

Badania symulacyjne siły skrawania w procesie obróbki powierzchni prostokreślnych frezem stożkowym

Simulation tests of the cutting force in the process of machining of ruled surfaces with a conical mill

JAN BUREK
KAROL ŻURAWSKI
PIOTR ŻUREK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.153>

Przeanalizowano siły skrawania w procesie obróbki obwodowej frezem stożkowym. Badania przeprowadzono dla różnych kątów skrzywienia powierzchni obrabianej oraz różnych wartości kąta prowadzenia narzędzia.

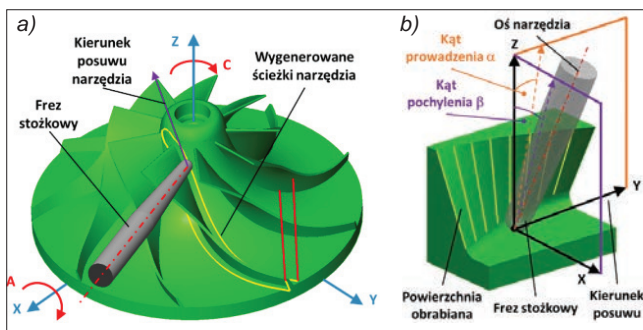
SŁOWA KLUCZOWE: frezowanie pięcioosiowe, frez stożkowy, powierzchnia prostokreślna, siły skrawania

Presented is the analysis of the cutting force in the flank milling process with a conical mill. The tests were carried out for various twist angles of the machined surface and different values of the lead angle.

KEYWORDS: five-axis milling, conical ball mill, ruled surface, cutting force

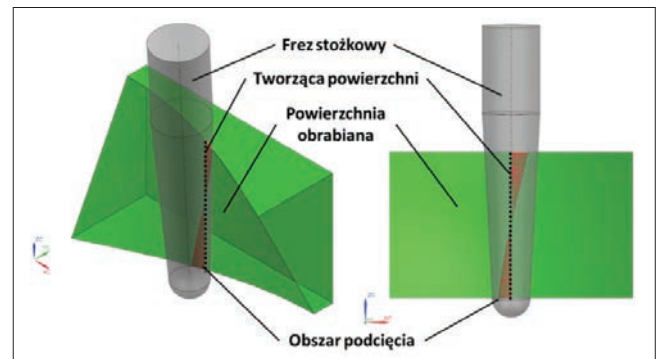
Technologie pięcioosiowego frezowania są obecnie wykorzystywane do wytwarzania skomplikowanych geometrycznie części dla przemysłu lotniczego, takich jak łopatki i wirniki turbin oraz sprężarek. Jednak obróbka tak złożonych elementów wciąż stanowi problem technologiczny. Z jednej strony wynika to z wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej oraz wysokiej jakości powierzchni, z drugiej zaś – z dążenia do maksymalizacji wydajności procesu [6–8, 10].

Najczęściej obróbkę powierzchni złożonych realizuje się w strategii wierszowania frezem kulistym. Pozwala ona na wykonanie powierzchni o dowolnym kształcie. Wadą tej strategii jest bardzo mała wydajność. W przypadku obróbki powierzchni prostokreślnych możliwe jest zastosowanie frezów stożkowych do obróbki obwodowej (rys. 1) i uzyskanie zdecydowanie większej wydajności obróbki w porównaniu z możliwościami oferowanym przez frezy kuliste [8, 10].

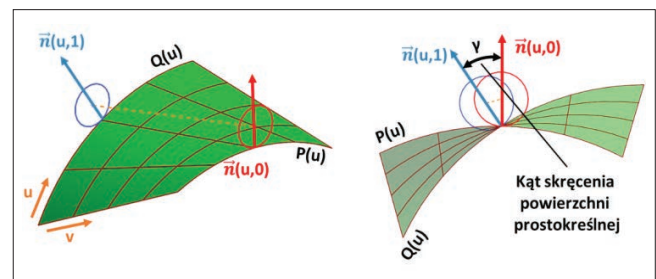


Rys. 1. Schemat: a) frezowania obwodowego wirnika, b) pięcioosiowych parametrów pozycjonowania osi narzędzia [6, 7]

Ta metoda pozwala na uzyskanie wielokrotnie większej wydajności, lecz podczas obróbki powierzchni nierozwijalnych istnieje ryzyko powstawania podcięć lub pozostawie-



Rys. 2. Schemat powstawania podcięć podczas obróbki powierzchni prostokreślnych nierozwijalnych [6, 7]



Rys. 3. Kąt skrzywienia γ powierzchni prostokreślnych nierozwijalnych [6, 7]

nia resztek naddatku obróbkowego z powodu liniowego styku narzędzia z wykonywanym przedmiotem (rys. 2).

