

Wpływ parametrów kinematycznych i geometrycznych na przekrój warstwy skrawanej w pięcioosiowej obróbce powierzchni złożonych

Effect of kinematic and geometric parameters on the cut layer in a 5-axis machining of the sculptured surfaces

MICHAŁ GDULA
JAN BUREK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.12.191>
English version available on: www.mechanik.media.pl

Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych zrealizowanych metodą bezpośrednią CAD. Oceniono istotność wpływu parametrów orientacji osi frezu toroidalnego oraz promieni krzywizny powierzchni złożonej na przekrój warstwy skrawanej w procesie pięcioosiowego frezowania powierzchni wypukło-wklęsłej oraz wklęsło-wypukłej.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka pięcioosiowa, frez toroidalny, przekrój warstwy skrawanej, powierzchnie złożone

Results of simulation studies made using the direct CAD method are presented. The significance of the influence of the toroidal cutter axis orientation parameters and curvature radius of the sculptured surface on the cut layer in a 5-axis milling of the convex-concave and concave-convex surfaces, was assessed.

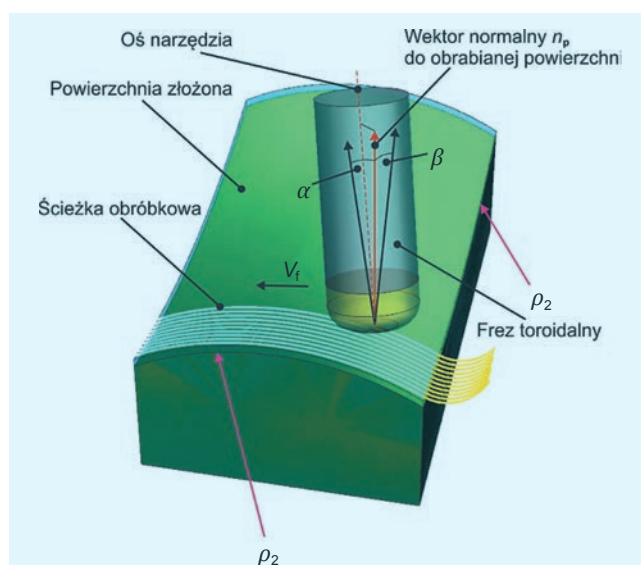
KEYWORDS: 5-axis machining, toroidal cutter, cut layer, sculptured surfaces

Postęp przemysłu maszynowego, a zwłaszcza lotniczego, jest związany z rozwojem nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych oraz technologii wytwarzania złożonych geometrycznie części [1, 2, 5, 8]. Formy wtryskowe, matryce, wirniki czy łopatki turbin opisane są różnymi typami powierzchni, wśród których najczęstsze są powierzchnie krzywoliniowe, należące do grupy tzw. powierzchni złożonych [5, 8].

Wobec powierzchni złożonych stawiane są wysokie wymagania odnośnie do dokładności kształtu i stanu warstwy wierzchniej. Obróbka obejmuje niekiedy wiele skomplikowanych zabiegów, najczęściej na maszynach CNC, w procesie frezowania symultanicznego, rozumianego jako jednoczesna obróbka w pięciu osiach. Do modelowania powierzchni złożonych i projektowania procesu ich pięcioosiowej obróbki wykorzystywane są systemy CAD/CAM. Programy te oraz rozbudowane kinematycznie wieloosiowe centra obróbkowe umożliwiają obróbkę przedmiotu o dowolnym zarysie krzywoliniowym [1, 2, 8].

Dokładność kształtu oraz chropowatość powierzchni złożonych zależą głównie od parametrów kinematycznych (kąta wyprzedzenia α oraz kąta pochylenia β) pięcioosiowej obróbki oraz parametrów geometrycznych obrabianej powierzchni (krzywizn głównych rozpatrywanych w tej pracy jako promienie ρ_1 i ρ_2), co zobrazowano na rys. 1.

