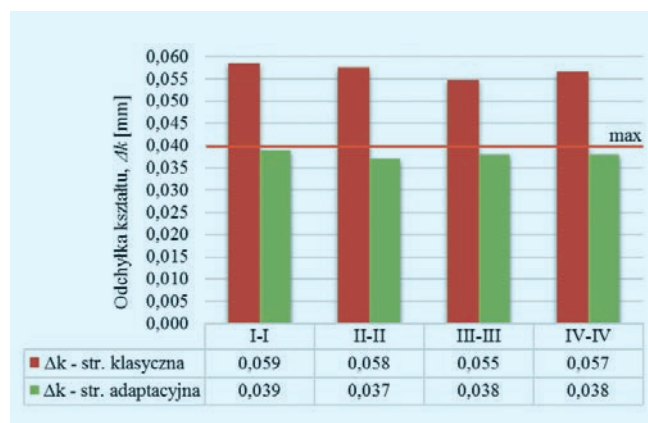


Rys. 5. Aparatura użyta do badań: a) współrzędnościowa maszyna pomiarowa Accura II Zeiss, b) profilografometr MahrSurf XR 20

■ **Odchyłka kształtu.** Wyniki pomiaru odchyłki kształtu Δ_k analizowanych przekrojów poprzecznych pióra łopatki przedstawiono na rys. 6 oraz 7.

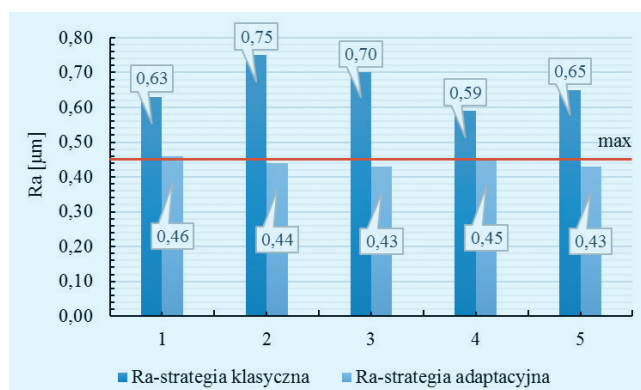


Rys. 6. Odchyłki kształtu Δ_k analizowanych profili strony wklęsłej pióra łopatki

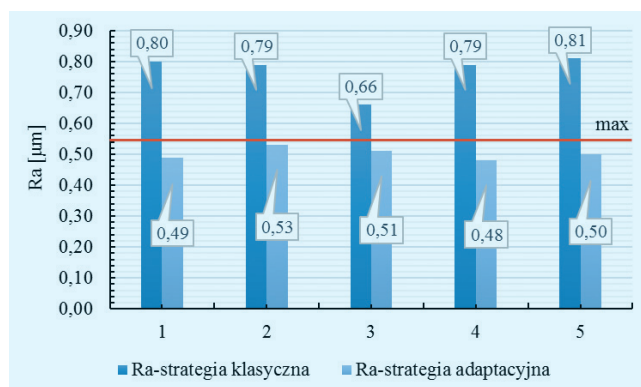


Rys. 7. Odchyłki kształtu Δ_k analizowanych profili strony wypukłej pióra łopatki

■ **Chropowatość powierzchni.** Średnie wartości z pomiarów parametrów R_a chropowatości powierzchni strony wklęsłej przedstawiono na rys. 8. Natomiast średnie wartości z pomiarów parametru R_a chropowatości powierzchni strony wypukłej łopatki przedstawiono na rys. 9.



Rys. 8. Wartości parametru R_a chropowatości powierzchni strony wklęsłej



Rys. 9. Wartości parametru R_a chropowatości powierzchni strony wypukłej

Podsumowanie

W wyniku zastosowania proponowanej nowej metody sterowania (adaptacji) kąta prowadzenia α w zależności od zmian promienia krzywizny ρ_1 obrabianego profilu powierzchni udało się zmniejszyć odchyłki kształtu Δ_k pióra łopatki w zakresie 25÷30% w stosunku do obróbki tego samego pióra strategią klasyczną (bez adaptacji kąta α). Ponadto uzyskano zmniejszenie wartości parametru R_a i równomierny ich rozkład na obrabianej powierzchni.

Podsumowując, można stwierdzić, że opracowana koncepcja metody sterowania kątem prowadzenia α osi frezu toroidalnego umożliwia zwiększenie dokładności pięcioosiowej obróbki powierzchni złożonych.

LITERATURA

- Burek J., Gdula M., Sułkiewicz P., Żurek P. „Strategia 5-osiowej obróbki łopatek turbin uwzględniająca zmiany krzywizny obrabianego profilu”. *Mechanik*. 12 (2016): s. 1892–1893.
- Gdula M. „Proces symultanicznego pięcioosiowego frezowania powierzchni złożonych frezem toroidalnym”. *Praca doktorska*. Rzeszów 2017.
- Gilles P., Cohen G., Monies F. “Torus cutter positioning in five-axis milling using balance of the transversal cutting force”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 66, 5 (2013): s. 965–973.
- He Y., Chen Z. “Optimising tool positioning for achieving multi-point contact based on symmetrical error distribution curve in sculptured surface machining”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 73, 5 (2014): s. 707–714.
- Li L.L., Zhang Y.F. “Optimal tool-path generation for 5-axis milling of sculptured surfaces”. *IEEE International Conference on Control and Automation*. ThB3-4, s. 1207–1212.
- Plathonik D., Lauwres B. “Computing of the actual shape of removed material for five-axis flat-end milling”. *Computer Aided Design*. 44, 11 (2012): s. 1103–1114.