Aby ograniczyć to zjawisko, niezbędna jest ciągła zmiana kąta prowadzenia α narzędzia w czasie obróbki w zależności od zmiany kąta skrzywienia γ powierzchni obrabianej (rys. 3) [5, 6].

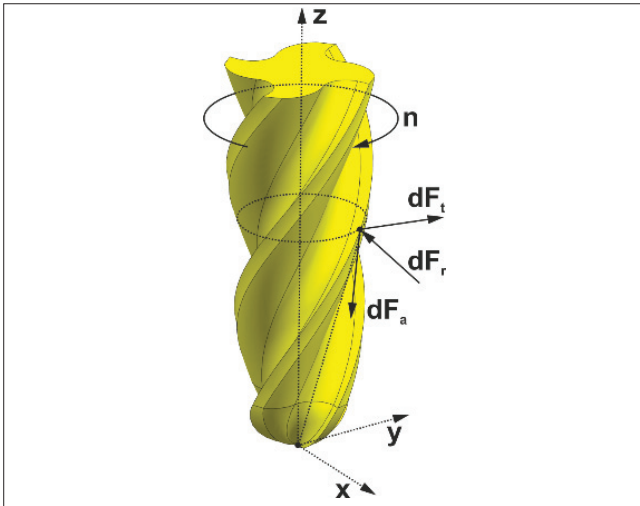
Zmiana kąta prowadzenia α oraz skrzywienia powierzchni γ zmienia pole powierzchni przekroju warstwy skrawanej oraz długość czynnej krawędzi skrawającej, co bezpośrednio wpływa na wartości składowe siły skrawania (rys. 4), opisane modelem mechanistycznym [1–3, 5, 9]:

$$\begin{cases} dF_t = dK_{te}dS + K_{tc}dA \\ dF_r = dK_{re}dS + K_{rc}dA \\ dF_a = dK_{ae}dS + K_{ac}dA \end{cases}$$

gdzie:

F_t – składowa styczna siły skrawania,
 F_r – składowa promieniowa siły skrawania,
 F_a – składowa osiowa siły skrawania,
 S – długość czynna krawędzi skrawającej,
 A – pole przekroju warstwy skrawanej,
 K_{te} , K_{re} , K_{ae} – współczynniki proporcjonalności krawędziowej oddziałujące na krawędź skrawającą, wyznaczone doświadczalnie,
 K_{tc} , K_{rc} , K_{ac} – współczynniki proporcjonalności związane ze ścinaniem, wyznaczone doświadczalnie.

* Dr hab. inż. Jan Burek prof. PRz (jburek@prz.edu.pl), mgr inż. Karol Żurawski (zurawski@prz.edu.pl), mgr inż. Piotr Żurek (p_zurek@prz.edu.pl) – Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji Politechniki Rzeszowskiej



Rys. 4. Składowe siły skrawania w układzie lokalnym [1-3]

Wartość oraz rozkład siły skrawania mają bezpośredni wpływ na odkształcenia układu OUPN, co skutkuje powstawaniem odchyłek kształtu [1-3, 5, 9].

Celem niniejszej pracy było ustalenie wpływu kąta prowadzenia frezu α oraz kąta skręcenia powierzchni prostokreślnej γ na wartości składowych siły skrawania w procesie pięcioosiowego frezowania obwodowego.

Badania symulacyjne

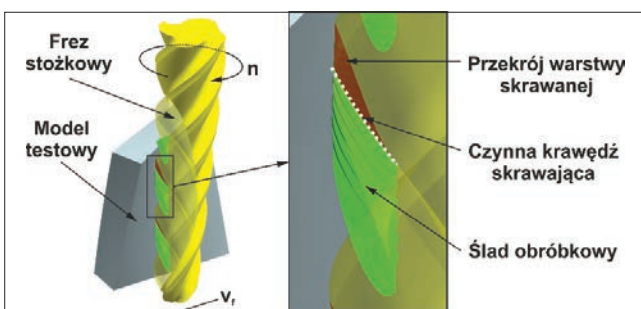
Do analizy wykorzystano operacje boolowskie wykonywane pomiędzy modelem testowym oraz modelem narzędzia. Na pierwszym etapie przygotowano model testowy w systemie NX 11. Zawierał on powierzchnie prostokreślne o różnych wartościach kąta skręcenia γ .