Ponadto parametry te mają zasadniczy wpływ na warunki styku w strefie styku powierzchni roboczej frezu toroidalnego i powierzchni obrabianej, a tym samym na przebieg pięcioosiowego frezowania [3, 4, 6, 7].



Rys. 1. Parametry kinematyczne procesu pięcioosiowego frezowania oraz parametry geometryczne obrabianej powierzchni złożonej

Warunki styku frezu toroidalnego z powierzchnią obrabianą

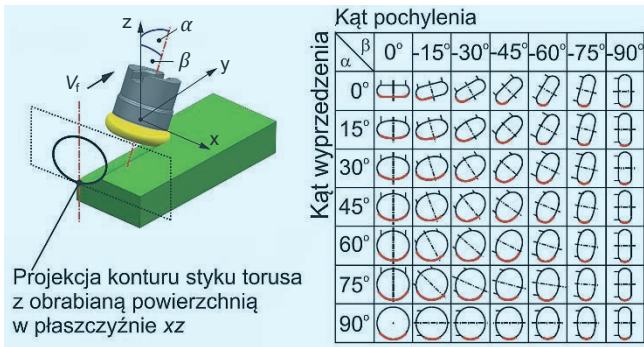
Warunki styku pomiędzy frezem toroidalnym a obrabianą powierzchnią wynikają bezpośrednio z kinematyki procesu pięcioosiowego frezowania. Są one określane przez:

- wzajemne położenie narzędzia i obrabianej powierzchni, realizowane przez kinematyczne kątowe parametry α oraz β orientacji osi narzędzia względem wektora normalnego n_p do powierzchni obrabianej (rys. 1),
 - parametry geometryczne powierzchni złożonej (promienie krzywizny ρ_1 i ρ_2),
 - parametry technologiczne frezowania,
 - kształt i wielkość przekroju warstwy skrawanej,
- które z kolei determinują składowe siły skrawania działające na narzędzie i przedmiot obrabiany, a tym samym wpływają na dokładność obrabianej powierzchni.

W procesie frezowania pięcioosiowego warunki styku powierzchni roboczej frezu toroidalnego z powierzchnią obrabianą ulegają ciągłej zmianie. Wynika to przede wszystkim z geometrycznych zależności torusa frezu, promienia krzywizny obrabianego aktualnie profilu powierzchni, jak również nastaw kątowych parametrów pozycjonowania osi frezu [2].

W pracy [8] przedstawiono analizę warunków styku frezu toroidalnego z powierzchnią obrabianą – wykonano projekcję (rzuty) zarysu konturu styku torusa frezu z obrabianą powierzchnią w kierunku posuwu na płaszczyznę xz układu współrzędnych (rys. 2).

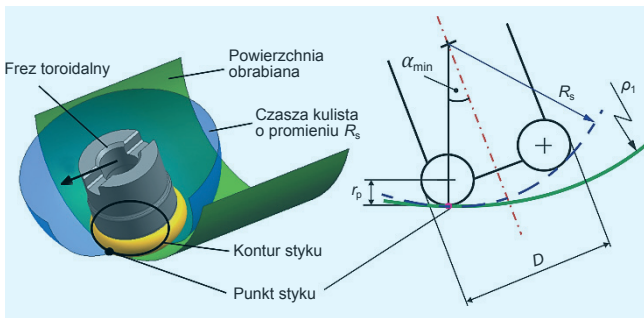
* Dr inż. Michał Gdula (gdulam@prz.edu.pl), dr hab. inż. Jan Burek prof. PRZ (jburek@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji



Rys. 2. Wpływ kątowych parametrów orientacji osi frezu toroidalnego na projekcję zarysu konturu styku torusa z obrabianą powierzchnią [5]

W zobrazowanych na rys. 2 przypadkach orientacji osi frezu toroidalnego zmienne są zarys konturu styku narzędzia z obrabianą powierzchnią oraz położenie punktu styku, co w przypadku obróbki powierzchni wklęsłych może powodować jej podcięcie [2, 8].

