

Badania symulacyjne siły skrawania w procesie obróbki frezem baryłkowym

Simulation testing of cutting force in the process of barrel milling machining

JAN BUREK
PIOTR ŻUREK
KAROL ŻURAWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.158>

Przedstawiono badania symulacyjne przebiegu siły skrawania w procesie obróbki frezem baryłkowym. Analizy przeprowadzono na modelach powierzchni wklęsłych oraz wypukłych o różnych promieniach krzywizny.

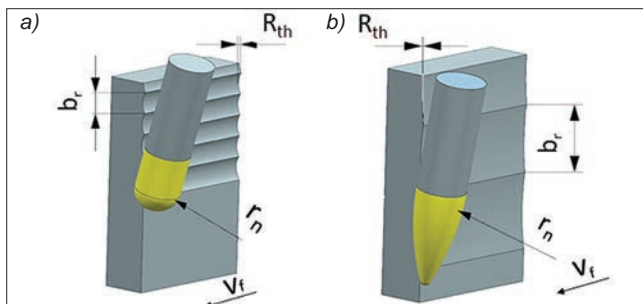
SŁOWA KLUCZOWE obróbka pięcioosiowa, frez baryłkowy, siła skrawania

The paper presents simulation tests of cutting force in the process of barrel milling. The analyzes were carried out on concave and convex surfaces with different radii of curvature.
KEYWORDS: 5-axis milling, barrel mill, cutting force

W praktyce przemysłowej obserwuje się wzrost zastosowania frezowania pięcioosiowego, zwłaszcza podczas produkcji elementów o złożonych kształtach, takich jak wirniki, tarcze łopatkowe oraz matryce. Obróbkę takich części prowadzi się najczęściej w strategii wierszowania frezem kulistym (rys. 1a). Pozwala ona na wykonanie dowolnych kształtów, jednak charakteryzuje się bardzo niską wydajnością. Dlatego poszukuje się nowych konstrukcji frezów, które umożliwią zwiększenie wydajności powierzchniowej obróbki.

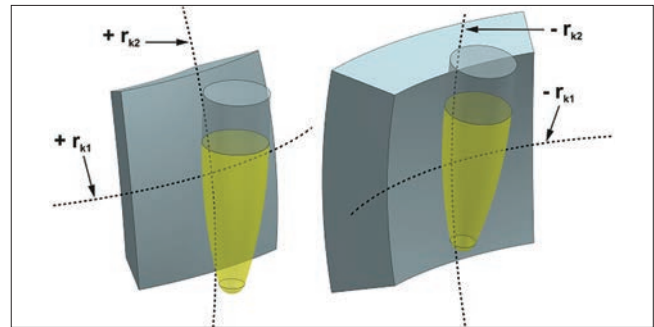
Jedną z takich konstrukcji jest frez baryłkowy o wielokrotnie zwiększonym promieniu zarysu krawędzi skrawającej r_n (rys. 1b). To rozwiązanie przyczynia się do zwiększenia dosuwu osiowego b_r (szerokości ścieżki obróbkowej), a tym samym – wielokrotnego podniesienia wydajności powierzchniowej obróbki. Zmiana dosuwu osiowego skutkuje jednak istotnym zwiększeniem pola przekroju warstwy skrawanej oraz długości czynnej krawędzi skrawającej [1, 5, 6, 8, 10].

Ponadto w przypadku frezu baryłkowego na pole warstwy skrawanej mają wpływ promienie krzywizny powierzchni obrabianej (rys. 2). W zależności od znaku krzywizny („+” wypukła, „-” wklęsła) oraz wartości zmieniają się warunki styku narzędzia z przedmiotem obrabianym [9].