Gotowy element zaimportowano do środowiska hyperMill, w którym zaprogramowano obróbkę z różnymi kątami prowadzenia α narzędzia oraz wygenerowano dane pośrednie.

W następnym kroku utworzono sztywny wcześniej przygotowanego modelu narzędzia w oparciu o dane pośrednie. Ponadto w każdym następnym powtórzeniu model narzędzia wykonywał obrót o kąt wynikający z zadanego posuwu na ostrze.

Końcowym etapem było odjęcie wygenerowanych modeli narzędzia od bryły testowej. Operacja ta pozwoliła na wyznaczenie pola przekroju warstwy skrawanej oraz długości czynnej krawędzi skrawającej (rys. 5).

Otrzymane wartości wykorzystano we wzorach mechanistycznych w celu wyznaczenia wartości składowych siły skrawania. Zastosowane w symulacji parametry technologiczne oraz wartości współczynników przedstawiono w tabl. I i II.



Rys. 5. Metoda wyznaczania przekroju warstwy skrawanej i długości czynnej krawędzi skrawającej

TABLICA I. Parametry przyjęte do analizy

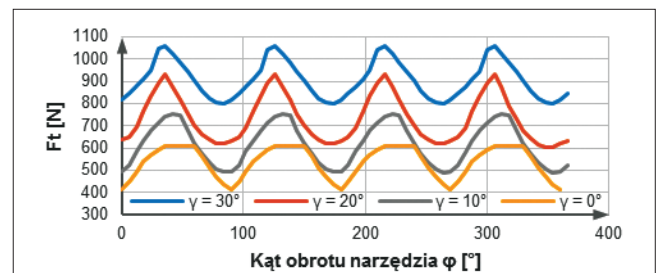
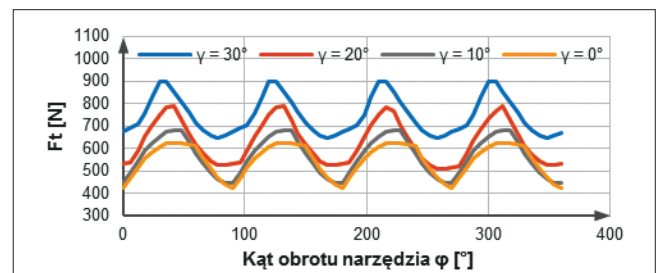
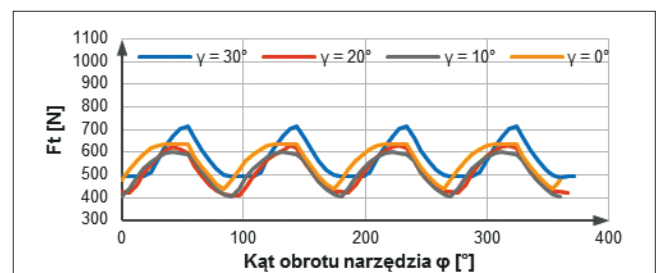
Średnica narzędzia d , mm	6
Głębokość skrawania a_p , mm	20
Szerokość skrawania a_e , mm	0,3
Posuw f_z , mm/ostrze	0,055
Zakres kątów prowadzenia α , °	od -3 do +3
Zakres kąta skręcenia powierzchni obrabianej γ , °	od 0 do 30

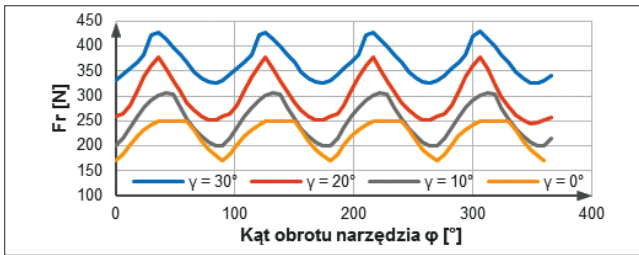
TABLICA II. Współczynniki proporcjonalności dla Ti6Al4V [1, 4]

K_{tc} , N/mm ²	2172,1
K_{rc} , N/mm ²	848,9
K_{ac} , N/mm ²	-725,07
K_{te} , N/mm	17,29
K_{re} , N/mm	7,79
K_{ae} , N/mm	-6,63