W związku z tym w pracach [2, 5, 8] podjęto próbę określenia minimalnego wymaganego kąta wyprzedzenia α_{\min} w obróbce wklęsłej powierzchni złożonej, aby uniknąć jej podcięcia (w obróbce powierzchni wypukłej podcięcie nie występuje). Autorzy tych prac przybliżają zakres pracy frezu toroidalnego modelem czaszy kulistej, której promień jest oparty na projekcji zarysu konturu styku frezu w lokalnym punkcie styku narzędzia z obrabianą powierzchnią (rys. 3).



Rys. 3. Pozycjonowanie frezu z użyciem modelu czaszy kulistej [5]

Na podstawie średnicy D oraz promienia płytki skrawającej r_p frezu toroidalnego, jak również promienia krzywizny ρ_1 obrabianego profilu powierzchni w kierunku posuwu można wyznaczyć wartość α_{\min} z zależności:

$$\alpha_{\min} = \arcsin \left(\frac{\frac{D}{2} - r_p}{\rho_1 - r_p} \right)$$

Stąd do obróbki powierzchni złożonych o zmieniających się promieniach krzywizny ρ_1 w kierunku posuwu należy w sposób ciągły obliczać minimalny wymagany kąt wyprzedzenia α_{\min} .

Warunki wpływające na strefę styku pomiędzy frezem toroidalnym a powierzchnią złożoną – tj. orientacja osi frezu oraz krzywizna powierzchni – w istotny sposób kształtują proces skrawania. Określają geometrię warstwy skrawanej, a tym samym wpływają na składowe siły skrawania, które działają na narzędzie i przedmiot obrabiany. Ma to zasadnicze konsekwencje dla dokładności kształtowanej powierzchni [2, 3, 5].

Dotychczas nie określono jednoznacznie istotności wpływu kąta wyprzedzenia α , kąta pochylenia β oraz promieni ρ_1 i ρ_2 krzywizn głównych powierzchni na przekrój

warstwy skrawanej. Dlatego celem niniejszej pracy jest określenie wpływu wymienionych parametrów na zmiany pola przekroju warstwy skrawanej. W tym celu przeprowadzono badania symulacyjne metodą bezpośrednią w środowisku CAD.

Badania symulacyjne

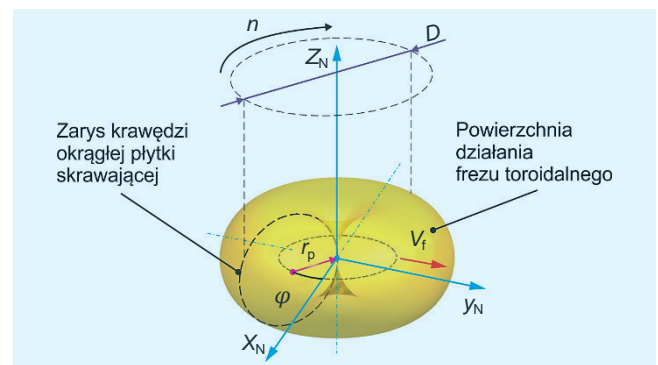
Badania symulacyjne zrealizowano poprzez bezpośrednie odwzorowanie narzędzia w środowisku CAD [1, 5]. Metoda ta opiera się na matematycznych modelach brył stosowanych w systemach CAD/CAM. Przedmiot obrabiany i narzędzie zamodelowano w sposób bryłowy, co umożliwiło przeprowadzenie operacji boolowskich na tych bryłach.

Symulacja polegała na dyskretnym zmianie wzajemnego położenia modeli przedmiotu obrabianego i frezu toroidalnego ruchami wynikającymi z kinematyki obróbki. W każdym kolejnym dyskretnym położeniu część wspólna brył reprezentujących narzędzie i przedmiot obrabiany stanowiła warstwę skrawaną.