Rys. 1. Obróbka pięcioosiowa: a) frezem kulistym, b) frezem baryłkowym [4]

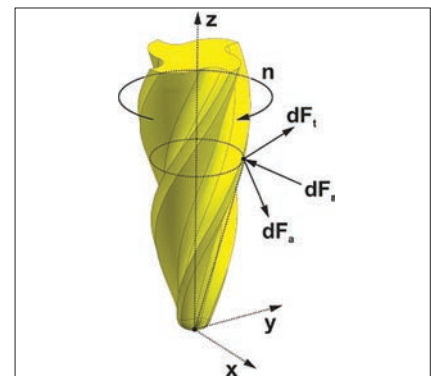
* Dr hab. inż. Jan Burek prof. PRz (jburek@prz.edu.pl), mgr inż. Karol Żurawski (zurawski@prz.edu.pl), mgr inż. Piotr Żurek (p_zurek@prz.edu.pl) – Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji Politechniki Rzeszowskiej



Rys. 2. Promienie krzywizny powierzchni wklęsłej oraz wypukłej [4]

Zmiana tych parametrów bezpośrednio oddziałuje na wielkość oraz przebieg składowych siły skrawania. Siła skrawania powoduje odkształcenia sprężyste układu OUPN i wpływa na błędy kształtu powierzchni przedmiotu obrabianego. Dlatego jej analiza jest niezwykle istotna w procesie obróbki pięcioosiowej frezem baryłkowym, zwłaszcza z uwzględnieniem promienia krzywizny powierzchni obrabianej [9].

Do badań przyjęto model mechanistyczny (1), natomiast do wyznaczania długości krawędzi skrawającej S oraz pola przekroju warstwy skrawanej A posłużyły analizy symulacyjne. Rozkład składowych siły skrawania dla frezu baryłkowego przedstawiono na rys. 3 [1, 7].



Rys. 3. Rozkład sił na frezie baryłkowym [1]

$$\begin{cases} dF_t = K_{te}dS + K_{tc}dA \\ dF_r = K_{re}dS + K_{rc}dA \\ dF_a = K_{ae}dS + K_{ac}dA \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

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

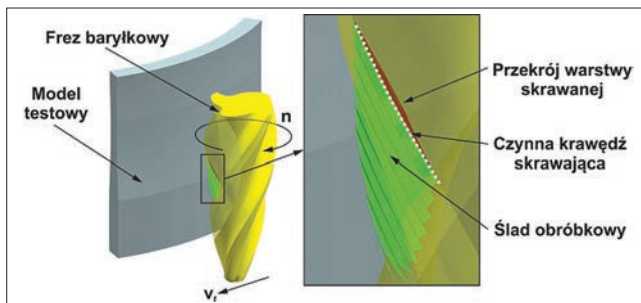
Celem badań było wyznaczenie przebiegów oraz wartości składowych siły skrawania w obróbce powierzchni wklęsłych oraz wypukłych o różnej wartości promienia krzywizny.

Metodyka badań

Wartości składowych siły skrawania były wyznaczone z zastosowaniem operacji boolowskich, przeprowadzanych pomiędzy modelem testowym i modelem narzędzia. Do badań przyjęto model frezu baryłkowego o promieniu zarysu krawędzi skrawającej $r_n = 85$ mm. Posuw na ostrze wynosił $f_z = 0,2$ mm. Modelami testowymi były powierzchnie o różnych promieniach krzywizny (tabl. I).

W pierwszej kolejności przygotowano modele testowe przedmiotu obrabianego w systemie NX 11. Następnie bryły testowe zaimportowano do systemu hyperMill, gdzie z ich użyciem opracowano ścieżki obróbkowe dla każdego modelu oraz wygenerowano kod pośredni.

Kolejnym etapem było zamodelowanie narzędzia, które zostało skopiowane w szyku powstałym w oparciu o wcześniej zaimportowany kod pośredni. Wykonywano 80 kopii na jeden obrót narzędzia. Następnie odejmowano modele narzędzia od modelu przedmiotu. W wyniku tej operacji otrzymywano pole przekroju warstwy skrawanej oraz długość czynnej krawędzi skrawającej (rys. 4). Parametry te (tabl. II) zastosowano we wzorach mechanistycznych, pozwalających wyznaczyć składowe siły skrawania występujące w procesie [2, 4, 11].