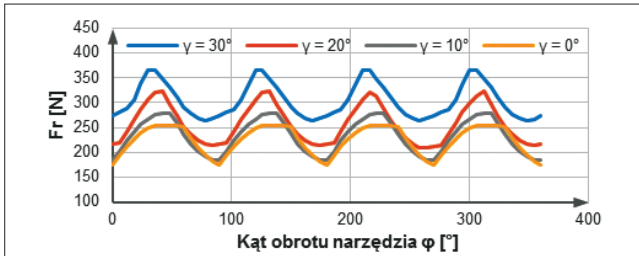
Analiza wyników

Na rys. 6-14 przedstawiono zależności wartości składowych siły skrawania F_t , F_r , F_a dla różnych kątów prowadzenia α oraz kątów skręcenia powierzchni prostokreślnej γ w funkcji kąta obrotu narzędzia φ . Na podstawie analizy wykresów składowych siły skrawania F_t , F_r , F_a można zauważyć znaczący wpływ zarówno kąta prowadzenia α , jak i kąta skręcenia powierzchni prostokreślnej γ .

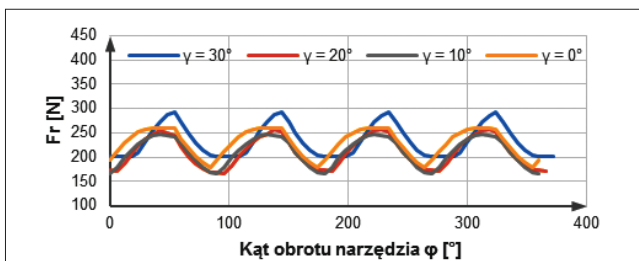
Rys. 6. Składowa siła skrawania F_t w funkcji kąta obrotu narzędzia dla kąta prowadzenia $\alpha = +3^\circ$ Rys. 7. Składowa siła skrawania F_t w funkcji kąta obrotu narzędzia dla kąta prowadzenia $\alpha = 0^\circ$ Rys. 8. Składowa siła skrawania F_t w funkcji kąta obrotu narzędzia dla kąta prowadzenia $\alpha = -3^\circ$



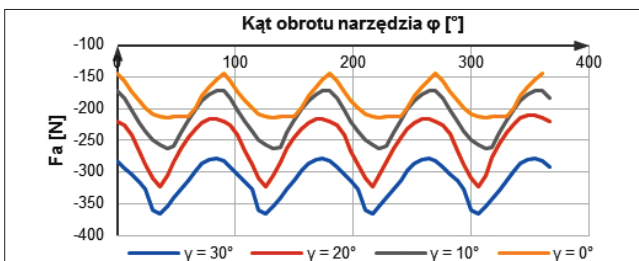
Rys. 9. Składowa promieniowa siły skrawania F_r w funkcji kąta obrotu narzędzia dla kąta prowadzenia $\alpha = +3^\circ$



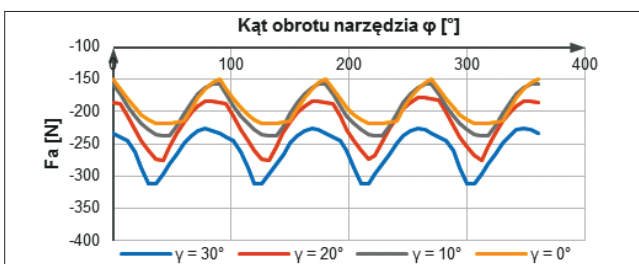
Rys. 10. Składowa promieniowa siły skrawania F_r w funkcji kąta obrotu narzędzia dla kąta prowadzenia $\alpha = 0^\circ$



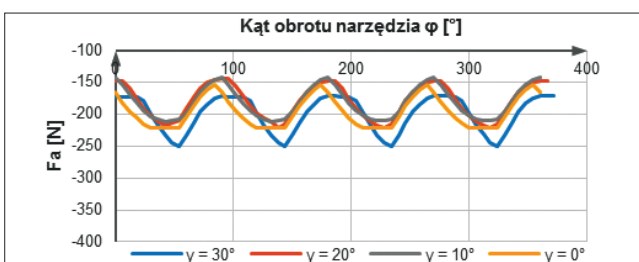
Rys. 11. Składowa promieniowa siły skrawania F_r w funkcji kąta obrotu narzędzia dla kąta prowadzenia $\alpha = -3^\circ$



Rys. 12. Składowa osiowa siły skrawania F_a w funkcji kąta obrotu narzędzia dla kąta prowadzenia $\alpha = +3^\circ$



Rys. 13. Składowa osiowa siły skrawania F_a w funkcji kąta obrotu narzędzia dla kąta prowadzenia $\alpha = 0^\circ$



Rys. 14. Składowa osiowa siły skrawania F_a w funkcji kąta obrotu narzędzia dla kąta prowadzenia $\alpha = -3^\circ$

W przypadku zastosowania zerowego kąta prowadzenia α wartości składowych siły skrawania zwiększały się wraz ze wzrostem wartości kąta skrzywienia powierzchni γ . Maksymalne wartości składowych sił osiągnięto dla $\gamma = 30^\circ$. W odniesieniu do wartości uzyskanych przy $\gamma = 0^\circ$ przyrost ten dochodził do 40%.