Ponieważ operacje logiczne są realizowane w sposób czysto geometryczny, w symulacji nie uwzględnia się takich zjawisk, jak odkształcenia sprężyste układu obrabiarca–uchwyt–przedmiot–narzędzie, drgania czy temperatura, które występują w rzeczywistym procesie obróbki.

Podczas symulacji w kolejnych dyskretnych położeniach narzędzia wyznaczana była interferencja przedmiotu obrabianego i narzędzia. Konieczne było wykonanie dwu operacji boolowskich: iloczynu i odejmowania. Wzorcowy model narzędzia umieszczono w określonym miejscu w przestrzeni roboczej systemu CAD i do każdego kolejnego dyskretnego położenia kopiowano z tego miejsca. Taka technika pozwala wyeliminować błąd numeryczny związany z operacjami logicznymi.

Model frezu toroidalnego utworzono na podstawie jego powierzchni działania (rys. 4).

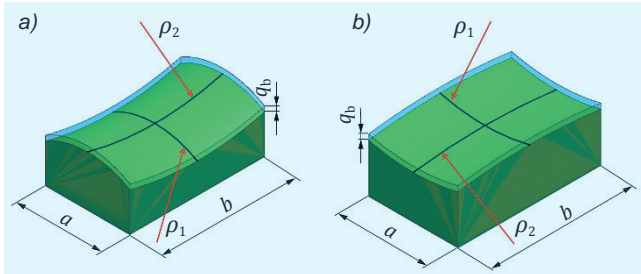


Rys. 4. Model frezu toroidalnego utworzony na podstawie powierzchni działania

Powierzchnia działania jest powierzchnią, jaką zataczają w przestrzeni krawędzie płytek skrawających frezu w wyniku ruchu głównego wokół osi wrzeciona głowicy frezarskiej. Frez poruszał się względem obrabianego przedmiotu ruchami, które wynikały z rzeczywistej kinematyki posuwów wrzeciona z ustalonym krokiem. W rozważanym przypadku ruch ten był zgodny z wektorem prędkości posuwu v_f , natomiast krok dyskretyzacji, tzn. zmianę wzajemnego położenia powierzchni działania frezu i przedmiotu obrabianego, przyjęto jako równy wartości posuwu na ostrze f_z .

Bryłowe modele analizowanych powierzchni miały kształt wyjściowego półfabrykatu z założonym naddatkiem q_b (rys. 5). Powierzchnie tych modeli otrzymywano

w wyniku bezpośredniej symulacji odwzorowania CAD powierzchni działania frezu toroidalnego. Do badań symulacyjnych przyjęto modele 3D-CAD, odpowiadające kostce prostopadłościowej o wymiarach a i b , ograniczonej powierzchnią wypukło-wklęsłą oraz wklęsło-wypukłą, o zadanych promieniach krzywizn w kierunku posuwu ρ_1 i w kierunku prostopadłym do kierunku posuwu ρ_2 .



Rys. 5. Modele 3D-CAD analizowanych powierzchni: a) wypukło-wklęsłej, b) wklęsło-wypukłej

Warunki badań

Badania przeprowadzono w dwóch etapach. Na pierwszym symulowano proces pięcioosiowej obróbki powierzchni wypukło-wklęsłej, natomiast na drugim etapie – powierzchni wklęsło-wypukłej – odzwierciedlających grzbiet i koryto łopatki turbiny.

TABLICA I. Warunki badań symulacyjnych

Parametry	Obróbka powierzchni wypukło-wklęsłej	Obróbka powierzchni wklęsło-wypukłej
a_p , mm	0,25	0,25
a_e , mm	1,5	1,5
f_z , mm/ostrze	0,26	0,26
ρ_1 , mm	25÷400	40÷120
ρ_2 , mm	800÷2000	800÷2000
α , °	3÷18	7÷23
β , °	0÷15	0÷15

Badania symulacyjne prowadzono z parametrami technologicznymi przyjętymi według zaleceń producenta narzędzia użytego do badań (frezu toroidalnego R300-016B20L-08L Sandvik Coromant) oraz materiału przedmiotu (stopu Inconel 718 na bazie niklu). Zakresy zmiennych procesu obróbki – kąt prowadzenia α , kąt pochylenia β oraz promienie krzywizny ρ_1 i ρ_2 – przyjęto na podstawie analizy różnych geometrii łopatek turbin (tabl. I).