Rys. 4. Analiza pola przekroju warstwy skrawanej wyznaczonego operacjami boolowskimi

TABLICA I. Wartości promieni krzywizn modeli testowych

Numer	r_{k1} , mm	r_{k2} , mm
1	25	∞
2	-25	∞
3	50	∞
4	-50	∞
5	∞	300
6	∞	-300
7	∞	∞

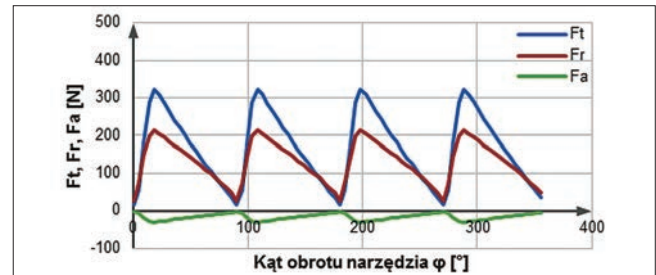
TABLICA II. Parametry przyjęte do analizy

Posuw na ostrze f_z , mm/z	0,2
Średnica narzędzia d , mm	10
Promień zarysu krawędzi skrawającej r_n , mm	85
Dosuw osiowy b_r , mm	4
Materiał	AW 6060
K_{C1} , MPa	1450
K_{C2} , MPa	280
K_{aC} , MPa	-110
K_{te} , N/mm	21,29
K_{re} , N/mm	42,5
K_{se} , N/mm	-3,1

Analiza wyników

Na rys. 5–11 przedstawiono wykresy zależności składowych siły skrawania F_t , F_r , F_a dla różnych wartości promieni krzywizny r_{k1} , r_{k2} w funkcji kąta obrotu narzędzia φ .

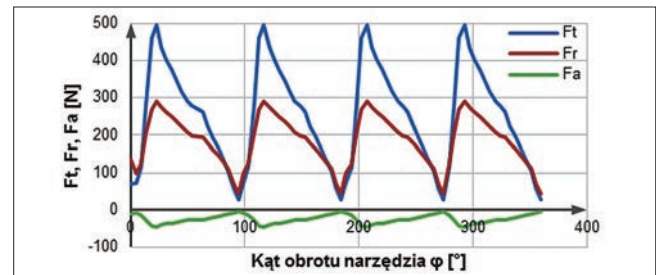
Aby porównać wpływ promieni krzywizny r_{k1} , r_{k2} , najpierw zbadano wartości składowych siły skrawania uzyskane w wyniku symulacji obróbki powierzchni płaskiej (rys. 5).



Rys. 5. Przebieg składowych siły skrawania powierzchni płaskiej

Z przedstawionych przebiegów wynika, że największą wartość uzyskała składowa styczna F_t – ok. 310 N. Wartość składowej promieniowej F_r osiągnęła ok. 210 N, a składowej osiowej F_a – ok. 30 N.

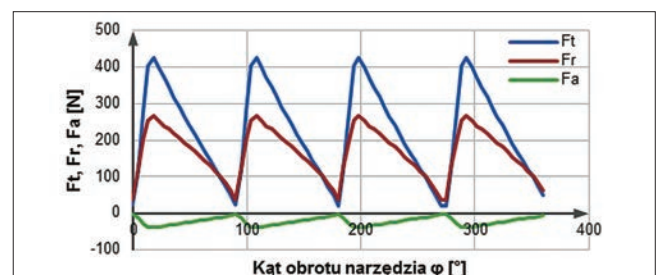
Następnie przeprowadzono badania dla powierzchni wklęsłej o promieniu krzywizny $r_{k1} = -25$ mm (rys. 6).



Rys. 6. Przebieg składowych siły skrawania dla powierzchni wklęsłej o krzywiznie $r_{k1} = -25$ mm

W oparciu o przedstawione przebiegi składowych siły skrawania można stwierdzić, że maksymalna wartość składowej F_t wynosi 500 N. W stosunku do wyników uzyskanych w trakcie obróbki powierzchni płaskiej nastąpił przyrost o ok. 60%. W przypadku składowej F_r maksymalna wartość osiągnęła 290 N, co również stanowi wzrost w stosunku do rezultatów uzyskanych dla obróbki powierzchni płaskiej o ok. 60%. Natomiast wartość składowej F_a wyniosła maksymalnie 45 N, co świadczy o wzroście wartości o ok. 50% w odniesieniu do obróbki powierzchni płaskiej.