W przypadku kąta prowadzenia $\alpha = 3^\circ$ wartości składowych siły skrawania również zwiększały się wraz ze wzrostem wartości kąta skrzywienia powierzchni γ . Analogicznie jak przy kącie $\alpha = 0^\circ$, maksymalną wartość otrzymano dla $\gamma = 30^\circ$. W stosunku do wartości odnotowanych przy $\gamma = 0^\circ$ przyrost wynosił nawet do 70%.

Zastosowanie kąta prowadzenia $\alpha = -3^\circ$ w odniesieniu do wartości składowych siły skrawania dla $\gamma = 0^\circ$ spowodowało:

- dla $\gamma = 30^\circ$ – niewielki wzrost wartości F_t , F_r , F_a (rzędu 10%),
- dla $\gamma = 20^\circ$ – utrzymanie wartości F_t , F_r , F_a na porównywalnym poziomie,
- dla $\gamma = 10^\circ$ – nieznaczny spadek wartości F_t , F_r , F_a (rzędu 5%).

Podsumowanie

Na podstawie badań symulacyjnych można stwierdzić, że w procesie pięcioosiowego frezowania obwodowego wartości kąta prowadzenia frezu α oraz kąta skrzywienia powierzchni prostokreślnej γ mają istotny wpływ na wartości składowych siły skrawania.

Zastosowanie zerowego lub dodatniego kąta prowadzenia α skutkowało powstawaniem podcięć w obrabianej powierzchni. W konsekwencji doprowadziło to do zwiększenia pola przekroju warstwy skrawanej wraz ze wzrostem kąta skrzywienia powierzchni γ , a w rezultacie również do wzrostu wartości składowych siły skrawania F_t , F_r , F_a .

Natomiast zastosowanie ujemnego kąta prowadzenia α spowodowało zmniejszenie pola przekroju warstwy skrawanej, co umożliwiło znaczne zredukowanie różnic w wartościach składowych siły skrawania w rozpatrywanym zakresie kątów γ .

W celu minimalizacji wpływu odkształceń układu OUPN na dokładność obrabianej powierzchni konieczna jest ciągła zmiana kąta prowadzenia α w zależności od zmiany wartości kąta skrzywienia γ powierzchni prostokreślnej.

LITERATURA

1. Altinas Y., Lee P. "Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 36, 9 (1996): s. 1059–1072.
2. Altinas Y., Lee P. "Mechanics and dynamics of ball end milling". *Transaction of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 120 (1998): s. 684–692.
3. Altinas Y., Engin S. "Generalized modeling of milling mechanics and dynamics: part I – helical end mills". *CIRP Annals*. 50 (2001): s. 25–30.
4. Altinas Y., Armarego E.J.A., Budak E. "Prediction of milling force coefficient from orthogonal cutting data". *Transaction of ASME*. 118 (1996): s. 216–224.
5. Artetxe E., Urbikain G., Lamikiz A., López de Lacalle L.N., González R., Rodal P. "A Mechanistic Cutting Force Model for New Barrel End Mills". *Procedia Engineering*. 132 (2015): s. 553–560.
6. Burek J., Żurawski K., Żurek P. „Wpływ kąta prowadzenia frezu na dokładność wymiarowo-kształtową powierzchni prostokreślnej”. *Mechanik*. 87, 8–9 (2014): s. 729.
7. Burek J., Żurawski K., Żurek P. „Wpływ kąta pochylenia freza na dokładność kształtową powierzchni prostokreślnej”. *Mechanik*. 89, 10 (2016): s. 1472–1473.
8. Ferry W. "Virtual five-axis flank milling of jet engine impellers". Vancouver: The University of British Columbia, 2008.
9. Gorka U., Artetxe E., López de Lacalle L.N. "Numerical simulation of milling forces with barrel-shaped tools considering runout and tool inclination angles". *Applied Mathematical Modelling*. 47, (2017): s. 619–636.
10. Waldt N. "NC-Programmierung für das funfachsige Flan-ken-fresen von Feriformflächen". Universität Hannover, 2005.