Aby określić istotność wpływu jednego lub kilku czynników wejściowych na czynnik wynikowy, przeprowadzono badania rozpoznawcze w oparciu o odpowiednio wyselekcjonowany program badawczy. Najczęściej w badaniach istotności wpływu wykorzystuje się dwie grupy programów. Pierwsza z nich obejmuje programy związane z analizą wariancji – programy statyczne randomizowane. Warunkiem ich zastosowania jest brak interakcji czynników wejściowych. Drugą grupę stanowią: program randomizowany – bilans losowy, czyli program statyczny randomizowany (przesycony), oraz program statyczny zdeterminowany (częściowy nasycony) Placketta-Burmana.

Z uwagi na występowanie czterech czynników wejściowych i jednocześnie założenie interakcji między nimi oraz ponieważ liczba wykonywanych doświadczeń w środowisku symulacyjnym jest równa liczbie zmiennych w modelu,

badania symulacyjne zrealizowano według programu Placketta-Burmana. Środowiskiem symulacyjnym był moduł CAD systemu Siemens NX.

Na każdym etapie parametrami stałymi były: głębokość skrawania a_p , szerokość skrawania a_e , prędkość skrawania v_c i posuw na ostrze f_z . Stałe pozostawały także średnica frezu toroidalnego $D = 16$ mm i promień okrągłej płytki skrawającej $r_p = 4$ mm. Parametrami zmiennymi w ustalonym zakresie były: kąt wyprzedzenia α , kąt pochylenia β , promień krzywizny w kierunku posuwu ρ_1 i promień krzywizny w kierunku prostopadłym do posuwu ρ_2 .

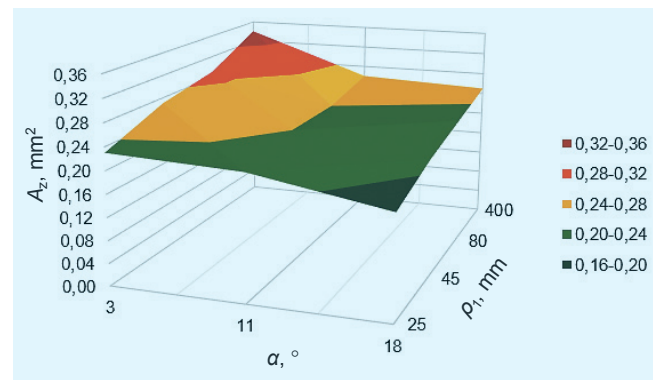
Wyniki badań

■ **Określenie istotności wpływu α , β , ρ_1 , ρ_2 na przekrój warstwy skrawanej powierzchni wypukło-wklęsłej.** Istotność wpływu kąta wyprzedzenia α , kąta pochylenia β , promienia krzywizny w kierunku posuwu ρ_1 oraz promienia krzywizny w kierunku prostopadłym do posuwu ρ_2 na przekrój warstwy skrawanej określono na przyjętym poziomie istotności wynoszącym $\tau = 0,05$. W kolejnych krokach obliczono wariancję doświadczenia, liczbę stopni swobody, wartości współczynników badanych zmiennych t -Studenta oraz wartość krytyczną współczynników badanych zmiennych a_{kr} na przyjętym poziomie istotności τ . Następnie dla zmiennych rzeczywistych porównano wartości współczynników istotności z wartością krytyczną. Dało to podstawę do oceny istotności wpływu badanych zmiennych na przekrój warstwy skrawanej (tabl. II).