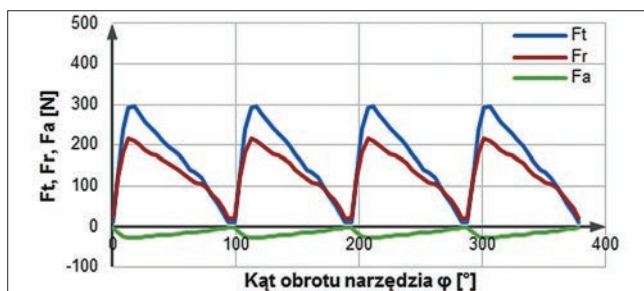
Wyniki badań dla powierzchni wklęsłej o promieniu krzywizny $r_{k1} = -50$ mm pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Przebieg składowych siły skrawania dla powierzchni wklęsłej o krzywiznie $r_{k1} = -50$ mm

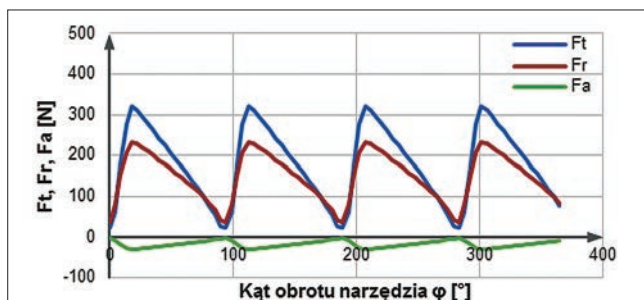
Składowa styczna wynosiła $F_t = 426$ N, co stanowi wartość większą o ok. 38% w odniesieniu do rezultatów uzyskanych dla powierzchni płaskiej. Również składowa promieniowa była większa od wartości dla powierzchni płaskiej o ok. 38% i wynosiła $F_r = 180$ N. Przyrost siły osiowej wyniósł ok. 22%.

W przypadku powierzchni wypukłej o promieniu $r_{k1} = +25$ mm składowa styczna wyniosła $F_t = 292$ N, co jest wartością o ok. 16% mniejszą w stosunku do powierzchni płaskiej (rys. 8). Różnica w składowych promieniowych wyniosła 5%, natomiast składowa osiowa osiągnęła wartość $F_a = 26$ N – o ok. 13% mniej od wyników uzyskanych dla powierzchni płaskiej.



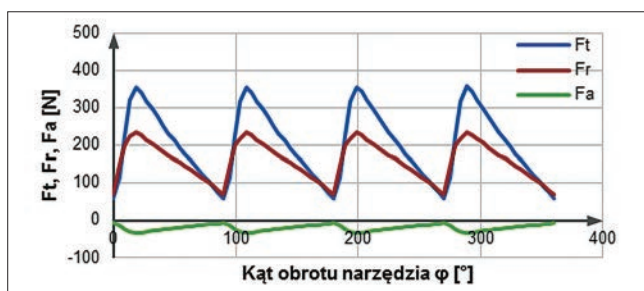
Rys. 8. Przebieg składowych sił skrawania dla powierzchni wypukłej o krzywiznie $r_{k1} = +25$ mm

Wraz ze wzrostem promienia krzywizny r_{k1} do $+50$ mm składowe siły rosną i zbliżają się do wyników otrzymanych dla powierzchni płaskiej (rys. 9).