TABLICA II. Ocena istotności badanych zmiennych

Kąt pochylenia β	Nieistotny
Kąt wyprzedzenia α	Istotny
Promień krzywizny ρ_1	Istotny
Promień krzywizny ρ_2	Nieistotny

Na podstawie wyników symulacji oraz obliczeń objętych planem badań stwierdzono, że na przekrój warstwy skrawanej w pięcioosiowym frezowaniu powierzchni wypukło-wklęsłej istotnie wpływa tylko kąt wyprzedzenia α oraz promień krzywizny ρ_1 w kierunku posuwu. Wpływ tych istotnych parametrów na pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Wpływ kąta wyprzedzenia α i promienia krzywizny ρ_1 na pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z w obróbce powierzchni wypukło-wklęsłej

Z wykresu wynika, że kąt wyprzedzenia α w znacznie większym stopniu wpływa na pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z niż promień krzywizny ρ_1 .

Zwiększenie wartości kąta α z 3° do 18° spowodowało zmniejszenie wartości pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej o ok. 20% dla powierzchni, której obrabiany kontur ma promień $\rho_1 = 25$ mm, oraz o ok. 25% dla powierzchni, której kontur ma promień $\rho_1 = 400$ mm. Zwiększenie wartości promienia krzywizny ρ_1 z 25 mm do 400 mm spowodowało zwiększenie pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej o ok. 15% dla kąta $\alpha = 3^\circ$ oraz 10% dla kąta $\alpha = 18^\circ$. Mało istotny jest natomiast wpływ kąta pochylenia β i promienia krzywizny ρ_2 na pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z .

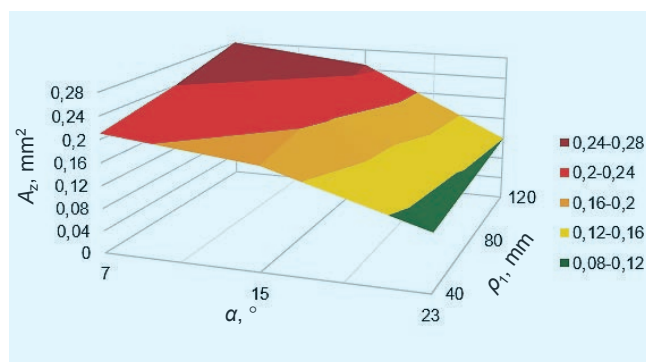
■ **Określenie istotności wpływu α , β , ρ_1 , ρ_2 na przekrój warstwy skrawanej powierzchni wklęsło-wypukłej.** W analogiczny sposób, jak opisano w poprzednim podrozdziale, określono istotność wpływu kąta wyprzedzenia α , kąta pochylenia β , promienia krzywizny w kierunku posuwu ρ_1 oraz promienia krzywizny w kierunku prostopadłym do posuwu ρ_2 na przekrój warstwy skrawanej powierzchni wklęsło-wypukłej. Ocenę tego wpływu zobrazowano w tabl. III.

Ograniczeniem w symulacji obróbki powierzchni wklęsło-wypukłej była wartość minimalnego kąta prowadzenia α_{\min} , którą obliczono z podanej wcześniej zależności dla najmniejszej wartości promienia krzywizny ρ_1 obrabianego konturu powierzchni w kierunku posuwu narzędzia. Aby uniknąć podcięcia, obliczono graniczną minimalną wartość kąta prowadzenia $\alpha_{\min} = 7^\circ$, którą należy zastosować w symulacji obróbki powierzchni wklęsło-wypukłej frezem toroidalnym R300-016B20L-08L Sandvik Coromant.

TABLICA III. Ocena istotności badanych zmiennych

Kąt pochylenia β	Nieistotny
Kąt wyprzedzenia α	Istotny
Promień krzywizny ρ_1	Istotny
Promień krzywizny ρ_2	Nieistotny

Na podstawie wyników symulacji obróbki oraz obliczeń objętych planem badań stwierdzono, że podobnie jak w przypadku obróbki powierzchni wypukło-wklęsłej, tak i w obróbce powierzchni wklęsło-wypukłej na przekrój warstwy skrawanej istotnie wpływają jedynie kąt wyprzedzenia α oraz promień krzywizny ρ_1 .



Rys. 7. Wpływ kąta wyprzedzenia α i promienia krzywizny ρ_1 na pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z w obróbce powierzchni wklęsło-wypukłej

Wpływ kąta wyprzedzenia α oraz promienia krzywizny ρ_1 na pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z przedstawiono na rys. 7.

Z wykresu wynika, że podobnie jak w symulacji obróbki powierzchni wypukło-wklęsłej, tak i w tym przypadku na pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z w znacznie większym stopniu wpływa kąt wyprzedzenia α niż promień krzywizny ρ_1 . Zwiększenie wartości kąta α z 7° do 23° spowodowało zmniejszenie pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z o ok. 30% dla powierzchni, której promień w kierunku posuwu $\rho_1 = 40$ mm oraz 35% dla powierzchni o promieniu obrabianego konturu $\rho_1 = 120$ mm. Zwiększenie promienia krzywizny ρ_1 z 40 mm do 120 mm spowodowało zwiększenie pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej o ok. 25% dla kąta prowadzenia $\alpha = 7^\circ$ oraz o ok. 10% dla kąta prowadzenia $\alpha = 23^\circ$.

Jak wynika z obliczeń objętych planem badań, wpływ kąta pochylenia β i promienia krzywizny ρ_2 na pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_z jest mało istotny.

Podsumowanie

Na podstawie badań symulacyjnych procesu pięcioosiowego frezowania powierzchni złożonych frezem toroidalnym oraz oceny istotności wpływu kąta wyprzedzenia α , kąta pochylenia β oraz promienia krzywizny ρ_1 w kierunku posuwu i promienia krzywizny ρ_2 w kierunku prostopadłym do posuwu stwierdzono, że na przekrój warstwy skrawanej w obróbce powierzchni wypukło-wklęsłej i wklęsło-wypukłej istotnie wpływają tylko kąt wyprzedzenia α oraz promień krzywizny ρ_1 w kierunku posuwu narzędzia. Dodatkowo na przekrój warstwy skrawanej można znacząco wpływać poprzez kinematyczny parametr kąta wyprzedzenia α .

Otrzymane wyniki wskazują nowe możliwości w zakresie sterowania orientacją osi narzędzia i dają podstawę do opracowania nowej strategii CAM. Powinna ona bazować na analizie geometrycznej przenikania się powierzchni roboczej frezu z powierzchnią obrabianą i wynikającym stąd przekroju warstwy skrawanej. Metoda ta powinna także umożliwiać stabilizację pola przekroju warstwy skrawanej, a tym samym wartości sił skrawania i parametrów dokładności powierzchni złożonych. W tym zakresie trwają prace prowadzone przez autorów niniejszego artykułu.

LITERATURA

- Budak E., Ozturk E., Tunc L.T. "Modelling and simulation of 5-axis milling processes". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 58 (2009): s. 347–350.
- Burek J., Żyłka Ł., Gdula M. "Cross section of the cutting layer in the simultaneous five axis free surfaces machining". *Archives of Mechanical Technology and Automation*. 34, 4 (2015): s. 11–24.
- Burek J., Żyłka Ł., Gdula M., Płodzień M. „Wpływ orientacji osi frezu toroidalnego na składowe siły skrawania w pięcioosiowej obróbce łopatki turbiny”. *Mechanik CD*. 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*. 184 (2007): s. 6–11.
- Gdula M. "Proces symultanicznego pięcioosiowego frezowania powierzchni złożonych frezem toroidalnym". Praca doktorska. Rzeszów 2017.
- 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*. 47 (2007): s. 2263–2272.
- Gilles P., Cohen G., Monies F. "Torus cutter positioning in five-axis milling using balance of the transversal cutting force". *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 66 (2013): s. 965–973.
- Mucha M. „Optymalizacja wydajności obróbki elementów o zarysie krzywoliniowym ze stopu tytanu”. Praca doktorska, Kraków, 2015. ■