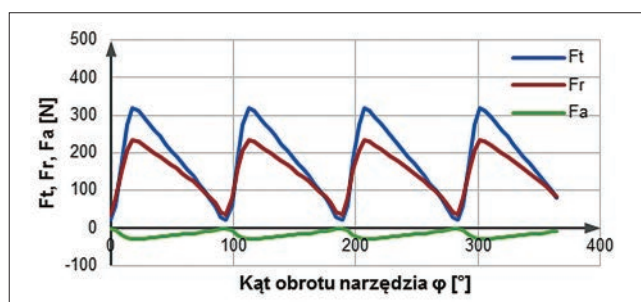


Rys. 9. Przebieg składowych sił skrawania dla powierzchni wypukłej o krzywiznie $r_{k1} = +50$ mm

W przypadku powierzchni o krzywiznie $r_{k2} = -300$ mm (rys. 10) składowa styczna $F_t = 350$ N, czyli o ok. 10% więcej w porównaniu z powierzchnią płaską. Natomiast składowa promieniowa osiągnęła wartość $F_r = 227$ N – o ok. 5% więcej w odniesieniu do obróbki powierzchni płaskiej. Z kolei wartość składowej osiowej F_a wyniosła 32 N. Ważne, że w przypadku obróbki powierzchni wklęsłych zwiększeniu ulegają wartości minimów przebiegów składowych sił skrawania.



Rys. 10. Przebieg składowych sił skrawania dla powierzchni wklęsłej o krzywiznie $r_{k2} = -300$ mm



Rys. 11. Przebieg składowych sił skrawania dla powierzchni wypukłej o krzywiznie $r_{k2} = +300$ mm

Podczas obróbki powierzchni wypukłej o promieniu $r_{k2} = 300$ mm składowe siły skrawania F_t , F_r , F_a nie ulegają znaczącej zmianie (rys. 11). Ponadto z wykresów przebiegu poszczególnych składowych sił skrawania można wywnioskować, że zawsze kontakt z obrabianą powierzchnią mają dwa ostrza jednocześnie.

Podsumowanie

Badania symulacyjne wykazały dużą zmienność sił skrawania dla różnych promieni krzywizny powierzchni obrabianej. Różnice w wartościach składowych sił wynosiły do 60%. Może to skutkować błędami wymiaru oraz kształtu. Stąd wartości promieni krzywizny powierzchni obrabianej powinny być uwzględniane w projektowaniu procesu technologicznego obróbki frezem baryłkowym.

LITERATURA

1. Artetxe E., Urbikai 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.
2. Burek J., Żurek P., Sułkiewicz P., Żurawski K. „Programowanie procesu pięcioosiowej symultanicznej obróbki frezem baryłkowym w programie HyperMILL”. *Mechanik*. 89, 5–6 (2016): s. 470–471.
3. Burek J., Żurek P., Żurawski K. „Porównanie chropowatości powierzchni złożonych po obróbce frezem baryłkowym oraz kulistym”. *Mechanik*. 10 (2016).
4. Burek J., Żyłka Ł., Żurek P., Żurawski K., Sałata M. „Badania symulacyjne warstwy skrawanej frezem baryłkowym”. *Mechanik*. 90, 8–9 (2017): s. 714–716.
5. Chaves-Jacob J., Poulachon G., Duc E. „Optimal strategy finishing impeller blades using 5-axis machining”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 58 (2012): s. 5731–5830.
6. Ehsan Layegh K., Lazoglu K., Ismail K. „A new identification method of specific cutting coefficients for ball end milling”. *Procedia CIRP*. 14 (2014): s. 182–187.
7. Gorka U., Artetxe E., López de Lacalle, Norberto Lopez de Lacalle L. „Numerical simulation of milling forces with barrel-shaped tools considering runout and tool inclination”. *Applied Mathematical Modelling*. 47 (2017): s. 619–636.
8. Li T., Chen W., Xu R., Wang D. „Flank milling for blisk with a barrel ball milling cutter”. *Key Engineering Materials*. 407–408 (2009): s. 202–206.
9. Tasy D.M., Her M.J., „Accurate 5-axis machining of twisted ruled surfaces”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 123, 4 (2001): s. 731–738.
10. Wang D., Chen W., Li T., Xu R. „Five-axis flank milling of sculptured surface with barrel cutters”. *Key Engineering Materials*. 407–408 (2009): s. 292–297.
11. Yang Y., Wan M., Zhang W., Ma Y. „Extraction of cutter-workpiece engagement for multi-axis milling”. *Materials Science Forum*. 770 (2014): s. 357–360.